別　添　２－１

柏崎刈羽原子力発電所６号及び７号炉

竜巻影響評価について

目次

別添２－1
1．竜巻に対する防護
1.1．概要
1.2．竜巻影響評価の対象施設
1.3．評価の基本的な考え方
2．基準竜巻・設計竜巻の設定
2.1．概要
2.2．竜巻検討地域の設定
2.3．基準竜巻の最大風速（V_B）の設定
2.4．設計竜巻の最大風速（V_D）の設定
2.5．設計竜巻の特性値
3．竜巻影響評価
3.1．評価概要
3.2．評価対象施設
3.3．設計荷重の設定
3.4．評価対象施設等の設計方針
3.5．竜巻随伴事象に対する評価

添付資料
1.1．重大事故等対処施設に対する考慮について
1.2．外部事象防護対象施設及び評価対象施設の抽出について
1.3．耐震Ｓクラス設備について
1.4．外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出について
2.1．数値気象解析に基づく竜巻検討地域の設定について
2.2．竜巻検討地域において発生した竜巻
2.3．竜巻最大風速のハザード曲線の求め方
2.4．地形効果による竜巻風速への影響について
2.5．設計竜巻の特性値の設定
3.1．竜巻影響評価の概要及び保守性について
3.2．竜巻影響評価及び竜巻対策の概要
3.3．設計飛来物の選定について
3.4．竜巻随伴事象の抽出について

1.　竜巻に対する防護

1.1. 概要

原子力規制委員会の定める「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置，構造及び設備の基準に関する規則（以下「設置許可基準規則」という。）」第6条において，外部からの衝撃による損傷の防止として，安全施設は，想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならないとしており，敷地周辺の自然環境をもとに想定される自然現象の一つとして，竜巻の影響を挙げている。

発電用原子炉施設の供用期間中に極めてまれに突風・強風を引き起こす自然現象としての竜巻及びその随伴事象等によって発電用原子炉施設の安全性を損なわない設計であることを評価・確認するために原子力規制委員会の定める「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（平成25年6月19日原規技発13061911号　原子力規制委員会決定）」（以下「ガイド」という。）を参照し，竜巻影響評価として以下を実施し，発電用原子炉施設の安全機能が維持されることを確認する。

・設計竜巻及び設計荷重（設計竜巻荷重及びその他の組み合わせ荷重）の設定
・柏崎刈羽原子力発電所における飛来物に係る調査
・飛来物防止対策
・考慮すべき設計荷重に対する外部事象防護対象施設の構造健全性等の評価を行い，必要に応じ対策を行うことで安全機能が維持されることの確認

また，第 43 条の要求を踏まえ，設計竜巻によって，設計基準対象施設の安全機能と重大事故等対処設備の機能が同時に損なわれることがないことを確認するとともに，重大事故等対処設備の機能が喪失した場合においても，位置的分散又は頑健性のある外殻となる建屋による防護に期待できる代替手段等により必要な安全機能を維持できることを確認する。【添付資料 1.1】

1.2. 竜巻影響評価の対象施設

竜巻影響評価の対象施設としては，以下の「(1) 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設」及び「(2) 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設」に示す施設を竜巻影響評価の対象施設とする。

また，竜巻に対する防護設計を行う，外部事象防護対象施設のうち評価対象施設，外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設を「評価対象施設等」という。

(1) 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設【添付資料 1.2】

設置許可基準規則第 6 条における安全施設とは，「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」で規定されているクラス 1，クラス 2 及びクラス 3 に属する構築物，系統及び機器（以下「安全重要度分類のクラス 1，クラス 2 及びクラス 3 に属する構築物，系統及び機器」という。）を指していることか

ら，竜巻によってその安全機能が損なわれないことを確認する必要がある施設は，安全重要度分類のクラス 1，クラス 2 及びクラス 3 に属する構築物，系統及び機器とする。

また，以下の点を踏まえ，竜巻によってその安全機能が損なわれないことを確認する必要がある施設のうち，外部事象防護対象施設は，外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器（発電用原子炉を停止するため，また，停止状態にある場合は引き続きその状態を維持するために必要な異常の発生防止の機能，又は異常の影響緩和の機能を有する構築物，系統及び機器，並びに，使用済燃料プールの冷却機能及び給水機能を維持するために必要な異常の発生防止の機能，又は異常の影響緩和の機能を有する構築物，系統及び機器として安全重要度分類のクラス 1，クラス 2 及び安全評価上その機能に期待するクラス 3 に属する構築物，系統及び機器）に加え，それらを内包する建屋とする。

- 竜巻襲来後に設備等の損壊状況を踏まえ，必要に応じプラント停止の措置をとること
- プラント停止後は，その状態を維持することが重要であること

その上で，本評価における評価対象施設は，外部事象防護対象施設のうち，屋内設備は内包する建屋により防護する設計とすることから，屋外設備（建屋含む），外気との接続がある設備及び外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備に分類し，抽出した。また，外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備については，建屋，構築物の構造健全性維持可否の観点，設計飛来物の衝突による開口部の開放又は開口部建具の貫通の観点から，設備を抽出する。

なお，上記に含まれない構築物，系統及び機器は，竜巻及びその随伴事象により損傷した場合であっても，代替手段があること等により安全機能を損なわないことから評価完了とする。

図 1.2.1 に外部事象防護対象施設のうち評価対象施設の抽出フローを，図 1.2.2 に評価対象施設を示す。

また，上記の抽出に加え，「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震 S クラスの設計を要求される設備（系統，機器）及び建屋・構築物のうち，竜巻の影響を受ける可能性がある設備を抽出し，追加で評価対象施設に反映する施設がないことを確認した。【添付資料 1.3】

（屋外設備）

・軽油タンク
・非常用ディーゼル発電機燃料移送系
・原子炉建屋
・タービン建屋 海水熱交換器区域
・コントロール建屋

・廃棄物処理建屋

（外気との接続がある設備）
・非常用ディーゼル発電機吸気系
・非常用換気空調系（非常用ディーゼル発電機電気品区域換気空調系（非常用ディーゼル発電機非常用送風機含む），中央制御室換気空調系，コントロール建屋計測制御電源盤区域換気空調系，海水熱交換器区域換気空調系）

（外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備）
・原子炉建屋 1 階 非常用ディーゼル発電機室設置設備（非常用ディーゼル発電機，非常用ディーゼル発電機ディーゼル機関，非常用ディーゼル発電機始動用空気系，非常用ディーゼル発電機冷却水系）
・原子炉建屋 4 階設置設備（使用済燃料プール（使用済燃料貯蔵ラックを含む），燃料プール注入ライン逆止弁）
・タービン建屋 海水熱交換器区域 1 階 非常用電気品室（A）設置設備（パワーセンタ，モータコンロールセンタ）
・タービン建屋 海水熱交換器区域 1 階 階段室設置設備（原子炉補機冷却系配管，原子炉補機冷却海水系配管）等

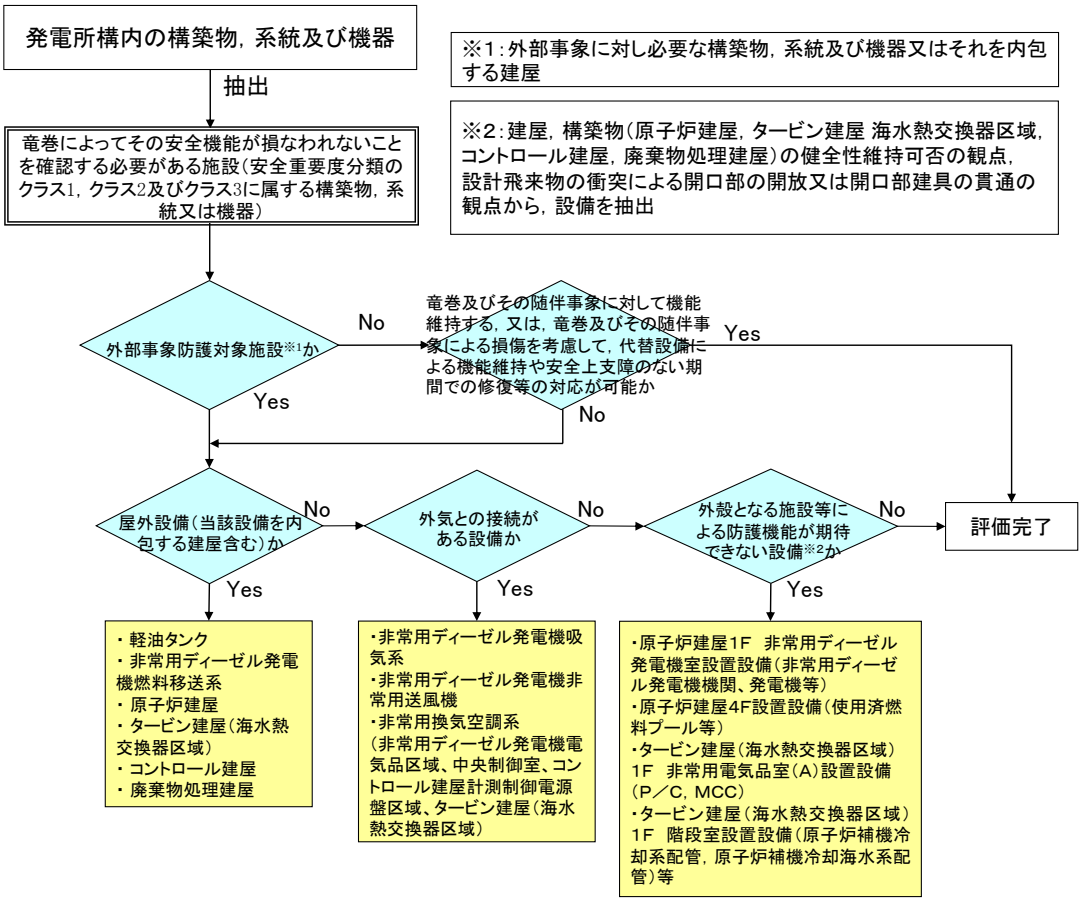


図 1.2.1 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設の抽出フロー

防護上の観点又は機密に係わる事項を含む為，公開できません

図 1.2.2　外部事象防護対象施設のうち評価対象施設

(2) 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設【添付資料 1.4】

外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設としては，当該施設の破損等により外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼして安全機能を喪失させる可能性がある施設，又はその施設の特定の区画とする。

外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設としては，発電所構内の構築物，系統及び機器（安全重要度分類のクラス 1，クラス 2，クラス 3 及びノンクラス）の中から，以下の①，②及び③に示す施設を抽出する。

図 1.2.3 に外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出フローを，図 1.2.4 に評価対象施設を示す。

① 機械的影響の観点での抽出

発電所構内の構築物，系統及び機器のうち，倒壊により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性がある施設として，以下を抽出し，評価する。

・主排気筒（6 号及び 7 号炉への影響）
・5 号炉主排気筒（6 号炉への影響）
・5 号炉タービン建屋（6 号炉への影響）
・サービス建屋（6 号及び 7 号炉への影響）
・原子炉建屋天井クレーン（自号炉への影響）
・燃料交換機（自号炉への影響）

② 機能的影響の観点での抽出

発電所構内の構築物，系統及び機器のうち，屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備として，以下を抽出し，評価を実施する。

・非常用ディーゼル発電機排気管
・非常用ディーゼル発電機排気消音器
・ミスト管（燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電機機関本体，潤滑油補給タンク，燃料ドレンタンク）

③ 二次的影響の観点での抽出

発電所構内の構築物，系統及び機器のうち，二次的影響の観点から，竜巻随伴事象の影響により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性がある施設として，以下を抽出し，評価を実施する。

・溢水により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性のある設備（純水タンク，ろ過水タンク，NSD 収集タンク）
・火災発生により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性がある設備（変圧器，5 号炉軽油タンク，第一ガスタービン発電機用燃料タンク）
・外部電源

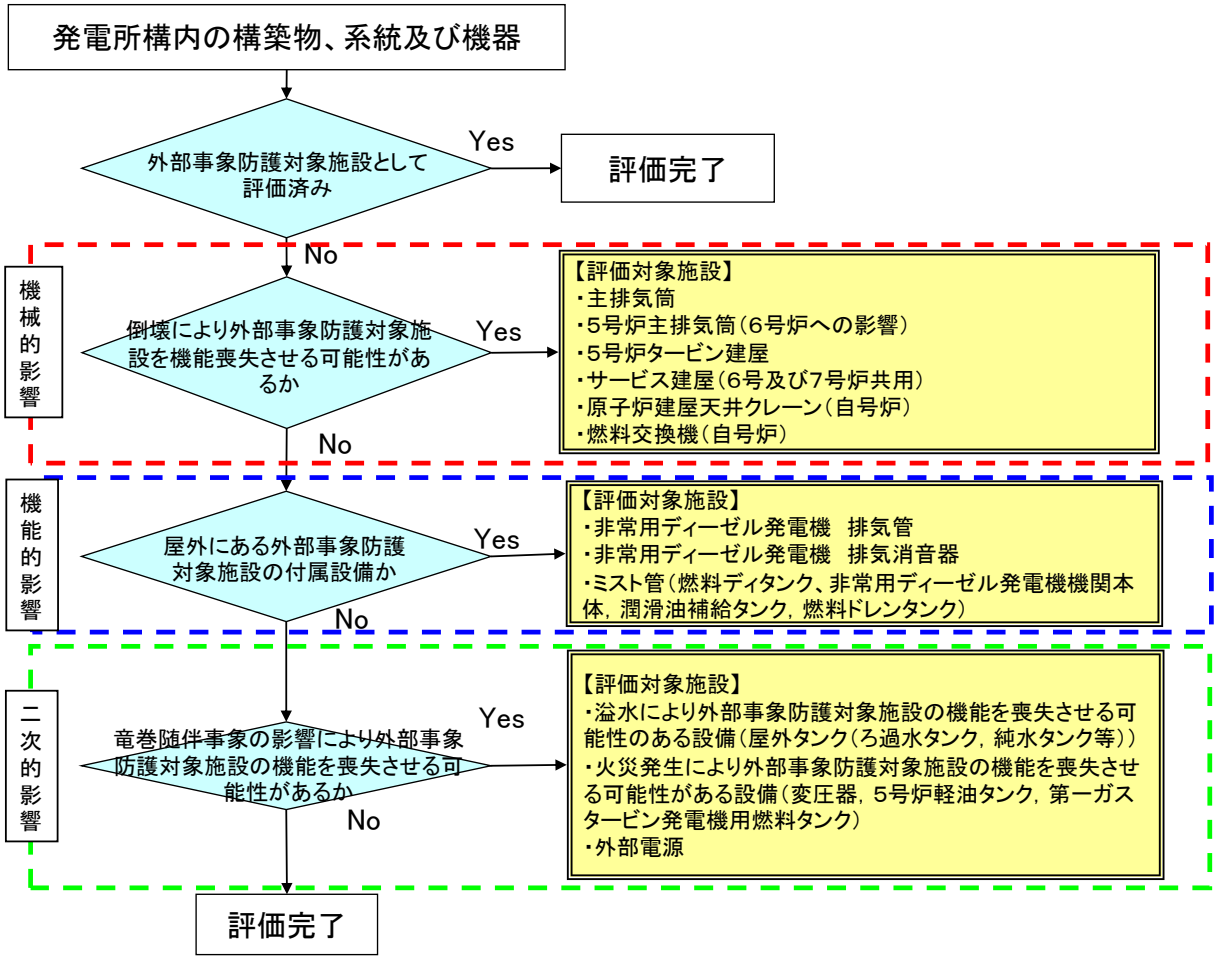


図 1.2.3　外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出フロー

防護上の観点又は機密に係わる事項を含む為，公開できません

図 1.2.4　外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設

1.3. 評価の基本的な考え方

1.3.1. 評価の基本フロー

ガイドに基づき基準竜巻，設計竜巻及び設計荷重を適切に設定するとともに，考慮すべき設計荷重に対して，抽出した評価対象施設等の構造健全性評価を行い，必要に応じて対策を行うことで安全機能が維持されていることの確認を行う。図1.3.1.1に竜巻影響評価の基本フローを示す。

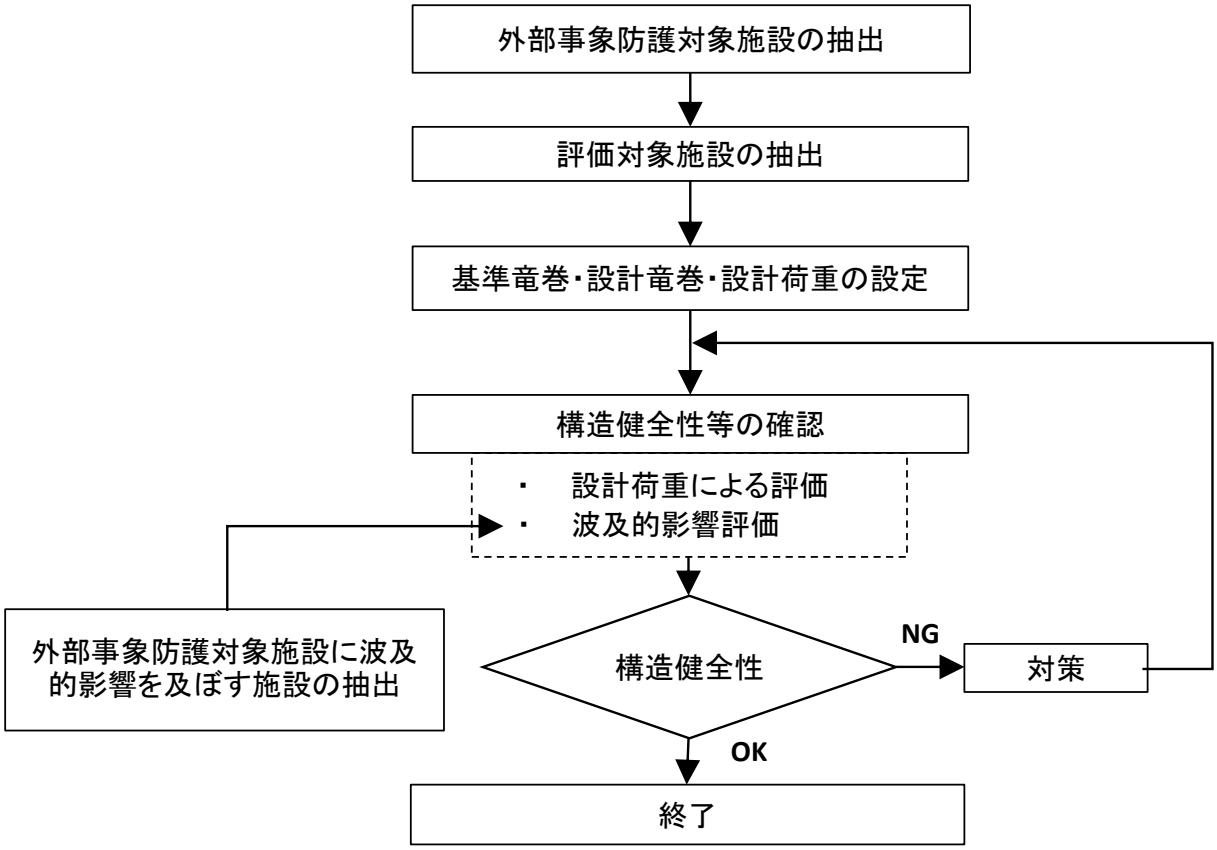


図 1.3.1.1　竜巻影響評価の基本フロー

1.3.2. 評価対象施設等に作用する荷重

以下に示す設計荷重を適切に設定する。

(1) 設計竜巻荷重

設計竜巻荷重を以下に示す。

①風圧力

設計竜巻の最大風速による風圧力

②気圧差による圧力

設計竜巻における気圧低下によって生じる評価対象施設等の内外の気圧差による圧力

③飛来物の衝撃荷重

設計竜巻によって評価対象施設等に衝突し得る飛来物（以下「設計飛来物」という。）が評価対象施設等に衝突する際の衝撃荷重

(2) 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重

設計竜巻荷重と組み合わせる荷重を以下に示す。

①評価対象施設等に常時作用する荷重，運転時荷重等

②竜巻以外の自然現象による荷重，設計基準事故時荷重等

なお，上記(2)の②の荷重については，竜巻以外の自然現象及び事故の発生頻度等を参照して，上記(2)の①の荷重と組み合わせることの適切性や設定する荷重の大きさ等を判断する。

具体的な荷重については，「3.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定」に示す。

1.3.3. 施設の安全性の確認方針

設計竜巻荷重及びその他組み合わせ荷重（常時作用している荷重，竜巻以外の自然現象による荷重，設計基準事故時荷重等）を適切に組み合わせた設計荷重に対して，評価対象施設，あるいはその特定の区画の構造健全性等の評価を行い，必要に応じて対策を行うことで安全機能が維持されることを確認する。

2.　基準竜巻・設計竜巻の設定

2.1. 概要

基準竜巻及び設計竜巻の設定は，図2.1.1に示すとおり竜巻検討地域の設定，基準竜巻の最大風速の設定及び設計竜巻の最大風速の設定の流れで実施する。

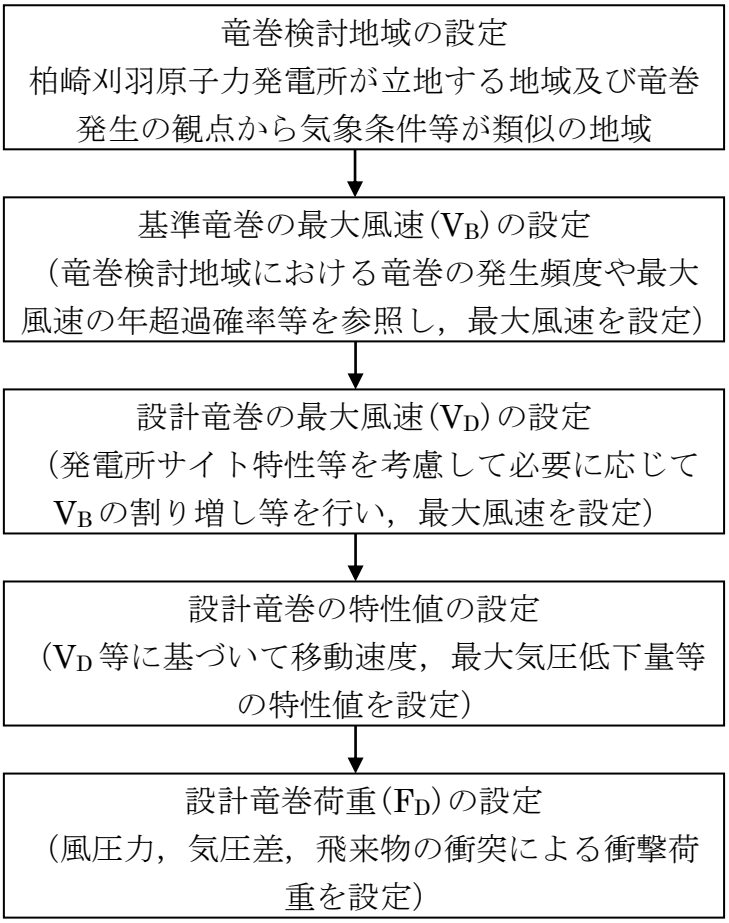


図2.1.1　基準竜巻・設計竜巻の設定に係る基本フロー

2.2. 竜巻検討地域の設定

柏崎刈羽原子力発電所に対する竜巻検討地域について，ガイドを参考に，柏崎刈羽原子力発電所が立地する地域と気象条件の類似性の観点で検討を行い，図 2.2.1 に示すとおり北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸の海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km の範囲を竜巻検討地域に設定した（面積約 33,395km^2）。以下にその妥当性確認の結果を示す。

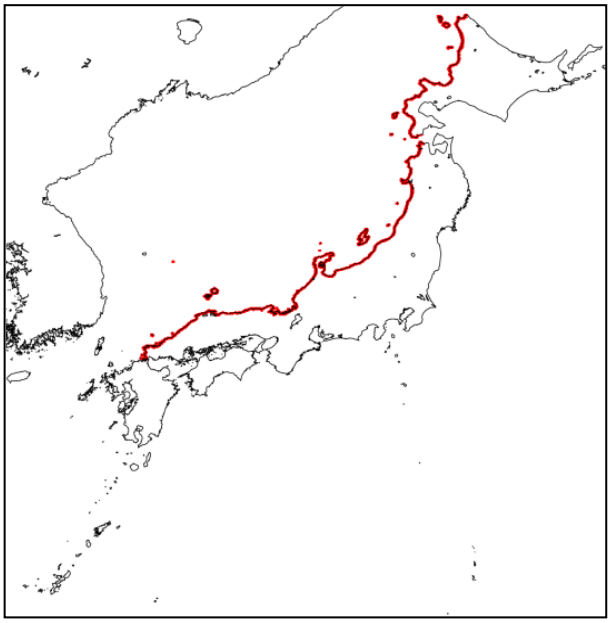


図2.2.1　竜巻検討地域（赤線部）

2.2.1. 竜巻検討地域の妥当性確認

竜巻検討地域の妥当性について，以下の観点から確認を実施した。

(1) 総観場の分析に基づく地域特性の確認
(2) 過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の確認
(3) 突風関連指数に基づく地域特性の確認

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」の考え方に基づき，竜巻発生要因となる気象条件（総観場）を確認する観点から，(1),(2)の分析により地域特性を確認し，竜巻検討地域を設定した。

また，一般的に大気現象は時空間スケールの階層構造が見られ，ある大気現象はスケールの小さな現象を内包しているため，大きな竜巻の発生要因となる環境場の形成のし易さを把握する観点から，(3)の分析により竜巻の発生スケールに近いメソスケールの気象場が有する地域性と齟齬がないことについても確認した。竜巻とその関連気象の時空間スケールを図 2.2.1.1 に，検討の流れを示したフローを図 2.2.1.2 に示す。

なお，(3)の突風関連指数を用いた分析は，“大きな竜巻の発生に対する大気場の必要条件”を把握する上で有効であることを踏まえ，(3)の分析結果のみで竜巻検討地域

を設定するのではなく，(1)，(2)の分析により設定した竜巻検討地域の妥当性を確認するために用いている。

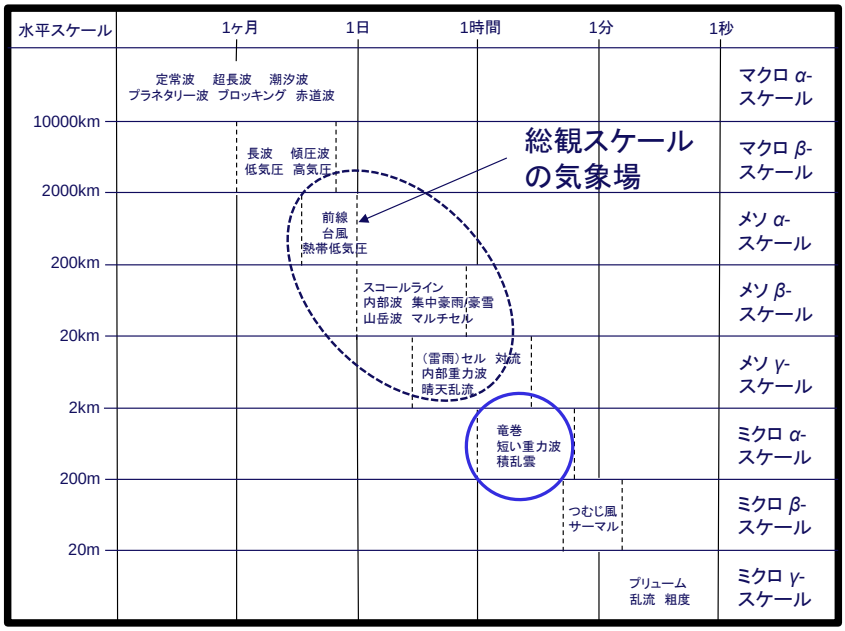


図 2.2.1.1 竜巻とその関連気象の時空間スケール

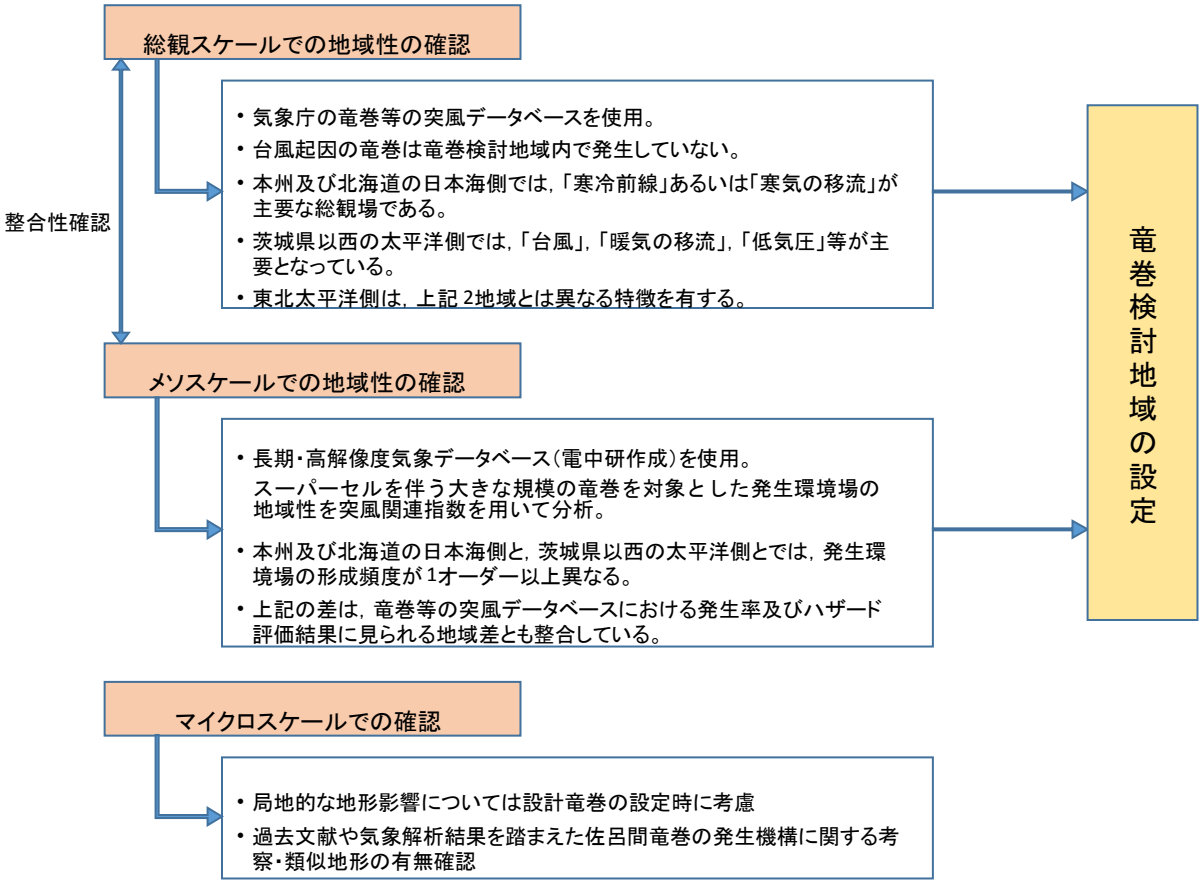


図 2.2.1.2 竜巻検討地域の検討フロー

2.2.2. 総観場の分析に基づく地域特性の確認

気象庁竜巻等の突風データベース※では，竜巻を発生させた総観場を約 40 種に分類しているが，「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」を参考に，竜巻を発生させる親雲の発生要因を考慮して 7 種に再編し，発生分布の特徴を分析した。表 2.2.2.1 に総観場の分類法と発生分布の特徴を示す。また，図 2.2.2.1 に総観場ごとの竜巻発生地点の分布，図 2.2.2.2 に F2 以上の竜巻発生箇所を示す。

分析の結果，竜巻発生要因となる気象条件の観点で，以下のような地域特性があることを確認した。

① 太平洋側では台風起因の大きな竜巻が多く発生しているのに対し，九州を除く日本海側地域や北海道では発生していない。（図 2.2.2.1（a））

また，台風は北上するにつれて衰弱しやすい特性を有していることから，仮に台風起因の竜巻の発生した場合も，規模の大きな竜巻の発生可能性は低いと考えられる。

② 温帯低気圧や季節風(夏)起因の竜巻は全国で発生しているが，規模的には太平洋側で F3 が発生しているのに対し，日本海側では F2 が最大となっている。（図 2.2.2.1(b)，(c)）

③ 季節風(冬)起因の竜巻は，九州を除く日本海側地域に多く発生している。規模的には，東北地方の日本海側及び北陸地方では F2 竜巻が 1 件発生しているのみで，F3 竜巻は発生していない。（図 2.2.2.1（d））

図 2.2.2.3 にも示すとおり，日本海側と太平洋側では竜巻発生要因となる気象条件（総観場）が大きく異なっており，竜巻検討地域を日本海側とすることの妥当性が確認できた。

※：気象庁 竜巻等の突風データベース（http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html ）

表 2.2.2.1 総観場の分類法

総観場	気象庁 DB の分類	特徴
台風	台風	台風を取り巻く雲が竜巻を発生させる。関東以西の太平洋側で発生頻度が高く,F3 竜巻も多くみられる。
温帯低気圧	南岸低気圧，日本海低気圧，二つ玉低気圧，東シナ海低気圧，オホーツク海低気圧，その他（低気圧），寒冷前線，温暖前線，閉塞前線	寒気と暖気が接し傾圧不安定による組織的な雲が形成する環境場。主に南からの下層の暖湿流が親雲の発達に重要な働きをするため,暖湿流が山岳等で遮られない関東以西の太平洋側で発生頻度が高く，F3 竜巻も見られる。 日本海側での頻度は比較的低め。
季節風（夏）	暖気の移流，熱帯低気圧，湿舌，太平洋高気圧	暖湿流が主要因で親雲を形成する環境場。関東以西の太平洋側や内陸で多く確認されている。
季節風（冬）	寒気の移流，気圧の谷，大陸高気圧，季節風	大気上層に寒気が流入することで大気が不安定になり,竜巻の親雲が形成する環境場。寒気は北～西から移流することが多いため,日本海側や関東以北で発生頻度が高い。
停滞前線	停滞前線，梅雨前線，前線帯，不安定線，その他（前線）	南からの暖湿流により親雲が形成されやすく,関東以西の太平洋側や内陸で発生頻度が高い。
局地性	局地性擾乱，雷雨（熱雷），雷雨（熱雷を除く），地形効果，局地性降水	局地的な循環により親雲が形成する環境場。内陸で発生頻度が高い。
その他	移動性高気圧，中緯度高気圧，オホーツク海高気圧,帯状高気圧,その他(高気圧)，大循環異常，その他	上記に当てはまらない環境場。全体的に個数は少ない。

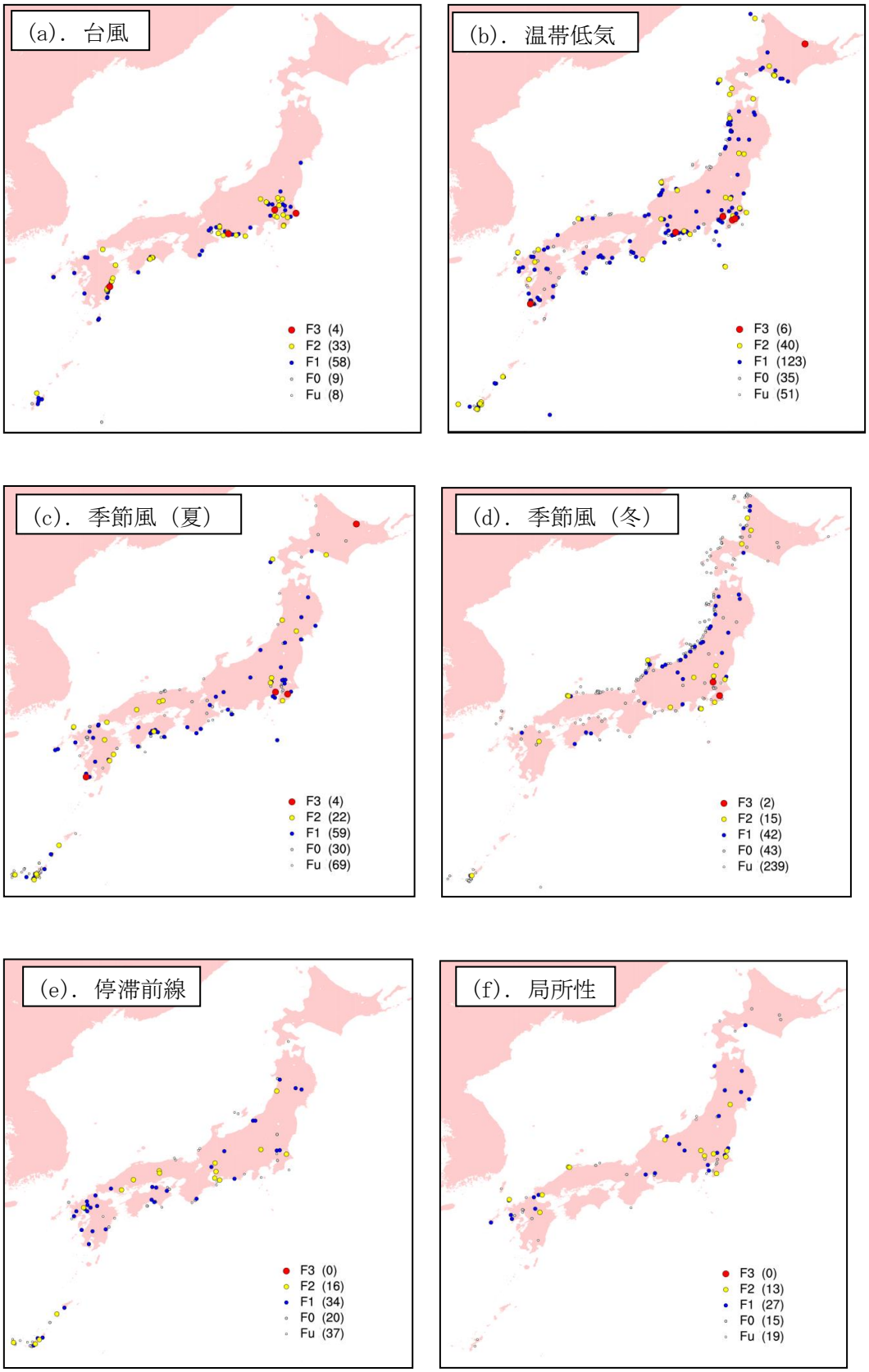


図 2.2.2.1　総観場ごとの竜巻発生地点の分布(1961 年～2012 年)

(気象庁竜巻等の突風データベースのデータをもとに作成)

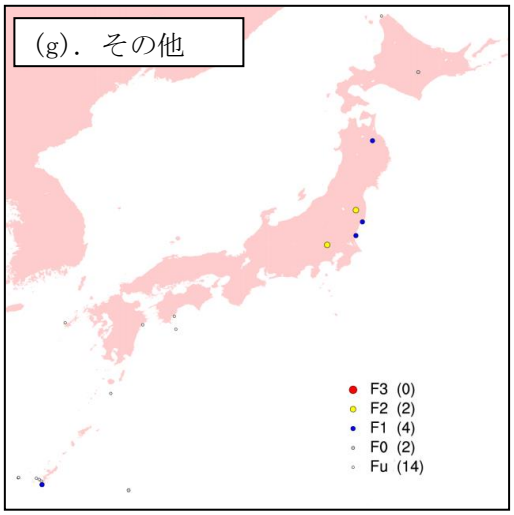


図 2.2.2.1(続き)　総観場ごとのスケール別竜巻発生地点の分布（1961 年～2012 年）
（気象庁竜巻等の突風データベースのデータをもとに作成）

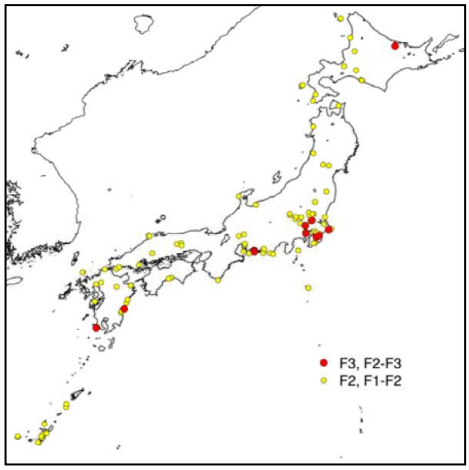
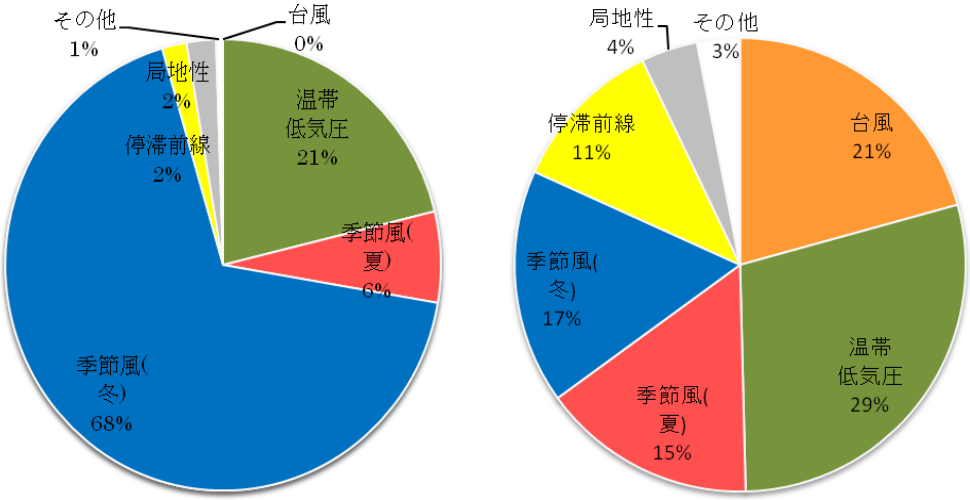


図 2.2.2.2　F2 以上の竜巻発生箇所
（気象庁竜巻等の突風データベースのデータをもとに作成）



竜巻検討地域（日本海沿岸）　　太平洋側地域

図 2.2.2.3 竜巻の総観場の特徴の比較

2.2.3. 過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の確認

日本で竜巻が集中する地域については，独立行政法人原子力安全基盤機構の「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」に，全国 19 個の竜巻集中地域が示されている。

図 2.2.3.1 に示すとおり，柏崎刈羽原子力発電所は，竜巻集中地域④（新潟県・富山県）に立地している。したがって，基本的な考え方としては柏崎刈羽原子力発電所における竜巻検討地域は，この竜巻集中地域④とすることが考えられる。

ただし，気象庁竜巻等の突風データベースによると，1961 年 1 月から 2012 年 6 月の 51.5 年間に発生が確認された竜巻の個数は竜巻集中地域④で 45 事例であり，この期間に④で観測されているもっとも強い竜巻は F1 となる。（表 2.2.3.1）

竜巻発生の影響評価の観点からすると，データ数は多い方がよく，また竜巻集中地域④以外の日本海沿岸では F2 規模の竜巻も発生しているため，竜巻検討地域として北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸を設定し，その妥当性を検討する。

なお，設定した竜巻検討地域の竜巻個数は 192 個，観測されたもっとも強い竜巻は F2 となる。表 2.2.3.2 に竜巻検討地域内での F1 を超える竜巻の観測記録を示す。

竜巻検討地域と竜巻集中地域④の F1 以上の竜巻発生確率は，2.9×10^{-5}，2.5×10^{-5}（個/年/km^2）であることから，竜巻検討地域は単位面積あたりの竜巻発生数が大きくなるよう，かつ藤田スケール（以下「F スケール」という。）が大きな竜巻が含まれるような設定となっている。

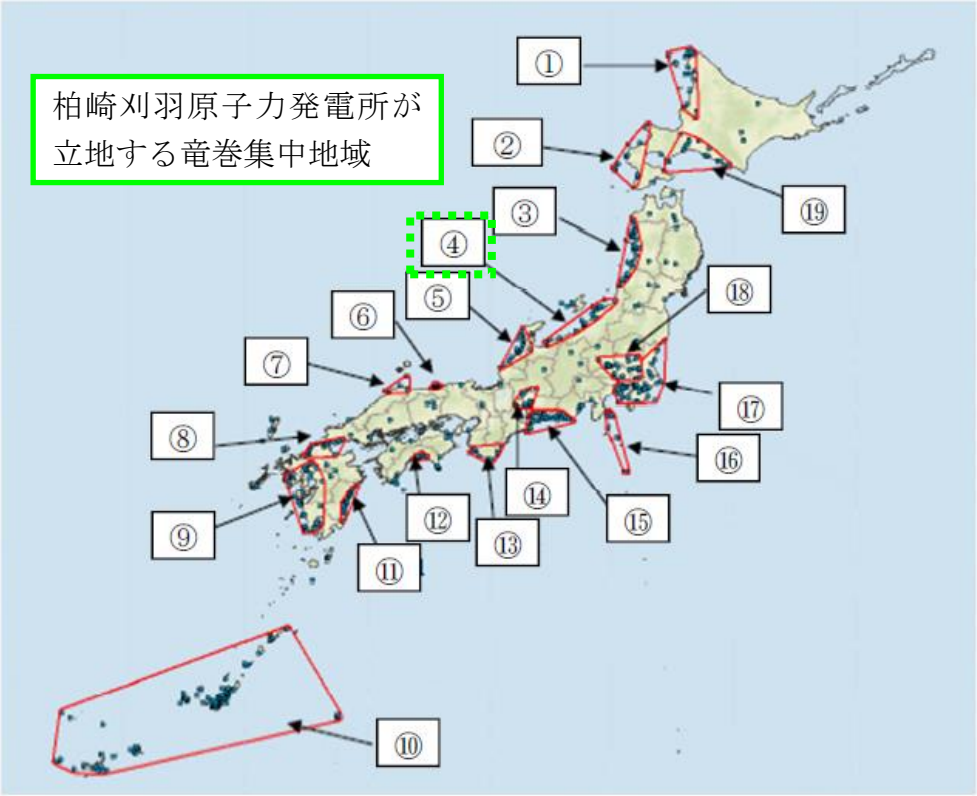
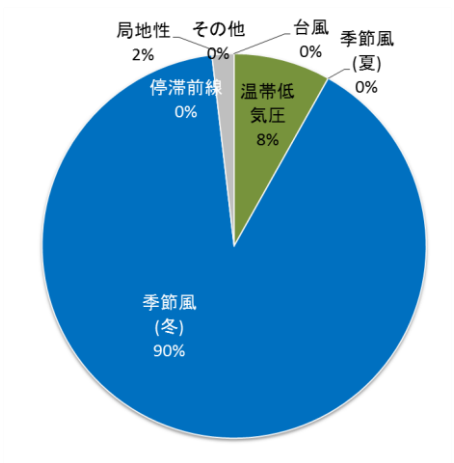


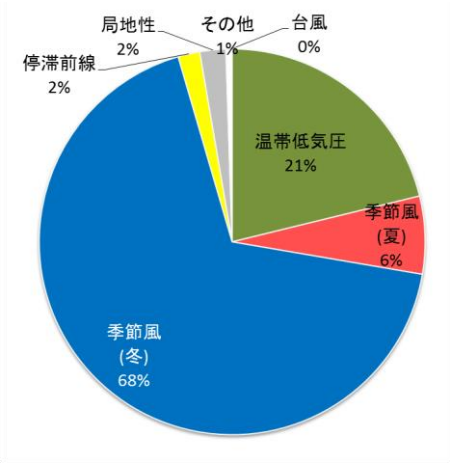
図 2.2.3.1　竜巻の発生する地点と竜巻が集中する 19 個の地域
（JNES「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」より引用）

竜巻の地域特性を検討するため，竜巻集中地域④と竜巻検討地域，及び竜巻集中地域④に隣接する竜巻集中地域③（青森県日本海側～山形県）と⑤（石川県西部～福井県北西部）における総観場の比較を行った。

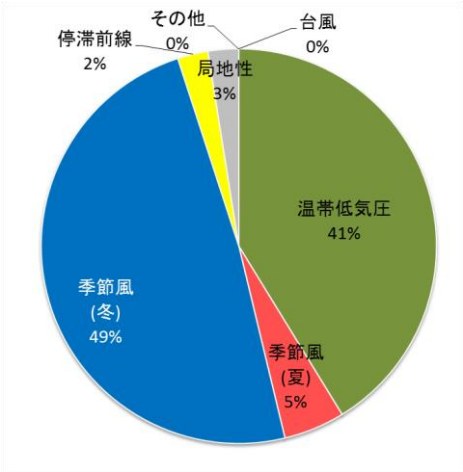
図 2.2.3.2 に各地域の竜巻発生要因に関する総観場の特徴を示す。また，表 2.2.3.1 に総観場の特徴を示す。



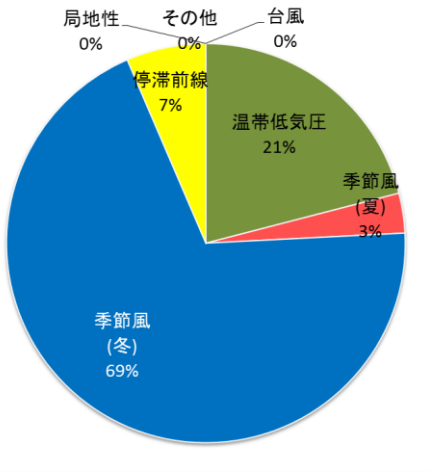
竜巻集中地域④（新潟県・富山県）



竜巻検討地域（日本海沿岸）



竜巻集中地域③
（青森県日本海側～山形県）



竜巻集中地域⑤
（石川県西部～福井県北西部）

図 2.2.3.2　各地域の竜巻発生要因に関する総観場の特徴

竜巻集中地域④で発生した竜巻の総観場は，″季節風（冬）″が 90%，″温帯低気圧″が 8%を占める。竜巻検討地域では，竜巻集中地域と同様に″季節風（冬）″と″温帯低気圧″の比率が高い。これらの地域では，寒気にともなって発生した親雲に起因した竜巻が多いと推測できる。また，両地域とも，太平洋側で多くみられる台風起源の竜巻は今のところ確認されていない。

また，竜巻集中地域④に隣接する竜巻集中地域③と⑤については，温帯低気圧の割合は竜巻検討地域④よりもやや高いものの，やはりどちらの地域も″季節風（冬）″と″温帯低気圧″が竜巻発生の主要因となっている。

以上の分析結果より，北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸を竜巻検討地域に設定することは竜巻集中地域における地域特性の観点からも妥当であると考えられる。

表 2.2.3.1 F スケールごとの総観場のまとめ

		個数	総観場 1 位（比率%）	総観場 2 位（比率%）	総観場 3 位（比率%）	主移動方向（比率%）
集中地域④	全体	45	季節風（冬）90%	温帯低気圧 8%	局地性 2%	東 32%
	F1	7	季節風（冬）88%	局地性 7%	温帯低気圧 5%	東北東 43%
	F0	7	季節風（冬） 86%	温帯低気圧 14%		東，東北東 33%
	F 不明	31	季節風（冬） 91%	温帯低気圧 8%	局地性 1%	北東 43%
	F0 以上	14	季節風（冬） 87%	温帯低気圧 9%	局地性 4%	東北東 38%
検討地域	全体	192	季節風（冬） 68%	温帯低気圧 21%	季節風（夏） 6%	東 39%
	F2	10	温帯低気圧 63%	季節風（冬） 23%	局地性 9%	北東 50%
	F1	40	温帯低気圧 51%	季節風（冬） 42%	局地性 6%	東 35%
	F0	24	季節風（冬） 65%	温帯低気圧 27%	停滞前線 4%	東 33%
	F 不明	118	季節風（冬） 81%	季節風（夏） 9%	温帯低気圧 6%	東 46%
	F1 以上	50	温帯低気圧 54%	季節風（冬） 38%	局地性 6%	東 30%
	F0 以上	74	季節風（冬） 47%	温帯低気圧 45%	局地性 5%	東 31%
集中③	全体	40	季節風（冬） 49%	温帯低気圧 41%	季節風（夏） 5%	東 36%
集中⑤	全体	31	季節風（冬） 69%	温帯低気圧 21%	停滞前線 7%	東 55%
太平洋	全体	337	温帯低気圧 29%	台風 21%	季節風（冬） 17%	北東 23%

表2.2.3.2　竜巻検討地域における竜巻の観測記録（F1より大きい竜巻）
（気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成）

現象区別	発生日時	発生場所	Fスケール※	総観場
竜巻	1962/09/28 14:20	北海道宗谷支庁東利尻町	(F2)	寒冷前線
竜巻	1971/10/17 05:00	北海道留萌支庁羽幌町	(F2)	寒気の移流
竜巻	1974/10/03 19:05	北海道檜山支庁奥尻郡奥尻町	(F1～F2)	温暖前線
竜巻	1974/10/20 15:00	北海道檜山支庁檜山郡上ノ国町	(F1～F2)	寒冷前線
竜巻	1975/05/31 18:10	島根県　簸川郡大社町	(F2)	日本海低気圧・局地性じょう乱・寒気の移流
竜巻	1975/09/08 01:30	北海道檜山支庁奥尻郡奥尻町	(F1～F2)	日本海低気圧・暖気の移流
竜巻	1979/11/02 01:58	北海道渡島支庁松前郡松前町	(F2)	日本海低気圧・温暖前線
竜巻	1989/03/16 19:20	島根県　簸川郡大社町	(F2)	局地性じょう乱・寒気の移流
竜巻	1990/04/06 02:55	石川県　羽咋郡富来町	F2	オホーツク海低気圧・気圧の谷
竜巻	1999/11/25 15:40	秋田県 八森町	(F1～F2)	日本海低気圧・寒冷前線

※：Fスケールは，ア）被害の詳細な情報等から推定できたもの，イ）文献等からの引用又は被害のおおまかな情報等から推定したものがあり，F2以上の事例ではア）とイ）を区別し，イ）の場合には値を括弧で囲んでいる。

2.2.4. 突風関連指数による地域特性の確認

総観場での確認に加え，大きな被害をもたらす強い竜巻の発生要因となる環境場の形成のし易さについての地域特性を確認するため，気象庁や米国気象局における現業においても竜巻探知・予測に活用されており，竜巻の発生しやすさを数値的に示すことができる突風関連指数を用いて地域特性の確認を行った。なお，突風関連指数を用いての検討については日本海側と太平洋側の地域性が異なることを示すために実施し，特定規模の竜巻発生の可能性を評価するものではない。

2.2.4.1. 突風関連指数を用いた竜巻予測の技術について

竜巻の主な発生メカニズムは，二つに大別されると考えられている。一つは局地的な前線（寒気団と暖気団との境界線）に伴って生じた渦が上昇流によって引き伸ばされて竜巻となるもので，比較的寿命が短く強い竜巻になりにくいとされている。もう一つは「スーパーセル」と呼ばれる，回転する継続した上昇気流域（メソサイクロン）を伴った非常に巨大な積乱雲に伴って竜巻が発生するものである。スーパーセル内では，下降流域と上昇流域が分離されるため，巨大な積乱雲が長時間持続する傾向にある。近年，ドップラーレーダーによる解析をもとにした竜巻の事例調査が進んだことにより，大きな被害をもたらす強い竜巻の多くはスーパーセルに伴って発生することが判明している。現状，竜巻を直接予測することは困難であるが，大規模竜巻の発生と関係が深いスーパーセルの発生環境を予測することにより竜巻発生を間接的に予測できる。以下に，竜巻発生予測について，突風関連指数を適用している例を示す。

<u>気象庁での突風関連指数の適用状況</u>

気象庁では平成 20 年 3 月から，低気圧の発達等に関して半日から 1 日程度前に発表する予告的な気象情報において，11 種類の突風関連指数を算出し，竜巻やダウンバースト等の激しい突風が発生する可能性があると予測される場合には，当気象情報において注意喚起することとした。

その後，気象庁では竜巻等の突風の予測プロダクトとして，平成 22 年 5 月より竜巻発生確度ナウキャスト情報の提供を開始した。竜巻発生確度ナウキャストは，「竜巻が今にも発生する（又は発生している）可能性の程度」（発生確度）を 10 分ごとに解析した結果をもとに，降水域の移動ベクトル等を用いて 1 時間先まで発生確度を予測する。発生確度の解析は，以下の二つの技術を組み合わせて実施している。

・気象ドップラーレーダ観測によるメソサイクロン（親雲）検出技術

・メソ数値予測（MSM）を用いた突風危険指数の算出技術

竜巻発生確度ナウキャストにおけるデータ等の流れを図 2.2.4.1.1 に示す。竜巻発生確度ナウキャストは最新の観測・解析データをもって短いリードタイムの予測を迅速に行うことが主目的のため，レーダプロダクトに重みを置いている。また，小さな竜巻も見逃しなく予測できるような説明変数として突風関連指数を選択している。

以上のように，気象庁では竜巻の監視や様々なリードタイムに対する予測に突風関連指数を活用している。

<u>海外での突風関連指数の適用状況</u>

海外では，米国の気象庁にあたる NOAA の SPC（ストーム予測センター）においても気象庁と同様に，突風関連指数の情報とレーダー観測のデータが現業で活用されており，突風関連指数に関する検討も盛んに行われている。

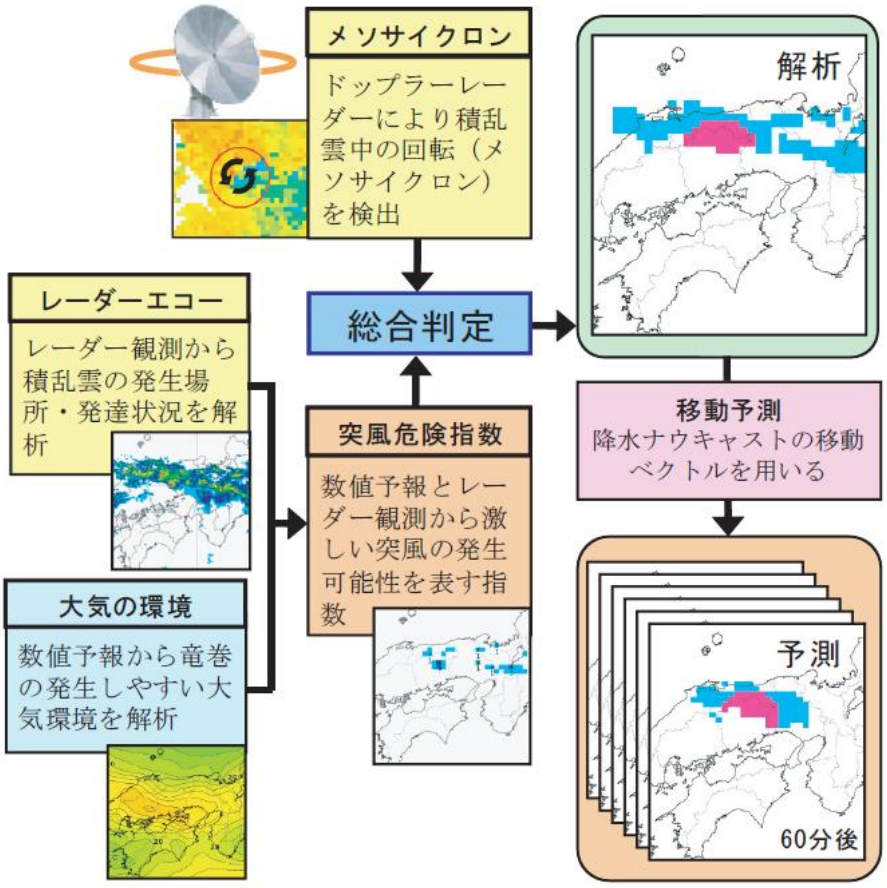


図 2.2.4.1.1　竜巻発生確度ナウキャストの解析・予測技術

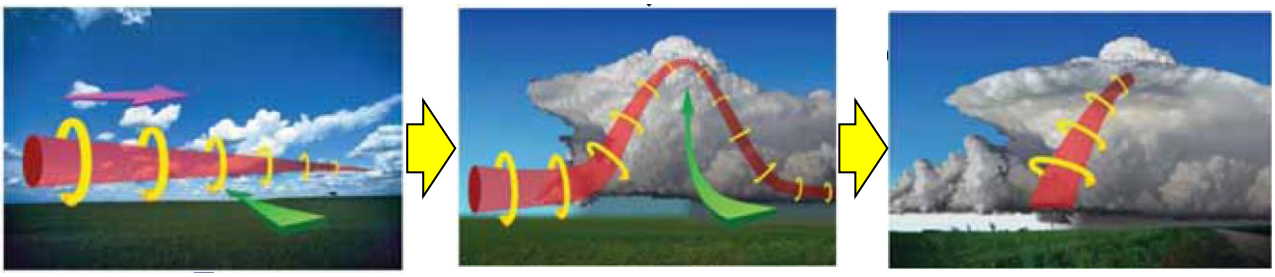
2.2.4.2.　検討に用いる突風関連指数について

大きな被害をもたらす竜巻の親雲の多くはスーパーセルであり，スーパーセルの発生環境は予測できる技術があって気象庁等でも活用されていることを述べてきた。ここでは，本検討に用いる突風関連指数について説明する。

図 2.2.4.2.1 に竜巻の発生メカニズムを示す。スーパーセルが発生しやすい環境場として，大気下層の鉛直シア（異なる高度間での風向・風速差）と，強い上昇気流を起こすきっかけとしての不安定な大気場が必要である。本検討では，大気の不安定度を表す指標として，「CAPE」，鉛直シアに伴って発生する水平渦度が親雲に取り込まれる度合いを表す指標として「SReH」を採用し，両者の指標が同時に高くなる頻度につ

いて，地域的な特徴を確認する分析を行った。また，両者を掛け合わせた指標であるEHI による分析も行い，SReH・CAPE の同時超過頻度分析との比較を行った。SReH,CAPE,EHI については，竜巻の発生実態を解明する研究において国内外で広く利用され，竜巻発生の環境場との関連づけ等の知見が多く蓄積されており，気象庁での竜巻予測に用いる突風関連指数の中でも主な指標として紹介されているため，本検討を行う上でも妥当なものと考えられる。

SReH,CAPE 及びその複合指数である EHI について以下に説明する。



風向・風速差による渦の発生　　上昇気流の発生　　竜巻の発生

図 2.2.4.2.1　竜巻の発生メカニズム※

※：江口 譲，原子力発電所の竜巻影響評価，原子力プラント機器の健全性評価に関する講習会，平成 26 年 12 月 12 日

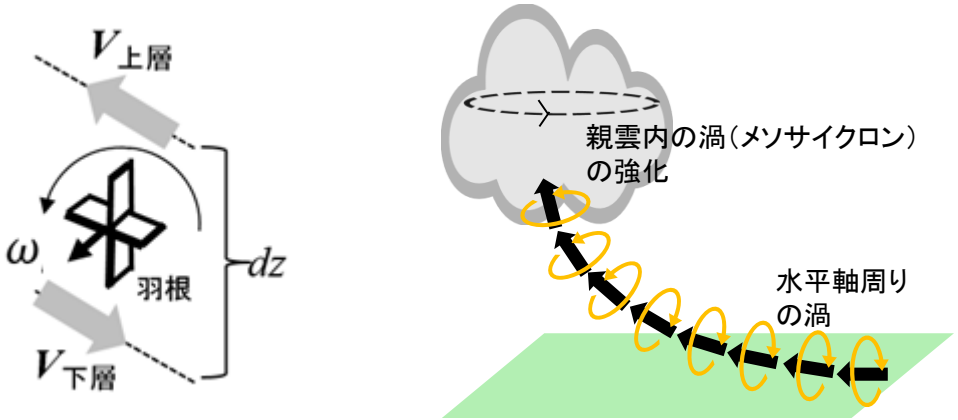
(1) SReH（Storm Relative Helicity：ストームの動きに相対的なヘリシティー）

風向・風速差により発生した渦度が親雲に取り込まれる度合いを示し，値が大きいほど，積乱雲がスーパーセルに発達しやすい。（図 2.2.4.2.2）

$$\mathrm{SReH} = \int_{\text{地上}}^{\text{高度}3km} (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega}\, dz$$

V：水平風速ベクトル　C：ストームの移動速度

ω：鉛直シアに伴う水平渦度



水平渦度生成に関する模式図　　水平渦度の親雲への輸送に関する模式図

図 2.2.4.2.2　SReH の算出概念

(2) CAPE (Convective Available Potential Energy：対流有効位置エネルギー)

上昇気流の発達しやすさを表し，値が大きいほど背の高い積乱雲に発達し得るため，大気の不安定度の指標となる。(図 2.2.4.2.3)

$$\mathrm{CAPE} = \int_{LFC}^{EL} g \frac{\theta_e'(z) - \theta_e(z)}{\theta_e(z)} dz$$

g：重力加速度　　θ_e’：下層の空気塊を持ち上げた際の相当温位

θ_e：ストーム周囲の相当温位　　dz：鉛直方向の層厚

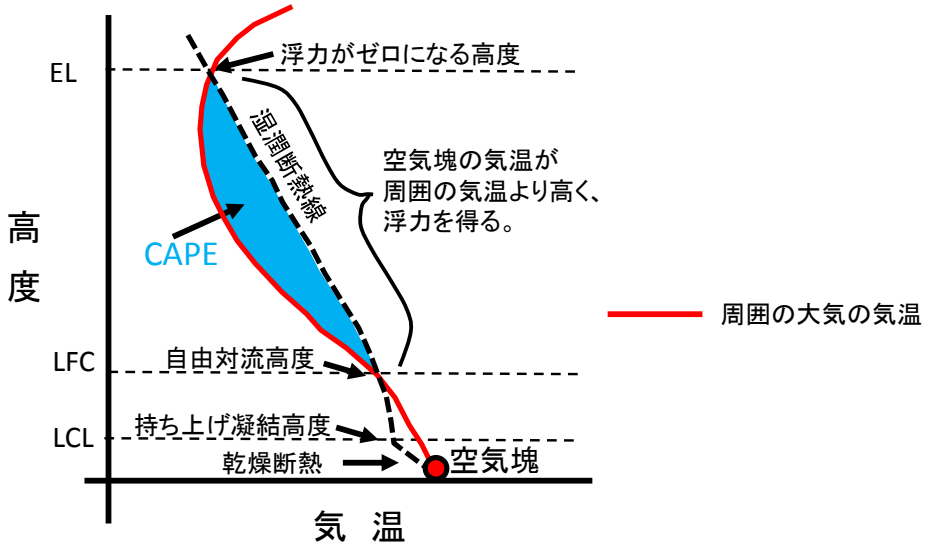


図 2.2.4.2.3　CAPE の算出概念

(3) EHI (Energy Helicity Index)

SReH と CAPE の複合的な突風関連指数。スーパーセルや竜巻の発生し易さを経験的に指標化したもので，米国では CAPE 単独や SReH 単独に比べると竜巻発生との相関関係が高いとされている。

$$\mathrm{EHI} = \frac{\mathrm{SReH} \times \mathrm{CAPE}}{160000}$$

（参考）相当温位

温位とは，下式に示すように気温 T と気圧 p に関する量であり，ある空気塊を断熱的に基準圧力 1000 hPa に戻したときの絶対温度である。

2 つの空気塊を比較した場合，温位の高い空気塊は軽く上昇しやすく（不安定であり），単位体積中に含み得る水蒸気量が多いため，大きな積乱雲の発生につながる。

相当温位は，空気塊に含まれる水蒸気の持っている潜熱（水蒸気が凝結する際に空気塊の温度が上昇）の影響も考慮された温位である。

$$\theta = T\left(\frac{1000}{p}\right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (R:\text{気体定数},\ C_p:\text{定圧比熱})$$

2.2.4.3. 突風関連指数の地域特性

これまでに発生した F3 竜巻に対する突風関連指数の分析結果を図 2.2.4.3.1 に示す。WRF モデル（Weather Research and Forecasting model）と呼ばれる数値気象モデルを用いて当時の気象場を解析（再現）し，それをもとに突風関連指数を算出している。図 2.2.4.3.1 をみると，季節によって CAPE の値が大きくことなるものの，F3 竜巻事例では共通して SReH と CAPE の両方が大きくなる傾向が見られた。

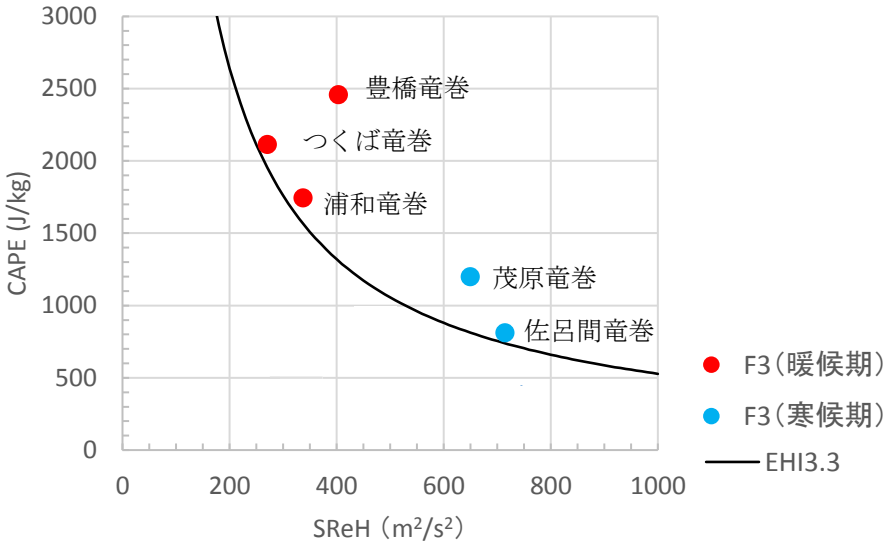


図 2.2.4.3.1　F3 竜巻における SReH と CAPE の関係

大きな竜巻を引き起こすスーパーセルの発生要因の指標である SReH と CAPE について，国内で（太平洋側で）発生した F3 竜巻では，SReH と CAPE の両方（あるいは複合指数である EHI）が大きな値をとる傾向が見られる。また，これまでに発生した国内における F2-F3 を含めた全ての F3 竜巻（6 事例）は，スーパーセルを伴っていたことが報告されている。

したがって，SReH と CAPE それぞれに対して閾値を設け，その閾値を同時に超える頻度（以下，同時超過頻度と呼ぶ。）を分析することにより，スーパーセルに伴って発生するような大規模な竜巻の発生環境を観点とした地域性を見出だすことができると考えられる。

2.2.4.4. 突風関連指数の同時超過頻度による地域性の検討

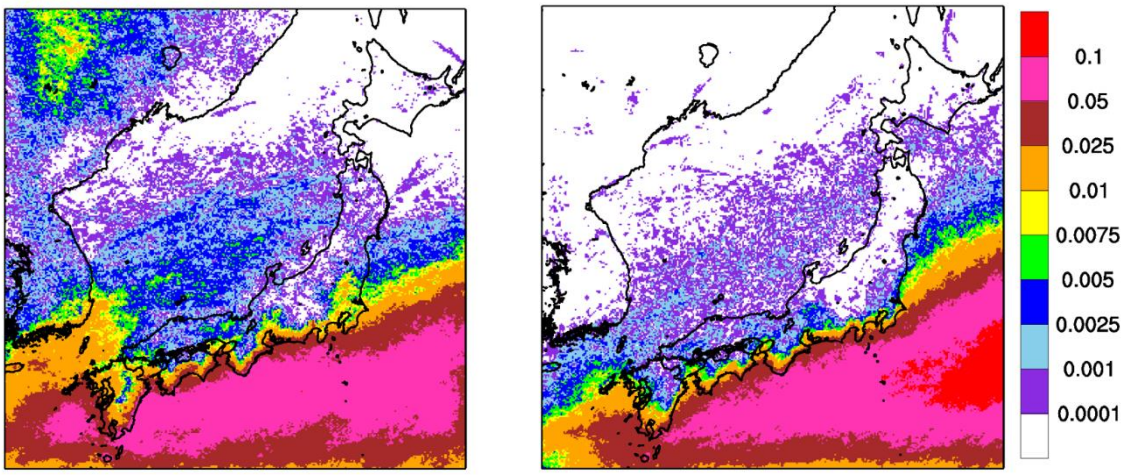
SReH と CAPE の閾値については，図 2.2.4.4.1 の F3 竜巻のデータをもとに，実際の

竜巻発生地点と対応するよう，下記のように設定した。また，CAPE の閾値については，緯度・季節で絶対値が大きく変わるため，5 月～10 月（暖候期）及び 11 月～4 月（寒候期）に分けて閾値を設定した。

［5 月－10 月（暖候期）］SReH：250 m^2/s^2，CAPE：1600 J/kg

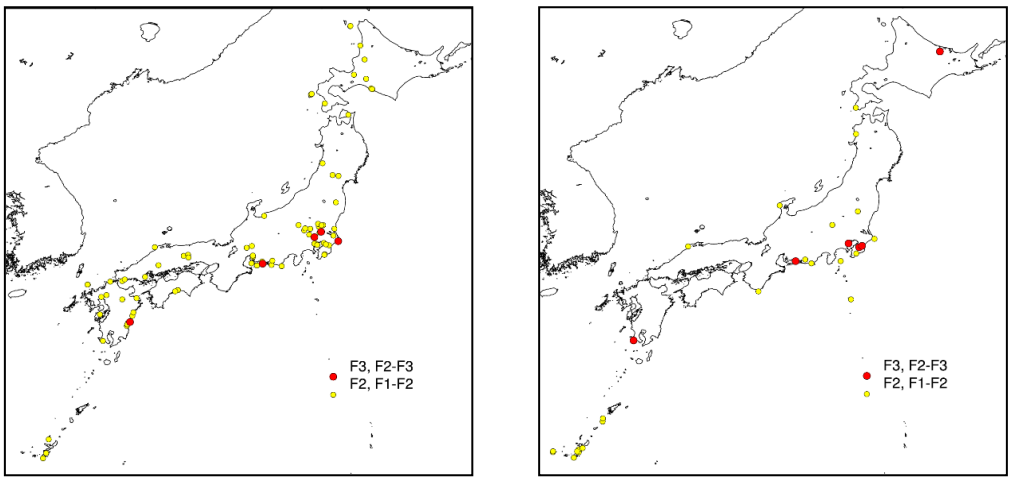
［11 月－4 月（寒候期）］SReH：250 m^2/s^2，CAPE： 600 J/kg

図 2.2.4.4.1 は，1961 年～2010 年までの 50 年間にわたって 1 時間ごとに解析されたデータをもとに，SReH と CAPE の同時超過頻度分布をマップ化したものである。また，気象庁竜巻等の突風データベースで確認された F2-F3 竜巻及び F3 竜巻の発生箇所を図 2.2.4.4.2 に示す。



暖候期 5 月～10 月　　寒候期 11 月～4 月

図2.2.4.4.1 F3規模以上を対象としたSReH，CAPE同時超過頻度分布（単位：%）



暖候期5月～10月　　寒候期11月～4月

図2.2.4.4.2　F2規模以上の発生箇所

（気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成）

また，EHI についても，SReH と CAPE と同様に閾値を設け超過頻度について分析した。EHI の閾値については，過去のいずれの F3 事例においても EHI が 3.5 程度を越えていることから，それを包含する値として EHI:3.3 を設定した（暖候期と寒候期は分けない）。

EHI の超過頻度分布をマップ化したものについても図 2.2.4.4.3 に示す。SReH, CAPE の同時超過頻度分布（図 2.2.4.4.1）に対応した結果となっており，EHI を用いて通年レベルの評価を行った場合でも地域特性がはっきり表れている。

以上により，CAPE, SReH, EHI について F3 以上を想定した特定の閾値を設けた場合の分析を実施したが，突風関連指数については不確実性が存在するため，EHI:3.0 及び 3.6 を設定した場合についても同様の地域性が現れることを確認した。(図 2.2.4.4.4)

ただし，閾値を大きくした場合，実際に F3 が発生した関東平野内を包含できなくなる。また閾値を小さくした場合，小さな竜巻が発生する環境場をカウントすることから，地域性は薄れていくことがわかる。

なお，CAPE, SReH についても同様の感度解析を実施しており，同様の傾向が得られることを確認した。【添付資料 2.1 付録 E】

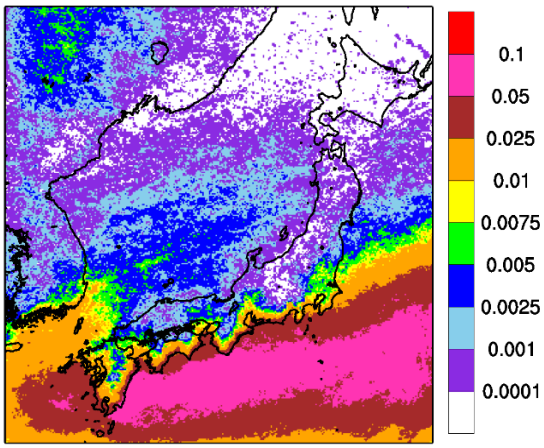
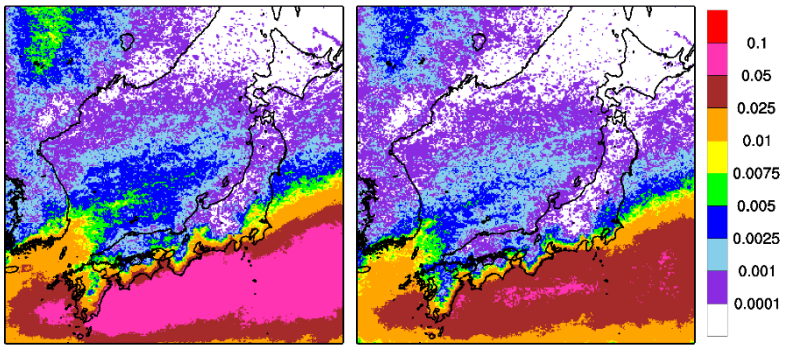


図2.2.4.4.3 EHIの超過頻度分布（単位：%，EHI閾値:3.3）



閾値 3.0　　閾値 3.6

図 2.2.4.4.4　EHI の超過頻度分布（単位:%，EHI 閾値は左から，3.0，3.6）

突風関連指数による，大規模な竜巻形成につながる環境場の発生頻度分析を行った結果，柏崎刈羽原子力発電所の立地地域は，茨城県以西の太平洋沿岸よりも 1～2 オーダー以下の頻度となることが分かった。

スーパーセルに伴って発生する大規模な竜巻形成につながる環境場の発生頻度分布の観点からも，太平洋側と竜巻検討地域で大きな地域特性の違いがあることを確認した。

参考として，F2 規模の竜巻について同様の検討を行った。閾値の設定は F2 規模の竜巻発生時の実績をもとに以下のように設定した。

［5 月－10 月 （暖候期)］SReH：200 m^2/s^2，CAPE：1000 J/kg

［11 月－4 月 （寒候期)］SReH：200 m^2/s^2，CAPE：350 J/kg

EHI を用いる場合の閾値　EHI:1.5

SReH，CAPE の同時超過頻度分析の結果を図 2.2.4.4.5 に，EHI の超過頻度分布を図 2.2.4.4.6 に示す。

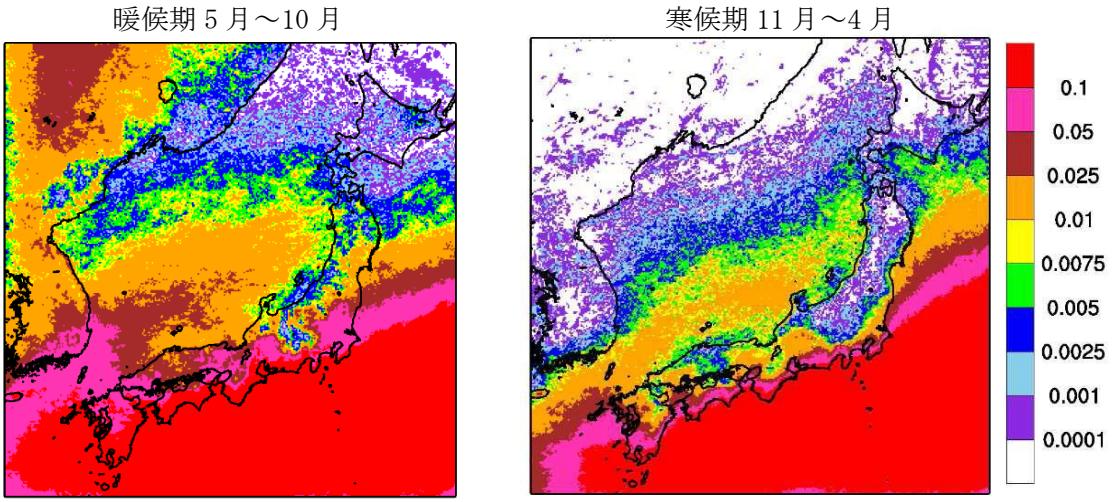


図2.2.4.4.5 F2規模のSReH，CAPE同時超過頻度分布（単位：%）

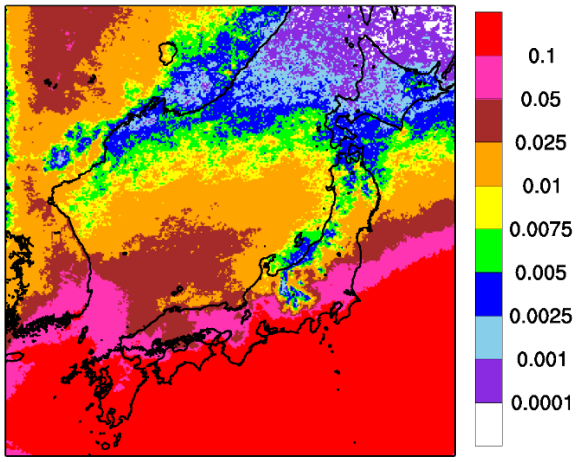


図2.2.4.4.6 EHIの超過頻度分布（単位：%，EHI閾値:1.5）

F2 規模相当の閾値での同時超過頻度を解析した結果をみても，柏崎刈羽原子力発電所が立地する地域は，太平洋側と比較して頻度が低くなっていることが確認できる。

日本海側で大きな竜巻が発生しにくい原因の一つとしては，太平洋側から暖かく湿った空気が，日本列島の中央部に存在する高く複雑な山岳域を湿潤不安定な状態のまま乗り越えてくることが出来ないため，日本海側では大きな竜巻を引き起こす環境場が形成しにくくなっていることが考えられる。

2.2.4.5. 佐呂間町で発生した竜巻について

突風関連指数を用いた解析結果から，F3 規模以上の竜巻が発生しやすいとされる地域が分かったが，そのエリアに含まれていない北海道網走支庁佐呂間町では 2006 年 11 月に F3 竜巻が発生している（以下「佐呂間竜巻」という。）。

佐呂間竜巻は，太平洋沿岸で発生した竜巻と比較すると，

・国内で唯一内陸部（丘陵地の麓）において発生した竜巻である。

・F3 竜巻としては継続時間（1 分）と移動距離（約 1.4km）が非常に短かった

という点で異なっている。

佐呂間竜巻の発生した地域では，太平洋側からの暖湿流が小高い丘を越えて流入するような地形になっており，平野部の冷気流とぶつかることにより大きな上層・下層間の風向差が生じる環境場となっていた。（図 2.2.4.5.1，図 2.2.4.5.2）

また，日高山脈の東側では，山を越えた冷気流と太平洋側の暖気流がぶつかる地点となっており，ここで発生した親雲が山脈沿いに北上しながら持続的に発達し，佐呂間地域で F3 規模の竜巻を形成するに至ったと考えられる。

これらの発生メカニズムについて，図 2.2.4.5.3 に模式的に示す。

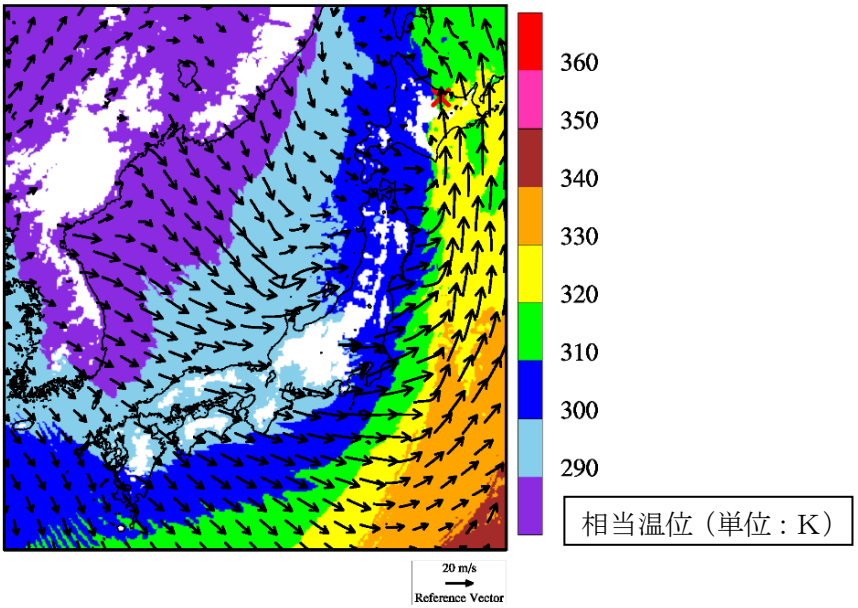
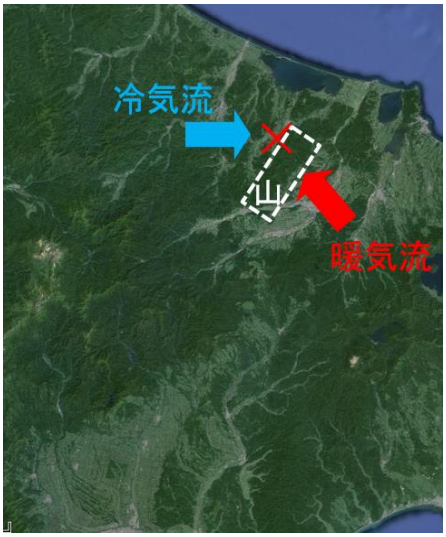


図 2.2.4.5.1　佐呂間竜巻発生時の風向・風速及び相当温位の分布（海抜 500m 高度）



親雲の発生位置（点線内）と移動方向　　竜巻の発生位置（×）と影響が指摘される山（点線部）

図 2.2.4.5.2　親雲の発生箇所と移動方向（左）及び竜巻の発生箇所（右）※

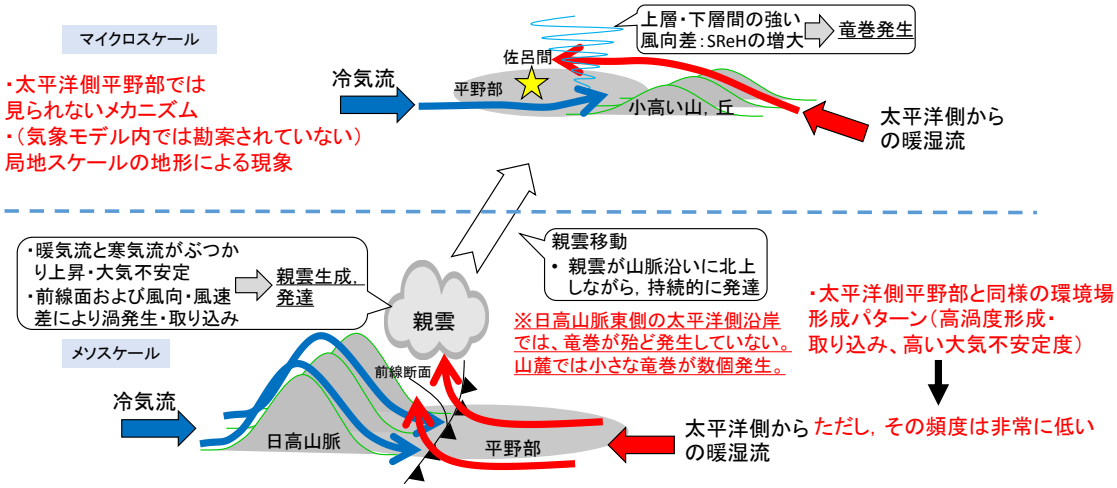


図 2.2.4.5.3　佐呂間竜巻の発生メカニズムに関する模式図※

※：軽水型原子力発電所の竜巻影響評価における設計竜巻風速及び飛来物速度の設定に関するガイドライン，日本保全学会，原子力規制関連事項検討会，平成 27 年 1 月

このように，佐呂間竜巻の発生メカニズムは，太平洋側沿岸域にて発生している F3 竜巻のメカニズムとは大きく異なっており，竜巻の持続時間・被害域長さも大きく異なっている。

竜巻影響評価における取り扱いとしては，基準竜巻設定で対象としている地域性・

空間スケールよりも局地的な地形影響を受けており，そういった影響については，設計竜巻 V_D の設定時に考慮するのがガイドの趣旨に沿ったものとなる。

考慮する際のポイントは，以下の 2 点である。

- 太平洋側からの暖湿流が高標高山岳等に遮断されずに直接流入し得る地域である。
- 近隣地形（数キロ程度四方の範囲）において，（太平洋側からの）暖気流の流入する風上側に尾根状の丘・山が存在すること。

その観点で柏崎刈羽原子力発電所の地形を確認すると，以下のように整理できる。

- 本州中央部に高標高山岳が存在するため，太平洋側から暖湿流が直接流入しない。（図 2.2.4.5.4）
- 日本海側で発達する気流は，主に西から東へ移動する傾向が強く，気流の流入する風上側（海側）に尾根状の丘，山が存在しない。

したがって，柏崎刈羽原子力発電所で佐呂間竜巻と同様な地形条件にはなっていないことを確認した。

以上の検討結果より，竜巻発生要因及び発生する竜巻の規模には地域性があることが示され，その観点から柏崎刈羽原子力発電所の竜巻検討地域として，北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸を竜巻検討地域として設定することが妥当であることが確認できた。

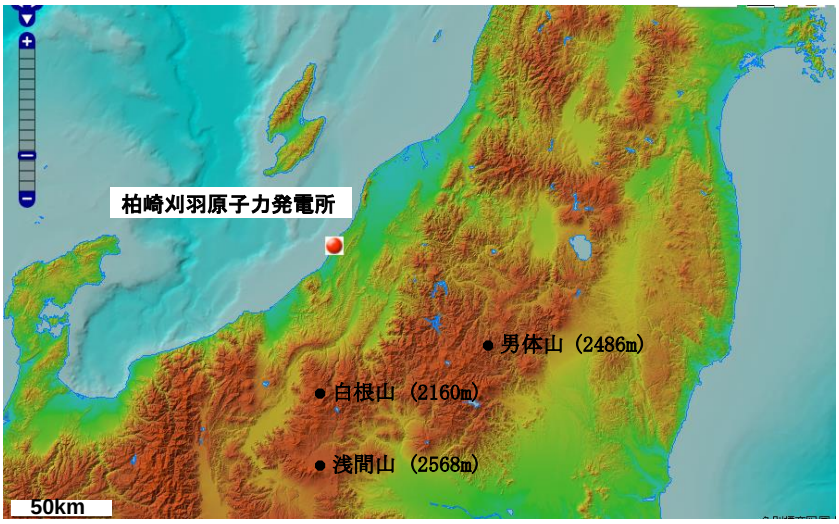


図2.2.4.5.4　柏崎刈羽原子力発電所周辺地形図

2.3. 基準竜巻の最大風速(V_B)の設定

基準竜巻の最大風速は，過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})のうち，大きな風速を設定する。

2.3.1. 過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})

表2.3.1.1に竜巻検討地域で過去に発生したF1より大きい竜巻の観測記録を示す。

表2.3.1.1より竜巻検討地域における過去最大竜巻はF2であり，Fスケールと風速の関係より風速は50～69m/sであることから， V_{B1}はF2の風速範囲の上限値69m/sとする。

表2.3.1.1　竜巻検討地域における竜巻の観測記録（F1より大きい竜巻）
（気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成）

現象区別	発生日時	発生場所	Fスケール※	総観場
竜巻	1962/09/28 14:20	北海道宗谷支庁東利尻町	(F2)	寒冷前線
竜巻	1971/10/17 05:00	北海道留萌支庁羽幌町	(F2)	寒気の移流
竜巻	1974/10/03 19:05	北海道檜山支庁奥尻郡奥尻町	(F1～F2)	温暖前線
竜巻	1974/10/20 15:00	北海道檜山支庁檜山郡上ノ国町	(F1～F2)	寒冷前線
竜巻	1975/05/31 18:10	島根県　簸川郡大社町	(F2)	日本海低気圧・局地性じょう乱・寒気の移流
竜巻	1975/09/08 01:30	北海道檜山支庁奥尻郡奥尻町	(F1～F2)	日本海低気圧・暖気の移流
竜巻	1979/11/02 01:58	北海道渡島支庁松前郡松前町	(F2)	日本海低気圧・温暖前線
竜巻	1989/03/16 19:20	島根県　簸川郡大社町	(F2)	局地性じょう乱・寒気の移流
竜巻	1990/04/06 02:55	石川県　羽咋郡富来町	F2	オホーツク海低気圧・気圧の谷
竜巻	1999/11/25 15:40	秋田県 八森町	(F1～F2)	日本海低気圧・寒冷前線

※：Fスケールは，ア）被害の詳細な情報等から推定できたもの，イ）文献等からの引用又は被害のおおまかな情報等から推定したものがあり，F2以上の事例ではア）とイ）を区別し，イ）の場合には値を括弧で囲んでいる。

2.3.2. 竜巻最大風速のハザード曲線の求め方【添付資料 2.3(1)】

竜巻最大風速のハザード曲線は，気象庁「竜巻等の突風データベース」より竜巻検討地域における竜巻の観測記録を抽出・評価し，既往の算定法(Wen&Chu及びGarson et al.)に基づき算定した。具体的な算定方法は，JNES委託研究成果報告書※を参考とし，図2.3.2.1に示すフローに従いハザード曲線を算定した。なお，ハザード曲線は，竜巻検討地域の竜巻特性を適切に考慮できる海岸線から海側，陸側それぞれ5kmの範囲内で算定した。加えて，竜巻検討地域を海岸線に沿って1km範囲ごとに短冊状に細分化した場合のハザード曲線も算定することにより，竜巻発生確認数のばらつきやFスケールの偏りの影響も検討した。【添付資料2.3参考資料3】

※ 東京工芸大学：「平成21～22 年度原子力安全基盤調査研究（平成22 年度）竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」，独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書，平成23年2月

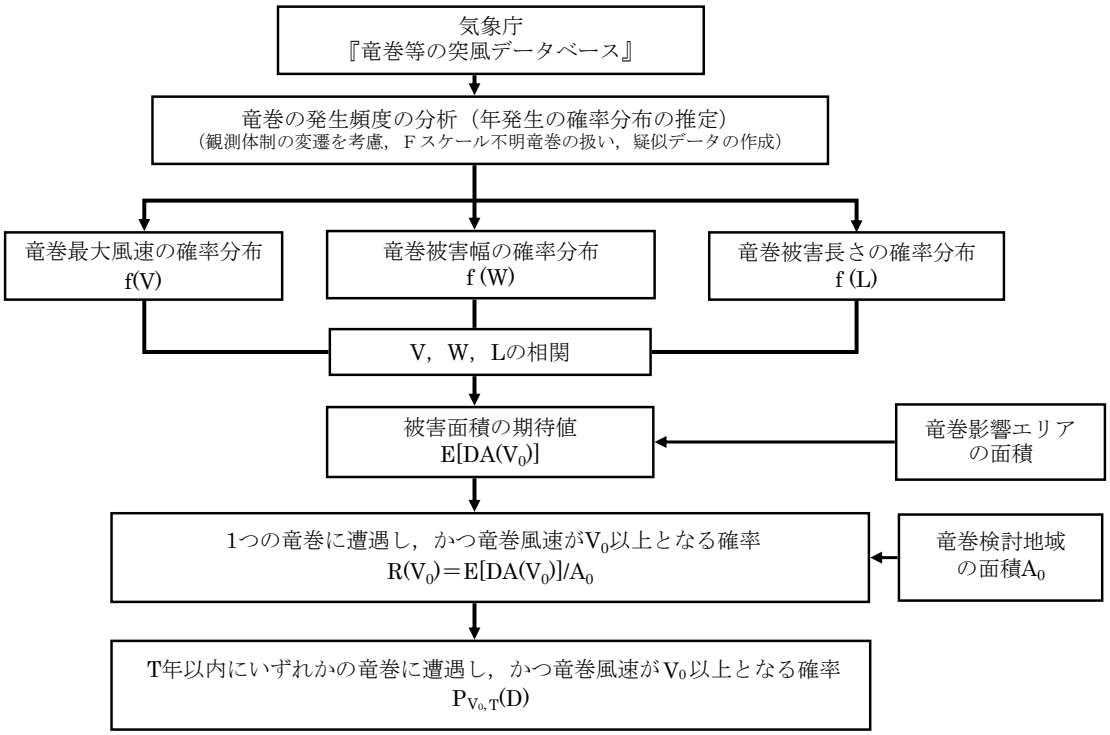


図 2.3.2.1　竜巻最大風速ハザード曲線の算定フロー

2.3.3. 海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域の評価

本評価では，竜巻検討地域外で発生して竜巻検討地域内に移動した竜巻である通過竜巻も発生数にカウントする。被害幅及び被害長さは，それぞれ被害全幅及び被害全長を用いる。

2.3.4. 竜巻の発生頻度の分析【添付資料 2.3(2)】

気象庁「竜巻等の突風データベース」をもとに，1961 年 1 月～2012 年 6 月までの 51.5 年間の統計量を F スケール別に算出する。なお，観測体制の変遷による観測データ品質のばらつき(図 2.3.4.1 参照)を踏まえ，以下の(1)～(3)の基本的な考え方に基づいて整理を行う。

(1) 被害が小さくて見過ごされやすい F0 及び F スケール不明竜巻に対しては，観測体制が強化された 2007 年以降の年間発生数や標準偏差を用いる。
(2) 被害が比較的軽微な F1 竜巻に対しては，観測体制が整備された 1991 年以降の年間発生数や標準偏差を用いる。
(3) 被害が比較的大きく見逃されることがないと考えられる F2 及び F3 竜巻に対しては，観測記録が整備された 1961 年以降の全期間の年間発生数や標準偏差を用いる。

また，F スケール不明の竜巻については，以下の取扱いを行う。

陸上で発生した竜巻（以下「陸上竜巻」という。）及び海上で発生して陸上へ移動した竜巻については，被害があって初めてその F スケールが推定されるため，陸上での F スケール不明の竜巻は，被害が少ない F0 竜巻に分類した。海上で発生しその後上陸しなかった竜巻（以下「海上竜巻」という。）については，その竜巻のスケールを推定することは困難であることから，「海岸線から海上 5km の範囲における海上竜巻の発生特性が，海岸線から内陸 5km の範囲における陸上竜巻の発生特性と同様である。」という仮定に基づいて各 F スケールに分類する。

上記の基本的な考え方に基づいて観測記録を整理・推定した結果を表 2.3.4.1 に示す。

なお，竜巻発生の確率モデルは，ガイドに従ってポアソン過程に従うものとし，年発生数の確率分布には，ポリヤ分布を適用した。

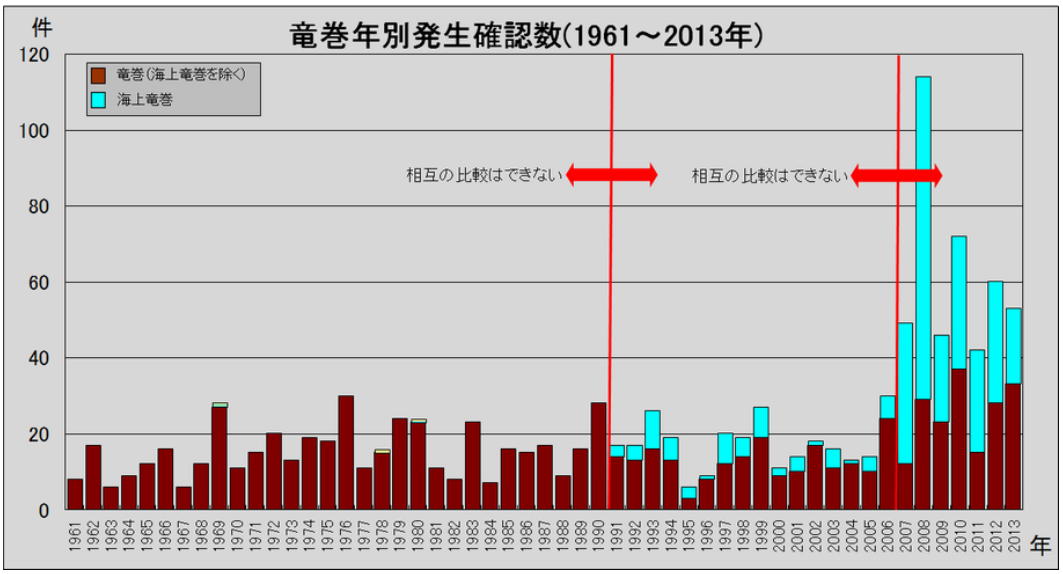


図 2.3.4.1　竜巻の年別発生確認数（気象庁 HP より）

表 2.3.4.1　竜巻発生数の解析結果

竜巻検討地域（沿岸±5km）	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不　明		総数
			F0	F1	F2	F3	（陸上）	（海上）	（含む不明）
1961～2012/6（51.5年間）	期間内総数	74	24	40	10	0	13	105	192
	平均値（年）	1.44	0.47	0.78	0.19	－	0.25	2.04	3.73
	標準偏差（年）	2.25	1.75	0.90	0.49	－	0.71	5.92	7.81
	CV（年）	1.56	3.76	1.16	2.52	－	2.83	2.90	2.09
1991～2012/6（21.5年間）	期間内総数	46	24	21	1	0	12	105	163
	平均値（年）	2.14	1.12	0.98	0.05	－	0.56	4.88	7.58
	標準偏差（年）	3.11	2.61	0.91	0.22	－	1.02	8.49	11.07
	CV（年）	1.45	2.34	0.93	4.64	－	1.83	1.74	1.46
2007～2012/6（5.5年間）	期間内総数	27	22	5	0	0	7	91	125
	平均値（年）	4.91	4.00	0.91	－	－	1.27	16.55	22.73
	標準偏差（年）	5.55	4.32	1.24	－	－	1.69	11.41	15.10
	CV（年）	1.13	1.08	1.36	－	－	1.33	0.69	0.66
疑似51.5年間（陸上竜巻）	期間内総数	333	206	51	10	0	66	853	1186
	平均値（年）	6.44	4.00	0.98	0.19	－	1.27	16.55	22.99
	標準偏差（年）	4.75	4.32	0.91	0.49	－	1.69	11.41	12.36
	CV（年）	0.74	1.08	0.93	2.52	－	1.33	0.69	0.54
疑似51.5年間（全竜巻）	期間内総数	1187	969	182	36	0	0	0	1187
	平均値（年）	23.05	18.82	3.53	0.70	－	－	－	23.05
	標準偏差（年）	8.97	8.76	1.72	0.92	－	－	－	8.97
	CV（年）	0.39	0.47	0.49	1.32	－	－	－	0.39

2.3.5. 竜巻風速，被害幅，被害長さの確率分布及び相関係数【添付資料 2.3(3),(4)】

竜巻ハザードを評価するためには，一つの竜巻が発生した際の，竜巻風速，被害幅及び被害長さの確率分布が必要となることから，これらの確率密度分布を求める。なお，竜巻風速の確率密度分布は，F スケール別の竜巻発生数から求める。

竜巻検討地域における 51.5 年間の竜巻の発生数，被害幅及び被害長さをもとに，確率密度分布についてはガイド及びガイドが参考としている JNES 委託研究成果報告書を参照し，対数正規分布に従うものとする。(図 2.3.5.1～図 2.3.5.6)

なお，疑似的な竜巻の作成において被害幅又は被害長さの情報がない竜巻には，観測された竜巻と同程度の竜巻を想定し，それに相当する被害幅又は被害長さを与えている。その際は，被害幅又は被害長さが大きいほうから優先的に用いることにより，保守的に評価を行う。

また，竜巻のハザードの計算においては，2 変量あるいは 3 変量の確率分布関数を対象とするため，竜巻風速，被害幅及び被害長さについての相関係数を求めた。表 2.3.5.1 に 1961 年以降の観測データのみを用いて，竜巻風速，被害幅及び被害長さについて相関係数を求めた結果を示す。

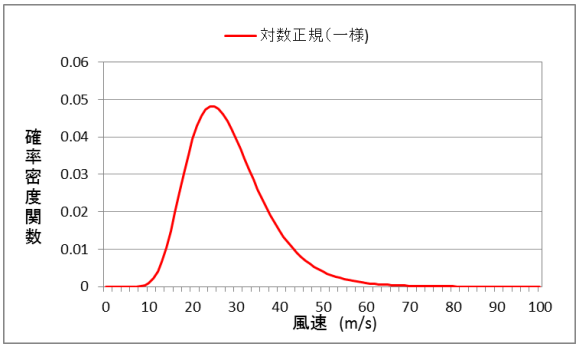


図2.3.5.1　竜巻風速の確率密度分布

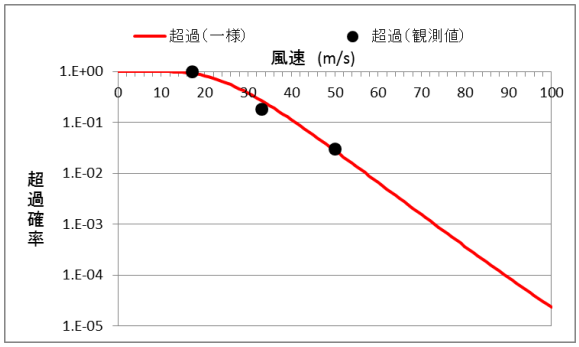


図2.3.5.2　竜巻風速の超過確率分布

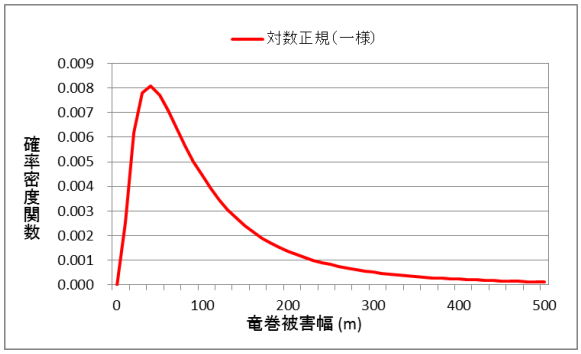


図2.3.5.3　被害幅の確率密度分布

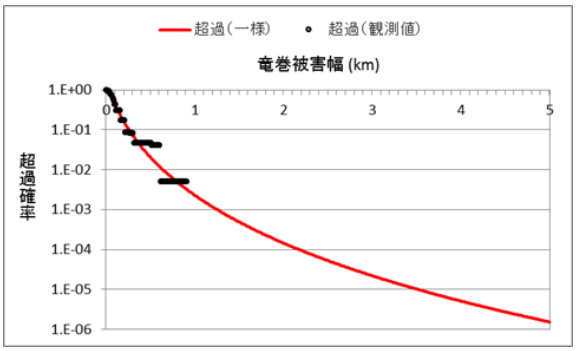


図2.3.5.4　被害幅の超過確率分布

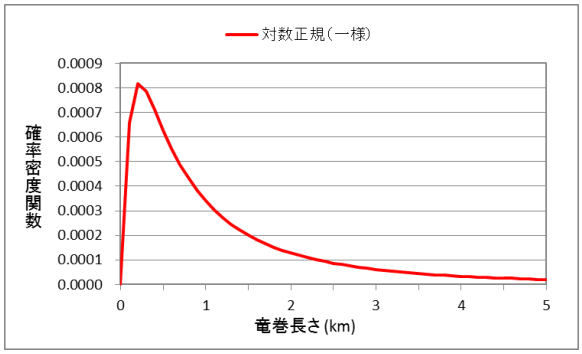


図2.3.5.5　被害長さの確率密度分布

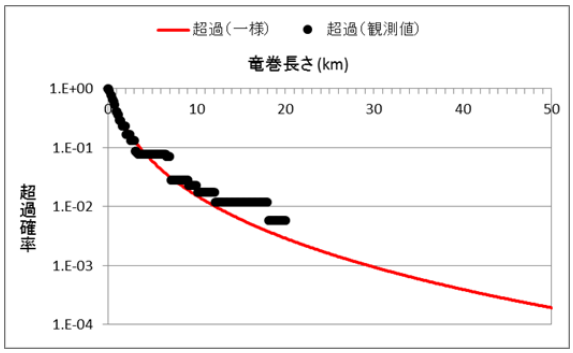


図2.3.5.6　被害長さの超過確率分布

表 2.3.5.1　竜巻風速，被害幅，被害長さの相関係数（単位なし）

相関係数	風速	被害幅	被害長さ
風速	1.000	-0.050*	0.312
被害幅	-0.050*	1.000	0.462
被害長さ	0.312	0.462	1.000

*風速と被害幅は無相関との知見が得られたため，ハザード算定の際には，相関係数 0 として計算

2.3.6. 竜巻影響エリアの設定【添付資料 2.3(5)】

竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})の算定にあたり，V_{B2}の発生エリアである竜巻影響エリアを設定する。竜巻影響エリアは，柏崎刈羽原子力発電所の号炉ごとに設定する。号炉ごとのすべての評価対象施設の設置面積の合計値及び推定される竜巻被害域(被害幅，被害長さから設定)に基づいて，竜巻影響エリアを設定する。

図2.3.6.1に柏崎刈羽原子力発電所6号炉の竜巻影響エリア，図2.3.6.2に7号炉の竜巻影響エリアを示す。竜巻影響エリアは，柏崎刈羽原子力発電所6号炉又は7号炉の評価対象施設を含む長方形エリアの対角線長さが約260mであることを考慮して，各号炉の評価対象施設を包絡する円形のエリア（直径300m，面積約7.1×10^4m^2）として設定する。なお，竜巻影響エリアを円形とするため，竜巻の移動方向には依存性は生じない。

防護上の観点又は機密に係わる事項を含む為，公開できません

図2.3.6.1　6号炉 竜巻影響エリア

図2.3.6.2　7号炉 竜巻影響エリア

2.3.7. ハザードの算定【添付資料 2.3(6)】

T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し，かつ竜巻風速がV_0以上となる確率を求める。竜巻の年発生数の確率密度分布としてポリヤ分布の適合性が高い。ポリヤ分布は式(1)で示される。

$$P_T(N) = \frac{(\nu T)^N}{N!}\left(1+\beta\nu T\right)^{-N-1/\beta}\prod_{k=1}^{N-1}\left(1+\beta k\right) \qquad (1)$$

ここで，

N：竜巻の年発生数

ν：竜巻の年平均発生数

T：年数

βは分布パラメータであり式（2）で示される。

$$\beta = \left(\frac{\sigma^2}{\nu}-1\right)\times\frac{1}{\nu} \qquad (2)$$

ここで，

σ ：竜巻の年発生数の標準偏差

Dをリスク評価対象構造物が風速V_0以上の竜巻に遭遇する事象と定義し，$R(V_0)$をリスク評価対象構造物が1つの竜巻に遭遇し，竜巻風速がV_0以上となる確率と定義すると，T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し，かつ竜巻風速がV_0以上となる確率は式(3)で示される

$$P_{Vo,T}(D) = 1-\left[1+\beta\nu R(V_0)T\right]^{-1/\beta} \qquad (3)$$

この$R(V_0)$は，竜巻影響評価の対象地域の面積をA_0（つまり竜巻検討地域の面積約33,395km^2），1つの竜巻の風速がV_0以上となる面積を$DA(V_0)$とすると式(4)で示される。

$$R(V_0) = \frac{E\left[DA(V_0)\right]}{A_0} \qquad (4)$$

ここで，$E[DA(V_0)]$は，$DA(V_0)$の期待値を意味する。

本評価では，以下のようにして$DA(V_0)$の期待値を算出し，式(4)により$R(V_0)$を推定して，式(3)により$P_{V_0,T}(D)$を求める。風速をV，被害幅w，被害長さl，移動方向α及び構造物の寸法をA, Bとし，$f(V, w, l)$等の同時確率密度関数を用いると，$DA(V_0)$の期待値は式(5)で示される。

$$E[DA(V_0)] = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0)\, l\ f(V,w,l)\, dV\, dw\, dl$$

$$+ \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty H(\alpha)\, l\ \ f(V,l,\alpha)\, dV dl\, d\alpha + \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) G(\alpha)\ f(V,w,\alpha)\, dV dw\, d\alpha$$

$$+ AB \int_{V_0}^\infty f(V) dV \qquad (5)$$

ここで，$W(V_0)$は竜巻風速がV_0以上となる幅であり，式(6)で示される。

$H(\alpha)$及び$G(\alpha)$はそれぞれ，竜巻の被害長さ及び被害幅方向に沿った面にリスク評価対象構造物を投影したときの長さであり，式(7)で示される。

$$W(V_0) = \left(\frac{V_{\min}}{V_0} \right)^{1/1.6} w \qquad (6)$$

ここで，

V_{min}：被害幅w内の最小竜巻風速

V_0：被害が発生する最小風速

$$H(\alpha) = B\,|\sin\alpha| + A\,|\cos\alpha|$$

$$G(\alpha) = A\,|\sin\alpha| + B\,|\cos\alpha| \qquad (7)$$

本評価ではリスク評価対象構造物を円形構造物（竜巻影響エリア）で設定しているため，$H(\alpha)$，$G(\alpha)$ともに竜巻影響エリアの直径300 mで一定（竜巻の移動方向に依存しない）となる。円の直径をD_0とした場合の計算式は式(8)で示される。

$$E[DA(V_0)] = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0)\, l\ f(V,w,l)\, dV\, dw\, dl$$

$$+ D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty l\ f(V,l)\, dV dl\ + D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0)\ f(V,w)\, dV dw$$

$$+ (D_0{}^2 \pi / 4) \int_{V_0}^\infty f(V) dV \qquad (8)$$

2.3.8. 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})

海岸線から陸側及び海側それぞれ5km全域（竜巻検討地域）を対象に算定したハザード曲線より，年超過確率10^{-5}※における風速を求めると図2.3.8.1に示すとおり59m/sとなった。

また，使用した竜巻の統計データの不確実性については検討を実施しており，Fスケール不明の海上竜巻の発生数は，陸上竜巻のFスケール別発生比率で按分して取り扱っているが，竜巻検討地域を「北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸」にすることに伴う竜巻ハザード曲線算出のためのデータの不確実性（日本海側はFスケール不明の海上竜巻が多い）を踏まえ，参照する年超過確率を10^{-5}から一桁下げた年超過確率10^{-6}※における風速である76m/sをV_{B2}とする。

なお，1km範囲ごとに短冊状に細分化した場合のハザード曲線については，算出を実施したものの，その技術的説明性が乏しいと考え，V_{B2}の設定には使用しないものとした。【添付資料2.3（参考資料3）】

※ 設計基準事故の発生頻度が10^{-3}/年～10^{-4}/年（発電用軽水型原子炉施設に係る新安全基準骨子案に対する意見募集の結果について：平成25年4月3日技術基盤課）であることから，設計基準として考慮する竜巻の最大風速は年超過確率10^{-4}に設定することが妥当であると考える。ただし，ガイドで竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})の年超過確率は，10^{-5}を上回らないことが要求されていること，ハザードの不確実性があることを踏まえて保守的に10^{-4}より1 桁下げて，参照する年超過確率は10^{-5}とするが，統計データの不確実性の検討を踏まえて保守的に10^{-5}より1桁下げて，竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})の年超過確率は10^{-6}とする。

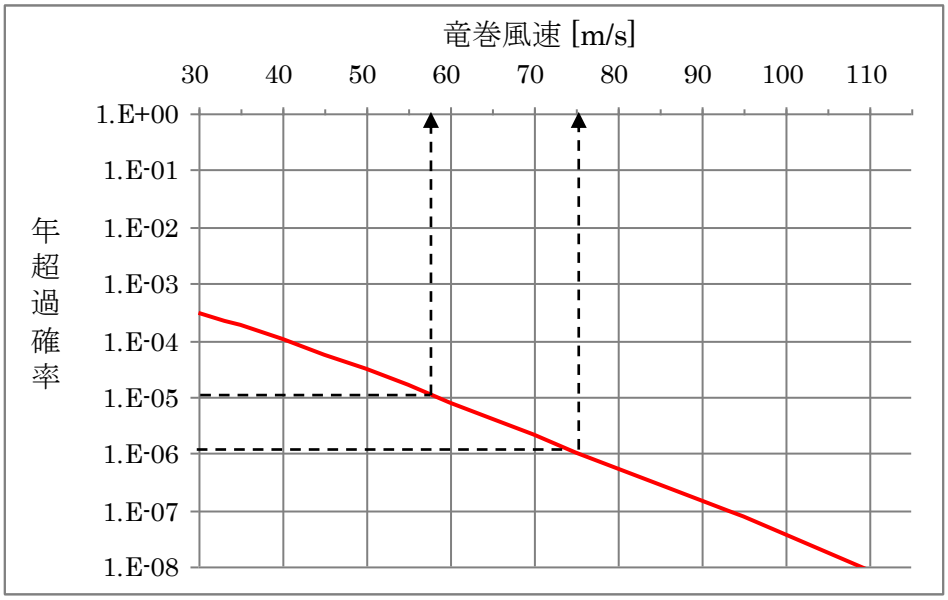
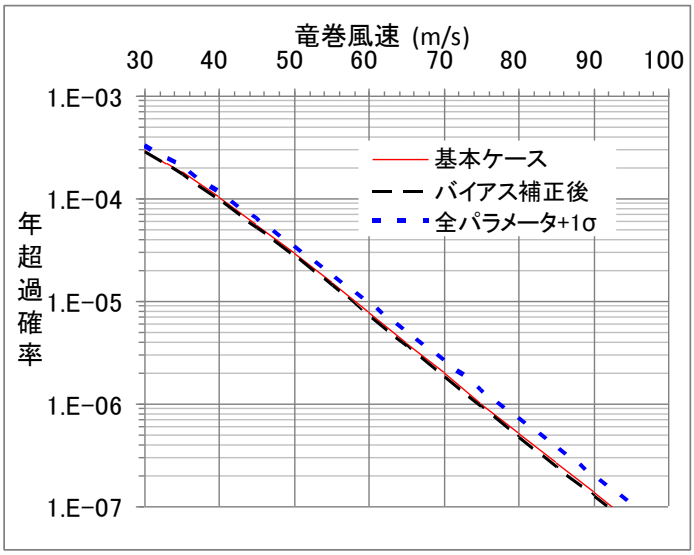


図2.3.8.1　竜巻最大風速のハザード曲線（海側，陸側5km範囲）

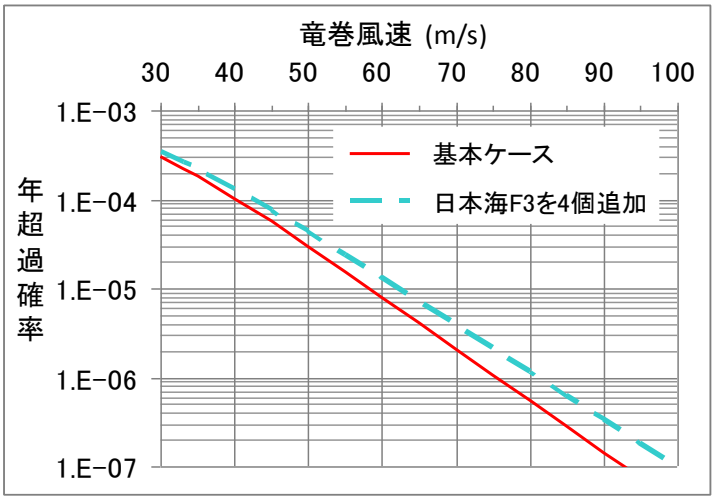
また，不確実さ要素のハザード算定結果への影響を検討した。【添付資料2.3参考資料5】

図2.3.8.2(a)に示した，データ，確率分布形選択及びデータ量が少ないことによる不確実さを表したハザード曲線により，これらの不確実さが十分小さいことを確認した。

さらに，疑似データにF3竜巻を4個追加した感度解析結果を図2.3.8.2(b)に示す。この場合の年超過確率10^{-5}に相当する竜巻風速は62.2m/sとなり，かなり保守的な仮定をおいてもハザードへの影響は限定的であることから，データの高い安定性を確認した。



(a) バイアス補正後及び全パラメータ＋1σのハザード



(b) 竜巻風速の年超過確率分布

図2.3.8.2　ハザード不確実さ検討結果

2.3.9. 基準竜巻の最大風速(V_B)

過去に発生した竜巻による最大風速V_{B1} =69 m/s及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速V_{B2}=76m/sのうち，大きい風速である76m/sを柏崎刈羽原子力発電所における基準竜巻の最大風速V_Bとする。（表2.3.9.1）

使用した竜巻の統計データの不確実性については前項までで検討を実施しているが，将来的な気候変動により規模や発生数の増加傾向となることは否定できない。

将来的な気候変動として現時点でも予想されるものとしては地球温暖化が挙げられる。地球温暖化が進行した際には台風の強度が強まる傾向が考えられ，現時点の経験データでは台風起因の竜巻は日本海側では観測されていないものの将来的には日本海側においても発生する可能性がある。ただし台風は北上するにつれて，山岳での暖湿流遮断による安定化や海水温度低下による水蒸気供給量低下により衰弱しやすい特性を有していることから，仮に発生するとしても規模の大きな竜巻の発生は考えにくい。

将来的な気候変動についての現時点での予想は上記のとおりとなるが，気候変動を完全に予測することは難しいため，最新のデータ・知見をもって気候変動の影響に注視し，竜巻検討地域や基準竜巻の最大風速は，必要に応じて見直しを実施していくものとする。

表2.3.9.1　竜巻の最大風速の算定結果

項目	最大風速[m/s]
過去に発生した竜巻による 最大風速V_{B1}	69
竜巻最大風速のハザード曲線による 最大風速V_{B2}	76
基準竜巻の最大風速V_B	76

2.4. 設計竜巻の最大風速（V_D）の設定

柏崎刈羽原子力発電所が立地する地域の特性として，周辺の地形や竜巻の移動方向を考慮して，基準竜巻の最大風速の割り増しを検討し，設計竜巻の最大風速を設定する。

2.4.1. 地形効果による竜巻風速への影響

地形効果が竜巻強度に及ぼす影響に関する知見として，(1) 地形起伏による影響，(2) 地表面粗度による影響，について既往の研究において示されており，その知見を踏まえ，柏崎刈羽原子力発電所周辺の地形効果による竜巻の増幅可能性について検討する。

(1) 地形起伏による影響

竜巻のような回転する流れでは，角運動量保存則により「回転の中心からの距離」及び「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質がある。そのため，図 2.4.1.1 に示すとおり竜巻の渦が上り斜面を移動するとき（渦 1 から渦 2 へ移動する場合），基本的に渦は弱まり，下り斜面を移動するときには強まる。

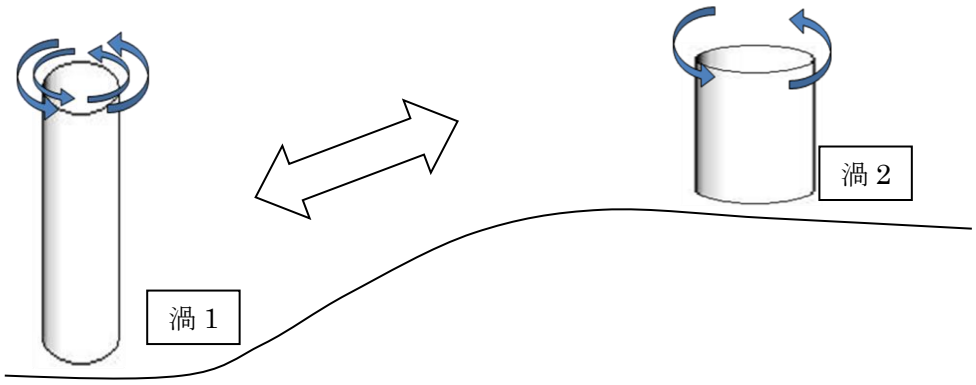


図 2.4.1.1　竜巻旋回流の地形影響に関する模式図

(2) 地表面粗度による影響

風は地表面の細かな凸凹が与える摩擦抵抗の影響を受けやすく，風速は，地表面において 0 となり上空に向かうにつれて増加する。地表面粗度は竜巻の旋回流を減衰させる効果を有し，地表面粗度の構成物が飛来物として運動することで風速が減衰することも示唆されていることから，地表面粗度の増加とともに竜巻に起因する強風の風速を低下させるといえる。

2.4.2. 柏崎刈羽原子力発電所周辺の地形

柏崎刈羽原子力発電所敷地周辺の地形を図2.4.2.1，柏崎刈羽原子力発電所東西方向の鉛直断面での地形起伏を図2.4.2.2，柏崎刈羽原子力発電所敷地周辺の地表面粗度を図2.4.2.3に示す。柏崎刈羽原子力発電所が立地する敷地は，北西が日本海に面

し，三方を森林に囲まれた標高60m前後のなだらかな丘陵地である。

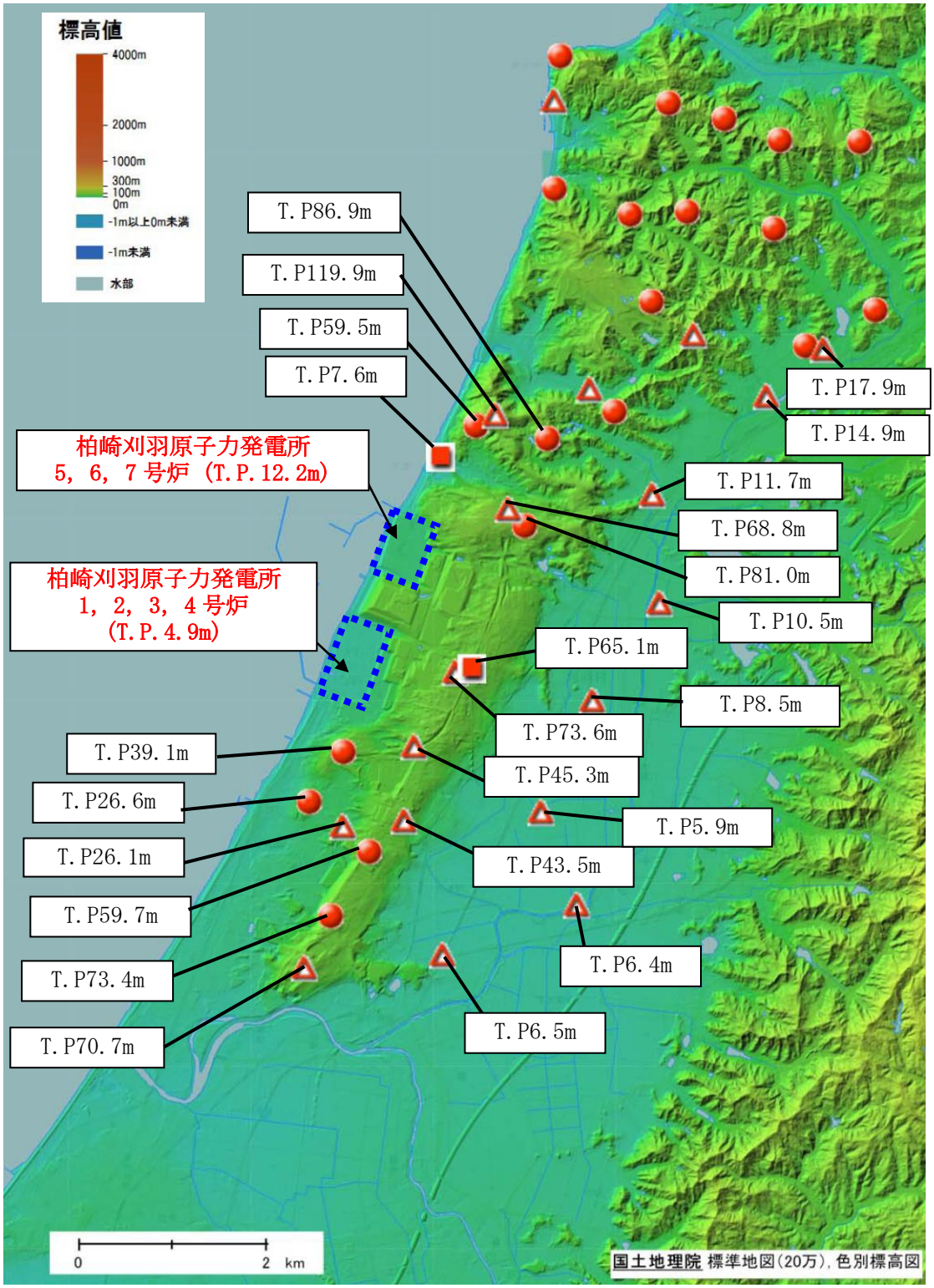


図 2. 4. 2. 1　柏崎刈羽原子力発電所周辺の地形
（国土地理院「電子国土 Web」より作成）

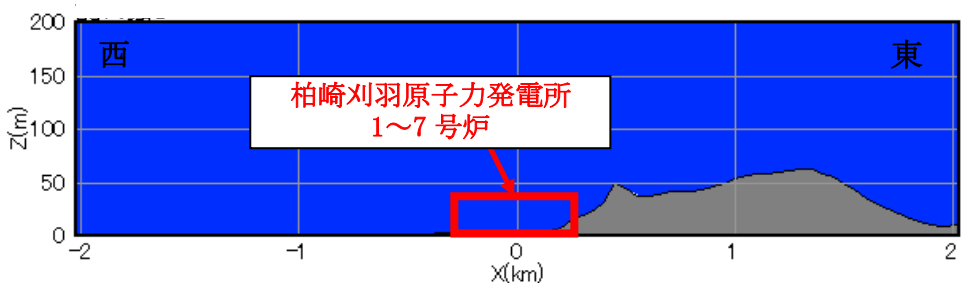


図 2.4.2.2　柏崎刈羽原子力発電所東西方向の鉛直断面での地形起伏

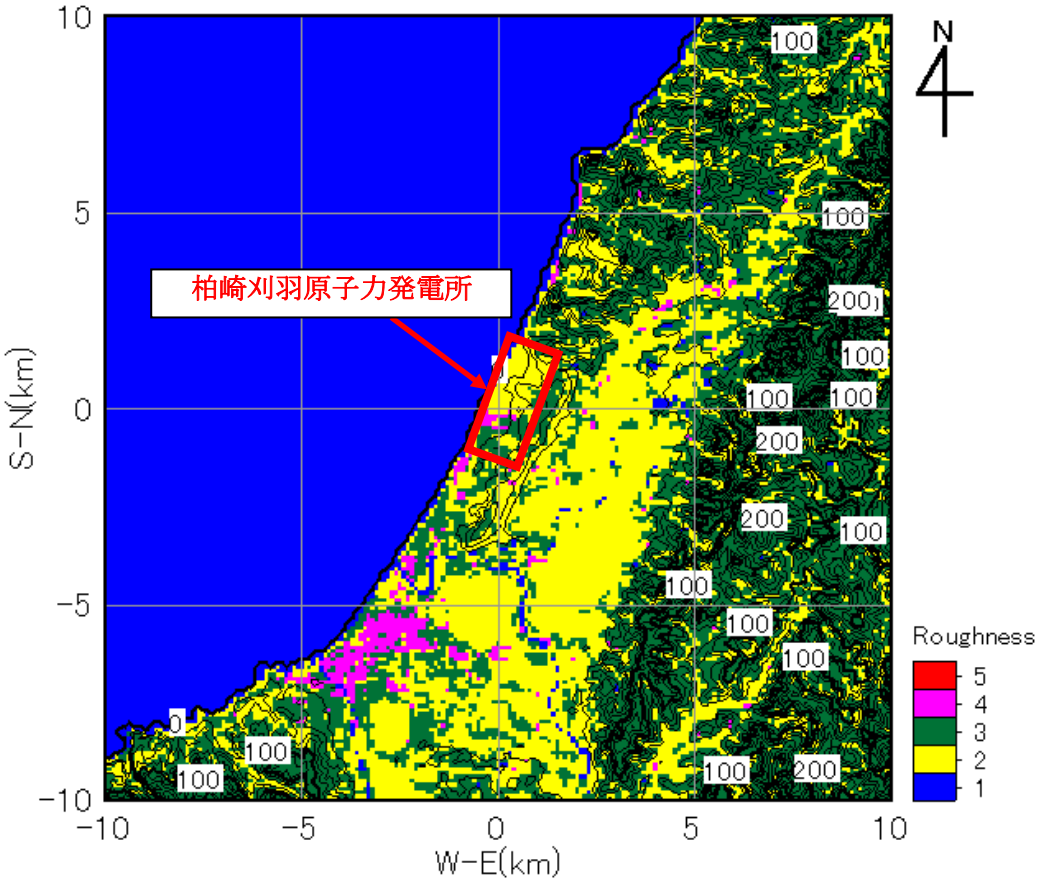


図 2.4.2.3　柏崎刈羽原子力発電所周辺の地表面粗度

2.4.3.　竜巻の移動方向の分析

柏崎刈羽原子力発電所の周辺地域を対象に竜巻の移動方向に関する分析を行う。なお，分析の対象とする地域は，JNES「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」に示されている竜巻集中地域を参考に，集中地域③（青森県日本海側～山形県），④（新潟県・富山県）及び⑤（石川県西部～福井県北西部）とした。

