

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. 評価対象施設の設計方針
 - 3.5. 竜巻随件事象に対する評価

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. 竜巻防護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. 竜巻防護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. 数値気象解析にもと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. 竜巻随件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ずとしており、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、竜巻の影響を挙げている。

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件事象等によって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竜巻防護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、設計基準事故対処設備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といった観点から、代替手段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) 竜巻防護施設のうち評価対象施設」及び「(2) 竜巻防護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。

(1) 竜巻防護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, 2及び3に該当する構築物、系統及び機器（以下、「**安全重要度クラス1, 2, 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、竜巻防護施設としては、安全重要度クラス1, 2, 3に属する構築物、系統及び機器とする。

竜巻防護施設のうち、本評価における対象としては、**外部事象**に対し必要な構築物、系統及び機器とし、その中から屋外設備（当該設備を内包する建屋含む）、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を抽出した。

外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器は、以下の点を踏まえ、原子炉停止、炉心冷却、使用済燃料プール冷却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設備を選定する。

- ・ 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

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（「3.3 設計荷重の設定」に示す飛来物が影響を及ぼす高さ（原則地上10m 迄）等を踏まえ、機能が維持されるかを確認）する、又は、竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、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には、安全機能を損なわないことから評価完了とする。

なお、外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備については、建屋、構築物の構造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 に竜巻防護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、「基準地震動およ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
- ・ 非常用ディーゼル発電機非常用送風機
- ・ 換気空調系（ディーゼル発電機電気区域換気空調系、中央制御室換気空調系、コントロール建屋計測制御・電源盤区域喚起空調系、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))
- ・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, モータコントロールセンタ)
- ・6号炉タービン建屋 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)

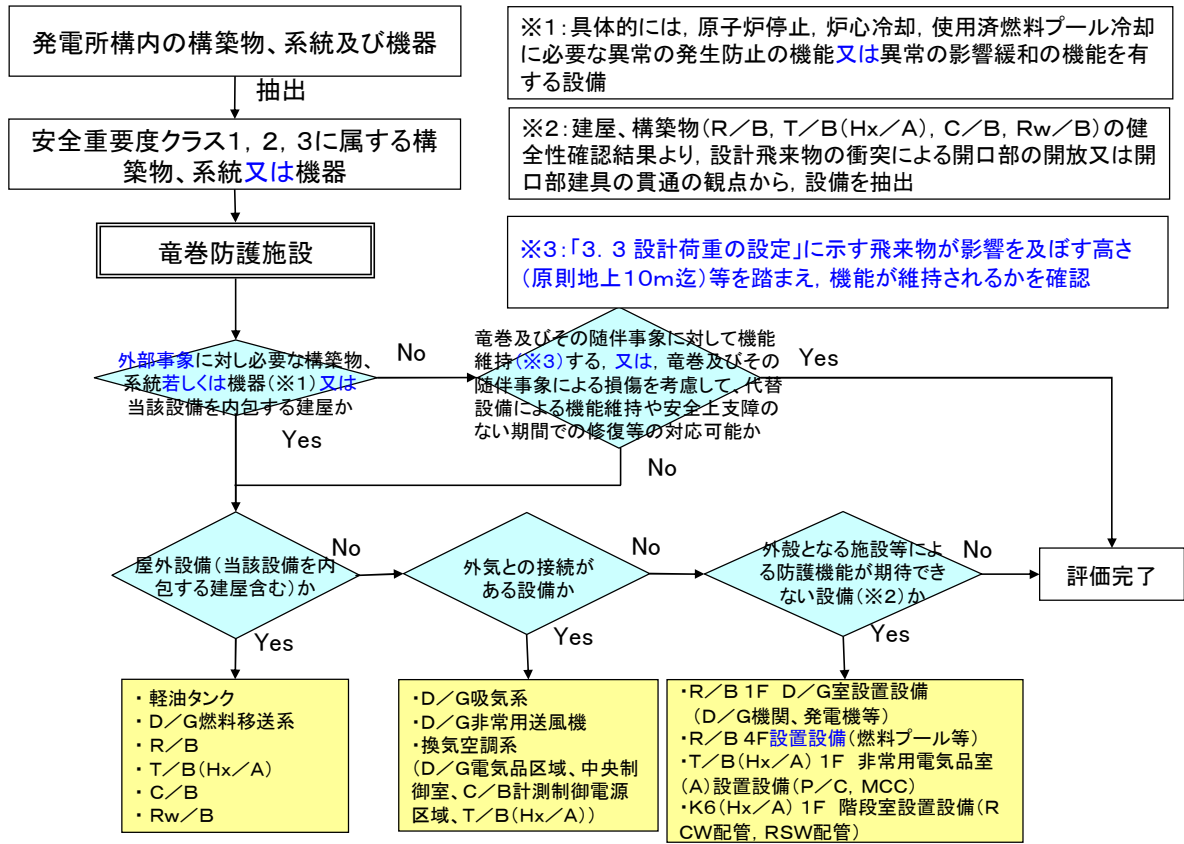


図 1.2.1 竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出フロー

防護上の観点または機密に係わる事項を含む為、公開できません

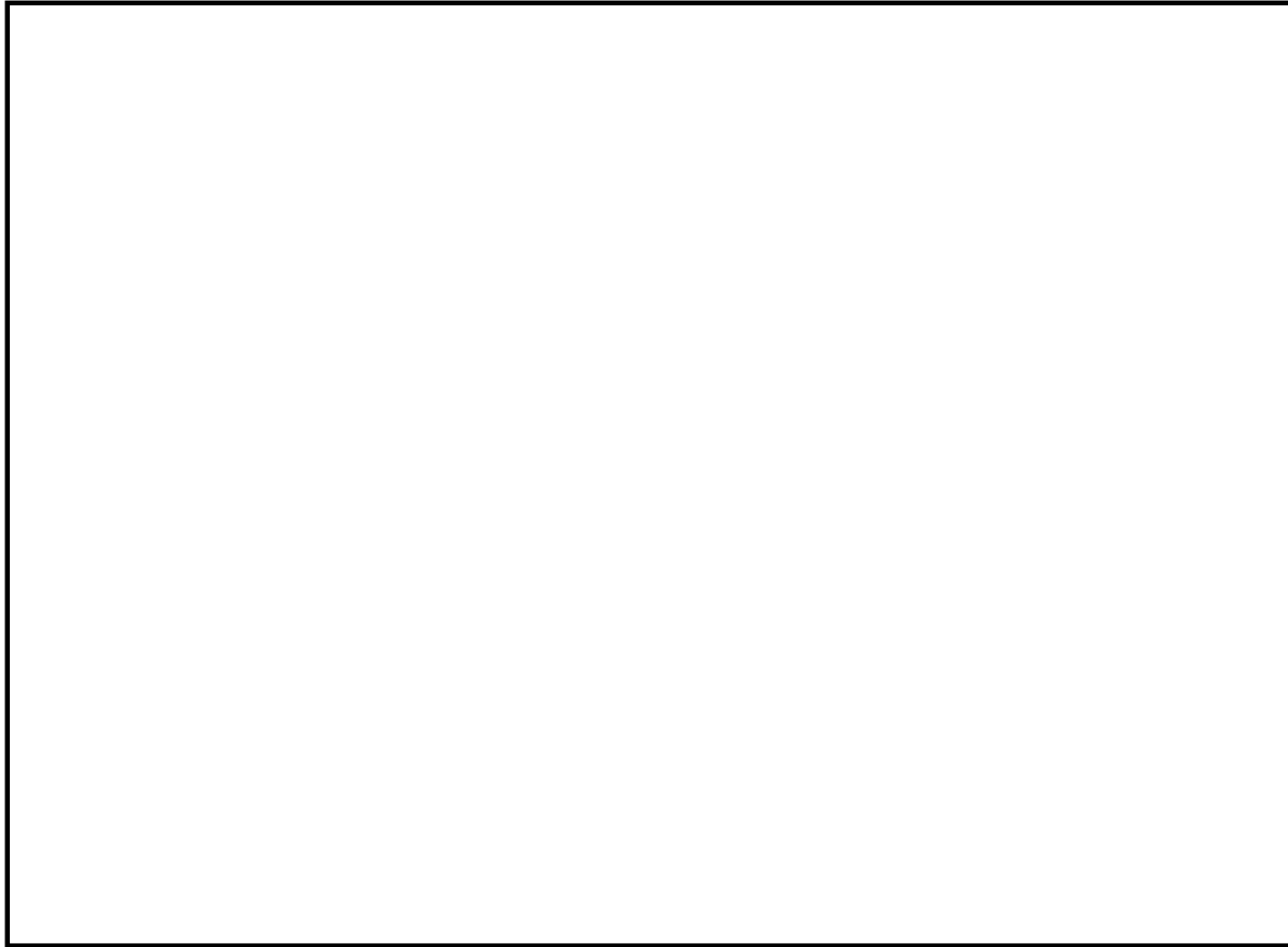


図 1.2.2 竜巻防護施設のうち評価対象施設

(2) 竜巻防護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】

竜巻防護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に対し必要な構築物、系統及び機器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、またはその施設の特定の区画とする。

竜巻防護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（安全重要度クラス1, 2, 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に竜巻防護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に対し必要な構築物、系統及び機器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、評価する。

(倒壊により外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器を機能喪失させる可能性がある施設)

- ・主排気筒
- ・5号炉主排気筒（6号炉への影響）
- ・5号炉タービン建屋
- ・サービス建屋（6・7号炉共通施設）
- ・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に対し必要な構築物、系統及び機器の付属設備として、以下を抽出し、評価を実施する。

(屋外にある外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器の付属設備)

- ・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に対し必要な構築物、系統及び機器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、評価を実施する。

(竜巻随伴事象の影響により外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器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に対し必要な構築物、系統及び機器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、苛性ソーダ貯槽、硫酸貯槽）
- ・ 火災発生により外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器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

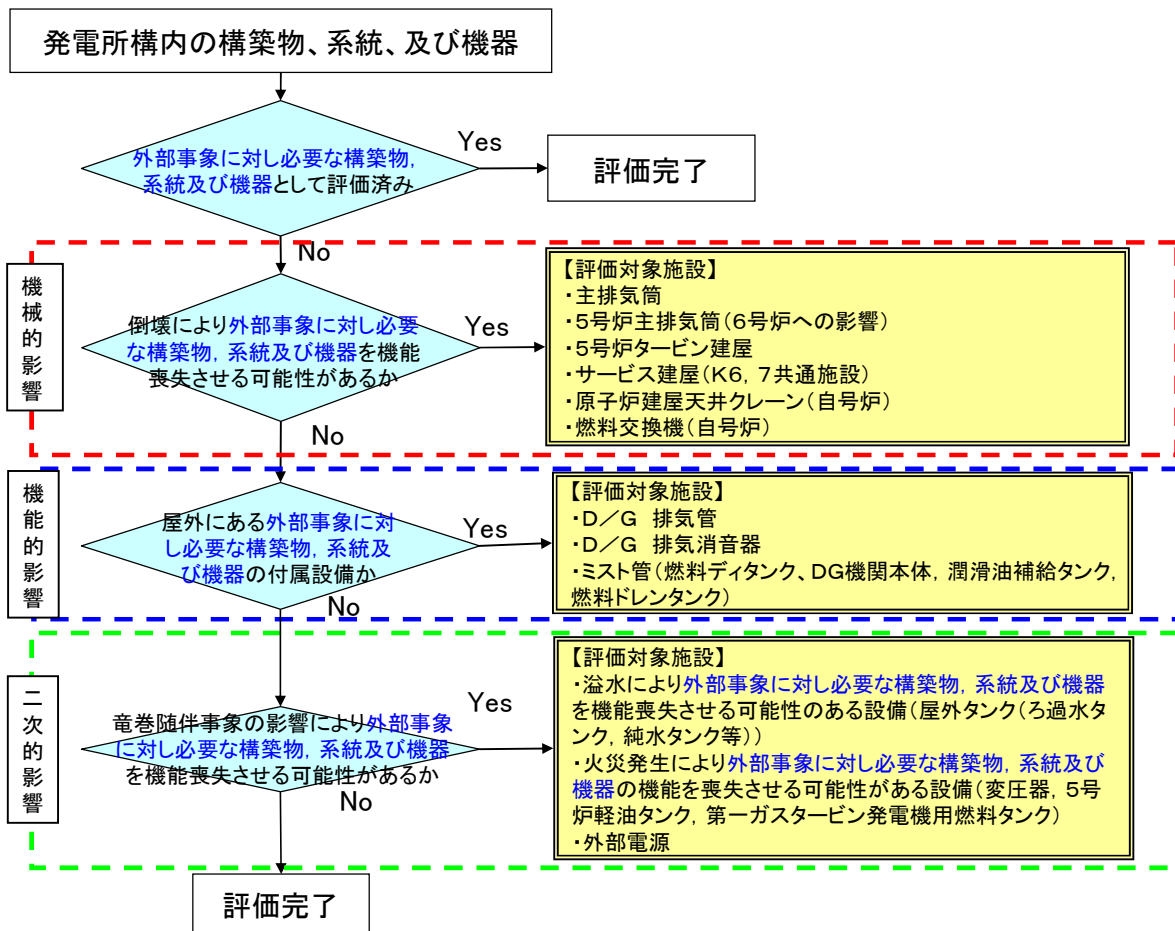


図 1. 2. 3 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出フロー

防護上の観点または機密に係わる事項を含む為、公開できません

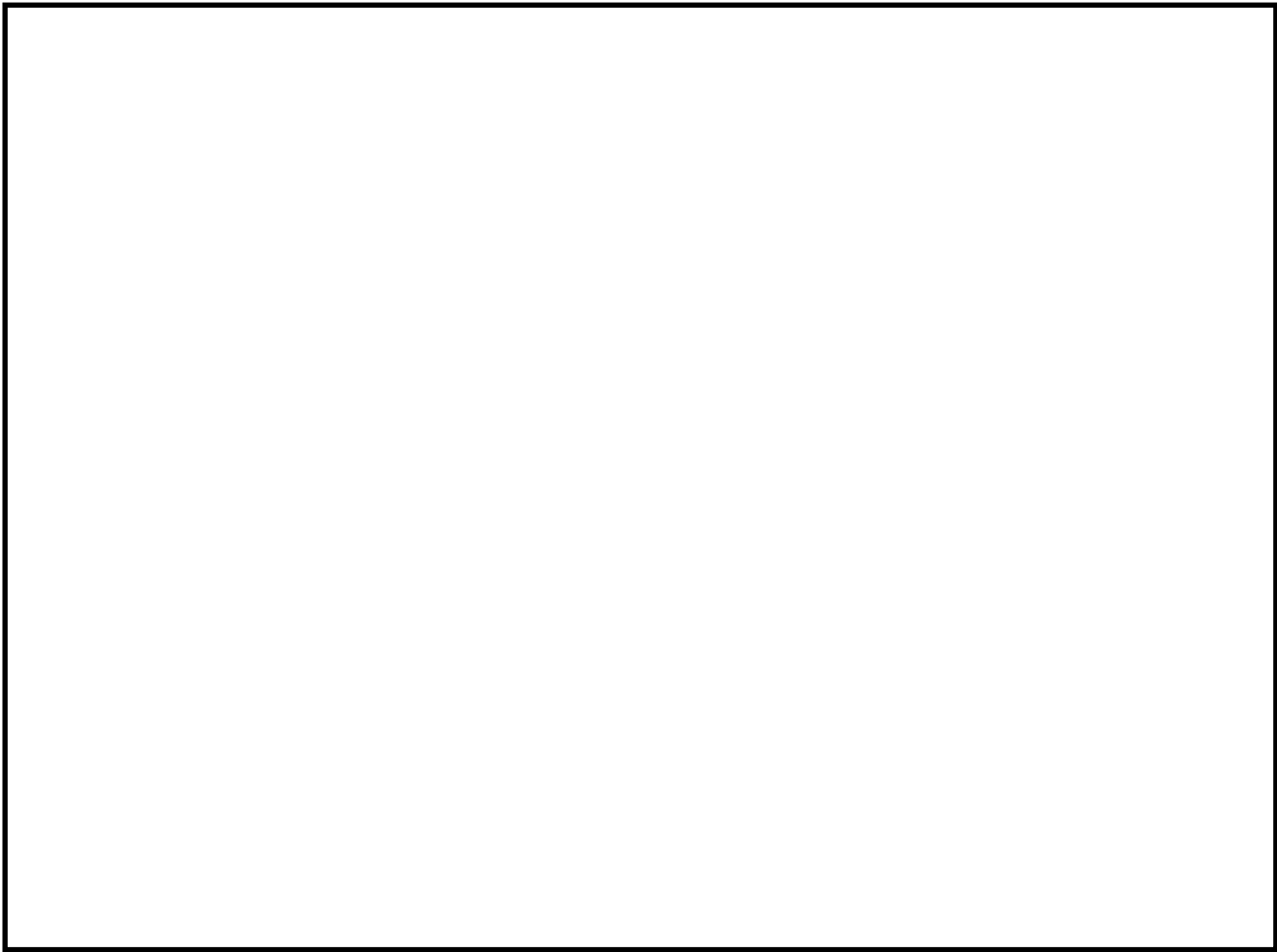


図 1.2.4 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設

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。

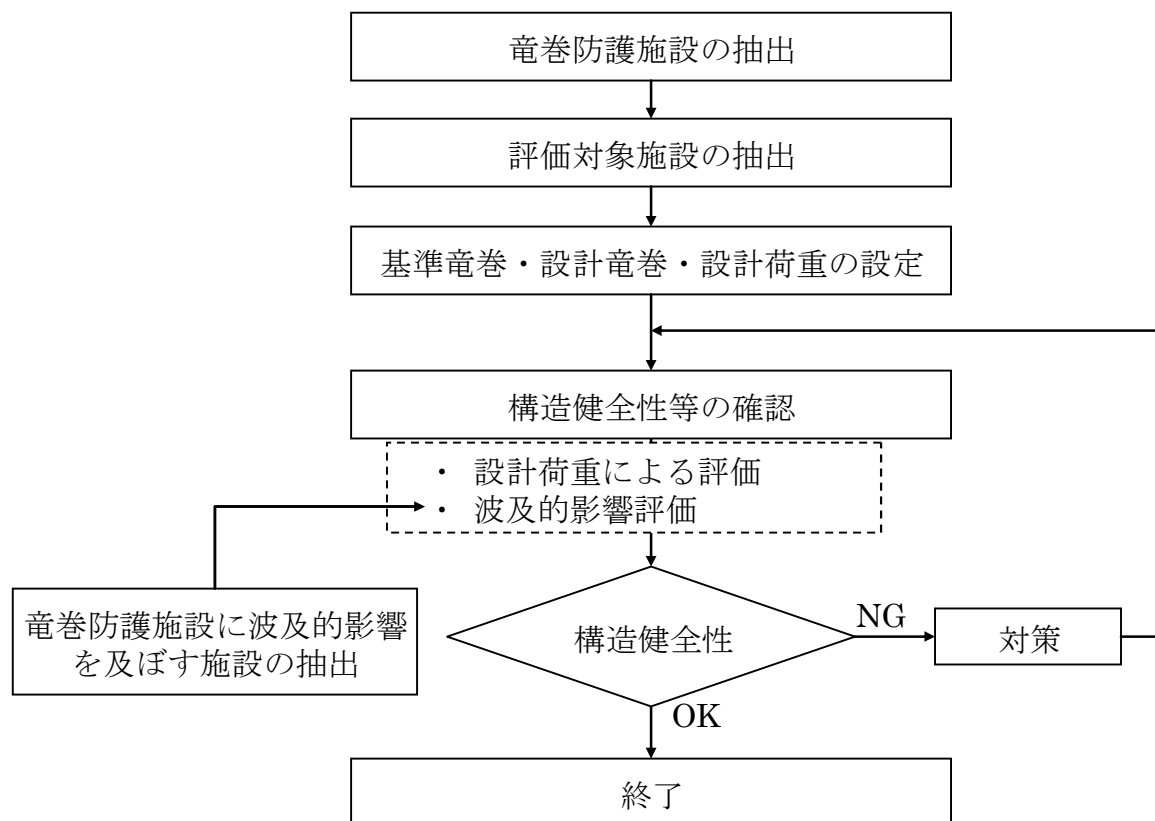


図 1.3.1.1 竜巻影響評価の基本フロー

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設計対象施設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に示す通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。

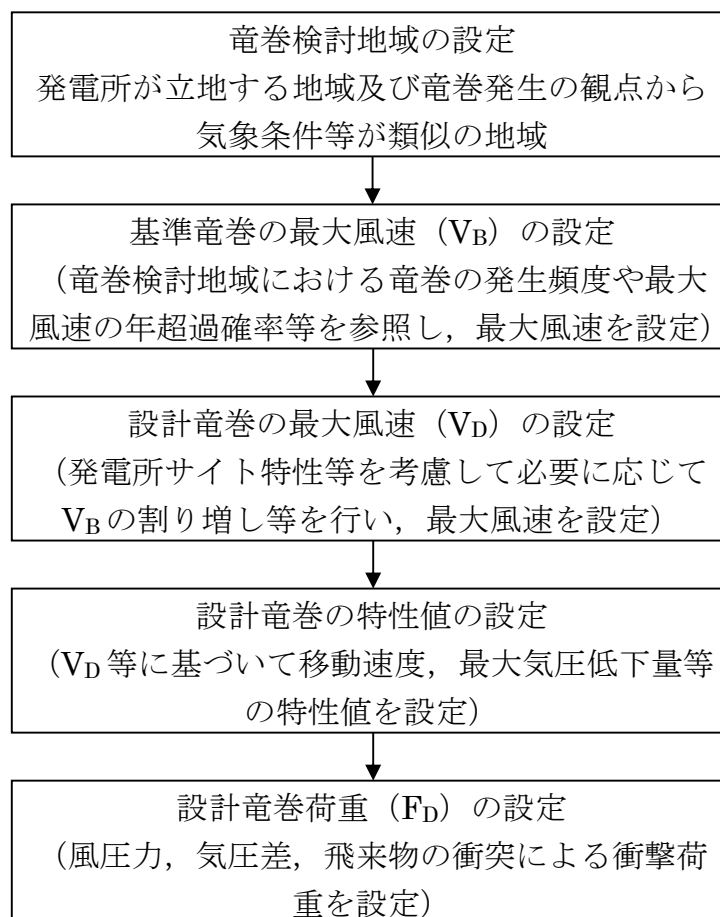


図2.1.1 基準竜巻・設計竜巻の設定に係る基本フロー

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、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 33,395km²）。以下にその妥当性確認の結果を示す。

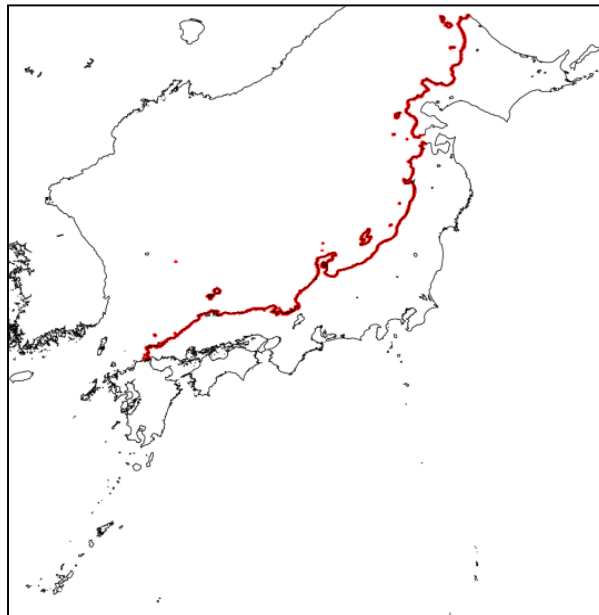


図2.2.1 竜巻検討地域（赤線部）

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検討
- (2) 過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の検討
- (3) 突風関連指数に基づく地域特性の検討

「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。

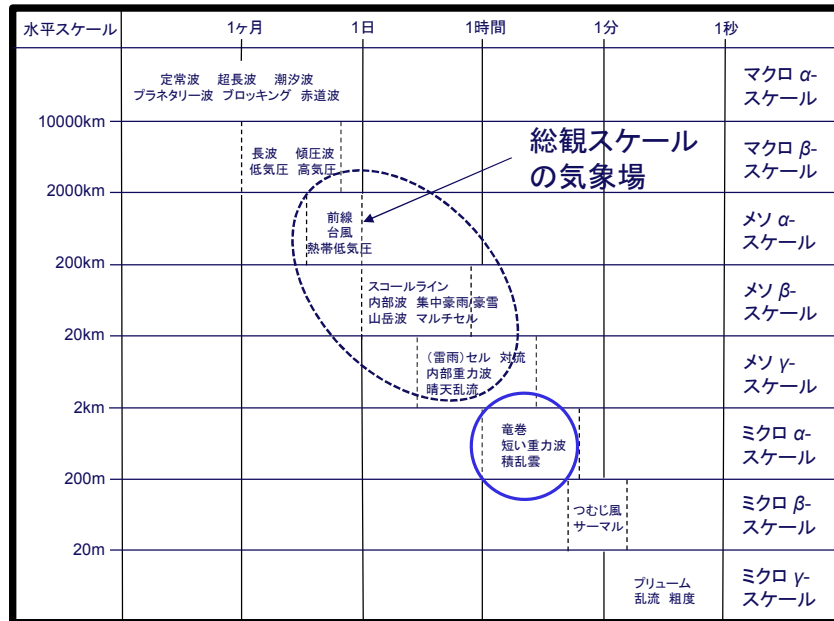


図 2.2.1.1 竜巻とその関連気象の時空間スケール

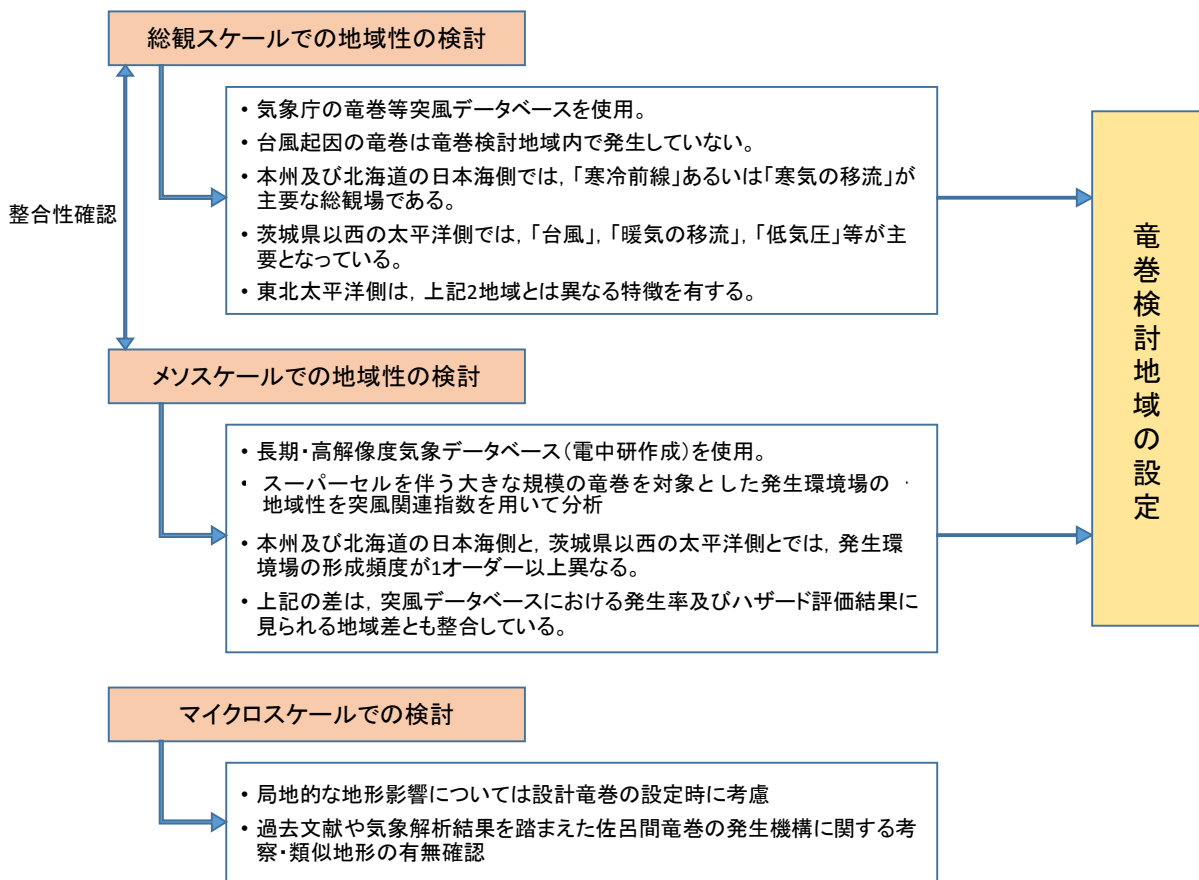


図 2.2.1.2 竜巻検討地域の検討フロー

2.2.2. 総観場の分析に基づく地域特性の検討

気象庁竜巻データベース[※]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low。
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。

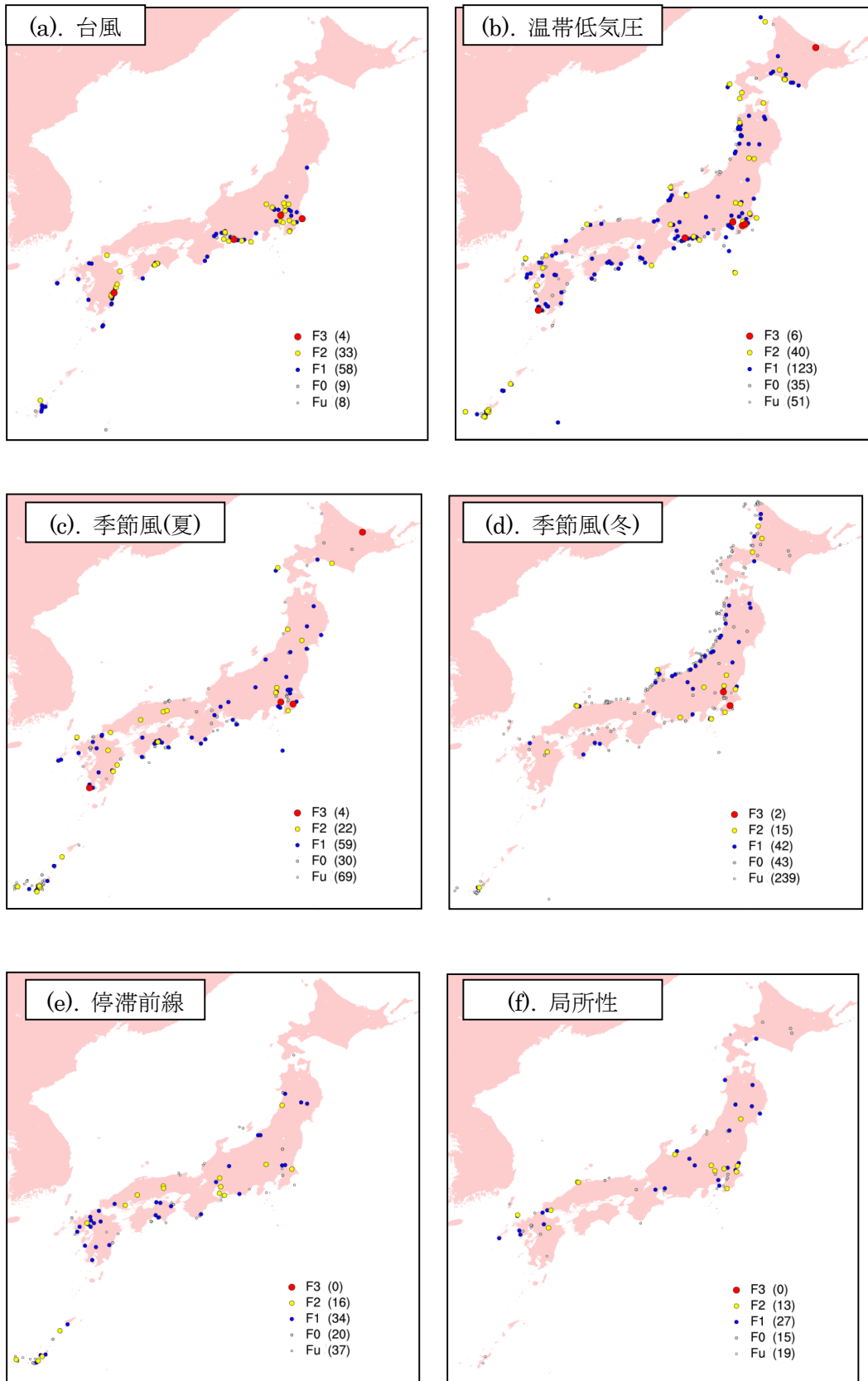


図 2.2.2.1 総観場ごとの竜巻発生地点の分布(1961年～2012年)
(気象庁竜巻データベースのデータをもとに作成)

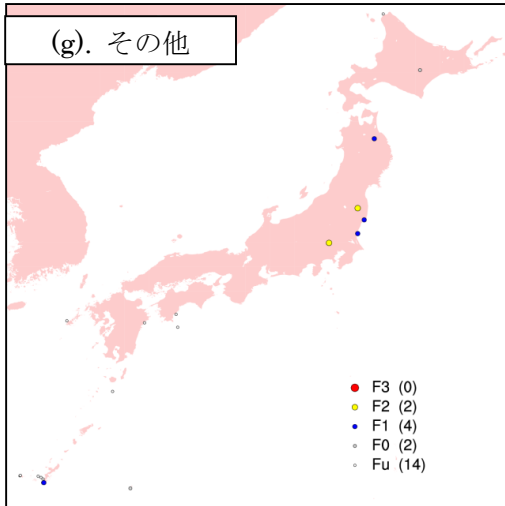


図 2.2.2.1(続き) 総観場ごとのスケール別竜巻発生地点の分布 (1961年～2012年)
(気象庁竜巻データベースのデータをもとに作成)

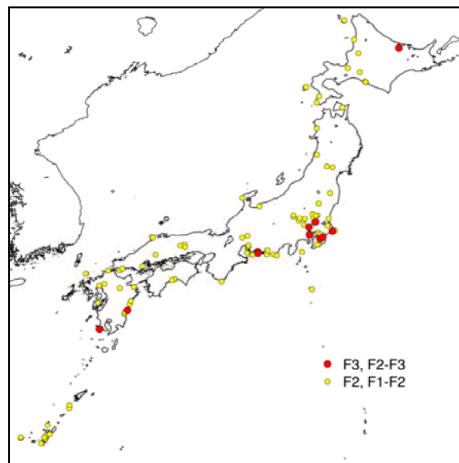


図 2.2.2.2 F2以上の竜巻発生箇所
(気象庁竜巻データベースのデータをもとに作成)

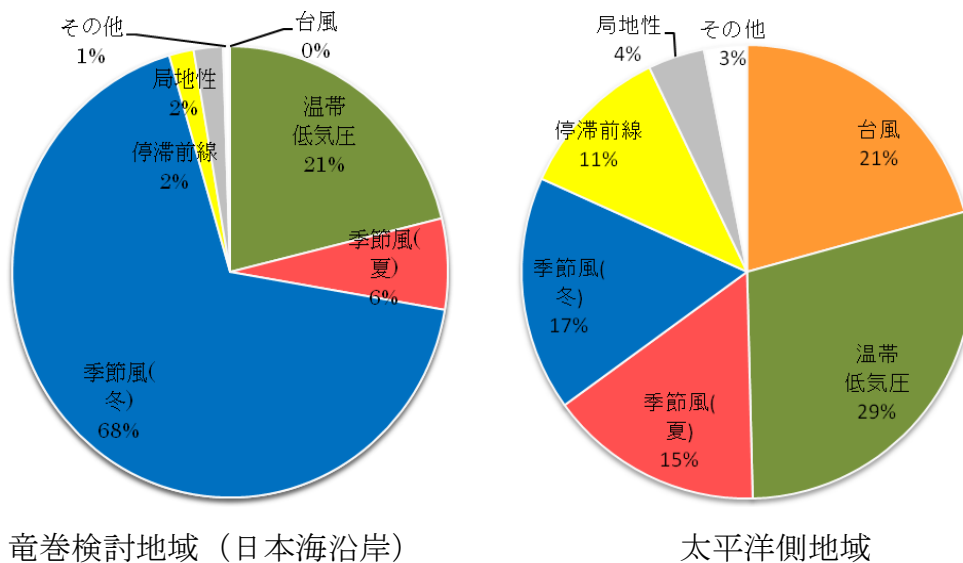


図 2.2.2.3 竜巻の総観場の特徴の比較

2.2.3. 過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の検討

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 に示す通り、柏崎刈羽原子力発電所は、竜巻集中地域④（新潟県（佐渡島含む）・富山県）に立地している。従って、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/km²）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。**

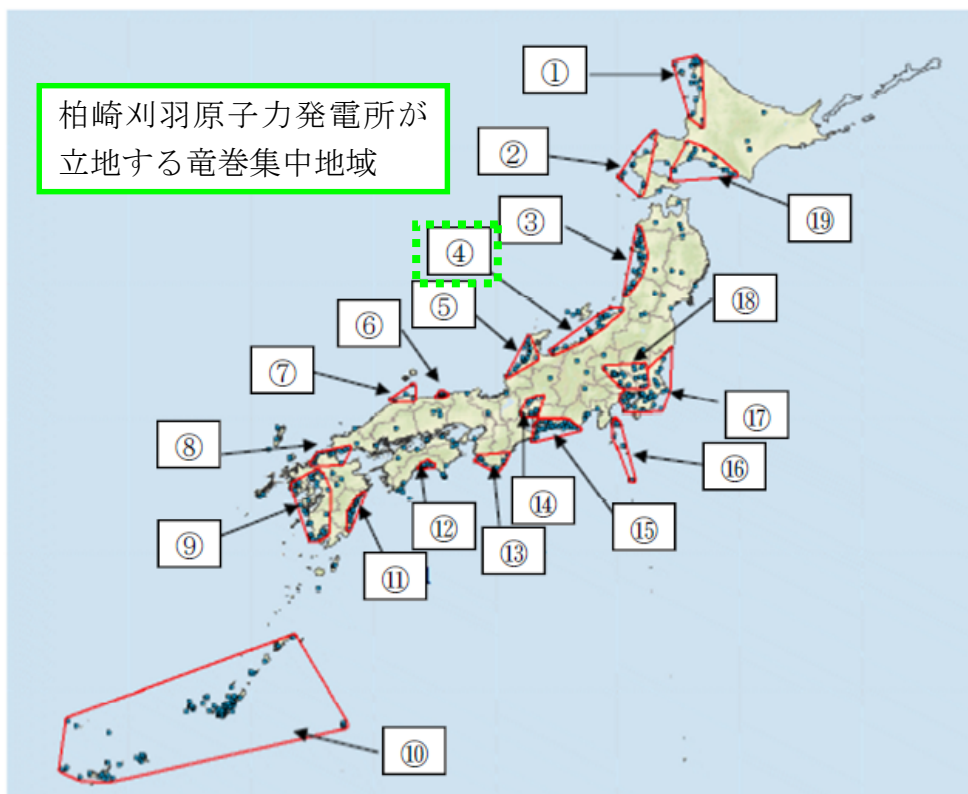


図 2.2.3.1 竜巻の発生する地点と竜巻が集中する 19 個の地域
(JNES「竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」より引用)

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(青森県日本海側から山形県)と⑤(石川県と福井県)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。

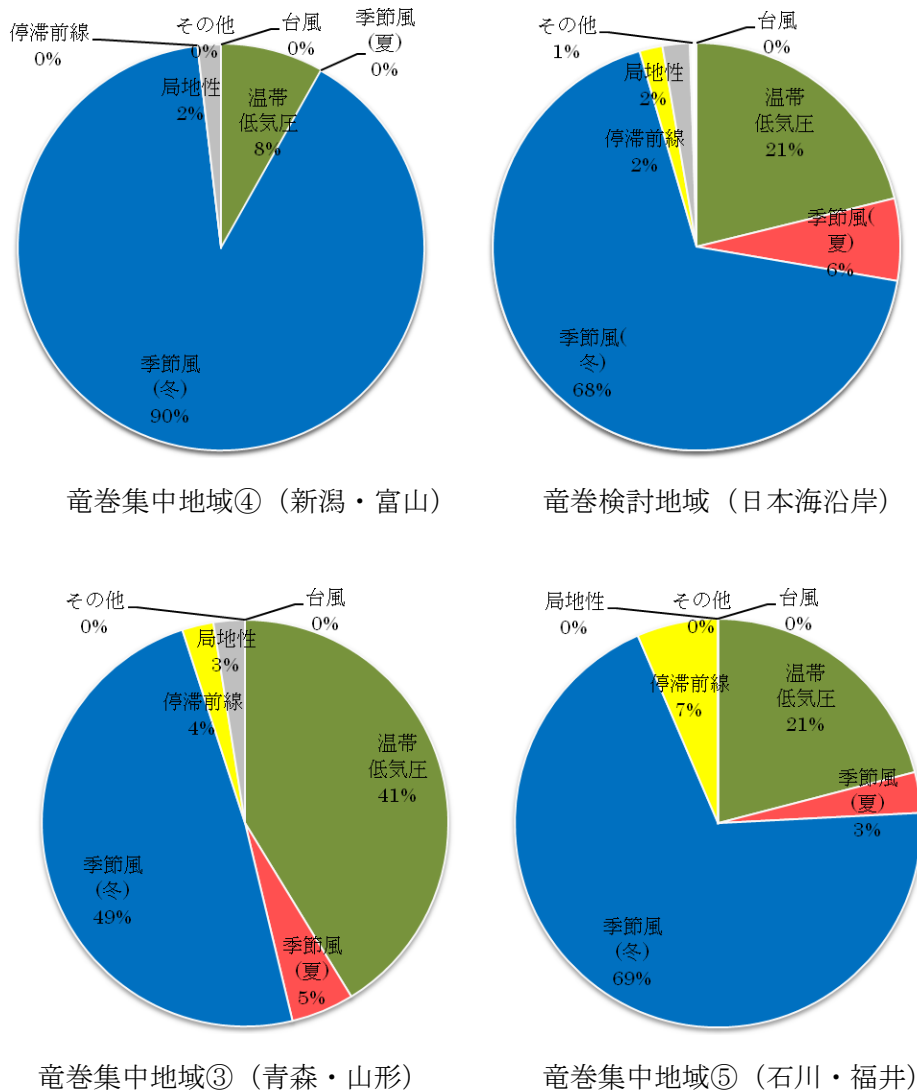


図 2.2.3.2 各地域の竜巻発生要因に関する総観場の特徴

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、寒気にもよ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 40%
	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「竜巻等竜巻データベース」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) 文献等からの引用また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検討

