

東海第二発電所

外部からの衝撃による損傷の防止

(竜巻)

第6条 外部からの衝撃による損傷の防止

(竜巻)

<目次>

1. 基本方針
 - 1.1 要求事項の整理
 - 1.2 追加要求事項に対する適合性
 - (1) 位置, 構造及び設備
 - (2) 安全設計方針
 - (3) 適合性説明

2. 外部からの衝撃による損傷の防止
 - 別添資料1 竜巻影響評価について
 - 別添資料2 竜巻影響評価におけるフジタモデルの適用について

< 概 要 >

1. において、設計基準対処設備の設置許可基準規則、技術基準基礎の追加要求事項を明確化するとともに、それら要求に対する東海第二発電所における適合性を示す。

2. において、設計基準対処設備について、追加要求事項に適合するために必要となる機能を達成するための設備又は運用等について説明する。

1. 基本方針

1.1 要求事項の整理

外部からの衝撃による損傷の防止について，設置許可基準規則第 6 条及び技術基準規則第 7 条において，追加要求事項を明確化する。（表 1）

表1 設置許可基準規則第6条及び技術基準規則第7条 要求事項

設置許可基準規則 第6条（外部からの衝撃による損傷の防止）	技術基準規則 第7条（外部からの衝撃による損傷の防止）	備考
安全施設は、想定される自然事象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。	設計基準対象施設が想定される自然現象（地震及び津波を除く。）によりその安全性を損なうおそれがある場合は、防護措置、基礎地盤の改良その他の適切な措置を講じなければならない。	追加要求事項
2 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならない。		追加要求事項
3 安全施設は、工場等内又はその周辺において想定される発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）に対して安全機能を損なわないものでなければならない。	<p>2 周辺監視区域に隣接する地域に事業所、鉄道、道路その他の外部からの衝撃が発生するおそれがある要因がある場合には、事業所における火災又は爆発事故、危険物を搭載した車両、船舶又は航空機の事故その他の敷地及び敷地周辺の状況から想定される事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）により発電用原子炉施設の安全性が損なわれないよう、防護措置その他の適切な措置を講じなければならない。</p> <p>3 航空機の墜落により発電用原子炉施設の安全性を損なうおそれがある場合は、防護措置その他の適切な措置を講じなければならない。</p>	追加要求事項

1.2 追加事項に対する適合性

(1)

(3) その他の主要な構造

(i) 本発電用原子炉施設は、(1)耐震構造、(2)耐津波構造に加え、以下の基本的方針のもとに安全設計を行う。

a. 設計基準対象施設

(a) 外部からの衝撃による損傷の防止

安全施設は、発電所敷地で想定される洪水、風（台風）、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、地滑り、火山の影響、生物学的事象、森林火災及び高潮の自然現象（地震及び津波を除く。）又は地震及び津波を含む自然現象の組合せに遭遇した場合において、自然事象そのものがもたらす環境条件及びその結果として施設で生じ得る環境条件においても安全機能を損なわない設計とする。

なお、発電所敷地で想定される自然現象のうち、洪水、地滑りについては、立地的要因により設計上考慮する必要はない。

また、自然現象の組合せにおいては、地震、津波、風（台風）、積雪及び火山の影響による荷重の組合せを設計上考慮する。

上記に加え、重要安全施設は、科学的技術的知見を踏まえ、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生じる応力について、それぞれの因果関係及び時間的变化を考慮して適切に組み合わせる。

また、安全施設は、発電所敷地又はその周辺において想定される、航空機落下、ダムの崩壊、爆発、近隣工場等の火災、有毒ガ

ス、船舶の衝突及び電磁的障害の発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）に対して安全機能を損なわない設計とする。

なお、発電所敷地又はその周辺において想定される人為事象のうち、航空機落下については、確率的要因により設計上考慮する必要はない。また、ダムの崩壊については、立地的要因により考慮する必要はない。

ここで、想定される自然現象及び発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）に対して、安全施設が安全機能を損なわないために必要な安全施設以外の施設又は設備等（重大事故等対処設備を含む。）への措置を含める。

- (a-1) 安全施設は、想定される竜巻が発生した場合においても、作用する設計荷重に対して、その安全機能を損なわない設計とする。また、安全施設は、過去の竜巻被害状況及びプラント配置から想定される竜巻に随伴する事象に対して、安全機能を損なわない設計とする。竜巻に対する防護設計を行うための設計竜巻の最大風速は 100m/s とし、設計荷重は、設計竜巻による風圧力による荷重、気圧差による荷重及び飛来物が安全施設に衝突する際の衝撃荷重を組み合わせた設計竜巻荷重、並びに、安全施設に常時作用する荷重、運転時荷重及びその他竜巻以外の自然現象による荷重等を適切に組み合わせたものとして設定す

る。安全施設の安全機能を損なわないようにするため、安全施設に影響を及ぼす飛来物の発生防止対策を実施するとともに、作用する設計荷重に対する安全施設及び安全施設を内包する区画の構造健全性の確保、若しくは、飛来物による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間での修復等の対応、又は、それらを適切に組み合わせることで、その安全機能を損なわない設計とする。飛来物の発生防止対策として、飛来物となる可能性のあるもののうち、資機材については飛来した場合の運動エネルギー及び貫通力が設定する設計飛来物である鋼製材（長さ 4.2m×幅 0.3m×高さ 0.2m, 質量 135kg, 飛来時の水平速度 51m/s, 飛来時の鉛直速度 34m/s）より大きなものに対し、固縛、固定又は竜巻防護施設からの離隔を実施する。

（２）安全設計方針

1.7 竜巻防護に関する基本方針

1.7.1 設計方針

（１）竜巻に対する設計の基本方針

安全施設が竜巻に対して、発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な各種の機能を損なわないよう、基準竜巻、設計竜巻及び設計荷重を適切に設定し、以下の事項に対して、対策を行い、建屋による防護、構造健全性の維持及び代替設備の確保等によって、安全機能を損なわない設計とする。

また、安全施設は、設計荷重による波及的影響によって、安全機能を損なわない設計とする。

- a. 飛来物の衝突による施設の貫通及び裏面剥離
- b. 設計竜巻による風圧力による荷重，気圧差による荷重，及び設計飛来物による衝撃荷重を組み合わせた設計竜巻荷重及びその他の組み合わせ荷重（常時作用している荷重，運転時荷重，竜巻以外の自然現象による荷重及び設計基準事故時荷重）を適切に組み合わせた設計荷重
- c. 竜巻による気圧の低下
- d. 外気と繋がっている箇所への風の流入

竜巻から防護する施設としては，安全施設が竜巻の影響を受ける場合においても，発電用原子炉施設の安全性を確保するために，「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」で規定されているクラス1，クラス2及びクラス3に該当する構築物，系統及び機器とする。

竜巻から防護する施設のうちクラス1，クラス2に該当する構築物，系統及び機器（以下「竜巻防護施設」という。）として竜巻による影響を評価し設計する。また，竜巻防護施設を内包する施設についても同様に竜巻による影響を評価し設計する。クラス3に属する施設は，損傷する場合を考慮して，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設計とすることにより，安全機能が維持されることから，竜巻による影響を評価する対象から除外する。

竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設については「1.7.1 (3) 竜巻防護施設」にて記載する。竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設については，「1.7.1(4) 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設」にて記載する。

竜巻に対する防護設計を行う，竜巻防護施設，竜巻防護施設を内包する施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設を「評価対象施設」

という。

なお、「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た結果，追加で「1.7.1(3) 竜巻防護施設」に反映する施設はない。

竜巻防護施設の安全機能を損なわないようにするため，竜巻防護施設に影響を及ぼす飛来物の発生防止対策をするとともに，作用する設計荷重に対する竜巻防護施設の構造健全性の維持，竜巻防護施設を内包する区画の構造健全性の確保，若しくは，飛来物による損傷を考慮し安全上支障のない期間での修復等の対応，又は，それらを適切に組み合わせた設計とする。

屋外に設置する竜巻防護施設の構造健全性の維持または竜巻防護施設を内包する区画の構造健全性の確保において，それらを防護するために設置する竜巻防護対策設備は，防護ネット，防護鋼板等から構成し，飛来物から竜巻防護施設を防護できる設計とする。

【別添資料1（1.：1-1～13）】

(2) 設計竜巻の設定

「添付書類六 8. 竜巻」において設定した基準竜巻の最大風速は92m/sとする。

設計竜巻の設定に際して，東海第二発電所は敷地が平坦であるため，地形効果による風の増幅を考慮する必要はないことを確認したが，基準竜巻の最大風速を安全側に切り上げて，設計竜巻の最大風速は100m/sとする。

【別添資料1（2.：1-14～44）】

(3) 竜巻防護施設

竜巻防護施設のうち，屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設を含む），屋内の施設で外気と繋がっている施設及び外殻となる施設による防護機能が期待できない施設に分類し，評価対象施設として抽出する。なお，外殻となる施設等による防護機能が期待できない施設については，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，評価対象施設を抽出する。

（屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設を含む））

(a) 非常用ディーゼル発電機吸気フィルタ

(b) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機吸気フィルタ

（以下(a) (b)を区別不要の場合は「ディーゼル発電機吸気フィルタ」という。）

(c) 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン

(d) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフベントファン

（以下(c) (d)を区別不要の場合は「ディーゼル発電機室ルーフベントファン」という。）

(e) 中央制御室換気系冷凍機（配管，弁含む）

(f) 残留熱除去系海水系ポンプ（配管，弁含む）

(g) 残留熱除去系海水系ストレーナ

(h) 非常用ディーゼル発電機海水ポンプ（配管，弁含む）

(i) 非常用ディーゼル発電機海水ストレーナ

(j) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水ポンプ（配管，弁含む）

(k) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水ストレーナ

（以下(f)～(k)を区別不要の場合は「海水ポンプ室内設備」とい

う。)

(l) 非常用ガス処理系排気配管

(m) 排気筒

<以下、竜巻防護施設を内包する施設>

(n) 原子炉建屋（原子炉圧力容器，原子炉再循環ポンプ等を内包）

(o) タービン建屋（気体廃棄物処理系隔離弁等を内包）

(p) 使用済燃料乾式貯蔵建屋（使用済燃料乾式貯蔵容器を内包）

(q) 軽油貯蔵タンクタンク室（軽油貯蔵タンクを内包）

(屋内の施設で外気と繋がっている施設)

(a) 中央制御室換気系隔離弁，ファン（ダクト含む）

(b) 非常用ディーゼル発電機室換気系ダクト

(c) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室換気系ダクト

（以下(b)(c)を区別不要の場合は「ディーゼル発電機室換気系ダクト」という。）

(d) 原子炉建屋換気系隔離弁，ダクト

(外殻となる施設（建屋，構築物）による防護機能が期待できない施設)

(a) 中央制御室換気系ファン（空気調和器含む）

(b) 中央制御室換気系フィルタユニット

（以下(a)(b)を区別不要の場合は「中央制御室換気系ファン」という。）

(c) 非常用電源盤

(d) 非常用ガス処理系設備及び非常用ガス再循環系設備

(e) 使用済燃料プール

- (f) 燃料プール冷却浄化系真空破壊弁
- (g) 使用済燃料乾式貯蔵容器

【別添資料 1 (1.2.2 (1) : 1-3~7)】

(4) 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設

竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設としては、当該施設の破損等により竜巻防護施設に波及的影響を及ぼして安全機能を喪失させる可能性がある施設、又はその施設の特定の区画とする。

竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設のうち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 a 及び b に示す施設を抽出した。

a. 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、倒壊により竜巻防護施設の機能を喪失させる可能性がある施設として、以下を抽出し、評価する。

- (a) サービス建屋
- (b) 海水ポンプ室
- (c) 鋼製防護壁
- (d) 排気筒

b. 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、気圧差等による損傷により竜巻防護施設の機能を喪失させる可能性がある屋外の竜巻防護施設の附属設備として、以下を抽出した。

- (a) 非常用ディーゼル発電機排気消音器
- (b) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器
(以下(a)(b)を区別不要の場合は「ディーゼル発電機排気消音器」という。)
- (c) 非常用ディーゼル発電機排気配管
- (d) 非常用ディーゼル発電機燃料デイトンクベント管
- (e) 非常用ディーゼル発電機機関ベント管
- (f) 非常用ディーゼル発電機潤滑油サンプタンクベント管
- (g) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気配管
- (h) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料デイトンクベント管
- (i) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機機関ベント管
- (j) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機潤滑油サンプタンクベント管
(以下(c)～(j)を区別不要の場合は「ディーゼル発電機附属設備配管」という。)
- (k) 残留熱除去系海水系配管（放出側）
- (l) 非常用ディーゼル発電機海水配管（放出側）
- (m) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水配管（放出側）
(以下(k)～(m)を区別不要の場合は「海水ポンプ室内設備附属配管（放出側）」という。)

【別添資料 1 (1.2.2 (2) : 1-8～11)】

(5) 設計飛来物の設定

東海第二発電所敷地全体を俯瞰した現地調査及び検討を行い、発電所構

内の資機材，車両等の設置状況を踏まえ，評価対象施設に衝突する可能性のある飛来物を抽出する。

設計飛来物は，浮き上がりの有無，運動エネルギー及び貫通力を踏まえ，「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）」を参照して鋼製材を設定する。

また，竜巻防護対策設備の防護ネットを通過し得る可能性があり，鋼製材にて包含できないことから，砂利も設計飛来物とする。

第 1.7-1 表に東海第二発電所における設計飛来物を示す。

飛来物の発生防止対策については，現地調査により抽出した飛来物や持ち込まれる物品の寸法，質量及び形状から飛来の有無を判断し，運動エネルギー及び貫通力を考慮して，衝突時に建屋等又は竜巻防護対策設備に与えるエネルギー及び貫通力が設計飛来物によるものより大きく，竜巻防護施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼす施設等を防護できない可能性があるものは飛散防止対策（固縛，固定又は竜巻防護施設からの離隔）を実施し，確実に飛来物とならない運用とする。

【別添資料 1（3.3.1（3）：1-46～57）】

(6) 荷重の組み合わせと許容限界

竜巻に対する防護設計を行うため，評価対象施設に作用する設計竜巻荷重の算出，設計竜巻荷重の組み合わせの設定，設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定及び許容限界について以下に示す。

a. 評価対象施設に作用する設計竜巻荷重

設計竜巻により評価対象施設に作用する荷重として「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)」を以下に示すとおり算出する。

(a) 風圧力による荷重 (W_w)

設計竜巻の最大風速による荷重であり、「建築基準法施行令」（昭和 25 年 11 月 16 日政令第 338 号）、「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説」及び建設省告示 1454 号（平成 12 年 5 月 31 日）に準拠して、次式のとおり算出する。

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

ここで、

W_w : 風圧力による荷重

q : 設計用速度圧

G : ガスト影響係数 (=1.0)

C : 風力係数（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。）

A : 施設の受圧面積

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

ここで、

ρ : 空気密度

V_D : 設計竜巻の最大風速

ただし、竜巻による最大風速は、一般的には水平方向の風速として算定されるが、鉛直方向の風圧力に対してぜい弱と考えられる評価対象施設が存在する場合には、鉛直方向の最大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した設計とする。

(b) 気圧差による荷重 (W_p)

外気と隔離されている区画の境界部が気圧差による圧力影響を受ける設備及び竜巻防護施設を内包する施設の建屋壁、屋根等においては、

設計竜巻による気圧低下によって生じる評価対象施設の内外の気圧差による圧力荷重が発生し，保守的に「閉じた施設」を想定し次式のとおり算出する。

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

ここで，

W_P : 気圧差による荷重

ΔP_{max} : 最大気圧低下量

A : 施設の受圧面積

(c) 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

飛来物の衝突方向及び衝突面積を考慮して設計飛来物が評価対象施設に衝突した場合の影響が大きくなる向きで衝撃荷重を算出する。

【別添資料 1 (3.3.1 : 1-47~56)】

b. 設計竜巻荷重の組み合わせ

評価対象施設の設計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，複合荷重 W_{T1} 及び W_{T2} は米国原子力規制委員会の基準類を参考として，以下のとおり設定する。

$$W_{T1} = W_P$$

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

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。

【別添資料 1 (3.3.1 : 1-56~57)】

c. 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、以下のとおり設定する。

(a) 評価対象施設に常時作用する荷重，運転時荷重

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

(b) 竜巻以外の自然現象による荷重

竜巻は，積乱雲及び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ことから，設計竜巻荷重と組み合わせる荷重として考慮しない。

i) 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。

ii) 雪

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の降雪や，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。

iii) 雹

雹は積乱雲から降る直径 5mm 以上の氷の粒⁽²⁾であり，仮に直径 10cm 程度の大型の雹を想定した場合，その重量は約 0.5kg となる。竜巻と雹が同時に発生する場合においても，10cm 程度の雹の終端

速度は $59\text{m/s}^{(3)}$ ，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，雹の衝突荷重は設計竜巻荷重に包絡される。

iv) 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。

(c) 設計基準事故時荷重

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

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

仮に，風速が低く発生頻度が高い竜巻と設計基準事故が同時に発生する場合，評価対象施設のうち設計基準事故時荷重が生じ，竜巻による風荷重等の影響を受ける屋外設備としては動的機器である残留熱除去系海水系ポンプ等が考えられるが，設計基準事故時においても残留熱除去系海水系ポンプ等の圧力，温度が変わらず，運転時荷重が変化することはないため，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。

【別添資料 1 (3.3.2 : 1-57~58)】

d. 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 J E A G 4601-1987（日本電気協会）
- ・ 原子力エネルギー協会（N E I）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 J E A G 4601-1987（日本電気協会）
- 等

【別添資料 1（3.4.1 : 1-59）】

(7) 評価対象施設の防護設計方針

評価対象施設については、以下の設計方針のとおり、設計荷重に対してその構造健全性が維持され、評価対象施設以外の竜巻防護施設については、

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。なお、竜巻防護施設のうち、外殻となる防護機能が期待できる屋内施設は、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。

【別添資料 1 (3.4.2 : 1-60～66)】

a. 屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設を含む）

屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設を含む）は、設計荷重に対して、安全機能が維持される設計とし、必要に応じて施設の補強、防護ネット及び防護鋼板の設置等の防護対策を講じる方針とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (1) : 1-60～62)】

(a) ディーゼル発電機吸気フィルタ

ディーゼル発電機吸気フィルタは、設計飛来物の衝突により貫通が発生することを考慮しても、閉塞することはなく、吸気機能が維持される設計とする。また、風圧力による荷重及び気圧差による荷重、ディーゼル発電機吸気フィルタに常時作用する荷重に対して、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。

【別添資料 1 (3.4.2 (1) : 1-60)】

(b) ディーゼル発電機室ルーフベントファン

ディーゼル発電機室ルーフベントファンは、設計飛来物に対しては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、風圧力による荷重、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。

【別添資料 1 (3.4.2 (1) : 1-60)】

(c) 中央制御室換気系冷凍機

中央制御室換気系冷凍機は、設計飛来物に対しては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、風圧力による荷重、気圧差による荷重、中央制御室換気系冷凍機に常時作用する荷重に対して、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。

【別添資料 1 (3.4.2 (1) : 1-60)】

(d) 海水ポンプ室内設備

海水ポンプ室内設備は、設計飛来物に対しては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、風圧力による荷重、気圧差による荷重、海水ポンプ室内設備に常時作用する荷重に対して、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。

【別添資料 1 (3.4.2 (1) : 1-61)】

(e) 非常用ガス処理系排気配管

非常用ガス処理系排気配管は、設計飛来物の衝突により貫通が発生することを考慮しても、閉塞することはなく、排気機能が維持される設計とする。また、風圧力による荷重、非常用ガス処理系排気配管に常時作用する荷重に対して、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。

【別添資料 1 (3.4.2 (1) : 1-61)】

(f) 排気筒

排気筒は、設計飛来物の衝突により貫通が発生することを考慮しても、閉塞することはなく、排気機能が維持される設計とする。また、風圧力による荷重、排気筒に常時作用する荷重に対して、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。

排気筒の支持機能においても、設計飛来物の衝突により損傷が発生することを考慮しても、風圧力による荷重、排気筒の支持部材に常時作用する荷重に対して、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。

【別添資料 1 (3.4.2 (1) : 1-61)】

(g) 原子炉建屋，タービン建屋，使用済燃料乾式貯蔵建屋

風圧力による荷重，気圧差による荷重及び設計飛来物の衝撃荷重に対して，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。

【別添資料 1 (3.4.2 (1) : 1-61～62)】

(h) 軽油貯蔵タンクタンク室

風圧力による荷重，気圧差による荷重及び設計飛来物の衝撃荷重に対して，構造骨組の構造健全性が維持されるとともに，開口部（点検口類）の破損により内包する軽油貯蔵タンク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，貫通の発生により，内包する軽油貯蔵タンクが安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (1) : 1-62)】

b. 屋内の施設で外気と繋がっている施設

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、防護ネットの設置等の防護対策を講じる方針とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (2) : 1-62~63)】

(a) 中央制御室換気系隔離弁, ファン

中央制御室換気系隔離弁, ファンは, 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。中央制御室換気系の取入口の建屋開口部は, 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も作用しない。また, 気圧差による荷重, 中央制御室換気系に常時作用する荷重に対して, 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。

【別添資料 1 (3.4.2 (2) : 1-62)】

(b) ディーゼル発電機室換気系ダクト

ディーゼル発電機室換気系ダクトは, 原子炉建屋に内包されていることを考慮すると, 風圧力による荷重及び設計飛来物による衝突荷重は作用しない。また, 気圧差による荷重, ディーゼル発電機室換気系に常時作用する荷重に対して, 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。

【別添資料 1 (3.4.2 (2) : 1-62)】

(c) 原子炉建屋換気系隔離弁, ダクト

原子炉建屋換気系隔離弁, ダクトは, 設計飛来物が衝突により貫通することを考慮しても, 補修が可能な設計とすることにより, 安全機能を損なわない設計とする。また, 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。したがって, 気圧差による

荷重，原子炉建屋換気系に常時作用する荷重に対して，構造健全性が維持され安全機能を損なうことのない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (2) : 1-63)】

- c. 外殻となる施設（建屋，構築物）による防護機能が期待できない施設設計竜巻荷重に対して，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。

【別添資料 1 (3.4.2 (3) : 1-63～64)】

- (a) 中央制御室換気系ファン

中央制御室換気系ファンは，設計飛来物の衝突により，原子炉建屋附属棟壁面の貫通が発生することを考慮し，壁面補強等の防護対策を行うことにより，中央制御室換気系ファンへの設計飛来物の衝突を防止し，中央制御室換気系ファン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。

【別添資料 1 (3.4.2 (3) : 1-63)】

- (b) 非常用電源盤

非常用電源盤は，設計飛来物の衝突により，原子炉建屋附属棟 1 階電気室扉の開放又は扉建具の貫通が発生することを考慮し，防護鋼板の設置等の防護対策を行うことにより，非常用電源盤への設計飛来物の衝突を防止し，非常用電源盤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。

【別添資料 1 (3.4.2 (3) : 1-63)】

- (c) 非常用ガス処理系設備，非常用ガス再循環系設備

非常用ガス処理系設備及び非常用ガス再循環系設備は、竜巻襲来による気圧差によって、原子炉建屋6階のブローアウトパネルが開放され、設計飛来物による衝突が考えられるが、ブローアウトパネルの配置高さを考慮すると、設計飛来物は到達せず、衝撃荷重も作用しないことにより、非常用ガス処理系設備及び非常用ガス再循環系設備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。

【別添資料1 (3.4.2 (3) : 1-63)】

(d) 使用済燃料プール、燃料プール冷却浄化系真空破壊弁

使用済燃料プール及び燃料プール冷却浄化系真空破壊弁は、竜巻襲来による気圧差によって、原子炉建屋6階のブローアウトパネルが開放され、設計飛来物による衝突が考えられるが、ブローアウトパネルの配置高さを考慮すると、設計飛来物は到達せず、衝撃荷重も作用しないことにより、使用済燃料プール及び燃料プール冷却浄化系真空破壊弁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。