図 2.4.3.1 に竜巻集中地域④周辺で発生した竜巻の移動方向，図 2.4.3.2 に竜巻集中地域③，④及び⑤において過去に発生した竜巻の移動方向の頻度を分析した結果を示す。竜巻の移動方向の分析の結果，柏崎刈羽原子力発電所周辺で発生する竜巻は，

陸側から海側（東から西）に向かう竜巻は極めて少なく，発電所西方の海上から東方向（陸側）へ向かう方向が多い。

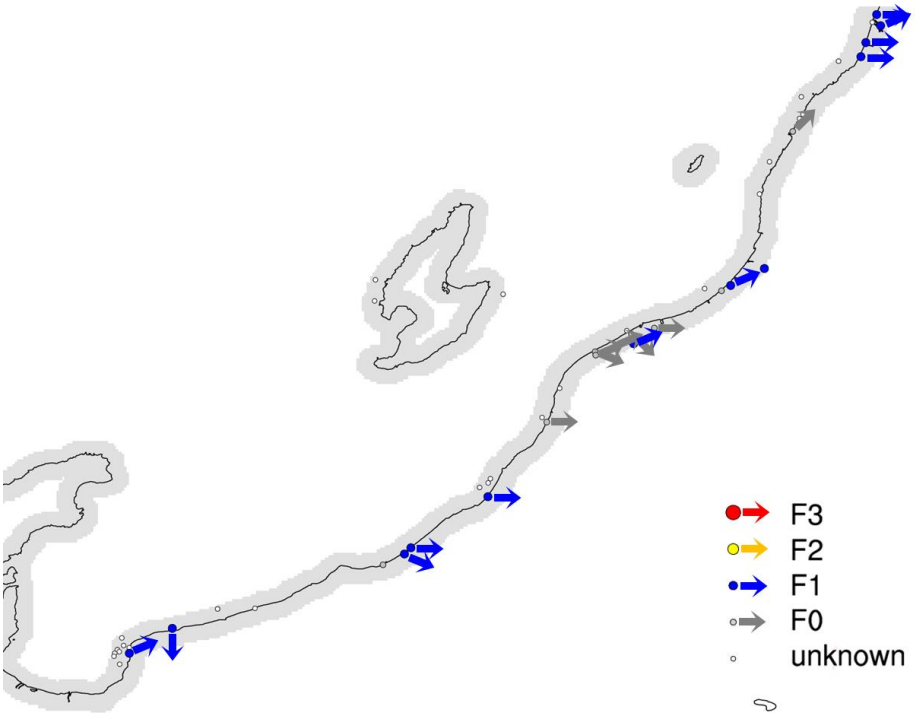


図2.4.3.1　竜巻集中地域④における竜巻移動方向（F0以上のみ）

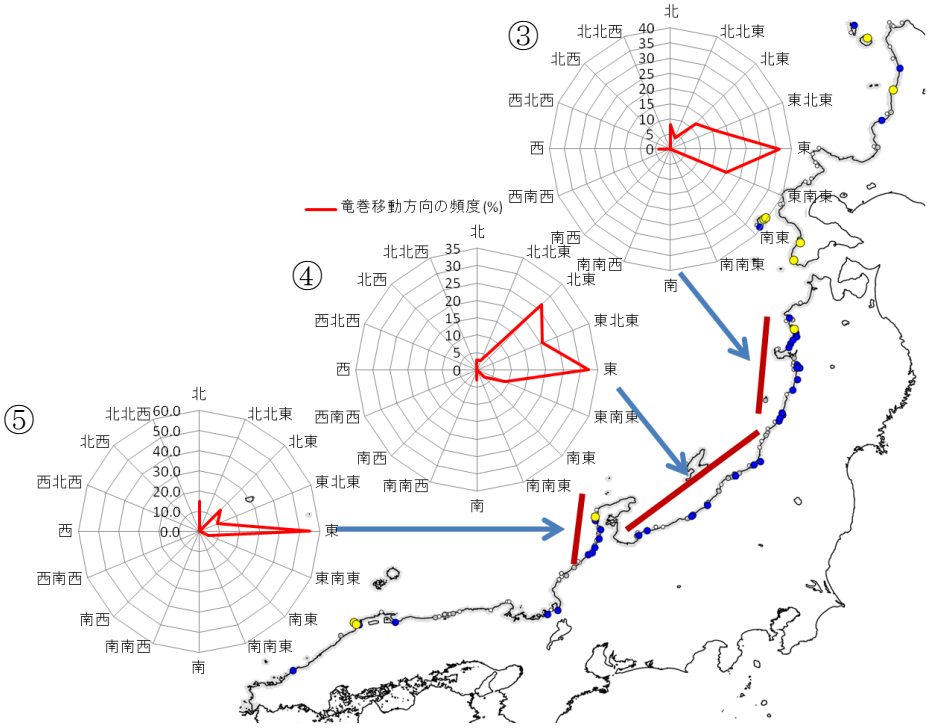


図 2.4.3.2　竜巻集中地域③，④及び⑤における竜巻移動方向の頻度

2.4.4. 竜巻風速の増幅に関する検討

(1) 地形起伏による竜巻増幅

柏崎刈羽原子力発電所周辺で発生する竜巻は，地形が平坦な海側から発電所敷地に進入する可能性が高く発電所敷地自体も平坦であるため竜巻が増幅することはないと考えられる。万が一発電所敷地外の東側（例えば刈羽村の平地）で竜巻が発生し，その竜巻が海側に向かって移動し，発電所敷地内に進入した場合，竜巻はなだらかな丘陵を通過する。この場合，丘陵がなだらかであるため，地形効果による竜巻の増幅はない。

(2) 地表面粗度による竜巻増幅

柏崎刈羽原子力発電所周辺では，発電所西方の海上から東方向（陸側）へ向かう竜巻の発生が極めて多く，竜巻が海上から陸側に移動する際には，地表面粗度の小さい海上から粗度の大きな陸上に上陸するため，粗度により減衰するものと考えられる。

2.4.5. 設計竜巻の最大風速 V_D

以上のことから，柏崎刈羽原子力発電所では，地形効果による竜巻の増幅を考慮しない。一方，将来的な気候変動による竜巻発生の不確実性を踏まえ，設計竜巻の最大風速 V_D は F3 の風速範囲の上限値 92m/s とする。

2.5. 設計竜巻の特性値

竜巻風速場としてフジタモデルを適用した場合の設計竜巻の特性値については，表 2.5.1 のとおり設定する。なお，最大気圧低下量と最大気圧低下率は，数値解析によって計算する。【添付資料 2.5】

表 2.5.1　設計竜巻の特性値

設計竜巻の最大風速 (V_D) [m/s]	移動速度 (V_T) [m/s]	最大接線風速 (V_{Rm}) [m/s]	最大接線風速半径 (R_m) [m/s]	最大気圧低下量 (ΔP_{max}) [hPa]	最大気圧低下率 ($(dp/dt)_{max}$) [hPa / s]
92	14	78	30	64	42

3. 竜巻影響評価

3.1. 評価概要

評価の概要は以下のとおりとする。

(1) 設計荷重（設計竜巻荷重及びその他の組み合わせ荷重）の設定
(2) 原子力発電所における飛来物に係る調査
(3) 飛来物防止対策
(4) 考慮すべき設計荷重に対する評価対象施設の構造健全性等の評価を行い，必要に応じ対策を行うことで安全機能が維持されることを確認

3.2. 評価対象施設

「1.2 竜巻影響評価の対象施設」に示したとおりとする。

3.3. 設計荷重の設定

3.3.1. 設計竜巻荷重の設定

設計竜巻の最大風速 V_D 等に基づき，「風圧力」，「気圧差による圧力」及び「飛来物の衝撃荷重」について，以下のとおり設定する。

(1) 設計竜巻による風圧力の設定

設計竜巻の水平方向の最大風速によって施設（屋根を含む）に作用する風圧(W_W)は「建築基準法施行令」及び「日本建築学会　建築物荷重指針・同解説」に準拠して，下式により算定する。

なお，ガスト影響係数(G)は，G=1.0，風力係数(C)は施設の形状や風圧力が作用する部位（屋根，壁等）に応じて設定する。

$W_W = q \cdot G \cdot C \cdot A$

q:設計用速度圧
G:ガスト影響係数(=1.0)
C:風力係数
A:施設の受圧面積

$q = (1/2) \cdot \rho \cdot V_D^2$

ρ:空気密度
V_D:設計竜巻の最大風速

ただし，竜巻による最大風速は，一般的には水平方向の風速として算定されるが，鉛直方向の風圧力に対してぜい弱と考えられる評価対象施設等が存在する場合には，フジタモデルの風速場による求まる鉛直方向の風速等に基づいて算出した鉛直方向の風圧力についても考慮する。

(2) 設計竜巻における気圧低下によって生じる評価対象施設等の内外の気圧差による圧力の設定

設計竜巻による評価対象施設等の内外の気圧差による圧力は，最大気圧低下量（ΔP_{max}）に基づき設定する。

①建屋・構造物等

建屋については，気圧差による圧力荷重が最も大きくなる「閉じた施設」を想定し，内外気圧差による圧力荷重 W_P を以下の式により設定する。

$W_P = \Delta P_{max} \cdot A$

ここで，ΔP_{max} ： フジタモデルにより求まる最大気圧低下量，A:施設の受圧面積

外部事象防護対象施設を内包する建屋・構築物について，影響評価を実施し，当該施設が破損した場合には安全機能維持について確認を行う。

②設備(系統，機器)

設備についても，上記と同様に圧力荷重 W_P を設定する。なお，非常用換気空調系のように外気と隔離されている区画の境界部等気圧差による圧力影響を受ける設備について，圧力影響により作用する応力が許容値内であるか確認し，許容値を上回る場合には安全機能維持への影響について確認する。

(3) 設計竜巻による飛来物が評価対象施設等に衝突する際の衝突荷重の設定

①柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉における飛来物に係る現地調査結果及び設計飛来物の選定について

柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉の竜巻影響評価における設計飛来物については，飛来物に係る現地調査結果及びガイドの表4.1に示されている設計飛来物の設定例を参照し設定する。

以下に柏崎刈羽原子力発電所にて実施した飛来物の現地調査の結果と，その結果を元に抽出した設計飛来物の設定の考え方を示す。【添付資料3.3】

a. 評価に用いる設計竜巻の特性

評価に用いる竜巻の速度は，92m/s とする。(表2.5.1参照)

b. 飛来物に対する考え方

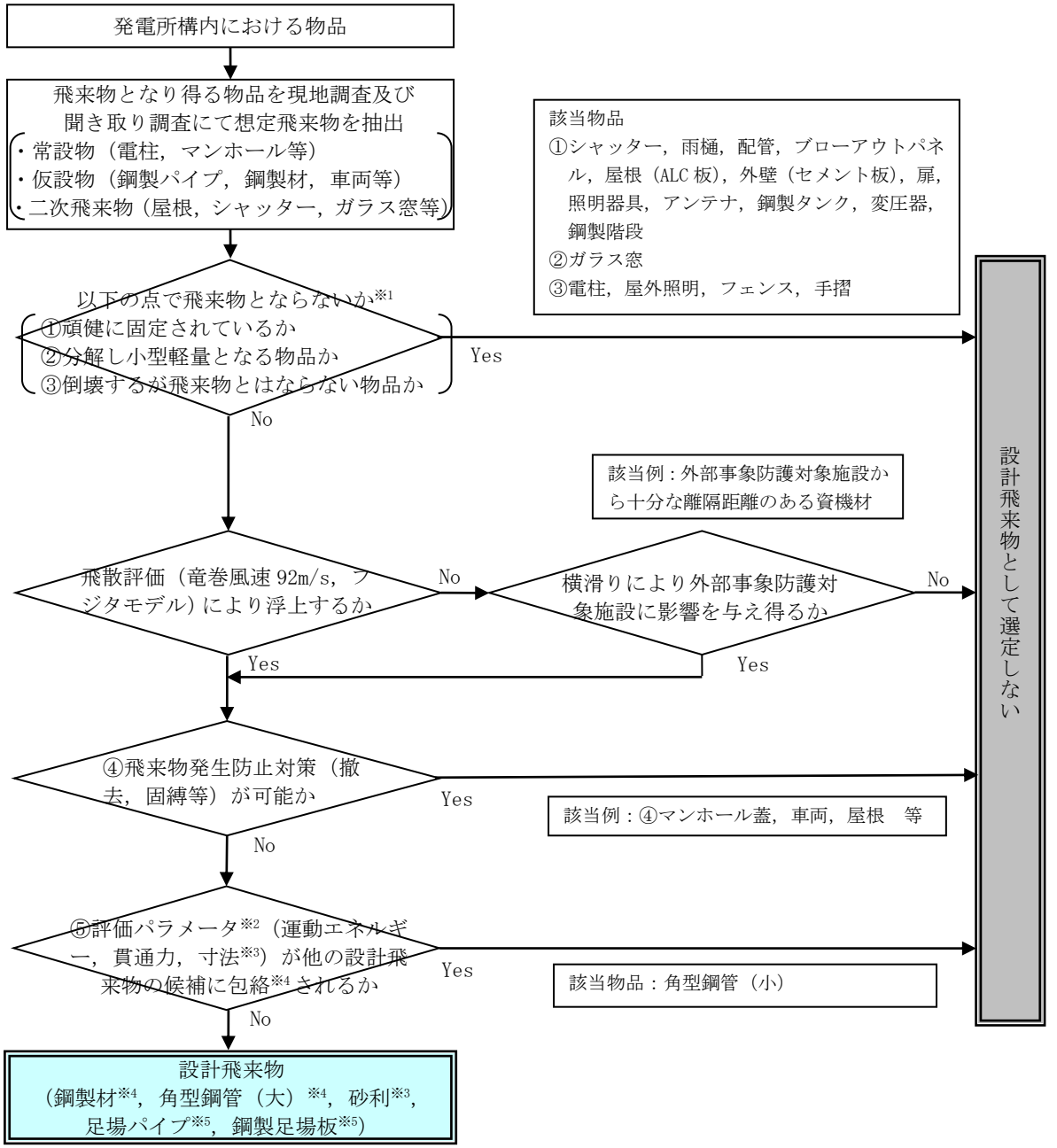
飛来物のうち，後述する設計飛来物（極小飛来物である砂利を除く。）より運動エネルギー及び貫通力（コンクリートの貫通限界厚さ，鋼板の貫通限界厚さ）が大のものについては，設置場所等に応じ固縛を行うことで飛散させないものとする。また，衝突時に評価対象施設等に与えるエネルギーが設計飛来物の運動エネルギーより小さいものについては，適切な飛散防止対策を行う。

c. 設計飛来物の選定

設計飛来物の選定フローを図 3.3.1.1，選定結果を表 3.3.1.1 に示す。

柏崎刈羽原子力発電所の飛来物に係る調査の結果，柏崎刈羽原子力発電所において飛来物となる可能性があるものから，浮き上がりの有無，運動エネルギー及び貫通力の大きさから，鋼製材，角型鋼管（大），足場パイプ及び鋼製足場板を設計飛来物として選定した。ただし，これらのうち飛散防止対策を講じるものは除く。選定した鋼製材のサイズ，重量については，現地調査及びガイドに基づいて，影響が大きい寸法，重量を設定した。

また，後述の非常用換気空調系ルーバへの防護対策として設置する竜巻防護ネットをすり抜ける可能性のある飛来物として砂利を選定した。なお，砂利のサイズは竜巻防護ネットをすり抜ける可能性があるサイズ（4cm）を考慮して設定した。



※1：過去の事例を参考に判定
※2：評価対象施設等に想定される損傷モードより，評価パラメータを設定
※3：非常用換気空調系ルーバへの防護対策として設置する竜巻防護ネットを通過する可能性があるものを抽出
※4：仮設足場に飛散防止対策を講じた場合を考慮し，運動エネルギー，貫通力が仮設足場材（足場パイプ，鋼製足場板）に次ぐ飛来物についても抽出
※5：仮設足場に飛散防止対策を講じた場合は除く。

図 3.3.1.1 設計飛来物の選定フロー

②設計飛来物の速度等の設定

設計竜巻による設計飛来物の最大水平速度($_{M}V_{Hmax}$)及び最大鉛直速度($_{M}V_{Vmax}$)は，(3) a.に示す竜巻風速92m/sにて,フジタモデルを適用し風速場の中での速度を算出した。また，設計飛来物の浮き上がり高さ及び飛散距離も同様に算出した。その結果を表3.3.1.1に示す。

a) 鋼製材，角型鋼管（大）及び砂利の影響高さ

ランキン渦モデルを採用している米国Regulatory Guide 1.76では，小さな飛来物（スチールパイプ等）はどの高さへの衝突も想定しているのに対し，重量物（自動車）に対しては9.1m（30feet）以下に影響を及ぼすこととしている。

一方，フジタモデルを適用した場合の鋼製材，角型鋼管（大）及び砂利の影響高さは，表3.3.1.1のとおり，設計飛来物の浮き上がり高さは，最大でも0.15mと僅かであるが，設計飛来物は（設計飛来物の寸法で最も長い辺は4.2m）回転して飛散することも想定される。

また，高所の建屋開口部等への影響を及ぼす可能性があるものには飛散防止対策を講じることから，設計飛来物は原則地上高10m迄影響を及ぼすものとする。

b) 足場パイプ及び鋼製足場板の影響高さ

足場パイプ及び鋼製足場板の浮き上がり高さは，表3.3.1.1のとおり，高所の建屋開口部等へ影響を及ぼす可能性があることから，どの高さへの衝突も想定するものとする。

飛来物の発生防止対策については，現地調査により抽出した飛来物や持ち込まれる物品の寸法，質量及び形状から飛来の有無を判断し，運動エネルギー，貫通力を考慮して，衝突時に建屋等又は竜巻防護対策設備に与えるエネルギーが設計飛来物（極小飛来物である砂利を除く。）によるものより大きく，外部事象防護対象施設を防護できない可能性があるものは固縛，固定又は外部事象防護対象施設からの離隔対策を実施し，確実に飛来物とならない運用とする。

表 3.3.1.1 柏崎刈羽原子力発電所における設計飛来物

飛来物の種類	砂利	鋼製材	角型鋼管（大）	足場パイプ	鋼製足場板
サイズ（m）	長さ×幅×奥行き 0.04×0.04×0.04	長さ×幅×奥行き 4.2×0.3×0.2	長さ×幅×奥行き 4×0.1×0.1	長さ×幅×奥行き 4×0.05×0.05	長さ×幅×奥行き 4×0.25×0.04
質量（kg）	0.2	135	28	11	14
最大水平速度 （m/s）	14	10	16	42	55
最大鉛直速度 （m/s）	7	7	7	38	18
浮き上がり高さ （m）	0.08	0.08	0.15	0.57+(148)※1, ※2	52+(148)※1, ※2
飛散距離（m）	18	9	20	261	373

※1：（　）内の値は飛来物初期高さ（地面からの物品の高さ）

※2：大湊側における最も高所の 5 号炉主排気筒頂部に設置されている状況を想定し設定

③設計竜巻荷重の組み合わせ

評価対象施設等の評価に用いる設計竜巻荷重は，設計竜巻による風圧力による荷重(W_W)，気圧差による荷重(W_p)，及び設計飛来物による衝撃荷重(W_M)を組み合わせた複合荷重として，以下の式により算出する。

$W_{T1}=W_p$

$W_{T2}=W_W+0.5\cdot W_p+W_M$

ここで，

W_{T1}，W_{T2}:設計竜巻による複合荷重

W_W:設計竜巻の風圧力による荷重

W_p:設計竜巻の気圧差による荷重

W_M:設計飛来物による衝撃荷重

なお，評価対象施設等にはW_{T1}及びW_{T2}の両荷重をそれぞれ作用させる。

3.3.2. 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定

設計竜巻荷重と組み合わせる荷重は，以下のとおりとする。

(1) 評価対象施設等に常時作用する荷重，運転時荷重等

評価対象施設等に作用する荷重として，自重等の常時作用する荷重，内圧等の運転時荷重を適切に組み合わせる。

(2) 竜巻以外の自然現象による荷重

竜巻は積乱雲や積雲に伴って発生する現象であり※1，積乱雲の発達時に竜巻と同時発生する可能性がある自然現象は，雷，雪，ひょう及び降水である。これらの自然現象の組み合わせにより発生する荷重は，以下のとおり設計竜巻荷重に包絡される。

なお，竜巻と同時に発生する自然現象については今後も継続的に新たな知見等の収集に取り組み，必要な事項については適切に反映を行う。

①雷

竜巻と雷が同時に発生する場合においても，雷によるプラントへの影響は，雷撃であるため雷による荷重は発生しない。

②雪

柏崎刈羽原子力発電所が立地する地域においては，冬期，竜巻が襲来する場合は竜巻通過前後に降雪を伴う可能性はあるが，上昇流の竜巻本体周辺では，竜巻通過時に雪は降らない。また，下降流の竜巻通過時や竜巻通過前に積もった雪の

大部分は竜巻の風により吹き飛ばされるため，雪による荷重は十分小さく設計竜巻荷重に包絡される。

③ひょう

ひょうは積乱雲から降る直径 5mm 以上の氷の粒※2 であり，仮に直径 10cm 程度の大型のひょうを想定した場合,その重量は約 0.5kg となる。10cm 程度のひょうの終端速度は 59m/s※3,運動エネルギーは約 0.9kJ であり,設計飛来物の運動エネルギーと比べ十分に小さく，ひょうの衝突による荷重は設計竜巻荷重に包絡される。

④降水

竜巻と降水が同時に発生する場合においても，雨水により屋外施設に荷重の影響を与えることはなく，また降雨による荷重は十分小さいため，設計竜巻荷重に包絡される。

※1：雷雨とメソ気象　大野久雄，東京堂出版
※2：気象庁ホームページ
※3：一般気象学　小倉義光，東京大学出版会

(3) 設計基準事故時荷重

外部事象防護対象施設は，設計竜巻によって安全機能を損なわない設計とするため，設計竜巻は原子炉冷却材喪失事故等の設計基準事故の起因とはならないことから，設計竜巻と設計基準事故は独立事象となる。

設計竜巻と設計基準事故が同時に発生する頻度は十分小さいことから，設計基準事故時荷重と設計竜巻との組み合わせは考慮しない。

なお，評価対象施設等のうち設計基準事故時荷重が生じ，竜巻による風荷重等の影響を受ける屋外設備としては，軽油タンク及び非常用ディーゼル発電機燃料移送系が考えられるが，設計基準事故時においても，運転時の系統内圧力及び温度と変わらないため，設計基準事故により考慮すべき荷重はなく，竜巻と設計基準事故時荷重の組み合わせは考慮しない。

3.4. 評価対象施設等の設計方針

評価対象施設等については，以下の設計方針のとおり，設計荷重に対してその構造健全性を維持する設計とする。評価対象施設等以外の竜巻によってその安全機能が損なわれないことを確認する必要がある施設については，竜巻及びその随伴事象に対して機能維持する，若しくは，竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して，代替設備により必要な機能を確保（例えば，外部電源喪失時における非常用ディーゼル発電機からの受電）すること，安全上支障のない期間に修復（例えば，気圧差により開放し

たブローアウトパネルに対する閉止措置）すること等の対応が可能な設計とすることにより，竜巻によってその安全機能が損なわれないことを確認する必要がある施設の安全機能を損なわない設計とする。

(1) 許容限界

建屋・構築物の設計において，設計飛来物の衝突による貫通及び裏面剥離発生の有無の評価については，貫通及び裏面剥離が発生する限界厚さと部材の最小厚さを比較することにより行う。さらに，設計荷重により，発生する変形又は応力が以下の法令，規格，基準，指針類等に準拠し算定した許容限界を下回る設計とする。

・建築基準法
・日本工業規格
・日本建築学会及び土木学会等の基準・指針類
・原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987（日本電気協会）
・震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針（日本建築防災協会）
・原子力エネルギー協会（NEI）の基準・指針類等

系統及び機器の設計において，設計飛来物の衝突による貫通の有無の評価については，貫通が発生する限界厚さと部材の最小厚さを比較することにより行う。設計飛来物が貫通することを考慮する場合には，設計荷重に対して防護対策を考慮した上で，系統及び機器に発生する応力が以下の規格，基準及び指針類に準拠し算定した許容応力度等に基づく許容限界を下回る設計とする。

・日本工業規格
・日本機械学会の基準・指針類
・原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987（日本電気協会）等

(2) 屋外設備（建屋含む）

屋外設備は，設計荷重に対して，安全機能が維持される設計とし，必要に応じて施設の補強，非常用ディーゼル発電機燃料移送系防護板の設置等の防護対策を講じる方針とする。

なお，外殻となる施設等による防護機能が期待できる屋内設備は，建屋又は構築物による防護により，設計荷重に対して安全機能を損なわない方針とする。

①軽油タンク

軽油タンクは，風圧力による荷重，気圧差による荷重，設計飛来物（鋼製材，角型鋼管（大），砂利，足場パイプ，鋼製足場板のことをいう。以下，(2)において同じ。）による衝撃荷重，軽油タンクに常時作用する荷重，運転時荷重に対して構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

②非常用ディーゼル発電機燃料移送系

非常用ディーゼル発電機燃料移送系のポンプ，配管及び弁は，風圧力による荷重，気圧差による荷重，非常用ディーゼル発電機燃料移送系のポンプ，配管及び弁に常時作用する荷重，運転時荷重に対して構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

また，設計飛来物に対して非常用ディーゼル発電機燃料移送系防護板の設置等の防護対策を行う。

③原子炉建屋，タービン建屋 海水熱交換器区域，コントロール建屋，廃棄物処理建屋

原子炉建屋，タービン建屋 海水熱交換器区域，コントロール建屋，廃棄物処理建屋は，風圧力による荷重，気圧差による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重，各建屋に常時作用する荷重，運転時荷重に対して，構造骨組の構造健全性が維持されるとともに，屋根，壁，開口部（扉類）の破損により当該建屋内の外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。また，設計飛来物の衝突時においても，貫通及び裏面剥離の発生により当該建屋内の外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。

外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備に関する方針は(4)に示す。

(3) 外気との接続がある設備

外気との接続がある設備は，設計荷重に対して，安全機能が維持される設計とし，必要に応じて竜巻防護ネットの設置等の防護対策を講じる方針とする。

①非常用ディーゼル発電機吸気系

非常用ディーゼル発電機吸気系は，原子炉建屋に内包されていることを考慮すると，風圧力による荷重は作用しない。非常用ディーゼル発電機吸気系の建屋開口部は鋼製材，角型鋼管（大），砂利の影響高さ地上 10m より高いこと，足場パイプ，鋼製足場板に対しては竜巻防護ネットの設置等の防護対策を行うことを考慮すると，設計飛来物による衝撃荷重は作用しない。

気圧差による荷重に対して，非常用ディーゼル発電機吸気系の構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

②非常用換気空調系（非常用ディーゼル発電機電気区域換気空調系（非常用ディーゼル発電機非常用送風機含む），中央制御室換気空調系，コントロール建屋計測制御電源盤区域換気空調系，海水熱交換器区域換気空調系）

非常用換気空調系は，各建屋に内包されていることを考慮すると，風圧力による荷重は作用しない。非常用換気空調系の地上 10m 以下の建屋開口部には設計飛来物（極小飛来物である砂利を除く。）の衝突に対する竜巻防護ネットの設置等の防護対策を行うこと，地上 10m より高い建屋開口部には足場パイプ，鋼製足場板の衝突

に対する竜巻防護ネットの設置等の防護対策を行うことを考慮すると，砂利を除く設計飛来物による衝撃荷重は作用しない。なお，砂利による衝撃荷重に対して，安全機能を損なわない設計とする。

(4) 外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備

外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備は，設計荷重に対して，安全機能が維持される設計とし，必要に応じて施設の補強等の防護対策を講じる方針とする。

①原子炉建屋 1 階 非常用ディーゼル発電機室設置設備，原子炉建屋 4 階設置設備（使用済燃料プール（使用済燃料貯蔵ラックを含む），燃料プール注入ライン逆止弁），タービン建屋 海水熱交換器区域 1 階 非常用電気品室（A）設置設備，タービン建屋 海水熱交換器区域 1 階 階段室設置設備等

原子炉建屋 1 階 非常用ディーゼル発電機室設置設備，タービン建屋海水熱交換器区域 1 階 非常用電気品室(A)設置設備，タービン建屋海水熱交換器区域 1 階 階段室設置設備等は，設計飛来物の衝突により，開口部の開放又は開口部建具の貫通が発生することを考慮し，開口部建具の補強等の防護対策を行う。

原子炉建屋 4 階設置設備（使用済燃料プール（使用済燃料貯蔵ラックを含む），燃料プール注入ライン逆止弁）の区画の建屋開口部は鋼製材，角型鋼管（大），砂利の影響高さ地上 10m より高いこと，足場パイプ，鋼製足場板に対しては竜巻防護ネットの設置等の防護対策を行うことを考慮すると，設計飛来物による衝撃荷重は作用しない。

(5) 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設

設計荷重に対する当該施設の健全性評価を行い，必要に応じて施設の補強等の防護対策を講じる方針とする。

①主排気筒，5 号炉主排気筒

主排気筒は，設置高さが地上 10m より高いことを考慮すると，鋼製材，角型鋼管（大），砂利による衝撃荷重は作用しない。また，足場パイプ，鋼製足場板による衝撃荷重及び風圧力による荷重に対して，倒壊により外部事象防護対象施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

5 号炉主排気筒は，風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対して，倒壊により外部事象防護対象施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

②5 号炉タービン建屋，サービス建屋

5 号炉タービン建屋及びサービス建屋は，風圧力による荷重，気圧差による荷重，設計飛来物による衝撃荷重に対して，倒壊により外部事象防護対象施設へ波及的影

響を及ぼさない設計とする。

③原子炉建屋天井クレーン，燃料交換機

原子炉建屋天井クレーン，燃料交換機を内包する原子炉建屋の開口部は，鋼製材，角型鋼管（大），砂利の影響高さ地上 10m より高いこと，足場パイプ，鋼製足場板に対しては竜巻防護ネットの設置等の防護対策を行うことにより，倒壊により外部事象防護対象施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

④非常用ディーゼル発電機排気管，非常用ディーゼル発電機排気消音器，ミスト管

非常用ディーゼル発電機排気管，非常用ディーゼル発電機排気消音器，ミスト管は，設置高さが地上 10m より高いことを考慮すると，鋼製材，角型鋼管（大），砂利による衝撃荷重は作用しない。足場パイプ，鋼製足場板の衝突による損傷を考慮して，安全上支障のない期間での補修が可能な設計とすることにより，非常用ディーゼル発電機に波及的影響を及ぼさない設計とする。また，風圧力による荷重及び気圧差による荷重に対して，構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

⑤竜巻随伴事象の影響により外部事象防護対象施設の機能喪失させる可能性がある施設（溢水により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性のある設備，火災発生により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性がある設備，外部電源）

竜巻随伴事象の影響により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性がある施設の設計方針は，3.5 に記載する。

3.5. 竜巻随伴事象に対する評価

竜巻随伴事象は，過去の竜巻被害状況及び柏崎刈羽原子力発電所のプラント配置から，想定される事象として，火災，溢水及び外部電源喪失を抽出し，事象が発生した場合の影響評価を行い外部事象防護対象施設が安全機能を損なわれないことを確認した。【添付資料 3.4】

(1) 火災

竜巻随伴事象として，竜巻による飛来物が建屋開口部付近の発火性又は引火性物質を内包する機器，屋外の危険物タンク等に飛来物が衝突する場合の火災が想定される。

建屋内については，外部事象防護対象施設を設置している区画の開口部が，地上高 10m より高い場合には，設計飛来物のうち足場パイプ，鋼製足場板の衝突に対する竜巻防護ネットの設置等の防護対策を行うこと，地上 10m 以下の場合には設計飛来物の衝突に対する竜巻防護ネットの設置等の防護対策を行うことから，飛来物が侵入することはない。

建屋外については，屋外にある危険物タンク等からの火災がある。火災源と外部事象防護対象施設の位置関係を踏まえて外部火災影響評価において，航空機墜落や敷地内の危険物タンク火災が発生した場合においても，安全上重要な設備が収納されている原子炉建屋，コントロール建屋や屋外安全系機器に影響を及ぼさないことを確認している。

以上より，竜巻による火災により外部事象防護対象施設の安全機能に影響を与えることはない。

(2) 溢水

竜巻随伴事象として，竜巻による飛来物が建屋開口部付近の溢水源に衝突する場合，屋外タンクに飛来物が衝突する場合の溢水が想定される。

建屋内については，外部事象防護対象施設を設置している区画の開口部が，地上高10m より高い場合には，設計飛来物のうち足場パイプ，鋼製足場板の衝突に対する竜巻防護ネットの設置等の防護対策を行うこと，地上 10m 以下の場合には設計飛来物の衝突に対する竜巻防護ネットの設置等の防護対策を行うことから，飛来物が侵入することはない。

内部溢水影響評価において，地震時の屋外タンクの破損を想定し，原子炉建屋やコントロール建屋の水密扉や建屋隙間部の止水措置等により，地震起因の溢水が安全系機器に影響を及ぼさないことを確認している。

竜巻による飛来物で屋外タンク等が損傷して発生する溢水に対しては，上記に包絡されることから，外部事象防護対象施設の安全機能維持に影響を与えることはない。

以上より，竜巻による溢水により外部事象防護対象施設の安全機能に影響を与えることはない。

(3) 外部電源喪失

設計竜巻，設計竜巻と同時に発生する雷又はダウンバースト等の影響により外部電源喪失が発生する場合については，設計竜巻に対して非常用ディーゼル発電機の構造健全性を維持することにより，外部電源喪失の影響がなく外部事象防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。

1.1 重大事故等対処施設に対する考慮について

第43条の要求を踏まえ，設計竜巻によって，設計基準対象施設の安全機能と重大事故等対処設備の機能が同時に損なわれることがないことを確認するとともに，重大事故等対処設備の安全機能が喪失した場合においても，位置的分散又は頑健性のある外殻となる建屋による防護に期待できる代替手段等により必要な安全機能を維持できることを確認する。

重大事故等対処設備の機能維持は，以下の方針に従い評価を実施する。

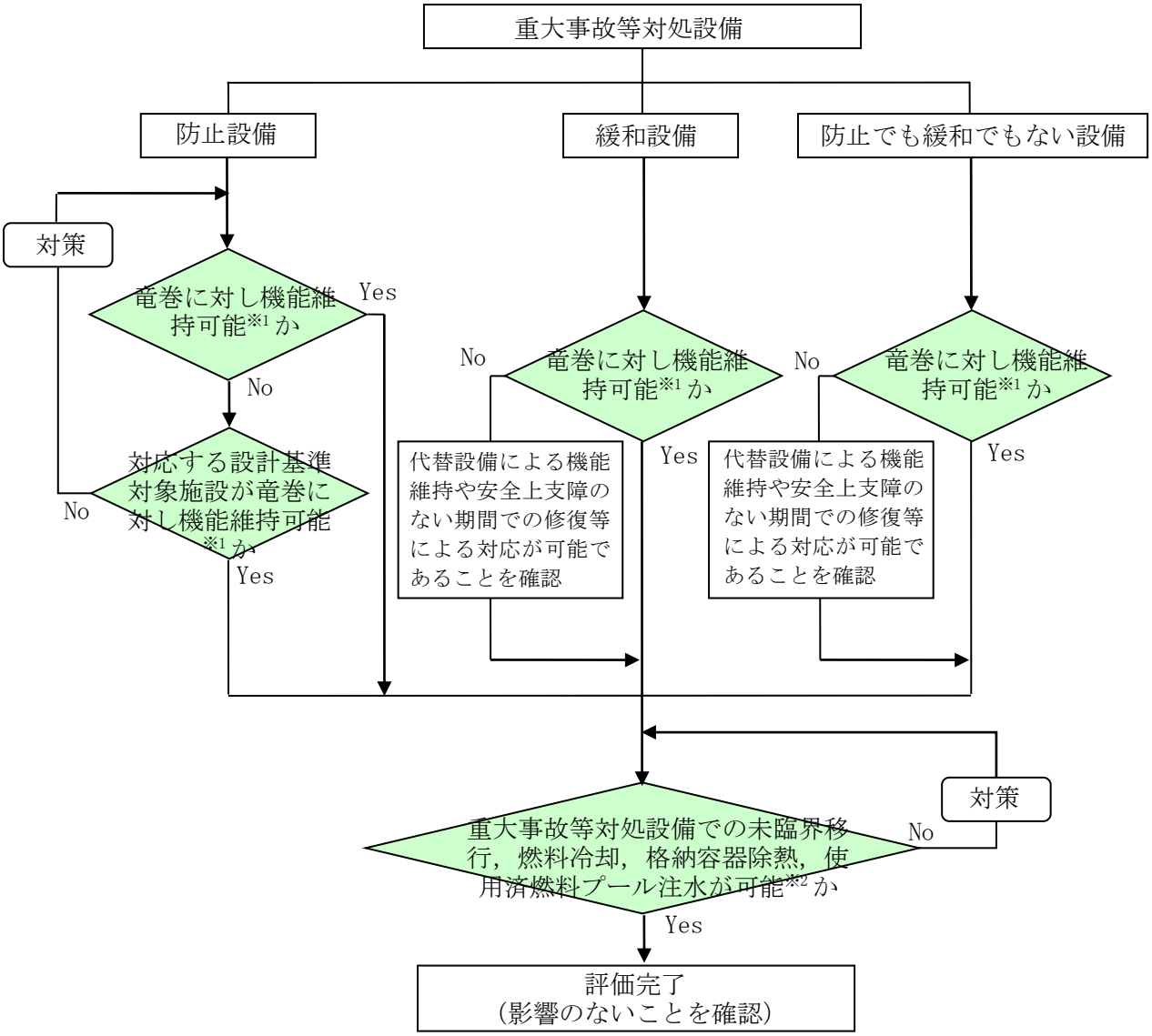
(1) 重大事故防止設備は，竜巻によって，対応する設計基準対象施設の安全機能と同時にその機能が損なわれるおそれのないこと

(2) 重大事故等対処設備であって，重大事故防止設備でない設備は，代替設備若しくは安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であること

(3) 竜巻が発生した場合においても，重大事故等対処設備によりプラント安全性に関する主要な機能（未臨界移行機能，燃料冷却機能，格納容器除熱機能，使用済燃料プール注水機能）が維持できること（竜巻により重大事故等対処設備と設計基準対象施設の機能が同時に損なわれることはないが，安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であることを確認する）

評価フローを図1.1.1，評価結果を表1.1.1に示す。また，図1.1.2に竜巻襲来時における重大事故等対処設備と代替手段の3点での位置的分散による安全機能維持の例（低圧代替注水系の場合）を示す。

表1.1.1より，設計竜巻によって，重大事故等対処施設の安全機能が喪失した場合においても，位置的分散又は頑健性のある外殻となる建屋による防護に期待できる代替手段等により必要な安全機能を維持できることを確認した。



※1：屋内設備については，当該設備を内包する建屋（原子炉建屋，タービン建屋，コントロール建屋，廃棄物処理建屋）の影響評価を実施し，安全機能が維持されるかを確認。
※2：竜巻により重大事故等対処設備と設計基準対象施設が同時に損なわれることはないが，安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であることを確認。

図 1.1.1 竜巻に対する重大事故等対処設備の評価フロー

防護上の観点又は機密に係わる事項を含む為，公開できません

図 1.1.2 竜巻襲来時における代替手段による安全機能維持の例
（低圧代替注水系の場合）

表1.1.1　竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(1/5)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所※	竜巻	
					評価	防護方法
第37条（重大事故等の拡大の防止等）	－		－	－	－	－
第38条（重大事故等対処施設の地盤）	－		－	－	－	－
第39条（地震による損傷の防止）	－		－	－	－	－
第40条（津波による損傷の防止）	－		－	－	－	－
第41条（火災による損傷の防止）	－		－	－	－	－
第42条（特定重大事故等対処施設）	特定重大事故等対処施設		→申請範囲外		－	－
第43条（重大事故等対処設備）	ホイールローダ		防止でも緩和でもない設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置
第44条（緊急停止失敗時に発電用原子炉を未臨界にするための設備）	ATWS緩和設備（代替制御棒挿入機能）		防止設備	R/B	○	建屋内
	制御棒，制御棒駆動機構（水圧駆動），制御棒駆動系水圧制御ユニット		防止設備	R/B	○	建屋内
	ATWS緩和設備（代替冷却材再循環ポンプ・トリップ機能）		防止設備	R/B	○	建屋内
	ほう酸水注入系		防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	自動減圧系の起動阻止スイッチ		→46条に記載		－	－
第45条（原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧時に発電用原子炉を冷却するための設備）	高圧代替注水系		防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	原子炉隔離時冷却系		（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
	高圧炉心注水系		（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
	復水貯蔵槽，サプレッション・チェンバ		→56条に記載		－	－
	ほう酸水注入系		→44条に記載		－	－
第46条（原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するための設備）	逃がし安全弁 （逃がし弁機能用及び自動減圧機能用アキュムレータ含む）		防止設備	R/B	○	建屋内
	代替自動減圧機能		防止設備	R/B，C/B	○	建屋内
	自動減圧系の起動阻止スイッチ		防止設備	C/B	○	建屋内
	可搬型直流電源設備		→57条に記載		－	－
	AM用切替装置（SRV）		防止設備	C/B	○	建屋内
	逃がし安全弁用可搬型蓄電池		防止設備	R/B	○	建屋内
	高圧窒素ガスボンベ(供給系配管含む)		防止設備	R/B	○	建屋内
	高圧炉心注水系注入隔離弁		（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
	原子炉建屋ブローアウトパネル		防止設備	屋外R/B廻り	○	影響なし
第47条（原子炉冷却材圧力バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備）	低圧代替注水系（常設）〔復水移送ポンプ〕		防止設備・緩和設備	Rw/B	○	建屋内
	復水貯蔵槽		→56条に記載		－	－
	低圧代替注水系（可搬型）〔可搬型代替注水ポンプ（A－2級）〕		防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置及び代替設備（低圧代替注水系（常設））
	防火水槽，淡水貯水池		→56条に記載		－	－
	低圧代替注水系（可搬型）（常設箇所）〔接続口，配管等〕		防止設備・緩和設備	屋外R/B廻り	○	分散配置及び代替設備（低圧代替注水系（常設））
	低圧注水	残留熱除去系ポンプ	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		残留熱除去系配管，弁等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		サプレッション・チェンバ	→56条に記載		－	－
	原子炉補機冷却	原子炉補機冷却系ポンプ	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却系配管，弁等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
	原子炉補機冷却系		→48条に記載		－	－
	非常用取水設備 ［海水貯留堰，取水路等 ］		→その他の設備に記載		－	－

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる
　又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準対象施設が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）
　又は各外部事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備，防止でも緩和でもない設備）
－：他の項目にて整理

※　重大事故等対処設備（SA設備），原子炉建屋（R/B），コントロール建屋（C/B），廃棄物処理建屋（Rw/B）

表1.1.1　竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(2/5)

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	保管・設置箇所※	竜巻	
				評価	防護方法
第48条（最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備）	代替原子炉補機冷却系（可搬型）〔熱交換器ユニット，大容量送水車（熱交換器ユニット用）等〕	防止設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置及び代替設備（原子炉補機冷却系）
	代替原子炉補機冷却系（常設箇所）〔接続口，配管等〕	防止設備	屋外T/B廻り	○	分散配置及び代替設備（原子炉補機冷却系）
	耐圧強化ベント系（W/W及びD/W）〔ボンベ，配管，弁等〕	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	格納容器圧力逃がし装置［フィルタベント］	→50条に記載（うち，防止設備）		－	－
	低圧代替注水系（可搬型）〔可搬型代替注水ポンプ（A－2級）〕	→56条に記載		－	－
	防火水槽，淡水貯水池	→56条に記載		－	－
	残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）	→47条に記載		－	－
	残留熱除去系（格納容器スプレイ冷却モード，サプレッション・チェンバ・プール水冷却モード）	→49条に記載		－	－
	原子炉補機冷却系	（設計基準対象施設）	R/B T/B	○	建屋内
	非常用取水設備［海水貯留堰，取水路等］	→その他の設備に記載		－	－
第49条（原子炉格納容器内の冷却等のための設備）	代替格納容器スプレイ冷却系（常設）〔復水移送ポンプ〕	防止設備・緩和設備	Rw/B	○	建屋内
	復水貯蔵槽	→56条に記載		－	－
	代替格納容器スプレイ冷却系（可搬型）〔可搬型代替注水ポンプ（A－2級）〕	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置及び代替設備（代替格納容器スプレイ冷却系（常設））
	防火水槽，淡水貯水池	→56条に記載		－	－
	代替格納容器スプレイ冷却系（常設箇所）〔接続口，配管等〕	防止設備・緩和設備	屋外R/B廻り	○	分散配置及び代替設備（代替格納容器スプレイ冷却系（常設））
	残留熱除去系（格納容器スプレイ冷却モード，サプレッション・チェンバ・プール水冷却モード）	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
	サプレッション・チェンバ	→56条に記載		－	－
	原子炉補機冷却系	→48条に記載		－	－
	非常用取水設備［海水貯留堰，取水路］	→その他の設備に記載		－	－
第50条（原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備）	格納容器圧力逃がし装置：フィルタ装置，よう素フィルタ，フィルタベント遮蔽壁，配管等	防止設備・緩和設備	R/B・屋外	○	影響なし
	格納容器圧力逃がし装置：ラプチャーディスク	緩和設備	屋外	○	影響なし
	格納容器圧力逃がし装置：ドレン移送ポンプ，ドレンタンク	防止設備・緩和設備	屋内・屋外	○	影響なし
	格納容器圧力逃がし装置：遠隔手動弁操作設備・遠隔空気駆動弁操作用ボンベ	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	格納容器圧力逃がし装置：スクラバ水pH制御設備	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	代替設備（代替循環冷却）
	格納容器圧力逃がし装置：可搬型窒素供給装置	→52条に記載		－	－
	格納容器圧力逃がし装置：ホース，接続口	防止設備・緩和設備	屋外	○	代替設備（代替循環冷却）
	格納容器圧力逃がし装置：低圧代替注水系（可搬型）〔可搬型代替注水ポンプ（A－2級）〕	→56条に記載		－	－
	格納容器圧力逃がし装置：防火水槽，淡水貯水池	→56条に記載		－	－
	代替循環冷却：復水移送ポンプ	緩和設備	Rw/B	○	建屋内
	代替循環冷却：残留熱除去系（熱交換器等）	緩和設備	R/B	○	建屋内
	代替循環冷却：代替原子炉補機冷却系（可搬型）〔熱交換器ユニット，大容量送水車（熱交換器ユニット用）等〕	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置及び代替設備（格納容器圧力逃がし装置）
	代替循環冷却：代替循環冷却系（常設箇所）〔配管，弁等〕	緩和設備	R/B,T/B,Rw/B,C/B	○	建屋内
	代替循環冷却：サプレッション・チェンバ	→56条に記載		－	－
	代替循環冷却：非常用取水設備［海水貯留堰，取水路等］	→その他の設備に記載		－	－
第51条（原子炉格納容器下部の溶融炉心を冷却するための設備）	格納容器下部注水系（常設）〔復水移送ポンプ〕	緩和設備	Rw/B	○	建屋内
	コリウムシールド	緩和設備	R/B	○	建屋内
	復水貯蔵槽	→56条に記載（うち，緩和設備）		－	－
	格納容器下部注水系（可搬型）〔可搬型代替注水ポンプ（A－2級）〕	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置及び代替設備（格納容器下部注水系（常設））
	防火水槽，淡水貯水池	→56条に記載		－	－
	格納容器下部注水系（常設）（常設箇所）［配管，弁等］	緩和設備	R/B	○	建屋内
	格納容器下部注水系（可搬型）（常設箇所）〔接続口，配管等〕	緩和設備	屋外R/B廻り	○	分散配置及び代替設備（格納容器下部注水系（常設））
	ほう酸水注入系	→44条に記載		－	－
	高圧代替注水系	→45条に記載		－	－
	低圧代替注水系（常設），（可搬型）	→47条に記載		－	－

○:各外部事象に対し安全機能を維持できる
　又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準対象施設が各外部事象に対し安全機能を維持できる(防止設備)
　又は各外部事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備，防止でも緩和でもない設備)
－:他の項目にて整理

※　重大事故等対処設備（SA設備），タービン建屋（T/B），原子炉建屋（R/B），廃棄物処理建屋（Rw/B），コントロール建屋（C/B）

表1.1.1　竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(3/5)

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	保管・設置箇所※2	竜巻	
				評価	防護方法
第52条（水素爆発による原子炉格納容器の破損を防止するための設備）	不活性ガス系	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
	格納容器圧力逃がし装置	→50条に記載		－	－
	格納容器圧力逃がし装置［フィルタ装置出口放射線モニタ，フィルタ装置水素濃度計］	→58条に記載		－	－
	格納容器圧力逃がし装置［ホース，接続口］	→50条に記載		－	－
	低圧代替注水系（可搬型）［可搬型代替注水ポンプ（A－2級）］	→56条に記載		－	－
	防火水槽，淡水貯水池	→56条に記載		－	－
	可搬型窒素供給装置	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	代替設備（耐圧強化ベント系，代替循環冷却）
	サプレッション・チェンバ	緩和設備	R/B	○	建屋内
	耐圧強化ベント系（W/W）	→48条に記載		－	－
	耐圧強化ベント系［耐圧強化ベント系放射線モニタ，フィルタ装置水素濃度計］	→58条に記載		－	－
	水素濃度及び酸素濃度の監視 ［格納容器内水素濃度（SA），格納容器内水素濃度，格納容器内酸素濃度］	緩和設備	R/B	○	建屋内
第53条（水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備）	静的触媒式水素再結合器，静的触媒式水素再結合器動作監視装置	緩和設備	R/B	○	外殻となる建屋が開口する場合には同機能は不要
	原子炉建屋水素濃度※1	緩和設備	R/B	○	外殻となる建屋が開口する場合には同機能は不要
	原子炉建屋原子炉区域	→その他の設備に記載		－	－
第54条（使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備）	燃料プール代替注水系（可搬型）［可搬型代替注水ポンプ（A－1級），可搬型代替注水ポンプ（A－2級）］	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	代替設備（残留熱除去系及び燃料プール冷却浄化系）
	燃料プール代替注水系（可搬型）（常設箇所）［接続口，配管等］	防止設備・緩和設備	屋外R/B廻り	○	代替設備（残留熱除去系及び燃料プール冷却浄化系）
	燃料プール代替注水系（常設箇所）［常設スプレイヘッダ，配管，弁等］	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	可搬型スプレイヘッダ	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	防火水槽，淡水貯水池	→56条に記載		－	－
	原子炉建屋放水設備 ［大容量送水車（原子炉建屋放水設備用），放水砲］	→55条に記載		－	－
	使用済燃料貯蔵プール水位・温度（SA・SA広域）	防止設備・緩和設備	R/B	○	設計荷重に対して影響ないことを確認
	使用済燃料貯蔵プール放射線モニタ（高レンジ・低レンジ）	防止設備・緩和設備	R/B	○	設計荷重に対して影響ないことを確認
	使用済燃料貯蔵プール監視カメラ（使用済燃料貯蔵プール監視カメラ用空冷装置を含む）	防止設備・緩和設備	R/B	○	設計荷重に対して影響ないことを確認
	燃料プール冷却浄化系	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替原子炉補機冷却系（可搬型）［熱交換器ユニット，大容量送水車（熱交換器ユニット用）等］	防止設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置及び代替設備（原子炉補機冷却系）
	代替原子炉補機冷却系（常設箇所）［接続口，配管等］	→48条に記載		－	－
	非常用取水設備 ［海水貯留堰，取水路等］	→その他の設備に記載		－	－
第55条（工場等外への放射性物質の拡散を抑制するための設備）	原子炉建屋放水設備 ［大容量送水車（原子炉建屋放水設備用），放水砲等］	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	補修を実施
	海洋拡散抑制設備 ［放射性物質吸着材］	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	補修を実施
	海洋拡散抑制設備 ［汚濁防止膜］	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	補修を実施
	海洋拡散抑制設備 ［小型船舶（汚濁防止膜設置用）］	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	補修を実施
	航空機燃料火災への泡消火 ［泡原液搬送車，泡原液混合装置］	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	補修を実施
第56条（重大事故等の収束に必要となる水の供給設備）	復水貯蔵槽	防止設備・緩和設備	Rw/B	○	建屋内
	サプレッション・チェンバ	緩和設備	R/B	○	建屋内
	ほう酸水注入系貯蔵タンク	→44条に記載		－	－
	防火水槽	－（代替淡水源）	屋外(地下埋設)	○	影響なし(地下)
	淡水貯水池	－（代替淡水源）	屋外	○	代替設備（復水貯蔵槽）
	大容量送水車（海水取水用）	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	代替設備（淡水貯水池）
	可搬型代替注水ポンプ（A－2級）	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	代替設備（復水貯蔵槽及びサプレッション・チェンバ）
	非常用取水設備 ［海水貯留堰，取水路等］	→その他の設備に記載		－	－

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる
　又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準対象施設が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）
　又は各外部事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備，防止でも緩和でもない設備）
－：他の項目にて整理

※1　計装設備については計装ループ全体を示すため要素名を記載

※2　重大事故等対処設備（SA設備），原子炉建屋（R/B），廃棄物処理建屋（Rw/B）

表1.1.1　竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(4/5)

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	保管・設置箇所※	竜巻	
				評価	防護方法
第57条（電源設備）	常設代替交流電源設備〔第一ガスタービン発電機一式〕	防止設備・緩和設備	屋外T/B廻り	○	分散配置及び代替設備（非常用交流電源設備）
	常設代替交流電源設備〔タンクローリ（16kL）〕	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置及び代替設備（軽油タンク）
	可搬型代替交流電源設備〔電源車〕	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置及び代替設備（非常用交流電源設備）
	可搬型代替交流電源設備（常設箇所）〔電源車接続箇所〕	防止設備・緩和設備	屋外R/B廻り	○	分散配置及び代替設備（非常用交流電源設備）
	号炉間電力融通ケーブル（常設）	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	号炉間電力融通ケーブル（可搬型）	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	代替設備（非常用交流電源設備）
	所内蓄電式直流電源設備〔AM用直流125V蓄電池・充電器，直流125V蓄電池・充電器A，A-2，B〕	防止設備・緩和設備	R/B C/B	○	建屋内
	常設代替直流電源設備〔AM用直流125V蓄電池，充電器〕	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	可搬型代替直流電源設備〔電源車〕	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置及び代替設備（非常用直流電源設備）
	代替所内電源設備〔緊急用断路器〕	防止設備・緩和設備	屋外T/B廻り	○	代替設備（非常用所内電源設備）
	代替所内電源設備〔緊急用電源切替箱断路器，緊急用電源切替箱接続装置，AM用動力変圧器，MCC等〕	防止設備・緩和設備	R/B，C/B	○	建屋内
	代替所内電源設備〔非常用高圧母線C・D系〕	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	非常用交流電源設備〔非常用ディーゼル発電機，燃料ディタンク〕	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
	非常用交流電源設備〔燃料移送ポンプ，配管等〕	（設計基準対象施設）	屋外	○	影響なし
	非常用直流電源設備〔直流125V蓄電池・充電器C，D等〕	（設計基準対象施設）	C/B	○	建屋内
	燃料補給設備〔軽油タンク〕	防止設備・緩和設備	屋外	○	影響なし
	燃料補給設備〔タンクローリ（4kL）等〕	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置及び代替設備（軽油タンク）
第58条（計装設備）	重大事故等発生時の計装（SA時計装一式） ［原子炉圧力容器の温度・圧力・水位］ ［原子炉圧力容器・原子炉格納容器への注水量］ ［原子炉格納容器内の温度・圧力・水位・水素濃度・酸素濃度・放射線量率］ ［未臨界の維持又は監視］ ［最終ヒートシンクの確保(代替循環冷却系・格納容器圧力逃がし装置・耐圧強化ベント系・残留熱除去系)］ ［格納容器バイパス監視］ ［水源の確保］ ［原子炉建屋内の水素濃度］ ［使用済燃料プールの監視］ ［発電所内の通信連絡］ ［可搬型計測器］	防止設備・緩和設備（設計基準対象施設）	C/B R/B Rw/B R/B(5号炉)	○	建屋内
	重大事故等発生時の計装 ［最終ヒートシンクによる冷却状態の確認（格納容器圧力逃がし装置）］	防止設備・緩和設備	屋外	○	代替設備（主要パラメータの他チャンネル）
第59条（運転員が原子炉制御室にとどまるための設備）	中央制御室及び遮蔽	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	中央制御室可搬型陽圧化空調機	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	中央制御室待避室及び遮蔽	緩和設備	C/B	○	建屋内
	中央制御室待避室陽圧化装置（空気ボンベ）	緩和設備	C/B，Rw/B	○	建屋内
	無線連絡設備（常設），衛星電話設備（常設）	→62条に記載		－	－
	データ表示装置（待避室），差圧計，酸素濃度・二酸化炭素濃度計	防止でも緩和でもない設備	C/B	○	建屋内
	可搬型蓄電池内蔵型照明	防止でも緩和でもない設備	C/B	○	建屋内
	非常用ガス処理系（排風機，フィルタ装置等）	緩和設備	R/B	○	建屋内

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる
　又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準対象施設が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）
　又は各外部事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備，防止でも緩和でもない設備）
－：他の項目にて整理

※　重大事故等対処設備（SA設備），タービン建屋（T/B），原子炉建屋（R/B），廃棄物処理建屋（Rw/B），コントロール建屋（C/B）

表1.1.1　竜巻に対する重大事故等対処設備の評価結果(5/5)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所※	竜巻	
					評価	防護方法
第60条（監視測定設備）	可搬型モニタリングポスト		防止でも緩和でもない設備	可搬型SA設備保管場所 R/B（5号炉）	○	代替設備（モニタリングポスト）
	放射線サーベイ機器〔可搬型ダスト・よう素サンプラ，GM汚染サーベイメータ，NaIシンチレーションサーベイメータ，電離箱サーベイメータ，ZnSシンチレーションサーベイメータ〕		防止でも緩和でもない設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	可搬型気象観測装置		防止でも緩和でもない設備	可搬型SA設備保管場所	○	代替設備（気象観測装置）
	小型船舶（海上モニタリング用）		防止でも緩和でもない設備	可搬型SA設備保管場所	○	補修を実施
	モニタリング・ポスト用発電機		防止でも緩和でもない設備	屋外	○	代替設備（可搬型モニタリングポスト）
第61条（緊急時対策所）	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所（対策本部）及び遮蔽並びに高気密室		防止設備・緩和設備	R/B（5号炉） 屋外	○	建屋内
	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所（対策本部）可搬型陽圧化空調機，可搬型外気取入送風機		防止設備・緩和設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所（対策本部）陽圧化装置（空気ボンベ）		緩和設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所（対策本部）二酸化炭素吸収装置		防止設備・緩和設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所（対策本部）可搬型エリアモニタ		緩和設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	酸素濃度計，二酸化炭素濃度計，差圧計（対策本部）		防止でも緩和でもない設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所（待機場所），遮蔽及び室内遮蔽		防止設備・緩和設備	R/B（5号炉） 屋外	○	建屋内（屋上生体遮蔽は飛散せず機能維持可能）
	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所（待機場所）可搬型陽圧化空調機		防止設備・緩和設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所（待機場所）陽圧化装置（空気ボンベ）		緩和設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所（待機場所）可搬型エリアモニタ		緩和設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	可搬型モニタリングポスト		→60条に記載		－	－
	酸素濃度計，二酸化炭素濃度計，差圧計（待機場所）		防止でも緩和でもない設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	安全パラメータ表示システム（SPDS）		→62条に記載		－	－
	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所用可搬型電源設備		防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	大湊側高台保管場所の予備機と接続
	通信連絡設備		→62条に記載		－	－
	5号炉屋外緊急連絡用インターフォン		→62条に記載		－	－
	軽油タンク，タンクローリ（4kL）		→57条に記載		－	－
第62条（通信連絡を行うために必要な設備）	所内通信	携帯型音声呼出電話設備	防止設備・緩和設備	C/B，R/B（5号炉）	○	建屋内
		無線連絡設備（常設）（可搬型）	防止設備・緩和設備	C/B， R/B(5号炉) （屋外設備含む）	○	建屋内設備は影響なし。屋外設備は分散配置された代替設備（有線系，衛星系）により機能維持可能
		安全パラメータ表示システム（SPDS）	緩和設備	C/B， R/B（5号炉） （屋外設備含む）	○	建屋内（屋外設備については代替設備（有線系））にて機能維持可能
		5号炉屋外緊急連絡用インターフォン	防止設備・緩和設備	R/B（5号炉） （屋外設備含む）	○	建屋内（屋外設備については代替設備（送受話器，電力保安通信用電話設備））にて機能維持可能
	所内外通信	衛星電話設備（常設）（可搬型）	防止設備・緩和設備	C/B， R/B(5号炉) （屋外設備含む）	○	建屋内設備は影響なし。屋外設備は分散配置された代替設備（有線系，無線系）により機能維持可能
	所外通信	統合原子力防災ネットワークを用いた通信連絡設備，データ伝送設備	防止でも緩和でもない設備	R/B(5号炉) （屋外設備含む）	○	建屋内設備は影響なし。屋外設備は分散配置された代替設備（有線系，衛星系）により機能維持可能
その他の設備	重大事故等時に対処するための流路，注水先又は注入先［原子炉圧力容器，原子炉格納容器，使用済燃料プール，原子炉建屋原子炉区域］		防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	非常用取水設備［海水貯留堰，取水路等］		防止設備・緩和設備	屋外	○	影響なし

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる
　又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準対象施設が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）
　又は各外部事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備，防止でも緩和でもない設備）
－：他の項目にて整理

※　重大事故等対処設備（SA設備），原子炉建屋（R/B），コントロール建屋（C/B）

1.2 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設の抽出について

柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉における外部事象防護対象施設のうち，評価対象施設の抽出フローを図1.2.1，抽出結果を表1.2.1に示す。具体的には，以下のStepにて抽出した。

Step1：安全重要度分類のクラス 1，クラス 2 及びクラス 3 に属する構築物，系統及び機器のうち，外部事象防護対象施設※を抽出する。

※：外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器（発電用原子炉を停止するため，また，停止状態にある場合は引き続きその状態を維持するために必要な異常の発生防止の機能，又は異常の影響緩和の機能を有する構築物，系統及び機器，並びに，使用済燃料プールの冷却機能及び給水機能を維持するために必要な異常の発生防止の機能，又は異常の影響緩和の機能を有する構築物，系統及び機器として，安全重要度分類のクラス 1，クラス 2 及び安全評価上その機能に期待するクラス 3 に属する構築物，系統及び機器）又はそれを内包する建屋を選定する。

また，上記以外の安全施設については，竜巻及びその随伴事象に対して機能維持すること，竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して，代替設備により必要な機能を確保すること，若しくは，安全上支障のない期間に修復すること等の対応が可能な場合，安全機能を損なわないことから評価完了とする。

Step2：Step1で抽出された設備の設置場所を確認し，竜巻襲来時に風圧，気圧差及び飛来物衝突の影響を受ける屋外設備（当該設備を内包する建屋含む）を評価対象施設とする。

Step3：屋内設備だが外気との接続があるため，竜巻襲来時に気圧差荷重の影響を受ける非常用換気空調系等を評価対象施設とする。

Step4：外部事象防護対象施設が設置されている施設等の外殻による防護機能が期待できないものを評価対象とする。なお，外殻による防護に期待できるかは，建屋・構築物等の竜巻荷重に対する健全性の確認結果より，設計飛来物の衝突による開口部の開放又は開口部建具の貫通の観点から，設備を抽出する。

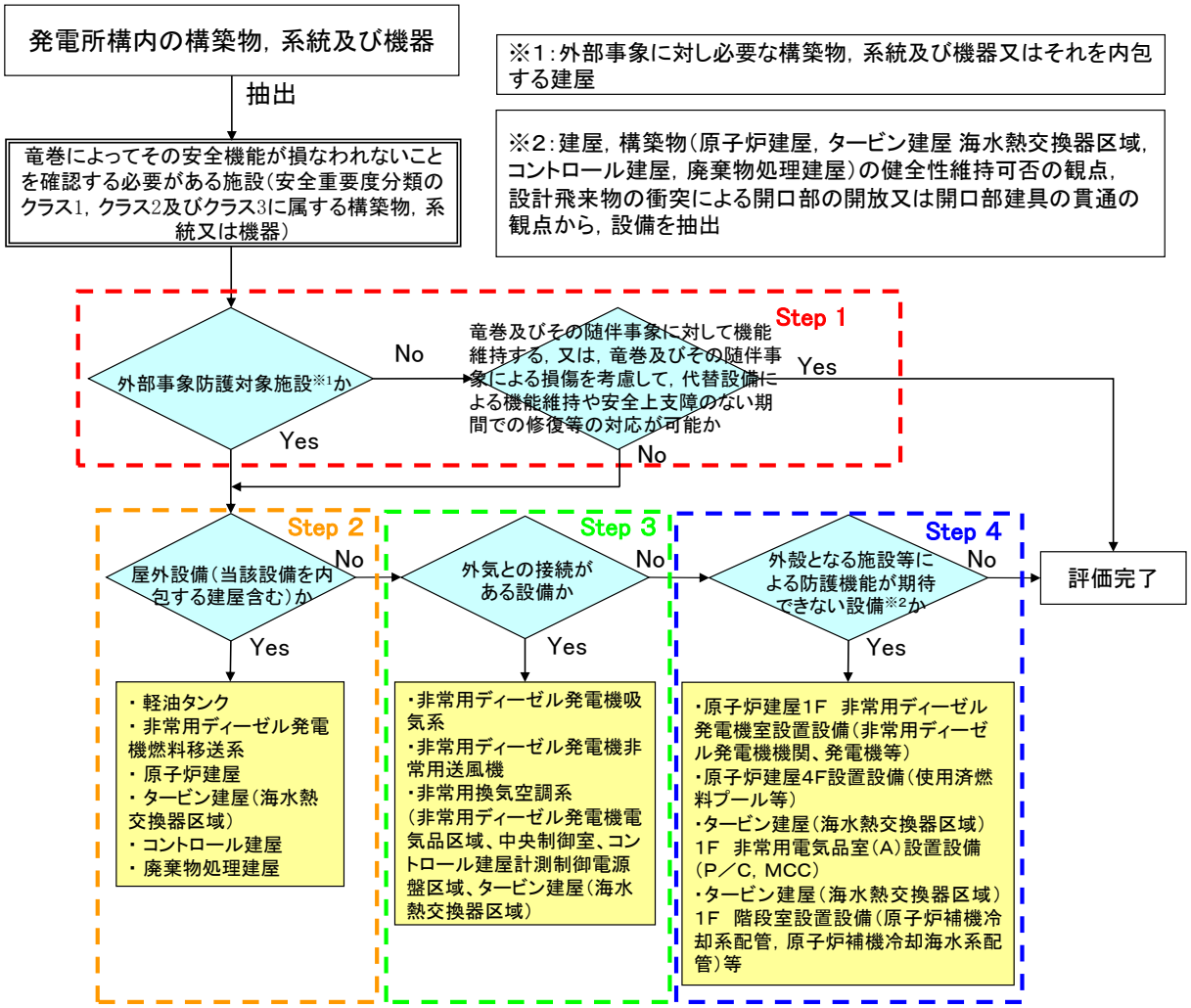


図 1.2.1 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設の抽出フロー

表1.2.1　外部事象防護対象施設のうち評価対象施設の抽出結果(1/4)

○：Yes　×：No　－：該当せず又は評価完了

分類	機能	構築物，系統又は機器※1	配置場所※4	Step1 竜巻及びその随伴事象に対して機能維持する，又は，竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応可能か	Step2 屋外設備（当該設備を内包する建屋含む）か	Step3 外気との接続がある設備か	Step4 外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備か	評価対象施設
PS-1	原子炉冷却材圧力バウンダリ機能	・原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
	過剰反応度の印加防止機能	・制御棒カップリング ・制御棒駆動機構カップリング	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
	炉心形状の維持機能	・炉心支持構造物 （炉心シュラウド，シュラウドサポート，上部格子板，炉心支持板，制御棒案内管） ・燃料集合体	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
MS-1	原子炉の緊急停止機能	・原子炉停止系の制御棒による系 （制御棒，制御棒駆動系）	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
	未臨界維持機能	・原子炉停止系 （制御棒による系，ほう酸水注入系）	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
	原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止機能	・逃がし安全弁 （安全弁としての開機能）	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
	原子炉停止後の除熱機能	・残留熱を除去する系統 （残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード），原子炉隔離時冷却系，高圧炉心注水系，逃がし安全弁（手動逃がし機能），自動減圧系（手動逃がし機能）） ・サプレッションプール	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
		・復水貯蔵槽	Rw/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
	炉心冷却機能	・非常用炉心冷却系 （残留熱除去系（低圧注水モード），原子炉隔離時冷却系，高圧炉心注水系，自動減圧系（逃がし安全弁）） ・サプレッションプール	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
		・復水補給水系（復水貯蔵槽）	Rw/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
	放射性物質の閉じ込め機能，放射線の遮蔽及び放出低減機能	・原子炉格納容器 ・原子炉格納容器隔離弁及び原子炉格納容器バウンダリ配管 ・主蒸気流量制限器 ・残留熱除去系（格納容器スプレイ冷却モード）	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
		・原子炉建屋原子炉区域(ブローアウトパネル付き)	屋外（建屋）	－ （外部事象防護対象施設のため対象外。なお，設計荷重に対し影響なし。ﾌﾞﾛｰｱｳﾄﾊﾟﾈﾙが気圧差で開放した場合，閉止を実施）	○	－	－	○
		・非常用ガス処理系	R/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－	－
		・可燃性ガス濃度制御系	R/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－	－
		・主排気筒（非常用ガス処理系排気管の支持機能）	屋外	○ （風荷重に対し影響無し，飛来物に対し損傷した場合には補修を実施）	－	－	－	－
		遮蔽設備（原子炉遮蔽壁，一次遮蔽壁）	R/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－	－
		遮蔽設備（二次遮蔽壁）	屋外（建屋）	－ （外部事象防護対象施設のため対象外。なお，設計荷重に対し影響なし。ﾌﾞﾛｰｱｳﾄﾊﾟﾈﾙが気圧差で開放した場合，閉止を実施）	○	－	－	○
	工学的安全施設及び原子炉停止系への作動信号の発生機能	・安全保護系	R/B，C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
	安全上特に重要な関連機能	・非常用所内電源系 （ディーゼル機関，発電機，始動用空気系，冷却水系）	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	○	○
		・非常用所内電源系 （非常用ディーゼル発電設備吸気系）	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	○	－	○
		・非常用所内電源系 （発電機から非常用負荷までの配電設備及び電路）	R/B，C/B，T/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	○※2	○
		・軽油タンク ・非常用ディーゼル発電機燃料移送系	屋外	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	○	－	－	○
		・中央制御室及びその遮蔽	C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
		・中央制御室換気空調系 （放射線防護機能及び有毒ガス防護機能）	C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	○	－	○
		・原子炉補機冷却水系 ・原子炉補機冷却海水系	R/B，T/B，C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	○※3	○
		・非常用直流電源系 ・計測制御用電源設備	R/B，C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－

※1 間接関連系は，当該系の機能遂行に直接必要ない構築物，系統及び機器であるため，記載を省略した。（評価対象施設に関する物のみ記載）
※2 6号及び7号炉熱交換器エリア１階非常用電気品室(A)内のパワーセンタ，モータコントロールセンタは，飛来物の侵入・衝突による損傷リスク有り。
※3 6号炉熱交換機エリア１階 階段室内の原子炉補機冷却水系,原子炉補機冷却海水系配管は，飛来物の侵入・衝突による損傷リスク有り。
※4 原子炉建屋(R/B)，タービン建屋(T/B)，コントロール建屋(C/B)，廃棄物処理建屋(Rw/B)

表1.2.1　外部事象防護対象施設のうち評価対象施設の抽出結果(2/4)

○：Yes　×：No　－：該当せず又は評価完了

分類	機能	構築物，系統又は機器※1	配置場所※2	Step1 竜巻及びその随伴事象に対して機能維持する，又は，竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応可能か	Step2 屋外設備（当該設備を内包する建屋含む）か	Step3 外気との接続がある設備か	Step4 外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備か	評価対象施設
PS-2	原子炉冷却材を内蔵する機能 （ただし，原子炉冷却材圧力ﾊﾞｳﾝﾀﾞﾘから除外されている計装等の小口径のもの及びﾊﾞｳﾝﾀﾞﾘに直接接続されていないものは除く。）	・原子炉冷却材浄化系 （原子炉冷却材圧力バウンダリから外れる部分） ・主蒸気系	R/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－	－
		・原子炉隔離時冷却系タービン蒸気供給ライン	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
	原子炉冷却材圧力ﾊﾞｳﾝﾀﾞﾘに直接接続されていないものであって，放射性物質を貯蔵する機能	・使用済燃料プール （使用済燃料貯蔵ラックを含む）	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	○	○
		・新燃料貯蔵庫 （臨界を防止する機能）	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
		・放射性気体廃棄物処理系 （活性炭式希ガスホールドアップ装置）	T/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－	－
	燃料を安全に取り扱う機能	・燃料交換機 ・原子炉建屋クレーン ・原子炉ウェル	R/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－	－
	安全弁及び逃がし弁の吹き止まり機能	・逃がし安全弁 （吹き止まり機能に関連する部分）	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
MS-2	安全上特に重要な関連機能の間接関連系	・非常用ディーゼル発電機本体設備に係わる空調系 （非常用ディーゼル発電機非常用送風機）	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	○	－	○
		・非常用所内電源系空調 （非常用ディーゼル発電機電気品区域換気空調系）	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	○	－	○
		・非常用所内電源系空調 （コントロール建屋計測制御電源盤区域換気空調系）	C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	○	－	○
		・非常用所内電源系空調 （海水熱交換器区域換気空調系）	T/B (Hx/A)	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	○	－	○
	使用済燃料プール水の補給機能	・残留熱除去系（使用済燃料プール水の補給） ・サプレッションプール	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
	放射性物質放出の防止機能	・放射性気体廃棄物処理系（オフガス系）隔離弁	T/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－	－
		・主排気筒 （非常用ガス処理系排気管の支持機能以外の部分）	屋外	○ （風荷重に対し影響無し，飛来物に対し損傷した場合には補修を実施）	－	－	－	－
		・燃料プール冷却浄化系の燃料プール入口逆止弁	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	○	○
		・原子炉建屋原子炉区域（ブローアウトパネル付き）	屋外（建屋）	－ （外部事象防護対象施設のため対象外。なお，設計荷重に対し影響なし。ﾌﾞﾛｰｱｳﾄﾊﾟﾈﾙが気圧差で開放した場合，閉止を実施）	○	－	－	○
		・非常用ガス処理系	R/B	○ （風荷重に対し影響無し，飛来物に対し損傷した場合には補修を実施）	－	－	－	－
	事故時のプラント状態の把握機能	・事故時監視計器の一部 （格納容器エリアモニタ等）	C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
	制御室外からの安全停止機能	・制御室外原子炉停止装置 （安全停止に関連するもの）	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－

※1 間接関連系は，当該系の機能遂行に直接必要ない構築物，系統及び機器であるため，記載を省略した。（評価対象施設に関する物のみ記載）
※2 原子炉建屋(R/B)，タービン建屋(T/B)，海水熱交換器区域(Hx/B)，コントロール建屋(C/B)

表1.2.1　外部事象防護対象施設のうち評価対象施設の抽出結果(3/4)

○：Yes　×：No　－：該当せず又は評価完了

分類	機能	構築物，系統又は機器※1	配置場所※2	Step1 竜巻及びその随伴事象に対して機能維持する，又は，竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応可能か	Step2 屋外設備（当該設備を内包する建屋含む）か	Step3 外気との接続がある設備か	Step4 外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備か	評価対象施設
PS-3	原子炉冷却材保持機能 (PS-1，PS-2以外のもの)	・原子炉冷却材圧力バウンダリから除外される計装等の小口径配管，弁	R/B	○ (屋内設備のため,影響なし)	－	－	－	－
	原子炉冷却材の循環機能	・冷却材再循環系	R/B	○ (屋内設備のため,影響なし)	－	－	－	－
	放射性物質の貯蔵機能	・圧力制御室プール水排水系（圧力制御室プール水サージタンク）	屋外	○ (運用停止等により,影響なし)	－	－	－	－
		・復水貯蔵槽	Rw/B	○ (屋内設備のため,影響なし)	－	－	－	－
		・液体廃棄物処理系	Rw/B	○ (屋内設備のため,影響なし)	－	－	－	－
		・固体廃棄物処理系	Rw/B	○ (屋内設備のため,影響なし)	－	－	－	－
		・固体廃棄物貯蔵庫	屋外（建屋）	○ （補修を実施（放射性物質の拡散防止について適切な処置を実施））	－	－	－	－
		・固体廃棄物処理建屋	屋外（建屋）	○ （補修を実施（放射性物質の拡散防止について適切な処置を実施））	－	－	－	－
		・焼却炉建屋	屋外（建屋）	○ （補修を実施（放射性物質の拡散防止について適切な処置を実施））	－	－	－	－
		・新燃料貯蔵庫 ・新燃料貯蔵ラック	R/B	○ (屋内設備のため,影響なし)	－	－	－	－
		・使用済燃料輸送容器保管建屋	屋外（建屋）	○ （補修を実施（放射性物質の拡散防止について適切な処置を実施））	－	－	－	－
	電源供給機能 （非常用を除く）	・タービン ・発電機及び励磁装置 ・復水器（復水器を含む） ・給水系 ・循環水系	T/B	○ (屋内設備のため,影響なし)	－	－	－	－
		・送電線	屋外	○ （代替設備（非常用ディーゼル発電機）により機能維持可能）	－	－	－	－
		・変圧器	屋外	○ （代替設備（非常用ディーゼル発電機）により機能維持可能）	－	－	－	－
		・開閉所	屋外	○ （代替設備（非常用ディーゼル発電機）により機能維持可能）	－	－	－	－
	プラント計測・制御機能 （安全保護機能を除く）	・原子炉制御系（制御棒価値ミニマイザ含む） ・原子炉核計装系の一部 ・原子炉プラントプロセス計装の一部	C/B	○ (屋内設備のため,影響なし)	－	－	－	－
	プラント運転補助機能	・補助ボイラ設備	補助ボイラ建屋	○ (補修を実施)	－	－	－	－
		・所内蒸気系及び戻り系	R/B，T/B，C/B	○ (屋内設備のため,影響なし)	－	－	－	－
		・計装用圧縮空気系 ・原子炉補機冷却水系（MS-1関連以外） ・タービン補機冷却水系,タービン補機冷却海水系	R/B，T/B，C/B	○ (屋内設備のため,影響なし)	－	－	－	－
		・復水補給水系	Rw/B	○ (屋内設備のため,影響なし)	－	－	－	－
	核分裂生成物の原子炉冷却材中の放散防止機能	・燃料被覆管	R/B	○ (屋内設備のため,影響なし)	－	－	－	－
	原子炉冷却材の浄化機能	・原子炉冷却材浄化系	R/B	○ (屋内設備のため,影響なし)	－	－	－	－
		・復水浄化系	T/B	○ (屋内設備のため,影響なし)	－	－	－	－

※1 間接関連系は，当該系の機能遂行に直接必要ない構築物，系統及び機器であるため，記載を省略した。（評価対象施設に関する物のみ記載）
※2 原子炉建屋(R/B)，タービン建屋(T/B)，コントロール建屋(C/B)，廃棄物処理建屋(Rw/B)

表 1.2.1　外部事象防護対象施設のうち評価対象施設の抽出結果(4/4)

○：Yes　×：No　－：該当せず又は評価完了

分類	機能	構築物，系統又は機器※1			配置場所※2	Step1 竜巻及びその随伴事象に対して機能維持する，又は，竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応可能か	Step2 屋外設備（当該設備を内包する建屋含む）か	Step3 外気との接続がある設備か	Step4 外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備か	評価対象施設
MS-3	原子炉圧力上昇の緩和機能	・逃がし安全弁（逃がし弁機能）			R/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－	－
		・タービンバイパス弁			T/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－	－
	出力上昇の抑制機能	・冷却材再循環流量制御系（ポンプ・トリップ機能） ・制御棒引抜監視装置			R/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－	－
	原子炉冷却材の補給機能	・制御棒駆動水圧系 ・原子炉隔離時冷却系			R/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－	－
	原子炉冷却材の再循環流量低下の緩和機能	・冷却材再循環ポンプMGセット			Rw/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－	－
	緊急時対策上重要なものおよび異常状態の把握機能	・5号炉原子炉建屋内緊急時対策所			R/B(5号炉)	○ （頑健な建屋に防護されているため，影響なし）	－	－	－	－
		・試料採取系			R/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－	－
		通信連絡設備	所外通信	・有線系	各建屋 （地下設備含む）	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－	－
					送電鉄塔	○ （代替設備（衛星系）により機能維持可能）	－	－	－	－
			所内通信	・有線系	各建屋 （地下設備含む）	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－	－
					屋外設備	○ （補修を実施）	－	－	－	－
		・放射線監視設備	モニタリングポスト		屋外	○ （代替設備（可搬型モニタリング設備）により機能維持可能）	－	－	－	－
			放射能観測車		可搬型SA設備保管場所	○ （代替設備（放射能観測車の代替測定装置）により機能維持可能）	－	－	－	－
		・事故時監視計器の一部			R/B，T/B，C/B，Rw/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－	－
					気象観測装置	○ （代替設備（可搬型気象観測装置）により機能維持可能）	－	－	－	－
		・津波監視カメラ			7号炉R/B 主排気筒	○ （補修を実施）	－	－	－	－
		・消火系			給水建屋 水処理建屋	○ （補修を実施）	－	－	－	－
					ろ過水タンク （屋外配管含む）	○ （補修を実施）	－	－	－	－
					泡消火設備	○ （補修を実施）	－	－	－	－
		・安全避難通路，非常用照明			各建屋内	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－	－

※1 間接関連系は，当該系の機能遂行に直接必要ない構築物，系統及び機器であるため，記載を省略した。（評価対象施設に関する物のみ記載）
※2 重大事故等対処設備(SA設備)，原子炉建屋(R/B)，タービン建屋(T/B)，コントロール建屋(C/B)，廃棄物処理建屋(Rw/B)

1.3 耐震 S クラス設備について

外部事象防護対象施設のうち評価対象施設としては，「安全重要度分類のクラス1，クラス2及びクラス3に属する構築物，系統及び機器」より抽出をしているが，「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震Sクラスの設計を要求される設備（系統，機器）及び建屋・構築物（以下，「耐震Sクラス設備等」という。）のうち，竜巻の影響を受ける可能性がある設備についても抽出し，追加で評価対象施設に反映する施設がないことを確認した。

耐震Sクラス設備等のうち評価対象施設の抽出フローを図1.3.1，抽出結果を表1.3.1に示す。

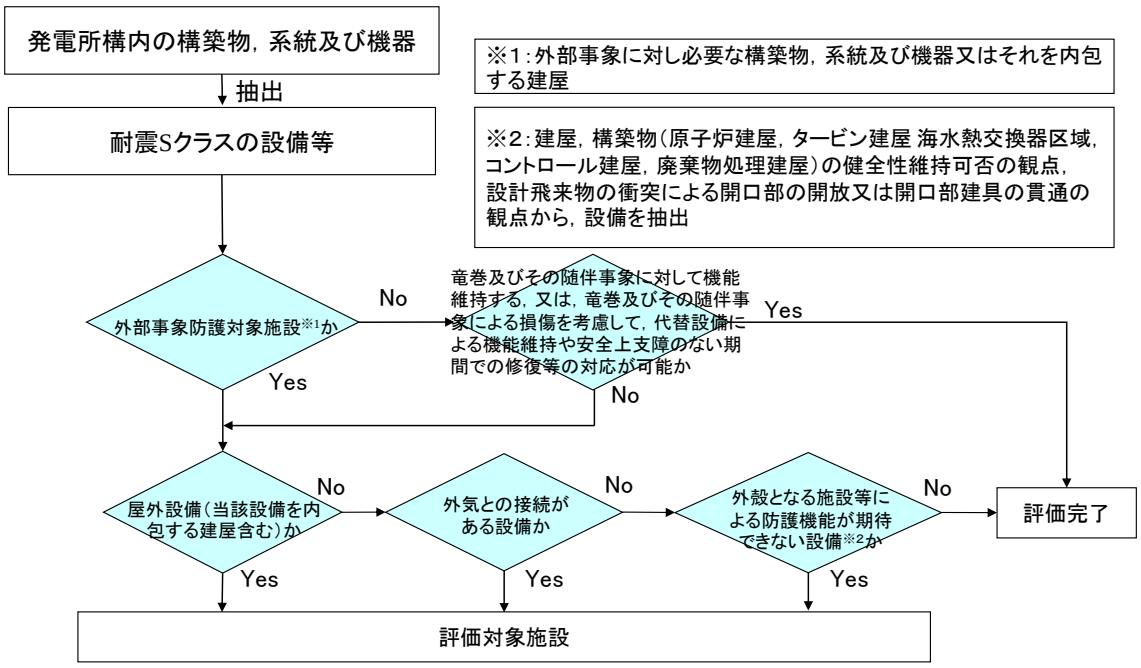


図 1.3.1　耐震 S クラス設備等のうち評価対象施設の抽出フロー

表 1.3.1　耐震Ｓクラス設備等のうち評価対象施設の抽出結果(1/3)

○：Yes，×：No，－：該当せず又は評価完了

耐震重要度分類	機能別分類	設備別分類	構築物，系統又は機器	配置場所※2	Step1 竜巻及びその随伴事象に対して機能維持する，又は，竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応可能か	Step2 屋外設備か	Step3 外気との接続がある設備か	Step4 外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備か	評価対象施設
Sクラス	原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系	主要設備	・原子炉圧力容器 ・原子炉冷却材圧力バウンダリに属する容器・配管・ポンプ・弁	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
		補助設備	・隔離弁を閉とするに必要な電気及び計装設備	C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
		直接支持構造物	・原子炉圧力容器支持スカート部	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
			・機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	R/B，C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
	使用済燃料を貯蔵するための施設	主要設備	・使用済燃料プール ・使用済燃料貯蔵ラック	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	○	○ （抽出済）
		補助設備	・燃料プール水補給設備（残留熱除去系）	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
			・非常用電源（ディーゼル発電機及びその冷却系・補助施設を含む）	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	○	○ （抽出済）
			・計装設備	C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
		直接支持構造物	・機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	R/B，C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
	原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための施設，及び原子炉の停止状態を維持するための施設	主要設備	・制御棒，制御棒駆動機構及び制御棒駆動水圧系（スクラム機能に関する部分）	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
		補助設備	・炉心支持構造物 ・チャンネル・ボックス	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
			・電気計装設備	C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
		直接支持構造物	・機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	R/B，C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
	原子炉停止後，炉心から崩壊熱を除去するための施設	主要設備	・原子炉隔離時冷却系 ・高圧炉心注水系 ・残留熱除去系 ・冷却水源としてのサプレッション・チェンバ	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
		補助設備	・原子炉補機冷却系	T/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	○※1	○ （抽出済）
			・炉心支持構造物	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
			・非常用電源（ディーゼル発電機及びその冷却系・補助施設を含む）	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	○	○ （抽出済）
			・計装設備	C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
			・当該施設の機能維持に必要な空調設備	R/B，T/B，C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	○ （非常用ディーゼル発電機電気品区域換気空調系，コントロール建屋計測制御・電源盤区域送風機・排風機，海水熱交換器区域非常用送風機）	○ （抽出済）
		直接支持構造物	・機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	R/B，T/B，C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－

※1　6号炉 海水熱交換器区域 1F 階段室内の原子炉補機冷却系，原子炉補機冷却海水系配管は，飛来物の侵入・衝突による損傷リスク有り。
※2　原子炉建屋(R/B)，コントロール建屋(C/B)，タービン建屋(T/B)

表 1.3.1　耐震Ｓクラス設備等のうち評価対象施設の抽出結果(2/3)

○：Yes，×：No，－：該当せず又は評価完了

耐震重要度分類	機能別分類	設備別分類	構築物，系統又は機器	配置場所※2	Step1 竜巻及びその随伴事象に対して機能維持する，又は，竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応可能か	Step2 屋外設備か	Step3 外気との接続がある設備か	Step4 外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備か	評価対象施設
Sクラス	原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後，炉心から崩壊熱を除去するための施設	主要設備	・非常用炉心冷却系（高圧炉心注水系，原子炉隔離時冷却系，残留熱除去系，自動減圧系） ・冷却水源としてのサプレッション・チェンバ	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
		補助設備	・原子炉補機冷却系	T/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	○※1	○ （抽出済）
			・非常用電源（ディーゼル発電機及びその冷却系・補助施設を含む）	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	○	○ （抽出済）
			・計装設備	C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
			・中央制御室の遮蔽	C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
			・中央制御室換気空調系	C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	○	×	○ （抽出済）
			・当該施設の機能維持に必要な空調設備	R/B，T/B，C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	○ （非常用ディーゼル発電機電気品区域換気空調系，コントロール建屋計測制御・電源盤区域送風機・排風機，海水熱交換器区域非常用送風機）	○ （抽出済）
		直接支持構造物	・機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	R/B，T/B，C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
	原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に，圧力障壁となり放射性物質の拡散を直接防ぐための施設	主要設備	・原子炉格納容器 ・格納容器バウンダリに属する配管・弁	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
		補助設備	・隔離弁を閉とするに必要な電気及び計装設備	C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
		直接支持構造物	・機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	R/B，C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－

※1　6号炉 海水熱交換器区域 1F 階段室内の原子炉補機冷却系，原子炉補機冷却海水系配管は，飛来物の侵入・衝突による損傷リスク有り。
※2　原子炉建屋(R/B)，コントロール建屋(C/B)，タービン建屋(T/B)

表 1.3.1　耐震Ｓクラス設備等のうち評価対象施設の抽出結果(3/3)

○：Yes，×：No，－：該当せず又は評価完了

耐震重要度分類	機能別分類	設備別分類	構築物，系統又は機器	配置場所※2	Step1 竜巻及びその随伴事象に対して機能維持する，又は，竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応可能か	Step2 屋外設備か	Step3 外気との接続がある設備か	Step4 外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備か	評価対象施設
Sクラス	放射性物質の放出を伴うような事故の際に，その外部拡散を抑制するための施設であり，Sクラス(Ⅳ)以外の施設	主要設備	・残留熱除去系（格納容器スプレイ冷却モード） ・冷却水源としてのサプレッション・チェンバ	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
			・可燃性ガス濃度制御系	R/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－	－
			・原子炉建屋原子炉区域	R/B	○ （設計荷重に対し影響なし 必要に応じプラントを停止し，ﾌﾞﾛｰｱｳﾄﾊﾟﾈﾙの閉止を実施）	－	－	－	－
			・非常用ガス処理系及び排気口	R/B，屋外	○ （風荷重に対し影響無し，飛来物に対し損傷した場合には補修を実施）	－	－	－	－
			・原子炉格納容器圧力抑制装置（ダイアフラムフロア，ベント管）	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	×
		補助設備	・原子炉補機冷却系	T/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	○※1	○ （抽出済）
			・非常用電源（ディーゼル発電機及びその冷却系・補助施設を含む）	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	○	○ （抽出済）
			・計装設備	C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
			・当該施設の機能維持に必要な空調設備	R/B，T/B，C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	○ （非常用ディーゼル発電機電気品区域換気空調系，コントロール建屋計測制御・電源盤区域送風機・排風機，海水熱交換器区域非常用送風機）	○ （抽出済）
		直接支持構造物	・機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	R/B，T/B，C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
	津波防護機能を有する設備及び浸水防止機能を有する設備（※3）	主要設備	・水密扉，閉止板　等	R/B，T/B，Rw/B，C/B	○ （補修を実施）	－	－	－	－
		補助設備	－	－	－	－	－	－	－
		直接支持構造物	・機器・配管等の支持構造物	R/B，T/B，Rw/B，C/B	○ （補修を実施）	－	－	－	－
	津波監視機能を有する設備（※3）	主要設備	・津波監視カメラ，取水槽水位計	屋外	－	－	－	－	－
		補助設備	・非常用電源（ディーゼル発電機及びその冷却系・補助施設を含む）	R/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	○	○ （抽出済）
			・計装設備	C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－
		直接支持構造物	・電気計装設備等の支持構造物	R/B，C/B	－ （外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	×	－

※1　6号炉 海水熱交換器区域 1F 階段室内の原子炉補機冷却系，原子炉補機冷却海水系配管は，飛来物の侵入・衝突による損傷リスク有り。
※2　原子炉建屋(R/B)，コントロール建屋(C/B)，タービン建屋(T/B)，廃棄物処理建屋(Rw/B)
※3　要求はSs機能維持

1.4 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出について

外部事象防護対象施設に対する波及的影響として，当該施設の倒壊・損傷等により，外部事象防護対象施設が損傷を受ける機械的影響，当該施設が機能喪失に陥った場合に，外部事象防護対象施設も機能喪失する機能的影響，竜巻随伴事象（火災，溢水，外部電源喪失）による二次的影響の観点から波及的影響を及ぼし得る施設を抽出する。

図1.4.1に外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出フローを示す。

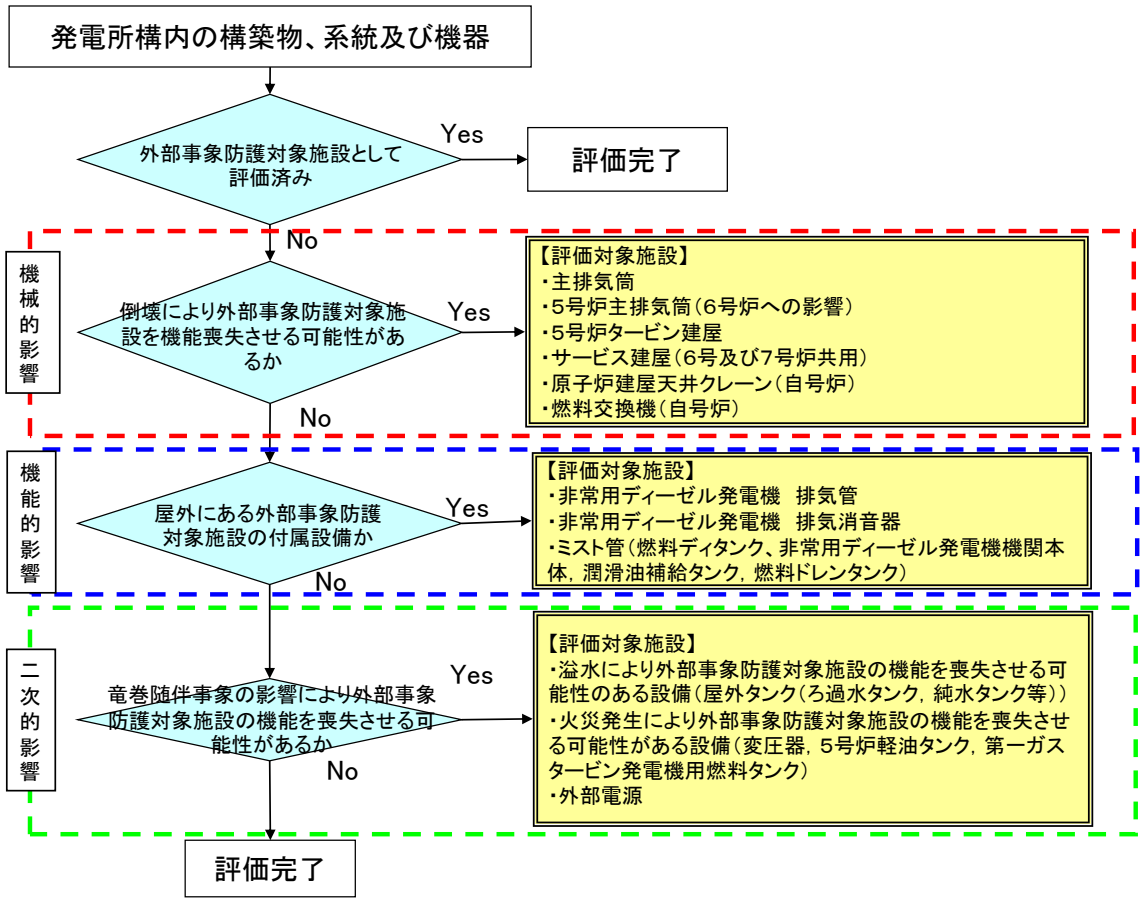


図 1.4.1 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出フロー

(1) 機械的影響の観点での抽出

発電所構内の構築物，系統及び機器のうち，機械的影響の観点から，外部事象防護対象施設周辺の施設が倒壊することにより，外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性がある施設を抽出する。

具体的には，図1.4.2に示すとおり，施設の高さが外部事象防護対象施設との距離以上である施設を抽出した。

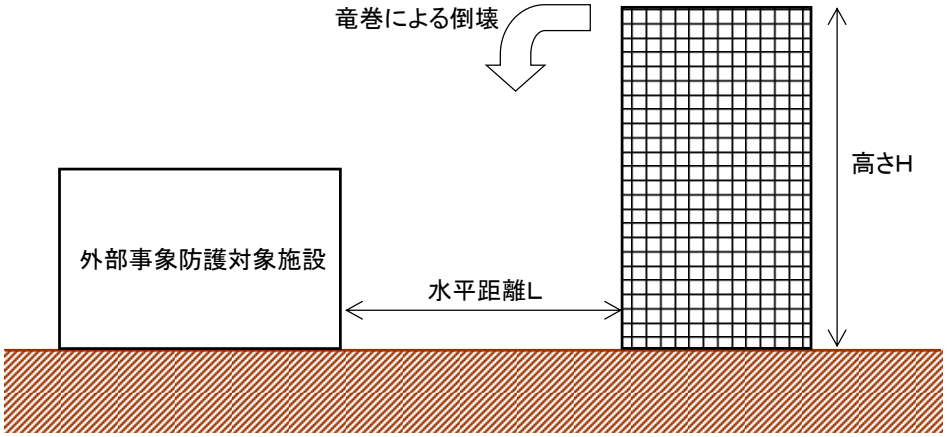


図 1.4.2 地上高さが外部事象防護対象施設との距離以上である施設（高さ H≧水平距離 L）

外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性がある建屋及び構築物について確認した結果を表1.4.1，設備について確認した結果を表1.4.2に示す。

また，図1.4.3には，外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る建物・構築物並びに主排気筒の倒壊範囲を示す。

確認の結果，倒壊により外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性がある施設として，以下を抽出した。

a. 建屋・構築物

・主排気筒（6号及び7号炉への影響）
・5号炉主排気筒（6号炉への影響）
・5号炉タービン建屋（6号炉への影響）
・サービス建屋（6号及び7号炉共通施設）

b. 設備（系統，機器）

・原子炉建屋天井クレーン（自号炉への影響）
・燃料交換機（自号炉への影響）

(2) 機能的影響の観点での抽出

発電所構内の構築物，系統及び機器のうち，機能的影響の観点（「屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備か」）から，機能喪失に陥った場合に，外部事象防護対象施設も機能喪失する可能性がある施設を確認した結果を表1.4.2に示す。

確認の結果，機能喪失に陥った場合に，外部事象防護対象施設も機能喪失する可能性がある屋外の外部事象防護対象施設の付属設備として，以下を抽出した。

- 非常用ディーゼル発電機 排気管
- 非常用ディーゼル発電機 排気消音器
- ミスト管（燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電機機関本体，潤滑油補給タンク，燃料ドレンタンク）

(3) 二次的影響の観点での抽出

発電所構内の構築物，系統及び機器のうち，二次的影響の観点から，竜巻随伴事象の影響により外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性がある施設を抽出する。

建屋内においては，外気との接続がある外部事象防護対象施設の開口部より，飛来物の侵入が想定される場合には，適切な防護対策を実施する。そのため，飛来物の侵入による溢水や火災は発生しないことから，外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器の安全機能に影響は与えない。

また，建屋外においては，外部事象防護対象施設の安全機能に影響がないことを確認するため，発電所敷地内の外部事象防護対象施設の周辺にある溢水源，発火源となる設備として，以下を抽出した。

なお，6号及び7号炉の軽油タンクについては，外部事象防護対象施設として抽出済であることから，本項目では抽出しない。

- 溢水により外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性のある設備（純水タンク，ろ過水タンク，NSD収集タンク）
- 火災発生により外部事象防護対象施設の機能を喪失させる可能性がある設備（変圧器，5号炉軽油タンク，第一ガスタービン発電機用燃料タンク）
- 外部電源

表1.4.1 機械的影響の観点の抽出結果（建屋，構築物）

建屋，構築物	近傍の外部事象防護対象施設	高さ	外部事象防護対象施設までの最短距離	評価対象施設
サービス建屋（6号及び7号炉共通施設）	コントロール建屋	17m	隣接	○
6号炉 主排気筒	コントロール建屋， 6号炉 原子炉建屋	46.8m※1	隣接	○
7号炉 主排気筒	7号炉 原子炉建屋	46.8m※2	隣接	○
5号炉 主排気筒	6号炉 原子炉建屋， 6号炉 軽油タンク	148m	約20m	○
5号炉 主排気筒モニタ建屋	6号炉 軽油タンク	10m以下	約40m	×
5号炉 原子炉建屋※3	6号炉 原子炉建屋	39m	約55m	×
5号炉 タービン建屋	6号炉 タービン建屋海水熱交換器区域	33.1m	約5m	○
5号炉 サービス建屋	6号炉 原子炉建屋	17.89m	約145m	×
5号炉 循環水ポンプ建屋	6号炉 タービン建屋海水熱交換器区域	21.78m	約55m	×
5号炉 海水熱交換器建屋※3	6号炉 タービン建屋海水熱交換器区域	13.8m	約80m	×
出入管理所	6号炉 軽油タンク	10m以下	約25m	×
待合室	6号炉 軽油タンク	10m以下	約15m	×
給水建屋	6号及び7号炉 軽油タンク	10m以下	約90m	×
予備品倉庫	7号炉 軽油タンク	10m以下	約65m	×
発電倉庫	7号炉 軽油タンク	10m以下	約85m	×
ランドリ建屋	6号炉 原子炉建屋， 6号炉 タービン建屋海水熱交換器区域	13.7m	約140m	×
補助ボイラ建屋	6号炉 原子炉建屋， 6号炉 タービン建屋海水熱交換器区域	11.5m	約140m	×
焼却炉建屋	6号炉 原子炉建屋， 6号炉 タービン建屋海水熱交換器区域	20.35m	約170m	×
避雷鉄塔※4	7号炉 タービン建屋海水熱交換器区域	149.5m	約250m	×

※1 ： 6号炉 原子炉建屋の屋上T.P.38.2m(地表から26.2m)からの高さ

※2 ： 7号炉 原子炉建屋の屋上T.P.38.2m(地表から26.2m)からの高さ

※3 ： 5号炉の外部事象防護対象施設を内包する施設であるが，参考として記載した。

※4 ： 発電所構内における鉄塔のうち，外部事象防護対象施設に最寄り鉄塔として記載した。

表 1.4.2 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出結果（設備）（1/3）

○：Yes，×：No

分類	機能	構築物，系統又は機器※1	配置場所※2	外部事象防護対象施設として評価済みか	機械的影響 倒壊により外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性があるか	機能的影響 屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備か
PS-1	原子炉冷却材圧力バウンダリ機能	・原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系	R/B	×	×	×
	過剰反応度の印加防止機能	・制御棒カップリング ・制御棒駆動機構カップリング	R/B	×	×	×
	炉心形状の維持機能	・炉心支持構造物 （炉心シュラウド，シュラウドサポート，上部格子板，炉心支持板，制御棒案内管） ・燃料集合体	R/B	×	×	×
MS-1	原子炉の緊急停止機能	・原子炉停止系の制御棒による系 （制御棒，制御棒駆動系）	R/B	×	×	×
	未臨界維持機能	・原子炉停止系 （制御棒による系，ほう酸水注入系）	R/B	×	×	×
	原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止機能	・逃がし安全弁 （安全弁としての開機能）	R/B	×	×	×
	原子炉停止後の除熱機能	・残留熱を除去する系統 （残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード），原子炉隔離時冷却系，高圧炉心注水系，逃がし安全弁（手動逃がし機能），自動減圧系（手動逃がし機能）） ・サプレッションプール	R/B	×	×	×
		・復水貯蔵槽	Rw/B	×	×	×
	炉心冷却機能	・非常用炉心冷却系 （残留熱除去系（低圧注水モード），原子炉隔離時冷却系，高圧炉心注水系，自動減圧系（逃がし安全弁）） ・サプレッションプール	R/B	×	×	×
		・復水補給水系（復水貯蔵槽）	Rw/B	×	×	×
	放射性物質の閉じ込め機能，放射線の遮蔽及び放出低減機能	・原子炉格納容器 ・原子炉格納容器隔離弁及び原子炉格納容器バウンダリ配管 ・主蒸気流量制限器 ・残留熱除去系（格納容器スプレイ冷却モード）	R/B	×	×	×
		・原子炉建屋原子炉区域(ブローアウトパネル付き)	屋外（建屋）	○	×	×
		・非常用ガス処理系	R/B	×	×	×
		・可燃性ガス濃度制御系	R/B	×	×	×
		・主排気筒 （非常用ガス処理系排気管の支持機能）	屋外	×	○	×
		遮蔽設備（原子炉遮蔽壁，一次遮蔽壁）	R/B	×	×	×
		遮蔽設備（二次遮蔽壁）	屋外（建屋）	○	×	×
	工学的安全施設及び原子炉停止系への作動信号の発生機能	・安全保護系	R/B，C/B	×	×	×
	安全上特に重要な関連機能	・非常用所内電源系 （ディーゼル機関，発電機，始動用空気系，冷却水系）	R/B	○	×	○ （非常用ディーゼル発電機排気管，排気消音器，ミスト管（燃料ディタンク，非常用ディーゼル発電機機関本体，潤滑油補給タンク，燃料ドレンタンク））
		・非常用所内電源系 （非常用ディーゼル発電設備吸気系）	R/B	○	×	×
		・非常用所内電源系 （発電機から非常用負荷までの配電設備及び電路）	R/B，C/B，T/B	○	×	×
		・軽油タンク ・非常用ディーゼル発電機燃料移送系	屋外	○	×	×
		・中央制御室及びその遮蔽	C/B	×	×	×
		・中央制御室換気空調系 （放射線防護機能及び有毒ガス防護機能）	C/B	○	×	×
		・原子炉補機冷却水系 ・原子炉補機冷却海水系	R/B，T/B，C/B	○	×	×
		・非常用直流電源系 ・計測制御用電源設備	R/B，C/B	×	×	×

※1：間接関連系は，当該系の機能遂行に直接必要ない構築物，系統及び機器であるため，記載を省略した。（評価対象施設に関する物のみ記載）
※2：原子炉建屋(R/B)，タービン建屋(T/B)，コントロール建屋(C/B)，廃棄物処理建屋(Rw/B)

表 1.4.2 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出結果（設備）(2/3)

○：Yes，×：No

分類	機能	構築物，系統又は機器※1	配置場所※2	外部事象防護対象施設として評価済みか	機械的影響 倒壊により外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性があるか	機能的影響 屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備か
PS-2	原子炉冷却材を内蔵する機能（ただし，原子炉冷却材圧力ﾊﾞｳﾝﾀﾞﾘから除外されている計装等の小口径のもの及びﾊﾞｳﾝﾀﾞﾘに直接接続されていないものは除く。）	・原子炉冷却材浄化系（原子炉冷却材圧力バウンダリから外れる部分） ・主蒸気系	R/B	×	×	×
		・原子炉隔離時冷却系タービン蒸気供給ライン	R/B	×	×	×
	原子炉冷却材圧力ﾊﾞｳﾝﾀﾞﾘに直接接続されていないものであって，放射性物質を貯蔵する機能	・使用済燃料プール（使用済燃料貯蔵ラックを含む）	R/B	○	×	×
		・新燃料貯蔵庫（臨界を防止する機能）	R/B	×	×	×
		・放射性気体廃棄物処理系（活性炭式希ガスホールドアップ装置）	T/B	×	×	×
	燃料を安全に取り扱う機能	・燃料交換機 ・原子炉建屋クレーン	R/B	×	○	×
		・原子炉ウェル	R/B	×	×	×
	安全弁及び逃がし弁の吹き止まり機能	・逃がし安全弁（吹き止まり機能に関連する部分）	R/B	×	×	×
MS-2	安全上特に重要な関連機能の間接関連系	・非常用ディーゼル発電機本体設備に係わる空調系（非常用ディーゼル発電機非常用送風機）	R/B	○	×	×
		・非常用所内電源系空調（非常用ディーゼル発電機電気品区域換気空調系）	R/B	○	×	×
		・非常用所内電源系空調（コントロール建屋計測制御電源盤区域換気空調系）	C/B	○	×	×
		・非常用所内電源系空調（海水熱交換器区域換気空調系）	T/B (Hx/A)	○	×	×
	使用済燃料プール水の補給機能	・残留熱除去系（使用済燃料プール水の補給） ・サプレッションプール	R/B	×	×	×
	放射性物質放出の防止機能	・放射性気体廃棄物処理系（オフガス系）隔離弁	T/B	×	×	×
		・主排気筒（非常用ガス処理系排気管の支持機能以外の部分）	屋外	×	○	×
		・燃料プール冷却浄化系の燃料プール入口逆止弁	R/B	○	×	×
		・原子炉建屋原子炉区域（ブローアウトパネル付き）	屋外（建屋）	○	×	×
		・非常用ガス処理系	R/B	×	×	×
	事故時のプラント状態の把握機能	・事故時監視計器の一部（格納容器エリアモニタ等）	C/B	×	×	×
	制御室外からの安全停止機能	・制御室外原子炉停止装置（安全停止に関連するもの）	R/B	×	×	×

※1：間接関連系は，当該系の機能遂行に直接必要ない構築物，系統及び機器であるため，記載を省略した。（評価対象施設に関する物のみ記載）
※2：原子炉建屋(R/B)，タービン建屋(T/B)，海水熱交換器区域(Hx/B)，コントロール建屋(C/B)

表 1.4.2 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出結果（設備）(3/3)

○：Yes，×：No

分類	機能	構築物，系統又は機器※1			配置場所※2	外部事象防護対象施設として評価済みか	機械的影響 倒壊により外部事象防護対象施設を機能喪失させる可能性があるか	機能的影響 屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備か
PS-3	原子炉冷却材保持機能 (PS-1，PS-2以外のもの)	・原子炉冷却材圧力バウンダリから除外される計装等の小口径配管，弁			R/B	×	×	×
	原子炉冷却材の循環機能	・冷却材再循環系			R/B	×	×	×
	放射性物質の貯蔵機能	・圧力制御室プール水排水系（圧力制御室プール水サージタンク）			屋外	×	×	×
		・復水貯蔵槽			Rw/B	×	×	×
		・液体廃棄物処理系			Rw/B	×	×	×
		・固体廃棄物処理系			Rw/B	×	×	×
		・固体廃棄物貯蔵庫			屋外（建屋）	×	×	×
		・固体廃棄物処理建屋			屋外（建屋）	×	×	×
		・焼却炉建屋			屋外（建屋）	×	×	×
		・新燃料貯蔵庫 ・新燃料貯蔵ラック			R/B	×	×	×
		・使用済燃料輸送容器保管建屋			屋外（建屋）	×	×	×
	電源供給機能 （非常用を除く）	・タービン ・発電機及び励磁装置 ・復水系（復水器を含む） ・給水系 ・循環水系			T/B	×	×	×
		・送電線			屋外	×	×	×
		・変圧器			屋外	×	×	×
		・開閉所			屋外	×	×	×
	プラント計測・制御機能 （安全保護機能を除く）	・原子炉制御系（制御棒価値ミニマイザ含む） ・原子炉核計装系の一部 ・原子炉プラントプロセス計装の一部			C/B	×	×	×
	プラント運転補助機能	・補助ボイラ設備			補助ボイラ建屋	×	×	×
		・所内蒸気系及び戻り系			R/B，T/B，C/B	×	×	×
		・計装用圧縮空気系 ・原子炉補機冷却水系（MS-1関連以外） ・タービン補機冷却水系，タービン補機冷却海水系			R/B，T/B，C/B	×	×	×
		・復水補給水系			Rw/B	×	×	×
	核分裂生成物の原子炉冷却材中の放散防止機能	・燃料被覆管			R/B	×	×	×
	原子炉冷却材の浄化機能	・原子炉冷却材浄化系			R/B	×	×	×
		・復水浄化系			T/B	×	×	×
MS-3	原子炉圧力上昇の緩和機能	・逃がし安全弁（逃がし弁機能）			R/B	×	×	×
		・タービンバイパス弁			T/B	×	×	×
	出力上昇の抑制機能	・冷却材再循環流量制御系（ポンプ・トリップ機能） ・制御棒引抜監視装置			R/B	×	×	×
	原子炉冷却材の補給機能	・制御棒駆動水圧系 ・原子炉隔離時冷却系			R/B	×	×	×
	原子炉冷却材の再循環流量低下の緩和機能	・冷却材再循環ポンプMGセット			Rw/B	×	×	×
	緊急時対策上重要なものおよび異常状態の把握機能	・5号炉原子炉建屋内緊急時対策所			R/B(5号炉)	×	×	×
		・試料採取系			R/B	×	×	×
		通信連絡設備	所外通信	・有線系	各建屋 （地下設備含む）	×	×	×
					送電鉄塔	×	×	×
			所内通信	・有線系	各建屋 （地下設備含む）	×	×	×
					屋外設備	×	×	×
		・放射線監視設備	モニタリングポスト		屋外	×	×	×
			放射能観測車		可搬型SA設備保管場所	×	×	×
		・事故時監視計器の一部			R/B，T/B，C/B，Rw/B	×	×	×
					気象観測装置	×	×	×
		・津波監視カメラ			7号炉R/B 主排気筒	×	×	×
		・消火系			給水建屋 水処理建屋	×	×	×
					ろ過水タンク （屋外配管含む）	×	×	×
					泡消火設備	×	×	×
		・安全避難通路，非常用照明			各建屋内	×	×	×

※1：間接関連系は，当該系の機能遂行に直接必要ない構築物，系統及び機器であるため，記載を省略した。（評価対象施設に関する物のみ記載）
※2：重大事故等対処設備(SA設備)，原子炉建屋(R/B)，タービン建屋(T/B)，コントロール建屋(C/B)，廃棄物処理建屋(Rw/B)

防護上の観点又は機密に係わる事項を含む為，公開できません

図1.4.3 倒壊により外部事象防護対象施設が損傷する可能性がある施設の抽出

数値気象解析に基づく竜巻検討地域の設定について

1. はじめに

一般的に，大気現象の水平方向の広がりのことは「水平スケール」と呼ばれ，寿命や周期は「時間スケール」と呼ばれる。図 1 は雷雨とその関連事象の時空間スケールの関係を表したものである。個々の積雲の時空間スケールは 1 km・10 分程度であり，発達・組織化（マルチセル化・スーパーセル化）すると 10～100 km・数時間～半日程度にまで大きくなる。それに対し，竜巻の時空間スケールは数分・100 m 程度である。

竜巻の発生メカニズムを考える際，時空間スケールの階層構造が重要である（図 2)。ある大気現象は，スケールのより小さな現象を内包しており，竜巻の場合，竜巻の漏斗雲内の気流は数十メートル～数百メートル規模（マイクロスケールと呼ばれる（Orlanski 1975)；図 2 では “MISOCYCLONE“と記載されている）の現象であるのに対し，竜巻を引き起こすもとの積乱雲である親雲のスケールは数キロメートル～数十キロメートル規模（メソスケールと呼ばれる。図 2 では “MESOCYCLONE” と記載されている）である。台風，低気圧，前線等のいわゆる総観場は，数百キロメートル～数千キロメートル規模（総観スケールと呼ばれる。図 2 では ”MASOCYCLONE” と記載されている）として扱われる。また，竜巻内部には吸い込み渦（図 2 では“Suction Vortex”と記載されている）と呼ばれるさらに強い渦が形成されることもある。

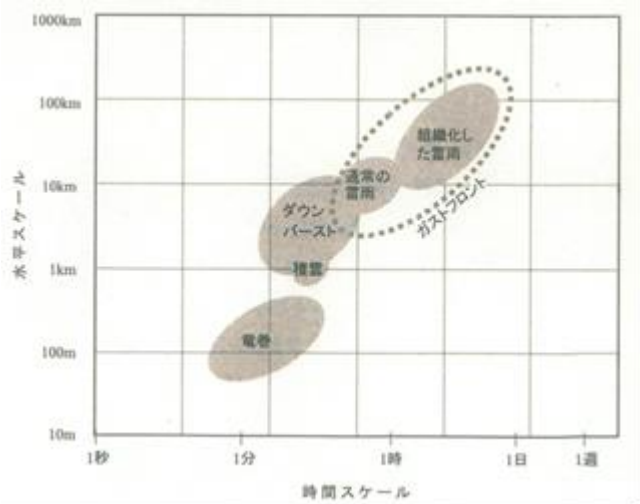


図 1　雷雨とその関連現象の時空間スケール（大野 2001）

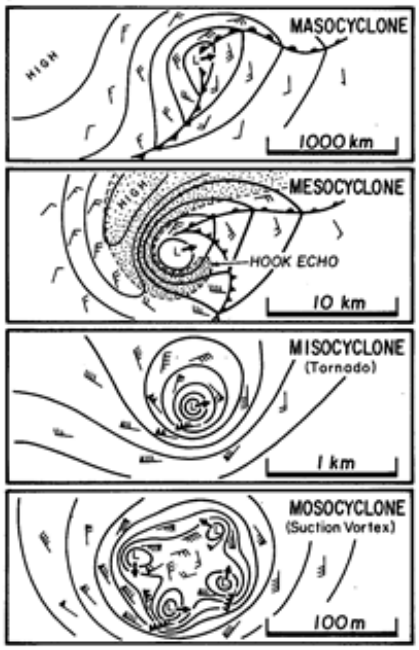


図 2　竜巻発生時の渦の多重構造（Fujita 1981）

このように，竜巻の発生にはさまざまなスケールの現象が介在し，異なるスケールの現象が相互作用しているため，竜巻の発生頻度や強度の地域性は複数の時空間スケールで議論する必要がある。気象学における現状として，観測データの欠如や数値シミュレーション技術の不十分さゆえにマイクロスケールの現象の理解が難しく，未知なメカニズムもあると認識されている。一方，総観場の観点では，さまざまなパターンで竜巻が発生していることがわかっており，「日本海側では台風性竜巻の発生が確認されていない」ことや，地域に応じて総観場の割合が異なる等の分析結果が得られている。しかし，例えば，寒冷前線起因の F3 竜巻が実際に発生している（1990 年茂原竜巻や 2006 年佐呂間竜巻等）が，寒冷前線自体は国内どこでも通過し得るため，ある地域において F3 竜巻が発生し難いことを総観場の分析結果だけで示すのは難しい。

ガイドでは，基準竜巻風速 V_{B1} の設定の際に国内最大規模の竜巻ではなく竜巻検討地域内における記録等を参照する場合には，その明確な根拠を提示する必要があると記載されている。そのため，総観スケールの気象場の分析結果のみではなく，メソスケールあるいはマイクロスケールの気象場の特徴から地域性が見られる理由，及び竜巻検討地域内の記録を参照して V_{B1} を設定できる根拠をより気象力学的に明らかにすることが必要である。ただし，上述のように，マイクロスケールでの議論は極めて困難である。

そこで，マイクロスケールで発生する竜巻現象を包含する気象場（以下，環境場と呼ぶ）として，親雲の水平スケールに対応するメソスケールの気象場を対象として，F3 規模以上の竜巻の発生に適した環境場が生起する頻度についてその地域性の有無を検討する。以下，第 2 節では竜巻の発生メカニズムについて簡単に触れ，竜巻発生環境場を議論する上で重要な視点について述べる。第 3 節では，発生環境場の指標として活用されている突風関連指数について，本検討で用いる突風関連指数の概要を述べる。第 4 節では，気象モデルを用いて顕著な竜巻の数値シミュレーションを行い，気象場や突風関連指数の解析結果を考察する。この結果をもとに，第 5 節において過去 50 年間の気象解析データを用いて，突風関連指数の地域性について分析し，F3 規模以上の竜巻発生に適した環境場の生成のし易さを観点とした地域性の有無について考察する。第 6 節では北海道網走支庁佐呂間町にて発生した F3 竜巻の特殊性，及び竜巻検討地域設定に対する取り扱いについて述べる。

なお，メソスケールでの地域性を検討するに際し，ヨーロッパ中期予報センターの長期再解析データをもとに，気象モデルを用いたダウンスケーリングと呼ばれる手法により当該スケールに対する空間分解能（水平解像度 5km）を有する気象データを作成した。今回，1961 年～2010 年の 1 時間ごとのデータを使用した。その検討フローを図 3 に示す。

過去の既往文献や，国内外で発生した大きな竜巻を対象とした発生環境場に関する解析結果をもとに，不確かさも考慮して突風関連指数の閾値を設定し，長期間にわたる気象データにおいて，その閾値を超過する頻度を算出し，得られた頻度分布において定性的に十分に差があるかどうかを観点として地域性の有無を考察した。

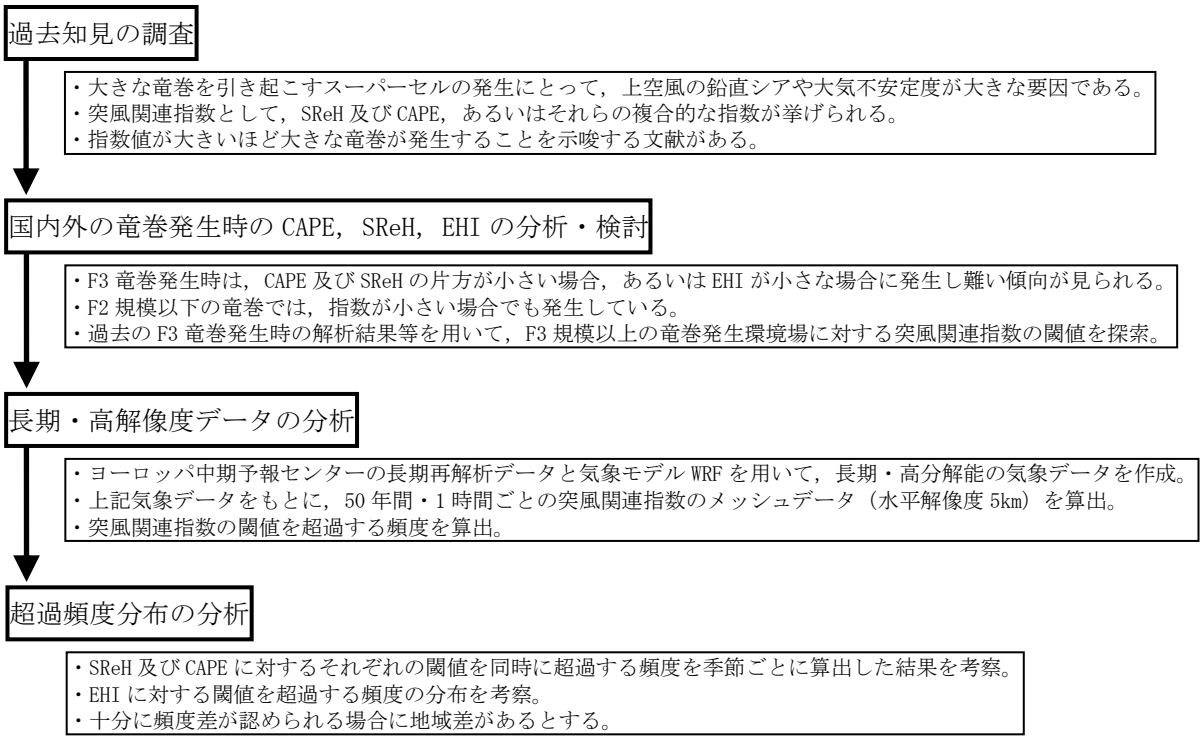


図 3 メソスケールでの分析フロー

2. 竜巻の発生メカニズム・分類とメソスケール分析の有効性

2.1 竜巻の発生メカニズム

竜巻の発生メカニズムは二つに大別されると考えられている（新野 2007）。一つは，スーパーセルと呼ばれる特徴的な構造を有する巨大積乱雲に伴うもの（図 4 に例示した模式図参照）であり，もう一つは，気温・湿度や風向・風速が急変する局地的な前線（図 5 に例示した模式図参照）に伴うものである。

スーパーセルを伴う竜巻では，大気下層における鉛直シア（風向が上下で逆転する，あるいは風速が上下で大きく異なる場合に生じる）に伴って水平軸を有した渦管が形成され，それが上昇気流によって数キロメートル上空まで持ち上がる。その際，メソサイクロンと呼ばれる直径 3・4km～10km 程度の鉛直軸回りの強い渦が積乱雲中にでき，その下部に竜巻が発生する（Klemp and Wilhelmson 1978；図 4 参照）。このように，メソサイクロンの形成がこの種の竜巻の最大の特徴である（新野 2007）。図 4 に示すように，鉛直シアによりスーパーセル内では降水粒子の落下域（下降流域）と上昇流域が分離されるため，巨大な積乱雲にまで発達し，長時間持続し得る。国内で発生した F2 規模以上の竜巻に対し，スーパーセルあるいはミニチュア（ミニ）スーパーセルが存在したことを観測・解析した成果も得られている（Suzuki et al. 2000，Mashiko et al. 2009 等）。また，水平風速のマイクロスケールの空間スケールを有する竜巻漏斗雲の形成メカニズムについては，水平渦が

上昇気流により引き伸ばされることの影響，あるいはメソサイクロンが地表面付近の上昇気流への影響等が指摘されている（Noda and Niino 2010）が，多くは未解明であり，レーダ観測や数値実験による研究が行われている。しかし，メソサイクロンが強いほど竜巻強度が大きくなるという関係性が，最先端のドップラーレーダを用いた詳細観測により分かってきている。(Burgess et al.2002)

一方，局地前線に伴う竜巻では，気温・湿度，風向・風速が水平方向に鋭く変化する局地的前線面において，水平シア流の不安定や傾圧的作用等により生成した鉛直軸周りの渦が鉛直方向に引き伸ばされることによって発生する（Lee and Wilhelmson 1997)。スーパーセルとは大気成層が大きく異なり（Doswell and Evans 2003)，降水粒子が地上に達する段階になると下降気流が上昇気流を打ち消すため（Byers-Braham の概念)，積乱雲がこれ以上発達せず，衰弱・消滅する。そのため，強い竜巻が生じにくいと考えられている。局地的に水平スケールは数キロメートル以下であり，メソスケールのうち小さなスケール（メソγスケール)，あるいはマイクロスケールにあたる。この種の渦は，上記のサイクロンに対してマイソサイクロンと呼ばれている。

2.2 竜巻の分類

上記にて説明した発生メカニズムの観点から，メソサイクロンの形成が大きな竜巻の発生と深く係わっていることがわかる。米国では，メソサイクロンが形成される竜巻は，スーパーセル型と呼ばれる F2~F5 規模を想定した顕著な竜巻として分類され，F1 規模以下の竜巻は局地前線等に伴う非スーパーセル型と分類されている(Rassmussen and Blanchard 1998, Doswell and Evans 2003)。国内にて発生した F2-F3 を含めた全ての F3 竜巻(6 事例)[1] もメソサイクロンを伴うスーパーセル型であったと報告されている（表１)。

そこで，飯塚・加治屋（2011)，Bluestein（2013）及びその他の検討（Rassmussen and Blanchard 1998, Doswell and Evans 2003）と同様に，メソサイクロンの有無で竜巻を分類することとし，メソサイクロンを有する場合を「スーパーセル型」，そうでない場合を「非スーパーセル型」と定義する。

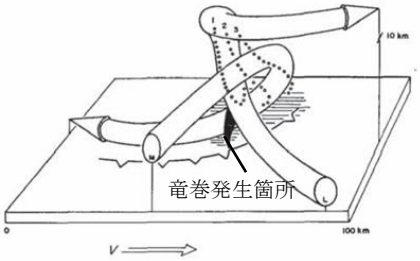
なお，スーパーセル型・非スーパーセル型竜巻の同定に関する国内の検討例として，飯塚・加治屋（2011）による分析が見られ，2006 年～2009 年間の 3 ヶ年においてスーパーセル型竜巻の竜巻強度は，F2 及び F3（3 事例)，F1（6 事例)，F0（8 事例)，F 不明（2 事例）であったのに対し，非スーパーセル型竜巻では，F2 及び F3 竜巻（0 事例)，F1（9 事例)，F0（11 事例)，F 不明（5 事例）であったと報告している。分析期間は短いものの，国内で発生した F3 竜巻のスーパーセル型の竜巻強度の傾向を考慮すれば，大きな竜巻は米国と同様に基本的にスーパーセル型に分類できるといえる。

[1] 気象庁データベースにおける括弧つき F2-F3 竜巻（(F2-F3)と記載された竜巻）は過去に 5 事例（1960 年代に 4 事例，1990 年に 1 事例）報告されている。これらの竜巻については解析を実施した文献が見あたらなかったため，表 1 には記載していない。

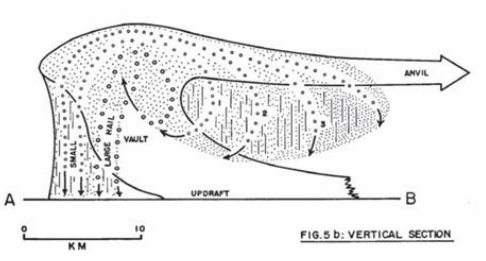
2.3 メソスケールでの分析の有効性

空間スケールの観点では，メソスケール気象場の分析はスーパーセル型竜巻の発生しやすさの傾向・地域性を分析する目的には十分であるが，空間スケールの小さく，竜巻強度も小さい非スーパーセル型竜巻に対しては向かない。また，竜巻強度の観点では，大きな竜巻（国内最大強度の F3 を含む F2 以上の規模の竜巻）の発生のしやすさがメソスケール気象場の分析により検討することができる。したがって，設計基準を考える際には，スーパーセル型竜巻の発生を観点とした地域性を検討することが妥当である。