総観場での検討に加え、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検討するため、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検討を行った。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基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。

気象庁での突風関連指数の適用状況

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（または発生している）可能性の程度」（発生確度）を 10 分毎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。

海外での突風関連指数の適用状況

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。

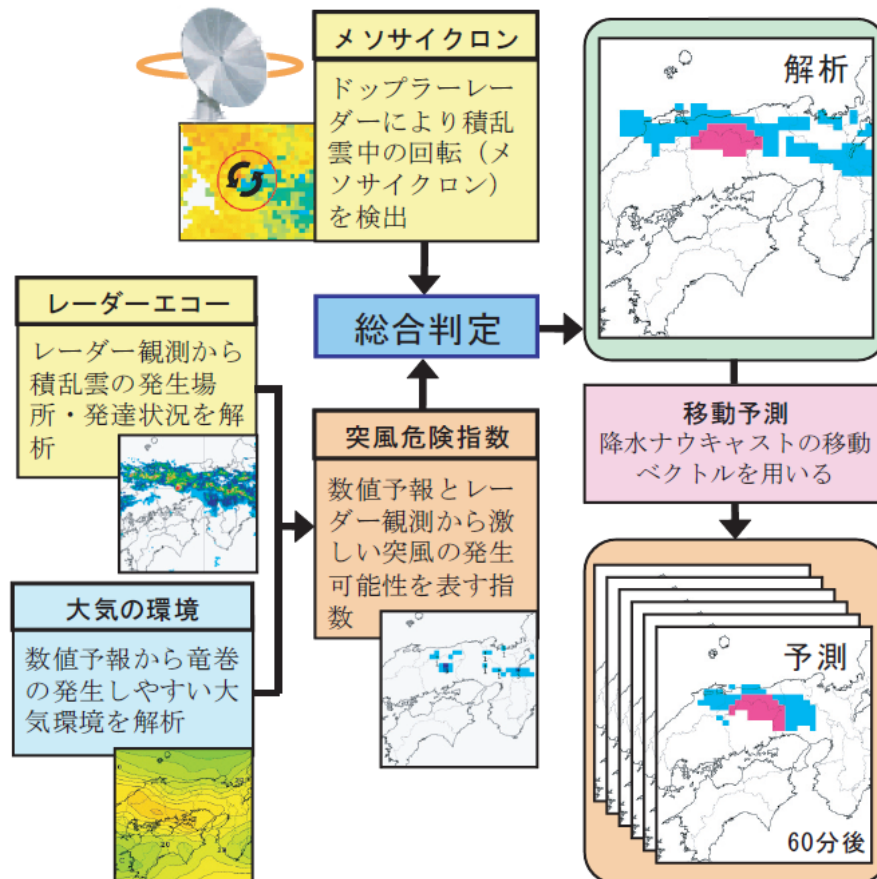


図 2.2.4.1.1 竜巻発生確度ナウキャストの解析・予測技術

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

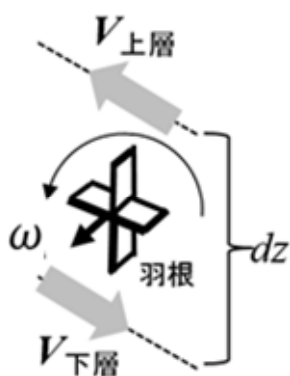
(1) SReH (Storm Relative Helicity : ストームの動きに相対的なヘリシティ)

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)

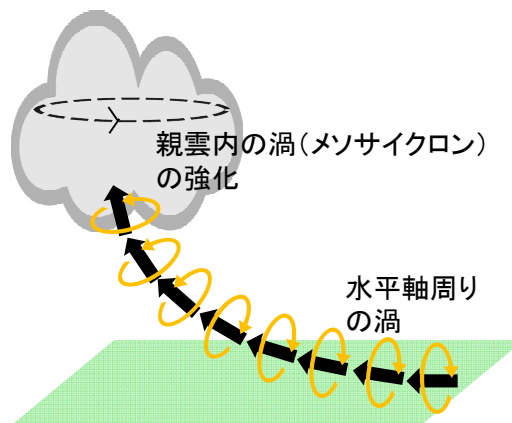
$$\text{SReH} = \int_{\text{地上}}^{\text{高度}3\text{km}} (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega} dz$$

\mathbf{V} : 水平風速ベクトル \mathbf{C} : ストームの移動速度

$\boldsymbol{\omega}$: 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
 うるため、大気的不安定度の指標となる。(図 2.2.4.2.3)

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

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

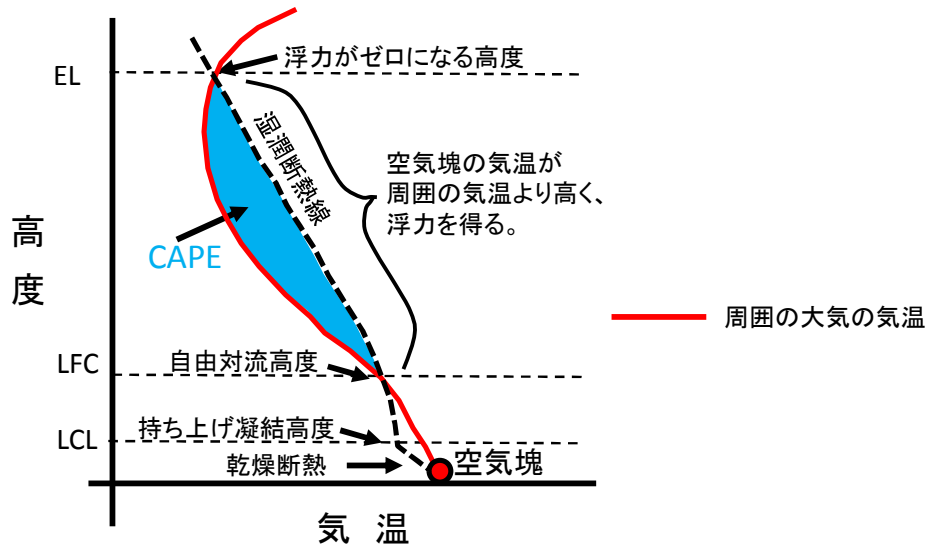


図 2.2.4.2.3 CAPE の算出概念

(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。

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

(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)、単位体積中に含みう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。

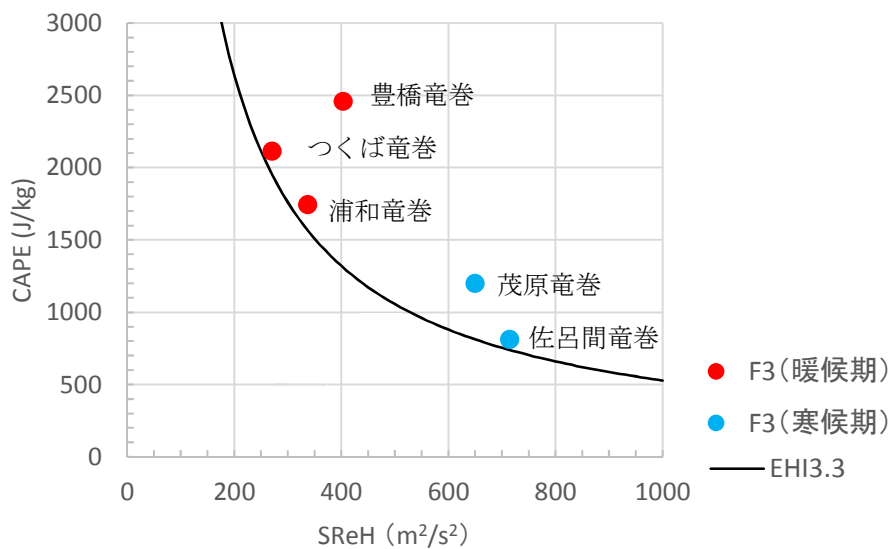


図 2.2.4.3.1 F3 竜巻における SReH と CAPE の関係

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すことができると思われる。

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 m²/s², CAPE : 1600 J/kg

[11月～4月（寒候期）] SReH : 250 m²/s², 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 時間毎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、気象庁竜巻データベースで確認された F2-F3 竜巻および F3 竜巻の発生箇所を図 2.2.4.4.2 に示す。

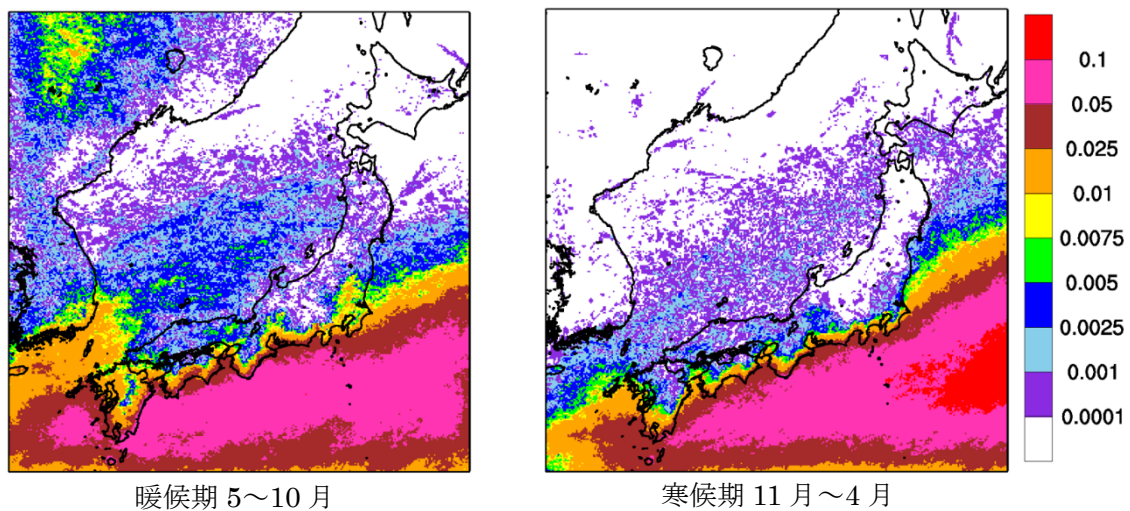


図2.2.4.4.1 F3規模以上を対象としたSReH, CAPE同時超過頻度分布（単位：％）

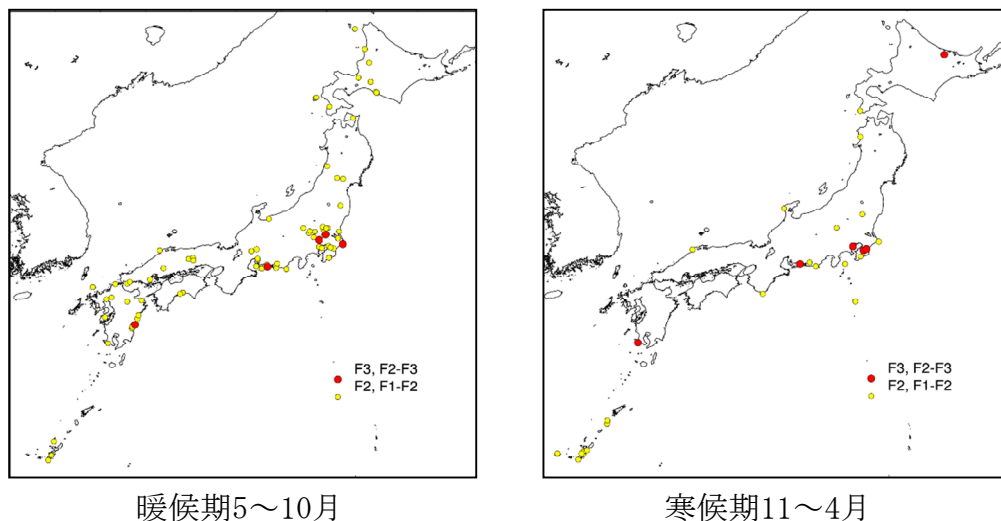


図2.2.4.4.2 F2規模以上の発生箇所
（気象庁「竜巻等竜巻データベース」より作成）

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】

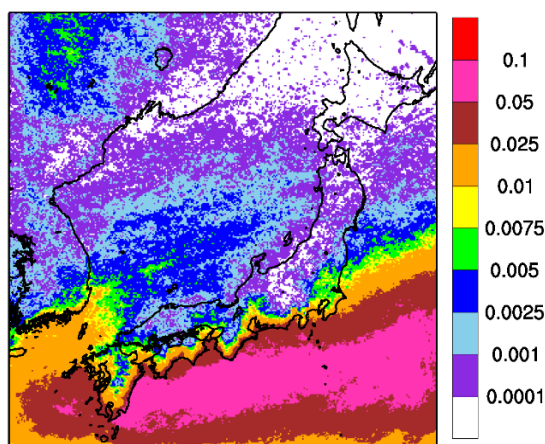


図2.2.4.4.3 EHIの超過頻度分布（単位：％，EHI閾値:3.3）

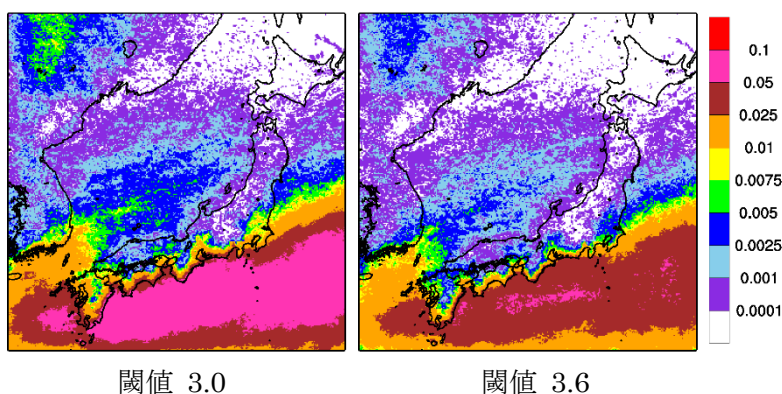


図 2.2.4.4.4 EHI の超過頻度分布（単位:％，EHI 閾値は左から，3.0，3.6）

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様に設定した。

[5月-10月 (暖候期)] SReH : 200 m²/s², CAPE : 1000 J/kg

[11月-4月 (寒候期)] SReH : 200 m²/s², 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。

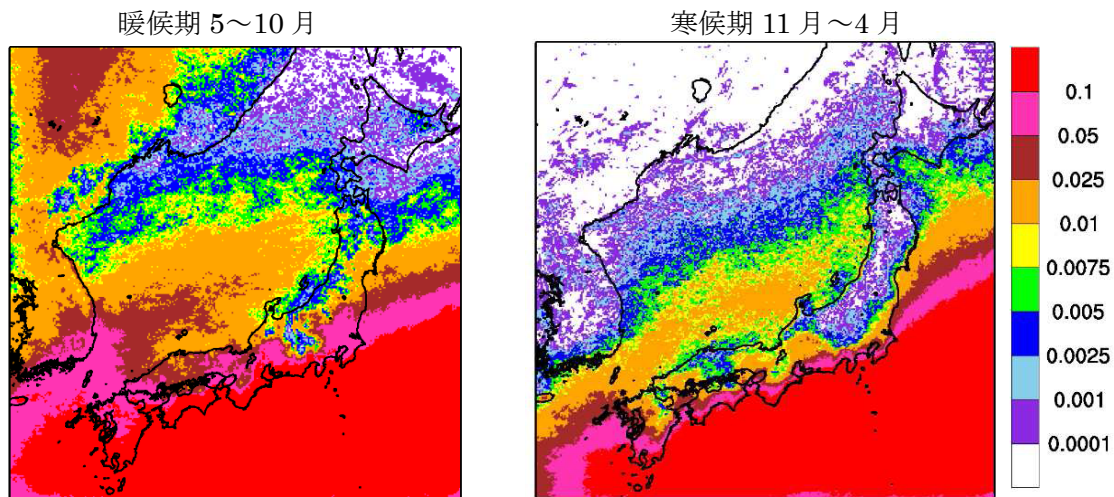


図2.2.4.4.5 F2規模のSReH, CAPE同時超過頻度分布 (単位: %)

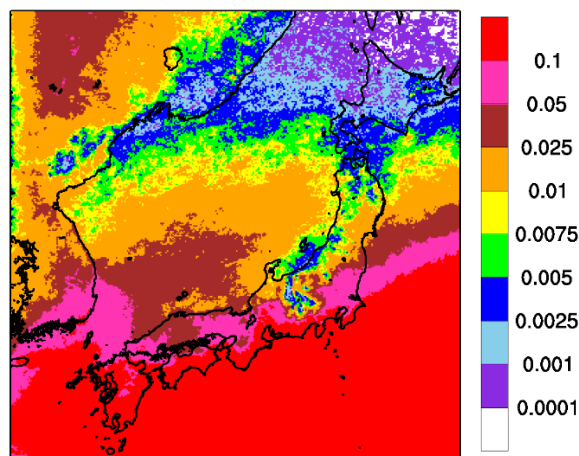


図2.2.4.4.6 EHIの超過頻度分布 (単位: %, EHI閾値:1.5)

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事が出来ないため、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、佐呂間竜巻と呼ぶ。）。

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。

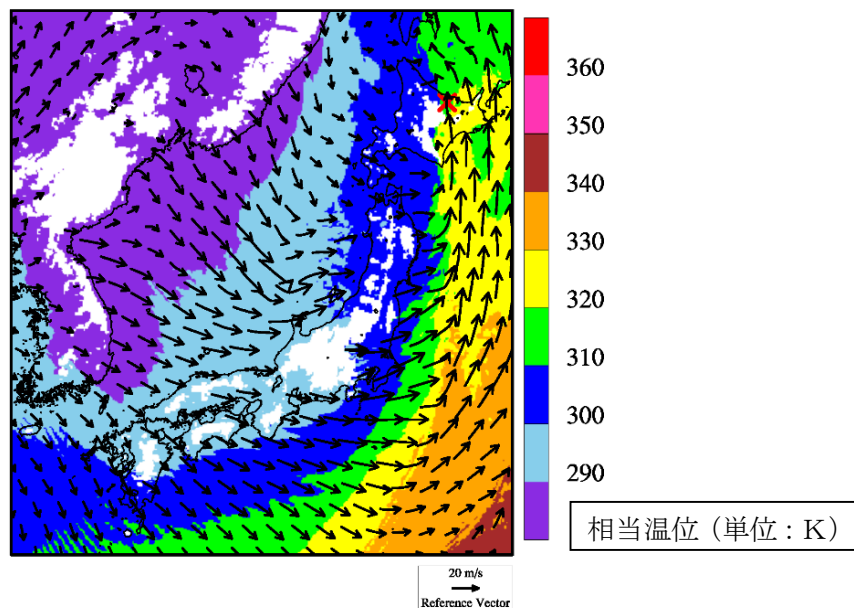


図 2.2.4.5.1 佐呂間竜巻発生時の風向・風速および相当温位の分布(海拔 500m 高度)



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）および竜巻の発生箇所（右）

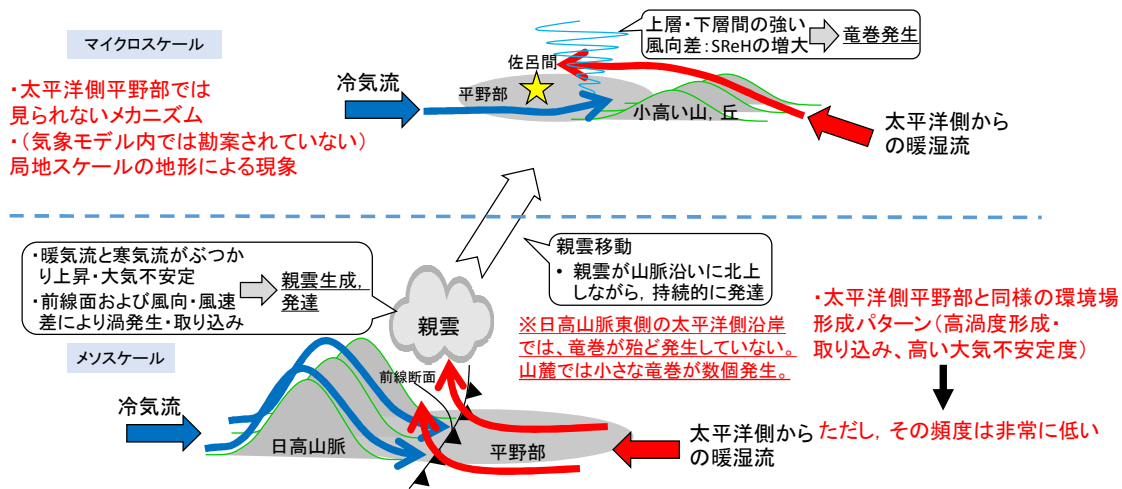


図 2. 2. 4. 5. 3 佐呂間竜巻の発生メカニズムに関する模式図

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うる地域で

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、以下の様に整理できる。

- ・ 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。

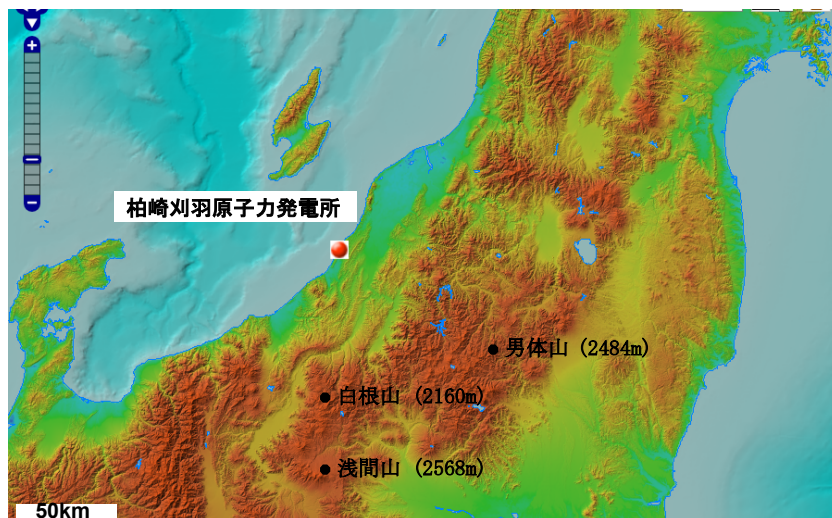


図2. 2. 4. 5. 4 柏崎刈羽原子力発電所周辺地形図

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。また、2.2節に基づく検討結果から、日本海側に設定した竜巻検討地域は、太平洋側と比較して総観場及びF3規模の竜巻発生のは易さの観点から地域性が異なることが説明できる。したがって、竜巻検討地域で過去に発生した最大竜巻F2の風速範囲の上限値69m/sを V_{B1} 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「竜巻等竜巻データベース」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) 文献等からの引用また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「竜巻等竜巻データベース」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、竜巻検討地域において過去に発生した竜巻は、海上発生 of F スケール不明の竜巻が半数以上を占める偏った発生となっていることや竜巻発生確認数にばらつきがあることを踏まえ、竜巻影響評価ガイドに基づき、ハザード曲線に保守性をもたせるために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

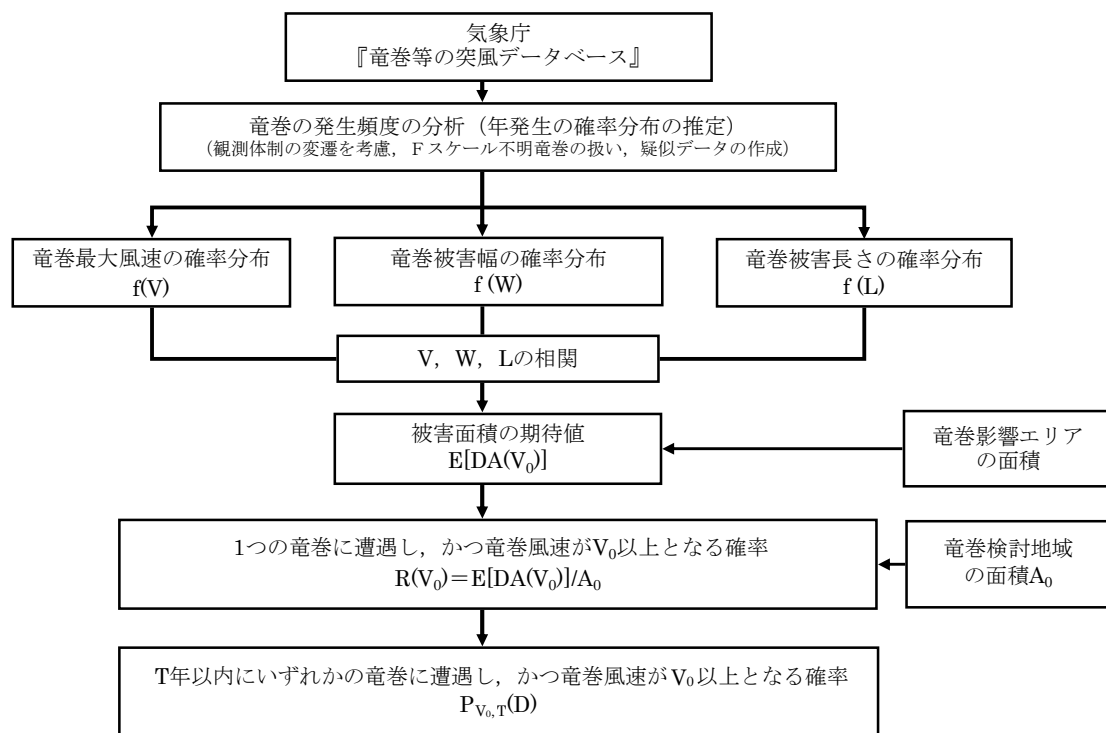


図 2.3.2.1 竜巻最大風速ハザード曲線の算定フロー

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「竜巻等竜巻データベース」を基に、1961年～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、被害があつて初めてその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。

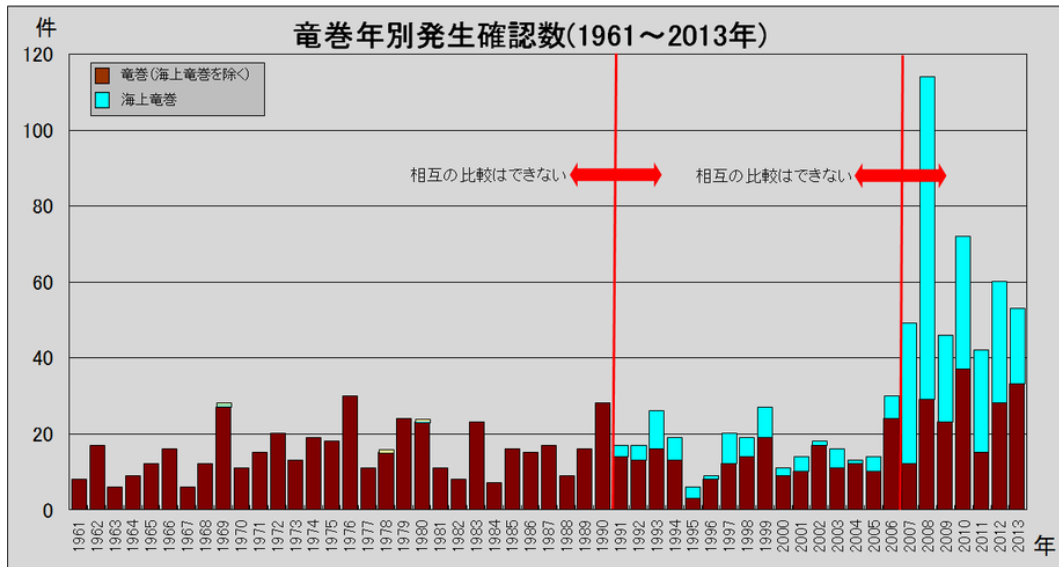


図 2.3.4.1 竜巻の年別発生確認数（気象庁 HP より）

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 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
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基に，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伴う被害幅または被害長さの情報がない竜巻には，被害幅または被害長さを有する竜巻の観測値を与えている。その際は，被害幅または被害長さが大きいほうから優先的に用いることで，被害幅または被害長さの平均値が大きくなるように工夫しているとともに，被害幅または被害長さ 0 のデータについては計算に用いておらず，保守的な評価を行っている。

このように，前述の F スケール不明の竜巻の取扱い等も含め，データについては保守的な評価となる取扱いを行っている。

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。

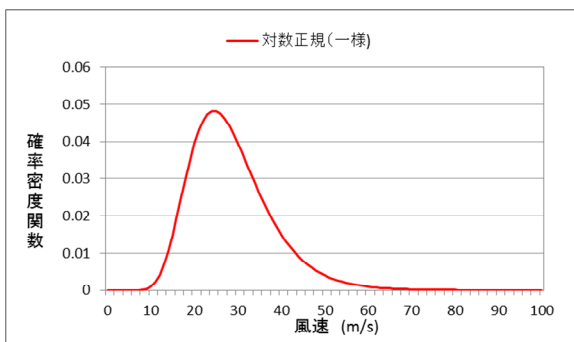


図2.3.5.1 竜巻風速の確率密度分布

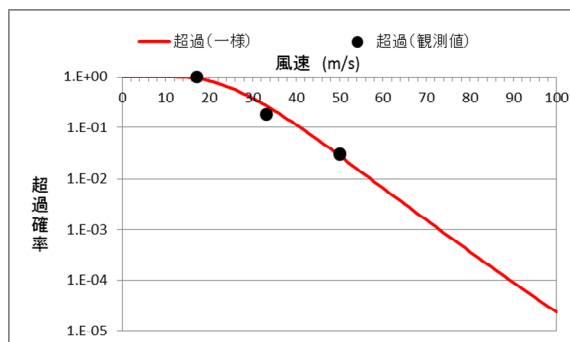


図2.3.5.2 竜巻風速の超過確率分布

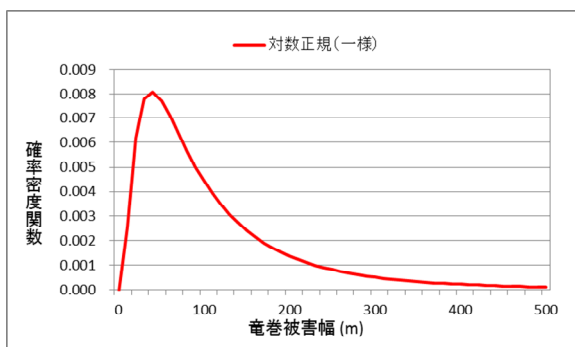


図2.3.5.3 被害幅の確率密度分布

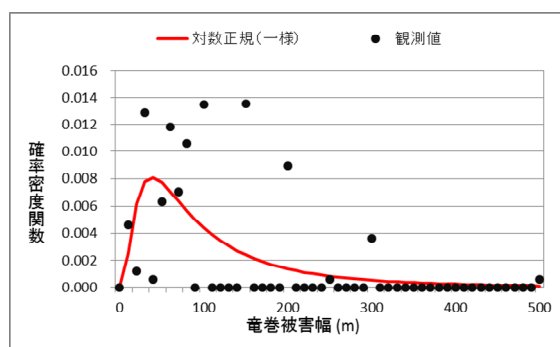


図2.3.5.4 被害幅の超過確率分布

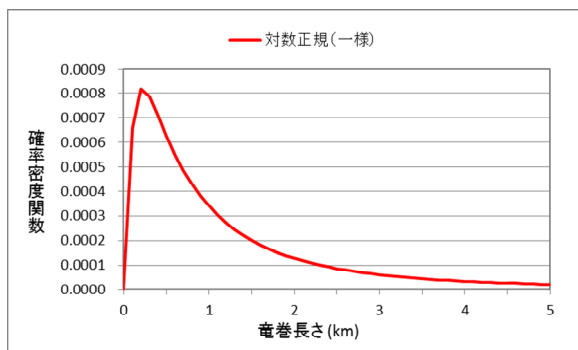


図2.3.5.5 被害長さの確率密度分布

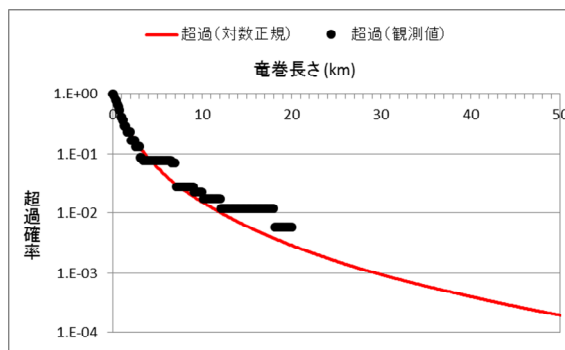


図2.3.5.6 被害長さの超過確率分布

表 2.3.5.1 竜巻風速, 被害幅, 被害長さの相関係数 (単位無し)

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号炉または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 $7.1 \times 10^4 \text{m}^2$)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。



図2.3.6.1 6号炉 竜巻影響エリア

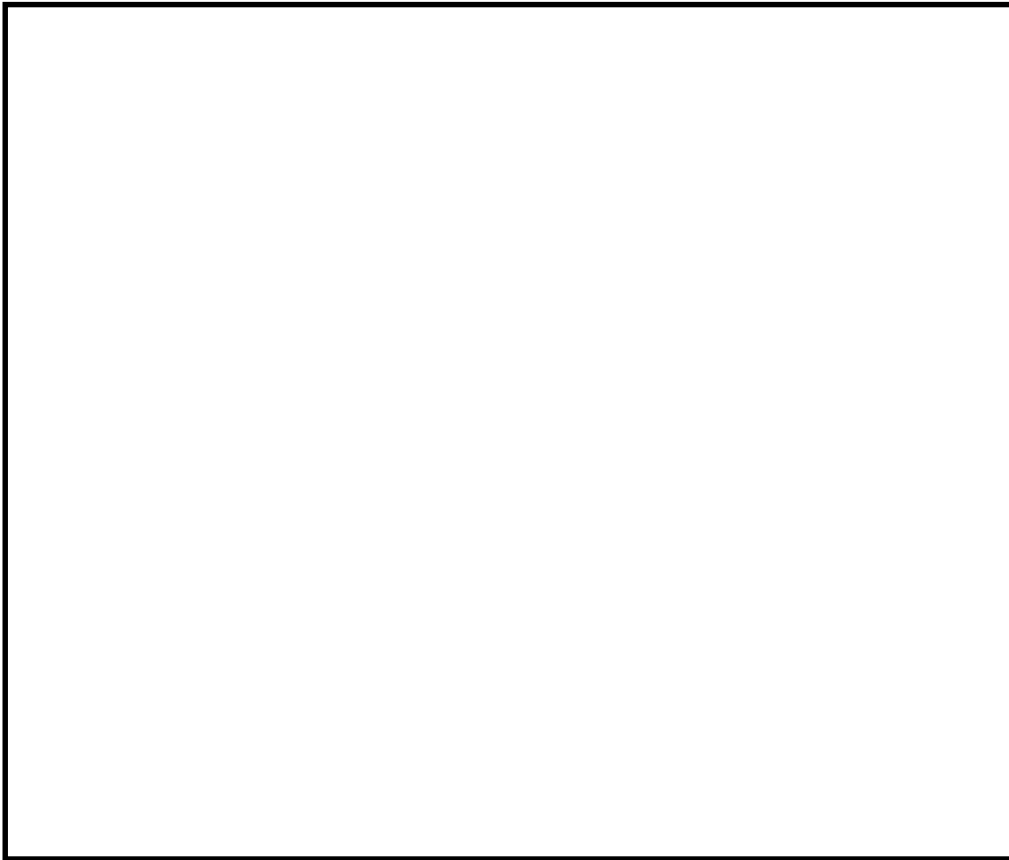


図2.3.6.2 7号炉 竜巻影響エリア

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。

$$P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} (1 + \beta vT)^{-N-1/\beta} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (1)$$

ここで、

N : 竜巻の年発生数
 v : 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。

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

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

$$P_{V_0,T}(D) = 1 - [1 + \beta v R(V_0) T]^{-1/\beta} \quad (3)$$

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33,395km²)、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。

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

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。

$$\begin{aligned}
E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
&+ \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty H(\alpha) l f(V, l, \alpha) dV dl d\alpha + \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) G(\alpha) f(V, w, \alpha) dV dw d\alpha \\
&+ AB \int_{V_0}^\infty f(V) dV \tag{5}
\end{aligned}$$

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時の長さであり、式(7)で示される。

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

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

$$\begin{aligned}
H(\alpha) &= B |\sin \alpha| + A |\cos \alpha| \\
G(\alpha) &= A |\sin \alpha| + B |\cos \alpha| \tag{7}
\end{aligned}$$

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。

$$\begin{aligned}
E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
&+ D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty l f(V, l) dV dl + D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw \\
&+ (D_0^2 \pi / 4) \int_{V_0}^\infty f(V) dV \tag{8}
\end{aligned}$$

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58.3m/sとなった。

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 原子力規制庁技術基盤課）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。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，竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速の年超過確率は 10^{-5} とする。

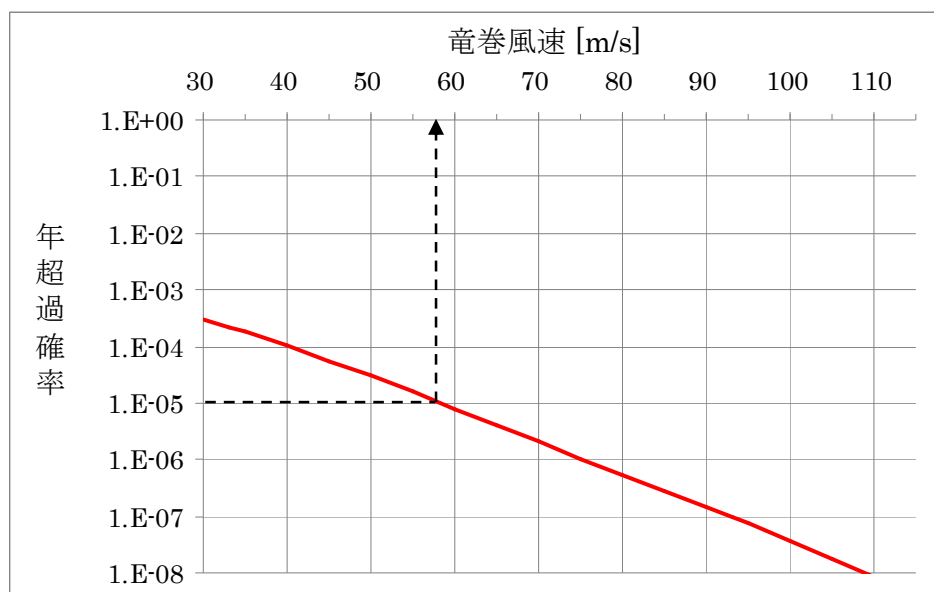
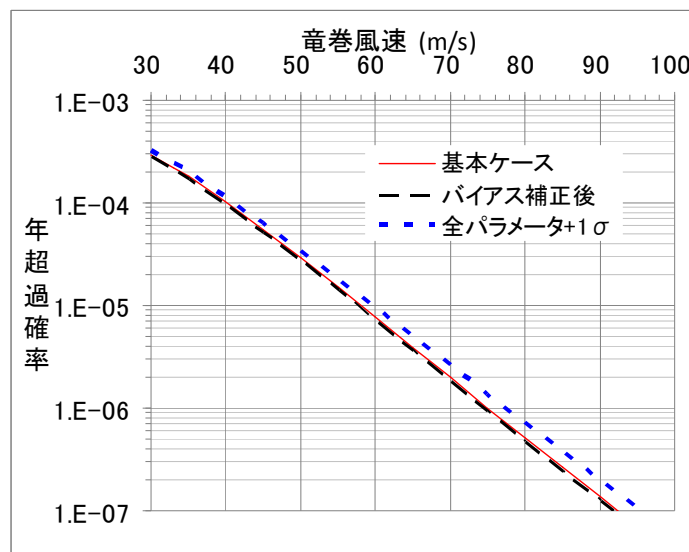