【別添資料1 (3.4.2 (3) : 1-64)】

(e) 使用済燃料乾式貯蔵容器

使用済燃料乾式貯蔵容器は、使用済燃料乾式貯蔵建屋に内包されていることを考慮すると、風圧力による荷重及び気圧差荷重は作用しない。建屋上部の開口から設計飛来物による衝突が考えられるため、衝撃荷重に対して、使用済乾式貯蔵容器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。

【別添資料1 (3.4.2 (3) : 1-64)】

d. 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。

【別添資料 1 (3.4.2 (4) : 1-64~66)】

(a) サービス建屋

サービス建屋は、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対して、倒壊により竜巻防護施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (4) : 1-64)】

(b) 海水ポンプ室

海水ポンプ室は、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対して、倒壊により海水ポンプ室内設備へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (4) : 1-64)】

(c) 鋼製防護壁

鋼製防護壁は、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対して、倒壊により海水ポンプ室内設備へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (4) : 1-64~65)】

(d) 排気筒

排気筒は、竜巻防護施設のうち評価対象施設として、構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計としており、転倒により竜巻防護施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

【別添資料 1 (3.4.2 (3) : 1-65)】

(e) ディーゼル発電機排気消音器

ディーゼル発電機排気消音器は、設計飛来物の衝突により貫通が発

生することを考慮しても、閉塞することはなく、排気機能が維持される設計とすることにより、ディーゼル発電機に波及的影響を及ぼさない設計とする。また、風圧力による荷重及び気圧差による荷重に対して構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料1 (3.4.2 (4) : 1-65)】

(f) ディーゼル発電機附属設備配管

ディーゼル発電機附属設備配管は、設計飛来物の衝突により貫通が発生することを考慮しても、閉塞することなく、排気機能が維持される設計とすることにより、ディーゼル発電機に波及的影響を及ぼさない設計とする。また、風荷重による荷重、気圧差による荷重及びディーゼル発電機附属設備配管に常時作用す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。

【別添資料1 (3.4.2 (4) : 1-65)】

(g) 海水ポンプ室内設備配管（放出側）

海水ポンプ室内設備配管（放出側）は、設計飛来物の衝突により貫通が発生することを考慮しても、閉塞することなく、放水機能が維持される設計とすることにより、海水ポンプ室内設備に波及的影響を及ぼさない設計とする。また、風荷重による荷重、気圧差による荷重及び海水ポンプ室内設備附属配管に常時作用す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。

【別添資料1 (3.4.2 (4) : 1-65～66)】

(8) 竜巻随伴事象に対する評価

竜巻随伴事象は、過去の竜巻被害状況及び東海第二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、

事象が発生する場合においても、竜巻防護施設が安全機能を損なわない設計とする。

a. 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に衝突する場合、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、竜巻防護施設を設置している区画の開口部付近には、原子炉施設の安全機能を損なう可能性がある発火性又は引火性物質を内包する機器が配置されておらず、防護ネットの設置等の防護対策を行うことより、飛来物が到達することはない。

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。この火災に対する影響評価対象となる竜巻防護施設は、外部火災の影響評価対象施設と同じであることから、火災源と外部火災影響評価対象施設の位置関係を踏まえて火災の影響を評価した上で、外部火災影響評価対象施設が安全機能を損なわない設計とすることを「1.10.8 外部火災防護に関する基本方針」に記載する。

以上より、竜巻による火災により竜巻防護施設が安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料1 (3.5 (1) : 1-66)】

b. 溢水

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、竜巻防護施設を設置している区画の開口部付近には、原子炉施設の安全機能を損なう可能性がある溢水源が配置されてお

らず，防護ネットの設置等の防護対策を行うことより，飛来物が到達することはない。

建屋外については，「1.10.3 溢水に対する基本方針」にて，地震時の屋外タンクの破損を想定し，地震起因の溢水が安全系機器に影響を及ぼさない設計としており，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，竜巻防護施設の安全機能維持に影響を与えることはない。

以上より，竜巻による溢水により竜巻防護施設が安全機能を損なわない設計とする。

【別添資料1 (3.5 (2) : 1-66～67)】

c. 外部電源喪失

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

【別添資料1 (3.5 (3) : 1-67～68)】

1.7.2 手順等

竜巻に対する防護については、竜巻に対する影響評価を行い、安全施設が安全機能を損なわないよう手順等を定める。

- (1) 屋外の作業区画で飛散する恐れのある資機材、車両等については、飛来時の運動エネルギー及び貫通力等を評価し、竜巻防護施設への影響の有無を確認する。竜巻防護施設への影響を及ぼす資機材、車両等については、固縛、固定、竜巻防護施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼす施設から隔離、頑健な建屋内収納又は撤去する。これら飛来物発生防止対策について手順を定める。

【別添資料1 (3.3.1 (3) : 1-52~54)】

- (2) 竜巻の襲来が予想される場合及び竜巻襲来後において、竜巻防護施設を防護するための操作・確認、補修等が必要となる事項について手順を定める。

第 1.7-1 表 東海第二発電所における設計飛来物

飛来物の種類	砂利	鋼製材
サイズ (m)	長さ×幅×高さ 0.04×0.04×0.04	長さ×幅×高さ 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	0.18	135
最大水平速度 (m/s)	62	51
最大鉛直速度 (m/s)	42	34

【別添資料 1 (3.3.1 (3) : 1-55)】

(3) 適合性説明

(外部からの衝撃による損傷の防止)

第六条 安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。

2 重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該重要安全施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならぬ。

3 安全施設は、工場等内又はその周辺において想定される発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）に対して安全機能を損なわないものでなければならない。

適合のための設計方針

1 について

(2) 竜 巻

安全施設は、最大風速 100m/s の竜巻による風圧力による荷重、気圧差による荷重及び飛来物の衝撃荷重を組み合わせた荷重等に対して安全機能を損なわないために、飛来物の発生防止対策及び竜巻防護対策を行う。

a. 飛来物の発生防止対策

竜巻により発電所構内の資機材等が飛来物となり、竜巻防護施設が安全機能を損なわないために、以下の対策を行う。

- ・ 竜巻防護施設へ影響を及ぼす資機材及び車両については、固縛、固定、

竜巻防護施設からの離隔，頑健な建屋内収納又は撤去する。

b. 竜巻防護対策

固縛等による飛来物の発生防止対策ができないものが飛来し，安全施設が安全機能を損なわないように，以下の対策を行う。

- ・ 竜巻防護施設を内包する施設及び竜巻防護対策設備により，竜巻防護施設を防護し構造健全性を維持し安全機能を損なわない設計とする。
- ・ 竜巻防護施設の構造健全性が維持できない場合には，代替設備の確保，損傷した場合の取替え又は補修が可能な設計とすることにより安全機能を損なわない設計とする。

ここで，竜巻は積乱雲や積雲に伴って発生する現象であり，積乱雲の発達時に竜巻と同時発生する可能性のある自然現象は，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，設計竜巻荷重に包含されることから，各々の事象に対して安全施設の安全機能を損なわない設計とする。

1.12 参考文献

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

1.3 気象等

8. 竜巻

8.1 規格・基準類

竜巻に対する規格・基準は、国内では策定されていないが、気象庁では竜巻により発生した被害の状況から風速を推定する指標として、第 8.1-1 表に示す藤田スケールを採用している。また、「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。）において、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が定められていることから、同ガイドに基づき竜巻検討地域を設定し、基準竜巻の最大風速は、「8.2 過去に発生した竜巻による最大風速（ V_{B1} ）」及び「8.3 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。

【別添資料 1（2.1 : 1-14）】

8.1.1 竜巻検討地域の設定

東海第二発電所に対する竜巻検討地域について、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、第 8.1-1 図に示すとおり、福島県から沖縄県にかけての太平洋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 57,000km²）。

竜巻検討地域は、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、「総観場の分析に基づく地域特性の確認」、「過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の確認」により地域特性を確認し、竜巻の個数及び単位面積当たりの発生数によって設定した。

【別添資料 1 (2.2 : 1-14~15) (2.2.4 : 1-21)】

(1) 総観場の分析に基づく地域特性の確認

竜巻発生要因の総観場を，気象庁「竜巻等の突風データベース」⁽¹⁾に基づき，6種類（低気圧，台風，停滞前線，局所性降雨，季節風，その他（高気圧等））に分類し，発生分布の特徴を分析した。第 8.1-2 図の総観場ごとの竜巻発生位置の分布，第 8.1-3 図の都道府県ごとの竜巻の発生要因別比率に示すとおり，低気圧起因の竜巻は全国一様に発生していること，一方，台風起因の竜巻は日本海側には発生しておらず，主に太平洋側で発生していることが分かる。また，停滞前線起因の竜巻は北海道を除く各地に発生していること，局所性降雨は内陸部での竜巻発生も促すこと，季節風や高気圧起因とされる竜巻の発生数は比較的少ないことが分かる。

台風起因の竜巻の発生領域から，竜巻発生要因の総観場の分析に基づく竜巻検討地域を太平洋側の宮城県から沖縄県の範囲を基本とすることは，妥当な設定である。

【別添資料 1 (2.2.1 : 1-15~17) (2.2.2 : 1-18~19)】

(2) 過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の確認

日本で竜巻が集中する地域については，「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」⁽²⁾に，全国 19 箇所の竜巻集中地域が示されており，第 8.1-4 図に示すとおり，東海第二発電所は，竜巻集中地域⑰に立地している。

従って，竜巻集中地域⑰を竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域とする。

【別添資料 1 (2.2.3 : 1-20)】

8.2 過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1})

竜巻検討地域における過去最大竜巻はF3であり、Fスケールと風速の関係より風速は $70\text{m/s} \sim 92\text{m/s}$ であることから、竜巻検討地域で過去に発生した最大竜巻F3の風速範囲の上限値 92m/s を V_{B1} とする。

第 8.2-1 表に竜巻検討地域におけるF3スケール相当以上の竜巻の観測記録を示す。

【別添資料1 (2.3.1 : 1-22)】

8.3 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

竜巻最大風速のハザード曲線は、ガイドに従い、気象庁「竜巻等の突風データベース」より竜巻検討地域における竜巻の観測記録を抽出、評価し、既往の算定法 (Wen&Chu⁽³⁾ 及び Garson et. al⁽⁴⁾ ⁽⁵⁾) に基づき算定した。具体的な算定方法は、東京工芸大学委託成果⁽⁶⁾ を参考とし、ハザード曲線を算定した。本評価は、竜巻データの分析、竜巻風速、被害幅及び被害長さの確率密度分布の算定、相関係数の算定、並びにハザード曲線の算定によって構成される。

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陸側及び海側それぞれ5kmの範囲に加え、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も算定し、そのうち最も大きな風速を V_{B2} とし設定する。

【別添資料1 (2.3.2 : 1-23~37)】

a. 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陸

上発生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。

【別添資料 1 (2.3.2 : 1-23~37)】

b. 竜巻の発生頻度の分析

気象庁「竜巻等の突風データベース」をもとに、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を踏まえ、以下の(a)～(c)の基本的な考え方に基づいて整理を行う。

- (a) 被害が小さくて見過ごされやすいF 0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。
- (b) 被害が比較的軽微なF 1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。
- (c) 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F 2及びF 3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F 0竜巻とみなす。

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。その結果、F スケール不明の海上竜巻の取扱いにより、第 8.3-1 表のとおり観測実績に対して保守性を高めた評価としている。

【別添資料 1 (2.3.3 : 1-24~25)】

c. 年発生数の確率密度分布の設定

竜巻の年発生数の確率密度分布の設定に当たっては、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、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。

【別添資料 1 (2.3.3 : 1-26)】

d. 竜巻風速、被害幅及び被害長さの確率分布並びに相関係数

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「東京工芸大委託成果」を参照し、対数正規分布に従うものとする。
(第 8.3-1 図～第 8.3-3 図)

なお、疑似的な竜巻の作成に伴う被害幅又は被害長さの情報がない竜巻には、被害幅又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、被害幅又は被害長さが大きいほうから優先的に用いることで、被害幅又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同時に、

被害幅又は被害長さ 0 のデータについて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、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る。(第 8.3-2 表)

【別添資料 1 (2.3.4 : 1-27~29)】

e. 竜巻影響エリアの設定

東海第二発電所の評価対象施設の面積及び設置位置を考慮して、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。(第 8.3-4 図)

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。

【別添資料 1 (2.3.5 : 1-29~30)】

f. ハザード曲線の算定

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、ハザード曲線を求める。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 (a) ⁽⁴⁾ で示される。

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

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 (b) で示される。

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

ここで、

σ : 竜巻の年発生数の標準偏差

D を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 (c) で示される。

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

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 57,000km²)、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 (d) で示される。

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

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 (d) により $R(V_0)$ を推定し、式 (c) により $P_{V_0, T}(D)$ を求める。風速を V 、被害幅を w 、被害長さを l 、移動方向を 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 (e) で示される。⁽⁵⁾

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

ここで、 $W(V_0)$ は竜巻風速が V_0 以上となる幅であり、式 (f) 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評価対象構造物を投影した時の長さであり、式 (g) 及び式 (h) で示される。

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

ここで、

V_{\min} : 被害幅 w 内の最小竜巻風速

V_0 : 被害が発生する最小風速

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

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

本評価では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、 $H(\alpha)$ 及び $G(\alpha)$ とともに竜巻影響エリアの直径 300m 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 (i) で示される。

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

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 では大強風（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。

以上を参考とし、 $V_{min}=25\text{m/s}$ とした。この値は、F0（17～32m/s）のほぼ中央値に相当する。

海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全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、73m/s となる。

（第 8.3-5 図）

【別添資料 1（2.3.6 : 1-31～32）】

g. 1km 範囲に細分化した評価

1km 範囲ごとの評価は、1km 幅は変えずに順次ずらして移動するケース（短冊ケース）を設定して評価する。評価の条件として、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している。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ている。上記評価条件に基づいて、海岸線か

ら陸側及び海側それぞれ 5km 全域の評価と同様の方法で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、陸側 3~4km を対象とした場合の 80m/s が最大となる。（第 8.3-6 図）

【別添資料 1（2.3.6 : 1-33）】

h. 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）の評価と 1km 範囲に細分化した評価を比較して、竜巻最大風速のハザード曲線により設定する最大風速 V_{B2} は、ガイドを参考に年超過確率 10^{-5} に相当する風速とし、80m/s とする。（第 8.3-7 図）

【別添資料 1（2.3.7 : 1-34）】

8.4 基準竜巻の最大風速の設定

過去に発生した竜巻による最大風速 $V_{B1} = 92\text{m/s}$ 及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 $V_{B1} = 80\text{m/s}$ より、東海第二発電所における基準竜巻の最大風速 V_B は 92m/s とする。

【別添資料 1（2.3.9 : 1-38）】

8.5 設計竜巻の最大風速の設定

東海第二発電所が立地する地域の特性として、周辺の地形を考慮して、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。

【別添資料 1（2.4 : 1-40~41）】

8.5.1 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、地形起伏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、東海第二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、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。

【別添資料 1 (2.4.1 : 1-40)】

8.5.2 東海第二発電所周辺の地形

東海第二発電所敷地周辺の地形を第 8.5-1 図に示す。発電所が立地する敷地周辺は、最大でも標高 40m 程度のなだらかな地形である。

【別添資料 1 (2.4.2 : 1-40~41)】

8.5.3 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

東海第二発電所周辺で発生する竜巻は、敷地周辺の地形において、竜巻渦の旋回強度に影響を及ぼすと考えられるマイクロスケール（数百 m）規模の起伏は認められないことから、地形効果による竜巻の増幅の可能性は低いとする。

【別添資料 1 (2.4.2 : 1-40~41)】

8.5.4 設計竜巻の最大風速 V_D

東海第二発電所では、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るが、現状では竜巻の観測数等のデータが十分とまでは言い切れず不確実性があることを考慮し、設計竜巻の最大風速 V_D は、基準竜巻の最大風速 92m/s を安全側に切り上げた 100m/s とする。

【別添資料 1 (2.4.3 : 1-41)】

8.6 設計竜巻の特性値の設定

設計竜巻の特性値は、次に示す手法に基づき、第 8.6-1 表のとおり設定する。

(1) 設計竜巻の移動速度 (V_T)

設計竜巻の移動速度 (V_T) は、ガイドに基づき、「東京工芸大学委託成果」による風速場モデルに依存しない日本の竜巻の観測記録に基づいた竜巻移動速度 (平均値) と最大風速との関係を参照して設定されている以下の算定式を用いて、 V_D から V_T を算定する。

$$V_T = 0.15 \cdot V_D \quad (\text{j})$$

【別添資料 1 (2.4.4 : 1-42)】

(2) 設計竜巻の最大接線風速 (V_{Rm})

設計竜巻の最大接線風速 (V_{Rm}) は、ガイドに基づき、米国NRCの基準類⁽⁷⁾を参考に設定されている風速場モデルに依存しない以下の式を用いて算定する。

$$V_{Rm} = V_D - V_T \quad (\text{k})$$

【別添資料 1 (2.4.4 : 1-42)】

(3) 設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径 (R_m)

設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径 (R_m) は、ガイドに基づき、「東京工芸大学委託成果」による日本の竜巻の観測記録を基に提案されたモデルにより設定されている風速場モデルに依存しない以下の値を用いる。

$$R_m = 30 \text{ (m)} \quad (l)$$

【別添資料 1 (2.4.4 : 1-42)】

(4) 設計竜巻の最大気圧低下量 (ΔP_{max})

設計竜巻の最大気圧低下量 (ΔP_{max}) は、ガイドに基づき、米国NRCの基準類⁽⁷⁾を参考に設定されている簡便に算出でき、保守的な設定となるランキン渦モデルによる風速分布に基づいた以下の式を用いて算定する。

$$\Delta P_{max} = \rho \cdot V_{Rm}^2 \quad (m)$$

ここで、

$$\rho : \text{空気密度 (1.22kg/m}^3\text{)}$$

【別添資料 1 (2.4.4 : 1-42)】

(5) 設計竜巻の最大気圧低下率 ($(dp/dt)_{max}$)

設計竜巻の最大気圧低下率 ($(dp/dt)_{max}$) は、ガイドに基づき、米国NRCの基準類⁽⁷⁾を参考に設定されている簡便に算出でき

保守的な設定となるランキン渦モデルによる風速分布に基づいた以下の式を用いて算定する。

$$(d p / d t)_{\max} = (V_T / R_m) \cdot \Delta P_{\max} \quad (\text{n})$$

【別添資料 1 (2.4.4 : 1-42)】

第 8.1-1 表 藤田スケール

藤田スケール	風速
F 0	17～32m/s (約 15 秒間の平均)
F 1	33～49m/s (約 10 秒間の平均)
F 2	50～8m/s (約 7 秒間の平均)
F 3	70～92m/s (約 5 秒間の平均)
F 4	93～116m/s (約 4 秒間の平均)
F 5	117～142m/s (約 3 秒間の平均)

第 8.2-1 表 竜巻検討地域内で過去（1961 年 1 月～2012 年 6 月）

に発生した F 3 スケール相当以上の竜巻の観測記録

発生日時	発生場所				F スケール
	緯度	経度	都道府県	市町村	
1999 年 09 月 24 日 11 時 07 分	34 度 42 分 4 秒	137 度 23 分 5 秒	愛知県	豊橋市	F 3
1990 年 02 月 19 日 15 時 15 分	31 度 15 分 38 秒	130 度 16 分 35 秒	鹿児島県	枕崎市	F 2～F 3
1978 年 02 月 28 日 21 時 20 分	35 度 32 分 1 秒	139 度 41 分 50 秒	神奈川県	川崎市	F 2～F 3
198 年 12 月 07 日 18 時 00 分	34 度 45 分 4 秒	137 度 22 分 46 秒	愛知県	豊橋市	F 2～F 3
1968 年 09 月 24 日 19 時 05 分	32 度 7 分 16 秒	131 度 32 分 8 秒	宮崎県	高鍋町	F 2～F 3
1967 年 10 月 28 日 03 時 12 分	35 度 42 分 3 秒	140 度 43 分 10 秒	千葉県	飯岡町	F 2～F 3

【別添資料 1 (2.3.1 : 1-22)】

第 8.3-1 表 竜巻発生数の分析結果

			F3	F2	F1	F0	小計	陸上不明	海上不明	合計
過去 に 観測 され た 竜巻	1961.1 ～2012.6 51.5年間	期間内個数	6	41	100	46	193	20	87	300
		平均値 (個/年)	0.12	0.80	1.94	0.89	3.75	0.39	1.8	5.83
		標準偏差 (個/年)	0.32	0.94	1.96	2.17	3.25	0.8	4.35	7.26
	1991.1 ～2012.6 21.5年間	期間内個数	1	15	72	46	134	15	86	235
		平均値 (個/年)	0.05	0.70	3.35	2.14	6.23	0.70	4.00	10.93
		標準偏差 (個/年)	0.22	0.78	2.03	2.96	3.24	0.84	6.08	8.81
	2007.1 ～2012.6 5.5年間	期間内個数	0	1	12	31	44	9	63	116
		平均値 (個/年)	0.00	0.18	2.18	5.64	8.00	1.64	11.45	21.09
		標準偏差 (個/年)	0.00	0.43	1.99	4.17	4.16	0.97	8.32	11.75

			F3	F2	F1	F0	計
疑似 51.5 年間 の 竜巻	疑似 51.5年間 (陸上竜 巻)	期間内個数	6	41	173	376	596
		平均値 (個/年)	0.12	0.80	3.36	7.30	11.57
		標準偏差 (個/年)	0.32	0.94	2.03	4.74	5.25
	疑似 51.5 年間 (全竜巻)	期間内個数	12	82	345	749	1188
		平均値 (個/年)	0.23	1.59	6.70	14.54	23.07
		標準偏差 (個/年)	0.46	1.33	2.87	6.8	7.42

【別添資料 1 (2.3.2 : 1-25)】

第 8.3-2 表 最大風速，被害幅及び被害長さの対数値の相関係数

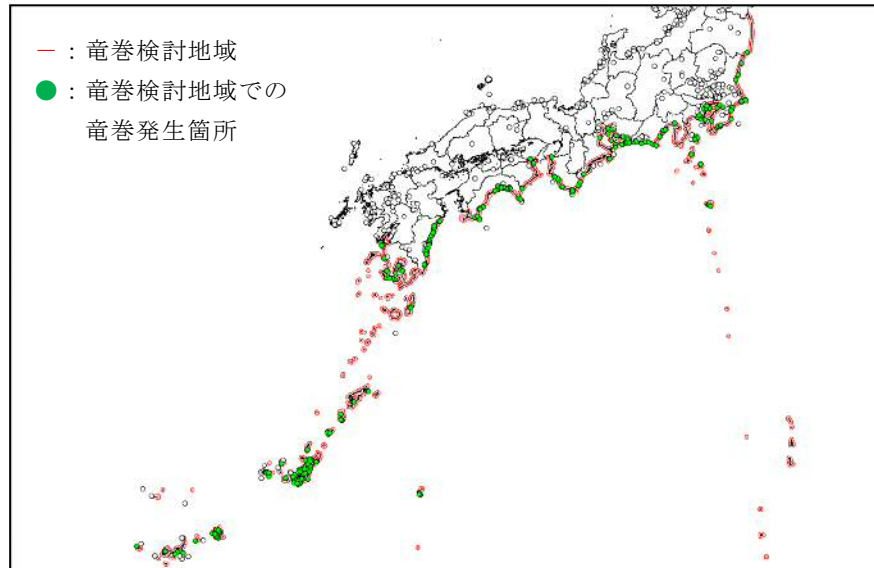
相関係数の値	最大風速	被害幅	被害長さ
最大風速	1.000	0.381	0.452
被害幅	—	1.000	0.381
被害長さ	—	—	1.000