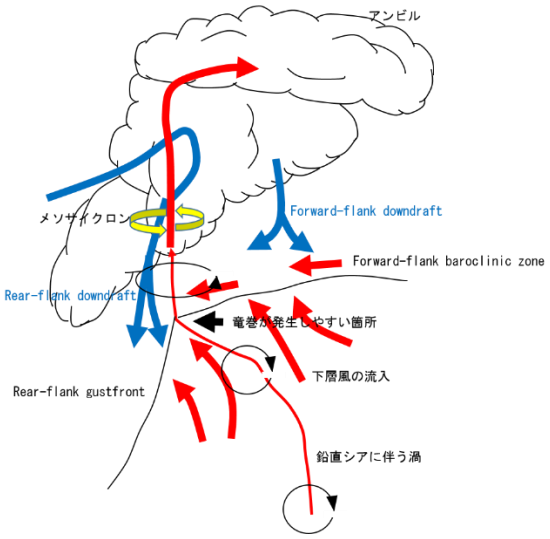
そこで，3 節以降では，突風関連指数と呼ばれる竜巻の発生のしやすさを指数化した量を用いて，大きな竜巻の発生のしやすさについて分析し，その地域性について検討する。その際，スーパーセル型竜巻はメソサイクロンを有する点が特徴的であり，その発生はメソスケールにおける風の鉛直シアや大気不安定性と深く係わっている（Bluestein 2013,Klemp and Wilhelmson 1978,Rotunno and Klemp 1985,Trapp 2013）ことから，SReH 及び CAPE，あるいは EHI と呼ばれる突風関連指数を用いる。



風況場



鉛直断面構造



メソサイクロンの形成メカニズム

図 4　スーパーセル型雷雨の構造（Browning 1964, Bluestein 2013 に加筆）

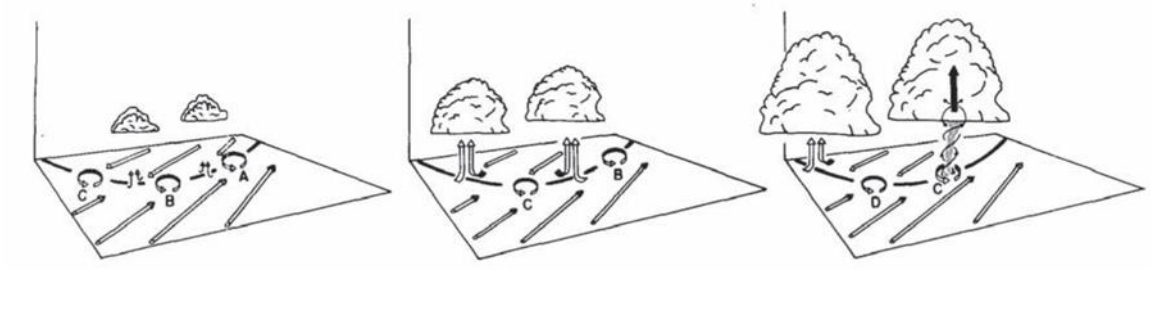


図 5　局地前線に伴う竜巻の発生機構に関する模式図（Wakimoto and Wilson 1989）
（上向きの黒い⇒が上昇気流を表す）

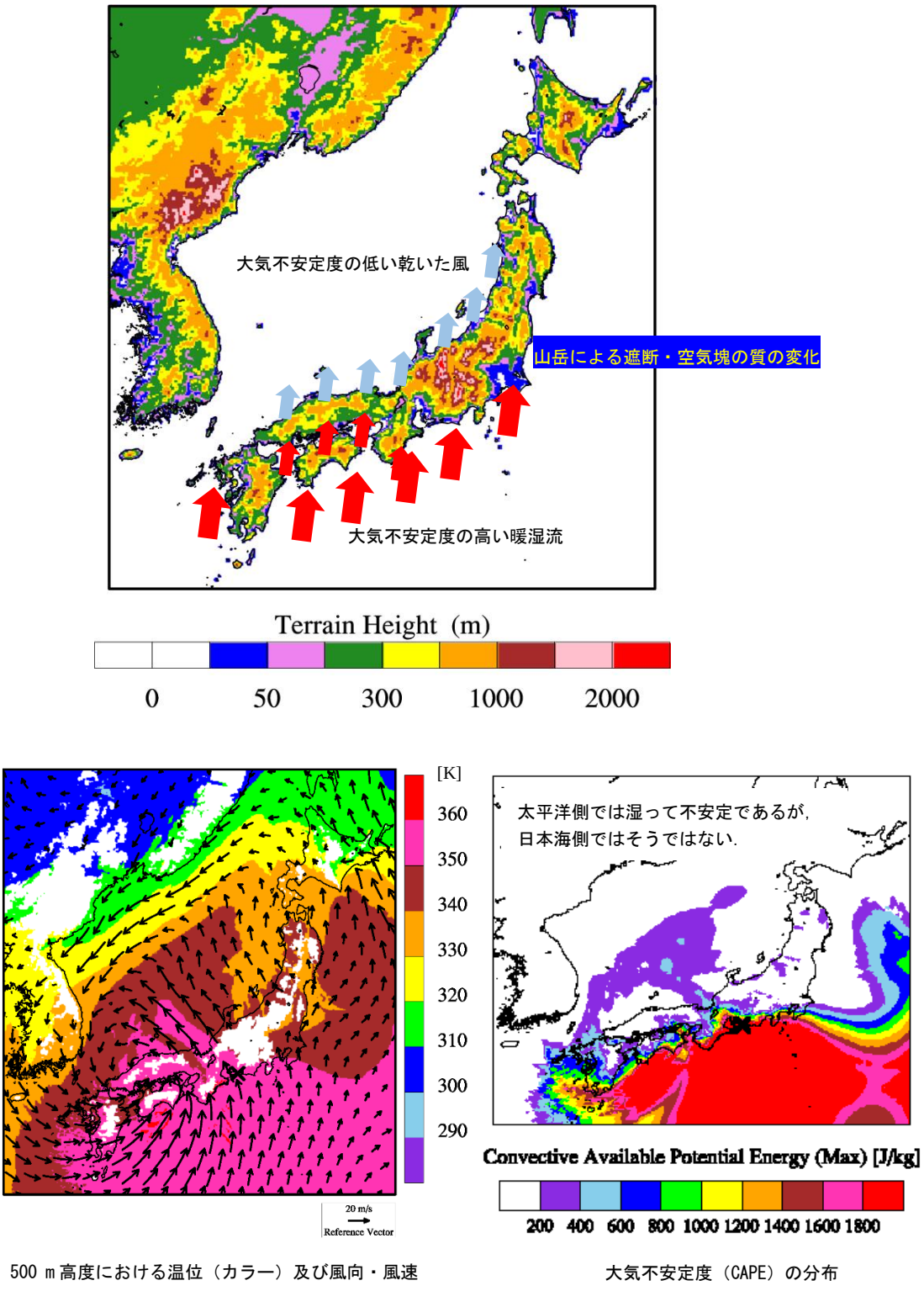


図 6　（上）総観スケールでの気流場の模式図（カラーは標高を表す）及び
（下）1999 年 9 月に豊橋にて発生した F3 竜巻の事例

表 1 過去に国内にて発生した F3 規模竜巻の概要

発生日	発生場所 （県・市町村）	Fスケール	主な総観場	メソサイクロンの存在を 報告した資料・文献
1971/7/7	埼玉県浦和市	（F3）	台風	Fujita et al.（1972）
1978/2/28	神奈川県川崎市	F2-F3	寒冷前線	村松（1979）
1990/12/11	千葉県茂原市	F3	暖気の移流	鈴木・新野（1991）、Niino et al.（1993）
1999/9/24	愛知県豊橋市	F3	台風	坪木ら(2000)
2006/11/7	網走支庁佐呂間町	F3	寒冷前線	Kato and Niino（2007）
2012/5/6	茨城県常総市	F3	気圧の谷	Yamauchi et al.（2013）

3. 突風関連指数

突風関連指数はこれまで数多く提案されており，気象庁における現業においても竜巻探知・予測に活用されている（瀧下 2011 等）。ここでは，国内外で最も知見が蓄積された指数として SReH（Storm Relative Helicity：ストームの動きに相対的なヘリシティー；Davies-Jones et al. 1990），CAPE（Convective Available Potential Energy：対流位置有効エネルギー；Moncrieff and Miller 1976）を用いる。図 7 及び図 8 にそれぞれ，両指数の算出概念を表す。概して，SReH は風の鉛直シア（高度方向の風向・風速差）に伴って発生する大気の水平渦度が親雲に取り込まれる度合，CAPE は大気の不安定度合の指標である。値が大きいほどその度合が高くなる。大気下層の空気塊を「持ち上げて」乾燥断熱線及び湿潤断熱線を求め，空気塊が自由対流高度に達した際に積乱雲の発達するポテンシャルとして CAPE を計算する。

図 7　SReH の算出概念

（左：水平渦度生成に関する模式図，右：水平渦度の親雲への輸送に関する模式図）

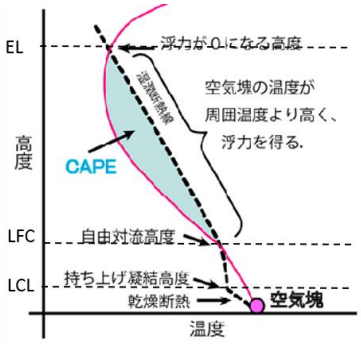


図 8　CAPE の算出概念

両指数の算出式は以下のとおりである。

$$\mathrm{SReH} = \int_{\text{地上}}^{\text{高度}3km} (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega}\, dz \tag{1}$$

$$\mathrm{CAPE} = \int_{LFC}^{EL} g \frac{\theta_e'(z) - \theta_e(z)}{\theta_e(z)} dz \tag{2}$$

ここで，式（1）の V は水平風速ベクトル，ω は鉛直シアに伴う水平渦度であり，C のストームの移動速度は Bunkers et al.（2000）にしたがって，長期再解析データから得られる地上高 6km の平均風速と，シアベクトル（地上高 5.5～6km 層の水平風ベクトルと 0～0.5km 層の水平風ベクトルの差）から算出する関係式にて求めた。式（2）の g は重力加速度，θ_e はストーム周囲の相当温位，θ_e' は持ち上げ空気塊の相当温位であり，dz は鉛直方向の層厚である。LFC は自由対流高度と呼ばれ，前線周辺の風の水平方向の収束，太陽による地表面加熱，地形による強制上昇等によって，空気塊がこの高度まで何らかの要因で持ち上げられると（$\theta_e < \theta_e'$ となり）自身の浮力だけで上昇し，平衡高度 EL（$\theta_e = \theta_e'$ となる）に達するまで積乱雲が発達する（図 8）。なお，温位とは，式（3）に示すように気温 T と気圧 p に関する量であり，ある空気塊を断熱的に基準圧力 1000 hPa に戻したときの絶対温度である。気温は高度によって変わるが，温位は同じ空気塊では常に一定（断熱過程では温位は保存される）な物理量であるため，空気塊のあたたかさ，浮力特性，及び不安定性を把握するのに用いられる（付録 A 参照）。

$$\theta = T\left(\frac{1000}{p}\right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (R:\text{気体定数},\ C_p:\text{定圧比熱}) \tag{3}$$

二つの空気塊を比較した場合，温位の高い空気塊は軽く上昇しやすく（不安定であり），単位体積中に含み得る水蒸気量が多いと，大きな積乱雲の発生につながる。竜巻が発生する積乱雲の中では，水蒸気が降水粒子に変化しているため，その際に発生する潜熱の影響が考慮された相当温位が保存される。乾燥している気象場では相当温位と温位は等しい。

式（1）を見ればわかるように，SReH は，上端高度の違いによって値が変わる。上端を地上から 3 km とした場合，その殆どが地上から 1 km までの大気によるヘリシティーであるという指摘（Rasmussen 2003）があるが，1 km 高さは夏場では境界層高さ（雲底高度）程度と低めであるため，本検討では多くの既往検討と同様に 3 km とする。また，持ち上げる空気塊の性質によって CAPE の値は変わる。地表から 500 m 程度上空までの平均的な性質を持つ空気塊を持ち上げたときの MLCAPE（Mean Layer CAPE）がよく用いられる。本検討では，地表から 500 m 上空までで最も不安定な空気塊を持ち上げる。このようにして求められた CAPE は MUCAPE（Most Unstable CAPE）と呼ばれる。大気下層に冷気がありその上空で対流が発生する場合を考慮することができる。このような場合，MLCAPE では安定な大気とみなされることにより CAPE 値が非常に小さくなる傾向にある（付録 B 参照）。

本検討では，SReH と CAPE に加え，EHI と呼ばれる SReH と CAPE の複合指数を用いた分析も行った。Davies（1993）は EHI 算出に MLCAPE を用いたが，本検討では MUCAPE を用いて以下のように EHI を算出した。

$$\mathrm{EHI} = \frac{\mathrm{SReH} \times \mathrm{CAPE}}{160000} \tag{4}$$

4. 国内で発生した F3 竜巻及び日本海側 F2 竜巻の数値シミュレーション

竜巻発生時の気象場（風向・風速，気温，気圧，水蒸気量等）を数値気象モデルにより解析し，その解析結果をもとに突風関連指数を算出する。気象モデルとして WRF（Weather Research and Forecasting）モデル（Skamarock et al. 2005）バージョン 3.2.1 を用いた。WRF モデルは，気象力学・物理現象を数値モデル化したものであり，（竜巻の親雲の水平スケールに対応する）メソγスケール（水平方向 2 km ～ 20 km 程度）の気象要素を解析できるコミュニティーモデルとして世界的に利用されている（付録 C 参照）。主な計算条件は表 2 に記すとおりである。電力中央研究所による長期高解像度再解析データセット（橋本ら 2013）と同様の条件を採用しており，ネスティングと呼ばれる技法を用いて，水平解像度 15 km で解析した結果をもとに水平解像度 5 km の解析結果を得る。これにより，粗い水平空間分解能（ECMWF-Interim：約 70 km，ERA40：約 250 km）の初期・境界値データから詳細メッシュの気象場を解析できる。なお，30 分間隔で計算結果を出力し，当時の天気図や気象レーダ画像等を参考にして竜巻発生時刻と解析結果における降雨域の通過時刻との違いや，対応する降雨域の有無を確認することにより，計算結果に大きな問題がないことを確認した。気象庁の竜巻等の突風データベースでは，1988 年以降の事例に対しては天気図に加え，レーダ画像も掲載されている。1988 年以降の事例については WRF モデルによる解析結果の適切性をレーダ画像と天気図から判断した。1987 年以前の事例については F3 竜巻については天気図から判断した。基本的に，発生時刻から±1 時間内に擾乱が竜巻発生地点周辺を通過することを適切性の判断基準とした。

表 2　WRF モデルセットアップの概要

水平グリッド間隔	15 km（親領域），5 km（子領域）
鉛直層数	35
積分時間間隔	90秒（親領域），30秒（子領域）
モデル上端気圧	50 hPa
初期・境界値データ	ECMWF-Interim（1989年～），ERA40（～1988年）
ネスティング	フィードバック有
積雲対流スキーム	Kain-Fritsch（親領域のみ）
雲物理スキーム	Morrison 2-moment（両領域）
接地層スキーム	2-D Smagorinsky（両領域）
境界層スキーム	YSU（両領域）
地表面スキーム	Noah LSM（両領域）
放射スキーム（長波）	RRTM（両領域）
放射スキーム（短波）	Dudhia（両領域）

分析対象事例は，表 3 に示すとおり，過去に発生した F3 竜巻（1987 年以前の F2-F3 竜巻は除く），1988 年以降に日本海側で発生した F1-F2，F2 竜巻とした（F3 竜巻は 5 事例，F2-F3 竜巻は 1 事例，F2 竜巻は 3 事例，F1-F2 竜巻は 1 事例）。1987 年以前に発生した竜巻については，（初期値・境界値データとして使用している ERA40 の水平空間分解能が約 250 km と粗いために，竜巻通過時刻や発生箇所が実際に比べて乖離する場合がある[1]ため）この資料では対象としていない。ただし，F3 竜巻に対しては 1987 年以前の竜巻に対しても解析を行い，計算結果の適切性も確認している。なお，対象事例に対して適切性が低いことを理由に除外した事例はない。

[1] 5 章では WRF モデルで解析された 1961 年から 50 年間のデータを用いるが，発生時刻や発生箇所に多少の違いがあったとしても事象を漏れなくカウントできれば地域性の検討には問題ない。

表 3　分析対象事例の概要

発生日時	季節	発生地点	Fスケール	計算開始日時	SReH	MaxCAPE
2012/05/06 12:35	暖候期	茨城県常総市	F3	2012/05/06 03時	270	2115
2006/11/07 13:23	寒候期	北海道網走支庁佐呂間町	F3	2006/11/07 03時	714	813
1999/09/24 11:07	暖候期	愛知県豊橋市	F3	1999/09/24 03時	403	2459
1990/12/11 19:13	寒候期	千葉県茂原市	F3	1990/12/11 09時	649	1201
1971/07/07 07:50	暖候期	埼玉県浦和市	F3	1971/07/06 15時	337	1746
1990/02/19 15:15	寒候期	鹿児島県枕崎市	F2-F3	1990/02/19 03時	745	373
1991/06/12 13:30	暖候期	富山県魚津市	F2	1991/06/12 03時	227	1358
1990/04/06 02:55	寒候期	石川県羽咋郡	F2	1990/04/05 15時	484	889
1989/03/16 19:20	寒候期	島根県簸川郡	F2	1989/03/16 09時	329	430
1999/11/25 15:40	寒候期	秋田県八森町	F1-F2	1999/11/25 03時	363	1222

表 3 中の SReH と最大 CAPE の値は，発生地点を中心とした東西・南北 100 km 四方内の最大値である。ここで，最大 CAPE を求めた理由と方法は以下のとおりである。雲物理過程により擾乱（竜巻を伴う積乱雲）が発生すると，発生前の大気不安定な状況が解消されるため，竜巻発生地点の CAPE 値は周囲に比べて低くなる傾向がある。つまり，解析データでは，ある格子点（メッシュ）で竜巻を伴う擾乱が発生しているとき，その格子点に対する CAPE 値は周辺のメッシュ値に比べて小さめになり得る(瀧下 2011 等)。これは,CAPE 値の大きさをもって竜巻の規模を定量的に検討する際に問題となる。そこで，Rasmussen and Blanchard (1998)を参考に，各格子点に対して，地上～500 m 高度までの平均風向を算出し，その風向に対して当該地点から風下側に扇形の影響範囲を設け，影響範囲内の CAPE 値の最大値を求めるように工夫した（図 9)。その際，扇形の半径は 15 km，中心角として平均風向を中心に± 45 度の範囲をとった。この最大値が最大 CAPE にあたる。このように算定することにより，周辺の CAPE 値の大きな空気塊が当該メッシュを含むスーパーセルに向かって流入することを考慮できる。

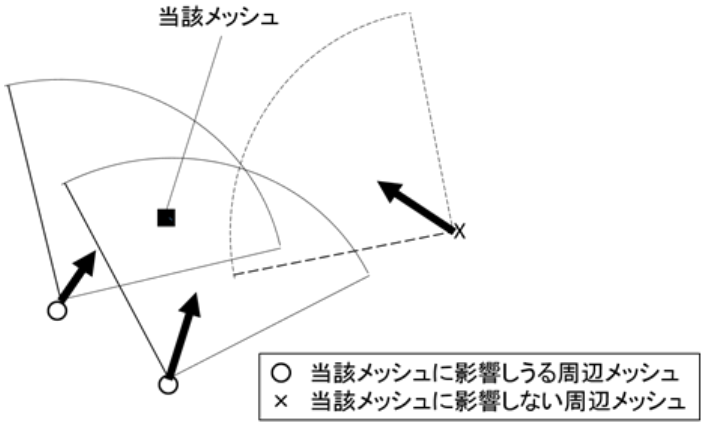


図 9　最大 CAPE 値の抽出方法の概念図

以下では，解析した気象場として，500 m 高度における風向・風速と相当温位の分布図，突風関連指数の解析結果として SReH 及び最大 CAPE の分布図を示す。全て 5 km 水平解像度の計算結果である。

4.1　2012/05/06 F3 事例（気圧の谷・寒気移流）

太平洋側から南西風が吹き込む一方，（中層では）大陸・日本海側側から寒気を伴う北よりの風が吹いており（図略），風のシアと大気不安定度が高まっている。SReH の値は東日本の太平洋側で非常に高いが，関東平野周辺では CAPE が非常に高く，3 個の竜巻がほぼ同時に発生した。

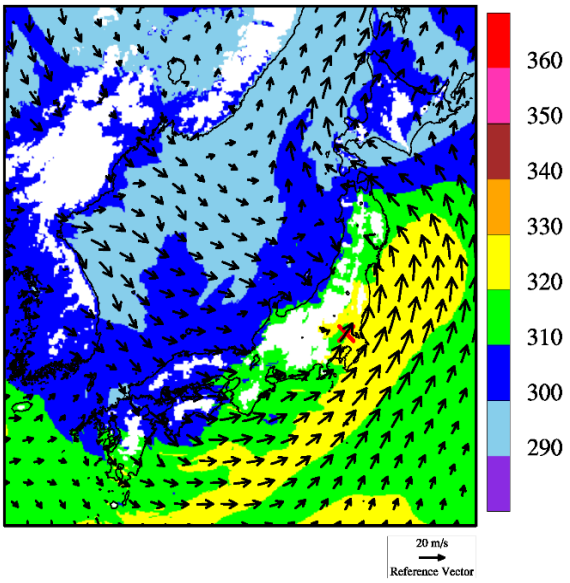
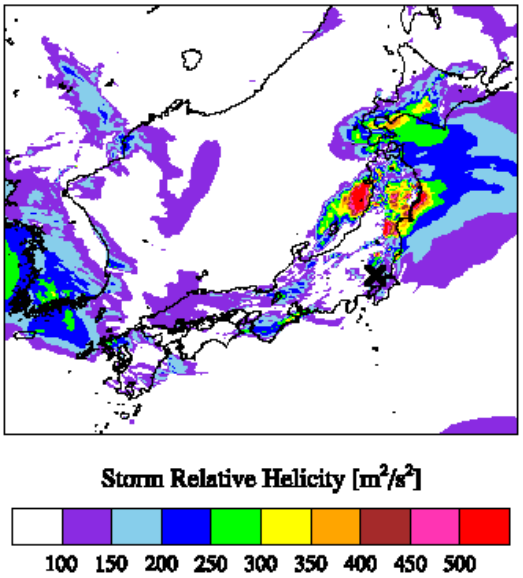
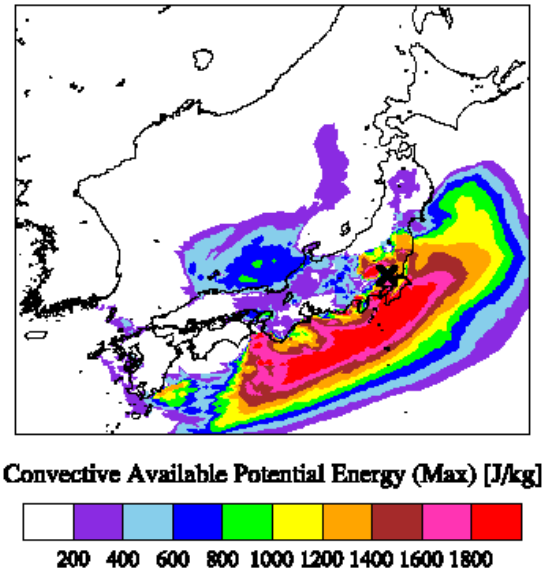


図 10　2012/05/06 F3 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速及び相当温位（単位：K）（左下）SReH，（右下）最大 CAPE





4.2　2006/11/07 F3 事例（寒冷前線・暖気の移流）

寒冷前線の西側では北西～西よりの冷たい風（寒色系）が，東側では南よりの暖かい風（暖色系）が吹いており，気温差と風の収束により積乱雲が発生・発達しやすい状況にある。特に，道東・オホーツク地方には太平洋から暖かく，不安定な空気塊が流入している。大気不安定度は道東の中でも南側で高くなっており，非常に高い風のシア（高い SReH）と相まって親雲が発達しやすい状況が解析されている。なお，同日に，周辺地域において 2 個の小さな竜巻も発生した。日本海側の中でも能登半島周辺より北側で季節風が吹き込み，大気がやや不安定になっている（CAPE が高めになっている）が，SReH が低く，道東・オホーツク海地方の状況とは異なる。

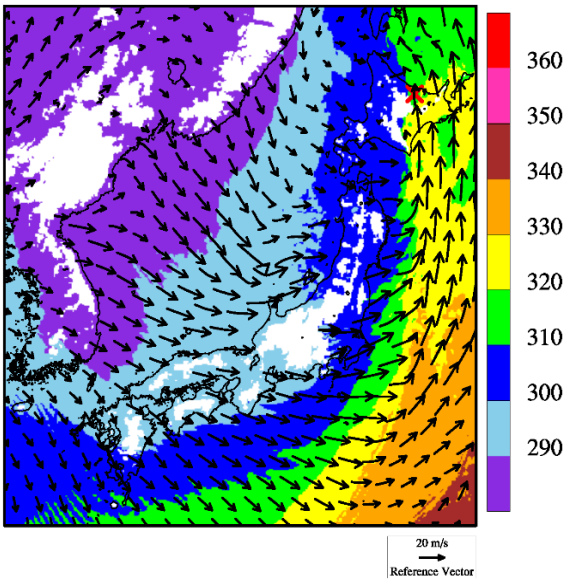
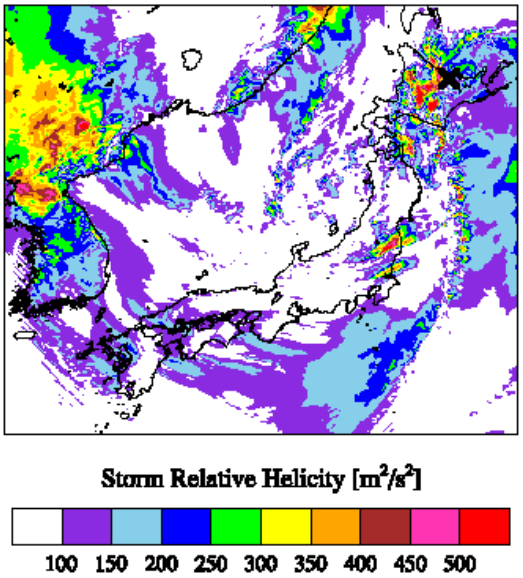
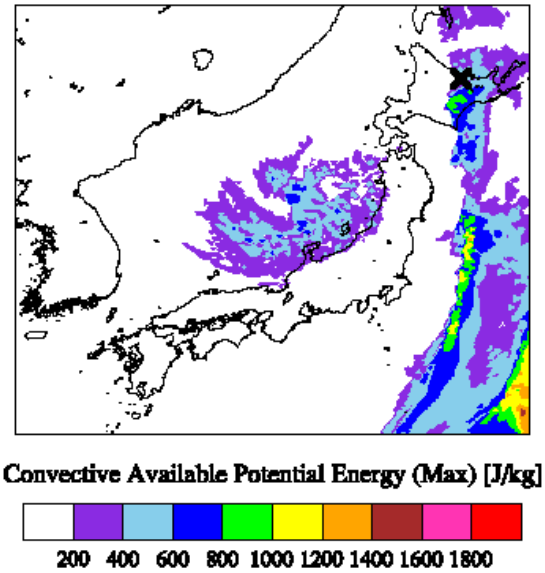


図 11　2006/11/07 F3 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速及び相当温位（単位：K）（左下）SReH，（右下）最大 CAPE





4.3　1999/09/24 F3 事例（台風）

台風の中心は隠岐の南西沖にあり，四国東部・紀伊半島の沿岸部及び濃尾平野では，台風中心から遠く離れているが，太平洋側からの非常に不安定な暖湿流が流れ込み（CAPE が非常に大きく），SReH も高くなっている。濃尾平野では 4 個の竜巻（2 個の F1，1 個の F2，1 個の F3）が発生した。台風中心が日本海側にあり，日本海側の SReH は太平洋側に比べて決して小さくはないが，不安定度は格段に小さいのが見てとれる。

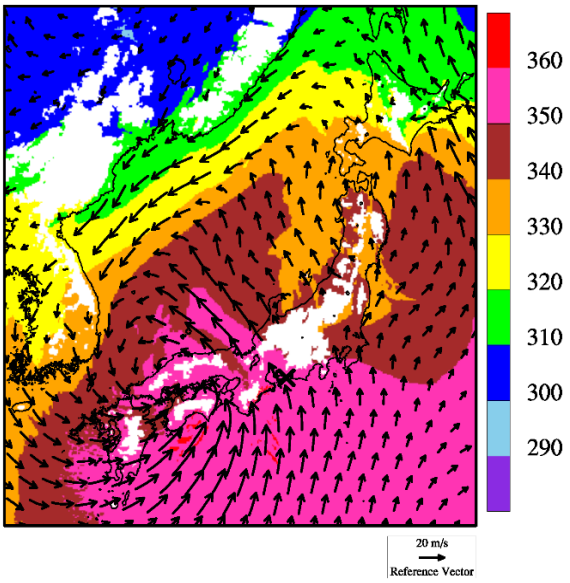
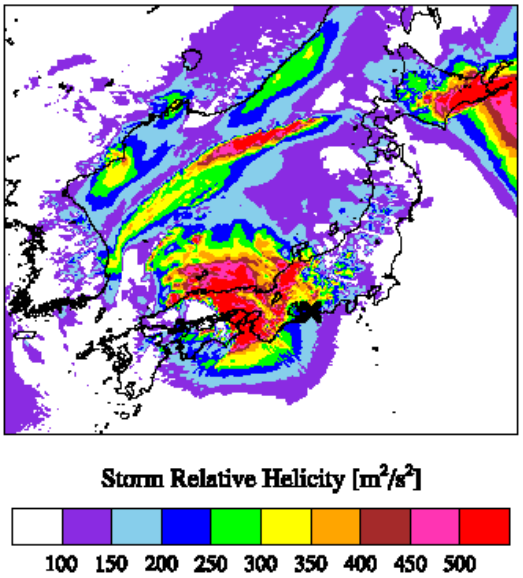
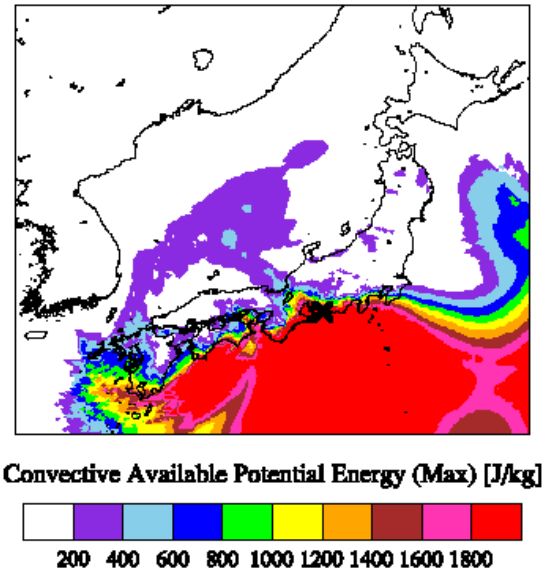


図 12　1999/09/24 F3 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速及び相当温位（単位：K）（左下）SReH，（右下）最大 CAPE





4.4　1990/12/11 F3 事例（暖気の移流・気圧の谷，寒冷前線）

房総半島と日本海に低気圧があり，房総半島の低気圧からは南西方向に寒冷前線が伸びている。そのため，寒冷前線及び房総半島にある低気圧を境に温位差が大きくなっている（寒色系と暖色系（緑色）の境が明瞭である）。房総半島には低気圧中心に向かって暖かく，不安定な空気塊が流入しており，房総半島では局所的に SReH の値も高い。房総半島周辺では大小 7 個の竜巻が発生した。

日本海側の低気圧をとりまくように，特に北側で SReH が非常に高くなっているが，温位が低く，CAPE の値も小さくなっている。一方，福島県沖に CAPE の高い領域が見られるが，SReH の値は大きくなく，相当温位も比較的低く，房総半島周辺とは状況が異なる。

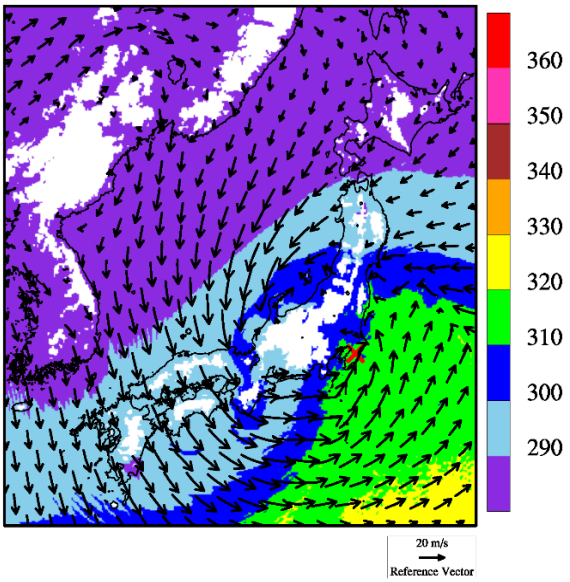
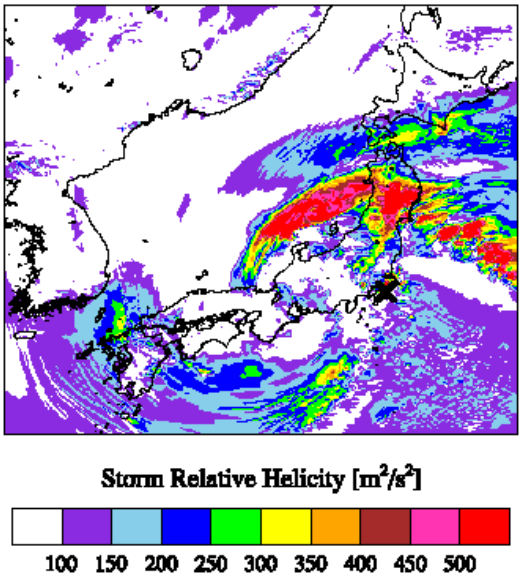
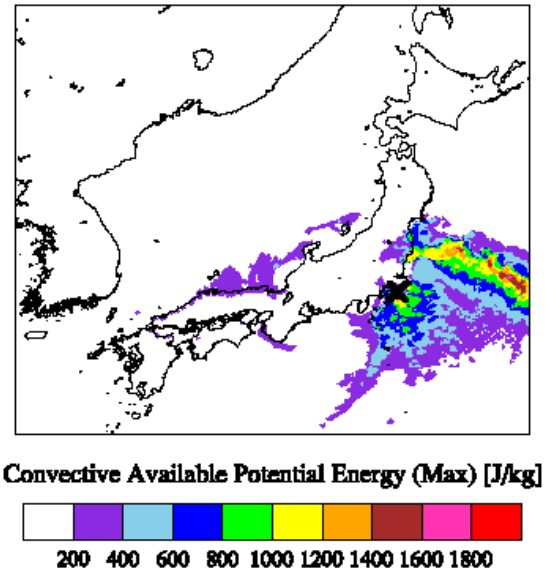


図 13　1990/12/11 F3 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速及び相当温位（単位：K）（左下）SReH，（右下）最大 CAPE





4.5　1971/07/07 F3 事例（台風）

台風の中心は紀伊半島の南西沖にあり，中部から東日本にかけては，太平洋側から非常に CAPE が高く，不安定な空気塊が流入している。SReH は，1999/09/24 F3 事例（豊橋竜巻）ほど大きくはないが，発生地点周辺では SReH が比較的高くなっており，SReH と CAPE の両方が共に大きい環境場となっていた。

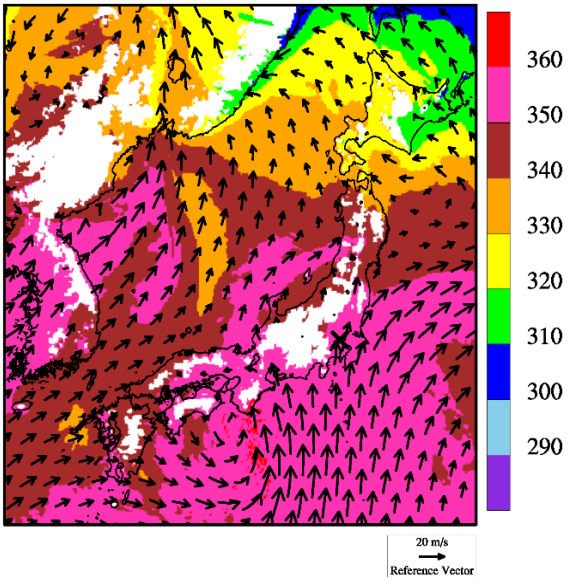
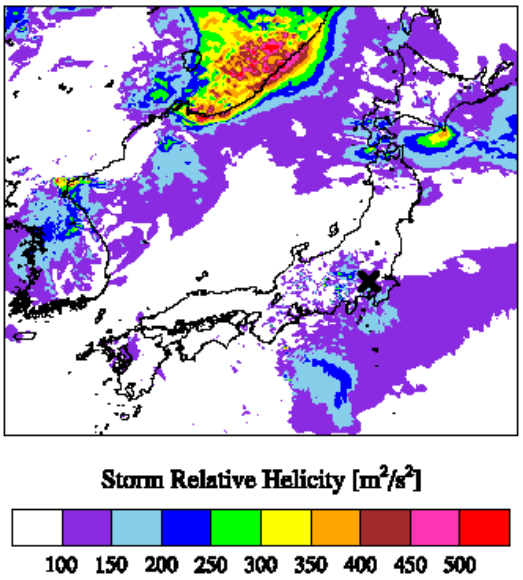
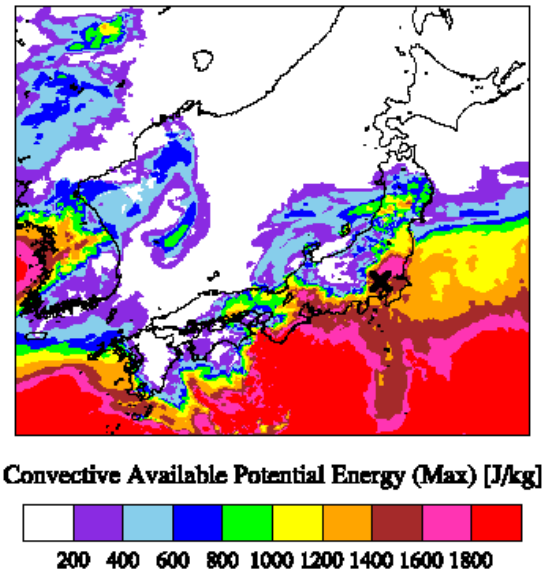


図 14　1971/07/07 F3 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速及び相当温位（単位：K）（左下）SReH,（右下）最大 CAPE





4.6　1990/02/19 F2-F3 事例（寒冷前線・暖気の移流・その他（低気圧））

朝鮮半島東部の沖合にある低気圧から寒冷前線と温暖前線が伸び，九州から近畿にかけては比較的暖かい気流が太平洋側から流入している。その中でも発生地点周辺には最も暖かい空気塊が流入しており，鹿児島県南部では局所的に CAPE の値がやや高くなっている。しかし，CAPE 値は F3 竜巻事例に見られるほど高くない。一方，寒冷前線に沿って SReH が非常に高かった。不安定性にやや欠けていたのが，F3 規模には至らなかった理由の一つであると考えられる。

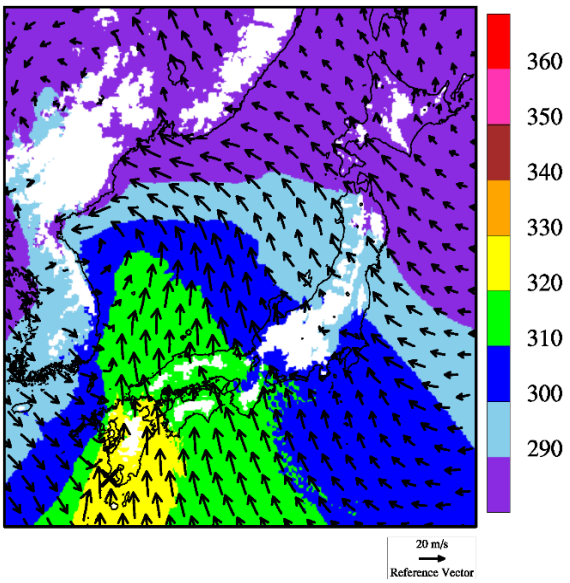
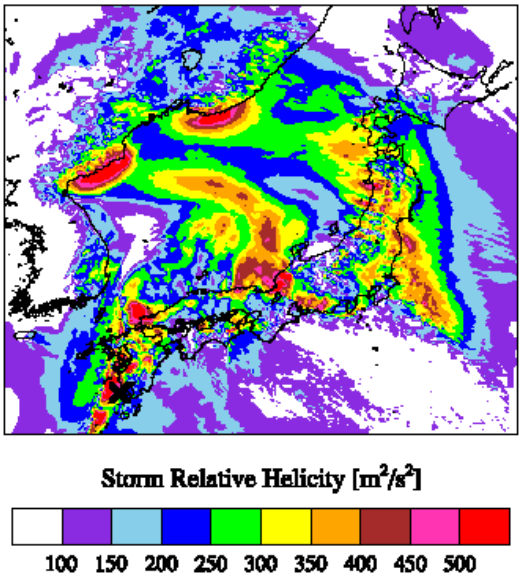
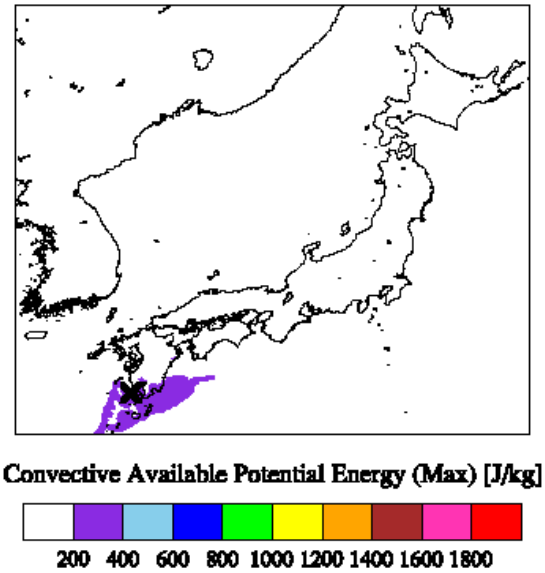


図 15　1990/02/19 F2-F3 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速及び相当温位（単位：K）（左下）SReH，（右下）最大 CAPE





4.7　1991/06/12 日本海側 F2 事例（寒冷前線・局地性擾乱）

日本海側沿岸に沿って寒冷前線があり，その北側では西南西の風が吹いている。空気塊の暖かさとしては太平洋側と同等のもの（茶色）が，対馬海峡から日本海に入り込んでおり，青森県沖まで到達している。ただし，大気不安定度は暖候期にしては大きくなく，寒冷前線南側の九州から近畿にかけての不安定度（CAPE 分布の赤い領域）と比べるとかなり小さい。SReH の値も特段高い傾向は見られず，F3 発生時の環境場とは様相が異なる。

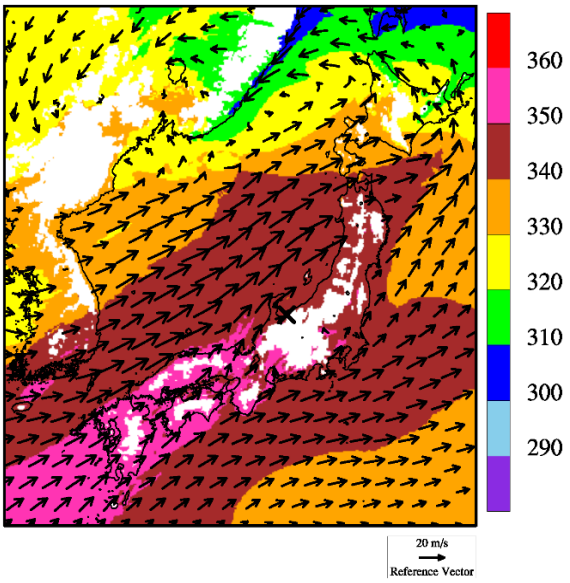
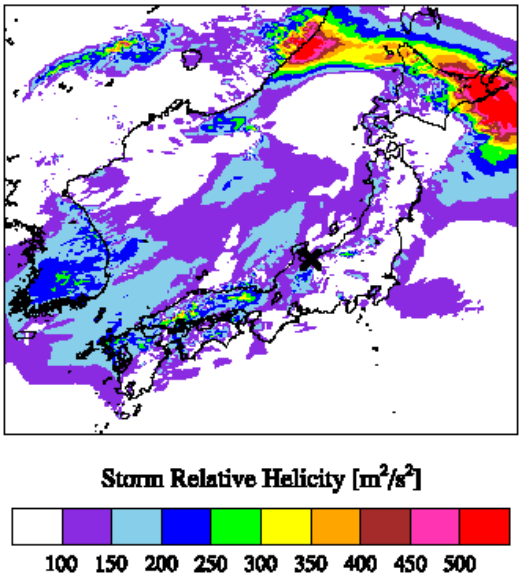
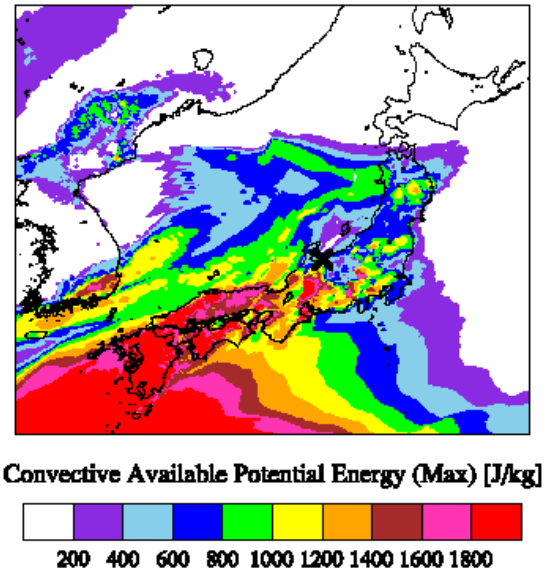


図 16　1991/06/12 F2 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速及び相当温位（単位：K）（左下）SReH,（右下）最大 CAPE





4.8　1990/04/06 日本海側 F2 事例（オホーツク海低気圧・気圧の谷）

オホーツク海にある低気圧と九州の南西海上にある高気圧との間で，西高東低の気圧配置となっており，朝鮮半島東部から季節風が能登半島から敦賀湾に向かって流れ込んでいる。冬季によく見られる状況といえる。能登半島周辺での不安定度の高さは，海上で寒気が暖められて大気が不安定になったことが原因であり，SReH も高めである。特に能登半島周辺では高い。不安定化のメカニズムは異なるが 2006/11/07 F3 竜巻（佐呂間竜巻）と似た環境場になっている。ただし，SReH が佐呂間竜巻に比べて 4 割程度低く，これが F3 規模に達しなかった理由の一つであると考えられる。

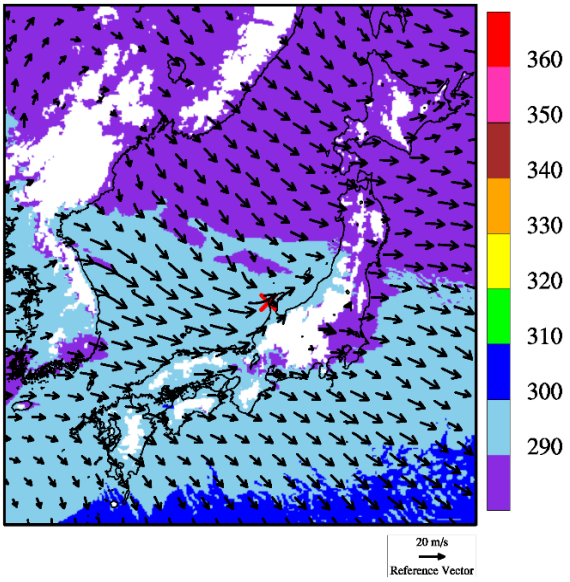
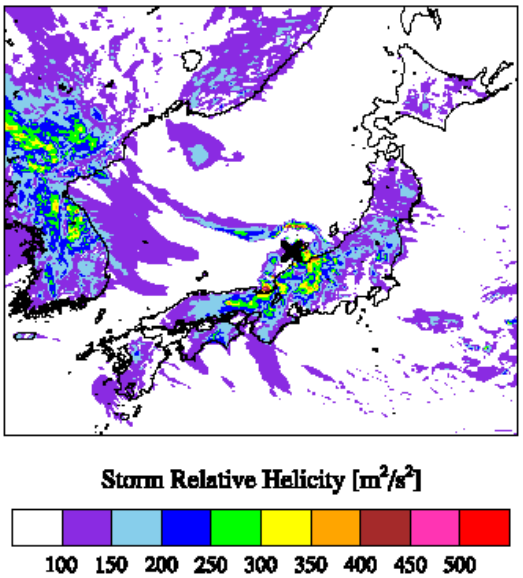
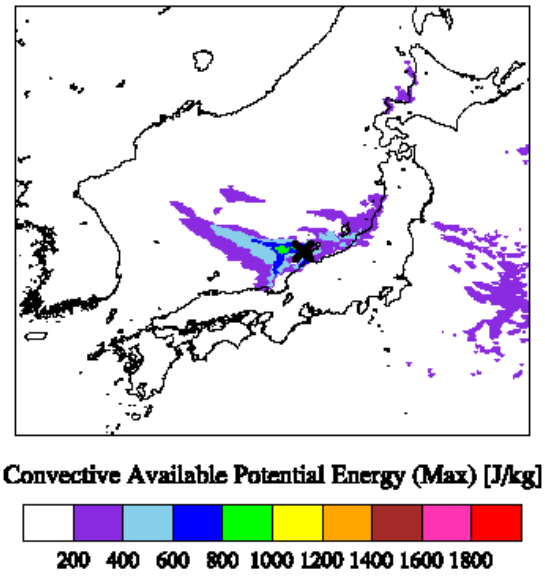


図 17　1990/04/06 F2 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速及び相当温位（単位：K）（左下）SReH,（右下）最大 CAPE





4.9 1989/03/16 日本海側 F2 事例（局地性擾乱・寒気の移流）

西高東低の弱い冬型の気圧配置にあり，朝鮮半島から寒気が流入している。島根県の沖で渦状の流れが形成されており，SReH がかなり高くなっている。しかし，やや不安定な大気になっているものの，他の日本海側 F2 事例よりも更に不安定度が低くなっており，環境場の観点では，F3 規模まで発達するには不安定度合が欠如していたと考えられる。

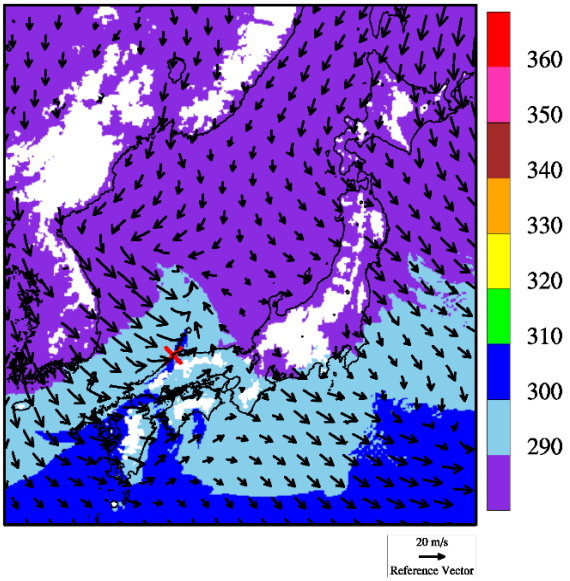
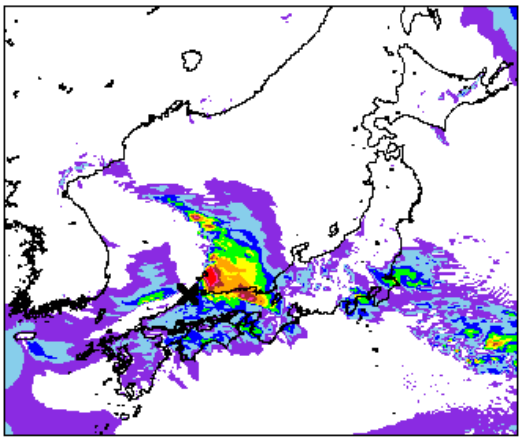
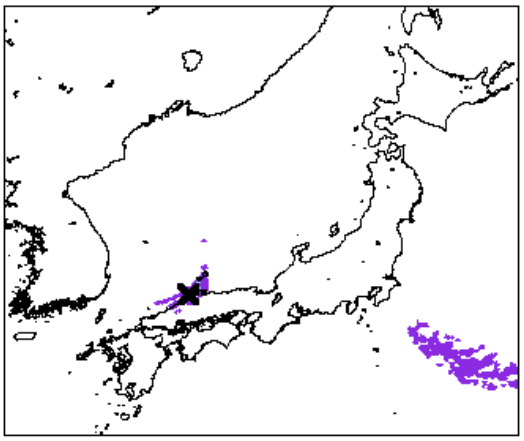
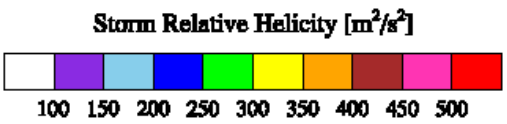
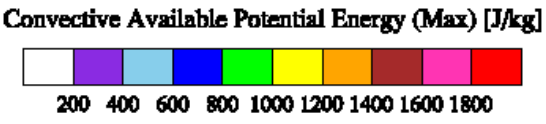


図 18　1989/03/16 F2 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速及び相当温位（単位：K）（左下）SReH,（右下）最大 CAPE









4.10　1999/11/25 日本海側 F1-F2 事例（日本海低気圧・寒冷前線）

北海道の西海上にある低気圧から延びた寒冷前線が日本海沿岸を通過した際に発生した。寒冷前線上では温位のコントラスト（青色と緑色）が明瞭であり，寒冷前線に沿った地域の中でも発生地点周辺はSReHが比較的高く，CAPEの高い範囲の北端部に位置している。CAPEの大きさは，寒候期に発生した F3 竜巻事例を上回ったが，SReHは低かった。

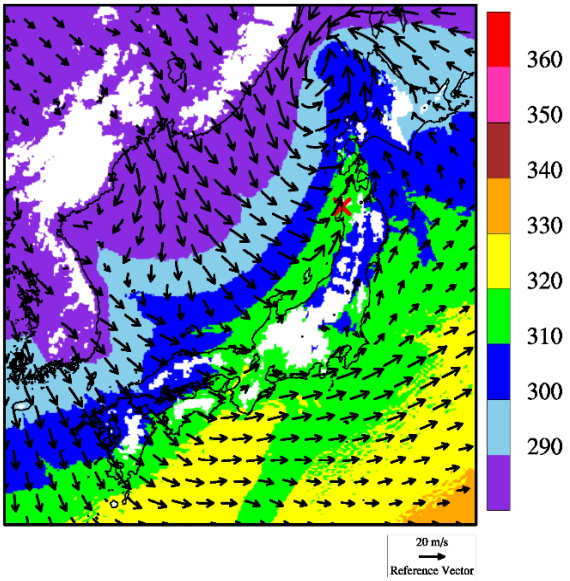
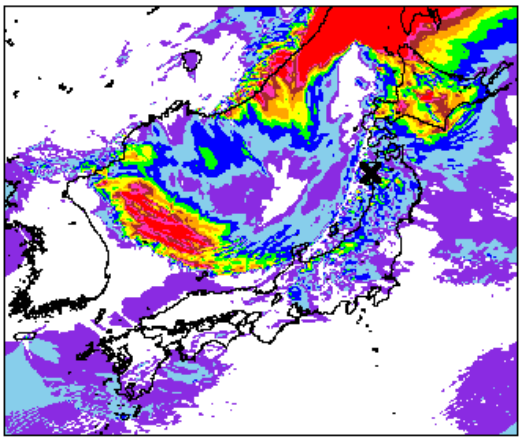
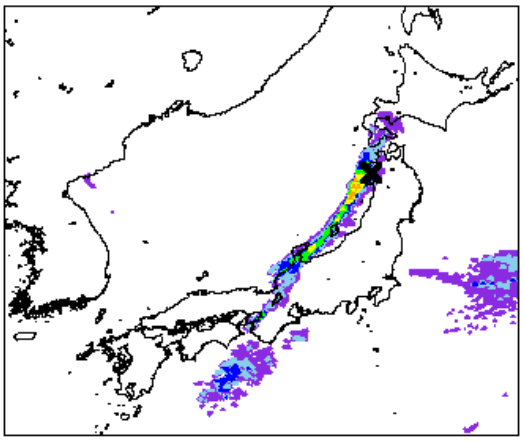
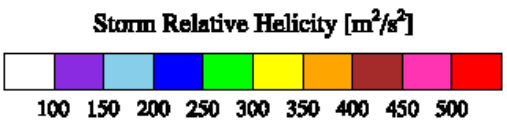
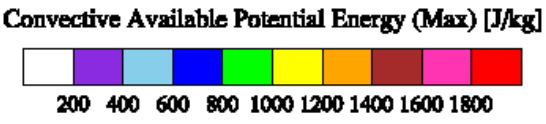


図 19　1999/11/25 F1-F2 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速及び相当温位（単位：K）（左下）SReH，（右下）最大 CAPE









4.11　SReH・CAPE と竜巻強度との間の関係性

10 事例を分析した結果から以下の傾向が見られる。

① F3 竜巻事例では共通して，SReH と最大 CAPE の両方が大きく，太平洋側からの暖湿流の流入が見られた。寒候期（11 月～4 月）に発生した事例では CAPE が暖候期（5 月～10 月）に比べて小さいが， SReH が非常に大きく，大気不安定度の小ささを補っているようである。

② 今回分析した F2-F3 竜巻時の発生環境場は，CAPE（大気不安定度）が F3 竜巻発生時に比べてかなり低かった。F2 規模と F3 規模とで風速レベルで違いが大きく，本検討において F2-F3 竜巻を F3 竜巻と混合して扱うべきではない。

③ F2 竜巻でも SReH は F3 竜巻事例と同レベルの大きさになり得る。冬季の西高東低型の気圧配置下での日本海上での気団変質時，寒冷前線通過時，暖候期の場合は対馬海峡から日本海に向かって空気塊が流れ込む時に大気がやや不安定性な状況が見られたが，多くの事例で大気不安定度は F3 竜巻発生時よりも小さかった。不安定度が大きかった事例もあるが，その場合 SReH が大きくなかった。つまり，両指数が共に大きくなる状況は見られなかった[1]。

図 20 は表 3 における SReH と最大 CAPE の値を竜巻のカテゴリ別にプロットしたものである。F3 竜巻においては，暖候期と寒候期で CAPE の大きさが大きく異なっており（5 章参照），寒候期では暖候期に比べて値が小さいが，SReH が非常に大きい傾向が見られる。

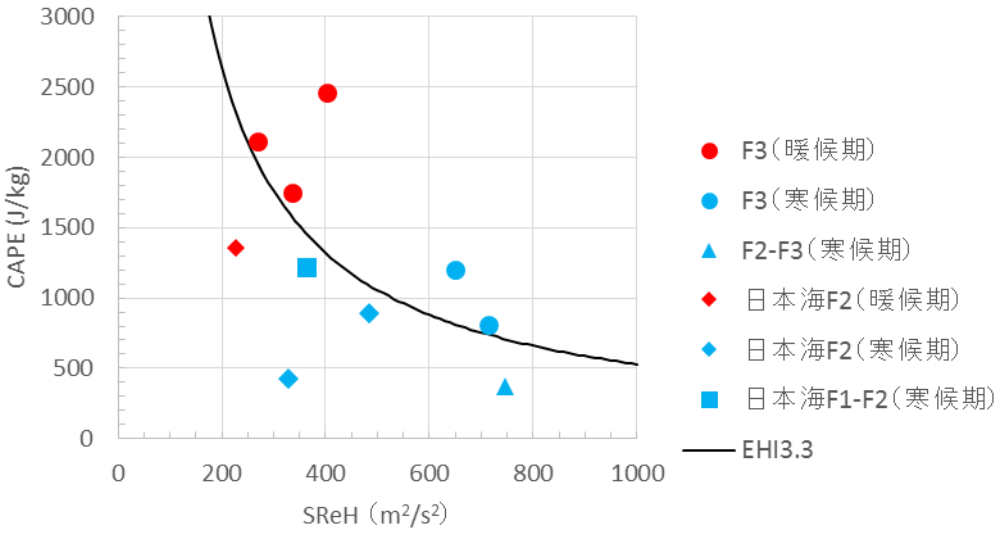


図 20　SReH と最大 CAPE の関係

[1]太平洋側の F2，F2-F3 竜巻はこの点で日本海側の F2 竜巻と異なるようである。太平洋側からの暖気流の流入下で起こるため，F3 竜巻と同レベルあるいは大きな指数になるケースが見られる。実際，小さな竜巻が F3 竜巻発生時の前後あるいはほぼ同時に発生することが F3 竜巻 5 事例中 4 事例見られた。

事例数が少ないことが課題であるが，日本海側のF2規模竜巻の発生環境場では小さな指数値の下でも竜巻が発生しているという点において，F3 規模竜巻の発生環境場との違いが見られる。SReHとして 250 ～ 300 m^2/s^2 程度以上，（最大）CAPE として1600 J/kg（暖候期）あるいは 600 J/kg（寒候期）程度以上の環境場において F3 竜巻が発生しているとみなすことができる。EHI に対しては，3.3 程度を超える場合に F3 竜巻が発生している。この場合，季節に分けずに通年単位で分析できる可能性がある。

国内外の関連研究をレビューしたものを付録 B に記した。現時点では各研究とも課題がある状況であるが，特に米国での成果では，F3 規模以上とそれ以外といった大きな竜巻とそれ以外を区分けすることにおいては両指数が活用できそうである。そこで，次節では，国内最大規模 F3あるいはそれ以上の規模の竜巻が発生するのに適した環境場を対象に，その生起頻度の地域性について検討する。

5. 竜巻発生環境場の生起頻度分析

前節において過去に発生した竜巻に対する環境場を分析したところ，国内で（太平洋側で）発生したF3竜巻では，SReHと（最大MU）CAPEの両方が大きな値をとる傾向が見られた。ここでは，SReHとCAPEそれぞれに対してある閾値を設け，その閾値を同時に超える頻度を分析することにより，国内最大規模 F3あるいはそれ以上の規模の竜巻発生を観点とした地域性について議論する。（杉本ら 2014a）また，参考としてEHIに対しても同様に検討することとする。

5.1 用いる気象データ

突風関連指数の地域性を見出すには，詳細なメッシュ間隔でかつ長期間のデータが必要である。そこで，ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)の再解析データ ECMWF-Interim(1989年以降；水平分解能約 70 km）及び ERA40（1989年まで；水平分解能約 250 km）をもとに，気象モデルを用いて数値的に気象場を解析したデータセット（橋本ら 2011）を用いる。当データセットは，気象庁と電力中央研究所が共同で作成したJRA-25再解析データ(Onogi et al. 2007）よりも 5 km・1 時間ごとと時空間解像度が細かく，豪雨事例の再現性も高まっている（橋本ら 2013)。本検討では，1961年から2010年までの50年間にわたって 1 時間ごとに解析されたデータを用いる。詳細メッシュでかつこれほど長期間のデータセットは他に類をみない。

ECMWFの再解析データは，地球温暖化予測を目的として世界的に広く活用されており，最も精度が高いものと認識されている。しかし，空間分解能が非常に粗いため，物理的ダウンスケーリング手法として，WRFモデルを用いた長期再解析により 5 km メッシュの気象場を算出してデータセットを作成し，本データセットで解析されている上空風，気温，気圧等の気象データを用いて，SReHとCAPEの値を1時間ごと・5 km メッシュで算出した。50年間にわたるデータサンプル数は各メッシュに対して約 4.4×10^5 個存在することとなる。

5.2 季節間の傾向差

F3 竜巻の発生環境場の特徴として，寒候期（11 月～4 月）に発生した竜巻の CAPE が暖候期（5 月～10 月）に比べて小さく，SReH が高い傾向にあった。こうした季節に応じた指数の特徴の違いについて考察する。

図 21 は，SReH の閾値を 150 m^2/s^2，CAPE（最大 CAPE ではない）の閾値を 250 J/kg に設定し，各指数に対する超過頻度（全体の母数に対する割合（%））を各モデル格子点に対して月別に算出したものである。ここでは小さな閾値を設定している[1]。SReH に対しては，日本海及び沿岸域では冬季に頻度が大きく，大きな値をとる傾向が示唆されている。また，関東平野，及び日高山脈周辺では年間を通じて他地域に比べて高い頻度を有している。7 月は全体的に低くなっている。一方，CAPE に対しては，寒候期で低い値をとり，暖候期で高い値をとる傾向が見られ，緯度依存性も見られ，Chuda and Niino (2005)の分析結果と整合している。この緯度依存性は，熱帯域ほど暖かく，高い雲ができやすいことと関係している。CAPE については，季節・緯度依存性が強く，南に行くほど，暖かい季節になるほど絶対値が大きくなっている。加藤（2008a）でも指摘されているように超過頻度を検討する上ではこの特徴を踏まえる必要がある。そのため，以下の検討では，季節に応じた最大 CAPE の閾値を設定して超過頻度を求めている。

ところで，閾値が変わると図 21 で見られる頻度分布もそれに応じて変わるが，相対的な頻度大小関係はある程度保持される。国内最大規模 F3 の竜巻は太平洋側沿岸の平野部で発生しているが，CAPE の値は基本的に南ほど高い値をとるため，CAPE の地域性とは整合しない（例えば，沖縄では F3 竜巻は発生していない）。また，SReH においても整合しない（例えば，日本海側で F3 竜巻は発生していない）。少なくとも片方の指数だけでは F3 竜巻発生地点の地域傾向を説明することはできない。したがって，SReH・CAPE の関係性（図 20）から両方の指数を考慮した場合に説明づけられるか否かがポイントとなる。

5.3 同時超過頻度分布に見られる傾向

前節における検討結果（図 20）を踏まえ，SReH の閾値を 250 m^2/s^2，CAPE の閾値を 1600 J/kg（暖候期）あるいは 600 J/kg（寒候期）として，同時超過頻度を算出する。また，竜巻発生時には降水現象を伴うものと考えられることから，降水量の閾値 2 mm/hr を条件に追加した。なお，降水量の閾値については頻度値の大小に若干影響を及ぼすが，結果の解釈には全く影響しないことを確認している。

暖候期・寒候期別に同時超過頻度を算出した結果を図 22 に示す。また，図 23 は，気象庁の「竜巻等の突風データベース」で確認された F2-F3 竜巻及び F3 竜巻の発生箇所を示したものである。暖候期においては，同時超過頻度 0.01 % 前後の地域が茨城県以西の太平洋側及び九州の沿岸域の平野部に広がっており，超過頻度の高い地域は F3 規模の竜巻の発生箇所を含包している。つまり，超過頻度の高い地域で F3 規模以上の竜巻発生に適した環境場が整いやすいことが示唆されている。それに対し，日本海側，東北太平洋側，及び北

[1]閾値を小さく設定するということは，スーパーセルだけではなく，小さな雷雨発生の環境場も捕捉することを意味する。

海道・下北半島といった北日本での超過頻度の値は，1～2 オーダ以上小さな値となっている。

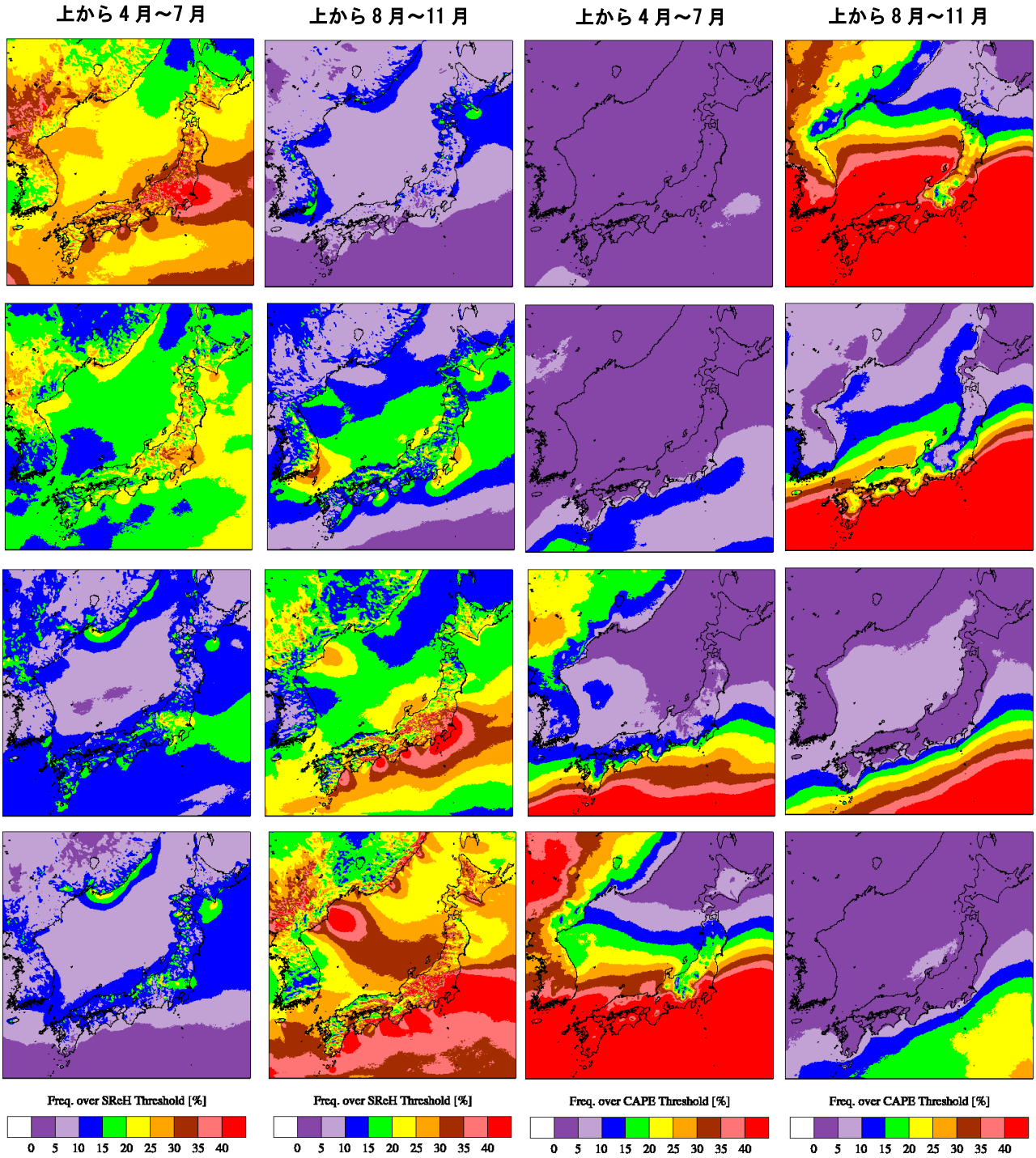


図 21　月別の SReH （左側 2 列）及び CAPE（右側 2 列） の超過頻度分布

また，寒候期の超過頻度分布では，頻度が高い地域が南側にシフトしているが，F3 竜巻発生箇所がより沿岸に近い地点に限られていること対応している。全体的に暖候期に見られる傾向と同様であり，また F3 規模竜巻の発生数に季節間の差が見られないことも反映さ

れている。このように，過去の F3 竜巻発生時の環境場の解析結果を踏まえて設定した SReH と CAPE の閾値を両方超過する頻度の分布は，実際の F3 竜巻の発生箇所の傾向と整合している。

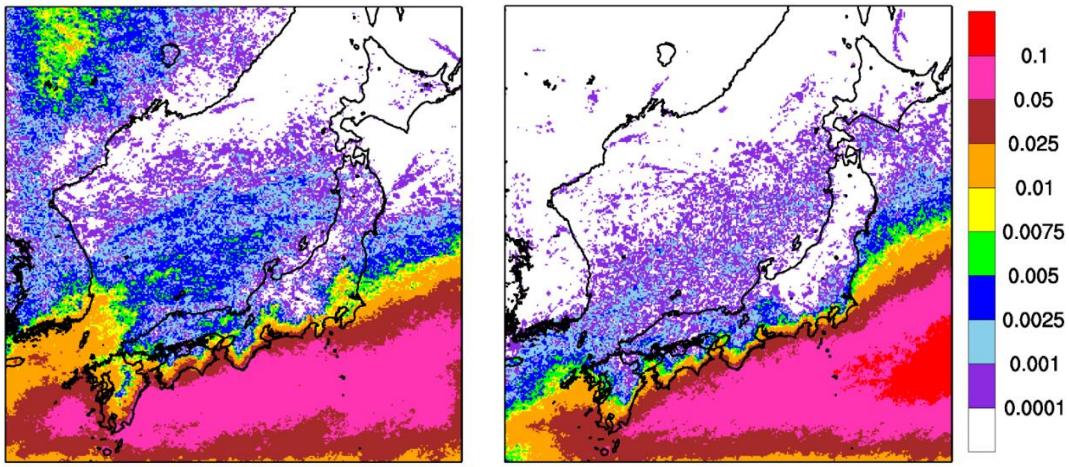


図 22　同時超過頻度分布（単位：%，F3 規模以上を対象；左：暖候期，右：寒候期）
（実績ベースの閾値（SReH：250 m^2/s^2，最大 CAPE：1600 J/kg（暖）600 J/kg（寒））

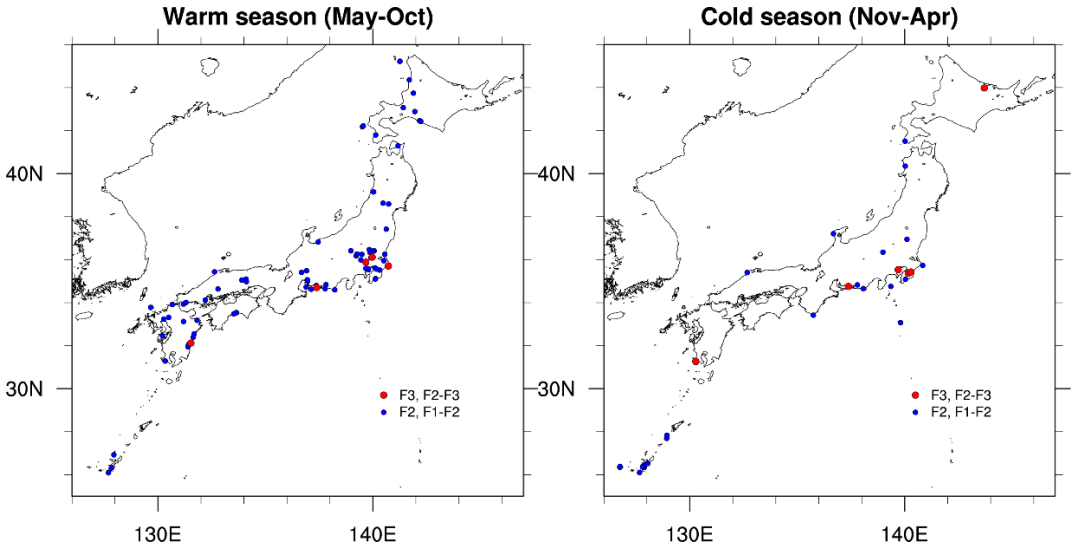


図 23　F3 竜巻（F2-F3 を含む）及び F2 竜巻（F1-F2 を含む）の発生箇所
（左：暖候期，右：寒候期）

同時超過頻度分布は，閾値を「超過する」という意味において，F3 規模あるいはそれ以上の規模の竜巻が発生するのに適した環境場の生起しやすさを表現していると解釈できる。この分布では，高標高山岳（九州山地，四国山地，中国山地，中央アルプス等）の南北で頻度が大きく異なっており，これら山岳によって太平洋側からの暖気流が遮断される効果（図 6 参照）が大きな竜巻の発生に影響していることも示唆されている。

EHI を用いた場合，図 22 に見られる両季節の傾向の中間的な傾向が見られる。図 24 は，EHI の閾値を 3.3（図 20 参照）にした際の超過頻度分布である。通年単位で閾値を設定しているため，中間的な傾向を示すのは妥当である。また，SReH と CAPE の両方の指数を用いる方法においても問題がないことを示唆している。つまり，米国とは異なり（付録 B 参照），国内においては，SReH あるいは CAPE の片方が異常に大きく，EHI がある程度高い値を示すような事例が稀であるからである。

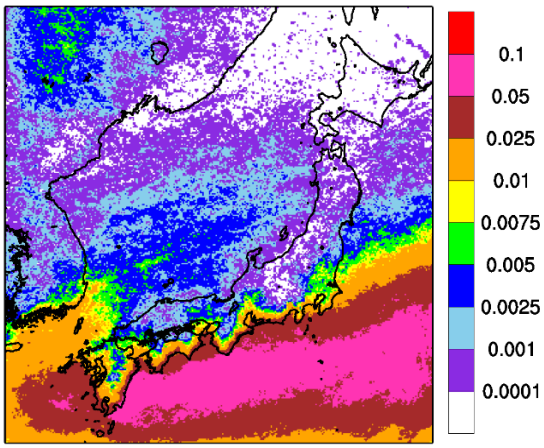


図 24　超過頻度分布（単位は %；通年；EHI の閾値：3.3）

5.4 F3 規模の最大風速を考慮すべき地域

図 22 より国内最大規模の F3 竜巻が発生するのに適した環境場が形成される頻度には地域差があることがわかった。この分布形態から実際に F3 規模の竜巻を考慮すべき地域を特定するには確率論的な議論が必要である。つまり，国内のガイドで記載されている超過確率 10^{-5}，米国のガイド等（Ramsdell and Rishel 2007，U.S. NRC 2007）で記載されている超過確率 10^{-7} を参考として必要となる風速レベルを考慮する必要がある。

図 25 は，ハザード評価と同様に海上 F 不明竜巻を按分して各 F スケール竜巻の 51.5 年間（1961 年～2012 年 6 月）擬似発生数を分析し，F スケールごとに発生率（対象 F スケールの発生数/擬似発生数）を地域別にプロットしたものである。太平洋側と北日本とでは竜巻の全発生数に大差はないことから，この発生率で対象 F スケール竜巻の発生しやすさをおおむね把握することができる。Dotzek et al.（2005）と同様，F スケールが大きくなるほど指数的に頻度が低減しているが，F3 規模の発生率は，茨城県以西太平洋側・九州沿岸では，その他の地域に比べ 1 オーダ程度発生率が高くなっており，突風関連指数の分析結果と整合していることがわかる。日本海側沿岸や東北太平洋側・下北半島では，F3 竜巻が発生していないため，もっと頻度が小さくなることが予想できる。また，F2 規模になると地域差が小さくなり，F0 規模ではむしろ太平洋側の方が若干少なくなることも見てとれる。

九州電力川内発電所を対象とした竜巻影響評価において，（海岸線に対して陸側･海側 5 km の竜巻検討地域に対する）ハザード評価結果では，F3 規模竜巻（風速 92 m/s）に対する超過確率は大凡 10^{-6}～10^{-7} にある。上記のように，日本海側を含む北日本では F3 規模竜巻の

発生しやすさ，及び発生数は，太平洋側に比べて少なくとも 1 オーダは低いことを考慮すると，F3 規模竜巻の風速が生起する確率は，超過確率にして 10^{-7}～10^{-8} を下回る。この超過確率レベルは米国のガイドに規定されているレベルを下回っている。そのため，北日本・日本海側の地域では，F3 規模竜巻の風速レベルは基準竜巻風速としては想定範囲外の範疇に入ると考えることができる。

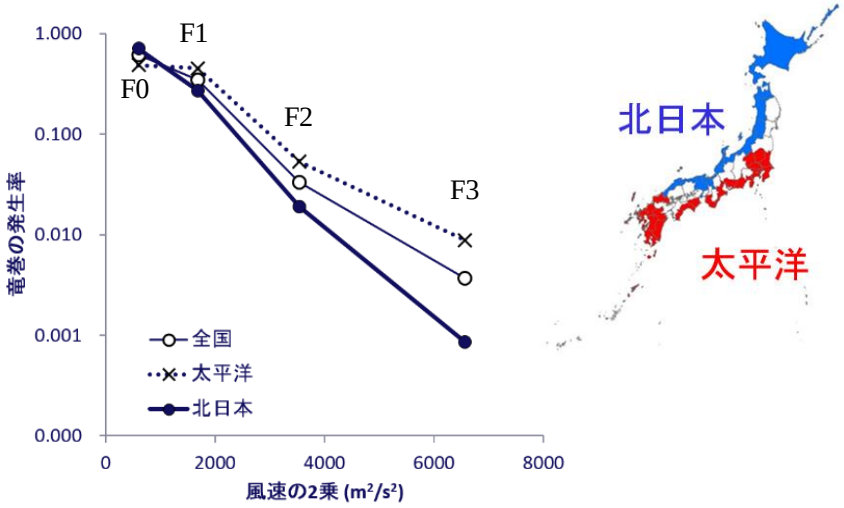


図 25　各 F スケールの発生率

5.5 閾値が同時超過頻度の分析結果に及ぼす感度

小さな閾値を設定すると，雷雨（非竜巻）・小さな竜巻の発生を勘案することとなるため，全体的に頻度値が上昇し，（発生実績と同様に）地域性が明瞭でなくなる。一方，非常に大きな閾値を設定すると，F4・F5 規模の非常に大きな竜巻に着目することになり，高頻度域は太平洋側の更に限定された地域になる。杉本ら（2014b）は，国内最大規模の F3 規模が発生する環境場として適切な閾値を，SReH については 150～550 m^2/s^2 の範囲（100 m^2/s^2 刻み），最大 CAPE に対しては，200～1500 J/kg（100 J/kg 刻み）の範囲の値の組み合わせで検討した。最適とみなされた組み合わせに対する結果は図 22 に示した結果におおむね沿ったものとなっている（付録 E）。

突風関連指数を用いたメソスケール分析はスーパーセル型竜巻に適するため，非スーパーセル型竜巻を含む F2 規模の竜巻を含めた分析に SReH や CAPE といった突風関連指数を用いる適用性は微妙ではあるが，ここでは F2 規模以上の竜巻の発生頻度を念頭においた閾値について考えてみる。

図 20 の結果から両指数の閾値を

SReH： 200 m^2/s^2

最大 CAPE ：1000 J/kg（暖候期），350 J/kg（寒候期）

とする[1]。ただし，暖候期については 参考にできる竜巻が 1 事例しかないため，650 J/kg の閾値についても検討する。EHI を用いる場合，島根県で発生した 1989/03/16 F2 事例以外は 1.5～2.0 前後の EHI に入っているが，1989/03/16 F2 事例では 0.8 強にとどまっている。そこで，1.5 と 0.8 を EHI の閾値として超過頻度の算出を試みる。

同時超過頻度の算出結果を図 26 に示す。F3 規模以上の竜巻を対象とする場合よりも頻度は全体的に上がっている。図 22 では奄美・沖縄方面では本州（茨城県以西）太平洋側に比べて頻度がやや低くなる傾向が推測されるが，図 26 では奄美・沖縄地方でも値が高い傾向が推測され，実際の発生箇所（図 23）に整合している。

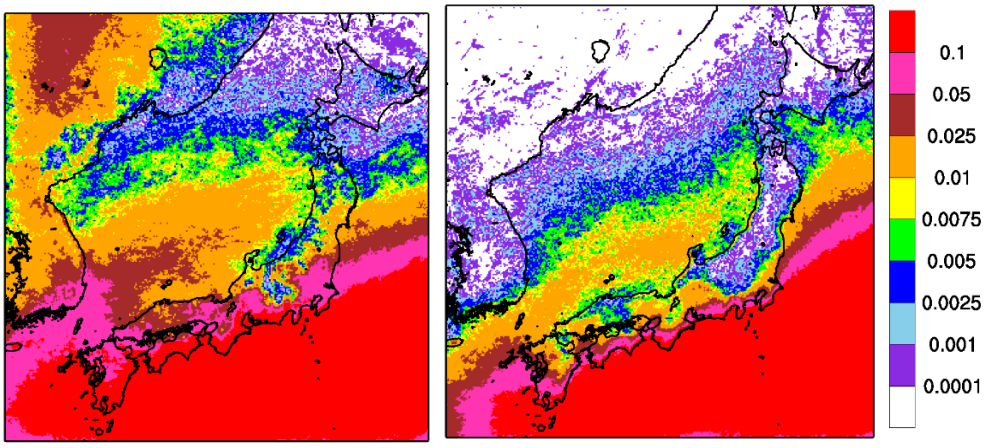


図 26　同時超過頻度分布（単位：%，F2 規模以上を対象；左：暖候期，右：寒候期）
（SReH の閾値：200 m^2/s^2，最大 CAPE の閾値：1000 J/kg （暖）350 J/kg（寒））

暖候期においては，福島県から宮城県の太平洋側及び本州日本海側沿岸での頻度が高まり，中部地方以西では内陸も含めて頻度が高く，東日本も内陸深くまで頻度が高くなっている。実際の F2 規模以上の発生箇所の多くを含包できている。しかし，北海道の石狩地方以北で F2 竜巻が計 4 個発生しているが，同時超過頻度はかなり低い。CAPE の閾値を 1000 J/kg から 650 J/kg 程度まで落とすと対応性は高まり（図 27），能登半島以北の日本海側・北日本における頻度は本州・中日本以南に比べて少し低い程度となって，全体的に地域間の差は薄れる。図 25（F2 規模以上の場合，全国平均からの差は，太平洋側とそれ以外の地域ともに 1 オーダの差はない）を踏まえると，図 27 の方がベターと考えられる。

[1]太平洋側 F2・F1-F2 竜巻の場合は F3 規模に対する閾値を同時に超過する竜巻がいくつか存在する。その一部は F3 竜巻（茂原竜巻，豊橋竜巻，つくば竜巻）とともに発生したものである。環境場としては F3 竜巻が発生し得る状況下でも，マイクロスケールの気象メカニズム等で小さな竜巻が発生することがあると解釈できる。つまり，閾値は，環境場（親雲スケールの気象場）を観点とした，対象規模の竜巻が発生するための「必要条件」であるといえる。

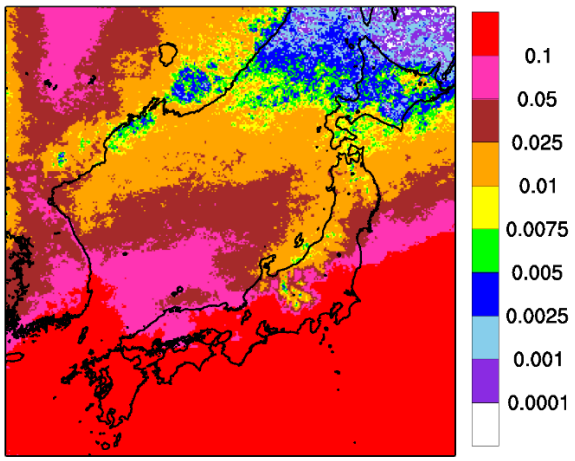


図 27　同時超過頻度分布（単位：%，暖候期）

（SReH の閾値：200 m^2/s^2，最大 CAPE の閾値：650 J/kg）

オホーツク地方で頻度が高く，F2 規模程度の竜巻が発生する環境場は東北・道南地方に匹敵した確率で形成され得るといえる。

また，候期においても福島県から宮城県の太平洋側，襟裳岬から道南方面の沿岸部，及び本州・道南の日本海側沿岸で頻度が大きくなっている。道南より北側の日本海側沿岸で頻度が増えていないのは実態と整合している。中央アルプス以北の中央山地で頻度は低目である。この地域で竜巻は 2 箇所発生している（図 23）が，共に F1-F2 規模の小さな竜巻である（図 28）。

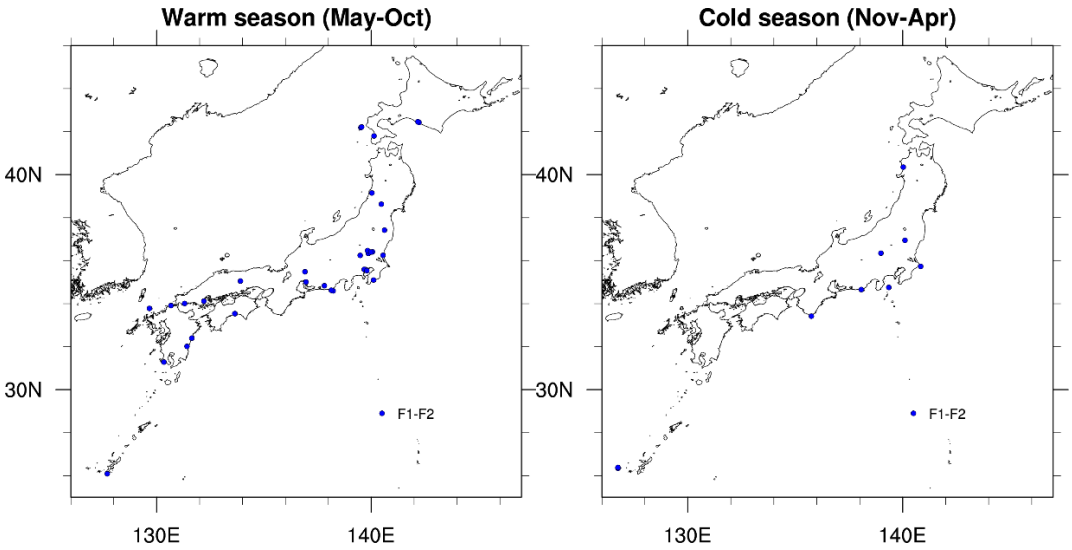


図 28　F1-F2 竜巻の発生箇所

第 4 節における個別竜巻の分析事例において，暖候期に対しては 1988 年以降に発生した F2 あるいは F1-F2 竜巻が 1 事例しかない。図 26 に示した東北太平洋側沿岸から道南・道東にかけての頻度において，暖候期の方が低いというのは海水温の高さの季節性との整合性にも欠けるため，最大 CAPE の閾値は 1000 J/kg よりも小さくした方がよいと思われ

る。図 27 で用いた閾値 650 J/kg の妥当性の判断は今後発生するであろう F2 規模の竜巻の発生を踏まえた分析結果をもとに再度検討する必要があるが，おおむね発生状況の地域性は表現できている。

EHI を用いた場合，EHI 1.5 では，図 26 の暖候期，寒候期の状況を平均的に見たときの頻度分布に大凡あてはまる（図 29 左図）。1989/03/16 F2 事例を参考に 0.8 まで閾値を下げると，地域性は殆ど見られなくなる（図 29 右図）。上述のように，暖候期の分布は図 26 よりも閾値を下げた図 27 の分布の方がよい傾向が見られることから，EHI 1.5 の結果は頻度を過少に評価している可能性がある。しかし，閾値を 0.8 まで落とした結果では，茨城県以西太平洋側＋九州沿岸と，それ以外の地域との差がかなり小さく，落としすぎのようである。いずれにしても，F2 規模以上の竜巻を対象とする場合，F3 規模以上を対象とする場合とは異なって季節間での発生数の差があり（図 23），EHI を用いた通年評価をすることについては議論の余地が大きい。

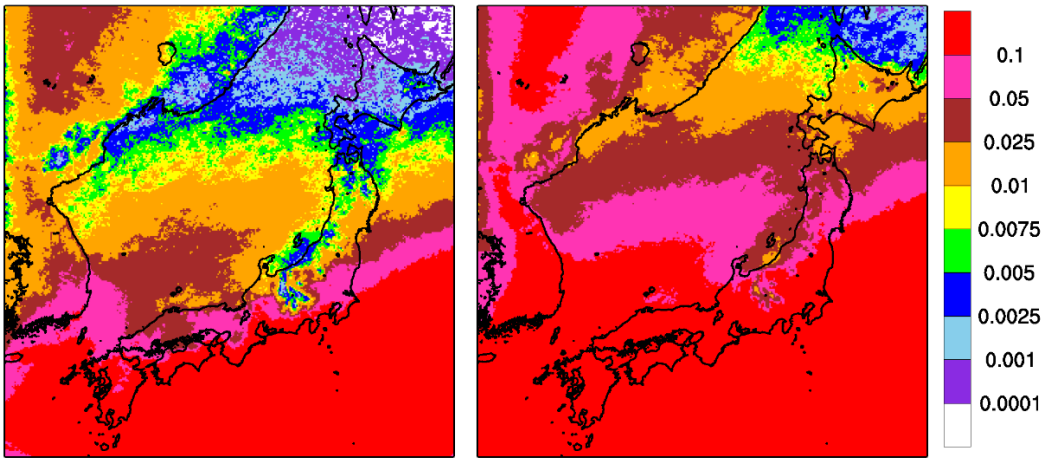


図 29　超過頻度分布（単位は %；通年；EHI の閾値：(左) 1.5，(右) 0.8）

6.　佐呂間竜巻に対する考察

図 22 の同時超過頻度分布において，北海道では超過頻度が非常に低いが，網走支庁佐呂間町では F3 竜巻が発生している。ここではこの竜巻に対する考察及び影響評価における取り扱いの方向性について述べる。

佐呂間竜巻の発生メカニズムについて過去の知見を踏まえ，図 30 のように模式的に示した。図 11 に示したように，当竜巻発生時においては，太平洋側からの暖気流が道東・オホーツク地方に流入している環境下で，高い SReH を伴う寒冷前線が通過しており，図 20 に示すように，SReH，CAPE ともに一定の高さを保持していた。この意味で，太平洋側で過去に発生した F3 竜巻の環境場の特徴と同様の特徴を有する。ただし，CAPE については，図 11 に示したように，SReH とは異なり，降水域が発達した日高山脈の東側に広く高い値をとっているわけではなかった。一方，加藤（2008b）が以下のように指摘しているように，この竜巻に対しては周辺地形によるマイクロスケールの影響を無視できない。

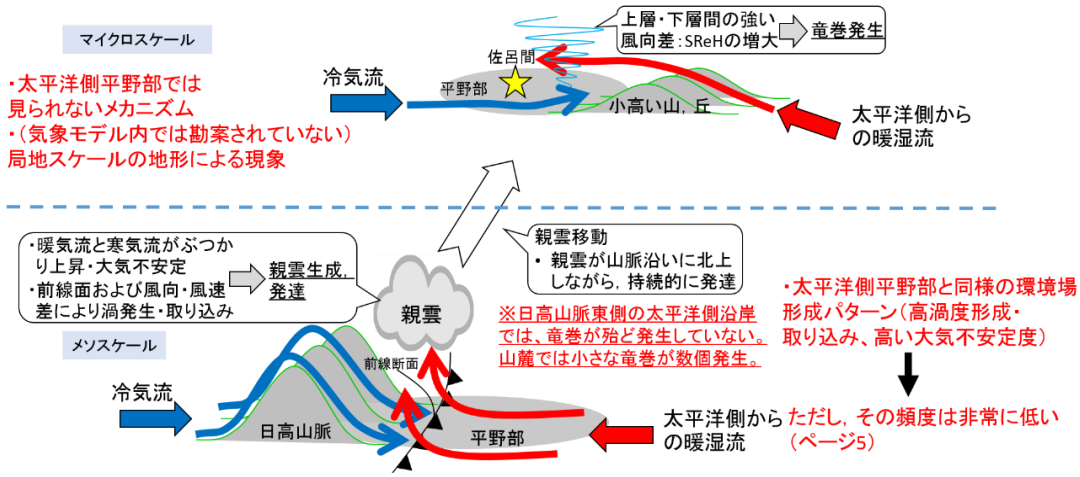


図 30　佐呂間竜巻の発生メカニズムに関する模式図

「下層での鉛直シアの強化は，ガストフロントの前面下層の気圧低下による水平風加速に加えて，強い鉛直渦度生成領域の風上（南南東）側に南南西～北北東に伸びる最大標高 600 m 以上で幅 10 km ほどの尾根による山岳波の影響を少なからず受けている。実際の竜巻発生位置の風上側にも同様な尾根が存在していることから，佐呂間竜巻は地形の影響を受けて発生したと考えられる。」

このマイクロスケールの効果は環境場では考慮できない（解像できない）ため，両指数の値は，特に SReH では図 20 でプロットした結果よりも高まっている可能性が高い[1]。

前節でも議論したように，オホーツク地方は北海道の中でも F2 規模以上の竜巻であれば本州北日本と同等の頻度で環境場が形成されやすい地域であるが，F3 規模以上の竜巻に対しては環境場が形成されがたい，つまり F3 規模に到る程度に大気不安定な空気塊の流入と高渦度を有した総観場の通過が同時に発生する頻度が極めて低い。佐呂間竜巻が地形影響を受けていることを踏まえると，竜巻発生を観点とした気候としては，この地域で F3 規模の竜巻発生に適した環境場は極めて生起しがたく，佐呂間竜巻発生時においても F3 規模竜巻の発生には（特に最大 CAPE においては）微妙な環境場であった[2]が，近隣の周辺地形の影響を強く受けて F3 規模の竜巻発生に到ったと解釈するのが妥当と考えられる。

上述のように，竜巻発生環境場に関する同時超過頻度分布（図 22），及び発生率の分析結果（図 25）をもととした超過確率の議論では，竜巻検討地域の設定及び基準竜巻風速 V_{B1} の設定に佐呂間竜巻を特段考慮する必要はない。それはこの竜巻が基準竜巻設定で対象としている地域性・空間スケールよりも局地的・小さな空間スケールを有する地形影響を受けたものであるからである。むしろ，この影響については，ガイドにおける設計竜巻 V_D の設定時に考慮するのがガイドの趣旨に沿っている。

---

[1] MLCAPE の値は非常に小さく（瀧下ら 2011），MUCAPE の値は大きめであることから，尾根を乗り越えた先の佐呂間町上空における（寒冷前線起因の）冷気流の上側で，大気が局所的に不安定になっている可能性は否定できない。

[2] 佐呂間竜巻は季節の変わり目に発生したが，暖候期の傾向が強かった（図 27 参照）といえる。

佐呂間竜巻のような竜巻が発生するかどうかについては，当時の気象場（総観場（寒冷前線），気流場，大気不安定度）と周辺地形の類似性を確認すればよい。確認のポイントとしては，これまでに説明した気象場の分析結果を踏まえれば以下の 2 点である。

・太平洋側からの暖湿流が高標高山岳等に遮断されずに直接流入し得る地域である。
・近隣地形（数キロ程度四方の範囲）において，（太平洋側からの）暖気流の流入方向に尾根状の丘・山が存在すること。

この条件を満たせば，寒冷前線通過時に，暖かい空気塊が尾根を乗り越えて寒冷前線起因の冷気流の上側に流入できる。このような確認を行う必要があるのは，東北太平洋側や北海道オホーツク地方・道南地方等太平洋に面した地域に立地した発電所である。柏崎刈羽原子力発電所は沿岸部に立地しているため，佐呂間竜巻で影響を及ぼしたような尾根形状の島が沖近くに存在するかがポイントとなる。 日本海側沿岸部に立地した柏崎刈羽原子力発電所においては，高標高山岳の影響が大きいため（図 6），不安定性の非常に大きい暖湿流が流れ込むような状況は生じがたい。

7. まとめと今後の課題

以上，数値気象モデル及びモデル解析データをもととした竜巻検討地域の設定方法について，特に検討地域における最大竜巻規模を基準竜巻風速 V_{B1} として採用できるかどうかを観点として，竜巻発生環境場の分析を行った。その結果，以下の結果が得られた。

- F3 規模の竜巻，F2-F3 規模の竜巻（1988 年以降），日本海側 F2 規模の竜巻（1988 年以降），及び日本海側 F1-F2 規模の竜巻（1988 年以降）を対象に，WRF モデルと ECMWF 再解析データを用いた気象解析を行い，5 km 解像度での気象場と突風関連指数（SReH・CAPE）の分布を分析した。
- 上記竜巻事例に対して竜巻発生地点周辺における SReH と CAPE の両指数の値を分析し，F3 規模以上の場合と F2 規模以上の場合の両方に対して，地域性を考える際の妥当な閾値について検討した。
- F3 規模以上の竜巻を対象とした閾値を同時に超過する頻度の分布を 50 年間の長期再解析データをもとに算定した。その結果，茨城県以西の太平洋側沿岸及び九州沿岸の平野部で頻度が高く，実際の竜巻発生箇所とも整合していた。一方，その他の地域では，上記太平洋側地域に比べて 1～2 オーダ低い頻度であった。
- 総観スケールでの気流場では，日本列島の高標高山脈によって太平洋側から流れ込む不安定性の高い暖湿流が遮断され（図 6），この気流パターンが F3 規模の大きな竜巻が日本海側で発生せず，茨城県以西の太平洋側沿岸域において発生するという実績と関係していると考えられる。大きな竜巻はさまざまな総観場区分に発生しているが，総観場区分で「局地性」と判定された竜巻は，スケールの小さな非スーパーセル型であり，上記太平洋側沿岸域と対応していない。一方，総観場として「台風性」と判定された大きな竜巻の発生箇所は対応している。そのため，台風性の大きな竜巻の発生箇所を検討地域の設定の参考にすることは一つの方法として考えられる。

- 同時超過頻度分布の特徴は，擬似竜巻発生数を用いたF3竜巻の発生率の地域差と対応していた。2つの突風関連指数を用いた分析は地域性検討に有効であると考えられる。また，超過確率の観点では，10^{-7}の超過確率以上の風速を検討対象とするのであれば，F3竜巻の風速レベルを考慮すべき地域は上記太平洋側・九州の沿岸域に限られる。
- 佐呂間竜巻に関連して，オホーツク地方は気候的にはF2 竜巻が一定以上の生起確率で発生し得る地域であるが，F3規模以上の竜巻発生環境場は極めて形成されがたい地域である。佐呂間竜巻に対しては周辺地形の影響を少なからず受けたことが報告されており，基準竜巻設定ではなく，設計竜巻設定時にこの竜巻と類似したものが発生する可能性を定性的に考慮するのがガイドに沿っている。
- EHI を用いた評価は，F3 規模以上の場合ではおおむね良好であるが，F2 規模以上の場合では，季節間の発生数の違いが大きいため，通年レベルでの評価が難しいようである。現時点では，季節を分けて SReH と最大 CAPE を用いて評価する方がベターだと思われる。
- メソスケールで分析した結果は，竜巻の発生メカニズムの観点において，大きな竜巻の発生に対する大気場の必要条件を把握する上で有効である。総観場傾向から設定した検討地域は，メソスケールでの分析結果と整合した。
- メソスケールでの検討によって得られた必要条件的な傾向は，突風関連指数の分析においては，実際には大きな竜巻が発生しなくとも発生し得る環境場であった事例を排除していないため，実態よりも広い範囲で大きな竜巻が発生し得る地域を評価する点において保守的な評価を行っているといえる。

今後の課題として，将来的な気候変動により規模や発生数の増加傾向となることは否定できないため，最新のデータ・知見をもって気候変動の影響に注視し，必要に応じて見直しを実施していくものとする。

参考文献

Bluestein, H. B., 2013: Severe Convective Storms and Tornadoes. Springer, 456 pp.

Brady, R. H., and E. J. Szoke, 1989: A case study of nonmesocyclone tornado development in northeast Colorado: similarities to waterspout formation. Mon. Wea. Rev., 843-856.

Browning, K. A., 1964: Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. J. Atmos. Sci., 21, 634-639.

Bunkers, M. J., B. A. Klimowski, J. W. Zeitler, R. L. Thompson, and M. L. Weisman, 2000: Predicting supercell motion using a new hodograph technique. Wea. Forecasting, 15, 61-79.

Burgess, D. W., M. A. Magsig, J. Wurman, D. C. Dowell, and Y. Richardson, 2002: Radar observations of the 3 May 1999 Oklahoma City tornado. Wea. Forecasting, 17, 456-471.

Chuda, T., and H. Niino, 2005: Climatology of environmental parameters for mesoscale convections in Japan. J. Meteor. Soc. Japan, 83, 391-408.

Davies, J. M., 1993: Hourly helicity, instability, and EHI in forecasting supercell tornadoes. 17th Conf. on Severe Local Storms, St. Louis, MO, Amer. Meteor. Soc., 107-111.

Davies-Jones, R., D. Burgess, and M. Foster, 1990: Test of helicity as a tornado forecast parameter. 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Provincial Park, AB., Canada, Amer. Meteor. Soc., 588-592.

Doswell III, C. A., and J. S. Evans, 2003: Proximity sounding analysis for derechos and supercells: an assessment of similarities and differences. Atmos. Res., 67-68, 117-133.

Dotzek, N., M. V. Kurgansky, J. Grieser, B. Feuerstein, and P. Nevir, 2005: Observational evidence for exponential tornado intensity distributions over specific kinetic energy. Geophys. Res. Letters, 32, L24813, doi:10.1029/2005GL024583.

Fujita, T. T., 1981: Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. J. Atmos. Sci., 38, 1511-1534.

Klemp, J. B., and R. B. Wilhelmson, 1978: Simulations of right- and left-moving storms produced through storm splitting. J. Atmos. Sci., 35, 1097-1110.

Lee, B. D., and R. B. Wilhelmson, 1997: The numerical simulation of nonsupercell tornadogenesis. Part II: Evolution of a family of tornadoes along a weak outflow boundary. J. Atmos. Sci., 54, 2387-2415.

Mashiko, W., H. Niino, and T. Kato, 2009: Numerical simulation of tornadogenesis in an outer-rainband minisupercell of typhoon Shanshan on 17 September 2006. Mon. Wea. Rev., 137, 4238-4260.

Moncrieff, M. W., and M. J. Miller, 1976: The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 102, 373-394.

Noda, A. T., and H. Niino, 2010: A numerical investigation of a supercell tornado: Genesis and vorticity budget. J. Meteor. Soc. Japan, 88, 135-159.

Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis. J. Meteor. Soc. Japan, 85, 369-432.

Orlanski, I., 1975: A rational subdivision of scales for atmospheric processes. Bull. Amer. Meteor. Soc., 56, 527-530.

Ramsdell, J. V. Jr., and J. P. Rishel, 2007: Tornado climatology of the contiguous United States. NUREG/CR-4461, Revision 2.

Rasmussen, E. N., 2003: Refined supercell and tornado forecast parameters. Wea. Forecasting, 18, 530-535.

Rasmussen, E. N., and D. O. Blanchard, 1998: A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. Wea. Forecasting, 13, 1148-1164.

Roberts, R. D., and J. W. Wilson, 1995: The genesis of three nonsupercell tornadoes observed with dual-Doppler radar. Mon. Wea. Rev., 123, 3408-3436.

Rotunno, R., and J. Klemp, 1985: On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms. J. Atmos. Sci., 42, 271-292.

Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers (2005) : A description of the advanced research WRF version 2. NCAR Tech. Note, NCAR/TN-468+STR, 88 pp.

Suzuki, O, H. Niino, H. Ohno, and H. Nirasawa, 2000: Tornado-producing mini supercells associated with Typhoon 9019. Mon. Wea. Rev., 128, 1868-1882.

Trapp, R. J., 2013: Mesoscale-Convective Processes in the Atmosphere. Cambridge, 346 pp.

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, 2007: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plant, Revision 1.

Wakimoto, R. M., and J. W. Wilson, 1989: Non-supercell tornadoes. Mon. Wea. Rev., 117, 1113-1140.

飯塚義浩，加治屋秋実，2011：数値予報資料から求めた竜巻に関連する大気環境指数の統計的検証，天気，58，19-30.

大野久雄，2001：雷雨とメソ気象，東京堂出版，309 pp.

原子力規制委員会，2013：原子力発電所の竜巻影響評価ガイドの制定について，原規技発第 13061911 号，平成 25 年 6 月 19 日制定，平成 26 年 9 月一部改正.

加藤輝之，2008：竜巻発生の環境場に関する研究（Ⅰ）－竜巻をもたらす積乱雲の発生環境に関する統計的研究－，平成 19 年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進，6-12.

加藤輝之，2008：スーパーセルに伴う竜巻の発生機構の研究（Ⅲ）－2006 年の佐呂間竜巻に対する解析－，平成 19 年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進，39-44.

杉本聡一郎，野原大輔，平口博丸，2014：国内既往最大規模の竜巻を対象とした発生頻度の地域性について，第 11 回学術講演会要旨集，日本保全学会，395-402.

杉本聡一郎，野原大輔，平口博丸，2014：突風関連指数を用いた大きな竜巻の発生環境場の地域性に関する検討，2014 年度春季大会講演予稿集，日本気象学会，B464.

瀧下洋一，2011：竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報についてー突風に関する防災気象情報の改善ー，測候時報，78，57-93.

新野 宏，2007：竜巻，天気，54，933-936.

橋本篤，平口博丸，豊田康嗣，中屋耕，2011：温暖化に伴う日本の気候変化予測（その1）ー気象予測・解析システムNuWFASの長期気候予測への適用性評価ー，電力中央研究所報告 N10044，22pp.

橋本篤，平口博丸，田村英寿，服部康男，松梨史郎，2013：領域気候モデルを用いた過去53年間の気象・気候再現，電力中央研究所報告，N13004，18 pp.

付録 A　温位について

気体の状態方程式によれば，同じ気圧下で密度が小さいほど気体の温度は高くなる。したがって，ある空気塊が周囲よりも高温であれば，その空気塊は浮力を得て上昇する。このとき，下層での空気塊の気温が高いからといって，ある高い高度に断熱的に持ち上げた空気塊は，その高度の周囲の気温より高いとは限らない。同じ高度（気圧）で気温の高低を比較してはじめて，空気塊が浮力を受けるかどうかがわかる。温位を用いれば，本文の式（3）のように，1000 hPa という基準気圧（高度）での気温を算出するため，二つの空気塊の相対的な暖かさや浮力の発生有無を容易に判断できる。

1 万メートル程度上空における飛行機の客室内の気温を例にとる。客室内は与圧されて 800 hPa 程度の気圧となっており，温位は 310 K 程度とする。それに対し，飛行高度での気圧（100～200 hPa）での気温が約-70 ℃とすると温位は 360 K 程度である。外気をそのまま取り込むと，温位は保存するため，客室内では温位 360 K に対する気温は約 60 ℃となるため，外気を取り込んだ際に空気を冷やす必要がある（吉崎・加藤 2007）。上空ほど気温は低いため，パラドックス的に感じるが，このように温位を用いれば空気塊の暖かさについて容易に把握・比較することが可能である。温位が高いほど暖かく，上昇しやすいということから，大気の不安定性を論じるのに温位や相当温位が使われるのはそういう理由である。

参考文献

吉崎正憲，加藤輝之，2007：豪雨・豪雪の気象学．朝倉書店，187 pp.

付録 B　SReH 及び CAPE と竜巻強度との関係に関する過去文献のレビュー

B-1　これまでの知見整理

Davies (1993)は，最も近い観測点で得られたラジオゾンデデータから SReH をはじめとした鉛直シア関係の指数に関する調査を行い，例えば 0-3km SReH については，平均値として F2・F3 竜巻の場合 369 m^2/s^2 (21 事例)，F4・F5 竜巻の場合 539 m^2/s^2 (10 事例) と報告した。ただし，スーパーセル竜巻のポテンシャルの見積もりには，大気不安定性と風のシア若しくは SReH の組み合わせを調べるべきであると指摘している。Johns et al. (1993) は，F2 規模以上の竜巻に対して 0-2km SReH と CAPE との間に図 B-1 の関係性を報告した。殆どの F2 規模以上の竜巻が EHI (=CAPE×SReH/160000) が 2 程度を超える場合に発生していることがみてとれる。また，F4・F5 規模の竜巻（図中の Violent ○）の場合，より大きな EHI で発生している傾向にある。関連した成果は，EHI > 2 でスーパーセルが発達する可能性が非常に高く，EHI > 4 で非常に大きな竜巻が発生する可能性が高いとする文献にも見られる (Davies 1993)。

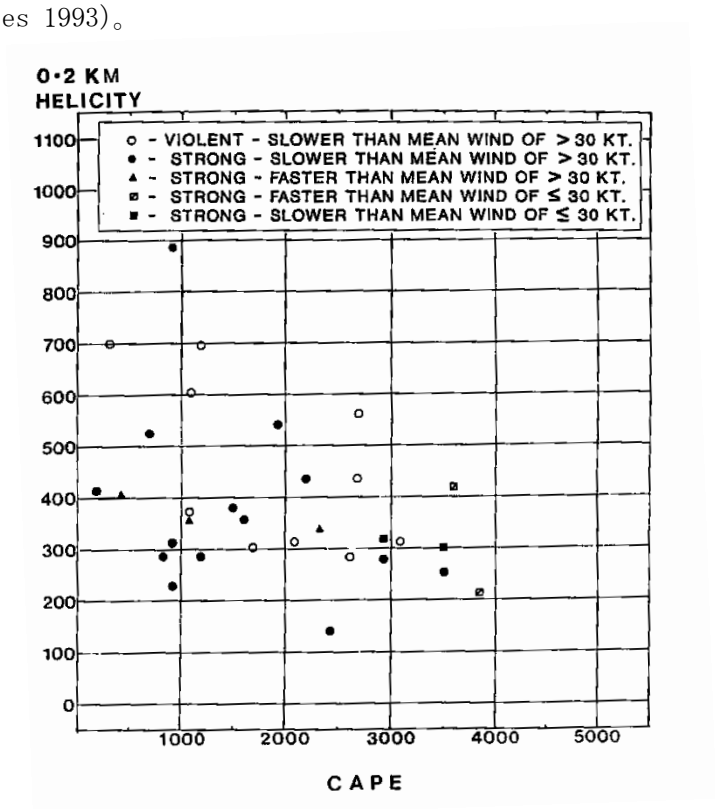
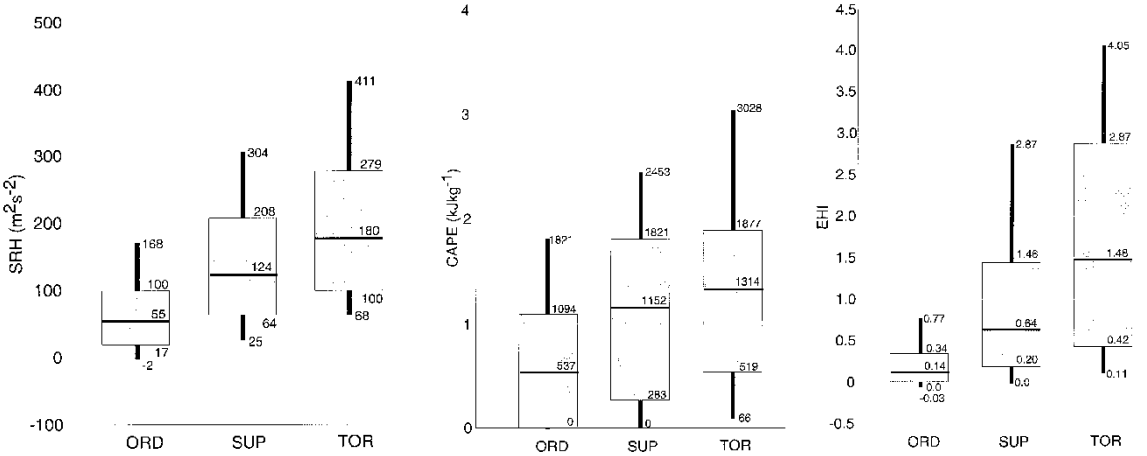


図 B-1　CAPE と 0-2km SReH の関係（プロットは F2 規模以上。○は F4・F5 規模）

Rasmussen and Blanchard (1998)は，1992 年に米国で実施されたラジオゾンデデータ (0 時 UTC（世界標準時）の約 3000 のデータ）を分析し，竜巻発生地点から 400 km 以内の観測地点のデータから竜巻発生時の突風関連指数の気候学的特性について調べた。F2 規模以上の竜巻とそれ以外の差（中央値の差）は，SReH，CAPE 単独で用いる場合よりも両方を複

合させたEHIの方が区別できていることが見てとれる（図B-2）。ただし，F2規模以上の竜巻が発生した範囲のうち値の小さなEHIでF1規模以下の竜巻が発生しているケースもある。全ての竜巻・非竜巻を対象とすると，EHIのヒストグラムの結果では，竜巻発生指標としての EHI の有効性が低いと考えられるという報告もある（櫻井・川村 2008）。上記で取りあげた各文献を踏まえれば，突風関連指数の適用性はF0・F1 規模以上か非竜巻かという小さな竜巻の発生有無の区別には向かず，F2 規模以上か否かの区別では適用性が高まり，むしろF3・F4規模以上か否かといった大きな竜巻の発生有無を議論するのに適しているといえる。なお，Rasmussen and Blanchard (1998)では，F3 規模以上の高強度の竜巻とそれ以外を区別することについては検討していない。



図B-2　各突風指数（左：SReH，中：CAPE，右：EHI）に対する箱ひげ図（箱は値の小さい方から 25%から75%の範囲を表し，箱中の太線は中央値を示す。TORはF2規模以上の竜巻，SUPはF1規模以下の竜巻，ORDは非スーパーセル雷雨を表す。）

Rasmussen (2003)は，SReH を求める際の地上からの層厚について検討し，これまでガイドライン的に使われてきた 0-3km SReH (Davies-Jones et al. 1993) の殆どは，地上から1 km までの大気（0-1km SReH）に起因するため，SReH算出の層厚を0-1kmとすることを提案している。その他，SReH を求める際のストームの移動ベクトル算出方法についてもいくつか方法がある。指数の算出手法に関連して，CAPE についてはより複雑である。特に，数値モデルによる解析値・予測値を算出する場合，対流不安定が解消されることにより CAPE 値が小さく見積もられる場合がある（瀧下 2011）。そのため，Rasumussen and Blancard (1998) では，その影響を軽減する算出方法を用いている。また，CAPEを算出する際の持ち上げ空気塊の性質によりさまざまな種類のCAPEがある。例えば，地上数キロまでの大気の平均的な性質を持たせることもあれば（MLCAPEと呼ばれる），最大の不安定度になる高さの空気塊を持ち上げることもできる（MUCAPE)。MLCAPEがよく用いられることが多いが，一般的に MUCAPE の方が値は高く(Chuda and Niino 2005)，米国のSPC(Storm Prediction Center)のような実運用の場で MUCAPE が SCP（= MUCAPE/1000 × 0-3km SReH/100 × Bulk Richardson Number/40)）の算出に用いられる場合がある（※今回の検討でも MUCAPE を用

いている)。特に，下層に寒気があり，その上に暖気がある安定した条件下のケース（佐呂間竜巻の佐呂間町付近では地形影響でその傾向が増大していると考えられる）では MLCAPE に基づく不安定度は非常に小さくなる。このように，SReH や CAPE の算出方法についても議論すべき余地がある。

ゾンデデータを用いる解析は，竜巻発生地点との距離差が大きいことが課題である。そこで，数値気象モデルによる解析・予測による格子点データを用いた分析もなされている。米国の水平解像度 40 km 予報データ(1 時間ごと)を用いた分析では(Thompson et al. 2003)，SReH，CAPE，EHI の全体的な傾向として Rasmussen and Blanchard (1998)と同様の結果が得られているが,F2 規模以上の竜巻に対する EHI の中央値が 2 程度と大きくなる等,Davies (1993)に近い結果となっている。SCP では F2 規模以上とそれ以外の差が顕著であり(図 B-3)，CAPE や SReH に関連した複合関連指数として EHI 以外の指数の検討の余地がある。

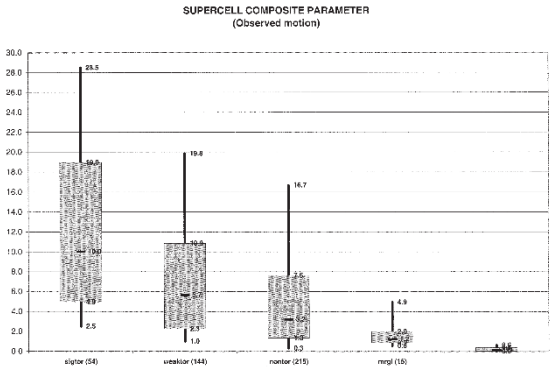


図 B-3　SCP に対する箱ひげ図（sigtor は F2 規模以上，weaktor は F1 規模以下，nontor は非竜巻，mrgl はややスーパーセル化したストーム，nonsuper は非スーパーセルストームを表し，括弧内の数字は事例数を表す。箱ひげ図の意味は図 B-2 と同じ。）

飯塚・加治屋 (2011)は，気象庁のメソ客観解析データ（水平解像度 10 km・鉛直総数 16 層・3 時間ごと）のデータを用いて，2006 年 2 月から 3 ヵ年の間に発生した 141 個の竜巻・非発生事例を分析した。その際，発生地点から 40 km 範囲内に存在する格子点に対する突風関連指数の最大値をピックアップしている。他文献と同様に CAPE や SReH 単独では竜巻・非竜巻の区別，あるいはスーパーセル竜巻・非スーパーセルの区別が明瞭でないが，EHI のような複合パラメータではより明瞭になっている（図 B-4)。図 B-4 では F スケール別の傾向も示されているが，F1 規模と F2・F3 規模（F3 は佐呂間竜巻のみ）との間に差はなく，米国の結果とはやや異なる。現象論の観点では，大きな竜巻はスーパーセル化が明瞭となり，大きな空間スケールの現象が駆動力（large-scale forcing）となって発生するため，数 km から十数 km 程度の空間代表性を有する格子点データやラジオゾンデデータをもととした突風関連指数で十分に議論ができる一方，小さな竜巻は大きな竜巻を伴わない場合は large-scale forcing の影響が小さい，局地的な擾乱に伴う頻度が多くなるため，突風関連指数との関連性が薄れていると解釈できる。

瀧下 (2011)は，気象庁の数値予報資料 (MSM)（気象庁メソ客観解析データと空間分解能等は同じ仕様だが解析データではなく，予報データである）を用いて，2004 年から 3 ヵ年

に発生した竜巻やダウンバースト発生時の SReH，CAPE，EHI の関係を調べた（図 B-5）。発生地点を中心とした 50 km 四方内の最大の値を採用している。この図から，最も大きく，唯一の F3 竜巻である佐呂間竜巻の環境場において（ML）CAPE が非常に小さく（それゆえ，EHI も非常に小さく），また，F1 竜巻と F2・F3 竜巻で特段の違いが見られないことから，指数で竜巻強度を判断するのは困難であると結論づけている。

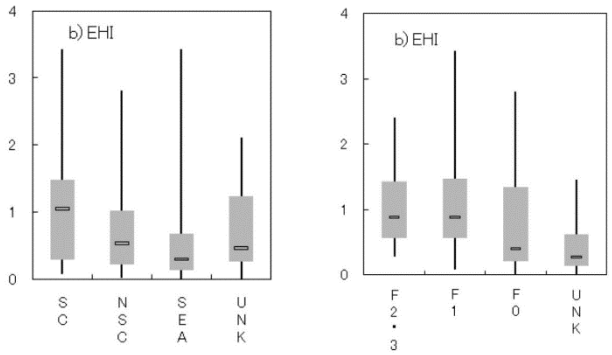


図 B-4　EHI に対する箱ひげ図（左：竜巻種別，右：F スケール別；SC はスーパーセル型竜巻，NSC はノンスーパーセル型竜巻，SEA は海上竜巻，UNK は陸上竜巻でスーパーセル判定ができなかった竜巻を表す。）

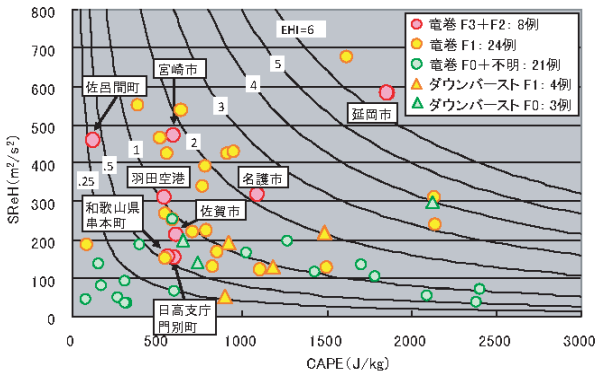


図 B-5 竜巻及びダウンバースト事例における分析例

F1 竜巻と F2・F3 竜巻の区別については，これまで挙げた文献同様，やはり困難なようである。しかし，佐呂間竜巻において CAPE 値が非常に小さい点についてはその解釈に注意しなければならない。同種のデータを用いた飯塚・加治屋（2011）は，850 hPa 以下の総数は 7 層しかなく，ゾンデ観測データよりも鉛直分解能が粗いため，結果の解釈には注意を要することを指摘している。つまり，CAPE 算出において，適切な空気塊を持ち上げていない可能性は否定できない。また，加藤（2008a）が指摘するように，佐呂間竜巻発生時には，佐呂間町の南東側にある山を暖気流が乗り越え，佐呂間町付近では下層では冷たい西よりの気流と，その直上に東よりの暖気流が流れ込み，鉛直シアが増大していたと考えられる。

このような場合，地表面付近がやや安定傾向となるため上述のように，MLCAPE の値は非常に小さくなる。MUCAPE の場合は地表面付近の大気が冷たい場合に，その上空で発生し得る elevated convection を考慮できるが，佐呂間竜巻に対して結果的に CAPE 値が大きくなる（本文参照)。つまり，算出方法に検討の余地が大きいため，佐呂間竜巻といった 1 つの F3 竜巻事例をもって，SReH，CAPE 系の突風関連指数の限界を断じることは難しい。

B-2　今後の研究の方向性

以上のように，検討時点でのデータの品質等々が低かった等，各文献ともに検討の余地があり，今後は各文献の知見を全て踏まえた解析方法・データをもって分析・考察することが重要である。大局的には，スーパーセル化が顕著な（F3 規模程度以上の）大きな竜巻とそれ以外の竜巻の発生環境場は，EHI 値の差が有意である傾向が見られることから，SReH 値と CAPE 値とから地域レベルでの傾向を議論できる可能性がある。また，こうした突風関連指数の活用は，F2 規模以上とそれ以外の比較が限度であり，F1 規模以上とそれ以外というように，小さな竜巻の発生予測への指数の活用は向かないと考えられる。

欧米や国内の気象学会では，突風関連指数の有効性について現在も検討がなされている。もととするデータ品質の観点では，これまで離れた箇所の高層ゾンデデータや空間解像度の粗い解析・予測データをもとに分析されてきた点が課題であり，高精度な解析データをもって，これまでの文献・知見が正しいかどうか確認する必要がある。その際，過去文献において指数値の算出に工夫されている点を可能な限り採用するとともに，SReH，CAPE をはじめとした単一指数もしくはそれらの組み合わせ（加藤 2008b）に加え，EHI，SCP，STP 等の複合パラメータの説明性の高さについて広範に適用性を検討することが求められる。

現時点では，時空間解像度の高い長期気象解析データ（水平解像度 5km・10 分ごとデータ）をもとに，CAPE に対する算出方法を工夫した上で，SReH，CAPE の特性，加藤（2008b）と同様に SReH と CAPE を組み合わせて用いた方法，及び EHI について検討し，SReH と CAPE を用いる方法と EHI を用いる手法とでは，F3 規模以上の竜巻が発生する地域性を観点とした解析結果に大差がないことを確認した（本文参照)。

参考文献

Chuda, T., and H. Niino, 2005: Climatology of environmental parameters for mesoscale convections in Japan. J. Meteor. Soc. Japan, 83, 391-408.

Davies, J. M., 1993: Hourly helicity, instability, and EHI in forecasting supercell tornadoes. 17th Conf. on Severe Local Storms, St. Louis, MO., Amer. Meteor. Soc., 107-111.

Davies, J. M., and R. H. Johns, 1993: Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes. 1. Wind shear and helicity. The tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards, Geophysical Monograph 79, Amer. Geophy. Union, 573-582.

Johns, R. H., J. M. Davies, and P. W. Leftwich, 1993: Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes. 2. Variations in the combinations of wind and instability parameters. The tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards, Geophysical Monograph 79, Amer. Geophy. Union, 583-590.

Rasmussen, E. N., and D. O. Blanchard, 1998: A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. Wea. Forecasting, 13, 1148-1164.

Rasmussen, E. N., 2003: Refined supercell and tornado forecast parameters. Wea. Forecasting, 18, 530-535.

Thompson, R. L., R. Edwards, J. A. Hart, K. L. Elmore, and P. Markowski, 2003: Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle. Wea. Forecasting, 18, 1243-1261.

飯塚義浩，加治屋秋実，2011：数値予報資料から求めた竜巻に関連する大気環境指数の統計的検証，天気，58，19-30.

加藤輝之，2008：竜巻発生の環境場に関する研究（Ⅰ）－竜巻をもたらす積乱雲の発生環境に関する統計的研究－，平成 19 年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進，6-12.

加藤輝之，2008：スーパーセルに伴う竜巻の発生機構の研究（Ⅲ）－2006 年の佐呂間竜巻に対する解析－，平成 19 年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進，39-44.

櫻井渓太，川村隆一，2008：日本における竜巻発生の環境場と予測可能性．天気，55，7-22.

瀧下洋一，2011：竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報について－突風に関する防災気象情報の改善－，測候時報，78，57-93.

付録 C　気象モデルの概要

気象モデルとは，物理・力学的法則に基づいて，物理量の時間変化を計算機により数値的に解くために各諸過程を概念化したもので，気象庁による日々の気象予報もこの気象モデルを用いて実施されている。図 C-1 のように計算対象領域を 3 次元格子で覆い，各格子点上で気圧，風等の物理量を定義する。観測データや気象庁等の解析・予報結果をもとに計算開始時刻の物理量を決めて，計算領域境界部の値を時々刻々変化させながら（図 C-2），運動方程式，熱力学方程式，連続式，水分量の保存式等を数値積分すると，将来時刻における気象要素の値が計算される。各方程式中の運動量や熱・水のソース・シンク項は各物理過程によって生み出される（例えば，水蒸気から水滴が生成されるとその潜熱が熱力学方程式中のソースとなる）が，気象モデルでは図 C-3 に示すような物理過程がモデル化され，力学系の各保存式のソルバーと連携している。

この種の気象モデルは，放射性汚染気塊の輸送量計算にも使用されており，WSPEEDI-Ⅱ（Worldwide version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information;世界版緊急時環境線量情報予測システム第 2 版）では，本検討に用いた WRF モデルの前身に位置づけられる MM5（PSU/NCAR Mesoscale Model version 5；Dudhia 1993）が気象場の入力情報の作成に用いられている（山澤ら 1997）。WRF モデルは，MM5 の力学系・物理モデル共に大幅な改良が加えることにより開発されたものであり，現在米国においては気象の現業・研究の両面で活用されている。また，わが国を含めた諸外国においても広く活用されている。

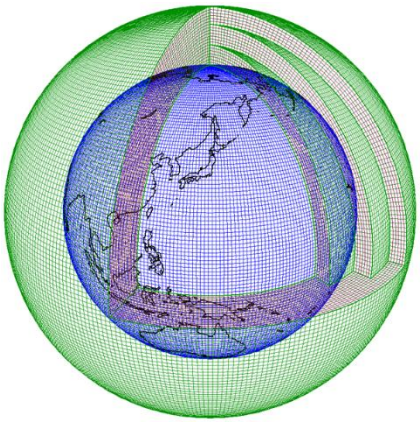


図 C-1 計算グリッド構造の例
（気象庁ホームページ http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/whitep/1-3-1.html より）

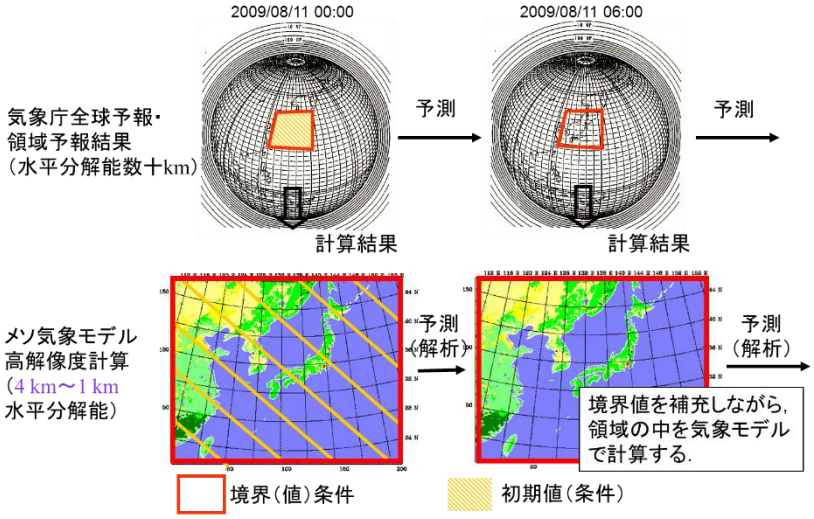


図 C-2　気象モデルを用いた解析・予測計算の流れの概念図（気象庁全球モデルを例に）

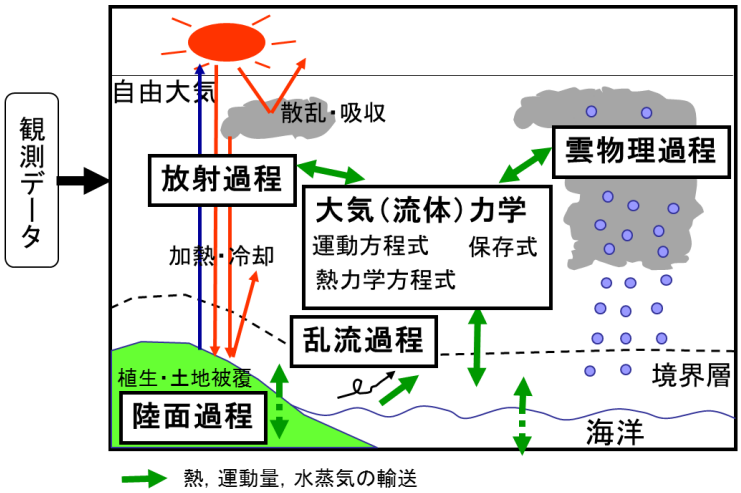


図 C-3 気象モデルを用いた計算の模式図

参考文献

Dudhia, J., 1993: A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. Mon. Wea. Rev., 121, 1493-1513.