図2.3.8.1 竜巻最大風速のハザード曲線（海側，陸側5km範囲）

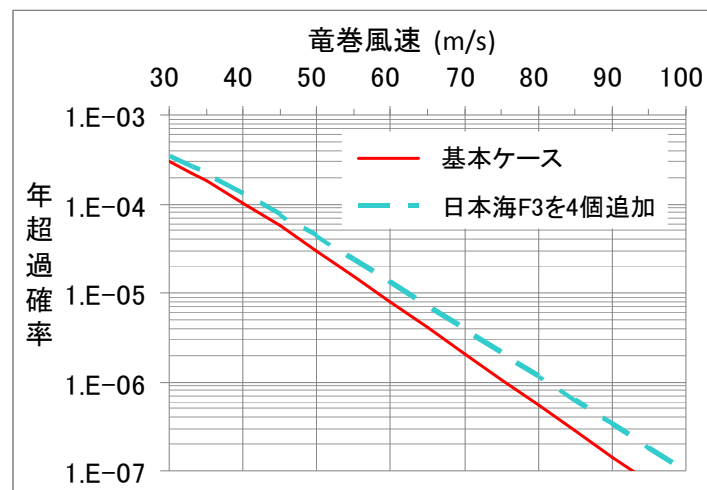
また、不確かさ要素のハザード算定結果への影響を検討した【添付資料2.3参考資料5】

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かさを表したハザード曲線により、これらの不確かさが十分小さいことを確認した。

更に、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 ハザード不確かさ検討結果

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 $V_{B2}=58.3$ m/sのうち、大きい風速は69m/sである。(表2.3.9.1)

また、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} に相当する風速である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。

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通りとなるが、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}	58.3
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

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 に示す通り竜巻の渦が上り斜面を移動する時（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時には強まる。

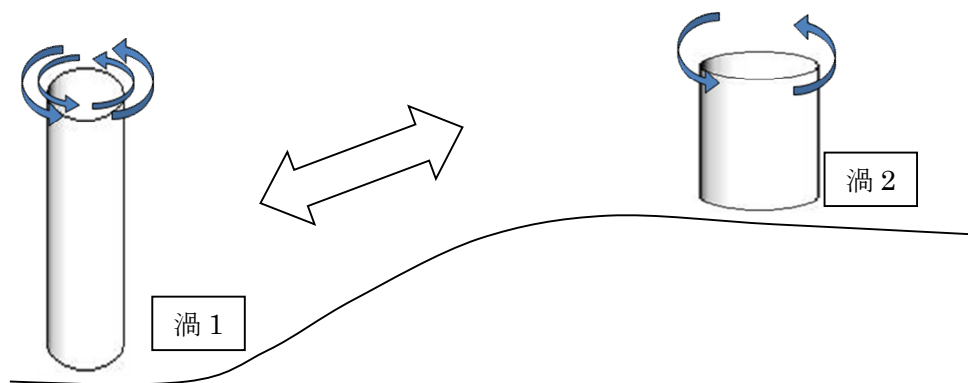


図 2.4.1.1 竜巻旋回流の地形影響に関する模式図

(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。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。

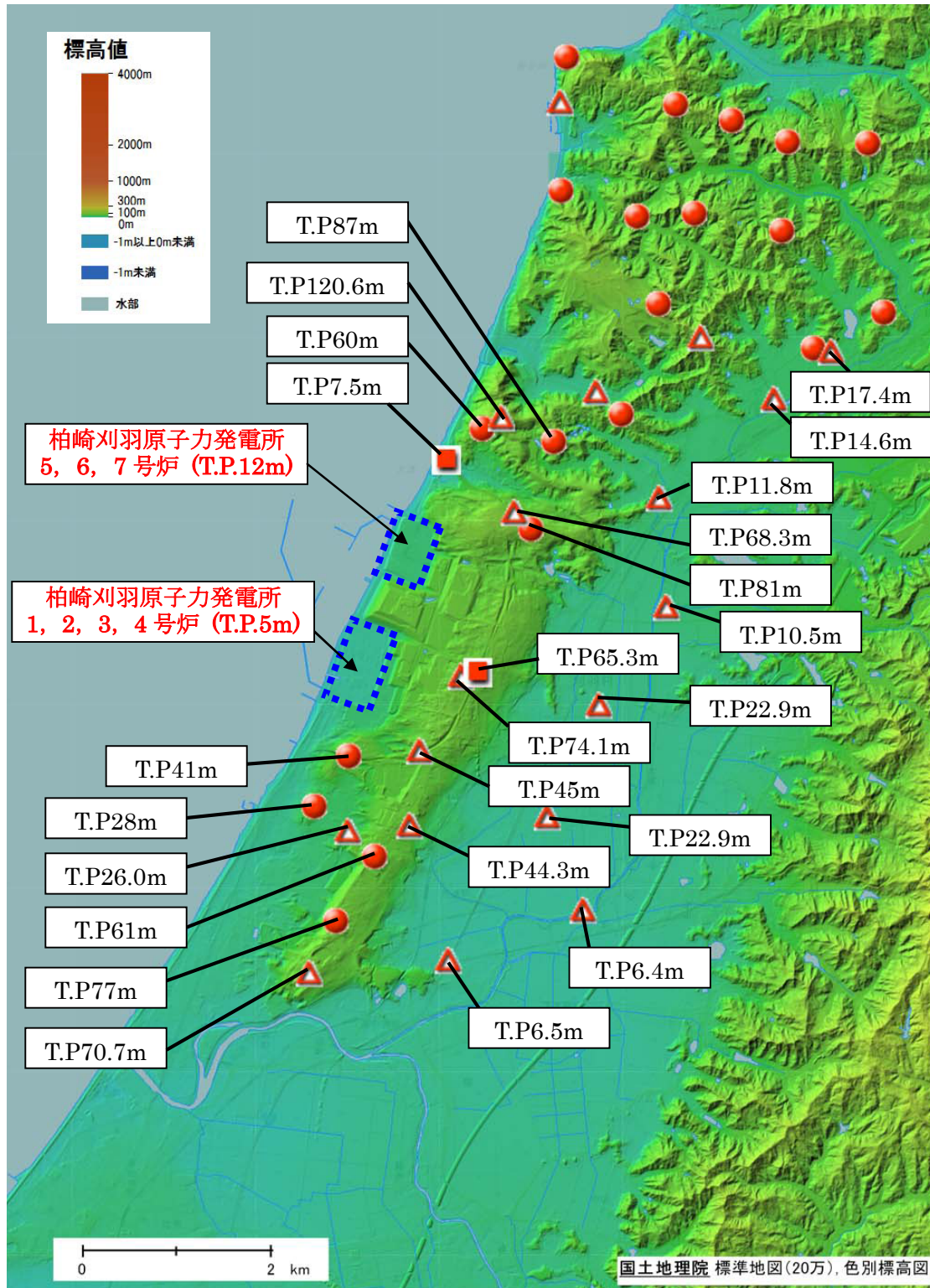


図 2.4.2.1 柏崎刈羽原子力発電所周辺の地形
(国土地理院「電子国土Web」より作成)

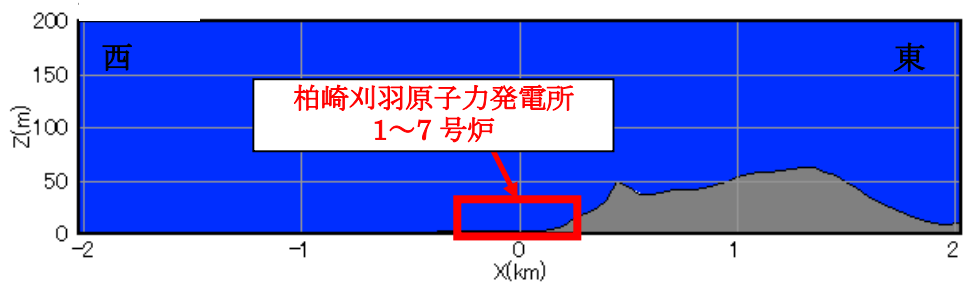


図 2. 4. 2. 2 柏崎刈羽原子力発電所東西方向の鉛直断面での地形起伏

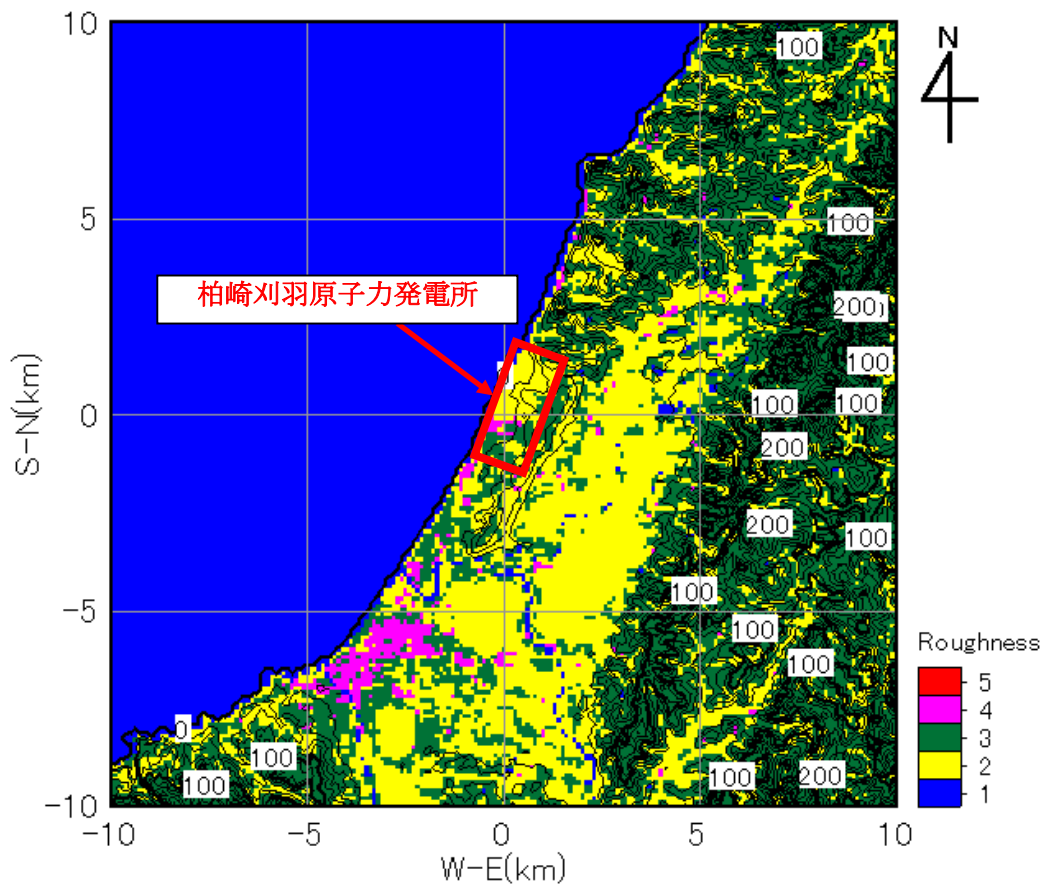


図 2. 4. 2. 3 柏崎刈羽原子力発電所周辺の地表面粗度

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（東北地方の日本海側）、④（新潟県・富山県）及び⑤（石川県）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。

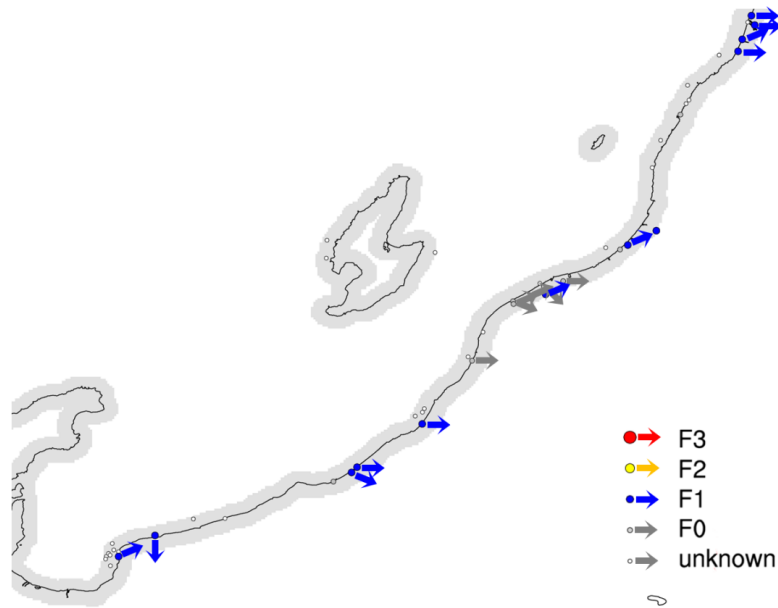


図2.4.3.1 竜巻集中地域④における竜巻移動方向（F0以上のみ）

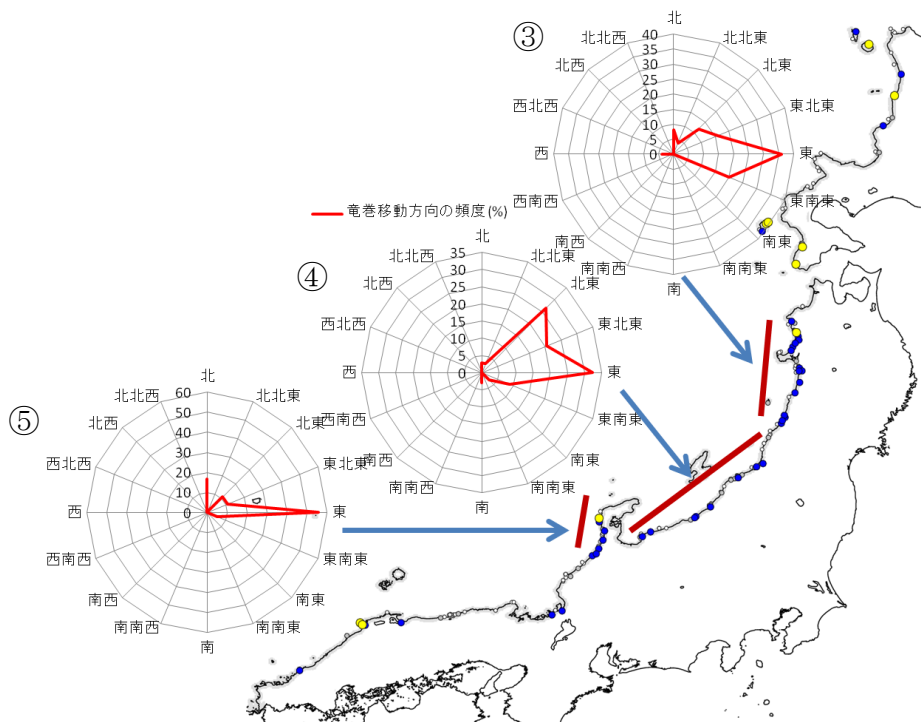


図 2.4.3.2 竜巻集中地域③，④及び⑤における竜巻移動方向の頻度

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越える必要がある。この場合の地形効果による増幅は、丘陵がなだらかであるため竜巻の増幅・減衰はない、もしくは丘陵の上り勾配と下り勾配で相殺される。

(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、粗度による減衰効果が期待できる。

2.4.5. 設計竜巻の最大風速 V_D

検討の結果、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する必要はないと考えられるが、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選定した場合の設計竜巻の特性値については、表 2.5.1 の通り設定する。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

最大瞬間風速(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せい弱と考えられる評価対象施設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} ：最大気圧低下量，A：施設の受圧面積

竜巻防護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、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6,7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6,7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解説表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

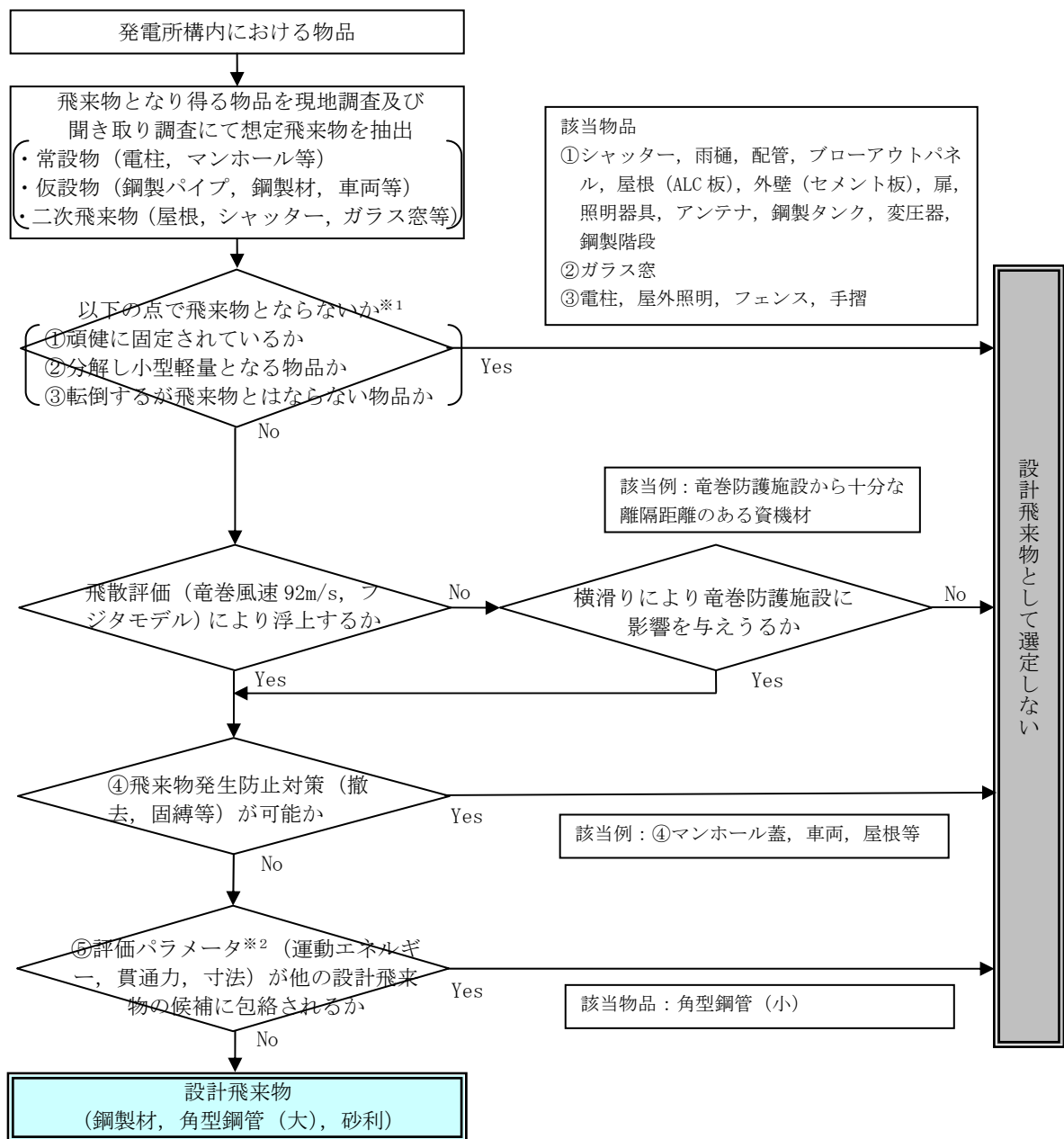
飛来物のうち、後述する設計飛来物に選定した鋼製材より運動エネルギー及び貫通力（コンクリートの貫通限界厚さ）が大のもの、角型鋼管（大）より貫通力（鋼板の貫通限界厚さ）が大のものについては、設置場所等に応じ固縛を行うことで飛散させないものとする。また、衝突時に防護施設に与えるエネルギーが鋼製材の運動エネルギーより小さいものについては、適切な飛散防止対策を行う。

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、鋼製材及び角型鋼管（大）を設計飛来物として選定した。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：評価対象施設に想定される損傷モードより、評価パラメータを設定

図 3.3.1.1 設計飛来物の選定フロー
6条-別添2(竜巻)-1-54

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(V_{Hmax})及び最大鉛直速度(V_{Vmax})は、(3) a. に示す竜巻風速92m/sにて、フジタモデルを仮定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。表3.3.1.1の通り、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、設計飛来物は回転して飛散すること、米国Regulatory Guide 1.76では飛来物(自動車)が9.1m(30feet)以下に影響を及ぼすこととしていることを踏まえ、設計飛来物は原則地上高10m迄影響を及ぼすものとして評価する。

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)
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
質量(kg)	0.2	135	28
最大水平速度(m/s)	14	10	16
最大鉛直速度(m/s)	7	7	7
浮き上がり高さ(m)	0.08	0.08	0.15
飛散距離(m)	18	9	20

③設計竜巻荷重の組み合わせ

評価対象施設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) 評価対象施設に常時作用する荷重，運転時荷重等

評価対象施設に常時作用する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，雹及び大雨である。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雹

雹は積乱雲から直径 5mm 以上の氷の粒^{※2}であり，仮に直径 10cm 程度の大型の雹を想定した場合，その重量は約 0.5kg となる。10cm 程度の雹の終端速度は 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，雹の衝突による荷重は設計竜巻荷重に包絡される。

④大雨

竜巻と大雨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、東京大学出版社

(3) 設計基準事故時荷重

設計竜巻は原子炉冷却材喪失事故などの設計基準事故の起因とはならないため、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、竜巻防護施設等のうち設計基準事故荷重が生じ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、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、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. 評価対象施設の設計方針

評価対象施設については、設計荷重に対してその構造健全性が維持され、評価対象設備以外の設備については、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、竜巻防護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（竜巻防護施設を内包する施設も含む。）

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、竜巻防護ネット、燃料移送ポンプ防護壁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竜巻防護ネット、燃料移送ポンプ防護壁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

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竜巻防護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竜巻防護施設が安全機能を損なわない設計とする。

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関する方針は(4)に示す。

(3) 外気との接続がある設備

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地上 10m より高いことを考慮すると、設計飛来物による衝撃荷重は作用しない。また、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非常用ディーゼル発電機非常用送風機

非常用ディーゼル発電機非常用送風機は、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非常用送風機を設置している区画の建屋開口部は地上10mより高いことを考慮すると、設計飛来物による衝撃荷重は作用しない。また、気圧差による荷重に対して、非常用ディーゼル発電機非常用送風機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。

③換気空調系（ディーゼル発電機電気区域換気空調系，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）

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。換気空調系の地上10m以下の建屋開口部に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。また、気圧差による荷重に対して、換気空調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。

(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

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）），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，6号炉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，6号炉タービン建屋海水熱交換器区域1階 階段室設置設備は、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））は、建屋開口部は地上10mより高いことを考慮すると、設計飛来物による衝撃荷重は作用しない。

(5) 竜巻防護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，設計飛来物による衝撃荷重は作用しない。また，風圧力による荷重に対して，転倒により外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器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，転倒により外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器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，転倒により外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器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，地上10mより高いことを考慮すると，設計飛来物による衝撃荷重は作用しない。

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，設計飛来物による衝撃荷重は作用しない。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竜巻随件事象の影響により外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器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に対し必要な構築物，系統及び機器を機能喪失させる可能性がある設備，火災発生により外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器の機能を喪失させる可能性がある設備，外部電源）

竜巻随件事象の影響により外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器の機能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. 竜巻随件事象に対する評価

竜巻随件事象は，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に対し必要な構築物，系統及び機器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

竜巻随件事象として，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，外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器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は到達しない，又は地上高 10m より低い場合には竜巻防護ネット等の竜巻防護対策設備を設置することから，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。火災源と外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器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に対し必要な構築物，系統及び機器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，外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器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は到達しない，又は地上高 10m より低い場合には竜巻防護ネット等の竜巻防護対策設備を設置することから，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，外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器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に対し必要な構築物，系統及び機器の安全機能に影響を与えることはない。

(3) 外部電源喪失

竜巻により，送電網等が損傷して外部電源喪失に至った場合，原子炉の負荷喪失となり，所内単独運転に移行して事象収束する可能性があるが，移行できず原子炉トリップした場合においても，自動的に非常用ディーゼル発電機から受電できるため，外部電源喪失の影響がなく原子炉の安全停止に影響を与えることはない。

1.1 重大事故等対処施設に対する考慮について

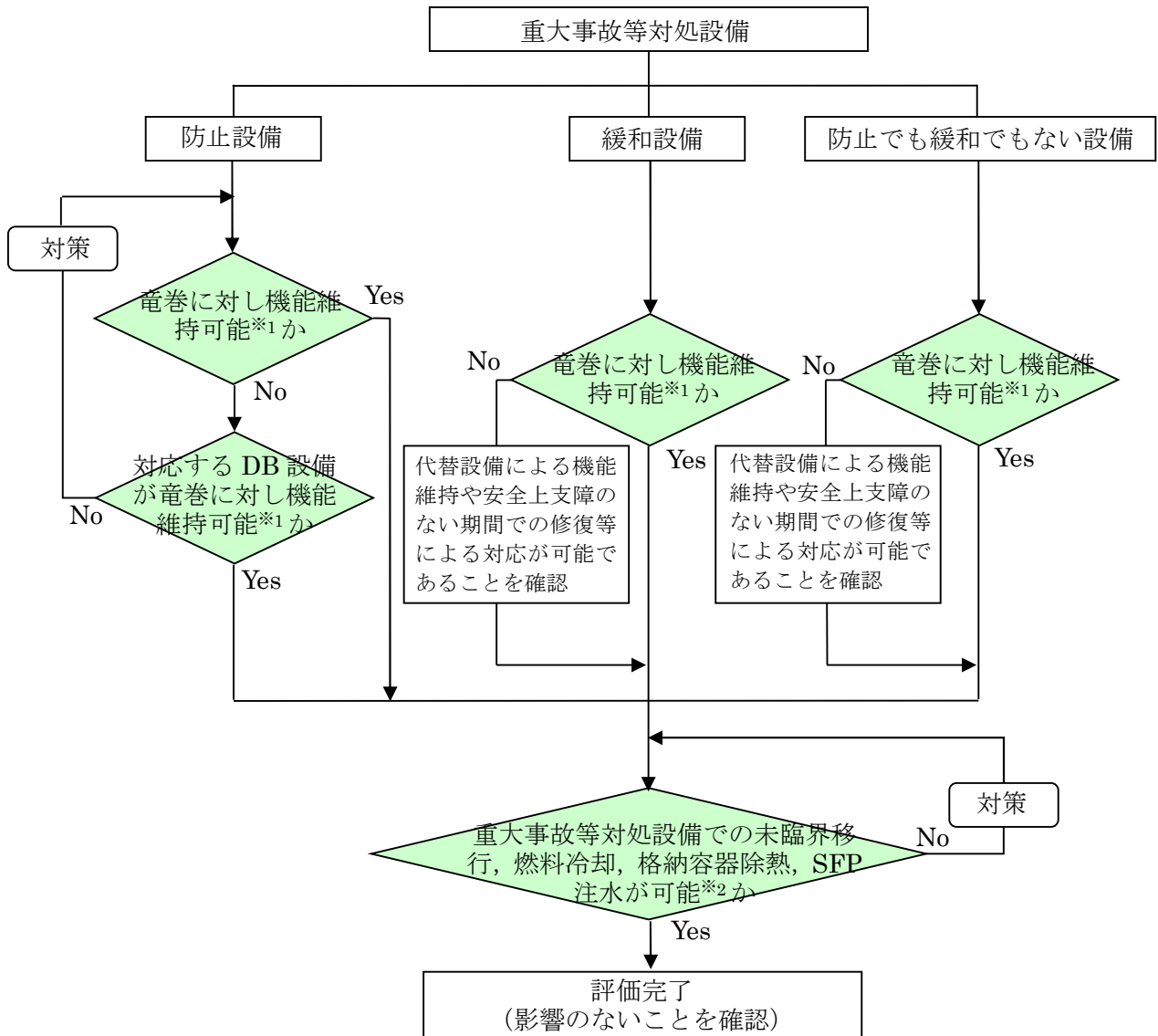
第43条の要求を踏まえ、設計竜巻によって、設計基準事故対処設備の安全機能と重大事故等対処設備の機能が同時に損なわれることがないことを確認するとともに、重大事故等対処施設の安全機能が喪失した場合においても、位置的分散又は頑健性のある外殻となる建屋による防護に期待できるといった観点から、代替手段により必要な安全機能を維持できることを確認する。

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、設計基準事故対処設備の安全機能と同時にその機能が損なわれる恐れのないこと
- (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、代替設備も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事故対処設備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といった観点から，代替手段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事故対処設備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

防護上の観点または機密に係わる事項を含む為、公開できません

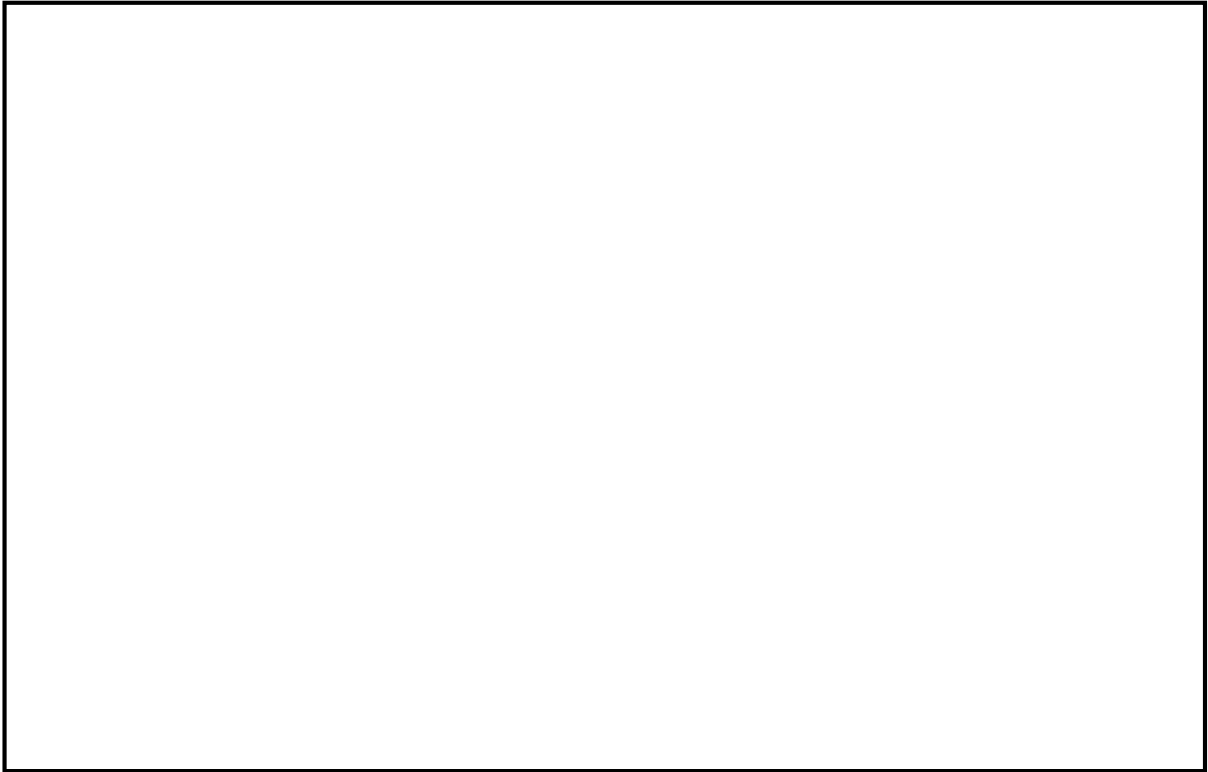


図 1.1.2 竜巻襲来時における代替手段による安全機能維持の例
(低圧代替注水系の場合)

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	設備設置箇所	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）	代替制御棒挿入機能	防止設備	R/B	○	建屋内
	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	R/B	○	建屋内
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）	原子炉隔離時冷却系	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
	高圧代替注水系	防止設備	R/B	○	建屋内
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）	代替自動減圧機能	防止設備	R/B	○	建屋内
	減圧制御〔自動減圧系の起動阻止スイッチ〕	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
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）〔MWCポンプ〕	防止設備・緩和設備	Rw/B	○	建屋内
	低圧代替注水系（可搬型）〔消防車〕	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（低圧代替注水系（常設））
	低圧代替注水系（可搬型）（常設箇所）〔消防車接続口、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））
	低圧代替注水系（常設箇所）〔原子炉圧力容器（注入先）、配管等〕	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内

○：竜巻に対し安全機能を維持できる
 又は竜巻による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）
 又は竜巻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

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	設備設置箇所	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（可搬部）〔代替Hx設備一式〕	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（原子炉補機冷却系）	
	代替原子炉補機冷却系（常設箇所）〔代替Hx接続口、配管等〕	防止設備・緩和設備	屋外T/B廻り	○	分散配置及び代替設備（原子炉補機冷却系）	
	代替原子炉補機冷却系（常設箇所）〔原子炉補機冷却系配管、Hx等〕	防止設備・緩和設備	R/B T/B	○	建屋内	
	真空破壊弁（S/C→D/W）	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内	
	耐圧強化ベント系（W/W及びFD/W）	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）		—	—	
	代替格納容器圧力逃がし装置 〔地下式フィルタベント〕	→50条に記載（うち、防止設備）		—	—	
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（MWC代替スプレイ）	防止設備・緩和設備	Rw/B R/B	○	建屋内	
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、配管等	防止設備・緩和設備 防止でも緩和でもない設備	屋内・屋外	○	代替設備（耐圧強化ベント、代替循環冷却）
		フィルタベントライン計装〔水素濃度計、放射線モニタ等〕	防止設備・緩和設備 防止でも緩和でもない設備	R/B, 屋外R/B廻り	○	建屋内（格納容器圧力逃がし装置側水素濃度計）及び代替設備（耐圧強化ベント用放射線検出器）
		格納容器圧力逃がし装置スクラバ水ph制御設備（可搬型）	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	建屋内
		窒素供給装置（可搬型）	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、代替循環冷却）
	代替格納容器圧力逃がし装置	フィルタ装置、よう素フィルタ、配管等	防止設備・緩和設備 防止でも緩和でもない設備	屋内・屋外（地下設置）	○	影響なし（屋内・地下）
		代替フィルタベントライン計装〔水素濃度計、放射線モニタ等〕	防止設備・緩和設備 防止でも緩和でもない設備	屋内・屋外（地下設置）	○	影響なし（屋内・地下）
		代替格納容器圧力逃がし装置薬液タンク	緩和設備	屋外（地下）	○	影響なし（地下）
		窒素供給装置（可搬型）	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、代替循環冷却）
代替循環冷却	復水移送ポンプ	→47, 49条に記載（うち、緩和設備）		—	—	
	代替Hx設備一式（可搬部）、配管等	→48条に記載（うち、緩和設備）		—	—	
	代替循環冷却用設備（常設）	緩和設備	R/B, T/B, Rw/B	○	建屋内	
	真空破壊弁（S/C→D/W）	→48条に記載（うち、緩和設備）		—	—	
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）	緩和設備	Rw/B	○	建屋内	
	格納容器下部注水系（可搬型）〔消防車〕	緩和設備	屋外	○	分散配置及び代替設備（格納容器下部注水系（常設））	
	格納容器下部注水系（可搬型）（常設箇所）〔消防車接続口、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））	
	格納容器下部注水系（常設箇所） 〔復水補給水系配管等〕	緩和設備	R/B Rw/B	○	建屋内	
	格納容器下部注水系（常設箇所） 〔原子炉格納容器（注入先）〕	→49条に記載（うち、緩和設備）		—	—	

○：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DB設備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

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	設備設置箇所	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）	格納容器内の水素濃度監視設備 〔格納容器水素濃度系（SA）格納容器酸素濃度計〕	緩和設備	R/B	○	建屋内
	格納容器圧力逃がし装置	→50条に記載		—	—
	代替格納容器圧力逃がし装置	→50条に記載		—	—
	耐圧強化ベント系（W/W）	→48条に記載（窒素供給装置（可搬型）は50条に記載）		—	—
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）	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〕	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	静的触媒式水素再結合器〔PAR〕	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監視設備	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
第54条（使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備）	原子炉建屋水素濃度計	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
	燃料プール代替注水系（可搬型）〔消防車〕	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（燃料プール代替注水系（常設））
	燃料プール代替注水系（可搬型）（常設箇所）〔消防車接続口、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（燃料プール代替注水系（常設））
	燃料プール代替注水系（常設箇所）〔配管、弁等〕	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	使用済燃料貯蔵プールの水位、プール水温度	防止設備・緩和設備	R/B	○	分散配置及び代替設備（FPC温度計）
	使用済燃料貯蔵プール放射線モニタ	防止設備・緩和設備	R/B	○	代替設備（FPC温度計）
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）	使用済燃料貯蔵プール監視カメラ	防止でも緩和でもない設備	R/B	○	代替設備（FPC温度計）
	放水設備一式 〔大容量送水車、放水砲〕	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	補修を実施
	放射性物質吸着剤	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	補修を実施
	海洋への拡散抑制設備 〔汚濁防止膜〕	緩和設備	屋外固体廃棄物処理建屋廻り	○	補修を実施
	海洋への拡散抑制設備 〔汚濁防止膜設置のための小型船舶〕	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な水の供給設備）	泡消火設備 〔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
	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・プール	緩和設備	R/B	○	建屋内
	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）	淡水貯水池	○	代替設備（復水貯蔵槽）
	淡水貯水池～ 防火水槽移送ホース	防止設備・緩和設備	地下敷設	○	影響なし（地下）
	海水	—	屋外	—	—
海水取水ポンプ、海水ホース （可搬型代替注水ポンプ）	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）	
		→47条に記載	—	—	—

○：竜巻に対し安全機能を維持できる
又は各竜巻による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）
又は各竜巻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

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	設備設置箇所	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〔GTG一式〕	防止設備・緩和設備	ガスタービン発電機保管場所	○	分散配置及び代替設備（非常用D/G）
	常設代替交流電源設備〔第二GTG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D/G）
	常設代替交流電源設備〔非常用高圧母線C・D系〕	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	可搬型代替交流電源設備〔電源車〕（移動式変圧器含む）	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D/G）
	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D/G）
	常設代替直流電源設備〔AM用直流125V蓄電池〕	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	常設代替直流電源設備〔蓄電池A系、A-2系〕	防止設備・緩和設備	C/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（直流電源設備）
	可搬型代替直流電源設備〔免震棟保管バッテリー〕	防止設備・緩和設備	免震重要棟	○	代替設備（直流電源設備）
	代替所内電源盤	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	6-7号炉電力融通ケーブル	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	（燃料設備（D/G軽油タンク））	→設計基準対象施設における評価対象施設		—	—
	（燃料設備（タンクローリー））	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（D/G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） 〔RPV温度・圧力・水位〕 〔RPV・格納容器への注水量〕 〔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〕 〔未境界監視〕 〔最終ヒートシンクによる冷却状態の確認〕 〔格納容器バイパス監視〕 〔水源の確保〕 〔原子炉建屋内水素濃度〕	防止設備・緩和設備	C/B R/B Rw/B	○	建屋内
第59条（原子炉制御室）	中央制御室及び生体遮蔽	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	中央制御室居住性（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生体遮へい	緩和設備	C/B	○	建屋内
	中央制御室待避室加圧用ポンペ	緩和設備	C/B	○	建屋内

○：竜巻に対し安全機能を維持できる
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも、対応するDB設備が各外部事象に対し安全機能を維持できる（防止設備）
又は竜巻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

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	設備設置箇所	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	○	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	免震重要棟 R/B（3号炉）	○	建屋内
	小型船舶		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
	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）
	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	○	補修を実施
第61条（緊急時対策所）	緊急時対策所〔KK3TSC〕及び生体遮蔽		防止設備・緩和設備	R/B（3号炉）	○	建屋内
	緊急時対策所〔KK3TSC〕居住性（空調機）		防止設備・緩和設備	R/B（3号炉）	○	建屋内
	3号炉原子炉建屋内緊急時対策所用電源車		防止設備・緩和設備	屋外	○	代替設備（3号炉非常用D/G）
	プラントのデータ表示システム〔KK3TSCデータ伝送装置、SPDS表示装置等〕		防止でもない緩和でもない設備	R/B（3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）
	緊急時対策所〔免震重要棟TSC〕及び生体遮蔽		防止設備・緩和設備	免震重要棟	○	代替設備（3号炉緊急対策所）
	緊急時対策所（免震重要棟TSC）居住性（空調機）		防止設備・緩和設備	免震重要棟	○	代替設備（3号炉緊急対策所）
	免震重要棟ガスタービン発電機		防止設備・緩和設備	免震重要棟	○	代替設備（3号炉緊急対策所）
	プラントのデータ表示システム〔免震重要棟TSCデータ伝送装置、SPDS表示装置等〕		防止でも緩和でもない設備	免震重要棟 （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）
（通信連絡設備）		—62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	R/B, T/B, C/B, Rw/B	○	建屋内
	所内外通信	衛星電話設備, 無線連絡設備（所内通信）	防止でも緩和でもない設備	C/B, 免震棟, R/B（3号炉） （屋外設備含む）	○	建屋（C/B, R/B（3号炉））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, 衛星系）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	C/B, 免震棟, R/B（3号炉） （屋外設備含む）	○	建屋（C/B, R/B（3号炉））内設備は影響なし。屋外設備については分散配置された代替設備（有線系, 無線系, 衛星系）により機能維持可能