【別添資料 1 (2.3.4 : 1-29)】

第 8.6-1 表 設計竜巻の特性値

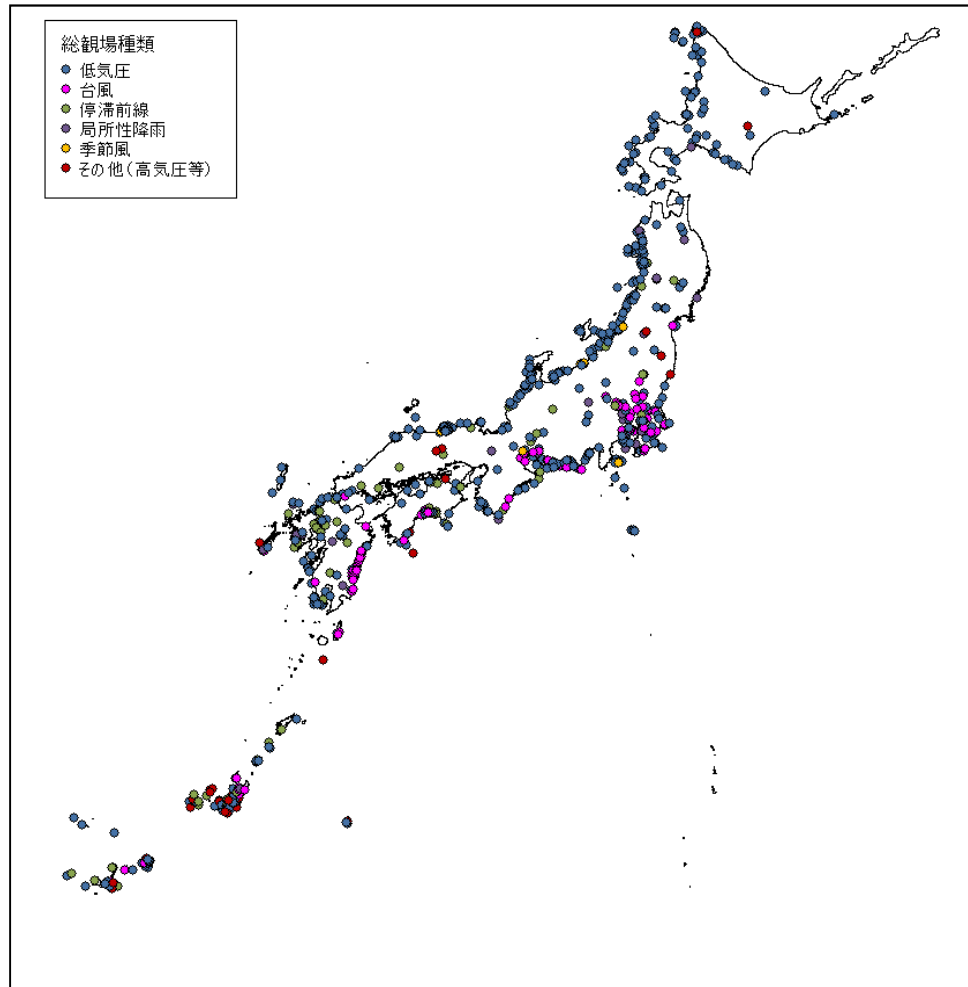
設計竜巻の 最大風速 V_D (m/s)	移動速度 V_T (m/s)	最大接線 風速 V_{Rm} (m/s)	最大接線 風速半径 R_m (m)	最大気圧 低下量 ΔP_{max} (hPa)	最大気圧 低下率 $(dp/dt)_{max}$ (hPa/s)
100	15	85	30	89	45

【別添資料 1 (2.4.4 : 1-43)】



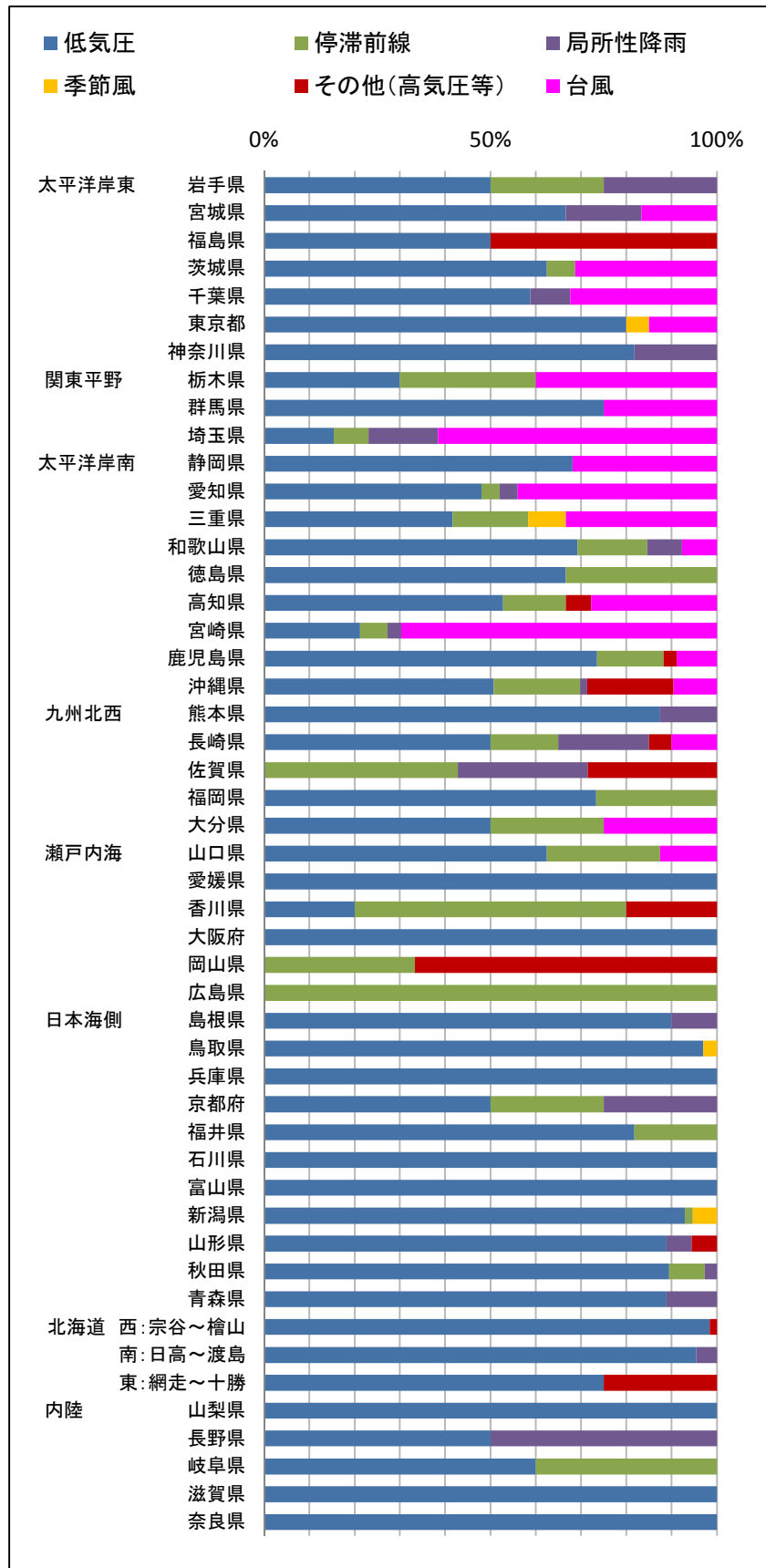
第8.1-1図 竜巻検討地域

【別添資料 1 (2.2.4 : 1-21)】



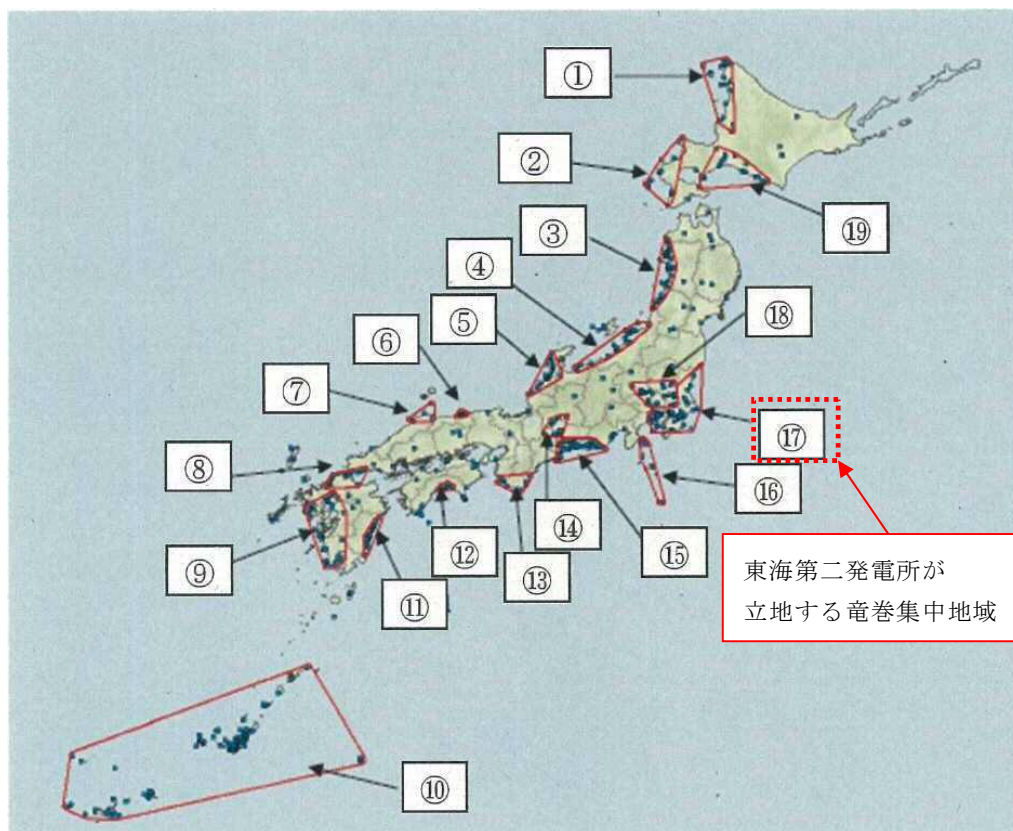
第 8.1-2 図 竜巻発生時の総観場の分布(1961 年 1 月～2012 年 6 月)

【別添資料 1 (2.2.1 : 1-16)】



第 8.1-3 図 各都道府県での発生要因別比率

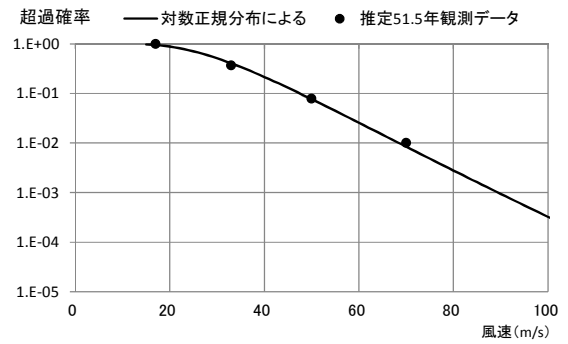
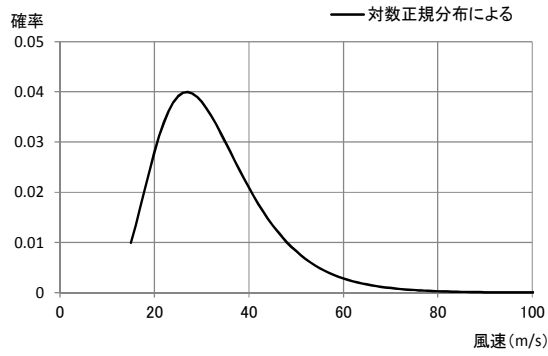
【別添資料 1 (2.2.1 : 1-17)】



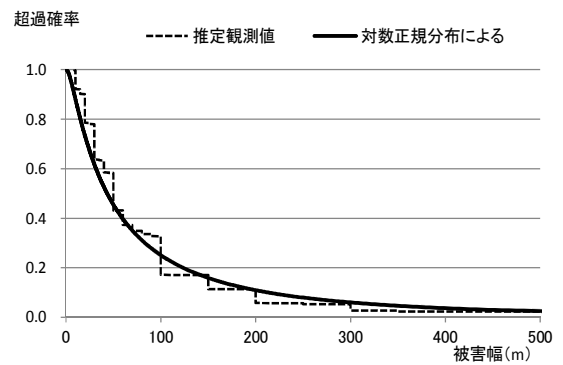
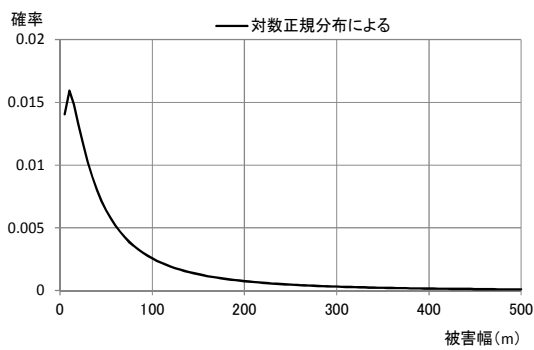
第 8.1-4 図 竜巻の発生する地点と竜巻が集中する 19 の地域

(「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説」より引用)

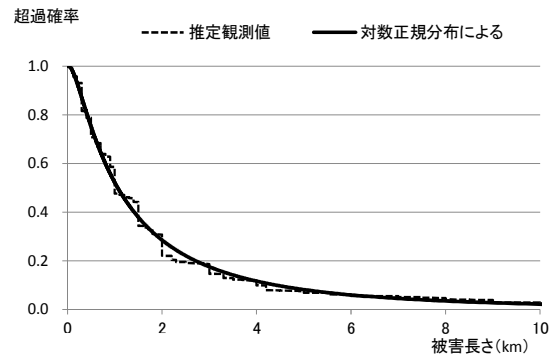
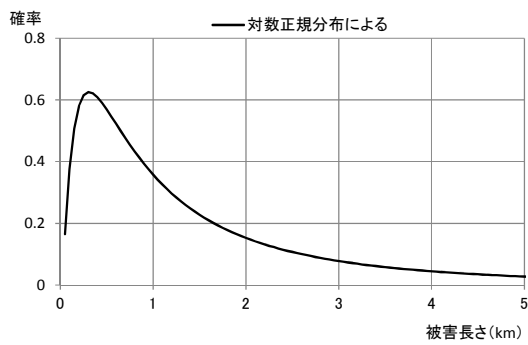
【別添資料 1 (2.2.3 : 1-20)】



第 8.3-1 図 最大風速の確率密度分布（左）と超過確率分布（右）

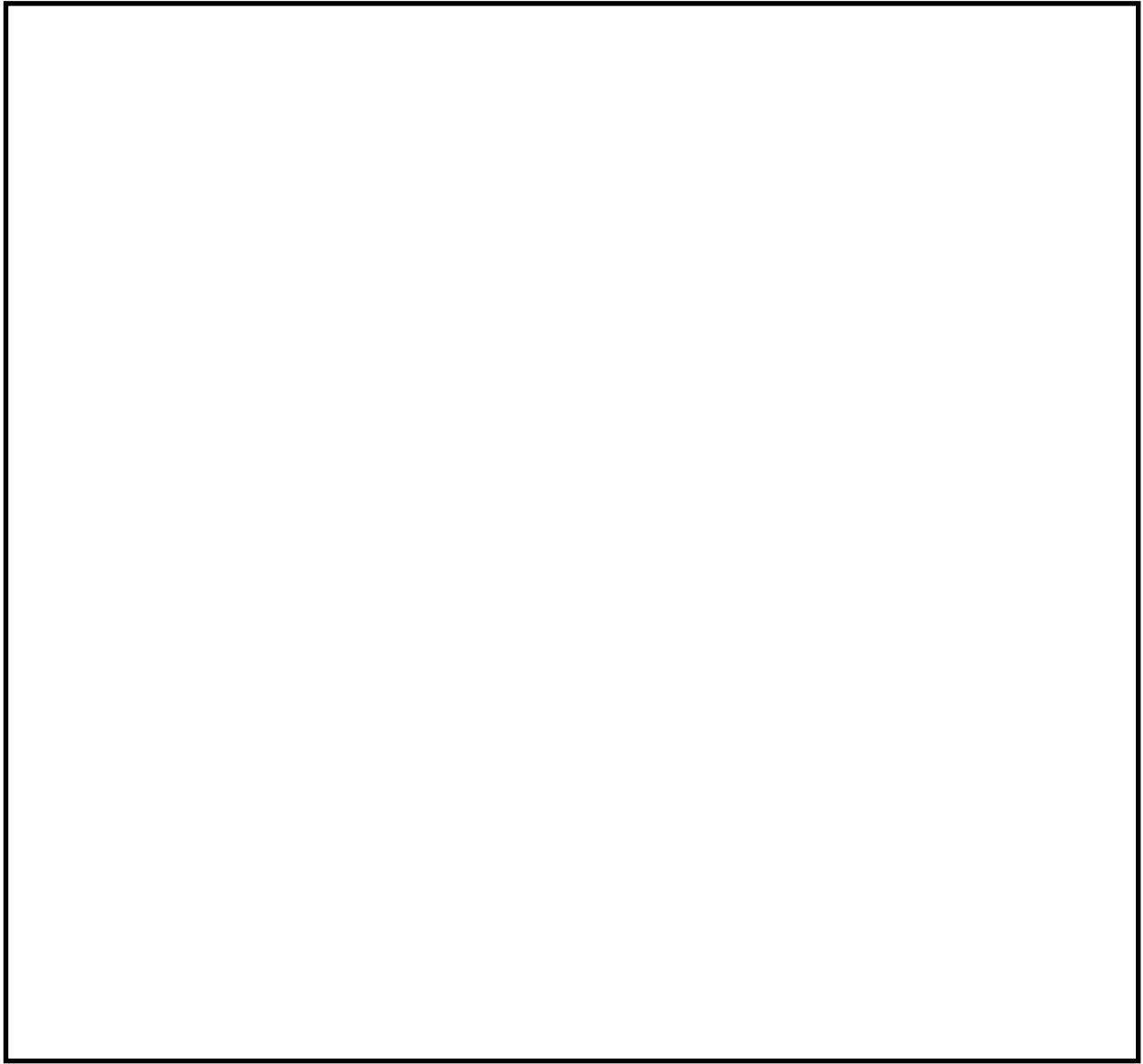


第 8.3-2 図 被害幅の確率密度分布（左）と超過確率分布（右）

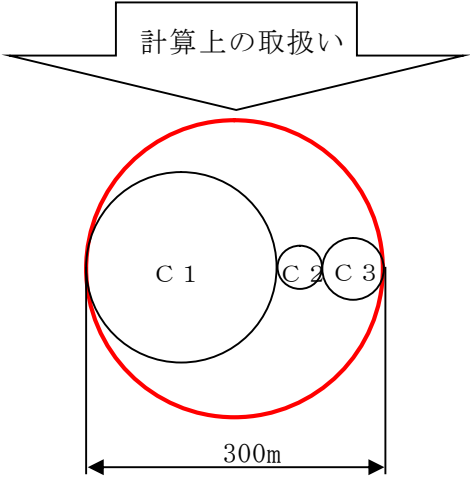


第 8.3-3 図 被害長さの確率密度分布（左）と超過確率分布（右）

【別添資料 1 (2.3.4 : 1-28)】

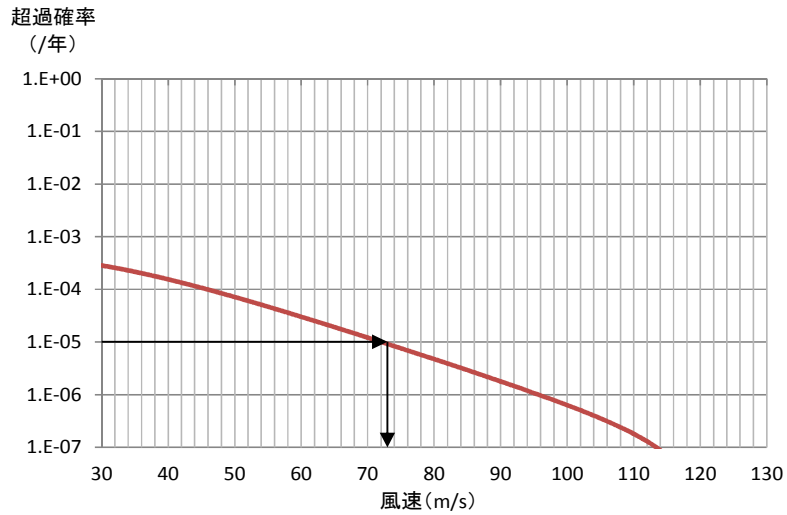


□ は、商業機密又は核物質防護上の観点から公開できません。



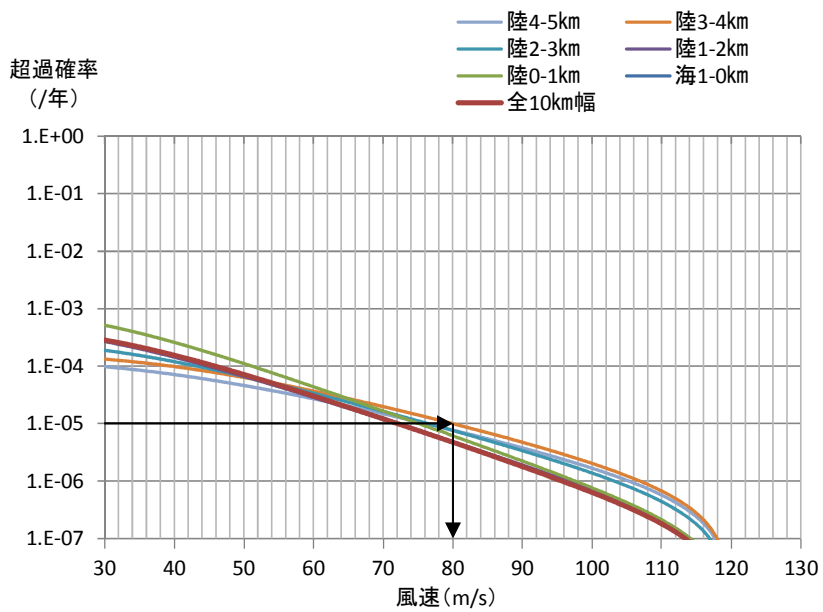
第 8.3-4 図 竜巻影響エリア

【別添資料 1 (2.3.5 : 1-30)】



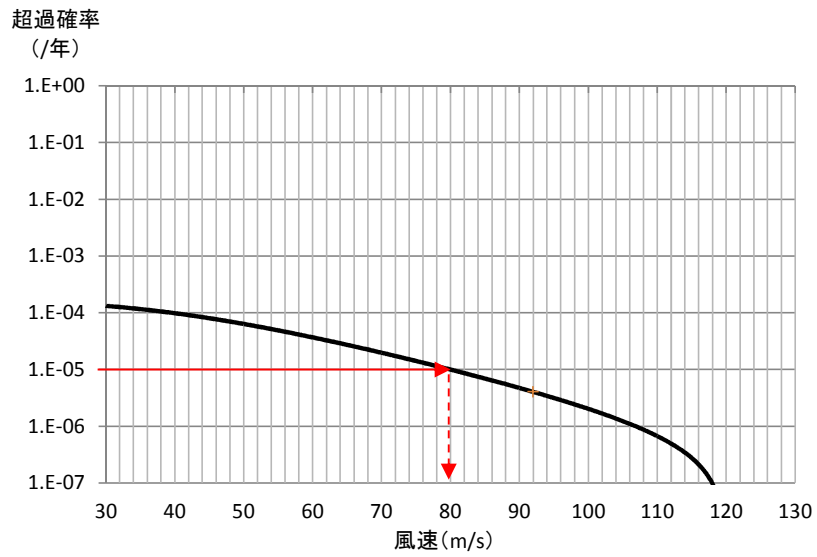
第 8.3-5 図 竜巻最大風速のハザード曲線（海側，陸側 5km 範囲）

【別添資料 1（2.3.6 : 1-32）】



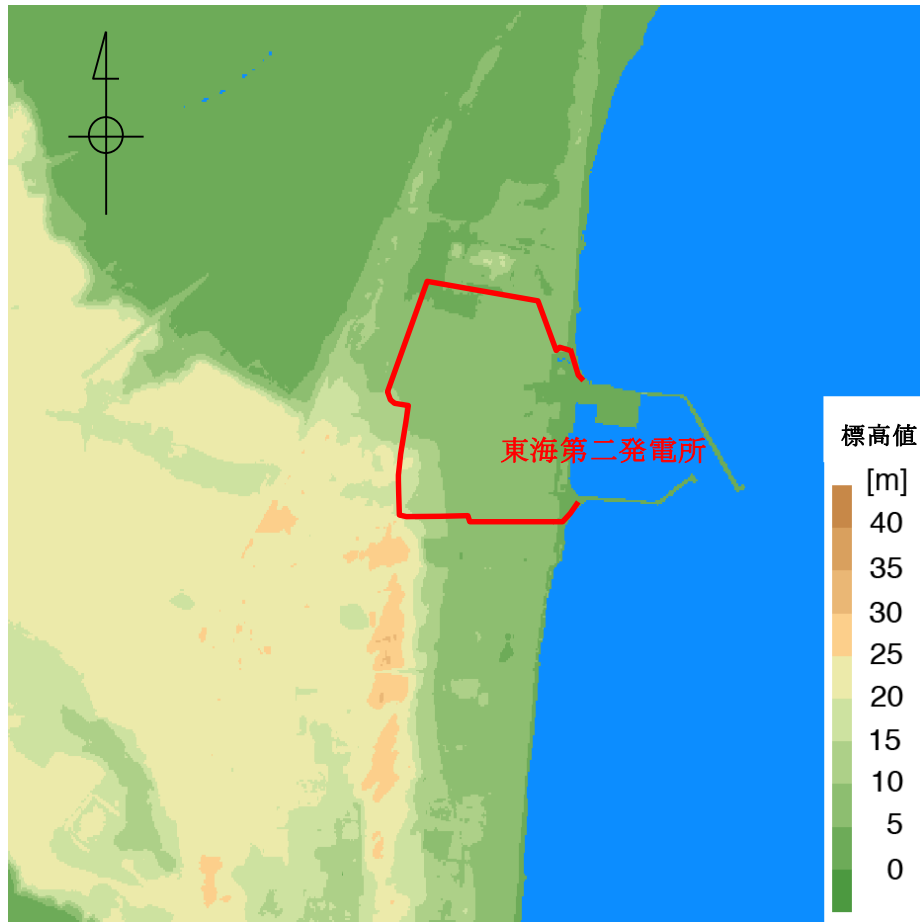
第 8.3-6 図 竜巻検討地域を 1km 幅毎に細分化した場合のハザード曲線

【別添資料 1（2.3.6 : 1-33）】



第 8.3-7 図 竜巻最大風速のハザード曲線

【別添資料 1 (2.3.9 : 1-38)】



第 8.5-1 図 東海第二発電所を中心とした東西 3km×南北 3km の地形

(国土地理院 5m メッシュ標高データに加筆)