山澤弘実，茅野政道，永井晴康，古野朗子，1997：緊急時環境線量情報予測システム（世界版）WSPEEDI の開発と検証．日本原子力学会誌，39，881-892.

付録 D　高標高山岳が及ぼす影響

1990 年 12 月 11 日に千葉県茂原市で発生した日本最大級 F3 竜巻時(総観場:暖気の移流，気圧の谷，寒冷前線）の海抜 100 m 高度における気象場（風向・風速及び相当温位の分布）を図 D-1 左図に示す。太平洋上は（相当温位の高い）暖かく湿潤な大気状態にあり，12 月の冬季としては暖かく湿った大気（緑色）が太平洋側から千葉県南東部房総半島沿岸に発生した地点に流れ込んでいることが解析されている。この大気は内陸部に中心をもつ低気圧の大きな渦に沿って日本海側へ運ばれているが，日本海側では，相当温位が低くなり，不安定性が解消されていることがわかる。

このような高い山岳の南側と北側で空気塊の性質が変わることはいずれの F3 規模の竜巻でも見られている（例えば，図 D-1 右図)。太平洋側から流入した大気下層の空気塊が山岳を越えようとした場合，空気塊の上昇に伴い気温が低下し，昇り斜面上空で空気塊が飽和して降水粒子が生成され，湿潤不安定な状態が解消されることもある。この場合，空気塊が山岳を乗り越えたとしても乾燥・安定化の進んだ空気塊になるため，太平洋沿岸部で竜巻を引き起こした大気が，例えば日本列島の中央部に存在する高く複雑な山岳域を湿潤不安定な状態のまま乗り越えて日本海側に流入して大きな竜巻を引き起こすことは考えられない。つまり，台風等の接近・通過時の渦度が高い時間帯に同時に太平洋側から暖かく湿った空気塊が特に開けた平野部（関東平野，濃尾平野，宮崎平野等）に流入する」という F3 規模竜巻の発生シナリオが日本海側ではあてはまりにくいことを示唆している。

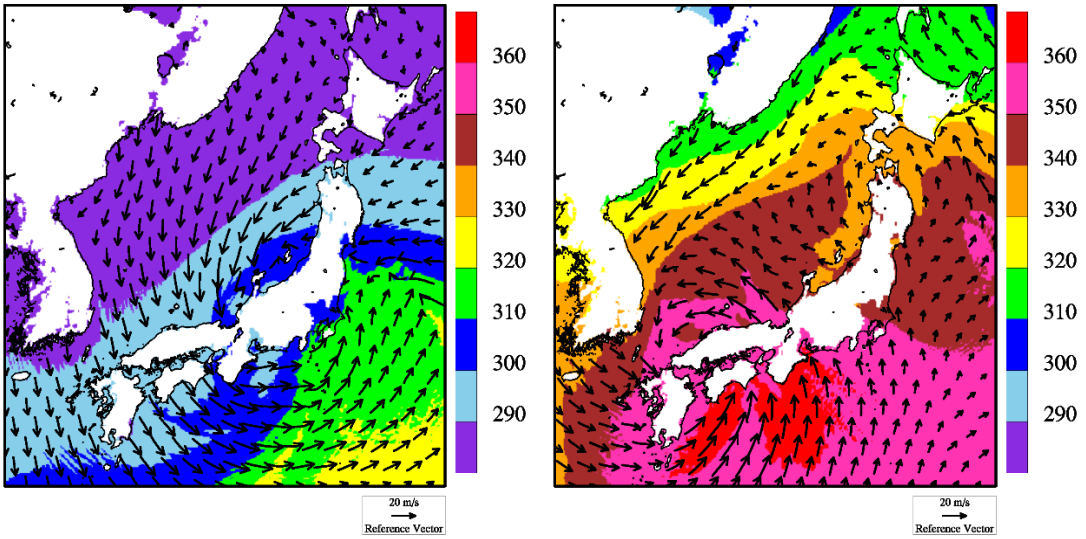


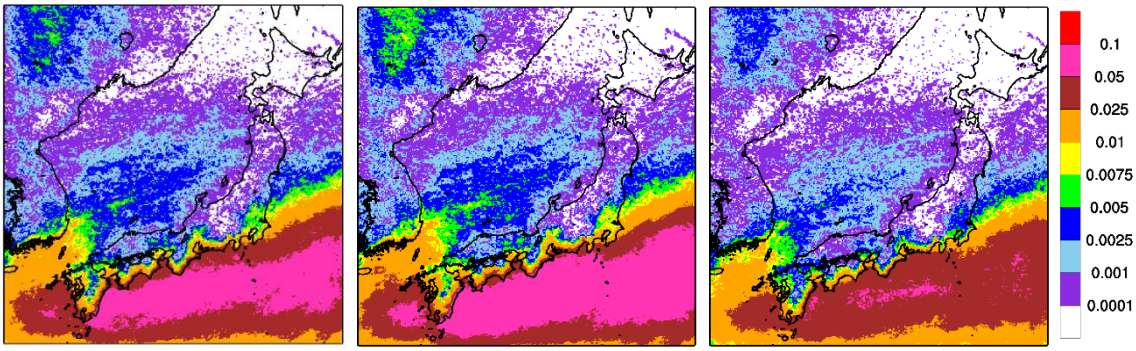
図 D-1　海抜 100 m 高度における風向・風速及び相当温位（単位：K)
(左：1990/12/11 F3 事例，右：1999/09/24 F3 事例)

付録 E　閾値の感度

突風関連指数に不確実性が存在するのは確かである。そこで，今回設定した閾値に対してばらつき分を考慮し，ばらつき分が超過頻度分布にどのような影響を及ぼすかについて確認した。

(a) EHI

今回用いた閾値 3.3 に対し，3.0 及び 3.6（もともとの値の±1 割程度）の閾値にした場合の超過頻度分布を図 E-1 に示す。閾値を 3.6 にした場合，関東平野内での F3 竜巻の発生箇所を含包できておらず（図 E-2 参照），値として大きすぎることがわかる。一方，閾値を 3.0 にすると，対馬海上からの暖気流入に対応して島根県沖に高い値（超過頻度分布の 0.01%前後以上）が見られるようになる。いずれの閾値においても，日本海側沿岸域・北日本と太平洋側沿岸域との差は維持されている。



閾値 3.3　　閾値 3.0　　閾値 3.6

図 E-1　同時超過頻度分布（単位は %。EHI の閾値は左から，3.3，3.0，3.6 である。）

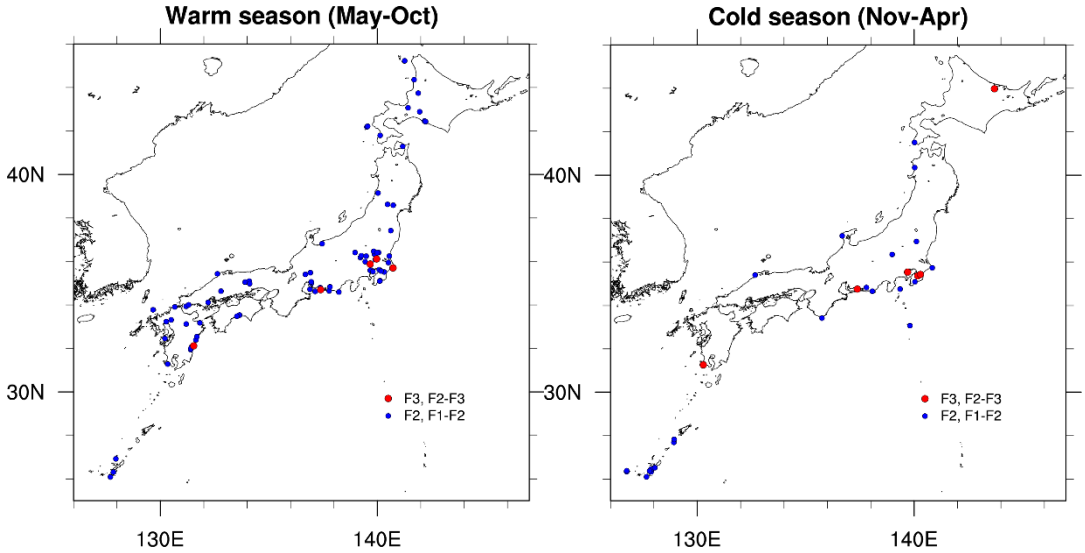
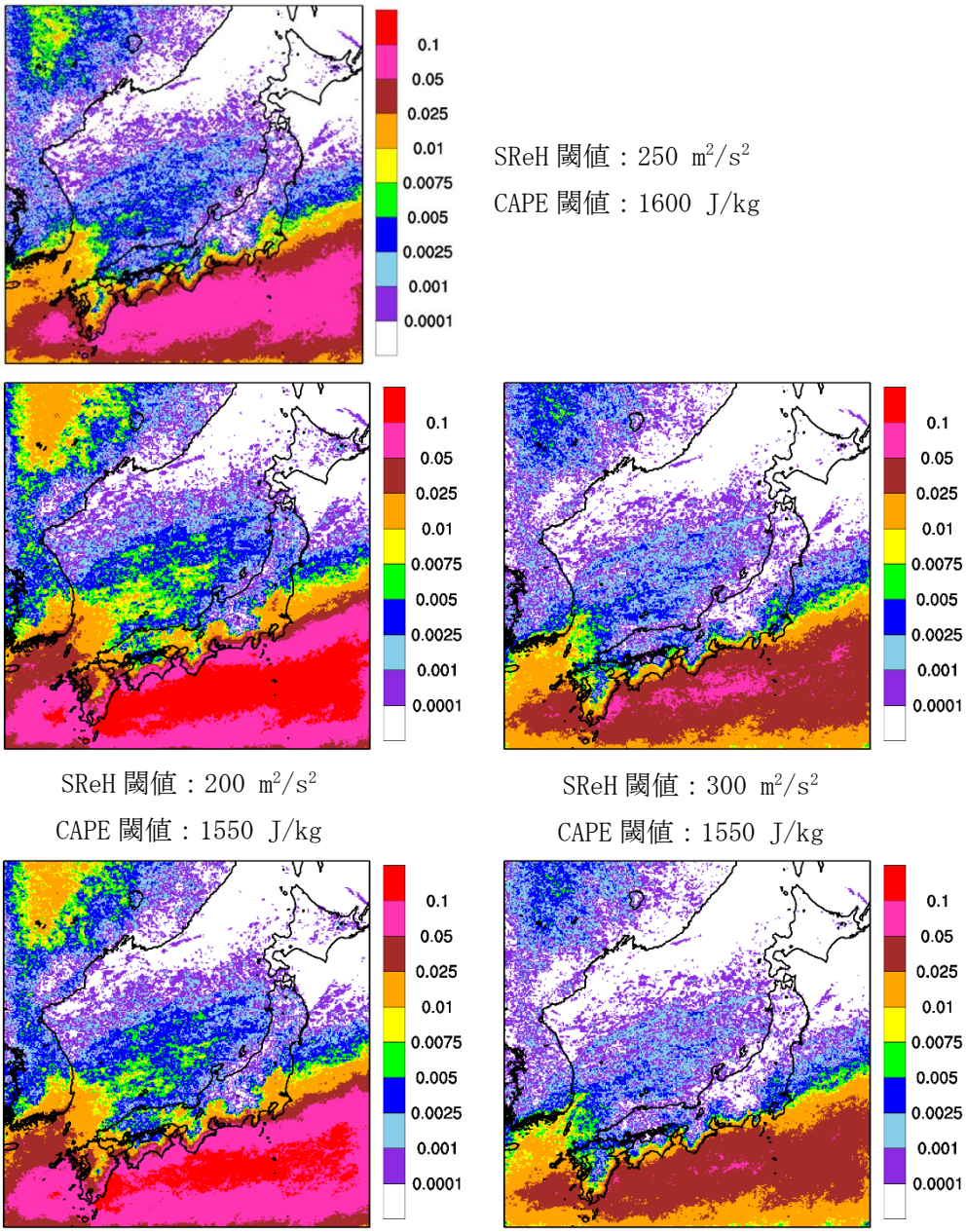


図 E-2　F3 竜巻（F2-F3 を含む）及び F2 竜巻（F1-F2 を含む）の発生箇所
（左：暖候期，右：寒候期）

(b) SReH と CAPE（暖候期）

今回用いた閾値は，SReH が 250 m^2/s^2，CAPE が 1600 J/kg である。そこで，SReH を 200～300 m^2/s^2（50 m^2/s^2 刻み），CAPE を 1550～1650 J/kg（50 J/kg 刻み）で変化させ，各組み合わせで検討した。図 E-3 は 5 ケース分プロットしたものである。閾値を小さくするほど，頻度は全体的に大きくなる。



SReH 閾値：250 m^2/s^2
CAPE 閾値：1600 J/kg

SReH 閾値：200 m^2/s^2
CAPE 閾値：1550 J/kg

SReH 閾値：300 m^2/s^2
CAPE 閾値：1550 J/kg

SReH 閾値：200 m^2/s^2
CAPE 閾値：1650 J/kg

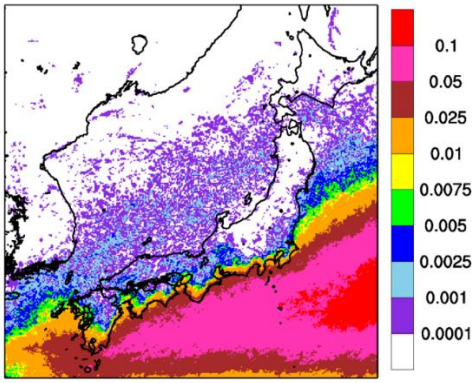
SReH 閾値：300 m^2/s^2
CAPE 閾値：1650 J/kg

図 E-3　同時超過頻度分布（暖候期，単位は %）

今回設定した閾値（SReHの閾値：250 m^2/s^2，CAPEの閾値：1600 J/kg）に対する頻度分布の0.01 %前後よりも大きな地域が，発生箇所を含包していることがわかる。特に，いずれかの閾値を大きくすると，EHIの場合と同様に，関東平野内のF3竜巻の発生箇所を含包できない傾向にある。特に SReHの感度が高い。SReHとCAPEの両方の閾値を小さくした場合（SReH：200 m^2/s^2，CAPEの閾値：1550 J/kg）においては，全体的な頻度は高まり，内陸部深くまで頻度が高まっており，閾値を小さくしすぎていることがわかるが，それでも日本海側沿岸・北日本と茨城県以西太平洋側との差異は維持されている。

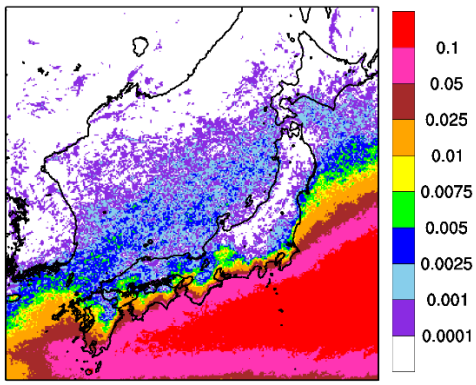
図E-4は寒候期に対する図であるが，今回設定した閾値（SReHの閾値：250 m^2/s^2，CAPEの閾値：600 J/kg）に対しては，0.025 %前後より大きな値をとる地域がF3竜巻の発生箇所を含包している。暖候期ほど閾値に敏感ではないが，暖候期に対する感度分析の傾向が寒候期に対しても見られる。

平成27年2月3日の審査会合において用いた閾値は，今回の検討のように感度解析的に閾値を変えて決めたわけではない。あくまで，数は少ないながらも過去のF3竜巻発生時の環境場を解析し，下限の指数値を決めたが，その結果はF3竜巻の発生の実態をよく表現できていると考えられる。閾値に幅を持たせた分析結果では，閾値を小さくするほど，小さな竜巻が発生する環境場をカウントするため，超過頻度が大きくなる。暖候期は寒候期に比べて閾値にやや敏感であるが，茨城県以西の太平洋側沿岸域と，日本海側及び北日本の沿岸域との差は維持されることを確認できた。これは，EHIを用いる場合でも，CAPEとSReHを用いる場合においても同様である。



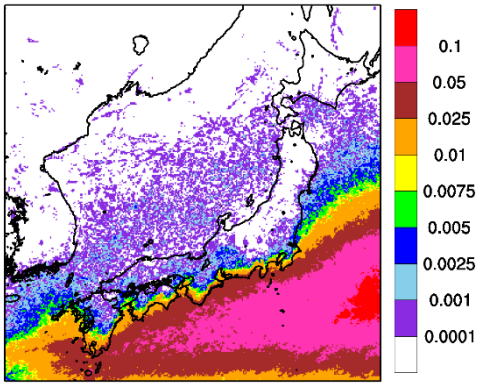
SReH 閾値：250 m^2/s^2

CAPE 閾値：600 J/kg



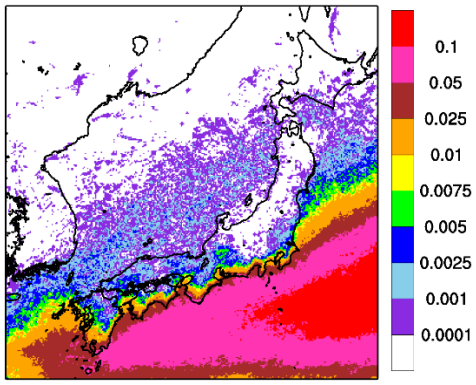
SReH 閾値：200 m^2/s^2

CAPE 閾値：550 J/kg



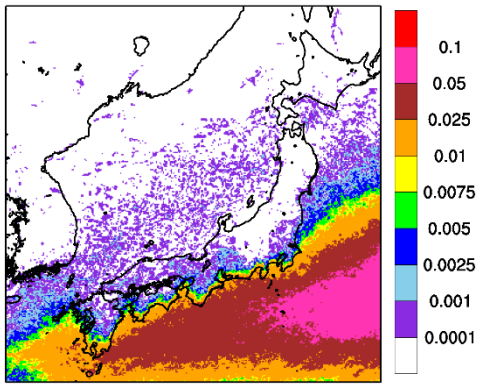
SReH 閾値：300 m^2/s^2

CAPE 閾値：550 J/kg



SReH 閾値：200 m^2/s^2

CAPE 閾値：650 J/kg



SReH 閾値：300 m^2/s^2

CAPE 閾値：650 J/kg

図 E-4　同時超過頻度分布（寒候期，単位は %）

竜巻検討地域において発生した竜巻

竜巻検討地域において1961年から2012年6月に発生した竜巻の一覧を下表に示す。

	発生日時	発生位置緯度	発生位置経度	Fスケール	現象区別
001	1962年09月28日14時20分	45度13分30秒	141度15分25秒	(F2)	竜巻
002	1965年09月30日02時35分	39度44分33秒	140度4分46秒	F1	竜巻
003	1965年09月30日03時00分	39度19分29秒	140度0分10秒	F0～F1	竜巻又はダウンバースト
004	1968年01月08日09時50分	37度13分48秒	138度19分22秒	F1	竜巻
005	1969年06月22日09時00分	34度37分30秒	131度36分10秒	F1	竜巻
006	1969年11月18日07時08分	38度54分31秒	139度50分7秒	F1	竜巻
007	1971年02月01日00時20分	36度41分10秒	136度40分30秒	F1	竜巻
008	1971年10月17日05時00分	44度21分23秒	141度41分30秒	(F2)	竜巻
009	1971年10月17日05時00分	44度21分23秒	141度41分30秒	F0～F1	竜巻
010	1972年11月21日17時05分	36度53分27秒	137度24分57秒	F1	竜巻
011	1973年05月21日16時30分	36度49分56秒	136度44分45秒	F0～F1	竜巻
012	1973年09月27日23時00分	45度26分20秒	141度2分10秒	F1	竜巻
013	1973年10月22日13時20分	39度41分41秒	140度4分20秒	F1	竜巻
014	1974年08月08日05時05分	40度16分53秒	140度3分24秒	F0～F1	竜巻
015	1974年10月03日19時05分	42度11分20秒	139度31分0秒	(F1～F2)	竜巻
016	1974年10月20日15時00分	41度47分45秒	140度7分47秒	(F1～F2)	竜巻
017	1975年05月31日18時10分	35度25分57秒	132度37分42秒	(F2)	竜巻
018	1975年05月31日18時10分	35度26分6秒	132度37分57秒	F0～F1	竜巻
019	1975年05月31日18時40分	35度25分8秒	132度37分53秒	F0～F1	竜巻
020	1975年09月08日01時30分	42度12分52秒	139度32分58秒	(F1～F2)	竜巻
021	1977年01月13日01時30分	36度34分5秒	136度34分0秒	F0～F1	竜巻
022	1978年08月14日10時40分	45度5分0秒	141度38分0秒	不明	竜巻
023	1979年10月31日13時00分	37度8分21秒	136度41分2秒	F0～F1	竜巻
024	1979年11月02日01時58分	41度30分7秒	140度1分6秒	(F2)	竜巻
025	1984年11月19日22時00分	35度26分4秒	133度19分22秒	F1	竜巻
026	1987年01月11日01時32分	40度2分27秒	139度56分19秒	F0～F1	竜巻
027	1987年01月11日02時00分	40度6分9秒	139度57分57秒	F1	竜巻
028	1989年03月16日19時20分	35度24分0秒	132度40分0秒	(F2)	竜巻
029	1990年04月06日02時55分	37度12分10秒	136度40分56秒	F2	竜巻
030	1991年01月13日14時48分	38度1分25秒	138度12分20秒	不明	竜巻
031	1991年02月15日11時00分	35度33分54秒	135度52分53秒	F1	竜巻
032	1991年09月17日08時50分	42度49分12秒	140度12分50秒	不明	竜巻
033	1991年12月11日20時10分	36度35分59秒	136度38分0秒	F1	竜巻
034	1992年09月13日08時50分	45度26分50秒	141度40分0秒	不明	竜巻
035	1992年09月17日09時05分	43度50分50秒	141度29分55秒	F1	竜巻
036	1992年09月17日09時05分	43度50分50秒	141度29分55秒	不明	竜巻
037	1993年09月26日15時52分	43度57分17秒	141度36分54秒	不明	竜巻
038	1993年10月17日09時30分	36度55分9秒	136度43分51秒	不明	竜巻
039	1993年10月23日17時00分	38度5分30秒	138度12分30秒	不明	竜巻
040	1993年11月24日13時50分	37度13分27秒	138度12分49秒	不明	竜巻
041	1994年03月26日11時40分	38度48分32秒	139度46分19秒	F1	竜巻
042	1994年09月01日16時00分	37度59分6秒	139度2分56秒	不明	竜巻
043	1995年12月01日13時51分	36度26分13秒	136度25分3秒	不明	竜巻
044	1996年09月05日10時20分	39度15分18秒	139度54分1秒	不明	竜巻
045	1996年10月08日23時07分	44度43分7秒	141度48分15秒	F1	竜巻
046	1996年11月30日07時05分	37度23分39秒	138度34分14秒	F1	竜巻
047	1997年01月22日09時20分	37度54分58秒	139度2分0秒	F0	竜巻
048	1998年09月24日15時00分	35度38分26秒	134度55分31秒	不明	竜巻
049	1998年10月31日08時40分	37度19分6秒	136度42分10秒	不明	竜巻
050	1998年11月15日22時30分	38度56分40秒	139度49分22秒	F1	竜巻

051	1999年10月08日09時30分	36度43分56秒	136度40分18秒	不明	竜巻
052	1999年10月29日21時25分	40度13分10秒	140度4分11秒	F0～F1	竜巻
053	1999年11月25日15時40分	40度20分50秒	140度1分37秒	(F1～F2)	竜巻
054	2000年07月25日06時20分	36度8分1秒	136度4分13秒	不明	竜巻
055	2000年07月25日06時30分	36度13分26秒	136度8分2秒	不明	竜巻
056	2001年06月01日13時20分	40度32分7秒	139度56分44秒	F1	竜巻
057	2001年06月19日14時50分	35度37分58秒	136度3分11秒	F1	竜巻
058	2002年09月23日14時30分	36度58分15秒	137度33分15秒	F0～F1	竜巻
059	2002年09月24日13時15分	39度30分6秒	140度4分56秒	F1	竜巻
060	2002年11月04日11時20分	36度21分14秒	136度19分32秒	F0	竜巻
061	2002年11月05日10時30分	35度38分45秒	135度56分16秒	不明	竜巻
062	2003年10月18日16時25分	36度11分51秒	136度7分2秒	不明	竜巻
063	2004年08月15日12時10分	45度27分22秒	141度2分1秒	F0未満	竜巻
064	2005年01月12日07時50分	35度32分0秒	134度3分30秒	不明	竜巻
065	2005年12月05日11時50分	35度23分26秒	132度42分50秒	F1	竜巻又はダウンバースト
066	2005年12月25日19時10分	38度51分16秒	139度47分16秒	F1	竜巻
067	2006年11月09日12時05分	42度3分31秒	139度26分50秒	F1	竜巻
068	2007年08月24日08時20分	38度47分40秒	139度42分0秒	不明	竜巻
069	2007年08月24日08時20分	38度47分40秒	139度42分0秒	不明	竜巻
070	2007年10月01日14時25分	43度23分0秒	140度26分30秒	不明	竜巻
071	2007年10月01日14時27分	43度17分8秒	140度20分16秒	不明	竜巻
072	2007年10月01日15時30分	42度26分26秒	139度47分30秒	不明	竜巻
073	2007年10月04日13時36分	44度53分0秒	141度41分0秒	不明	竜巻
074	2007年10月04日16時30分	42度27分15秒	139度50分20秒	不明	竜巻
075	2007年10月11日09時55分	40度47分21秒	140度7分54秒	不明	竜巻
076	2007年10月11日10時25分	40度47分21秒	140度7分54秒	不明	竜巻
077	2007年10月16日15時23分	35度36分35秒	133度5分10秒	不明	竜巻
078	2007年11月22日09時00分	36度54分32秒	137度24分56秒	不明	竜巻又は漏斗雲
079	2007年12月02日01時30分	38度54分26秒	139度50分18秒	F0	竜巻
080	2008年06月01日12時50分	40度23分20秒	139度58分55秒	不明	竜巻
081	2008年07月30日08時03分	35度34分20秒	134度13分5秒	不明	竜巻
082	2008年07月30日08時28分	35度33分5秒	134度10分56秒	不明	竜巻又は漏斗雲
083	2008年07月30日08時28分	35度33分5秒	134度10分56秒	不明	竜巻又は漏斗雲
084	2008年07月30日08時41分	35度33分36秒	134度11分26秒	不明	竜巻又は漏斗雲
085	2008年07月30日08時55分	35度34分48秒	134度9分30秒	不明	竜巻
086	2008年07月30日09時01分	35度34分16秒	134度9分26秒	不明	竜巻
087	2008年07月30日09時18分	35度34分6秒	134度8分16秒	不明	竜巻
088	2008年08月14日11時25分	38度55分10秒	139度48分31秒	不明	竜巻
089	2008年08月15日16時20分	35度30分51秒	133度59分38秒	F0以下	竜巻
090	2008年09月14日08時33分	45度28分53秒	141度50分14秒	不明	竜巻
091	2008年09月14日08時47分	45度29分22秒	141度37分30秒	不明	竜巻
092	2008年09月21日11時07分	38度28分16秒	139度28分39秒	不明	竜巻
093	2008年10月01日11時55分	40度1分15秒	139度45分45秒	不明	竜巻
094	2008年10月01日11時55分	40度0分37秒	139度44分9秒	不明	竜巻
095	2008年10月10日09時05分	39度47分5秒	140度0分55秒	不明	竜巻
096	2008年10月10日10時20分	39度44分36秒	140度0分23秒	不明	竜巻
097	2008年10月10日12時07分	39度40分20秒	140度1分7秒	不明	竜巻
098	2008年10月11日00時45分	41度51分7秒	140度7分37秒	F0	竜巻
099	2008年10月15日13時48分	37度51分36秒	138度54分57秒	F0	竜巻
100	2008年10月15日14時47分	38度40分48秒	139度34分48秒	不明	竜巻
101	2008年10月15日16時10分	38度22分2秒	139度26分44秒	不明	竜巻
102	2008年10月26日18時30分	37度56分11秒	139度6分24秒	F0	竜巻
103	2008年10月27日14時55分	36度9分11秒	136度4分16秒	不明	竜巻
104	2008年10月30日12時33分	35度32分51秒	134度12分26秒	不明	竜巻
105	2008年10月30日12時38分	35度35分1秒	134度17分35秒	F0	竜巻
106	2008年10月30日12時50分	35度34分34秒	134度16分10秒	不明	竜巻
107	2008年10月31日07時30分	37度7分33秒	136度42分25秒	不明	竜巻

108	2008年11月02日16時20分	37度44分35秒	138度48分7秒	不明	竜巻
109	2008年11月19日08時36分	36度27分26秒	136度23分41秒	不明	竜巻又は漏斗雲
110	2008年11月19日11時45分	37度55分41秒	139度1分4秒	不明	竜巻
111	2008年11月20日08時30分	37度26分19秒	138度34分17秒	不明	竜巻
112	2008年11月20日08時40分	36度56分37秒	136度44分33秒	不明	竜巻
113	2008年11月20日08時42分	36度56分37秒	136度44分33秒	不明	竜巻
114	2008年11月20日08時42分	36度56分37秒	136度44分33秒	不明	竜巻
115	2008年11月20日09時40分	37度27分8秒	138度34分43秒	不明	竜巻
116	2008年11月20日10時00分	36度41分30秒	136度33分4秒	不明	竜巻又は漏斗雲
117	2008年11月23日10時20分	36度59分16秒	136度46分25秒	F0～F1	竜巻
118	2009年01月24日11時05分	42度5分27秒	139度23分57秒	不明	竜巻
119	2009年01月24日11時15分	42度0分27秒	139度27分46秒	不明	竜巻
120	2009年02月07日20時15分	39度41分6秒	140度5分11秒	F0	竜巻
121	2009年03月14日17時26分	35度35分53秒	134度13分28秒	不明	竜巻又は漏斗雲
122	2009年08月23日18時37分	38度36分36秒	139度34分27秒	不明	竜巻
123	2009年08月23日18時51分	38度37分26秒	139度35分7秒	不明	竜巻
124	2009年09月10日13時30分	37度25分26秒	138度32分38秒	不明	竜巻
125	2009年09月10日13時35分	37度25分26秒	138度32分38秒	不明	竜巻
126	2009年09月13日03時40分	38度34分7秒	139度33分9秒	F0	竜巻
127	2009年10月04日12時50分	39度39分55秒	140度4分26秒	不明	竜巻
128	2009年10月27日13時10分	37度2分7秒	137度49分14秒	不明	竜巻
129	2009年10月30日07時26分	40度30分18秒	139度59分57秒	F0	竜巻
130	2009年10月30日09時20分	40度9分56秒	140度0分26秒	F1	竜巻
131	2009年11月03日06時25分	36度52分52秒	137度21分58秒	不明	竜巻又は漏斗雲
132	2009年11月03日06時37分	36度54分8秒	137度22分38秒	不明	竜巻
133	2009年11月03日06時38分	36度54分8秒	137度22分38秒	不明	竜巻
134	2009年11月03日06時39分	36度53分27秒	137度22分8秒	不明	竜巻
135	2009年11月03日06時43分	36度54分56秒	137度23分51秒	不明	竜巻
136	2009年12月18日02時00分	36度34分20秒	136度33分53秒	F0	竜巻
137	2009年12月18日11時03分	35度34分22秒	134度14分26秒	不明	竜巻又は漏斗雲
138	2010年08月25日12時30分	43度57分25秒	141度35分10秒	不明	竜巻
139	2010年08月25日13時05分	43度59分0秒	141度39分15秒	F0未満	竜巻
140	2010年09月07日03時45分	39度46分12秒	140度3分59秒	F0	竜巻
141	2010年09月16日14時30分	35度37分0秒	134度24分5秒	不明	竜巻
142	2010年09月17日10時45分	37度38分56秒	138度44分42秒	不明	竜巻
143	2010年09月17日10時55分	37度38分3秒	138度45分37秒	F0以下	竜巻
144	2010年10月15日04時30分	37度10分5秒	136度40分32秒	F0	竜巻
145	2010年10月15日17時00分	38度3分23秒	139度19分23秒	F0	竜巻
146	2010年10月15日17時05分	38度4分24秒	139度21分9秒	F1	竜巻
147	2010年10月17日12時40分	40度22分52秒	139度59分42秒	F0	竜巻
148	2010年10月17日13時20分	39度51分44秒	140度1分32秒	F0	竜巻
149	2010年10月26日07時00分	43度24分30秒	141度22分0秒	不明	竜巻
150	2010年10月26日07時05分	43度24分30秒	141度19分0秒	不明	竜巻
151	2010年10月26日07時05分	43度8分28秒	140度23分6秒	不明	竜巻
152	2010年10月26日07時10分	43度23分40秒	141度25分50秒	F0未満	竜巻
153	2010年10月26日07時10分	43度24分0秒	141度24分40秒	不明	竜巻
154	2010年10月26日07時38分	43度22分30秒	141度24分15秒	不明	竜巻
155	2010年10月26日08時10分	43度8分38秒	140度23分6秒	不明	竜巻
156	2010年10月26日15時50分	41度51分39秒	140度6分25秒	不明	竜巻
157	2010年11月12日13時15分	40度19分0秒	140度1分47秒	F0	竜巻
158	2010年11月29日09時20分	37度0分3秒	136度46分18秒	F0	竜巻
159	2010年11月29日12時18分	36度15分21秒	136度6分51秒	不明	竜巻又は漏斗雲
160	2010年11月29日12時24分	36度15分23秒	136度6分59秒	不明	竜巻
161	2010年11月29日12時25分	36度15分17秒	136度6分37秒	不明	竜巻
162	2010年12月03日15時30分	37度50分58秒	138度55分4秒	F0	竜巻
163	2010年12月03日15時36分	37度52分15秒	138度58分57秒	F0未満	竜巻
164	2010年12月03日15時45分	37度53分11秒	139度2分24秒	F1	竜巻

165	2010年12月09日17時10分	37度12分36秒	138度18分7秒	F0～F1	竜巻
166	2010年12月15日07時56分	36度51分20秒	137度23分5秒	不明	竜巻
167	2010年12月16日08時00分	38度2分43秒	138度37分10秒	不明	竜巻
168	2010年12月17日10時20分	42度52分12秒	140度18分46秒	不明	竜巻
169	2010年12月18日07時18分	35度34分17秒	134度10分6秒	不明	竜巻又は漏斗雲
170	2010年12月24日15時57分	35度34分17秒	134度10分4秒	不明	竜巻
171	2010年12月27日01時30分	37度1分3秒	136度44分37秒	F0	竜巻
172	2010年12月29日13時50分	35度46分56秒	135度14分0秒	不明	竜巻
173	2010年12月29日14時00分	35度46分54秒	135度12分6秒	不明	竜巻
174	2011年01月03日14時52分	38度3分48秒	139度16分7秒	不明	竜巻
175	2011年03月09日11時30分	36度13分1秒	136度11分51秒	F0未満	竜巻又は漏斗雲
176	2011年03月09日17時25分	35度34分6秒	134度8分57秒	不明	竜巻
177	2011年03月31日09時50分	37度10分31秒	138度13分58秒	F0未満	竜巻又は漏斗雲
178	2011年08月13日17時32分	40度29分8秒	139度53分20秒	不明	竜巻
179	2011年08月20日18時30分	43度5分3秒	140度22分46秒	不明	竜巻
180	2011年08月20日18時40分	43度4分56秒	140度23分57秒	不明	竜巻
181	2011年08月20日18時45分	43度4分52秒	140度24分37秒	不明	竜巻
182	2011年08月22日12時05分	45度19分0秒	140度58分47秒	不明	竜巻又は漏斗雲
183	2011年09月20日05時50分	45度25分27秒	141度41分35秒	不明	竜巻
184	2011年11月15日16時10分	37度2分0秒	137度42分0秒	不明	竜巻
185	2011年11月15日16時12分	37度2分0秒	137度42分0秒	不明	竜巻
186	2011年11月15日16時14分	37度2分0秒	137度42分0秒	不明	竜巻
187	2011年11月15日16時15分	37度2分0秒	137度42分0秒	不明	竜巻
188	2011年11月15日16時20分	37度2分0秒	137度42分0秒	不明	竜巻
189	2011年11月24日12時10分	36度56分25秒	137度23分30秒	不明	竜巻又は漏斗雲
190	2011年11月25日06時27分	36度53分45秒	137度23分0秒	不明	竜巻又は漏斗雲
191	2011年12月24日12時10分	36度48分30秒	136度42分0秒	不明	竜巻
192	2012年02月01日04時15分	35度21分41秒	132度40分40秒	F0	竜巻

気象庁　「竜巻等の突風データベース」より作成

2.3　竜巻最大風速のハザード曲線の求め方

「ガイド」に基づき，竜巻に遭遇し，かつ竜巻がある風速以上になる確率モデルの推定法（Wen and Chu 及び Garson et al.）に基づいて竜巻最大風速のハザード曲線を算定し，V_{B2}を算定した。具体的には，独立行政法人原子力安全基盤機構が東京工芸大学に委託した研究の成果（以下「東京工芸大学委託成果」という）も参考とし以下のとおり算定した。

(1) 評価フロー

本評価は，竜巻の発生頻度の分析，竜巻風速・被害幅・被害長さの確率密度分布及び相関係数の算定，並びにハザード曲線の算出によって構成されている。評価フローを図 1.1 に示す。

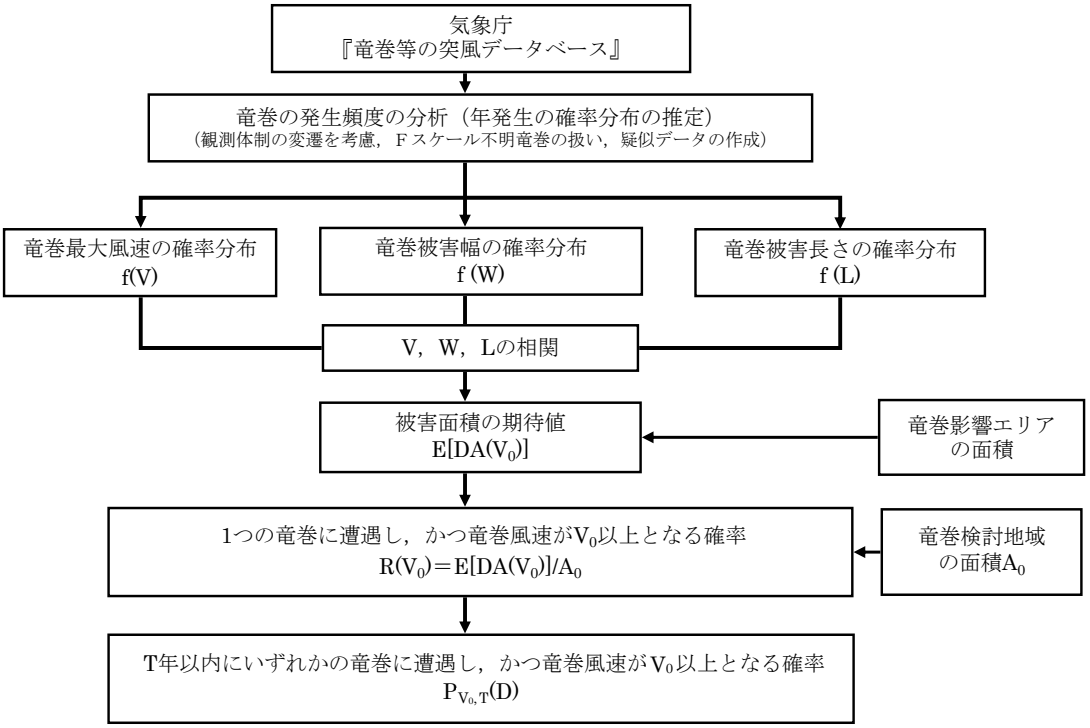


図 1.1　竜巻最大風速ハザード曲線の算定フロー

(2) 竜巻の発生頻度の分析

①適用データ

気象庁「竜巻等の突風データベース」より竜巻検討地域における 1961 年 1 月～2012 年 6 月までの竜巻発生データを用いた。

②竜巻の発生頻度

気象庁「竜巻等の突風データベース」は 1961 年以降のデータがデータベース化されているが，観測体制は近年になるほど強化されており，年代により観測値の質にば

らつきがある。観測体制が強化された 2006 年あるいは 2007 年以降は，発生数が非常に多くなっており，海上竜巻の増加が特に顕著である。ただし，これら海上竜巻の多くは，その詳細が“不明”となっているのも特徴である。

観測体制の変遷や観測された竜巻の特徴を考慮して，解析に用いるデータの観測期間を以下のように設定した。

✓観測体制が強化された 2007～2012/6（5.5 年間）
✓観測体制が整備された 1991～2012/6（21.5 年間）
✓観測記録が整備された 1961～2012/6（51.5 年間）

上記 3 つの観測期間について，竜巻発生数，年間平均発生数及びその標準偏差を F スケールごとに調査した結果を表 2.1 に示す。同表の 1～3 段目までは，1961～，1991～，2007～2012/6 の結果をそれぞれ表し，小計は F0 から F3 竜巻の発生数の合計，総数は不明（陸上・海上）も含めた合計を表す。

1961 年以降の 51.5 年間で，192 個の竜巻が観測されているが，このうち 5 つの竜巻は海側の 5km 以遠から竜巻検討地域に入ってきた海上竜巻である。陸側 5km 以遠から当該領域に進入した竜巻は無い。ここでは，ガイド等に基づき，竜巻検討地域に進入あるいは通過した竜巻も発生と見なして解析を行う。

192 個の竜巻のうちの約 21%（40 個）を F1 竜巻が占め，不明は半数以上（118 個）となっている。不明竜巻の多く（98 個）は 2007 年以降の 5.5 年間に観測されており，それらの殆ど（91 個）が海上竜巻である。F0 竜巻についても，その 9 割以上（24 個中 22 個）が 2007 年以降の観測である。

一方，F2 竜巻については，51.5 年間で 10 個観測されているが，2007 年以降の発生例は無く，観測体制の強化に伴う影響をそれほど受けていないことが示唆される。また，F3 竜巻の観測例が無いのも，本竜巻検討地域の特徴である。

以上の結果を踏まえ，各観測期間のデータを統合して，擬似的な 51.5 年間のデータや統計量を F スケールごとに作成した。その基本的な考え方は以下のとおりである。

i. 被害が小さくて見過ごされやすい F0 及び F 不明竜巻は，観測体制が強化された 2007 年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
ii. 被害が比較的軽微な F1 竜巻については，観測体制が整備された 1991 年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
iii. 被害が比較的大きく見逃されることが少ない F2,3 竜巻については，観測データが整備された 1961 年以降の全期間の年間発生数や標準偏差を採用する。
iv. 51.5 年間の発生数を，ｉ～ⅲの観測期間との比率から F スケールごとに推計する。

このようにして得られた結果（以下，疑似データと呼ぶ）を表 2.1 の 4 段目に示す。ここでの小計には，陸上での不明竜巻を含めた。その結果，51.5 年間に発生し

た竜巻 1187 個のうち，不明も含む陸上竜巻が 333 個，海上竜巻は 853 個と推定された。

竜巻は，被害があって初めてそのＦスケールが推定されるため，陸上での不明竜巻(上陸竜巻のＦ不明を含む)は被害が少ないF0 竜巻に分類するのが合理的である。その一方，海上のＦスケール不明の竜巻については，そのＦスケールを推定することは困難であるが，沿岸部近傍での竜巻の発生特性は陸上と海上では類似していると考えられる【参考資料 1】。そこで，以下のような仮定の下に，検討地域の竜巻発生数を推計した。

v. 陸上で発生あるいは上陸したＦ不明竜巻はF0 に含める。これにより，全ての陸上竜巻を F0～F3 に分類する。
vi. 沿岸部近傍での海上竜巻の発生特性は，陸上竜巻の発生特性と類似しているとの仮定の下，不明な海上竜巻の発生数を陸上竜巻のＦスケール別発生比率で按分する。

このようにして得られた結果を表 2.1 の 5 段目に示す。検討領域における 51.5 年間の竜巻の発生総数は 1187 個，その 8 割以上が F0，1 割強が F1 と推定された。また，F2 竜巻は，実際の観測数は 51.5 年間で 10 個であったが，海上竜巻を考慮したため，疑似データでは 36 個に増加している。

また，図 2.1 に示す日本における竜巻強度分布の変遷より，理想的な竜巻強度分布（縦軸：竜巻の発生率，横軸：風速の二乗）は直線上になる。今回の実施した疑似データ作成方法においても，直線となる期間からＦスケールごとの使用データを選定しており，適切な方法と考えられる。

表 2.1　竜巻発生数の解析結果

竜巻検討地域（沿岸±5km）	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不　明		総数
			F0	F1	F2	F3	（陸上）	（海上）	（含む不明）
1961～2012/6（51.5年間）	期間内総数	74	24	40	10	0	13	105	192
	平均値（年）	1.44	0.47	0.78	0.19	－	0.25	2.04	3.73
	標準偏差（年）	2.25	1.75	0.90	0.49	－	0.71	5.92	7.81
	CV（年）	1.56	3.76	1.16	2.52	－	2.83	2.90	2.09
1991～2012/6（21.5年間）	期間内総数	46	24	21	1	0	12	105	163
	平均値（年）	2.14	1.12	0.98	0.05	－	0.56	4.88	7.58
	標準偏差（年）	3.11	2.61	0.91	0.22	－	1.02	8.49	11.07
	CV（年）	1.45	2.34	0.93	4.64	－	1.83	1.74	1.46
2007～2012/6（5.5年間）	期間内総数	27	22	5	0	0	7	91	125
	平均値（年）	4.91	4.00	0.91	－	－	1.27	16.55	22.73
	標準偏差（年）	5.55	4.32	1.24	－	－	1.69	11.41	15.10
	CV（年）	1.13	1.08	1.36	－	－	1.33	0.69	0.66
疑似51.5年間（陸上竜巻）	期間内総数	333	206	51	10	0	66	853	1186
	平均値（年）	6.44	4.00	0.98	0.19	－	1.27	16.55	22.99
	標準偏差（年）	4.75	4.32	0.91	0.49	－	1.69	11.41	12.36
	CV（年）	0.74	1.08	0.93	2.52	－	1.33	0.69	0.54
疑似51.5年間（全竜巻）	期間内総数	1187	969	182	36	0	0	0	1187
	平均値（年）	23.05	18.82	3.53	0.70	－	－	－	23.05
	標準偏差（年）	8.97	8.76	1.72	0.92	－	－	－	8.97
	CV（年）	0.39	0.47	0.49	1.32	－	－	－	0.39

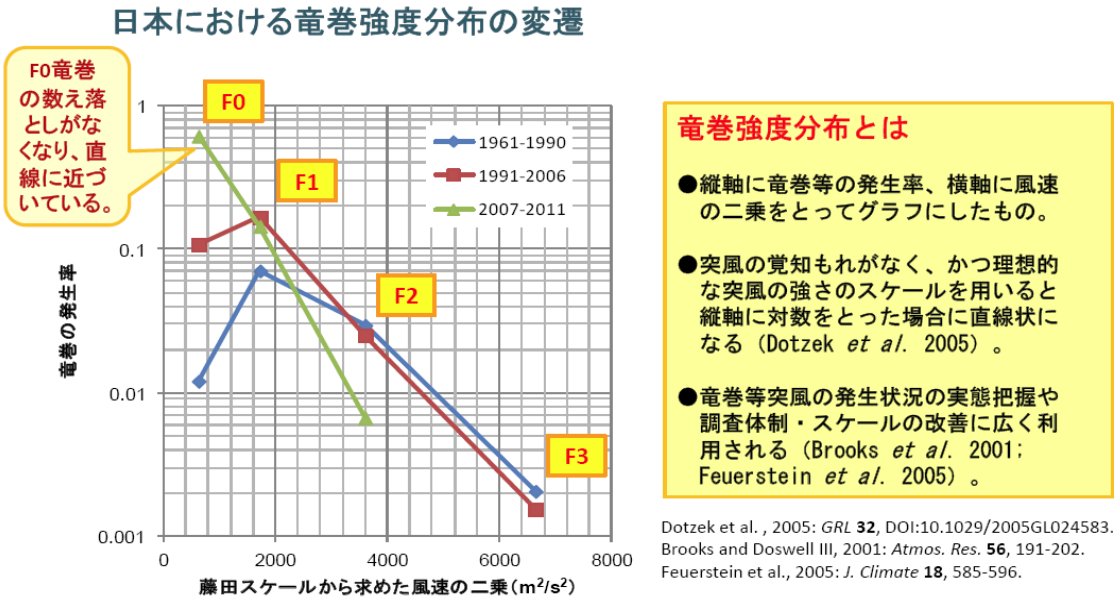


図 2.1 日本における竜巻強度分布の変遷
（出典：気象庁「竜巻等突風の強さの評定に関する検討会」第一回資料 3）

③年発生数の確率密度分布の設定

設定に当たっては，竜巻は気象事象の中でも極めて稀に発生する事象であり，発生数の変動（標準偏差）が大きい分布であることから，東京工芸大学委託成果にならってポリヤ分布により設定した。なお，ポリヤ分布は，竜巻影響評価ガイドにおいて推奨されているポアソン分布を一般化したものであり，年発生数の年々変動の実態をポアソン分布よりも適合性が高い形で表現できることを確認している。【参考資料 2】

(3) 竜巻の被害幅，被害長さの分析

竜巻発生数と同様にして，3 つの観測期間を対象にして，被害幅の観測データを解析した結果を表 3.1 に示す。ここで記載した F 不明とは，被害幅と F スケールの両方若しくは片方が不明であることを表す。また，気象庁のデータベース上で，被害幅が 0m と記録されている竜巻も不明扱いとし，解析対象からは除外した。

本竜巻検討地域では，51.5 年間に 192 個の竜巻が観測されているが，F スケールが分かっているものが 74 個（表 2.1 の 1 段目の小計），F スケールと幅の両方が分かっているものが 55 個（表 3.1 の 1 段目の小計）である。被害幅の解析に利用可能なデータ数は，発生数のデータ数に比べてかなり少ないことが分かる。先に推定した F スケールごとの発生数（表 2.1）との整合性も確保する必要がある。そこで，以下のようにして 51.5 年間の被害幅の統計量を推定した。

① 統計量を確保するために，1961 年以降の観測データを使用し，F スケール別に被害幅データを抽出する。このデータをもとに，F スケール別に被害幅のデータや平均値・標準偏差を求める（表 3.1 の上段）。
② 各スケール別の 51.5 年間のデータ数は，①で得られる観測値ではなく，表 2.1 で推定された 51.5 年間の疑似データの発生数とする。
③ 具体的には，①で抽出された F スケール別の被害幅データを大きい順に並び替え※，②で設定した 51.5 年間の発生数分だけ繰り返し集積し，51.5 年間の疑似データ（幅のデータ）を作成する。
④ 作成された疑似データの平均値や標準偏差を求める。

※：51.5 年間の発生数分だけ繰り返し集積する際に，より大きな被害幅データを集積することで保守的なデータとなるように，大きい順に並べ替えた。

このようにして求めた結果を表 3.1 の最下段に示す。F スケール別の平均値や標準偏差は，繰り返しサンプリングを行っている関係で，最上段の観測値とは若干異なっている(若干大きい)。以上により,F スケールごとの被害幅の発生特性を保持しつつ，発生数との整合性を確保することができる。

被害長さについても，被害幅と同様の解析を行った。結果を表 3.2 に示す。

表 3.1 竜巻の被害幅の解析結果

竜巻検討地域（沿岸±5km）	竜巻幅の統計 (m)	小計	竜巻スケール				不　明		総数
			F0	F1	F2	F3	（陸上）	（海上）	（含む不明）
1961～2012/6（51.5年間）	期間内総数	55	23	26	6	0	32	105	192
	平均値 (m)	124	120	113	190	－			
	標準偏差 (m)	151	125	104	349	－			
	CV	1.22	1.04	0.92	1.84	－			
1991～2012/6（21.5年間）	期間内総数	42	23	18	1	0	16	105	163
	平均値 (m)	123	120	128	100	－			
	標準偏差 (m)	117	125	116	0	－			
	CV	0.96	1.04	0.91	0.00	－			
2007～2012/6（5.5年間）	期間内総数	26	21	5	0	0	8	91	125
	平均値 (m)	127	126	132	－	－			
	標準偏差 (m)	116	129	54	－	－			
	CV	0.91	1.03	0.41	－	－			
疑似 51.5年間（全竜巻）	期間内総数	1187	969	182	36	0	0	0	1187
	平均値 (m)	121	120	113	190	－			
	標準偏差 (m)	131	123	102	323	－			
	CV	1.08	1.02	0.90	1.70	－			

表 3.2 竜巻の被害長さの解析結果

竜巻検討地域（沿岸±5km）	被害長さの統計(km)	小計	竜巻スケール				不　明		総数
			F0	F1	F2	F3	（陸上）	（海上）	（含む不明）
1961～2012/6（51.5年間）	期間内総数	57	23	28	6	0	30	105	192
	平均値 (km)	2.516	1.139	3.550	2.967	－			
	標準偏差 (km)	4.039	1.486	5.243	3.462	－			
	CV	1.61	1.30	1.48	1.17	－			
1991～2012/6（21.5年間）	期間内総数	41	23	17	1	0	17	105	163
	平均値 (km)	1.502	1.139	2.024	1.000	－			
	標準偏差 (km)	1.943	1.486	2.467	0.000	－			
	CV	1.29	1.30	1.22	0.00	－			
2007～2012/6（5.5年間）	期間内総数	26	21	5	0	0	8	91	125
	平均値 (km)	1.800	1.219	4.240	－	－			
	標準偏差 (km)	2.300	1.533	3.618	－	－			
	CV	1.28	1.26	0.85	－	－			
疑似 51.5年間（全竜巻）	期間内総数	1187	969	182	36	0	0	0	1187
	平均値 (km)	1.607	1.149	3.780	2.967	－			
	標準偏差 (km)	2.697	1.466	5.287	3.205	－			
	CV	1.68	1.28	1.40	1.08	－			

(4) 竜巻風速，被害幅，被害長さの確率分布，相関係数

竜巻ハザードを評価するためには，一つの竜巻が発生した際の，竜巻風速・被害幅・被害長さの確率分布が必要となる。そこで，本竜巻検討地域における 51.5 年間の竜巻の発生数・被害幅・被害長さのデータ（表 4.1）を用いて各確率密度分布を求める。その際，竜巻影響評価ガイド並びに東京工芸大学委託成果を参照して，確率密度関数が対数正規分布にしたがうものとした。

①竜巻風速の確率密度分布

F スケールの竜巻風速には幅があるため，具体的な風速の設定方法には任意性があり，F スケールの範囲内のある値（中央値等）に設定する方法や F スケールの風速範囲内で一様に分布すると仮定する方法などが考えられる。

図 4.1 に竜巻風速が中央値に集中した場合（黒い実線）及び一様に分布するとした場合（赤い実線）について，風速の分布形（超過確率）を推定した結果を示す。●印は，各 F スケール下限値における観測値（疑似 51.5 年間データ）の超過確率を表しており，例えば F1 の下限値（33m/s）以上となる確率は約 0.2 である。また，○印は，F3 が 1 個観測された場合を仮定してプロットをした。

ハザード解析においては，特定の風速以上となる確率が重要であることから，●印で表された観測値ベースの超過確率と適合度が高い分布形が望ましい。図 4.1(a)の○印も含めて評価すると，一様分布の方が中央値の場合よりも適合度が良いと言える。

また，後述のハザード解析において，竜巻風速が中央値に集中した場合及び一様に分布するとした場合で計算した結果，図 4.2 のとおり風速設定を一様分布とした方が中央値で代表させる場合よりも厳しいハザード曲線となっている。

以上より，ハザードを保守的に評価するとの観点から，風速分布としては一様分布を採用した。風速分布を一様分布とした場合の竜巻風速の確率密度分布，年超過確率分布の算定結果を図 4.3 に示す。

②竜巻の被害幅の確率密度分布

竜巻の被害幅は，竜巻風速とは異なり具体的な値が直接観測されていることから，任意性はなく，観測値から作成した疑似データに基づき，確率密度分布を推定する。竜巻の被害幅の確率密度分布，年超過確率分布の算定結果を図 4.4 に示す。算定結果は，年超過確率の図より観測結果を適切に推定できていることがわかる。

③竜巻の被害長さの確率密度分布

竜巻の被害長さは，竜巻風速とは異なり具体的な値が直接観測されていることから，任意性はなく，観測値から作成した疑似データに基づき，確率密度分布を推定する。竜巻の被害長さの確率密度分布，年超過確率分布の算定結果を図 4.5 に示す。算定結果は，年超過確率の図より観測結果を適切に推定できていることがわかる。

ハザード曲線を算定する際，2 変量又は 3 変量の確率分布関数を対象とするため，竜巻風速，被害幅，被害長さの相関係数の検討を実施した。相関係数は，1961 年以降の観測データで,3 変量が同時に観測されているデータを用いるのが理想的であるが，十分なデータ数を確保するため，風速と幅のみが観測されているデータ等，2 変量の比較が行える観測データも併せて用いて相関係数を算定した。なお，竜巻風速，被害幅，被害長さの確率密度分布の推定では，発生頻度が重要であるために繰り返しサンプリングを行ったデータを用いたが，以下の理由により，相関係数の推定ではそのような措置を行わず，観測の元データをもとに推定した。

F スケール不明や F0 竜巻では，被害規模が小さいために被害幅や被害長さの観測データが F2 竜巻に比べて得られる機会が少なく，ばらつきも大きいものと考えられる。そのようなデータをサンプリングにより増やすと，F2 竜巻で見られる相関の高さが反映されない算定結果になることが懸念される。

表 4.2 に示す算定結果によれば，本竜巻検討地域では，竜巻風速と被害長さには相関係数 0.31 程度，被害幅と被害長さには，0.46 程度の相関が認められた。相関を求めた際のデータ数，平均値，標準偏差及び相関係数を表 4.2 に示す。

表 4.1　竜巻検討地域における竜巻パラメータ（51.5 年間の推定結果）

	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
疑似 51.5年間 （全竜巻）	発生数	期間内総数	1187	969	182	36	0
		平均値（年）	23.05	18.82	3.53	0.70	−
		標準偏差（年）	8.97	8.76	1.72	0.92	−
		CV（年）	0.39	0.47	0.49	1.32	−
	被害幅	期間内総数	1187	969	182	36	0
		平均値（m）	121	120	113	190	−
		標準偏差（m）	131	123	102	323	−
		CV	1.08	1.02	0.90	1.70	−
	被害長	期間内総数	1187	969	182	36	0
		平均値（km）	1.607	1.149	3.780	2.967	−
		標準偏差（km）	2.697	1.466	5.287	3.205	−
		CV	1.68	1.28	1.40	1.08	−

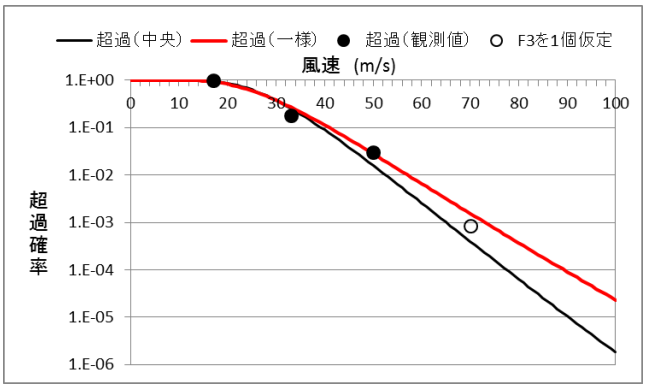
表 4.2(1)　相関係数算定に用いた竜巻風速，被害幅，被害長さのデータ数（単位：個）

データ数	風速	被害幅	被害長さ
風速	74	55	57
被害幅	55	59	54
被害長さ	57	54	59

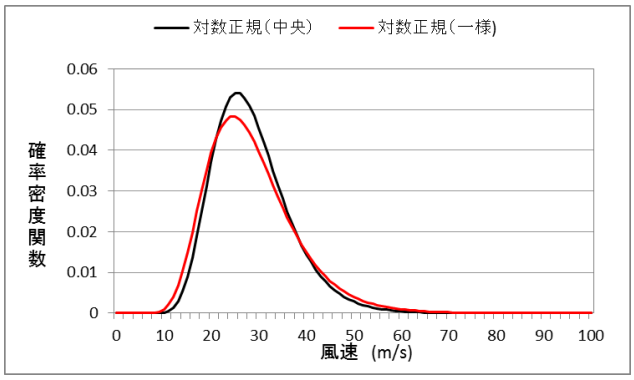
表 4.2(2)　竜巻風速，被害幅，被害長さの相関係数（単位なし）

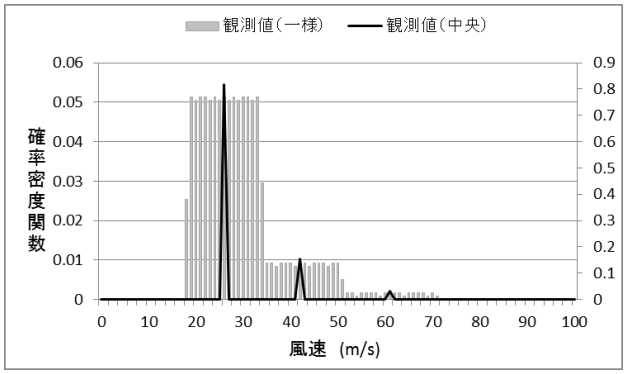
相関係数	風速	被害幅	被害長さ
風速	1.000	−0.050*	0.312
被害幅	−0.050*	1.000	0.462
被害長さ	0.312	0.462	1.000

*風速と被害幅は無相関との知見が得られたため，ハザード算定の際には，相関係数 0 として計算



(a)超過確率





(b)確率密度関数（左：推定値，右：観測値）

図 4.1 竜巻風速の確率分布の推定結果と観測値の比較

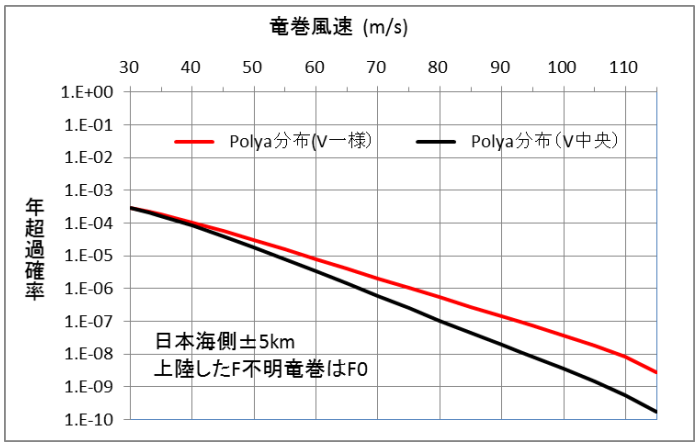


図 4.2 風速設定の違いによる竜巻最大風速のハザード曲線の比較（海側，陸側 5km 範囲）

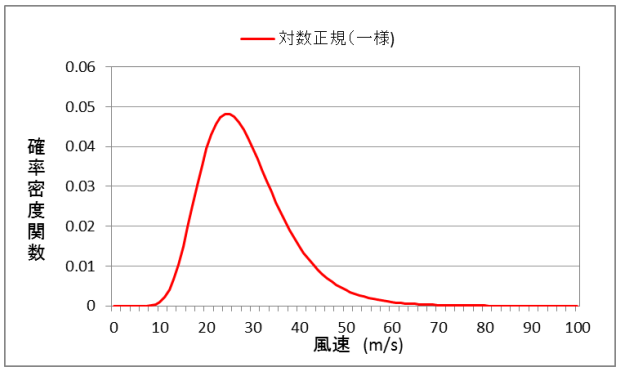


図 4.3(1)　竜巻風速の確率密度分布

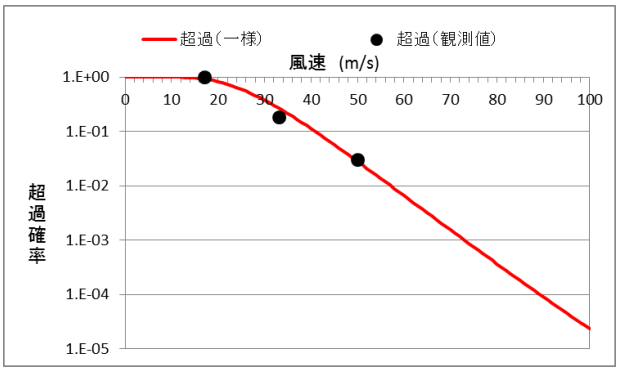


図 4.3(2)　竜巻風速の年超過確率分布

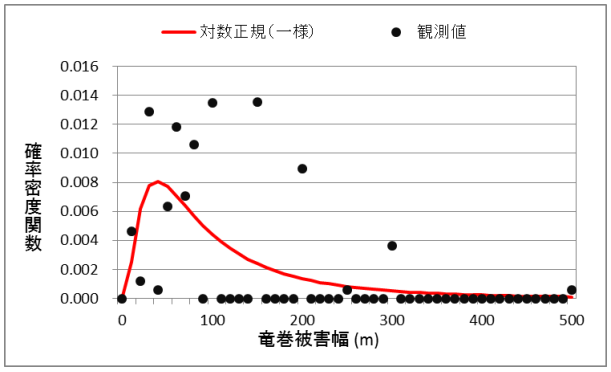


図 4.4(1)　被害幅の確率密度分布

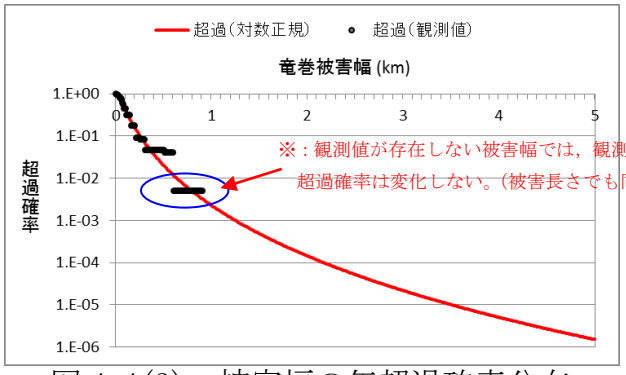


図 4.4(2)　被害幅の年超過確率分布

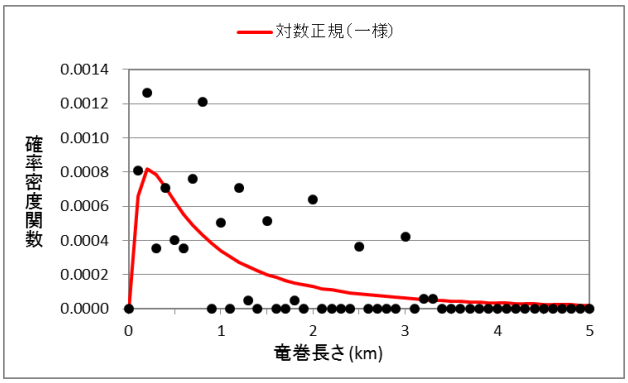


図 4.5(1)　被害長さの確率密度分布

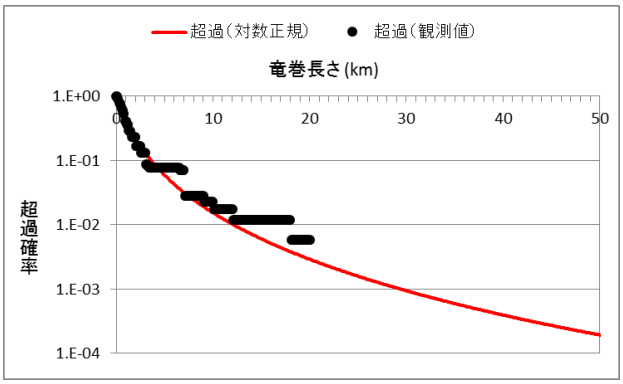


図 4.5(2)　被害長さの年超過確率分布

(5) 竜巻影響エリア

竜巻影響エリアは，柏崎刈羽原子力発電所の号炉ごとに設定する。号炉ごとのすべての評価対象施設の設置面積の合計値及び推定される竜巻被害域(被害幅，被害長さから設定)に基づいて，竜巻影響エリアを設定する。

図 5.1 に柏崎刈羽原子力発電所６号炉の竜巻影響エリア，図 5.2 に 7 号炉の竜巻影響エリアを示す。竜巻影響エリアは，柏崎刈羽原子力発電所６号又は７号炉の評価対象施設を含む長方形エリアの対角線長さが約 260m であることを考慮して，各号炉の評価対象施設を包絡する円形のエリア（直径 300m，面積約 $7.1\times10^{4}m^{2}$）として設定する。なお，竜巻影響エリアを円形とするため，竜巻の移動方向には依存性は生じない。

防護上の観点又は機密に係わる事項を含む為，公開できません

図5.1　6号炉 竜巻影響エリア

図5.2　7号炉 竜巻影響エリア

(6) ハザード曲線の算定

東京工芸大学委託成果によれば，Wen and Chu が竜巻に遭遇し，かつ竜巻風速がある値以上になる確率モデルの推定法を提案している。竜巻の発生がポアソン過程に従うと仮定した場合，竜巻の年発生数の確率分布は，(6.1)式に示すポリヤ分布の適合性が良いとされている。本ハザード曲線の算定においても，東京工芸大学委託成果にならって適合性の良いポリヤ分布により設定した。

$$P_T(N) = \frac{(\nu T)^N}{N!}(1+\beta\nu T)^{-N-1/\beta}\prod_{k=1}^{N-1}(1+\beta k) \qquad (6.1)$$

ここで，

N ：竜巻の年発生数

ν ：竜巻の年平均発生数

T ：年数

σ ：竜巻の年発生数の標準偏差

$$\beta = \left(\frac{\sigma^2}{\nu} - 1\right) \times \frac{1}{\nu} \qquad (6.2)$$

対象とする構造物が，T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し，その竜巻の風速が V_0 以上となる確率は式(6.1)から導出され以下の式(6.3)となる。

$$P_{V_0,T}(D) = 1 - \left[1+\beta\nu R(V_0)T\right]^{-1/\beta}$$

D ：対象とする構造物が風速 V_0 以上の竜巻に遭遇する事象

$R(V_0)$：リスク評価対象構造物が１つの竜巻に増遇し，竜巻風速が V_0 以上となる確率

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \qquad (6.3)$$

$DA(V_0)$：竜巻による構造物の被害面積

$E[DA(V_0)]$：$DA(V_0)$の期待値

A_0 ：リスクの評価対象とする地域の面積

次に，$E[DA(V_0)]$の求め方を説明する。

１個の竜巻の風速が V_0 以上となる面積 $DA(V_0)$は以下のように表される。

$$\begin{aligned} DA(Vo) &= WL + HL + WG + AB \quad ; \mathrm{Vi} \geq \mathrm{Vo} \\ DA(Vo) &= 0 \quad ; \mathrm{Vi} < \mathrm{Vo} \end{aligned} \qquad (6.4)$$

ここで，W は竜巻の被害幅，L は被害長さ，A,B は構造物の寸法，H と G は竜巻の被害幅や被害長さ方向への構造物の投影長さである。

上記の関係を，竜巻風速・被害幅・被害長さ・竜巻移動方向の確率分布を用いると，式(6.5)のように表すことができる。

$$E[DA(V_0)] = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0)\, l\, f(V,w,l)\, dV\, dw\, dl$$

$$+ \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty H(\alpha)\, l\, f(V,l,\alpha)\, dV dl\, d\alpha + \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) G(\alpha)\, f(V,w,\alpha)\, dV dw\, d\alpha \qquad (6.5)$$

$$+ AB \int_{V_0}^\infty f(V) dV$$

ここで,

V：竜巻最大風速

w：竜巻の被害幅

l ：竜巻の被害長さ

α：竜巻の移動方向

f（・）：確率密度分布

$$H(\alpha) = B|\sin\alpha| + A|\cos\alpha|$$

$$G(\alpha) = A|\sin\alpha| + B|\cos\alpha|$$

$$W(V_0) = \left(\frac{V_{min}}{V_0}\right)^{1/1.6} w \qquad (6.6)$$

式(6.5)の右辺第 1 項は，被害幅と被害長さの積，即ち被害面積を表しており，いわゆる点構造物に対する被害，第 2 項と第 3 項は，被害幅・被害長さと構造物寸法の積，即ち面構造物あるいは線状構造物の被害面積を表す。竜巻の幅は長さに比べて短いため，第 3 項の寄与は第 2 項に比べて 1 オーダー小さい。第 4 項は建物面積 AB に依存する項である。

$W(V_0)$は，竜巻の被害幅のうち風速が V_0以上となる部分の幅であり，式(6.6)により算出される。この式により，被害幅内の風速分布に応じて被害様相に分布があることが考慮されている。V_{min} は，竜巻被害が発生する最小風速であり，Garson は gale intensity velocity と呼んでいる（Gale とは非常に強い風の意)。米国の気象局（National Weather Service）では，34～47 ノット（17.5～24.2m/s）とされている。日本の気象庁では，気象通報にも用いられている風力階級において，風力 8 が疾強風（gale，17.2～20.7m/s)，風力 9 は大強風（strong gale，20.8～24.4m/s）と分類されており，風力 9 では「屋根瓦が飛ぶ。人家に被害が出始める」とされている。以上より，これらの風速を包括するよう，V_{min}=25m/s とした。この値は，F0（17～32m/s）のほぼ中央値に相当する。なお,この値よりも小さなV_{min}(例えば,F0 の最小風速 17m/s)を用いると，風速 V_0以上となる被害面積は小さくなる。

また，H(α)及びG(α)はそれぞれ，竜巻の被害長さ及び被害幅方向に沿った面に竜巻影響評価対象構造物を投影したときの長さである。5節にて竜巻影響エリアを円形（直径D_0）で設定しているため，竜巻の移動方向には依存せず，一定値となる。

$$H(\alpha)=G(\alpha)=D_0 \tag{6.7}$$

したがって，式(6.5)は式(6.5’)と表すことができる。

$$\begin{aligned} E[DA(V_0)] = & \int_0^\infty\int_0^\infty\int_{V_0}^\infty W(V_0)\,l\,f(V,w,l)\,dV\,dw\,dl \\ & + D_0\int_0^\infty\int_{V_0}^\infty l\,f(V,l)\,dVdl + D_0\int_0^\infty\int_{V_0}^\infty W(V_0)\,f(V,w)\,dVdw \\ & + ({D_0}^2\pi/4)\int_{V_0}^\infty f(V)dV \end{aligned} \tag{6.5’}$$

2変量，3変量の対数正規分布は，以下の式(6.8)又は式(6.9)のように表される。

μ，σ，ρは，ln(x)，ln(y)，ln(z)の平均値，標準偏差及び相関係数であり，本評価では4節にて求めた竜巻風速，被害幅，被害長さの確率密度分布の平均値，標準偏差及び相関係数をμ，σ並びにρに適用して，同時確率密度関数fを定めた。

$$f(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}}\frac{1}{xy}\exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left\{\left(\frac{\ln(x)-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2-2\rho\left(\frac{\ln(x)-\mu_x}{\sigma_x}\right)\left(\frac{\ln(y)-\mu_y}{\sigma_y}\right)+\left(\frac{\ln(y)-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right\}\right] \tag{6.8}$$

$$\begin{aligned} f(x,y,z) = & \frac{1}{(2\pi)^{3/2}\begin{vmatrix}\sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_x\sigma_z\rho_{xz}\\ \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz}\\ \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} & \sigma_z^2\end{vmatrix}^{1/2}}\times\frac{1}{xyz} \\ & \times\exp\left[-\frac{1}{2}\begin{pmatrix}\ln(x)-\mu_x & \ln(y)-\mu_y & \ln(z)-\mu_z\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_x\sigma_z\rho_{xz}\\ \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz}\\ \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} & \sigma_z^2\end{pmatrix}^{-1}\begin{pmatrix}\ln(x)-\mu_x\\ \ln(y)-\mu_y\\ \ln(z)-\mu_z\end{pmatrix}\right] \end{aligned} \tag{6.9}$$

(7) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})

以上より，ハザード曲線の算定結果を図 7.1 に示す。竜巻最大風速のハザード曲線により設定する最大風速 V_{B2} は，ガイドを参考に年超過確率 10^{-5} に相当する竜巻風速は，59m/s とする。

また，使用した竜巻の統計データの不確実性については検討を実施しており，F スケール不明の海上竜巻の発生数は，陸上竜巻の F スケール別発生比率で按分して取り扱っているが，竜巻検討地域を「北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸」にすることに伴う竜巻ハザード曲線算出のためのデータの不確実性（日本海側は F スケール不明の海上竜巻が多い）を踏まえ，参照する年超過確率を 10^{-5} から一桁下げた年超過確率 10^{-6} における風速である 76m/s を V_{B2} とする。

なお，ガイドで要求されている，1km ごとの短冊領域でのハザード曲線による最大風速 V_{B2} 算定については，評価を実施したものの，その技術的説明性が乏しいと考え，V_B の設定には使用しないものとした。【参考資料 3】

また，不確実さ要素のハザード算定結果への影響を検討した。【参考資料 5】

図 7.2(a)に示した，データ，確率分布形選択及びデータ量が少ないことによる不確実さを表したハザード曲線により，これらの不確実さが十分小さいことを確認した。さらに，疑似データに F3 竜巻を 4 個追加した感度解析結果を図 7.2(b)に示す。この場合の年超過確率 10^{-5} に相当する竜巻風速は 62.2m/s となり，かなり保守的な仮定をおいてもハザードへの影響は限定的であることから，データの高い安定性を確認した。

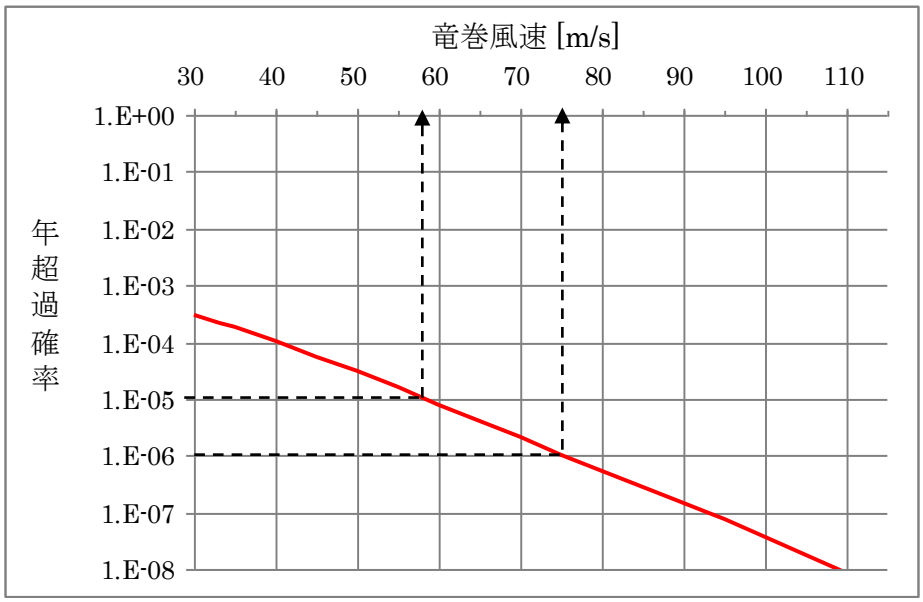
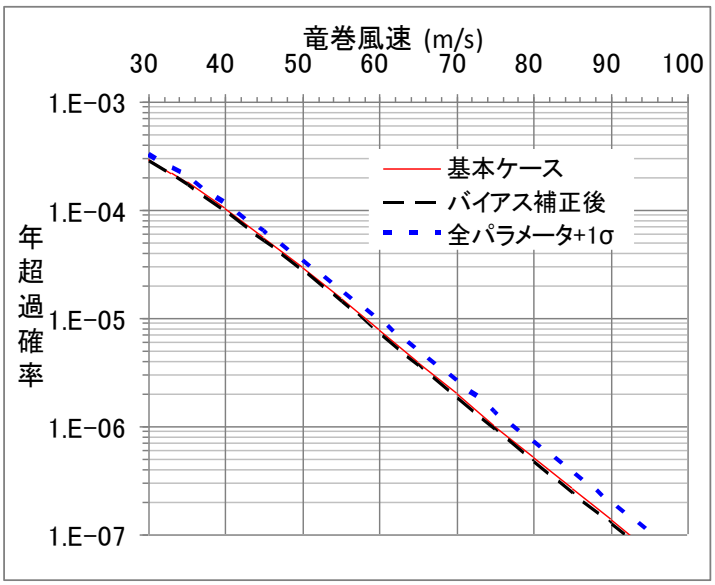
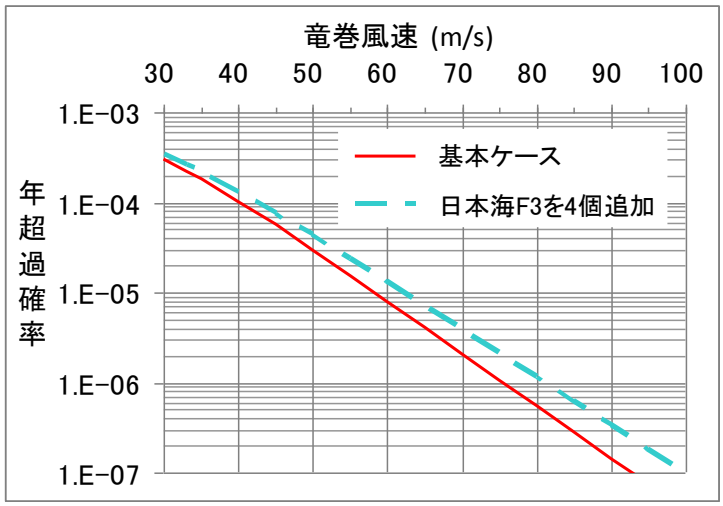


図7.1　竜巻最大風速のハザード曲線（海側，陸側5km範囲）



(a) バイアス補正後及び全パラメータ＋1σのハザード



(b) 竜巻風速の年超過確率分布

図7.2　ハザード不確実さ検討結果

【参考資料１】

海上のＦスケール不明竜巻の按分方法の妥当性について

51.5 年間の疑似データを推定する際に，海上で発生したＦスケール不明竜巻（非上陸竜巻）を，Ｆスケールが判明している陸上竜巻（含む上陸竜巻）のＦスケールごとの発生比率で按分している。そこでは，沿岸部近傍での竜巻の発生特性は陸上と海上とでは類似している，と仮定している。他の合理的な按分方法も無いのが実情ではあるが，観測結果をもとに，この仮定の妥当性について考察する。

ここでは，陸上で発生した竜巻（以後，陸上竜巻と呼ぶ）と，水上で発生しその後上陸した竜巻（以後，上陸竜巻と呼ぶ）を区別して考える。

表１及び図１は，陸上竜巻，上陸竜巻及び（陸上＋上陸）竜巻のそれぞれの竜巻区分に対して，F0，F1，F2 以上の竜巻が占める割合である。全国の上陸竜巻の場合，Ｆスケールごとの割合はそれぞれ 30，45，24％となっており，陸上竜巻との間に大きな差は無い（数％以内）。上陸竜巻は海上で発生した竜巻であることから，海上での Ｆスケール不明竜巻のＦスケールごとの発生割合は，上陸竜巻の発生割合と同様だと考えられる。

上陸竜巻と陸上竜巻の発生割合に大きな差は見られないことは，海側と陸側のＦスケールごとの発生割合が類似していることを示唆している。従って，海上でのＦ不明竜巻を，陸上竜巻（あるいは（陸上＋上陸）竜巻）の発生割合で按分する手法は妥当な方法だと考えられる。

一方，日本海側の上陸竜巻の場合，Ｆ スケールごとの割合はそれぞれ 50，34，16%であり，陸上竜巻の値と 10～20%程度異なる。日本海側の場合，F0 の割合が全国の値に比べて大きく，逆にＦスケールの大きな竜巻の割合が同程度少なくなっており，地域的な特性が見られる。上陸竜巻と陸上竜巻の割合の差が，地域特性によるものかデータ数が少ないことによるものか判断できないが，（陸上＋上陸）竜巻の割合は，全国の値に比較的近くなる（F0 の数が多いという地域特性は残る）。したがって，（陸上＋上陸）竜巻の割合で按分する本手法は，データ数が少ない場合にも有効な手法だと考えられる。

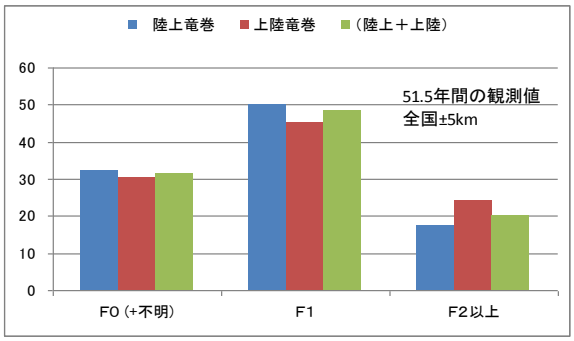
表１　Ｆスケールごとの竜巻発生数の割合

(a) 全国沿岸±5km

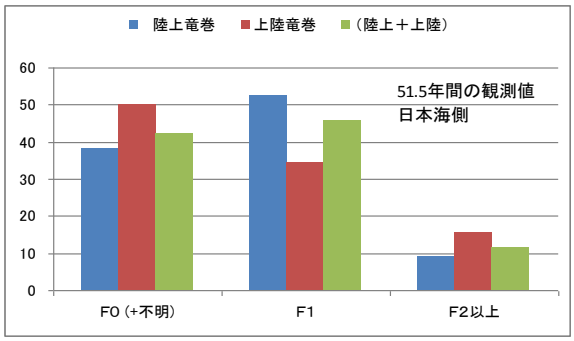
発生数の割合（%）	Ｆ０（+不明）	Ｆ１	Ｆ２以上
陸上竜巻	32	50	18
上陸竜巻	30	45	24
(陸上＋上陸)	32	48	20

(b) 日本海側

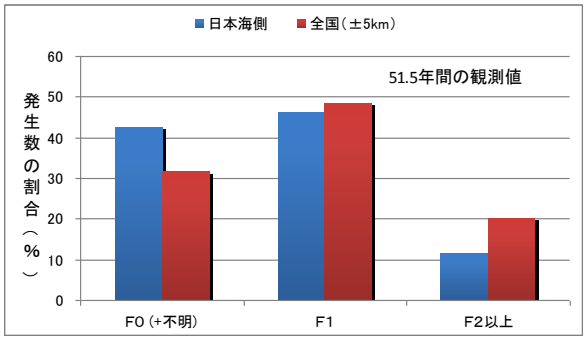
発生数の割合（%）	Ｆ０（+不明）	Ｆ１	Ｆ２以上
陸上竜巻	38	53	9
上陸竜巻	50	34	16
(陸上＋上陸)	43	46	11



(a)　全国±5km



(b) 日本海側



(c)　(陸上＋上陸) 竜巻

図１　Ｆスケールごとの発生数の割合

【参考資料 2】

竜巻発生数の確率分布（ポアソン，ポリヤ分布）がハザード結果に及ぼす影響

1. 竜巻発生確率とハザード曲線

Wen and Chu は，竜巻に遭遇し，かつ竜巻風速がある値以上となる確率の推定法を提案している。それによれば，竜巻の発生がポアソン過程に従うと仮定した場合，竜巻の年発生数の確率分布はポアソン分布若しくはポリヤ分布に適合する。

ポアソン分布：$P_T(N) = \dfrac{(\nu T)^N}{N!}\exp(-\nu T)$ (1)

ポリヤ分布：$P_T(N) = \dfrac{(\nu T)^N}{N!}(1+\beta\nu T)^{-(N+1/\beta)}\prod_{k=1}^{N-1}(1+\beta k)$ (2)

ここで，N は竜巻の年発生数，ν は竜巻の年平均発生数，T は年数である。

また，T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し，Vo 以上の竜巻風速に見舞われる確率 $P_{Vo,T}(D)$ は次式で表される。

ポアソン分布：$P_{Vo,T}(D) = 1-\exp[-\nu R(Vo)T]$ (3)

ポリヤ分布：$P_{Vo,T}(D) = 1-[1+\beta\nu R(Vo)T]^{-1/\beta}$ (4)

ここで，R(Vo)は，検討対象とする構造物が，ある一つの竜巻に遭遇し，竜巻風速が Vo 以上となる確率である。

2. ポアソン分布とポリヤ分布

ポアソン過程とは，ある現象がランダムに起こる場合に，今までの発生状況がそれ以降の発生に影響を与えず，かつ発生が時間的に一様に推移する現象を表す数学的モデルであり，以下のような仮定に基づいている。

① 事象は時間・空間のいかなる場所でもランダムに発生する
② 与えられた時間・空間の区間内で，事象の発生は他の任意の区間に対して独立である
③ 微小区間Δｔにおける事象発生確率はΔｔに比例する。Δｔの間に事象が 2 回以上発生する確率は無視できる

ポアソン分布に従う現象例としては，交通事故件数，大量生産の不良品数，火災件数，遺伝子の突然変異等数多くある。ポアソン分布の分散は平均値に等しいが，観測される現象の中には，その分散が平均値から外れている現象もある。

ポリヤ分布は，分散と平均値が異なるような現象への適合度が高く，β が大きい場合は分散の大きな分布形を表し，$\beta \rightarrow 0$ のときにはポアソン分布に近づく。Thom (1963) は，米国中部を対象とした竜巻発生数の分析を行い，ポアソン過程が実態と

乖離する場合があることを指摘するとともに，ポリヤ分布による適合性が高いことを示した。また，東京工芸大学委託成果では，陸上竜巻（含む上陸竜巻）及び水上竜巻のいずれに対しても，ポリヤ分布の適合度が高いことを示した。

ポリヤ分布は，疫病の流行，ある単語を含む文書数を数える文書頻度等の言語処理等に活用されており，ある事象が起こった場合に，それによって周囲にも現象が起こりやすくなる現象（弱い伝播性）が考慮されている。竜巻の場合では，前線や台風により竜巻が発生した場合，同時多発的に複数の竜巻が発生する（tornado outbreak と呼ばれる）状況が考えられる（Wen and Chu, 1973)。

3.　確率論から見た近似式

式(3)(4)に基づき，ポアソン分布とポリヤ分布に基づく竜巻ハザードを実際に計算すると，両者にほとんど違いが見られない。以下では，その理由について考察する。

ある一つの竜巻に遭遇し，竜巻風速が Vo 以上となるような被害を受ける確率を R(Vo) とすると，このような竜巻被害を受けない確率は次式で表される。

$$(\text{被害を受けない確率}) = 1 - R(V_0) \tag{5}$$

同様に，N 個の竜巻が発生したときに，いずれの竜巻に対しても被害を受けない確率は次式で表される（独立性を仮定)。

$$(\text{N個の竜巻で被害を受け ない確率}) = [1 - R(V_0)]^N \tag{6}$$

逆に，N 個の竜巻が発生したときに，いずれかの竜巻により被害（最低 1 回，最大 N 回）を受ける確率は次式となる。

$$(\text{N個のいずれかの竜巻で 被害を受ける確率}) = 1 - [1 - R(V_0)]^N \tag{7}$$

したがって，1 年間に N 個の竜巻が発生する確率を P(N)とすると，これによる被害確率は,

$$\left\{ 1 - [1 - R(V_0)]^N \right\} P(N) \tag{8}$$

となる。R(Vo)が十分小さければ，上式は次のように近似できる。

$$\left\{ 1 - [1 - R(V_0)]^N \right\} P(N) \approx R(V_0) \times N \times P(N) \tag{9}$$

ここで，次の近似を用いている。

$$[1 - R(V_0)]^N \approx 1 - N \times R(V_0) \tag{10}$$

竜巻被害の場合，R(Vo)は通常 10^{-3} 以下であるから，式(10)の近似は非常に良い精度で成り立つ。

以上のことから，式(9)より，1 年間にいずれかの竜巻により被害を受ける確率は次

式で近似できる。

$$P_{Vo}(D) \approx \sum_{N=1}^{\infty}[R(V_0)\times N\times P(N)] = R(V_0)\sum_{N=1}^{\infty}[N\times P(N)] = \nu\, R(V_0) \qquad (11)$$

即ち，被害確率は竜巻発生数の平均値 ν のみに依存し，標準偏差は勿論，確率分布にも無関係であり，ポリヤ分布とポアソン分布によるハザードの結果は一致することが理解できる。

4. ポアソン分布とポリヤ分布のハザードの近似式

3. では，確率論的な観点だけで近似式を誘導したが，ここでは式(3)(4)の近似式を直接求め，上記の結果を検証する。

式(8)のP(N)としてポアソン分布を仮定し，

$$\begin{aligned}&\left\{1-\left[1-R(V_0)\right]^N\right\}P(N) = P(N)-\left[1-R(V_0)\right]^N P(N)\\ &= P(N)-\left[1-R(V_0)\right]^N\frac{\nu^N}{N!}\exp(-\nu) = P(N)-\frac{(\nu-\nu R(V_0))^N}{N!}\exp(-\nu)\end{aligned} \qquad (12)$$

となることを考慮すると，式(11)の厳密な式は以下のとおりである。

$$\begin{aligned}&P_{Vo}(D) = \sum_{N=1}^{\infty}\left\{P(N)-\frac{(\nu-\nu R(V_0))^N}{N!}\exp(-\nu)\right\}\\ &= 1-\exp\left(\nu-\nu R(V_0)\right)\exp(-\nu)\\ &= 1-\exp(-\nu R(V_0))\end{aligned} \qquad (13)$$

即ち，ポアソン分布によるハザード評価の式(3)が導かれる。ここで，次の関係式を用いている。

$$\exp(x) = \sum_{n=0}^{\infty}\frac{x^n}{n!} \qquad (14)$$

したがって，式(3)（あるいは式(13)）は，式(14)を用いると，

$$P_{Vo}(D) = 1-\exp(-\nu R(V_0)) = 1-\left(1+\frac{(-\nu R(V_0))}{1!}+\frac{(-\nu R(V_0))^2}{2!}+\cdots\right) \qquad (15)$$

と表され，R(Vo)が小さい場合は，次式で近似できる。

$$P_{Vo}(D) \approx \nu R(V_0) \qquad (16)$$

ポリヤ分布の場合も同様に，一般の 2 項定理を用いると，次式で近似できる。

$$\begin{aligned}&P_{Vo}(D) = 1-\left[1+\beta\nu R(Vo)\right]^{-1/\beta} = 1-(1+\left(\frac{-1}{\beta}\right)\beta\nu R(Vo)+\cdots)\\ &\approx \nu R(V_0)\end{aligned} \qquad (17)$$

以上のことから，竜巻のように一つの竜巻に対する被害確率が非常に小さな現象に

対しては，年被害確率は竜巻発生数の平均値にのみ依存し，発生数の確率分布形状にはほとんど無関係であることが分かる。

【参考資料 3】

1km ごとの領域での竜巻ハザード曲線について

1.　保守性を考慮したハザード曲線の算定

竜巻発生確認数のばらつきやＦスケールの偏りがあることから，ハザード曲線に保守性を持たせるために，以下のような条件で算定を行った。計算に使用するパラメータは表 1.1 に示す。

・ 竜巻発生数は，竜巻検討地域外で発生して竜巻検討地域内に移動した竜巻である通過竜巻もカウント
・ 被害幅及び被害長さは，それぞれ1km範囲内の被害幅及び被害長さを用いる
・ 海側の竜巻発生位置は不明な場合が多く，竜巻移動経路が短冊を横切る長さを精度良く求められないため，海側0-1kmのセグメント長さの評価に陸側0-1km短冊の値を代用する方法を用いる

表 1.1　保守的なハザード曲線算定に用いるパラメータ

竜巻検討地域 (1km ごとエリア)	統計量	発生数 (個)	風速 (m/s)	幅 (m)	長さ (m)	相関係数 U ～ W	 U ～ L	 W ～ L
陸 0-1km	平均値	4.41	28.5	128	632	（検討地域±5kmの値を代用）		
	標準偏差	3.40	9.7	154	448			
陸 1-2km	平均値	1.90	29.4	197	766			
	標準偏差	2.17	8.6	173	434			
陸 2-3km	平均値	1.98	28.1	174	684			
	標準偏差	1.58	8.8	180	366			
陸 3-4km	平均値	1.09	30.6	213	861			
	標準偏差	0.79	8.6	216	310			
陸 4-5km	平均値	0.87	31.3	299	1029			
	標準偏差	0.99	9.0	247	132			
海 0-1km	平均値	8.99	28.0	100	632			
	標準偏差	4.93	9.3	120	448			

以上の条件で算定したハザード曲線を海側，陸側 5km 範囲内でのハザード曲線と併せて図 1.1 に示す。

図 1.1 より，年超過確率 10^{-5} に相当する風速が最も大きく評価されたのは，海側 0～1km 範囲での 58.4m/s であった。

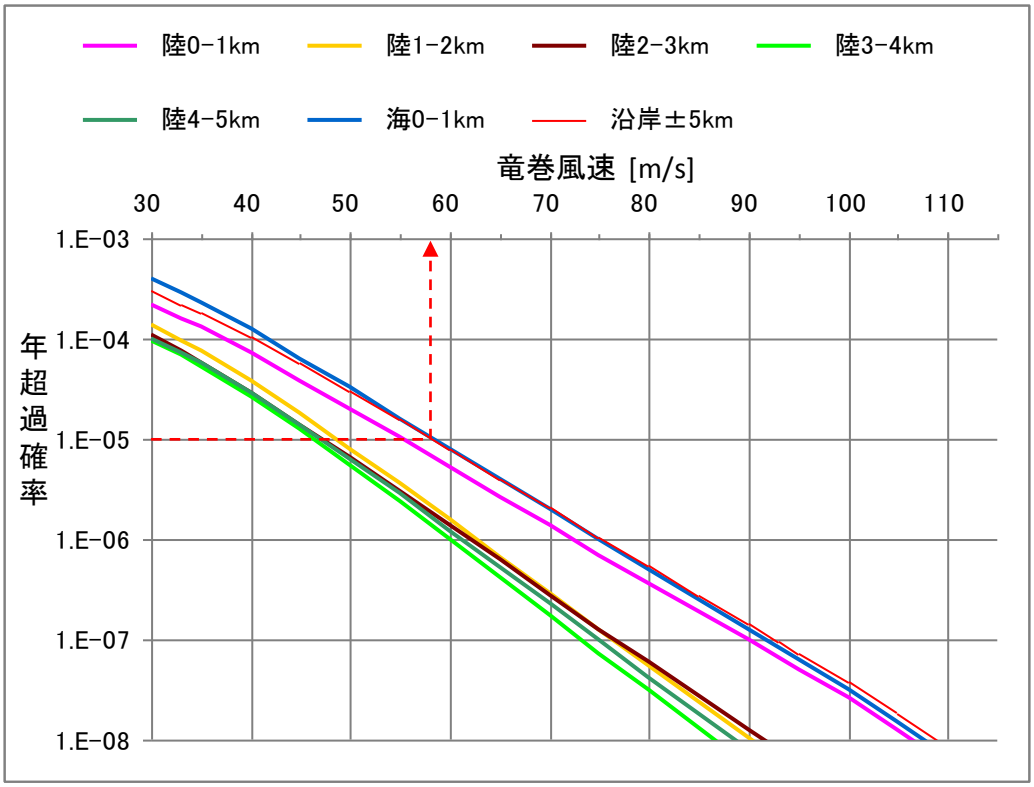


図 1.1　1km 範囲ごとのハザード曲線と±5km 範囲のハザード曲線

表1.2　年超過確率10^{-5}に対応した竜巻風速

短冊ケース	竜巻風速[m/s]
陸0-1km	55.2
陸1-2km	48.7
陸2-3km	47.2
陸3-4km	46.4
陸4-5km	47.1
海0-1km	58.4
（参考）海側及び陸側各±5km	58.3

参考に陸側 0～1km，1～2km，2～3km，3～4km，4～5km，海側 0～1km の竜巻発生・通過数を表 1.3～1.8 に示す。

表 1.3　陸側 0-1km 範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域（陸0-1km）	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不　明		総数
			F0	F1	F2	F3	（陸上）	（海上）	（含む不明）
1961～2012/6（51.5年間）	期間内総数	47	15	23	9	0	12	0	59
	平均値（年）	0.91	0.29	0.45	0.17	－	0.23	－	1.15
	標準偏差（年）	1.51	1.13	0.61	0.43	－	0.71	－	1.90
	CV（年）	1.65	3.89	1.37	2.47	－	3.03	－	1.66
1991～2012/6（21.5年間）	期間内総数	28	15	12	1	0	11	0	39
	平均値（年）	1.30	0.70	0.56	0.05	－	0.51	－	1.81
	標準偏差（年）	2.03	1.69	0.60	0.22	－	1.02	－	2.63
	CV（年）	1.56	2.43	1.08	4.64	－	2.00	－	1.45
2007～2012/6（5.5年間）	期間内総数	17	14	3	0	0	6	0	23
	平均値（年）	3.09	2.55	0.55	－	－	1.09	－	4.18
	標準偏差（年）	3.63	2.81	0.88	－	－	1.77	－	4.70
	CV（年）	1.17	1.11	1.62	－	－	1.62	－	1.12
疑似51.5年間（陸上竜巻）	期間内総数	227	132	29	9	0	57	0	227
	平均値（年）	4.37	2.55	0.56	0.17	－	1.09	－	4.37
	標準偏差（年）	3.40	2.81	0.60	0.43	－	1.77	－	3.40
	CV（年）	0.78	1.11	1.08	2.47	－	1.62	－	0.78
疑似51.5年間（全竜巻）	期間内総数	227	189	29	9	0	0	0	227
	平均値（年）	4.37	3.64	0.56	0.17	－	－	－	4.37
	標準偏差（年）	3.40	3.32	0.60	0.43	－	－	－	3.40
	CV（年）	0.78	0.91	1.08	2.47	－	－	－	0.78

表 1.4　陸側 1-2km 範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域（陸 1-2 km）	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不　明		総数
			F0	F1	F2	F3	（陸上）	（海上）	（含む不明）
1961～2012/6（51.5年間）	期間内総数	29	9	17	3	0	1	0	30
	平均値（年）	0.56	0.17	0.33	0.06	－	0.02	－	0.58
	標準偏差（年）	1.13	0.76	0.59	0.24	－	0.14	－	1.13
	CV（年）	2.01	4.37	1.78	4.06	－	7.18	－	1.94
1991～2012/6（21.5年間）	期間内総数	18	9	8	1	0	0	0	18
	平均値（年）	0.84	0.42	0.37	0.05	－	－	－	0.84
	標準偏差（年）	1.58	1.15	0.59	0.22	－	－	－	1.58
	CV（年）	1.89	2.76	1.58	4.64	－	－	－	1.89
2007～2012/6（5.5年間）	期間内総数	12	8	4	0	0	0	0	12
	平均値（年）	2.18	1.45	0.73	－	－	－	－	2.18
	標準偏差（年）	2.84	2.08	0.86	－	－	－	－	2.84
	CV（年）	1.30	1.43	1.19	－	－	－	－	1.30
疑似51.5年間（陸上竜巻）	期間内総数	98	75	20	3	0	0	0	98
	平均値（年）	1.88	1.45	0.37	0.06	－	－	－	1.88
	標準偏差（年）	2.17	2.08	0.59	0.24	－	－	－	2.17
	CV（年）	1.15	1.43	1.58	4.06	－	－	－	1.15
疑似51.5年間（全竜巻）	期間内総数	98	75	20	3	0	0	0	98
	平均値（年）	1.88	1.45	0.37	0.06	－	－	－	1.88
	標準偏差（年）	2.17	2.08	0.59	0.24	－	－	－	2.17
	CV（年）	1.15	1.43	1.58	4.06	－	－	－	1.15

表 1.5　陸側 2-3km 範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 （陸 2-3 km）	発生数 の統計	小計	竜巻スケール				不　明		総数
			F0	F1	F2	F3	（陸上）	（海上）	（含む不明）
1961～ 2012/6 （51.5年間）	期間内総数	25	10	13	2	0	0	0	25
	平均値（年）	0.49	0.19	0.25	0.04	－	－	－	0.49
	標準偏差（年）	1.00	0.66	0.56	0.20	－	－	－	1.00
	CV（年）	2.07	3.41	2.21	5.02	－	－	－	2.07
1991～ 2012/6 （21.5年間）	期間内総数	16	10	6	0	0	0	0	16
	平均値（年）	0.74	0.47	0.28	－	－	－	－	0.74
	標準偏差（年）	1.37	0.97	0.56	－	－	－	－	1.37
	CV（年）	1.84	2.09	2.00	－	－	－	－	1.84
2007～ 2012/6 （5.5年間）	期間内総数	12	9	3	0	0	0	0	12
	平均値（年）	2.18	1.64	0.55	－	－	－	－	2.18
	標準偏差（年）	2.22	1.46	0.88	－	－	－	－	2.22
	CV（年）	1.02	0.89	1.62	－	－	－	－	1.02
疑似 51.5年間 （陸上竜巻）	期間内総数	102	85	15	2	0	0	0	102
	平均値（年）	1.95	1.64	0.28	0.04	－	－	－	1.95
	標準偏差（年）	1.58	1.46	0.56	0.20	－	－	－	1.58
	CV（年）	0.81	0.89	2.00	5.02	－	－	－	0.81
疑似 51.5年間 （全竜巻）	期間内総数	102	85	15	2	0	0	0	102
	平均値（年）	1.95	1.64	0.28	0.04	－	－	－	1.95
	標準偏差（年）	1.58	1.46	0.56	0.20	－	－	－	1.58
	CV（年）	0.81	0.89	2.00	5.02	－	－	－	0.81

表 1.6　陸側 3-4km 範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 （陸 3-4 km）	発生数 の統計	小計	竜巻スケール				不　明		総数
			F0	F1	F2	F3	（陸上）	（海上）	（含む不明）
1961～ 2012/6 （51.5年間）	期間内総数	20	4	15	1	0	0	0	20
	平均値（年）	0.39	0.08	0.29	0.02	－	－	－	0.39
	標準偏差（年）	0.66	0.27	0.57	0.14	－	－	－	0.66
	CV（年）	1.71	3.48	1.97	7.18	－	－	－	1.71
1991～ 2012/6 （21.5年間）	期間内総数	11	4	7	0	0	0	0	11
	平均値（年）	0.51	0.19	0.33	－	－	－	－	0.51
	標準偏差（年）	0.75	0.40	0.57	－	－	－	－	0.75
	CV（年）	1.46	2.15	1.77	－	－	－	－	1.46
2007～ 2012/6 （5.5年間）	期間内総数	7	4	3	0	0	0	0	7
	平均値（年）	1.27	0.73	0.55	－	－	－	－	1.27
	標準偏差（年）	1.04	0.55	0.88	－	－	－	－	1.04
	CV（年）	0.82	0.75	1.62	－	－	－	－	0.82
疑似 51.5年間 （陸上竜巻）	期間内総数	56	38	17	1	0	0	0	56
	平均値（年）	1.07	0.73	0.33	0.02	－	－	－	1.07
	標準偏差（年）	0.79	0.55	0.57	0.14	－	－	－	0.79
	CV（年）	0.74	0.75	1.77	7.18	－	－	－	0.74
疑似 51.5年間 （全竜巻）	期間内総数	56	38	17	1	0	0	0	56
	平均値（年）	1.07	0.73	0.33	0.02	－	－	－	1.07
	標準偏差（年）	0.79	0.55	0.57	0.14	－	－	－	0.79
	CV（年）	0.74	0.75	1.77	7.18	－	－	－	0.74

表 1.7　陸側 4-5km 範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域（陸 4-5 km）	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不　明		総数
			F0	F1	F2	F3	（陸上）	（海上）	（含む不明）
1961～2012/6（51.5年間）	期間内総数	15	2	12	1	0	1	0	16
	平均値（年）	0.29	0.04	0.23	0.02	－	0.02	－	0.31
	標準偏差（年）	0.64	0.20	0.62	0.14	－	0.14	－	0.65
	CV（年）	2.20	5.02	2.65	7.18	－	7.18	－	2.08
1991～2012/6（21.5年間）	期間内総数	8	2	6	0	0	1	0	9
	平均値（年）	0.37	0.09	0.28	－	－	0.05	－	0.42
	標準偏差（年）	0.74	0.30	0.71	－	－	0.22	－	0.74
	CV（年）	1.98	3.20	2.55	－	－	4.64	－	1.78
2007～2012/6（5.5年間）	期間内総数	6	2	4	0	0	1	0	7
	平均値（年）	1.09	0.36	0.73	－	－	0.18	－	1.27
	標準偏差（年）	1.16	0.55	1.28	－	－	0.43	－	1.04
	CV（年）	1.06	1.50	1.76	－	－	2.37	－	0.82
疑似 51.5年間（陸上竜巻）	期間内総数	45	19	15	1	0	10	0	45
	平均値（年）	0.84	0.36	0.28	0.02	－	0.18	－	0.84
	標準偏差（年）	0.99	0.55	0.71	0.14	－	0.43	－	0.99
	CV（年）	1.18	1.50	2.55	7.18	－	2.37	－	1.18
疑似 51.5年間（全竜巻）	期間内総数	45	29	15	1	0	0	0	45
	平均値（年）	0.84	0.55	0.28	0.02	－	－	－	0.84
	標準偏差（年）	0.99	0.69	0.71	0.14	－	－	－	0.99
	CV（年）	1.18	1.27	2.55	7.18	－	－	－	1.18

表 1.8　海側 0-1km 範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域（海 0-1 km）	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不　明		総数
			F0	F1	F2	F3	（陸上）	（海上）	（含む不明）
1961～2012/6（51.5年間）	期間内総数	25	8	12	5	0	9	38	72
	平均値（年）	0.49	0.16	0.23	0.10	－	0.17	0.74	1.40
	標準偏差（年）	0.90	0.75	0.43	0.30	－	0.62	2.52	3.35
	CV（年）	1.86	4.86	1.83	3.08	－	3.55	3.41	2.40
1991～2012/6（21.5年間）	期間内総数	15	8	6	1	0	8	38	61
	平均値（年）	0.70	0.37	0.28	0.05	－	0.37	1.77	2.84
	標準偏差（年）	1.23	1.15	0.46	0.22	－	0.91	3.71	4.86
	CV（年）	1.76	3.09	1.65	4.64	－	2.45	2.10	1.71
2007～2012/6（5.5年間）	期間内総数	9	8	1	0	0	5	34	48
	平均値（年）	1.64	1.45	0.18	－	－	0.91	6.18	8.73
	標準偏差（年）	2.19	2.08	0.43	－	－	1.69	5.79	7.50
	CV（年）	1.34	1.43	2.37	－	－	1.86	0.94	0.86
疑似 51.5年間（陸上竜巻）	期間内総数	142	75	15	5	0	47	319	461
	平均値（年）	2.74	1.45	0.28	0.10	－	0.91	6.18	8.92
	標準偏差（年）	2.73	2.08	0.46	0.30	－	1.69	5.79	6.40
	CV（年）	1.00	1.43	1.65	3.08	－	1.86	0.94	0.72
疑似 51.5年間（全竜巻）	期間内総数	463	397	49	17	0	0	0	463
	平均値（年）	8.89	7.67	0.91	0.32	－	－	－	8.89
	標準偏差（年）	4.93	4.83	0.83	0.54	－	－	－	4.93
	CV（年）	0.55	0.63	0.92	1.71	－	－	－	0.55

2.　1km ごとの領域で竜巻ハザードを求める際の問題点

ガイドでは，以下のように述べられている。

- ✓ 海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km の範囲を目安に竜巻検討地域を設定する
- ✓ 上記の場合,少なくとも 1km 範囲ごとに竜巻の年発生数の確率分布を算定し，そのうちの V_{B2} が最も大きな値として設定される確率分布を設計で用いること
- ✓ 竜巻最大風速の確率密度分布の設定に当たっては，竜巻検討地域を 1km 範囲ごとに区切ってそれぞれの範囲の確率分布を算定し，そのうちの V_{B2} が最も大きな値として設定される確率分布を設定する等，配慮すること

また，2013 年 10 月出された JNES の『原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説』には，以下のような記述がある。

- ✓ 【発生数】データ数確保の観点から，それぞれの竜巻の発生地点と消滅地点の 2 点を直線で結び，直線が複数の細分化した地域に跨る場合は全ての細分化地域で竜巻が発生したとする。
- ✓ 【竜巻風速・幅・長さ・移動方向】確率分布は，データ数確保の観点から，竜巻検討地域全体で評価する。竜巻の発生地点と消滅地点が竜巻検討地域外であっても，その 2 点を結ぶ直線が竜巻検討地域を通過するあるいは接する場合は，竜巻検討地域に属するものとする。

このようなガイドや解説の考え方に基づき，竜巻検討地域（±5km 範囲）を通過する竜巻も発生数にカウントするだけではなく，1.では 1km ごとの短冊領域についても通過数を発生数にカウントして評価を行っている。

通過数を発生数と見なす方法や，1km ごとの短冊領域でハザードを求める考え方には問題点が多い。ここでは，以下の 3 つの視点からその問題点を考察する。

1. Wen and Chu モデルの理論的仮定との不整合
2. 発生数と通過数の関係
3. 竜巻データベースの質

2.1　Wen and Chu モデルの物理的な意味

Wen and Chu の確率論的なモデルでは，直径 D_0 の円形構造物に対して，1 つの竜巻の風速が V_0 以上となる面積 $DA(V_0)$ の期待値 $E[DA(V_0)]$ は以下で表される。

$$
\begin{aligned}
E[DA(V_0)] = & \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0)\, l\, f(V,w,l)\, dV\, dw\, dl \\
& + D_0 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty l\, f(V,l,\alpha)\, dV dl d\alpha + D_0 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0)\, f(V,w,\alpha)\, dV dw d\alpha \\
& + (D_0{}^2 \pi / 4) \int_{V_0}^\infty f(V) dV
\end{aligned}
\tag{1}
$$

ここで，V，w，l，α は，それぞれ竜巻の最大風速，幅，長さ及び移動方向である。また，f(x,y,z)は x,y,z の同時確率密度分布，$W(V_0)$は幅方向の補正率である。

式(1)において竜巻長さ L を 0～∞まで積分していることから分かるように,Wen and Chu のモデルでは，面的に一様な竜巻パラメータ（同時確率密度分布）を持つ無限に広い領域を想定している。ただし，出現確率が非常に低ければ寄与率は無視できるため，無限に広い領域あるいは無限大の長さの竜巻を考える必要はない。しかし，結果に影響を与える竜巻の長さの範囲内では場の均一性を確保しておく必要がある。 海岸線から 1km ごとの短冊に区切って竜巻パラメータを求めハザードを計算することは,そのパラメータ特性が陸側・海側の両方に広い範囲で続いていることを想定していることになる。

竜巻長さの評価は,風速とともに,ハザードの評価に最も大きな影響を与えるため,非常に狭い範囲で評価された竜巻パラメータを使用する事は問題が大きい。

2.2　発生数と通過数の関係

無限に広い領域を帯状に区切った図 2.1 のような領域を想定し，点 0 で発生した長さ L の竜巻の移動を考える。それぞれの方向（θ ＝0 度の方向（海岸線を想定）は帯状の領域に平行，θ =90 度の方向（図の上向き）に x 軸）へ移動する確率は一様であると仮定した場合，x 軸方向への移動距離 x/L について示した結果を図 2.2 に示す。竜巻長さが 1.6km 程度（沿岸±5km での竜巻長さ平均値（疑似データ））であれば，海岸線から 1km 以上離れた場所に到達する確率は 0.5 程度，0.5km 離れた場所に到達する確率は 0.8 程度もある。図 2.1 は竜巻移動方向が半円内で一様とした場合であるが，θ ＝90 度の方向に移動方向が集中していれば，通過確率は更に高くなる。また区間を短くすればするほど，移動距離の長い竜巻ほど，見かけの発生密度の増加は顕著になり，ハザードを必要以上に過大に評価することにつながる。

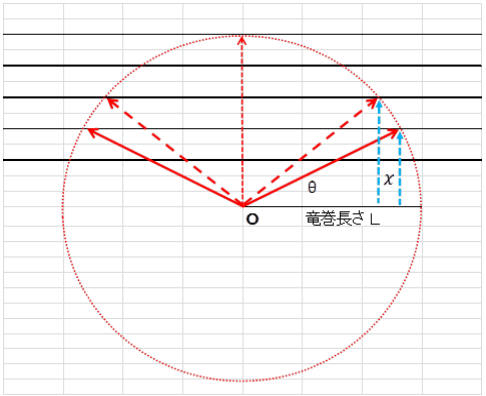


図 2.1 竜巻の発生と移動の概念図

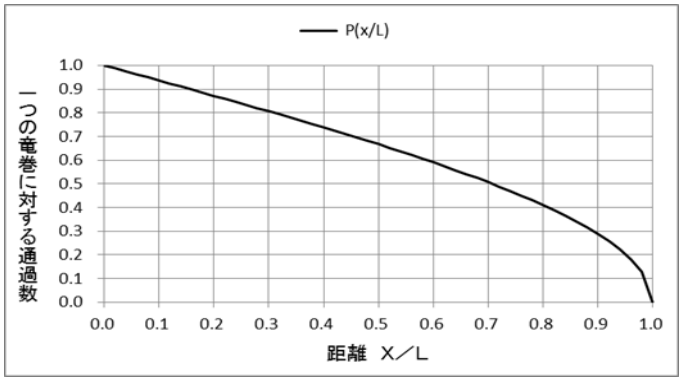


図 2.2　帯状領域での竜巻の通過数

2.3　竜巻データベースの質

上陸竜巻（水上で発生し，その後上陸した竜巻）の場合，その発生場所の緯度・経度は陸上を指す場合が多く，上陸地点若しくは被害の発生地点（陸上）がデータベースに記されているものと考えられる。即ち，上陸竜巻の多くは，本当の発生位置（海上）を特定することは難しい。このような竜巻に関しては，海岸から 1km 以内の海側[1]で発生したものとするとともに，上陸後の竜巻パラメータ（F スケール，被害長さ，被害幅）を解析に用いている。

一方，沿岸域を 1km ごとの短冊領域で評価する場合は，発生・消滅場所の緯度・経度情報から短冊内での発生数と通過数及び短冊内の竜巻長さ（セグメントの長さ）を解析することになる。上陸竜巻の緯度・経度情報は，多くの場合，海側を指していないため，陸側の F スケールや竜巻幅は分かっていても，海側のセグメントの長さを評価することができない。

一方，水上（上陸せず）の竜巻は，緯度・経度情報からセグメントの長さを求める

[1] 海岸線を通過した竜巻と位置づけるのが正しいが，沿岸部を発生位置としている。沿岸部での発生数が多い一因とも言える。

ことは可能であるが，逆にＦスケールや幅等のパラメータは不明である。さらに，目撃情報をもとにした発生・消滅位置の緯度経度から求めた竜巻長さと，陸上での実際の被害域から求めた竜巻長さとは質的に異なるデータである。

また，海上竜巻の緯度・経度情報の精度についても，陸上竜巻の場合，その誤差は±1 秒と非常に小さいが，海上竜巻の場合には±10～±30 秒程度のものが多く，竜巻によっては±1 分というものもある。一般に，沖合になればなるほど誤差範囲は大きくなり，沖合 5km では±2～±3 分の誤差範囲と記されたデータも少なくない。

2.4　発生数・同時確率密度分布・ハザードの関係

竜巻の(年平均)発生数ν，同時確率密度分布 f(x,y,z)，及び竜巻ハザード（1 年間にいずれかの竜巻により V0 以上の被害を受ける確率 $P_{V0}(D)$）の関係について整理する。竜巻のハザード $P_{V0}(D)$は，竜巻の年平均発生数νと次の関係にある。

$$P_{Vo}(D) \approx \nu\, R(V_0) = \nu \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \qquad (2)$$

即ち，竜巻の場合，ハザードは年平均発生数ν，$E[DA(V_0)]$に比例し，竜巻検討地域の面積 A_0に反比例する。

1km 幅の短冊では A_0が 1/10 になるため，($E[DA(V_0)]$は一定とすると）νが 1/10 近くにならない限りかなり大きなハザードを与える。

被害面積期待値 $E[DA(V_0)]$ は，竜巻風速，被害幅，被害長さ及び移動方向がそれぞれ無相関だと仮定すると，次式で近似できる。

$$E[DA(V_0)] \approx (1-F(v_0)) \times \left[\overline{w}\,\overline{l} + \mathrm{D}_0\,\overline{l} + \overline{w}\,\mathrm{D}_0 + (\pi\,\mathrm{D}_0{}^2/4)\right] \qquad (3)$$

即ち，被害面積期待値は，風速の超過確率（$1-F(V_0)$）に比例する。また，上式の第 1 項，第 2 項の寄与度が大きいので，平均被害長さ$\bar{l}$にもほぼ比例する。

1km 幅の短冊の場合，被害長さ 1 を全長で取ると，(式(2)も考慮すると）非常に大きなハザードとなる。

同時確率密度分布 f(x,y,z)は，竜巻パラメータが x,y,z となる一つの竜巻の出現確率を表している。したがって，N 個の竜巻があった場合，それらの竜巻のパラメータの出現割合（N 個に対する割合）のみが確率分布に反映され，個数 N は平均値νを通じてハザードに反映される（式(2)参照)。

日本の場合，沿岸部で竜巻の発生数（含む上陸数）は多いが，比率的にはＦスケールの小さなものが支配的である。一方，内陸部（例えば陸側 4～5km）では発生数は少ないが，相対的にＦスケールの大きな竜巻の比率が大きい。しかも，Ｆスケールの大きな竜巻は沿岸部から移動してくるため，通過竜巻も考慮したハザードは予想以上に厳しくなることがある。

2.5　まとめ

1km ごとの短冊でハザードを求めることは，Wen and Chu の数学的モデルが仮定している条件を満足していない。また，Wen and Chu のモデルは，一つの竜巻の出現確率（同時確率密度分布）に基づくものであり，竜巻パラメータに応じた通過数は必然的に満足されている。したがって，通過数を発生数と見なすことは，発生数を過剰に評価することになる。

短冊の区間を短く取れば取るほど，あるいは竜巻長さが長くなればなるほど，通過数を考慮した発生数の密度は高くなるという不合理性を有している。通過数は，定常な状態では一定値になることから，場の均一性を確認するために使用すべきであり，発生数と混同してはならない。

海上竜巻の緯度・経度情報をもとに，1km 刻みで海上竜巻を精度良く解析することは困難である。一方で，近年，海上竜巻が数多く観測・目撃されていることを考えると，その影響は考慮すべきと考える。観測精度やデータの質等を勘案すると，海域 5km 程度の範囲内での海上竜巻の発生数を考慮しつつ，海上竜巻の特性を陸上竜巻の特性で代用する手法は妥当なものであると考える。また，海岸線から±5km の範囲は，F2 クラスの竜巻長さの平均値及びばらつき（平均値 2.967km，標準偏差 3.205km）を考慮しても，Wen and Chu のモデルの適用範囲内にあると考える。

【参考資料 4】

短冊ケース海側 0-1km の評価方法について

1.　はじめに

海側の竜巻発生位置は不明な場合が多く，セグメント長さが精度良く求められないため，海側 0-1km のセグメント長さの評価に陸側 0-1km 短冊の値等を代用する方法を用いて評価した。

2.　海側 0-1km 短冊でのセグメント長さの設定

海側 0-1km のセグメント長さは，竜巻特性が最も類似している隣接する陸側 0-1km 短冊での値で代用するのが合理的であると考えられる（CASE 2-6B～6D）。

一方，図 2.1 の上陸竜巻の発生位置から推察されるように，陸側 0-1km 短冊のセグメント長さは過小評価されている可能性がある。そこで，発生位置が海側あるいは海岸線にない上陸竜巻については，その発生位置を海岸線にまで外挿し，陸側 0-1km のセグメント長さ（表 2.1 の右端の欄参照）を保守的に評価し（CASE 3-1），それを用いて海側 0-1km のハザードを評価した（CASE 3-2）。

上陸竜巻の場合，海側の発生位置は明確ではないが，全ての上陸竜巻が海側 0-1km 短冊を通過したとする極端な場合を想定し，移動経路を海側 1km まで外挿した場合のセグメント長さも参考のために求め，海側に発生位置がある上陸竜巻はその発生位置を真とし，陸側に発生位置がある場合のみ海側 1km を発生位置とした場合を，外挿混合と呼び，セグメント長さの比較を行った（表 3.1 の参考欄を参照）。

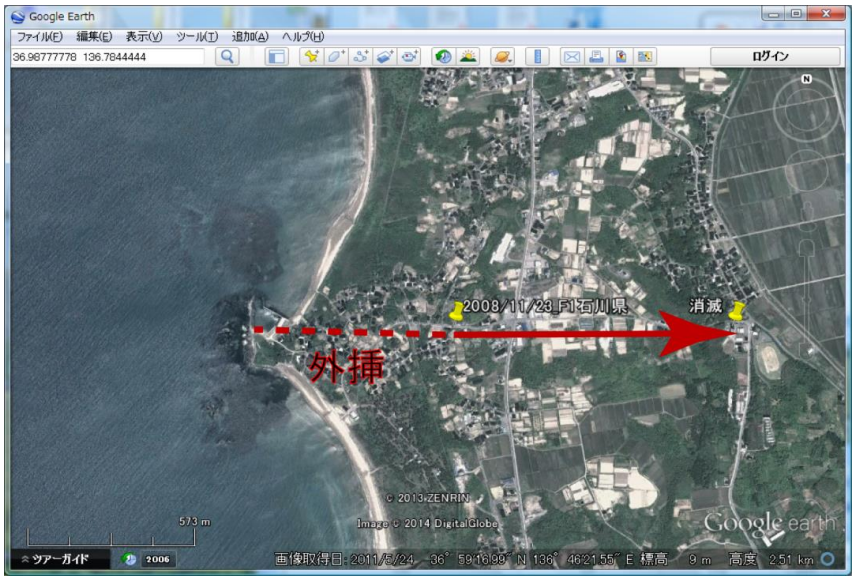


図 2.1　上陸竜巻のデータベース上の発生・消滅位置の一例(2008/11/23 の竜巻)

表 2.1　竜巻検討地域の竜巻データ一覧と 1km 短冊でのセグメント長さ

日本海	発生日時		発生場所		発生位置		F Scale	被害長 (km)	被害幅 (m)	竜巻区分	海側1km短冊のセグメント長さ (km)					陸側1km短冊のセグメント長さ (km)					上陸竜巻の外挿		
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度					4-5km	3-4km	2-3km	1-2km	0-1km	0-1km	1-2km	2-3km	3-4km	4-5km	海1まで	混合	陸0まで
1	19750531	18:10	島根県	簸川郡大社町	35.433	132.628	2	1.8	50	OL						0.842					1.139	1.139	0.906
2	19890316	19:20	島根県	簸川郡大社町	35.4	132.667	2	-999	-999	OL					-999						-999	-999	
3	19900406	2:55	石川県	羽咋郡富来町	37.203	136.682	2	10	900	OL					0	1.023	1.053	1.259	1.129	0.807	1.301	0	1.023
4	19741003	19:05	北海道	奥尻郡奥尻町	42.189	139.517	1.5	-999	-999	OL					-999						-999	-999	
5	19991125	15:40	秋田県	八森町	40.347	140.027	1.5	1	100	OL						0.896	0.123				1.024	1.024	1.000
6	19680108	9:50	新潟県	中頸城郡大潟	37.23	138.323	1	-999	-999	OL						1.151	1.164	1.161	1.173	1.173	1.182	1.182	1.201
7	19690622	9:00	山口県	阿武郡須佐町	34.625	131.603	1	6.5	200	OL						2.873	2.383				3.087	3.087	*5.095*
8	19721121	17:05	富山県	黒部市	36.891	137.416	1	-999	-999	OL					0						0	0	
9	19920917	9:05	北海道	増毛町	43.847	141.499	1	-999	20	OL					-999						-999	-999	
10	20010601	13:20	青森県	西津軽郡岩崎	40.535	139.946	1	0.8	150	OL						0.189					1.108	1.108	0.217
11	20040815	12:10	北海道	礼文郡礼文町	45.456	141.034	1	-999	-999	OL					0						0	0	
12	19730521	16:30	石川県	羽咋郡押水町	36.832	136.746	0.5	2	30	OL						1.084	0.978				1.088	1.088	1.090
13	19750531	18:10	島根県	簸川郡大社町	35.435	132.633	0.5	1.3	50	OL					0.361	0.133					1.539	0.361	0.133
14	19791031	13:00	石川県	羽咋郡富来町	37.139	136.684	0.5	-999	20	OL					0.243	3.1	1.123	0.081			1.881	0.243	3.1
15	20020923	14:30	富山県	下新川郡朝日	36.971	137.554	0.5	2	500	OL					0.945	1.028	1.021	0.14			1.021	0.945	1.028
16	20081123	10:20	石川県	羽咋郡志賀町	36.988	136.774	0.5	1	150	OL						0.528	0.437				1.224	1.224	1.139
17	20081015	13:48	新潟県	新潟市	37.86	138.916	0	2	70	OL						0.558	1.001	1.004	0.78		1.006	1.006	1.000
18	20081030	12:38	鳥取県	岩美郡岩美町	35.584	134.293	0	0.8	3	OL					0.018	0.802					1.268	0.018	0.802
19	20091030	7:26	青森県	西津軽郡深浦	40.505	139.999	0	0.1	30	OL					0						0	0	
20	20100917	10:55	新潟県	長岡市	37.634	138.76	0	2.5	150	OL					0.001	1.041	1.13	0.412			1.040	0.001	1.041
21	20101015	4:30	石川県	羽咋郡志賀町	37.168	136.676	0	0.1	30	OL						0.049					1.115	1.115	0.104
22	20101015	17:00	新潟県	胎内市	38.056	139.323	0	0.8	200	OL						0.819					1.123	1.123	0.889
23	20101017	12:40	秋田県	山本郡八峰町	40.381	139.995	0	0.5	100	OL						0.475					1.507	1.507	0.489
24	20101227	1:30	石川県	羽咋郡志賀町	37.018	136.744	0	0.7	80	OL						0.606					1.037	1.037	0.744
25	19780814	10:40	北海道	豊富町	45.083	141.633	-999	1.2	20	OL						0.962	0.135				1.126	1.126	1.092
26	19930926	15:52	北海道	留萌市	43.955	141.615	-999	0	0	OL				0.435	2.436	0.556					2.436	2.436	0.556
27	19960905	10:20	秋田県	由利郡金浦町	39.255	139.9	-999	0	0	OL					1.013						1.092	1.013	
28	20090823	18:37	山形県	鶴岡市	38.61	139.574	-999	-999	-999	OL					0						0	0	
29	20090823	18:51	山形県	鶴岡市	38.624	139.585	-999	-999	-999	OL					0						0	0	
30	20091004	12:50	秋田県	秋田市	39.665	140.074	-999	-999	-999	OL					0						0	0	
31	20091027	13:10	新潟県	糸魚川市	37.035	137.821	-999	-999	-999	OL					0						0	0	
32	20101026	7:10	北海道	石狩市	43.394	141.431	-999	0.1	20	OL					0.009	0.182					1.858	0.009	0.182