○: 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DB設備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

1.2 竜巻防護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号炉及び7号炉における竜巻防護施設のうち、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：安全重要度クラス1，2及びクラス3に属する構築物，系統及び機器のうち、外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器*を抽出する。

※：原子炉停止，炉心冷却，使用済燃料プール冷却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設備を選定する。

また，上記以外の安全施設については，竜巻及びその随件事象に対して機能維持（「3.3 設計荷重の設定」に示す飛来物が影響を及ぼす高さ（原則地上10m迄）等を踏まえ，機能が維持されるかを確認）する，又は，竜巻及びその随件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，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換気空調設備等を評価対象とする。

Step4：竜巻防護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。

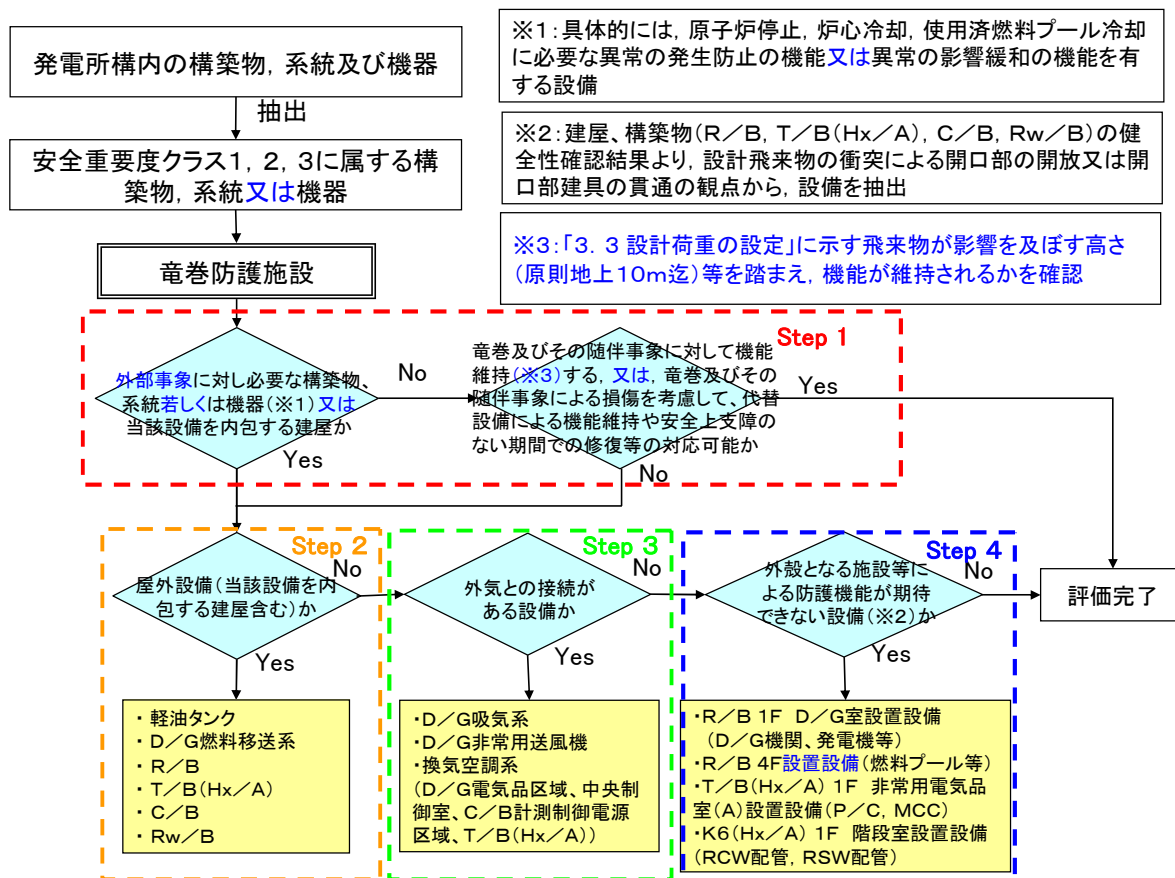


図 1.2.1 竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出フロー

表1.2.1 竜巻防護施設及び評価対象施設の抽出結果（1／4）

○:Yes ×:No -:該当せずもしくは評価完了

分類	機能	構築物、系統又は機能	配置場所	Step				評価対象施設	
				外部事象に対し必要な構築物、系統、機器	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	屋外設備（当該設備を内包する建屋含む）か	外気との接続がある設備か		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
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 （制御棒駆動系、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、原子炉隔離時冷却系、高圧炉心注水系、逃がし安全弁、自動減圧系）、 ・サブプレッションプール	R/B	○	—	×	×	×	—
	炉心冷却機能	・復水貯蔵槽	Rw/B	○	—	×	×	×	—
		・非常用炉心冷却系 （残留熱除去系、原子炉隔離時冷却系、高圧炉心注水系、自動減圧系） ・サブプレッションプール	R/B	○	—	×	×	×	—
	放射性物質の閉じ込め機能、放射線の遮へい及び放出低減機能	・腹水補給水系（復水貯蔵槽）	Rw/B	○	—	×	×	×	—
		・原子炉格納容器	R/B	○	—	×	×	×	—
		・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	R/B	○	—	×	×	×	—
		・残留熱除去系（原子炉格納容器スプレイ冷却モード）	R/B	○	—	×	×	×	—
		・原子炉建屋	R/B	○	—	○	—	—	○
		・非常用ガス処理系 （排風機、乾燥装置、フィルタ装置）	R/B	×	○	—	—	—	—
	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	・非常用ガス処理系 （原子炉建屋原子炉棟吸込口から排気筒頂部までの配管、弁）	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	×	○	—	—	—	—	
・安全保護系		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	○	—	×	×	○	○	
	・非常用所内電源系 （ディーゼル発電設備吸気系）	R/B	○	—	×	○	—	○	
	・D/G本体設備に係わる空調系 （D/G非常用送風機）	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配路）	R/B, C/B, T/B	○	—	×	×	○※1	○	
	・軽油タンク	屋外	○	—	○	—	—	○	
	・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へい	C/B	○	—	×	×	×	—	
	・中央制御室換気空調系	C/B	○	—	×	○	—	○	
・原子炉補機冷却水系	T/B	○	—	×	×	○	○		
・原子炉補機冷却海水系	T/B	○	—	×	×	○	○		
・直流電源系	R/B, C/B	○	—	×	×	×	—		
・計測制御電源系	R/B, C/B	○	—	×	×	×	—		

※1 K6, 7 Hx/A 1F 非常用電気品室(A)内のP/C, MCCは、飛来物の侵入・衝突による損傷リスク有り。

※2 K6 Hx/A 1F 階段室内のRCW,RSW配管は、飛来物の侵入・衝突による損傷リスク有り。

表1.2.1 竜巻防護施設及び評価対象施設の抽出結果（2 / 4）

○:Yes ×:No -:該当せずもしくは評価完了

分類	機能	構築物、系統又は機能	配置場所	Step1		Step2	Step3	Step4	評価対象施設
				外部事象に対し必要な構築物、系統、機器	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	屋外設備（当該設備を内包する建屋含む）か	外気との接続がある設備か	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	
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	○	-	×	×	×	-
	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	○	-	×	×	○	○
		・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	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	○	-	×	×	×	-	
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 (D/G制御室空調系 (DG/Z送風機・排風機))	R/B	○	-	×	○	-	○
		・非常用所内電源系空調 (C/B計測制御電源盤区域送風機・排風機)	C/B	○	-	×	○	-	○
		・非常用所内電源系空調 (Hx/A非常用送風機)	T/B (Hx/A)	○	-	×	○	-	○
	燃料プール水の補給機能	・残留熱除去系 ・放射性気体廃棄物処理系 (オフガス系) 隔離弁	R/B T/B	○ ×	- ○ (屋内設備のため、影響なし)	×	×	×	-
	放射性物質放出の防止機能	・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	×	○ (設置高さより飛来物影響なし)	-	-	-	-
		・燃料プール冷却浄化系の燃料プール入口逆止弁 ・原子炉建屋原子炉棟	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、ブローアウトの閉止を実施)	×	×	○	○
		・非常用ガス処理系	R/B	×	○ (設置高さより飛来物影響なし)	-	-	-	-
	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)	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	○	-	×	×	×	-

表1.2.1 竜巻防護施設及び評価対象施設の抽出結果（3／4）

○:Yes ×:No -:該当せずもしくは評価完了

分類	機能	構築物、系統又は機能	配置場所	Step					評価対象施設
				外部事象に対し必要な構築物、系統、機器	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	
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	・原子炉再循環系	R/B	×	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	-	-	-
	放射性物質の貯蔵機能	・サブプレッションプール水サージタンク	屋外	×	○ (運用停止中のため、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 (ドラム缶)	固体廃棄物貯蔵庫	×	○ (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))	-	-	-	-
		・固体廃棄物処理設備	固体廃棄物処理建屋	×	○ (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)	-	-	-	-
	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 ・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	開閉所	×	○ (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 (RWM含む) ・原子炉核計装 ・原子炉プロセス計装	C/B	×	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	-	-	-
	プラント運転補助機能	・補助ボイラー設備	補助ボイラー建屋	×	○ (補修を実施)	-	-	-	-
		・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	T/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射防止機能	・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)	-	-	-	-

表 1.2.1 竜巻防護施設及び評価対象施設の抽出結果（4 / 4）

○:Yes ×:No -:該当せずもしくは評価完了

分類	機能	構築物、系統又は機能	配置場所	Step					評価対象施設
				外部事象に対し必要な構築物、系統、機器	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	
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	・原子炉冷却材再循環系（再循環ポンプトリップ機能）	R/B	×	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	-	-	-
		・制御棒引放監視装置	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	・原子炉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	原子力発電所緊急時対策所	免震重要棟	×	○ (代替設備(3号炉緊急対策所)により機能維持可能)	-	-	-	-
			R/B(3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)	-	-	-	-
			所外通信	・無線系 マイクロ波無線鉄塔	×	○ (分散配置された代替設備(衛星系(3号炉)、有線系)により機能維持可能)	-	-	-
		・有線系 送電鉄塔		×	○ (分散配置された代替設備(衛星系、無線系)により機能維持可能)	-	-	-	-
		所内外通信	免震重要棟(屋外設備含む)	×	○ (代替設備(衛星系(3号炉)、無線系(3号炉)、有線系)により機能維持可能)	-	-	-	-
			・有線系 ・無線系 ・衛星系 R/B(3号炉)(屋外設備含む)	×	○ (建屋内設備は影響なし。屋外設備は代替設備(衛星系(免震重要棟)、無線系(マイクロ波無線鉄塔、免震重要棟)、有線系)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)	×	○ (建屋(免震重要棟除く)内及び地下布設のため影響なし)	-	-	-	-
			屋外設備	×	○ (復旧(PHS基地局)により機能維持可能)	-	-	-	-
		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)	-	-	-	-
	放射線監視設備(放射能観測車)	可搬型SA設備保管場所	×	○ (代替設備(放射線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	×	○ (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)	-	-	-	-	
	消火系	給水建屋 水処理建屋	×	○ (代替設備(防火水槽等)により機能維持可能)	-	-	-	-	
ろ過水タンク(屋外配管含む)		×	○ (代替設備(防火水槽等)により機能維持可能)	-	-	-	-		
泡消火設備		×	○ (代替設備(消防車)により機能維持可能)	-	-	-	-		
安全避難通路、非常照明	各建屋内	×	○ (屋内設備のため、影響なし)	-	-	-	-		

1.3 耐震Sクラス設備について

竜巻防護施設のうち評価対象施設としては、「安全重要度クラス1, 2, 3に属する構築物, 系統及び機器」より抽出をしているが, 「基準地震動およ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。

図1.3.1に耐震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。

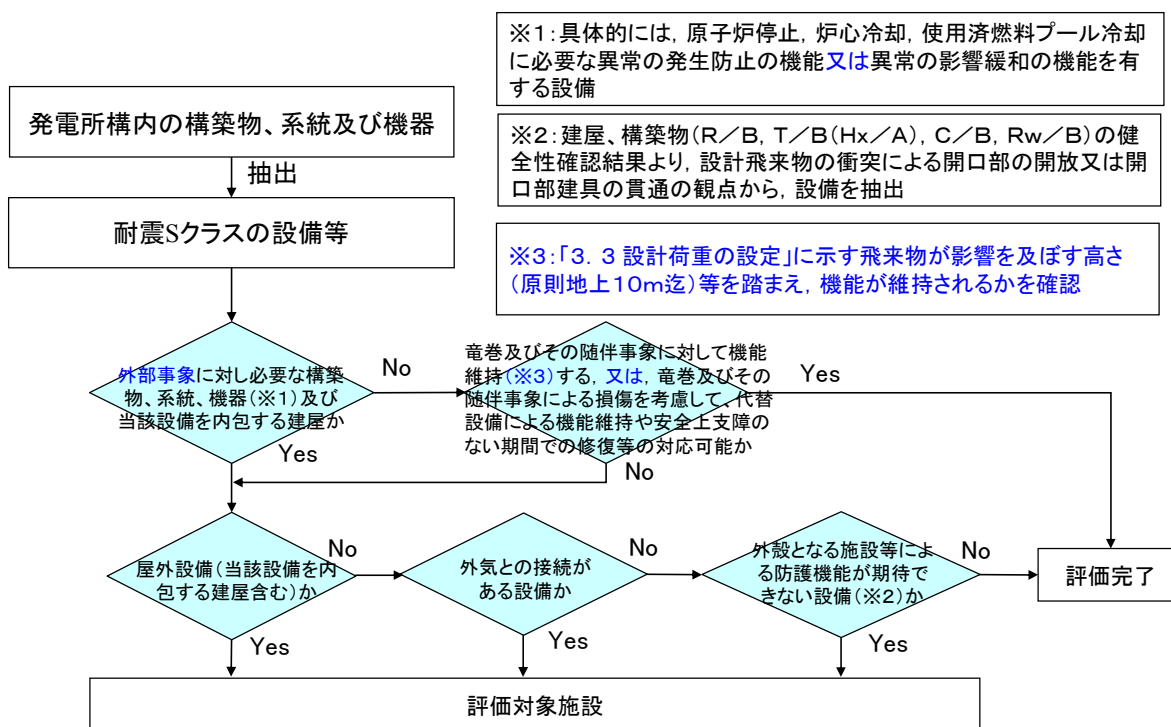


図 1.3.1 耐震Sクラス設備等のうち評価対象施設の抽出フロー

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フロー（1 / 2）

○:Yes、×:No、-:該当せずもしくは評価完了

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	Step1		Step2	Step3	Step4	評価対象施設	
					外部事象に対し必要な構築物、系統、機器	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	屋外設備か	外気との接続がある設備か	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		
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	○	-	×	×	×	-	
		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	○	-	×	×	×	-	
		直接支持構造物	・原子炉圧力容器支持スカート部 ・機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	R/B R/B、C/B	○ ○	- -	×	×	×	- -	
		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	○	-	×	×	○	○ (抽出済)
		補助設備	・燃料プール水補給設備（残留熱除去系） ・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 R/B	○ ○	- -	×	×	×	○ ○	- (抽出済)
		直接支持構造物	・計装設備 ・機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	C/B R/B、C/B	○ ○	- -	×	×	×	×	- -
		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	○	-	×	×	×	-	
		補助設備	・炉心支持構造物 ・チャンネル・ボックス ・電気計装設備	R/B C/B	○ ○	- -	×	×	×	×	- -
		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	○	-	×	×	×	-	
		主要設備	・原子炉隔離時冷却系 ・高圧炉心注水系 ・冷却水源としてのサブプレッション・チェンバ	R/B	○	-	×	×	×	-	
		補助設備	・原子炉補機冷却系 ・炉心支持構造物 ・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）	T/B R/B R/B	○ ○ ○	- - -	×	×	○	○ ○ (抽出済)	
		直接支持構造物	・計装設備 ・当該施設の機能維持に必要な空調設備	C/B R/B、T/B、C/B	○ ○	- -	×	×	×	○ ○ (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	○	-	×	×	×	-	
		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ブプレッション・チェンバ	R/B	○	-	×	×	×	-	
		補助設備	・原子炉補機冷却系 ・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）	T/B R/B	○ ○	- -	×	×	○	○ ○ (抽出済)	
		直接支持構造物	・計装設備 ・中央制御室の遮へい ・中央制御室換気空調系 ・当該施設の機能維持に必要な空調設備	C/B C/B C/B	○ ○ ○	- - -	×	○	×	○ ○ (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	○	-	×	×	×	○ (抽出済)	
		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	○	-	×	×	×	-	
		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	○	-	×	×	×	-	
		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	○	-	×	×	×	-	

※ K6 Hx/A 1F 階段室内のRCW.RSW配管は、飛来物の侵入・衝突による損傷リスク有り。

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フロー (2 / 2)

○:Yes、×:No、-:該当せずもしくは評価完了

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	Step1	Step2	Step3	Step4	評価対象施設		
					外部事象に対し必要な構築物、系統、機器	電巻及びその随伴事象に対して機能維持する、又は、電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	屋外設備か	外気との接続がある設備か		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	
Sクラス	放射線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ブプレッション・チェンバ	R/B	○	-	×	×	×	-	
			・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、 プロットハッチの閉止を実施)	-	-	-	-	
			・非常用ガス処理系及び排気口	R/B, 屋外	×	○ (設置高さより飛来物影響なし)	-	-	-	-	
		補助設備	・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)	R/B	○	-	×	×	×	○	×
			・原子炉補機冷却系	T/B	○	-	×	×	○*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	○	-	×	×	○	○	○ (抽出済)
			・計装設備 ・当該施設の機能維持に必要な空調設備	C/B	○	-	×	×	×	×	-
		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	○	-	×	×	×	○ (D/G制御室空調系、 C/B計測制御電源版区域 送風機・排風機、Hx/A 非常用送風機)	○ (抽出済)
		津波防護機能を有する設備(※2)	主要設備	- (※3)	-	-	-	-	-	-	-
			補助設備	-	-	-	-	-	-	-	-
			直接支持構造物	-	-	-	-	-	-	-	-
浸水防止機能を有する設備(※2)	主要設備	・浸水防止設備(水密扉、閉止板)	R/B, T/B, Rw/B, C/B	×	○ (補修を実施)	-	-	-	-		
	補助設備	-	-	-	-	-	-	-	-		
	直接支持構造物	-	-	-	-	-	-	-	-		
津波監視機能を有する設備(※2)	主要設備	・津波監視カメラ、取水ビット水位計	屋外	×	-	-	-	-	-		
	補助設備	-	-	-	-	-	-	-	-		
	直接支持構造物	-	-	-	-	-	-	-	-		

※1 K6 Hx/A 1F 階段室内のRCW.RSW配管は、飛来物の侵入・衝突による損傷リスク有り。

※2要求はS8機能維持

※3防潮堤については、電巻襲来時に必要としない設備であるため、評価対象施設から除外する。

なお、設計電巻と津波の重畳事象を考慮した場合、大湊側に設置する施設等は、電巻により防潮堤が損傷した場合であっても、防潮堤によらず敷地高さにより津波からの防護が可能。

荒浜側に設置する施設等(免震重要棟、3号炉緊急対策棟、アクセスルート)は、防潮堤により津波から防護するため、電巻により荒浜側防潮堤が損傷した場合には、必要に応じプラント停止し、復旧措置を実施する。

1.4 竜巻防護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

竜巻防護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、外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器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、外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器も機能喪失する機能的影響、竜巻随件事象（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に竜巻防護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。

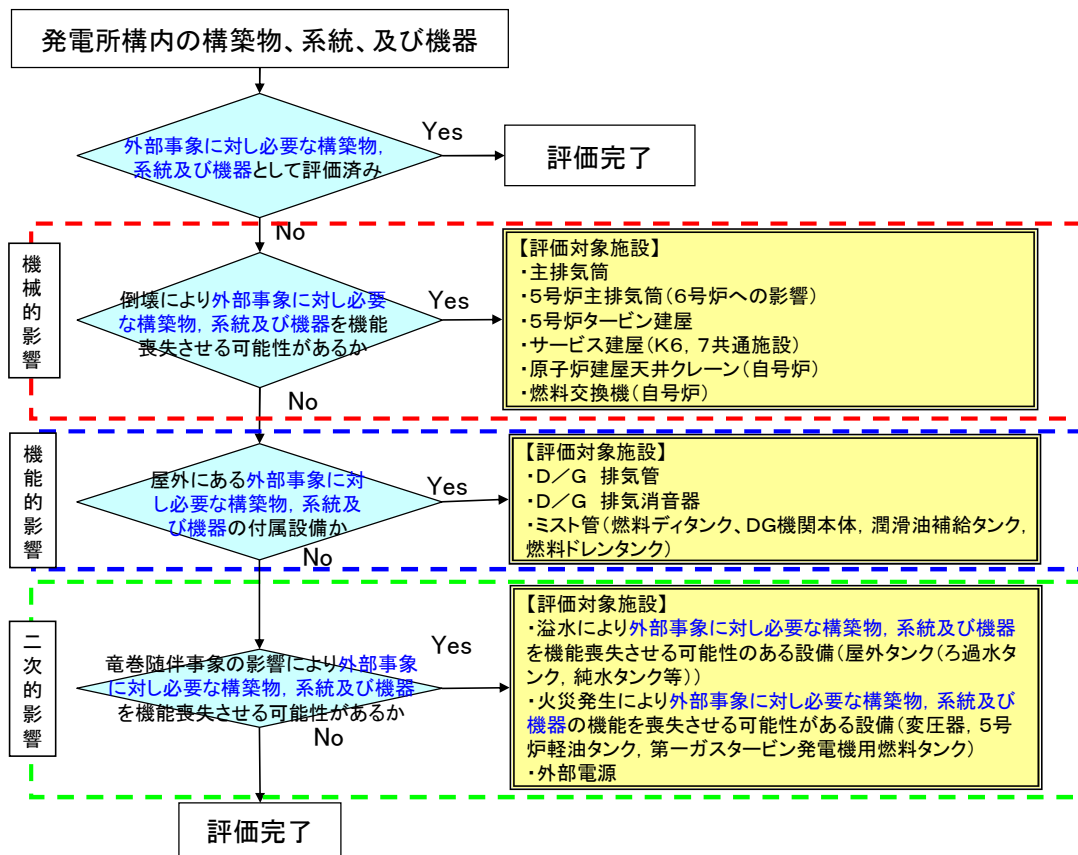


図 1.4.1 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出フロー

(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，外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器又は当該設備の外殻となる建屋周辺の施設が倒壊することにより，外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器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に示す通り，施設の高さが外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器又は当該設備の外殻となる建屋との距離以上である施設を抽出した。

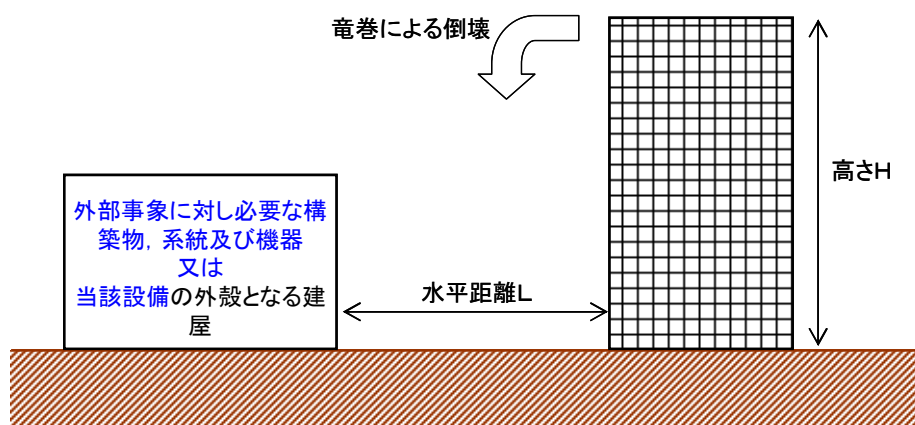


図 1.4.2 地上高さが外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器又は当該設備の外殻となる建屋との距離以上である施設（高さ $H \geq$ 水平距離 L ）

外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器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，外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器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に対し必要な構築物，系統及び機器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。

(倒壊により外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器を機能喪失させる可能性がある施設)

- a. 建屋・構築物
 - ・主排気筒
 - ・5号炉主排気筒（6号炉への影響）
 - ・5号炉タービン建屋
 - ・サービス建屋（6・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に対し必要な構築物，系統及び機器の付属設備か」）から，機能喪失に陥った場合に，外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器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，外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器も機能喪失する可能性がある屋外の外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器の付属設備として，以下を抽出した。

（屋外にある外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器の付属設備）

- ・ディーゼル発電設備 排気管
- ・ディーゼル発電設備 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に対し必要な構築物，系統及び機器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に対し必要な構築物，系統及び機器の開口部より，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，外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器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に対し必要な構築物，系統及び機器及び当該設備の外殻となる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号炉及び7号炉の軽油タンクについては，外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器として抽出済であることから，本項目では抽出しない。

（竜巻随伴事象の影響により外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器

を機能喪失させる可能性がある施設)

- 溢水により外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器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，苛性ソーダ貯槽，硫酸貯槽）
- 火災発生により外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器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	近傍の外部事象に対し必要な構築物， 系統及び機器並びに当該設備の外殻 となる建屋	高さ	外部事象に対し 必要な構築物， 系統及び機器ま での最短距離	評価対象 施設
サービス建屋 (6, 7号共通施設)	コントロール建屋	17m	隣接	○
6号 主排気筒	コントロール建屋， 6号 原子炉建屋	46.8m ^{※1}	隣接	○
7号 主排気筒	7号 原子炉建屋	46.8m ^{※2}	隣接	○
5号 主排気筒	6号 原子炉建屋， 6号 軽油タンク， コントロール建屋	148m	約30m	○
5号 主排気筒モニタ 建屋	6号 軽油タンク	10m以下	約60m	×
5号 原子炉建屋 ^{※3}	6号 原子炉建屋	39m	約60m	×
5号 タービン建屋	6号 タービン建屋 海水熱交換器区域	33.1m	約10m	○
5号 サービス建屋	6号 原子炉建屋	17.89m	約150m	×
5号 循環水ポンプ建 屋	6号 タービン建屋 海水熱交換器区域	21.78	約80m	×
5号 海水熱交換器建 屋 ^{※3}	6号 タービン建屋 海水熱交換器区域	13.8m	約90m	×
出入管理所	6号 軽油タンク	10m以下	約40m	×
待合室	6号 軽油タンク	10m以下	約30m	×
給水建屋	6号及び7号 軽油タンク	10m以下	約100m	×
予備品倉庫	7号 軽油タンク	10m以下	約70m	×
発電倉庫	7号 軽油タンク	10m以下	約90m	×
ランドリ建屋	6号 原子炉建屋， 6号 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 原子炉建屋， 6号 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 原子炉建屋， コントロール建屋	17m	約170m	×
避雷鉄塔 ^{※4}	7号 タービン建屋 海水熱交換器区域	149.5m	約250m	×

※1 : 6号 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 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号炉の竜巻防護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，防護対象施設に最寄り鉄塔として記載した。

表 1.4.2 竜巻防護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	配置場所	外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器として評価済みか	機械的影響	機能的影響
					倒壊により外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器を機能喪失させる可能性があるか	屋外にある外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器の付属設備か
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	R/B	×	×	×
	過剰反応度の印加防止機能	・制御棒カップリング	R/B	×	×	×
	炉心形状の維持機能	・炉心支持構造物	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	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, 原子炉隔離時冷却系, 高圧炉心注水系, 逃がし安全弁, 自動減圧系), ・サブ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	R/B	×	×	×
		・復水貯蔵槽	Rw/B	×	×	×
	放射線物質の閉じ込め機能, 放射線の遮へい及び放出低減機能	・原子炉格納容器	R/B	×	×	×
		・原子炉建屋	R/B	○	×	×
		・非常用ガス処理系 (排風機, 乾燥装置, フィルタ装置)	R/B	×	×	×
		・非常用ガス処理系 (原子炉建屋原子炉棟吸込口から排気筒頂部までの配管, 弁)	R/B 屋外	×	×	×
		・可燃性ガス濃度制御系 ・主排気筒 (非常用ガス処理系排気筒の支持機能)	R/B 屋外	×	×	×
	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	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	○	×	○ (ディーゼル発電設備 排気管, 排気消音器, ミスト管 (燃料ディーゼルタンク, 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 (ディーゼル発電設備吸気系)	R/B	○	×	
・D/G本体設備に係わる空調系 (D/G非常用送風機)		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回路)		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へい		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		T/B	○	×		
・取水路 (屋外トレンチ含む)		屋外(地下)	×	×		
・直流電源系 ・計測制御電源系		R/B, C/B	×	×		

表 1.4.2 竜巻防護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	配置場所	外部事象に対し必要な構築物, 系統及び機器として評価済みか	機械的影響	機能的影響
					倒壊により外部事象に対し必要な構築物, 系統及び機器を機能喪失させる可能性があるか	屋外にある外部事象に対し必要な構築物, 系統及び機器の付属設備か
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	×	×	×
	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	・原子炉隔離時冷却系タービン蒸気供給ライン	R/B	×	×	×
		・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	×	×	×
	燃料を安全に取り扱う機能	・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	×	×	×
安全弁及び逃がし弁の吹き止まり機能	・燃料交換機 ・原子炉建屋クレーン	R/B	×	○	×	
MS-2	安全上特に重要な関連機能の間接関連系	・逃がし安全弁 (吹き止まり機能に関連する部分)	R/B	×	×	×
		・非常用所内電源系空調 (D/G制御室空調系 (DG/Z送風機・排風機))	R/B	○	×	×
		・非常用所内電源系空調 (C/B計測制御電源盤区域送風機・排風機)	C/B	○	×	×
		・非常用所内電源系空調 (Hx/A非常用送風機)	T/B (Hx/A)	○	×	×
	燃料プール水の補給機能	・残留熱除去系	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	×	○	×
	事故時のプラント状態の把握機能	・燃料プール冷却浄化系の燃料プール入口逆止弁	R/B	○	×	×
		・原子炉建屋原子炉棟	R/B	×	×	×
		・非常用ガス処理系	R/B	×	×	×
制御室外からの安全停止機能	・事故時監視計器の一部 (格納容器エリアモニタ)	C/B	×	×	×	
	・制御室外原子炉停止装置 (安全停止に関連するもの)	R/B	×	×	×	

表 1.4.2 竜巻防護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	配置場所	外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器として評価済みか	機械的影響	機能的影響		
					倒壊により外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器を機能喪失させる可能性があるか	屋外にある外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器の付属設備か		
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	・原子炉再循環系	R/B	×	×	×		
	放射性物質の貯蔵機能	・サブプレッション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 ・固体廃棄物処理系						
		・固体廃棄物貯蔵庫 (ドラム缶)	固体廃棄物貯蔵庫	×	×	×		
		・固体廃棄物処理設備	固体廃棄物処理建屋	×	×	×		
		・新燃料貯蔵庫	R/B	×	×	×		
		・新燃料貯蔵ラック						
	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 ・給水系 ・循環水系	T/B	×	×	×		
		・送電線	屋外	×	×	×		
		・変圧器	屋外	×	×	×		
		・開閉所	開閉所	×	×	×		
	プラント計測・制御機能 (安全保障機能を除く)	・原子炉制御系 (RWM含む) ・原子炉核計装	C/B	×	×	×		
	プラント運転補助機能	・補助ボイラー設備	補助ボイラー建屋	×	×	×		
	・計装用圧縮空気系 ・復水補給水系	T/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 ・復水浄化系	R/B T/B	×	×	×			
MS-3	緊急時対策上重要なものおよび異常状態の把握機能	・原子力発電所緊急時対策所	免震重要棟 R/B(3号炉)	×	×	×		
		・試料採取系	R/B	×	×	×		
		通信 連絡 設備	所外 通信	・無線系	マイクロ波 無線鉄塔	×	×	×
				・有線系	送電鉄塔 免震重要棟 (屋外設備含む)	×	×	×
			所内外 通信	・有線系 ・無線系 ・衛星系	R/B (3号炉) (屋外設備含む)	×	×	
			所内 通信	・有線系	各建屋 (地下設備含む)	×	×	×
					屋外設備	×	×	×
					屋外	×	×	×
					可搬型SA設備保管場	×	×	×
					R/B	×	×	×
					気象観測装置	×	×	×
					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	×	×	×
					各建屋内	×	×	×

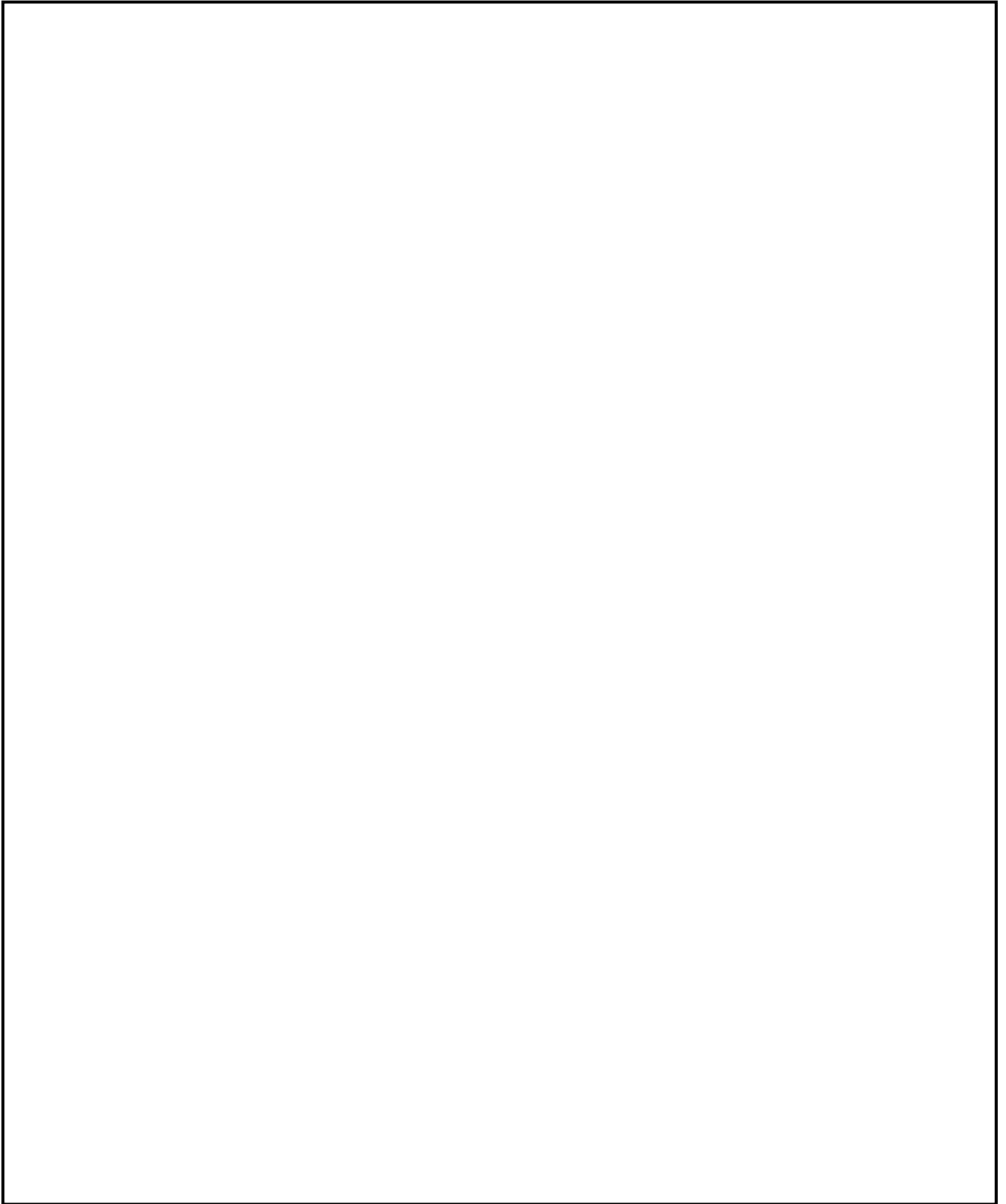


図1.4.3 倒壊により外部事象に対し必要な構築物、系統及び機器が損傷する可能性がある施設の抽出

数値気象解析にもと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については「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示したものである。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。

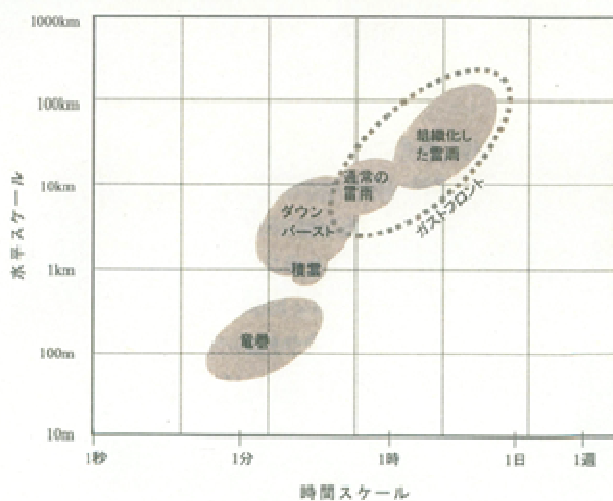


図1 雷雨とその関連現象の時空間スケール（大野 2001）

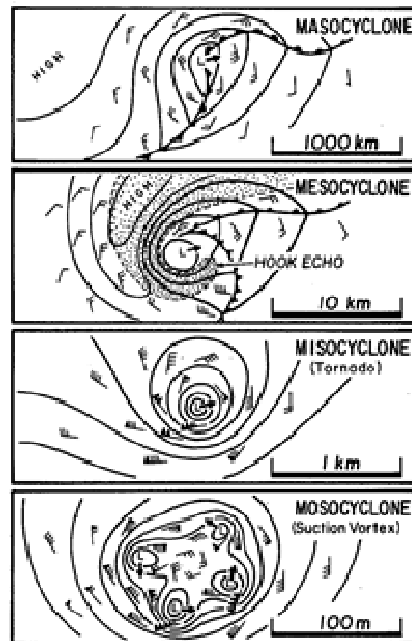


図2 竜巻発生時の渦の多重構造（Fujita 1981）

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うるため、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。

竜巻影響評価ガイド（原子力規制委員会 2013）では、基準竜巻風速 V_{BI} 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、および竜巻検討地域内の記録を参照して V_{BI} 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、およ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 時間毎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。

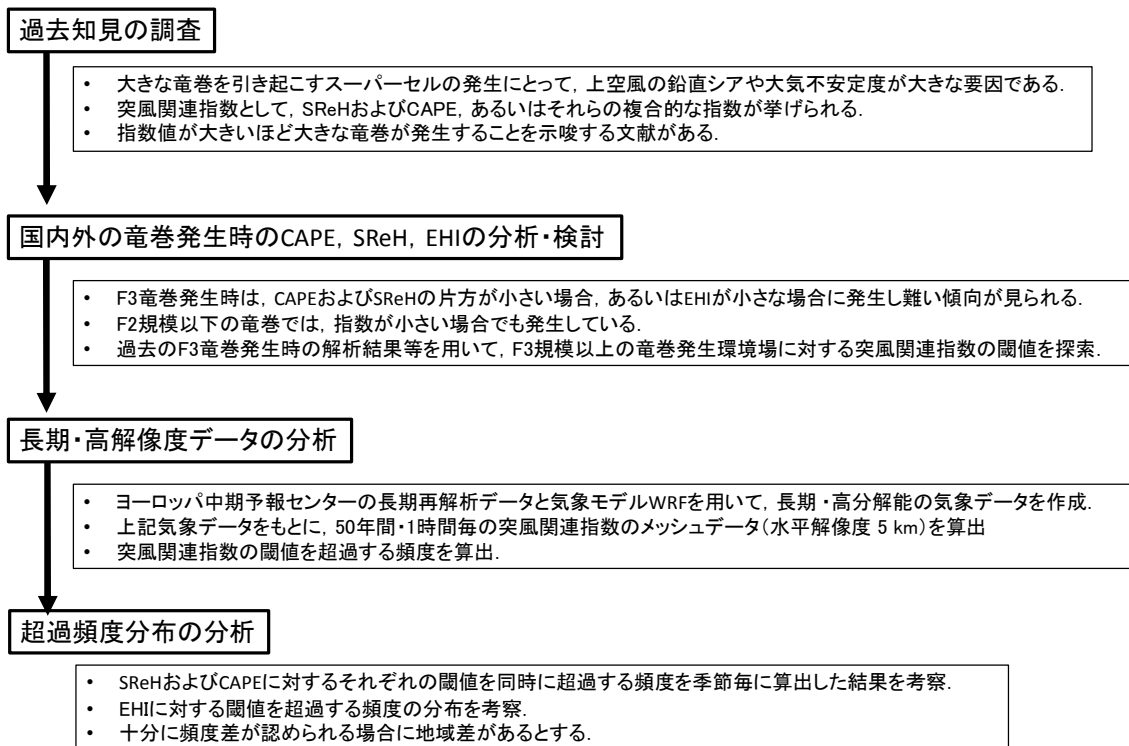


図3 メソスケールでの分析フロー

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、長時間持続しうる。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関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 (Rasmussen 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 (Rasmussen 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。