【別添資料 1 (2.4.2 : 1-41)】

8.7 参考文献

- (1) 気象庁 竜巻等の突風データベース
- (2) 井上博登, 福西史郎, 鈴木哲夫, 2013:原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説, 独立行政法人原子力安全基盤機構, JNES-RE-2013-9009
- (3) Wen. Y. K and Chu. S. L. (1973) : Tornado Risks and Design Wind Speed, Journal of the Structural Division, Proceedings of American Society of Civil Engineering, Vol.99, No.ST12, pp. 2409-2421
- (4) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C.A. (1975) : Tornado Risk Evaluation Using Wind Speed Profiles, Journal of the Structural. Division, Proceedings of American Society of Civil Engineering, Vol.101, No.ST5, pp.1167-1171
- (5) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C.A. (1975) : Tornado Design Winds Based on Risk, Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.101, No.ST9, pp.1883-1897
- (6) 東京工芸大学 (2011) : 平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究 (平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構
- (7) U. S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.76: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March 2007.

東海第二発電所

竜巻影響評価について

本資料のうち、は商業機密又は核物質防護上の観点から公開できません。

目 次

1. 竜巻に対する防護	1
1.1 概要	1
1.2 評価の基本方針	2
1.2.1 竜巻から防護する施設の抽出	2
1.2.2 竜巻影響評価の対象施設	2
1.2.3 評価の基本的な考え方	12
1.2.3.1 評価方法	12
1.2.3.2 評価対象施設に作用する荷重	12
1.2.3.3 施設の安全性の確認方針	13
2. 基準竜巻・設計竜巻の設定	14
2.1 概要	14
2.2 竜巻検討地域の設定	14
2.2.1 気象総観場の分析	15
2.2.2 総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域 $T A_1$ の設定	18
2.2.3 竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域 $T A_2$ の設定	20
2.2.4 竜巻検討地域 $T A$ の設定	21
2.3 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定	22
2.3.1 過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1})	22
2.3.2 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})	23
2.3.3 発生頻度の分析	24
2.3.4 竜巻風速, 被害幅, 被害長さの確率密度分布及び相関係数	27
2.3.5 竜巻影響エリアの設定	29
2.3.6 ハザード曲線の算定	31

2.3.7	竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})	34
2.3.8	竜巻ハザードの不確かさの検討	35
2.3.9	基準竜巻の最大風速 (V_B)	38
2.3.10	竜巻データの更新に関する対応	39
2.4	設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定	40
2.4.1	地形効果による竜巻風速への影響	40
2.4.2	東海第二発電所敷地周辺における地形と竜巻風速への影響	40
2.4.3	設計竜巻の最大風速 (V_D)	41
2.4.4	設計竜巻の特性値	42
3.	竜巻影響評価	45
3.1	概要	45
3.2	評価対象施設	45
3.3	設計荷重の設定	46
3.3.1	設計竜巻荷重の設定	46
3.3.2	設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定	57
3.4	評価対象施設の設計方針	58
3.4.1	許容限界	59
3.4.2	設計方針	59
3.5	竜巻随件事象に対する評価	65

添付資料

1. 竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出について
2. 耐震Sクラス施設について
3. 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出について
4. 竜巻検討地域の設定について
5. 竜巻最大風速のハザード計算について
別紙 5-1 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
別紙 5-2 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について
6. 地形効果による竜巻の増幅の可能性について
7. 竜巻影響評価の概要及び保守性について
8. 竜巻影響評価及び竜巻防護対策の概要
別紙 8-1 評価対象施設の設計荷重について
別紙 8-2 竜巻防護対策のうち飛散防止対策の概要について
9. 設計飛来物の設定について
別紙 9-1 分解され小型軽量となる物品及び倒壊するが飛来物とならない物品について
別紙 9-2 空力パラメータについて
10. 竜巻時に発生する雹の影響について
11. 竜巻随件事象の抽出について

: 今回提出範囲

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」第六条において、外部からの衝撃による損傷の防止として、「安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない」としており、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。

発電用原子炉施設の供用期間中に極めてまれに発生する突風、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発電用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するため、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（平成 25 年 6 月 19 日 原子力規制委員会決定，平成 26 年 9 月 17 日改正）」（以下「竜巻影響評価ガイド」*という）を参照し、以下の竜巻影響評価について実施し、安全機能が維持されることを確認する。

- (1) 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
- (2) 東海第二発電所における飛来物に係る調査
- (3) 飛散防止対策
- (4) 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

※：「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」を含む。（特に区別する必要がある場合は、以下「ガイド（案）及び解説」という）

1.2 評価の基本方針

1.2.1 竜巻から防護する施設の抽出【添付資料1】

竜巻から防護する施設（以下「竜巻防護施設」という。）は、安全施設が竜巻の影響を受ける場合においても原子炉施設の安全性を確保するために、「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」のクラス1、2及び3の設計を要求される構築物、系統及び機器とする。

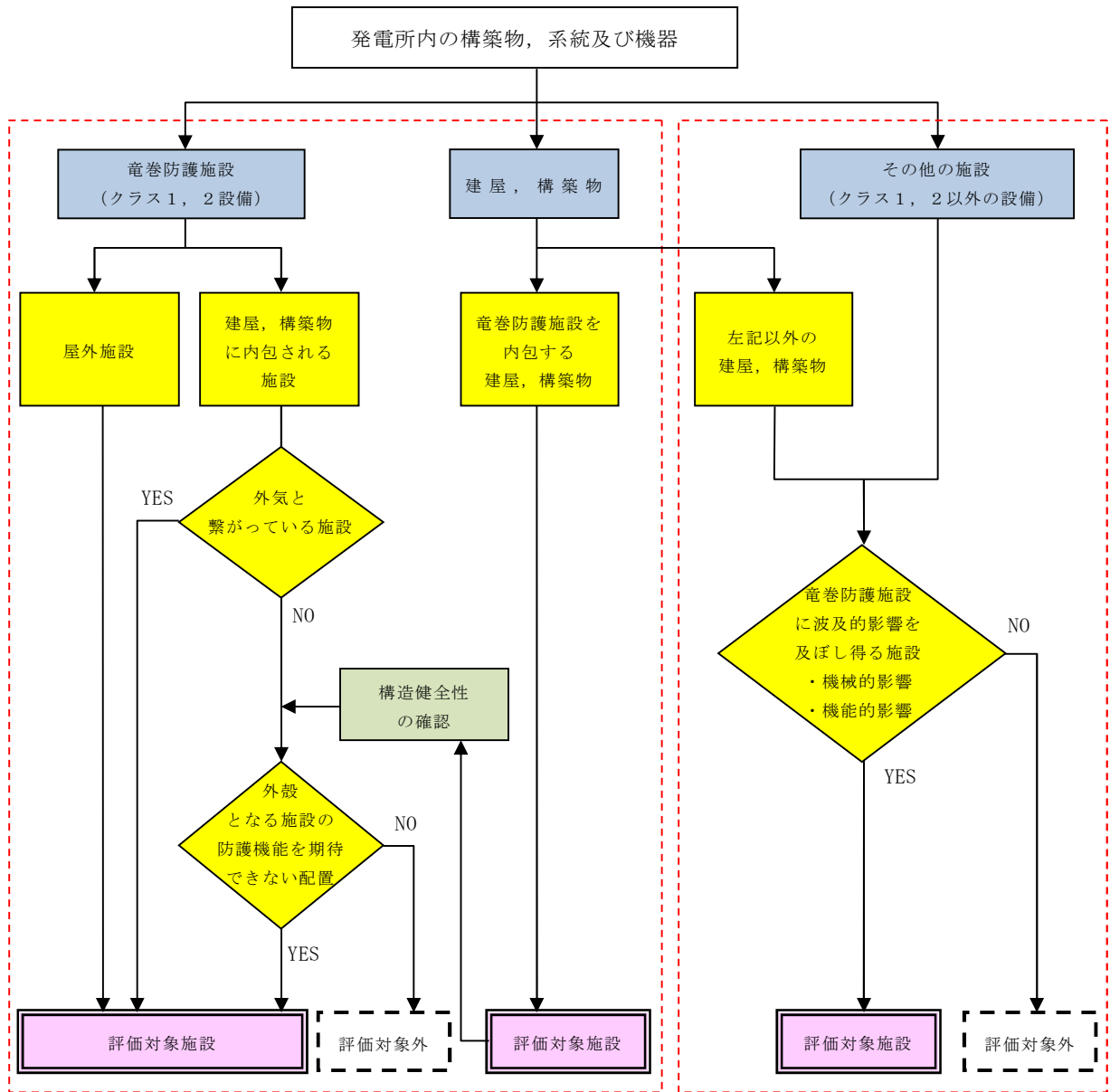
ただし、クラス3に属する施設については、竜巻及びその随件事象による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間に修復すること等の対応が可能な設計とすることで、安全機能を損なうことのない設計とすることから、以降「竜巻防護施設」という場合は、クラス1及び2に属する施設を指すものとする。

1.2.2 竜巻影響評価の対象施設

以下の(1)及び(2)に示す施設を竜巻影響評価の対象施設（以下「評価対象施設」という。）とする。

評価対象施設の抽出フローを第1.2.2-1図に示す。

なお、「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震Sクラスの設計を要求される施設についても、評価対象施設として抽出すべきものがないことを確認した。【添付資料2】



第 1.2.2-2 図

第 1.2.2-4 図

第 1.2.2-1 図 評価対象施設の抽出フロー

(1) 竜巻防護施設

竜巻防護施設のうち、評価対象施設として、屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設を含む）、屋内の施設で外気と繋がっている施設及び外殻となる施設による防護機能が期待できない施設を抽出する。

なお、外殻となる施設による防護機能が期待できない施設については、竜巻防護施設を内包する施設の構造健全性の確認結果を踏まえ抽出する。

防護機能を期待できることが確認できた施設（の区画）に内包される竜巻防護施設については、当該外殻施設により防護されることから、個別評価は実施しない。

第 1.2.2-2 図に、竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出フロー及び抽出された評価対象施設を示す。

また、第 1.2.2-2 図において抽出した評価対象施設のうち、屋外施設の配置を第 1.2.2-3 図に示す。

a. 屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設を含む）

(a) 非常用ディーゼル発電機吸気フィルタ

(b) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機吸気フィルタ

(以下(a)(b)を区別不要の場合は、「ディーゼル発電機吸気フィルタ」という。)

(c) 非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン

(d) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフトファン

(以下(c)(d)を区別不要の場合は、「ディーゼル発電機室ルーフトファン」という。)

(e) 中央制御室換気系冷凍機（配管， 弁含む）

(以下(e)を「中央制御室換気系冷凍機」という。)

(f) 残留熱除去系海水系ポンプ（配管， 弁含む）

(g) 残留熱除去系海水系ストレーナ

(h) 非常用ディーゼル発電機海水ポンプ（配管， 弁含む）

(i) 非常用ディーゼル発電機海水ストレーナ

(j) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水ポンプ（配管， 弁含む）

(k) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水ストレーナ

(以下(f)～(k)を区別不要の場合は、「海水ポンプ室内設備」という。)

- (l) 非常用ガス処理系排気配管
- (m) 排気筒

<以下、竜巻防護施設を内包する施設>

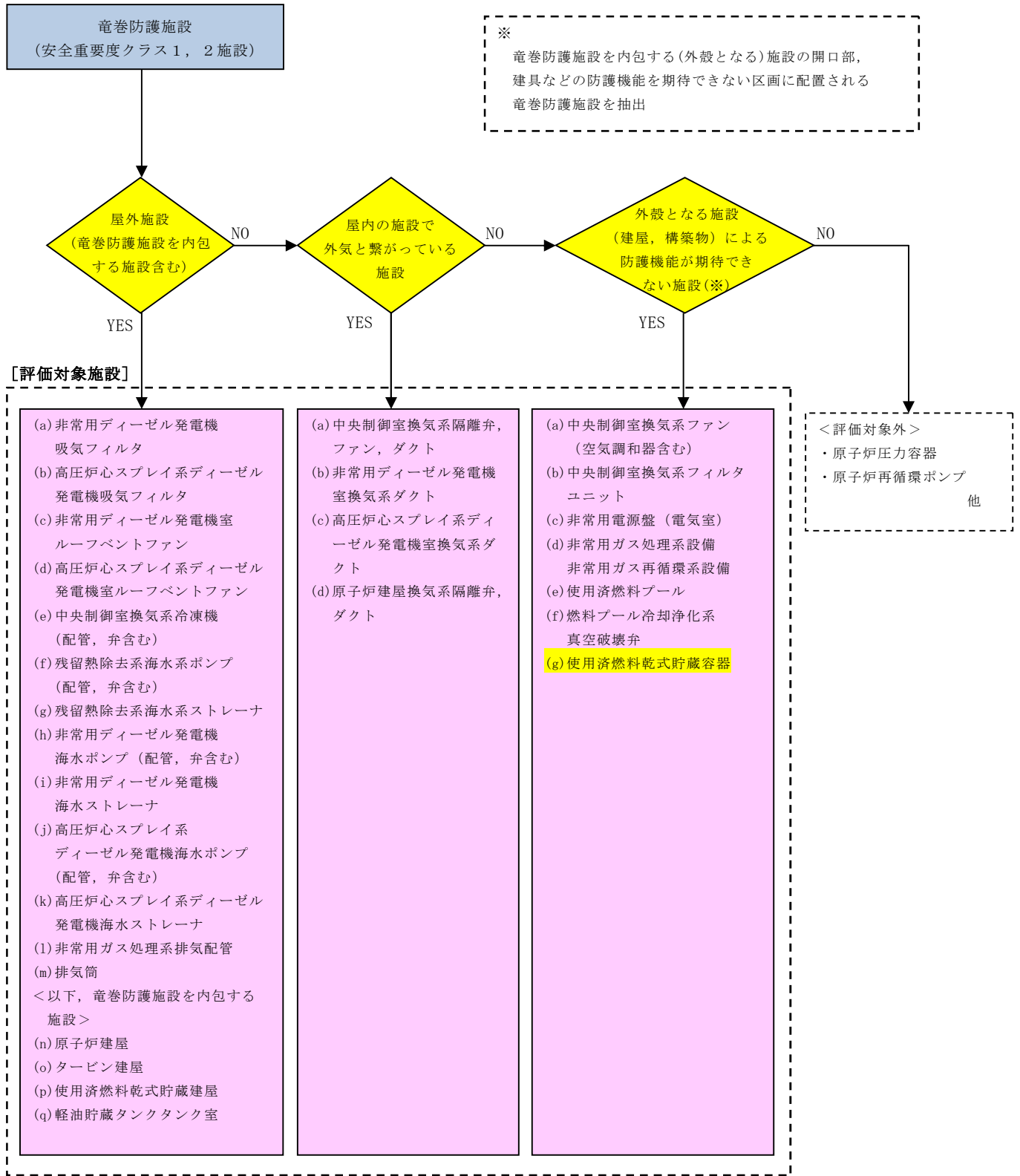
- (n) 原子炉建屋（原子炉圧力容器，原子炉再循環ポンプ等を内包）
- (o) タービン建屋（気体廃棄物処理系隔離弁等を内包）
- (p) 使用済燃料乾式貯蔵建屋（使用済燃料乾式貯蔵容器を内包）
- (q) 軽油貯蔵タンクタンク室（軽油貯蔵タンクを内包）

b. 屋内の施設で外気と繋がっている施設

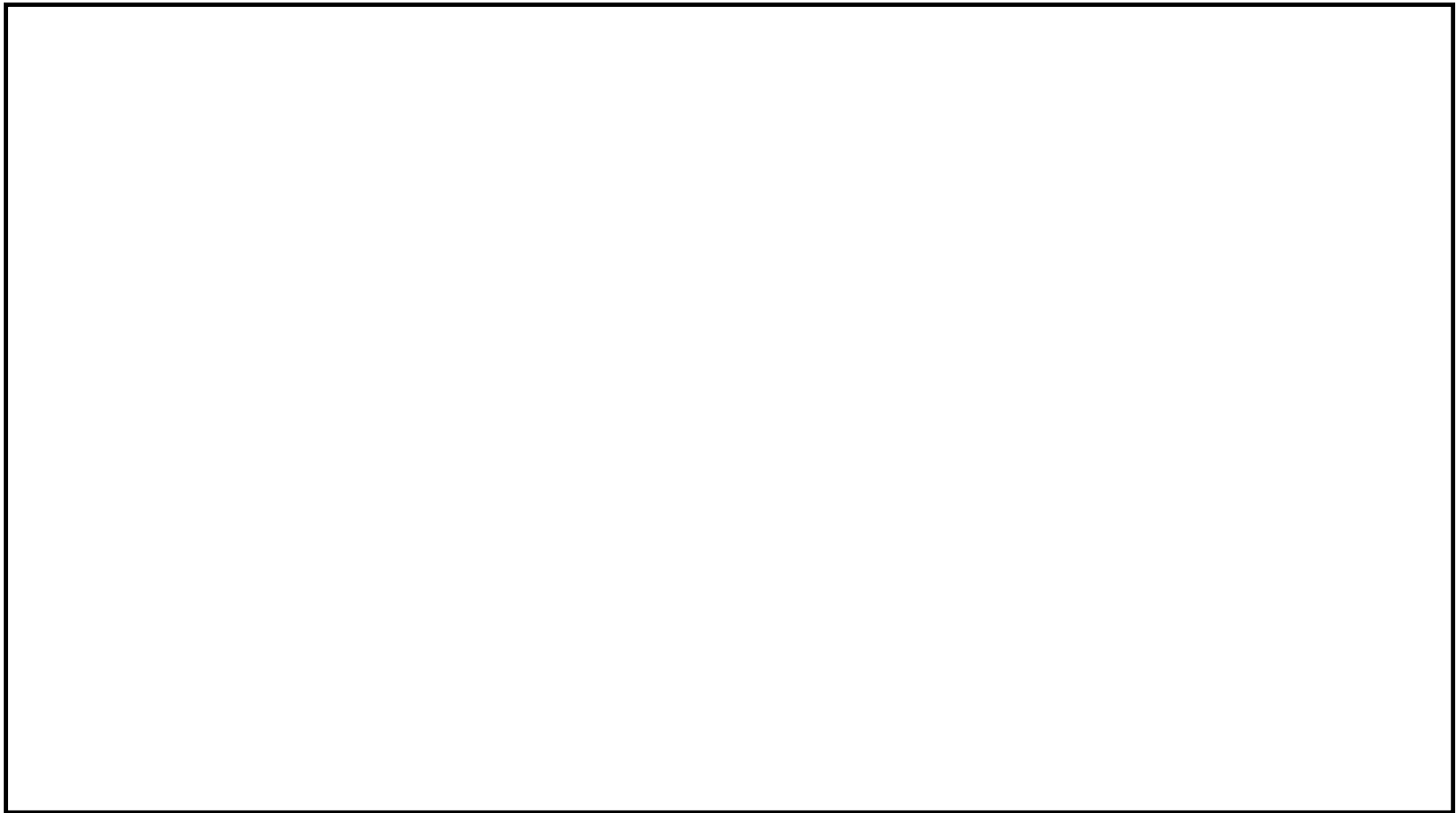
- (a) 中央制御室換気系隔離弁，ファン（ダクト含む）
- (b) 非常用ディーゼル発電機室換気系ダクト
- (c) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室換気系ダクト
(以下(b)(c)を区別不要の場合は，「ディーゼル発電機室換気系ダクト」という。)
- (d) 原子炉建屋換気系隔離弁，ダクト

c. 外殻となる施設（建屋，構築物）による防護機能が期待できない施設

- (a) 中央制御室換気系ファン（空気調和器含む）
- (b) 中央制御室換気系フィルタユニット
(以下(a)(b)を区別不要の場合は，「中央制御室換気系ファン」という。)
- (c) 非常用電源盤（原子炉建屋附属棟1階電気室）
- (d) 非常用ガス処理系設備及び非常用ガス再循環系設備
- (e) 使用済燃料プール
- (f) 燃料プール冷却浄化系真空破壊弁



第 1.2.2-2 図 竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出フロー



第 1.2.2-3 図 竜巻防護施設のうち評価対象施設（屋外施設）の配置図

(2) 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設【添付資料3】

竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設として評価対象施設となる施設は、発電所構内の構築物、系統及び機器のうち、倒壊により竜巻防護施設を機能喪失させる（機械的影響）可能性があるもの、及び屋外に設置される竜巻防護施設の附属設備のうち、気圧差等による損傷により竜巻防護施設を機能喪失させる（機能的影響）可能性があるものとする。

第1.2.2-4図に、竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出フロー及び抽出された施設を示す。

また、第1.2.2-4図において抽出した竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の配置図を、第1.2.2-5図に示す。