3. 竜巻パラメータの推定結果及び竜巻ハザードの推定結果

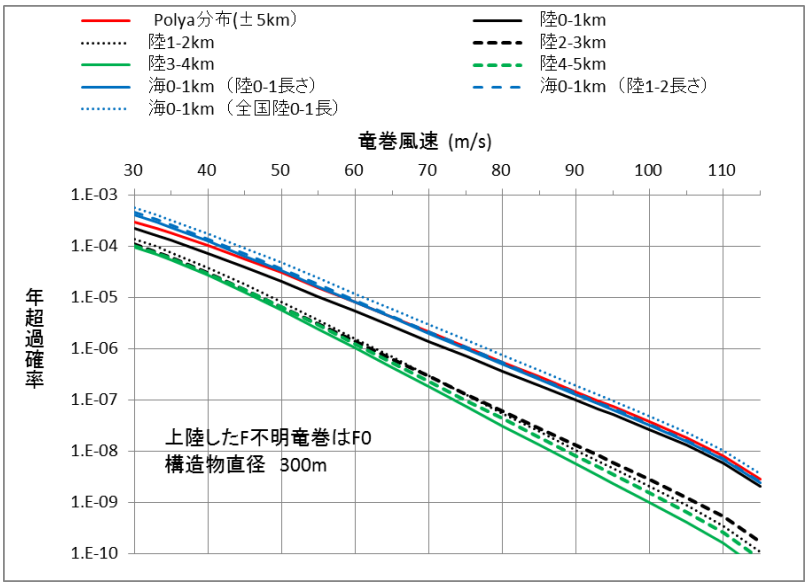
ハザードの計算条件を表 3.1 に示す。また，ハザードの推定結果を図 3.1 及び表 3.2 に示す。陸側 0-1km の長さで代用した場合（CASE 2-6B）は，ハザードの風速は 58.4m/s と±5km ケースとほぼ同じとなる。

海側 0-1km のハザードは，不確実性が最も大きな短冊であり，そのセグメント長さの取り方によって結果が 59～62m/s の範囲となるが，いずれにおいても V_B(=76m/s)を上回らない。

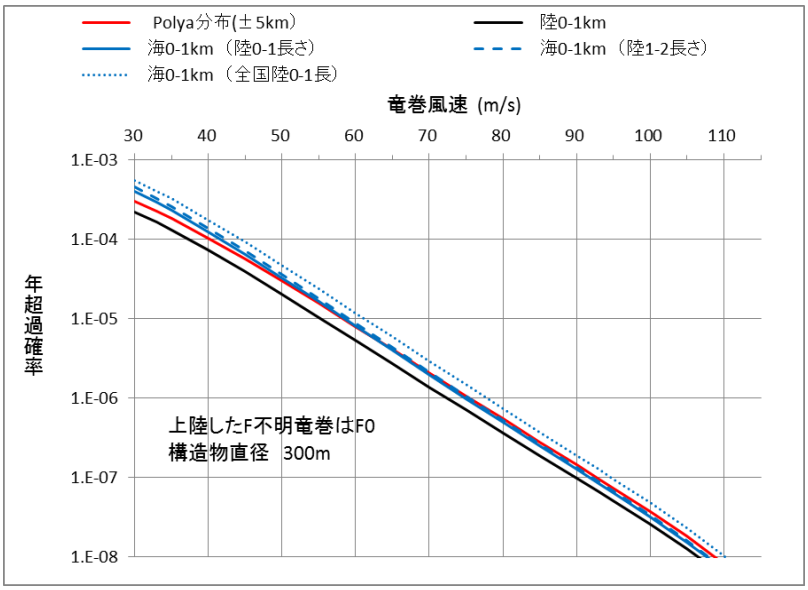
表 3.1　竜巻ハザードの計算条件

検討ケース	竜巻検討地域（日本海側±5km）	統計量	発生数（個）	風速（m/s）	幅（m）	長さ（m）	相関係数 U～W	相関係数 U～L	相関係数 W～L
CASE 1A-1	±5km （V一様分布）	平均値	23.05	**28.6**	121	1607	(0.05)	0.31	0.46
		標準偏差	8.97	**9.4**	131	2697			
CASE 2-1	陸 0-1km	平均値	4.41	**28.5**	128	632	同上（検討地域±5kmの値を代用）		
		標準偏差	3.40	**9.7**	154	448			
CASE 2-2	陸 1-2km	平均値	1.90	29.4	197	766			
		標準偏差	2.17	8.6	173	434			
CASE 2-3	陸 2-3km	平均値	1.98	**28.1**	174	684			
		標準偏差	1.58	**8.8**	180	366			
CASE 2-4	陸 3-4km	平均値	1.09	30.6	213	861			
		標準偏差	0.79	8.6	216	310			
CASE 2-5	陸 4-5km	平均値	0.87	31.3	299	1029			
		標準偏差	0.99	9.0	247	132			
CASE 2-6A	海 0-1km	平均値	8.99	**28.0**	100	65			
		標準偏差	4.93	**9.3**	120	183			
CASE 2-6B	海 0-1km（陸0-1km長さ）	平均値	8.99	**28.0**	100	632			
		標準偏差	4.93	**9.3**	120	448			
CASE 2-6C	海 0-1km（陸1-2km長さ）	平均値	8.99	**28.0**	100	766			
		標準偏差	4.93	**9.3**	120	434			
CASE 2-6D	海 0-1km（全国陸0-1km長さ）	平均値	8.99	**28.0**	100	896			
		標準偏差	4.93	**9.3**	120	810			
CASE 3-1	陸 0-1km（外挿）	平均値	4.41	**28.5**	128	703			
		標準偏差	3.40	**9.7**	154	582			
CASE 3-2	海 0-1km（陸0-1km外挿長さ）	平均値	8.99	**28.0**	100	703			
		標準偏差	4.93	**9.3**	120	582			
参考	海側 0-1km 外挿混合	平均値	8.99	**28.0**	100	874			
		標準偏差	4.93	**9.3**	120	574			

(注)風速のゴシックは，風速を F スケール内の一様分布で推定。その他は中央値。
(注)相関係数の赤字は負の相関を表す。負の相関の場合は，無相関（=0）とする。
　　1km 短冊の相関係数は，±5km 領域での値を代用。



(a) 短冊領域のハザード比較



(b) 海岸線付近のハザード比較

図 3.1 短冊領域におけるハザードの推定結果

表 3.2　超過確率に対応した竜巻風速

検討ケース	柏崎刈羽原子力発電所 【建物直径 300m】	超過確率(Polya)に対応する風速				
		1.E-04	1.E-05	1.E-06	1.E-07	1.E-08
CASE　1A-1	±5km （V一様分布）	40.3	58.3	75.4	92.7	108.7
CASE　1A-2	±5km （V　中央値）	38.8	53.6	67.1	80.4	93.9
CASE　2-1	陸側 0-1km	37.2	55.2	72.4	89.9	106.6
CASE　2-2	陸側 1-2km	32.7	48.7	62.6	76.4	90.3
CASE　2-3	陸側 2-3km	30.6	47.2	62.0	76.6	91.6
CASE　2-4	陸側 3-4km	---	46.4	60.1	73.3	86.5
CASE　2-5	陸側 4-5km	30.1	47.1	61.2	74.9	88.6
CASE　2-6A	海側 0-1km	32.1	49.7	65.8	82.0	98.6
CASE　2-6B	海 0-1km (陸0-1km長さ)	41.6	58.4	74.9	91.7	107.7
CASE　2-6C	海 0-1km (陸1-2km長さ)	42.4	59.0	75.4	92.1	108.0
CASE　2-6D	海 0-1km (全国陸0-1km長)	44.3	61.1	77.8	94.7	110.2
CASE　3-1	陸 0-1km (外挿)	38.1	56.0	73.2	90.6	107.2
CASE　3-2	海 0-1km (陸0-1km外挿)	42.6	59.5	76.0	92.9	108.7

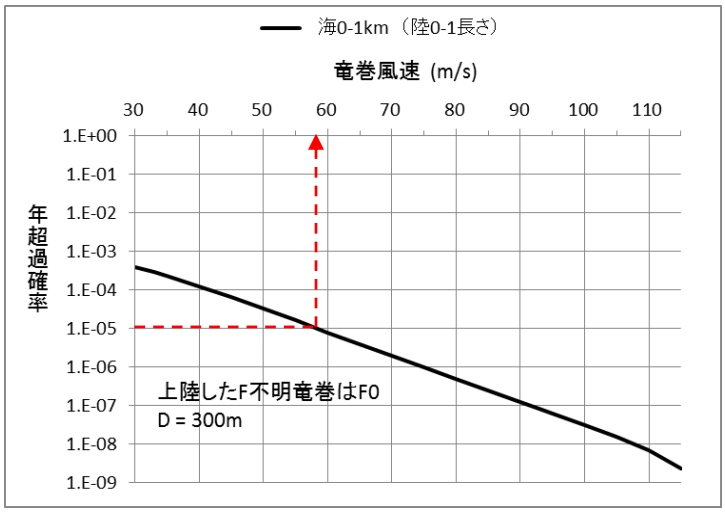


図 3.2　竜巻検討地域における海側 0-1km のハザード（CASE 2-6B）

【参考資料 5】

竜巻ハザードの推定幅（推定誤差）に関する考察

1.　はじめに

自然現象評価では，不確実さの存在を認識することが重要であるため，竜巻ハザードに関わる不確実さ要素について以下のとおり整理した。

① 確率分布形選択に伴う不確実さ（認識論的不確実さ）
　確率分布形選択に伴うパラメータ不確実さ
　⇒2.1 節で検討

② データ量が少ないことに伴う不確実さ（認識論的不確実さ）
　データ収集期間が 51.5 年間分であることから，地震等と比較するとデータ量が少ないことに伴うパラメータ不確実さ
　⇒2.1 節，2.2 節で検討

③ データの不確実さ（偶然的不確実さ）
　今後データ収集が進み，疑似データ同様のデータが収集されたとした場合でも残る，データそのものの不確実さ
　⇒2.1 節で検討

これらの不確実さ要素がハザード評価に及ぼす影響について検討する。

2.　不確実さ要素の影響検討

2.1　竜巻パラメータとハザードの推定誤差（①，②，③）

疑似データ 1187 個の竜巻データに対して，Jackknife 法を適用した。Jackknife 法は水文統計分野で広く使用される手法で，国土交通省が定める河川行政の技術分野に関する基準である「河川砂防技術基準」においても，確率分布モデルのバイアスを補正するとともに，その安定性を評価する手法として挙げられている。母集団分布を仮定しないノンパラメトリックな方法であり，高い適用性をもつ。

Jackknife 法は大きさ n 個の標本のうち i 番目の 1 データのみを欠いたデータ数 n-1 個の標本を全ての i について作成し（n セット作成することになる），これらの標本から求めた統計量をもとに不偏推定値及びそのまわりの推定誤差を算定する手法である。（具体的な計算方法は後述）

n 個の全データを使って求められた再現期待値（例えば風速平均値の場合，n セットの風速平均の平均）を P_0 とすると，バイアス補正した推定値（以下，Jackknife 推定値という）P^* とその標準偏差の推定値（以下，Jackknife 推定幅という）ΔP^* は次式で与えられる。

$$P^* = P_0 + \underline{(n-1)(P_0 - \overline{P})} \qquad (1)$$

$$\Delta P^* = \sqrt{n-1}\,\Delta P \qquad (2)$$

ここで，$\overline{P}$は分布を仮定した場合の推定値（以下，単に推定値という），ΔPはnセットの風速平均データの標準偏差，式(1)の下線部がバイアスと呼ばれ，母数の真の値と推定値の差である。

本検討で得られた結果を表1に示す。

例えば風速の平均値の場合，Jackknife推定値は28.622m/sであり，対数正規分布を仮定した場合の推定値 28.591m/s とほぼ同じである。また，Jackknife 推定幅は0.236m/sと推定される[1]。

これらの平均値と標準偏差，及びそれぞれの推定幅をもとに，全てのパラメータを＋1σとした場合のハザードを計算した。計算条件の一覧を表 2 に示す。また，ハザードの推定結果を図1，図2，及び表3に示す。

図 1 よりデータの変動に伴うバイアス誤差は小さいことが確認できる。(①，②の不確実さ推定)

ハザードについては表 3 より，サンプリング誤差に伴う不確実さについて信頼度84%をカバーする値として，年超過確率 10^{-5} において 59.72m/s であると言える。(③の不確実さを考慮)

表1　Jackknife法により得られた竜巻パラメータの特性

日本海 疑似データ1187個	風速(U)		幅(W)		長さ(L)		相関係数		
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	U～W	U～L	W～L
平均	28.591	9.391	123.0	130.3	1607.1	2697.4	0.0210	0.2892	0.4928
標準偏差	0.007	0.008	0.1	0.2	2.3	5.5	0.0009	0.0008	0.0007
全データ	28.591	9.391	123.0	130.3	1607.1	2697.4	0.0210	0.2892	0.4928
バイアス	−0.031	−0.042	0.2	0.0	−0.5	−6.3	0.0404	0.0332	0.0200
Jackknife 推定値	28.622	9.433	122.8	130.3	1607.6	2703.7	−0.0194	0.2560	0.4728
Jackknife 推定幅	0.236	0.270	3.8	6.7	78.3	188.3	0.0321	0.0284	0.0235

表2　ハザードの計算条件

ケース名	統計量	発生数	風速(U)	幅(W)	長さ(L)	U～W	U～L	W～L
基本(全データ)	平均	23.049	28.591	122.977	1607.077	0.0210	0.2892	0.4928
	標準偏差	8.972	9.391	130.320	2697.369			
バイアス補正後	平均	23.049	28.622	122.807	1607.573	−0.0194	0.2560	0.4728
	標準偏差	8.972	9.433	130.350	2703.693			
風速・幅・長さ・相関 （＋1σ）	平均	23.049	28.858	126.591	1685.861	0.0128	0.2844	0.4964
	標準偏差	8.972	9.703	137.088	2891.977			

注）発生数の平均と標準偏差は，疑似データの値を使用。
注）負の相関係数は0と置く。

[1] 疑似データの場合，Fスケールの小さな竜巻の割合が多く，幅や長さの変動が小さくなる。

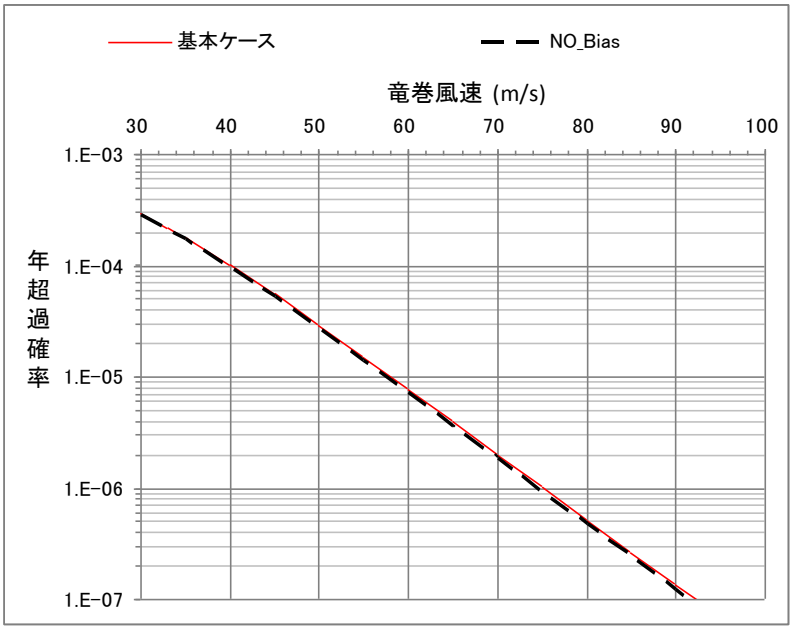


図１　基本ケースとバイアス補正後ケースのハザード算定結果比較

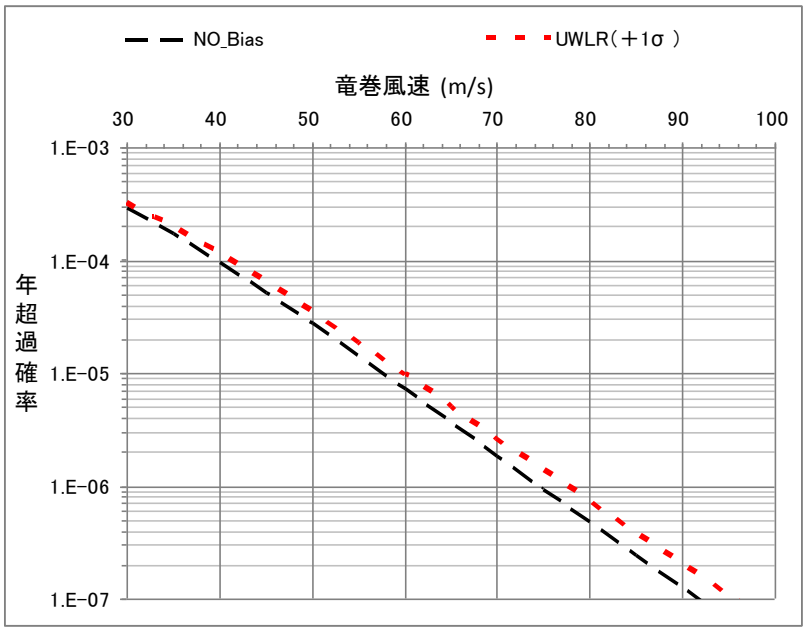


図２　バイアス補正後ケースと全パラメータ＋1σケースのハザード算定結果比較

表３　ハザード推定結果

ケース名	超過確率に対応する竜巻風速				バイアス補正後の竜巻風速との差			
	1.E-04	1.E-05	1.E-06	1.E-07	1.E-04	1.E-05	1.E-06	1.E-07
基本(全データ)	40.15	58.02	75.06	92.25	0.47	0.56	0.61	0.64
バイアス補正後	39.68	57.46	74.45	91.61	－	－	－	－
風速・幅・長さ・相関(＋1σ)	41.16	59.72	77.56	95.49	1.48	2.26	3.11	3.88

＜疑似データ無しの場合の解析＞

疑似データの場合，F スケールの小さな竜巻の割合が多く，幅や長さの変動が小さくなる傾向がある。そのため，3 種類の竜巻パラメータがすべて判明している 52 個の竜巻観測データのみを用いて同様の検討を実施した。即ち，観測データは均質なデータから成り，疑似データは存在しない。パラメータの推定結果を表 4，計算条件の一覧を表 5，ハザードの推定結果を図 3，図 4，及び表 6 に示す。疑似データの場合と比較して，Jackknife 推定幅は大きくなっていることがわかる。したがってハザードの推定幅についても大きくなる傾向があるものの，発生数の違い[2]を考慮し年超過確率 10^{-6} の最大風速を見ても，幅は 10m/s 程度であることが確認できる。

表 4　Jackknife 法により得られた竜巻パラメータの特性（疑似データ無し）

日本海 生データ52個	風速		幅		長さ		相関係数		
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	U～W	U～L	W～L
平均	36.337	11.655	129.8	154.8	1815.4	2227.7	0.0023	0.3210	0.4399
標準偏差	0.226	0.143	3.0	6.5	43.3	59.7	0.0090	0.0168	0.0171
全データ	36.337	11.656	129.8	154.9	1815.4	2228.5	0.0000	0.3210	0.4399
バイアス	0.002	−0.045	0.0	−7.0	0.0	−40.7	0.1154	−0.0022	0.0006
Jackknife 推定値	36.335	11.700	129.8	162.0	1815.4	2269.3	−0.1154	0.3232	0.4393
Jackknife 推定幅	1.616	1.021	21.5	46.7	309.0	426.1	0.0645	0.1198	0.1221

表 5　ハザードの計算条件（疑似データ無し）

ケース名	統計量	発生数	風速	幅	長さ	U～W	U～L	W～L
基本(全データ)	平均	1.010	36.3365	129.769	1815.385	0.0023	0.3210	0.4399
	標準偏差		11.6550	154.791	2227.749			
バイアス補正後	平均	1.010	36.3346	129.759	1815.400	−0.1154	0.3232	0.4393
	標準偏差		11.7004	161.961	2269.288			
風速・幅・長さ・相関 （＋1σ）	平均	1.010	37.9509	151.243	2124.444	−0.0510	0.4429	0.5614
	標準偏差		12.7212	208.638	2695.378			

[2] 発生数が少なくなるため，最大風速の年超過確率自体は小さくなる。

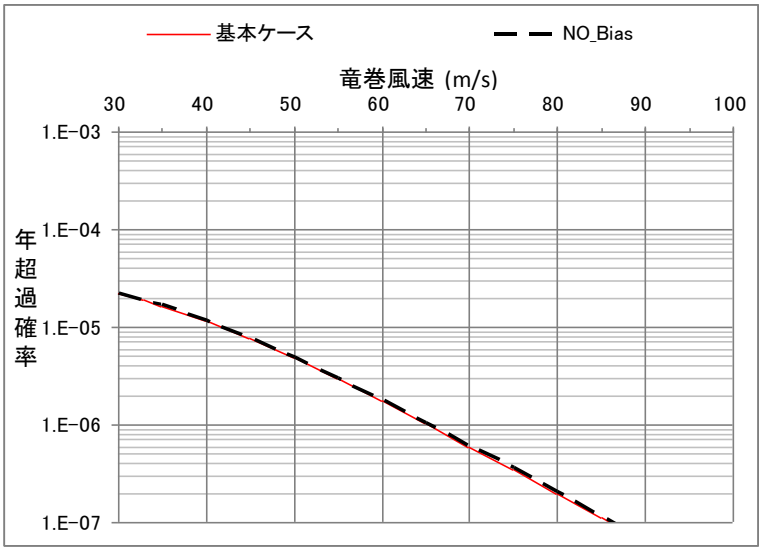


図 3　基本ケースとバイアス補正後ケースのハザード算定結果比較
（疑似データ無し）

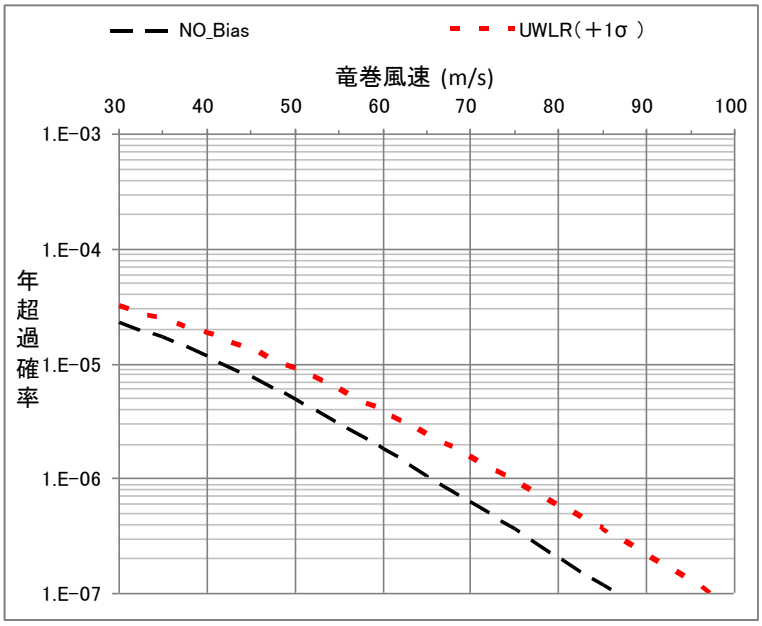


図 4　バイアス補正後ケースと全パラメータ＋1σケースのハザード算定結果比較
（疑似データ無し）

表 6　ハザード推定結果（疑似データ無し）

ケース名	超過確率に対応する竜巻風速			バイアス補正後の竜巻風速との差		
	1.E-05	1.E-06	1.E-07	1.E-05	1.E-06	1.E-07
基本（全データ）	41.77	65.26	85.98	-0.11	-0.25	-0.39
バイアス補正後	41.88	65.51	86.37	-	-	-
風速・幅・長さ・相関□（＋1σ）	48.42	74.45	97.32	6.54	8.94	10.95

2.2　日本海側での F3 竜巻がハザードに与える影響（②）

日本海側では F3 竜巻の観測事例は無いが，F3 竜巻が 1 つあったと仮定した場合（明日，F3 竜巻が発生した場合，あるいは F3 竜巻が 1 つ見逃されていた場合を考慮）のハザードへの影響を検討した。

データに，1999 年 9 月 24 日に豊橋で観測された F3 竜巻（長さ 18km，幅 550m）を一つ加えて疑似データを作成した[3]。日本海に多く見られる海上不明竜巻を陸上竜巻の F スケール比率で按分する影響で，F3 竜巻は疑似データ上 4 個となった。これをもとにハザードを推定したところ，年超過確率 10^{-5} に相当する風速は，62.2m/s に増加した。

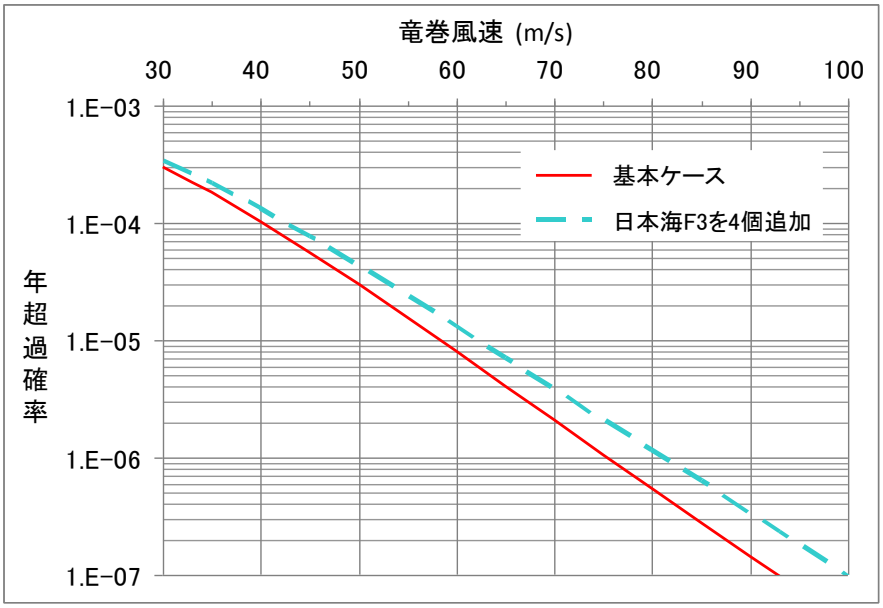


図 5　F3 竜巻発生を仮定した場合の竜巻風速の年超過確率分布

[3] 太平洋側沿岸±5km において，F3 竜巻は豊橋の事例のみであり，その他の F3 竜巻は F2～F3 を F3 として扱っている。また，竜巻長さも 18km と長く，かなり厳しい竜巻を対象としている。

3.　まとめ

不確実さ要素のハザード算定への影響について以下のような結果が得られた。

① 確率分布形選択に伴う不確実さ（認識論的不確実さ）

⇒バイアス補正を実施してもハザードは年超過確率 10^{-5} において 1m/s 以下の変化であったことから，影響は限定的である。

② データ量が少ないことに伴う不確実さ（認識論的不確実さ）

⇒①同様，バイアス補正を実施してもハザードは年超過確率 10^{-5} において 1m/s 以下の変化であったことから，安定した標本となっており，母集団の確率特性をよく表現できていると考えられる。また仮に，データに F3 竜巻を 4 個追加した場合も，年超過確率 10^{-5} において竜巻風速は 62.2m/s となった。

③ データ（疑似データ）の不確実さ（偶然的不確実さ）

⇒データの不確実さを考慮したハザード評価により，サンプリング誤差の不確実さについて信頼度 84%をカバーする値として，年超過確率 10^{-5} において 59.72m/s であると言える。

以上より，V_B=76m/s は高い信頼度を持った数値と推測されることから，合理的に望ましい対策を検討するために使用可能な数値と判断できる。

Jackknife 法の具体的な手順

大きさ n の標本の各データを $X_1, X_2, \cdots, X_n$ とする。これを用いて求める母集団の特性を推定する統計量（竜巻ハザードの場合，各パラメータの平均及び分散）を

$$\hat{\psi} = \psi(X_1, X_2, \cdots, X_n)$$

とする。大きさ n 個の標本のうち i 番目の 1 データのみを欠いたデータ数 n-1 個の標本を用いた統計量を

$$\hat{\psi}_{(i)} = \psi(X_1, X_2, \cdots, X_{i-1}, X_{i+1}, \cdots, X_n)$$

とする。$\hat{\psi}_{(i)}$ の平均値を

$$\hat{\psi}_{(\bullet)} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\hat{\psi}_{(i)} \qquad (3)$$

により求める。バイアス値は次式で与えられる。

$$\hat{B}IAS = (n-1)(\hat{\psi}_{(\bullet)} - \hat{\psi}) \qquad (4)$$

これを用いて統計量のバイアスを補正した Jackknife 推定値は次式で与えられる。

$$\tilde{\psi} = \hat{\psi} - \hat{B}IAS = n\hat{\psi} - (n-1)\hat{\psi}_{(\bullet)}$$

また，Jackknife 法による推定幅は，

$$\hat{V}^2 = \frac{n-1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\hat{\psi}_{(i)} - \hat{\psi}_{(\bullet)}\right)^2 \qquad (5)$$

で求められる。

地形効果による竜巻風速への影響について

1. はじめに

ガイドにおいて，丘陵等による地形効果によって竜巻が増幅する可能性があると考えられることから，原子力発電所が立地する地域において，設計対象施設の周辺地形等によって竜巻が増幅される可能性について検討を行い，その検討結果に基づいて設計竜巻の最大風速(V_D)を設定することが求められている。

ここでは，既往の研究に基づく地形起伏の竜巻の風速への影響に関する知見を取りまとめる。

2. 対象とする地形起伏スケールの整理

竜巻に対する地形の効果は，スーパセルスケールへの関与によるメソスケールでの「発生」等への影響と，渦の旋回流への関与によるマイクロスケールでの「風速」等への影響とに大別される。

前者への言及として，例えば，Markowsk and Dotezk(2011)による数値気象モデル（CM1）を用いた検討等がある。ここでは，メソスケールの地形（尾根幅数十km程度）が，CAPE や SRH といった，竜巻の発生要因を支配するパラメータに与える影響が論点となる。加藤らによる佐呂間竜巻への分析もこれに相当すると考えられる。

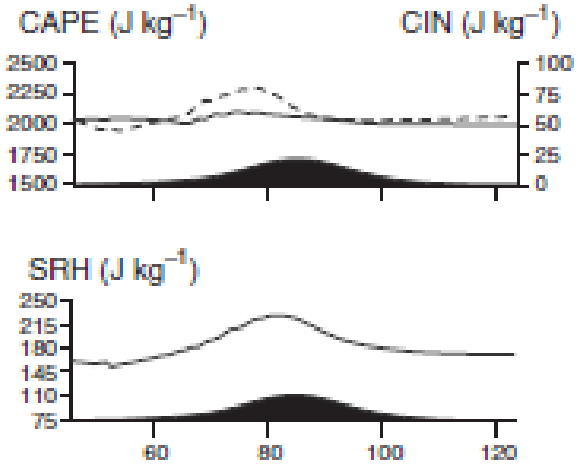


図 1 メソスケール尾根地形に起因する CAPE，SRH 等のパラメータの変化を調べた例

一方，竜巻風速 V_D に対する地形影響には，後者が相当する。ここでは，タッチダウンした漏斗雲により発生する旋回流及びそれに随伴して生じる強風への地形影響が論点となる。ここで考慮すべき地形の規模としては，前述のメソスケールのものと比べて小さく数百 m 規模と考えられる（Karstens 2012，Lewellen 2012)。

3. マイクロスケールの地形の起伏が竜巻の旋回流強度及び強風に与える影響

マイクロスケールの地形の起伏が竜巻の旋回流及び強風に与える影響の定量的評価は，いまだ，研究課題である（Karstens 2012）。しかしながら，定性的な知見を与える関連研究は存在する。そこで用いられている主な手法は，①被害状況調査，②風洞実験，③数値シミュレーションとなる。

①被害状況調査（Forbes 1998，Karstens 2012）では，実際の竜巻の被害を精査し，被害状況と地形特性との関係を調べる。これにより，被害が発生しやすい地形特性を分析し，そこから旋回流強度及び風速の強弱を類推することになる。

②風洞実験（Karstens 2012）では，風洞実験の測定部に尾根や斜面といった地形模型を入れ，その上部に竜巻発生装置を設置し，それを移動させたときの，地表面近傍の圧力・風速分布を調べる。

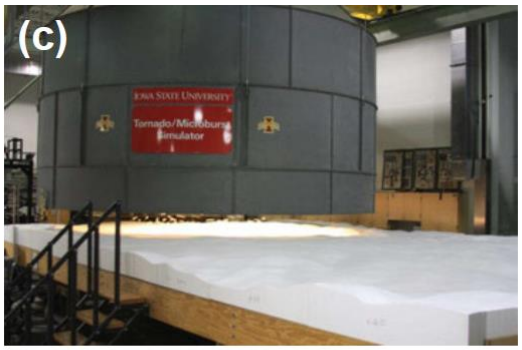


図 2　風洞実験の様子（Karstens 2012）

③数値シミュレーション（Lewellen 2012）では，竜巻の旋回流や移動及び地形の起伏を模擬した流体解析コードによる，数値実験を行い，旋回流の強度や風速及び竜巻の構造に関連する圧力分布を調べる。

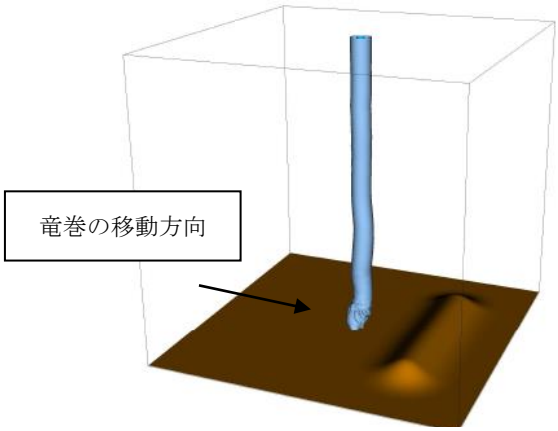


図 3 数値シミュレーションのセットアップ

これらを通じて，マイクロスケールの地形の起伏に起因する竜巻の旋回流や風速の強化に対する知見が得られている。被害状況調査により，竜巻の強化が下り斜面や尾根の裾で生じる可能性が示唆されている（Forbes 1998，Karstens 2012）。また，実被害調査の知見を支持する結果が風洞実験・数値シミュレーションにおいても確認されている。2 次元尾根地形を対象とした場合の風洞実験（Karstens 2012）及び数値シミュレーション（Lewellen2012）の結果をそれぞれ，図 4，図 5 に示す。風洞実験の結果である図 4 において，(a)に示す二次元尾根地形を図中左側から右側に竜巻を模擬した旋回流が移動するときに地表面で測定された圧力の最大値が(b)になる。ここで実験仕様の制約上，風速のデータは取得されておらず，風速に相当するものとして，圧力勾配（圧力の高いことろから低いところに流れる風の駆動力になり，風速に相当する）を(c)に示している。(c)の結果から，

① 圧力勾配（図 4(c)）が斜面において，正・負の値を持つこと（=旋回流が強弱する）

②斜面に比べ尾根の上・下流の平たん部ではほぼフラットとなること（=旋回流の強度が変化しない）

を理解できる。

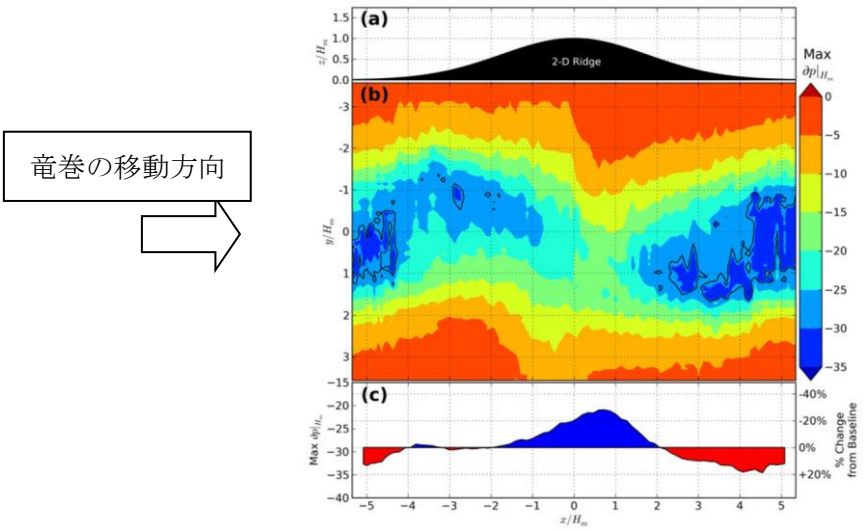


図 4 尾根地形を竜巻が通過するときの地表面圧力及び圧力勾配（風速に相当）

数値シミュレーション結果である図 5 において，ピーク圧力が(a)，風速が(b)になる。シミュレーションは風速の取り扱いを可能としており，図 5 の(b)のような結果の議論を可能としている。図中の黒色実線が等高線を意味し，竜巻は，図 4 と同じく図中左側から右側へと移動している。この結果も，下記のとおり図 4 の知見と整合している。

・上り斜面では圧力が増加し（緑色→赤色），下り斜面では圧力が減少（赤色→緑色）する（実験で得られた知見①を支持）

・ピーク圧力の高い領域は尾根頂部に限定され，平たん部の圧力は上流側と下流側とで同レベルとなる。（実験で得られた知見②を支持）

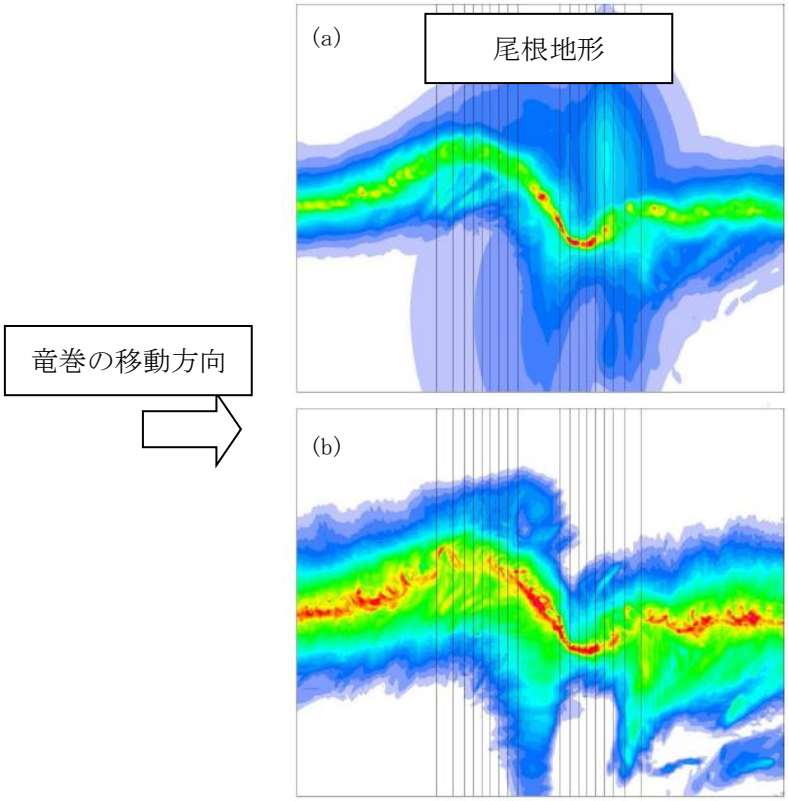


図 5 尾根地形を竜巻が通過するときの地表面ピーク圧力及び風速

ここで地形の規模として尾根高さ Hm に対して±5Hm を考慮していることにも留意を願いたい。これは，尾根高さが 100m の場合，±500m にわたる地形を対象としていることを意味する。

また，これらの研究が，地形の起伏の影響範囲が，斜面及び尾根・山の頂・裾部に限定されることを示唆していることを強調したい。図 4，5 にみられるとおり，地形の下流側の平たん部における風速や圧力の値は，地形を乗り越える前の上流部の値に相当する。

4. 柏崎刈羽原子力発電所周辺での地形起伏の効果

竜巻集中地域と竜巻検討地域で発生した竜巻の移動経路の発生頻度を図 6 に示す。北東から東南東に向かう竜巻が顕著であることを確認できる。すなわち，地形影響を議論する際には，特に，柏崎刈羽原子力発電所より西側に注視すればよいといえる。

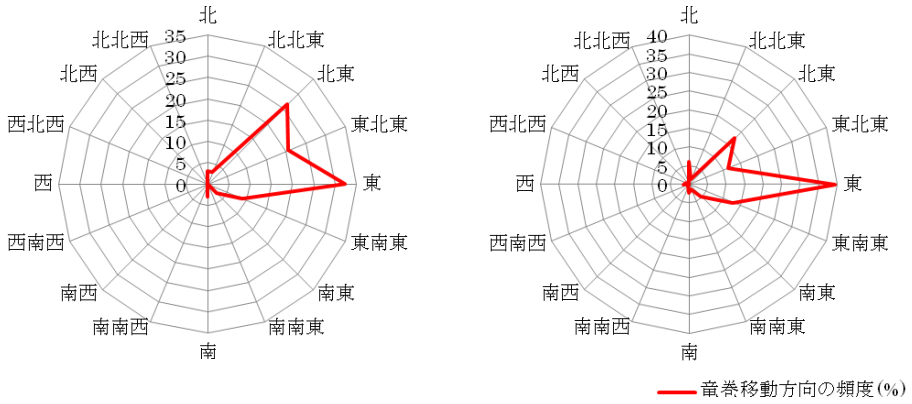


図 6 竜巻の移動経路の発生頻度（左：竜巻集中地域，右：竜巻検討地域）

柏崎刈羽原子力発電所を含む周辺の地形状況を図 7 に示す。図中において，地形の起伏を等値線から確認することができる。参考までに，粗度区分もカラーコンタで併記している。また，図 8 には，東向きの移動経路を勘案して，東西方向の鉛直断面の地形起伏を示した。

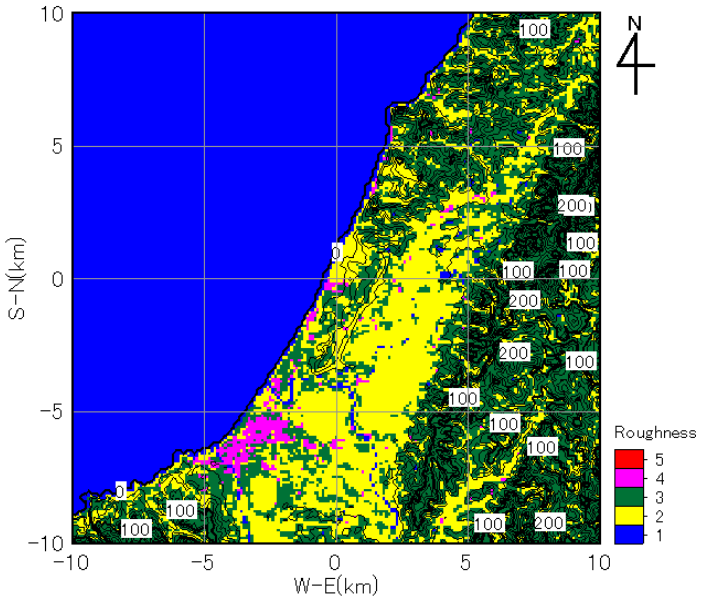


図 7 柏崎刈羽原子力発電所周辺の地形起伏

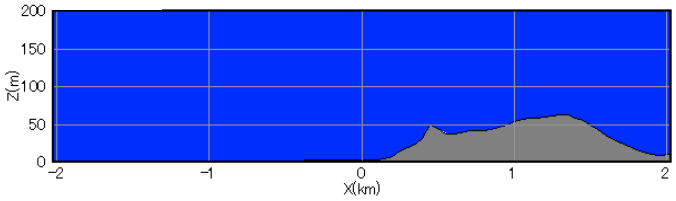


図 8 柏崎刈羽原子力発電所東西方向の鉛直断面での地形起伏

これらの結果から，柏崎刈羽原子力発電所周辺の数km領域において，「尾根高さ Hm に対して±5Hm」という既往の研究が示している影響範囲の大きさに該当する地形が存在しないことがわかる。特に，西側については，海が占有し，地形を平坦と判断し得ることを理解できる。

さらに，地形の起伏に伴う風速の増減について，数値シミュレーションによる検討も行った。図 9 に，8 風向に対する増減速率（流入風速に対する比）の計算結果を示す。なお，実際の風況シミュレーションでは地形の起伏と粗度の影響とを重畳させることが一般的であるが，ここでは地表面粗度を一様（粗度区分Ⅱ）とした結果を示している。これは，地形効果への議論を明確に示すことを意図したものである（別途，地表面粗度の影響を考慮したシミュレーション結果も実施し，ここで提示した結論との整合を核にしている)。

この数値シミュレーションでは，直線的な風（straight wind）に対する計算を行ったが，上記で取りまとめた竜巻に関する知見とは異なり，下り坂で減速する特徴があるため，発電所付近において風速の顕著な減速がないという観点で確認した。図中のカラーコンタが増減速の度合い（比）を 10 倍したものを示す。原点位置が該当地点（柏崎刈羽原子力発電所）となる。図 6 に示す竜巻の主な移動方向に対する計算結果において，発電所付近においてカラーコンタが緑色（比として 1 前後）から明確な変化はしていないことから，地形による風速の顕著な変調は見られず，風の場に対する地形の起伏の影響は小さいと判断される。

参考文献

Forbes GS (1998) Topographic influences on tornadoes in Pennsylvania. 19th Conf. on Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc., Minneapolis, MN, 269-272.

Karstens CD (2012) Observations and laboratory simulations of tornadoes in complex topographical regions. Graduate theses and dissertations of Iowa State Univ., paper12778.

Lewellen DC (2012) Effects of topography on tornado dynamics: A simulation study. 26th Conf. on Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc., Nashville, TN, 4B.1.

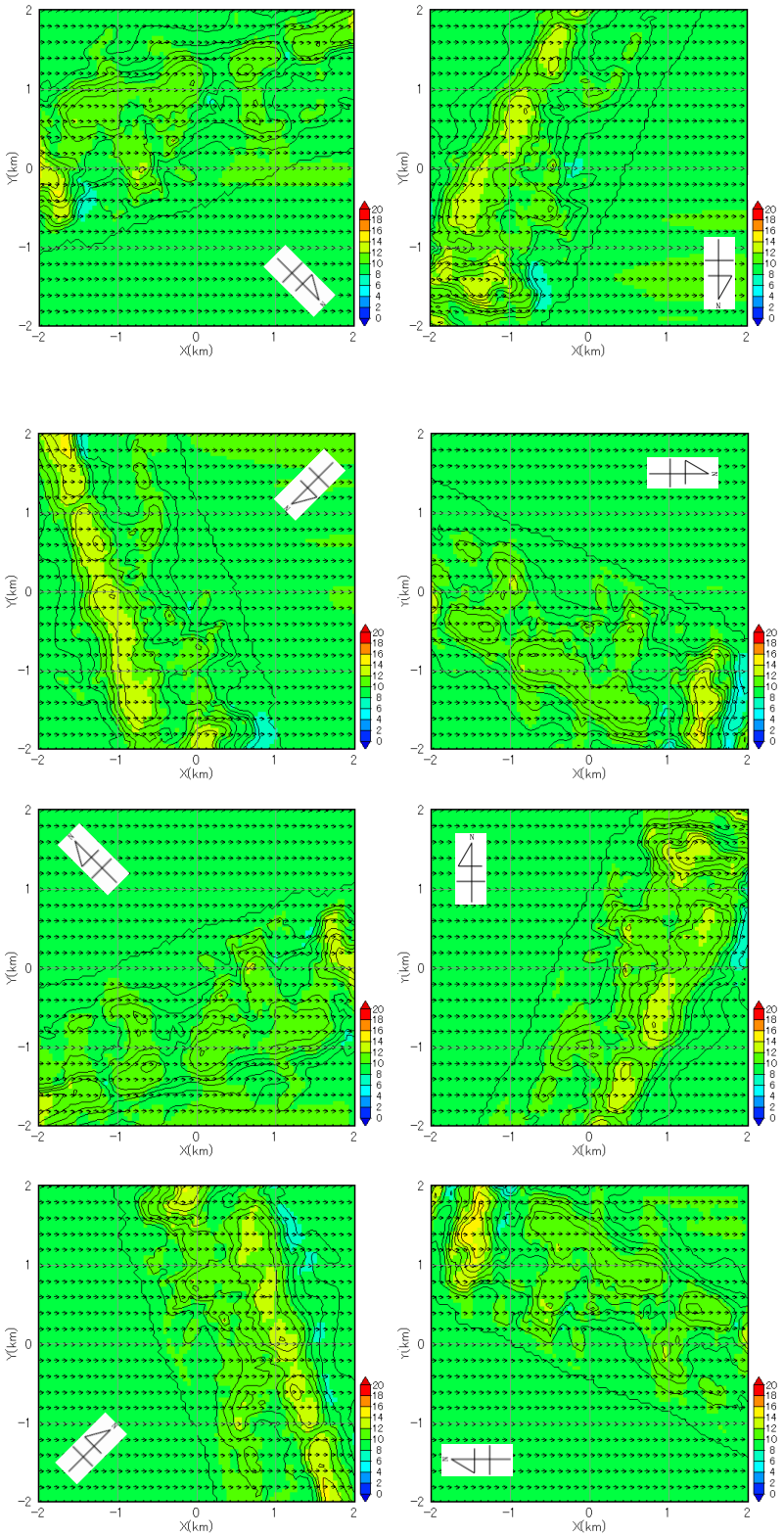


図 9 柏崎刈羽原子力発電所周辺の風速の増減速率分布（8 風向）
（流入風速に対する比を 10 倍にして表示）

参考資料１：地形の起伏に起因する竜巻の旋回流の強弱に対する物理的解釈

ここでは，本資料で示した地形の起伏による竜巻の旋回流の強弱に対する物理的解釈を示す。なおここで示す,角運動量保存則に基づく解釈の妥当性を,被害状況調査(Forbes 1998, Karstens 2012）や風洞実験（Karstens 2012）も支持している。

一般的に，回転する流れでは，「回転の中心からの距離」と「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質がある。これは角運動量保存則と呼ばれるが,角運動量保存則と Holton (1992) を参考に，竜巻旋回流が形成された後における渦の伸長・収縮に伴う旋回流風速の増速・減速機構を以下に導く。竜巻のコア部分を一つの鉛直軸を有する剛体運動の気柱と仮定すると，上り坂を越える場合（図の渦１から渦２へ移動する場合）には渦の長さが短くなる。その際，角運動量の保存則は次式のように表される。

$$\int_0^{2\pi}\int_0^{r_1}\int_0^{h_1}(\rho r^2\omega_1)dh\cdot rdrd\varphi=\int_0^{2\pi}\int_0^{r_2}\int_0^{h_2}(\rho r^2\omega_2)dh\cdot rdrd\varphi \qquad ①$$

$$\frac{1}{4}r_1^{\,4}\omega_1 h_1=\frac{1}{4}r_2^{\,4}\omega_2 h_2 \qquad ②$$

ここで，ω は角速度，r は渦コア（気柱）の半径，h は渦コア（気柱）の高さ，ρ は空気密度であり，添字の１と２はそれぞれ，渦１と渦２に対する値を表す。また，気柱の体積が保存されるので，式③が成立する。

$$\pi r_1^{\,2}h_1=\pi r_2^{\,2}h_2 \Rightarrow \quad r_2^{\,2}=\frac{h_1}{h_2}r_1^{\,2} \qquad ③$$

この関係を式②に代入すると，式④が得られる。

$$\frac{\omega_1}{h_1}=\frac{\omega_2}{h_2} \Rightarrow \frac{d}{dt}\left(\frac{\omega}{h}\right)=0 \qquad ④$$

④の関係式は「渦位（ポテンシャル渦度）の保存式」に相当するものであり，角速度ωは地上高さ h に比例することがわかる。また，③より，渦の半径 r は $h^{1/2}$ に反比例するので，竜巻の最大接線風速（$\omega\times r$）は $h^{1/2}$ に比例する。そのため，竜巻の渦が上り斜面を移動するとき，基本的に渦は弱まり，下り斜面を移動するときには強まる。

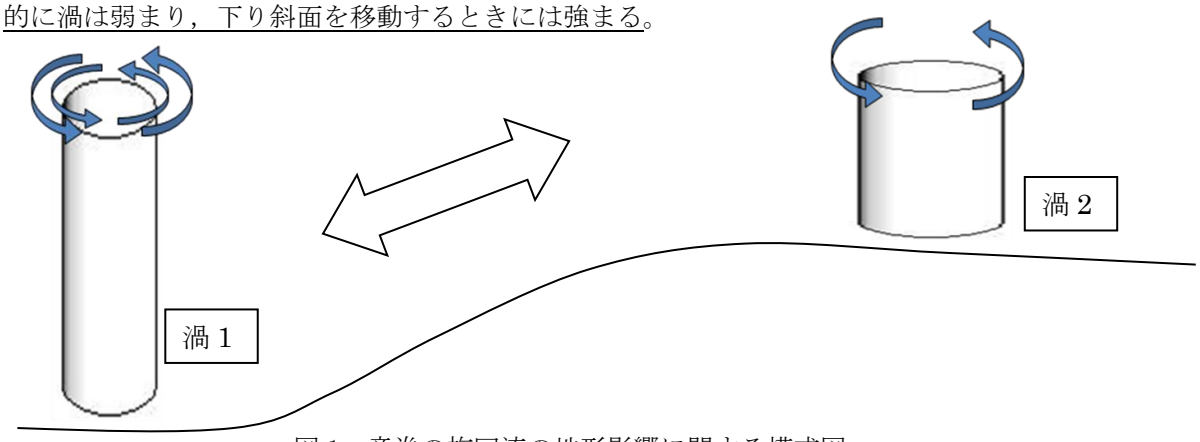


図１　竜巻の旋回流の地形影響に関する模式図

参考資料２：竜巻による旋回流を対象とした数値シミュレーションへのレビュー

ガイド及びその解説に記載されている参考文献において，地形影響による旋回流の強化の評価技術として，数値シミュレーションの援用が例示されている。ここでは，ラージエディシミュレーション（LES）という技法が用いられている。LES では，風の運動を支配する方程式系を数値的に解くことにより，風の三次元分布の非定常な変化を求める。計算自体には仮定が少ないのが長所であるが，膨大な計算資源が必要であること，計算の初期・境界条件の設定が難しいこと，が欠点である。竜巻の実際の流れ場を対象とした場合，より難しいものとなる。

具体的には，LES では，風の変動を大規模なものと小規模なものとに分離し，前者を数値シミュレーションの中で直接的に再現し,後者を物理法則から妥当性を類推できる仮定にもとづくモデル（サブグリッドモデル）で表現する。そのため，計算精度が格子解像度，計算手法やサブグリッドモデルの現象再現性に強く依存する。一方，表 1 に示すように，近年の竜巻数値流体計算に用いられている格子解像度や計算手法には，様々なものが用いられており，適切な手法として統一的な知見が得られていないのが現状といえる。

このことを勘案して，本資料では，数値シミュレーションの結果を援用して，旋回流の増減への定性的評価及びその挙動への物理的解釈を与えることとし，定量的な数値の取り扱いは行わないこととした。

表１　近年の竜巻数値流体計算の主要仕様

文献	解析体系	地表面境界条件	乱流モデル	解析手法	格子解像度	解析領域
Lewellen (2012)	複雑地形上実スケール竜巻	空力的粗度	LES（TKE 型）	Lewellen(2007)と同じ（IB 法を付加）	5m 以下	2x2x2km
Natarajan and Hangan (2012)	実験スケール竜巻	不明（ノンスリップ？）	LES（動的スマゴリンスキ型）	商用コード Fluent ベース（2 次精度中心差分 hexahedral grid）	不明（セル数は 2.5e6）	実験サイズ (半径=0.4m)
Maruyama(2011)	実験スケール竜巻	ノンスリップ	LES（標準スマゴリンスキ型）	RIAM-COMPACT（Kajishima Sheme）	最大風速半径の 1/8	実験サイズ
Lewellen et al. (2008)	飛散物を含む実スケール竜巻	空力的粗度	LES（TKE 型）	Lewellen(2007)と同様（2 流体モデルを付加）	不明	不明
Lewellen and Lewellen (2007)	実スケール竜巻	空力的粗度	LES（TKE 型）	2 次精度中心差分	不明	不明

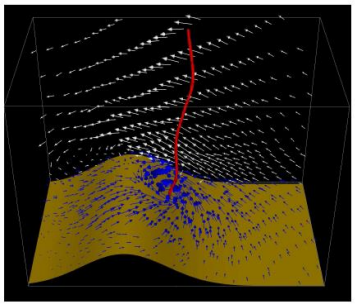
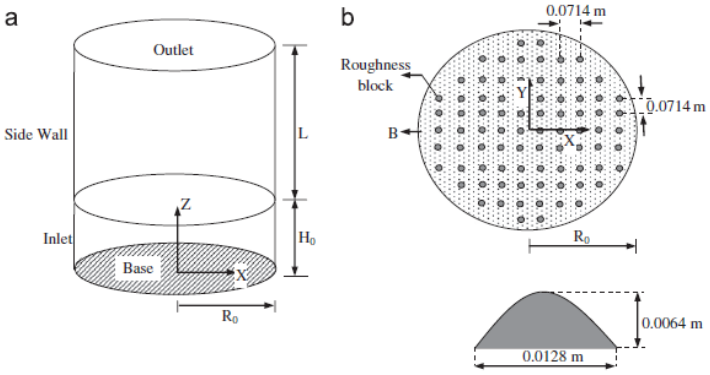


Figure 7: Sample velocity vectors 10 m above the surface (blue) and on a selected vertical plane (white) for a tornado heading upslope (moving right to left); vectors are given in a reference frame with the ground at rest. The red line represents the mean vortex core position at the time. The simulation case is that of fig. 4.

(a) Lewellen (2012)



(b) Natarajan and Hangan(2012)

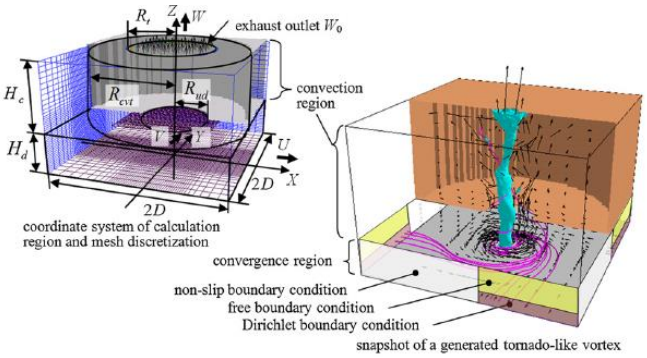


Fig. 1. Numerical tornado simulator.

(c) Maruyama (2011)

図1　近年の竜巻数値流体計算の解析モデル

参考資料３

地表面粗度について

1. 概要

本資料において，既往の研究に基づく地表面粗度の物理的意味及び竜巻等の暴風時の風速への影響に関する知見を取りまとめる。

2. 地表面粗度の定義

大気の運動（風）は，地表面の影響を受けるが，地表面に近いほどその影響は強い。影響を受ける範囲は 1–2 km に及ぶことが一般的で，その範囲を大気境界層と呼ぶ。その中でも表面から数十メートルまでの領域は特にその影響が著しく，「接地層」といわれる（竹内・近藤 1981）。

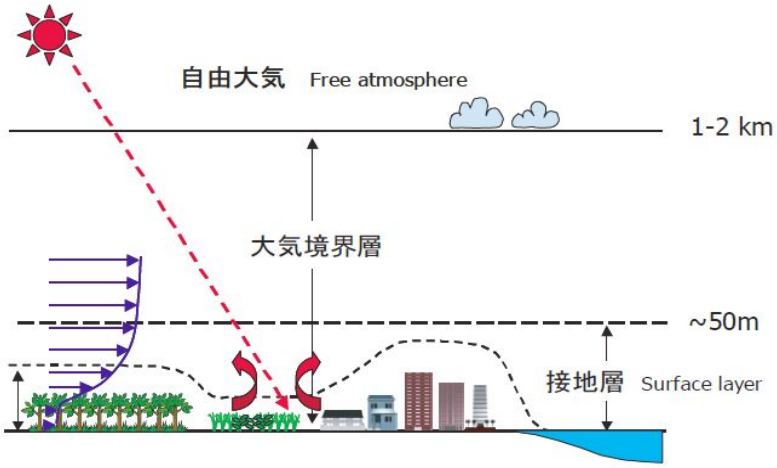


図 1 大気の鉛直構造の模式図

風速は，地表面において 0 となり上空に向かうにつれて増加する。強風状態において，この風速の鉛直分布は対数分布と合致する。この対数分布の性状は，地表面の細かな凸凹が与える摩擦抵抗により定まる。この摩擦抵抗による風速分布への効果を示す指標を「粗度長」（地表面粗度）と定義する（塩谷 1992；近藤 2000）。

接地層内の風速 U は，地表面からの高さ z に対して，粗度長 z_o を用いて

$$U(z) = c \ln(z/z_o) \qquad (1)$$

により整理される（ここで，c は係数）。

3. 粗度長の値

粗度長の値は，既往の研究において，様々な地表面状態に対して示されている。そこで

得られている概略値を以下に示す。

地表面	粗度長［m］
水（広くて静かな面）	10^{-6} － 10^{-5}
砂・砂漠	0.0003
土	0.001 － 0.01
草（草丈 0.02 － 0.1 m）	0.003 － 0.01
草（草丈 0.25 － 1.0 m）	0.04 － 0.10
農地	0.04 － 0.20
果樹園	0.5 － 1.0
森林	1.0 － 6.0
大都市（東京）	2.0

竹内・近藤 1981 より

地表面	粗度長［m］
湖や海面	10^{-3} － 10^{-5}
水田	0.01 － 0.05
草（草丈 0.1 m）	0.01 － 0.03
草（草丈 1.0 m）	0.1 － 0.3
田園集落	0.2 － 0.5
森林	0.3 － 1.0
大都市	1 － 3

近藤 2000 より

粗度長が地表面の細かな凹凸の度合いに呼応し増減することを確認できる。

4. 粗度長を加味した風速の算定

この粗度長を考慮した建築物の耐風設計（強風を対象とした建築物の風荷重設定）手順を日本建築学会が取りまとめている（日本建築学会 2004)。ここでは，地表面の状況に応じた粗度長の変化を 5 つの区分に分類して取り扱うことにしている。

粗度区分	評価地点及び風上側地域の地表面の状況
Ⅰ	海面又は湖面のような，ほとんど障害物のない地域
Ⅱ	田園地帯や草原のような農作物程度の障害物がある地域，樹木，低層建築物等が散在している地域
Ⅲ	樹木・低層建築物が多数存在する地域，あるいは中層建築物（4 － 9 階）が散在している地域
Ⅳ	中層建築物（4 － 9 階）が主となる市街地
Ⅴ	高層建築物（10 階以上）が密集する市街地

そして，式(1)の対数分布を近似するものとして，次式で示される分布とともに，各粗度

区分に対して式中のパラメータとして下表の値を提示している。

$$U(z) = c\ (z/z_G)^{\alpha} \qquad (zb < z \leq z_G) \qquad (2)$$

粗度区分	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
zb (m)	5	5	10	20	30
z_G (m)	250	350	450	550	650
α	0.1	0.15	0.2	0.27	0.35

地表面の凹凸が大きくなるほど，zb，z_G，α（べき指数）の値も大きくなる。
粗度区分Ⅰ－Ⅴに対して，式(2)から得られる風速の鉛直分布を図 2 に示す。

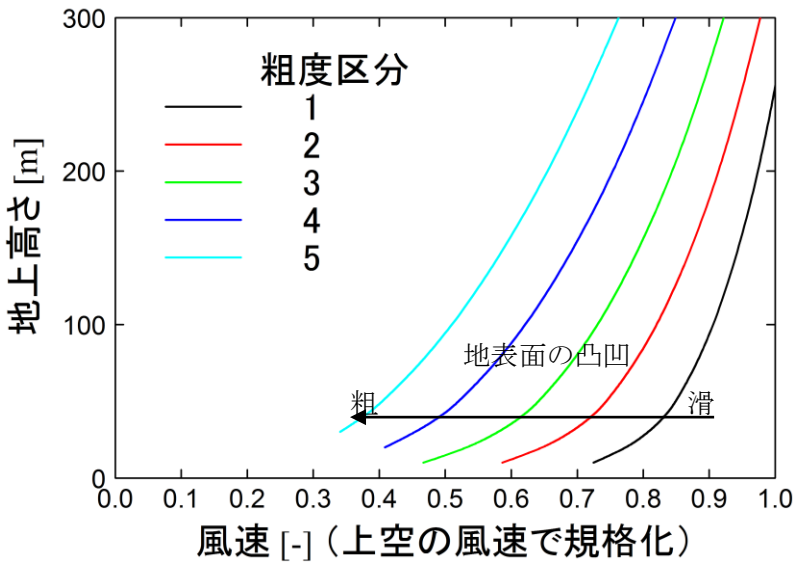


図 2 粗度区分と風速の鉛直分布との関係

ここで，地表面の凹凸による地表面近傍における風速の減速を議論するため，同一の上空風速（$z = z_G$の風速）に対する分布を提示している。すなわち，横軸の数字は地表面粗度の影響に起因する減速の度合いを意味する。地上に近づくにつれて・粗度区分が大きくなるにつれて，地表面近傍の風速が小さくなることを確認できる。例えば，地上高さ 10 m の風速は，粗度区分がⅠからⅡに変化することで 20%程度低下し，Ⅲに変化することで 35%程度低下する。

5. 竜巻の風速に対する粗度長の効果

4 章に示した風速の算定手順は，強風を対象としたものであり，地表面状態が森林等柔なものからビルなどの剛なものまでを包括して，地表面の凹凸が，強風の減衰をもたらすことを示唆するものである。

なお，竜巻は通常の強風と異なり，強い渦（旋回流）構造を有する。地表面粗度は，この竜巻の旋回流を減衰させる効果を有する（例えば，Dessens 1972, Leslie 1977, Lewellen and Sheng 1979, Rostek and Snow 1985, Church 1993, Natarajan and Hangan 2012)。また，地表面粗度の構成物が飛来物として運動することも竜巻の風速を大きく減少させることも示唆されている（Lewellen et al. 2008)。

これらの知見から，表面の凹凸，すなわち地表面粗度，の増加とともに竜巻に起因する強風の風速が低下するといえる。

参考文献

近藤（2000） 地表面に近い大気の科学 324pp

塩谷（1992） 強風の性質 開発社 201pp

竹内・近藤（1981） 大気科学講座 1 地表に近い大気 東大出版 226pp

日本建築学会（2004） 建築物荷重指針・同解説 丸善 651pp

Church, C. R., J. T. Snow (1993) Laboratory models of tornadoes. The tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards, Geophysical Monograph 79, Amer. Geophy. Union, 277-295.

Hattori Y et al. (2010) Wind-tunnel experiment on logarithmic-layer turbulence under the influence of overlying detached eddies. Bound.-Layer Meteor., 134, 269-283.

James R. Holton (1992) An Introduction to Dynamic Meteorology, pp.511.

Dessens, J., Jr. (1972) Influence of ground roughness on tornadoes : A Laboratory Simulation. J. Appl. Meteor., 11, 72-75.

Leslie F W (1977) Surface roughness effects on suction vortex formation：A Laboratory Simulation. J. Atmos. Sci., 34, 1022-1027.

Lewellen WS, Sheng YP (1979) Influence of surface conditions on tornado wind distributions. 11th Conf. on Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc., Kansas City, MO, 375-381.

Lewellen DC, Gong B, Lewellen WS (2008) Effects of finescale debris on near-surface tornado dynamics. J. Atmos. Sci., 65, 3247-3262.

Natarajan D, Hangan H (2012) Large eddy simulations of translation and surface roughness effects on tornado-like vortices. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 104-106, 577-584.

Maruyama, T. (2011) Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 99, 249-256.

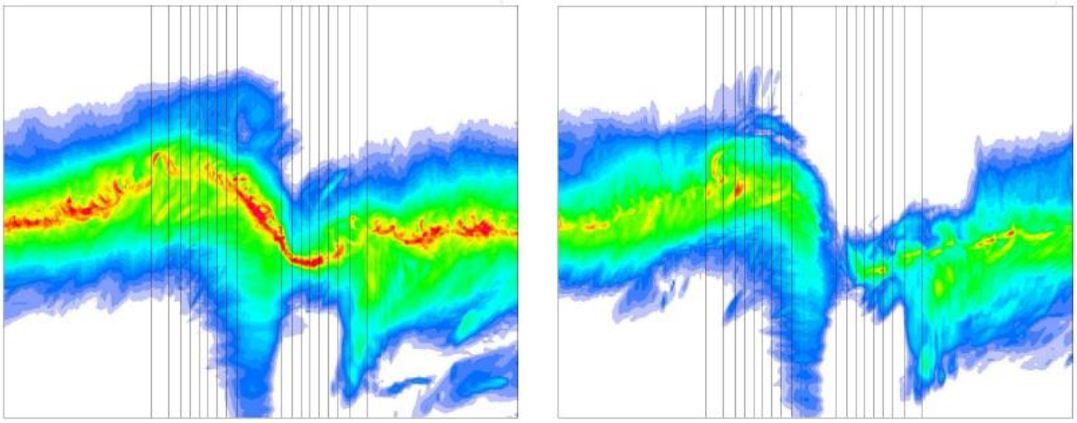
Lewellen, D. C., and W. S. Lewellen (2007) Near-surface intensification of tornado vortices. J. Atmos. Sci., 64, 2176-2194.

Rostek WF, Snow JT (1985) Surface roughness effects on tornado like vortices. 14th

Conf. on Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc., Indianapolis, IN, 252-255.

別紙：地形と粗度との重畳について

ここでは，本資料で示した粗度による竜巻の減衰について，別資料で示した地形効果との重畳について言及する。地表面粗度と地形効果との重畳について，Lewellen（2012）により実施されたLESが一つの知見を与えている。このLESでは，高さ100mの尾根を越える竜巻の減衰を2種類の地表面粗度（zo = 2 cmと20 cm）に対して調べている。それにより得られた最大風速のカラーコンタを以下に示す。



地表面粗度zo=2cmの場合　　地表面粗度zo=20cmの場合

図1 最大風速のカラーコンタ

地表面粗度の値によらず，地形の起伏に伴う竜巻進路は蛇行している。竜巻の移動に伴う，最大瞬間風速の値の強弱は，地表面粗度に伴い異なる挙動を呈するが，地表面粗度の増加は，最大風速の低下に寄与していることを確認できる。

この結果は，本資料が説明した地表面粗度による竜巻風速の減衰について，地形の起伏が重畳する場合も同様の結論となることを示唆する。

参考文献：

Lewellen DC (2012) Effects of topography on tornado dynamics: A simulation study. 26th Conf. on Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc., Nashville, TN, 4B.1.

設計竜巻の特性値の設定

当社の竜巻影響評価においては，フジタの竜巻工学モデル DBT-77（DBT：Design Basis Tornado）を適用していることから，設計竜巻の特性値を以下のとおり設定する。

1. フジタモデル DBT-77 について

フジタモデルには，Fujita Work Book[1]の 6 章に記載されているフジタモデル DBT-77 と 7 章に記載されているフジタモデル DBT-78 があり，フジタモデル DBT-77 は単一渦型のモデル，フジタモデル DBT-78 はフジタモデル DBT-77 で模擬した大きな竜巻の中に小さな吸込渦（suction vortices）を加えた多重渦型のモデルである。（図１）

米国 NRC ガイド[2]に記載されているフジタモデルは，「内側のコアと外側のコアの間にある環には，強い竜巻の吸引渦が形成され，親竜巻の中心の回りで回転する（In the annulus between the inner core radius and the outer core radius, suction vortices form in strong tornadoes and rotate around the center of the parent tornado)」とあるように，多重渦型のフジタモデル DBT-78 のことを述べている。

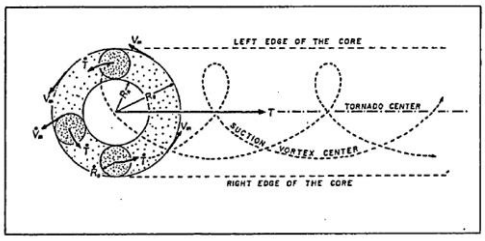


Figure 8.2 Fujita's latest model of multiple-vortex tornadoes for engineering applications. The design-basis tornado model in Chapter 6 developed in 1977 was identified as "DBT-77". Design-basis suction-vortex parameters in Chapter 7 were added to the DBT-77 in constructing this latest analytical model, to be idetified as "DBT-78".

図 1 DBT-78 モデルの模式図[1]

米国 NRC ガイドでは，フジタモデル DBT-78 の中の小さな吸込渦は半径が小さく，圧力の時間変化率が半径に反比例して大きくなることを考慮して，同ガイドで採用したランキン渦モデルでも保守的に圧力の時間変化率が大きくなるように，改訂前（2007 年以前）の同ガイドで採用されていた最大接線風速半径 45.7m を選択している。

また，米国ローレンス・リバモア国立研究所報告書[3]では，「多重渦型のフジタモデル DBT-78 で考慮されている吸込渦はすぐに減衰することから，大多数の専門家は竜巻被災の重要因子ではないと考えている」と述べており，単一渦型のフジタ

モデル DBT-77 を飛来物評価の竜巻風速場として選定している。

フジタモデル DBT-78 モデルは，Fujita Work Book[1]において，最大風速や発生率がモデル化されているのみであり，飛散解析に必要となる風速場に関する数式が完全には定義されていない。また，仮に DBT-78 モデルを適用した場合，竜巻半径が東京工芸大報告書[4]に示されている日本で観測された被害幅に基づく竜巻半径と整合が取れなくなるといった点が挙げられる。

以上を踏まえ，当社の竜巻影響評価ではフジタモデル DBT-77 を適用している。DBT-77 モデルの入力パラメータは移動速度，最大接線風速及び最大接線風速半径であり，これらについて制限は Fujita Work Book[1]では記載されておらず，特に制限はないものと考えられることを踏まえ，以下のとおり設計竜巻の特性値を設定する。

(1) 設計竜巻の移動速度(V_T)

ランキン渦モデルを仮定したガイドにおいて移動速度(V_T)は，下記の式にて設定される。

$V_T = 0.15 \cdot V_D$（ガイドの 3.1 式） (1)

一方，この式は日本の竜巻観測記録（気象庁データベース）に基づいた竜巻移動速度（平均値）と最大風速との関係[4]を参照して設定されており，風速場モデルに関わらず用いることができることから，フジタモデルでも適用できる。

また，参考に，V_D=92m/s の際のランキン渦モデルとフジタモデル DBT-77 での移動速度を以下に示す。

表 1　設計竜巻の移動速度(V_T)の比較

	ランキン渦モデル	フジタモデル DBT-77
移動速度(V_T)	14m/s	14m/s

(2) 設計竜巻の最大接線風速(V_{Rm})

ランキン渦モデルを仮定したガイドにおいて最大接線風速(V_{Rm})は，竜巻の最大風速から移動速度(V_T)を引いた値として，下記の式にて設定される。

$V_{Rm}=V_D-V_T$（ガイドの 3.2 式） (2)

一方，上記式は，風速場によらないのでフジタモデルでも適用できる。

また，参考に，V_D=92m/s の際のランキン渦モデルとフジタモデル DBT-77 での最大接線風速を以下に示す。

表 2　設計竜巻の最大接線風速(V_{Rm})の比較

	ランキン渦モデル	フジタモデル DBT-77
最大接線風速(V_{Rm})	78m/s	78m/s

(3) 設計竜巻の最大接線風速半径(R_m)

ランキン渦モデルを仮定したガイドにおいて最大接線風速半径(R_m)については，観測された被害幅を用いて推定している。

竜巻によって被害が生じる風速を V_0 とした場合，Rm を超えた範囲では，風速 $V = V_{Rm} \cdot (R_m/r)$ と表せるため，被害が生じる風速 V_0 と，被害幅 r_0，及び最大接線風速 V_{Rm} が分かれば最大接線風速半径 R_m を得ることができる。(図 2)

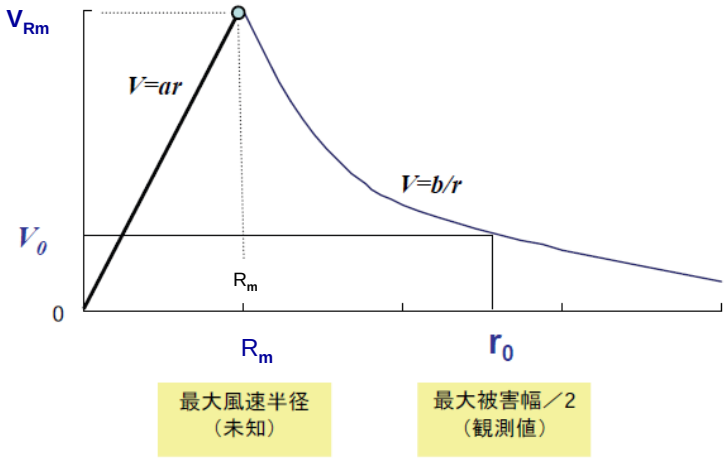


図 2　竜巻半径と風速との関係

例えば，東京工芸大報告書[4] p. 163 の仮定 2 より，最大風速 V_{Rm}=70m/s (F3 あるいは F3 に近い F2 竜巻)，被害幅 250m の 1/2 である r_0 = 125m，被害が生じる風速 V_0 = 17m/s，とするとこれをもとに設定する最大接線風速半径(R_m)は，下記のとおり。

$$R_m = r_0 \cdot V_0 / V_{Rm}$$
$$R_m = 125 \cdot 17/70 \qquad (3)$$
$$R_m \fallingdotseq 30.36\,(\mathrm{m})$$

一方，フジタモデルの水平風速 V は接線風速と径方向風速を合成したものであるので，外部コア半径の外側では水平風速 V は以下で与えられる。

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{V_\theta^{\,2} + V_r^{\,2}} \\ &= F_r(r) F_h(z) V_m \sqrt{1 + \tan^2 \alpha_0} \end{aligned} \qquad (4)$$

ここで，$F_r(r) = \dfrac{R_m}{r}$，$F_h(z) = \begin{cases} z^{k_0} & (z < 1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases}$ (5)

$$\tan\alpha_0 = \begin{cases} -A(1-z^{1.5}) & (z<1) \\ B\{1-\exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases} \tag{6}$$

フジタモデルでは，ランキン渦モデルと異なり高さによって風速が変化するが，外部コア半径の内側ではｒに比例して風速が大きくなり，外部コア半径の外側ではｒに反比例して小さくなる点ではランキン渦モデルと同様である。（ランキン渦モデルと同様に，竜巻半径と風速の関係は図２のとおりとなる）

また，接線風速Ｖが最大となるのは，流入層の上端（z=1）であるが，このとき，$F_h(z)$=1，$\tan\alpha_0$=0 となるので，外部コア半径の外側ではランキン渦モデルと同様に $V=V_mR_m/r$ が成立する。

したがって，被害幅から最大接線風速半径を推定する際に，ランキン渦モデルと同様に求めることができると考えられるため，本検討においてはガイドを参照して最大接線風速半径 R_m = 30m を設定する。

また，参考に，V_D=92m/s の際のランキン渦モデルとフジタモデル DBT-77 での最大接線風速半径を以下に示す。

表３　設計竜巻の最大接線風速半径（R_m）の比較

	ランキン渦モデル	フジタモデル DBT-77
最大接線風速半径(R_m)	30m	30m

（4）設計竜巻の最大気圧低下量（ΔP_{max}）・最大気圧低下率（$(dp/dt)_{max}$）

ランキン渦モデルを仮定したガイドにおいて最大気圧低下量（ΔP_{max}）・最大気圧低下率（$(dp/dt)_{max}$）は，それぞれ ρV_{Rm}^2，$(V_T/R_m)\cdot\Delta P_{max}$ と設定される。

一方，フジタモデルにおける設計竜巻の最大気圧低下量・最大気圧低下率については，速度分布が既知である場合，流れの連続式と運動量保存式から導出される以下の圧力ポアソン方程式を解くことにより，圧力を求めることができる。

$$\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x_1^{\,2}}+\frac{\partial^2 p}{\partial x_2^{\,2}}+\frac{\partial^2 p}{\partial x_3^{\,2}}\right)=-\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3}\frac{\partial}{\partial x_i}\left(U_j\frac{\partial U_i}{\partial x_j}-\nu\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j}\right) \tag{7}$$

ここで，x_i は座標(x, y, z)を，U_i 及び p は風速ベクトル及び圧力を表す。また，ν は動粘性係数を，ρ は空気密度を表す。なお，添え字 i，j は１から３までの整数とする。

式(7)を解くために有限要素法（計算方法の詳細は参考文献(5)，(6)を参照）を用い，一辺 300m(10R_m)の立方体を解析領域として，この領域を１辺 100 個の有限要素に分割した。竜巻（最大接線風速 V_{Rm}=78m/s，半径 R_m=30m）の中心が解析領域の角部に位置するものとして，各節点に Fujita モデルの風速値を与えた。移動速度 V_t は圧力分布には影響しないため，ここでの計算では V_t=0 とした。

図 3 に Fujita モデルの圧力分布（空気密度で除したもの）を示す。空気密度で除した最大圧力差は 5149.8m^2/s^2 であるので，これに空気密度 1.226kg/m^3 を乗じて最大圧力差を求めた。ただし，この結果は一辺 300m(10Rm)の立方体を解析領域とした有限領域での数値解析結果であるので，これを無限領域における最大気圧低下量とするために,更に補正係数 1.0066 を乗じた（表 4)。なお，この補正係数 1.0066 は，ランキン渦に対する最大圧力差の有限領域での数値解析結果と無限領域での理論値の比から求めた。

図 4 に Fujita モデルの圧力(空気密度で除したもの)の x-方向空間微分値を示す。x-方向空間微分値（絶対値）の最大値は 240.2 m/s^2 であり，最大気圧変化率はこの値に移動速度を乗じることにより，式(8)のように求められる。ただし，数値解析誤差を考慮するため，更に補正係数 1.0096 を乗じて最大気圧低下率とした（表 5)。なお，この補正係数 1.0096 は,ランキン渦に対する最大気圧変化率の有限領域での数値解析結果と無限領域での理論値の比から求めた。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = V_T \frac{\partial p}{\partial \chi} \tag{8}$$

また，参考として，図 5 に有限領域での数値解析より求めたランキン渦の圧力分布と圧力の x-方向空間微分値を示す（圧力は空気密度で除したもの)。

表 4　最大気圧低下量

最大風速	最大接線風速	空気密度で除した最大圧力差	最大気圧低下量
92m/s	78m/s	5149.8m^2/s^2	6355Pa

表 5　最大気圧低下率

最大風速	最大接線風速	移動速度	空気密度で除した最大圧力低下率	最大気圧低下率
92m/s	78m/s	14m/s	240.2m/s^2	4163Pa/s

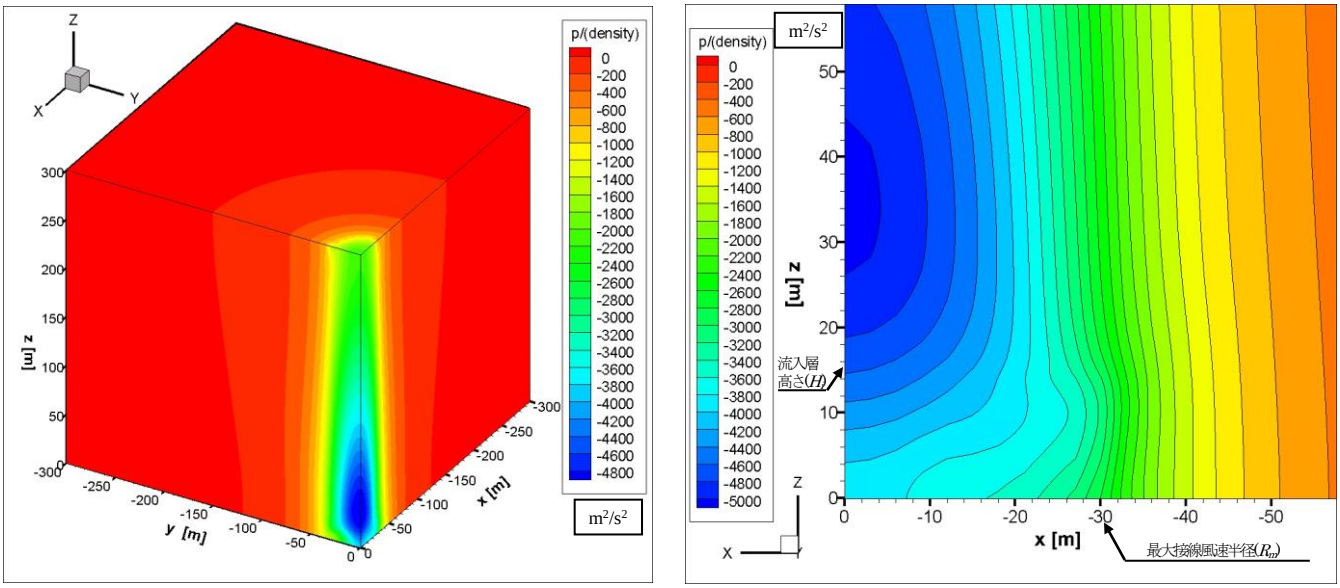


図 3　最大接線風速 V_{Rm}=78m/s における Fujita モデルの圧力分布（左：全体図，右：y 方向からの拡大図，圧力は空気密度で除したもの，最大値 92.83m^2/s^2，最小値-5056.99m^2/s^2）

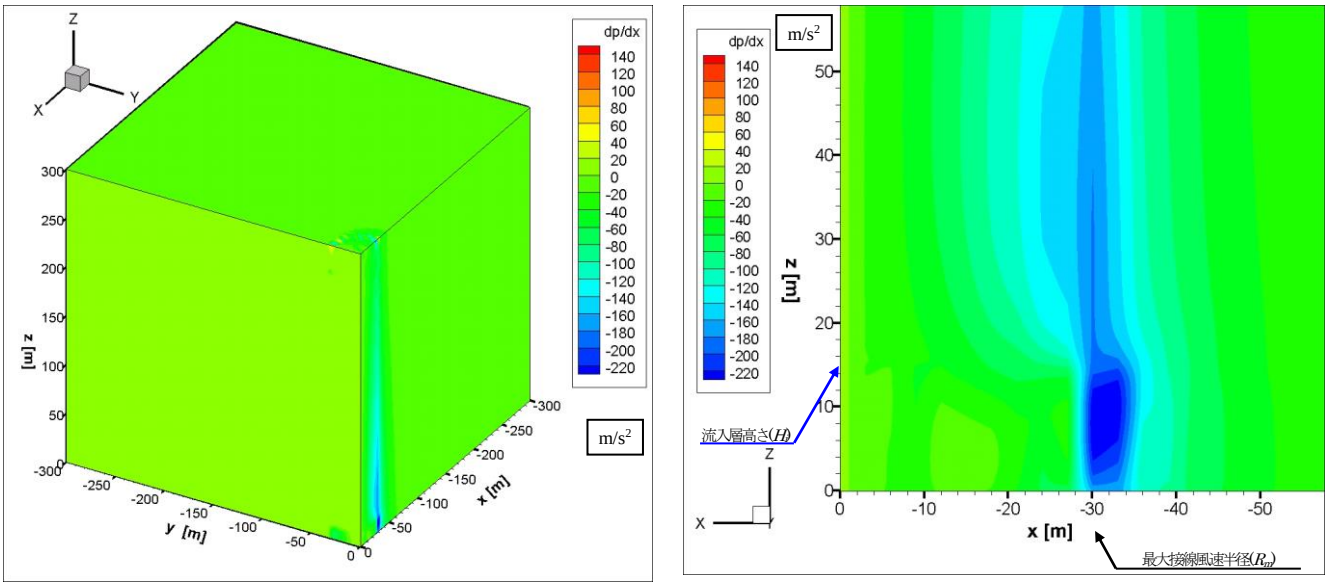


図 4 最大接線風速 V_{Rm}=78m/s における Fujita モデルの圧力（空気密度で除したもの）の x-方向空間微分値（左：全体図，右：y 方向からの拡大図，最大値 163.3m/s^2，最小値-240.2m/s^2）

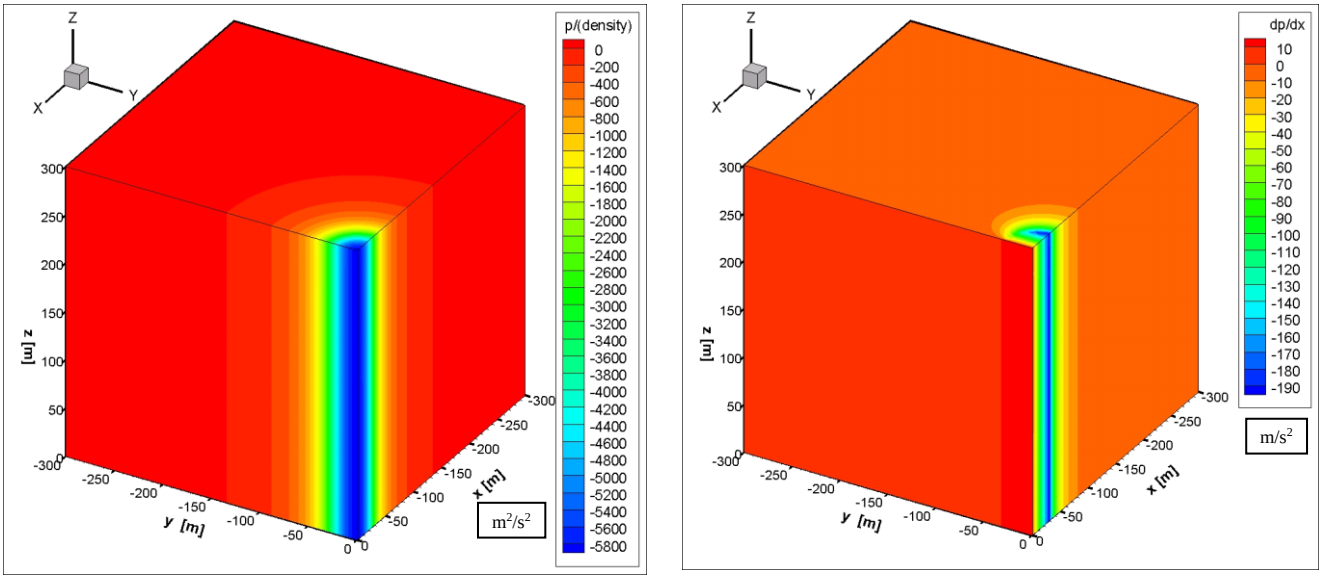


図 5 最大接線風速 V_{Rm}=78m/s におけるランキン渦モデルの（左）圧力分布と（右）圧力の x-方向空間微分値
（本図は，図 3,4 同様，有限領域の数値解析により算出）

また，参考に，V_D=92m/s の際において，ガイドに基づき計算したランキン渦モデルの最大気圧低下量･最大気圧低下率と上記の数値解析により計算したフジタモデル DBT-77 の最大気圧低下量・最大気圧低下率を以下に示す。

表 6　設計竜巻の最大気圧低下量（ΔP_{max}）・最大気圧低下率（$(dp/dt)_{max}$）の比較

	ランキン渦モデル	フジタモデル DBT-77
最大気圧低下量（ΔP_{max}）	7459Pa	6355 Pa
最大気圧低下率（$(dp/dt)_{max}$）	3481Pa/s	4163Pa/s

フジタモデルは，地面との摩擦の影響を受けず回転するランキン渦に比べ，地面との摩擦の影響で回転が弱まり竜巻の中心付近が低圧になりにくい（図 3 及び図 5）。また，フジタモデルの流入層は，流体が竜巻中心方向に引き込まれることにより形成されることから，フジタモデルの最も低圧な領域は，竜巻中心において流入層高さの少し上の部分に存在し（図 3 右図），同部分の圧力より求まる最大気圧低下量は，ランキン渦モデルの最大気圧低下量よりも小さくなる（表 6）。

フジタモデルの圧力分布は複雑であり，上記の数値解析により求めている。そのため，フジタモデルにおける圧力の空間微分値は，局所的に大きな場所（外部コアと外周部の境界）が発生することから，最大気圧低下率がガイドの簡易な式で求めたランキン渦モデルの値より大きくなっている。

参考文献

(1)Fujita, T. T. (1978) Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications. SMRP Research Paper 165, Department of Geophysical Sciences, University of Chicago, 142pp.

(2)U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, 2007: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plant, Revision 1.

(3)Rationale for Wind-Borne Missile Criteria for DOE facilities, UCRL-CR-135687, Lawrence Livermore National Laboratory, 1999

(4) 東京工芸大学 (2011): 平成 21～22 年度原子力安全基盤調査研究(平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構.

(5)Y. Eguchi, S. Sugimoto, Y. Hattori and H. Hirakuchi, “Tornado Pressure Retrieval from Fujita’s Engineering Model, DBT-77”, Proceedings of the 6th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models (ICVFM Nagoya 2014), November 17 - 20, 2014, Nagoya, Japan.

(6) 江口 譲, 服部康男, 流速場情報に基づく圧力場計算法の提案, 第 72 回ターボ機械協会　大分講演会(2014.10.3)

3.1 竜巻影響評価の概要及び保守性について

図 3.1.1 に竜巻影響評価の概要及び保守性確保の状況を示す。竜巻影響評価については，その不確実性を踏まえて，各ステップに対し保守性を考慮している。

【基準竜巻・設計竜巻の設定】

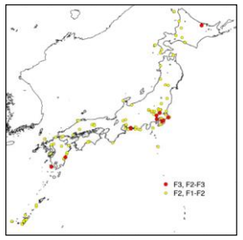
○竜巻検討地域：総観スケール（総観場）での分析（左下図）により北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸を竜巻検討地域と設定。また，メソスケール（突風関連指数）での分析（下中央図）でも地域特性を確認。

○V_{B1}：竜巻検討地域における過去最大竜巻 F2 の風速範囲の上限値 69m/s と設定。

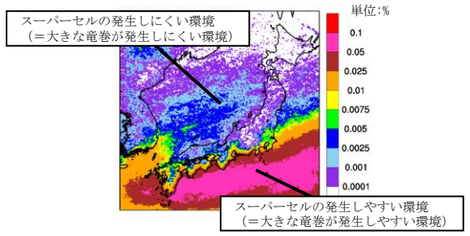
○V_{B2}：竜巻風速のハザード曲線（右下図）より，年超過確率 10^{-5} における風速 59m/s であるが，竜巻検討地域を北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸にすることに伴う竜巻ハザード曲線算出のためのデータの不確実性（日本海側は F スケール不明の海上竜巻が多い）を踏まえ，年超過確率 10^{-5} より一桁下げた年超過確率 10^{-6} 相当の風速 76m/s（F3）と設定。

○基準風速：V_{B1} と V_{B2} のうち大きい風速である年超過確率 10^{-6} 相当の風速 76m/s（F3）を基準風速と設定。

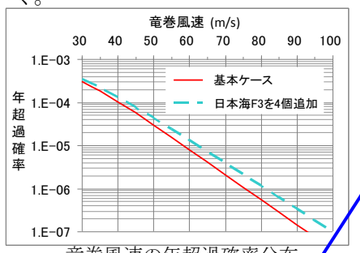
○なお，将来的な気候変動を完全に予測することは難しいため，最新のデータ・知見をもって気候変動の影響を注視し，竜巻検討地域や基準風速は，必要に応じ見直しを実施していく。



F2 以上の竜巻発生箇所



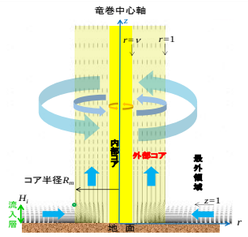
EHI の超過頻度分布（EHI 閾値 3.3）



竜巻風速の年超過確率分布

【設計竜巻の設定（最大風速及び特性値）・設計荷重の設定】

○最大風速：地形効果による竜巻の増幅を考慮する必要はないが，将来的な気候変動の不確実性を踏まえ F3 の風速範囲の上限値 92m/s と設定。



フジタモデルの風速場のイメージ

○風速場モデル：各風速場モデルとの比較や，米国におけるフジタモデルの利用実績を確認し，地面に置かれた物体へ影響を与える風速場をよく表現できているフジタモデルを選定。

○飛来物評価手法：飛来物評価における物体の浮上・飛来モデル，竜巻や物体の配置等を設定。

○設計竜巻の特性値:風速場としてフジタモデルを選定した場合の特性値を設定。

○設計荷重：設計竜巻の風荷重，気圧差による荷重，設計飛来物（鋼製材，砂利）による衝撃荷重等を設定。

【施設の構造健全性の確認】

○設計荷重に対して，建屋・構築物，設備等の評価対象施設等の構造健全性が維持されるかを確認。

【防護対策】

○設計竜巻の最大風速 92m/s にて飛来物発生防止対策や評価対象施設への防護

・基準風速における保守性

→竜巻風速のハザード曲線における最大風速（年超過確率 10^{-5}）59m/s に対し，基準風速を年超過確率 10^{-6} に相当する 76m/s と設定。

なお，ハザード曲線においては，データ量の少ないことによる不確実さを考慮し，以下の検討を実施。

- 擬似的な 51.5 年間のデータをフジタスケールごとに作成（F スケール不明の海上竜巻の発生数は，陸上竜巻の F スケール別発生比率で按分）
- 竜巻データに対して JackKnife 法を適用し，データの安定性を評価
- 日本海側に F3 竜巻（擬似データ上 4 個）を追加した感度解析を実施

・設計風速における保守性

→基準風速 76m/s に対し，将来的な気候変動を踏まえ F3 の風速範囲の上限値 92m/s（≒年超過確率 10^{-7}）と設定。

・物体の浮上・飛来モデルにおける不確実性の考慮

→物体に働く揚力は，風を受ける方向等により様々な値を取り得るため，地面での揚力係数と物体の見附面積の積（$C_L a$）の代わりに，空中での xyz 方向の流れに対する抗力係数と見附面積の積の平均値（$C_D A$）を用い，実際より大きな揚力を作用させ，浮上し易くなるよう設定。（鋼製材であれば，$C_D A / C_L a$≒1.14）

・竜巻が物体に与える速度に関する不確実性の考慮

→実際には竜巻が遠方から物体に近づき，最大風速より低い風速に曝され飛散することになるが，物体を強制的に高速域に配置するとともに，竜巻に対する物体の場所依存性を考慮し，多点数配置（米国 Reg.Guide 1.76 では 1 点配置）された物体の飛来速度の中から，最大となる飛来速度を設定。

→設計飛来物は，必ずしも最大速度で評価対象施設等に衝突するとは限らないが，設計飛来物の速度としては，設計竜巻によって飛来した際の最大速度（水平方向・鉛直方向）を設定。

・風圧力や気圧差による圧力に関する保守性

→フジタモデルの風速場は，接線風速や気圧低下量に高さ依存性があるため，建屋や設備に対し，必ずしも水平方向の最大風速による風圧力や最大気圧低下量による圧力が作用するとは限らないが，設計荷重としては，水平方向の最大風速による風圧力，最大気圧低下量による圧力に基づき設定。

・飛来物の影響高さ（竜巻対策範囲）における保守性（仮設足場に飛散防止対策を講じる場合）※

→ランキン渦モデルを採用している米国 Regulatory Guide 1.76 では，小さな飛来物（スチールパイプ等）はどの高さへの衝突も想定しているのに対し，重量物（自動車）に対しては 9.1m（30feet）以下に影響を及ぼすこととしている。

一方，フジタモデルを適用した場合における設計飛来物の浮き上がり高さは，最大でも角型鋼管の 0.15m と僅かであるが，設計飛来物の鋼製材(4.2m)や角型鋼管(4m)は回転して飛散することも想定される。また，高所の建屋開口部等への影響を及ぼす可能性があるものには飛散防止対策を講じることから，設計飛来物は原則地上高 10m まで影響を及ぼすものとし，建屋開口部の対策範囲は「10m 以下」と設定。

※仮設足場に飛散防止対策を講じない場合には，仮設足場材（足場パイプ，鋼製足場板）は，高所の建屋開口部等へ影響を及ぼす可能性があることから，どの高さへの衝突も考慮するものとする。

図 3.1.1 竜巻影響評価の概要及び保守性確保の状況

3.2 竜巻影響評価及び竜巻対策の概要

【設計竜巻荷重，設計荷重の設定】

○ガイドに基づき，設計竜巻荷重は，設計竜巻の風圧力による荷重（W_W），気圧差による荷重（W_P）及び飛来物による（W_M）を適切に組み合わせた荷重を設定するとともに，設計竜巻荷重と組み合わせる荷重（竜巻以外の自然現象による荷重等）は，設計竜巻荷重に包絡される若しくは考慮すべき荷重ではないことを確認。

○W_W，W_P，W_Mは，設計竜巻の最大風速 V_D=92m/s，風速場モデルをフジタモデルとした場合の荷重を設定する。

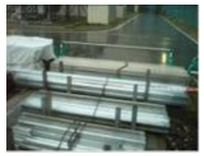
【設計飛来物の選定】

○柏崎刈羽原子力発電所の飛来物に係る現地調査を行い，発電所構内の常設物（マンホール蓋等），仮設物（資機材等）及び二次飛来物（屋根等）の中から，それらの飛来物発生防止対策の可否，固定状況，過去の被害事例や代表性（運動エネルギー，貫通力等）を踏まえ，右図のとおり設計飛来物を選定。ただし，これらのうち飛散防止対策を講じるものは除く。

鋼製材
（最大飛散高さ 0.08m）

角型鋼管（大）
（最大飛散高さ 0.15m）

砂利
（最大飛散高さ 0.08m）



足場パイプ
（最大飛散高さ 0.57＋(148)m※1，※2）

鋼製足場板
（最大飛散高さ 52＋(148) m※1，※2）

※1：（ ）内の値は飛来物初期高さ（地面からの物品の高さ）

※2：大湊側における最も高所の 5 号炉排気筒頂部に設置されている状況を想定し設定

図 3.2.1.1 柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉の設計飛来物

【竜巻影響評価】

○設計荷重に対し，外部事象防護対象施設の構造安全性が維持され安全機能が維持されていることを確認。なお，仮設足場に飛散防止対策を講じた場合，設計飛来物（鋼製材，角型鋼管（大），砂利）の最大飛散高さは非常に僅か（図 3.2.1.1 より設計飛来物の最大飛散高さは，大きいものでも 0.15m）であるが，鋼製材（4.2m）や角型鋼管（4m）は回転して飛散することや米国 Reg.Guide1.76 にて飛来物（自動車）が 9.1m（30feet）以下に影響を及ぼすとしていることを踏まえ，設計飛来物は高さ 10m 迄影響を及ぼすものとして評価。仮設足場に飛散防止対策を講じない場合，設計飛来物（足場パイプ，鋼製足場板）の最大飛散高さは大きいことから，建物等のどの高さへの衝突も想定し評価。

＜施設の評価＞

○評価対象施設（原子炉建屋，タービン建屋（海水熱交換器区域），コントロール建屋，廃棄物処理建屋）の構造骨組評価，局部評価，設計飛来物の衝突に関する評価及び建屋外周部建具（扉等）に関する評価を実施し，内包する外部事象防護対象施設が影響を受けないことを確認し，外部事象防護対象施設に影響がある場合には，防護対策を実施。

○外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼす施設（サービス建屋，5 号炉タービン建屋，5 号炉，6 号及び 7 号炉主排気筒）の構造骨組評価を実施し，倒壊により外部事象防護対象施設が影響を受けないことを確認。なお，主排気筒は，設計飛来物の衝突により，仮に主排気筒の機能が喪失した場合の平常時被ばく評価を実施し，敷地境界線量が線量目標値を超えないことも確認。

＜設備の評価＞

○評価対象施設（非常用換気空調系，軽油タンク，非常用ディーゼル発電機燃料移送系，非常用ディーゼル発電機吸気系）に対する設計飛来物による貫通評価，設計荷重に対する強度評価を実施し，外部事象防護対象施設の構造健全性が維持されることを確認し，外部事象防護対象施設に影響がある場合には，防護対策を実施。

○外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼす施設（非常用ディーゼル発電機排気消音器，ミスト管）は，設計飛来物が到達しないことから，設計荷重に対する強度評価を実施し，構造健全性が維持されることを確認。

【飛散防止対策】

○設計飛来物（極小飛来物である砂利を除く。）より運動エネルギー及び貫通力が大きいものについては，設置場所等に応じ下記のとおり固縛等を実施。なお，二次飛来物のうち，仮設足場，金属製屋根・外壁については，設計飛来物の影響に包絡されず，過去の被災事例からも飛散の可能性があることから，下記の飛散防止対策を実施する。（仮設足場には恒久的に飛散防止対策を講じる必要がないよう地上高 10m 以上の建屋開口部等に対しても防護対策を実施）

＜資機材・車両＞

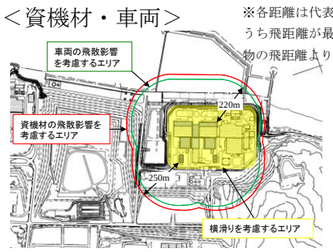


図 3.2.1.2 飛散影響・横滑りを考慮するエリア

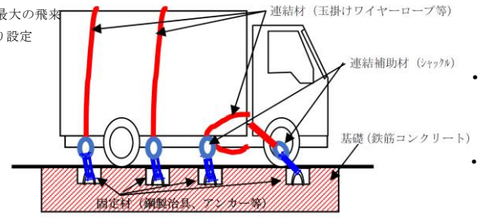


図 3.2.1.3 車両固縛のイメージ

・飛散影響・横滑りを考慮するエリア内に設置した資機材等（発電機，仮設小屋等）の飛散防止対策としては，移設，撤去又は浮き上がりや横滑りを考慮した固縛等を実施。

・飛散影響・横滑りを考慮するエリア内の一般車両の飛散防止対策としては，移設，撤去，固縛に加え，作業中車両について竜巻発生確度ナウキャスト等を活用し即座に車両を移動できる体制を整え，エリア外への待避を実施。

・建屋近傍の重大事故等対処設備（車両）は飛散防止対策として，固縛等を実施。高台の重大事故等対処設備（車両）は，飛散影響・横滑りを考慮するエリア外に駐車し，外部事象防護対象施設に対し離隔距離があることから，飛散防止対策は実施しない。

＜仮設足場＞

・竜巻による風圧力により仮設足場の各部材が飛散しないよう，緊結等の適切な飛散防止対策を実施。

＜金属製屋根・外壁＞

・竜巻による風圧力や気圧差により破損することで外部事象防護対象施設への影響が考えられる屋根及び外壁に対し，ボルト増し打ちをすることで，屋根及び外壁の補強を実施。

【防護対策】

○設計飛来物によって損傷する可能性がある外部事象防護対象施設について，下記のとおり防護対策を実施。影響評価同様，仮設足場に飛散防止対策を講じた場合，設計飛来物は高さ 10m 迄影響を及ぼすものとして，原則高さ 10m 以下を対策範囲と設定。仮設足場に飛散防止対策を講じない場合には，建物等のどの高さへの衝突も考慮し対策を実施。

＜竜巻防護ネットによる防護＞

図 3.2.1.4 竜巻防護ネットの設置イメージ

・設計飛来物から防護対象設備を護るため，防護対象設備近傍にある建屋開口部の換気空調系ルーバ等へ鉄板又は竜巻防護ネットを設置。

・竜巻防護ネットは設計飛来物の運動エネルギーを吸収可能な設計にするとともに，小径の飛来物※のすり抜けを防止する設計とする。

※：防護ネットをすり抜ける可能性があるため設計飛来物として選定した砂利を除く。

＜軽油タンク，非常用ディーゼル発電機燃料移送系の防護＞

・軽油タンクは，設計飛来物による貫通はしないが，更なる設計上の裕度を確保するため，鋼板肉厚を厚くしたタンクにリプレースを実施。

・非常用ディーゼル発電機燃料移送系（ポンプ，配管等）については，設計飛来物からの防護対策として防護板等を設置。

＜鋼製扉による防護＞

・設計飛来物の貫通により外部事象防護対象施設への影響が考えられる扉に対し，鋼製扉にリプレースを実施。

・鋼製扉は，設計飛来物の貫通力に耐える設計とする。

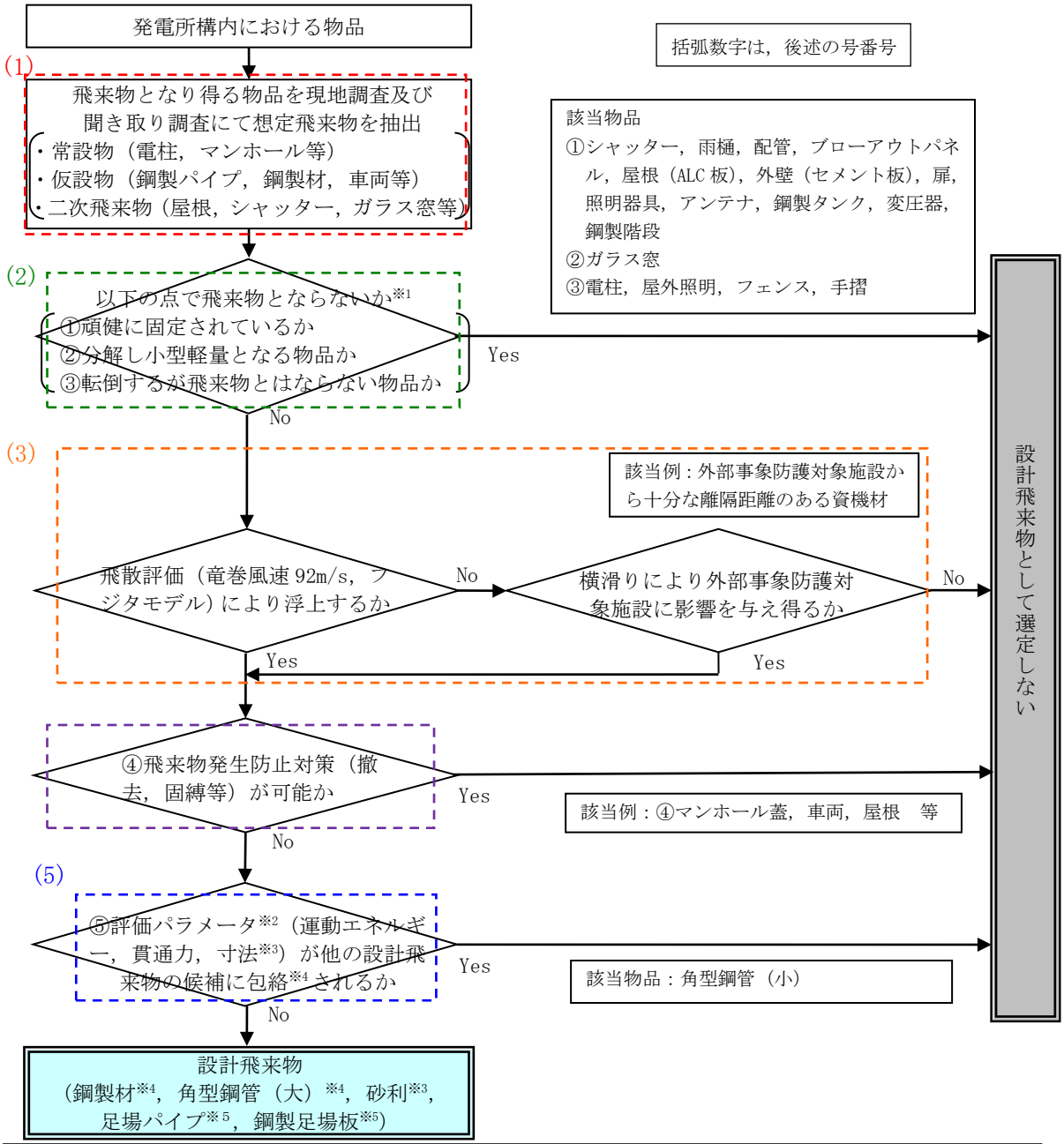
＜格納容器圧力逃がし装置の防護＞

・竜巻による損傷を考慮した場合でも，代替設備（代替循環冷却）により機能維持可能であるが，飛来物により機能喪失しないように防護対策を実施。

図 3.2.1 竜巻影響評価及び竜巻対策（防護対策，飛来物発生防止対策）の概要

3.3 設計飛来物の選定について

発電所構内における竜巻飛来物となり得る物品を網羅的に調査し，それらの中から代表性をもたせた設計飛来物を，図 3.3.1 のフローに基づき選定した。



※1：過去の事例を参考に判定
※2：評価対象施設等に想定される損傷モードより，評価パラメータを設定
※3：非常用換気空調系ルーバへの防護対策として設置する竜巻防護ネットを通過する可能性があるものを抽出
※4：仮設足場に飛散防止対策を講じた場合を考慮し，運動エネルギー，貫通力が仮設足場材（足場パイプ，鋼製足場板）に次ぐ飛来物についても抽出
※5：仮設足場に飛散防止対策を講じた場合は除く。

図 3.3.1 設計飛来物の選定フロー

(1) 飛来物調査

柏崎刈羽原子力発電所おける飛来物に関する現地調査は，平成 25 年 8 月 20 日，8 月 27 日，9 月 12 日，平成 27 年 3 月 13 日に実施した。調査では，常設物，仮設物のうち飛来物になり得る物品，及び二次飛来物（設置状況等から風圧や飛散による被害を受けて飛来物となり得る物）を抽出した。調査範囲は，米国 Regulatory Guide を参考にするとともに，後述の代表的な飛来物の飛散評価結果において，代表的な飛来物の飛散距離は最大でも 400m 程度であることを踏まえ，外部事象防護対象施設から半径 800m の範囲（図 3.3.2）とした。

また，持ち込み資機材等（夏場や冬場に屋外作業の準備等のために使用する休憩所（仮設小屋）や定期検査中に使用する仮設足場材等）の仮設物について，現地調査にて確認した結果の網羅性を高めることを目的に協力企業への聞き取りも実施し，現地調査で確認した飛来物源と大きな相違がないことを確認している。

防護上の観点又は機密に係わる事項を含む為，公開できません

図 3.3.2 調査範囲及び区分

表 3.3.1 調査エリア区分

エリア番号	エリア名称
①	5～7 号炉周辺エリア
②	大湊側高台周辺エリア
③	中央土捨場エリア
④	第二企業センター棟周辺エリア
⑤	固体廃棄物貯蔵庫周辺エリア
⑥	敷地北側エリア
⑦	取水口・放水口周辺エリア

飛来物調査の結果として，次々頁より，柏崎刈羽原子力発電所において確認した飛来物源をエリアごとに示す。

また，表 3.3.2 に，飛来物調査の結果を踏まえ，飛来物の形状（棒状，板状，塊状），サイズ（大，中，小）及び柔※1，剛※1 等の特徴を踏まえ飛来物源を詳細に分類した結果を示す。

※1：柔（木製又は中空状，複数の材からなる），剛（コンクリート又は鋼製で密実，単体からなる）

表 3.3.2 代表的な飛来物の抽出結果

		棒状			板状			塊状		
		大	中	小	大	中	小	大	中	小
常設物	剛	－	電柱	－	－	－	ﾏﾝﾎｰﾙ蓋	－	－	－
	柔	－	－	－	－	－	－	－	－	－
仮設物	剛	ｺﾝｸﾘｰﾄ柱	鉄骨 (ｶﾞｲﾄﾞ)鋼製材※ 角型鋼管（小,大) 鋼材	(ｶﾞｲﾄﾞ)鋼製ﾊﾟｲﾌﾟ※ 鋼製車止め ｶﾞｽﾎﾞﾝﾍﾞ	ﾄﾚｰﾗｰ荷台	ｸﾚｰﾝｳｪｲﾄ（2t) (ｶﾞｲﾄﾞ)ｺﾝｸﾘｰﾄ板※ ｺﾝｸﾘｰﾄ板 鋼矢板 鋼製架台 敷鉄板(薄,厚)	ｸﾚｰﾝｳｪｲﾄ（250kg,500kg) 鋼製看板 仮設分電盤	－	鋼製ﾎﾞﾋﾞﾝ ｸﾚｰﾝｳｪｲﾄ（5t) 発電機(大)	ｺﾝｸﾘｰﾄﾌﾞﾛｯｸ 砂利 発電機(小)
	柔	代替原子炉補機冷却系	－	－	－	－	－	乗用車 (ｶﾞｲﾄﾞ)ﾄﾗｯｸ※ ﾄﾗｯｸ 消防車 電源車 ﾊﾞｽ ﾄﾞﾗﾑ缶 ｸﾚｰﾝ車 ﾎｲｰﾙﾛｰﾀﾞ ﾌﾟﾚﾊﾌﾞ小屋 仮設小屋 (ｶﾞｲﾄﾞ)ｺﾝﾃﾅﾎﾞｯｸｽ※ 鋼製ﾀﾝｸ ﾌｫｰｸﾘﾌﾄ	木製ﾎﾞﾋﾞﾝ 軽乗用車 産廃ｺﾝﾃﾅ 自動販売機	空調室外機
二次飛来物	剛	－	仮設足場ﾊﾟｲﾌﾟ(4m)	仮設足場ﾊﾟｲﾌﾟ(2m)	屋根材（ALC板) 外壁(ｾﾒﾝﾄ板) ﾌﾞﾛｰｱｳﾄﾊﾟﾈﾙ	扉 仮設足場板(鋼製)	－	－	－	－
	柔	屋根材(鋼板)	雨樋	－	ｼｬｯﾀｰ 外壁(鋼板)	仮設足場板(ｱﾙﾐ)	－	－	－	照明器具

※：ガイドにおいてサイズ及び質量が記載されている物品

①5～7 号建屋周辺エリア（常設・仮設物）

①-1 仮設小屋

①-2 仮設小屋

①-3 発電機

①-4 鋼板

①-5 送水用配管蓋

①-6 仮設分電盤

①-7 敷鉄板

①-8 鋼製パイプ

①-9 仮設足場板

①-10 配電盤

①-11 仮設小屋

①-12 鋼製材

①-13 空調室外機

①-14 消火器箱（小），（大）

①-15 鋼製ボビン

①-16 マンホール蓋

①-17 マンホール蓋

①-18 グレーチング

①-19 ホース格納箱

①-20 分電盤

①-21 チェッカープレート

①-22 乗用車

①-23 鋼製架台

①-24 FRP タンク
(FRP=繊維強化プラスチック)

①-25 カラーコーン

①-26 消火器

①-27 仮設小屋

①-28 角型鋼管（小），（大）

①-29 鋼製蓋

①-30 鉄骨

①-31 鋼製タンク

①-32 工事看板

①-33 工事看板

①-34 鉄骨

①-35 チェッカープレート

①-36 変圧器

①-37 変圧器

①-38 常設代替交流電源設備
（ガスタービン発電機）

①-39 軽自動車

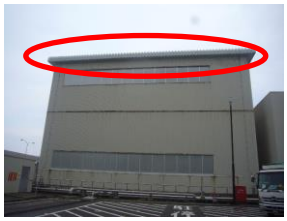
（二次飛来物）

①-1 仮設足場

①-2 仮設足場

①-3 外壁

①-4 屋根（ポリカーボネー



①-5 屋根

①-6 屋根

①-7 猿梯子

①-8 シャッター

①-9 庇，猿梯子，扉

①-10 屋根

①-11 窓ガラス

①-12 屋根（ガラス）

①-13 シャッター
（大物搬入口）

①-14 屋根

①-15 ルーバ

①-16 屋根，シャッター

①-17 アンテナ

①-18 配管

①-19 ブローアウトパネル

①-20 扉，換気フード，
猿梯子

①-21 拡声器

①-22 外壁

①-23 シャッター，配管

①-24 換気フード

①-25 配管

①-26 屋根

①-27 階段

①-28 階段

①-29 アンテナ

①-30 猿梯子

①-31 配管

①-32 扉，手摺

②大湊側高台周辺エリア（常設・仮設物）

②-1 コンクリート柱

②-2 発電機

②-3 発電機

②-4 木製ボビン

②-5 鋼製ボビン

②-6 カーブミラー

②-7 木板

②-8 ホイールローダ

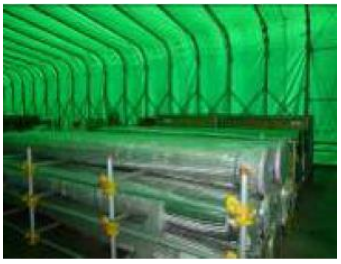
②-9 可搬型代替注水ポンプ
（消防車）

②-10 可搬型代替交流電源設備
（電源車）

②-11 分電盤

②-12 木材

②-13 鋼製ボビン



②-14 ホース

②-15 ホース

②-16 金属容器

②-17 鋼矢板

②-18 鋼製コンテナ

②-19 プレハブ小屋

②-20 プレハブ小屋

②-21 自動販売機

②-22 鋼製倉庫

②-23 大容量送水車

②-24 泡原液配送車

②-25 放水砲

②-26 代替原子炉捕機冷却系

②-27 タンクローリ（大）

②-28 タンクローリ（小）

②-29 放射能観測車

②-30 クレーン車

（二次飛来物）

②-1 シャッター

②-2 屋根

②-3 扉

②-4 排気フード

③中央土捨場エリア（常設・仮設物）

③-1 ﾁｪｯｶｰﾌﾟﾚｰﾄ

③-2 鋼製車止め
（単管バリケード）

③-3 仮設分電盤

③-4 消火器

③-5 クッションドラム

③-6 ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ

③-7 ｺﾝｸﾘｰﾄ板（排水溝蓋）

③-8 ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ

③-9 鋼製ﾌｪﾝｽ

③-10 消火栓蓋

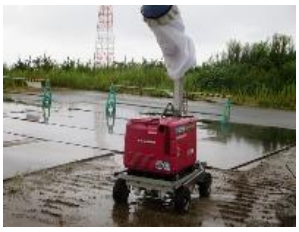
③-11 ﾁｪｯｶｰﾌﾟﾚｰﾄ

③-12 鋼製ﾌｪﾝｽ

③-13 移動式投光器
（バルーンライト）

③-14 建設重機
（バックホー）

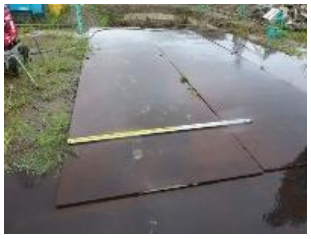
③-15 敷鉄板



③-16 移動式投光器
（バルーンライト）

③-17 発電機

③-18 高圧洗浄機，
水タンク



③-19 敷鉄板

③-20 産廃ｺﾝﾃﾅ

③-21 ﾌﾟﾚﾊﾌﾞ小屋

③-22 仮設小屋

③-23 プレハブ小屋

③-24 プレハブ小屋

③-25 梯子

③-26 自動販売機

③-27 ﾌﾟﾚﾊﾌﾞ小屋

③-28 乗用車

③-29 道路標識

③-30 木材

③-31 カーブミラー

③-32 建設重機
(バックホー)

③-33 工事看板

③-34 敷鉄板

③-35 鋼製ﾊﾟｲﾌﾟ

③-36 鉄塊

③-37 フレックス管

③-38 ﾄﾗｯｸ

③-39 ﾏﾝﾎｰﾙ蓋

③-40 分電盤

③-41 仮設足場板

③-42 仮設足場枠組材

③-43 木材

③-44 テント

③-45 信号機

③-46 仮設ﾄｲﾚ

③-47 ｺﾝｸﾘｰﾄﾌﾞﾛｯｸ

③-48 ベンチ

③-49 ドラム缶

（二次飛来物）

③-1 窓ガラス

③-2 階段，窓ガラス，扉

④第二企業センター棟周辺エリア（常設・仮設物）

④-1 ﾏﾝﾎｰﾙ蓋

④-2 ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ

④-3 ｺﾝｸﾘｰﾄ板
（排水溝蓋）

④-4 土のう袋

④-5 分電盤

④-6 屋外照明

④-7 乗用車

④-8 道路標識

④-9 配電盤

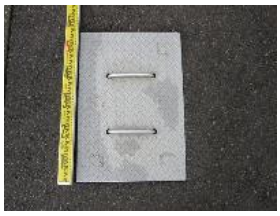
④-10 ﾌｪﾝｽ（単管柵）

④-11 ｱﾝﾃﾅ

④-12 砂利

④-13 鋼製車止め

④-14 空調室外機



④-15 ﾁｪｯｶｰﾌﾟﾚｰﾄ

④-16 排水溝蓋

④-17 消火器箱（小）

④-18 ｺﾝｸﾘｰﾄﾌﾞﾛｯｸ

④-19 ｸﾚｰﾝｳｪｲﾄ

④-20 FRP タンク
(FRP=繊維強化プラスチック)

④-21 制御盤

④-22 乗用車

④-23 鋼製看板

④-24 ｺﾝｸﾘｰﾄﾌﾞﾛｯｸ

④-25 鋼管

④-26 ﾌﾟﾚﾊﾌﾞ小屋

④-27 ｽﾃｯﾌﾟ

④-28 自動販売機

④-29 ｺﾝｸﾘｰﾄﾌﾞﾛｯｸ

④-30 仮設鉄骨

④-31 木製ﾎﾞﾋﾞﾝ

④-32 ﾄﾗｯｸ

④-33 ﾊﾞｽ

④-34 角型鋼管

④-35 産廃コンテナ

④-36 産廃コンテナ

④-37 屋外照明

④-38 鋼製架台

④-39 アミコンテナ

④-40 鋼製ﾌｪﾝｽ

④-41 鋼製車止め
(単管バリケード)

④-42 木材

④-43 H 鋼

④-44 鋼製ﾊﾟｲﾌﾟ

④-45 砂利

④-46 産廃ｺﾝﾃﾅ

④-47 自動販売機

④-48 ｵｲﾙ缶

④-49 ｶﾞｽﾎﾞﾝﾍﾞ

④-50 仮設小屋

④-51 乗用車

④-52 角型鋼管

④-53 ｱﾐｺﾝﾃﾅ

④-54 ﾌﾟﾚﾊﾌﾞ車庫

④-55 鋼製ﾌｪﾝｽ

④-56 ﾏﾝﾎｰﾙ蓋

④-57 鋼製ﾌｪﾝｽ

④-58 流し台

④-59 ﾄﾚｰﾗｰ

④-60 ﾄﾚｰﾗｰ荷台

（二次飛来物）

④-1 屋根，外壁

④-2 窓ガラス

④-3 シャッター

④-4 雨樋

④-5 拡声器

④-6 配管

④-7 拡声器，換気フード

④-8 シャッター

④-9 照明器具

④-10 屋根，外壁

④-11 窓ガラス

④-12 窓ガラス

④-13 照明器具

④-14 ルーバ

④-15 猿梯子

④-16 煙突

④-17 拡声器

④-18 拡声器

④-19 庇

④-20 換気フード

④-21 扉

④-22 換気フード

④-23 扉

④-24 屋根，外壁

④-25 屋根

⑤固体廃棄物貯蔵庫周辺エリア（常設・仮設物）

⑤-1 ﾄﾗｯｸ（ﾕﾆｯｸ車）

⑤-2 ﾓｰﾀｰ付き排気ﾌｧﾝ

⑤-3 屋外照明

⑤-4 鋼製車止め
（単管バリケード）

⑤-5 ｺﾝｸﾘｰﾄ板

⑤-6 ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ

⑤-7 ｶﾞｰﾄﾞﾚｰﾙ

⑤-8 ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ

⑤-9 ﾌﾟﾚﾊﾌﾞ小屋

⑤-10 鋼製フェンス

⑤-11 鋼板

⑤-12 防火標識

⑤-13 ﾏﾝﾎｰﾙ蓋

⑤-14 敷鉄板

⑤-15 制御盤

⑤-16 屋外照明

⑤-17 立て看板

⑤-18 ｺﾝﾃﾅﾎﾞｯｸｽ

⑤-19 ｺﾝﾃﾅﾎﾞｯｸｽ

⑤-20 鋼製ﾎﾞﾋﾞﾝ

（二次飛来物）

⑤-1 配管

⑤-2 シャッター，窓ガラス

⑤-3 換気フード

⑤-4 排気フード

⑤-5 シャッター

⑤-6 配管，雨樋

⑤-7 シャッター，扉

⑤-8 猿梯子

⑤-9 鋼製階段

⑤-10 排気フード

⑤-11 屋根，壁

⑤-12 窓ガラス，屋根

⑤-13 屋根，シャッター

⑥敷地北側エリア（常設・仮設物）

⑥-1 電源盤

⑥-2 マンホール蓋

⑥-3 鋼鉄看板

⑥-4 カラーコーン

⑥-5 立ち馬（馬脚立）

⑥-6 クッションドラム

⑥-7 敷鉄板

⑥-8 鋼製車止め
(単管バリケード)

⑥-9 土のう袋

⑥-10 トラック
(ユニック車)

⑥-11 乗用車

⑥-12 仮設小屋

⑥-13 空調室外機

⑥-14 コンクリートブロック

⑥-15 マンホール蓋

⑥-16 グレーチング

⑥-17 屋外照明

⑥-18 消火器箱(大)

⑥-19 樹木

⑥-20 避雷器収納箱

⑥-21 工事看板

⑥-22 空調室外機

⑥-23 チェッカープレート

⑥-24 消火器箱（小）

⑥-25 電話箱

⑥-26 カラーコーン

⑥-27 空調室外機

⑥-28 車止めポール

⑥-29 乗用車

⑥-30 木製ボビン

⑥-31 電柱

⑥-32 鋼材

⑥-33 鋼管

⑥-34 トラック

⑥-35 フォークリフト

⑥-36 乗用車

⑥-37 鋼製看板

⑥-38 コンクリート板

（二次飛来物）

⑥-1 扉，ルーバ

⑦取水口・放水口周辺エリア（常設・仮設物）

⑦-1 グレーチング

⑦-2 マンホール蓋

⑦-3 カラーコーン

⑦-4 空調室外機

⑦-5 排水溝蓋

⑦-6 鋼材

⑦-7 鋼管

⑦-8 コンクリート板

⑦-9 発電機

⑦-10 一輪車

⑦-11 仮設小屋

⑦-12 乗用車

⑦-13 脚立

⑦-14 配電盤

⑦-15 砂利

⑦-16 テント

⑦-17 敷鉄板

⑦-18 鋼製車止め
(単管バリケード)

⑦-19 工事看板

⑦-20 鋼製看板

⑦-21 屋外照明

⑦-22 マンホール蓋

⑦-23 カラーコーン

⑦-24 鋼製ネット

⑦-25 フレックス管

⑦-26 木材

⑦-27 廃材コンテナ

⑦-28 消火器箱（大）

⑦-29 台車

⑦-30 仮設足場板

（二次飛来物）

⑦-1 扉

⑦-2 扉

(2) 固定状況等を踏まえた抽出

(1)で抽出した結果を踏まえ，過去の被害事例等（別紙 1）を参考に，以下の観点のいずれにも当てはまらない物品を設計飛来物候補として抽出した。(表 3.3.3)

①溶接やボルトにより頑健に固定されているか

②分解し小型軽量となる物品か

③竜巻の影響により転倒はするが，飛来物とはならない物品か

(3) 代表的な飛来物の飛散評価

(2)で抽出をした代表的な飛来物に対し，設計竜巻の最大風速 92m/s，風速場モデルとしてフジタモデルを適用した場合における飛散評価を実施し,浮上する物品を抽出した結果を表 3.3.3 に示す。飛来物の初期高さは，プラントウォークダウンにて確認した飛来物の設置場所と外部事象防護対象施設との高低差を踏まえ設定した。但し，仮設物のように設置場所の特定が困難な物品については,外部事象防護対象施設に到達する可能性のある初期高さのうち，最大の高さを飛来物の初期高さとして設定した。(別紙 2)