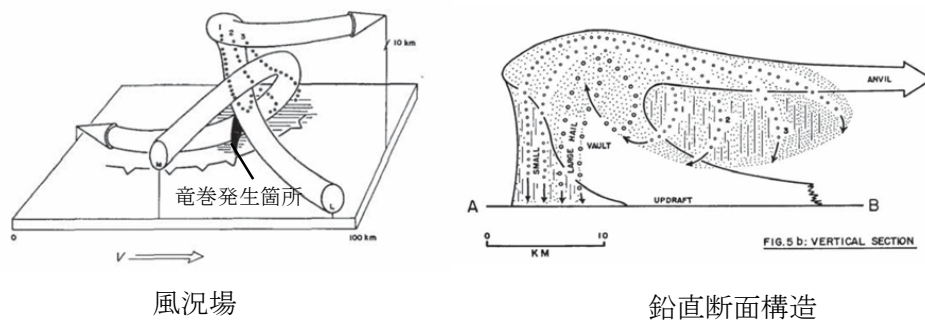
なお、スーパーセル型・非スーパーセル型竜巻の同定に関する国内の検討例として、飯塚・加治屋 (2011) による分析が見られ、2006 年~2009 年間の 3 ヶ年においてスーパーセル型竜巻の竜巻強度は、F2 及び F3 (3 事例)、F1 (6 事例)、F0 (8 事例)、F 不明 (2 事例) であったのに対し、非スーパーセル型竜巻では、F2 及び F3 竜巻 (0 事例)、F1 (9 事例)、F0 (11 事例)、F 不明 (5 事例) であったと報告している。分析期間は短いものの、国内で発生した F3 竜巻のスーパーセル型の竜巻強度の傾向を考慮すれば、大きな竜巻は米国と同様に基本的にス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

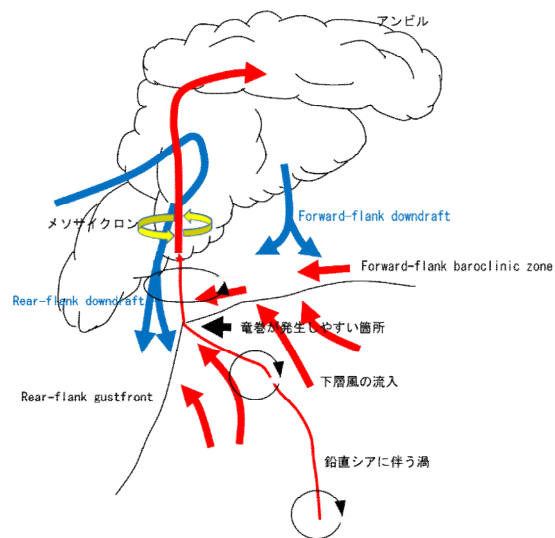
空間スケールの観点では、メソスケール気象場の分析はスーパーセル型竜巻の発生しやすさの傾向・地域性を分析する目的には十分であるが、空間スケールの小さく、竜巻強度も小さい非スーパーセル型竜巻に対しては向かない。また、竜巻強度の観点では、大きな竜巻（国内最大強度の F3 を含む F2 以上の規模の竜巻）の発生のしやすさがメソスケール気象場の分析により検討することができる。したがって、設計基準を考える際には、スーパーセル型竜巻の発生を観点とした地域性を検討することが妥当である。

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関わっている (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)

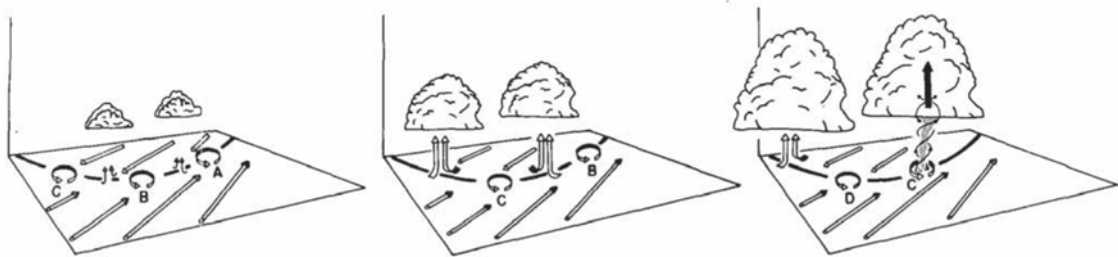
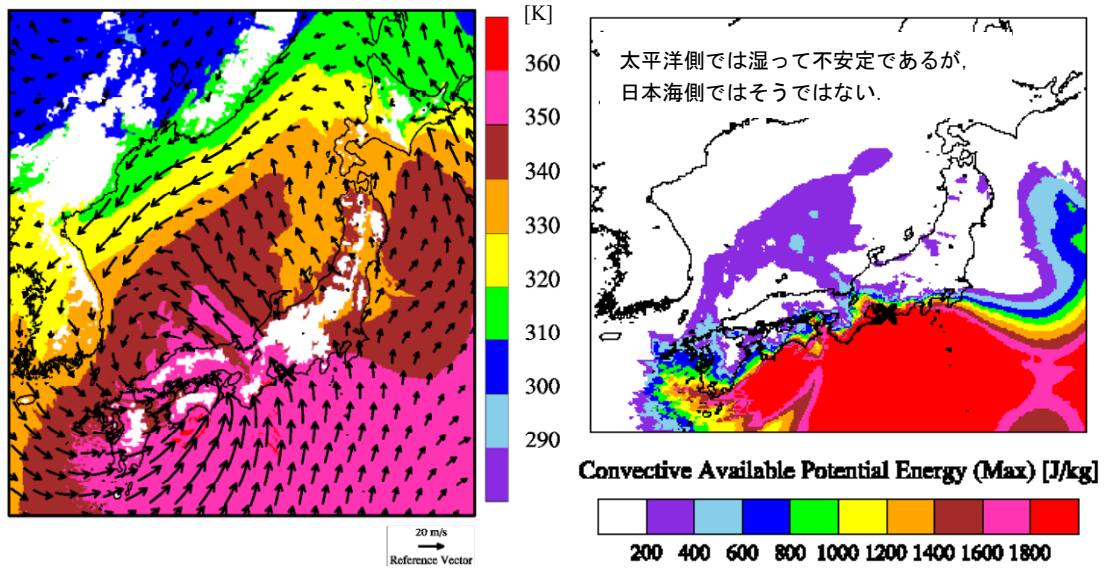
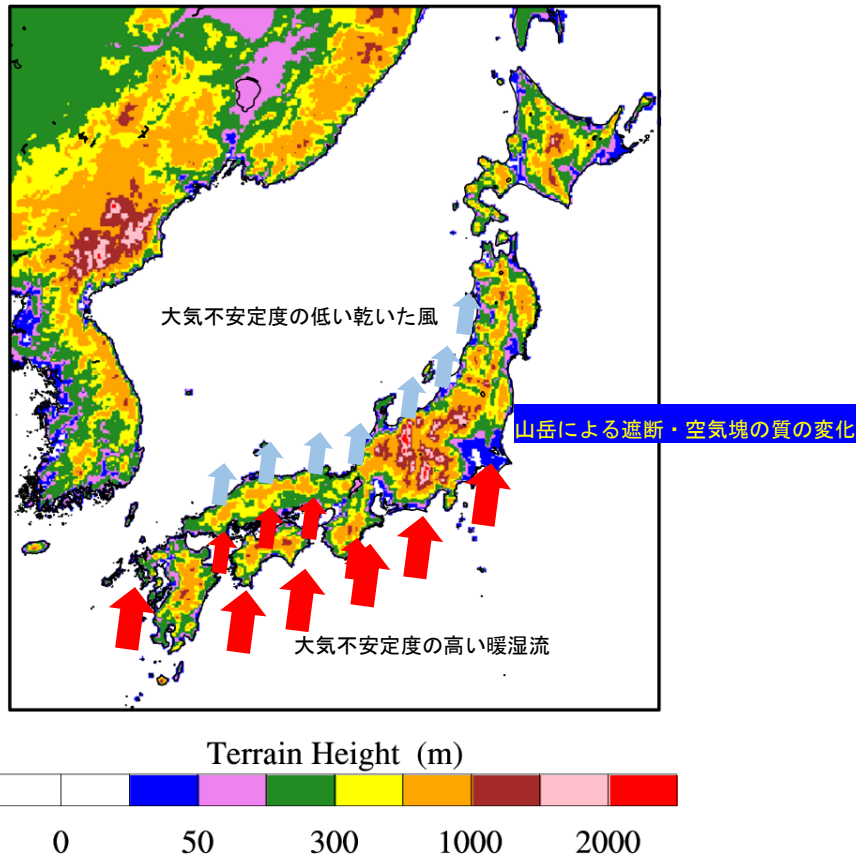


図5 局地前線に伴う竜巻の発生機構に関する模式図 (Wakimoto and Wilson 1989)
(上向き黒い⇒が上昇気流を表す)



500 m 高度における温位 (カラー) および風向・風速

大気不安定度 (CAPE) の分布

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) および
(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； 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 および図 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 は大気的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」乾燥断熱線およ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)

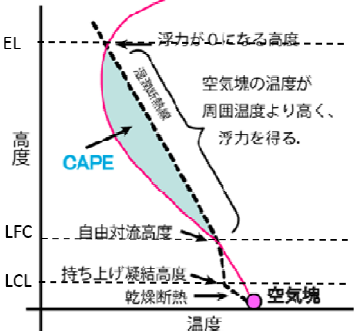


図 8 CAPE の算出概念

両指数の算出式は以下のとおりである。

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

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

ここで、式 (1) の \mathbf{V} は水平風速ベクトル、 $\boldsymbol{\omega}$ は鉛直シアに伴う水平渦度であり、 \mathbf{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、および不安定性を把握するのに用いられる (付録 A 参照)。

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

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)、単位体積中に含みう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。

$$EHI = \frac{SReH \times CAPE}{160000} \quad (4)$$

4. 国内で発生した F3 竜巻および日本海側 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 ERA-Interim: 約 70 km, ECMWF ERA-40: 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 ECMWF 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可能性がある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時、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うる（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。

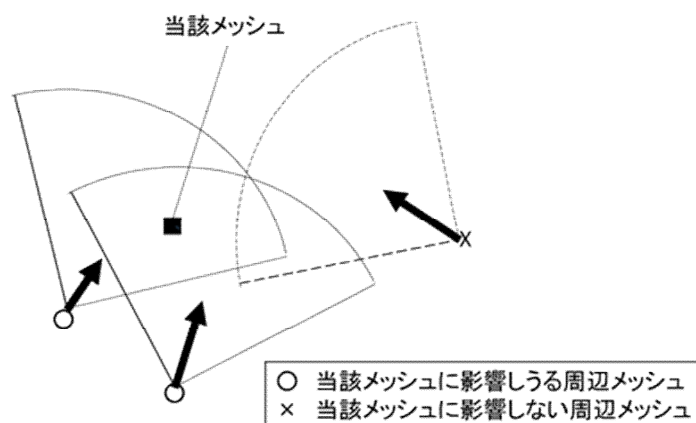


図 9 最大 CAPE 値の抽出方法の概念図

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 および最大 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。

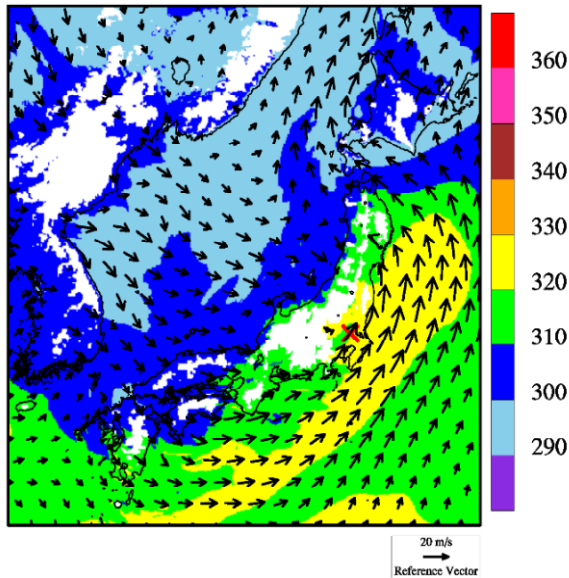
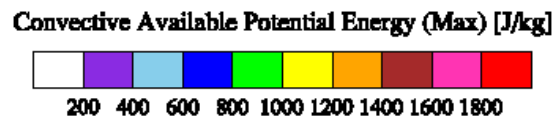
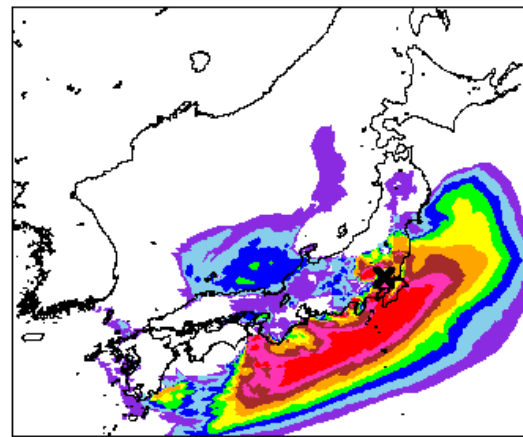
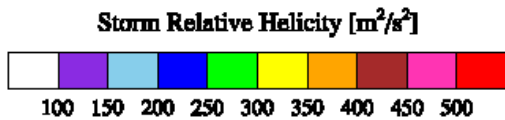
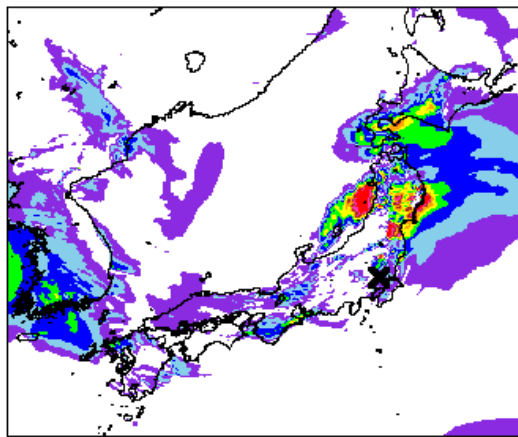


図 10 2012/05/06 F3 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速および相当温位（単位：K）（左下）SReH、（右下）最大CAPE



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。

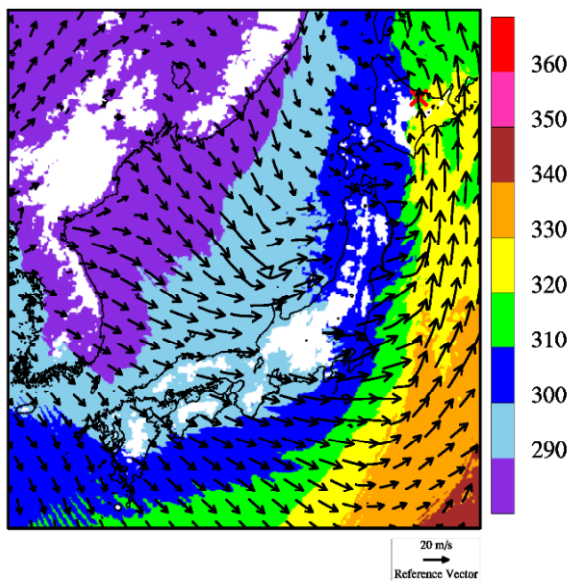
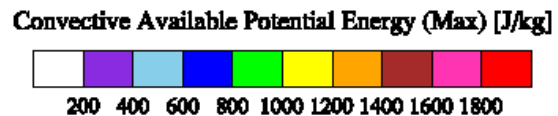
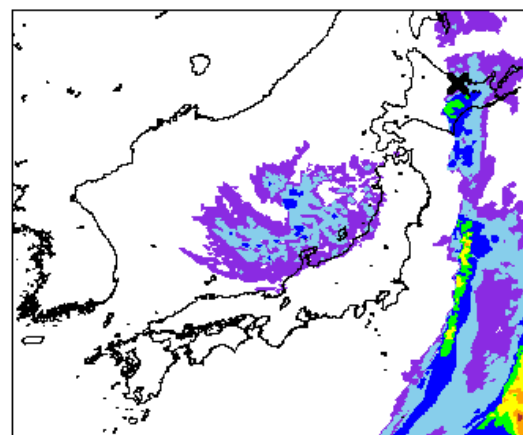
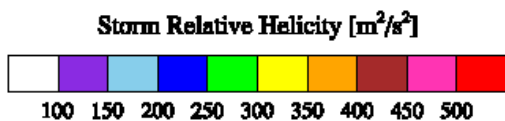
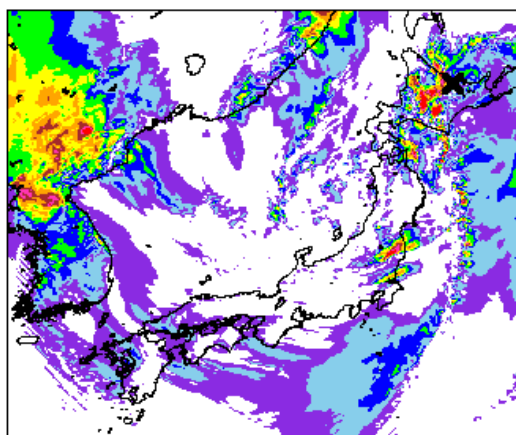


図 11 2006/11/07 F3 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速および相当温位（単位：K）（左下）SReH、（右下）最大 CAPE



4.3 1999/09/24 F3 事例（台風）

台風中心は隠岐の南西沖にあり、四国東部・紀伊半島の沿岸部および濃尾平野では、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。

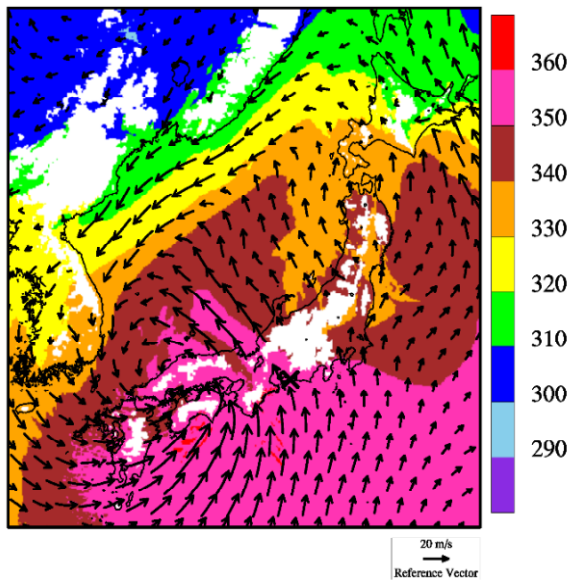
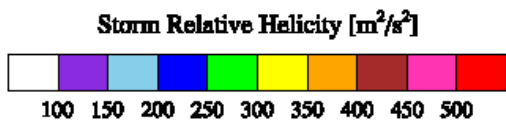
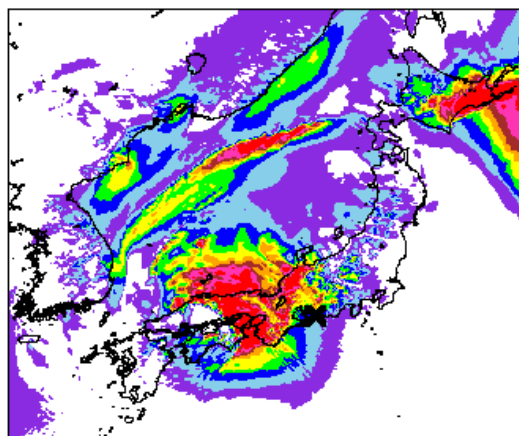


図 12 1999/09/24 F3 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速および相当温位（単位：K）（左下）SReH、（右下）最大 CAPE



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，寒冷前線およ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（×でやや見づらいが）。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 low，房総半島周辺とは状況が異なる。

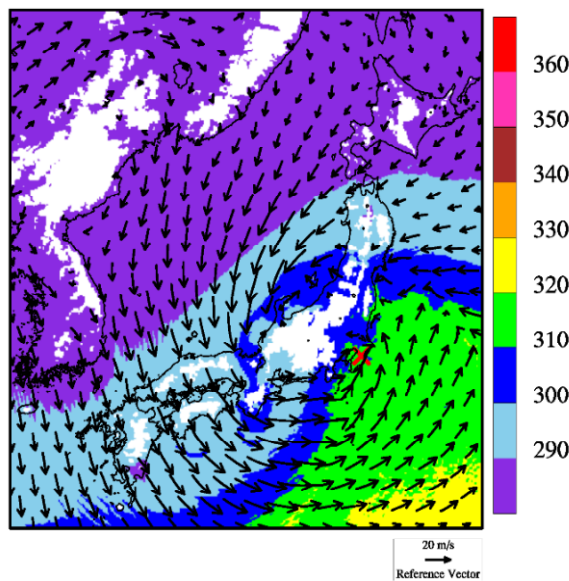
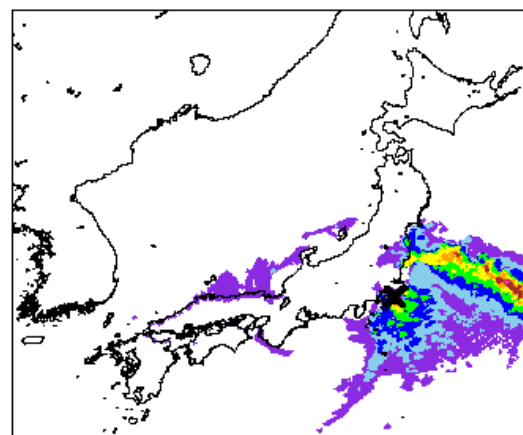
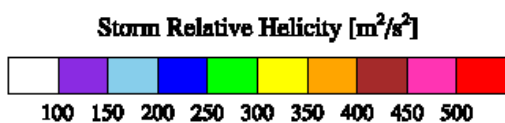
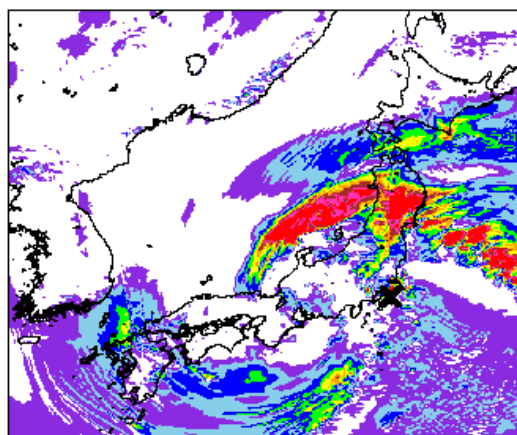


図 13 1990/12/11 F3 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速および相当温位（単位：K）（左下）SReH，（右下）最大 CAPE



4.5 1971/07/07 F3 事例 (台風)

台風を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 (×でやや見づらい)、SReH と CAPE の両方が共に大きい環境場となっていた。

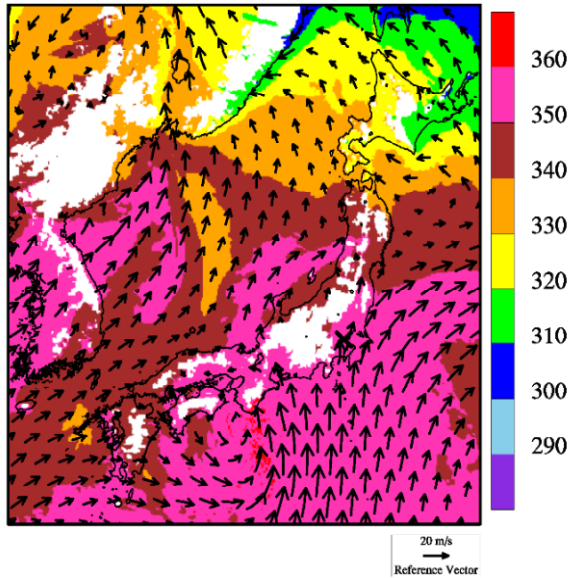
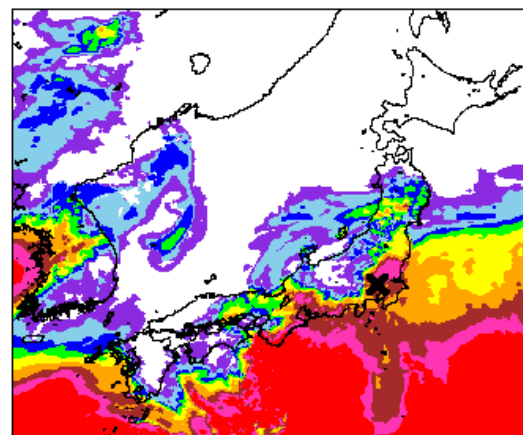
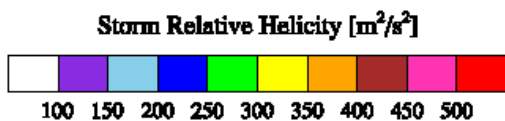
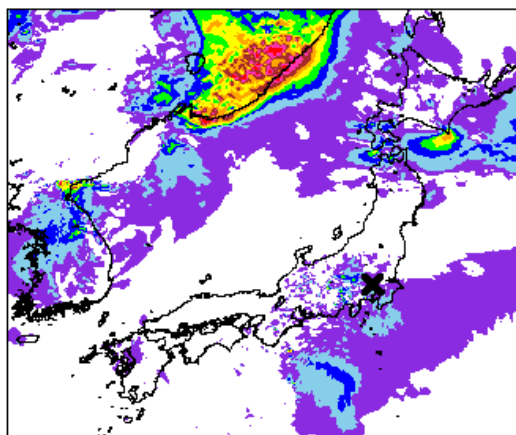


図 14 1971/07/07 F3 事例における気象場と突風関連指数 (左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位:K) (左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



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。

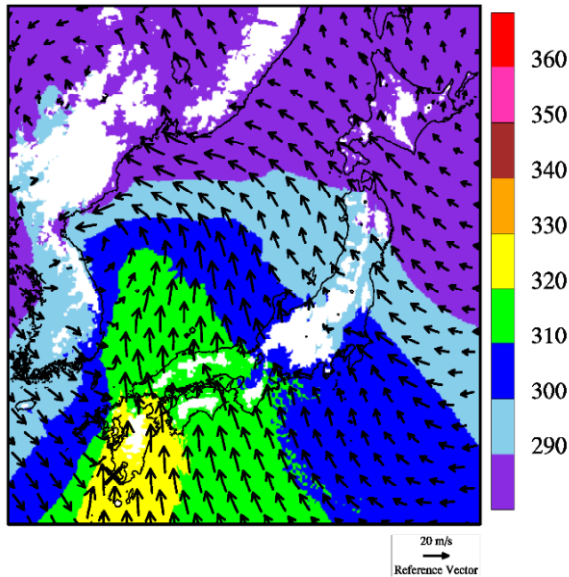
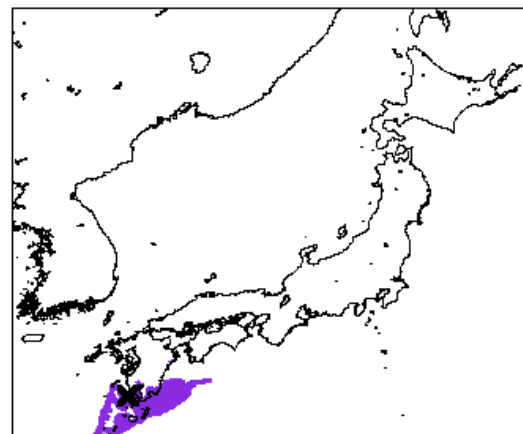
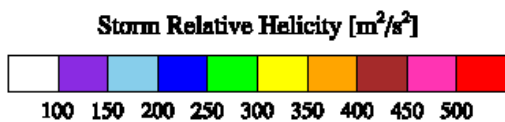
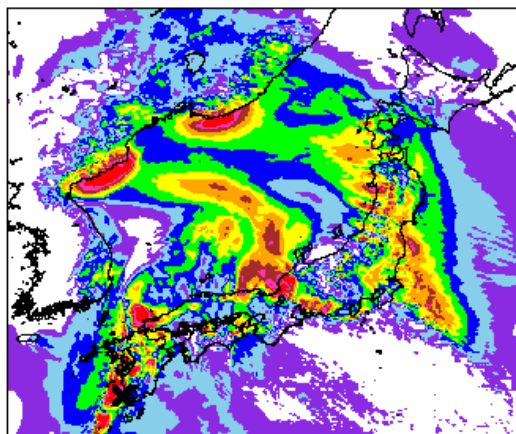


図 15 1990/02/19 F2-F3 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速および相当温位（単位：K）（左下）SReH、（右下）最大 CAPE



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。

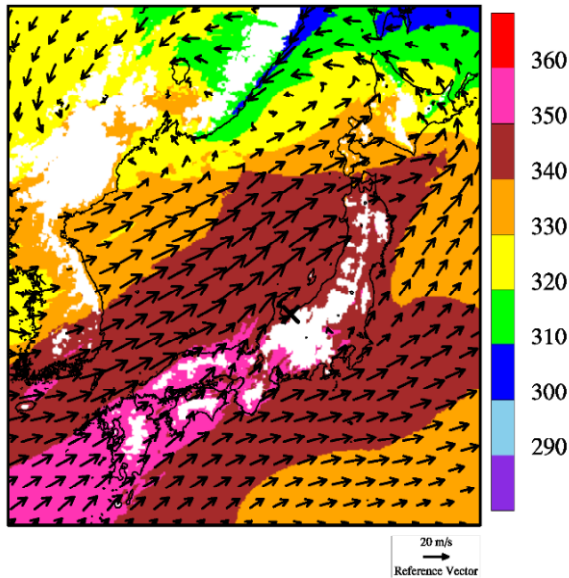
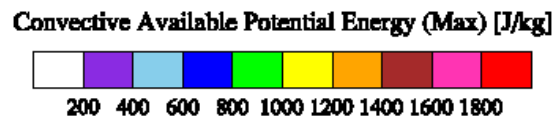
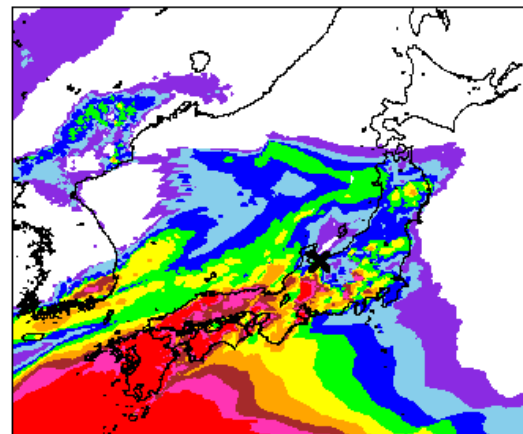
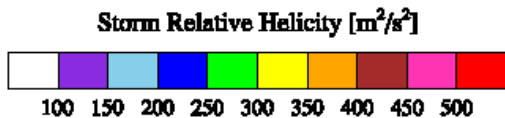
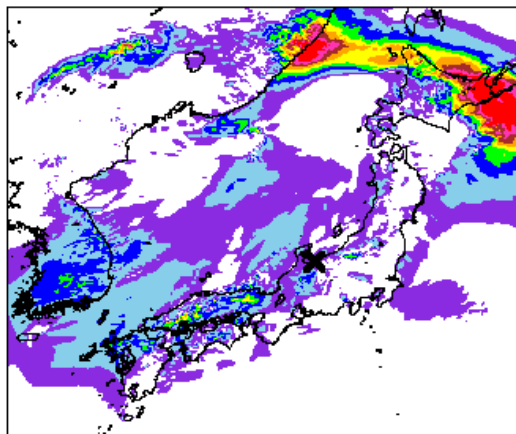


図 16 1991/06/12 F2 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速および相当温位（単位：K）（左下）SReH，（右下）最大 CAPE



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。

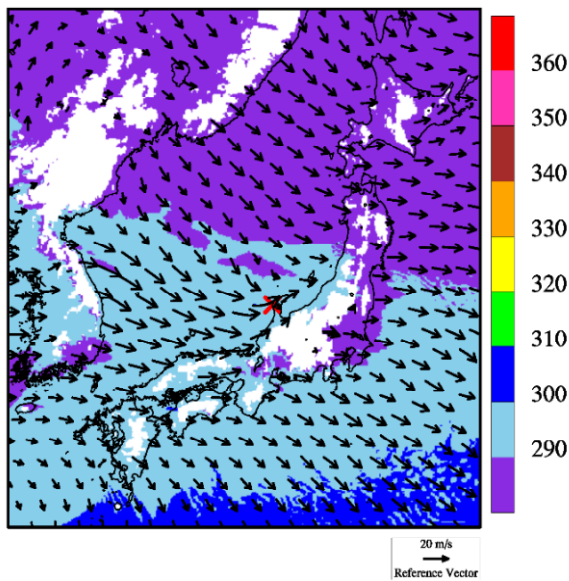
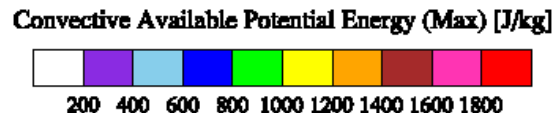
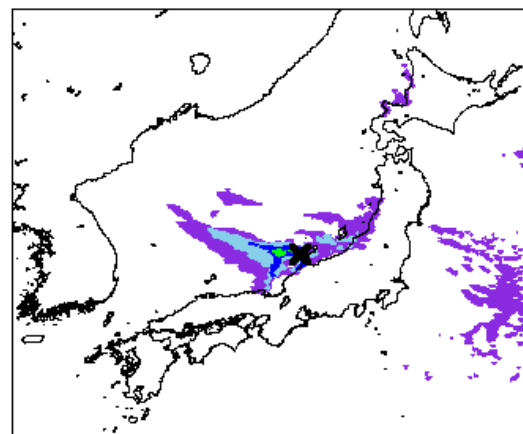
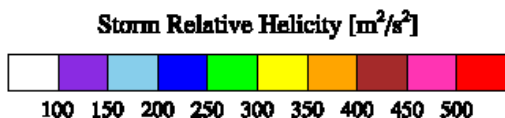
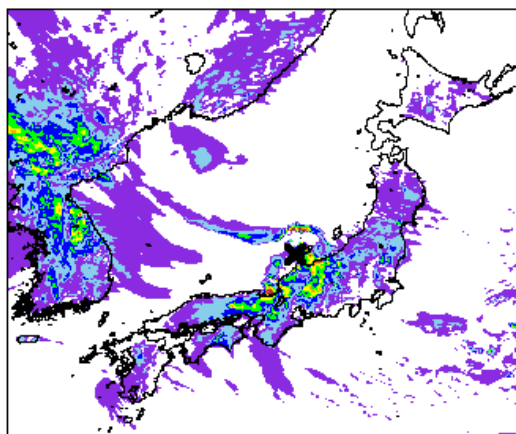


図 17 1990/04/06 F2 事例における気象場と突風関連指数 (左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K) (左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



4.9 1989/03/16 日本海側 F2 事例（局地的擾乱・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 事例よりもさら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。

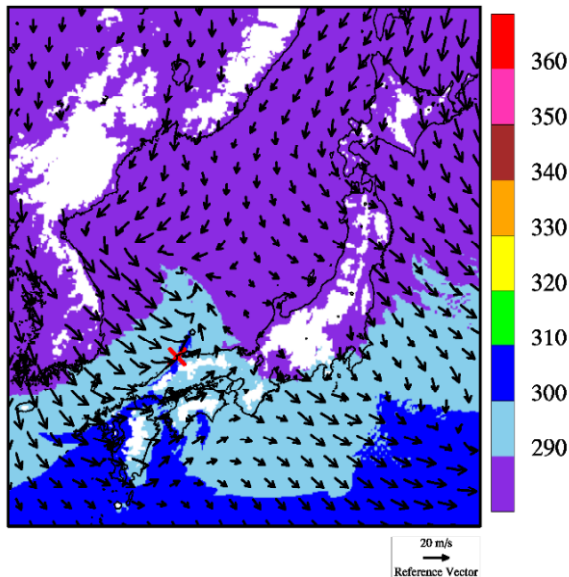
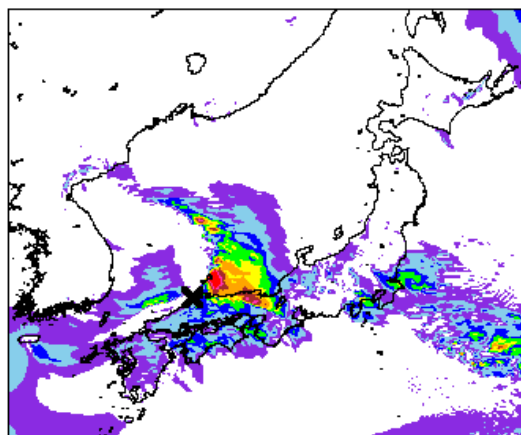
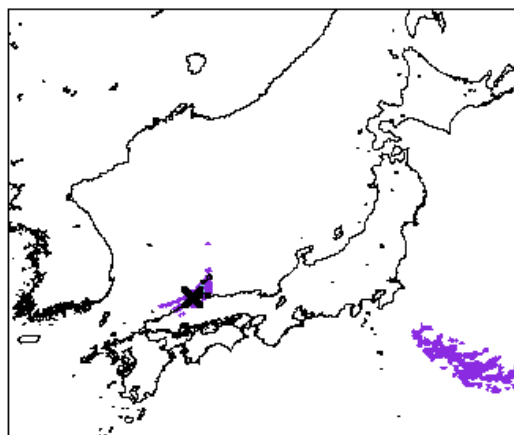


図 18 1989/03/16 F2 事例における気象場と突風関連指数（左）500 m 高度における風向・風速および相当温位（単位：K）（左下）SReH，（右下）最大 CAPE



Storm Relative Helicity [m^2/s^2]
100 150 200 250 300 350 400 450 500



Convective Available Potential Energy (Max) [J/kg]
200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800

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。

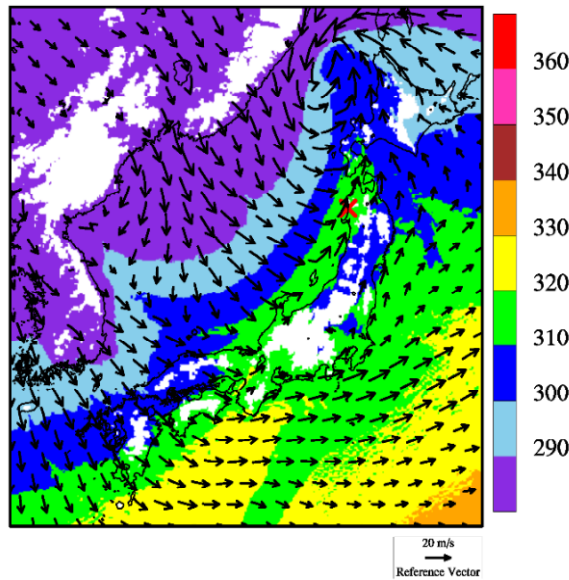
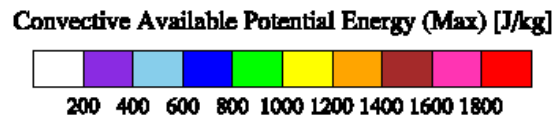
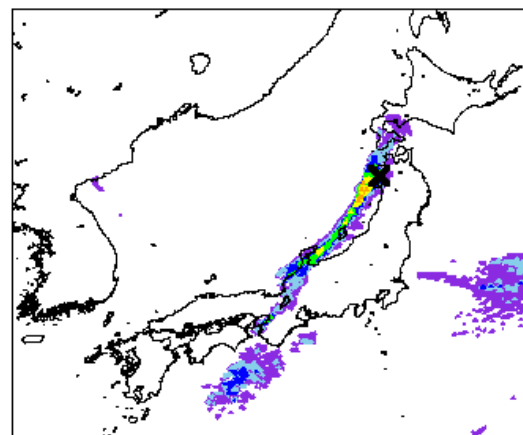
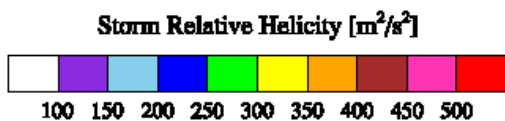
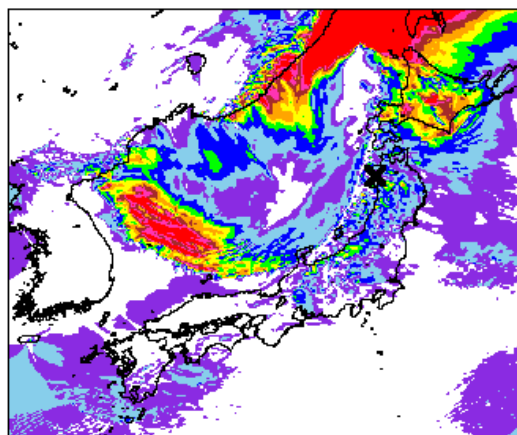


図 19 1999/11/25 F1-F2 事例における気象場と突風関連指数 (左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K) (左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



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うる。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。