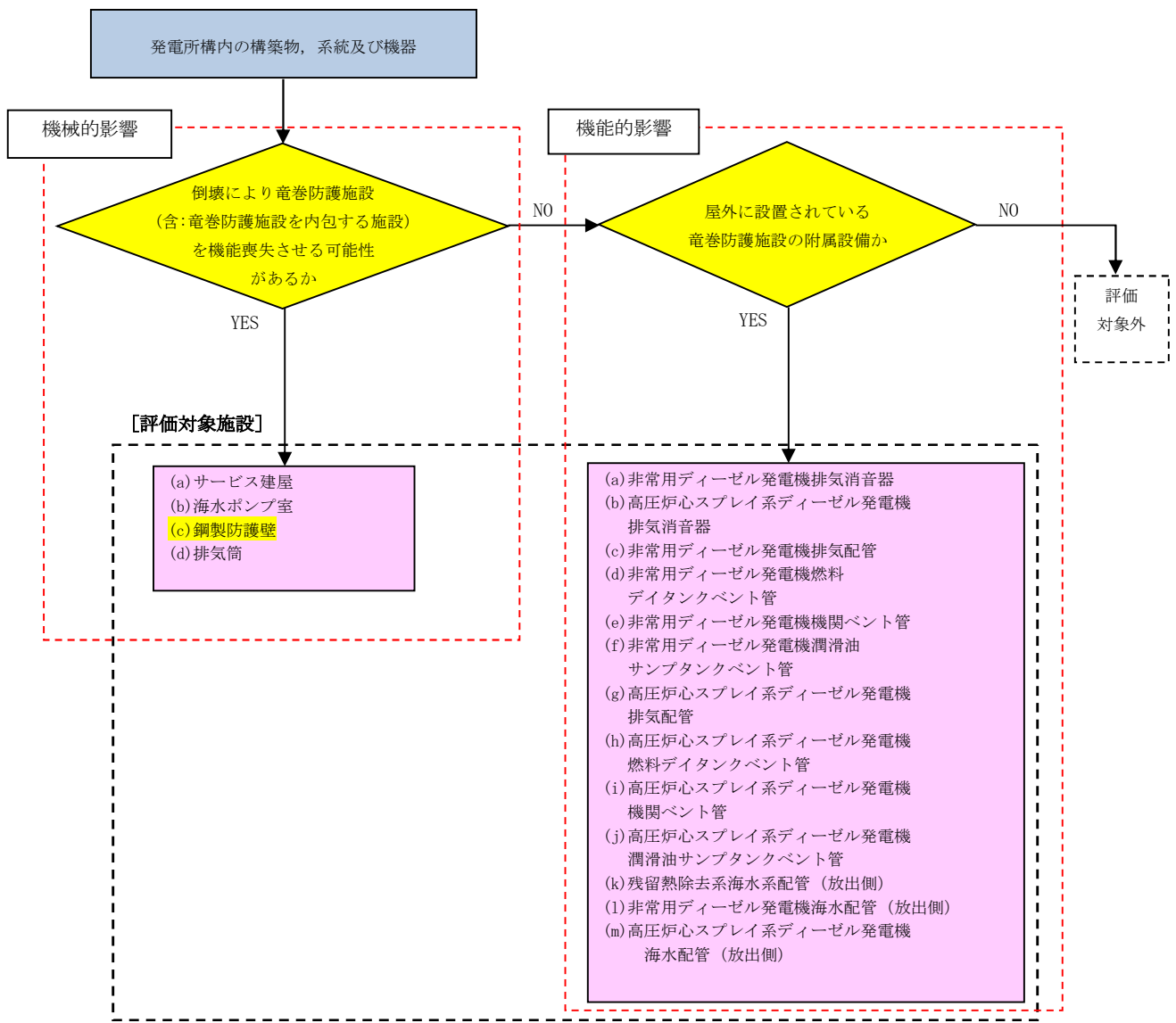
a. 機械的影響

- (a) サービス建屋
- (b) 海水ポンプ室
- (c) 鋼製防護壁
- (d) 排気筒

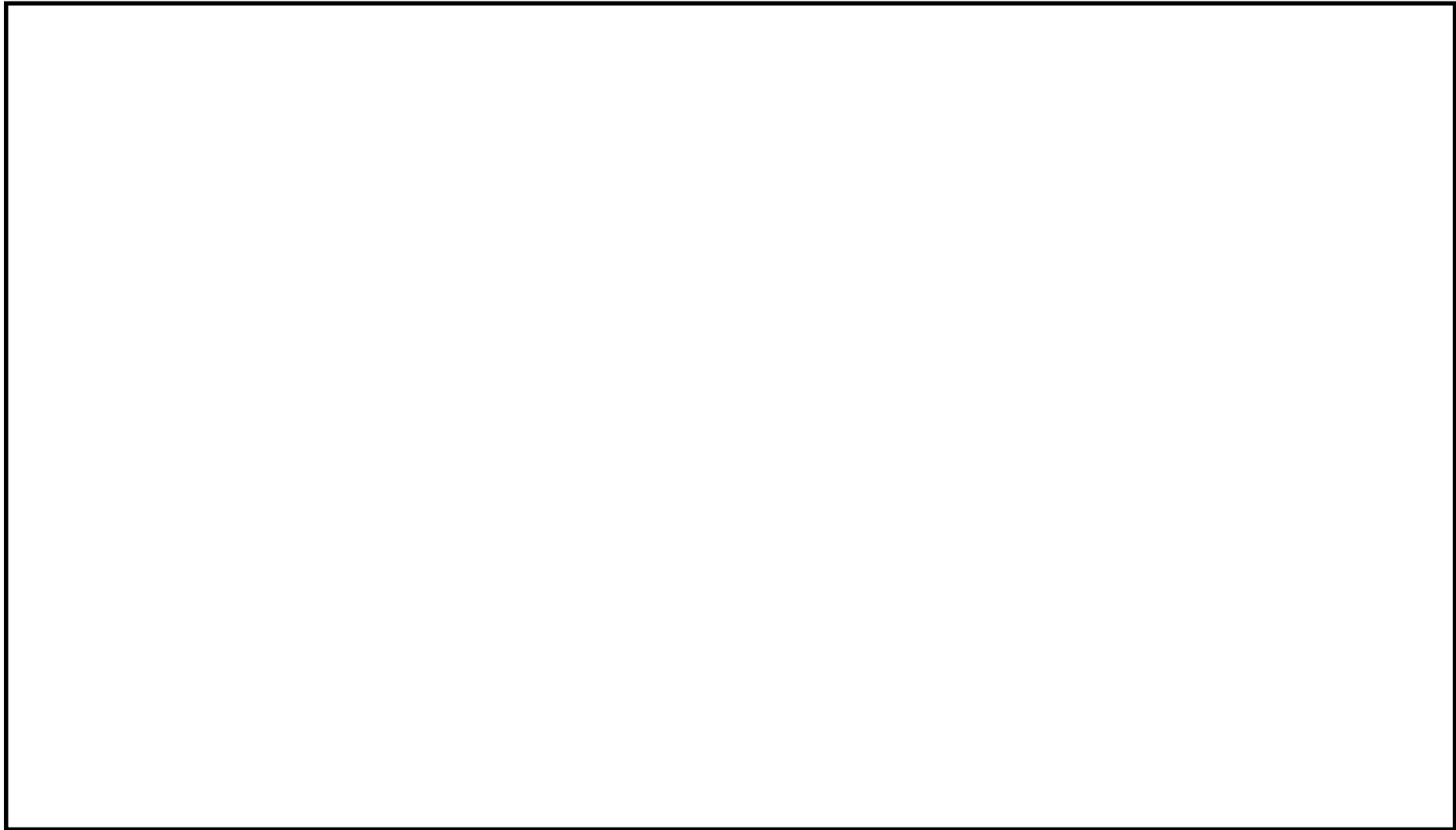
b. 機能的影響

- (a) 非常用ディーゼル発電機排気消音器
- (b) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器
(以下(a)(b)を区別不要の場合は、「ディーゼル発電機排気消音器」という。)
- (c) 非常用ディーゼル発電機排気配管
- (d) 非常用ディーゼル発電機燃料デイトンクベント管
- (e) 非常用ディーゼル発電機機関ベント管
- (f) 非常用ディーゼル発電機潤滑油サンプルタンクベント管
- (g) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気配管

- (h) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料デイトンクベント管
- (i) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機機関ベント管
- (j) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機潤滑油サンプタンクベント管
(以下(c)～(j)を区別不要の場合は、「ディーゼル発電機附属設備配管」という。)
- (k) 残留熱除去系海水系配管（放出側）
- (l) 非常用ディーゼル発電機海水配管（放出側）
- (m) 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水配管（放出側）
(以下(k)～(m)を区別不要の場合は、「海水ポンプ室内設備附属配管（放出側）」という。)



第 1. 2. 2-4 図 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出フロー



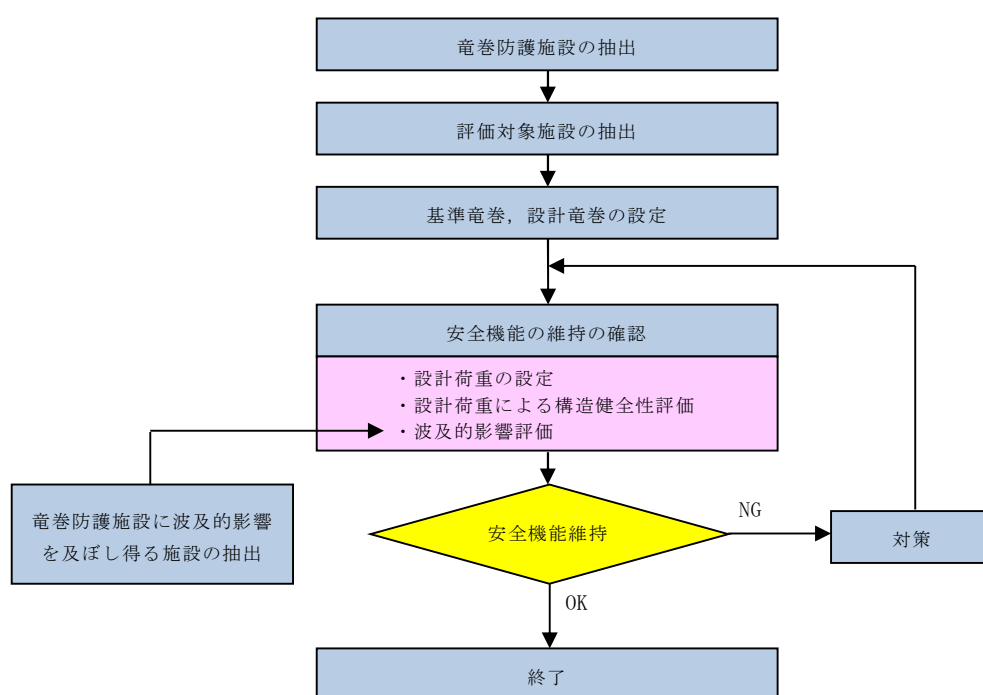
第 1.2.2-5 図 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の配置図

1.2.3 評価の基本的な考え方

1.2.3.1 評価方法

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，評価対象施設を抽出し，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について評価を行い，必要に応じ対策を行うことで安全機能が維持されていることを確認する。

竜巻影響評価の基本フローを第 1.2.3.1-1 図に示す。



第 1.2.3.1-1 図 竜巻影響評価の基本フロー

1.2.3.2 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。

a. 風圧力による荷重

設計竜巻の最大風速による風圧力による荷重

b. 気圧差による荷重

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荷重

c. 設計飛来物の衝撃荷重

設計竜巻によって評価対象施設に衝突し得る飛来物（設計飛来物）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。

a. 評価対象施設に常時作用する荷重，運転時荷重等

b. 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) b. 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) a. 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。

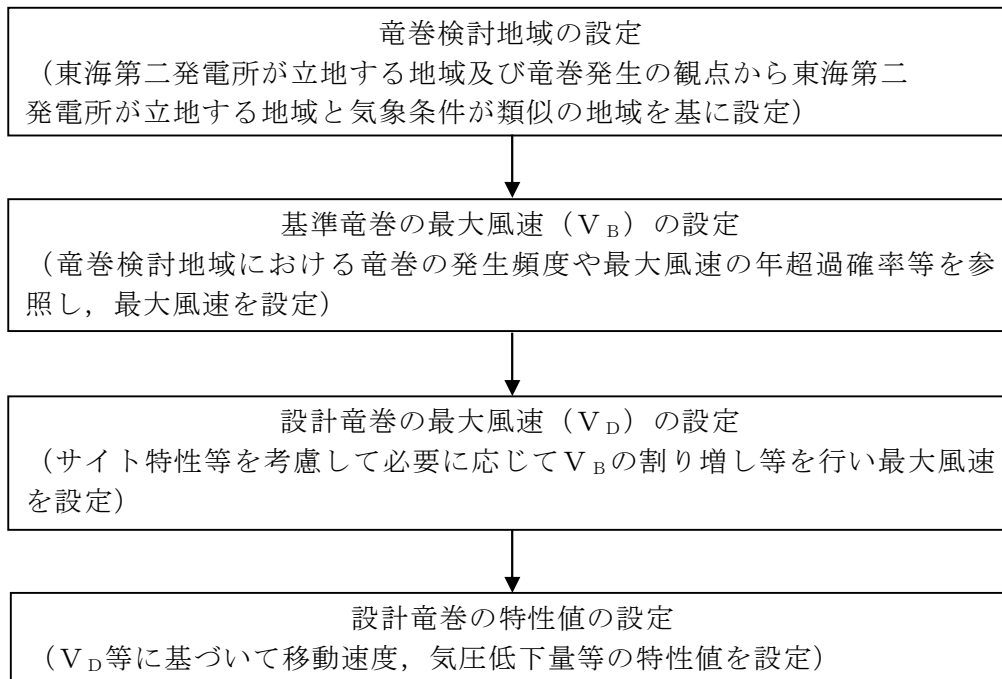
1.2.3.3 施設の安全性の確認方針

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確認を行い，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

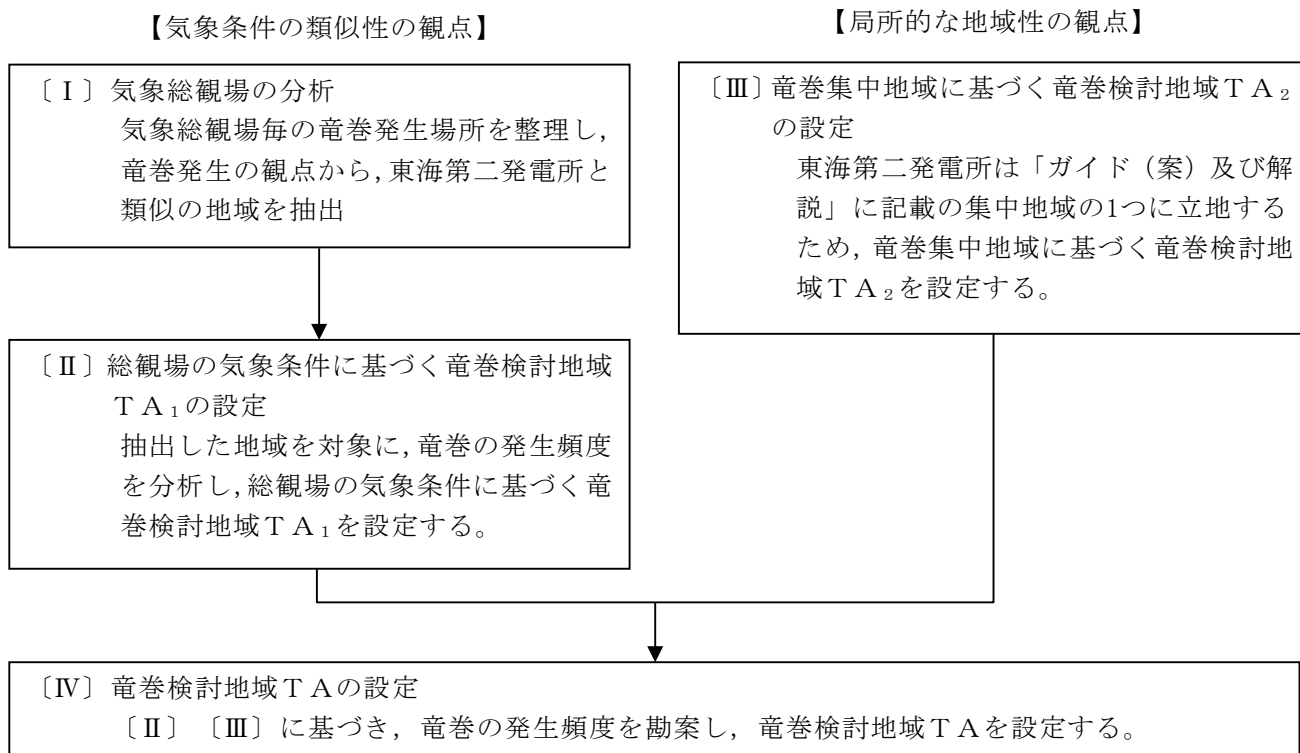
基準竜巻及び設計竜巻の設定フローを，第 2.1-1 図に示す。



第 2.1-1 図 基準竜巻及び設計竜巻の設定フロー

2.2 竜巻検討地域の設定【添付資料 4】

竜巻検討地域は，東海第二発電所が立地する地域及び竜巻発生
の観点から，「総観場の分析に基づく竜巻検討地域 T A₁の検討」及び「過去の竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域 T A₂の検討」により「竜巻検討地域 T A」を設定する。竜巻検討地域の設定フローを第 2.2-1 図に示す。



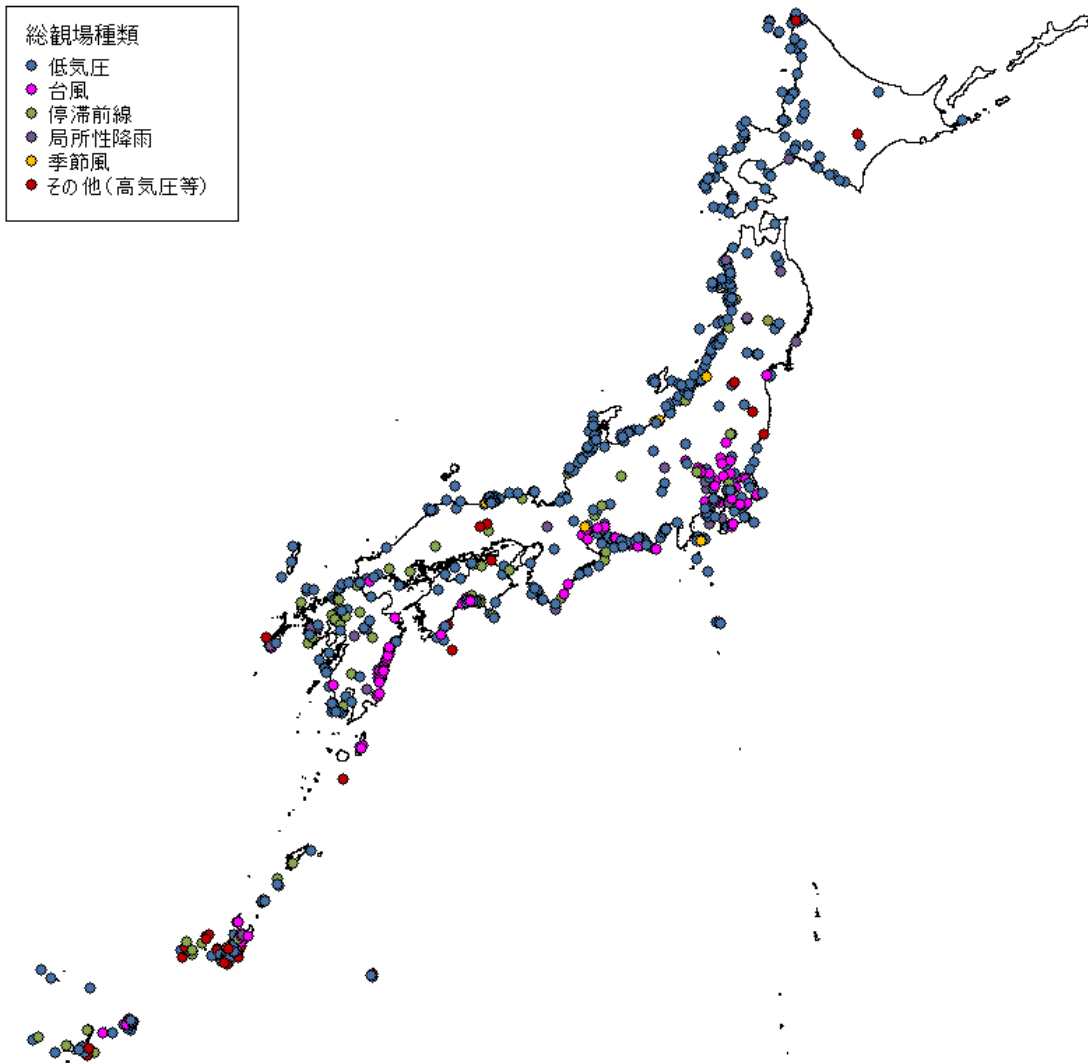
第 2.2-1 図 竜巻検討地域の設定フロー

2.2.1 気象総観場の分析

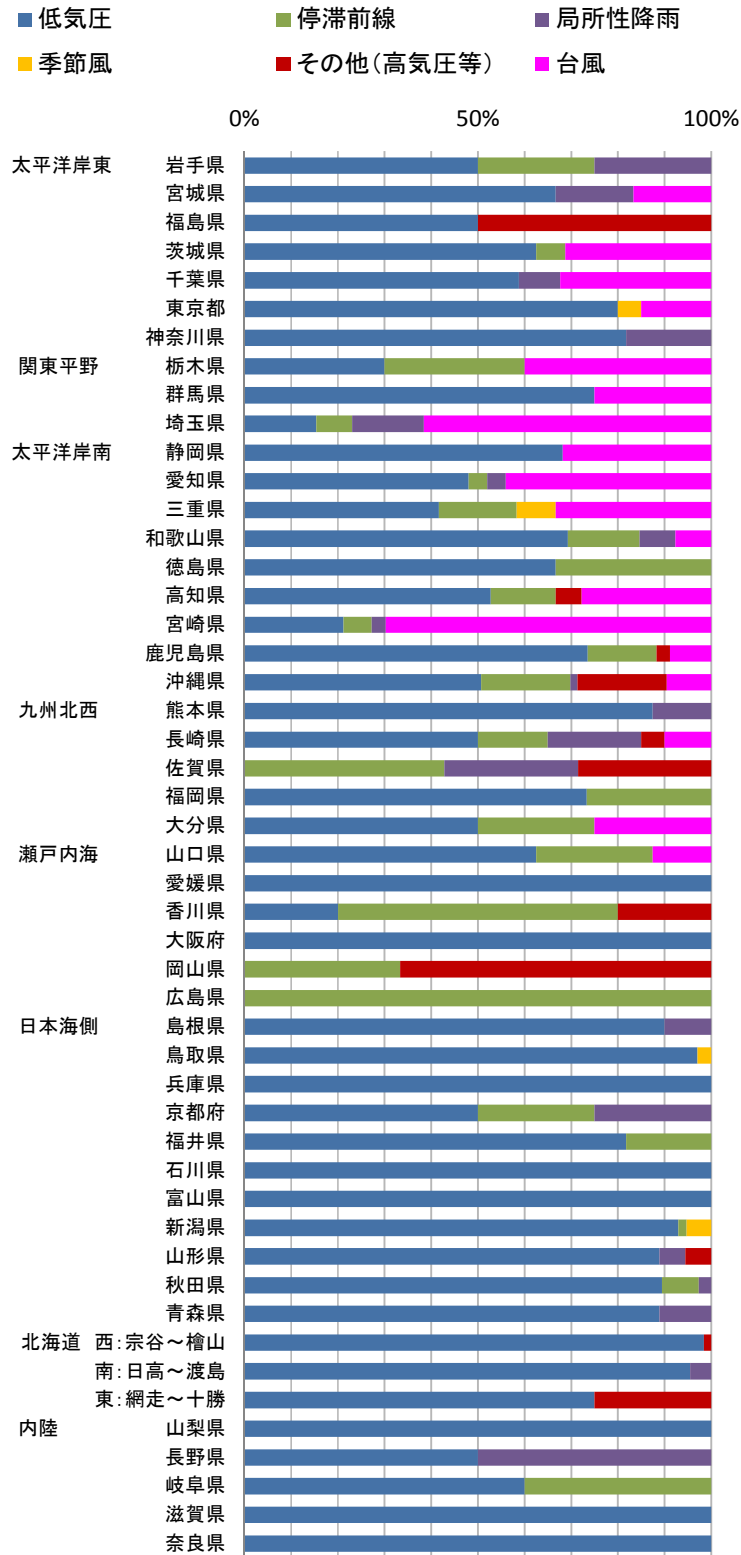
竜巻発生要因の総観場を 6 種類（低気圧，台風，停滞前線，局所性降雨，季節風，その他（高気圧等））に分類し，竜巻発生位置をこの気象要因毎に色分けした分布を，第 2.2.1-1 図に示す。