そのため，飛来物の飛散距離については，上記で設定した飛来物の初期高さから外部事象防護対象施設の高さまでに飛散した距離を設定した。(例えば，初期高さ 30m における飛散評価であれば，初期高さ 30m から 0m 迄の飛散距離となる)

また，飛来物の速度については，ガイドに基づき，飛散評価により求まる飛散した際の最大水平速度及び最大鉛直速度を設定した。

なお,浮上しないが横滑りにより外部事象防護対象施設に影響を与え得る物品については,浮上する物品同様，(4)以降の結果を踏まえ設計飛来物として選定する必要があるかを確認する。

(4) 飛来物発生防止対策の可否を踏まえた抽出

(3)で抽出した結果を踏まえ，固縛，撤去等の飛来物発生防止対策が可能かどうかを考慮し，設計飛来物の候補を抽出した。(表 3.3.3 右端欄参照)

(5) 評価パラメータの代表性の確認

(4)で抽出した結果に対し，竜巻及び飛来物により想定される評価対象施設の損傷モードより設定した評価パラメータ（運動エネルギー，貫通力，寸法）が，最大となる物品を（寸法については最小)，設計飛来物として選定する。(表 3.3.3 黄色箇所参照)

表 3.3.3 代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果（1/6）

（常設・仮設物）

分類		名称	長さ[m]	幅[m]	高さ[m]	質量[kg]	空力パラメータ[m^2/kg]	最大水平速度[m/s]	最大鉛直速度[m/s]	運動エネルギー[kJ]（水平）	運動エネルギー[kJ]（鉛直）	最大飛距離[m]	最大飛散高さ[m]	コンクリートの貫通限界厚さ※2[cm]		鋼板の貫通限界厚さ※3[mm]		浮き上がり有無	以下の点で飛来物とならないか※4 (4)飛来物発生防止対策（撤去，固縛等）が可能か (5)他の飛来物に包絡されるか
														水平	鉛直	水平	鉛直		
														t_{p_h}	t_{p_v}	$T_{_h}$	$T_{_v}$		
剛飛来物	棒状	（ガイド）鋼製パイプ※1	2	0.05	0.05	8.4	0.0058	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	(4)浮上しないが，外部事象防護対象施設との離隔をとる又は固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。
		鋼製車止め	1.3	0.217	0.217	90	0.0018	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	(4)浮上しないが，外部事象防護対象施設との離隔をとる又は固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。
		ガスボンベ	1.515	0.232	0.232	95	0.0021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
		鉄骨	2	0.34	0.25	156	0.0034	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
		（ガイド）鋼製材※1	4.2	0.3	0.2	135	0.0066	10	7	6	3	9	0.08	6	4	4	2	○	設計飛来物に選定する。
		角型鋼管（小）	4	0.06	0.06	12	0.0169	15	7	2	0.23	19	0.13	5	2	5	2	○	(5)角型鋼管（大）に包絡されることから，設計飛来物として選定しない。
		角型鋼管（大）	4	0.1	0.1	28	0.0118	16	7	4	0.55	20	0.15	6	3	6	2	○	設計飛来物に選定する。
		鋼材	6	0.3	0.3	558	0.0027	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	(4)浮上しないが，外部事象防護対象施設との離隔をとる又は固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。
		コンクリート柱	12	0.252	0.252	900	0.0017	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	

※1：ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品

※2：修正 NDRC 式及び，Degen 式を用いて算出

※3：発電用原子炉施設のタービンミサイルの評価に用いられている BRL 式にて算出

※4：評価対象施設に想定される損傷モードにより，評価パラメータを設定

表 3.3.3 代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果（2/6）

（常設・仮設物）

分類		名称	長さ[m]	幅[m]	高さ[m]	質量[kg]	空力パラメータ[m^2/kg]	最大水平速度[m/s]	最大鉛直速度[m/s]	運動エネルギー[kJ]（水平）	運動エネルギー[kJ]（鉛直）	最大飛距離[m]	最大飛散高さ[m]	コンクリートの貫通限界厚さ※2[cm]		鋼板の貫通限界厚さ※3[mm]		浮き上がり有無	以下の点で飛来物とならないか※4 (4)飛来物発生防止対策（撤去，固縛等）が可能か (5)他の飛来物に包絡されるか
														水平	鉛直	水平	鉛直		
														t_{p_h}	t_{p_v}	$T_{_h}$	$T_{_v}$		
剛飛来物	塊状	コンクリートブロック	0.65	0.65	0.65	660	0.0013	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	(4)浮上しないが，外部事象防護対象施設との離隔をとる又は固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。
		クレーンウェイト 5t	1.5	1.28	0.4	5000	0.0005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
		鋼製ボビン	2.6	2.6	1.6	900	0.0101	46	23	938	227	180	5	26	14	4	2	○	(4)固縛等の飛来物発生防止対策が可能なことから，設計飛来物として選定しない。
		発電機（大）	4	1.8	1.4	4920	0.0021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
		発電機（小）	0.91	0.53	0.7	125	0.008	27	7	43	3	36	2	10	3	2	1	○	
		砂利	0.04	0.04	0.04	0.2	0.016	14	7	0.02	0.004	18	0.08	1	1	1	1	○	設計飛来物に選定する。

※1：ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品
※2：修正 NDRC 式及び，Degen 式を用いて算出
※3：発電用原子炉施設のタービンミサイルの評価に用いられている BRL 式にて算出
※4：評価対象施設に想定される損傷モードにより，評価パラメータを設定

表 3.3.3 代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果（3/6）

（常設・仮設物）

分類		名称	長さ[m]	幅[m]	高さ[m]	質量[kg]	空力パラメータ[m^2/kg]	最大水平速度[m/s]	最大鉛直速度[m/s]	運動エネルギー[kJ](水平)	運動エネルギー[kJ](鉛直)	最大飛距離[m]	最大飛散高さ[m]	コンクリートの貫通限界厚さ※2[cm]		鋼板の貫通限界厚さ※3[mm]		浮き上がり有無	以下の点で飛来物とならないか※4 (4)飛来物発生防止対策（撤去，固縛等）が可能か (5)他の飛来物に包絡されるか
														水平 t_{p_h}	鉛直 t_{p_v}	水平 $T_{_h}$	鉛直 $T_{_v}$		
剛飛来物	板状	鋼製看板	1.4	1	0.05	40	0.0246	20	7	8	0.78	28	0.16	6	3	2	1	○	(4)固縛等の飛来物発生防止対策が可能なことから，設計飛来物として選定しない。
		マンホール蓋	0.65	0.65	0.05	54	0.0046	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
		仮設分電盤	1	0.2	1.5	60	0.02	57	21	98	13	223	15	15	6	4	1	○	
		敷鉄板(薄)	6	1.5	0.02	1404	0.0044	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	(4)浮上しないが，外部事象防護対象施設との離隔をとる又は固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。
		敷鉄板(厚)	6.1	1.53	0.03	2200	0.0029	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
		クレーンウェイト 2t	1.5	1.1	0.22	2000	0.0007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
		クレーンウェイト 250kg	1.1	0.9	0.07	250	0.0029	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
		（ガイド）コンクリート板※1	1.5	1	0.15	540	0.0022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
		クレーンウェイト 500kg	1.3	1.1	0.1	500	0.0021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
		鋼矢板	2	2	0.2	960	0.0032	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
		鋼製架台	3.8	1.8	0.2	10670	0.0005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
		コンクリート板	3.95	0.98	0.15	1400	0.0021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
		トレーラー荷台	9	2.5	0.25	4500	0.0036	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	

※1：ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品
※2：修正 NDRC 式及び，Degen 式を用いて算出
※3：発電用原子炉施設のタービンミサイルの評価に用いられている BRL 式にて算出
※4：評価対象施設に想定される損傷モードにより，評価パラメータを設定

表 3.3.3 代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果（4/6）

（常設・仮設物）

分類		名称	長さ[m]	幅[m]	高さ[m]	質量[kg]	空力パラメータ[m^2/kg]	最大水平速度[m/s]	最大鉛直速度[m/s]	運動エネルギー[kJ]（水平）	運動エネルギー[kJ]（鉛直）	最大飛距離[m]	最大飛散高さ[m]	コンクリートの貫通限界厚さ※2[cm]		鋼板の貫通限界厚さ※3[mm]		浮き上がり有無	以下の点で飛来物とならないか※4 (4)飛来物発生防止対策（撤去，固縛等）が可能か (5)他の飛来物に包絡されるか
														水平	鉛直	水平	鉛直		
														t_{p_h}	t_{p_v}	$T_{_h}$	$T_{_v}$		
柔飛来物	棒状	代替原子炉捕機冷却系	15.1	2.49	1.565	35450	0.0008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	(4)浮上しないが，外部事象防護対象施設との離隔をとる又は固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。
	塊状	ドラム缶	0.8	0.8	1.3	40	0.0431	67	18	89	6	235	26	12	4	2	1	○	(4)固縛等の飛来物発生防止対策が可能なことから，設計飛来物として選定しない。
		木製ボビン	2	2	1.2	305	0.0174	54	21	441	67	217	8	20	9	3	1	○	
		産廃コンテナ	2.915	1.6	0.925	650	0.0091	34	23	367	164	107	2	21	15	3	2	○	
		仮設小屋	5.81	2.34	2.45	1300	0.0173	56	22	2039	307	247	21	35	15	5	2	○	
		乗用車	4.9	1.88	1.87	2150	0.0068	39	24	1568	576	143	4	35	23	5	3	○	
		軽乗用車	3.395	1.475	1.625	800	0.0108	48	23	913	200	212	6	28	15	5	2	○	
		（ガイド）コンテナボックス※1	6	2.6	2.4	2300	0.0106	50	23	2795	591	220	12	41	21	6	2	○	
		フォークリフト	3.69	1.15	1.995	2500	0.0038	21	7	529	53	30	0.6	24	9	3	1	○	
		プレハブ小屋	5	5	3	4400	0.0084	47	24	4765	1201	204	11	45	24	6	2	○	
		トラック	8.445	2.23	2.465	3790	0.008	46	24	3883	1025	188	7	49	27	8	3	○	

※1：ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品
※2：修正 NDRC 式及び，Degen 式を用いて算出
※3：発電用原子炉施設のタービンミサイルの評価に用いられている BRL 式にて算出
※4：評価対象施設に想定される損傷モードにより，評価パラメータを設定

表 3.3.3 代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果（5/6）

（常設・仮設物）

分類		名称	長さ[m]	幅[m]	高さ[m]	質量[kg]	空力パラメータ[m^2/kg]	最大水平速度[m/s]	最大鉛直速度[m/s]	運動エネルギー[kJ]（水平）	運動エネルギー[kJ]（鉛直）	最大飛距離[m]	最大飛散高さ[m]	コンクリートの貫通限界厚さ※2[cm]		鋼板の貫通限界厚さ※3[mm]		浮き上がり有無	以下の点で飛来物とならないか※4 (4)飛来物発生防止対策（撤去，固縛等）が可能か (5)他の飛来物に包絡されるか
														水平	鉛直	水平	鉛直		
														t_{p_h}	t_{p_v}	$T_{_h}$	$T_{_v}$		
柔飛来物	塊状	（ガイド）トラック※1	5	1.9	1.3	4750	0.0026	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	(4)浮上しないが，外部事象防護対象施設との離隔をとる又は固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。
		電源車	6.88	2.2	3.04	7960	0.0036	25	24	2427	2211	86	2	40	39	5	5	○	(4)固縛等の飛来物発生防止対策が可能なことから，設計飛来物として選定しない。
		消防車	7.11	2.28	2.74	9210	0.0031	17	24	1321	2561	53	0.27	31	42	4	6	○	
		バス	11.99	2.49	3.75	12100	0.0047	38	24	8647	3464	161	5	67	45	10	6	○	
		ホイールローダ	11.15	3.19	3.25	24000	0.0023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	(4)浮上しないが，外部事象防護対象施設との離隔をとる又は固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。
		クレーン車	12.29	3	3.74	39635	0.0016	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	
		自動販売機	0.73	1.83	1.36	365	0.0088	41	23	296	94	142	3	20	12	4	2	○	(4)固縛等の飛来物発生防止対策が可能なことから，設計飛来物として選定しない。
		空調室外機	0.8	0.3	0.6	40	0.015	40	22	31	10	165	2	9	6	2	1	○	

※1：ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品
※2：修正 NDRC 式及び，Degen 式を用いて算出
※3：発電用原子炉施設のタービンミサイルの評価に用いられている BRL 式にて算出
※4：評価対象施設に想定される損傷モードにより，評価パラメータを設定

表 3.3.3 代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果（6/6）

（二次飛来物）

分類		名称	長さ[m]	幅[m]	高さ[m]	質量[kg]	空力パラメータ[m^2/kg]	最大水平速度[m/s]	最大鉛直速度[m/s]	運動エネルギー[kJ]（水平）	運動エネルギー[kJ]（鉛直）	最大飛距離[m]	最大飛散高さ※1[m]	コンクリートの貫通限界厚さ※2[cm]		鋼板の貫通限界厚さ※3[mm]		浮き上がり有無	以下の点で飛来物とならないか※4 (4)飛来物発生防止対策（撤去，固縛等）が可能か (5)他の飛来物に包絡されるか
														水平 t_{p_h}	鉛直 t_{p_v}	水平 $T_{_h}$	鉛直 $T_{_v}$		
剛飛来物	棒状	鋼製パイプ（足場用2m）	2	0.05	0.05	6	0.0088	42	38	5	4	262	0.64+(148)	8	7	11	9	○	(5)鋼製パイプ（足場用4m）に包絡されることから，設計飛来物として選定しない。
		鋼製パイプ（足場用4m）	4	0.05	0.05	11	0.0087	42	38	10	8	261	0.57+(148)	11	10	17	15	○	設計飛来物として選定する。※6
	板状	足場板（鋼製）	4	0.25	0.04	14	0.0525	55	18	21	3	373	52+(148)	12	5	6	2	○	設計飛来物として選定する。※6
柔飛来物	棒状	屋根材（５号炉循環水ポンプ建屋：鋼板）※5	13.18	0.519	0.2	90	0.0431	61	18	165	14	237	48+(22)	22	8	7	2	○	(4)固縛等の飛来物発生防止対策が可能なことから，設計飛来物として選定しない。
	板状	足場板（アルミ）	4	0.24	0.029	11	0.0683	54	16	15	2	394	57+(148)	11	4	5	1	○	(5)足場板（鋼製）に包絡されることから，設計飛来物として選定しない。
		外壁　（５号炉循環水ポンプ建屋）※5	0.035	0.32	9.12	36	0.0578	69	15	85	5	271	59+(0)	22	6	13	2	○	(4)固縛等の飛来物発生防止対策が可能なことから，設計飛来物として選定しない。

※1：() 内の値は飛来物初期高さ（地面からの物品の高さ）
※2：修正 NDRC 式及び Degen 式を用いて算出
※3：発電用原子炉施設のタービンミサイルの評価に用いられている BRL 式にて算出
※4：評価対象施設に想定される損傷モードにより，評価パラメータを設定
※5：屋根，外壁は，外部事象防護対象施設に届き得る範囲のなかで飛散評価結果値が最大である５号炉循環水ポンプ建屋を使用
※6：仮設足場に飛散防止対策を講じた場合は除く。

(6) 設計飛来物の選定結果

(1)～(5)より，柏崎刈羽原子力発電所における設計飛来物は，表 3.3.4 のとおりとする。

仮設足場材（足場パイプ，鋼製足場板）については，設計飛来物候補の中で，足場パイプがコンクリートに対する貫通力（鉛直）及び鋼板に対する貫通力が最大であり，鋼製足場板が，運動エネルギー及びコンクリートに対する貫通力（水平）が最大であるが，仮設足場に飛散防止対策を講じた場合を考慮し，運動エネルギー，貫通力が仮設足場材（足場パイプ，鋼製足場板）に次ぐ飛来物についても抽出する。

仮設足場材（足場パイプ，鋼製足場板）に次ぐ飛来物として，鋼製材については，設計飛来物候補の中で，運動エネルギー，コンクリートに対する貫通力が最大であり，角型鋼管（大）については，鋼板に対する貫通力が最大である。

また，砂利については，非常用換気空調系ルーバへの防護対策として設置する竜巻防護ネットを通過する可能性があり，鋼製材，角型鋼管（大），足場パイプ及び鋼製足場板にて包含できないことから，設計飛来物として選定する。

表 3.3.4 柏崎刈羽原子力発電所における設計飛来物選定結果

飛来物の種類	砂利	鋼製材	角型鋼管（大）	足場パイプ	鋼製足場板
サイズ（m）	長さ×幅×奥行き 0.04×0.04×0.04	長さ×幅×奥行き 4.2×0.3×0.2	長さ×幅×奥行き 4×0.1×0.1	長さ×幅×奥行き 4×0.05×0.05	長さ×幅×奥行き 4×0.25×0.04
質量（kg）	0.2	135	28	11	14
最大水平速度（m/s）	14	10	16	42	55
最大鉛直速度 （m/s）	7	7	7	38	18
浮き上がり高さ （m）	0.08	0.08	0.15	0.57+(148)※1，※2	52+(148)※1，※2
飛散距離（m）	18	9	20	261	373

※1：（　）内の値は飛来物初期高さ（地面からの物品の高さ）

※2：大湊側における最も高所の 5 号炉主排気筒頂部に設置されている状況を想定し設定

なお，表 3.3.4 に示した鋼製材，角型鋼管（大），砂利，足場パイプ及び鋼製足場板の水平，鉛直速度については，竜巻風速場をフジタモデルとし飛来物の最大速度を求めた値を用いることとする。

別紙１

分解され小型軽量となる物品及び倒壊するが飛来物とならない物品等について

設計飛来物の選定フローにおいて，「分解し小型軽量となる物品」及び「倒壊するが飛来物とはならない物品」は設計飛来物として選定しないこととしている。これは，過去の主な竜巻の被害概要の調査結果から，分解され小型軽量となる物品及び倒壊するが飛来物とならない物品について検討を行った結果より確認をしている。

以下に平成 2 年以降の主な竜巻による被害概要を調査した文献から検討を行った結果を示す。「分解し小型軽量となる物品」，「倒壊するが飛来物とはならない物品」は柏崎刈羽原子力発電所における調査結果を念頭に被害状況を示す。

(1) 分解し小型軽量となる物品（確認対象：屋外屋根，シャッター，ガラス窓，仮設足場）

竜巻の被害概要調査結果において分解し小型軽量となる物品として，柏崎刈羽原子力発電所に設置の類似品として屋外屋根，シャッター，ガラス窓，仮設足場を確認した。屋外屋根，シャッター，ガラス窓，仮設足場の被害状況は以下のとおり。

a．屋外屋根の被害状況

図 1～5 に屋外屋根の被害状況を示す。これらより，屋外屋根については，F0～F3 の被害状況において形を保ったままではなく，分解された状態で飛来していることが分かる。また，厚みが薄く，受風面積が大きいため風の影響を受けやすいことから形状が変形（柔飛来物）しており，剛飛来物に比べ，貫通等の影響が小さくはなるが，外部事象防護対象施設への影響が考えられる屋根については，飛散防止対策を実施する。

牛舎の屋根東方向，柱・トタン板は西方向に飛散している

図 1　平成 16 年 6 月 27 日佐賀県にて発生した F2 竜巻による野外屋根の被害状況[1]

カーボード屋根の飛散及び骨組の損傷

カーボード屋根の破損

屋外トイレ屋根の損傷

図 2　平成 18 年 9 月 17 日宮崎県延岡市で発生した F2 竜巻による屋外屋根の被害状況[2]

折板の損傷

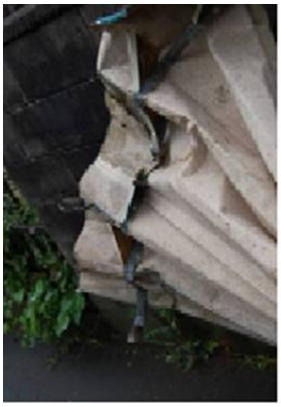
カーボードの被害

図 3　平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市で発生した F1 竜巻による屋外屋根の被害状況[3]

周囲の田に散乱した屋根ふき材

図 4　平成 24 年 2 月 1 日島根県出雲市にて発生した F0 竜巻による屋外屋根の被害状況[4]

飛散した鋼板製屋根材



飛散した折板屋根の状況

電線等に引っ掛かった飛来物（鋼板製屋根材）

図 5　平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市で発生した F3 竜巻による屋外屋根の被害状況[5]

b. シャッター

図 6～10 にシャッターの被害状況を示す。これらより，シャッターについては，F1～F3，EF5 の竜巻において形状は変形しているが，固定部が外れていないことが確認できる。

図 6　平成 20 年 5 月 25 日米国アイオワ州にて発生した EF5 竜巻によるシャッター被害状況[6]

シャッターの破損

図 7　平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市にて発生した F1 竜巻によるシャッターの被害状況[3]

シャッターの外れ

図 8　平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市で発生した F1(F2)竜巻によるシャッターの被害状況[7]

消防団施設のシャッターの被害状況

図 9　平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市にて発生した F3 竜巻によるシャッターの被害状況[5]

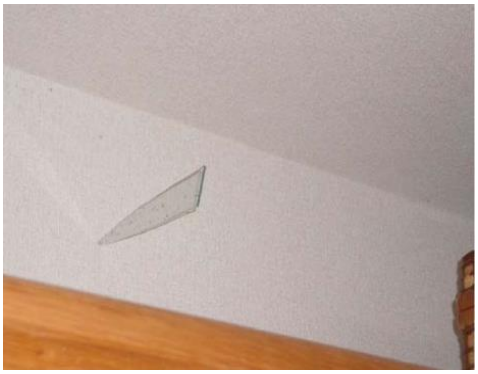
シャッターの被害

図 10　平成 25 年 9 月 2 日埼玉県発生した F2 竜巻によるシャッターの被害状況[8]

c．ガラス窓

図 11～16 にはガラス窓の被害状況を示す。これらより，ガラス窓については，F0～F3，EF5 の竜巻において損壊し，分解されていることが確認できる。分解された状態では，小型軽量となっており，設計飛来物である鋼製材若しくは砂利等に包含されると考えられる。

エントランスの窓ガラスの破損



破損した窓ガラス片の屋内壁面への突き刺さり

図 11　平成 18 年 9 月 17 日宮崎県延岡市で発生した F2 竜巻によるガラス窓の被害状況[2]

バスの窓ガラス破損

図 12　平成 20 年 5 月 25 日米国アイオワ州で発生した EF5 竜巻によるガラス窓の被害状況[6]

窓ガラスの損壊

窓ガラスの飛来物衝突痕

図 13　平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市での F1(F2)竜巻によるガラス窓の被害状況[7]

エントランスのガラス破損

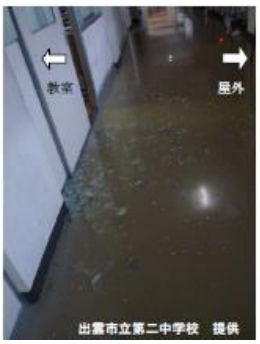
倉庫の窓ガラスと屋根の被害状況

窓ガラスの破損

図 14　平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市にて発生した F1 竜巻によるガラス窓の被害状況[3]

体育館窓ガラスの破損

(a) 教室



(b) 廊下

(c) 屋外に面した窓ガラス

本館 4 階の廊下と教室内のガラス破片の散乱状況

図 15　平成 24 年 2 月 1 日島根県出雲市にて発生した F0 竜巻によるガラス窓の被害状況[4]

店舗の窓ガラスの被害状況

ガラスへの飛来物の衝突痕

図 16　平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市で発生した F3 竜巻によるガラス窓の被害状況[5]

ｄ．仮設足場

図 17 には仮設足場の被害状況を示す。これらより，仮設足場については，F2 の竜巻において倒壊していることが確認できる。仮設足場材が飛散した場合を想定し，設計飛来物に選定する。ただし，飛散防止対策を講じた場合を除く。

仮設足場の倒壊

図 17　平成 18 年 9 月 17 日宮崎県延岡市で発生した F2 竜巻による仮設足場の被害状況[9]

(2) 柏崎刈羽原子力発電所の屋外屋根，シャッター，ガラス窓，仮設足場の状況

柏崎刈羽原子力発電所における屋外屋根の状況を図 18，シャッターの状況を図 19，ガラス窓の状況を図 20，仮設足場の状況を図 21 に示す。柏崎刈羽原子力発電所におけるこれらの物品の構造については，上記の被害にあった物品の構造と大きく変わらないことから，竜巻通過時には，同様の被害状況になると考えられる。

そのため，上記の被害状況からこれらの物品については，飛散をしていないシャッターを除き，二次飛来物となる可能性がある。仮設足場材については，飛散を想定し，設計飛来物に選定する。ただし，飛散防止対策を講じた場合を除く。また，ガラス窓については設計飛来物に包含されるが，屋外屋根については設計飛来物に包含されないことから，飛散防止対策を実施する。

図 18　柏崎刈羽原子力発電所における屋外屋根の状況

図 19　柏崎刈羽原子力発電所におけるシャッターの状況

図 20　柏崎刈羽原子力発電所におけるガラス窓の状況

図 21　柏崎刈羽原子力発電所における仮設足場の状況

(3) 倒壊するが飛来物とならない物品（確認対象：樹木，フェンス）

竜巻の被害概要調査結果において倒壊するが飛来物とならない物品で，柏崎刈羽原子力発電所に存在する類似品として樹木，フェンスを確認した。樹木，フェンスの被害状況は以下のとおり。

a．樹木

図 22～28 には樹木の被害状況を示す。これらより，樹木については，F1～F3 及び EF5 の被害状況において幹の折損，根の引き抜き等が見られるが折れた場合，引き抜かれた場合どちらにおいてもその場で倒壊しているのみであることが確認できる。これは竜巻の風荷重により，樹木が損壊を受けたあと，竜巻がすでに通り過ぎているためであると考えられ，樹木が折損，引き抜かれた後，更に竜巻により巻き上げられ，飛来物となることは考え難い。

倒木（南から見る）
倒れなかった樹木も点在している。

倒木（北西から見る）

図 22　平成 14 年 7 月 10 日群馬県境町で発生した F2 竜巻による樹木被害状況[10]

樹木の転倒

樹木の転倒（緑ヶ丘）

図 23　平成 18 年 9 月 17 日宮崎県延岡市で発生した F2 竜巻による樹木被害状況[2]

樹木の折損

図 24　平成 20 年 5 月 25 日米国アイオワ州にて発生した EF5 竜巻による樹木被害状況[6]

倒木（火打谷地区）

図 25　平成 21 年 7 月 19 日岡山県美作市にて発生した F2 竜巻による樹木被害状況[11]

倒木の被害

図 26　平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市にて発生した F1 竜巻による樹木被害状況[3]

倒木の折損

倒木の折損と鳥居の被害

樹木の倒木

倒木による社の倒壊

図 27　平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市にて発生した F3 竜巻による樹木被害状況[5]

樹木の倒壊

樹木の倒壊による小屋組の被害

樹木の被害

樹木の被害

樹木の被害

樹木の被害

図 28　平成 25 年 9 月 2 日埼玉県発生した F2 竜巻による樹木被害状況[8]

b．フェンス

図 29～31 にはフェンスの被害状況を示す。これらよりフェンスについては，F1～F3 の被害状況において傾き，倒壊等が見られるが樹木と同様にその場で倒壊しているのみであり，倒壊した後，竜巻はすでに通り過ぎていると考えられ，竜巻により巻き上げられ，飛来物となることは考え難い。

フェンスの著しい変形

フェンスの変形

図 29　平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市で発生した F1(F2)竜巻によるフェンスの被害状況[7]

フェンスの被害状況

図 30　平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市にて発生した F3 竜巻によるフェンスの被害状況[5]

フェンスの倒壊

屋上フェンスの被害

フェンスの倒壊

支柱部の破断

フェンスの被害（工事中の建築物）

フェンスの被害

図 31　平成 25 年 9 月 2 日埼玉県発生した F2 竜巻によるフェンスの被害状況[8]

(4) 柏崎刈羽原子力発電所の樹木，フェンスの状況

a. 樹木

柏崎刈羽原子力発電所における樹木の状況を図 32 に示す。上記にて示した被害にあった樹木と大きく変わらないことから，竜巻通過時には，同様の被害状況になり，幹の折損，根の引き抜きによりその場で倒壊すると考えられる。

図 32　柏崎刈羽原子力発電所における樹木の状況

b.フェンス

柏崎刈羽原子力発電所におけるフェンスの状況を図 33 に示す。上記にて示した被害にあったフェンスの構造と大きく変わらないことから，竜巻通過時には，同様の被害状況になり変形若しくは倒壊すると考えられる。

図 33　柏崎刈羽原子力発電所におけるフェンスの状況

以上より，樹木及びフェンスは，竜巻により倒壊するが，飛来しないことから，設計飛来物として選定しない。

参考文献

(1) 「佐賀市・鳥栖市竜巻現地被害調査報告」（平成 16 年 7 月 13 日）
(2) 「2006 年台風 13 号被害調査報告－延岡市の竜巻被害と飯塚市文化施設の屋根被害－」（平成 18 年 10 月 10 日）
(3) 「平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市竜巻被害調査報告」（平成 21 年 10 月 13 日）
(4) 「平成 24 年 2 月 1 日島根県出雲市で発生した突風被害調査報告」（平成 24 年 2 月 14 日）
(5) 「平成 24 年（2012 年）5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した建築物等の竜巻被害調査報告(ISSN1346-7328 国総研資料第 703 号 ISSN0286-4630 建築研究資料第 141 号平成 25 年 1 月)
(6) 「米国アイオワ州におけるトルネード被害調査報告」（平成 20 年 6 月 9 日）
(7) 「平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市竜巻被害調査報告(平成 21 年 8 月 17 日 一部修正)
(8) 「平成 25 年 9 月 2 日に発生した竜巻による埼玉県越谷市，北葛飾郡松伏町及び千葉県野田市での建築物等被害（速報)」(国土交通省国土技術政策総合研究所 独立行政法人建築研究所 平成 25 年 9 月 10 日 一部修正)
(9) 「2006 年台風 13 号に伴って発生した竜巻による延岡市の建物被害」
(10) 「群馬県境町で発生した突風による建築物等の被害について」(平成 14 年 7 月 26 日独立行政法人建築研究所)
(11) 「平成 21 年 7 月 19 日岡山県美作市竜巻被害調査報告」（平成 21 年 8 月 4 日）

飛来物初期高さ（高台高さ）の設定

飛来物候補の飛散評価を実施する際に，飛来物の初期高さ（高台高さ）を設定する必要がある。飛来物の初期高さは，プラントウォークダウンにて確認した飛来物の設置場所と評価対象施設との高低差を踏まえ設定した。ただし，仮設物のように設置場所の特定が困難な物品については，評価対象施設に到達する可能性のある初期高さのうち，最大の高さを飛来物の初期高さとして設定した。図１に設定した各飛来物の初期高さを示す。

なお，図１で記載した飛来物のうち，評価対象施設に到達する可能性があり，設計飛来物による影響に包絡されない飛来物（図１の灰色）については，外部事象防護対象施設との離隔をとる又は固縛等を実施する。（図１の黒字は，設計飛来物若しくは設計飛来物の影響に包絡される飛来物のため，固縛等は実施しない）

防護上の観点又は機密に係わる事項を含む為，公開できません

図１　各代表飛来物の設置場所を踏まえた初期高さ

竜巻時に発生するひょうの影響について

竜巻時はひょうを伴うこともあるため，ひょうに関する文献を参考にひょうの影響について検討を行った。

ひょうはあられが大きく成長したもので，直径 5mm 以上の氷の粒子である。ひょうの大きさは，通常は直径が 5～50mm である※1。このことから，直径 50mm のひょうを対象に影響評価を行う。なお，ひょうの大きさの変化に対する影響度を確認するため，比較対象として，参考文献※2に記載の雹で最大である 10cm のひょうにて評価を実施したとしても設計飛来物に包含されることも確認した。

空気中を落下する物体は空気抵抗を受けるので，時間を経れば空気抵抗と重力が釣り合い等速運動となり，一定の速度（終端速度）となる。空気中を落下するひょうもこの終端速度で落下する。ひょうの粒径ごとの終端速度を表 1 に示す。

表 1　ひょうの粒径ごとの終端速度※2

粒径（cm）	終端速度（m/s）
1	9
2	16
5	33
10	59

ここで，ひょうの影響を評価するため，運動エネルギー，貫通のしやすさを評価した結果を設計飛来物（鋼製材）と比較し表 2 に示す。ひょうの影響は設計飛来物（鋼製材）に包含できると言える。

表 2　粒径 5cm 及び 10cm ひょうの影響評価

		粒径 5cm ひょう	粒径 10cm ひょう	設計飛来物（鋼製材）
運動エネルギー		0.04kJ	0.91 kJ	3 kJ
貫通限界厚さ（鉛直）	コンクリート Fc＝330kgf/cm^2	0.8cm	2.7cm	4cm
	鋼板	0.2mm	0.7mm	2mm

※1　：白木正規，百万人の天気教室，成山堂書店

※2　：小倉義光，　一般気象学，東京大学出版会

3.4 竜巻随伴事象の抽出について

過去の竜巻被害を参考に竜巻の随伴事象を検討し，柏崎刈羽原子力発電所のプラント配置から考慮する必要がある事象として，火災，溢水及び外部電源喪失事象を抽出した。

(1) 過去の竜巻被害について

過去の竜巻被害について，1990 年以降の主な竜巻による被害概要を調査した文献から検討を行った。竜巻の被害の状況写真から日本国内での竜巻被害では，風圧力及び飛来物の衝突により発生している建築物，電柱，電線等の損傷がみられ，竜巻の随伴事象としては，電柱や電線の損傷による停電事象が発生している。(図 3.4.1,3.4.2)

(建物の被害)

(ガラスへの飛来物衝突痕)

(電柱の折損，傾斜)

図 3.4.1　2012 年茨城県常総市で発生した F3 竜巻による被害状況[1]

（電柱の折損，傾斜）

（建築物への飛来物の衝突痕）

（電柱，道路標識の折損）

図 3.4.2　2006 年に北海道佐呂間町にて発生した F3 竜巻による被害状況[(2)(3)]

(2) 柏崎刈羽原子力発電所のプラント配置を参考にした竜巻随伴事象について

(1)の過去の竜巻による被害状況から，柏崎刈羽原子力発電所においては送電線等が竜巻による被害を受けることにより，外部電源喪失事象の発生が考えられる。

さらに，柏崎刈羽原子力発電所のプラント配置から，屋外に軽油タンク，水タンクが配備されていることから，飛来物の衝突により火災事象及び溢水事象が発生する可能性がある。(図 3.4.3)

以上から，竜巻随伴事象として火災，溢水，外部電源喪失事象を抽出する。

防護上の観点又は機密に係わる事項を含む為，公開できません

軽油タンク等	①	5 号炉軽油タンク	軽油タンク等	⑪	原子炉冷却材再循環ポンプ可変周波数電源装置入力変圧器
	②	5 号炉所内変圧器		⑫	第一ガスタービン発電機用燃料タンク
	③	5 号炉励磁変圧器		⑬	No.3 純粋タンク，No.4 純粋タンク
	④	5 号炉主変圧器		⑭	No.3 ろ過水タンク，No.4 ろ過水タンク
	⑤	5 号炉起動変圧器		⑮	タンクローリ・可搬型代替注水ポンプ(消防車)
	⑥	6 号炉所内変圧器	水タンク等	⑯	5 号炉 NSD 収集タンク
	⑦	6 号炉主変圧器		⑰	6 号及び 7 号炉 NSD 収集タンク
	⑧	6 号炉起動変圧器			
	⑨	7 号炉所内変圧器			
	⑩	7 号炉主変圧器			

図 3.4.3　柏崎刈羽原子力発電所のプラント配置図

参考文献

(1)「平成 24 年(2012 年)5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した建築物等の竜巻被害状況調査報告」(ISSN1346-7328国総研資料　第703号　ISSN 0286-4630 建築研究資料 第141号 平成25年1月)

(2) 2006年佐呂間町竜巻被害調査報告(2006年11月21日)

(3) 佐呂間竜巻災害の記録―若佐地区―

別　添　２－２

柏崎刈羽原子力発電所６号及び７号炉

竜巻影響評価における
フジタモデルの適用について

目次

別添２－２
1. はじめに
2. 各風速場モデルの概要
　2.1.フジタモデル
　2.2.ランキン渦モデル
　2.3.非定常乱流渦モデル（LES による数値解析）
3. 各風速場モデルの比較
4. 米国におけるフジタモデルの取扱い
　4.1.フジタモデルの利用実績
　4.2. NRC ガイドでの取扱い
5. 飛来物評価における不確定性の考慮
　5.1.物体の浮上・飛来モデルにおける不確定性の考慮
　5.2.竜巻が物体に与える速度に関する不確定性の考慮
　5.3.飛来物評価法のまとめ
6. 実際の飛散状況に対する検証
　6.1.フジタスケールとの比較
　6.2.米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例
　6.3.佐呂間竜巻での車両飛散事例
7. 飛散以外の挙動に対する考慮
8. まとめ
9. 参考文献

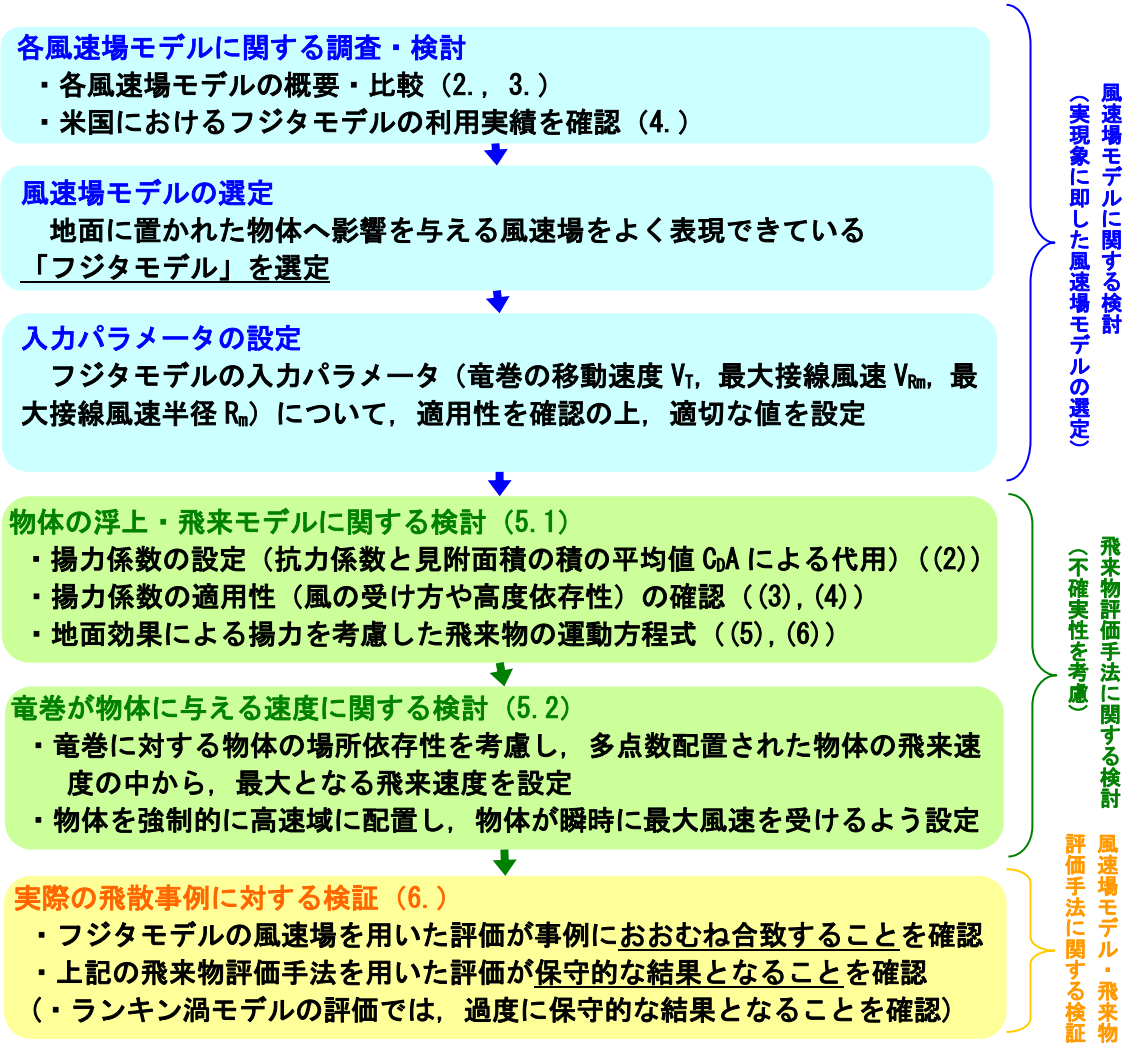
別紙１　「フジタモデル」及び「ランキン渦モデル」並びに「それぞれの風速場モデルを用いた際の飛来物評価手法」の比較

1. はじめに

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」[1]（以下「ガイド」という。）に従い竜巻影響評価を行う上で，設計飛来物の飛来速度を設定するための風速場モデルを選定する必要がある。これまでの竜巻飛来物評価において用いられている風速場モデルとして，米国 NRC の基準類に記載されている「ランキン渦モデル[2][3]」，原子力安全基盤機構の調査研究報告書に記載されている 「LES(Large-eddy simulation)」の数値解析[4]があるが，当社の竜巻影響評価においては，地面に置かれた物体への影響をよく表現できている風速場モデルにより，評価対象施設の影響評価・防護対策を実施するため，風速場モデルとしてフジタの竜巻工学モデル DBT-77(DBT: Design Basis Tornado) [5]を選定する。

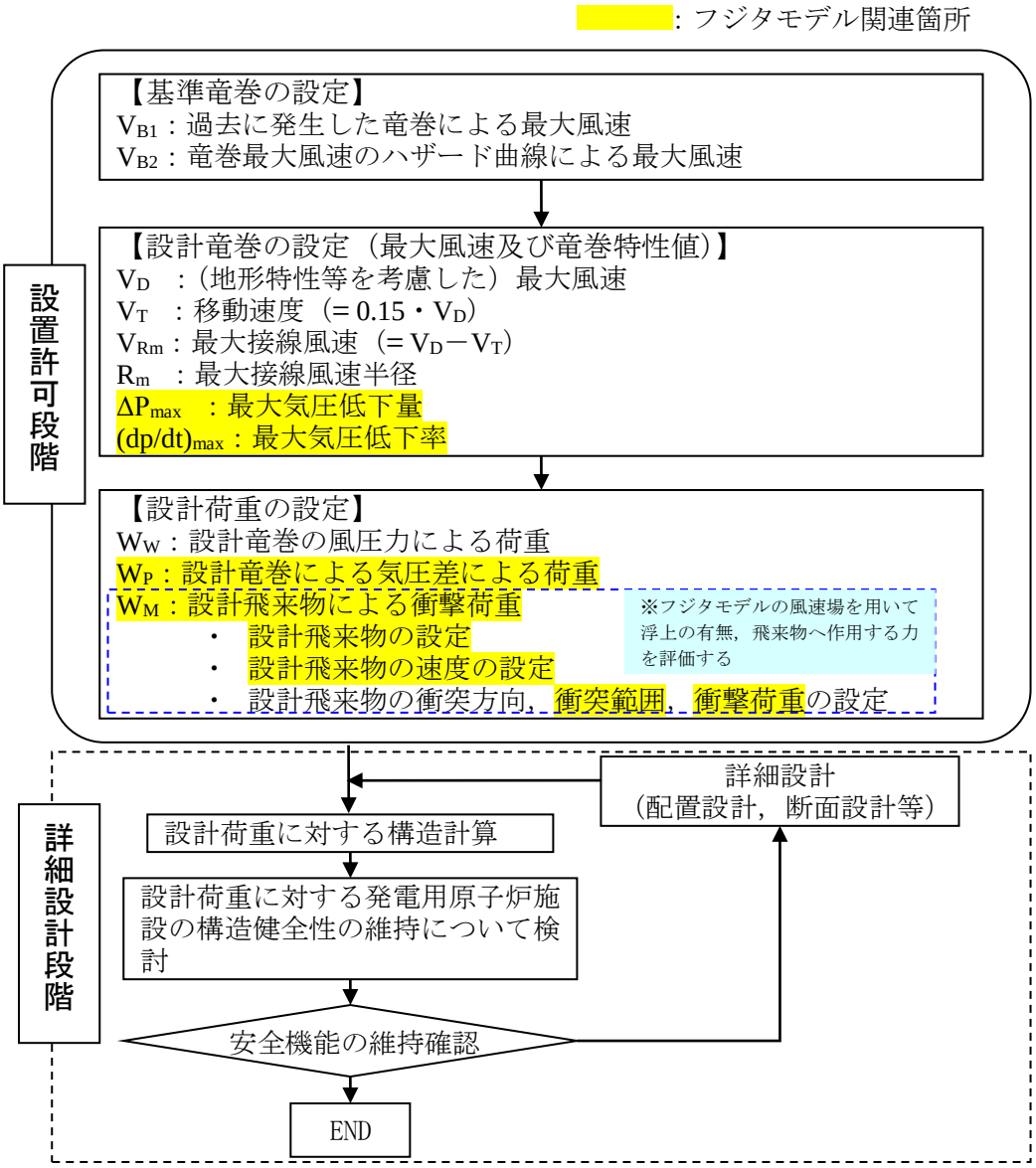
第 1 図に風速場モデルの選定及び飛来物評価方法に関する検討フローを示す。また，第 2 図に竜巻影響評価フローとフジタモデルの関連箇所を示す。

次節以降にてフジタモデルの詳細や，フジタモデルを適用した理由等を説明する。



第 1 図 風速場モデルの選定及び飛来物評価方法に関する検討フロー

（括弧内の数字は，本資料の節番号）



第２図　竜巻影響評価フローとフジタモデルの関連箇所

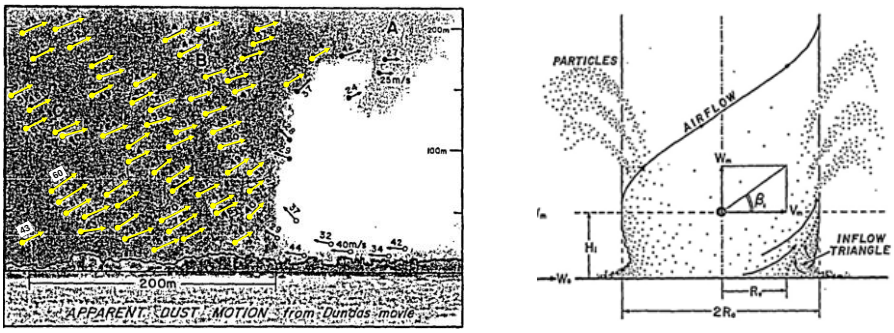
2. 各風速場モデルの概要

2.1 フジタモデル

フジタモデルは，米国 NRC の実際の竜巻風速場をモデル化したいという要望により，藤田博士が 1978 年に竜巻観測記録をもとに考案した工学モデルである。モデル作成に当たっては，1974 年 8 月に米国カンザス州 Ash Valley 等で発生した竜巻（第 3 図）の記録ビデオ画像の写真図化分析を行い，竜巻の地上痕跡調査，被災状況調査結果と照合することで風速ベクトルを作成し，そのベクトル図をもとに作成した流線モデルから，竜巻風速場を代数式で表現している（第 4 図）。

フジタモデルの特徴は，地表面付近における竜巻中心に向かう強い水平方向流れ，及び外部コアにおける上昇流といった，実際の竜巻風速場を良く表現している点にある。

第 3 図　Ash Valley 竜巻（1974.8.30）のビデオ画像



第 4 図　分析によって作成した風速ベクトル（左），ベクトル図より作成したフジタモデル流線（右）（(5)に一部加筆）

フジタモデルの風速場は第 5 図に示すように半径方向に 3 つの領域（内部コア，外部コア，最外領域）で構成され，内部コアと外部コアの接線（周）方向風速 V_θは半径に比例し，その外側の最外領域では周方向風速は半径に反比例するモデルとなっている。内部コアには上昇風速 V_zや半径方向風速 V_rは存在しないが，外部コアには存在する。高さ方向には地面から高さ H_i までを流入層としてモデル化しており，竜巻中心方向に向かう半径方向風速 V_r があり，この空気の流れ込みが外部コア内での上昇流となる。流入層より上部では外向きの半径方向風速が存在し，各風速成分は高さとともに減衰する流れとなっている。フジタモデルは，流体の連続式を満たす形で定式化されており，力学的に根拠のある風速場となっている。

フジタモデル DBT-77 における接線風速等の関係式については，Fujita Work Book[5] の Chapter6 に下記のとおり記載されている。(Chapter6 では，単一渦型のモデルであるフジタモデル DBT-77 を引用しているが，多重渦型のモデルであるフジタモデル DBT-78 は引用されていない。)

無次元座標 $r = R / R_m, \quad z = Z / H_i$

接線風速 $V_\theta = F_r(r) F_h(z) V_m$

$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r<1) \\ 1/r & (r \geq 1) \end{cases} \qquad F_h(z) = \begin{cases} z^{k_0} & (z<1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases}$$

半径方向風速

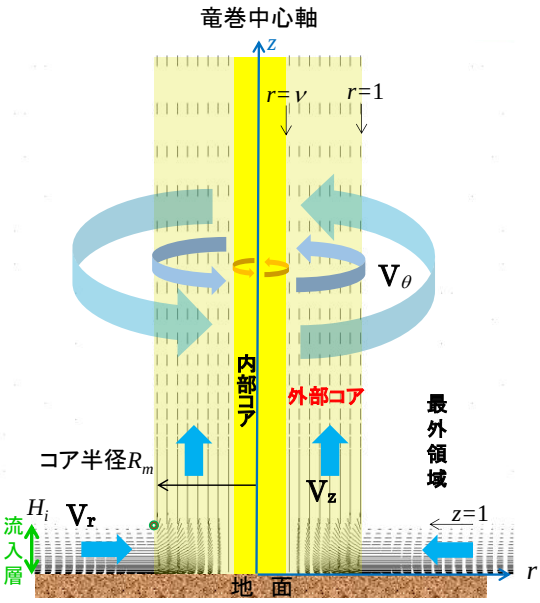
$$V_r = \begin{cases} 0 & (r \leq \nu) \\ \dfrac{V_\theta \tan\alpha_0}{1-\nu^2}\left(1-\dfrac{\nu^2}{r^2}\right) & (\nu < r < 1) \\ V_\theta \tan\alpha_0 & (r \geq 1) \end{cases}$$

$$\tan\alpha_0 = \begin{cases} -A(1-z^{1.5}) & (z<1) \\ B\{1-\exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

上昇風速

$$V_z = \begin{cases} \dfrac{3}{28}\dfrac{\eta V_m}{1-\nu^2} A(16z^{\frac{7}{6}} - 7z^{\frac{8}{3}}) & (z<1) \\ \dfrac{\eta V_m B \exp(-k(z-1))}{k(1-\nu^2)}\{2-\exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

k_0, k, ν, η, A, Bは定数



第 5 図　フジタモデルの概要

連続の式：$c \equiv \dfrac{1}{R_m r}\dfrac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \dfrac{1}{R_m r}\dfrac{\partial (rV_r)}{\partial r} + \dfrac{1}{H_i}\dfrac{\partial V_z}{\partial z} = 0$

フジタモデルでは　$c = 0$ となり連続の式を満たす。

V_θ	接線(周)方向風速
V_r	半径方向風速(中心方向が正)
V_z	上昇風速
V_m	最大接線風速
R_m	外部コア半径

内部コアの半径 R_νと外部コアの半径 R_m の比$\nu=R_\nu/R_m$については，Fujita[5]が以下の経験式を提案しているので，これを用いる。

$$\nu = 0.9 - 0.7\exp(-0.005R_m) \tag{1}$$

また，流入層は，地面との摩擦により低下した遠心力と圧力分布のバランスが崩れ，流体が竜巻中心方向の低圧部に引き込まれることにより形成されることから，摩擦の影響が及ぶ範囲のみで形成される。Fujita[5]は，流入層高さ H_i を竜巻中心の低圧部の大きさ（外部コア半径）R_m に比例するものとして，以下の経験式を提案しており，これを用いる。

$$H_i = \eta R_m \tag{2}$$

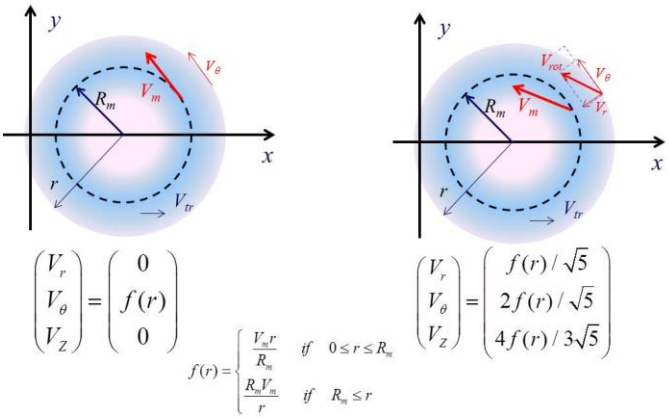
ここで，η は 1 以下の正の値であり，Fujita Work Book[5]の（6. 4）式より $\eta = 0.55(1-\nu^2)$ で定義される。

上記式において，外部コア半径 R_m=30(m)の場合，$\eta = 0.501$(H_i＝15(m))となり，原子力安全基盤機構の調査研究報告書[4]の図 2. 2. 3. 10 における流入層高さと竜巻半径の比（η = 0.4 程度）や，Kosiba[6]により示されている流入層高さ（H_i＝10～14(m)以下）とおおむね同じである。

なお，その他の定数についても，Fujita[5]の提案している値として，k_0 = 1/6, k = 0.03, A = 0.75, B = 0.217 を用いる。

2.2 ランキン渦モデル

ランキン渦モデルは，米国 NRC ガイドでも採用されており，設計竜巻の特性値を設定する際に用いられている。しかし，米国で開発された飛来物速度評価用のランキン渦モデル[3]は，竜巻中心に向かう半径方向風速 V_r と上昇風速 V_z を特別に付加している（第 6 図）。そのため，流れの連続の式（質量保存式）を満たしておらず，第 7 図に示すように地面から吹き出しが生じるような流れとなっており，地上からの物体の浮上・飛散を現実的に模擬することができない。ランキン渦モデルを用いて飛散評価を行う場合，地上の物体であっても空中浮遊状態を仮定して評価することになる。



第 6 図 設計竜巻圧力用のランキン渦モデル（左）と
飛来物速度評価用のランキン渦モデル（右）

無次元座標　$r = R / R_m$

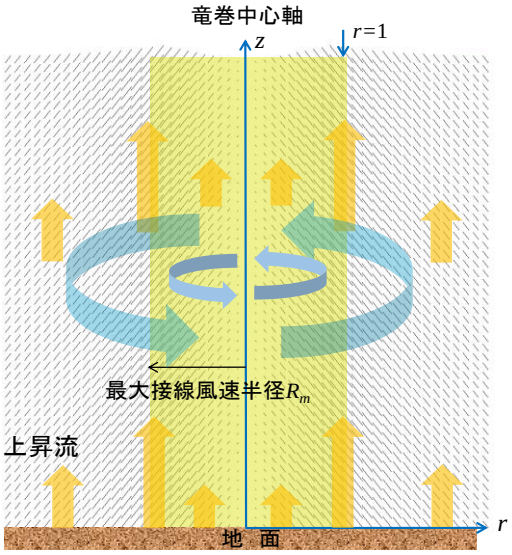
接線風速　$V_\theta = \frac{2V_m}{\sqrt{5}} F_r(r)$

$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ 1/r & (r \ge 1) \end{cases}$$

半径方向風速　$V_r = -\frac{1}{2} V_\theta$

上昇風速　$V_z = \frac{2}{3} V_\theta$

水平方向風速　$V_h = \sqrt{V_\theta^2 + V_r^2} = V_m F_r(r)$



連続の式：$c \equiv \frac{1}{R_m r}\frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{R_m r}\frac{\partial (rV_r)}{\partial r} + \frac{1}{R_m}\frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$，　$c = \begin{cases} -\frac{2V_m}{\sqrt{5}R_m} & (r < 1) \\ 0 & (r > 1) \end{cases}$

ランキン渦モデルでは，$r < 1$ で連続の式を満たさない。（$r < 1$ では流体が消滅する）

第 7 図　飛来物速度評価用のランキン渦モデルの概要

2.3 非定常乱流渦モデル（LES による数値解析）

LES は，非定常な乱流場を数値的に計算する手法として，ガイドにおける飛来物の最大速度の設定例にも活用されている。第 8 図に LES による渦の発生状況を示す。

古典的な Smagorinsky モデルに基づく LES の基礎方程式（運動量保存式及び質量保存式）は，流体が非圧縮性であると仮定する場合，以下のようになる。

$$\frac{\partial U_i}{\partial t}+U_1\frac{\partial U_i}{\partial x_1}+U_2\frac{\partial U_i}{\partial x_2}+U_3\frac{\partial U_i}{\partial x_3}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i}+(\nu+\nu_s)\left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_1{}^2}+\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_2{}^2}+\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_3{}^2}\right)-f_i \qquad (i=1,2,3) \qquad (3)$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial x_1}+\frac{\partial U_2}{\partial x_2}+\frac{\partial U_3}{\partial x_3}=0 \qquad (4)$$

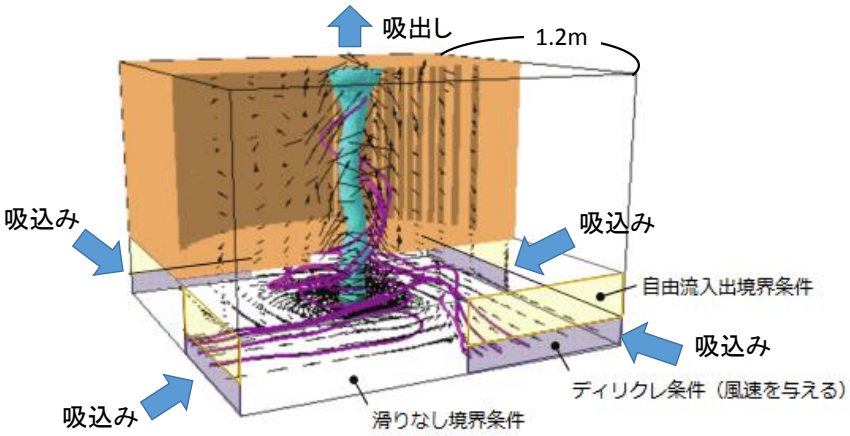
ここで，U_i 及び P は，i 方向の流速ベクトル及び圧力を表し，ν は動粘性係数を，f_i は i 方向の外力加速度を表す。また，x_i は i 方向の座標を表す。

一方，Smagorinsky モデルの渦粘性係数 ν_s は以下のように定義される。

$$\nu_s=(C_s h)^2\sqrt{\sum_{i,j=1}^{3}2S_{ij}{}^2} \qquad (5)$$

ここで，h は解像スケール（メッシュ幅相当），C_s は Smagorinsky 定数を表し，ひずみ速度テンソル S_{ij} は $S_{ij}=0.5(\partial U_i/\partial x_j+\partial U_j/\partial x_i)$ で定義される。

以上のとおり，LES は風速の時間的な変動（乱流）を考慮できる点が特長となっている。



第 8 図　LES 計算領域内での竜巻状の渦の発生状況（(4)に一部加筆）

以上が一般的なLESの説明となる。LESの手法自体は，広く活用されているものであるが，実スケールでの精緻な評価を行うためには，必要なメッシュ解像度の確保に膨大な計算機資源が必要となる。

また，ガイドで例示されているLESによる数値解析については，条件設定等に関して下記のような問題点がある。

ガイドで例示されているLESによる解析では，境界条件（側面からの流入風速の分布等）や解析領域の形状（流入箇所を局所的に配置等）を調整して人為的な乱れを与え，竜巻状の渦を生成している。渦の生成に当たって，以下のような条件を仮定していることから，実スケールでの評価を実施するには課題があるものと考えられる。

・人為的な流入境界条件（流入風速分布や流入箇所の局所的配置等）を設定していることから，流入境界条件の影響を受ける地表面付近の実際の竜巻風速場の再現はできていないものと考えられる。

・小規模な計算領域によるシミュレーションであり，実スケールへの適用（飛来物評価）の際には単純に速度を規格化して飛来物評価に適用している。

⇒風速の規格化の際には，時間平均の最大風速を100m/s（風速＋移動速度）に設定している。Maruyama[7]によれば，瞬間的な周方向風速は1.7倍程度まで大きくなる場合があり，移動速度と合わせると最大160m/s程度まで達するため，飛来物評価の際に非常に保守的な結果が算出されることが考えられる。

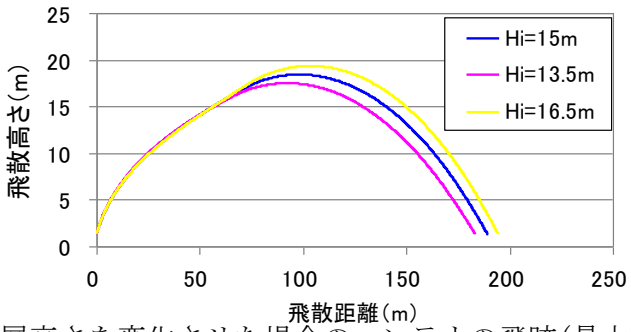
⇒流速が早い場合には粘性の影響は小さくなる傾向となるが，その影響については考慮していないことから，特に地表面付近については実際の風速場の再現はできていないものと考えられる。

（参考：フジタモデルを適用した場合の飛来物の飛跡）

第9図にフジタモデルを適用した場合におけるコンテナの飛散解析（長さ6m×幅2.4m×高さ2.6m，2300kg，C_DA/m=0.0105，最大風速100m/s）における飛跡を示す。

また，フジタモデルの流入層高さH_iは，外部コア半径R_m=30(m)の場合，H_i＝15(m)であり，2.1に記載のとおり他の文献[4][6]ともおおむね整合しているが，ここでは，その不確実性を考慮し，流入層高さH_iを±10%変化させた場合の飛跡も示す。

H_i＝15(m) の際のコンテナの最大飛散距離 189.4(m)に対し，流入層高さ H_i を±10%変化させた場合の最大飛散距離は 183.4(m)(-3.2%)，194.7(m)(+2.8%)となり，流入層高さH_iに対する最大飛散距離の感度は小さいことが分かる。



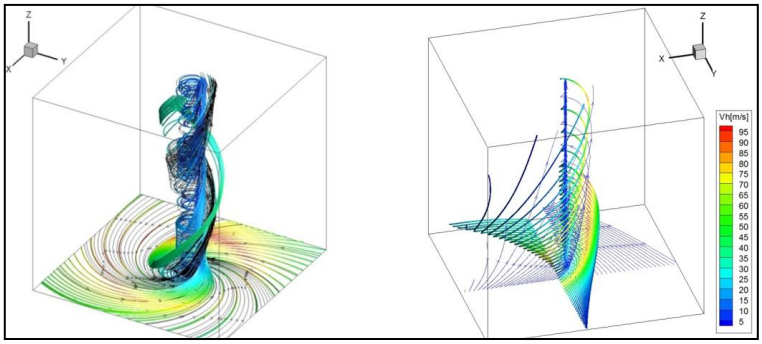
第9図 流入層高さを変化させた場合のコンテナの飛跡（最大風速100m/s）

3．各風速場モデルの比較

各風速場モデルの特徴の比較を第 1 表に示す。また，フジタモデルとランキン渦モデルの風速場構造の比較を第 10 図に示す。フジタモデルの風速場構造の流線は，地面付近を含め，より実際の竜巻風速場に即した形で表現されており，地上からの物体の浮上・飛散解析が可能となっていることがフジタモデルの大きなメリットとなっている。それに対し，ランキン渦モデルは上空での水平方向風速の観点からは比較的よく表現できると言えるものの，地上付近では実現象と乖離しており，地上からの飛散挙動は解析するには適切でない。ガイドで例示されている LES で生成した風速場も，2.3 の通り人為的な境界条件を設定していることや，小規模領域での計算結果を定数倍して実スケールサイズの値に変換している[(4) (7)]ことから，地上付近での風速場が実現象と乖離していると考えられるため，地上からの飛散挙動を解析するには適切でない。また，他のモデルと比較して，フジタモデルは特に問題となるような点もないことから，竜巻影響評価に用いる風速場モデルとしてフジタモデルを選定することは妥当であると考えられる。

第 1 表 各風速場モデルの特徴の比較

風速場モデル	使用実績	特長	問題点
フジタモデル	・竜巻飛来物設計速度，飛散高さに関する米国DOE重要施設の設計基準作成に利用されている 【対象施設の例】 Pantex Plant（テキサス州）， Oak Ridge(X-10, K-25,Y-12)（テネシー州），Savannah River Site（サウスカロライナ州）	・実観測に基づいて考案されたモデルであり，実際に近い風速場構造を表現している ・比較的簡易な代数式により風速場を表現できる ・流体の連続式を満たす定式化 **地上に設置した状態から飛来物の挙動を解析できる**	・特になし （ランキン渦モデルと比較すると，解析プログラムが複雑になるが，計算機能力の向上，および評価ツールの高度化により問題とならない）
ランキン渦モデル	・米国NRC Regulatory Guide 1.76で採用されている ・ガイド（設計竜巻の特性値の設定）で例示されている	・簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現できる	・風速場に高度依存性がなく，上昇流が全領域に存在する（地面からも吹き出しがある）ため，実現象から乖離 ・流体の連続式を満たしていない **地上からの飛散挙動を解析するには適切でない**
非定常乱流渦モデル（LES）	・ガイドにおいて，飛来物および最大速度の設定例に使用されている	・風速の時間的な変動，乱れをある程度模擬できる	ガイドに例示されているLESで生成した風速場で飛散解析を行う場合，以下の問題がある。 ・小規模領域での計算結果を，実スケールサイズに規格化するため，粘性の影響が実現象と乖離（特に地表面付近） ・人為的な境界条件を設定しており，地面や境界近傍で実現象と乖離 ・実スケールに規格化した場合の平均風速が100m/sとなるため，飛来物評価が非常に保守的な場合がある（瞬間的な最大値は160m/s程度） **地上からの飛散挙動を解析するには適切でない** ・実スケールでの解析は，膨大な計算機資源が必要になるため，現実的ではない



第 10 図　フジタモデル（左）とランキン渦モデル（右）の風速場構造の比較

4. 米国におけるフジタモデルの取扱い

4.1 フジタモデルの利用実績

米国エネルギー省（DOE：Department of Energy）が管理するエネルギー関連施設等に適用する基準[8]において，竜巻飛来物速度，飛散高さの設定にフジタモデルを用いた計算結果が使用されている[9][10]（文献(8)のD.4節：Windborne missile criteria specified herein are based on windstorm damage documentation and computer simulation of missiles observed in the field. ・・・. Computer simulation of tornado missiles is accomplished using a methodology developed at Texas Tech University.）。

この基準では，施設に要求される性能ごとにカテゴリ0から4まで分類し，カテゴリ0～2は一般的な建築物，カテゴリ3，4は核物質や危険物質を取り扱う施設に適用される。カテゴリ3，4に該当する施設として，Pantex Plant，Oak Ridge(X-10, K-25,Y-12)，Savannah River Siteが挙げられている。

フジタモデルの技術的な妥当性の検証については，米国DOE管轄のローレンス・リバモア国立研究所報告書[11]にてまとめられている。この報告書では，フジタモデルDBT-77を他の風速場モデルと比較検討しており，流体力学の連続の式を満足する（Fluid mechanics equations of continuity are satisfied）こと，モデル流況は，竜巻の映像分析で得られる流れの空間分布と整合する（Flow patterns are consistent with the spatial distribution of flow observed in photogrammetric analysis of tornado movies）こと等を利点として挙げている。

また，実際の事例に対するフジタモデルの検証としては，1978年12月3日に米国ルイジアナ州Bossier市で発生したF4竜巻による鋼製材の飛来について，フジタモデルDBT-77で再現した事例[9]がローレンス・リバモア国立研究所報告書[11]及び米国気象学会論文集[12]に掲載されている。

なお，米国LES（Louisiana Energy Services）の濃縮施設（NEF：National Enrichment Facility）では，上記のDOE施設の基準に基づき竜巻飛来物（鋼鉄パイプや木材の板等）を設定しており，米国NRCは当該施設に対する安全評価報告書（NUREG-1827）[13]の中で竜巻飛来物に対するLESの竜巻設計を是認している。

（Based on the review of the information concerning tornados and tornado-generated missiles,NRC concludes: (i) the information is accurate and is from reliable sources; and (ii)the design bases tornado-generated missiles are acceptable because they were determined based on an appropriate DOE standard. The use of a DOE standard is an acceptable approach to NRC staff.）

4.2 NRCガイドでの取扱い

2.1でも述べたとおり，フジタモデルは実際の竜巻風速場をモデル化したいという米国NRCの要請を受けて考案されたものであるが，米国NRC Regulatory Guide 1.76[(2)]では，フジタモデルについて “The NRC staff chose the Rankine combined vortex model for its simplicity, as compared to the model developed by T. Fujita (Ref. 7).” と述べられており，単に数式の簡易さを理由にランキン渦モデルが選定されている。また，NRCスタッフ自身で水平方向の飛来物速度（Simiuらの運動方程式[(3)]）を計算するプログラムを開発している(The NRC staff developed a computer program to calculate the maximum horizontal missile speeds by solving these equations.)ことが明記されている。

したがって，米国NRCガイドでランキン渦モデルが採用されているのは，フジタモデルより簡易であるという理由が主であり，竜巻風速場としての優劣を指摘されたものではない。

（参考）米国におけるランキン渦モデル以外の風速場モデルの利用実績

米国NRCでは，竜巻防護対策の追加を検討しているプラントに対し，確率論的竜巻飛来物評価手法TORMISの利用を承認している。

TORMISは，米国のEPRIで開発され，原子力発電所の構造物・機器への竜巻飛来物の衝突・損傷確率を予測する計算コードであり，同コードでは，ランキン渦モデル以外の風速場モデル（統合風速場モデル）が利用されていることから，米国NRCにおいても，ランキン渦モデル以外の風速場モデルが認められていないわけではない。

5．飛来物評価における不確定性の考慮

前節まででは，フジタモデルの風速場を適用することの妥当性について述べてきた。フジタモデルの風速場を適用することで，より現実的な竜巻影響評価を行うことが可能と考えられるが，一方で，実際の竜巻による物体の飛散挙動の不確定性についても考慮する必要がある。

本節では，フジタモデルの特長である地上からの飛散挙動に関する不確定性や，竜巻が物体と衝突する際の竜巻風速に関する不確定性等について，飛来物評価の中でどのように考慮しているかを説明する。

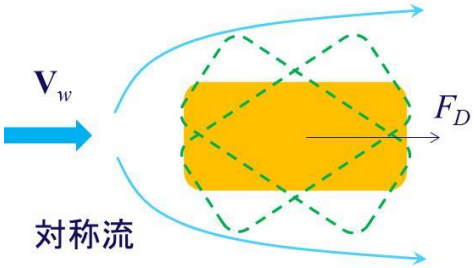
5.1 物体の浮上・飛来モデルにおける不確定性の考慮

本評価における物体の浮上・飛来モデルの考え方と，その中で保守性の観点から評価上考慮している点について説明する。

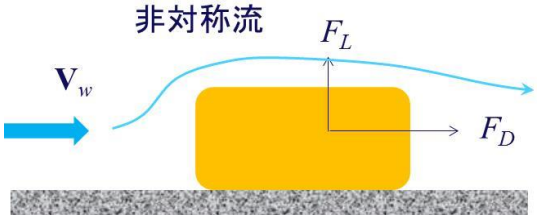
(1)物体の揚力の計算式

物体が空中にある場合，物体に作用する力は，ガイドの飛来物運動モデル[(3)(4)]と同様に，飛来物は第 11-1 図のようにランダムに回転しているものとし，平均的な抗力(流れの速度方向に平行な力) F_D と重力のみが作用する飛行モデルを採用している。

一方，物体が地面に置かれている場合や地面に近い場合は，地面効果による揚力（次頁参照）を考慮している[(14)]。具体的には，物体の形状が流れ方向の軸に関して対称であっても，第 11-2 図に示すように地面の存在により流れが非対称になり，物体上部の圧力が低くなることで物体を浮上させる駆動力が生じることから，これを揚力 F_L として考慮する。



第 11-1 図 空中で飛来物へ作用する力



第 11-2 図 地面付近で飛来物へ作用する力

このような揚力 F_L は地面での揚力係数 C_L，地上での物体の見附面積（風向方向から見た投影面積）a を用いて，以下のように表される[(15)]。

$$F_L = \frac{1}{2}\rho C_L a \left|\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M\right|_{x,y}^{\ 2} \tag{6}$$

ただし，ρ は空気密度，$\mathbf{V}_M$ は飛来物の速度ベクトル，$\mathbf{V}_w$ は風速ベクトル，$|*|_{x,y}$ は＊の x,y 成分（水平成分）の大きさを表す。

（参考）地上の物体における地面効果による揚力について

物体や地面は完全な滑面ではなく，凹凸を有しているため，完全接触と非接触の領域に区別される。物体の地面への投影面積を A とし，物体と地面の完全接触面積を s とした場合，無風時（第 12 図の左）は物体が流体に接する全表面で圧力は一定（p_0）とみなせるため，鉛直方向（上向き）に作用する揚力 F_{L0} は，以下で与えられる。

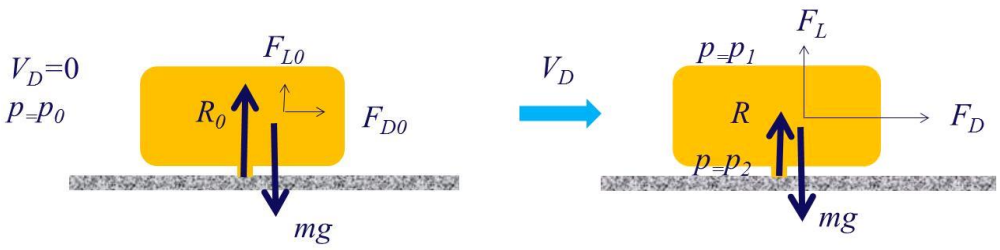
$$F_{Lo}=-p_oA+p_o(A-s)=-p_os \tag{7}$$

吸盤のように完全に地面に密着している場合は $s=A$ となるため，大気圧 p_0 に投影面積 A を乗じた力が下向きに作用し，物体と地面の間に僅かに空隙が生じる場合には，大気圧 p_0 に完全接触面積 s を乗じた力が下向きに作用することになるため，いずれの場合においても揚力は発生しないことが分かる。

一方，竜巻通過時（第 12 図の右）の物体に圧力差に伴う流体力が作用（簡単のため上面での圧力 p_1，下面での圧力 p_2 と仮定）する場合，鉛直方向の流体力 F_L は，以下で与えられる（圧力分布がある任意形状の物体についても圧力の表面積分を用いれば同様に計算は可能）。

$$F_L=-p_1A+p_2(A-s) \tag{8}$$

吸盤のように完全に地面に密着している場合は $s=A$ となるため，上面の圧力 p_1 に投影面積 A を乗じた力が下向きに作用するが，物体と地面の間に僅かに空隙が生じる場合には，地面と物体の接触状態によっては上向きの力が発生することがある。実際には，地面と物体の接触状態を確認することは難しいことから，本評価においては，保守的に地上における物体に揚力が作用することとしている。



第 12 図 部分的に地面に接する物体に作用する力（左：無風時，右：強風時，R_0，R：無風時，強風時における垂直抗力）

(2)揚力係数の設定

(6)式の C_La は風洞実験から求められる値であるが，実験条件（風を受ける方向等）により様々な値を取り得るため，それを包含するような係数を設定することが望ましい。本評価では，条件によらず保守性を確保できるよう，C_La に代わり以下で定義される抗力係数と見附面積の積の平均値 C_DA を用いることとする。

$$C_DA=\frac{1}{3}(C_{Dx}A_x+C_{Dy}A_y+C_{Dz}A_z) \tag{9}$$

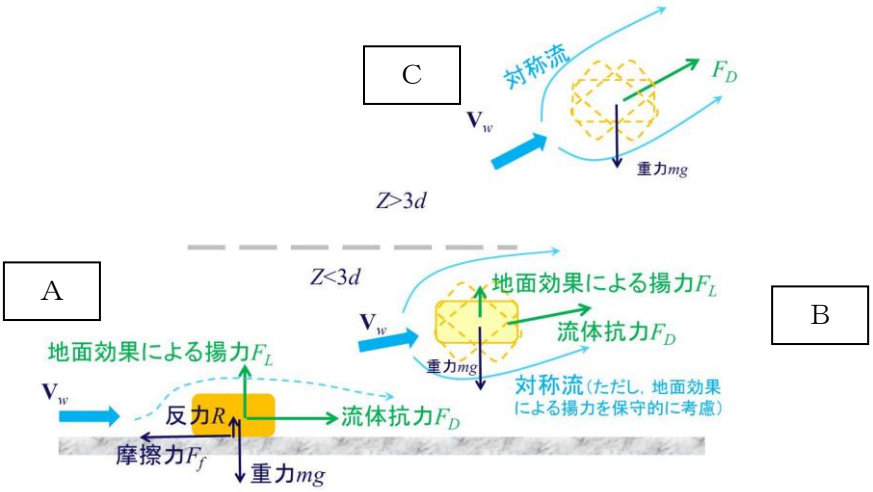
ここで，C_{Dx} は空中での x 軸方向流れに対する抗力係数，A_x は x 軸方向流れに対する見附面積であり，その他も同様である。

飛来物の運動モデルを第 13 図に示す。上記(9)式の考え方は，第 13 図に当てはめ整理すると以下のとおり。

・物体がある程度浮き上がった後の状態（第 13 図の状態 B）であれば，物体はランダム回転し，物体各面に均等に風を受けるものと考えられること。

・物体が地面に置かれた状態（第 13 図の状態 A）から，実際に浮き上がる際には，物体の上面や下面での圧力が均一ではなく，傾きながら浮き上がるようなことも考えられるが，このような挙動を理論的に評価することは難しい。
そのため，これに準ずる方法として，評価に用いる係数は，地面から浮かせた状態で実測された C_La のうち，物体が地面に置かれた状態（第 13 図の状態 A）にできる限り近い場合の値よりも大きな係数を用いることで，保守性は確保できると考えられること。

・物体が地面に置かれた状態（第 13 図の状態 A）と物体がある程度浮き上がった状態（第 13 図の状態 B）での評価にて，共通の係数を用いることは，地上からの物体浮上・飛散評価における実用性の観点からも望ましいこと。



第 13 図 飛来物の運動モデルの模式図
（A：地面上，B：$Z<3d$ の高度範囲，C：$Z>3d$ の高度範囲，ただし，$Z=z-d/2$，d：物体高さ）

物体の飛散解析におけるモデル化の基本的な考え方は，地面における揚力係数 C_L と見附面積 a の積 C_La をより大きな値で置き換えて，浮上現象を保守的に評価できるようにすることであり，この保守的な代用値として飛行定数 C_DA/m と同類の C_DA の利用が適切であることを以下で説明する。

物体が風速 U を受ける場合の揚力係数 C_L は，一般にその定義により揚力 F_L と以下の関係にある。

$$F_L=\frac{1}{2}\rho U^2C_La \qquad (10)$$

これを変形すると，$C_La=2F_L/\rho U^2$ となり，風速，風向及び物体の向きが一定であれば，揚力 F_L 及び速度圧 $q=\frac{1}{2}\rho U^2$ は見附面積 a の取り方には無関係の物理量であるので，C_La も見附面積 a の取り方（風向投影面積や揚力方向投影面積）に依存しないことが分かる。一方，同じ風速 U が同じ物体に作用する場合であっても，地面に置かれた物体の向きと風向の関係によって積 C_La は変化する。（例えば，円柱の長手方向と風向が平行な場合の揚力は小さいが，直角の場合には最大となる）

そこで，典型的な塊状物体・柱状物体・板状物体が地面に置かれた場合の C_La の最大値（又は，それに近い値）の実測結果と物体の幾何学形状のみで決定される C_DA の値を比較する。（第 2 表）

第 2 表より，$C_DA>C_La$ の関係が成立しており，C_La の代用として C_DA の利用が適切であることが確認できる。なお，C_DA は各方向の抗力係数と見附面積の積の平均値であり，例えば，一辺 d の立方体では $C_DA=2d^2$，一辺 d の平板では $C_DA=0.66d^2$ となる。両者には約 3 倍の違いがあるが，いずれの場合も<u>実際の C_La 値よりも大きな値であり，揚力の評価モデルとして C_La 値の代わりに C_DA を用いることで保守性は確保できる</u>。

また，以上の揚力のモデル化の説明は浮上時（第 13 図の状態 A）に対するものであるが，この揚力が物体高さの 3 倍までの飛散高度の範囲で連続的に低減するように作用するようにモデル化しており，第 13 図の状態 A，B，C の全領域で揚力の連続性が確保されている。

第 2 表　主な物体の C_DA と地面に置かれた物体の C_La（実測値）の大小関係(1/2)

形状	物体	仕様	C_DA※1	C_La（実測値）	C_La（実測値）に係る試験条件等
塊状	自動車	実物の Dodge Dart （長さ 16.7ft.，幅 5.8ft.，高さ 4.3 ft.）	129ft.^{2}	48.7ft.^{2}	・風洞試験(16)（風速 22～31m/s，Re=2.8x10^6～4.0×10^6） ・C_La が最大となる流入角での値を C_La（実測値）として記載
		1/6 縮尺模型 （セダン：長さ 4.85m，幅 1.79m，高さ 1.42m，質量 1633kg）	12.07m^2	7.76m^2	・風洞試験(22)（風速 0～150m/s, Re=0～3.0×10^6） ・４つのタイヤに作用する地面からの反力のうち，少なくとも一つがゼロとなった時点の風速 U から C_La 値を計算 ($C_La=2mg/\rho U^2$) ・C_La が最大となる流入角での値を C_La（実測値）として記載
		1/6 縮尺模型 （ミニバン：長さ 5.12m，幅 1.94m，高さ 1.69m，質量 2086kg）	14.58m^2	7.89m^2	
	立方体	一辺の長さ D	2D^2	0.2D^2 程度	・水路試験(17)（Re=8.0×10^3～2.8×10^4） ・流入方向と立方体面の一面が垂直になる配置における値を C_La（実測値）として記載
柱状	円柱	長さλ, 直径 D	0.47Dλ	0.2Dλ	・風洞試験(16)（Re=1.3×10^6） ・流入方向と円柱の軸直角方向が垂直になる配置（円柱の軸方向は地面と平行）における値を C_La（実測値）として記載
				0.05Dλ~0.23Dλ	・風洞試験（Re=3.5×10^4～1.2×10^5） ・流入方向と円柱の軸直角方向が垂直になる配置（円柱の軸方向は地面と平行）における値を C_La（実測値）として記載（電力中央研究所風洞実験）
	角柱	長さλ, 断面が一辺 D の正方形	0.8Dλ (1.3Dλ)※2	0.5Dλ～0.7Dλ 程度	・水路試験(17)（Re=8.0×10^3～2.8×10^4） ・流入方向と角柱の軸方向が垂直となる配置（角柱の軸方向は地面と平行）における値を C_La（実測値）として記載
		長さλ，高さ D，幅 B の長方形断面	0.4(D+B)λ	負値（地面との隙間が 0.167D 以上の場合）	・風洞試験（Re=3.8×10^4） ・流入方向と角柱の軸方向が垂直になる配置(角柱の軸方向は地面と平行) ・長方形断面（アスペクト比 4:3）の角柱は地面から 0.167D 以上離れると揚力は負となる（電力中央研究所風洞実験）

第 2 表　主な物体の C_DA と地面に置かれた物体の C_La（実測値）の大小関係(2/2)

形状	物体	仕様	C_DA※1	C_La（実測値）	C_La（実測値）に係る試験条件等
平板	薄い平板	長さλ, 幅 B，厚さ D（B=200mm, D=5mm, λ=1000mm の場合）	0.66Bλ	0 に近い値（地面から 0.25B 離れた位置で C_La=0.04Bλ）	・風洞試験[18]（幅 B に基づく Re=2.0×10^5） ・流入方向と平板の長さ方向が垂直になる配置（平板は地面と平行）における値を C_La（実測値）として記載
	薄い翼	長さλ，幅 B，厚さ D（B=100mm,D=15mm, λ=300mm）（参考文献(20)では B の代わりに c で表記）		0.2Bλ程度	・風洞試験[21]（幅 B（参考文献(20) では c）に基づく Re=2.2×10^5） ・流入方向と翼の長さ方向が垂直になる配置（翼面は地面と平行）
	平板状ブロック	長さλ，幅 B，厚さ D	0.66Bλ 0.66(Bλ+D(B+λ))※2	0.1Bλ程度	・水路試験[19]（Re=5.0×10^4 程度） ・流入方向と平板状ブロックの長さ方向が垂直になる配置（平板状ブロックは地面と平行）における値を C_La（実測値）として記載

※1：柱状及び平板では微少項を無視して記載

※2：塊状とみなせる場合

(3)設定した揚力係数の適用性の確認

地面における揚力係数 C_L と見附面積 a の積 C_La が，飛行定数 C_DA/m と同類の C_DA で代用できることについて，第 2 表における C_La（実測値）が竜巻における飛来物の飛散解析に適用可能であることについて，レイノルズ数の観点から確認を行う。

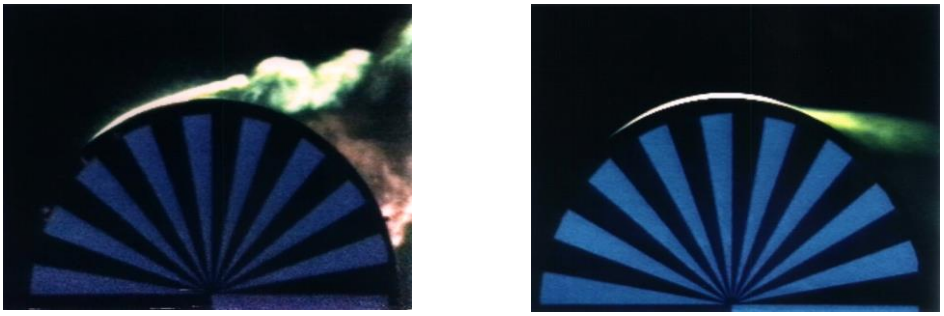
第 2 表の各文献中の実験でのレイノルズ数 Re は同表の備考欄に示すとおり，10^4 から 10^6 のオーダーにある。

ここで，実物の自動車（Dodge Dart：長さ 16.7 ft.，幅 5.8 ft.，高さ 4.3 ft.）では風速を 30 mph（13m/s）から 120 mph（54m/s）まで変化させてレイノルズ数の影響を調べた結果，風速は各空力係数に対して顕著な影響がないことが確認されている[16]。これは，剥離点が物体角部等に固定されてレイノルズ数にほとんど依存しないためであり，このような特性を有する立方体等についてもレイノルズ数依存性はないものと考えられる。

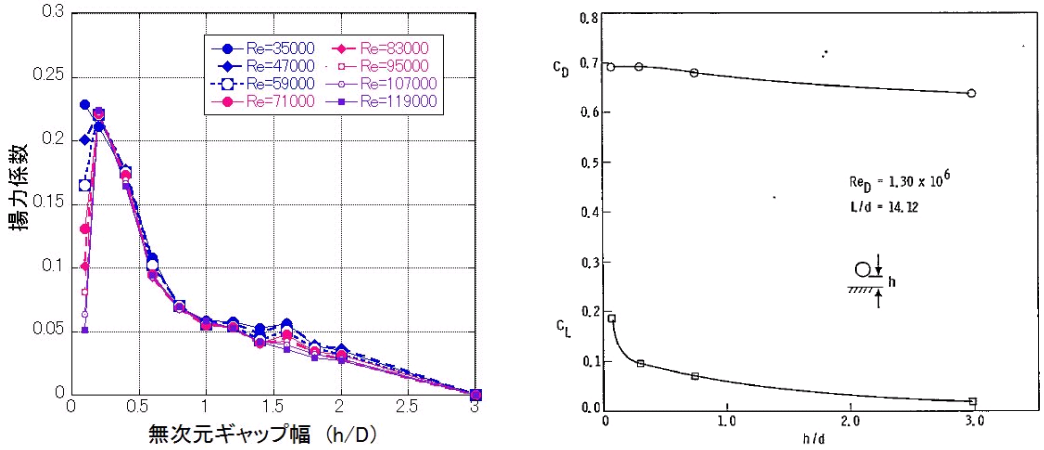
一方，円柱周りの流れのように剥離点が曲面上にある場合については，第 14 図に示すようにレイノルズ数 Re が変化すると，剥離点が移動し，抗力係数等が変化することが知られている。第 2 表の EPRI の円柱の風洞試験結果[16]は $Re=1.3\times10^6$ の高レイノルズ数条件で得られたものであり，竜巻中の円柱状の飛来物のレイノルズ数範囲に入るものと考えられる（例えば，相対風速 92m/s の直径 0.1m のパイプのレイノルズ数は $Re=6.0\times10^5$ 程度）。また，電力中央研究所我孫子地区内の吹出式開放型風洞（吹出口寸法：高さ 2.5m×幅 1.6m，風速：3.0～16.5m/s）においても，壁（地面）近くに設置した円柱（直径 100mm×模型長 1000mm）を対象として，$Re=3.0\times10^4$ から 1.0×10^5 程度までの揚力係数の測定試験が行われている。

EPRI の風洞試験と電力中央研究所の風洞試験には，レイノルズ数条件に大きな違いがあるが，第 15 図に示すとおり風洞試験で得られた円柱揚力係数に顕著な相違は認められない。

以上より，地面における各物体の揚力係数 C_L と見附面積 a の積 C_La はレイノルズ数にほとんど依存せず，第 2 表に示す風洞試験結果に基づくモデル化は妥当であると考えられる。



第 14 図　可視化した円柱周りの流れ（左：$Re\fallingdotseq4.0\times10^4$，右：$Re\fallingdotseq2.0\times10^5$）



第 15 図　（左）電力中央研究所の風洞試験　（Re=3.0×10⁴～1.0×10⁵）と
（右）EPRI の風洞試験[16]（Re=1.3×10⁶）で得られた円柱揚力係数

(4) 揚力の高さ依存性

この地面効果による揚力は高さとともに減衰するので，既往の風洞実験の結果[16][23]を考慮して，物体高さ d の物体にかかる揚力は，物体底面が地面から $3d$ の高度であるとき消滅すると仮定する。

具体的には，地面から z の距離（高度）にある物体に作用する揚力加速度 L を以下の関数形でモデル化する。（Z：物体底面の高度（＝$z-d/2$））

$$L=\frac{1}{2}\rho\frac{C_D A}{m}\left|\mathbf{V}_w-\mathbf{V}_M\right|_{x,y}^{2} f(Z/d) \tag{11}$$

ただし，$f(Z/d)$は，EPRI の風洞実験結果[16][23]を参考に，以下の反比例式とする。

$$f(Z/d)=\begin{cases}\{1-(Z/3d)\}/\{1+(Z/d)\} & (0\leqq Z\leqq 3d)\\ 0 & (3d<Z)\end{cases} \tag{12}$$

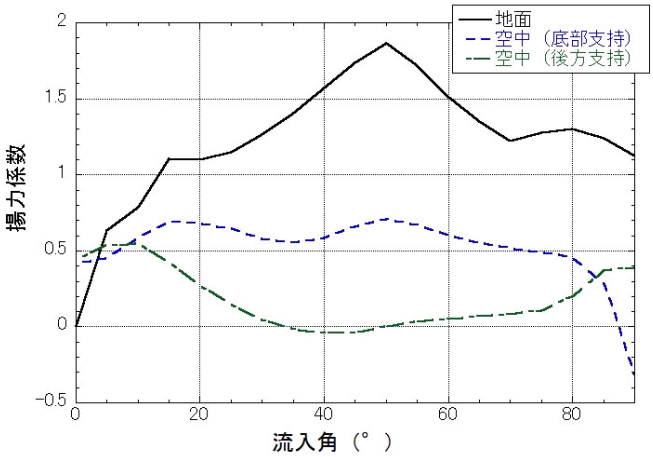
また，以下において，塊状物体（自動車），柱状物体（角柱，円柱），板状物体（平板）の風洞試験結果を踏まえ，物体高さ d の物体にかかる揚力は，物体底面が地面から $3d$ の高度で消滅するとした仮定が適切であることを確認する。

① 塊状物体（自動車）の揚力の高さ依存性

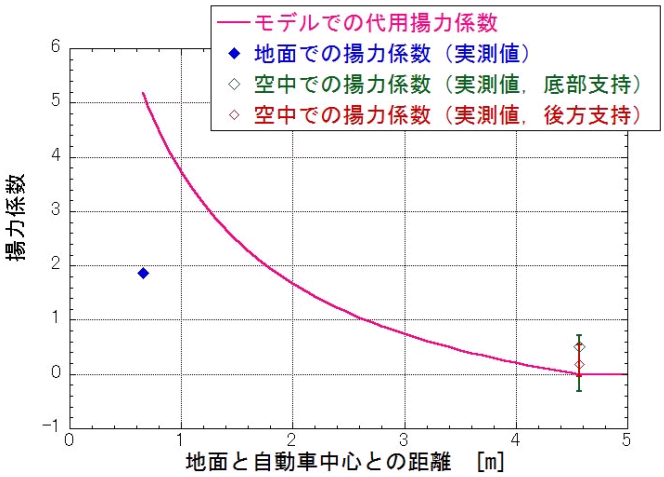
自動車の揚力係数は，EPRI の風洞試験[16]にて，地面及び風洞中央（h/d≒3.5）に設置した場合にて計測されており，第 16-1 図に示すように流入角（0°は正面，90°は側面に風を受ける角度）に依存した揚力係数が得られている。

また，第 16-2 図にて，EPRI の風洞試験によって得られた揚力係数と本モデルにて代用した揚力係数の関係を示す。EPRI の風洞試験では空中での自動車の姿勢は地面設置と同じ姿勢に保たれているため，空中においても揚力係数がゼロとはならないが，実際

に飛来する自動車の姿勢はランダムに変化することから，平均的な揚力係数は本モデルでの代用した揚力係数に近いものと考えられる。



第 16-1 図 地面及び風洞中央に設置した自動車の揚力係数の流入角依存性

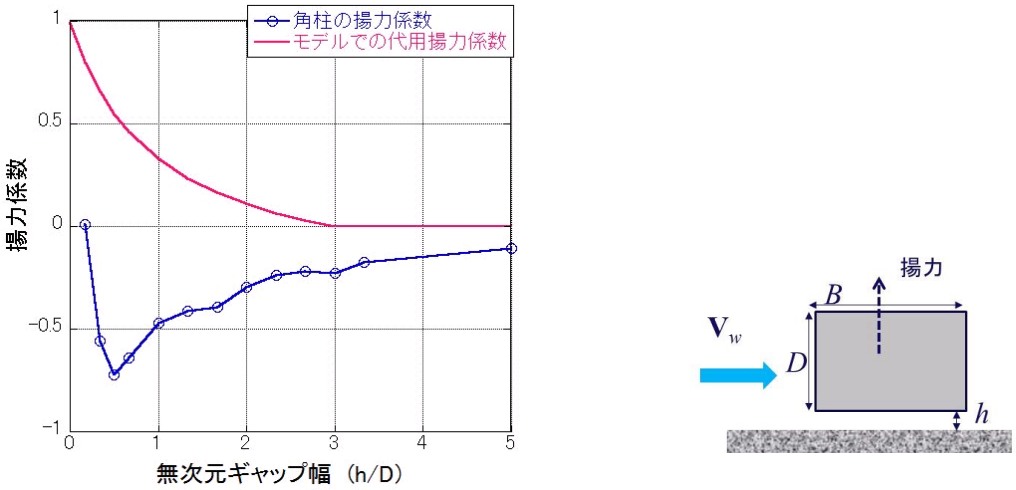


第 16-2 図 自動車の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

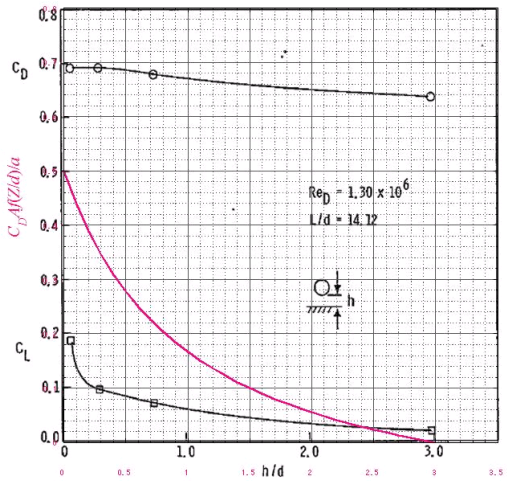
②柱状物体（角柱・円柱）の揚力の高さ依存性

角柱の揚力係数は，電力中央研究所我孫子地区内の吹出式開放型風洞（吹出口寸法：高さ 2.5m×幅 1.6m，風速：3.0～16.5m/s）にて測定しており，第 17 図にその結果を示す。角柱の場合，地面から 0.167D 以上離れると揚力は負となるので，正の揚力を与える本モデルで代用した揚力式（第 17 図の赤線）は保守的な結果となっていることが分かる。

円柱の揚力係数は，EPRI の風洞試験[16]にて測定しており，第 18 図に示すように本モデルで代用した揚力係数（第 18 図の赤線）は実際の円柱に働く揚力の最大揚力係数よりも大きな値となっているため，保守的な結果となっていることが分かる。



第 17 図 角柱の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係
（幅 B=80mm×高さ D=60mm×模型長 1000mm）



第 18 図　円柱の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

③板状物体（平板）の揚力の高さ依存性

平板の揚力係数は，平面的な形状を有する翼（迎角 0°）の試験結果[21]に基づき考察すると，本モデルで代用した揚力係数（第 19 図の赤線）は実際の翼に働く地面効果による揚力係数よりもおおむね大きな値となっている。また，この翼は奥行方向が長い形状で流れに直交するような配置となっており，実際の平板に比べて揚力が作用しやすいことを考慮すると，実際の平板の揚力係数は更に小さいものと考えられる。

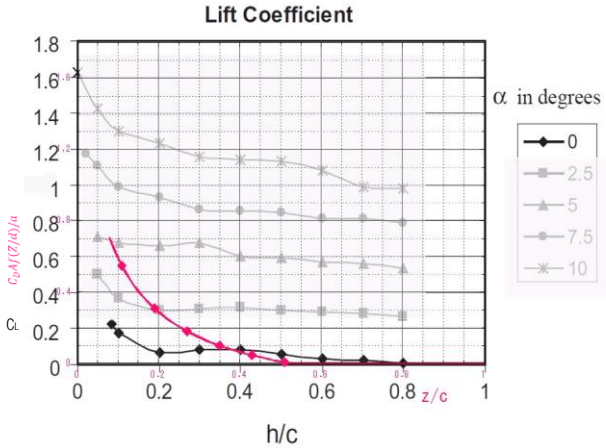


Fig. 8. Coefficient of lift at varying ground clearances for different angles of attack.

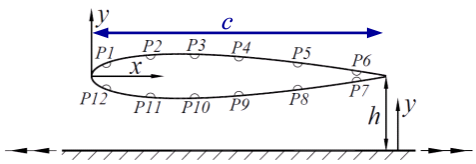


Fig. 2. Locations of pressure tappings.

第 19 図 翼の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

(5)飛来物の運動方程式

上記(1)～(4)を踏まえ，重力加速度 g，上向きの単位ベクトル $\mathbf{k}$ を用いて，飛行物体の運動方程式は以下のように記述される。

$$\frac{d\mathbf{V}_M}{dt} = \frac{1}{2}\rho\frac{C_D A}{m}\left|\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M\right|(\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) - (g - L)\mathbf{k} \tag{13}$$

飛来物の位置 $\mathbf{X}_M(t)$ と速度 $\mathbf{V}_M(t)$ の時刻歴の計算には陽解法(一定加速度法)を用いる。具体的には，時刻 $t=\tau$ における飛来物の位置 $\mathbf{X}_M(\tau)$ と速度 $\mathbf{V}_M(\tau)$ を既知として，時刻 $t=\tau+\Delta\tau$ における飛来物の速度と位置を以下の式で求める。ただし，$\mathbf{A}(\tau)$ は上記運動方程式の右辺に対応する時刻 $t=\tau$ における加速度ベクトルである。

$$\mathbf{V}_M(\tau+\Delta\tau) = \mathbf{V}_M(\tau) + \mathbf{A}(\tau)\Delta\tau \tag{14}$$

$$\mathbf{X}_M(\tau+\Delta\tau) = \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_M(\tau)\Delta\tau + \frac{\mathbf{A}(\tau)\Delta\tau^2}{2} \tag{15}$$

$\mathbf{A}(\tau)$ の計算には，時刻 $t=\tau$ における風速場も必要であるが，初期に原点に位置する竜巻の中心が x 軸上を移動速度 V_t で移動することを仮定しており，任意の時刻での風速場を陽的に求められるため，飛来物速度・位置を算出することができる。

(6) 飛来物の運動方程式（(13)式）に関する考察

地上面の物体（第 13 図の状態 A）が浮上するには，地面からの反力が消滅（$R<0$，つまり $mg<F_L$）する条件で浮上し，浮上後は，(13)式を成分表示した以下の飛来物の運動方程式に従って飛散する。

$$\frac{dV_{M,x}}{dt} = \frac{1}{2}\rho\frac{C_D A}{m}\sqrt{(V_{w,x}-V_{M,x})^2+(V_{w,y}-V_{M,y})^2+(V_{w,z}-V_{M,z})^2}\,(V_{w,x}-V_{M,x}) \tag{16}$$

$$\frac{dV_{M,y}}{dt} = \frac{1}{2}\rho\frac{C_D A}{m}\sqrt{(V_{w,x}-V_{M,x})^2+(V_{w,y}-V_{M,y})^2+(V_{w,z}-V_{M,z})^2}\,(V_{w,y}-V_{M,y}) \tag{17}$$

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} = \frac{1}{2}\rho\frac{C_D A}{m}\sqrt{(V_{w,x}-V_{M,x})^2+(V_{w,y}-V_{M,y})^2+(V_{w,z}-V_{M,z})^2}\,(V_{w,z}-V_{M,z}) - g + L \tag{18}$$

ここで，飛来物速度 $\mathbf{V}_M=(V_{M,x},V_{M,y},V_{M,z})$，竜巻風速 $\mathbf{V}_w=(V_{w,x},V_{w,y},V_{w,z})$ であり，右辺第 1 項が流体抗力 F_D の加速度を表しており，(18)式の右辺第 3 項が地面効果による揚力 F_L の加速度を表している。上記の式で，物体が静止している状態（上記の式(16)～(18)で飛来物速度 $\mathbf{V}_M$ を 0）を仮定すると，以下の式となる。

$$\frac{dV_{M,x}}{dt} = \frac{1}{2}\rho\frac{C_D A}{m}\sqrt{V_{w,x}{}^2 + V_{w,y}{}^2 + V_{w,z}{}^2} \times V_{w,x} \qquad (16')$$

$$\frac{dV_{M,y}}{dt} = \frac{1}{2}\rho\frac{C_D A}{m}\sqrt{V_{w,x}{}^2 + V_{w,y}{}^2 + V_{w,z}{}^2} \times V_{w,y} \qquad (17')$$

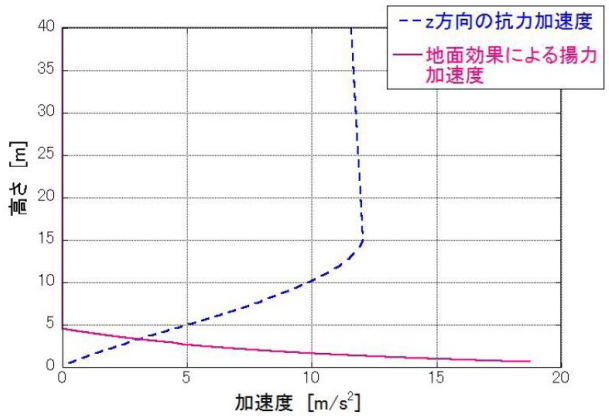
$$\frac{dV_{M,z}}{dt} = \frac{1}{2}\rho\frac{C_D A}{m}\sqrt{V_{w,x}{}^2 + V_{w,y}{}^2 + V_{w,z}{}^2} \times V_{w,z} - g + L \qquad (18')$$

フジタモデルでは，物体が地面上にある場合（第 13 図の状態 A）では上昇速度はゼロに近く，地面で静止している飛来物が受ける上昇速度はほぼゼロであるため，式(18’)の右辺第 1 項は右辺第 2，第 3 項に比べてはるかに小さな量となり，以下のとおり物理的に合理的な関係式が成立する。

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} \approx -g + L \qquad (19)$$

例として，竜巻コア半径 30m，設計竜巻の最大風速 92m/s の竜巻が原点に位置し x 方向に 14m/s で移動する場合，点(0,-30m)における式(18’)の右辺第 1 項の値（z 方向抗力（流体抗力）による加速度）と第 3 項の値（地面効果による揚力加速度）を第 20 図に示す。

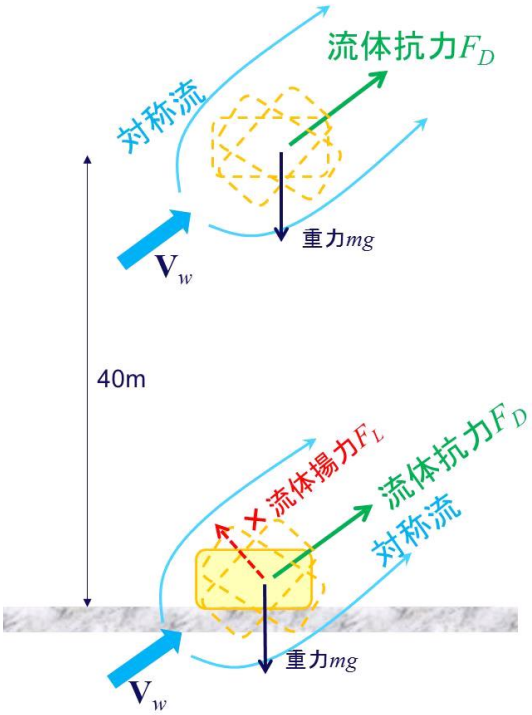
第 20 図より，地面上（z=0）においては，z 方向抗力による加速度は十分小さく，地面効果による揚力加速度の影響が大きいことが分かる。



第 20 図 地面近傍の飛来物に作用する z 方向の加速度

（飛来物の特性：$0.5\rho C_D A/m$=0.004 [m^{-1}]，d=1.31[m]）

なお，高さ方向の依存性が考慮されていないランキン渦の場合は，上昇風速が水平風速の約 60%にも達するため，地面から非現実的な風の噴出が発生する。地面効果は地面の存在によって水平な風が物体付近で湾曲・剥離することによって生じるものであるが，ランキン渦の風速場では地面の有無によって物体周りの流況が大きく変化せず，地面効果は物理的に発現しにくいため，ランキン渦モデルを用いた解析においては鉛直方向による揚力 L を付加していない（第 21 図）。

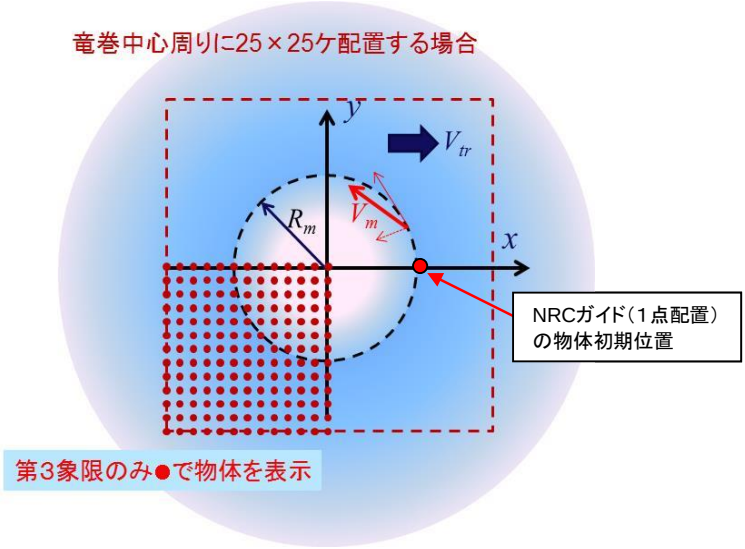


第 21 図 ランキン渦の場合の飛来物の運動モデルの模式図

5.2 竜巻が物体に与える速度に関する不確定性の考慮

竜巻によって飛散する物体の飛来速度や飛散距離は，同じ竜巻内であっても物体の受ける風速（物体がある位置の竜巻風速）によって大きく変動する。その影響度合いを確認するため，米国 NRC ガイド[(2)] に記載されている方法（物体の 1 点配置）と，物体を多点数配置した場合の飛来速度の違いを比較する。配置の違いについて，第 22 図に示す。

1 点配置の場合は，特定位置（竜巻進行方向の竜巻半径の位置（x,y）$=(R_m,0)$）に物体 1 個を設置する。また多点数配置の場合は，竜巻半径の 4 倍の正方形状の領域に 51×51 個の物体を配置する。その上で飛散させた物体のうち，最も速度が大きくなったものをその物体の飛来速度とする。

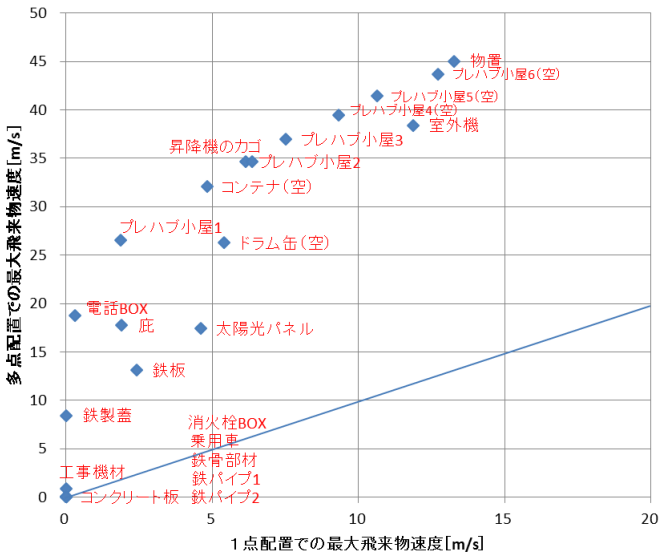


第 22 図　飛来物評価における竜巻と物体の位置関係

評価条件として，竜巻の最大風速を 92m/s とし，フジタモデルの風速場を用いて地上から飛散させるものとする。また，ガイドの記載より竜巻の移動速度 V_t を 14m/s，竜巻コア半径 R_m を 30m とする。飛散させる物体のパラメータとして，原子力安全基盤機構の調査研究報告書[(4)]に掲載されている物体の飛行定数（5.1 の C_DA を質量で割った値：C_DA/m(m^2/kg)）を用いる。第 23 図に比較結果を示す。

米国 NRC で用いられている 1 点配置の手法と比較し，多点数配置の手法では，飛行定数の大きい物体の多くが 1 点配置に比べて大きな飛来速度となる。多点数配置することで，その竜巻風速場における最大風速（最大接線風速と半径方向風速のベクトル和が竜巻移動方向と重なる点）を受ける物体が出てくるため，このような結果となったと考えられる。

したがって，物体を多点数配置することは，竜巻から受ける風速に関する不確定性を考慮できるものと考えられるため，本検討における方法として適用することとする。

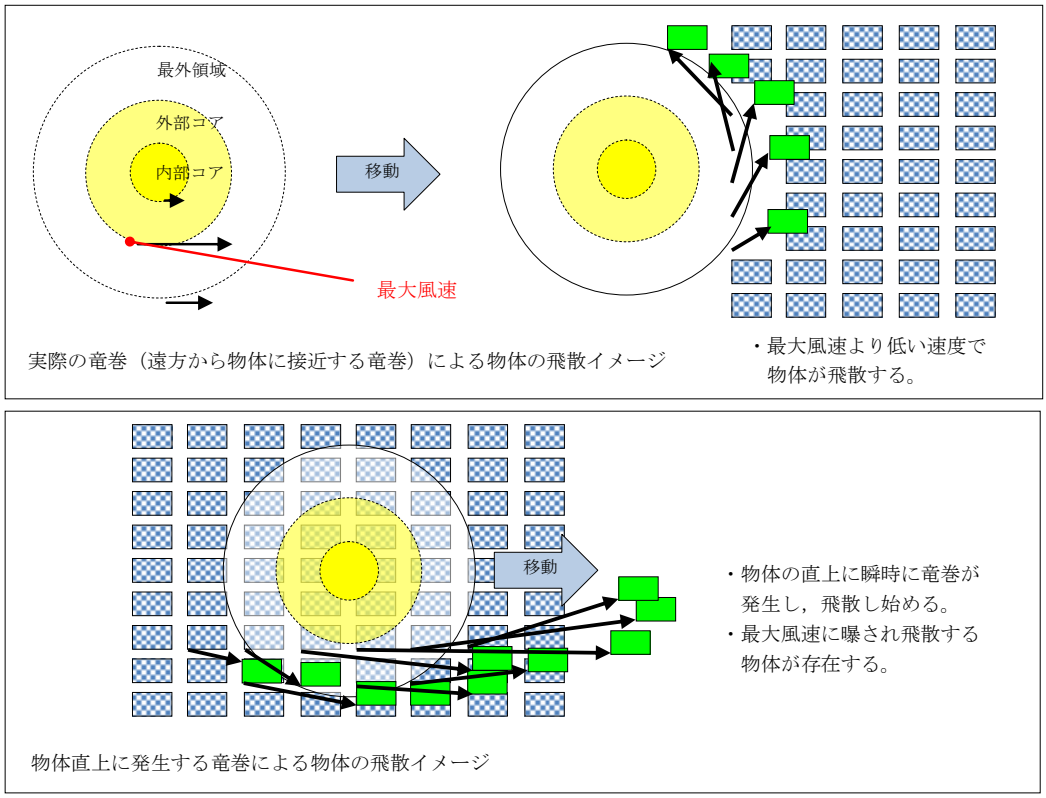


物体名	長さ (m)	幅 (m)	高さ(m)	飛行定数 $C_DA/m(m^2/kg)$
フォークリフト	3.60	1.10	2.10	0.0026
トラック	5.00	1.90	1.30	0.0026
消火栓BOX	0.50	0.50	1.10	0.0036
乗用車	3.10	1.60	1.30	0.0052
工事機材	2.44	0.65	1.20	0.0058
プレハブ小屋1	5.00	5.00	3.00	0.0083
コンテナ(空)	2.40	6.00	2.60	0.0105
昇降機のカゴ	1.20	1.20	2.80	0.0113
プレハブ小屋2	1.85	1.85	2.60	0.0119
プレハブ小屋3	4.60	2.30	3.30	0.012
プレハブ小屋4(空)	5.00	5.00	3.00	0.0153
電話BOX	0.30	0.30	0.40	0.0169
プレハブ小屋5(空)	1.85	1.85	2.60	0.0189
プレハブ小屋6(空)	4.60	2.30	3.30	0.0222
物置	1.80	0.90	1.50	0.0315
室外機	0.30	0.25	0.80	0.0343
コンクリート板	1.50	1.00	0.15	0.0021
庇	11.00	2.10	0.20	0.0242
鉄製蓋	0.70	0.50	0.03	0.0364
鉄板	2.00	0.25	0.04	0.0486
太陽光パネル	1.20	1.00	0.05	0.0582
鉄骨部材	4.20	0.30	0.20	0.0089
鉄パイプ1	2.00	0.05	0.05	0.0057
鉄パイプ2	1.00	0.05	0.05	0.0059
ドラム缶(空)	0.90	0.60	0.60	0.0203

第 23 図　1 点配置時と多点配置時の最大飛来物速度の比較（左）と
物体のパラメータ（右）

前頁の第 22 図に示す物体の多点数配置（竜巻半径の 4 倍の正方形状の領域に 51×51 個の物体を配置）を初期状態として適用したが，この手法は，物体の直上に竜巻を発生させており，竜巻発生地点の不確定性についても考慮した設定となる。

第 24 図に遠方から物体に接近する竜巻と，物体直上に発生する竜巻による飛散の比較イメージ図を示す。実際の竜巻に遭遇する状況（海上で竜巻が発生して上陸する場合等）を考慮すると，竜巻は遠方から物体に近づくため，最大風速より低い風速に曝され，飛散することになる。しかし，物体の直上に竜巻を発生させる設定とすることで，実際の竜巻による飛散と比較して，より厳しい結果を与えることになる。



第 24 図　物体に接近する竜巻と物体直上に発生する竜巻の比較イメージ図

この物体を多点数配置する方法と，竜巻を直上に発生させる方法を組み合わせることにより，必ずその竜巻による最大風速に曝される物体が発生するため，竜巻が物体に与える速度の不確定性を考慮することができると考えられる。

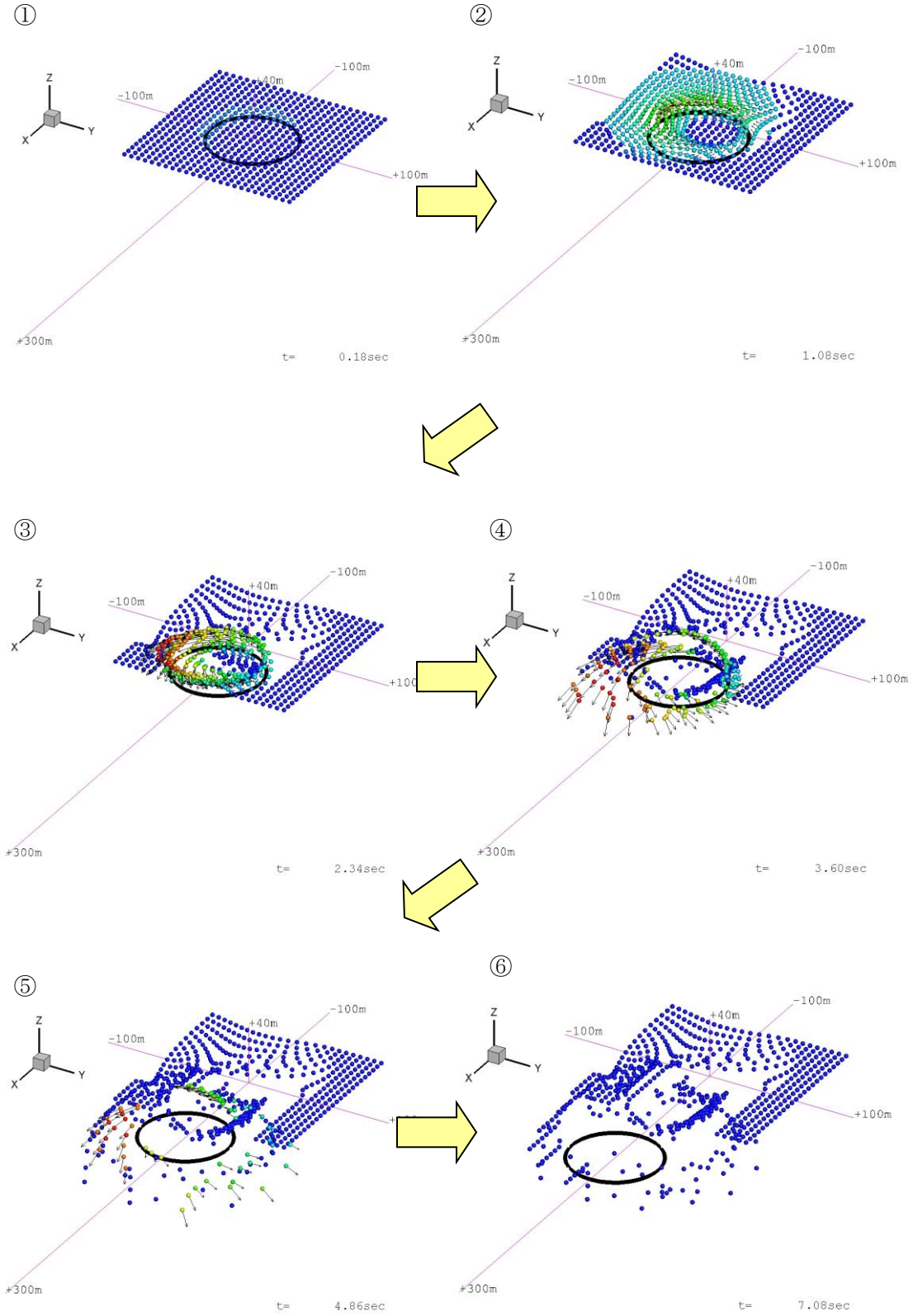
5.3 飛来物評価法のまとめ

飛来物の浮上・飛散モデルにおいて，実際の実験結果よりも浮上しやすい係数を設定することで，浮上に関する不確定性を考慮できるような設定とする。

また，物体を多点数配置し，その物体直上で竜巻が発生するという設定を組み合わせることにより，竜巻風速場内で物体が受ける風速の不確定性を考慮し，その竜巻において最大となる飛来速度が評価できるような設定とする。

以上により，フジタモデルを用いて飛来物の飛散速度評価を行う場合でも，竜巻による物体飛散の不確定性を考慮した評価結果が得られるものと考えられる。

なお，参考として第 25 図に本検討の条件設定による，物体の飛散イメージを示す。同じ物体でも，受ける風速によって大きく飛散状況が変わる様子が分かる。



第 25 図　竜巻による物体の飛散イメージ

6. 実際の飛散状況に対する検証

前節までは，フジタモデルの風速場を用いる優位性や，飛来物評価を行う上で考慮している事項等についての説明である。

本節では，フジタモデルの風速場や，前節の飛来物評価法を適用した場合，実際の事例等に比べて妥当な結果となるかどうかの検証を行う。

6.1 フジタスケールとの比較

フジタスケールは，竜巻等の突風により発生した建築物や車両等の被害状況から，当時の竜巻風速を推定するために考案された指標である。このフジタスケールで示されている自動車の被災状況を第3表に示す。

ここで，各スケールに対応する最大風速(69m/s，92m/s，116m/s)を用いて，フジタモデルによる自動車飛散解析を行う。その結果を第4表に示す。

フジタモデルによる自動車飛散解析の結果は，各スケールに対応する自動車の被災状況とおおむね合致していると考えられる。なお，ランキン渦モデルを用いた場合は，F2相当の風速（69m/s）で評価しても大きく飛散することになり，フジタスケールの定義の観点からは過度に保守的な結果となる。

第3表　フジタスケールで示されている自動車の飛散状況

フジタスケール	風速 [m/s]	自動車の被災状況
F2	50－69	cars blown off highway （自動車が道路からそれる）
F3	70－92	cars lifted off the ground （自動車が地面から浮上する）
F4	93－116	cars thrown some distances or rolled considerable distances （自動車がある距離を飛ばされる，又は，かなりの距離を転がる）

第４表　フジタモデルによる自動車の飛散解析結果

（自動車の特性:長さ 5.1m×幅 1.77m×高さ 1.31m, 質量 1814.4kg, $C_DA/m=0.0066\ m^2/kg$）

フジタスケールとの対応	最大水平風速 [m/s]	竜巻接線速度 [m/s]	竜巻移動速度 [m/s]	計算結果		
				速度 [m/s]	距離 [m]	高さ [m]
F2	69	59	10	8.9	4.4	0.1
F3	92	79	13	30	35	1.8
F4	116	99	17	51	95	4.3

6.2 米国Grand Gulf原子力発電所への竜巻来襲事例

1978年4月17日に米国のミシシッピー州にて建設中のGrand Gulf 原子力発電所にF3 の竜巻が来襲した[24]。主な被害として，建設中の冷却塔内部に設置されていたコンクリート流し込み用のクレーンが倒壊し，冷却塔の一部が破損したことが挙げられる。また，竜巻によりトレーラーが台から剥がれ移動したことや，直径8～10インチの木が折れた事例等も確認されており，第26図は，竜巻による飛来物の飛散状況が定量的に分かる事例として，資材置き場のパイプの飛散状況を示したものである。なお，通過時の竜巻規模はF2であったと考えられている。このパイプはコンクリート・石綿製で，長さは8フィート，直径（内径）は8インチであった。このパイプの飛散状況に対して，フジタモデルあるいはランキン渦モデルを風速場として用いた飛来解析を行った。その計算条件は過去の記録に基づき第5表のとおりとする。

"Courtesy of HathiTrust"　http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015037472209#view=1up;seq=65 [19]

第26図　Grand Gulf 原子力発電所資材置き場におけるパイプの散乱状況

被害状況	・パイプを収納した木箱（一部は二段重ね）は浮上せずに転倒し，パイプが周辺7m～9mに散乱。 （Pieces of pipe were scattered over the area, but none traveled more than 25-30 ft. The pipe joints are 8 in. dia x 8 ft long.[24]）

第 5 表　Grand Gulf 原子力発電所の竜巻によるパイプ飛散の再現をする上での計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	67m/s
	最大接線風速	53.6m/s
	移動速度	13.4m/s
	コア半径	45.7m
飛来物条件	直径（外径）	9 inch（0.2286m）
	物体高さ	0.229m
	密度	1700kg/m^3
	飛行定数 C_DA/m	0.0080 m^2/kg
初期配置	・物体個数 51×51 個，竜巻半径の 4 倍を一辺とする正方形内（$x, y=[-2R_m, +2R_m]$）に等間隔配置 ・設置高さ 1 m（パイプが収納されていた木箱が 2 段重ねで配置されていた状況を想定。）	

計算結果を第 6 表に示す。フジタモデルを風速場とした場合は，パイプがほとんど飛散せず，木箱が倒れた影響で散らばったと思われる状況とおおむね合致している。

なお，参考としてランキン渦モデルで評価した場合，飛散距離や最大水平速度に大きな違いがあり，実際の報告と比較して過度に保守的な評価結果となる。

第 6 表　Grand Gulf 原子力発電所のパイプの飛散計算結果

風速場モデル	初期物体高さ	計算結果		
		飛散距離	飛散高さ※2	最大水平速度
フジタモデル	1 m	1.2 m	0.0 m	4.9 m/s
ランキン渦モデル	1 m※1	42.6 m	0.34 m	30.7 m/s
ランキン渦モデル	40 m	227 m	0.34 m	40.9 m/s

※1：ランキン渦モデルでは地上付近の風速場を模擬できていないが，フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較をするため，フジタモデルと同条件とする。

※2：初期物体高さからの飛散高さ。

6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例

2006 年 11 月 7 日に北海道網走支庁佐呂間町に発生した竜巻（以下「佐呂間竜巻」という。）により，4t トラックが約 40m 移動したことが報告されている[25]。被災状況を第 27 図に示す。この事例では被災時に 4t トラックに乗員 2 名が乗車しており，4t トラックの初期位置と移動位置が分かっている（第 27 図左上画像の②）。また，4t トラックの他に 2 台の自動車（第 27 図左上画像の③と⑥）について，初期位置と被災後の移動位置が分かっている。このように竜巻被災前後で車両等の位置が明確になっている事例は極めてまれである。なお，竜巻飛来物の再現計算は，竜巻が頻発する米国でもほとんど実施されていない。この理由としては，来襲した実際の竜巻特性を精度よく計測・推測することが困難であることや自動車等の移動前後の位置が不明確な場合が多いことが挙げられる。

第 27 図　佐呂間竜巻（2006. 11. 7）による被災状況（工事事務所敷地内の車両被災）[25]
（文献(25)で示されている竜巻被害の方向を ⇨ で加筆）

ここでは，フジタモデルを風速場として用いた車両（4t トラック，乗用車）の飛散評価を行い，実際の被害状況と比べて妥当な結果となるかどうかの確認を行う。方法としては，下記の 2 通りとする。

(a) 竜巻特性や飛来物（4t トラック，乗用車）の状況を現実的に設定した場合の再現解析

(b) 柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証

(a)竜巻特性や飛来物の状況を現実的に設定した場合の再現解析

(ⅰ)4t トラックの飛散解析

再現解析の条件として，入手可能なデータ[25][26]に基づき，合理的と考えられる竜巻特性条件と飛来物（4t トラック）の条件を第 7 表のように設定する。初期配置の条件として，配置個数は１個とし，竜巻が遠方から近づく状況設定としている。また，風速 60m/s 以下では浮上しない設定となっている。その上で，竜巻との距離を合理的な範囲で変化させ，佐呂間竜巻の再現性を確認する。

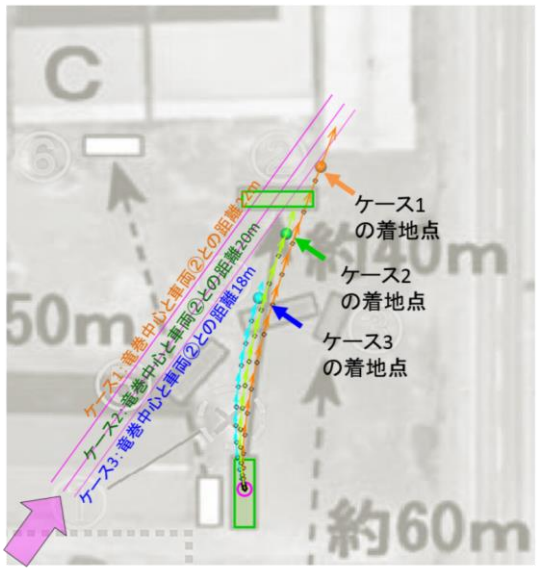
車両と竜巻中心との距離を 18 m，20 m，22 m とした場合の解析結果を第 8 表及び第 28 図に示す。車両の軌跡は竜巻中心との相対位置関係に敏感であるが，各ケースとも飛散方向が実際の移動方向とおおむね合致しており，特に車両と竜巻中心との距離を 20m としたケース 2 では飛散距離もほぼ正確に再現されている。このように，フジタモデルを風速場とした飛散解析で，飛来物が地上に設置された状況からの飛散挙動が再現できることが確認できる。

第 7 表　佐呂間竜巻の 4t トラックの計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速		92m/s
	最大接線風速		70m/s
	移動速度		22m/s
	コア半径		20m
飛来物条件	車種不明のため，三菱ふそう PA-FK71D の仕様を採用	車両長さ	8.1m
		車両幅	2.24m
		車両高さ	2.5m
		車両質量	4000kg
	飛行定数 C_DA/m		0.0056 m^2/kg
初期配置	・物体個数 1 個 ・竜巻は遠方から物体に近づくが，風速 60m/s 以下では浮上しない ・設置高さ 0 m		

第 8 表　佐呂間竜巻での 4t トラックの飛散計算結果

解析ケース	車両と竜巻中心との距離	計算結果(フジタモデル)		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
1	22m	45.4 m	2.8m	25.8 m/s
2	20m	35.5 m	2.3m	22.2 m/s
3	18m	25.9 m	1.7m	18.8 m/s



第 28 図　フジタモデルによるトラック飛散の再現解析結果

（ⅱ）乗用車の飛散解析

白い乗用車（第 27 図の⑥）の被災事例を対象として，物体を 1 点初期配置した条件で最大水平速度等を計算する。

白い乗用車の計算条件について，第 9 表に示す。

第 9 表　佐呂間竜巻の白い乗用車の計算条件

竜巻条件	第 7 表と同様		
飛来物条件	白い乗用車 （トヨタカローラを仮定）	車両長さ	4.40m
		車両幅	1.70m
		車両高さ	1.50m
	飛行定数 C_DA/m		0.0097 m^2/kg
初期配置	・物体個数 1 個 ・竜巻は遠方から物体に近づくが，風速 60m/s 以下では浮上しない ・設置高さ 0 m		

白い乗用車と竜巻中心との距離を，18m，20m，22m とした場合の解析結果を第 10 表及び第 29 図に示す。飛散距離についてはケース 1 でおおむね合致している。

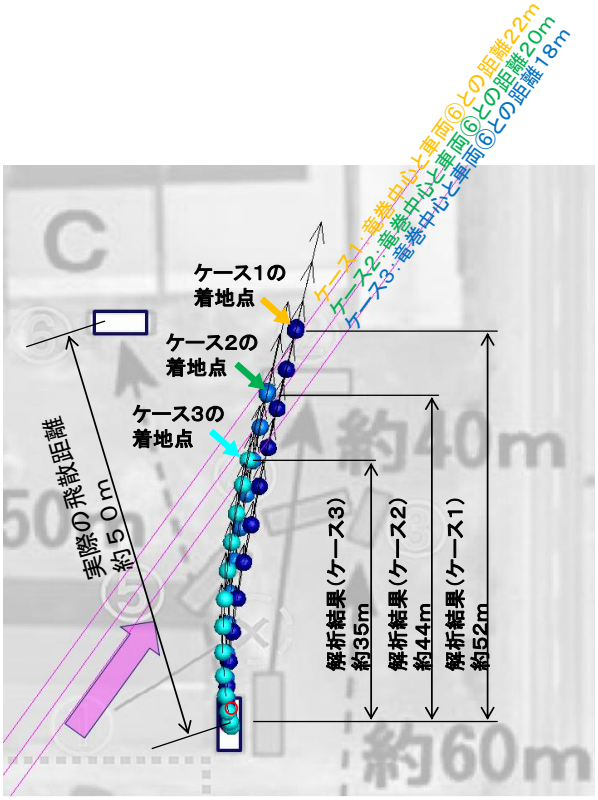
飛散方向については，飛び出し方向はおおむね合致しているものの，最終的な着地点には多少のずれが生じている。これは乗用車(白)が建物に近接して駐車していたため，この建物の倒壊の影響を受けて飛散方向のずれが生じたものと推定される。

なお，赤い乗用車（第 27 図の③）について評価した場合は，竜巻中心との距離が大きいため飛散しない解析結果となる。ただし，実際には，赤い乗用車は全壊・飛散した

プレハブ建物（軽量鉄骨造２階建て，第 27 図の A）の直ぐ下流側に駐車しており，その瓦礫の影響を受けて一緒に移動したものと考えられる。

第 10 表　佐呂間竜巻での白い乗用車の飛散計算結果

解析ケース	白い乗用車と竜巻中心との距離	計算結果(フジタモデル)		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
1	22m	51.9 m	3.6m	28.9 m/s
2	20m	43.5 m	3.4m	24.7 m/s
3	18m	34.7 m	2.9m	21.1 m/s



第 29 図　フジタモデルによる白い乗用車飛散の再現解析結果

(b)柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証[27]

ここでは，柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価法の竜巻条件・物体初期配置条件で前述の佐呂間竜巻における 4t トラック及び白い乗用車の被災事例を評価し，佐呂間竜巻での実際の被災状況（移動距離等）との結果を比較する。

（ｉ）4t トラックの飛散解析

計算条件について第 11 表に示す。竜巻条件としては，設計竜巻の最大風速を 92 m/s とし，その他の特性量については，ガイドに例示されている方法に従い，移動速度 V_t を 14 m/s（最大風速の 15%），竜巻コア半径 R_m を 30 m とする。

第 11 表　柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価法の計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92m/s
	最大接線風速	78m/s
	移動速度	14m/s
	コア半径	30m
飛来物条件	第 7 表と同様	
初期配置	・物体個数 51×51 個，竜巻半径の 4 倍を一辺とする正方形内（$x, y=[-2Rm, +2Rm]$）に等間隔配置 ・設置高さ 0m	

第 12 表に実際の被災状況と，柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価法の結果の比較を示す。また，第 30 図に被災後の 4t トラックの状況を示す。

フジタモデルによる飛散評価結果として，4t トラックの最大飛来物速度は 36 m/s，最大飛散高さは 3.6 m，最大飛散距離は 63.4 m となる。

実際の 4t トラック飛散距離は約 40m であり，フジタモデルによる飛散距離の評価結果はこれを上回る。また，飛散高さや最大水平速度については，直接の比較はできないものの，4t トラックの乗員 2 名が存命であったこと，被災後の 4t トラックがほぼ元の外形をとどめていること等から，柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価法で飛散解析をした場合でも，実際の被災状況と比較して妥当な結果となるものと考えられる。

なお，参考として同様の検証をランキン渦モデルでも実施しており，ランキン渦モデルによる評価では，最大飛散高さ，最大飛散距離ともに実際の被災状況と比較して非常に保守性が大きい結果となっていることが分かる。

第 12 表　実際の被災状況と「柏崎刈羽原子力発電所の飛来物評価法」との結果の比較（4t トラックの場合）

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ※2	最大水平速度
フジタモデル（地上）	63.4m	3.6m	36.0m/s（毎時 130 km）
ランキン渦モデル（地上※1）	193.7m	11.7m	43.9m/s
ランキン渦モデル（40m）	254.9m	11.7m	43.9m/s
実際の被災状況	約 40 m	4t トラックの運転席に乗車していた乗員 2 名が幸いにも存命で救出され，搬送先の病院で聞き取り調査に応じており[25]，被災した 4t トラックが地面からは 3.6m 以上の高所から落下したとは考えにくい。	被災後もほぼ元の外形をとどめていることが示されており[25]，実際の飛来物速度は本解析で得られた最大飛来物速度（約 130 km/h）を遙かに下回るものと推察できる。

※1：ランキン渦モデルでは地上付近の風速場を模擬できていないが，フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較をするため，フジタモデルと同条件とする。

※2：初期物体高さからの飛散高さ。

第 30 図　竜巻による被災後の 4t トラックの様子[25][26]

（ⅱ）乗用車（白）の飛散解析

4t トラックの場合と同様に，柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価条件で白い乗用車の飛散解析を行った場合の結果を第 13 表に示す。

白い乗用車の場合も，フジタモデルによる評価が実際の被災状況を包含する結果となっている。

第 13 表　実際の被災状況と「柏崎刈羽原子力発電所の飛来物評価法」との結果の比較（白い乗用車の場合）

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ※2	最大水平速度
フジタモデル（地上）	82.3m	4.2m	44.1m/s
ランキン渦モデル（地上※1）	269.6m	39.4m	49.6m/s
ランキン渦モデル（40m）	305.8m	39.4m	49.6m/s
実際の被災状況	約 50m	－	－

※1：ランキン渦モデルでは地上付近の風速場を模擬できていないが，フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較をするため，フジタモデルと同条件とする。
※2：初期物体高さからの飛散高さ。

7. 飛散以外の挙動に対する考慮

前節までで，飛来物の竜巻による挙動のうち，飛散に関する評価手法について説明をした。実際の竜巻による飛来物の挙動としては，飛散だけではなく，横滑りや転がりによる挙動が発生することも考えられるため，本節では，これらの飛来物の挙動について，下記の 2 点に分けて考察する。

(a)飛散する物体における横滑りや転がりの影響
(b)飛散しない物体における横滑りや転がりの影響

(a)飛散する物体における横滑りや転がりの影響

「5.2 竜巻が物体に与える速度に関する不確定性の考慮」に記載のとおり，本検討においては，竜巻を直上に発生させる方法を採用していることから，実際には横滑りや転がりを伴い移動する物体も強制的に高速域に配置され，浮上をして飛散することになる。この場合，空中では地面の摩擦力を受けないため，実際に比べて大きな水平速度が得られることになる。

また，浮上後に地面に衝突する場合は，運動エネルギの大部分は物体や地面の変形・破損等で消費されることから，落下後の横滑りや転がりによる移動距離は実際には小さいものと考えられる。

「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」における飛散した 4t トラックや乗用車は，実際には飛散だけではなく，横滑りや転がりを伴ったものと考えられるが，飛散解析より得られた飛散距離や最大水平速度は，実際の被災状況よりも保守的な評価となっていることから，飛散過程における不確実性を裕度として包含している。

(b)飛散しない物体における横滑りや転がりの影響

飛散しない物体においても，竜巻による風荷重が静止摩擦力より大きい場合には，横滑りをする。また，横滑りをしない場合でも，風荷重によるモーメントが自重のモーメントよりも大きい場合には転がることになる。このように，竜巻により横滑りや転がる場合には，地面での摩擦力の影響を受けながら移動することから，移動距離や水平速度は十分に小さいものと考えられる。

また，物体と外部事象防護対象施設の間に，障害物となるフェンス等がある場合には，横滑りや転がった物体が外部事象防護対象施設に到達することは阻止される。

以上より，飛散しない物体が横滑りや転がりにより，障害物の影響を受けず，外部事象防護対象施設と衝突することが想定される場合については，横滑りや転がった物体の影響が設計飛来物の影響に包含されることを確認し，包含されない場合には固縛等の措置を実施する。固縛等の措置に当たっては，フジタモデルの風速場より求まる風荷重に，地面での摩擦力を適切に考慮した上で，設計用荷重を設定する。

8. まとめ

フジタモデルは，米国 NRC による要望で実際の竜巻観測記録をもとに考案された風速場モデルであり，米国 DOE の重要施設に対する設計基準の作成の際にも用いられている。フジタモデルは，他のモデルではできなかった地上からの物体の浮上を現実的に評価することができる点が大きなメリットである。

これは，「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」の「(a)竜巻特性や飛来物の状況を現実的に設定した場合の再現解析」において，フジタモデルを風速場とした飛散解析結果が実際の飛散状況とおおむね合致していることからも，確認することができる。

また，フジタモデルにより算出される風速（V_w）は，飛来物の飛散評価のインプットとして用いるものであり，設計竜巻の最大風速の算出に当たっては保守性を確保した上で，「5. 飛来物評価における不確定性の考慮」のとおり，竜巻を多数の物体の直上に瞬時に発生させて物体が最大風速を受けるような初期条件を用いる等の評価手法により，不確実性も含めて飛来物速度等を保守的に評価できるようにしている。

これにより，「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」の「(b)柏崎刈羽原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証」では，本評価手法を用いることでフジタモデルにおいても実際の飛散状況に対して，保守性を有した妥当な結果となることを確認している。

地上からの浮上・飛散評価を行うことのメリットは，発電所敷地内に数多く存在する物の中から，竜巻による飛来物化の影響度合いを，浮上の有無の観点を含め，より正確に把握できることである。竜巻飛来物の影響（浮上の有無，飛散高さ，飛散距離，最大速度等）を正確に捉えることにより，飛来物の発生防止対策や評価対象施設の防護対策の範囲や強度について，適切な保守性を確保した上で実効性の高い竜巻防護対策を実施することが可能となると考えられる。

評価全体として一定の保守性を確保しつつ，適切な竜巻対策によりプラント全体の安全性を向上させるため，当社の竜巻影響評価については，フジタモデルを適用することとする。

9. 参考文献

(1) 原子力規制委員会，2013：原子力発電所の竜巻影響評価ガイドの制定について，原規技発第13061911号，平成25年6月19日制定，平成26年9月一部改正.