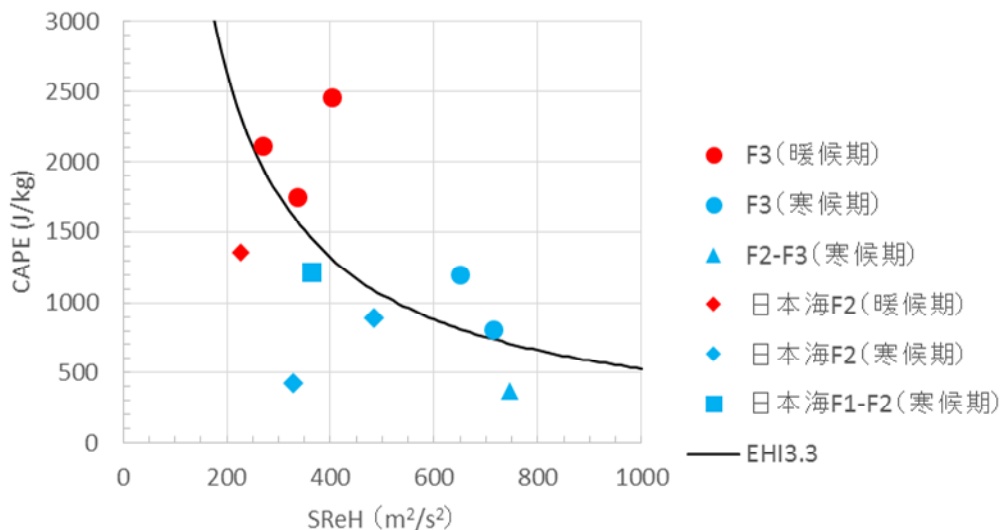


図 20 SReH と最大 CAPE の関係

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

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。

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 $250 \sim 300 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 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別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 ERA-Interim (1989 年以降; 水平分解能約 70 km) および 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 $5 \text{ km} \cdot 1 \text{ 時間}$ 毎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 時間毎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 $1 \text{ 時間} \cdot 5 \text{ km}$ 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 $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、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、日本海およ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、およ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 $250 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、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竜巻および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およ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包含している。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

¹閾値を小さく設定するという事は、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。

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，および北海道・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。

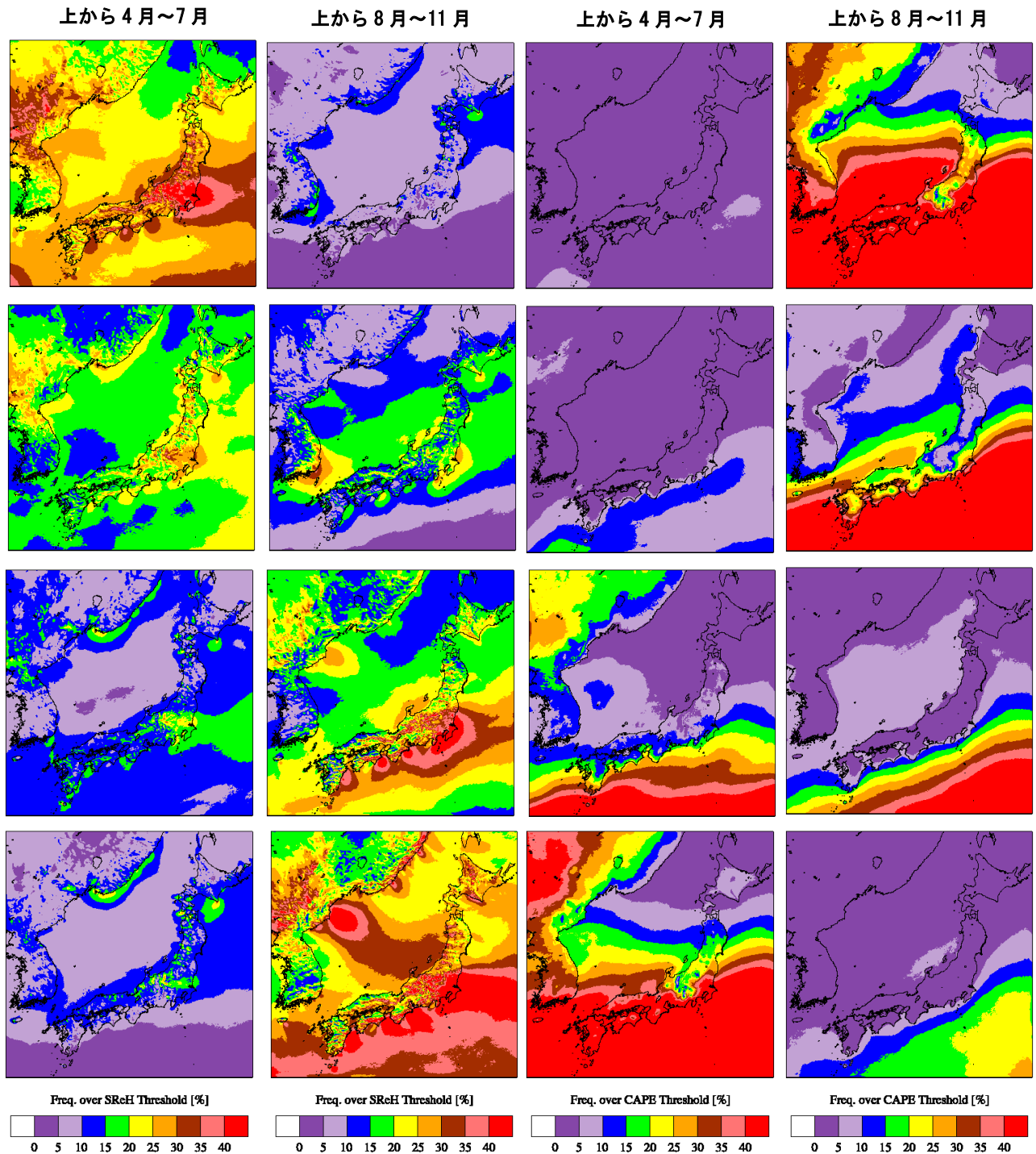


図 21 月別の SReH（左側 2 列）および CAPE（右側 2 列）の超過頻度分布

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に対応している。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。

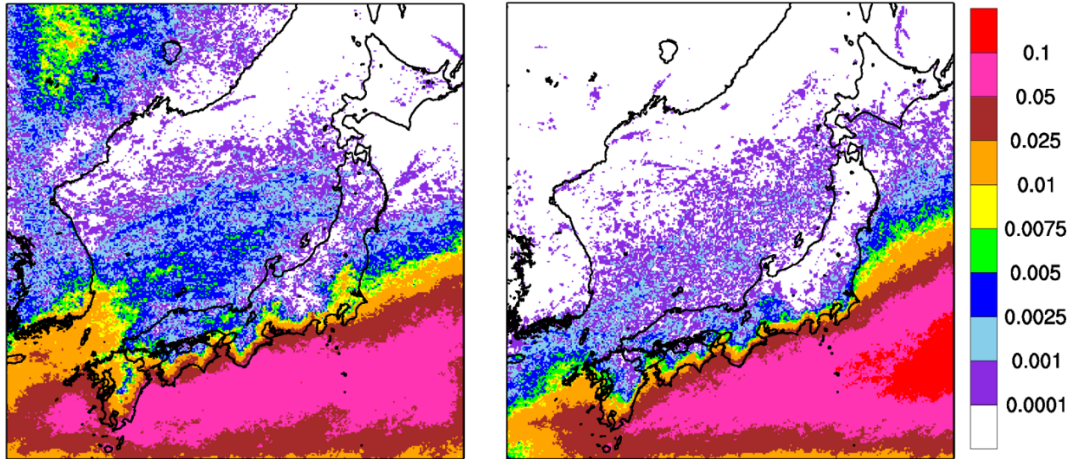


図 22 同時超過頻度分布（単位：%，F3 規模以上を対象；左：暖候期，右：寒候期）
（実績ベースの閾値（SReH：250 m²/s²，最大 CAPE：1600 J/kg（暖）600 J/kg（寒）））

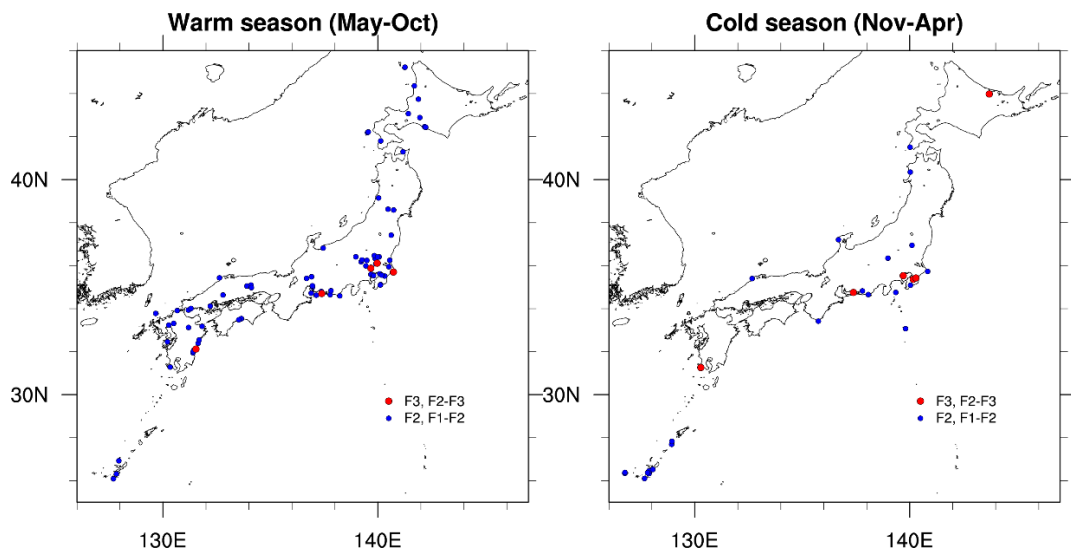


図 23 F3 竜巻（F2-F3 を含む）および F2 竜巻（F1-F2 を含む）の発生箇所
（左：暖候期，右：寒候期）

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。

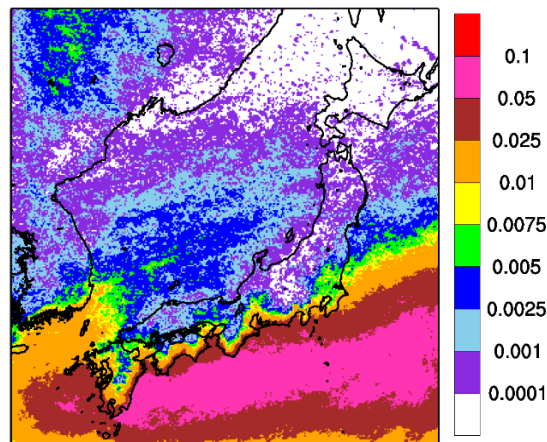


図 24 超過頻度分布 (単位は % ; 通年 ; EHI の閾値 : 3.3)

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、国内の竜巻影響評価ガイドで記載されている超過確率 10^{-5} 、米国の評価ガイド等 (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 スケール毎に発生率 (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概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 93 m/s) に対する超過確率は大凡 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 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、および発生数は、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 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ を下回る。この超過確率レベルは米国の評価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。

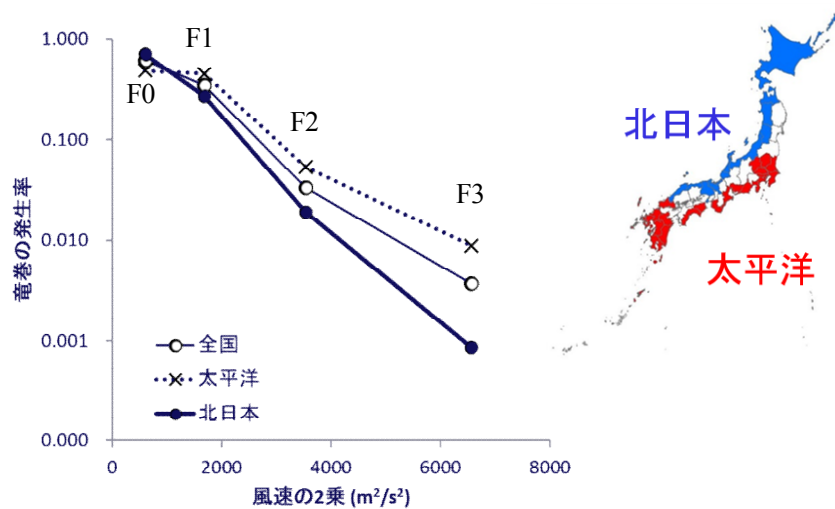


図 25 各 F スケールの発生率

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さら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 $150 \sim 550 \text{ m}^2/\text{s}^2$ の範囲 ($100 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 刻み)、最大 CAPE に対しては、 $200 \sim 1500 \text{ J/kg}$ (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 に示した結果に概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 : $200 \text{ m}^2/\text{s}^2$

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。

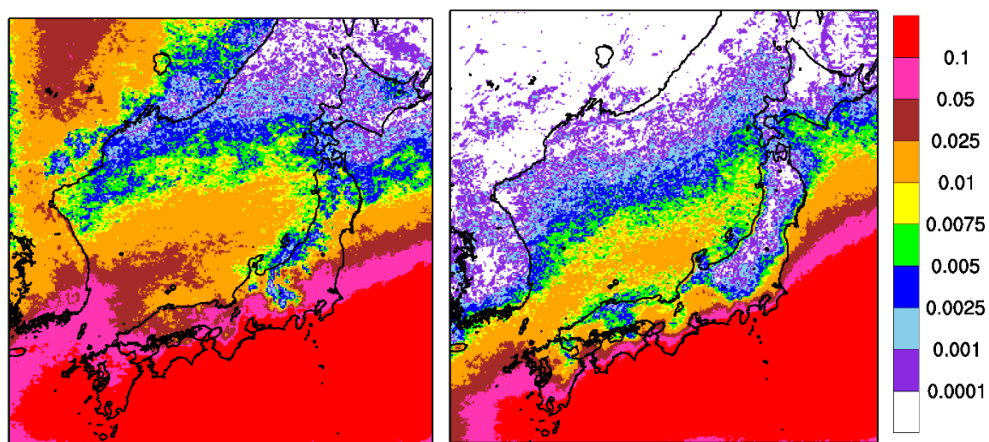


図 26 同時超過頻度分布（単位：%，F2 規模以上を対象；左：暖候期，右：寒候期）
 (SReH の閾値：200 m²/s²，最大 CAPE の閾値：1000 J/kg（暖）350 J/kg（寒）)

暖候期においては、福島県から宮城県の太平洋側およ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包含できている。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 巻が発生しうる状況下でも、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。

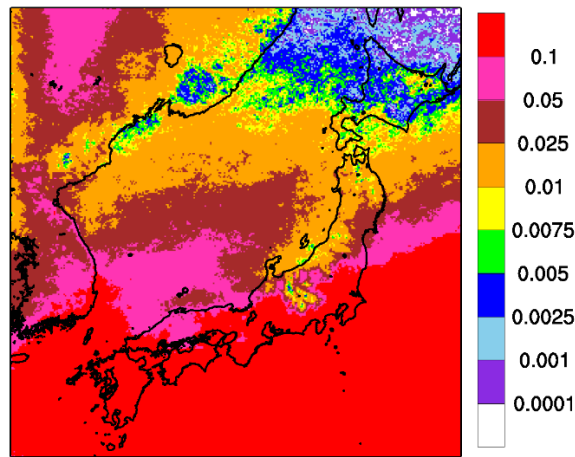


図 27 同時超過頻度分布 (単位：%, 暖候期)

(SReH の閾値 : $200 \text{ m}^2/\text{s}^2$, 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うるといえる。

寒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、および本州・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)。

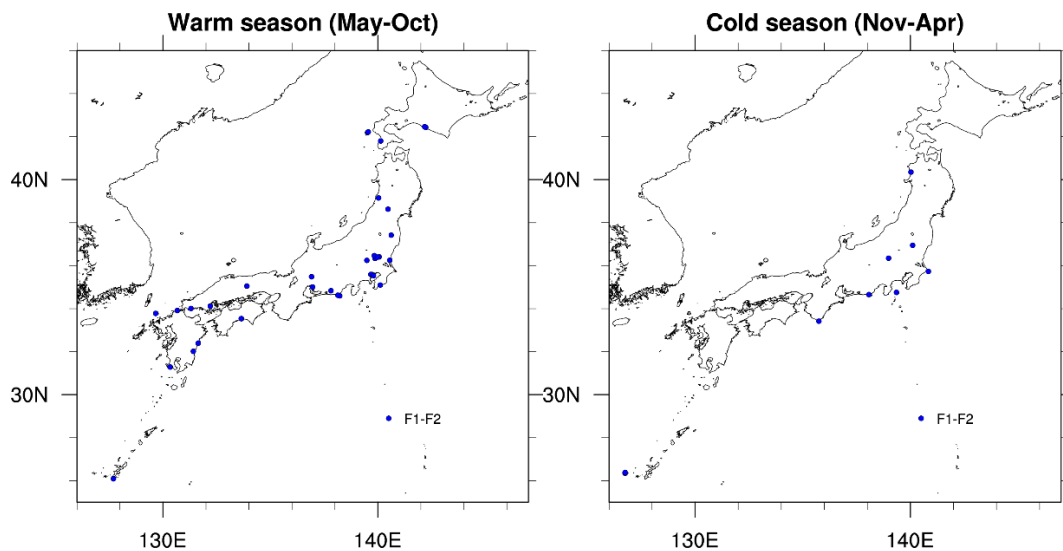


図 28 F1-F2 竜巻の発生箇所

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

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、概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時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。

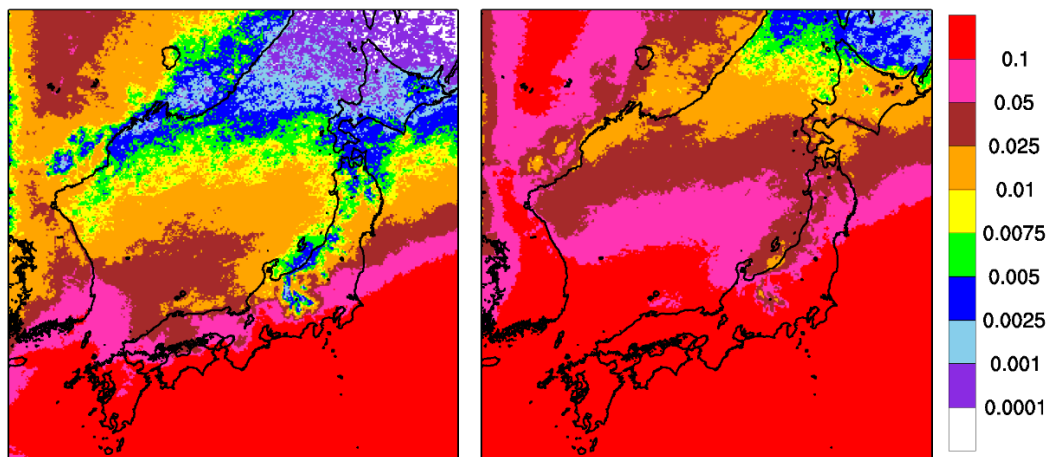


図 29 超過頻度分布（単位は %；通年；EHI の閾値：（左）1.5，（右）0.8）

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ですが、網走支庁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およ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。

「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

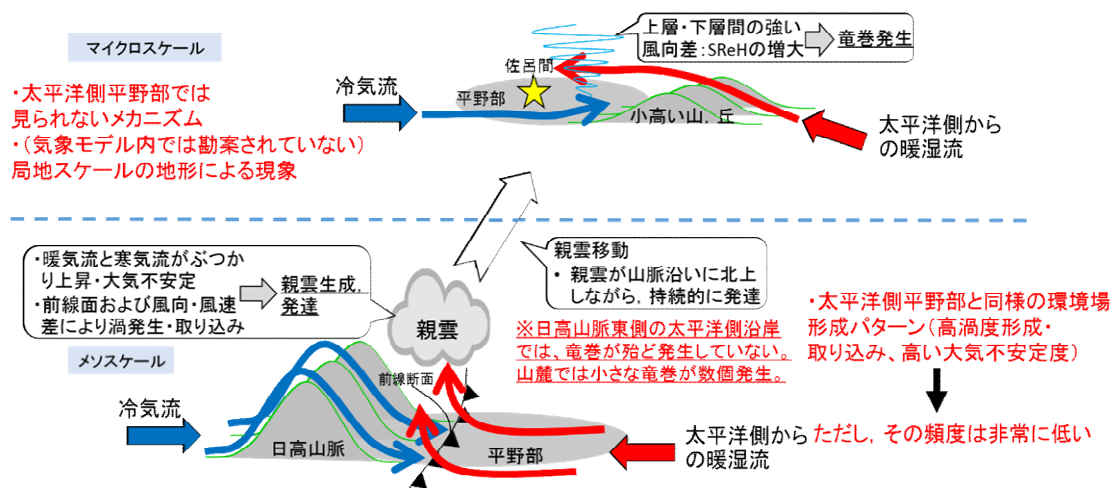


図 30 佐呂間竜巻の発生メカニズムに関する模式図

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）、およ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および基準竜巻風速 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、竜巻影響評価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。

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

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 26 参照）といえる。

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うる地域である。
- ・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。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発電所においては、高標高山岳の影響が大きい(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、数値気象モデルおよ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)、および日本海側 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およ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オーダ以下の頻度であった。
- ・ 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に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うる地域であるが、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評価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概ね良好であるが、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う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う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. Res., 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. Doswell, 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.
- Davis-Jones, R., D. Burgess, and M. Foster, 1990: Test of helicity as a tornado forecast parameter. 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis 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 scale. *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., 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. Meteorol. 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. 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. B. Klemp, 1985: On the rotation and propagation of simulated supercell storms. *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: A description of the advanced research WRF version 2. *NCAR Tech. Note*, NCAR/TN-468+STR, 88 pp., 2005.
- 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 Plants, 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評価ガイドの制定について. 原管研発第13061911号, 2013年6月19日制定
(http://www.nsr.go.jp/nra/kettei/data/20130628_jitsuyoutatsumaki.pdf).
- 加藤輝之, 2008a: 竜巻発生の環境場に関する研究 (I) - 竜巻をもたらす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, 2008b: 竜巻発生の環境場に関する研究 (III) - スーパーセルを伴う竜巻の発生機構の研究 -, 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, 39-44.
- 杉本聡一郎, 野原大輔, 平口博丸, 2014a: 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. 2014年度保全学会年次学術講演会, 395-402.
- 杉本聡一郎, 野原大輔, 平口博丸, 2014b: 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年度日本気象学会春季大会講演予稿集, 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－突風に関する防災
気象情報の改善－．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）
－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－．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。この時、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分かる。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°C 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°C 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 および 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 $369 \text{ m}^2/\text{s}^2$ (21 事例)、F4・F5 竜巻の場合 $539 \text{ m}^2/\text{s}^2$ (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もしくは 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 $\text{EHI} (= \text{CAPE} \times \text{SReH} / 160000)$ 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、 $\text{EHI} > 2$ でスーパーセルが発達する可能性が非常に高く、 $\text{EHI} > 4$ 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)。

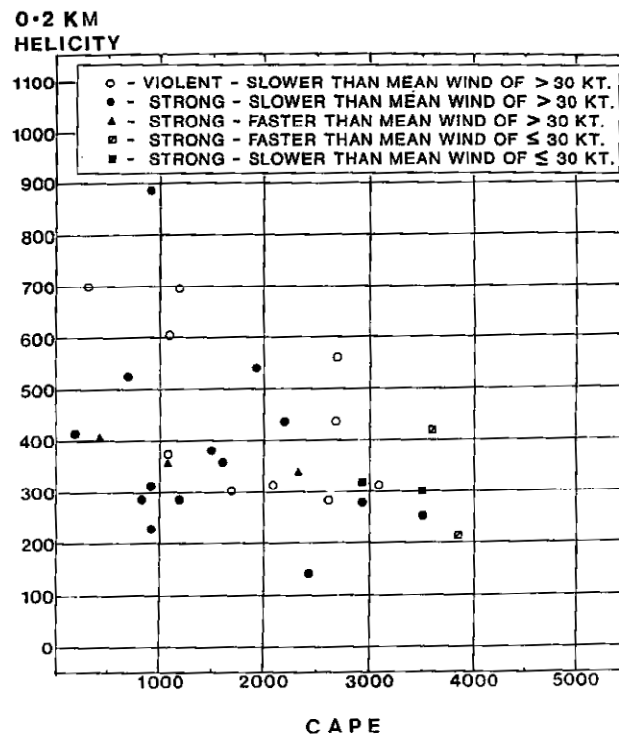


図 B-1 CAPE と 0-2km SReH の関係 (プロットは F2 規模以上。○は F4・F5 規模)

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 (1988)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。

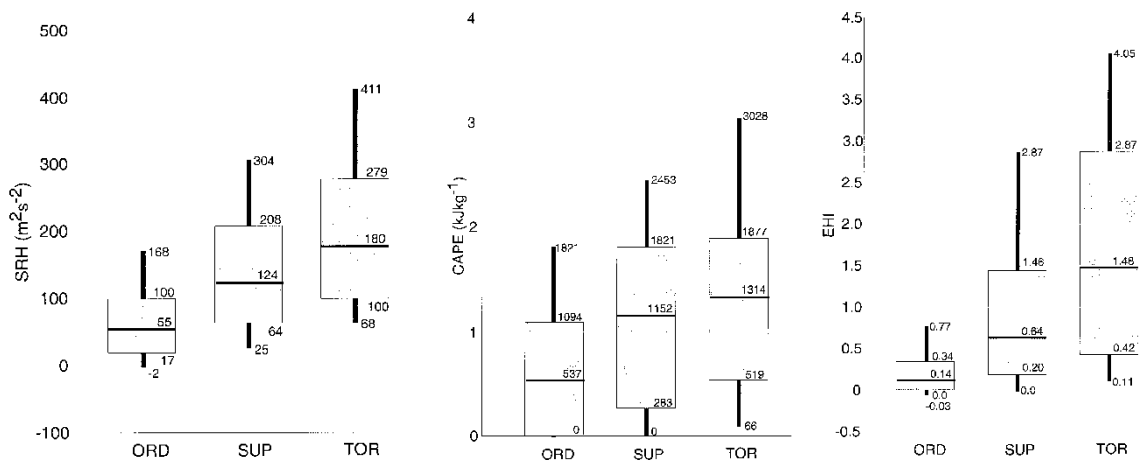


図 B-2 各突風指数 (左 : SReH, 中 : CAPE, 右 : EHI) に対する箱ひげ図 (箱は値の小さい方から 25%から 75%の範囲を表し、箱中の太線は中央値を示す。TOR は F2 規模以上の竜巻, SUP は F1 規模以下の竜巻, ORD は非スーパーセル雷雨を表す。)

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. 1990) 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、Rasmussen and Blanchard (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 2008)、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 にもと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 時間毎）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 (1988) 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。

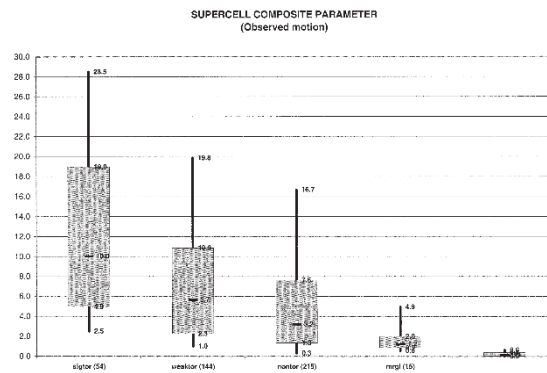


図 B-3 SCP に対する箱ひげ図 (sigtor は F2 規模以上, weaktor は F1 規模以下, nontor は非竜巻, mrgl はややスーパーセル化したストーム, nonsuper は非スーパーセルストームを表し, 括弧内の数字は事例数を表す。箱ひげ図の意味は図 B-2 と同じ。)

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 時間毎）のデータを用いて、2006 年 2 月から 3 ヶ年の間に発生した 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 ヶ年

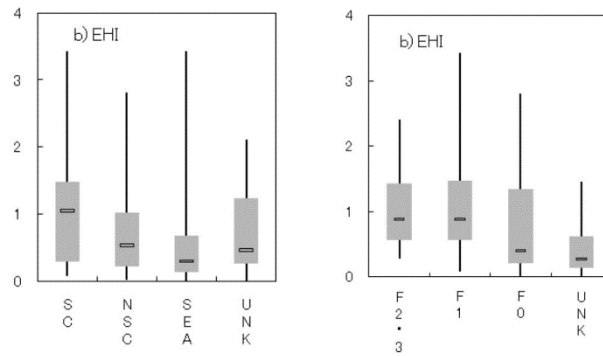


図 B-4 EHI に対する箱ひげ図 (左: 竜巻種別, 右: F スケール別; SC はスーパーセル型竜巻, NSC はノンスーパーセル型竜巻, SEA は海上竜巻, UNK は陸上竜巻でスーパーセル判定ができなかった竜巻を表す。)

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。

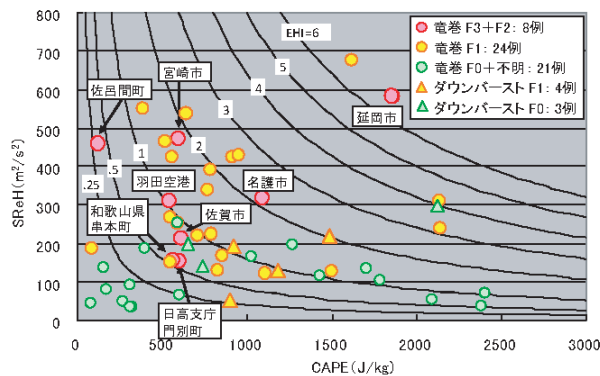


図 B-5 竜巻およびダウンバースト事例における分析例

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、その上空で発生しうる 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 分毎データ) 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、および 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 instability. The Tornado: Its structure dynamics, prediction, and hazards. C. Church, D. Burgess, C. Doswell and R. Davies-Jones, Eds., American Geophysical 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 combination of wind and instability parameters. *The Tornado: Its structure dynamics, prediction, and hazards*. C. Church, D. Burgess, C. Doswell and R. Davies-Jones, Eds., American Geophysical Union, 573-582.
- 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, 2008a: 竜巻発生の環境場に関する研究 (III) -スーパーセルを伴う竜巻の発生機構の研究-, 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, 39-44.
- 加藤輝之, 2008b: 竜巻発生の環境場に関する研究 (I) -竜巻をもたらす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.
- 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、風など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、および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。

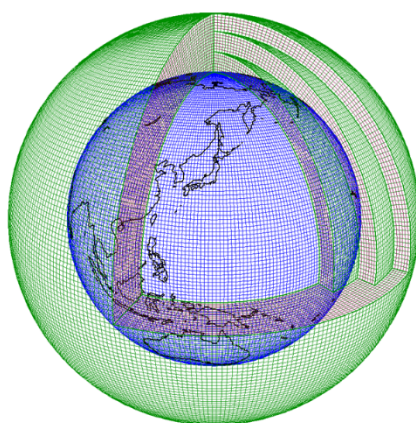


図 C-1 計算グリッド構造の例

(気象庁ホームページ <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-1.html> より)

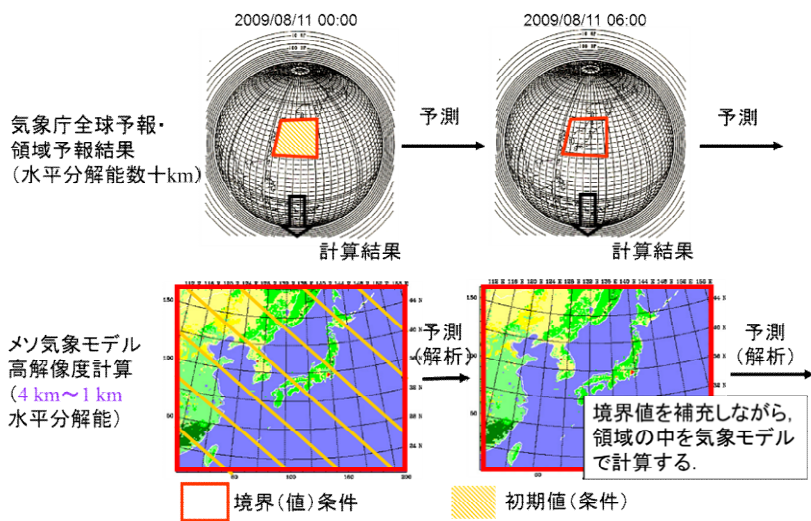


図 C-2 気象モデルを用いた解析・予測計算の流れの概念図（気象庁全球モデルを例に）

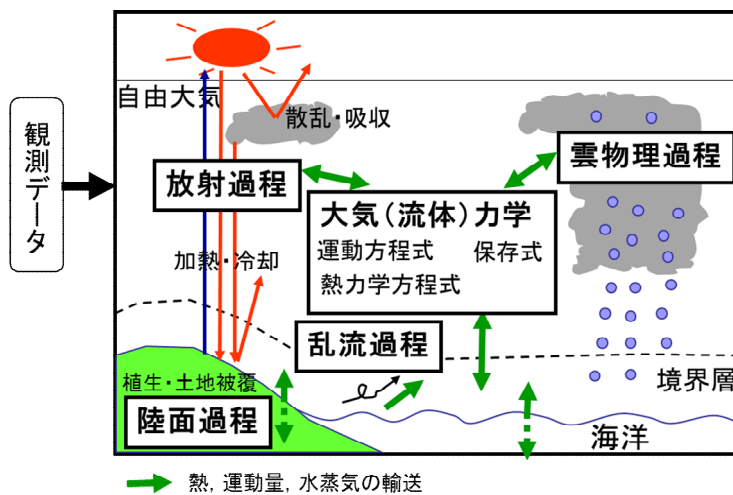


図 C-3 気象モデルを用いた計算の模式図

参考文献

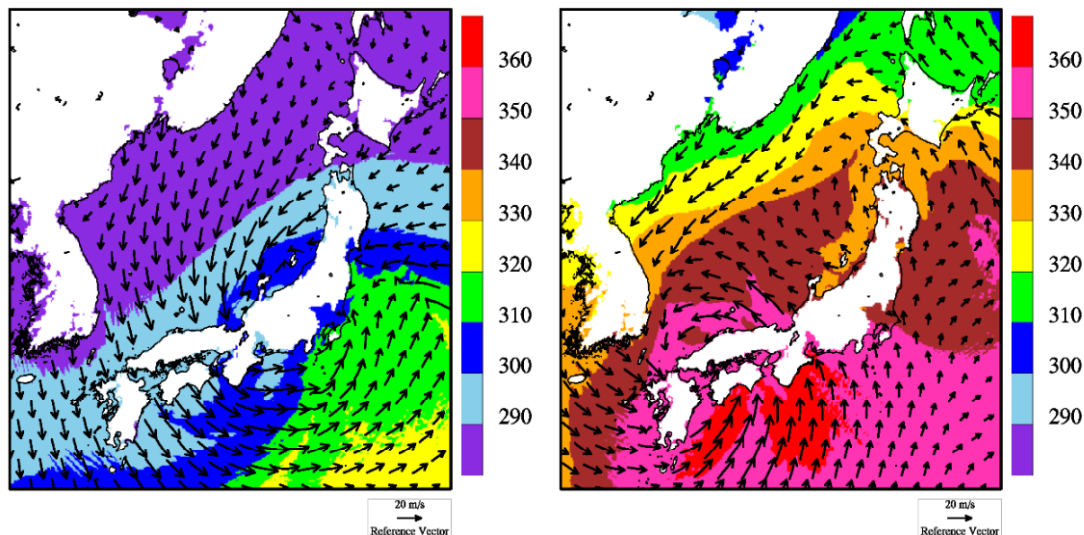
Dudhia, J., 1993: A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. Mon. Wea. Rev., 121, 1493-1513.