また，各都道府県での要因別発生比率を第 2.2.1-2 図に示す。

その結果，低気圧起因の竜巻は全国一様に発生していることが分かる。一方台風起因の竜巻は日本海側には発生しておらず，主に太平洋側で発生していることが分かる。また，停滞前線起因の竜巻は北海道を除く各地に発生していること，局所性降雨は内陸部での竜巻発生も促すこと，季節風や高気圧起因とされる竜巻の発生数は比較的少ないことが分かる。



第 2. 2. 1-1 図 竜巻発生時の総観場の分布(1961 年 1 月～2012 年 6 月)



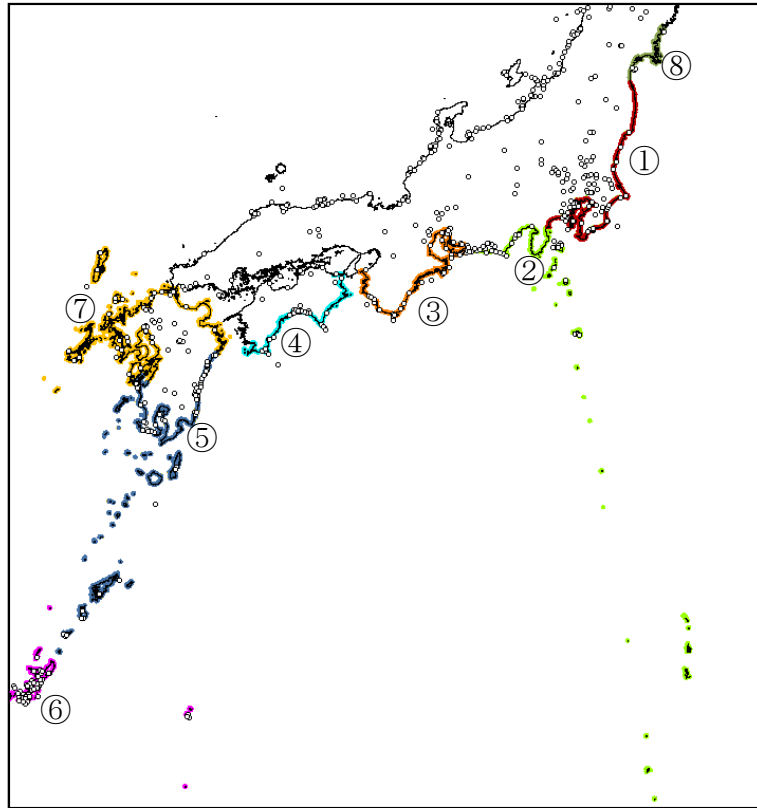
第 2.2.1-2 図 各都道府県での発生要因比率

2.2.2 総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域TA₁の設定

竜巻発生地域性が見られる台風起因の発生領域から、太平洋側の宮城県～沖縄県にかけての範囲を考慮する。東海第二発電所はこの範囲に立地しており、太平洋側の宮城県～沖縄県を基本として、竜巻の発生頻度の観点から総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域TA₁の検討を行う。

東海第二発電所から半径180km圏内(10万km²圏)を含む太平洋側沿岸の海岸線から海側陸側各5kmの範囲を対象として、竜巻検討地域TA₁の候補の領域8ケース及び竜巻の個数と単位面積当たりの発生数の比較を第2.2.2-1図及び第2.2.2-1表に示す。なお、表の竜巻の個数は各ケースの領域毎における発生した全ての竜巻の個数である。

この結果、TA_{1.6}のケースの単位面積当たりの発生数が最も大きくなるため、これを総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域TA₁とする。



第 2.2.2-1 図 竜巻検討地域 T A₁ の検討領域

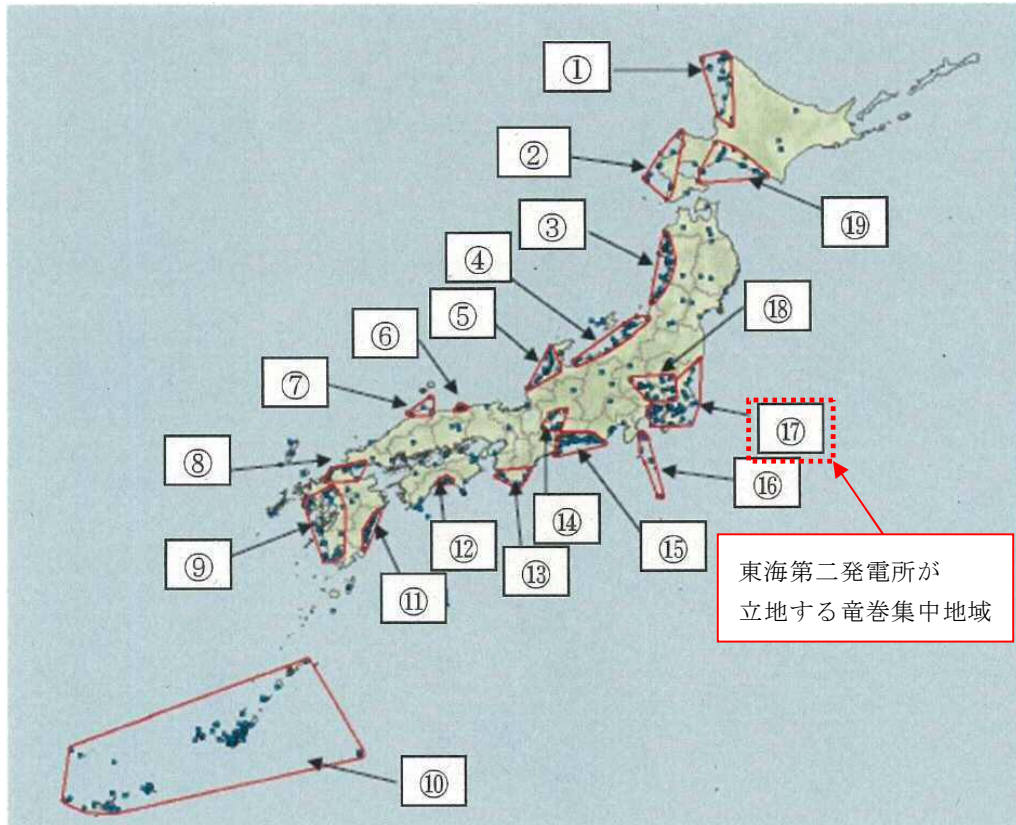
第 2.2.2-1 表 竜巻検討地域 T A₁ の候補毎の竜巻の個数と
単位面積当たり発生数

領域			領域面積 (km ²)	51.5 年間に 領域内で発 生した個数	単位面積当たり 発生数 (個/年/km ²)
T A _{1.1}	①	福島県～神奈川県	7,900	40	0.98E-04
T A _{1.2}	①～②	福島県～静岡県	15,700	68	0.84E-04
T A _{1.3}	①～③	福島県～和歌山県	23,400	104	0.86E-04
T A _{1.4}	①～④	福島県～高知県	28,600	138	0.94E-04
T A _{1.5}	①～⑤	福島県～鹿児島県	46,700	194	0.81E-04
T A_{1.6}	①～⑥	福島県～沖縄県	57,000	300	1.02E-04
T A _{1.7}	①～⑦	福島県～九州全県	79,700	337	0.82E-04
T A _{1.8}	①～⑥, ⑧	宮城県～沖縄県	59,700	302	0.98E-04

2.2.3 竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域TA₂の設定

東海第二発電所は、第 2.2.3-1 図に示す「ガイド（案）及び解説」⁽¹⁾ の竜巻が集中する 19 の地域のうち竜巻集中地域⑰に立地している。

竜巻集中地域⑰を前述のTA_{1.1}とみなし、これを竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域TA₂とする。



第 2.2.3-1 図 竜巻の発生する地点と竜巻が集中する 19 の地域

(「ガイド（案）及び解説」より引用)

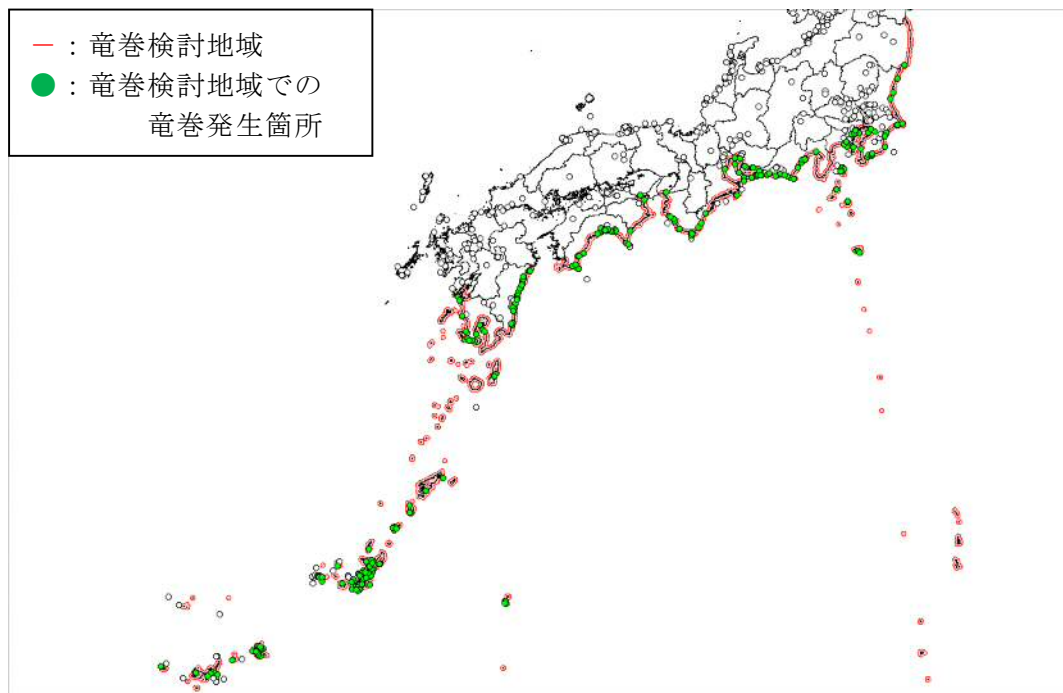
2.2.4 竜巻検討地域TAの設定

総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域TA₁及び竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域TA₂における、竜巻の個数及び単位面積当たりの発生数を第2.2.4-1表に示す。これより、竜巻の個数及び単位面積当たりの発生数の大きさから、TA₁を竜巻検討地域TAに設定する（面積約57,000km²）。

竜巻検討地域TAを第2.2.4-1図に示す。

第2.2.4-1表 竜巻検討地域内で発生が確認された竜巻の個数と
単位面積当たり発生数

	領域面積 (km ²)	51.5年間に 領域内で発 生した個数	単位面積当たり発生数 (個/年/km ²)
総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域TA ₁	57,000	300	1.02×10^{-4}
竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域TA ₂	7,900	40	0.98×10^{-4}



第2.2.4-1図 竜巻検討地域TA

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})

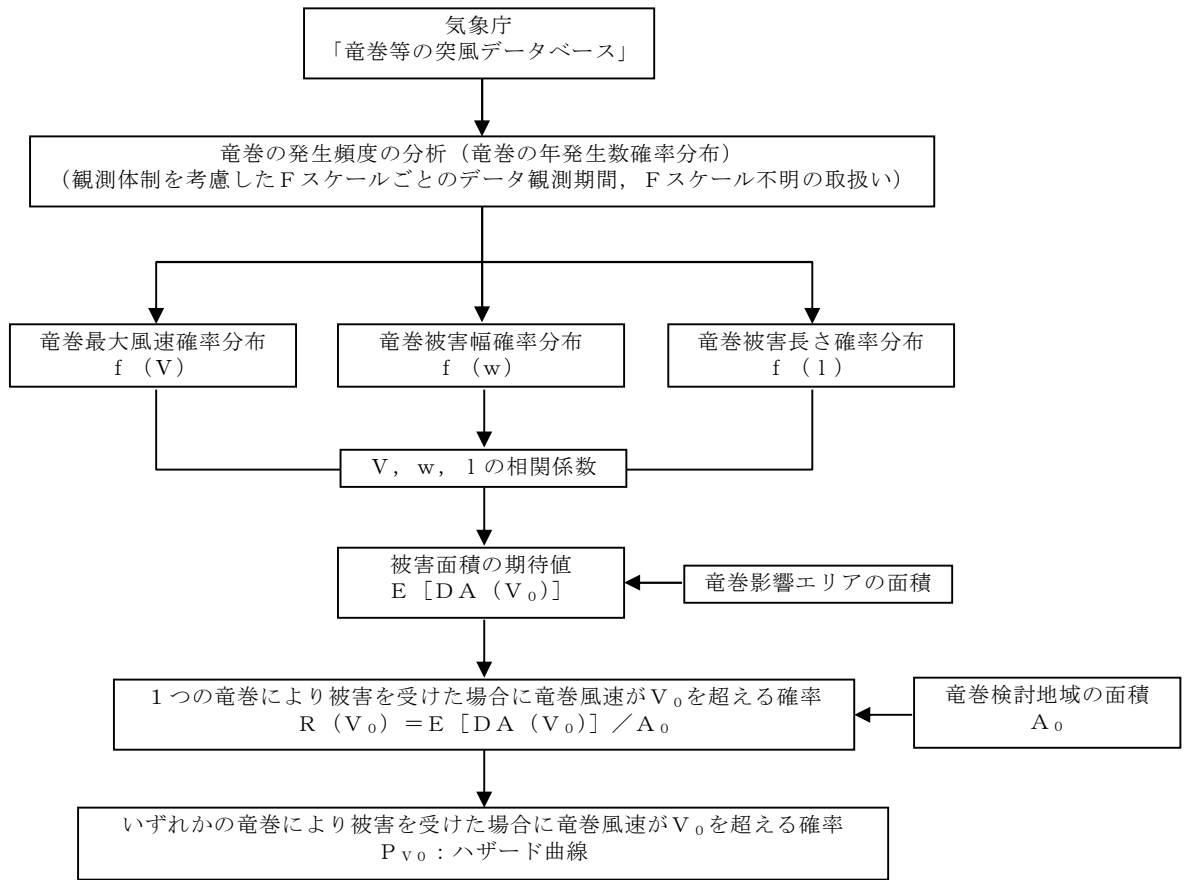
気象庁の「竜巻等の突風データベース」⁽²⁾に基づき、竜巻検討地域内で過去（1961年1月から2012年6月）に発生した竜巻のうち最大であるF3スケール相当以上の竜巻を第2.3.1-1表に示す。F3スケールにおける風速は70m/s～92m/sであることから、過去に発生した竜巻による最大風速 V_{B1} を92m/sとする。

第2.3.1-1表 竜巻検討地域内で過去（1961年1月～2012年6月）に発生したF3スケール相当以上の竜巻の観測記録⁽²⁾

発生日時	発生場所				Fスケール
	緯度	経度	都道府県	市町村	
1999年09月24日11時07分	34度42分4秒	137度23分5秒	愛知県	豊橋市	F3
1990年02月19日15時15分	31度15分38秒	130度16分35秒	鹿児島県	枕崎市	F2～F3
1978年02月28日21時20分	35度32分1秒	139度41分50秒	神奈川県	川崎市	F2～F3
1969年12月07日18時00分	34度45分4秒	137度22分46秒	愛知県	豊橋市	F2～F3
1968年09月24日19時05分	32度7分16秒	131度32分8秒	宮崎県	高鍋町	F2～F3
1967年10月28日03時12分	35度42分3秒	140度43分10秒	千葉県	飯岡町	F2～F3

2.3.2 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) 【添付資料 5】

竜巻最大風速のハザード曲線は、「竜巻影響評価ガイド」に従い、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「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽³⁾を参照して算定する。算定フローを第 2.3.2-1 図に示す。



第 2.3.2-1 図 ハザード曲線の算定フロー

竜巻最大風速のハザード曲線は、竜巻検討地域全域（海岸線から海側及び陸側それぞれ 5km 全域（以下「10km 幅」という。））、及び竜巻検討地域を海岸線に沿って 1km 範囲毎に細分化したケースを作成し、これらの年超過確率 10^{-5} の風速のうち、最も大きなものを V_{B2} として設定する。

2.3.3 発生頻度の分析

竜巻の発生数の分析結果を第 2.3.3-1 表に示す。竜巻検討地域において 1961 年 1 月から 2012 年 6 月までの 51.5 年間に 300 個の竜巻が観測されたことに対し、1188 個の竜巻が発生したと推定した。

竜巻についての過去の観測データは少なく、また、観測年代によって精度が異なる。そこで、下記のとおり観測データの補正を行い、年発生数の確率分布に供する統計データを推定した。

- (1) F 0 及び F スケール不明の竜巻については、観測体制が強化される以前は見過ごされた可能性が大きいことから、観測体制が強化された 2007 年以降の統計量を基にする。
- (2) F 1 の竜巻については、1991 年以降の年間発生数がそれ以前の 30 年間の発生数を明らかに上回ることから、1991 年以降の統計量を基にする。
- (3) F 2 以上の竜巻については、見逃されることが少なかったとして、1961 年以降の全期間の統計量を基にする。
- (4) F スケール不明の海上で発生し、上陸せず消滅した竜巻（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、陸上竜巻（上陸竜巻含む）の F スケール別発生比率で按分し、各 F スケールで発生した竜巻に加える。【添付資料 5 別紙 1】なお、F スケール不明の陸上竜巻（上陸竜巻含む）は、痕跡等が残らないほど小さかったとし、F 0 相当の竜巻であったとする。

また、竜巻検討地域内の竜巻の発生個数の評価は、発生地点と消滅地点を結ぶ線分が当該地域に掛かるか否かで判断する。

さらに、竜巻が上陸したか否かは、観測データの詳細情報を基本として、

発生地点座標と消滅地点座標を結ぶ線分が、陸地境界内に掛かるか否かも加えて判定する。

第 2.3.3-1 表 竜巻発生数の分析結果

		F3	F2	F1	F0	小計	陸上不明	海上不明	合計	
過去に観測された竜巻	1961.1-2012.6 51.5年間	期間内個数	6	41	100	46	193	20	87	300
		平均値 (個/年)	0.12	0.80	1.94	0.89	3.75	0.39	1.69	5.83
		標準偏差 (個/年)	0.32	0.94	1.96	2.17	3.25	0.69	4.35	7.26
	1991.1-2012.6 21.5年間	期間内個数	1	15	72	46	134	15	86	235
		平均値 (個/年)	0.05	0.70	3.35	2.14	6.23	0.70	4.00	10.93
		標準偏差 (個/年)	0.22	0.78	2.03	2.96	3.24	0.84	6.08	8.81
	2007.1-2012.6 5.5年間	期間内個数	0	1	12	31	44	9	63	116
		平均値 (個/年)	0.00	0.18	2.18	5.64	8.00	1.64	11.45	21.09
		標準偏差 (個/年)	0.00	0.43	1.99	4.17	4.16	0.97	8.32	11.75

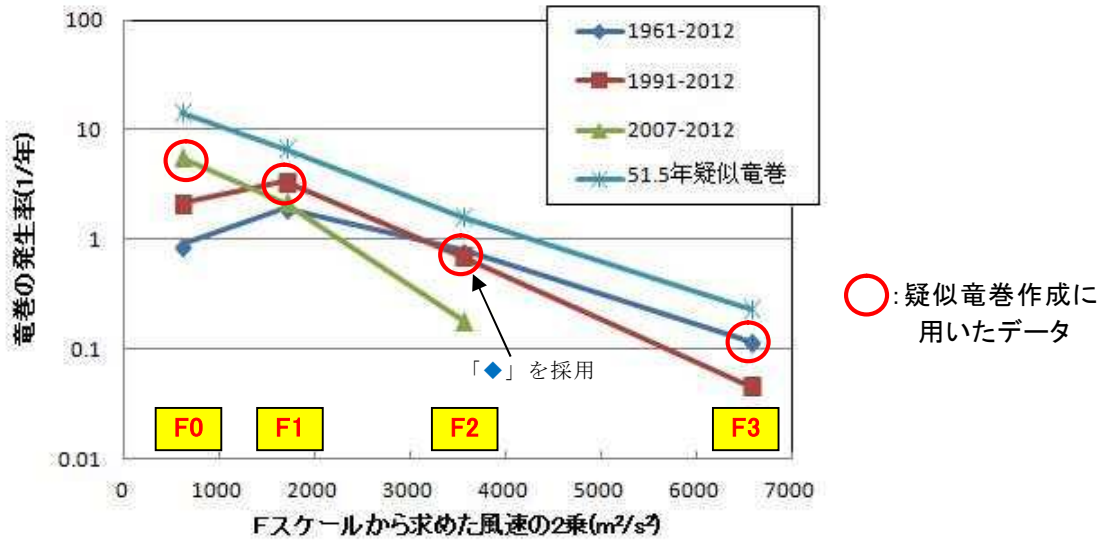
		F3	F2	F1	F0	計	
疑似51.5年間の竜巻	疑似51.5年間 (陸上竜巻)	期間内個数	6	41	173	376	596
		平均値 (個/年)	0.12	0.80	3.36	7.30	11.57
		標準偏差 (個/年)	0.32	0.94	2.03	4.74	5.25
	疑似51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	12	82	345	749	1188
		平均値 (個/年)	0.23	1.59	6.70	14.54	23.07
		標準偏差 (個/年)	0.46	1.33	2.87	6.69	7.42

また、上記の取扱いのうち(1)～(3)に関する各期間に観測された竜巻及び作成された51.5年間の疑似竜巻についての竜巻強度分布※を第2.3.3-1図に示す。

(1)～(3)の扱いにおいて用いたデータは図中で丸囲みしたものであり、理想的な分布とされる直線状態にあるもののみを用いている。また、(4)の扱いも加えて作成された疑似竜巻についても、理想的な直線状の強度分布になっていることから、(1)～(4)の手法は妥当であったと考えられる。

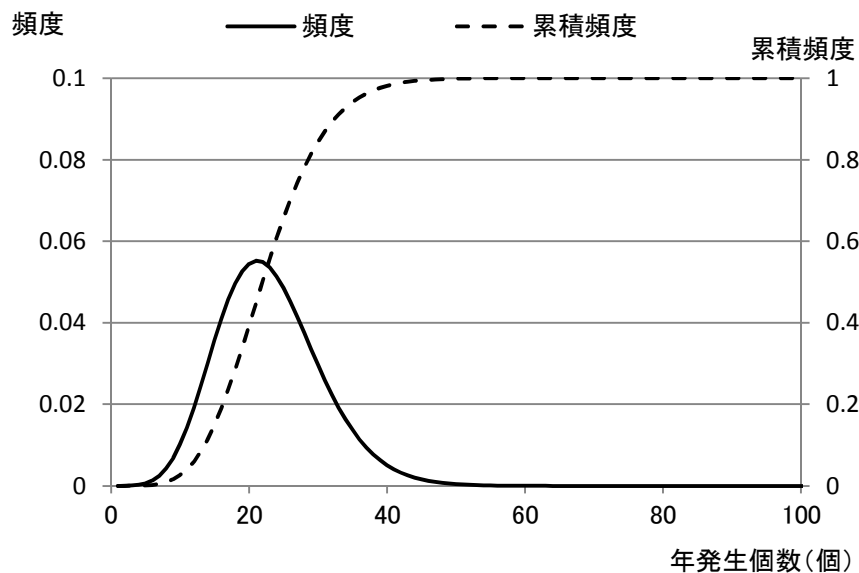
※：縦軸に竜巻の発生率、横軸に風速の2乗をとってグラフにしたもので、竜巻等突風の発生状況の実態把握や調査体制、スケールの改善に広く利用される (Brooks *et al.* 2001; Feuerstein *et al.* 2005)。