(2) U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, 2007: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plant, Revision 1.

(3) Simiu, E. and Cordes, M., Tornado-Borne Missile Speeds, NBSIR 76-1050, 1976.

(4) 東京工芸大学（2011）：平成 21～22 年度原子力安全基盤調査研究(平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究，独立行政法人原子力安全基盤機構.

(5) Fujita, T. T. (1978) Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications. SMRP Research Paper 165, Department of Geophysical Sciences, University of Chicago, 142pp.

(6) Karen A. Kosiba and Joshua Wurman, 2013: The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. Wea. Forecasting, 28, 1552-1561.

(7) Maruyama, T. (2011) Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 99, 249-256.

(8) U.S. Department of Energy, Natural Phenomena Hazards Design and Evaluation Criteria for Department of Energy Facilities, DOE-STD-1020-2002, 2002. (https://www.standards.doe.gov/standards-documents/1000/1020-astd-2002/@@images/file)

(9) Malaeb, D. A., Simulation of tornado-generated missiles. M.S. thesis, Texas Tech University, 1980.

(10) P.-H. Luan, Estimates of Missile Speeds in Tornadoes, M.S. thesis, Texas Tech University, 1987.

(11) J. R. McDonald, Rationale for Wind-Borne Missile Criteria for DOE facilities, UCRL-CR-135687, Lawrence Livermore National Laboratory, 1999. (https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/236459.pdf)

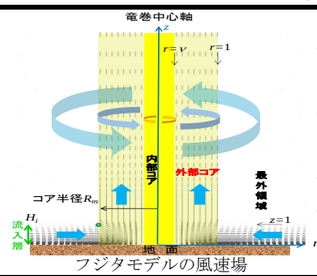
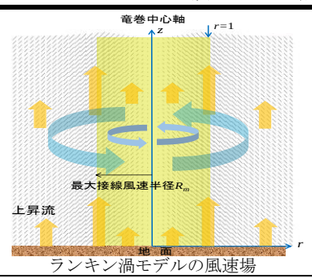
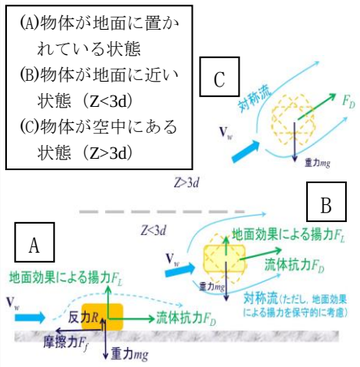
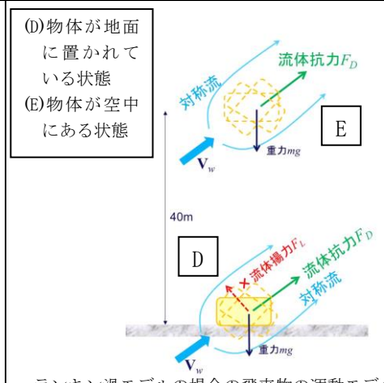
(12) McDonald, J. R., T. Theodore Fujita: His contribution to tornado knowledge through damage documentation and the Fujita scale. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82, pp.63-72, 2001.

(13) NUREG-1827 Safety Evaluation Report for the National Enrichment Facility in Lea County,New Mexico(Docket No.70-3103)

(14) 江口譲，杉本聡一郎，服部康男，平口博丸，竜巻による物体の浮上・飛来解析コードTONBOSの開発，電力中央研究所 研究報告N14002 ，2014.
(15)日本鋼構造協会,構造物の耐風工学，p82
(16) EPRI, Wind field and trajectory models for tornado-propelled objects, Report NP-748, 1978.
(17) 林建二郎・大井邦昭・前田稔・斉藤良，開水路中に水没設置された立方体および桟粗度の流体力,土木学会論文集B1(水工学) Vol.67, No.4, I_1141-I_1146, 2011.
(18) 松宮央登，中岡宏一，西原 崇，木村吉郎:太陽光発電パネルに作用する空気力の地面効果に関する風洞実験，構造工学論文集，Vol.60A, pp.446-454, 2014.
(19) 山本晃一，林建二郎，関根正人，藤田光一，田村正秀，西村晋，浜口憲一郎，護岸ブロックの抗力・揚力係数、および相当粗度の計測方法について，水工学論文集，第44巻，pp1053～1058, 2000.
(20) 江口 譲，西原 崇，水流動試験による電線の風荷重低減化のメカニズム解明，電力中央研究所　研究報告U96050, 1997.
(21) M.R. Ahmed, S.D. Sharma, An investigation on the aerodynamics of a symmetrical airfoil in ground effect, Experimental Thermal and Fluid Science, 29, pp.633-647, 2005.
(22) Schmidlin, T., Hammer,B., King,P., Ono, Y., Miller, L. S. and Thumann, G., Unsafe at any (wind) speed? -Testing the stability of motor vehicles in severe winds-, Vol.83, No.12, pp.1821-1830, 2002.
(23) Lei, C., Cheng, L. and Kavanagh, K., Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol.80, pp.263-286, 1999.
(24) Fujita, T. T., and J. R. McDonald, Tornado damage at the Grand Gulf, Mississippi nuclear power plant site: Aerial and ground surveys, U.S. Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-0383, 1978.
(25) 札幌管区気象台: 平成18年11月7日から9日に北海道（佐呂間町他）で発生した竜巻等の突風. 災害時気象調査報告，災害時自然現象報告書，2006 年第 1 号，2006.
（http://www.jma-net.go.jp/sapporo/tenki/yohou/saigai/saroma/saroma.htmlにて閲覧可能。）
(26) 奥田泰雄，喜々津仁密，村上知徳，2006年佐呂間町竜巻　被害調査報告. 建築研究所災害調査，49，2006.
(http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/other.html)

(27) 江口譲，杉本聡一郎，服部康男，平口博丸，原子力発電所での竜巻飛来物速度の合理的評価法 （Fujita の竜巻モデルを用いた数値解析コードの妥当性確認），日本機械学会論文集，Vol.81，No.823，2015.

「フジタモデル」及び「ランキン渦モデル」並びに「それぞれの風速場モデルを用いた際の飛来物評価手法」の比較

		フジタモデル（及び同モデルを用いた際の飛来物評価手法）	ランキン渦モデル（及び同モデルを用いた際の飛来物評価手法）
風速場モデル	各風速場モデルの概要	 フジタモデルの風速場 ・Fujita により実観測に基づき考案された竜巻風速場モデルであり，実際に近い風速場構造を有する ・半径方向に（内部コア，外部コア，最外領域）の 3 つの領域で構成され，外部コアに上昇風速を有する ・接線風速や上昇風速に高さ依存性がある ・米国 DOE 重要施設の基準において，竜巻飛来物速度，飛散高さの設定に使用	 ランキン渦モデルの風速場 ・簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現 ・上昇流は全領域に存在 ・接線風速や上昇風速に高さ依存性がなく，地面から吹き出しが生じる流れとなっている （飛散評価を行う場合，地上からの物体の浮上・飛散挙動を表現できないため，地上の物体であっても空中浮遊状態を仮定して評価することになる） ・米国 NRC Regulatory Guide 1.76 にて採用
	メリット	・地面に置かれた物体へ影響を与える風速場をよく表現できており，地上からの物体の浮上・飛散解析が可能 **→地上における構造物に対する力や挙動を表現するのに適しているモデルであり，防護対策や固縛対策の範囲や強度について，実効性の高い対策とすることが可能。**	・簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現可能
	デメリット	特になし。 （ランキン渦モデルに比べ，解析プログラムが複雑になるが，近年の計算機能力の向上や評価ツールの高度化により問題とならない）	・風速場に高度依存性がなく，上昇流が全領域に存在する（地面からも吹き出しがある）ため，実現象から乖離しており，地上からの物体の浮上・飛散挙動を表現できない **→地上における構造物に対し，過度に保守的な防護対策や固縛対策が必要となる。** （例えば，可搬型重大事故等対処設備の車両を固縛することで，機動性が損なわれる）
	主なパラメータ （設計竜巻の最大風速 92m/s の場合）	竜巻の移動速度 V_T：14(m/s) 最大接線風速 V_{Rm}：78(m/s) 最大接線風速半径 R_m：30(m) ガイドの値や式が風速場モデルによらないことを確認の上，各値や式をフジタモデルへ適用 最大気圧低下量 ΔP_{max}：64(hPa) 最大気圧低下率$(dp/dt)_{max}$：42(hPa/s) フジタモデルの圧力分布は複雑であるため，有限要素法の数値解析により算出 （フジタモデルは，地面との摩擦の影響を受けず回転するランキン渦に比べ，地面との摩擦の影響により回転が弱まり中心付近が低圧になりにくいモデルである。そのため，ランキン渦より最大気圧低下量が小さくなる） 内部コア半径と外部コア半径の比 ν：0.3 流入層高さ H_i：15(m) Fujita により提案された経験式より算出 （流入層高さは他の文献に示されている値とおおむね同じであることを確認） ※：その他の定数についても，Fujita により提案された値を使用	竜巻の移動速度 V_T：14(m/s) 最大接線風速 V_{Rm}：78(m/s) 最大接線風速半径 R_m：30(m) 最大気圧低下量 ΔP_{max}：75(hPa) 最大気圧低下率$(dp/dt)_{max}$：35(hPa/s) ガイドの値や式より算出
飛来物評価手法	物体の浮上・飛来モデル	 フジタモデルの場合の飛来物の運動モデル ≪物体の浮上・飛来モデル≫ ・地面の存在により物体上面と下面の流れが非対象となることで生じる地面効果による揚力（左図 A/B）と流れの速度方向に平行な抗力（左図 A~C，ただし地面付近では抗力の影響は小さい）を考慮し，地面に置かれた状態からの飛来高さや飛来物速度等を評価 ≪揚力係数≫ ・地面から浮き上がる際の物体挙動を理論的に評価することは困難であるため，翼のような極端な形状を除き保守的となるよう，風洞実験の結果を踏まえ，代用の揚力係数を設定（物体の風の受け方や高度を変化させた場合でも，代用揚力係数が実測値より保守的になっていることを確認）	 ランキン渦モデルの場合の飛来物の運動モデル ≪物体の浮上・飛来モデル≫ ・物体に働く流れの速度方向に平均的な抗力（左図 D/E）と自重の関係から，物体が飛来するか否かを判定し，飛来する場合には，風速場を表現できている空中浮遊状態からの飛来高さや飛来速度等を評価 ≪抗力係数≫ ・物体がランダム回転し，物体の各面に均等に力を受けるものとして，抗力係数は 3 方向の平均値を設定
	竜巻が物体に与える速度に関する設定	・竜巻に対する物体の場所依存性を考慮し，風速場における物体の中から，最大の飛来物速度や飛来距離を設定 ・実際に竜巻が遠方から近づく場合には，低い風速に曝され飛来することになるが，物体を強制的に高速域に配置し，物体が瞬時に最大風速を受けるよう設定	同左

別　添　3-1

柏崎刈羽原子力発電所６号及び７号炉

火山影響評価について

第 6 条：外部からの衝撃による損傷の防止

目次

別添 3-1
1.　基本方針
　1.1 概要
　1.2 火山影響評価の流れ
2.　立地評価
　2.1 原子力発電所に影響を及ぼし得る火山の抽出
　2.2 運用期間における火山活動に関する個別評価
3.　影響評価
　3.1 火山事象の影響評価
　3.2 火山事象（降下火砕物）に対する設計の基本方針
　3.3 安全施設のうち評価対象施設の抽出
　3.4 降下火砕物による影響の選定
　3.5 設計荷重の設定
　3.6 降下火砕物に対する設計
　3.7 降下火砕物の除去等の対策
4.　まとめ

補足資料
　1. 評価ガイドとの整合性について
　2. 降下火砕物の特徴及び影響モードと，影響モードから選定された影響因子に対し影響を受ける評価対象施設の組み合わせについて
　3. 降下火砕物による摩耗について
　4. 降下火砕物の化学的影響（腐食）について
　5. 積雪と降下火砕物との重畳の考え方について
　6. 降下火砕物による送電鉄塔への影響について
　7. 降下火砕物による非常用ディーゼル発電機の吸気に係るバグフィルタの影響評価
　8. アイスランド火山を用いる基本的考え方とセントヘレンズ火山による影響評価
　9. 降下火砕物の侵入による非常用ディーゼル機関空気冷却器への影響
　10. 降下火砕物の侵入による潤滑油への影響
　11. 降下火砕物のその他設備への影響について
　12. 降下火砕物の金属腐食研究

13. 安全保護系盤への降下火砕物の影響
14. 6 号及び 7 号炉の建屋及び屋外タンクの降灰除去について
15. アクセスルートにおける降下火砕物除去時間の評価について
16. 降下火砕物降灰時のバグフィルタ取替えについての手順
17. 観測された諸噴火の最盛期における噴出率と継続時間
18. 重大事故等対処設備への考慮
19. 軽油タンクからの燃料移送について
20. 水質汚染に対する補給水等への影響について

1. 基本方針

1.1 概要

原子力規制委員会の定める「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置，構造及び設備の基準に関する規則（平成 25 年 6 月 28 日原子力規制委員会規則第五号）」第六条において，外部からの衝撃による損傷防止として，安全施設は，想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならないとしており，敷地周辺の自然環境をもとに想定される自然現象の一つとして，火山の影響を挙げている。

火山の影響により発電用原子炉施設の安全性を損なわない設計であることを評価するため，火山影響評価を行い，発電用原子炉施設へ影響を与えないことを評価する。

1.2 火山影響評価の流れ

火山影響評価は，図 1.1 に従い，立地評価と影響評価の 2 段階で行う。

立地評価では，原子力発電所に影響を及ぼし得る火山の抽出を行い，抽出された火山の火山活動に関する個別評価を行う。具体的には設計対応不可能な火山事象が柏崎刈羽原子力発電所の運用期間中に影響を及ぼす可能性の評価を行う。

設計対応不可能な火山事象が影響を及ぼす可能性が十分低いと評価された場合は，原子力発電所に影響を与える可能性のある火山事象の抽出とその影響評価を行う。

影響評価では，個々の火山事象への設計対応及び運転対応の妥当性について評価を行う。影響評価の詳細フローは図 1.2 に示す。

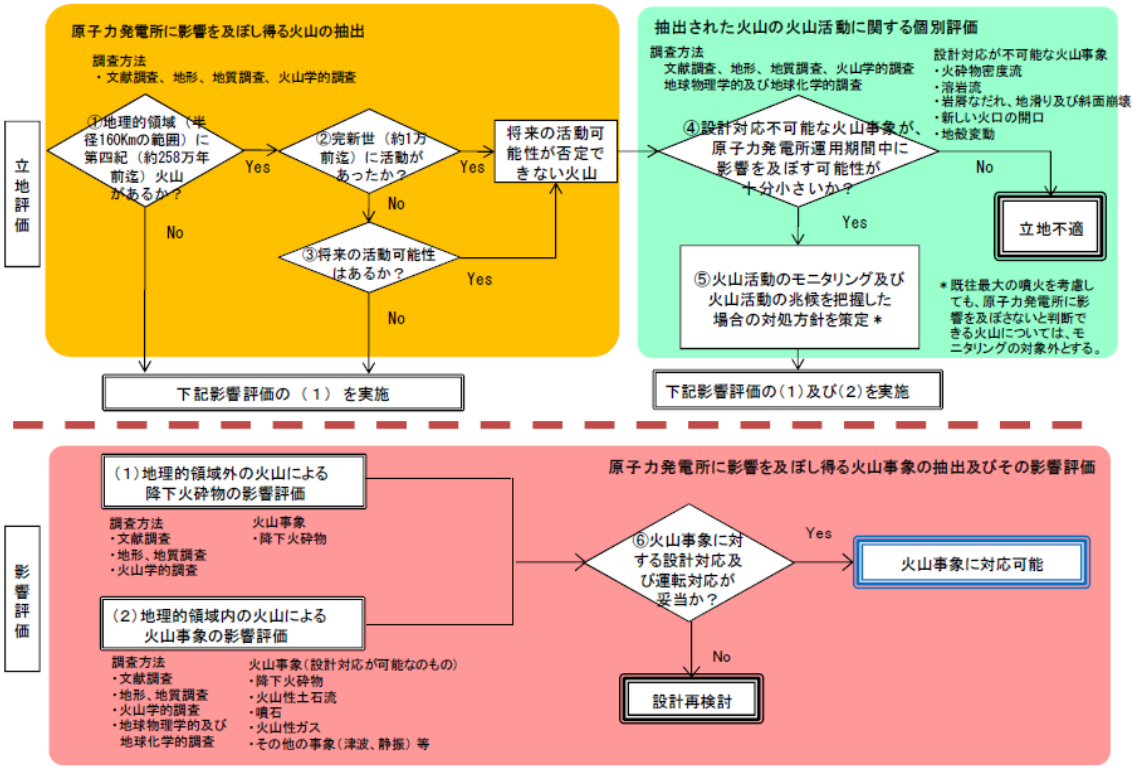


図 1.1 火山影響評価の基本フロー「原子力発電所の火山影響評価ガイド」から抜粋

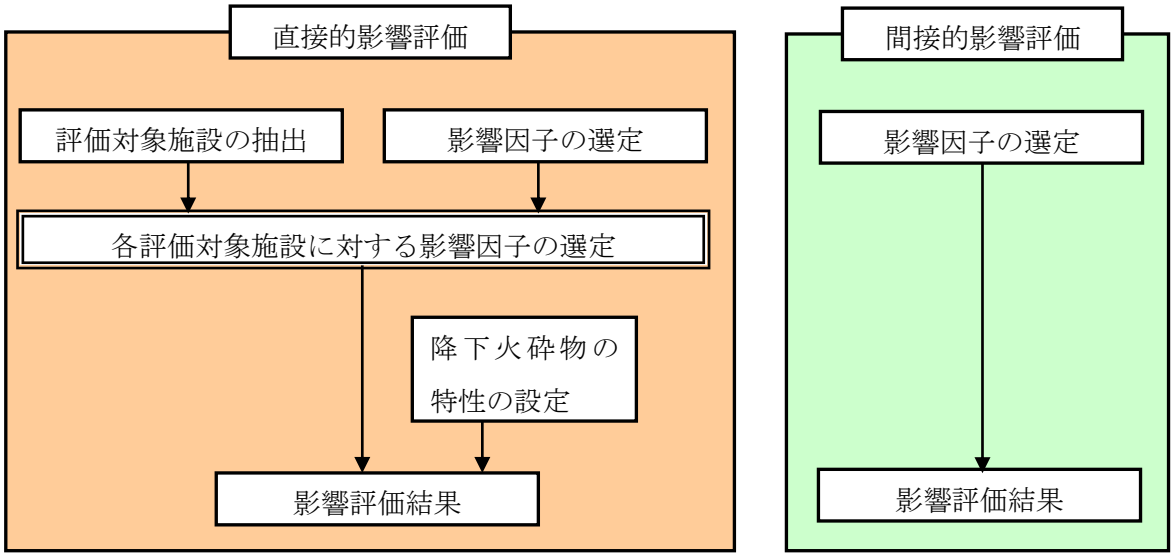


図 1.2 影響評価のフロー

2. 立地評価

2.1 原子力発電所に影響を及ぼし得る火山の抽出

地理的領域内に分布する第四紀火山（82 火山）について，完新世における活動の有無を確認し，将来の活動可能性のある火山，若しくは将来の活動可能性が否定できない火山を抽出した。

その結果，黒岩山，苗場山，妙高山，志賀高原火山群，新潟焼山，新潟金山，黒姫山，燧ヶ岳，志賀，沼沢，飯縄山，草津白根山，日光白根山，子持山，四阿山，白馬大池，榛名山，男体・女峰火山群，赤城山，烏帽子火山群，鼻曲山，浅間山，高原山，那須岳，立山，磐梯山，上廊下，吾妻山，鷲羽・雲ノ平，北八ヶ岳，安達太良山，環諏訪湖及び笹森山の 33 火山を将来の活動可能性のある火山又は将来の活動可能性を否定できない火山として評価した。

2.2 運用期間における火山活動に関する個別評価

将来の活動可能性のある火山又は将来の活動可能性を否定できない火山として評価した 33 火山を対象として，文献調査に基づき，運用期間における火山活動に関する設計対応不可能事象（火砕物密度流，溶岩流，岩屑なだれ，地滑り及び斜面崩壊，新しい火口の開口，地殻変動）の個別評価を行った。

火砕物密度流による堆積物が敷地周辺では確認されておらず，敷地まで十分に離隔距離があることから，発電所に影響を及ぼす可能性は十分に低いと評価した。

溶岩流，岩屑なだれ，地滑り及び斜面崩壊については，それぞれの火山と敷地との位置関係より，敷地まで十分な離隔距離があることから，発電所に影響を及ぼす可能性は十分に低いと評価した。

新しい火口の開口については，敷地周辺で深部低周波地震の活動がないこと，地温勾配

が小さく，また地殻熱流量が小さいことから，発電所に影響を及ぼす可能性は十分に低いと評価した。

地殻変動については，敷地周辺が過去の火山活動に伴う火口及びその近傍に位置しないことから，発電所に影響を及ぼす可能性は十分に低いと評価した。

以上の検討結果より，発電所の運用期間に設計対応不可能な火山事象が，発電所に影響を及ぼす可能性は十分に低いと評価した。また，これらの火山活動は，既往最大規模の噴火を考慮しても，発電所に影響を及ぼさないと評価し，火山モニタリングは不要と判断した。

3. 影響評価

3.1 火山事象の影響評価

将来の活動可能性が否定できない火山について，柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉の運用期間中の噴火規模を考慮し，それが噴火した場合，原子力発電所の安全機能に影響を及ぼし得る火山事象を抽出した結果，降下火砕物（火山灰）（以下「降下火砕物」という。）のみが柏崎刈羽原子力発電所に影響を及ぼし得る火山事象であるという結果となった。

地質調査において，発電所敷地周辺で確認されている降下火砕物堆積層について，給源が特定できる降下火砕物については，各火山の活動性を評価し，同規模の噴火が発生する可能性は十分に低いと評価した。また，給源不明の降下火砕物（阿相島テフラ等）は，敷地内で最大 35cm を確認しているが，水系等の影響を受けて堆積したと推定され，当時の堆積環境は現在と異なると考えられる。

一方，発電所運用期間中に，このような規模の降下火砕物が敷地周辺に生じる蓋然性を確認するため，文献，既往解析結果の知見及び降下火砕物シミュレーションを用い検討した結果，降下火砕物の層厚を約 23.1cm と評価した。以上のことから，発電所運用期間中に敷地内で想定する降下火砕物の最大層厚は，評価結果の約 23.1cm に対し，敷地内で給源不明なテフラの最大層厚 35cm が確認されていることを踏まえ，保守的に 35cm と設定する。そのほか得られた降下火砕物の特性を表 1.1 に示す。なお，鉛直荷重については，湿潤状態の降下火砕物に，プラント寿命期間を考慮して年超過確率 10^{-2} 規模の積雪を踏まえ設定する。

表 1.1　降下火砕物特性の設定結果

項　目	設　定	備　考
層　厚	35cm	鉛直荷重に対する健全性評価に使用
密　度※1	湿潤密度：1.5g/cm^3	
荷　重※2	8,542N/m^2	
粒　径	8.0mm 以下	水循環系の閉塞並びに換気系，電気系及び計測制御系の機械的影響（閉塞・摩耗）評価に使用

※1：密度は，構造物への静的負荷の評価に用いる値であり，乾燥状態の密度は，湿潤状態の密度に包含される。

※2：湿潤状態の降下火砕物の荷重（35cm×1500kg/m^3×9.80665m/s^2）＋積雪荷重（115.4cm※3×29.4N/（m^2・cm）※4）＝8,542N/m^2（小数点以下を切り上げ）

※3：積雪量＝１日あたりの積雪量の年超過確率 10^{-2} の値（84.3cm）

＋日最深積雪量の平均値（31.1cm）＝115.4cm

※4：新潟県建築基準法施行細則に基づく積雪の単位荷重（積雪 1cm 当たり 29.4N/m^2）

3.2 火山事象（降下火砕物）に対する設計の基本方針

将来の活動可能性が否定できない火山について，柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉の運用期間中の噴火規模を考慮し，それが噴火した場合，原子力発電所の安全機能に影響を及ぼし得る火山事象を抽出した結果，降下火砕物のみが柏崎刈羽原子力発電所に影響を及ぼし得る火山事象であるという結果となった。

降下火砕物に対し，防護すべき評価対象施設の安全機能を損なわない設計とする。以下に，火山事象に対する防護の基本方針を示す。

(1)降下火砕物による直接的な影響（荷重，閉塞，摩耗，腐食等）に対して，安全機能を損なわない設計とする。

(2)発電所内の構築物，系統及び機器における降下火砕物の除去等の対応が可能な設計とする。

(3)降下火砕物による間接的な影響として考慮する，広範囲にわたる送電網の損傷による 7 日間の外部電源の喪失及び発電所外での交通の途絶によるアクセス制限に対し，発電用原子炉の停止及び停止後の発電用原子炉の冷却，並びに使用済燃料プールの冷却に係る機能を担うために必要となる電源の供給が非常用ディーゼル発電機により継続できる設計とすることにより，安全機能を損なわない設計とする。

3.3 安全施設のうち評価対象施設の抽出

「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置，構造及び設備の基準に関する規則（平成 25 年 6 月 28 日原子力規制委員会規則第五号）」第六条において，外部からの衝撃による損傷の防止として，「安全施設は，想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。」とされている。

設置許可基準規則第六条における安全施設とは，「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」で規定されているクラス 1，クラス 2 及びクラス 3 に該当する構築物，系統及び機器（以下「安全重要度分類のクラス 1，クラス 2 及びクラス 3 に属する構築物，系統及び機器」という。）を指していることから，降下火砕物によってその安全機能が損なわれないことを確認する必要がある施設を，安全重要度分類のクラス 1，クラス 2 及びクラス 3 に属する構築物，系統及び機器とする。

また，以下の点を踏まえ，降下火砕物によってその安全機能が損なわれないことを確認する必要がある施設のうち，外部事象防護対象施設は，外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器（発電用原子炉を停止するため，また，停止状態にある場合は引き続きその状態を維持するために必要な異常の発生防止の機能，又は異常の影響緩和の機能を有する構築物，系統及び機器，並びに，使用済燃料プールの冷却機能及び給水機能を維持するために必要な異常の発生防止の機能，又は異常の影響緩和の機能を有する構築物，系統及び機

器として安全重要度分類のクラス 1，クラス 2 及び安全評価上その機能に期待するクラス 3 に属する構築物，系統及び機器）に加え，それらを内包する建屋とする。

・降下火砕物襲来時の設備損傷状況を踏まえ，必要に応じプラント停止の措置をとること

・プラント停止後は，その状態を維持することが重要であること

その上で，外部事象防護対象施設のうち，屋内設備は内包する建屋により防護する設計とし，評価対象施設を，屋外設備，建屋及び屋外との接続がある設備（屋外に開口している設備又は外気から取り入れた屋内の空気を機器内に取り込む機構を有する設備）に分類し，抽出する。

なお，上記以外の安全施設については，降下火砕物に対して機能を維持すること，若しくは，降下火砕物による損傷を考慮して，代替設備により必要な機能を確保すること，安全上支障のない期間での除灰，修復等の対応，又は，それらを適切に組み合わせることで，その安全機能を損なわない設計とする。

以上を踏まえた，評価フローを図 1.3 に示す。評価フローに基づき抽出した評価対象施設を表 1.2 及び表 1.3 に示すとともに，評価対象施設の設置場所を図 1.4 に示す。

また，設置許可基準規則第四十三条の要求を踏まえ，設計基準事象によって，設計基準対象施設の安全機能と重大事故等対処設備の機能が同時に損なわれることがないことを確認するとともに，重大事故等対処設備の機能が喪失した場合においても，外殻となる建屋による防護に期待できる代替手段等により必要な機能を維持できることを確認する。（補足資料-18）

なお，降下火砕物に対する重大事故等対処設備の設計方針は，設置許可基準規則第四十三条（重大事故等対処設備）にて考慮する。

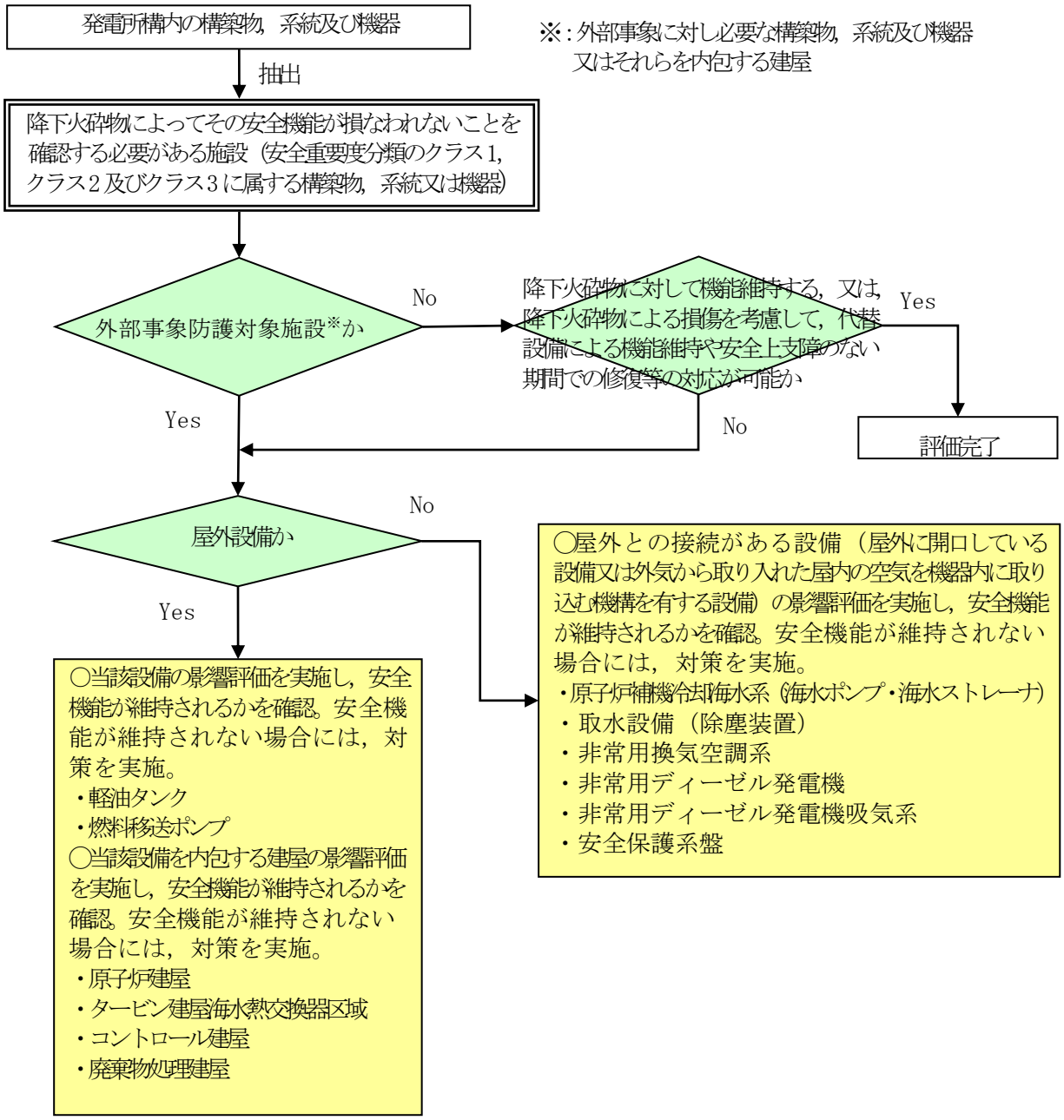


図 1.3 降下火砕物に対する安全施設の評価フロー

表 1.2 評価対象施設

分類	評価対象施設
屋外設備	・軽油タンク（クラス 1） ・燃料移送ポンプ（クラス 1）
建屋	・原子炉建屋 ・タービン建屋海水熱交換器区域 ・コントロール建屋 ・廃棄物処理建屋
屋外との接続がある設備（屋外に開口している設備又は外気から取り入れた屋内の空気を機器内に取り込む機構を有する設備）	・原子炉補機冷却海水系（クラス 1） （海水ポンプ・海水ストレーナ） ・取水設備（除塵装置）（クラス 3） ・非常用換気空調系（クラス 1） （中央制御室換気空調系） ・非常用換気空調系（クラス 2） （非常用ディーゼル発電機電気品区域換気空調系（非常用ディーゼル発電機非常用送風機含む），コントロール建屋計測制御電源盤区域換気空調系，海水熱交換器区域換気空調系） ・非常用ディーゼル発電機（クラス 1） ・非常用ディーゼル発電機吸気系（クラス 1） ・安全保護系盤（クラス 1）

表 1.3 評価対象施設の抽出（1/4）

分類	安全機能の重要度分類		設備設置箇所※2	降下火砕物に対して機能維持する，又は，降下火砕物による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応可能	屋外設備	屋外との接続がある設備	評価対象施設
	機能	構築物，系統又は機器※1					
PS-1	原子炉冷却材圧力バウンダリ機能	原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系	R/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	原子炉建屋
	過剰反応度の印加防止機能	制御棒カップリング・制御棒駆動機構	R/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	原子炉建屋
	炉心形状の維持機能	炉心支持構造物，燃料集合体	R/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	原子炉建屋
MS-1	原子炉の緊急停止機能	原子炉停止系の制御棒による系（制御棒，制御棒駆動系）	R/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	原子炉建屋
	未臨界維持機能	原子炉停止系（制御棒による系，ほう酸水注入系）	R/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	原子炉建屋
	原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止機能	逃がし安全弁（安全弁としての開機能）	R/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	原子炉建屋
	原子炉停止後の除熱機能	残留熱を除去する系統（残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード），原子炉隔離時冷却系，高圧炉心注水系，逃がし安全弁（手動逃がし機能），自動減圧系（手動逃がし機能）），サプレッションプール	R/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	原子炉建屋
		復水補給水系（復水貯蔵槽）	Rw/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	廃棄物処理建屋
	炉心冷却機能	非常用炉心冷却系（残留熱除去系（低圧注水モード），原子炉隔離時冷却系，高圧炉心注水系，自動減圧系（逃がし安全弁）），サプレッションプール	R/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	原子炉建屋
		復水補給水系（復水貯蔵槽）	Rw/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	廃棄物処理建屋
	放射性物質の閉じ込め機能，放射線の遮蔽及び放出低減機能	原子炉格納容器，原子炉格納容器隔離弁及び原子炉格納容器バウンダリ配管，主蒸気流量制限器，残留熱除去系（格納容器スプレイ冷却モード）	R/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	原子炉建屋
		原子炉建屋原子炉区域（ブローアウトパネル付き）	屋外（建屋）	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	○	－	原子炉建屋
		非常用ガス処理系，可燃性ガス濃度制御系	R/B	○（屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
		主排気筒（非常用ガス処理系排気管の支持機能）	屋外	○（降下火砕物による影響なし（非常用ガス処理系配管については，内部に侵入しにくい設計のため影響なし））	－	－	－
		遮蔽設備（原子炉遮蔽壁，一次遮蔽壁）	R/B	○（屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
		遮蔽設備（二次遮蔽壁）	屋外（建屋）	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	○	－	原子炉建屋
	工学的安全施設及び原子炉停止系への作動信号の発生機能	安全保護系	R/B C/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	○	原子炉建屋 コントロール建屋 安全保護系盤
	安全上特に重要な関連機能	非常用交流電源系（発電機から非常用負荷までの配電設備及び電路）	R/B・C/B・T/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	原子炉建屋 コントロール建屋 タービン建屋海水熱交換器区域
		非常用ディーゼル発電機（屋内設備）	R/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	○	原子炉建屋 非常用ディーゼル発電機 非常用ディーゼル発電機吸気系
		軽油タンク	屋外	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	○	－	軽油タンク
		非常用ディーゼル発電機燃料移送系	屋外	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	○	－	燃料移送ポンプ
		中央制御室及び遮蔽・中央制御室換気空調系	C/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	○	コントロール建屋 非常用換気空調系
		原子炉補機冷却水系・原子炉補機冷却海水系	R/B・T/B・C/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	○	原子炉建屋 タービン建屋海水熱交換器区域 コントロール建屋 原子炉補機冷却海水系 取水設備（除塵装置）
		非常用直流電源系・計測制御用電源設備	R/B・C/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	原子炉建屋 コントロール建屋

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる
又は各外部事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能

※1：間接関連系は，当該系の機能遂行に直接必要ない構築物，系統及び機器であるため，記載を省略した（評価対象施設に関する物のみ記載）
※2：重大事故等対処設備（SA 設備），原子炉建屋（R/B），タービン建屋（T/B），コントロール建屋（C/B），廃棄物処理建屋（Rw/B）

○：YES　×：No　－：該当せずもしくは評価完了

表 1.3 評価対象施設の抽出（2/4）

分類	安全機能の重要度分類		設備設置箇所※2	降下火砕物に対して機能維持する，又は，降下火砕物による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応可能	屋外設備	屋外との接続がある設備	評価対象施設
	機能	構築物，系統又は機器※1					
PS-2	原子炉冷却材を内蔵する機能（ただし，原子炉冷却材圧力バウンダリから除外されている計装等の小口径のもの及びバウンダリに直接接続されていないものは除く。）	原子炉冷却材浄化系（原子炉冷却材圧力バウンダリから外れる部分），主蒸気系	R/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
		原子炉隔離時冷却系タービン蒸気供給ライン	R/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	原子炉建屋
	原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていないものであって，放射性物質を貯蔵する機能	使用済燃料プール（使用済燃料貯蔵ラックを含む），新燃料貯蔵庫（臨界を防止する機能）	R/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	原子炉建屋
		気体廃棄物処理系（活性炭式希ガスホールドアップ装置）	T/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
	燃料を安全に取り扱う機能	燃料交換機，原子炉建屋クレーン，原子炉ウェル	R/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
	安全弁及び逃がし弁の吹き止まり機能	逃がし安全弁（吹き止まり機能に関連する部分）	R/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	原子炉建屋
MS-2	安全上特に重要な関連機能の間接関連系	非常用所内電源系空調	R/B・C/B・T/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	○	原子炉建屋 コントロール建屋 タービン建屋海水熱交換器区域 非常用換気空調系
	使用済燃料プール水の補給機能	残留熱除去系（使用済燃料プール水の補給），サプレッションプール	R/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	原子炉建屋
	放射性物質放出の防止機能	燃料プール冷却浄化系の燃料プール入口逆止弁	R/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	原子炉建屋
		原子炉建屋原子炉区域（ブローアウトパネル付き）	屋外（建屋）	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	○	－	原子炉建屋
		気体廃棄物処理系（OG 系）隔離弁	T/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
		主排気筒（非常用ガス処理系排気管の支持機能以外の部分）	屋外	○ （除灰により対応）	○	－	－
		非常用ガス処理系	R/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
	事故時のプラント状態の把握機能	事故時監視計器の一部（格納容器エリアモニタ等）	C/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	コントロール建屋
	制御室外からの安全停止機能	制御室外原子炉停止装置（安全停止に関連するもの）	R/B	－（外部事象防護対象施設のため対象外）	×	×	原子炉建屋

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる
又は各外部事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能

※1：間接関連系は，当該系の機能遂行に直接必要ない構築物，系統及び機器であるため，記載を省略した（評価対象施設に関する物のみ記載）
※2：重大事故等対処設備（SA 設備），原子炉建屋（R/B），タービン建屋（T/B），コントロール建屋（C/B），廃棄物処理建屋（Rw/B）

○：YES　×：No　－：該当せずもしくは評価完了

表 1.3 評価対象施設の抽出（3/4）

分類	安全機能の重要度分類		設備設置箇所※2	降下火砕物に対して機能維持する，又は，降下火砕物による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応可能	屋外設備	屋外との接続がある設備	評価対象施設
	機能	構築物，系統又は機器※1					
PS-3	原子炉冷却材保持機能（PS-1，PS-2 以外のもの）	原子炉冷却材圧力バウンダリから除外される計装等の小口径配管，弁	R/B	○（屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
	原子炉冷却材の循環機能	冷却材再循環系	R/B	○（屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
	放射性物質の貯蔵機能	圧力抑制室プール水排水系（圧力制御室サージタンク）	屋外	○（運用停止等により影響なし）	－	－	－
		復水貯蔵槽，液体廃棄物処理系，固体廃棄物処理系	Rw/B	○（屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
		固体廃棄物貯蔵庫	屋外（建屋）	○（補修を実施（放射性物質の拡散防止について適切な処置を実施））	－	－	－
		固体廃棄物処理建屋	屋外（建屋）	○（補修を実施（放射性物質の拡散防止について適切な処置を実施））	－	－	－
		焼却炉建屋	屋外（建屋）	○（補修を実施（放射性物質の拡散防止について適切な処置を実施））	－	－	－
		新燃料貯蔵庫，新燃料貯蔵ラック	R/B	○（屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
		使用済燃料輸送容器保管建屋	屋外（建屋）	○（補修を実施（放射性物質の拡散防止について適切な処置を実施））	－	－	－
	電源供給機能（非常用を除く）	タービン，発電機及び励磁装置，復水系（復水器を含む），給水系，循環水系	T/B	○（屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
		送電線	屋外	○（代替設備（非常用ディーゼル発電機）により機能維持可能）	－	－	－
		変圧器，開閉所	屋外	○（代替設備（非常用ディーゼル発電機）により機能維持可能）	－	－	－
	プラント計測・制御機能（安全保護機能を除く）	原子炉制御系（制御棒価値ミニマイザ含む），原子炉核計装系の一部，原子炉プラントプロセス計装の一部	C/B	○（屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
	プラント運転補助機能	所内ボイラ設備	補助ボイラ建屋	○（補修を実施）	－	－	－
		所内蒸気系及び戻り系	R/B・T/B・Rw/B	○（屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
		計装用圧縮空気系	R/B・T/B・C/B	○（建屋内は，外気取入口にバグフィルタが設置されている換気空調系によって，空調管理されているため，屋内の空気取り込みによる影響なし））	－	－	－
		原子炉補機冷却水系(MS-1)関連以外（配管／弁）	R/B・T/B・Rw/B	○（屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
		タービン補機冷却水系・タービン補機冷却海水系	T/B	○（補修を実施）	－	－	－
		復水補給水系（復水貯蔵槽）	Rw/B	○（屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
	核分裂生成物の原子炉冷却材中の放散防止機能	燃料被覆管	R/B	○（屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
	原子炉冷却材の浄化機能	原子炉冷却材浄化系	R/B	○（屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
		復水浄化系	T/B	○（屋内設備のため，影響なし）	－	－	－

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる
又は各外部事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能

※1：間接関連系は，当該系の機能遂行に直接必要ない構築物，系統及び機器であるため，記載を省略した（評価対象施設に関する物のみ記載）
※2：重大事故等対処設備（SA 設備），原子炉建屋（R/B），タービン建屋（T/B），コントロール建屋（C/B），廃棄物処理建屋（Rw/B）

○：YES　×：No　－：該当せずもしくは評価完了

表 1.3 評価対象施設の抽出（4/4）

分類	安全機能の重要度分類		設備設置箇所※3	降下火砕物に対して機能維持する，又は，降下火砕物による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応可能	屋外設備	屋外との接続がある設備	評価対象施設
	機能	構築物，系統又は機器※1					
MS-3	原子炉圧力上昇の緩和機能	逃がし安全弁（逃がし弁機能）	R/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
		タービン・バイパス弁	T/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
	出力上昇の抑制機能	冷却材再循環流量制御系（再循環ポンプトリップ機能），制御棒引抜監視装置	R/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
	原子炉冷却材の補給機能	制御棒駆動水圧系，原子炉隔離時冷却系	R/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
	原子炉冷却材の再循環流量低下の緩和機能	冷却材再循環ポンプ MG セット	Rw/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
	緊急時対策上重要なもの及び異常状態の把握機能	5 号炉原子炉建屋内緊急時対策所	R/B （5 号炉）	○ （設計荷重に対して影響ないことを確認）	－	－	－
		試料採取系	R/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
		通信連絡設備 所外通信※2 有線系	各建屋 （地下設備含む）	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
			送電鉄塔	○ （代替設備（衛星系）の除灰により機能維持可能）	－	－	－
		通信連絡設備 所内通信※2 有線系	各建屋 （地下設備含む）	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
			屋外設備	○ （補修の実施により対応）	－	－	－
		放射能監視設備 モニタリングポスト	屋外	○ （代替設備（可搬型モニタリング設備）により機能維持可能）	－	－	－
		放射能監視設備 放射能観測車	可搬型 SA 設備保管場所	○ （除灰により対応）	－	－	－
		事故時監視計器の一部	R/B，T/B，C/B，Rw/B	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－
			気象観測装置	○ （代替設備（可搬型気象観測装置）により機能維持可能）	－	－	－
		津波監視カメラ	7 号炉 R/B 主排気筒	○ （設計荷重に対して影響ないことを確認）	－	－	－
		消火系	給水建屋 水処理建屋	○ （補修の実施により対応）	－	－	－
			ろ過水タンク （屋外配管含む）	○ （補修の実施により対応）	－	－	－
			泡消火設備	○ （補修の実施により対応）	－	－	－
		安全避難通路，非常用照明	各建屋内	○ （屋内設備のため，影響なし）	－	－	－

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる
　又は各外部事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能

※1：間接関連系は，当該系の機能遂行に直接必要ない構築物，系統及び機器であるため，記載を省略した（評価対象施設に関する物のみ記載）
※2：所外通信（有線系，衛星系），所内通信（有線系，衛星系，無線系）のうち，優先的に使用する有線系の評価結果を代表で記載した
※3：重大事故等対処設備（SA 設備），原子炉建屋（R/B），タービン建屋（T/B），コントロール建屋（C/B），廃棄物処理建屋（Rw/B）

○：YES　×：No　－：該当せずもしくは評価完了

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

図 1.4 評価対象施設の設置場所（1/6）

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

7号炉原子炉建屋地上3階

7号炉原子炉建屋地上4階

7号炉原子炉建屋地下1階

7号炉原子炉建屋地上3階（中間階）

図1.4 評価対象施設の設置場所（2/6）

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

7号炉タービン建屋地下1階

7号炉タービン建屋地上3階

7号炉タービン建屋地下2階

図 1.4 評価対象施設の設置場所（3/6）

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

6 号炉原子炉建屋地上 3 階

6 号炉原子炉建屋地下 1 階

6 号炉原子炉建屋地上 4 階

6 号炉原子炉建屋地上 3 階（中間階）

図 1.4 評価対象施設の設置場所（4/6）

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

6 号炉タービン建屋地下 1 階

6 号炉タービン建屋地下 2 階

6 号炉タービン建屋地上 3 階

6 号炉タービン建屋地上 2 階

図 1.4 評価対象施設の設置場所（5/6）

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

6，7号炉コントロール建屋屋上

6，7号炉コントロール建屋地下1階

6，7号炉コントロール建屋地上2階

図 1.4 評価対象施設の設置場所（6/6）

3.4 降下火砕物による影響の選定

降下火砕物の特徴及び評価対象施設の構造や設置状況等を考慮して，降下火砕物が直接及ぼす影響（以下「直接的影響」という。）とそれ以外の影響（以下「間接的影響」という。）として選定する。

3.4.1 降下火砕物の特徴

各種文献の調査結果より， 降下火砕物は以下の特徴を有する。

(1) 火山ガラス片， 鉱物結晶片から成る。ただし，火山ガラス片は砂よりもろく硬度は低く，主要な鉱物結晶片の硬度は砂同等またはそれ以下である。

(2) 硫酸等を含む腐食性のガス（以下「腐食性ガス」という。）が付着している。ただし，金属腐食研究の結果より，直ちに金属腐食を生じさせることはない。

(3) 水に濡れると導電性を生じる。

(4) 湿った降下火砕物は乾燥すると固結する。

(5) 降下火砕物粒子の融点は約 1,000℃ であり，一般的な砂に比べ低い。

（補足資料-2）

3.4.2 直接的影響

降下火砕物の特徴から直接的影響の要因となる荷重，閉塞，摩耗，腐食，大気汚染，水質汚染及び絶縁低下を抽出し，評価対象施設の構造や設置状況等を考慮して直接的な影響因子を以下のとおり選定する。なお，柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉で想定される降下火砕物の条件を考慮し，表 1.4 に示す項目について評価を実施する。

(1) 直接的影響の要因の選定と評価手法

(a) 荷重

「荷重」について考慮すべき影響因子は，屋外設備及び建屋の上に堆積し静的な負荷を与える「構造物への静的負荷」，並びに屋外設備及び建屋に対し降灰時に衝撃を与える「粒子の衝突」である。粒子の衝突による影響については，「別添 2-1 竜巻影響評価について」に包絡される。

なお，建屋の評価は，建築基準法における積雪の荷重の考え方に準拠し，降下火砕物及び積雪の除去を適切に行うことから，短期許容応力度を許容限界とする。

また，建屋を除く評価対象施設においては，許容応力を「日本工業規格」，「日本機械学会の基準・指針類」及び「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987（日本電気協会）」に準拠する。

(b) 閉塞

「閉塞」について考慮すべき影響因子は，降下火砕物を含む海水が流路の狭隘部等を閉塞させる「水循環系の閉塞」，並びに降下火砕物を含む空気が機器の狭隘部や換気系の流路を閉塞させる「換気系，電気系及び計測制御系の機械的影響（閉塞）」である。

(c) 摩耗

「摩耗」について考慮すべき影響因子は，降下火砕物を含む海水が流路に接触することにより配管等を摩耗させる「水循環系の内部における摩耗」，並びに降下火砕物を含む空気が動的機器の摺動部に侵入し摩耗させる「換気系，電気系及び計測制御系の機械的影響（摩耗）」である。

(d) 腐食

「腐食」について考慮すべき影響因子は，降下火砕物に付着した腐食性ガスにより建屋及び屋外施設の外面を腐食させる「構築物への化学的影響（腐食）」，換気系，電気系及び計測制御系において降下火砕物を含む空気の流路等を腐食させる「換気系，電気系及び計測制御系の化学的影響（腐食）」，並びに海水に溶出した腐食性成分により海水管等を腐食させる「水循環系の化学的影響（腐食）」である。

(e) 大気汚染

「大気汚染」について考慮すべき影響因子は，降下火砕物により汚染された発電所周辺の大気が運転員の常駐する中央制御室内に侵入することによる居住性の劣化，並びに降下火砕物の除去，屋外設備の点検等，屋外における作業環境を劣化させる「発電所周辺の大気汚染」である。

(f) 水質汚染

「水質汚染」については，外部から供給される水源である，市水道水に降下火砕物が混入することによる汚染が考えられるが，柏崎刈羽原子力発電所では給水処理設備により水処理した給水を使用しており，また水質管理を行っていることから，安全施設の安全機能に影響しない。

（補足資料-20）

(g) 絶縁低下

「絶縁低下」について考慮すべき影響因子は，湿った降下火砕物が電気系及び計測制御系絶縁部に導電性を生じさせることによる盤の「絶縁低下」である。

表 1.4 降下火砕物が設備に影響を与える可能性のある因子

影響を与える可能性のある因子	評　価　方　法	詳細検討すべきもの
構造物への静的負荷	屋外の構築物において降下火砕物堆積荷重による影響を評価する。なお，荷重条件は水を含んだ場合の負荷が大きくなるため，降雨条件及び積雪の重畳を考慮する。	○
構造物への化学的影響（腐食）	屋外設備は外装の塗装等によって影響がないことを評価する。	○
粒子の衝突	降下火砕物は微小な粒子であり，「竜巻影響評価について」で設定している設計飛来物に包絡することを確認していることから，詳細検討は不要。	－
水循環系の閉塞	海水中に漂う降下火砕物の狭隘部等における閉塞の影響を評価する。また，必要に応じて，海水を供給している下流の設備への影響についても考慮する。	○
水循環系の内部における摩耗	海水中に漂う降下火砕物の設備内部の摩耗の影響を評価する。また，必要に応じて，海水を供給している下流の設備への影響についても考慮する。	－
水循環系の化学的影響（腐食）	耐食性のある材料の使用や塗装の実施等によって，腐食による影響がないことを評価する。	○
換気系，電気系及び計測制御系の機械的影響（閉塞・摩耗）	屋外設備等において影響を考慮すべき要因である。なお，必要に応じて，換気空調系の給気を供給している範囲への影響についても考慮する。	○
換気系，電気系及び計測制御系の化学的影響（腐食）	屋外設備等において影響を考慮すべき要因である。なお，必要に応じて，換気空調系の給気を供給している範囲への影響についても考慮する。	○
発電所周辺の大気汚染	運転員が常時滞在する中央制御室における居住性を評価する。	○
水質汚染	水質汚染によって，市水道が汚染する可能性があるが，給水処理設備により水処理した給水を使用しており，また水質管理を行っていることから，プラントの安全機能に影響はない。	－
絶縁低下	送電網より引き込む開閉所や変圧器周りに碍子洗浄装置等があり，降下火砕物が確認された場合，洗浄することが可能である。また，絶縁低下により，外部電源喪失に至った場合，非常用ディーゼル発電機により電源の供給を実施する。 屋内の施設であっても，屋内の空気を取り込む機構を有する計測制御盤については，影響がないことを評価する。	○

3.4.3 間接的影響

降下火砕物によって柏崎刈羽原子力発電所に間接的な影響を及ぼす因子は，湿った降下火砕物が送電線の碍子，開閉所の充電露出部等に付着し絶縁低下を生じさせることによる広範囲にわたる送電網の損傷に伴う「外部電源喪失」，並びに降下火砕物が道路に堆積することによる交通の途絶に伴う「アクセス制限」である。

3.4.4 評価対象施設に対する影響因子の想定

評価すべき直接的影響の要因については，その内容によりすべての評価対象施設に対して評価する必要がない項目もあることから，各評価対象施設と評価すべき直接的影響の要因について整理し，評価対象施設の特性を踏まえて必要な評価項目を表 1.5 のとおり選定した。

3.5 設計荷重の設定

設計荷重は，以下のとおり設定する。

(1) 評価対象施設に常時作用する荷重，運転時荷重

評価対象施設に作用する荷重として，自重等の常時作用する荷重，内圧等の運転時荷重を適切に組み合わせる。

(2) 設計基準事故時荷重

外部事象防護対象施設は，降下火砕物によって安全機能を損なわない設計とするため，設計基準事故とは独立事象である。

また，評価対象施設のうち設計基準事故時荷重が生じる屋外設備としては，軽油タンク及び燃料移送ポンプが考えられるが，設計基準事故時においても，通常運転時の系統内圧力及び温度と変わらないため，設計基準事故により考慮すべき荷重はなく，設計基準事故時荷重と降下火砕物との組み合わせは考慮しない。

(3) その他の自然現象の影響を考慮した荷重の組み合わせ

降下火砕物と組み合わせを考慮すべき火山以外の自然現象は，荷重の影響において地震及び積雪であり，降下火砕物の荷重と適切に組み合わせる。

（補足資料－5）

3.6 降下火砕物に対する設計

3.6.1 直接的影響に対する設計

直接的影響については，評価対象施設の構造や設置状況等（形状，機能，外気吸入や海水通水の有無等）を考慮し，想定される各影響因子に対して，影響を受ける各評価対象施設が安全機能を損なわない以下の設計とする。（表 1.6）

a. 軽油タンク（燃料移送ポンプ含む）

「構造物への静的負荷」について，当該施設の許容荷重が，降下火砕物による荷重に対して安全裕度を有することにより，構造健全性を失わず安全機能を損なわない設計とする。

「腐食」については，金属腐食研究の結果より，降下火砕物に含まれる腐食性ガスによって直ちに金属腐食は生じないが，外装の塗装等によって，短期での腐食により安全機能を損なわない設計とする。なお，降灰後の長期的な腐食の影響については，日常保守管理等により，状況に応じて補修が可能な設計とする。

「閉塞」及び「摩耗」については，軽油タンクのベント管を下向きに取り付ける，また，燃料移送ポンプは，降下火砕物が侵入しにくい設計とする。

b. 外部事象防護対象施設を内包する建屋

原子炉建屋，タービン建屋海水熱交換器区域，コントロール建屋及び廃棄物処理建屋は，「構造物への静的負荷」について，当該施設の許容荷重が，降下火砕物による荷重に対して安全裕度を有することにより，構造健全性を失わず安全機能を損なわない設計とする。なお，建屋の評価は，建築基準法における積雪の荷重の考え方に準拠し，降下火砕物の除去を適切に行うことから，降下火砕物の荷重を短期に生じる荷重とし，建築基準法による短期許容応力度を許容限界とする。

「腐食」については，金属腐食研究の結果より，降下火砕物に含まれる腐食性ガスによって直ちに金属腐食は生じないが，外装の塗装等によって，短期での腐食により安全機能を損なわない設計とする。なお，降灰後の長期的な腐食の影響については，日常保守管理等により，状況に応じて補修が可能な設計とする。

c. 原子炉補機冷却海水ポンプ

「閉塞」については，降下火砕物は粘土質ではないことから水中で固まり閉塞することはないが，降下火砕物の粒径に対し十分な流路幅を設ける設計とするともに，ポンプ軸受部が閉塞しない設計とする。

「摩耗」については，主要な降下火砕物は砂と同等または砂より硬度が低くもろいことから，摩耗の影響は小さく，また，日常保守管理等により，状況に応じて補修が可能であり，摩耗により安全機能を損なわない設計とする。

「腐食」については，金属腐食研究の結果より，降下火砕物に含まれる腐食性ガスによって直ちに金属腐食は生じないが，耐食性のある材料の使用や塗装の実施等によって，短期での腐食により安全機能を損なわない設計とする。なお，降灰後の長期的な腐食の影響については，日常保守管理等により，状況に応じて補修が可能な設計とする。

d. 原子炉補機冷却海水系ストレーナ

「閉塞」については，降下火砕物の粒径に対し十分な流路幅を設ける又は差圧の確認が可能な設計とする。

「摩耗」については，主要な降下火砕物は砂と同等または砂より硬度が低くもろいことから，摩耗の影響は小さく，また，日常保守管理等により，状況に応じて補修が可能であり，摩耗により安全機能を損なわない設計とする。

「腐食」については，金属腐食研究の結果より，降下火砕物に含まれる腐食性ガスによって直ちに金属腐食は生じないが，耐食性のある材料の使用や塗装の実施等によって，短期での腐食により安全機能を損なわない設計とする。なお，降灰後の長期的な腐食の影響については，日常保守管理等により，状況に応じて補修が可能な設計とする。

e. 取水設備（除塵装置）

「閉塞」については，降下火砕物の粒径に対し十分な流路幅を設ける設計とする。

「摩耗」については，主要な降下火砕物は砂と同等または砂より硬度が低くもろいことから，摩耗の影響は小さく，また，日常保守管理等により，状況に応じて補修が可能であり，摩耗により安全機能を損なわない設計とする。

「腐食」については，金属腐食研究の結果より，降下火砕物に含まれる腐食性ガスによって直ちに金属腐食は生じないが，耐食性のある材料の使用や塗装の実施等によって，短期での腐食により安全機能を損なわない設計とする。なお，降灰後の長期的な腐食の影響については，日常保守管理等により，状況に応じて補修が可能な設計とする。

f. 非常用換気空調系

非常用換気空調系（非常用ディーゼル発電機電気品区域換気空調系（非常用ディーゼル発電機非常用送風機含む），中央制御室換気空調系，コントロール建屋計測制御電源盤区域換気空調系，海水熱交換器区域換気空調系）は，「閉塞」及び「摩耗」について，外気取入口に，ルーバが取り付けられており，下方から吸い込む構造であること，非常用換気空調系のバグフィルタ（粒径約2μmに対して80%以上を捕獲する性能）を設置することで，降下火砕物が流路に侵入しにくい設計とする。さらに降下火砕物がバグフィルタに付着した場合でも取替え又は清掃が可能な構造とすることで，降下火砕物により閉塞しない設計とする。

「腐食」については，金属腐食研究の結果より，降下火砕物に含まれる腐食性ガスによって直ちに金属腐食は生じないが，金属材料を用いることによって，短期での腐食により安全機能を損なわない設計とする。なお，降灰後の長期的な腐食の影

響については，日常保守管理等により，状況に応じて補修が可能な設計とする。

「大気汚染」については，中央制御室換気空調系の外気取入ダンパの閉止及び再循環運転を可能とすることにより，中央制御室内への降下火砕物の侵入を防止すること，さらに外気取入遮断時において室内の居住性を確保できる設計とする。

g. 非常用ディーゼル発電機（非常用ディーゼル発電機吸気系含む）

「閉塞」については，非常用ディーゼル発電機の吸気口の上流側の外気取入口には，ルーバが取り付けられており，下方から吸い込む構造であること，非常用換気空調系のバグフィルタ（粒径約2μmに対して80%以上を捕獲する性能）を設置することにより，フィルタメッシュより大きな降下火砕物が内部に侵入しにくい設計とし，また，降下火砕物がバグフィルタに付着した場合でも取替え又は清掃が可能な構造とすることで，降下火砕物により閉塞しない設計とする。

なお，バグフィルタを通過した小さな粒径の降下火砕物が侵入した場合でも，降下火砕物により閉塞しない設計とする。

「摩耗」については，主要な降下火砕物は砂と同等または砂より硬度が低くもろいことから，摩耗の影響は小さく，かつ構造上の対応として，吸気口の上流側の外気取入口には，ルーバが取り付けられており，下方から吸い込む構造であること，非常用換気空調系のバグフィルタを設置することで，降下火砕物が流路に侵入しにくい設計とし，仮に当該設備の内部に降下火砕物が侵入した場合でも耐摩耗性のある材料を使用することで，摩耗により安全機能を損なわない設計とする。

「腐食」については，金属腐食研究の結果より，降下火砕物に含まれる腐食性ガスによって直ちに金属腐食を生じないが，金属材料を用いることによって，短期での腐食により安全機能を損なわない設計とする。なお，降灰後の長期的な腐食の影響については，日常の保守管理等により，状況に応じて補修が可能な設計とする。

h. 安全保護系盤

当該機器の設置場所は非常用ディーゼル発電機電気品区域換気空調系（非常用ディーゼル発電機非常用送風機含む）及び中央制御室換気空調系により，空調管理されており，外気取入口にはバグフィルタ（粒径約2μmに対して80%以上を捕獲する性能）を設置することで，降下火砕物による「絶縁低下」により安全機能を損なわない設計とする。

3.6.2 間接的影響に対する設計方針

柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉の非常用所内交流電源設備は，非常用ディーゼル発電機（3台/号炉）とそれぞれに必要な耐震Ｓクラスの燃料ディタンク（3

基；18kL 以上）を有している。さらに，軽油タンク（2 基；550kL 以上）を有している。

これらにより，7 日間の外部電源喪失に対して，また，原子力発電所外での影響（長期間の外部電源の喪失及び交通の途絶）を考慮した場合においても，発電用原子炉の停止及び停止後の発電用原子炉の冷却，並びに使用済燃料プールの冷却に係る機能を担うために必要となる電源の供給が継続できる設計とする。

（補足資料-19）

表 1.5 降下火砕物が影響を与える評価対象施設と影響因子の組み合わせ

影響因子 評価対象施設	構造物への静的負荷	構造物への化学的影響（腐食）	水循環系の閉塞・摩耗	水循環系の化学的影響（腐食）	換気系，電気系及び計測制御系の機械的影響（閉塞・摩耗）	換気系，電気系及び計測制御系の化学的影響（腐食）	発電所周辺の大気汚染	絶縁低下
軽油タンク（燃料移送ポンプ含む）	●	●	－(③)	－(③)	●	● (燃料移送ポンプ)	－(③)	－(③)
原子炉建屋，タービン建屋海水熱交換器区域，コントロール建屋，廃棄物処理建屋	●	●	－(③)	－(③)	－(③)	－(③)	－(③)	－(③)
原子炉補機冷却海水ポンプ	－(①)	－(①)	● (ポンプ)	● (ポンプ)	－(①) (モータ)	－(①) (モータ)	－(③)	－(③)
原子炉補機冷却海水系ストレーナ	－(①)	－(①)	●	●	－(③)	－(③)	－(③)	－(③)
取水設備（除塵装置）	－(③)	－(②)	●	●	－(③)	－(③)	－(③)	－(③)
非常用換気空調系	－(①)	－(②)	－(③)	－(③)	●	●	●	－(③)
非常用ディーゼル発電機（非常用ディーゼル発電機吸気系含む）	－(①)	－(①)	－(③)	－(③)	●	●	－(③)	－(③)
安全保護系盤	－(①)	－(①)	－(③)	－(③)	－(③)	－(③)	－(③)	●

凡例　●：詳細な評価が必要な設備
　　－：評価対象外( )内数値は理由

【評価除外理由】
①：静的荷重等の影響を受け難い構造（屋内設備の場合含む）③：影響因子と直接関連しない
②：腐食があっても，機能に有意な影響を受け難い

表 1.6 降下火砕物による直接的影響の評価結果

評価対象施設	確認結果	個別評価
軽油タンク（燃料移送ポンプ含む）	・考慮する堆積荷重は 8,542N/m^2 であり，軽油タンクの許容堆積荷重は約 13,000N/m^2（暫定値）以上であるため，安全性への影響はない。 ・軽油タンクには，外装塗装が施されており，降下火砕物による短期での腐食により機能を喪失することはない。 ・軽油タンクのベント管の開口部は，雪害対策として，タンク屋根外側，地上から約 10m の高さに下向きに設置されていることから，想定される降下火砕物堆積量に対し，開口部閉塞及び摩耗には至らない。 ・燃料移送ポンプ及び電動機は，その構造上から，降下火砕物が内部に侵入することはない。 また，降下火砕物堆積荷重に対しては，別途防護対策を実施するなかで堆積荷重を考慮した設計とする。	5
原子炉建屋，タービン建屋，海水熱交換器区域，コントロール建屋，廃棄物処理建屋	・考慮する堆積荷重は 8,542N/m^2 であり，建屋の許容堆積荷重はそれ以上の設計とするため，安全性への影響はない。 ・外壁塗装が施されており，降下火砕物による短期での腐食により機能を喪失することはない。	1
原子炉補機冷却海水ポンプ	・ポンプの狭隘部は降下火砕物の粒径より大きく，降下火砕物による閉塞には至らない。軸受部は異物逃がし溝を設け，降下火砕物による閉塞には至らない設計とする。また，降下火砕物は，破砕し易く摩耗による影響は小さい。 ・耐食性のある材料を使用していることから，降下火砕物による短期での腐食により機能を喪失することはない。	2
原子炉補機冷却海水系ストレーナ	・降下火砕物の粒径は，海水ストレーナのフィルタ穴径より僅かに小さいものの，差圧管理されており，自動洗浄されることから閉塞することはない。なお，海水ストレーナのフィルタを通過した降下火砕物は，下流の設備（原子炉補機冷却水系熱交換器）に対して閉塞等の影響を与えることはない。また，降下火砕物は，破砕し易く摩耗による影響は小さい。 ・海水ストレーナ及び下流の機器内面に防汚塗装等が施されており，降下火砕物による短期での腐食により機能を喪失することはない。	3
取水設備（除塵装置）	・降下火砕物の粒径は十分小さく，取水口を閉塞することはない。 ・取水設備（除塵装置）は塗装等の対応を実施しており，降下火砕物による短期での腐食により機能を喪失することはない。	7
非常用換気空調系	・非常用換気空調系の外気取入口にはルーバ及びバグフィルタ（粒径約 2μm に対して 80%以上を捕獲する性能）が設置されていることから，給気を供給する設備に対して，降下火砕物が与える影響は小さい。また，バグフィルタは，必要に応じて取替え又は清掃することにより除灰ができる。 ・中央制御室換気空調系については，外気取入ダンパを閉止し，再循環運転することにより，中央制御室の居住環境が維持されることを確認する。	6
非常用ディーゼル発電機（非常用ディーゼル発電機吸気系含む）	・外気取入口は，降下火砕物が侵入しにくい構造であり，また，バグフィルタ（粒径約 2μm に対して 80%以上を捕獲する性能）により降下火砕物が捕集されること，及び侵入した場合でも降下火砕物の硬度が低く破砕しやすいことから，機能に影響を及ぼすことはない。また，バグフィルタは，必要に応じて取替え又は清掃することにより除灰ができる。	4
安全保護系盤	・安全保護系盤が設置されている部屋は，非常用ディーゼル発電機電気品区域換気空調系（非常用ディーゼル発電機非常用送風機含む）及び中央制御室換気空調系にて空調管理されており，本換気空調系の外気取入口にはバグフィルタ（粒径約 2μm に対して 80%以上を捕獲する性能）が設置されていることから，降下火砕物に対する高い防護を有している。また，侵入する降下火砕物は微細なものに限られ，またその可能性は低く，その付着等により短絡等を発生させる可能性はないことから，安全機能が損なわれることはない。	8

3.7 降下火砕物の除去等の対策

3.7.1 降下火砕物に対応するための運用管理

降下火砕物に備え，手順を整備し， 図 1.5 のフローのとおり段階的に対応することとしている。その体制については，地震，津波，火山噴火等の自然災害に対し，保安規定に基づく保安管理体制として整備し，その中で体制の移行基準，活動内容についても明確にする。

①近隣火山の大規模な噴火兆候がある場合

↓

・火山情報等の収集
・連絡体制の強化（要員の確認）

②近隣火山の大規模な噴火が発生した場合又は，敷地内に降下火砕物が降り積もる状況となった場合

・対策本部設置判断（必要な要員召集）
・資器材の配備状況の確認
・プラントの機器，建屋等の状況確認
・降下火砕物の除去
・非常用換気空調系のバグフィルタ（粒径約 2μm に対して 80%以上を捕獲する性能）の差圧確認，取替え又は清掃等

図 1.5 降下火砕物に対応するための運用管理フロー

①近隣火山の大規模な噴火兆候がある場合

担当箇所は，火山情報（火山の位置，規模，風向，降灰予測等）を把握し，連絡体制を強化する。

②近隣火山の大規模な噴火が発生した場合又は，降下火砕物が降り積もる状況となった場合

担当箇所は，近隣火山において大規模な噴火が確認された場合，又は，発電所敷地で降灰が確認された場合に，関係箇所と協議の上，対策本部の設置判断をする。

換気空調系の取替え用バグフィルタの配備状況を確認するとともに，アクセスルート・屋外廻りの機器・屋外タンク・建屋等の降下火砕物の除去のため， 発電所内に保管しているホイールローダ・スコップ・マスク等の資機材の配備状況の確認を行う。

プラントの機器，建屋等の現在の状態（屋外への開口部が開放されていないか）を確認する。

敷地内に降下火砕物が到達した場合には，降灰状況を把握する。

プラント及び屋外廻りの監視を強化し，アクセスルート・屋外廻りの

機器・屋外タンク・建屋等の降下火砕物の除去を行うとともに，非常用換気空調系のバグフィルタ差圧を確認し，バグフィルタの取替え又は清掃等を行う。

降下火砕物により安全機能を有する設備が損傷等により機能が確保できなくなった場合，必要に応じプラントを停止する。

3.7.2 手順

火山に対する防護については，降下火砕物に対する影響評価を行い，安全施設が安全機能を損なわないよう手順を定める。

降灰が確認された場合には,建屋や屋外の設備等に長期間降下火砕物の荷重をかけ続けないこと,また降下火砕物の付着による腐食等が生じる状況を緩和するために，評価対象施設に堆積した降下火砕物の除灰を適切に実施する。

降灰が確認された場合には，状況に応じて外気取入ダンパの閉止，換気空調系の停止又は再循環運転により,建屋内への降下火砕物の侵入を防止する手順を定める。

降灰が確認された場合には,非常用換気空調系の外気取入口のバグフィルタについて，バグフィルタ差圧を確認するとともに，状況に応じて取替え又は清掃等を実施する。

4. まとめ

降下火砕物による直接的影響及び間接的影響のすべての項目について評価した結果，降下火砕物による直接的及び間接的影響はなく，発電用原子炉施設の安全機能を損なうことはない。

降下火砕物の飛来のおそれがある場合は，火山噴火対策を行うための体制を構築し，プラント及び屋外廻りの監視の強化，降下火砕物の除去等を実施する。

建屋に係る影響評価

降下火砕物による原子炉建屋等への影響について以下のとおり評価した。

(1)評価項目

① 構造物への静的負荷

降下火砕物の堆積荷重（降雨の影響含む）により原子炉建屋，タービン建屋海水熱交換器区域，コントロール建屋，廃棄物処理建屋の健全性に影響がないことを評価する。なお，堆積荷重は，積雪との重畳を考慮する。

② 構造物への化学的影響（腐食）

降下火砕物の構造物への付着や堆積による化学的腐食により構造物への影響がないことを評価する。

(2)評価条件

① 降下火砕物条件

・堆積量：35cm

・密度：1.5g/cm^3

② 積雪条件

・積雪量：115.4cm

積雪量＝１日あたりの積雪量の年超過確率 10^{-2} の値（84.3cm）

＋最深積雪量の平均値（31.1cm）＝115.4cm

・単位荷重：29.4N/m^2（新潟県建築基準法施行細則に基づく積雪の単位荷重）

(3)評価結果

① 構造物への静的負荷

設計堆積荷重は以下のとおり。

飽和状態の降下火砕物の荷重（35cm×1500kg/m^3×9.80665m/s^2）

＋積雪荷重（115.4cm×29.4N/（m^2・cm））＝8,542N/m^2

表 1-1 に，建屋ごとに裕度が最も小さい部位の評価結果を示す。

評価の結果，全ての建屋において，許容堆積荷重は堆積荷重を十分に上回っていることから，対象建屋の安全性への影響はない。

表 1-1 建屋の堆積荷重概略評価結果

号炉	評価対象施設	対象設備エリア	許容堆積荷重※1 (N/m²)	降下火砕物堆積荷重 (N/m²)	評価結果
6	原子炉建屋	使用済燃料プール上部	12,000	8,542	○
	コントロール建屋	中央制御室上部（全体） 7 号炉共通	21,000		○
	タービン建屋海水熱交換器区域	海水熱交換器区域上部	10,000		○
7	原子炉建屋	使用済燃料プール上部	12,000		○
	コントロール建屋	中央制御室上部（全体） 6 号炉共通	21,000		○
	タービン建屋海水熱交換器区域	海水熱交換器区域上部	11,000		○
	廃棄物処理建屋	復水貯蔵槽位置上部 （6 号炉と共通）	9,000※2		○

※1：許容堆積荷重は，以下の方法で算出した。

① 建屋の屋根部を構成する構造部材の断面性能を元に，各構造部材で発生する応力が短期許容応力度となるような屋根部の鉛直荷重（以下「耐荷重」という）を計算する。（耐荷重算定の詳細フローを図 1-1 に示す）

② 屋根部に作用する荷重としては堆積物による荷重以外に，常時作用する荷重（固定荷重，機器荷重及び配管荷重等）があるため，①で計算した耐荷重から常時作用する荷重の差し引いた値を許容堆積荷重として設定する（有効数字 2 桁で切り下げ）。

※2：廃棄物処理建屋については，屋上のルーフブロックを撤去することとしており，許容堆積荷重の暫定値として記載。

(1)設計時の長期荷重に対して，屋根を構成する各構造部材が持つ設計荷重に対する余裕率 α を設計時の構造計算結果をもとに算出する。

↓

(2)設計時の長期荷重に余裕率 α を乗算することにより，部材として許容できる最大の長期荷重を算定する。なお，最大の長期荷重算出には，各構造部材に対する余裕率 α の中で最小となる α を用いる。

↓

(3)建築基準法施行令における鋼材等の短期許容応力度と長期許容応力度の関係から(2)で算定した荷重を 1.5 倍したものを耐荷重とする。

図 1-1　耐荷重算定フロー

②構造物への化学的影響（腐食）

原子炉建屋，タービン建屋海水熱交換器区域，コントロール建屋及び廃棄物処理建屋については，外壁塗装を施していることから，降下火砕物による短期での腐食により機能に影響を及ぼすことはない。

（補足資料-4）

原子炉補機冷却海水ポンプに係る影響評価

降下火砕物による原子炉補機冷却海水ポンプに係る影響評価について以下のとおり評価した。

(1)評価項目

① 水循環系の閉塞

降下火砕物が混入した海水を海水ポンプにより取水した場合に，流水部，軸受部等が閉塞し，機器の機能に影響がないことを評価する。

② 水循環系の内部における摩耗

降下火砕物が混入した海水を海水ポンプにより取水した場合に，摩耗による機器の機能に影響がないことを評価する。

③ 水循環系の化学的影響（腐食）

降下火砕物が混入した海水を海水ポンプにより取水した場合に，内部構造物の化学的影響（腐食）により機器の機能に影響がないことを評価する。

(2)評価条件

① 降下火砕物条件

・粒径：8.0mm 以下

(3)評価結果

① 水循環系の閉塞

・流水部の閉塞

原子炉補機冷却海水ポンプ流水部の狭隘部は図 2-1 に示すように数十 mm であり，想定する降下火砕物の粒径は 8.0mm 以下であるため，閉塞には至らない。

・軸受部の閉塞

原子炉補機冷却海水ポンプの軸受の隙間は，約 1mm～4mm 程度の許容値以下で管理されている。一部の降下火砕物は軸受の隙間より，軸受内部に入り混む可能性があるが，図 2-1 に示すように異物逃がし溝（約 5mm 程度）を設け，軸受部の閉塞には至らない設計とする。

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

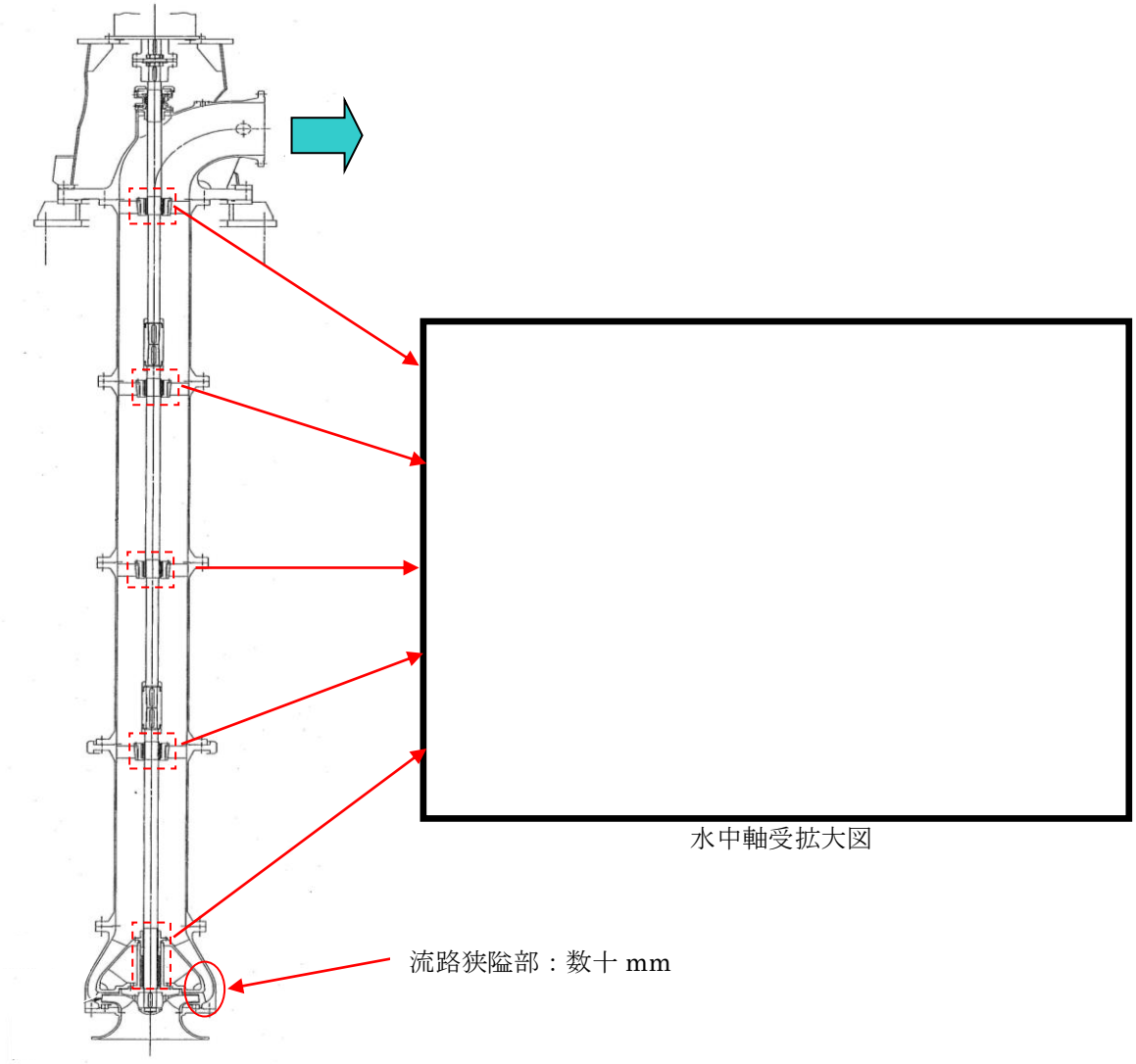


図 2-1　原子炉補機冷却海水ポンプ

② 水循環系の内部における摩耗

降下火砕物は破砕し易く，硬度が低いことから降下火砕物による摩耗が，設備に与える影響は小さく，また，日常の保守管理等により補修が可能。

（補足資料-3）

③水循環系の化学的影響（腐食）

原子炉補機冷却海水ポンプは，ステンレス製であり，また，塗装等の対応を実施していることから，降下火砕物による短期での腐食により原子炉補機冷却海水ポンプの機能に影響を及ぼすことはない。

（補足資料-4）

原子炉補機冷却海水系ストレーナに係る影響評価

降下火砕物による原子炉補機冷却海水系ストレーナに係る影響評価について以下のとおり評価した。

(1)評価項目

① 水循環系の閉塞

降下火砕物によって原子炉補機冷却海水系ストレーナの閉塞により，機器の機能に影響がないことを評価する。

② 水循環系の内部における摩耗

降下火砕物によって原子炉補機冷却海水系ストレーナの摩耗により，機器の機能に影響がないことを評価する。

③ 水循環系の化学的影響（腐食）

降下火砕物によって原子炉補機冷却海水系ストレーナの内部構造物の化学的影響（腐食）により機器の機能に影響がないことを評価する。

(2)評価結果

①水循環系の閉塞

号炉ごとの原子炉補機冷却海水系ストレーナのフィルタ穴径を示す。

	6 号炉	7 号炉
フィルタ穴径	8mm	7mm

想定する降下火砕物の粒径は，最大で 8mm であるが，7mm 以上の粒径割合は，およそ 4%程度であり，また，取水口からポンプ取水箇所までの距離が数十ｍあるため，原子炉補機冷却海水系ストレーナは閉塞する可能性は低い。また，粘性を生じさせる粘土鉱物等は含まれていないことから原子炉補機冷却海水系ストレーナが閉塞することはなく，原子炉補機冷却海水系ストレーナの機能に影響を及ぼすことはない。なお，フィルタが閉塞することがないよう差圧管理されており，一定の差圧（6 号及び 7 号炉：17.65kPa）で自動洗浄される。

原子炉補機冷却海水系ストレーナのフィルタを通過した降下火砕物の粒子は，下流設備の原子炉補機冷却水系熱交換器の伝熱管の穴径（6 号炉：23.0mm，7 号炉：16.6mm）に対して，想定する降下火砕物の粒径は十分小さく伝熱管等の閉塞により，下流設備に影響を及ぼすことはない。

原子炉補機冷却海水ポンプの定格流量は１台あたり，約 1,800m^3/h と大きく，冷却器管内で流れが一様になり，降下火砕物がストレーナ内で堆積し，閉塞する可能性は低い。

②水循環系の内部における摩耗

降下火砕物は破砕し易く，硬度が低いことから降下火砕物による摩耗が，設備に与える影響は小さく，また，日常の保守管理等により補修が可能。

（補足資料-3）

③水循環系の化学的影響（腐食）

原子炉補機冷却海水系ストレーナは，ライニングが施工されていることから，短期での腐食により原子炉補機冷却海水系ストレーナの機能に影響を及ぼすことはない。

また，原子炉補機冷却海水系ストレーナの下流設備の原子炉補機冷却水系熱交換器（伝熱管）には，耐食性に優れた材料（アルミニウム黄銅管）を用いていること，及び連続通水状態であり著しい腐食環境にならないことから，短期での腐食により下流設備に影響を及ぼすことはない。

非常用ディーゼル発電機（非常用ディーゼル発電機吸気系含む）に係る影響評価

降下火砕物による非常用ディーゼル発電機に係る影響について以下のとおり評価した。

(1)評価項目

① 換気系，電気系及び計測制御系の機械的影響（閉塞・摩耗）

降下火砕物の非常用ディーゼル発電機（機関）への侵入等により，機器の機能に影響がないことを評価する。

② 換気系，電気系及び計測制御系の化学的影響（腐食）

降下火砕物の非常用ディーゼル発電機（機関）への侵入等により，化学的影響（内部腐食）によって，機能に影響がないことを評価する。

(2)評価条件

・粒径：8.0mm 以下

(3)評価結果

① 換気系，電気系及び計測制御系の機械的影響（閉塞・摩耗）

非常用ディーゼル発電機吸気系は，非常用ディーゼル発電機非常用送風機室の機関給気口より上流側に，非常用換気空調系のバグフィルタ（粒径約 2μm に対して80%以上を捕獲する性能）が設置されており，降下火砕物の侵入を防止している。

粒径が 2μm 程度のものについては，図 4-1 に示すように過給機，空気冷却器（空気側）に侵入する可能性はあるが，機器の間隙は十分大きく閉塞に至らない。

また，機関シリンダ内に降下火砕物が混入した場合，シリンダライナー／ピストリング間隔と同程度のものは，当該間隙内に侵入し，摩耗発生が懸念されるが，主要な降下火砕物は，砂と比較しても破砕しやすく※1，硬度が低く※2，これまでの点検において有意な摩耗は確認されていないことから，降下火砕物の摩耗による影響の可能性は低い。長期的な影響についても，シリンダライナー及びピストンの間隙内に侵入した降下火砕物は，シリンダとピストン双方の往復運動が繰り返されるごとに，更に細かい粒子に破砕され，破砕された粒子はシリンダライナーとピストンリング間隙に付着している潤滑油により機関外へ除去される。また，潤滑油系には機関付フィルタが設置されているが，メッシュ寸法が（30μm）と取り込んだ降下火砕物によって閉塞することはなく長期的な影響も少ないと考えられる。加えて，非常用換気空調系のバグフィルタを通過した降下火砕物の潤滑油への混入を想定し，潤滑油に降下火砕物を混入させた状態における潤滑油の成分分析を実施した結果，潤滑油の性状に影響がないことを確認した。

（補足資料-3，9，10，12）

また，シリンダから排出される排気ガスの温度は，約500℃であることから，融点が約1,000℃である降下火砕物の溶融による影響はない。

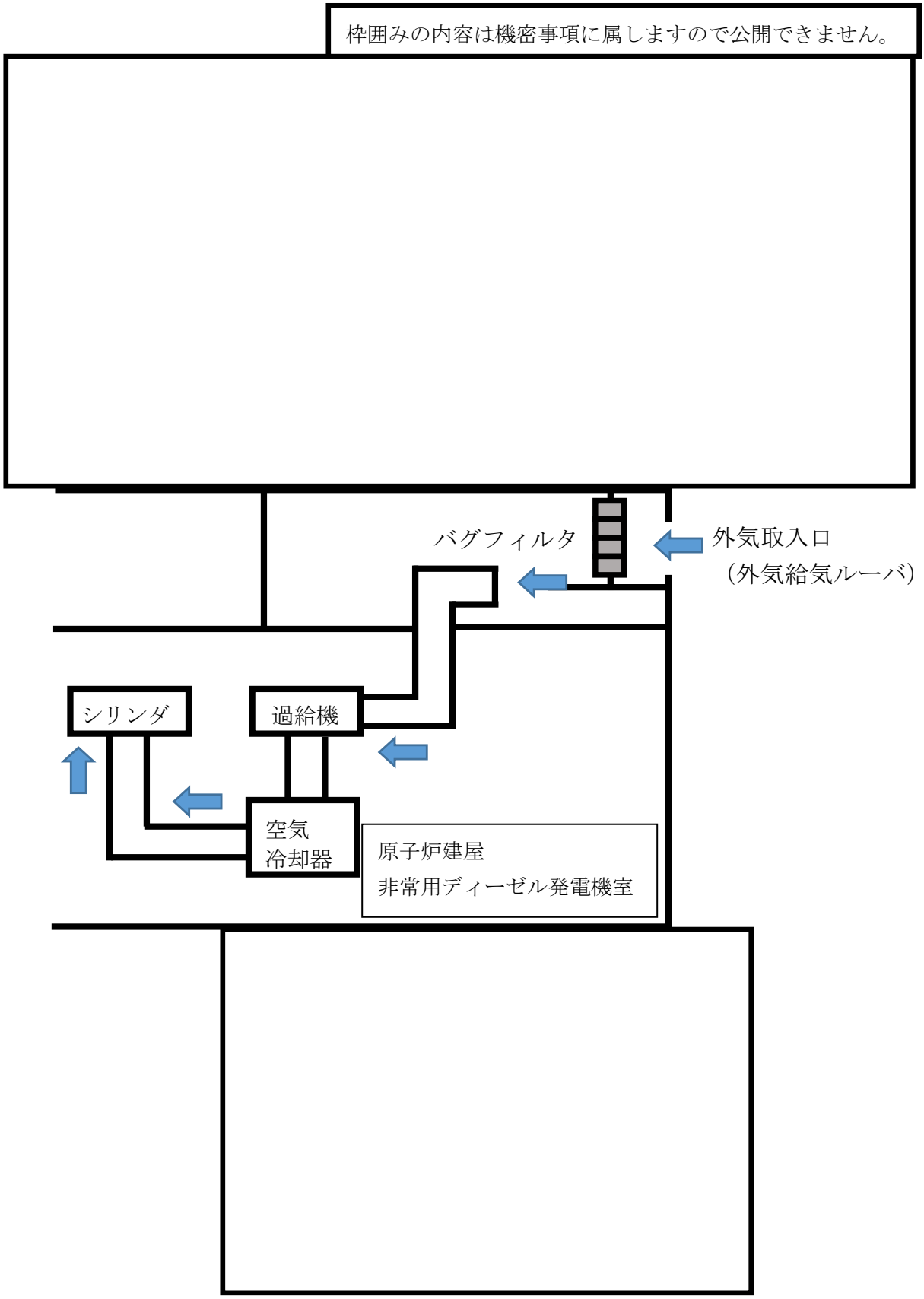


図 4-1　非常用ディーゼル発電機吸気系系統構造図

※1：武若耕司（2004）：シラスコンクリートの特徴とその実用化の現状，コンクリート工学，Vol.42，No.3，P38-47

※2：恒松修二ほか（1976）：シラスを主原料とする結晶化ガラス，窯業協会誌，84[6]，P32-40

② 換気系，電気系及び計測制御系の化学的影響（腐食）

金属腐食研究の結果より，降下火砕物に含まれる腐食性ガスによって直ちに金属腐食は生じないことから，金属材料を用いることで，短期での腐食により非常用ディーゼル発電機の機能に影響を与えにくい。なお，降灰後の長期的な腐食の影響については，日常の保守管理等により，状況に応じて補修が可能な設計とする。

（補足資料-12）

軽油タンク（燃料移送ポンプ含む）に係る影響評価

降下火砕物による軽油タンク（燃料移送ポンプ含む）への影響について以下のとおり評価した。

(1)評価項目

① 構造物への静的負荷

軽油タンクについては，降下火砕物の堆積による堆積荷重に対して健全性に影響がないことを評価する。

燃料移送ポンプについては，鋼板のカバーで覆われており，直接堆積しない構造であるが，別途，堆積荷重を考慮した防護対策を実施する。

② 構造物への化学的影響（腐食）

軽油タンク及び燃料移送ポンプが，降下火砕物の付着や堆積による化学的腐食により，機能への影響がないことを評価する。

③ 換気系，電気系及び計測制御系の機械的影響（閉塞・摩耗）

軽油タンクのベント管が，降下火砕物の閉塞及び摩耗による影響がないことを評価する。

燃料移送ポンプについては，軸受等への侵入による影響がないことを評価する。

④ 換気系，電気系及び計測制御系の化学的影響（腐食）

燃料移送ポンプモータへの侵入による，化学的影響（内部腐食）によって，機能に影響がないことを評価する。

(2)評価条件

・堆積荷重：8,542N/m^2

・粒径：8.0mm 以下

(3)評価結果

① 構造物への静的負荷

表 5-1 に軽油タンクごとに裕度が最も小さい部位の評価結果を示す。

評価の結果，全ての軽油タンクにおいて，許容堆積荷重は堆積荷重を上回っていることから，降下火砕物の荷重により，各軽油タンクの機能が喪失しないことを確認した。なお，燃料移送ポンプについては，当該ポンプ上部に防護板を設置することで，静的荷重によって機能喪失しない設計とする。

表 5-1　軽油タンクの堆積荷重評価結果（値は暫定値）

号炉	評価対象構造物	評価対象部位	設計耐荷重 (N/m²)	降下火砕物堆積荷重 (N/m²)	評価結果
6	軽油タンク A,B	ラフタボルト部	約 13,000	8,542	○
7	軽油タンク A,B	ラフタボルト部	約 13,000		○

② 構造物への化学的影響（腐食）

軽油タンクの化学的影響については，外装塗装が施されており，降下火砕物による短期での腐食により機能を喪失することはない。　（補足資料-4）

また，燃料移送ポンプの化学的影響については，当該ポンプ上部に防護板を設置することで，降下火砕物が燃料移送ポンプと直接接触する可能性は低いことから，降下火砕物による短期での腐食により機能を喪失することはない。

③換気系，電気系及び計測制御系の機械的影響（閉塞・摩耗）

（軽油タンク）

軽油タンクのベント管は，図 5-1 に示すように雪害対策として，ベント管開口部が下向きに取り付けられている。また，開口部はタンク屋根外側としており，地上から約 10m の高さがあることから，想定される降下火砕物堆積量に対し，開口部閉塞及び摩耗による影響はない。

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

図 5-1　軽油タンク外形図

（燃料移送ポンプ）

ポンプ本体への異物混入経路としては，軸貫通部があるが，当該部はオイルリング等を用いて潤滑剤や内部流体の漏えいのないよう適切に管理されていることから，降下火砕物がポンプ本体へ侵入することはなく閉塞や摩耗による影響はない。燃料移送ポンプの外形写真を図 5-2 に，概略構造図を図 5-3 に示す。

動力源となる電動機については「全閉外扇屋外型」であり，ケーシングの放熱フィン等に堆積した降下火砕物若しくは浮遊中の降下火砕物が冷却ファン側から吸入された場合でも電動機内部に降下火砕物が侵入することはない。

④換気系，電気系及び計測制御系の化学的影響（腐食）

上記のように，ポンプ本体及び電動機内部に降下火砕物が侵入することはないため影響はない。

図 5-2　燃料移送ポンプ外形写真

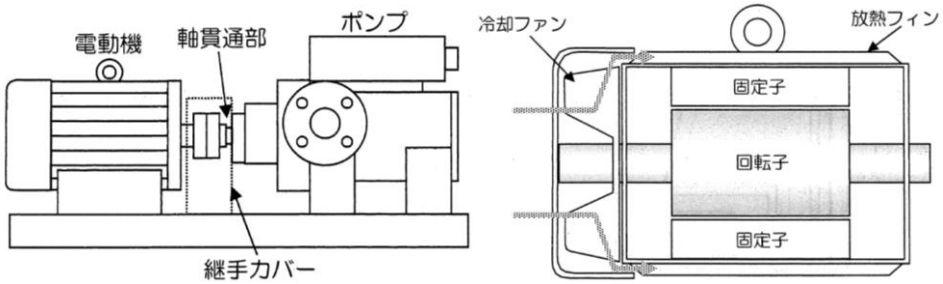


図 5-3　燃料移送ポンプ概略構造図

非常用換気空調系（外気取入口）に係る影響評価

降下火砕物による非常用換気空調系（非常用ディーゼル発電機電気品区域換気空調系（非常用ディーゼル発電機非常用送風機含む），中央制御室換気空調系，コントロール建屋計測制御電源盤区域換気空調系，海水熱交換器区域換気空調系）（外気取入口）への影響について以下のとおり評価した。

(1)評価項目

① 換気系，電気系及び計測制御系の機械的影響（閉塞・摩耗）

降下火砕物の換気空調系（外気取入口）に対する，機器の機能に影響がないことを評価する。

② 換気系，電気系及び計測制御系の化学的影響（腐食）

非常用換気空調系（外気取入口）に対する，化学的影響（内部腐食）によって，機能に影響がないことを評価する。

③ 発電所周辺の大気汚染

降下火砕物により汚染された発電所周辺の大気が換気空等設備を経て運転員が駐在している中央制御室の居住性に影響がないことを評価する。

(2)評価条件

① 降下火砕物条件

・粒径：8.0mm 以下

(3)評価結果

① 換気系，電気系及び計測制御系の機械的影響（閉塞・摩耗）

各評価対象施設の外気取入口には，ルーバが取り付けられており，下方から吸い込む構造となっていることから，上方より降下してくる火砕物に対し，取り込み難い構造となっている。また，外気取入口にはバグフィルタ（粒径約 2μm に対して 80%以上を捕獲する性能）が設置されており，想定する降下火砕物は十分除去されるため，給気を供給する系統及び機器に対して降下火砕物が与える影響は少ない。

なお，バグフィルタには差圧計が設置されており，必要に応じて取替え又は清掃することが可能である。非常用換気空調系の外気取入口イメージ図を図 6-1 に，非常用ディーゼル発電機電気品区域換気空調系（非常用ディーゼル発電機非常用送風機含む）の外気取入口を図 6-2 に示す。

（補足資料-7，16）

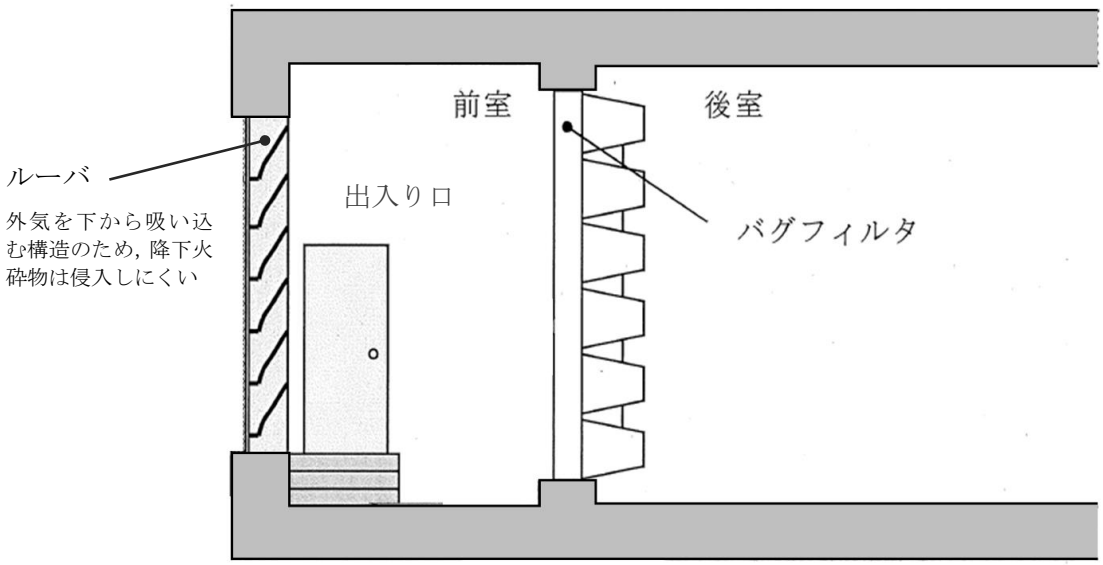


図 6-1 換気空調系の外気取入口イメージ図

図 6-2 非常用ディーゼル発電機電気品区域換気空調系（非常用ディーゼル発電機非常用送風機含む）の外気取入口

② 換気系，電気系及び計測制御系の化学的影響（腐食）

金属腐食研究の結果より，降下火砕物に含まれる腐食性ガスによって直ちに金属腐食は生じないことから，金属材料を用いることで，短期での腐食により非常用換気空調系（外気取入口）の機能に影響を与えにくい。なお，降灰後の長期的な腐食の影響については，日常の保守管理等により，状況に応じて補修が可能な設計とする。

（補足資料-12）

③ 発電所周辺の大気汚染

運転員が常駐している中央制御室は，中央制御室換気空調系によって空調管理されており，他の換気空調系と同様，外気取入口には，ルーバが取り付けられており，下方から吸い込む構造となっていることから，上方より降下してくる火砕物に対し，取り込み難い構造となっている。また，外気取入口にはバグフィルタ（粒径約 2μm に対して 80%以上を捕獲する性能）が設置されており，想定する降下火砕物は十分除去されるため，降下火砕物が与える影響は少ない。中央制御室換気空調系の外気取入口の写真を図 6-3 に示す。

なお，大気汚染による人に対する居住性の観点から，運転員が常駐する中央制御室については，中央制御室排風機の停止及び外気取入ダンパの閉止を行い再循環運転することにより，中央制御室の居住環境を維持できる。以下に，外気取入ダンパを閉止した状態の酸素濃度及び二酸化炭素濃度について評価した結果を示す。

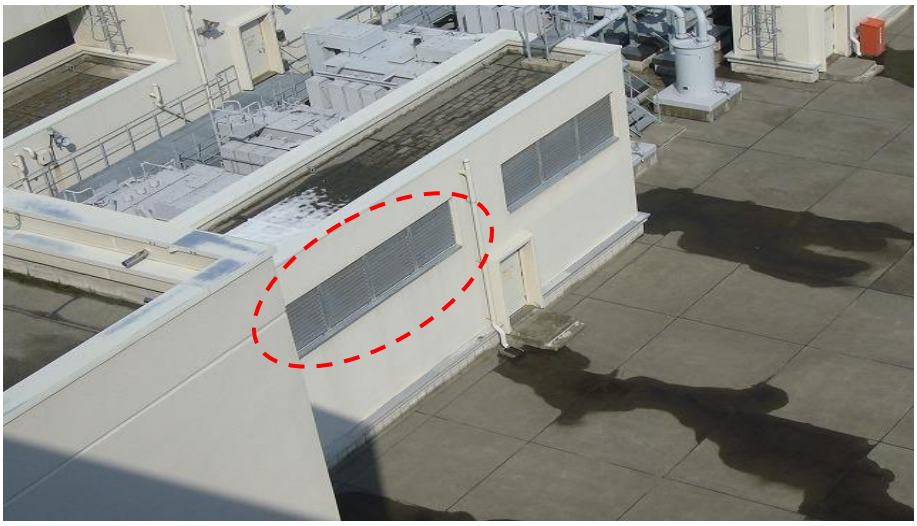


図 6-3　中央制御室換気空調系の外気取入口

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

○酸素濃度

「空気調和・衛生工学便覧　空調設備編」に基づき，酸素濃度について評価した。

【評価条件】

・在室人数　18 名

・中央制御室バウンダリ内体積 [redacted] m^3

・空気流入はないものとする。

・初期酸素濃度　20.95%（「空気調和・衛生工学便覧」成人呼吸気の酸素量）

・酸素消費量　0.066m^3/h・人（「空気調和・衛生工学便覧」の歩行（中等作業相当）での O_2 消費量）

・許容酸素濃度　18%以上（労働安全衛生規則）

【評価結果】

表 6-1　中央制御室再循環運転における酸素濃度の時間変化

時間	12 時間	24 時間	36 時間	428 時間
酸素濃度	20.8%	20.7%	20.7%	18.0%

○二酸化炭素濃度

「空気調和・衛生工学便覧　空調設備編」に基づき，二酸化炭素濃度について評価した。

【評価条件】

・在室人数　18 名

・中央制御室バウンダリ内体積 [redacted] m^3

・空気流入はないものとする。

・初期二酸化炭素濃度　0.030%（原子力発電所中央制御室運転員の事故時被ばくに関する規程（JEAC4622-2009））

・二酸化炭素排出量　0.046m^3/h・人（「空気調和・衛生工学便覧」の中等作業での CO_2 排出量）

・許容二酸化炭素濃度　0.5%以下（労働安全衛生規則）

【評価結果】

表 6-2　中央制御室再循環運転における二酸化炭素濃度の時間変化

時間	12 時間	24 時間	36 時間	97 時間
二酸化炭素濃度	0.09 %	0.15%	0.21%	0.50%

以上の結果から，97 時間外気取入を遮断したままでも，中央制御室内に滞在する運転員の操作環境に影響を与えない。なお，噴火継続時間に関する最近の観測記録（補足資料-17）と比較し，十分な裕度が確保できている。

取水設備（除塵装置）に係る影響評価

(1)評価項目

① 水循環系の閉塞

降下火砕物が混入した海水を取水することにより，取水設備が閉塞しないことを評価する。

② 水循環系の内部における摩耗

降下火砕物が混入した海水を取水することに伴う，取水設備の摩耗により，機器の機能に影響がないことを評価する。

③ 水循環系の化学的影響（腐食）

降下火砕物が混入した海水を取水することによる構造物内部の腐食により機器の機能に影響がないことを評価する。

(2)評価条件

・粒径：8.0㎜以下

(3)評価結果

① 水循環系の閉塞

取水設備（トラベリングスクリーンメッシュ幅 9㎜）への降下火砕物を想定しても，想定する降下火砕物の粒径はメッシュ幅より小さく，また，粘性を生じさせる粘土鉱物等は含まれていないことから，除塵装置が閉塞することはない。

② 水循環系の内部における摩耗

降下火砕物は破砕し易く，硬度が低いことから降下火砕物による摩耗が，設備に影響を与える影響は小さい。

（補足資料-3）

③ 水循環系の化学的影響（腐食）

海水系の化学的影響については,取水設備は塗装等の対応を実施していることから,降下火砕物による短期での腐食により取水設備の機能に影響を及ぼすことはない。

（補足資料-4）

安全保護系盤に係わる影響評価

降下火砕物による安全保護系盤への影響について以下のとおり評価する。

(1)評価項目

①絶縁低下

降下火砕物が盤内に侵入する可能性及び侵入した場合の影響について評価する。

(2)評価条件

・粒径：8.0mm 以下

(3)評価結果

安全保護系盤については，その発熱量に応じて盤内に換気ファンを設置している場合があるため，換気に伴い，降下火砕物が盤内に侵入する可能性がある。

当該盤が設置されているエリアは，非常用ディーゼル発電機電気品区域換気空調系（非常用ディーゼル発電機非常用送風機含む）及び中央制御室換気空調系にて空調管理されており，外気取入口に設置されているバグフィルタ（粒径約 2μm に対して 80%以上を捕獲する性能）を介した換気空気を吸入している。したがって，降下火砕物が大量に盤内に侵入する可能性は低く，その付着により短絡を発生させる可能性はないため，安全保護系盤の安全機能が損なわれることはない。

（補足資料-13）

1. 評価ガイドとの整合性について

原子力発電所の火山影響評価ガイドと降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価の整合性について，以下の表 1-1 に示す。

表 1-1 原子力発電所の火山影響評価ガイドと降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価の整合性（1/6）

原子力発電所の火山影響評価ガイド	降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価
１．総則 本評価ガイドは、原子力発電所への火山影響を適切に評価するため、原子力発電所に影響を及ぼし得る火山の抽出、抽出された火山の火山活動に関する個別評価、原子力発電所に影響を及ぼし得る火山事象の抽出及びその影響評価のための方法と確認事項をとりまとめたものである。 １．１ 一般 原子力規制委員会の定める「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」第６条において、外部からの衝撃による損傷の防止として、安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならないとしており、敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、火山の影響を挙げている。 火山の影響評価としては、最近では使用済燃料中間貯蔵施設の安全審査において評価実績があり、2009 年に日本電気協会が「原子力発電所火山影響評価技術指針」（JEAG4625-2009）を制定し、2012 年に IAEA が Safety Standards “Volcanic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations”(No. SSG-21)を策定した。近年、火山学は基本的記述科学から、以前は不可能であった火山システムの観察と複雑な火山プロセスの数値モデルの使用に依存する定量的科学へと発展しており、これらの知見を基に、原子力発電所への火山影響を適切に評価する一例を示すため、本評価ガイドを作成した。 本評価ガイドは、新規制基準が求める火山の影響により原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であることの評価方法の一例である。また、本評価ガイドは、火山影響評価の妥当性を審査官が判断する際に、参考とするものである。 原子力発電所の運用期間中に火山活動が想定され、それによる設計対応不可能な火山事象が原子力発電所に影響を及ぼす可能性が十分小さいと評価できない場合には、原子力発電所の立地は不適と考えられる。 １．２ 適用範囲 本評価ガイドは、実用発電用原子炉及びその附属施設に適用する。 １．３ 関連法規等 本評価ガイドは、以下を参考としている。 （１） 実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号） （２） 使用済燃料中間貯蔵施設の安全審査における「自然環境」の考え方について（平成 20 年 10 月 27 日 原子力安全委員会了承） （３） 日本電気協会 「原子力発電所火山影響評価技術指針」（JEAG4625-2009） （４）IAEA Safety Standards “Volcanic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations” (No. SSG-21, 2012)	1. 基本方針 1.1 概要 原子力規制委員会の定める「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置，構造及び設備の基準に関する規則（平成25年6月28日原子力規制委員会規則第五号）」第六条において，外部からの衝撃による損傷防止として，安全施設は，想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならないとしており，敷地周辺の自然環境をもとに想定される自然現象の一つとして，火山の影響を挙げている。 火山の影響により発電用原子炉施設の安全性を損なわない設計であることを評価するため，火山影響評価を行い，発電用原子炉施設へ影響を与えないことを評価する。

表 1-1 原子力発電所の火山影響評価ガイドと降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価の整合性（2/6）

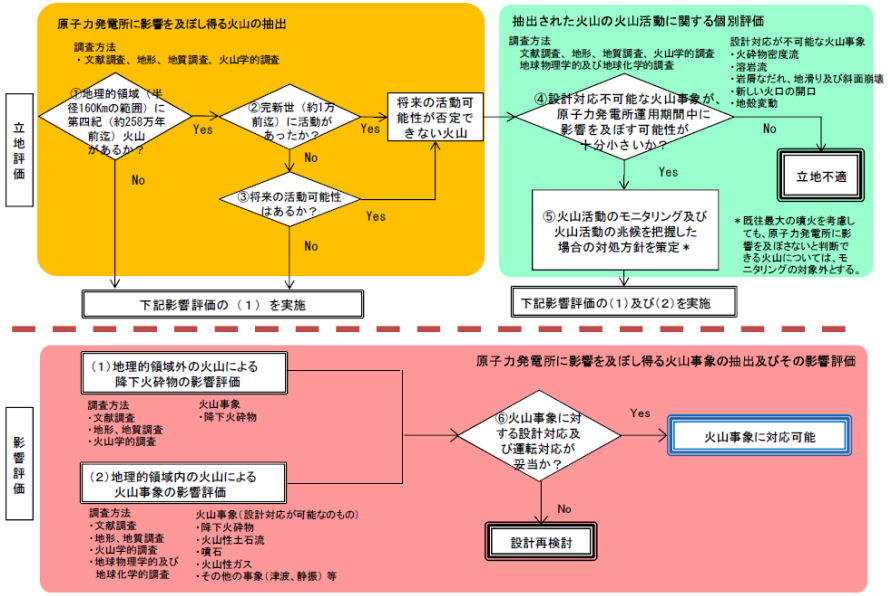
原子力発電所の火山影響評価ガイド	降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価
２．原子力発電所に影響を及ぼす火山影響評価の流れ 火山影響評価は、図１に従い、立地評価と影響評価の２段階で行う。 立地評価では、まず原子力発電所に影響を及ぼし得る火山の抽出を行い、影響を及ぼし得る火山が抽出された場合には、抽出された火山の火山活動に関する個別評価を行う。即ち、設計対応不可能な火山事象が原子力発電所の運用期間中に影響を及ぼす可能性の評価を行う。（解説-1） 影響を及ぼす可能性が十分小さいと評価された場合は、火山活動のモニタリングと火山活動の兆候把握時の対応を適切に行うことを条件として、個々の火山事象に対する影響評価を行う。一方、設計対応不可能な火山事象が原子力発電所運用期間中に影響を及ぼす可能性が十分小さいと評価されない場合は、原子力発電所の立地は不適と考えられる。 影響評価では、個々の火山事象への設計対応及び運転対応の妥当性について評価を行う。 解説-1. IAEA SSG-21 では、火砕物密度流、溶岩流、岩屑なだれ・地滑り及び斜面崩壊、新しい火道の開通及び地殻変動を設計対応が不可能な火山事象としており、本評価ガイドでも、これを適用する。  図１　原子力発電所に影響を及ぼす火山影響評価の基本フロー	1.2 火山影響評価の流れ （ガイドどおり）

表 1-1 原子力発電所の火山影響評価ガイドと降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価の整合性（3/6）

原子力発電所の火山影響評価ガイド	降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価
【立地評価】（項目名のみ記載） ３．原子力発電所に影響を及ぼし得る火山の抽出 ３．１文献調査 ３．２地形・地質調査及び火山学的調査 ３．３将来の火山活動可能性 ４．原子力発電所の運用期間における火山活動に関する個別評価 ４．１設計対応不可能な火山事象を伴う火山活動の評価 ４．２地球物理学的及び地球化学的調査 ５．火山活動のモニタリング ５．１監視対象火山 ５．２監視項目 ５．３定期的評価 ５．４火山活動の兆候を把握した場合の対処	2. 立地評価 2.1 原子力発電所に影響を及ぼし得る火山の抽出 地理的領域内に分布する第四紀火山（82火山）について，完新世における活動の有無を確認し，将来の活動可能性のある火山，若しくは将来の活動可能性が否定できない火山を抽出した。 その結果，黒岩山，苗場山，妙高山，志賀高原火山群，新潟焼山，新潟金山，黒姫山，燧ヶ岳，志賀，沼沢，飯縄山，草津白根山，日光白根山，子持山，四阿山，白馬大池，榛名山，男体・女峰火山群，赤城山，烏帽子火山群，鼻曲山，浅間山，高原山，那須岳，立山，磐梯山，上廊下，吾妻山，鷲羽・雲ノ平，北八ヶ岳，安達太良山，環諏訪湖及び笹森山の33火山を将来の活動可能性のある火山又は将来の活動可能性を否定できない火山として評価した。 2.2 運用期間における火山活動に関する個別評価 将来の活動可能性のある火山又は将来の活動可能性を否定できない火山として評価した33火山を対象として，文献調査に基づき，運用期間における火山活動に関する設計対応不可能事象（火砕物密度流，溶岩流，岩屑なだれ，地滑り及び斜面崩壊，新しい火口の開口，地殻変動）の個別評価を行った。 火砕物密度流による堆積物が敷地周辺では確認されておらず，敷地まで十分に離隔距離があることから，発電所に影響を及ぼす可能性は十分に低いと評価した。 溶岩流，岩屑なだれ，地滑り及び斜面崩壊については，それぞれの火山と敷地との位置関係より，敷地まで十分な離隔距離があることから，発電所に影響を及ぼす可能性は十分に低いと評価した。 新しい火口の開口については，敷地周辺で深部低周波地震の活動がないこと，地温勾配が小さく，また地殻熱流量が小さいことから，発電所に影響を及ぼす可能性は十分に低いと評価した。 地殻変動については，敷地周辺が過去の火山活動に伴う火口及びその近傍に位置しないことから，発電所に影響を及ぼす可能性は十分に低いと評価した。 以上の検討結果より，発電所の運用期間に設計対応不可能な火山事象が，発電所に影響を及ぼす可能性は十分に低いと評価した。また，これらの火山活動は，既往最大規模の噴火を考慮しても，発電所に影響を及ぼさないと評価し，火山モニタリングは不要と判断した。

表 1-1 原子力発電所の火山影響評価ガイドと降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価の整合性（4/6）

原子力発電所の火山影響評価ガイド

６．原子力発電所への火山事象の影響評価

原子力発電所の運用期間中において設計対応不可能な火山事象によって原子力発電所の安全性に影響を及ぼす可能性が十分小さいと評価された火山について、それが噴火した場合、原子力発電所の安全性に影響を与える可能性のある火山事象を表１に従い抽出し、その影響評価を行う。

ただし、降下火砕物に関しては、火山抽出の結果にかかわらず、原子力発電所の敷地及びその周辺調査から求められる単位面積あたりの質量と同等の火砕物が降下するものとする。なお、敷地及び敷地周辺で確認された降下火砕物で、噴出源が同定でき、その噴出源が将来噴火する可能性が否定できる場合は考慮対象から除外する。

また、降下火砕物は浸食等で厚さが低く見積もられるケースがあるので、文献等も参考にして、第四紀火山の噴火による降下火砕物の堆積量を評価すること。（解説-14）

抽出された火山事象に対して、4 章及び 5 章の調査結果等を踏まえて、原子力発電所への影響評価を行うための、各事象の特性と規模を設定する。（解説-15）

以下に、各火山事象の影響評価の方法を示す。

表１ 原子力発電所に影響を与える可能性のある火山事象及び位置関係※1

火山事象	潜在的に影響を及ぼす特性	原子力発電所との位置関係
1.降下火砕物	静的な物理的負荷、気中及び水中の研磨性及び腐食性粒子	注 2
2.火砕物密度流：火砕流、サージ及びブラスト	動的な物理的負荷、大気の過圧、飛来物の衝撃、300℃超の温度、研磨性粒子、毒性ガス	160km
3.溶岩流	動的な物理的負荷、洪水及び水のせき止め、700℃超の温度	50km
4.岩屑なだれ、地滑り及び斜面崩壊	動的な物理的負荷、大気の過圧、飛来物の衝撃、水のせき止め及び洪水	50km
5.火山性土石流、火山泥流及び洪水	動的な物理的負荷、水のせき止め及び洪水、水中の浮遊粒子	120km
6.火山から発生する飛来物（噴石）	粒子の衝突、静的な物理的負荷、水中の研磨性粒子	10km
7.火山ガス	毒性及び腐食性ガス、酸性雨、ガスの充満した湖、水の汚染	160km
8.新しい火口の開口	動的な物理的負荷、地盤変動、火山性地震	注 3
9.津波及び静振	水の氾濫	注 4
10. 大気現象	動的過圧、落雷、ダウンバースト風	注 4
11. 地殻変動	地盤変位、沈下又は隆起、傾斜、地滑り	注 4
12. 火山性地震とこれに関連する事象	継続的微動、多重衝撃	注 4
13. 熱水系及び地下水の異常	熱水、腐食性の水、水の汚染、氾濫又は湧昇、熱水変質、地滑り、カルスト及びサーモカルストの変異、水圧の急変	注 4

（参考資料：IAEA SSG-21 及び JEAG4625 ）

注1：噴出中心と原子力発電所との距離が、表中の位置関係に記載の距離より短ければ、火山事象により原子力発電所が影響を受ける可能性があるものとする。

注2：降下火砕物に関しては、原子力発電所の敷地及び敷地付近の調査から求められる単位面積あたりの質量と同等の火山灰等が降下するものとする。

注3：新火口の開口については、原子力発電所の運用期間中に、新火口の開口の可能性を検討する。

注4：火山活動によるこれらの事象は、原子力発電所との位置関係によらず、個々に検討を行う。

解説-14. 文献等には日本第四紀学会の「日本第四紀地図」を含む。

解説-15. 原子力発電所との位置関係について

表１に記載の距離は、原子力発電所火山影響評価技術指針（JEAG4625）から引用した。JEAG4625 では、調査対象火山事象と原子力発電所との距離は、わが国における第四紀火山の火山噴出物の既往最大到達距離を参考に設定している。また、噴出中心又は発生源の位置が不明な場合には、第四紀火山の火山噴出物等の既往最大到達距離と噴出物の分布を参考にしてその位置を想定する。

例えば、噴出中心と原子力発電所との距離が、表中の位置関係に記載の距離より短ければ、火山事象により原子力発電所が影響を受ける可能性があると考えられる。

降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価

3. 影響評価

3.1 火山事象の影響評価

将来の活動可能性が否定できない火山について，柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉の運用期間中の噴火規模を考慮し，それが噴火した場合，原子力発電所の安全機能に影響を及ぼし得る火山事象を抽出した結果，降下火砕物（火山灰）（以下「降下火砕物」という。）のみが柏崎刈羽原子力発電所に影響を及ぼし得る火山事象であるという結果となった。

地質調査において，発電所敷地周辺で確認されている降下火砕物堆積層について，給源が特定できる降下火砕物については，各火山の活動性を評価し，同規模の噴火が発生する可能性は十分に低いと評価した。また，給源不明の降下火砕物（阿相島テフラ等）は，敷地内で最大35cmを確認しているが，水系等の影響を受けて堆積したと推定され，当時の堆積環境は現在と異なると考えられる。

一方，発電所運用期間中に，このような規模の降下火砕物が敷地周辺に生じる蓋然性を確認するため，文献，既往解析結果の知見及び降下火砕物シミュレーションを用い検討した結果，降下火砕物の層厚を約23.1cmと評価した。以上のことから，発電所運用期間中に敷地内で想定する降下火砕物の最大層厚は，評価結果の約23.1cmに対し，敷地内で給源不明なテフラの最大層厚35cmが確認されていることを踏まえ，保守的に35cmと設定する。そのほか得られた降下火砕物の特性を表1.1に示す。なお，鉛直荷重については，湿潤状態の降下火砕物に，プラント寿命期間を考慮して年超過確率10^{-2}規模の積雪を踏まえ設定する。