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)の海拔100m高度における気象場(風向・風速および相当温位の分布)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 海拔100m高度における風向・風速および相当温位(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 および 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 竜巻の発生箇所を包含できておらず (図 E-2 参照)、値として大きすぎることをわかる。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。

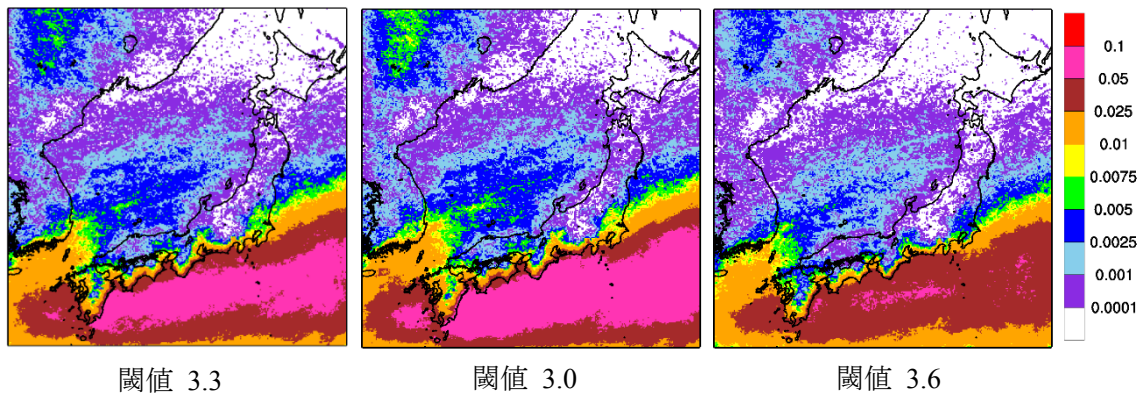


図 E-1 同時超過頻度分布 (単位は %。EHI の閾値は左から、3.3、3.0、3.6 である。)

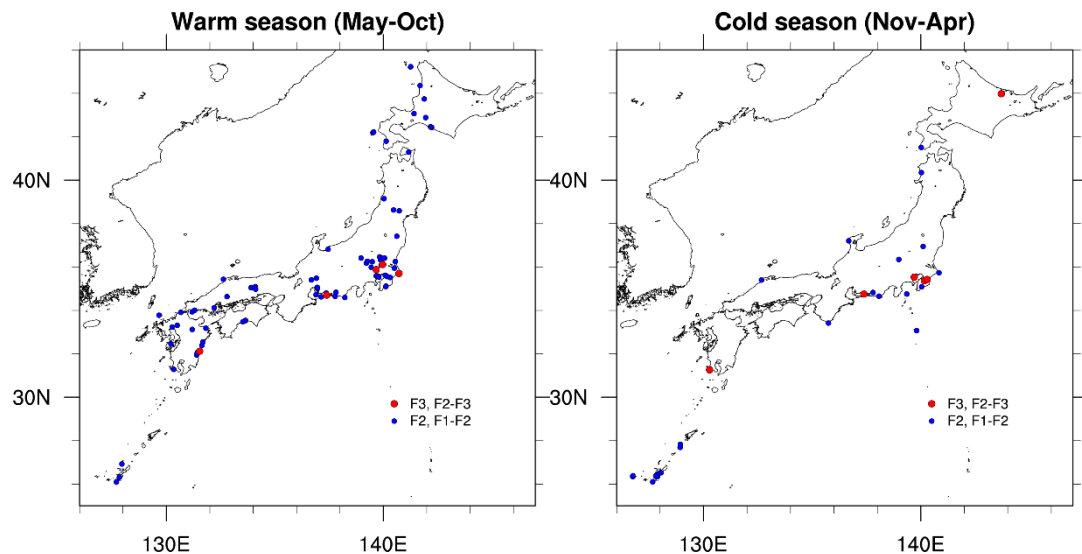


図 E-2 F3 竜巻 (F2-F3 を含む) および F2 竜巻 (F1-F2 を含む) の発生箇所 (左: 暖候期, 右: 寒候期)

(b) SReH と CAPE (暖候期)

今回用いた閾値は、SReH が $250 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、CAPE が 1600 J/kg である。そこで、SReH を $200 \sim 300 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ($50 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 刻み)、CAPE を $1550 \sim 1650 \text{ J/kg}$ (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。

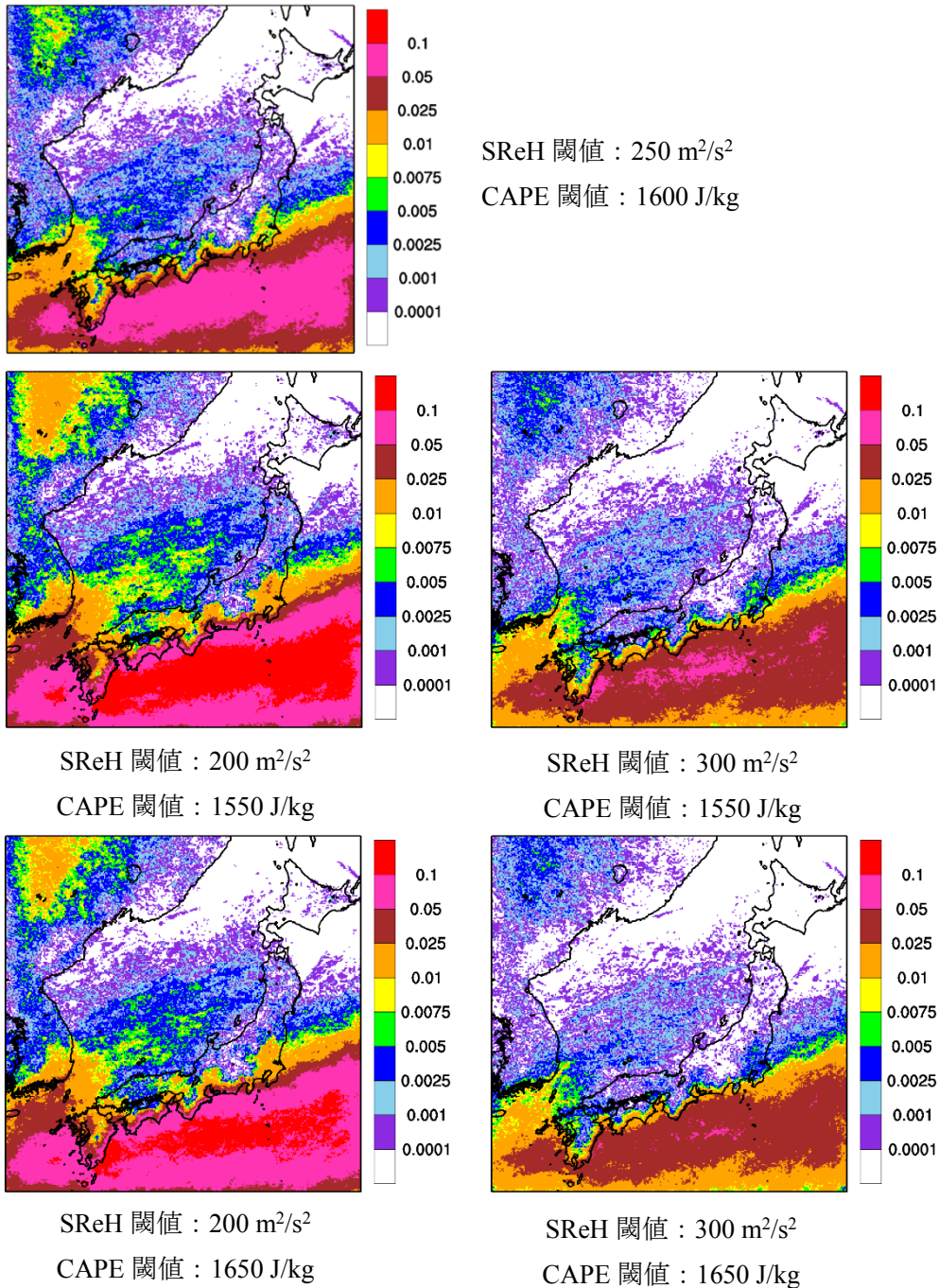
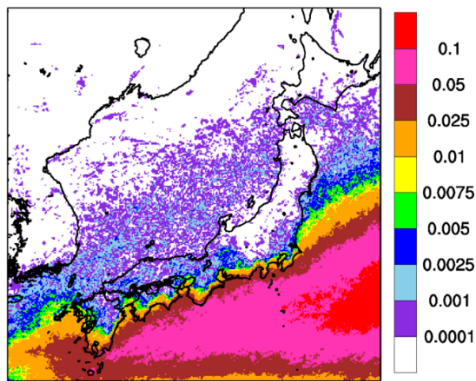


図 E-3 同時超過頻度分布 (暖候期, 単位は %)

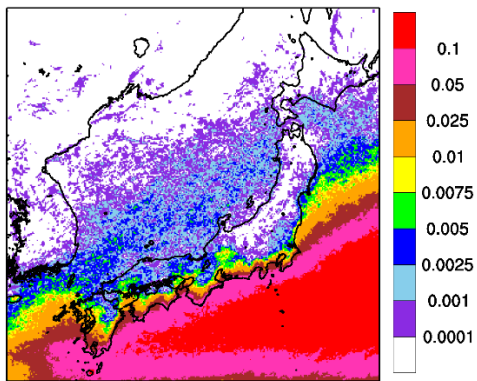
今回設定した閾値（SReH の閾値：250 m²/s²，CAPE の閾値：1600 J/kg）に対する頻度分布の 0.01 %前後よりも大きな地域が，発生箇所を包含していることがわかる。特に，いずれかの閾値を大きくすると，EHI の場合と同様に，関東平野内の F3 竜巻の発生箇所を包含できない傾向にある。特に SReH の感度が高い。SReH と CAPE の両方の閾値を小さくした場合（SReH：200 m²/s²，CAPE の閾値：1550 J/kg）においては，全体的な頻度は高まり，内陸部深くまで頻度が高まっており，閾値を小さくしすぎていることがわかるが，それでも日本海側沿岸・北日本と茨城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 m²/s²，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 竜巻の発生箇所を包含している。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。

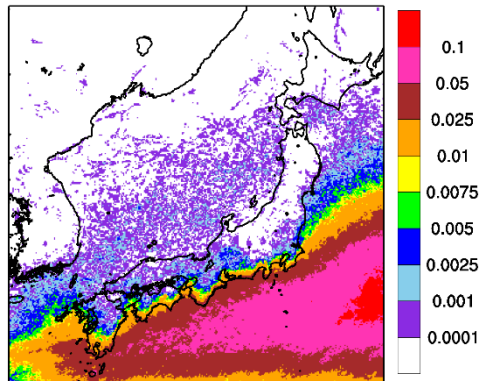
平成 27 年 2 月 3 日の審査会合において用いた閾値は，今回の検討のように感度解析的に閾値を変えて決めたわけではない。あくまで，数は少ないながらも過去の F3 竜巻発生時の環境場を解析し，下限の指数値を決めたが，その結果は F3 竜巻の発生の実態をよく表現できていると考えられる。閾値に幅を持たせた分析結果では，閾値を小さくするほど，小さな竜巻が発生する環境場をカウントするため，超過頻度が大きくなる。暖候期は寒候期に比べて閾値にやや敏感であるが，茨城県以西の太平洋側沿岸域と，日本海側および北日本の沿岸域との差は維持されることを確認できた。これは，EHI を用いる場合でも，CAPE と SReH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



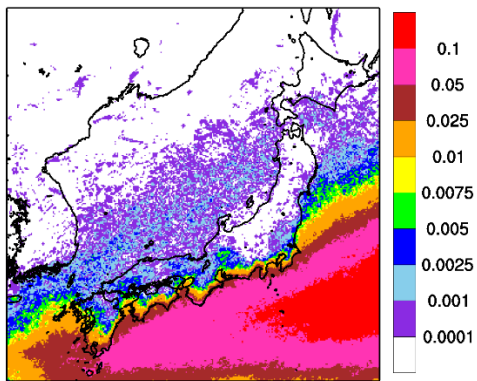
SReH 閾値 : 250 m²/s²
 CAPE 閾値 : 600 J/kg



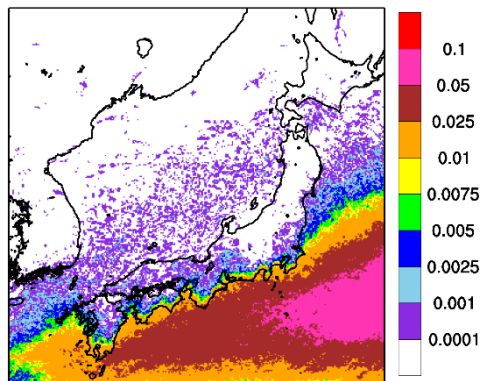
SReH 閾値 : 200 m²/s²
 CAPE 閾値 : 550 J/kg



SReH 閾値 : 300 m²/s²
 CAPE 閾値 : 550 J/kg



SReH 閾値 : 200 m²/s²
 CAPE 閾値 : 650 J/kg



SReH 閾値 : 300 m²/s²
 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	竜巻またはダウンバースト
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	竜巻またはダウンバースト
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	竜巻または漏斗雲
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	竜巻または漏斗雲
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	竜巻または漏斗雲
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	竜巻または漏斗雲
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	竜巻または漏斗雲
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	竜巻または漏斗雲
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	竜巻または漏斗雲
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	竜巻または漏斗雲
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	竜巻または漏斗雲
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	竜巻または漏斗雲
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	竜巻または漏斗雲
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	竜巻または漏斗雲
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	竜巻または漏斗雲
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	竜巻または漏斗雲
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	竜巻または漏斗雲
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	竜巻または漏斗雲
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

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（以下、「竜巻影響評価ガイド」という）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、なら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。

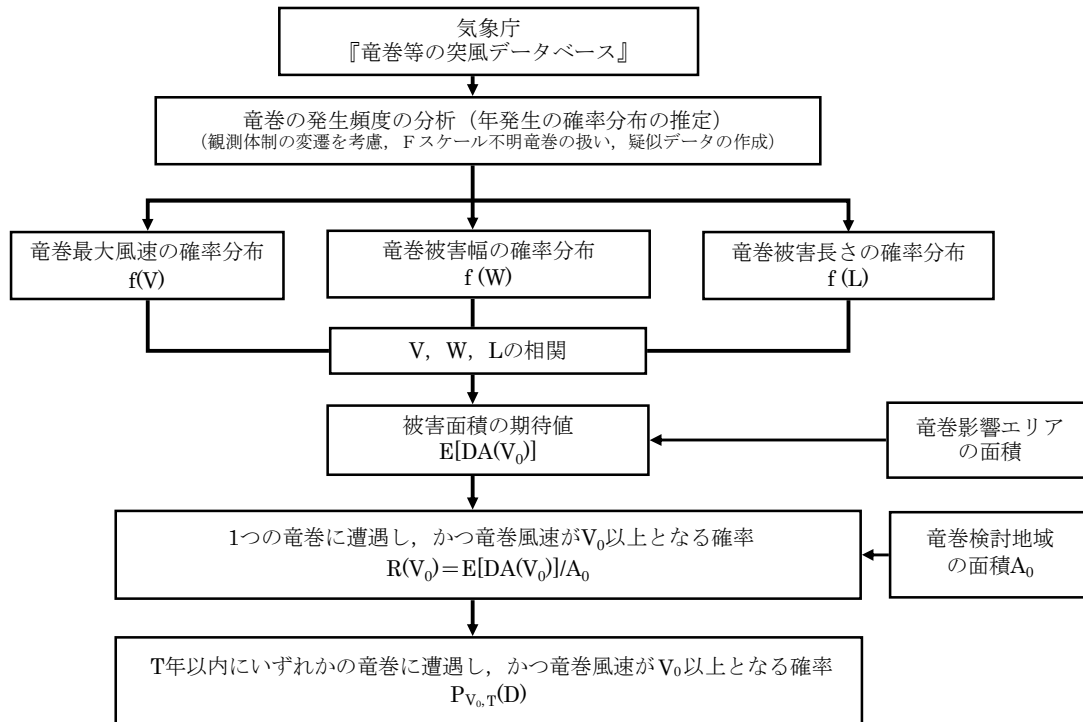


図 1.1 竜巻最大風速ハザード曲線の算定フロー

(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～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 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、年間平均発生数およびその標準偏差を F スケール毎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 スケール毎に作成した。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 および 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 スケール毎に推計する。

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 スケール毎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 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
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

日本における竜巻強度分布の変遷

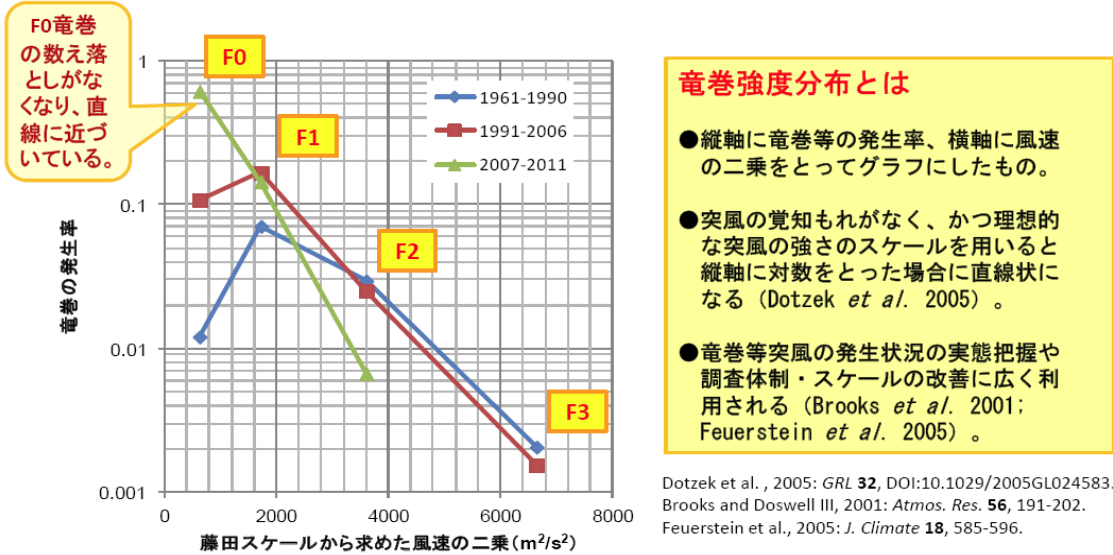


図 2.1 日本における竜巻強度分布の変遷

(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 スケールの両方も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 スケール毎の発生数（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 スケール毎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 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
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 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
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なら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とした場合で計算した結果，図 4.2 の通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変量または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、標準偏差余及び相関係数を表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	-
	被害長さ	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	-

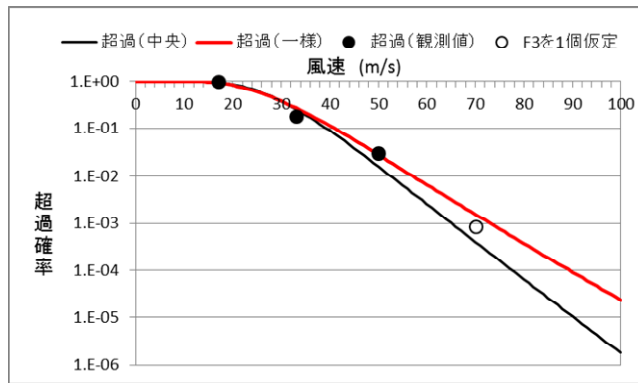
表 4.2(1) 相関係数算定に用いた竜巻風速, 被害幅, 被害長さのデータ数 (単位: 個)

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

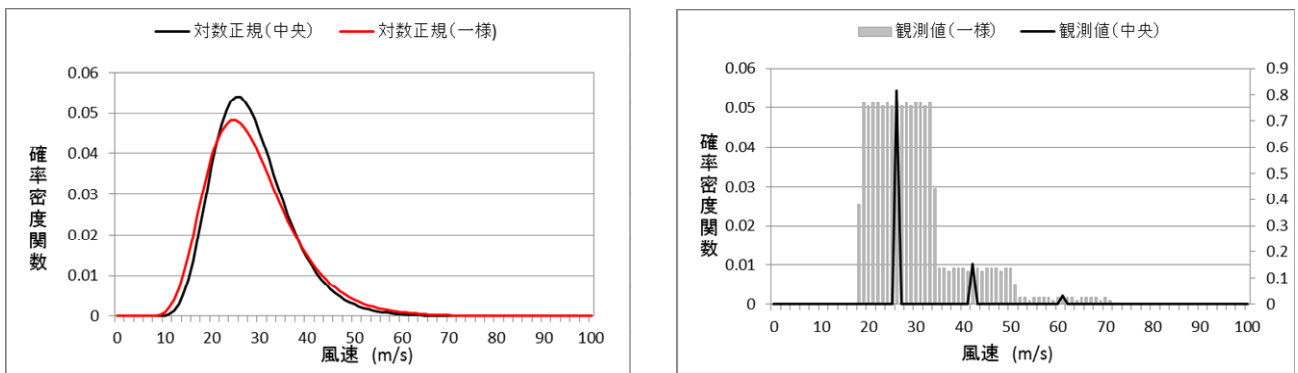
表 4.2(2) 竜巻風速, 被害幅, 被害長さの相関係数 (単位無し)

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

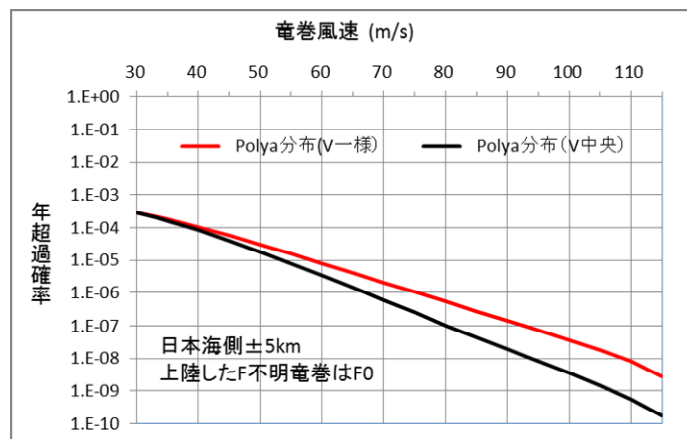


図 4.2 風速設定の違いによる竜巻最大風速のハザード曲線の比較 (海側, 陸側 5km 範囲)

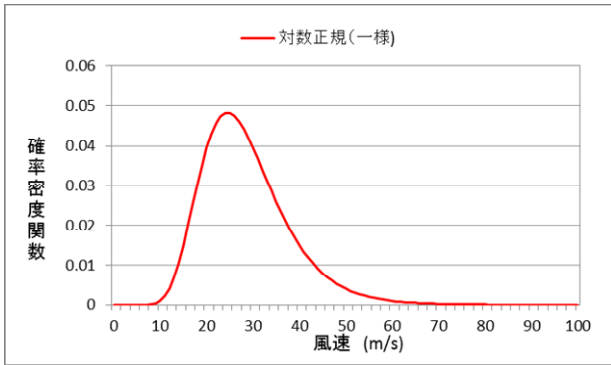


図 4.3(1) 竜巻風速の確率密度分布

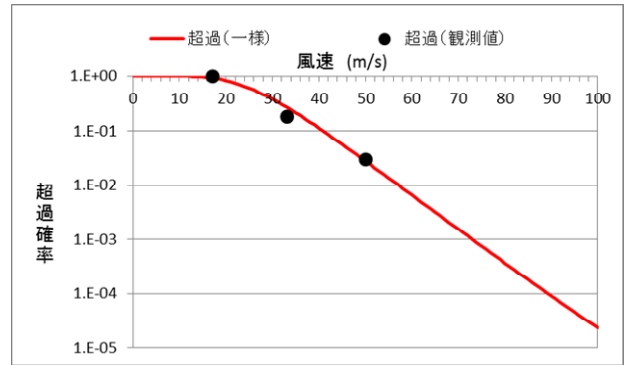


図 4.3(2) 竜巻風速の年超過確率分布

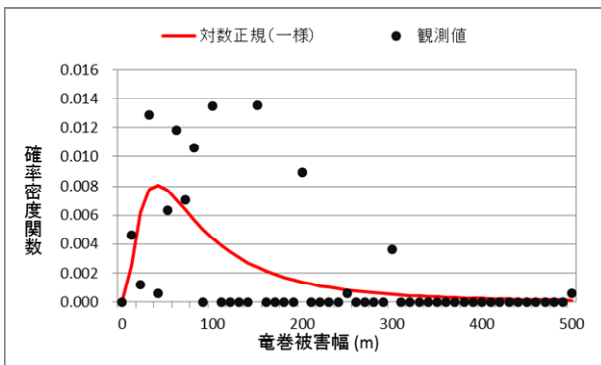


図 4.4(1) 被害幅の確率密度分布

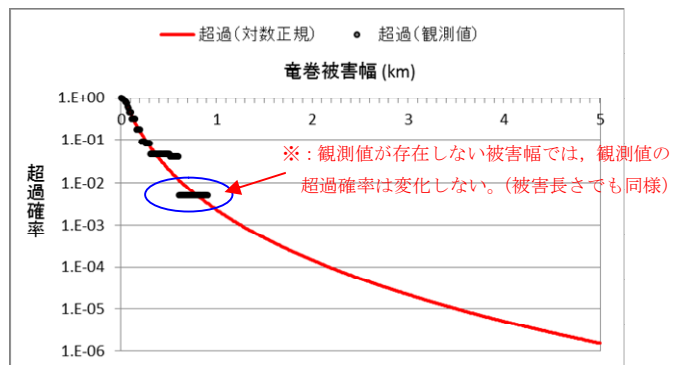


図 4.4(2) 被害幅の年超過確率分布

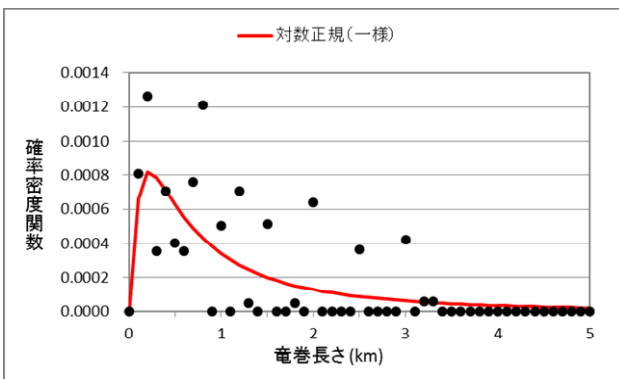


図 4.5(1) 被害長さの確率密度分布

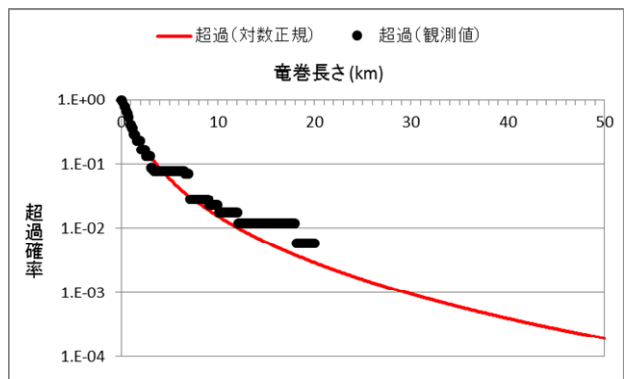


図 4.5(2) 被害長さの年超過確率分布

(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 号炉または 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 $7.1 \times 10^4 \text{m}^2$ ）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。



図5.1 6号炉 竜巻影響エリア

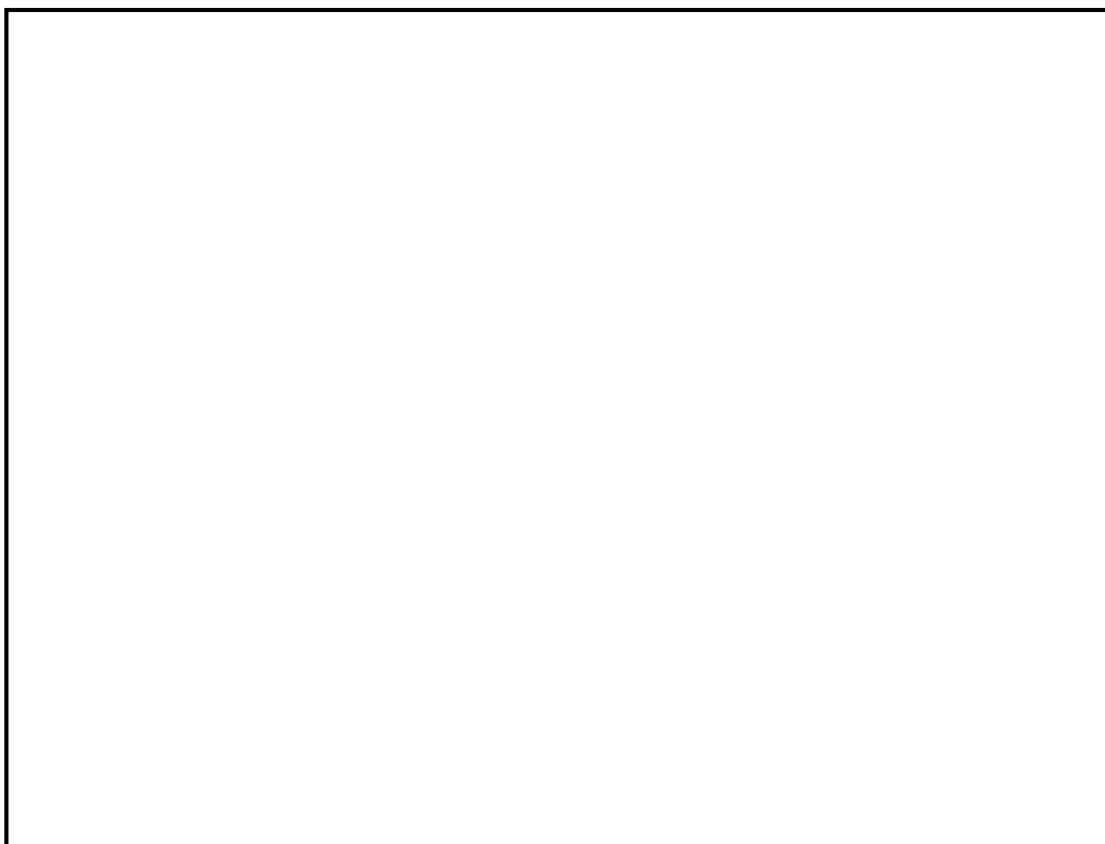


図5.2 7号炉 竜巻影響エリア

(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。

$$P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} (1 + \beta vT)^{-N-1} \beta \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (6.1)$$

ここで、

- N : 竜巻の年発生数
- v : 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

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

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。

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

- 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

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

- $DA(V_0)$: 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。

$$\begin{aligned} DA(V_0) &= WL + HL + WG + AB & ; V_i \geq V_0 \\ DA(V_0) &= 0 & ; V_i < V_0 \end{aligned} \quad (6.4)$$

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。

$$\begin{aligned}
E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
&+ \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty H(\alpha) l f(V, l, \alpha) dV dl d\alpha + \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) G(\alpha) f(V, w, \alpha) dV dw d\alpha \\
&+ AB \int_{V_0}^\infty f(V) dV
\end{aligned} \tag{6.5}$$

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

$f(\cdot)$: 確率密度分布

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

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

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

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。竜巻の幅は長さに対して短いため、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。以上を参考にして、 $V_{\min}=25\text{m/s}$ 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、 $H(\alpha)$ 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竜巻影響評価対象構造物を投影した時の長さである。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。

$$H(\alpha) = G(\alpha) = D_0 \quad (6.7)$$

従って、式(6.5)は式(6.5')と表すことができる。

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

2 変量, 3 変量の対数正規分布は, 以下の式(6.8)または式(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 ならびに ρ に適用して, 同時確率密度関数 f を定めた。

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

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

(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、竜巻影響評価ガイドを参考に年超過確率 10^{-5} に相当する竜巻風速 V_{B2} は、 58.3m/s とする。なお、竜巻影響評価ガイドで要求されている、 1km 毎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、不確か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かさを表したハザード曲線により、これらの不確かさが十分小さいことを確認した。更に、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。

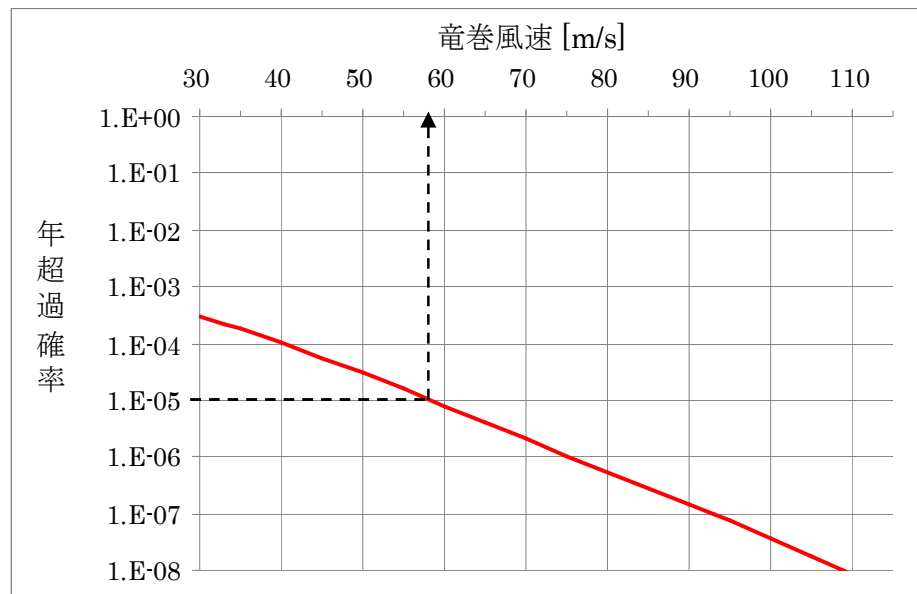
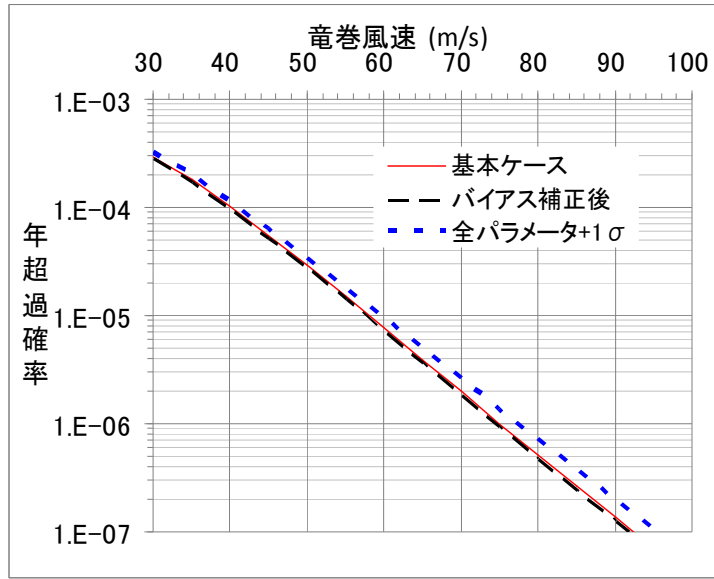
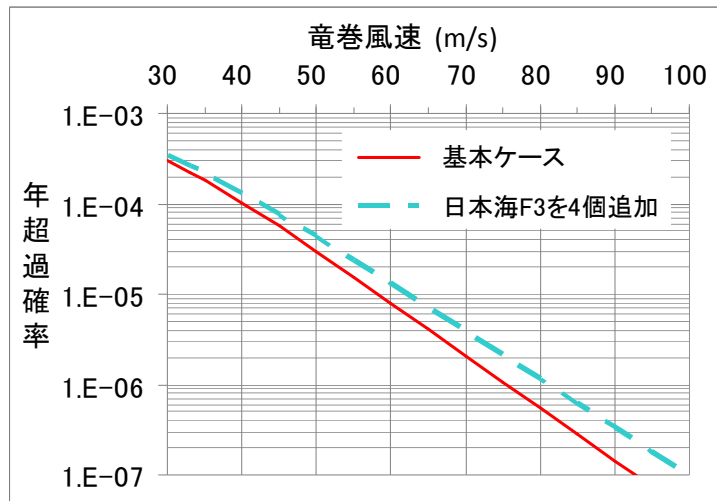


図7.1 竜巻最大風速のハザード曲線 (海側, 陸側5km範囲)



(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 スケール毎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、観測結果を基に、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および図1は、陸上竜巻、上陸竜巻および（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 スケール毎の割合はそれぞれ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 スケール毎の発生割合は、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 スケール毎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 スケール毎の割合はそれぞれ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事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）。従って、（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。

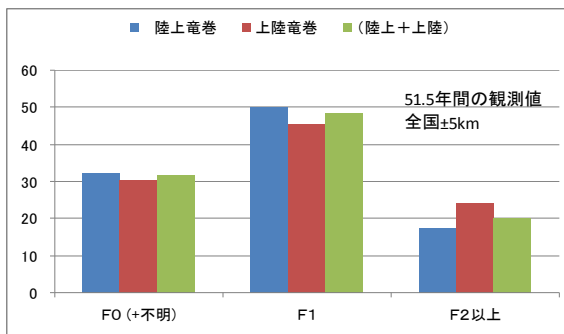
表1 Fスケール毎の竜巻発生数の割合

(a) 全国沿岸±5km

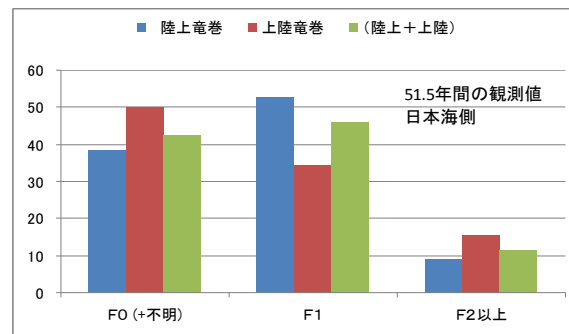
発生数の割合 (%)	FO (+不明)	F1	F2以上
陸上竜巻	32	50	18
上陸竜巻	30	45	24
(陸上+上陸)	32	48	20

(b) 日本海側

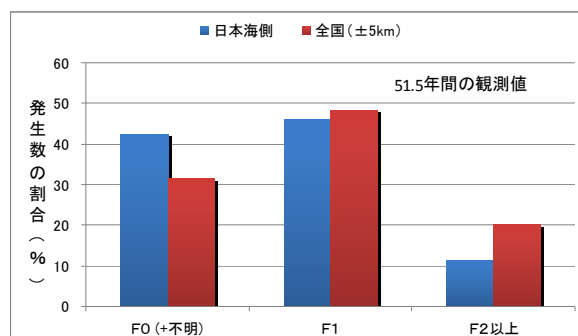
発生数の割合 (%)	FO (+不明)	F1	F2以上
陸上竜巻	38	53	9
上陸竜巻	50	34	16
(陸上+上陸)	43	46	11



(a) 全国±5km



(b) 日本海側



(c) (陸上+上陸) 竜巻

図1 Fスケール毎の発生数の割合

【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もしくはポリヤ分布に適合する。

$$\text{ポアソン分布： } P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} \exp(-vT) \quad (1)$$

$$\text{ポリヤ分布： } P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} (1 + \beta vT)^{-(N+1/\beta)} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (2)$$

ここで、 N は竜巻の年発生数、 v 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、 V_0 以上の竜巻風速に見舞われる確率 $P_{V_0,T}(D)$ は次式で表される。

$$\text{ポアソン分布： } P_{V_0,T}(D) = 1 - \exp[-vR(V_0)T] \quad (3)$$

$$\text{ポリヤ分布： } P_{V_0,T}(D) = 1 - [1 + \beta vR(V_0)T]^{-1/\beta} \quad (4)$$

ここで、 $R(V_0)$ 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 V_0 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、遺伝子の突然変異など数多くある。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、 $\beta \rightarrow 0$ の時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）およ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などの言語処理などに活用されており、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 V_0 以上となるような被害を受ける確率を $R(V_0)$ 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。

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

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）。

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

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。

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

従って、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、

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

となる。 $R(V_0)$ が十分小さければ、上式は次のように近似できる。

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

ここで、次の近似を用いている。

$$[1 - R(V_0)]^N \approx 1 - N \times R(V_0) \quad (10)$$

竜巻被害の場合、 $R(V_0)$ 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。

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

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、

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

となることを考慮すると、式(11)の厳密な式は以下の通りである。

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

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。

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

従って、式(3) (あるいは式(13)) は、式(14)を用いると、

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

と表され、 $R(V_0)$ が小さい場合は、次式で近似できる。

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

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。

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

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 毎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毎エリア)	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。

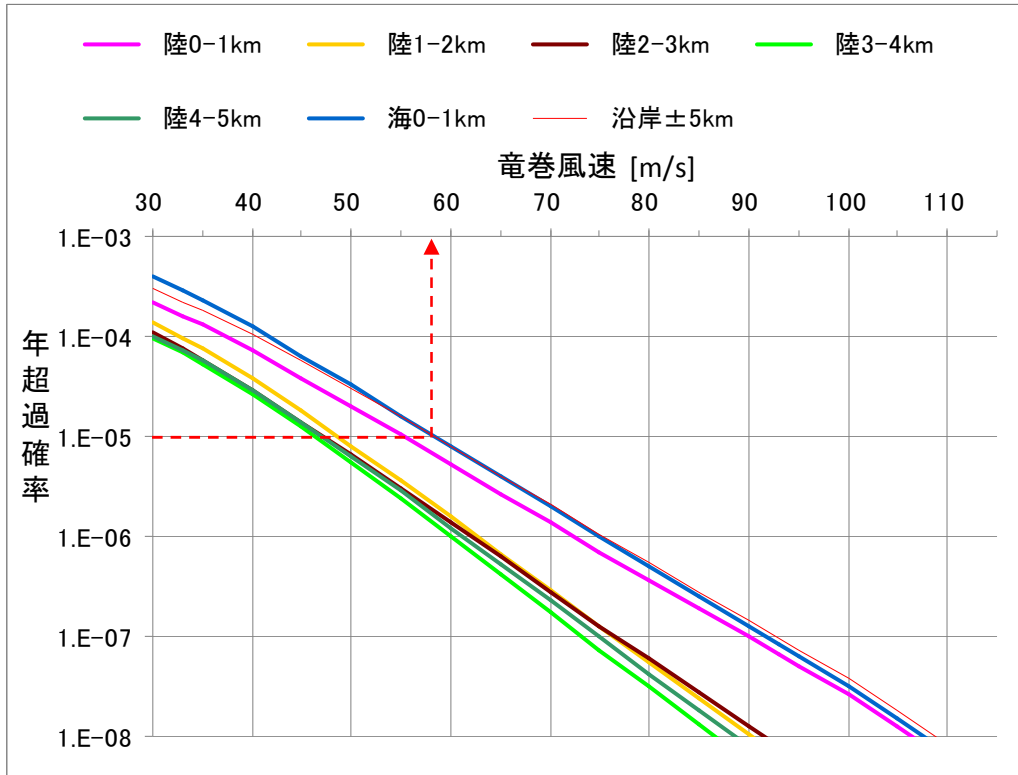


図 1.1 1km 範囲毎のハザード曲線と±5km 範囲のハザード曲線

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・通過数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
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)	4.41	3.67	0.56	0.17	-	-	-	4.41
	標準偏差(年)	3.40	3.32	0.60	0.43	-	-	-	3.40
	CV(年)	0.77	0.91	1.07	2.47	-	-	-	0.77

表 1.4 陸側1-2km 範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸1-2km)	発生数・通過数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
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)	1.90	1.46	0.39	0.06	-	-	-	1.90
	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・通過数 の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
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)	1.98	1.65	0.29	0.04	-	-	-	1.98
	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・通過数 の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
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)	1.09	0.74	0.33	0.02	-	-	-	1.09
	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・通過数 の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
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)	0.87	0.56	0.29	0.02	-	-	-	0.87
	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・通過数 の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
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)	8.99	7.71	0.95	0.33	-	-	-	8.99
	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 毎の領域で竜巻ハザードを求める際の問題点

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（以下、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あたっては、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 毎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 毎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。

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

ここで、 V, w, l, α は、それぞれ竜巻の最大風速、幅、長さおよび移動方向である。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 $0 \sim \infty$ 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 毎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、風速と共に、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 O 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（ $\theta = 0$ 度の方向（海岸線を想定）は帯状の領域に平行、 $\theta = 90$ 度の方向（図の上向き）に x 軸）へ移動する確率は一樣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 ± 5 km 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樣とした場合であるが、 $\theta = 90$ 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。

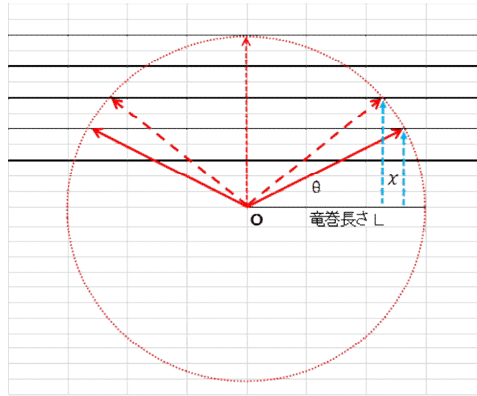


図 2.1 竜巻の発生と移動の概念図

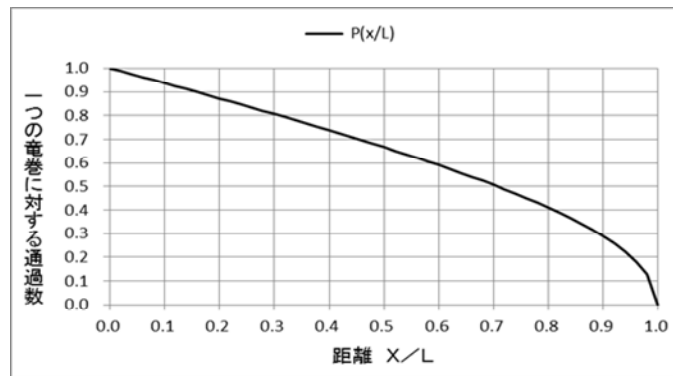


図 2.2 带状領域での竜巻の通過数

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、上陸地点も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 毎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およ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るが、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 海岸線を通じ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 スケールや幅などのパラメータは不明である。更に、目撃情報を基にした発生・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 $f(x,y,z)$ 、および竜巻ハザード (1年間にいずれかの竜巻により V_0 以上の被害を受ける確率 $P_{V_0}(D)$) の関係について整理する。竜巻のハザード $P_{V_0}(D)$ は、竜巻の年平均発生数 ν と次の関係にある。