突風の知覚漏れがなく、かつ理想的な突風の強さのスケールを用いると、縦軸に対数をとった場合に直線状になる (Dotzek *et al.* 2005)。



第 2.3.3-1 図 疑似竜巻作成に採用したデータ及び疑似竜巻の強度分布

竜巻の年発生数の確率密度分布の設定に当たっては、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）が大きいことから、「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」の成果を参考とし、第 2.3.3-2 図に示すポリヤ分布とした。



第 2.3.3-2 図 竜巻の年発生数の確率密度分布（ポリヤ分布）

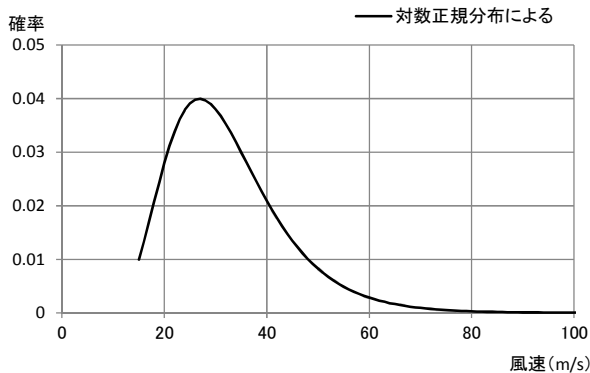
2.3.4 竜巻風速，被害幅及び被害長さの確率密度分布及び相関係数

発生数，被害幅及び被害長さについて，観測されたデータを基に，前記で評価した疑似 51.5 年間の発生数に対応するようにサンプリングし，統計量を算定した。統計量を第 2.3.4-1 表に示す。

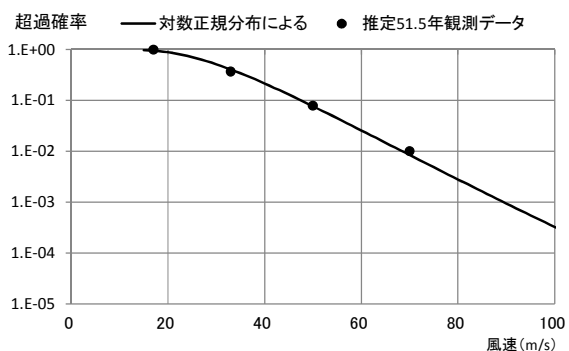
その結果を基に，最大風速，被害幅及び被害長さは対数正規分布に従うものとして求めた確率密度分布を，第 2.3.4-1 図～第 2.3.4-6 図に示す。

第 2.3.4-1 表 発生数，被害幅及び被害長さの統計量

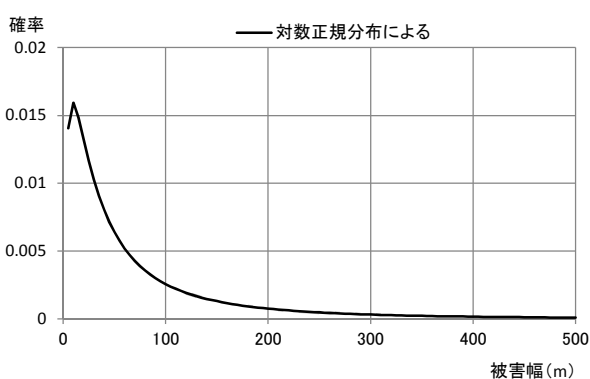
			F3	F2	F1	F0	計
疑似 51.5 年間	発生数	期間内個数	12	82	345	749	1188
		平均値 (個/年)	0.23	1.59	6.70	14.54	23.07
		標準偏差 (個/年)	0.46	1.33	2.87	6.69	7.42
	被害幅	期間内個数	12	82	345	749	1188
		平均値 (m)	525	250	124	56	94
		標準偏差 (m)	706	408	187	45	179
	被害長さ	期間内個数	12	82	345	749	1188
		平均値 (km)	14	5.63	2.43	1.18	1.98
		標準偏差 (km)	14	4.94	3.03	0.97	3.10



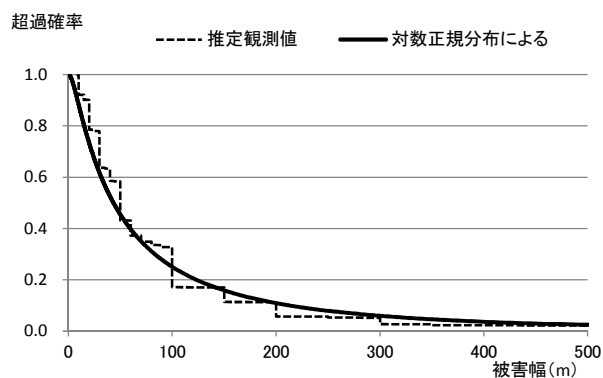
第 2.3.4-1 図 最大風速の確率密度分布



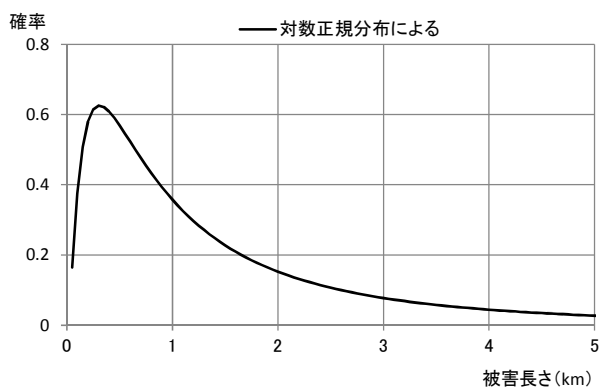
第 2.3.4-2 図 最大風速の超過確率



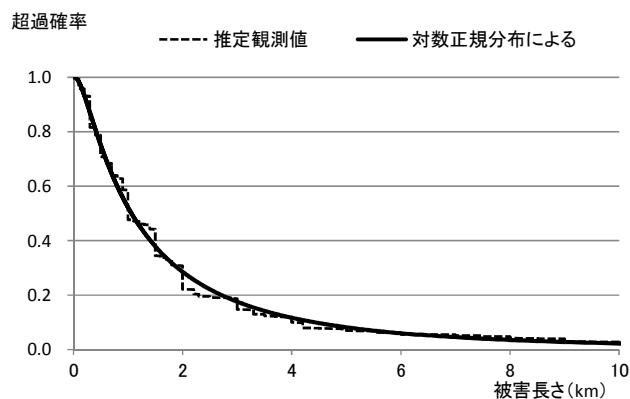
第 2.3.4-3 図 被害幅の確率密度分布



第 2.3.4-4 図 被害幅の超過確率



第 2.3.4-5 図 被害長さの確率密度分布



第 2.3.4-6 図 被害長さの超過確率

相関係数は、竜巻の最大風速、被害幅及び被害長さのうち、少なくとも 2 変量の比較が行える観測データを基に評価した。相関係数を第 2.3.4-2 表に示す。

第 2.3.4-2 表 最大風速，被害幅及び被害長さの対数値の相関係数

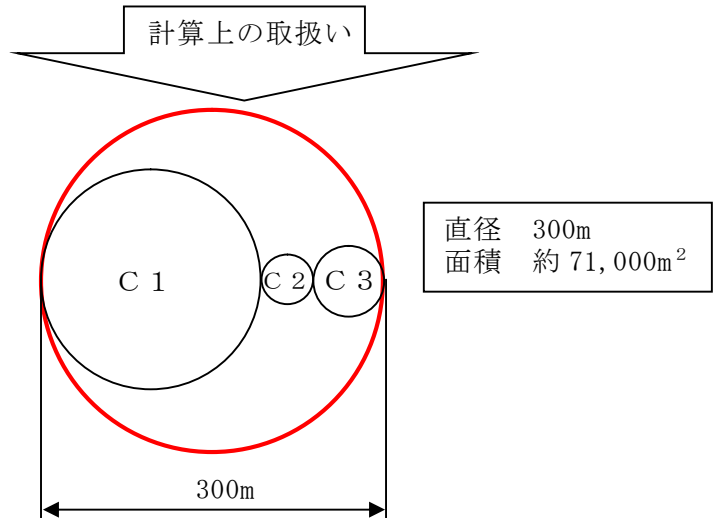
相関係数の値	最大風速	被害幅	被害長さ
最大風速	1.000	0.381	0.452
被害幅	—	1.000	0.381
被害長さ	—	—	1.000

2.3.5 竜巻影響エリアの設定

東海第二発電所の構築物，系統及び機器のうち，竜巻防護施設を包絡する円形領域を竜巻影響エリアとして設定した。竜巻影響エリアを第 2.3.5-1 図に示す。

なお，竜巻影響エリアは，原子炉建屋周辺，海水ポンプ室及び使用済燃料乾式貯蔵建屋が離れているため，それぞれをまず直径 188m，直径 44m 及び直径 60m の円形領域に包絡させ，さらにこれらの領域を包絡させた直径 300m の円形領域（面積 約 71,000m²）として設定した。

また，竜巻影響エリアを円形とするため，ハザード計算において竜巻の移動方向に対する依存性は生じない。



第 2.3.5-1 図 竜巻影響エリア

2.3.6 ハザード曲線の算定

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 以上となる確率を算定する。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。ポリヤ分布は次式で示される。【添付資料5 別紙2】

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

ここで、 N : 竜巻の年発生数

ν : 竜巻の年平均発生数

T : 年数

β は分布パラメータであり次式で示される。

$$\beta = (\sigma^2 - \nu) / \nu^2$$

ここで、 σ : 竜巻の年発生数の標準偏差

竜巻の年被災確率は十分小さいので、「竜巻影響評価ガイド」の解説3.3.2に例示されたWen & Chu⁽⁴⁾及びGarson et al.⁽⁵⁾⁽⁶⁾の近似式を用いると、評価対象施設が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 以上となる確率は次式により算出できる。

$$P_{V_0} = 1 - [1 + \beta \nu R(V_0)]^{-1/\beta} = 1 - [1 - \frac{1}{\beta} (\beta \nu R(V_0)) + \dots]$$

$$\approx \nu R(V_0) = \frac{\nu}{A_0} E[DA(V_0)] = pE[DA(V_0)]$$

ここで、

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

$$+ D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw + (\pi D_0^2 / 4) \int_{V_0}^\infty f(V) dV$$

p : 単位面積当たりの年被災率

E[] : 期待値

DA(V₀) : 1つの竜巻の風速が V₀ 以上となる面積

A₀ : 竜巻検討地域の面積

V : 風速

w : 被害幅

l : 被害長さ

f() : 確率密度分布

D₀ : 竜巻影響エリアの直径

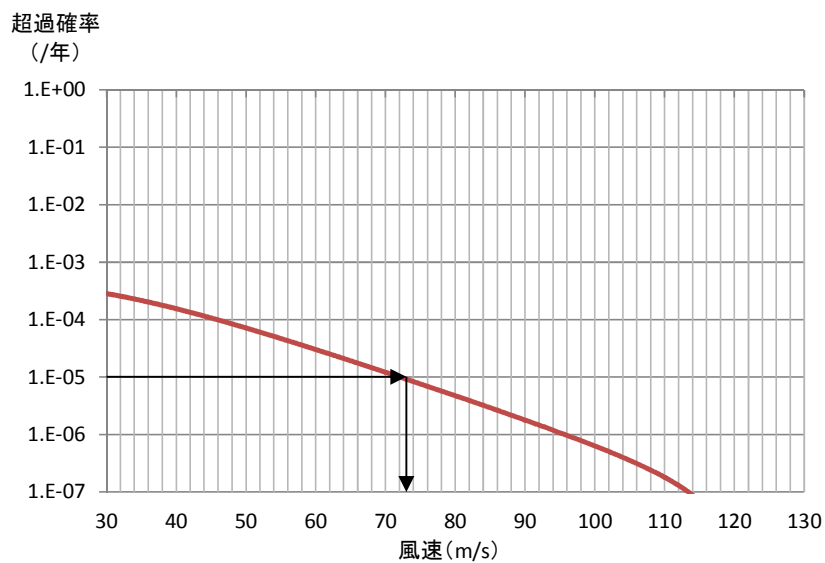
$$W(V_0) = \left(\frac{V_{\min}}{V_0} \right)^{1.6} w$$

: 被害幅のうち風速が V₀ を超える部分の幅

V_{min} : 被害域幅w 内の最小竜巻風速

竜巻検討地域全域（10km 幅）でのハザード曲線を第 2.3.6-1 図に示す。

年超過確率 10⁻⁵に相当する風速は 73m/s である。



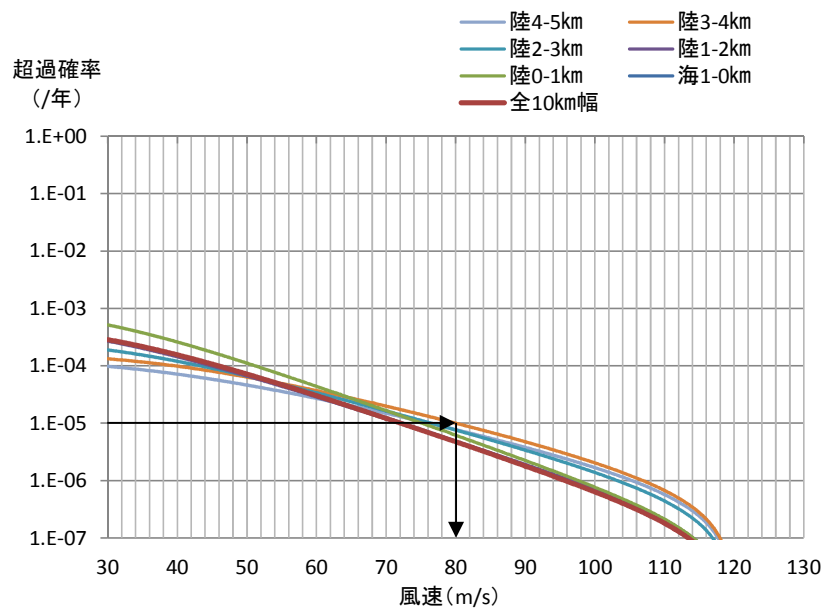
第 2.3.6-1 図 竜巻検討地域全域（10km 幅）でのハザード曲線

竜巻検討地域を1km幅毎に細分化した場合の評価条件及び先の10km幅でのケースも重ねたハザード曲線を、それぞれ第2.3.6-1表及び第2.3.6-2図に示す。なお、海側1km以遠の海上竜巻については全てFスケール不明であるため、ハザード曲線の算定は不可能である。

年超過確率 10^{-5} にて最も大きな風速を与える陸側3-4kmの場合、80m/sであった。

第2.3.6-1表 1km幅毎に細分化した場合の評価条件

発生数	発生地点と消滅地点を結ぶ直線が1km幅の領域に掛かる場合カウント
被害幅	カウントした竜巻の被害幅
被害長さ	カウントした竜巻が、1km幅の領域に掛かる長さ



第2.3.6-2図 1km幅毎に細分化した場合のハザード曲線

(10km幅でのハザード曲線も合わせて記載)

2.3.7 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

竜巻検討地域全域 (10km 幅) 及び 1km 幅毎のハザード曲線において, 年超過確率 10^{-5} での風速の最大値は 80m/s であり, これを最大風速 V_{B2} とする。

ハザード曲線による最大風速評価結果を, 第 2.3.7-1 表に示す。

第 2.3.7-1 表 ハザード曲線による最大風速評価結果

ハザード曲線の算定範囲	年超過確率 10^{-5} での最大風速
竜巻検討地域全域 (10km 幅)	73m/s
1km 幅毎の最大	80m/s (陸側 3-4km)

2.3.8 竜巻ハザードの不確かさの検討

竜巻検討地域は竜巻についての過去観測データは少なく、統計処理として必ずしも十分ではない可能性も考えられることから、竜巻ハザードの不確かさ要素について、以下の検討を実施した。

① 確率分布形選択に伴う不確かさ（認識論的不確かさ）

確率分布形選択に伴うパラメータ不確かさ

② データ量が少ないことに伴う不確かさ（認識論的不確かさ）

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かさ

③ データの不確かさ

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かさ

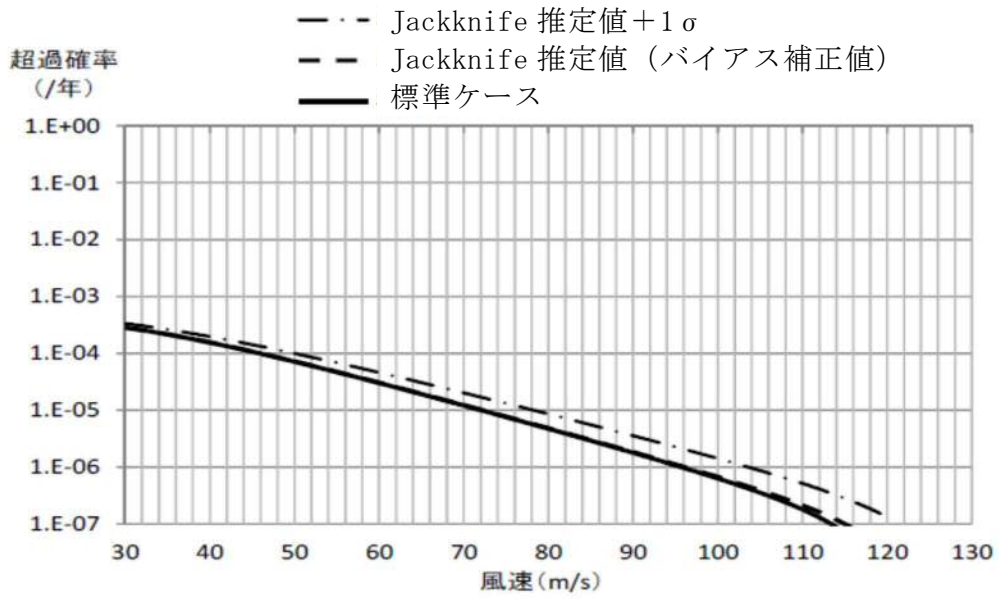
(1) 確率分布形選択に伴う不確かさ

竜巻ハザードの不確かさについて、確率分布形の選択による不確かさを表した第 2.3.8-1 図のハザード曲線によれば、標準ケースと Jackknife 推定値では、ほぼ曲線が重なり合っていることがわかる。また、標準ケースと Jackknife 推定値+1 σ においても、有意な差は認められない。

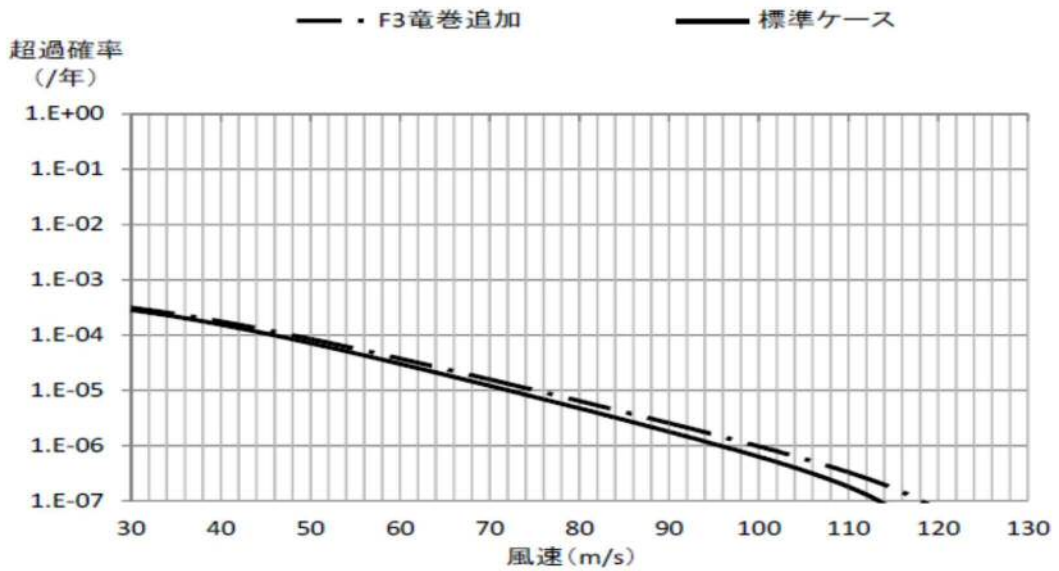
(2) データ量が少ないことに伴う不確かさ

データ量が少ないことに伴う不確かさとして、竜巻検討地域で、F 3 竜巻が 1 つ見落とされていたと仮定した場合のハザードへの影響を検討した。

これを基にハザードを推定したところ、第 2.3.8-2 図の示すとおりであり、年超過確率 10^{-5} に相当する風速は 76m/s となり、標準ケースと比較しても、ハザード曲線による最大風速への有意な差は認められない。



第 2.3.8-1 図 標準ケースと Jackknife 推定値ケース,
Jackknife 推定値+1 σ ケースのハザード算定結果の比較

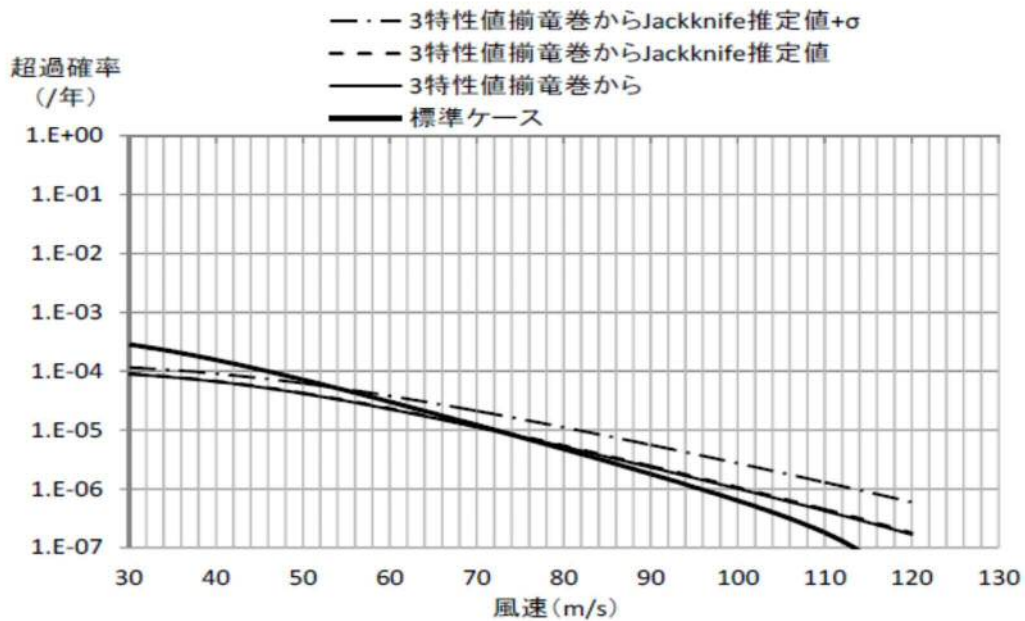


第 2.3.8-2 図 標準ケースと F 3 竜巻発生を仮定した場合の
ハザード算定結果の比較

(3) データの不確かさ

データの不確かさとして、疑似データを考慮した場合、Fスケールの小さな竜巻の割合が多くなるため、3種類の竜巻のパラメータ※が全て判明している161個の竜巻（以下「3特性値揃竜巻」という。）データのみを用いて同様の検討を実施した。疑似データを考慮した標準ケースと比較すると、Jackknife 推定幅は大きくなっているが、有意な差は認められない。

※：最大風速，被害幅及び被害長さ



第 2.3.8-3 図 標準ケース（疑似データ有）とバイアス補正無と Jackknife 推定値（バイアス補正值），Jackknife 推定値 + 1 σ のハザード算定結果の比較