表1.1 降下火砕物特性の設定結果

項　目	設　定	備　考
層　厚	35cm	鉛直荷重に対する健全性評価に使用
密　度※1	湿潤密度：1.5g/cm^3	
荷　重※2	8,542N/m^2	
粒　径	8.0mm 以下	水循環系の閉塞並びに換気系，電気系及び計測制御系の機械的影響（閉塞・摩耗）評価に使用

※1：密度は，構造物への静的負荷の評価に用いる値であり，乾燥状態の密度は，湿潤状態の密度に包含される。

※2：湿潤状態の降下火砕物の荷重（35cm×1,500kg/m^3×9.80665m/s^2）＋積雪荷重（115.4cm※3×29.4N/（m^2・cm）※4）＝8,542N/m^2（小数点以下を切り上げ）

※3：積雪量＝１日あたりの積雪量の年超過確率 10^{-2} の値（84.3cm）
＋日最深積雪量の平均値（31.1cm）＝115.4cm

※4：新潟県建築基準法施行細則に基づく積雪の単位荷重（積雪 1cm 当たり 29.4N/m^2）

表 1-1 原子力発電所の火山影響評価ガイドと降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価の整合性（5/6）

原子力発電所の火山影響評価ガイド	降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価
６．１　降下火砕物 （１）　降下火砕物の影響 (a) 直接的影響 降下火砕物は、最も広範囲に及ぶ火山事象で、ごくわずかな火山灰の堆積でも、原子力発電所の通常運転を妨げる可能性がある。降下火砕物により、原子力発電所の構造物への静的負荷、粒子の衝突、水循環系の閉塞及びその内部における磨耗、換気系、電気系及び計装制御系に対する機械的及び化学的影響、並びに原子力発電所周辺の大気汚染等の影響が挙げられる。 降雨・降雪などの自然現象は、火山灰等堆積物の静的負荷を著しく増大させる可能性がある。火山灰粒子には、化学的腐食や給水の汚染を引き起こす成分（塩素イオン、フッ素イオン、硫化物イオン等）が含まれている。 (b) 間接的影響 前述のように、降下火砕物は広範囲に及ぶことから、原子力発電所周辺の社会インフラに影響を及ぼす。この中には、広範囲な送電網の損傷による長期の外部電源喪失や原子力発電所へのアクセス制限事象が発生しうることも考慮する必要がある。 （２）　降下火砕物による原子力発電所への影響評価 降下火砕物の影響評価では、降下火砕物の堆積物量、堆積速度、堆積期間及び火山灰等の特性などの設定、並びに降雨等の同時期に想定される気象条件が火山灰等特性に及ぼす影響を考慮し、それらの原子炉施設又はその付属設備への影響を評価し、必要な場合には対策がとられ、求められている安全機能が担保されることを評価する。（解説-16、17、18）	3.4 降下火砕物による影響の選定 3.4.2 直接的影響 降下火砕物の特徴から直接的影響の要因となる荷重，閉塞，摩耗，腐食，大気汚染，水質汚染及び絶縁低下を抽出し，評価対象施設の構造や設置状況等を考慮して直接的な影響因子を以下のとおり選定する。なお，柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉で想定される降下火砕物の条件を考慮し，表1.4に示す項目について評価を実施する。 3.4.3 間接的影響 降下火砕物によって柏崎刈羽原子力発電所に間接的な影響を及ぼす因子は，湿った降下火砕物が送電線の碍子，開閉所の充電露出部等に付着し絶縁低下を生じさせることによる広範囲にわたる送電網の損傷に伴う「外部電源喪失」，並びに降下火砕物が道路に堆積することによる交通の途絶に伴う「アクセス制限」である。 3.3 安全施設のうち評価対象施設の抽出 （前略） 設置許可基準規則第六条における安全施設とは，「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」で規定されているクラス1，クラス2及びクラス3に該当する構築物，系統及び機器（以下「安全重要度分類のクラス1，クラス2及びクラス3に属する構築物，系統及び機器」という。）を指していることから，降下火砕物によってその安全機能が損なわれないことを確認する必要がある施設を，安全重要度分類のクラス1，クラス2及びクラス3に属する構築物，系統及び機器とする。 また，以下の点を踏まえ，降下火砕物によってその安全機能が損なわれないことを確認する必要がある施設のうち，外部事象防護対象施設は，外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器（発電用原子炉を停止するため，また，停止状態にある場合は引き続きその状態を維持するために必要な異常の発生防止の機能，又は異常の影響緩和の機能を有する構築物，系統及び機器，並びに，使用済燃料プールの冷却機能及び給水機能を維持するために必要な異常の発生防止の機能，又は異常の影響緩和の機能を有する構築物，系統及び機器として安全重要度分類のクラス1，クラス2及び安全評価上その機能に期待するクラス3に属する構築物，系統及び機器）に加え，それらを内包する建屋とする。 ・降下火砕物襲来時の設備損傷状況を踏まえ，必要に応じプラント停止の措置をとること ・プラント停止後は，その状態を維持することが重要であること その上で，外部事象防護対象施設のうち，屋内設備は内包する建屋により防護する設計とし，評価対象施設を，屋外設備，建屋及び屋外との接続がある設備（屋外に開口している設備又は外気から取り入れた屋内の空気を機器内に取り込む機構を有する設備）に分類し，抽出する。 また，上記以外の安全施設については，降下火砕物に対して機能を維持すること，若しくは，降下火砕物による損傷を考慮して，代替設備により必要な機能を確保すること，安全上支障のない期間での除灰，修復等の対応，又は，それらを適切に組み合わせることで，その安全機能を損なわない設計とする。 以上を踏まえた，評価フローを図1.3に示す。評価フローに基づき抽出した評価対象施設を表1.2及び表1.3に示すとともに，評価対象施設の設置場所を図1.4に示す。

表 1-1 原子力発電所の火山影響評価ガイドと降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価の整合性（6/6）

原子力発電所の火山影響評価ガイド	降下火砕物（火山灰）に対する設備影響の評価
（３） 確認事項 (a) 直接的影響の確認事項 ① 降下火砕物堆積荷重に対して、安全機能を有する構築物、系統及び機器の健全性が維持されること。 ② 降下火砕物により、取水設備、原子炉補機冷却海水系統、格納容器ベント設備等の安全上重要な設備が閉塞等によりその機能を喪失しないこと。 ③ 外気取入口からの火山灰の侵入により、換気空調系のフィルタの目詰まり、非常用ディーゼル発電機の損傷等による系統・機器の機能喪失がなく、加えて中央制御室における居住環境を維持すること。 ④ 必要に応じて、原子力発電所内の構築物、系統及び機器における降下火砕物の除去等の対応が取れること。	3.6 降下火砕物に対する設計 3.6.1 直接的影響に対する設計 直接的影響については，評価対象施設の構造や設置状況等（形状，機能，外気吸入や海水通水の有無等）を考慮し，想定される各影響因子に対して，影響を受ける各評価対象施設が安全機能を損なわない以下の設計とする。（表 1.6） 3.7 降下火砕物の除去等の対策 3.7.1 降下火砕物に対応するための運用管理 降下火砕物に備え，手順を整備し， 図 1.5 のフローのとおり段階的に対応することとしている。その体制については，地震，津波，火山噴火等の自然災害に対し，保安規定に基づく保安管理体制として整備し，その中で体制の移行基準，活動内容についても明確にする。
(b) 間接的影響の確認事項 原子力発電所外での影響（長期間の外部電源の喪失及び交通の途絶）を考慮し、燃料油等の備蓄又は外部からの支援等により、原子炉及び使用済燃料プールの安全性を損なわないように対応が取れること。	3.6.2 間接的影響に対する設計方針 柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉の非常用所内交流電源設備は，非常用ディーゼル発電機（3 台/号炉）とそれぞれに必要な耐震 S クラスの燃料ディタンク（3 基；18kL 以上）を有している。さらに，軽油タンク（2 基；550kL 以上）を有している。 これらにより，7 日間の外部電源喪失に対して，また，原子力発電所外での影響（長期間の外部電源の喪失及び交通の途絶）を考慮した場合においても，発電用原子炉の停止及び停止後の発電用原子炉の冷却，並びに使用済燃料プールの冷却に係る機能を担うために必要となる電源の供給が継続できる設計とする。
解説-16. 原子力発電所内及びその周辺敷地において降下火砕物の堆積が観測されない場合は、次の方法により堆積物量を設定する。 ✓ 類似する火山の降下火砕物堆積物の情報を基に求める。 ✓ 対象となる火山の噴火量、噴煙柱高、全体粒度分布、及びその領域における風速分布の変動を高度及び関連パラメータの関数として、原子力発電所における降下火砕物の数値シミュレーションを行うことより求める。数値シミュレーションに際しては、過去の噴火履歴等の関連パラメータ、並びに類似の火山降下火砕物堆積物等の情報を参考とすることができる。 解説-17. 堆積速度、堆積期間については、類似火山の事象やシミュレーション等に基づいて、原子力発電所への間接的な影響も含めて評価する。 解説-18. 火山灰の特性としては粒度分布、化学的特性等がある。 （「６．２火砕物密度流」以降省略）	以　上

2. 降下火砕物の特徴及び影響モードと，影響モードから選定された影響因子に対し影響を受ける評価対象施設の組み合わせについて

降下火砕物の特徴から抽出される影響モード，影響モードから選定される影響因子，及び影響因子から影響を受ける評価対象施設の組み合わせについて「表 1.5 降下火砕物が影響を与える評価対象施設と影響因子の組み合わせ」にて，評価すべき組み合わせを検討した結果，図 2-1 に示す結果となった。なお，選定された影響因子は，「原子力発電所の火山影響評価ガイド」に示されたものと同じ項目となった。

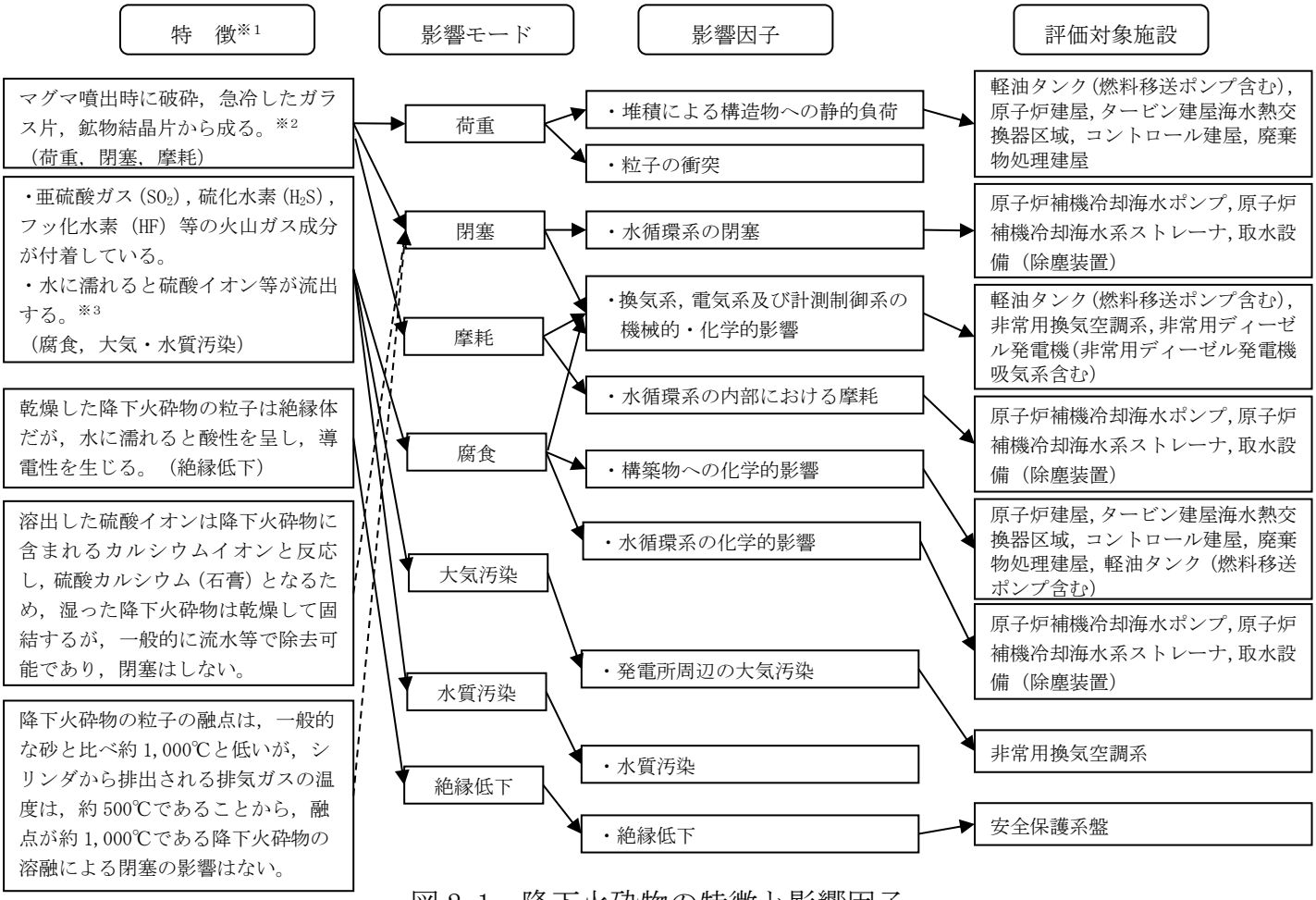


図 2-1　降下火砕物の特徴と影響因子

※1：（参考文献）（内閣府）広域的な火山防災対策に係る検討会（第 3 回）（資料 2）
※2：粘性を生じさせる粘土鉱物等は含まれていない。
※3：［降下火砕物による金属腐食の研究報告の例］
4 種類の金属材料（Zn メッキ，Al，SS41，Cu）に対して，桜島降下火砕物による金属腐食の程度は，実際の自然条件より厳しい条件においても表面厚さに対して十数～数十μm のオーダーの腐食。
＜試験条件・・・温度，湿度，保持時間［①（40℃，95%，4h）～②（20℃，80%，2h）×18 サイクル］＞
（参考文献）出雲茂人，末吉秀一ほか（1990 年）：火山環境における金属材料の腐食
⇒設計時の腐食代（数 mm オーダー）を考慮すると，構造健全性に影響を与えることはないと考えられる。

降水による降下火砕物の固結の影響について

降下火砕物は，湿ったのち乾燥することで固結する特徴をもっており[※1]，影響モードとして閉塞が考えられるが，一般的に流水等で除去可能である。

降下火砕物が固結した場合の評価対象施設に対する影響モードとしては，水循環系の閉塞並びに換気系，電気系及び計測制御系の機械的影響（閉塞）が考えられるが，水循環系においては，大量の海水が通水しているため，固結による影響はない。換気系，電気系及び計測制御系の機械的影響（閉塞）としては，非常用換気空調系のバグフィルタ（粒径約2μmに対して80%以上を捕獲する性能）の閉塞が考えられるが，非常用換気空調系の外気取入口にはルーバが設置されており，下向から吸い込む構造となっていることから，平時に比べ雨が降っている場合の降下火砕物の侵入は減少すると考えられる。なお，侵入した降下火砕物は，非常用換気空調系のバグフィルタによって除去されるが，湿った降下火砕物がバグフィルタに付着し固結した場合においても，バグフィルタの取替えが可能なことから，固結による影響はない。

一方，評価対象施設に対して間接的な影響を与え得る事象としては，降下火砕物による排水路の閉塞時の降水事象が考えられる。ただし，評価対象施設に有意な影響を及ぼし得る大雨に対しては，排水路の閉塞に伴う建屋周辺における滞留水が発生した場合においても，排水路とは別に排水用フラップゲートが設置されており，この滞留水は排水用フラップゲートを通じて速やかに排水されること，また，原子炉建屋等に対しては，溢水対策として建屋貫通部の止水処置等の実施，屋外設備である燃料移送ポンプについては，設置区画に防護板等を設置する設計とすることから，評価対象施設への影響はない。

※1：（参考文献）（内閣府）広域的な火山防災対策に係る検討会（第3回）（資料2）

3.降下火砕物による摩耗について

水循環系において最も摩耗の影響を受けやすい箇所はライニングが施されていない各冷却器の伝熱管と考えられるが，発電所の運用期間中において海水取水中に含まれる砂等の摩耗によるトラブルは発生していないこと，及び主要な降下火砕物は，砂等に比べて硬度が低くもろいことから，降下火砕物による摩耗が設備に影響を与える可能性はないと評価している。

1　降下火砕物と砂の破砕しやすさの違いについて

降下火砕物と砂の破砕しやすさの違いについては，「武若耕司（2004）：シラスコンクリートの特徴とその実用化の現状，コンクリート工学，vol.42，No.3，P38-47.」による調査報告があり，図3-1に示すとおり，「シラスは川砂などに比べて極めて脆弱な材料である」とされており，シラスと同様，火山ガラスを主成分とする降下火砕物は，砂と比較して破砕しやすいと考えられる。

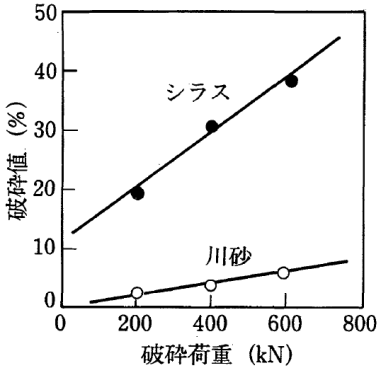


図 3-1　**シラスの破砕試験結果**

2　降下火砕物と砂及び設備材料の硬度の比較について

鉱物の硬度は掻傷硬度で表されており，ここではモース硬度による比較を行う。以下のとおり，主要な降下火砕物の硬度は砂より低いため，設備への影響は軽微と考える。

・降下火砕物の主成分は，火山ガラスであり，「恒松修二・井上耕三・松田応作（1976）：シラスを主原料とする結晶化ガラス，窯業協会誌84[6]，P32-40.」によると，火山ガラスのモース硬度は5と記載されている。

・砂の主成分は，石英であり，石英のモース硬度は7とされている。

また，発電所運用期間中において海水取水中に含まれる砂等による摩耗によるトラブルは経験していないことから，設備材料は砂に対して耐性を有すると考える。また，東北地方太平洋沖地震に伴う津波による海水中の砂に対しても，海水ポンプの運転が継続してい

る実績があることから，摩耗による設備への影響は軽微と考える。

4.降下火砕物の化学的影響（腐食）について

降下火砕物による「構造物への化学的影響（腐食）」等については，評価対象施設が塗装されていることで直ちに機能に影響を及ぼすことはないと評価している。その詳細について以下に示す。

原子力発電所には，炭素鋼，低合金鋼及びステンレス鋼の機器，配管，制御盤，ダクト等の外表面に対する塗装基準が定められており，耐放射線性，耐水性，除染性，耐熱性，耐油性等を考慮した塗料に係る基準が規定されている。

屋外設備については，海塩粒子等の腐食性有害物質が付着しやすく，最も厳しい腐食環境にさらされるため，アクリルゴム系，アクリルシリコン樹脂系，長油性フタル酸樹脂系等の塗料が複数層で塗布されており，水に濡れると硫酸イオン等が流出する等の特徴を持つ降下火砕物が堆積したとしても，直ちに金属表面等の腐食が進むことはない。

また，海水ポンプ，海水管等の海水に直接触れる部分については，エポキシ樹脂系，シリコン樹脂系等の耐食性塗料（樹脂ライニング含む）が施されている。

よって，降下火砕物が外表面に堆積及び混入した海水を取水したとしても，直ちに金属表面の腐食が進むことはない。

なお，定期的に外観の点検を行い，塗装の状態についても確認を行っている。6号及び7号炉における塗装の例を表4-1に示す。

表4-1 柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉における塗装の例

	下塗り	中塗り	上塗り
原子炉建屋 タービン建屋 コントロール建屋 廃棄物処理建屋	アクリルゴム系	アクリルシリコン樹脂系	アクリルシリコン樹脂系
軽油タンク	鉛・クロムフリーさび止めペイント	長油性フタル酸樹脂系	長油性フタル酸樹脂系 アルキド樹脂系
原子炉補機冷却海水ポンプ	エポキシ樹脂系	シリコン樹脂系	シリコン樹脂系
除塵装置	変性エポキシ樹脂	エポキシ樹脂系	ポリウレタン樹脂系 エポキシ樹脂系 シリコン樹脂系 変性エポキシ樹脂系

5.積雪と降下火砕物との重畳の考え方について

設備影響評価における降下火砕物の条件としては，想定される降下火砕物の層厚を35cm として，設定を行った。また，設計基準における積雪の条件は，規格・基準類として，建築基準法及び同施行令第 86 条第 3 項に基づく新潟県建築基準法施行細則で定められている積雪量，観測記録として，柏崎市に設置されている気象庁地域気象観測システム（アメダス）に記録されている日降雪量の最大値，及び観測記録をもとに算出した年超過確率結果を参照し，設計基準積雪量を 167cm と設定している。

一方，火山（降下火砕物）と積雪は相関性が低い事象の組み合わせであるため，重畳を考慮する際は，Turkstra 規則を適用する。Turkstra 規則の考え方は，建築基準法や，土木学会「性能設計における土木構造物に対する作用の指針」，国土交通省「土木・建築にかかる設計の基本」，ANSI(米国国家規格協会)等で採用されている。Turkstra 規則は，主たる作用（主事象）の最大値と，従たる作用（副事象）の任意時点の値（平均値）の和として作用の組み合わせを考慮する。単純性・保守性のために，主事象は設計基準で想定している規模，副事象はプラント寿命期間中に発生し得る程度の規模（年超過確率 10^{-2}）を想定する。この想定は，副事象として想定すべき任意時点の値(平均値)より厳しい値を想定することとなるため，保守性があると考える。

以上の考えをもとに，設計基準で想定している規模の降下火砕物（35cm）に重畳させる積雪量は，１日あたりの積雪量の年超過確率 10^{-2} の値（84.3cm）に日最深積雪量の平均値（31.1cm）を合算した 115.4cm とした。

なお，主事象を積雪，副事象を降下火砕物とした場合は，設計基準として想定している積雪量 167cm に降下火砕物 3.5cm※の荷重を重畳させることを想定するが，前者の荷重に包含される。(年超過確率に基づき想定する積雪量は，別紙１に基づき算出。)

また，降下火砕物又は積雪堆積状態における地震発生時の影響評価については，別紙２に記載する。

※降下火砕物については，確率論的評価を実施していないことから，副事象として想定する噴火規模は，設計基準規模として設定している噴火規模（VEI5）から１段階噴火規模を下げた VEI4 相当として設定した。

柏崎市における積雪の観測記録

年超過確率の推定に使用するデータについては，柏崎刈羽原子力発電所の最寄りの気象官署又はアメダスとする（表 5-1）。

表 5-1　柏崎市における毎年の積雪観測記録
（気象庁ホームページより）

年	雪(寒候年・cm)		
	降雪の合計	日降雪の最大	最深積雪
1981	594 ＊	67 ＊	122 ＊
1982	224 ＊	32 ＊	34 ＊
1983	516	61	107 ＊
1984	951	51	171
1985	733	72	139
1986	966	64	162
1987	347	44	50
1988	446	37	75
1989	135	24	25
1990	227	49	59
1991	396	37	73 ＊
1992	84 ＊	29 ＊	26 ＊
1993	140	23	24
1994	315	43	62
1995	425	27	59
1996	523	39	78
1997	274	26	29
1998	272	37	42
1999	274	31	42
2000	350	40	63
2001	441	32	67
2002	170	41	36
2003	294	34	54
2004	240	36	43
2005	434	43	68
2006	461	40	53
2007	53	23	22
2008	250	24	34
2009	138	20	19
2010	427	66	105
2011	278	29	67
2012	514	35	111

値＊：資料不足値
統計値を求める対象となる資料が許容する資料数を満たさない場合。
統計処理では，上記の観測記録を使用して評価を実施。

日最深積雪量の平均値の算出

日最深積雪量の平均値は，柏崎市のアメダスの観測記録から積雪が確認された日数（N）と，その日の最深積雪量（S_{Ni}）から算出する。

$$（日最深積雪量の平均値）＝\frac{1}{N}\sum_{i}S_{Ni}$$

上式は，積雪が確認された場合の平均的な積雪量を与える式となる。

柏崎市のアメダスの記録から，日最深積雪量の平均値を計算すると以下のとおりとなる。

観測期間：1980 年 11 月～2013 年 3 月
積雪が確認された日数（N）：1,925 日
最深積雪量の合計：59,766 cm

日最深積雪量の平均値＝$\frac{59,766}{1,925}=31.1$ ［cm］

年超過確率の推定方法

1. 評価方法

年超過確率の推定は，気象庁の「異常気象リスクマップ」の確率推定方法を採用して評価を実施する[1]。

評価フローを図 5-1 示す。

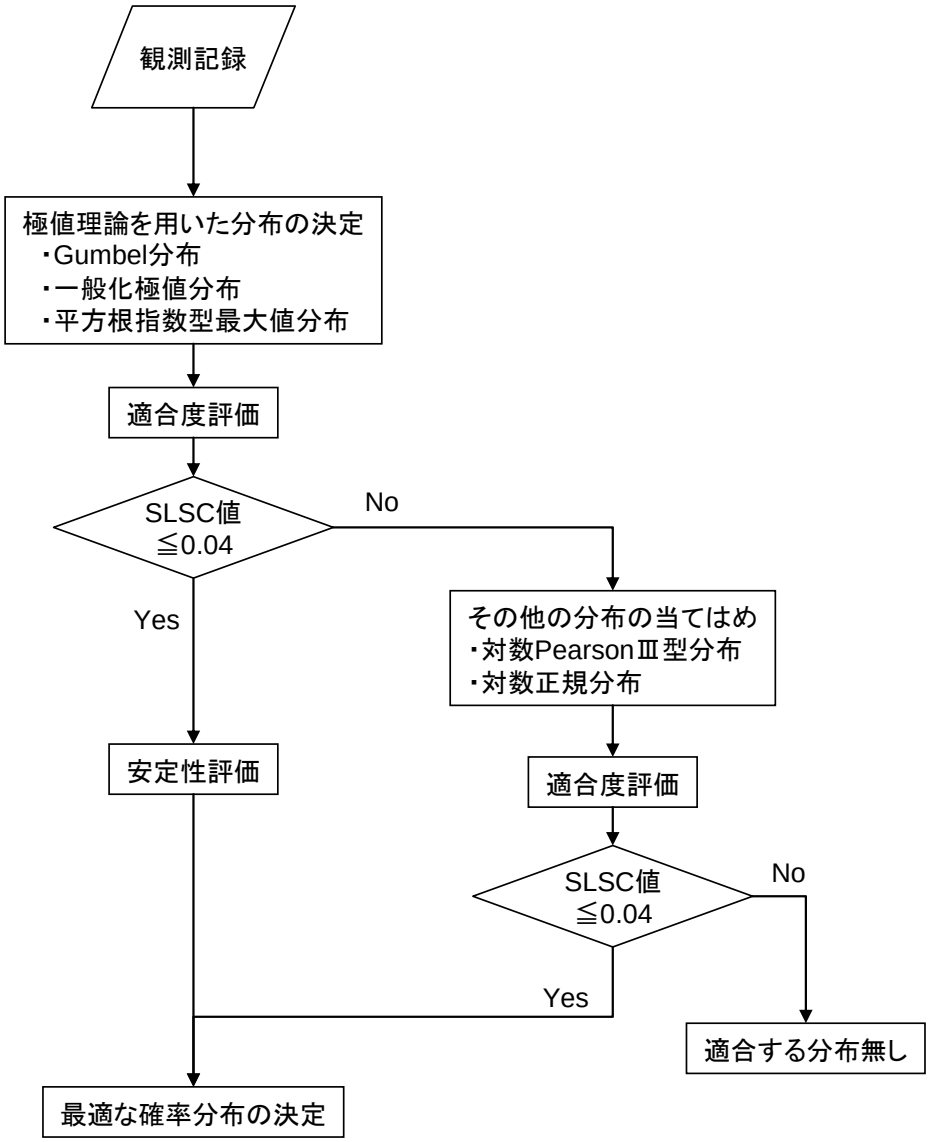


図 5-1　年超過確率評価フロー

(1)確率分布の算出

観測記録から確率分布の分布特性を表す母数を推定し，確率分布形状を特定する。ここでは，極値理論からの分布（Gumbel 分布，平方根指数型最大値分布，一般化極値分布）や従来から使用されている分布（対数 PearsonⅢ型分布，対数正規分布）の中から最適な確率分布を決定する。

確率分布モデルの母数推定については，以下に示すＬ積率法（L Moments）や最尤法等の手法を用いる。[2]

Ｌ積率法

第１次のＬ積率 λ_1，第２次のＬ積率 λ_2，第３次のＬ積率 λ_3はそれぞれ以下のように定義される。

$$\lambda_1 = b_0$$

$$\lambda_2 = 2b_1 - b_0$$

$$\lambda_3 = 6b_2 - 6b_1 + b_0$$

ここで，

$$b_0 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} x_j$$

$$b_1 = \frac{1}{N(N-1)}\sum_{j=1}^{N}(j-1)\,x_j$$

$$b_2 = \frac{1}{N(N-1)(N-2)}\sum_{j=1}^{N}(j-1)\,(j-2)x_j$$

N：標本数

x_j：N 個の標本を昇順に並び替えたときの小さい方から j 番目の値

最尤法

以下に示す対数尤度関数 L が最大となる a,b を算出

$$\mathrm{L}(a,b) = \sum_{j=1}^{N} \ln f(x_j)$$

$f(x)$：確率密度関数

また，例として極値理論からの分布（Gumbel 分布，平方根指数型最大値分布，一般化極値分布）の母数推定方法，及び非超過確率 p に対応する値の算出方法を表 5-2 に示す。

表 5-2　極値分布の母数推定法について

分布	母数 推定法	母数	クオンタイル （非超過確率 p に対応する値）
Gumbel 分布	L 積率法 （2 母数）	$\mathrm{a} = \frac{\lambda_2}{\ln 2}$ $\mathrm{c} = \lambda_1 - 0.5772157a$	$x_p = c - a \cdot \ln[-\ln(p)]$
一般化 極値分布 （GEV 分布）	L 積率法 （3 母数）	$\mathrm{k} = 7.859d + 2.9554 * d^2$ ここで $\mathrm{d} = \frac{2\lambda_2}{\lambda_3 + 3\lambda_2} - \frac{\ln 2}{\ln 3}$ $\mathrm{a} = \frac{k\lambda_2}{(1 - 2^{-k}) \cdot \Gamma(1 + k)}$ $\mathrm{c} = \lambda_1 - \frac{a}{k} \cdot [1 - \Gamma(1 + k)]$	$x_p = c + \frac{a}{k} \cdot \{1 - [-\ln(p)]^k\}$
平方根指数型 最大値分布	最尤法 （2 母数）	$\mathrm{L}(a, b) = \sum_{j=1}^{N} \ln f(x_j)$ $= N \ln a + N \ln b - N \ln 2 - \sum_{j=1}^{N} \sqrt{bx_j}$ $-a\left[\sum_{j=1}^{N} \exp\left(-\sqrt{bx_j}\right) + \sum_{j=1}^{N} \sqrt{bx_j} \exp\left(-\sqrt{bx_j}\right)\right]$	$x_p = \frac{{t_p}^2}{b}$ ここで $\ln(1 + t_p) - t_p = \ln\left[-\frac{1}{a}\ln(p)\right]$

(2)適合度評価

算出した分布がどの程度，観測記録と適合しているかを確認し分布の適合度を評価する。

本評価では，分布の適合度を SLSC（Standard Least Squares Criterion）と呼ばれる指標で評価する。

SLSC は，観測値をプロッティングポジション公式で並べた場合と，確率分布から推定した場合との確率の差を指標化した値である。（図 5-2）

SLSC が小さいほど，適合度が高く，経験的な分布とよくフィットする。本評価では SLSC が 0.04 以下で適合していると判断する。

プロッティングポジション公式とは，経験的に求められた公式であり，観測値の個数，大きさの順に並べたときの順位と再現期間との関係を数式化したものである。同公式では，いくつかの式が提案されているが，本評価においては多くの分布系によく適合する以下の式を採用する。

$$T(i) = \frac{N + 0.2}{i - 0.4}$$

ここで，N はデータの個数であり，大きい方から i 番目のデータの再現期間※（一日当たりの降雪量の確率年）$T(i)$ とする。

※：ある現象（例えば 1 日 80cm が降雪すること）が 1 回起こり得る「50 年」「100 年」という期間[1]

このとき，SLSC 値は，データ値と関数値（それぞれ標準化した値）を 2 乗平均した以下の式で表される。[2]

$$\mathrm{SLSC}=\frac{\sqrt{\xi^2}}{|s_{0.99}-s_{0.01}|}$$

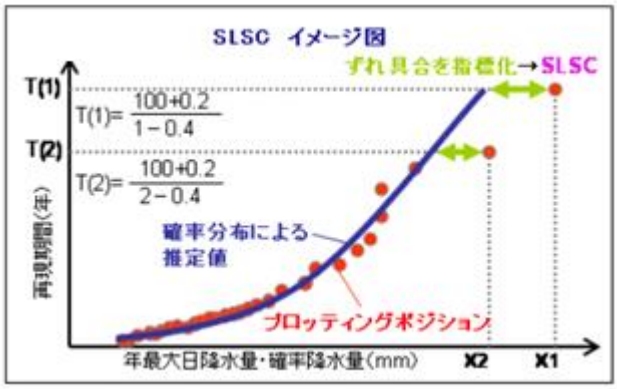
ここで，

$$\xi^2=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(s_i-r_i)^2$$

$s_{0.99}$，$s_{0.01}$：それぞれ非超過確率 0.99 と 0.01 に対する当該確率分布の標準変量

s_i：順序統計量データx_iを推定母数で変換した標準変量

r_i：プロッティングポジションに対応した理論クオンタイルを推定母数で変換した標準変量



X1(mm)：年最大日降水量の観測値 100 個のうち 1 番大きな値

X2(mm)：年最大日降水量の観測値 100 個のうち 2 番目に大きな値

図 5-2 SLSC のイメージ図（確率降水量の場合）[1]

(3)安定性評価

(2)で分布の適合度を評価し，SLSC が 0.04 以下を満足した場合には，次に分布の安定性を評価する。現在得られている観測値をランダムに抜き取った場合に，結果が大きく変化しないことを評価する。本評価では安定性評価には Jack knife 法を用いる。

[1]気象庁 HP（ http://www.data.kishou.go.jp/climate/riskmap/cal_qt.html ）

[2] 星清，1995：水文統計解析，開発土木研究所月報 No.540

2. 評価結果

表 5-3　一日あたりの積雪量に対する年超過確率

	Gumbel 分布	平方根指数型 最大値分布	一般化 極値分布
SLSC	0.038	0.067	0.038

確率年	積雪量		
10	58.0	68.0	57.9
100	84.3	117.6	88.8
10000	135.9	249.8	165.2

確率年	Jack knife 推定誤差		
10	4.8	2.8	4.8
100	8.4	3.5	10.2
10000	15.9	5.0	43.7

積雪・降下火砕物堆積状態での地震発生時の影響評価について

1. 評価内容

自然現象の重畳評価において抽出された組み合わせ「雪・降下火砕物が堆積している状態での地震発生」についての評価を実施した。自然現象の重畳評価においては主事象（設計基準規模）×副事象（年超過確率 10^{-2} 規模）を想定することを基本としていることから，表 5-4 に示す 8 パターンを考慮した。

これらの組み合わせのうち，荷重の大きさ等の観点で代表性のある，主事象：地震，副事象：積雪の組み合わせ，及び主事象：降下火砕物，副事象：地震（ベース負荷：積雪）の 2 とおりの評価を実施するものとする。代表性の判断の際の基準については表 5-5 に示す。

表 5-4　重畳評価ケース※1

No.	主事象 （設計基準規模）	副事象 （10^{-2} 規模）	ベース負荷 （平均規模）	備考
1	地震（Ss 等）	積雪（115.4cm）	－	－
2	地震（Ss 等）	降下火砕物（3.5cm）※2	積雪（31.1cm）	No.1 に包絡
3	風（40.1m/s）	降下火砕物（3.5cm）※2	積雪（31.1cm）	No.1 に包絡
4	風（40.1m/s）	積雪（115.4cm）	－	No.1 に包絡
5	降下火砕物（35.0cm）	地震（10^{-2} 相当地震動）	積雪（31.1cm）	－
6	積雪（167.0cm）	地震（10^{-2} 相当地震動）	－	No.5 に包絡
7	降下火砕物（35.0cm）	風（27.9m/s）	積雪（31.1cm）	No.5 に包絡
8	積雪（167.0cm）	風（27.9m/s）	－	No.5 に包絡

※1：除雪等に期待できる施設は堆積荷重について除雪等の能力を考慮した値とする。

※2：降下火砕物については，確率論的評価を実施していないことから，副事象として考慮する場合は，設計基準規模として設定している噴火規模（VEI5）から 1 段階噴火規模を下げた VEI4 相当を考慮する。

表 5-5　水平荷重・堆積荷重の比較

a. 水平荷重

		せん断力(kN) (K6 原子炉建屋 躯体 38.2(m) － 49.7(m))	判定
比較 a-1	設計用地震力	43.35×10^{3}	地震＞風
	風 (40.1m/s)	2.65×10^{3}	
比較 a-2	地震 (10^{-2}相当地震動)	9.7×10^{3}	地震＞風
	風 (27.9m/s)	1.29×10^{3}	

b. 堆積荷重

		堆積荷重 (N/m^2)	判定
比較 b-1	積雪(115.4cm)	3,393	積雪(115.4cm) ＞ 降下火砕物(3.5cm)＋積雪 (31.1cm)
	降下火砕物(3.5cm) ＋積雪(31.1cm)	1,429	
比較 b-2	積雪(167.0cm)	4,910	積雪(167.0cm) ＜ 降下火砕物(35.0cm)＋積雪 (31.1cm)
	降下火砕物(35.0cm) ＋積雪(31.1cm)	6,063	

2. 評価対象施設について

評価対象施設の抽出フローを図 5-3 に示す。地震の防護対象が耐震重要度分類 S クラス，B クラス及び C クラス，積雪の防護対象が安全重要度分類のクラス 1，クラス 2 及びクラス 3 であることから，地震と積雪・降下火砕物の重畳については，その両方に含まれる設備を評価対象とする。

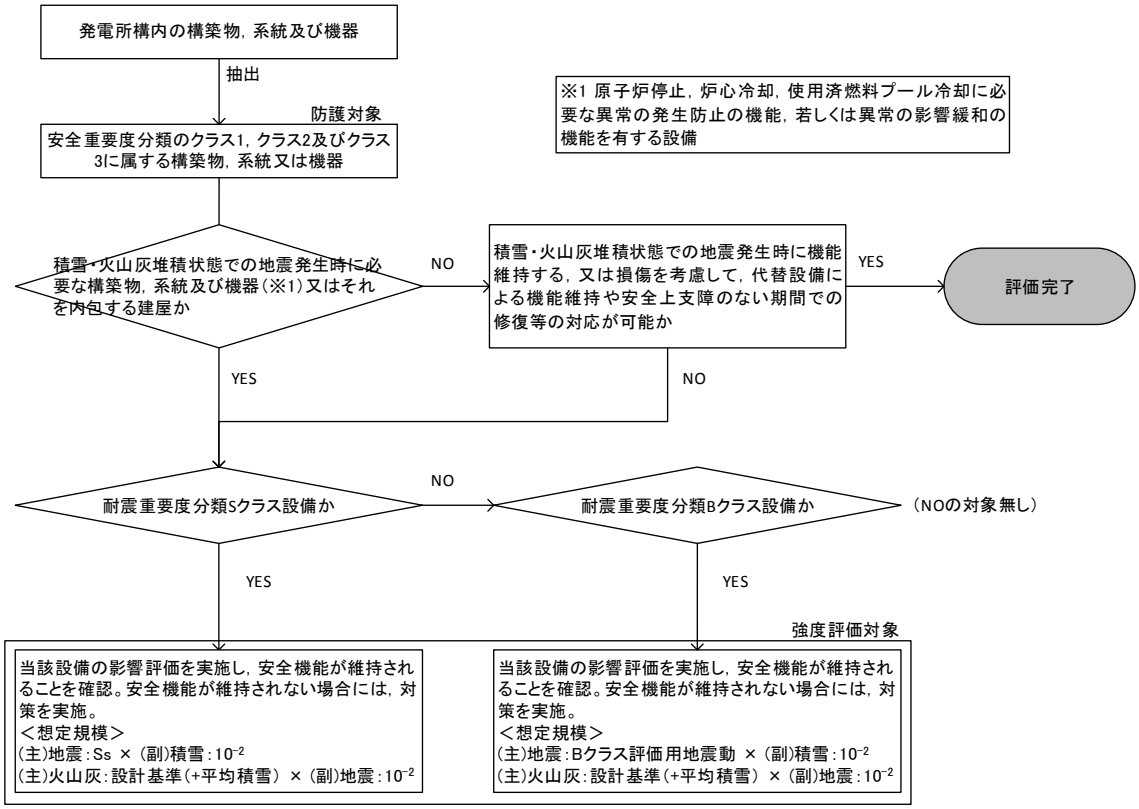


図 5-3　評価対象施設の考え方

3. 安全施設の健全性評価結果

抽出された各評価対象施設の直上付近の屋根等の健全性について確認した結果を表 5-6 に示す。本影響評価は，事象単独や積雪・降下火砕物の重畳に比べ厳しい条件であることから，屋根等強度評価に用いる堆積荷重は，除雪等により除去される堆積物を除いた荷重を用いる。

表 5-6 主な評価対象施設

建屋等	評価部位	評価対象施設	判定
原子炉建屋	原子炉建屋屋根全体	使用済燃料プール等	○
コントロール建屋	コントロール建屋屋根全体	中央制御室等	○
タービン建屋	海水熱交換器区域直上の屋根部分	非常用所内電源系，非常用所内電源系換気空調系，原子炉補機冷却水系・原子炉補機冷却海水系	○
屋外	軽油タンク天板及び非常用ディーゼル発電機燃料移送系防護天板	軽油タンク及び非常用ディーゼル発電機燃料移送ポンプ	○

4. 重畳評価の保守性について

上記の副事象の規模の考え方（年超過確率 10^{-2} 規模）については，Turkstra 規則における想定（平均的な値）よりもかなり保守的な設定としている。

年超過確率については，1 年で特定の規模以上の事象が発生する確率となっていることから，例えば年超過確率 10^{-2} の規模（言い換えると 100 年に 1 回以上発生する確率が約 63%の規模）は，平均的な規模（年に数回の規模）や年最大値の平均（おおよそ 1 年に 1 回の規模）よりも，一般的に大きくなると言える。

例として，本資料で対象としている地震と積雪の重畳について，同じく Turkstra 規則を参照している建築基準法における評価と比較したものを表 5-7 に示す。

表 5-7　組み合わせる積雪荷重について（建築基準法との比較）

	積雪の想定する規模	堆積積雪深
建築基準法（建築物荷重指針・同解説(2004)）	地震との組み合わせを考慮する場合（短期荷重），平均的な積雪荷重を想定し，建築基準法施行令第 86 条に規定する積雪荷重によって生ずる力の 0.35 倍※	柏崎市 130cm×0.35 =45.5cm 刈羽村 170cm×0.35 =59.5cm
今回の重畳評価に採用する考え方	再現期間 100 年における最大値を想定	1 日当たり積雪量の年超過確率 10^{-2} の規模の値 84.3cm＋日最深積雪量の平均値 31.1cm=115.4cm

※：建築基準法では上記のとおり，簡易式（短期積雪荷重の 0.35 倍）により算出しているが，そこでの想定規模の考え方に基づいて，経験データから冬季の平均的な積雪量を算出した場合，31.1cm となる。

6.降下火砕物による送電鉄塔への影響について

送電鉄塔に使用されている碍子は，降下火砕物が堆積しにくい構造となっており，静的荷重の影響は受けにくく機能への影響を及ぼすことはない。

火山活動により大量の降下火砕物による影響が想定される場合には，開閉所の洗浄装置等で碍子の洗浄を実施する等，事故の未然防止に努める。

7.降下火砕物による非常用ディーゼル発電機の吸気に係るバグフィルタの影響評価

非常用ディーゼル発電機の吸気は非常用換気空調系のバグフィルタ（粒径約 2μm に対して 80%以上を捕獲する性能）を介した換気空気を吸入しているため，降下火砕物の侵入による非常用ディーゼル発電機への影響は小さいと考えられる。なお，バグフィルタの手前には，外気取入口に下向き羽根のついたルーバが設置されており，降下火砕物により容易に閉塞しないと考えられるが，万一閉塞した場合の影響について，以下のとおり評価する。

１．閉塞までに要する時間について

以下の想定における非常用ディーゼル発電機の吸気バグフィルタの閉塞までの時間を試算した。降下火砕物の大気中濃度には，比較的噴火規模が大きく，地表レベルでの観測データがあるアイスランド南部エイヤヒャトラ氷河で発生した火山噴火の際のヘイマランド地区の濃度値（3,241μg/m^3）を用いるが，米国セントヘレンズ火山噴火の際の濃度値（33,400μg/m^3）を用いた場合についても試算した。（補足資料-8 参照）

また，非常用ディーゼル発電機吸気バグフィルタの灰捕集容量については，粉塵保持容量を用いた場合と，降下火砕物によるバグフィルタへの影響を直接確認した試験結果（試験内容等は 4.参照）に基づく保持容量を用いた場合のそれぞれで試算した。

(1)アイスランドの火山噴火データを用いた試算

表 7-1 より，吸気バグフィルタの閉塞時間を試算した結果，約 619 時間となった。

表 7-1 吸気バグフィルタ閉塞までの時間

	粉塵保持容量※1	降下火砕物による試験結果に基づく保持容量
① 非常用ディーゼル発電機吸気バグフィルタ灰捕集容量（g/枚）	800	8,540
② フィルタ１枚当たりの定格風量（m^3/h）	4,250	
③ 降下火砕物の大気中濃度（μg/m^3）※2	3,241	
④ 閉塞までの時間（h）＝①／②／③	58	619

※1:定格風量で最終圧力損失に達した時点においてバグフィルタが保持している粉塵量の設計値。（試験用粉体は換気用エアフィルタユニットの性能試験方法（JIS B 9908）で用いられ

る，JIS Z 8901 の試験粉体 1 の 15 種を使用）

※2：アイスランド南部エイヤヒャトラ氷河で発生(H22 年 4 月)した火山噴火地点から約 40km 離れたヘイマランド地区における大気中の降下火砕物濃度値（24 時間観測ピーク値） を参照した。

(2)セントヘレンズの火山噴火データを用いた試算

表 7-2 より，吸気バグフィルタの閉塞時間を試算した結果，約 60 時間となった。

表 7-2 吸気バグフィルタ閉塞までの時間

	粉塵保持容量	降下火砕物による試験結果に基づく保持容量
① 非常用ディーゼル発電機吸気バグフィルタ灰捕集容量（g/枚）	800	8,540
② フィルタ 1 枚当たりの定格風量（m^3/h）	4,250	
③ 降下火砕物の大気中濃度（μg/m^3）※	33,400	
④ 閉塞までの時間（h） ＝①／②／③	5.6	60

※：米国セントヘレンズ火山で発生（1980 年 5 月）した火山噴火地点から約 135km 離れた場所における大気中の降下火砕物濃度値（1 日平均値） を参照した。

2．バグフィルタの取替え又は清掃に必要な時間及び成立性について

非常用ディーゼル発電機のバグフィルタは，1 系統当たり 6 号炉で 39 枚，7 号炉で 46 枚，設置されており，バグフィルタの取替え又は清掃には複雑な作業が必要なく，1 プラント 1 系統当たりバグフィルタの取替え又は清掃に要する時間は，要員 4 名で 4 時間程度を見込んでいる。一方，吸気バグフィルタが閉塞するまでの時間は，1．(2)のとおり約 60 時間程度であることから，バグフィルタが閉塞するまでに取替え又は清掃することが可能である。非常用ディーゼル発電機のバグフィルタの写真を図 7-1 に示す。

図 7-1　非常用ディーゼル発電機のバグフィルタ（写真左側）

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

3. その他

非常用ディーゼル発電機は6号及び7号炉それぞれに3系統設置されており，バグフィルタが詰まった場合においても，バグフィルタの取替え又は清掃を行うことが可能である。

4. 降下火砕物によるバグフィルタ閉塞試験の概要

評価対象火山の一つである妙高山より採取した降下火砕物について，想定する濃度等より保守的な条件にて，6号及び7号炉の非常用ディーゼル発電機に使用しているものと同様のバグフィルタへの影響について，図7-2に示すモックアップ試験により確認した。

バグフィルタは，袋が膨らむことにより，袋全体で風を通過させる（面積を稼ぐ）構造であるが，過度な荷重がかかると下方に引き伸ばされ，バック（袋）が膨らまなくなり，通過面積が減少し差圧が上昇することや，荷重により破損することが想定される。そのため，降下火砕物による「バグフィルタの詰まり試験」及び「バグフィルタの耐荷重試験」について実施した。

図7-2 バグフィルタの耐荷重試験の様子

(1)バグフィルタの詰まり試験

①試験条件及び試験方法

a)降下火砕物

・濃度

想定される降下火砕物の大気中濃度は，1.のとおりアイスランドの火山噴火データ（3,241μg/m^3）であるが，本試験においては保守的に降下火砕物の濃度を約[redacted]と約[redacted]とした。

なお，本試験における降下火砕物の濃度は，米国セントヘレンズの火山噴

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

火データ（33,400μg/m³）も包含する。

・粒径

モックアップ装置にて噴霧する降下火砕物の粒径分布は，表 7-3 のとおり，想定する粒径分布に対し，より保守的となるような粒径分布の試料を作成した。具体的には，バグフィルタをより閉塞させやすくする観点から，試料の粒径分布を想定する粒径分布より全体的に小さくした。

表 7-3 モックアップ装置にて噴霧する降下火砕物の粒径

※：「富士火山 1707 年火砕物の降下に及ぼした風の影響，火山，第 2 集 第 29 巻 第 1 号」における富士山の降下火砕物の粒径分布図より算出

b)モックアップ装置

・装置の構成

図 7-3 に示すとおり，粉塵発生装置により噴霧させた試料を試験体（バグフィルタ）に吸着させ，バグフィルタ前後の差圧及び捕集重量を測定した。

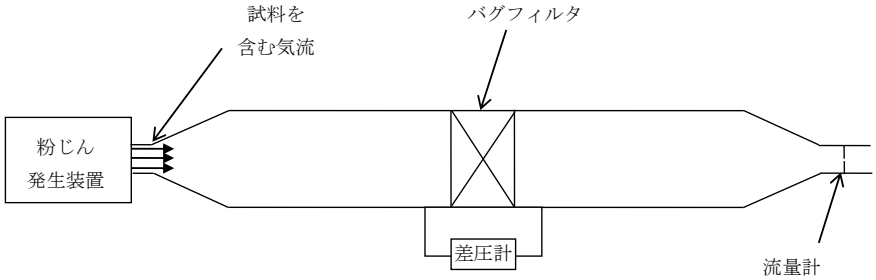


図 7-3 モックアップ装置の構成

・風量

１枚当たりのバグフィルタの定格風量（4250m³/h）に対し，バグフィルタに

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

より試料が吸着しやすくなるよう，粉塵発生装置から発せられる風量は[redacted]とした。

②判定基準

バグフィルタ差圧の判定基準は，設計値（系統要求値）の[redacted]とした。

③試験結果

バグフィルタの差圧と捕集重量の関係を図 7-4 に示す。

図 7-4 より，バグフィルタの差圧は，捕集重量に比例し増加していることが分かり，本試験における最大の捕集重量（8,540g）においてもバグフィルタの差圧は 202Pa であるため，判定基準[redacted]を満足していることを確認した。

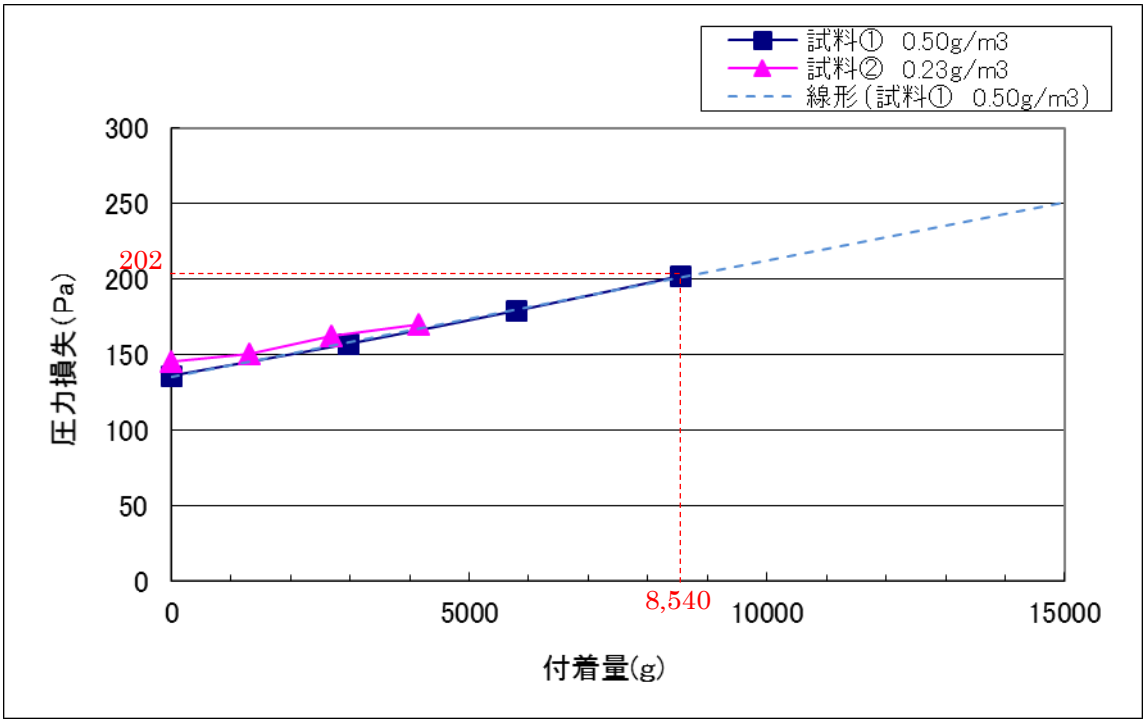


図 7-4 バグフィルタの詰まり試験結果

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

(2)バグフィルタの耐荷重試験

①試験条件及び試験方法

本試験においては，バグフィルタの袋に試料が溜まった際の荷重の影響を確認することが目的であり，試料の粒径や性状に結果が依存するような試験ではないことから，試料には砂を用い実施した。

バグフィルタの袋の底部に試料を入れて荷重を模擬した場合（試料①）とバグフィルタの袋全体に均等に試料を入れて荷重を模擬した場合（試料②）のそれぞれにおいて，試料の重量を変化させた場合におけるバグフィルタ前後の差圧を測定した。

②判定基準

バグフィルタ差圧の判定基準は，設計値（系統要求値）の[　　]とした。

③試験結果

バグフィルタの差圧と試料重量の関係を図 7-5，バグフィルタの外観を図 7-6 に示す。

図 7-5 より，バグフィルタの袋の底部に試料を入れて荷重を模擬した場合（試料①）では，試料重量 10,000g 迄は，バグフィルタの差圧が判定基準[　　]を満足し，12,000g にてバグフィルタの差圧が 250Pa となり，判定基準を上回る結果となった。

また，バグフィルタの袋全体に均等に試料を入れて荷重を模擬した場合（試料②）においても，試料重量 20,000g において，バグフィルタの差圧が 270Pa となり，判定基準を上回る結果となった。

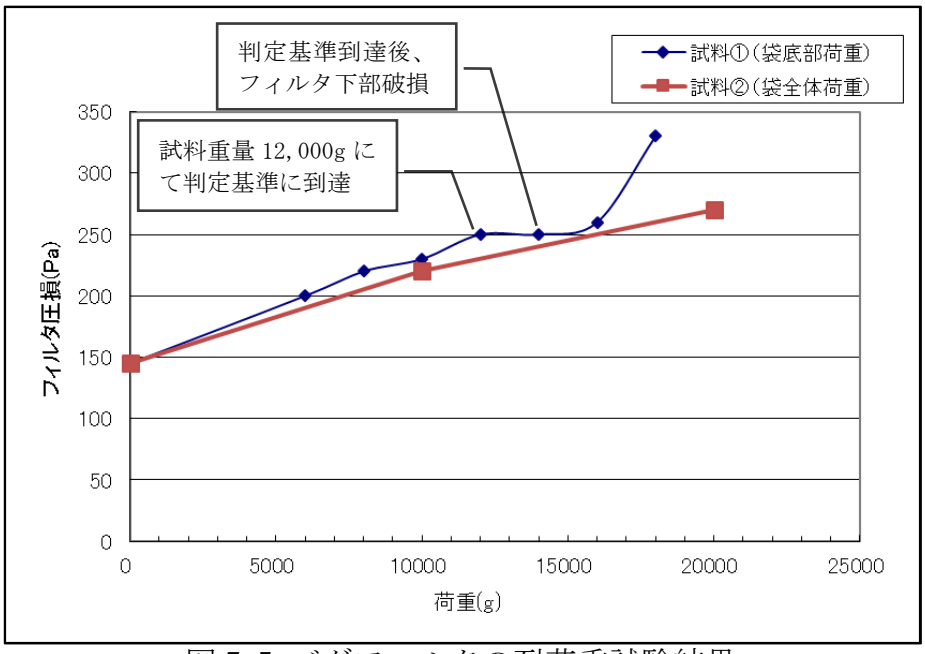


図 7-5 バグフィルタの耐荷重試験結果

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

初期状態（0g 荷重）

6,000g 荷重

12,000g 荷重

18,000g 荷重

図 7-6 耐荷重試験におけるバグフィルタの外観

(3)まとめ

「(1)バグフィルタの詰まり試験」及び「(2)バグフィルタの耐荷重試験」の結果をまとめると，以下のとおり。

・(1)の試験では，最大捕集容量（8,540g）でも，バグフィルタの差圧は 202Pa であり，判定基準 [redacted] を満足した。

・(2)の試験では，試料重量 10,000g 迄は，バグフィルタの差圧が判定基準を満足し，試料重量 12,000g にて，バグフィルタの差圧が 250Pa となり，判定基準を上回った。

以上より，バグフィルタの閉塞時間評価に用いる灰捕集容量には，より厳しい値である 8,540g を用いることとする。

8.アイスランド火山を用いる基本的考え方とセントヘレンズ火山による影響評価

柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉において，バグフィルタ閉塞の評価対象となる施設は，非常用ディーゼル発電機の吸気や非常用換気空調系のバグフィルタ（外気取入口）が該当するが，バグフィルタ手前には，外気取入口に下向き羽根のついたルーバが設置されており，降下火砕物が内部に侵入しにくい構造となっている。また，換気空調系については降灰が確認された場合には必要に応じ外気取入口のダンパを閉止する運用としており，バグフィルタへの降下火砕物の付着を抑制できる設計となっている。

この前提のもと，降下火砕物によるバグフィルタ閉塞に対する評価に当たっては，参考としてアイスランド南部エイヤヒャトラ氷河で発生（H22 年4 月）した火山噴火地点から約40km離れたヘイマランド地区において観測された大気中の降下火砕物濃度のピーク値，3,241μg/m^3 を用いている。

これは，

①比較的規模が大きい噴火であること（VEI4 以上）

②発電用原子炉施設が設置されている地表レベルで観測された降下火砕物の大気中濃度がデータとして存在すること

という条件に照らして，学会誌等の関係図書を確認したところ，上記のアイスランド南部のエイヤヒャトラ氷河で発生した大規模噴火における噴火口より約40km程度離れた地域での地表における大気中濃度を参照したものである。

また，噴火口からの観測地点の距離が135km であるセントヘレンズ火山噴火の観測データ（観測濃度33,400μg/m^3）について，当該濃度による影響評価を以下のとおり行った。

補足資料-7のとおり，非常用ディーゼル発電機の吸気に用いているバグフィルタの閉塞時間は60時間であり，他の非常用換気空調系においても同様のバグフィルタを用いていることから，閉塞時間は同程度である。

バグフィルタ交換に要する時間は最も時間を要する非常用ディーゼル発電機の吸気に用いているバグフィルタでも，4時間程度で交換が可能である。他の非常用換気空調系のバグフィルタについても，より短時間で取り替えることが可能であり，セントヘレンズ火山の濃度を用いて評価を行った場合でも影響が生じることはない。

なお，非常用ディーゼル発電機吸気系や非常用換気空調系は，外気取入口に下向き羽根のついたルーバから吸気することにより降下火砕物を吸い込みにくい構造としているが，上記試算では，こうした点を考慮せず，しかも大気中を降下・浮遊する火砕物の粒子が粒径にかかわらず，大気中濃度のまますべて吸い込まれてバグフィルタに捕集されることを前提とした計算となっているため，実際にはバグフィルタが閉塞するまでの時間にはさらに余裕があると考えられること，さらに，非常用換気空調系のバグフィルタに関しては，バグフィルタを通過する降下火砕物は細かな微細粒子ではあるが，降下火砕物が建屋内へ侵入することを抑制するため，降灰が確認された時点で必要に応じ空調停止やダンパ閉止の運用により影響防止を図ることとしており，機能に影響を及ぼすことはないと考える。

また，上記以外の大気中の降下火砕物濃度に関する知見として，電力中央研究所及び国立研究開発法人産業技術総合研究所にて以下のとおり報告がされている。本報告書で報告されている降下火砕物濃度に対して以下のとおり見解を示す。

電力中央研究所が公開した「数値シミュレーションによる降下火山灰の輸送・堆積特性評価法の開発（その2）－気象条件の選定法およびその関東地方での堆積量・気中濃度に対する影響評価－」（H28.4）の研究は，降下火砕物の性状に対して，影響が大きい風速・風向分布の特徴に注視した気象条件の設定法の検討，降下火砕物の性状への噴火・気象条件の影響を把握することを目的として実施したものである。

本論文で使用している「FALL3D」による数値シミュレーション手法については，今後更なる研究・開発を進め，将来的に発電所敷地での大気中の降下火砕物濃度を求める計算手法の確立を目指しているが，シミュレーションで用いられている噴煙柱モデルでは，噴出量が過大との報告がなされ，また，バグの存在が認識されており，現在のところ研究・開発段階と評価する。

上記に加え，本論文で公表した富士宝永噴火の数値シミュレーション結果に記載されている大気中濃度（10^{-1}－10^{0}g/m^{3}）については，実測データとの検証を踏まえた計算結果ではなく，種々の仮定を前提に実施した研究結果であり，現段階では原子力発電所の安全評価において降下火砕物の大気中濃度として用いることはできない。

国立研究開発法人産業技術総合研究所が公開した「吸気フィルタの火山灰目詰試験」（H28.4）の研究は，供試バグフィルタに降下火砕物を供給してバグフィルタの性能変化を確認する目的として実施したものである。試験は，日本工業規格JIS B

9908「換気用エアフィルタユニット・換気用電気集じん器の性能試験方法」に準拠した方法で実施され，試験で供給した降下火砕物濃度は，当該JIS規格の試験条件である粉じん濃度の70mg/m^3及びその10倍，100倍の濃度となっているが，試験条件の一例として示されている値であり，原子力発電所の安全評価に用いるものではないと考える。

なお，降下火砕物の影響については，安全機能を損なわない設計であることを確認しているが，発電用原子炉施設へ影響を及ぼす可能性があるような知見に対しては，適切に対応することで更なる安全性向上に向けた取り組みを着実に行っていくこととする。

9. 降下火砕物の侵入による非常用ディーゼル発電機空気冷却器への影響

非常用ディーゼル発電機空気冷却器への降下火砕物による冷却機能への影響について以下に示す。

非常用ディーゼル発電機吸気系の構造は図 9-1 に示すとおりであり，外気取入口から給気された大気中の降下火砕物がバグフィルタや過給機を経て一部空気冷却器に侵入し，空気冷却器を通過する際に，仮に冷却器内が結露していた場合，伝熱管に降下火砕物が付着し冷却機能へ影響を及ぼす可能性があるが，空気冷却器出口温度は，吸入空気の温度（外気温度）より常に高い状態で運転されるため冷却器は結露することはなく，降下火砕物の付着による冷却機能への影響はない。

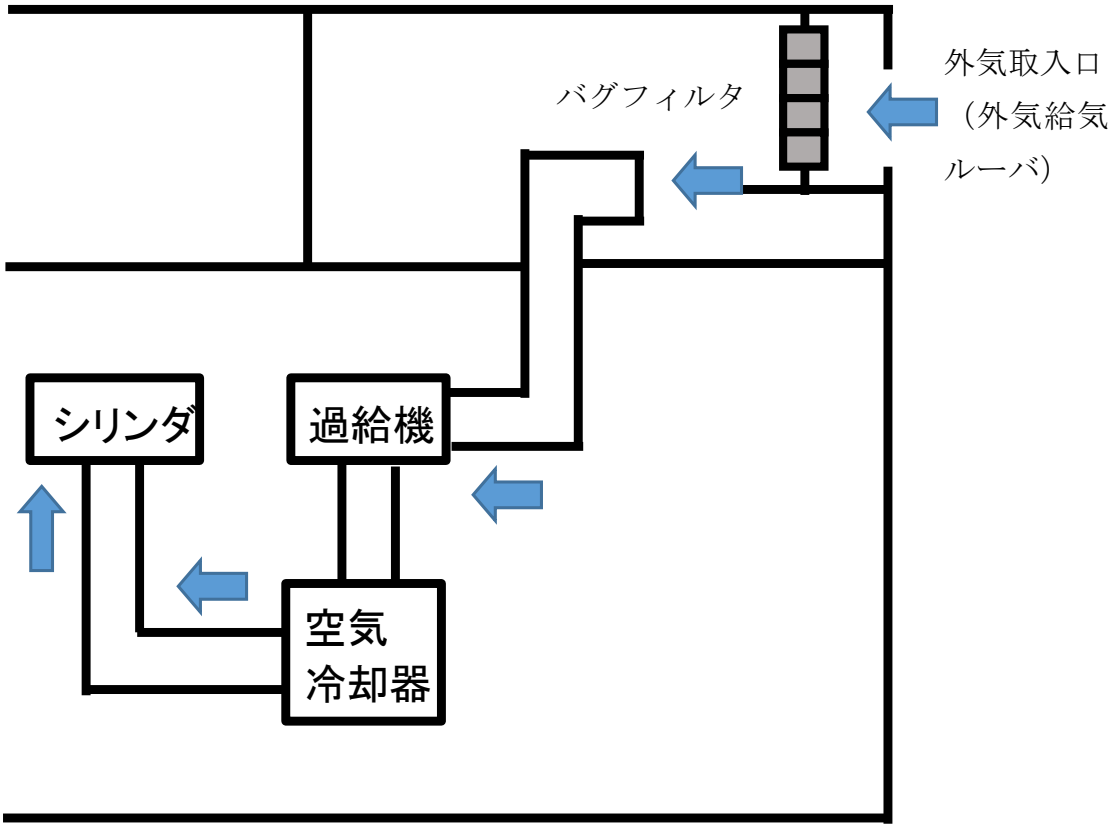


図 9-1　非常用ディーゼル発電機吸気系概略系統図

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

10. 降下火砕物の侵入による潤滑油への影響

非常用ディーゼル発電機吸気口上流に設置されているバグフィルタ通過後の降下火砕物の潤滑油への混入を想定し，潤滑油に降下火砕物を混入させた状態での潤滑油の成分分析を実施した結果を以下に示す。

1. 試験概要

評価対象火山の一つである妙高山より採取した降下火砕物を，6 号及び 7 号炉の非常用ディーゼル発電機に使用しているものと同様の潤滑油（マリン T104）に混入・攪拌させ（図 10-1），非常用ディーゼル発電機に期待される運転期間である 7 日間保管した後，粘性等の成分分析を実施した。

図 10-1 試料作成の様子

2. 試験条件

(1) 降下火砕物

a) 濃度

想定される潤滑油中の降下火砕物の濃度は，表 10-1 より [redacted] となるが，本試験においては保守的に降下火砕物の濃度を [redacted] とした。

また，潤滑油中の降下火砕物の濃度依存性を確認するため，参考に [redacted] の降下火砕物濃度の試料も作成した。

表 10-1 では，降下火砕物の大気中濃度に，アイスランド南部エイヤヒャトラ氷河で発生した火山噴火の際のヘイマランド地区の濃度値(3,241 μg/m^3)

を用いているが，仮に降下火砕物の大気中濃度値に米国セントヘレンズ火山噴火の際の濃度値（33,400μg/m³）を用いた場合でも，上記の保守性に包含される。

表 10-1 想定される潤滑油中の降下火砕物の濃度

①非常用ディーゼル発電機の吸気風量（m³/h）	[redacted]
②非常用ディーゼル発電機の運転継続日数（日）	7
③非常用換気空調系のバグフィルタの除去効率（%）	80
④非常用換気空調系のバグフィルタを通過する降下火砕物の粒径割合（%）※1	[redacted]
⑤降下火砕物の大気中濃度（μg/m³）	3,241
⑥非常用ディーゼル発電機潤滑油系の潤滑油量（ℓ）	[redacted]
⑦潤滑油中の降下火砕物濃度（mg/l） $= ① \times ② \times 24 \times (1 - ③) \times ④ \times \frac{⑤}{1000} \div ⑥$	[redacted]

※1：柏崎刈羽原子力発電所を想定している粒径分布（富士山「宝永噴火」（宮地（1984）※2），樽前火山（鈴木ほか（1973）※3）から 2μm 以下の降下火砕物の割合を[redacted]と算出

※2：富士火山 1707 年火砕物の降下に及ぼした風の影響，火山，第 2 集 第 29 巻 第 1 号，PP.17-30

※3：樽前降下軽石堆積物 Ta-b 層の粒度組成，火山，第 2 集 第 18 巻 第 2 号，PP.47-63

b）粒径

混入させる降下火砕物の粒径は，非常用換気空調系のバグフィルタ（粒径約 2μm に対し 80%以上を捕獲する性能）を通過した際に想定される 2μm 程度とする。

なお，2μm 程度は，潤滑油に有意な影響を与えうる非常用ディーゼル発電機の機関付フィルタのメッシュ寸法（30μm）と比べても十分小さいため，本試験において降下火砕物の粒径分布は設定しない。

(2)潤滑油

a)温度

潤滑油の温度は，非常用ディーゼル発電機の運転時における潤滑油の最高温度である[redacted]とする。

非常用ディーゼル発電機の運転時における潤滑油の状況を考慮し，降下火砕物を潤滑油に混入させた後の保管期間（7 日間）中は，潤滑油の温度を上記温度に保つとともに，定期的に攪拌を実施した。

3. 試験項目及び判定基準等

降下火砕物が混入した際の潤滑油の粘性への影響を確認する観点から，表 10-2 の試験項目について分析を実施した。

補足資料-2 より，降下火砕物の影響としては，その粒子による機械的影響（閉塞等）や，水に濡れると酸性を呈すことによる化学的影響（腐食等）が想定される。そのため，表 10-2 の試験項目は，降下火砕物（不純物）が混入した場合における動粘度や各不溶分，降下火砕物（酸性の可能性がある物質）が混入した場合における塩基価を確認することとした。

また，表 10-2 の試験項目については，非常用ディーゼル発電機の分解点検の際にも確認している項目であり，判定基準については同点検時の基準と同様とした。なお，各試験項目における分析方法については，JIS 規格等に定まるそれぞれの方法にて実施した。

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

表 10-2　試験項目及び判定基準等

試験項目	選定理由	判定基準	試験方法
引火点　PM	本項目は潤滑油の粘性に直接影響する項目ではないが，石油製品全般の安全管理面で最も重視される項目の一つであることから選定した。		（JIS K2265） 引火点試験器を用いて，試料の引火点を求める。
動粘度（40℃）	潤滑油の油膜厚さが適正に保持できるかを示す項目であるため選定した。動粘度が高いと油温度の異常な上昇，始動不良等の原因となり，動粘度が低すぎると油膜強度不足による異常摩耗が発生する。		（JIS K2283） 粘度計を用いて，試料の動粘度を求める。
水分（蒸留法）	水分は発錆の原因となるとともに，潤滑油の酸化を促進させ，油膜切れによる潤滑不良を起こすことから選定した。		（JIS K2275） 蒸留フラスコ中の試料に，水に不溶な溶剤を加えて，加熱しながら還流させ，検水管の捕集水量から試料中の水分を求める。
塩基価（過塩素酸法）	塩基価は潤滑油中に混入する酸性物質を中和するために添加されている塩基成分の残存量を示す値であり，潤滑油の劣化状況を把握できることから選定した。		（JIS K2501） 試料を溶剤に溶かし，ガラス電極と比較電極を用いて，電位差滴定する。電位計の読みと，これに対応する液の滴定量との関係を作図し求める。
ペンタン不溶分（A 法）	潤滑油の不溶分が増加すると粘度の上昇，潤滑油系統の清浄性の悪化，フィルタ目詰まり等を起こすことから選定した。		（ASTM D893） 試料に溶剤を加えて均一に溶解した後，遠心分離処理し上澄み液を除去し不溶分を分離する。この操作を数回繰り返し，不溶分を乾燥させ重量を計測する。
トルエン不溶分（A 法）			

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

4. 試験結果

以下の表 10-3のとおり，各試験項目における判定基準を満足していることから，潤滑油の各性状に影響がないことを確認した。

なお，降下火砕物が潤滑油に混入した際の影響の度合いは，降下火砕物の給源や非常用ディーゼル発電機の運転状態（非常用ディーゼル発電機が運転している状態においては，潤滑油系に運転圧が加わる）によって異なる可能性があるが，系統内において常にその運転圧が加わることがないこと，また，想定される潤滑油中の降下火砕物の濃度より保守的な条件（約 300 倍）で実施した本試験においても潤滑油の性状に有意な変化がなかったことから，想定される降下火砕物の濃度に対して，非常用ディーゼル発電機の機能に影響はないと判断した。

表 10-3 潤滑油の成分分析結果

試験項目	代表性状	判定基準	試験結果（降下火砕物濃度：[redacted]）	判定	参考（降下火砕物濃度：[redacted]）
引火点[℃]	262※	212 以上	[redacted]	○	[redacted]
動粘度[mm^2/s]	146	230 以下	[redacted]	○	[redacted]
水分[%]	－	0.5 以下	[redacted]	○	[redacted]
塩基価[mg KOH/g]	13	6 以上	[redacted]	○	[redacted]
ペンタン不溶分[%]	－	5 以下	[redacted]	○	[redacted]
トルエン不溶分[%]	－	1 以下	[redacted]	○	[redacted]

※：製品の製造過程におけるばらつきを含んだ代表値であり，引火点の試験結果が低い値となっているのは，このばらつきによるものだと考えられる。また，代表性状を確認するため新油に対して実施される試験方法「C.O.C 法」に比べ，今回実施した試験方法「P.M 法（分解点検等の際に実施される試験方法）」では，引火点の測定値が 10～20℃程度低く示される。
なお，試験結果と参考の比較より，降下火砕物濃度が[redacted]より低い[redacted]の場合でも，引火点には大きな違いは見られなかったことから，降下火砕物の混入による引火点への影響はなかったものと考えられる。

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

補足資料-11

11.降下火砕物のその他設備への影響について

1. 評価対象施設

降下火砕物の影響を受ける可能性のある，その他設備について評価を実施する。

(1)5 号炉原子炉建屋内緊急時対策所

(2)主排気筒（非常用ガス処理系）

2. 評価結果

(1)5 号炉原子炉建屋内緊急時対策所

5 号炉原子炉建屋内緊急時対策所の評価として，5 号炉原子炉建屋に対する，荷重評価を行ない，降下火砕物による静的負荷により機能を喪失することはないことを確認した。

降下火砕物堆積荷重：8,542N/m^2 ＜ 許容堆積荷重：33,000 N/m^2

また，大気汚染に対する居住性の観点から，外気取入遮断時の 5 号炉原子炉建屋内緊急時対策所の居住環境について「空気調和・衛生工学便覧　空調設備編」に基づき，酸素濃度及び二酸化炭素濃度について評価した。

○酸素濃度

【評価条件】

・在室人数　181 名

・5 号炉原子炉建屋内緊急時対策所バウンダリ内体積 [redacted] m^3

・空気流入はないものとする。

・初期酸素濃度　20.95%（「空気調和・衛生工学便覧」成人呼吸気の酸素量）

・酸素消費量　0.066m^3/h･人（「空気調和・衛生工学便覧」の歩行（中等作業相当）での O_2 消費量）

・許容酸素濃度　18%以上（労働安全衛生規則）

【評価結果】

表 11-1　5 号炉原子炉建屋内緊急時対策所における酸素濃度の時間変化

時間	0 時間	17 時間	18 時間
酸素濃度	20.95%	18.0%	17.8%

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

○二酸化炭素濃度

【評価条件】

・在室人数　181 名

・5 号炉原子炉建屋内緊急時対策所バウンダリ内体積 [redacted] m^3

・空気流入はないものとする。

・初期二酸化炭素濃度　0.030％（原子力発電所中央制御室運転員の事故時被ばくに関する規程（JEAC4622-2009））

・二酸化炭素排出量　0.046m^3/h･人（「空気調和・衛生工学便覧」の中等作業での CO_2 排出量）

・許容二酸化炭素濃度　0.5%以下（労働安全衛生規則）

【評価結果】

表 11-2　5 号炉原子炉建屋内緊急時対策所における二酸化炭素濃度の時間変化

時間	0 時間	3 時間	4 時間
二酸化炭素濃度	0.03 %	0.40%	0.52%

以上の結果から，5 号炉原子炉建屋内緊急時対策所において，外気取入を遮断した場合においても，3 時間以上の居住性が確保される結果となった。なお，本評価は保守的に外気取入を遮断して評価をしているが，間欠して建屋内の空気や外気を取入れることで 5 号炉原子炉建屋内緊急時対策所の居住環境がより長時間維持される。

(2) 主排気筒（非常用ガス処理系）

主排気筒内に降下火砕物が侵入することにより，非常用ガス処理系配管が閉塞しないことを評価する。

○評価結果

主排気筒内に設置されている非常用ガス処理系の配管内には，降下火砕物が侵入する可能性があるが，配管頂部は閉止されている。また，当該系統からの空気は，配管頂部付近にある配管側面に設けられた開口より放出する構造となっており，降下火砕物は配管内に侵入しづらく，閉塞する可能性は低いと考えられる。主排気筒及び主排気筒内非常用ガス処理系配管外形図を図 11-1 に示す。

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

図 11-1　主排気筒及び主排気筒内非常用ガス処理系配管外形図

【参考】酸素消費量及び二酸化炭素排出量

○「空気調和・衛生工学便覧」成人呼吸量（酸素消費量換算に使用）

作業	呼吸数（回/min）	呼吸量（L/min）
仰が（臥）	14	5
静座	16	8
歩行	24	24
走行（150m/min）	40	64
走行（300m/min）	45	100

酸素消費量※＝24(L/min)×(0.2095-0.1640)=1.092(L/min)≒0.066(m^3/h)

※空気調和・衛生工学便覧における酸素消費量換算式

○「空気調和・衛生工学便覧」労働強度別 CO_2 吐出し量

作業程度	エネルギー代謝率 RMR	作業例（産業衛生学会雑誌より）	CO2 吐出し量（m^3/h）
安静時	0	―	0.013
極軽作業	0～1	電話応対(座位)0.4，記帳0.5，計器監視(座位)0.5，ひずみとり(ﾊﾝﾏｰで軽く,98回/分)0.9，自動車運転1.0	0.022
軽作業	1～2	旋盤(ﾍﾞｱﾘﾝｸﾞ,0.83 分/個)1.1，監視作業(立位)1.2，平地歩行(ゆっくり,45m/分)1.5	0.030
中等作業	2～4	歩行（普通，71m/min）2.1，丸のこ 2.5，自転車(平地，170m/分)3.4，歩行(速足，95m/分)3.5	0.046
重作業	4～7	びょう打ち(1.3 本/分)4.2，階段歩行(昇り,45m/分)6.5	0.074

12.降下火砕物の金属腐食研究

桜島降下火砕物による金属腐食研究結果を柏崎刈羽原子力発電所における降下火砕物による金属腐食の影響評価に適用する考え方について以下に示す。

1. 適用の考え方

降下火砕物による金属腐食については，主として火山ガス（SO_2）が付着した降下火砕物の影響によるものである。

降下火砕物による腐食影響において引用した研究文献「火山環境における金属材料の腐食」では，桜島の降下火砕物を用いて，実際の火山環境に近い状態を模擬するため，高濃度の亜硫酸ガス（SO_2）雰囲気を保った状態で金属腐食試験を行なったものであり，降下火砕物の腐食成分濃度を高濃度で模擬した腐食試験結果であることから，柏崎刈羽原子力発電所で考慮する火山についても本研究結果が十分適用可能である。

2. 研究文献「火山環境における金属材料の腐食」の概要

(1)試験概要

「火山環境における金属材料の腐食（出雲茂人，末吉秀一ほか），防食技術 Vol.39,pp.247-253，1990」によると，降下火砕物を水で洗浄し，可溶性の成分を除去した後,金属試験片に堆積させ,高濃度の SO_2 ガス雰囲気(150～200ppm)で，加熱（温度 40℃，湿度 95%を 4 時間），冷却（温度 20℃，湿度 80%を 2 時間）を最大 18 回繰り返すことにより，結露，蒸発を繰り返し金属試験片の腐食を観察している。

(2)試験結果

図 12-1 に示すとおり，降下火砕物の堆積量が多い場合は，降下火砕物の堆積なし又は堆積量が少ない場合と比較して，金属試験片の腐食が促進されるが，腐食量は表面厚さにして十数～数十μm 程度との結果が得られ，降下火砕物層では結露しやすいこと，並びに保水効果が大きいことにより腐食が促進されると結論づけられている。

(3)試験結果からの考察

降下火砕物による腐食については，主として火山ガスが付着した降下火砕物の影響によるものであり，本研究においては，金属試験片の表面に降下火砕物を置き，実際の火山環境を模擬して高濃度の SO_2 雰囲気中で暴露し，腐食

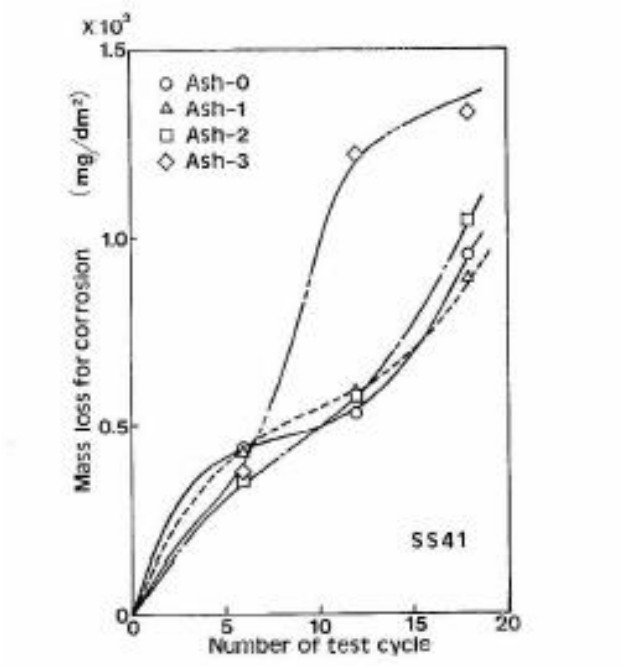
実験を行っているものである。

腐食の要因となる火山ガスを高濃度の雰囲気を常に保った状態で行っている試験であり，自然環境に存在する降下火砕物よりも高い腐食条件※で金属腐食量を求めており，柏崎刈羽原子力発電所で考慮する降下火砕物についても十分適用可能である。

【※参考】

・三宅島火山の噴火口付近の観測記録：20～30ppm
（「三宅島火山ガスに関する検討会報告書」より）

・桜島火山上空の噴煙中火山ガスの観測記録：17～68ppm（「京大防災研究所年報」より）



Ash-0：降下火砕物のない状態

Ash-1：表面が見える程度に積もった状態

Ash-2：表面が見えなくなる程度に積もった状態

Ash-3：約 0.8mm の厚さに積もった状態

図 12-1　SS41 の腐食による腐食変化

13.安全保護系盤への降下火砕物の影響

降下火砕物の建屋内侵入については，非常用換気空調系（外気取入口）からの侵入が考えられるが，バグフィルタは，粒径約2μmに対して80%以上の捕獲する性能を有していることから，系統内へ侵入する降下火砕物の影響は小さいと考えられるものの，ここでは降下火砕物の粒子が一部侵入した場合を想定し，その影響を確認する。

安全保護系盤については，非常用ディーゼル発電機電気品区域換気空調系（非常用ディーゼル発電機非常用送風機含む）及び中央制御室換気空調系にて管理されており，外気取入口にバグフィルタが設置されており，降下火砕物の侵入を防止することができる。

しかしながら，安全保護系盤についてはその発生熱量に応じて盤内に換気ファンを設置している盤があり，強制的に盤内に室内空気を取り込むことから，仮に，降下火砕物が侵入することを考慮し，以下のとおり検討した。

1. 侵入する降下火砕物の粒径

非常用ディーゼル発電機電気品区域換気空調系（非常用ディーゼル発電機非常用送風機含む）及び中央制御室換気空調系の外気取入口にはバグフィルタ（主として粒径が2μmより大きい粒子を除去）が設置されている。

このため，仮に室内に侵入したとしても，降下火砕物の粒径は，おおむね2μm以下の細かな粒子であると推定される。

2. 計測制御系の盤に対する降下火砕物の影響

計測制御系の盤等において，数μm 程度の線間距離となるのは，集積回路（ＩＣ等）の内部であり，これら部品はモールド（樹脂）で保護されているため，降下火砕物が侵入することはない。また，端子台等の充電部が露出している箇所については，端子間の距離は 10^{-1}mm 程度あることから，降下火砕物が付着しても，直ちに短絡等を発生させることはない。したがって，万が一，細かな粒子の降下火砕物が盤内に侵入した場合においても，降下火砕物の付着等により短絡等を発生させる可能性はない。

14. 6 号及び 7 号炉の建屋及び屋外タンクの降灰除去について

降下火砕物の除灰に要する概算時間について，土木工事の人力作業※を参考に試算した結果を表 14-1 に示す。

表 14-1　除灰に要する概算時間

項目		評価諸元
①堆積面積(m^2)	原子炉建屋	6200
	タービン建屋 (海水熱交換器区域含む)	15600
	廃棄物処理建屋	2300
	コントロール建屋	2400
	軽油タンク	400
	5 号炉原子炉建屋内 緊急時対策所	4000
	合計	30900
②堆積厚さ(m)		0.35
③堆積量=①×②(m^3)		約 11000
④1m^3 当たりの作業人工※（人日）		0.39

1. 作業量(上記のとおり)

   0.39 人日／m^3 × 11000m^3 = 約 4300 人日

2. 作業日数（試算例）

（1）作業人数：300 人（6 人／組×50 組）

（2）所要日数：約 15 日

※：「国土交通省土木工事積算基準（H25）」における人力掘削での人工を保守的に採用

15.アクセスルートにおける降下火砕物除去時間の評価について

降下火砕物が敷地内に 35cm（設計基準）堆積することを想定した場合においても，安全施設の安全機能を確保するために，アクセスルートにおける降下火砕物の除去は不要である。しかしながら，参考として，降下火砕物が敷地内に 35cm 堆積した場合のアクセスルートにおける降下火砕物除去時間を評価した。大湊側高台保管場所からの降灰除去ルート及び仮復旧時間を図 15-1 に，荒浜側高台保管場所からの降灰除去ルート及び仮復旧時間を図 15-2 に示す。

1.ホイールローダ仕様

○最大けん引力　　：14.17t

○バケット全幅　　：2,700mm

○走行速度（１速）　：前進・後進 0～8km/h

2.降灰除去速度の算出

＜降灰条件＞

○厚さ：35cm

○単位体積重量：1.5t/m^3

＜除去方法＞

アクセスルート上に降り積もった降下火砕物を，ホイールローダで道路脇へ押し出し除去する。

一回の押し出し可能量を 11.3t とし，11.3t の降下火砕物を集積し，道路脇へ押し出す作業１サイクルとして繰り返す。

１回の集積で進める距離 X

=11.3t÷（降下火砕物厚さ 0.35m×幅 2.7m×1.5t/m^3）

=7.97m≒7.9m

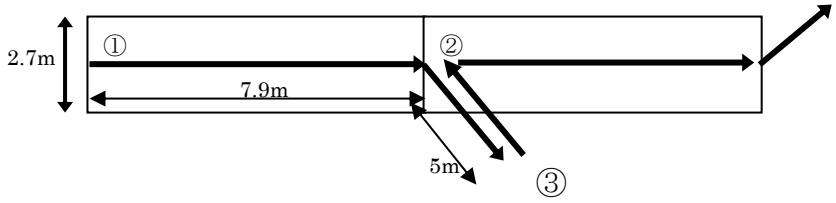
1 サイクル当りの作業時間は，1 速の走行速度(0～8km/h)の平均 4km／h で作業すると仮定して

A：押し出し(①→②→③)　：(7.9m+5m)÷4km/h＝11.6 秒≒12 秒

B：ギア切り替え：3 秒

C：後進：(③→②)：5m÷4km/h=4.5 秒≒5 秒

1 サイクル当りの作業時間（A+B+C）=12 秒+3 秒+5 秒=20 秒



＜降灰除去速度＞

1サイクル当りの除去延長÷1サイクル当りの除去時間

=7.9m÷20秒=0.395m/秒=1.422km/h≒1.4km/h

3.まとめ

○降下火砕物の除灰速度について，1.4km/hとする。

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

①大湊側高台保管場所からのルート

区間	距離 (m)	時間評価項目	速度 (km/h)	所要時間 (分)	累積（分）
第二企業センター※→①	約 770	徒歩移動	4	12	12
①→②	約 590	降灰除去	1.4	26	38
②→③	約 240	ホイールローダ移動	15	1	39
③→④	約 780	降灰除去	1.4	34	73
④→⑤	約 80	ホイールローダ移動	15	1	74
⑤→⑥	約 130	降灰除去	1.4	6	80
⑥→⑦	約 260	ホイールローダ移動	15	2	82
⑦→⑧	約 130	降灰除去	1.4	6	88
⑧→⑨	約 230	ホイールローダ移動	15	1	89
⑨→⑩	約 500	降灰除去	1.4	22	111

※初動対応要員が滞在する「第二企業センター又はその近傍に設置する執務場所又は宿泊場所」については，第二企業センターを起点として評価する。

図 15-1　大湊側高台保管場所からの降灰除去ルート及び仮復旧時間

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

②荒浜側高台保管場所からのルート

区間	距離 (m)	時間評価項目	速度 (km/h)	所要時間 (分)	累積（分）
第二企業センター※→①	約 420	徒歩移動	4	7	7
①→②	約 750	降灰除去	1.4	33	40
②→③	約 130	ホイールローダ移動	15	1	41
③→④	約 890	降灰除去	1.4	39	80
④→⑤	約 80	ホイールローダ移動	15	1	81
⑤→⑥	約 130	降灰除去	1.4	6	87
⑥→⑦	約 260	ホイールローダ移動	15	2	89
⑦→⑧	約 130	降灰除去	1.4	6	95
⑧→⑨	約 230	ホイールローダ移動	15	1	96
⑨→⑩	約 500	降灰除去	1.4	22	118

※初動対応要員が滞在する「第二企業センター又はその近傍に設置する執務場所又は宿泊場所」については，第二企業センターを起点として評価する。

図 15-2　荒浜側高台保管場所からの降灰除去ルート及び仮復旧時間

16. 降下火砕物降灰時のバグフィルタ取替えについての手順

非常用換気空調系の外気取入口のバグフィルタの取替え作業を行う際は，以下の手順を実施することとしている。バグフィルタの取替えイメージについて図 16-1 に示す。

・バグフィルタの取替え作業はルーバ内にて行うため，降灰の影響を受けにくいと考えられるが，防護具（マスク，めがね）装備する。
・開口部に対して養生を行う。
・設備影響を勘案し，必要に応じ対象となる系統の運転を停止し，系統を隔離してから取替え作業を行う。
・取替え作業前に，空調機内への取り込み低減のため，周囲の降下火砕物を清掃する。
・取替え後，バグフィルタ差圧にて差圧が低下することを確認する。
・作業終了後，降下火砕物の再浮遊の影響を低減させるため，作業エリアの降下火砕物は清掃する。

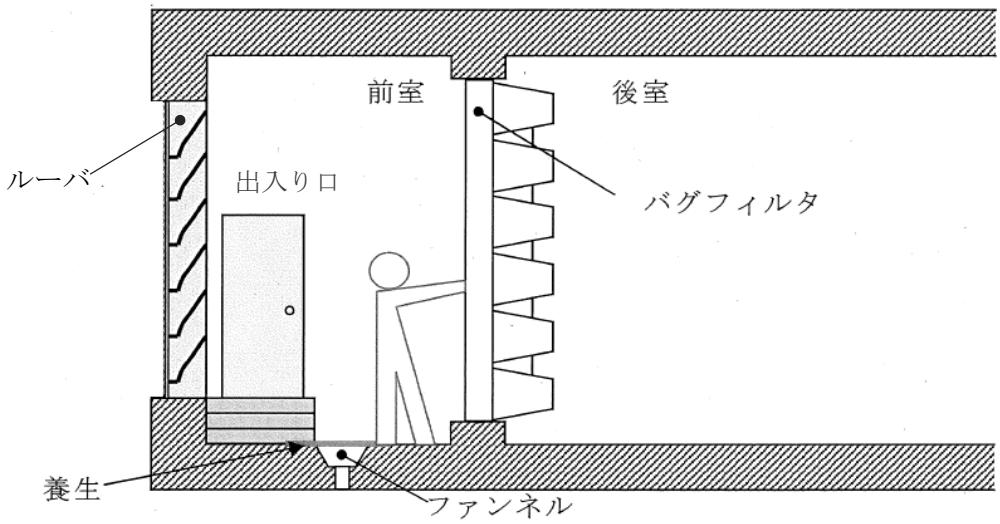


図 16-1　バグフィルタの取替えイメージ

17. 観測された諸噴火の最盛期における噴出率と継続時間

図 17-1 に示すとおり，富士山（宝永噴火 1707 年）の噴出継続時間は，断続的に約 16 日間継続している。

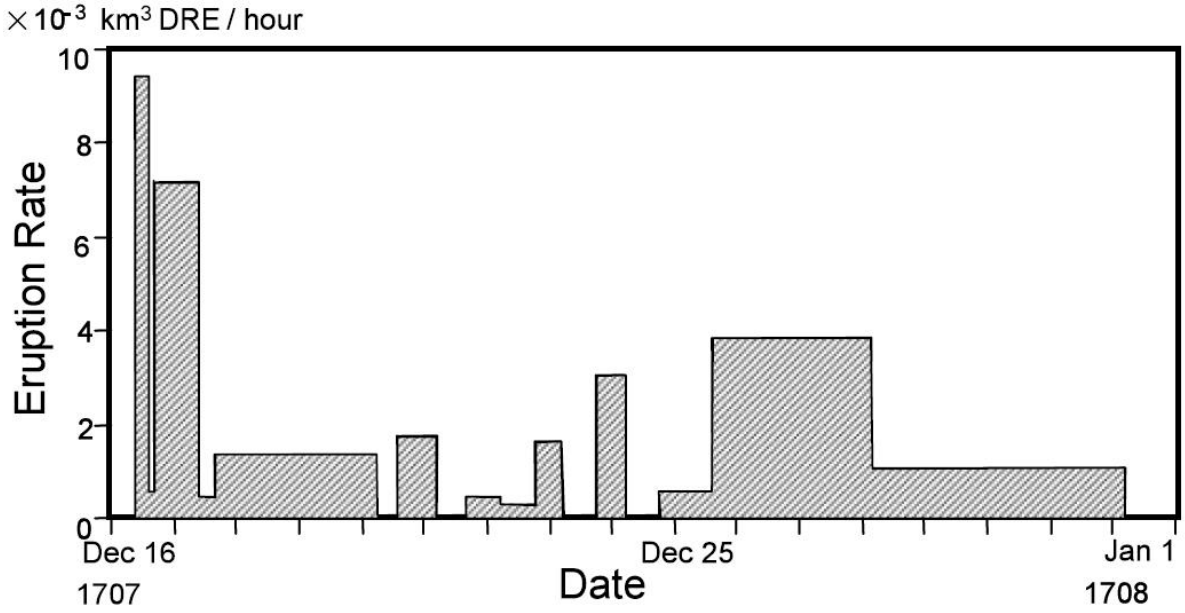


図 17-1　富士山（宝永噴火 1707 年）の噴出率の推移（宮地・小山（2007））

表 17-1 に示すとおり，火山観測データが存在する最近の観測記録では，噴火の継続時間は殆どが数時間程度であり，長いものでも 36 時間程度である。

表 17-1　観測された諸噴火最盛期における噴出率と継続時間

噴　火　年　（地域名）	噴煙柱高度 (km)	噴 出 率 (m^3/s)	継続時間 (h)
Pinatubo 1991（フィリピン）	35	250,000	9
Bezymianny 1956（カムチャツカ）	36	230,000	0.5
Santa Maria 1902（グアテマラ）	34	17,000-38,000	24-36
Hekla 1947（アイスランド）	24	17,000	0.5
Soufriere 1979（西インド諸島）	16	6,200	9
Mt.St.Helens 1980（アメリカ合衆国）	18	12,600	0.23
伊豆大島 1986（伊豆）	16	1,000	3
Soufriere 1902（西インド諸島）	14.5-16	11,000-15,000	2.5-3.5
Hekla 1970（アイスランド）	14	3,333	2
駒ヶ岳 1929（北海道）	13.9	15,870	7
有珠山 1977-I（　〃　）	12	3,375	2
Fuego 1971（グアテマラ）	10	640	10
桜島 1914（九州）	7-8	4,012	36
三宅島 1983A-E（伊豆）	6	570	1.5
Heimaey 1973（アイスランド）	2-3	50	8.45
Ngauruhoe 1974（ニュージーランド）	1.5-3.7	10	14

18. 重大事故等対処設備への考慮

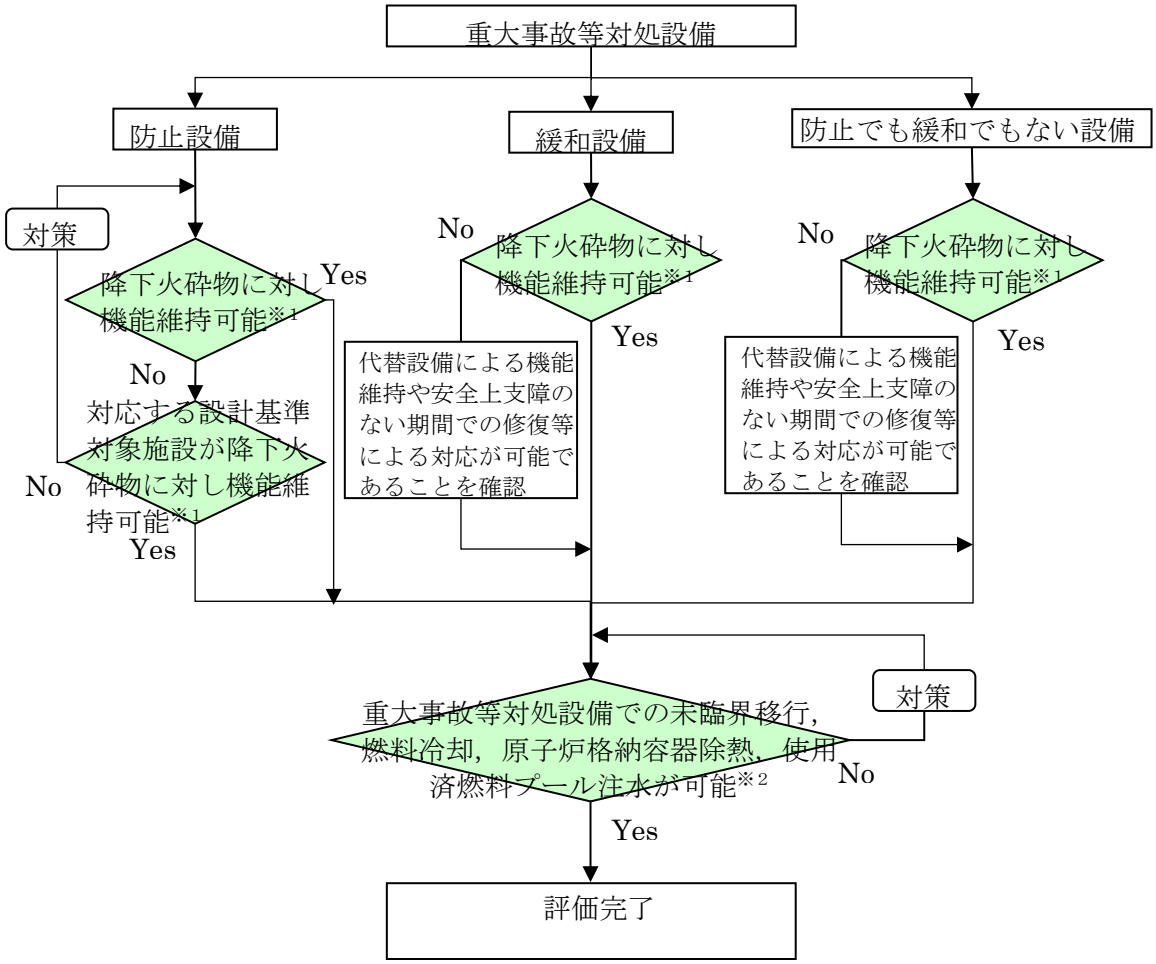
第四十三条の要求を踏まえ，設計基準事象によって，設計基準対象施設の安全機能と重大事故等対処設備の機能が同時に損なわれることがないことを確認するとともに，重大事故等対処設備の機能が喪失した場合においても，外殻となる建屋による防護に期待できる代替手段等により必要な機能を維持できることを確認する。

重大事故等対処設備の機能維持は，以下の方針に従い評価を実施する。評価フローを図 18-1，影響評価結果については表 18-1 に示す。

(1) 重大事故防止設備は，外部事象によって設計基準対象施設の安全機能と同時にその機能が損なわれるおそれのないこと

(2) 重大事故等対処設備であって，重大事故防止設備でない設備は，代替設備若しくは安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であること

(3) 外部事象が発生した場合においても，重大事故等対処設備によりプラント安全性に関する主要な機能（未臨界移行機能，燃料冷却機能，原子炉格納容器除熱機能，使用済燃料プール注水機能）が維持できること（各外部事象により重大事故等対処設備と設計基準対象施設の機能が同時に損なわれることはないが，安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であることを確認する）



※１：屋内設備については，当該設備を内包する建屋（原子炉建屋，タービン建屋，コントロール建屋，廃棄物処理建屋，５号炉原子炉建屋内緊急時対策所）の影響評価を実施し，安全機能が維持されることを確認。

※２：降下火砕物により重大事故等対処設備と設計基準対象施設が同時に損なわれることはないが，安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であることを確認。

図 18-1 降下火砕物に対する重大事故等対処設備の評価フロー

表 18-1　重大事故等に対処するための機能を有する設備の影響評価（1/5）

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所※	火山	
					評価	防護方法
第37条（重大事故等の拡大の防止等）	－		－	－	－	－
第38条（重大事故等対処施設の地盤）	－		－	－	－	－
第39条（地震による損傷の防止）	－		－	－	－	－
第40条（津波による損傷の防止）	－		－	－	－	－
第41条（火災による損傷の防止）	－		－	－	－	－
第42条（特定重大事故等対処施設）	特定重大事故等対処施設		→申請範囲外		－	－
第43条（重大事故等対処設備）	ホイールローダ		防止でも緩和でもない設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
第44条（緊急停止失敗時に発電用原子炉を未臨界にするための設備）	ATWS緩和設備（代替制御棒挿入機能）		防止設備	R/B	○	建屋内
	制御棒，制御棒駆動機構（水圧駆動），制御棒駆動系水圧制御ユニット		防止設備	R/B	○	建屋内
	ATWS緩和設備（代替冷却材再循環ポンプ・トリップ機能）		防止設備	R/B	○	建屋内
	ほう酸水注入系		防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	自動減圧系の起動阻止スイッチ		→46条に記載		－	－
第45条（原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧時に発電用原子炉を冷却するための設備）	高圧代替注水系		防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	原子炉隔離時冷却系		（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
	高圧炉心注水系		（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
	復水貯蔵槽，サプレッション・チェンバ		→56条に記載		－	－
	ほう酸水注入系		→44条に記載		－	－
第46条（原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するための設備）	逃がし安全弁 （逃がし弁機能用及び自動減圧機能用アキュムレータ含む）		防止設備	R/B	○	建屋内
	代替自動減圧機能		防止設備	R/B，C/B	○	建屋内
	自動減圧系の起動阻止スイッチ		防止設備	C/B	○	建屋内
	可搬型直流電源設備		→57条に記載		－	－
	AM用切替装置（SRV）		防止設備	C/B	○	建屋内
	逃がし安全弁用可搬型蓄電池		防止設備	R/B	○	建屋内
	高圧窒素ガスボンベ(供給系配管含む)		防止設備	R/B	○	建屋内
	高圧炉心注水系注入隔離弁		（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
	原子炉建屋ブローアウトパネル		防止設備	屋外R/B廻り	○	影響なし
第47条（原子炉冷却材圧力バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備）	低圧代替注水系（常設）〔復水移送ポンプ〕		防止設備・緩和設備	Rw/B	○	建屋内
	復水貯蔵槽		→56条に記載		－	－
	低圧代替注水系（可搬型）〔可搬型代替注水ポンプ（A－2級）〕		防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	防火水槽，淡水貯水池		→56条に記載		－	－
	低圧代替注水系（可搬型）（常設箇所）〔接続口，配管等〕		防止設備・緩和設備	屋外R/B廻り	○	影響なし
	低圧注水	残留熱除去系ポンプ	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		残留熱除去系配管，弁等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		サプレッション・チェンバ	→56条に記載		－	－
	原子炉補機冷却	原子炉補機冷却系ポンプ	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却系配管，弁等	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
	原子炉補機冷却系		→48条に記載		－	－
	非常用取水設備 ［海水貯留堰，取水路等 ］		→その他の設備に記載		－	－

○:各外部事象に対し安全機能を維持できる
　又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準対象施設が各外部事象に対し安全機能を維持できる(防止設備)
　又は各外部事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備，防止でも緩和でもない設備)
－:他の項目にて整理

※　重大事故等対処設備（SA設備），原子炉建屋（R/B），コントロール建屋（C/B），廃棄物処理建屋（Rw/B）

表 18-1　重大事故等に対処するための機能を有する設備の影響評価（2/5）

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所※	火山	
					評価	防護方法
第48条（最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備）	代替原子炉補機冷却系（可搬型）〔熱交換器ユニット，大容量送水車（熱交換器ユニット用）等〕		防止設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	代替原子炉補機冷却系（常設箇所）〔接続口，配管等〕		防止設備	屋外T/B廻り	○	影響なし
	耐圧強化ベント系（W/W及びD/W）〔ボンベ，配管，弁等〕		防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	格納容器圧力逃がし装置［フィルタベント］		→50条に記載（うち，防止設備）		－	－
	低圧代替注水系（可搬型）〔可搬型代替注水ポンプ（A－2級）〕		→56条に記載		－	－
	防火水槽，淡水貯水池		→56条に記載		－	－
	残留熱除去系（原子炉停止時冷却モード）		→47条に記載		－	－
	残留熱除去系（格納容器スプレイ冷却モード，サプレッション・チェンバ・プール水冷却モード）		→49条に記載		－	－
	原子炉補機冷却系		（設計基準対象施設）	R/B T/B	○	建屋内
	非常用取水設備［海水貯留堰，取水路等］		→その他の設備に記載		－	－
第49条（原子炉格納容器内の冷却等のための設備）	代替格納容器スプレイ冷却系（常設）〔復水移送ポンプ〕		防止設備・緩和設備	Rw/B	○	建屋内
	復水貯蔵槽		→56条に記載		－	－
	代替格納容器スプレイ冷却系（可搬型）〔可搬型代替注水ポンプ（A－2級）〕		防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	防火水槽，淡水貯水池		→56条に記載		－	－
	代替格納容器スプレイ冷却系（常設箇所）〔接続口，配管等〕		防止設備・緩和設備	屋外R/B廻り	○	影響なし
	残留熱除去系（格納容器スプレイ冷却モード，サプレッション・チェンバ・プール水冷却モード）		（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
	サプレッション・チェンバ		→56条に記載		－	－
	原子炉補機冷却系		→48条に記載		－	－
	非常用取水設備［海水貯留堰，取水路］		→その他の設備に記載		－	－
第50条（原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備）	格納容器圧力逃がし装置	フィルタ装置，よう素フィルタ，フィルタベント遮蔽壁，配管等	防止設備・緩和設備	R/B・屋外	○	設計荷重に対して影響ないことを確認
		ラプチャーディスク	緩和設備	屋外	○	影響なし（降下火砕物が侵入し難い構造）
		ドレン移送ポンプ，ドレンタンク	防止設備・緩和設備	屋内・屋外	○	設計荷重に対して影響ないことを確認
		遠隔手動弁操作設備・遠隔空気駆動弁操作用ボンベ	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
		スクラバ水pH制御設備	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
		可搬型窒素供給装置	→52条に記載		－	－
		ホース，接続口	防止設備・緩和設備	屋外	○	影響なし（適切に除灰する。）
		低圧代替注水系（可搬型）〔可搬型代替注水ポンプ（A－2級）〕		→56条に記載	－	－
		防火水槽，淡水貯水池		→56条に記載	－	－
	代替循環冷却	復水移送ポンプ	緩和設備	Rw/B	○	建屋内
		残留熱除去系（熱交換器等）	緩和設備	R/B	○	建屋内
		代替原子炉補機冷却系（可搬型）〔熱交換器ユニット，大容量送水車（熱交換器ユニット用）等〕	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
		代替循環冷却系（常設箇所）〔配管，弁等〕	緩和設備	R/B，T/B，Rw/B，C/B	○	建屋内
		サプレッション・チェンバ	→56条に記載		－	－
		非常用取水設備［海水貯留堰，取水路等］	→その他の設備に記載		－	－
第51条（原子炉格納容器下部の溶融炉心を冷却するための設備）	格納容器下部注水系（常設）〔復水移送ポンプ〕		緩和設備	Rw/B	○	建屋内
	コリウムシールド		緩和設備	R/B	○	建屋内
	復水貯蔵槽		→56条に記載（うち，緩和設備）		－	－
	格納容器下部注水系（可搬型）〔可搬型代替注水ポンプ（A－2級）〕		緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	防火水槽，淡水貯水池		→56条に記載		－	－
	格納容器下部注水系（常設）（常設箇所）〔配管，弁等〕		緩和設備	R/B	○	建屋内
	格納容器下部注水系（可搬型）（常設箇所）〔接続口，配管等〕		緩和設備	屋外R/B廻り	○	影響なし
	ほう酸水注入系		→44条に記載		－	－
	高圧代替注水系		→45条に記載		－	－
	低圧代替注水系（常設），（可搬型）		→47条に記載		－	－

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる
　又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準対象施設が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）
　又は各外部事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備，防止でも緩和でもない設備）
－：他の項目にて整理

※　重大事故等対処設備（SA設備），タービン建屋（T/B），原子炉建屋（R/B），廃棄物処理建屋（Rw/B），コントロール建屋（C/B）

表 18-1　重大事故等に対処するための機能を有する設備の影響評価（3/5）

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	保管・設置箇所※2	火山	
				評価	防護方法
第52条（水素爆発による原子炉格納容器の破損を防止するための設備）	不活性ガス系	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
	格納容器圧力逃がし装置	→50条に記載		－	－
	格納容器圧力逃がし装置［フィルタ装置出口放射線モニタ，フィルタ装置水素濃度計］	→58条に記載		－	－
	格納容器圧力逃がし装置［ホース，接続口］	→50条に記載		－	－
	低圧代替注水系（可搬型）［可搬型代替注水ポンプ（A－2級）］	→56条に記載		－	－
	防火水槽，淡水貯水池	→56条に記載		－	－
	可搬型窒素供給装置	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	サプレッション・チェンバ	緩和設備	R/B	○	建屋内
	耐圧強化ベント系（W/W）	→48条に記載		－	－
	耐圧強化ベント系［耐圧強化ベント系放射線モニタ，フィルタ装置水素濃度計］	→58条に記載		－	－
	水素濃度及び酸素濃度の監視 ［格納容器内水素濃度（SA），格納容器内水素濃度，格納容器内酸素濃度］	緩和設備	R/B	○	建屋内
第53条（水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備）	静的触媒式水素再結合器，静的触媒式水素再結合器動作監視装置	緩和設備	R/B	○	建屋内
	原子炉建屋水素濃度※1	緩和設備	R/B	○	建屋内
	原子炉建屋原子炉区域	→その他の設備に記載		－	－
第54条（使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備）	燃料プール代替注水系（可搬型）［可搬型代替注水ポンプ（A－1級），可搬型代替注水ポンプ（A－2級）］	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	燃料プール代替注水系（可搬型）（常設箇所）［接続口，配管等］	防止設備・緩和設備	屋外R/B廻り	○	影響なし
	燃料プール代替注水系（常設箇所）［常設スプレイヘッダ，配管，弁等］	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	可搬型スプレイヘッダ	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	防火水槽，淡水貯水池	→56条に記載		－	－
	原子炉建屋放水設備 ［大容量送水車（原子炉建屋放水設備用），放水砲］	→55条に記載		－	－
	使用済燃料貯蔵プール水位・温度（SA・SA広域）	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	使用済燃料貯蔵プール放射線モニタ（高レンジ・低レンジ）	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	使用済燃料貯蔵プール監視カメラ（使用済燃料貯蔵プール監視カメラ用空冷装置を含む）	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	燃料プール冷却浄化系	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替原子炉補機冷却系（可搬型）［熱交換器ユニット，大容量送水車（熱交換器ユニット用）等］	防止設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	代替原子炉補機冷却系（常設箇所）［接続口，配管等］	→48条に記載		－	－
	非常用取水設備 ［海水貯留堰，取水路等］	→その他の設備に記載		－	－
第55条（工場等外への放射性物質の拡散を抑制するための設備）	原子炉建屋放水設備 ［大容量送水車（原子炉建屋放水設備用），放水砲等］	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	海洋拡散抑制設備 ［放射性物質吸着材］	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	海洋拡散抑制設備 ［汚濁防止膜］	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	海洋拡散抑制設備 ［小型船舶（汚濁防止膜設置用）］	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	航空機燃料火災への泡消火 ［泡原液搬送車，泡原液混合装置］	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
第56条（重大事故等の収束に必要となる水の供給設備）	復水貯蔵槽	防止設備・緩和設備	Rw/B	○	建屋内
	サプレッション・チェンバ	緩和設備	R/B	○	建屋内
	ほう酸水注入系貯蔵タンク	→44条に記載		－	－
	防火水槽	－（代替淡水源）	屋外（地下埋設）	○	影響なし（地下）
	淡水貯水池	－（代替淡水源）	屋外	○	影響なし
	大容量送水車（海水取水用）	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	可搬型代替注水ポンプ（A－2級）	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	非常用取水設備 ［海水貯留堰，取水路等］	→その他の設備に記載		－	－

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる
　又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準対象施設が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）
　又は各外部事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備，防止でも緩和でもない設備）
－：他の項目にて整理

※1　計装設備については計装ループ全体を示すため要素名を記載

※2　重大事故等対処設備（SA設備），原子炉建屋（R/B），廃棄物処理建屋（Rw/B）

表 18-1　重大事故等に対処するための機能を有する設備の影響評価（4/5）

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	保管・設置箇所※	火山	
				評価	防護方法
第57条（電源設備）	常設代替交流電源設備〔第一ガスタービン発電機一式〕	防止設備・緩和設備	屋外T/B廻り	○	影響なし（適切に除灰する。）
	常設代替交流電源設備〔タンクローリ（16kL）〕	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	可搬型代替交流電源設備〔電源車〕	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	可搬型代替交流電源設備（常設箇所）〔電源車接続箇所〕	防止設備・緩和設備	屋外R/B廻り	○	影響なし
	号炉間電力融通ケーブル（常設）	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	号炉間電力融通ケーブル（可搬型）	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	所内蓄電式直流電源設備〔AM用直流125V蓄電池・充電器，直流125V蓄電池・充電器A，A-2，B〕	防止設備・緩和設備	R/B C/B	○	建屋内
	常設代替直流電源設備〔AM用直流125V蓄電池，充電器〕	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	可搬型代替直流電源設備〔電源車〕	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	代替所内電源設備〔緊急用断路器〕	防止設備・緩和設備	屋外T/B廻り	○	影響なし（適切に除灰する。）
	代替所内電源設備〔緊急用電源切替箱断路器，緊急用電源切替箱接続装置，AM用動力変圧器，MCC等〕	防止設備・緩和設備	R/B，C/B	○	建屋内
	代替所内電源設備〔非常用高圧母線C・D系〕	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	非常用交流電源設備〔非常用ディーゼル発電機，燃料ディタンク〕	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
	非常用交流電源設備〔燃料移送ポンプ，配管等〕	（設計基準対象施設）	屋外	○	影響なし（適切に除灰する。）
	非常用直流電源設備〔直流125V蓄電池・充電器C，D等〕	（設計基準対象施設）	C/B	○	建屋内
	燃料補給設備〔軽油タンク〕	防止設備・緩和設備	屋外	○	影響なし（適切に除灰する。）
	燃料補給設備〔タンクローリ（4kL）等〕	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
第58条（計装設備）	重大事故等発生時の計装（SA時計装一式） ［原子炉圧力容器の温度・圧力・水位］ ［原子炉圧力容器・原子炉格納容器への注水量］ ［原子炉格納容器内の温度・圧力・水位・水素濃度・酸素濃度・放射線量率］ ［未臨界の維持又は監視］ ［最終ヒートシンクの確保(代替循環冷却系・格納容器圧力逃がし装置・耐圧強化ベント系・残留熱除去系)］ ［格納容器バイパス監視］ ［水源の確保］ ［原子炉建屋内の水素濃度］ ［使用済燃料プールの監視］ ［発電所内の通信連絡］ ［可搬型計測器］	防止設備・緩和設備（設計基準対象施設）	C/B R/B Rw/B R/B(5号炉)	○	建屋内
	重大事故等発生時の計装 ［最終ヒートシンクによる冷却状態の確認（格納容器圧力逃がし装置）］	防止設備・緩和設備	屋外	○	影響なし（適切に除灰する。）
第59条（運転員が原子炉制御室にとどまるための設備）	中央制御室及び遮蔽	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	中央制御室可搬型陽圧化空調機	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	中央制御室待避室及び遮蔽	緩和設備	C/B	○	建屋内
	中央制御室待避室陽圧化装置（空気ボンベ）	緩和設備	C/B，Rw/B	○	建屋内
	無線連絡設備（常設），衛星電話設備（常設）	→62条に記載		—	—
	データ表示装置（待避室），差圧計，酸素濃度・二酸化炭素濃度計	防止でも緩和でもない設備	C/B	○	建屋内
	可搬型蓄電池内蔵型照明	防止でも緩和でもない設備	C/B	○	建屋内
	非常用ガス処理系（排風機，フィルタ装置等）	緩和設備	R/B	○	建屋内

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる
　又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準対象施設が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）
　又は各外部事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備，防止でも緩和でもない設備）
—：他の項目にて整理

※　重大事故等対処設備（SA設備），タービン建屋（T/B），原子炉建屋（R/B），廃棄物処理建屋（Rw/B），コントロール建屋（C/B）

表 18-1　重大事故等に対処するための機能を有する設備の影響評価（5/5）

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所※	火山	
					評価	防護方法
第60条（監視測定設備）	可搬型モニタリングポスト		防止でも緩和でもない設備	可搬型SA設備保管場所 R/B（5号炉）	○	影響なし（適切に除灰する。）
	放射線サーベイ機器［可搬型ダスト・よう素サンプラ，GM汚染サーベイメータ，NaIシンチレーションサーベイメータ，電離箱サーベイメータ，ZnSシンチレーションサーベイメータ］		防止でも緩和でもない設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	可搬型気象観測装置		防止でも緩和でもない設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	小型船舶（海上モニタリング用）		防止でも緩和でもない設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	モニタリング・ポスト用発電機		防止でも緩和でもない設備	屋外	○	影響なし（適切に除灰する。）
第61条（緊急時対策所）	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所（対策本部） 及び遮蔽並びに高気密室		防止設備・緩和設備	R/B（5号炉） 屋外	○	建屋内
	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所（対策本部） 可搬型陽圧化空調機，可搬型外気取入送風機		防止設備・緩和設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所（対策本部）陽圧化装置（空気ボンベ）		緩和設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所（対策本部）二酸化炭素吸収装置		防止設備・緩和設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所（対策本部）可搬型エリアモニタ		緩和設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	酸素濃度計，二酸化炭素濃度計，差圧計（対策本部）		防止でも緩和でもない設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所（待機場所） ，遮蔽及び室内遮蔽		防止設備・緩和設備	R/B（5号炉） 屋外	○	建屋内
	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所（待機場所） 可搬型陽圧化空調機		防止設備・緩和設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所（待機場所）陽圧化装置（空気ボンベ）		緩和設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所（待機場所）可搬型エリアモニタ		緩和設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	可搬型モニタリングポスト		→60条に記載		－	－
	酸素濃度計，二酸化炭素濃度計，差圧計（待機場所）		防止でも緩和でもない設備	R/B（5号炉）	○	建屋内
	安全パラメータ表示システム（SPDS）		→62条に記載		－	－
	5号炉原子炉建屋内緊急時対策所用可搬型電源設備		防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	影響なし（適切に除灰する。）
	通信連絡設備		→62条に記載		－	－
	5号炉屋外緊急連絡用インターフォン		→62条に記載		－	－
	軽油タンク，タンクローリ（4kL）		→57条に記載		－	－
第62条（通信連絡を行うために必要な設備）	所内通信	携帯型音声呼出電話設備	防止設備・緩和設備	C/B，R/B（5号炉）	○	建屋内
		無線連絡設備（常設）（可搬型）	防止設備・緩和設備	C/B， R/B(5号炉) （屋外設備含む）	○	建屋内（屋外設備については代替設備（有線系））にて機能維持可能
		安全パラメータ表示システム（SPDS）	緩和設備	C/B， R/B（5号炉） （屋外設備含む）	○	建屋内（屋外設備については代替設備（有線系））にて機能維持可能
		5号炉屋外緊急連絡用インターフォン	防止設備・緩和設備	R/B（5号炉） （屋外設備含む）	○	影響なし （屋外設備についても、灰が積もりにくい形状であるとともに，適切に除灰するなどの対応により機能維持可能）
	所内外通信	衛星電話設備（常設）（可搬型）	防止設備・緩和設備	C/B， R/B(5号炉) （屋外設備含む）	○	影響なし （屋外設備についても、灰が積もりにくい形状であるとともに，適切に除灰するなどの対応により機能維持可能）
	所外通信	統合原子力防災ネットワークを用いた通信連絡設備，データ伝送設備	防止でも緩和でもない設備	R/B(5号炉) （屋外設備含む）	○	影響なし （屋外設備についても、灰が積もりにくい形状であるとともに，適切に除灰するなどの対応によりにより機能維持可能）
その他の設備	重大事故等時に対処するための流路，注水先又は注入先 ［原子炉圧力容器，原子炉格納容器，使用済燃料プール，原子炉建屋原子炉区域］		防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	非常用取水設備 ［海水貯留堰，取水路等］		防止設備・緩和設備	屋外	○	影響なし

○：各外部事象に対し安全機能を維持できる
　又は各外部事象による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準対象施設が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）
　又は各外部事象による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備，防止でも緩和でもない設備）
－：他の項目にて整理

※　重大事故等対処設備（SA設備），原子炉建屋（R/B），コントロール建屋（C/B）

19. 軽油タンクからの燃料移送について

柏崎刈羽原子力発電所 6 号炉及び 7 号炉の 7 日間の外部電源の喪失に対して，非常用ディーゼル発電機の燃料として，軽油タンク及び燃料デイタンクを有しており，燃料移送ポンプにより，軽油タンクから燃料デイタンクへ燃料移送される系統構成となっている。系統構成については図 19-1 に示す。

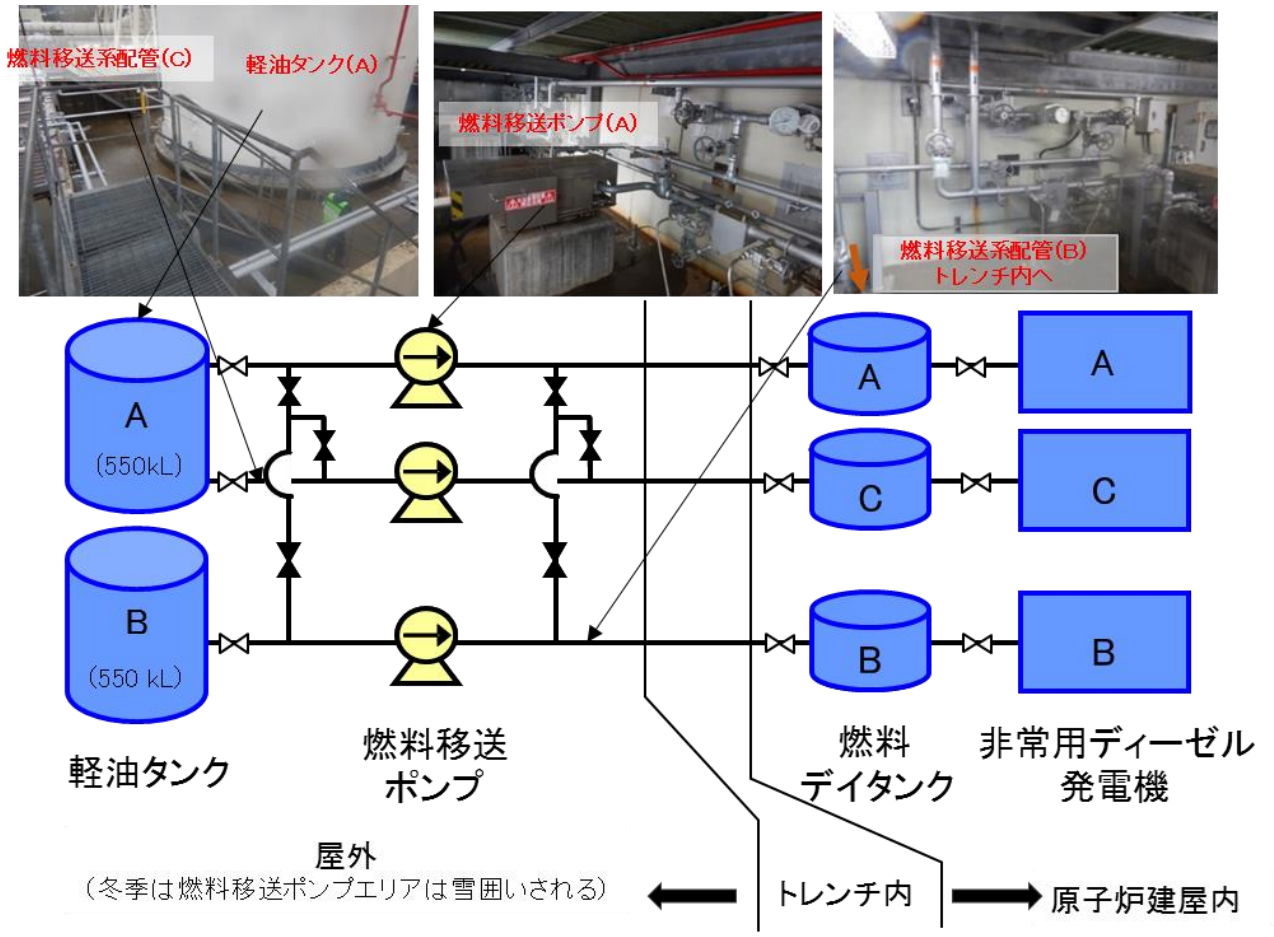


図 19-1　非常用ディーゼル発電機　燃料供給系統の構成

軽油タンク及び燃料移送ポンプは屋外設備であるが，降下火砕物の静的荷重等に対してその機能に影響がない設計とすることとしている（個別評価-5）。また，非常用ディーゼル発電機燃料移送系の配管は，軽油タンクの取り出し口から非常用ディーゼル発電機燃料移送系配管トレンチまでは屋外に設置されているが，その形状は管状であり，その口径は 65A 以下と降下火砕物が堆積しにくい形

状であることから，降下火砕物によって機能喪失することはない。以上のことから，7 日間の外部電源喪失に対して，非常用ディーゼル発電機へ燃料供給が可能であり，発電用原子炉の停止及び停止後の発電用原子炉の冷却，並びに使用済燃料プールの冷却に係る機能を担うために必要となる電源の供給が継続できる。

20. 水質汚染に対する補給水等への影響について

（１）外部から供給される水源の概略系統及び供給先

水質汚染については，降下火砕物が柏崎市水道水に混入することで，補給水等の汚染が考えられる。

図 20-1 に示すとおり，市水道水は，ろ過水タンク及び純水装置を経由し純水タンクに供給される。ろ過水タンクに貯留された水は消火系及び雑用水系に供給されるが，外部事象防護対象施設は含まれていない。一方，純水タンクに貯留された純水は，純水装置（給水処理設備）による水処理及び水質管理が行われていること，また，供給する設備には，復水貯蔵槽及び原子炉補機冷却水サージタンク等への補給並びにホウ酸水注入系の封水等があるが，いずれも，点検時の水張りや系統内でリークが生じた際に補給等が必要になるもので，降下火砕物襲来時に補給が必要ではなく，水質汚染はプラントの安全機能に影響を及ぼさない。

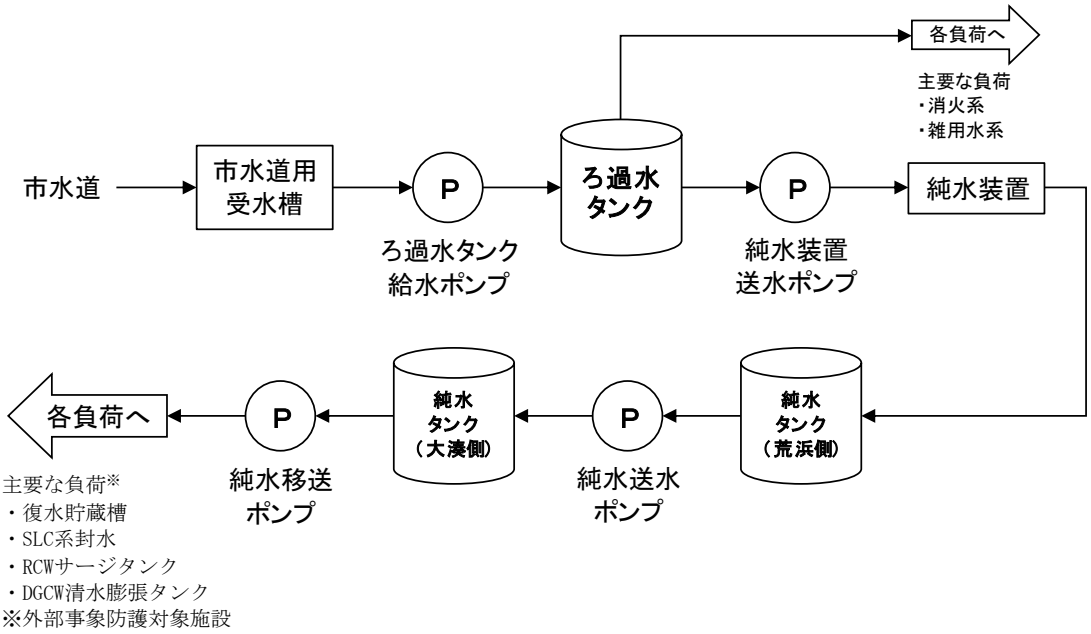


図 20-1　外部から供給される水源の概略系統図