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

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、($E[\cdot]$ 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 $E[\cdot]$ は、竜巻風速、被害幅、被害長さおよ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。

$$E[DA(V_0)] \approx (1-F(V_0)) \times [w\bar{l} + D_0\bar{l} + \bar{w}D_0 + (\pi D_0^2/4)] \quad (3)$$

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 l 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。従って、 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 毎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。従って、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・経度情報を基に、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 短冊の値など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)。

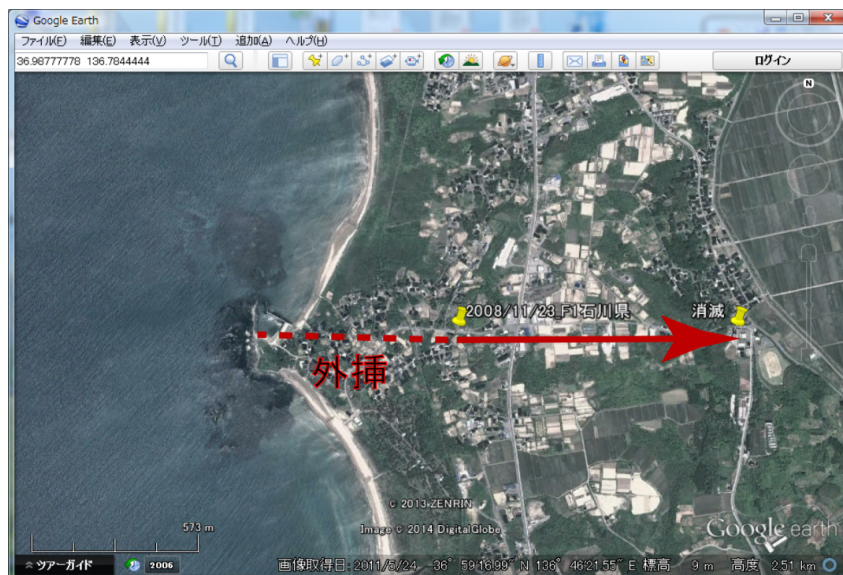


図 2.1 上陸竜巻のデータベース上の発生・消滅位置の一例(2008/11/23 の竜巻)

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 および表 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。

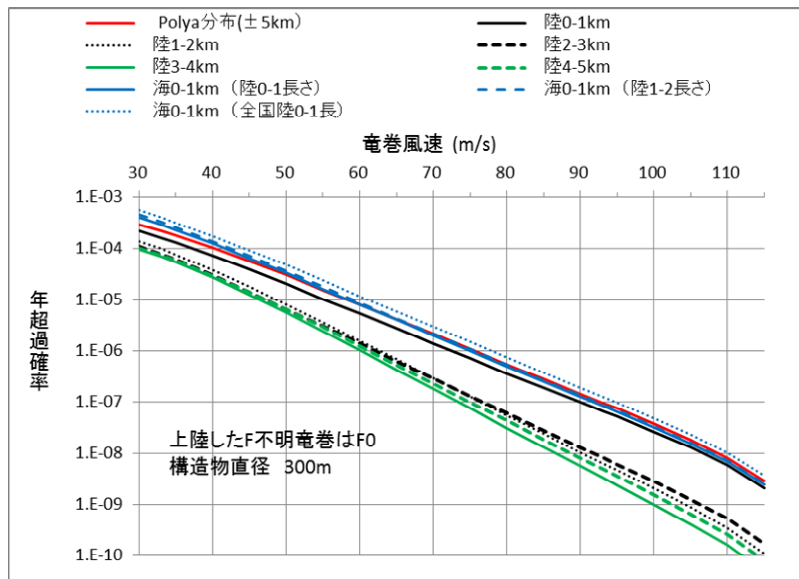
表 3.1 竜巻ハザードの計算条件

検討ケース	竜巻検討地域 (日本海側±5km)	統計量	発生数	風速	幅	長さ	相関係数		
			(個)	(m/s)	(m)	(m)	U ~ W	U ~ L	W ~ L
CASE 1A-1	±5km (V-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			

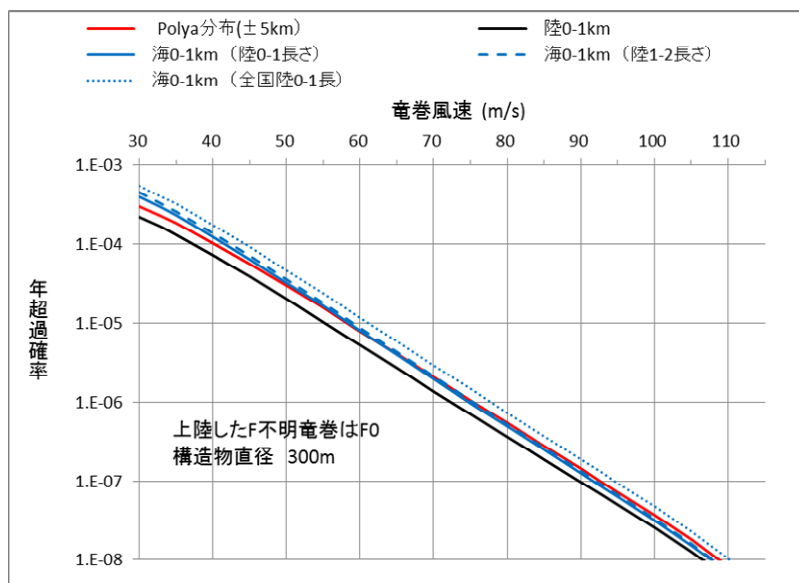
(注)風速のゴシックは、風速を F スケール内の一様分布で推定。その他は中央値。

(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-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

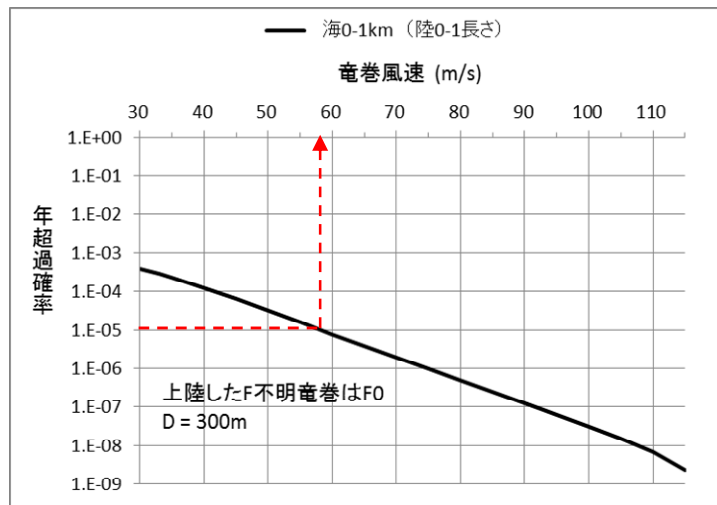


図 3.2 竜巻検討地域における海側 0-1km のハザード (CASE 2-6B)

【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通り整理した。

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（偶然的な不確実さ）

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共に、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。

$$P^* = P_0 + (n-1)(P_0 - \bar{P}) \quad (1)$$

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

ここで、 \bar{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基に、全てのパラメータを +1 σ 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 (+1 σ)	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。

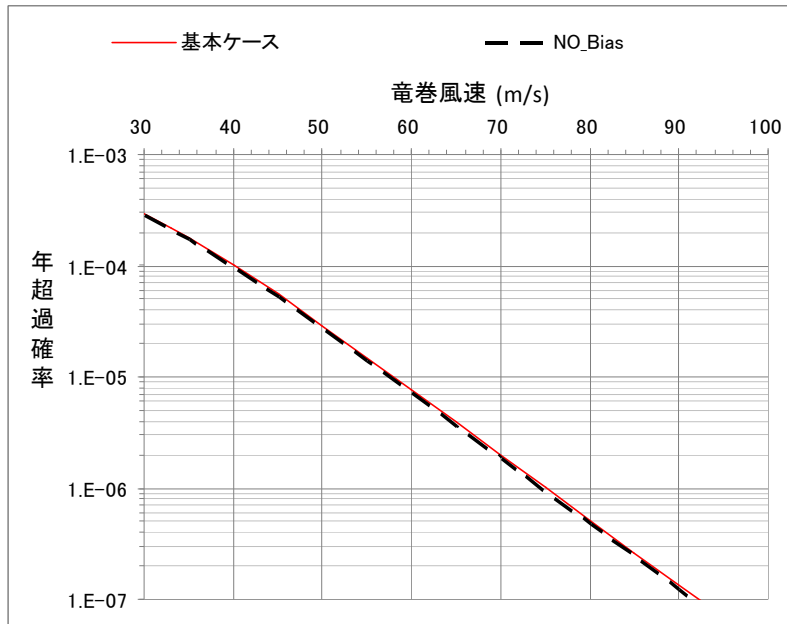


図1 基本ケースとバイアス補正後ケースのハザード算定結果比較

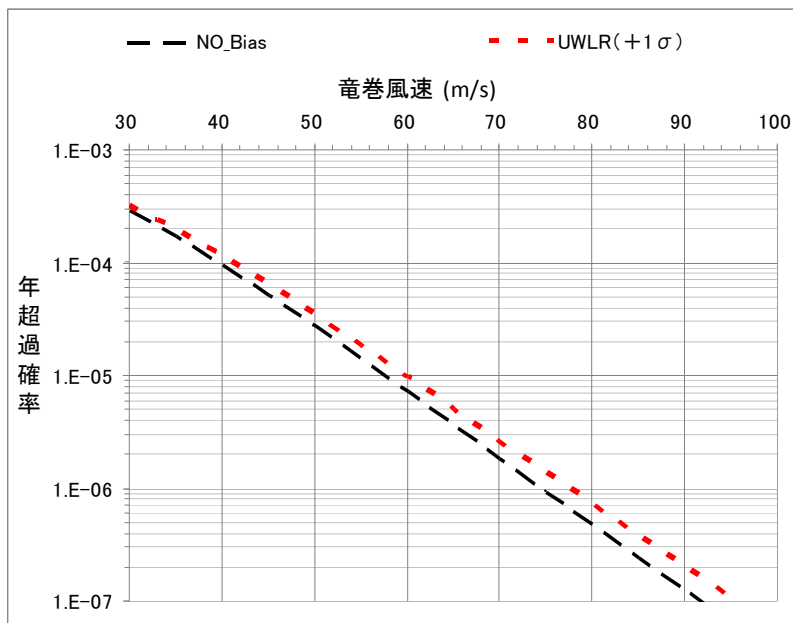


図2 バイアス補正後ケースと全パラメータ+1σケースのハザード算定結果比較

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。

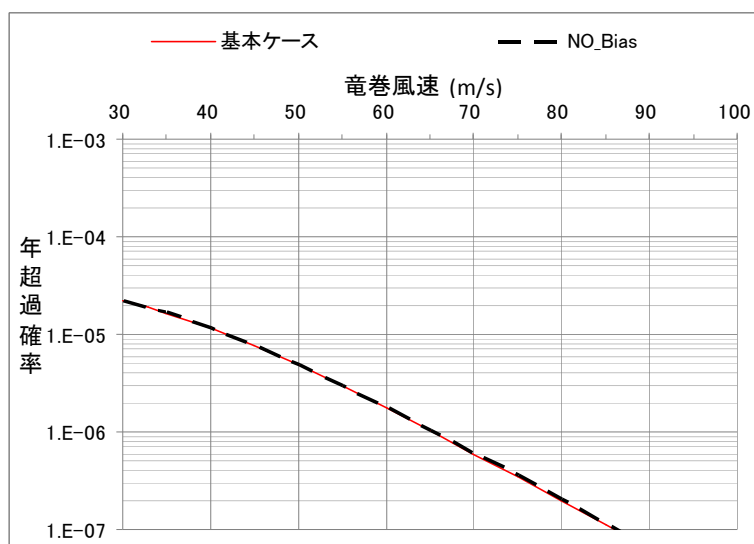


図3 基本ケースとバイアス補正後ケースのハザード算定結果比較
(疑似データ無し)

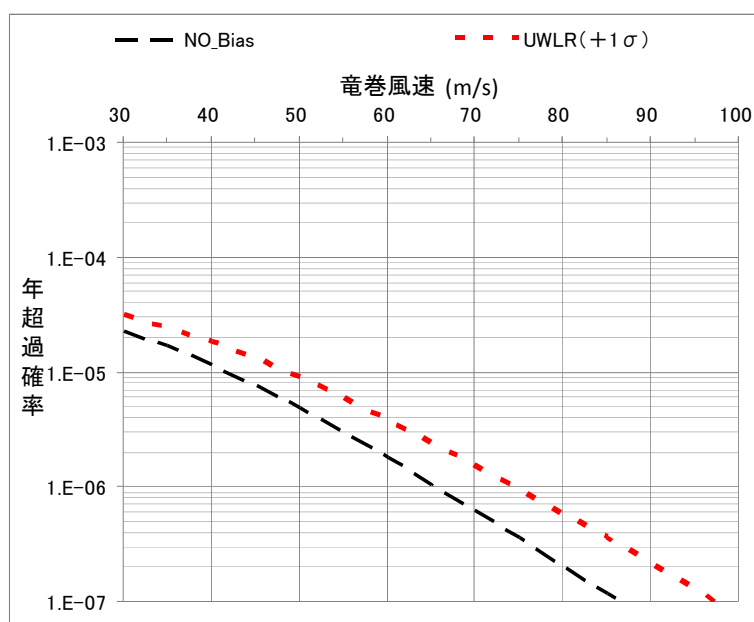


図4 バイアス補正後ケースと全パラメータ+1σケースのハザード算定結果比較
(疑似データ無し)

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。これを基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。

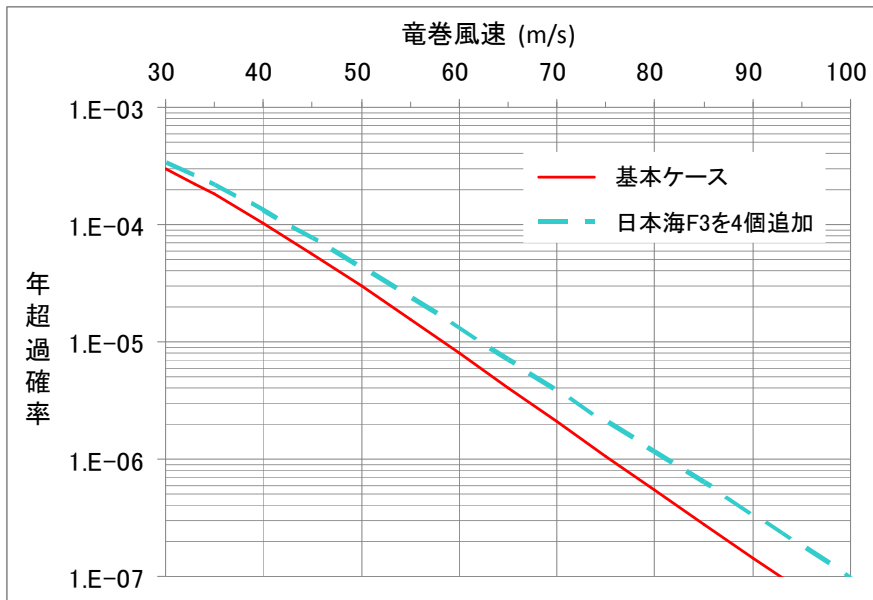


図 5 F3 竜巻発生を仮定した場合の竜巻風速の年超過確率分布

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）

⇒②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（偶然的な不確実さ）

⇒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、 $V_B=76\text{m/s}$ 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, \dots, 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

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

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

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

とする。 $\hat{\psi}_{(i)}$ の平均値を

$$\hat{\psi}_{(\bullet)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{\psi}_{(i)} \quad (3)$$

により求める。バイアス値は次式で与えられる。

$$\hat{BIAS} = (n-1)(\hat{\psi}_{(\bullet)} - \hat{\psi}) \quad (4)$$

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。

$$\tilde{\psi} = \hat{\psi} - \hat{BIAS} = n\hat{\psi} - (n-1)\hat{\psi}_{(\bullet)}$$

また、Jackknife 法による推定幅は、

$$\hat{VAR} = \frac{n-1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{\psi}_{(i)} - \hat{\psi}_{(\bullet)})^2 \quad (5)$$

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

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」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、スーパーセルスケールへの関与によるメソスケールでの「発生」などへの影響と、渦の旋回流への関与によるマイクロスケールでの「風速」など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)を用いた検討などがある。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。

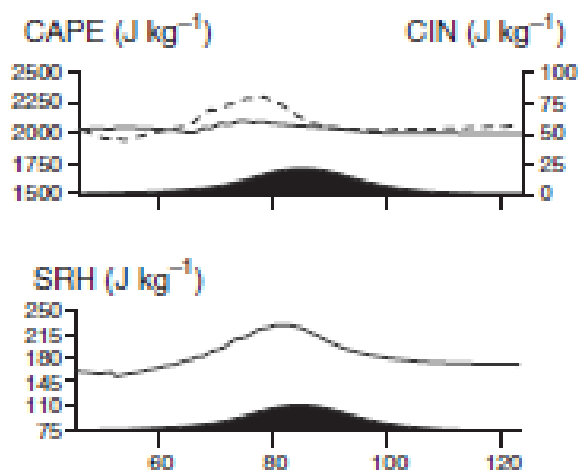


図1 メソスケール尾根地形に起因するCAPE, SRHなどのパラメータの変化を調べた例

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およ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およ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および強風に与える影響の定量的評価は、未だ、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およ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。

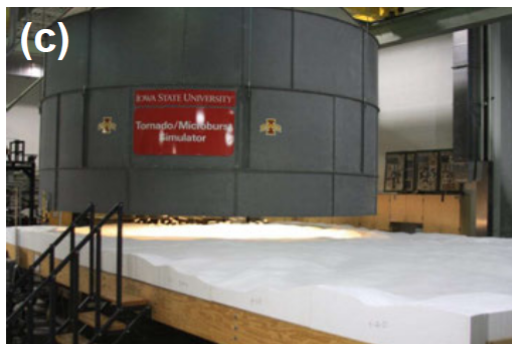


図 2 風洞実験の様子 (Karstens 2012)

③数値シミュレーション (Lewellen 2012) では、竜巻の旋回流や移動およ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および竜巻の構造に関連する圧力分布を調べる。

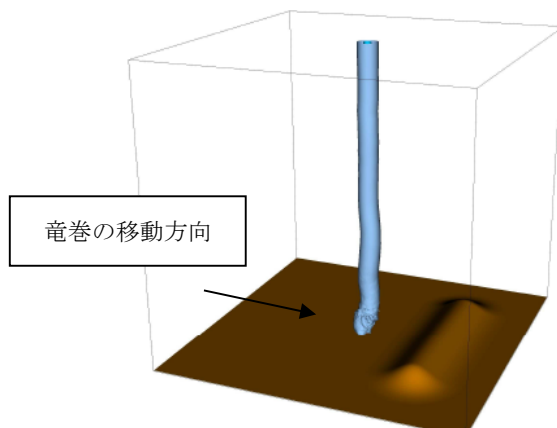


図 3 数値シミュレーションのセットアップ

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) およ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2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、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 (圧力の高いとこ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(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・下流の平坦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。

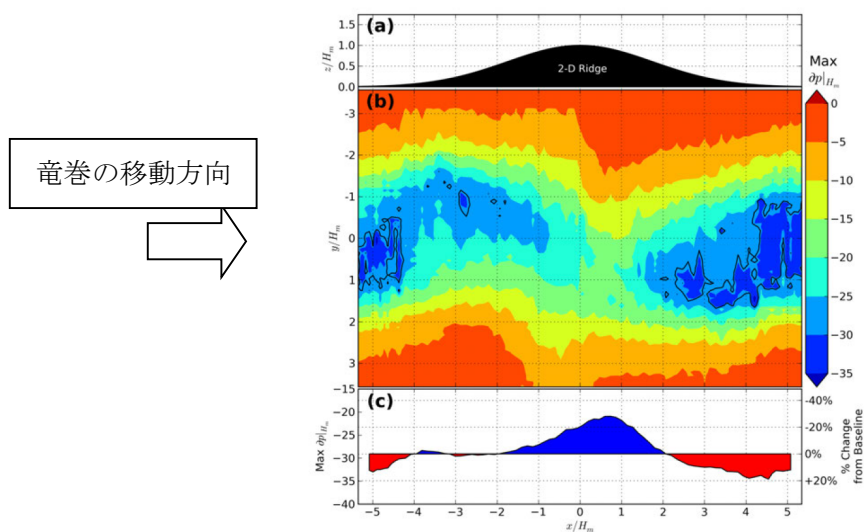


図 4 尾根地形を竜巻が通過するときの地表面圧力および圧力勾配 (風速に相当)

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）

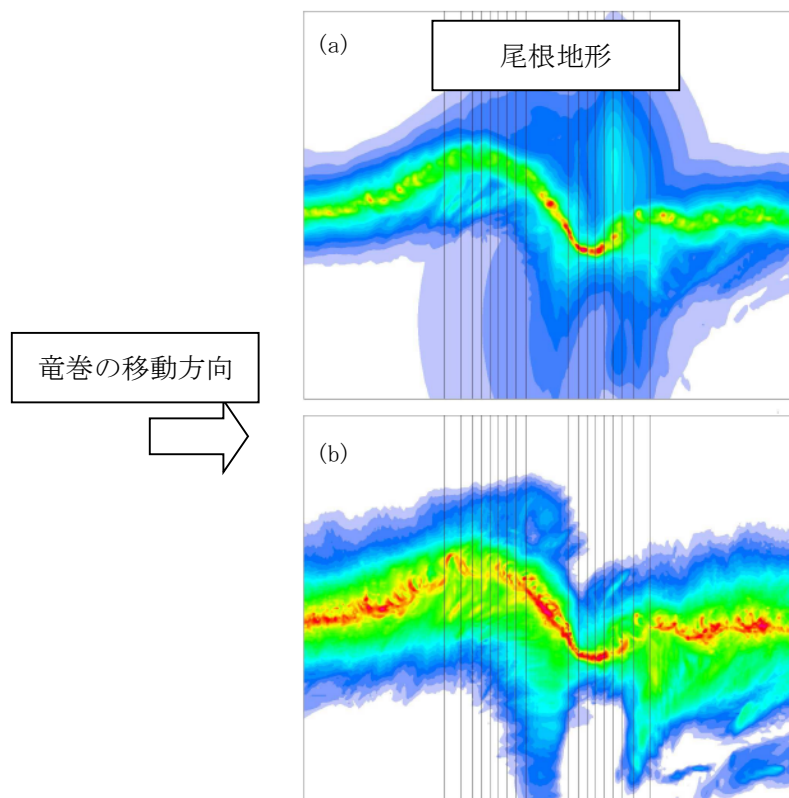


図 5 尾根地形を竜巻が通過するときの地表面ピーク圧力および風速

ここで地形の規模として尾根高さ H_m に対して $\pm 5H_m$ 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、 $\pm 500m$ 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、斜面および尾根・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、柏崎サイトより西側に注視すればよいといえる。

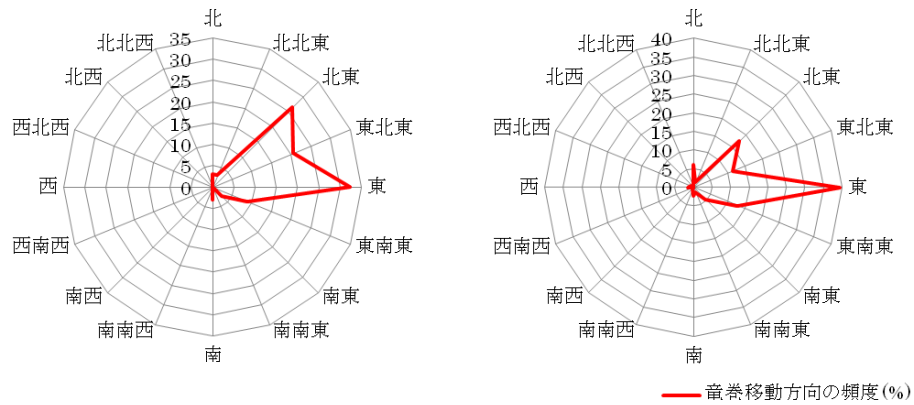


図 6 竜巻の移動経路の発生頻度（左：竜巻集中地域，右：竜巻検討地域）

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。

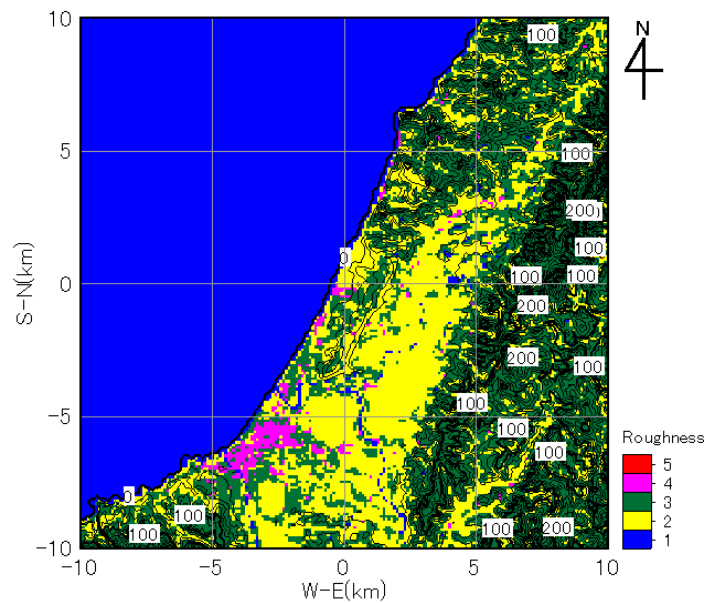


図 7 柏崎周辺の地形起伏

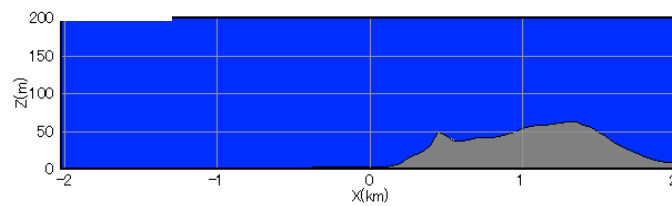


図 8 柏崎東西方向の鉛直断面での地形起伏

これらの結果から、柏崎周辺の数km領域において、「尾根高さ H_m に対して $\pm 5H_m$ 」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う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（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、風の場合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. Proc 19th Conf Severe local storms Amer Meteorol Soc, Minneapolis, MN, pp.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 Conference on Severe Local Storms Amer Meteorol Soc, Nashville, TN, 4B.1.

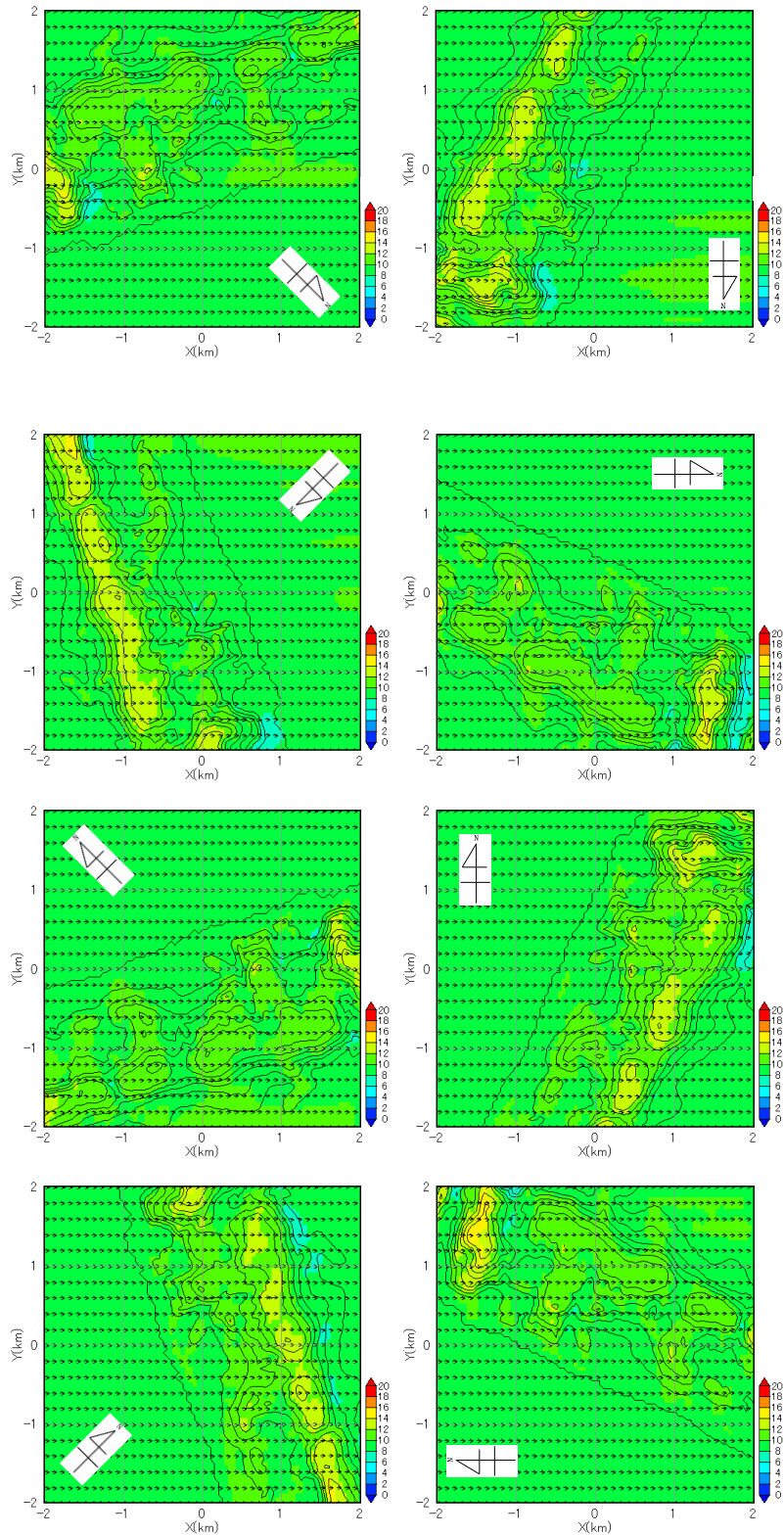


図 9 柏崎周辺の風速の増減速率分布 (8 風向) (流入風速に対する比を 10 倍にして表示)

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。

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{r_1} \int_0^{h_1} (\rho r^2 \omega_1) dh \cdot r dr d\varphi = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_2} \int_0^{h_2} (\rho r^2 \omega_2) dh \cdot r dr d\varphi \quad \text{①}$$

$$\frac{1}{4} r_1^4 \omega_1 h_1 = \frac{1}{4} r_2^4 \omega_2 h_2 \quad \text{②}$$

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。

$$\pi r_1^2 h_1 = \pi r_2^2 h_2 \Rightarrow r_2^2 = \frac{h_1}{h_2} r_1^2 \quad \text{③}$$

この関係を式②に代入すると、式④が得られる。

$$\frac{\omega_1}{h_1} = \frac{\omega_2}{h_2} \Rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega}{h} \right) = 0 \quad \text{④}$$

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時、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動する時には強まる。

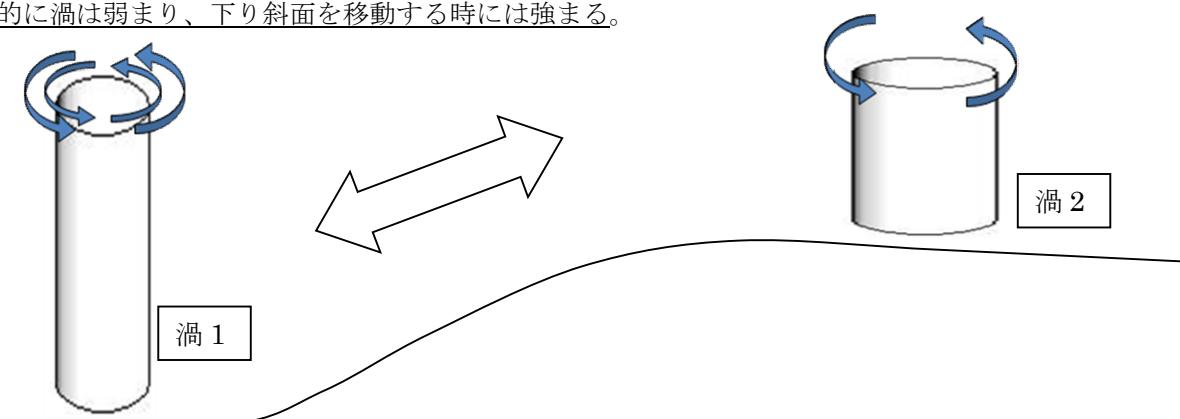


図 竜巻の旋回流の地形影響に関する模式図

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

竜巻影響評価ガイドおよ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同規模なものに分離し、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およ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を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 (2013)	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

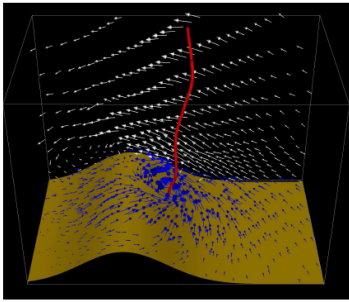
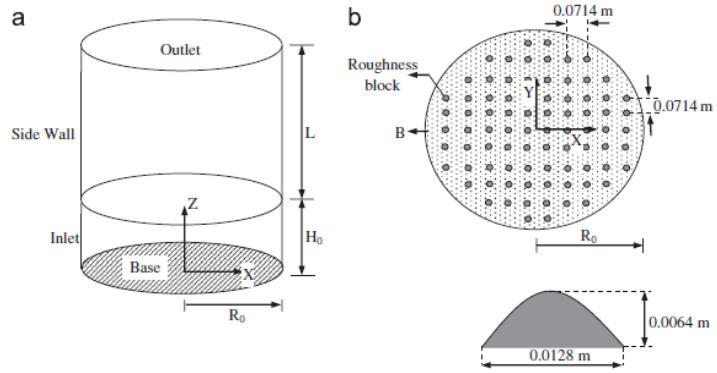


Figure 7: Sample velocity vectors 10 m above the surface (blue) and on a selected vertical plane (white) for a tornado heading upslope (moving right to left); vectors are given in a reference frame with the ground at rest. The red line represents the mean vortex core position at the time. The simulation case is that of fig. 4.

(a) Lewellen (2012)



(b) Natarajan and Hangan

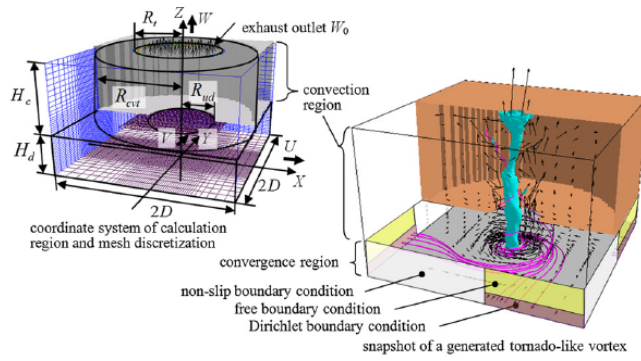


Fig. 1. Numerical tornado simulator.

(c) Maruyama (2011)

図1 近年の竜巻数値流体計算の解析モデル

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および竜巻など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）。

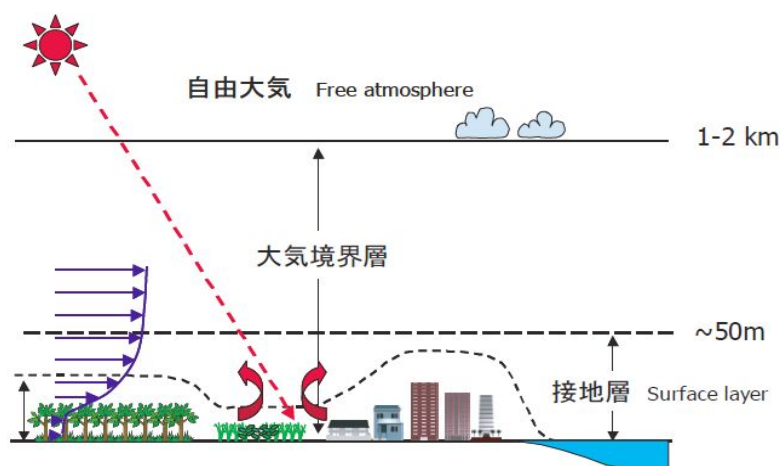


図 1 大気の鉛直構造の模式図

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_0 を用いて

$$U(z) = c \ln(z/z_0) \tag{1}$$

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	評価地点および風上側地域の地表面の状況
I	海面または湖面のような、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、低層建築物など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。

$$U(z) = c(z/z_G)^\alpha \quad (zb < z \leq z_G) \quad (2)$$

粗度区分	I	II	III	IV	V
z_b (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、 z_b , 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。

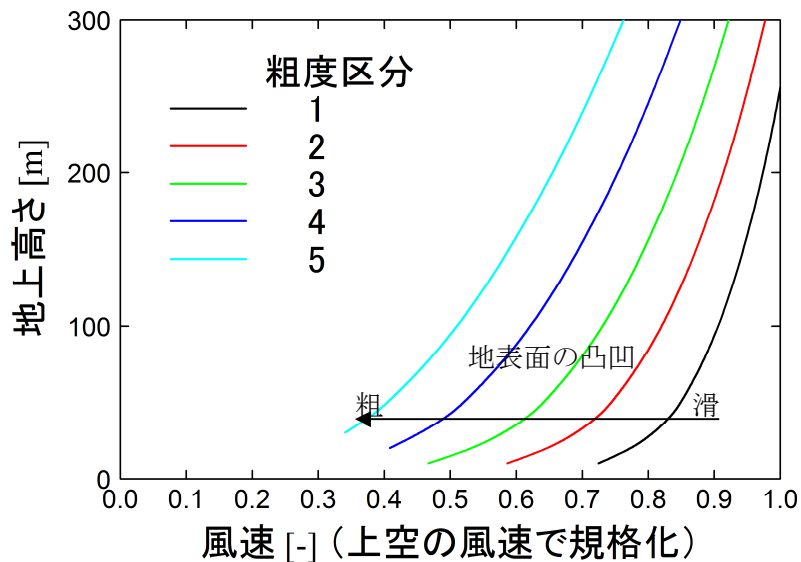


図 2 粗度区分と風速の鉛直分布との関係

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、地表面状態が森林など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 開発者 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 CR (1993) The tornado: its structure, dynamics, prediction and hazards. American Geophysics Union.

Hattori Y et al. (2010) Wind-tunnel experiment on logarithmic-layer turbulence under the influence of overlying detached eddies. *Boundary-Layer Meteorol* 134, pp269-283.

Leslie F W (1997) Surface roughness effects on suction vortex formation. *J Atmos Sci* 34, pp.1022-1027.

Lewellen WS, Sheng YP (1979) Influence of surface conditions on tornado wind distribution. *Proc 11th Conf Severe local storms*, pp.375-378.

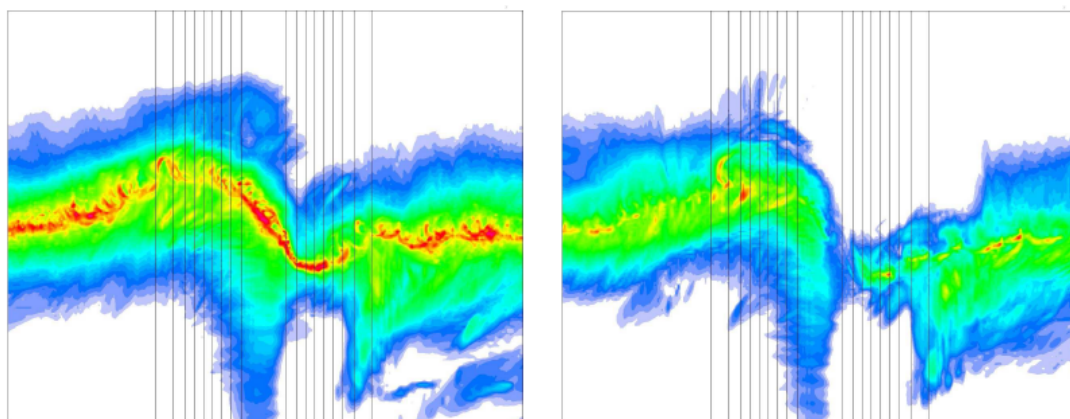
Lewellen DC, Gong B, Lewellen WS (2008) Effects of finescale debris on near-surface tornado dynamics. *J Atmos Scipp*.3247-3262.

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, pp.577-584.

Rostek WF, Snow JT (1985) Surface roughness effects on tornado like vortices. *Proc. 15th Conf Severe local storms*, pp.252-255.

添付資料：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 ($z_0 = 2 \text{ cm}$ 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 $z_0=2\text{cm}$ の場合

地表面粗度 $z_0=20\text{cm}$ の場合

図 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, D. C. (2012) Effects of topography on tornado dynamics: A simulation study. 26th Conference on Severe Local Storms, Amer. Meteorol. Soc., Nashville, TN, 4B.1.