以上のことから、竜巻ハザードに関する不確かさ要素の影響は小さく、ハザードへの影響はほとんどないことから、データの高い安定性を確認した。

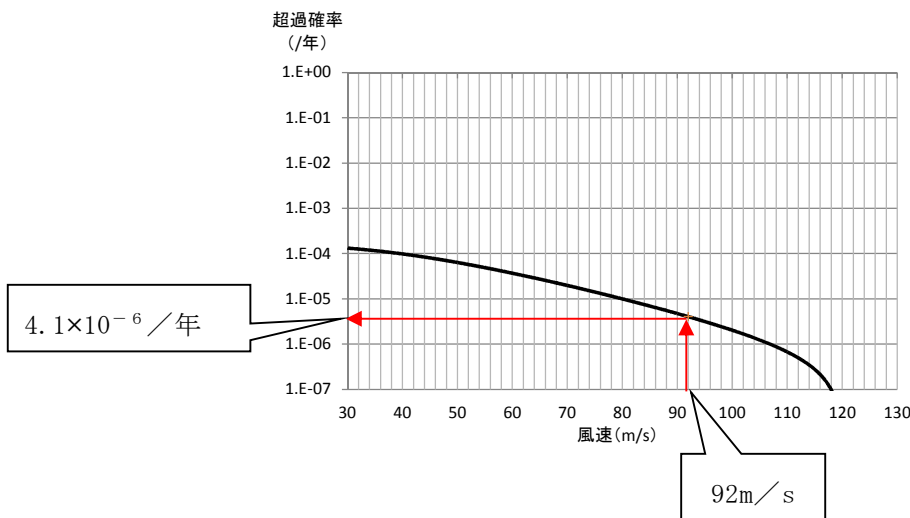
2.3.9 基準竜巻の最大風速 (V_B)

以上をもとに、基準竜巻の最大風速 V_B は V_{B1} と V_{B2} のうち大きな風速とすることから、東海第二発電所における基準竜巻の最大風速 V_B は、第 2.3.9-1 表に示すとおり、92m/s となる。

V_B の年超過確率は、第 2.3.9-1 図に示すとおり、 4.1×10^{-6} となる。

第 2.3.9-1 表 基準竜巻の最大風速

過去最大竜巻による 最大風速 V_{B1} (m/s)	ハザード曲線による 最大風速 V_{B2} (m/s)	基準竜巻の 最大風速 V_B (m/s)
92	80	92



第 2.3.9-1 図 基準竜巻の最大風速のハザード曲線

2.3.10 竜巻データの更新に関する対応

(1) 評価時点以降のデータ更新分について

上記の基準竜巻の検討には、検討実施時点での最新であった 1961 年 1 月から 2012 年 6 月までの竜巻データベースを用いているが、その後、気象庁により継続的にデータベースが更新されている^{*1}。本状況においても、以下の理

由より、最新データを参照した場合でも基準竜巻の最大風速は上記の評価結果を上回るものではなく、現時点での見直しは不要と判断している。

- ・2012年6月以降、現時点での V_{B1} の風速 92m/s を超える竜巻^{※2}が報告されていない。

- ・2012年6月以降、竜巻検討地域で観測された竜巻はF0もしくはF1相当のものが殆どであり、竜巻強度の分布はハザードを下げる方向に変化していると考えられるため、現時点での V_{B2} が更新されることはない。

※1：2017年3月末時点で、2016年3月までのデータ及び2016年4月以降の速報データが掲載されている。

(2) 将来の気候変動について

将来的な気候変動として予測される地球温暖化により竜巻の規模や発生数が増加する可能性も否定できない。

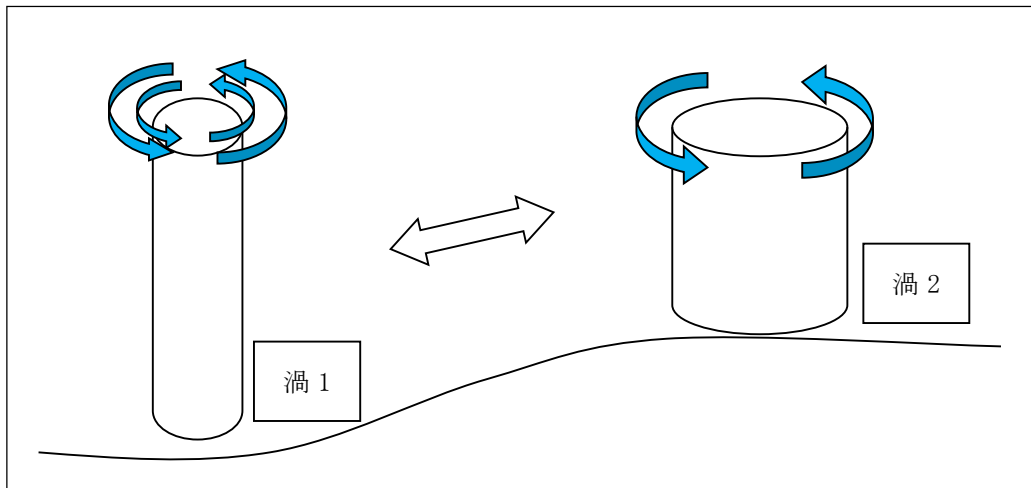
しかしながら、将来的な気候変動を完全に予測することは難しいため、最新のデータ、知見をもって気候変動の影響に注視し、竜巻検討地域や基準竜巻の最大風速は、必要に応じ見直しを実施していくものとする。

2.4 設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定

2.4.1 地形効果による竜巻風速への影響【添付資料 6】

地形効果が竜巻強度に及ぼす影響に関する知見として、地形の起伏による影響について既往の研究において示されている。

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、第 2.4.1-1 図に示すとお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と考えられる。

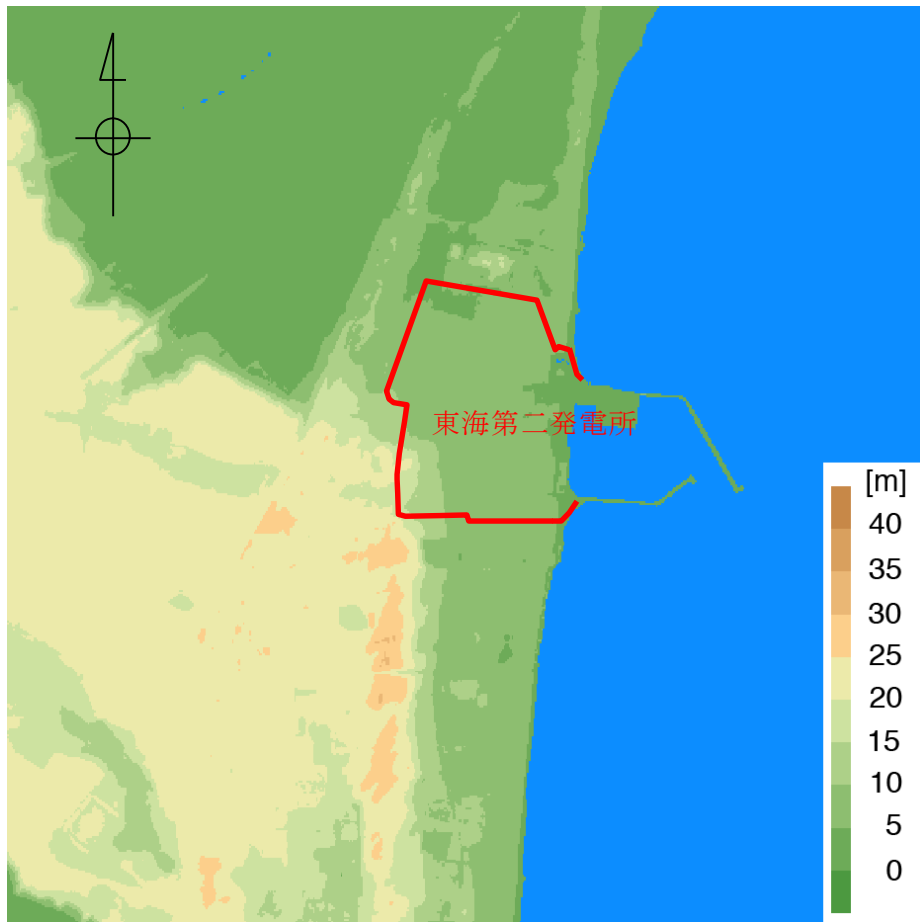


第 2.4.1-1 図 竜巻旋回流の地形影響に関する模式図

2.4.2 東海第二発電所敷地周辺における地形と竜巻風速への影響

東海第二発電所敷地周辺の地形を第 2.4.2-1 図に示す。敷地周辺は、最大でも標高 40 m 程度のなだらかな地形であり、竜巻渦の旋回強度に影響を及ぼすと考えられるマイクロスケール（数百 m）規模の起伏は認められないことから、地形効果による竜巻の増幅の可能性は低いと判断した。

なお、今後も地形増幅に関する新たな知見や情報（観測記録等も含む）の収集に取組み、必要な事項については適切に対応する。



第 2.4.2-1 図 東海第二発電所を中心とした東西 3km×南北 3km の地形標高
(国土地理院 5m メッシュ標高データに加筆)

2.4.3 設計竜巻の最大風速 (V_D)

設計竜巻の最大風速 V_D の設定においては、上述のとおり、東海第二発電所敷地周辺の地形効果の影響による竜巻の増幅を考慮する必要はないものと判断するが、現状では竜巻の観測数等のデータが十分とまでは言い切れず不確実性があることを考慮し、設計竜巻の最大風速 V_D は、基準竜巻の最大風速 92m/s を安全側に切り上げた 100m/s とする。

2.4.4 設計竜巻の特性値

設計竜巻の特性値は，原則として十分な信頼性を有した観測記録等に基づいて設定する必要があるが，現状では設定に足る十分な信頼性を有した観測記録等が無い場合，「竜巻影響評価ガイド」に示される方法に基づき，下記の5項目に従い設定する。その結果を第2.4.4-1表に示す。

- (1) 設計竜巻の移動速度 (V_T)

$$V_T = 0.15 \cdot V_D$$

V_D (m/s) : 設計竜巻の最大風速

- (2) 設計竜巻の最大接線風速 (V_{Rm})

$$V_{Rm} = V_D - V_T$$

V_D (m/s) : 設計竜巻の最大風速

V_T (m/s) : 設計竜巻の移動速度

- (3) 設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径 (R_m)

$$R_m = 30 \text{ (m)}$$

- (4) 設計竜巻の最大気圧低下量 (ΔP_{max})

$$\Delta P_{max} = \rho \cdot V_{Rm}^2$$

ρ : 空気密度 (1.22 (kg/m³))

V_{Rm} (m/s) : 設計竜巻の最大接線風速

- (5) 設計竜巻の最大気圧低下率 ($(dp/dt)_{max}$)

$$(dp/dt)_{max} = (V_T/R_m) \cdot \Delta P_{max}$$

V_T (m/s) : 設計竜巻の移動速度

R_m (m) : 設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径

第 2.4.4-1 表 設計竜巻の特性値

設計竜巻の 最大風速 V_D (m/s)	移動速度 V_T (m/s)	最大接線 風速 V_{Rm} (m/s)	最大接線 風速半径 R_m (m)	最大気圧 低下量 ΔP_{max} (hPa)	最大気圧 低下率 $(dp/dt)_{max}$ (hPa/s)
100	15	85	30	89	45

<参考文献>

- (1) 井上博登, 福西史郎, 鈴木哲夫 (2013) : 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド (案) 及び解説, 独立行政法人原子力安全基盤機構, JNES-RE-2013-9009.
- (2) 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>)
- (3) 東京工芸大学 (2011) : 平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究 (平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構
- (4) Wen. Y. K and Chu. S. L. (1973) : Tornado risks and design wind speed, Proceedings of American Society of Civil Engineering, Journal of the Structural Division 99, 2409-2421
- (5) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C. A. (1975) : Tornado risk evaluation using wind speed profiles, Journal of the Structural. Division, Proceedings of American Society of Civil Engineering, pp. 1167-1171
- (6) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C. A. (1975) : “Tornado Design Winds Based on Risk,” Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 101, No. 9, pp. 1883-1897

3 竜巻影響評価

3.1 概要

竜巻影響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) 東海第二発電所における設計飛来物の設定（調査含む）
- (3) 飛散防止対策
- (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の確認

3.2 評価対象施設

「1.2.2 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」を基に、以下のとおり設定する。

(1) 風圧力による荷重の設定

設計竜巻の水平方向の最大風速 V_D によって施設（屋根を含む）に作用する風圧力による荷重(W_w)は、「建築基準法施行令」, 「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説」及び「建設省告示第1454号（平成12年5月31日）」に準拠し、下式により算定する。

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

q : 設計用速度圧 ($= (1/2) \cdot \rho \cdot V_D^2$)

ρ : 空気密度

G : ガスト影響係数 ($= 1.0$)

C : 風力係数

(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)

A : 施設の受圧面積

なお、鉛直方向の風圧力については以下のとおりとする。

- ・ 建屋, 構築物については, 底部や屋根スラブについては, 鉛直方向の風圧力の影響を受けると考えられる。庇については, 評価対象施設には存在しないが, 屋根スラブについては, 鉛直方向の風圧力に対する健全性の評価を行う。
- ・ 設備については, 鉛直方向の風圧力に対して特に脆弱と考えられる部位は評価対象施設の中に存在しないことから, 鉛直方向の風圧力の考慮は行わない。

(2) 気圧差による荷重の設定

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荷重 (W_p) は、最大気圧低下量 (ΔP_{max}) に基づき設定する。

a. 建屋，構築物

建屋については、気圧差による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。

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

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，当該施設が損傷のおそれがある場合には，安全機能維持への影響について確認する。

b. 設備（系統，機器）

設備（系統，機器）についても，上記と同様に W_p を設定する。

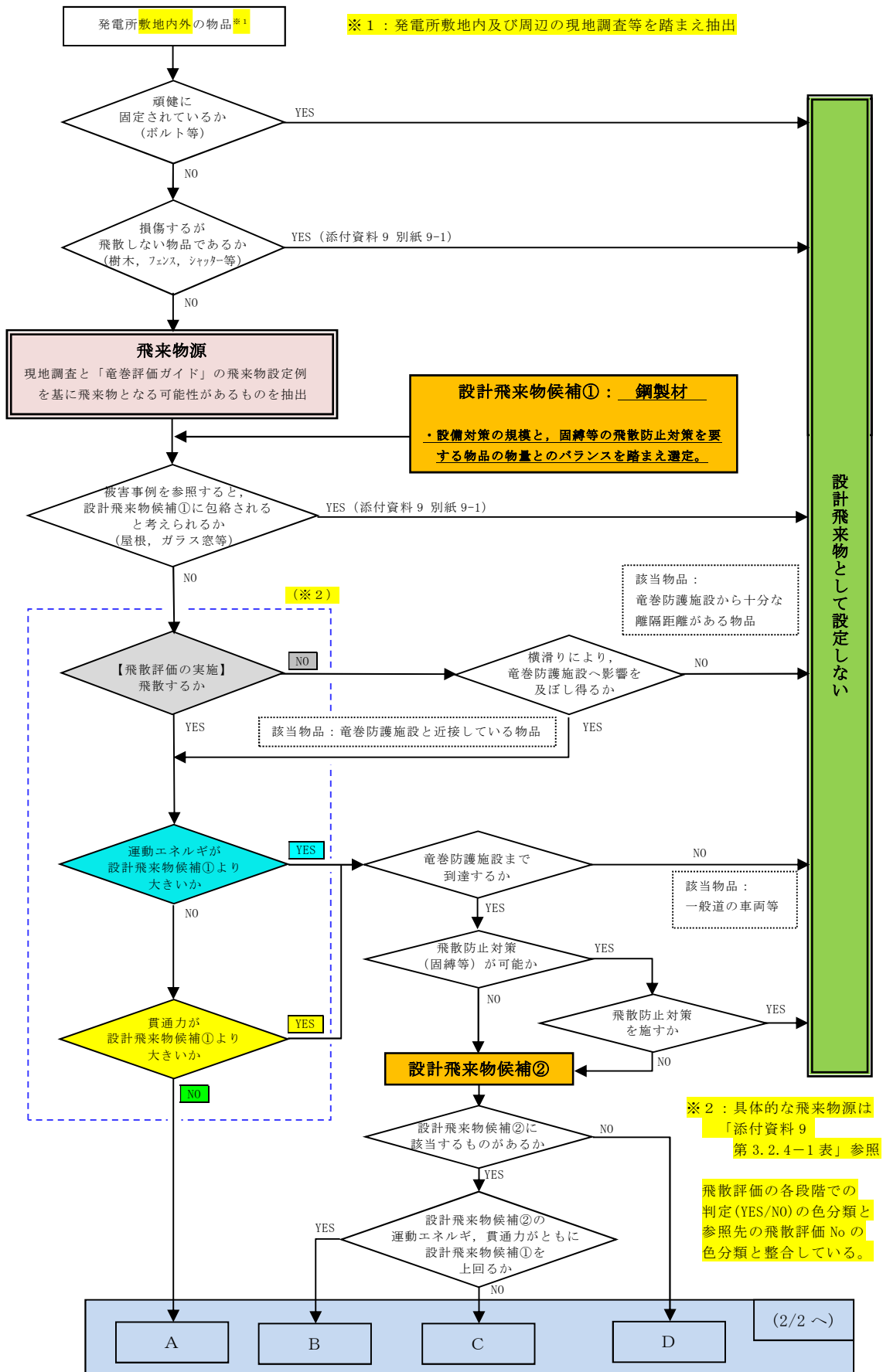
換気空調系のように外気と隔離されている区画の境界部等，気圧差による圧力影響を受ける設備について，気圧差により作用する応力が許容値以内であるか確認し，許容値を上回る場合には安全機能維持への影響について確認する。

(3) 設計飛来物による衝撃荷重の設定

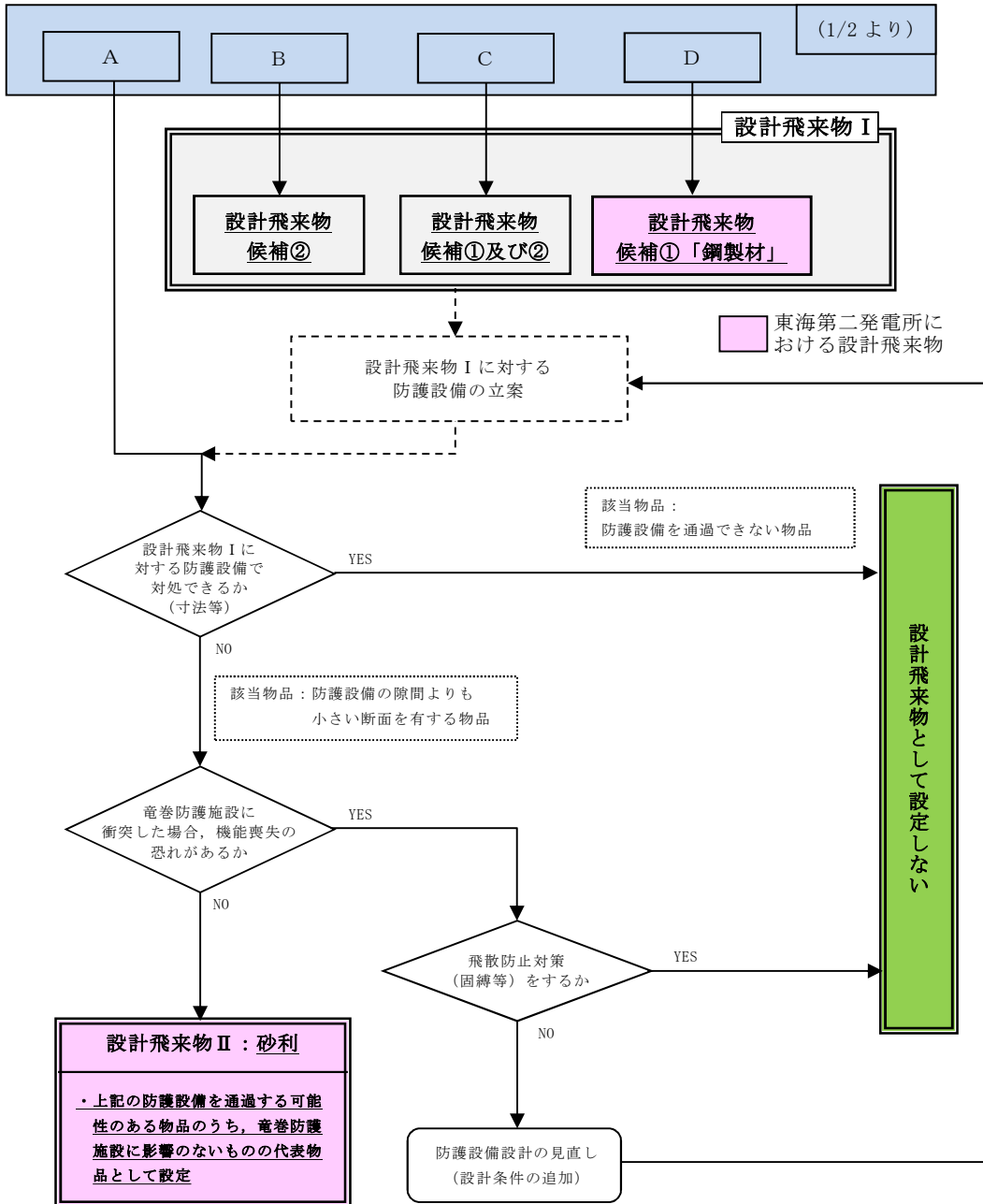
a. 東海第二発電所における設計飛来物の設定【添付資料 9】

東海第二発電所の竜巻影響評価における設計飛来物については，東海第二発電所における飛来物源の現地調査結果と，「竜巻影響評価ガイド」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て設定する。

第 3.3.1-1 図に東海第二発電所における設計飛来物の設定フロー、第 3.3.1-1 表に、東海第二発電所における設計飛来物を示す。



第 3.3.1-1 図 設計飛来物の設定フロー(1/2)



第 3.3.1-1 図 設計飛来物の設定フロー (2/2)

第 3.3.1-1 表 東海第二発電所における設計飛来物

飛来物の種類	砂利	鋼製材
サイズ (m)	長さ×幅×高さ 0.04×0.04×0.04	長さ×幅×高さ 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	0.18	135

(a) 評価に用いる設計竜巻の特性

評価に用いる設計竜巻の最大風速は 100m/s とする。

(第 2.4.4-2 表)

(b) 設計飛来物の設定

i) 現地調査

飛来物となり得る物品を確認するため、東海第二発電所の現地調査を実施した。調査範囲は、発電所の敷地のみならず、隣接する日本原子力研究開発機構の敷地や、東海第二発電所敷地近傍の墓地、宅地等も含んだ、原子炉建屋から半径 800m の範囲とした。後述の飛散評価の結果によれば、確認された物品の飛散距離は最大でも 400m 程度であることから、調査範囲は十分と考えられる。

ii) 設計飛来物となり得る飛来物源の抽出

現地調査で確認された物品の最大飛散距離は最大でも 400m 程度と評価されたことに加え、近隣施設内での現場調査による物品は東海第二発電所構内の物品に類似していた。したがって、東海第二発電所の設計飛来物の設定に際しては、東海第二発電所敷地内候補で認められた物品に「竜巻影響評価ガイド」の解説表 4.1 に例示された物品を加えたものを飛来物源として抽出した。

iii) 設計飛来物の設定

上記の飛来物源から、第 3.3.1-1 図のフローに従い、「竜巻影響評価ガイド」に例示されている鋼製材を設計飛来物として設定した。

さらに、鋼製材に対する防護対策として設置する防護ネットを通過し得る設計飛来物として、砂利を設定した。砂利のサイズはネットの網目のサイズを考慮して設定した。以降の設計飛来物とは、上記の鋼製材及び砂利の 2 つを示す。

(c) 設計飛来物以外の飛来物源に対する措置

i) 基本方針

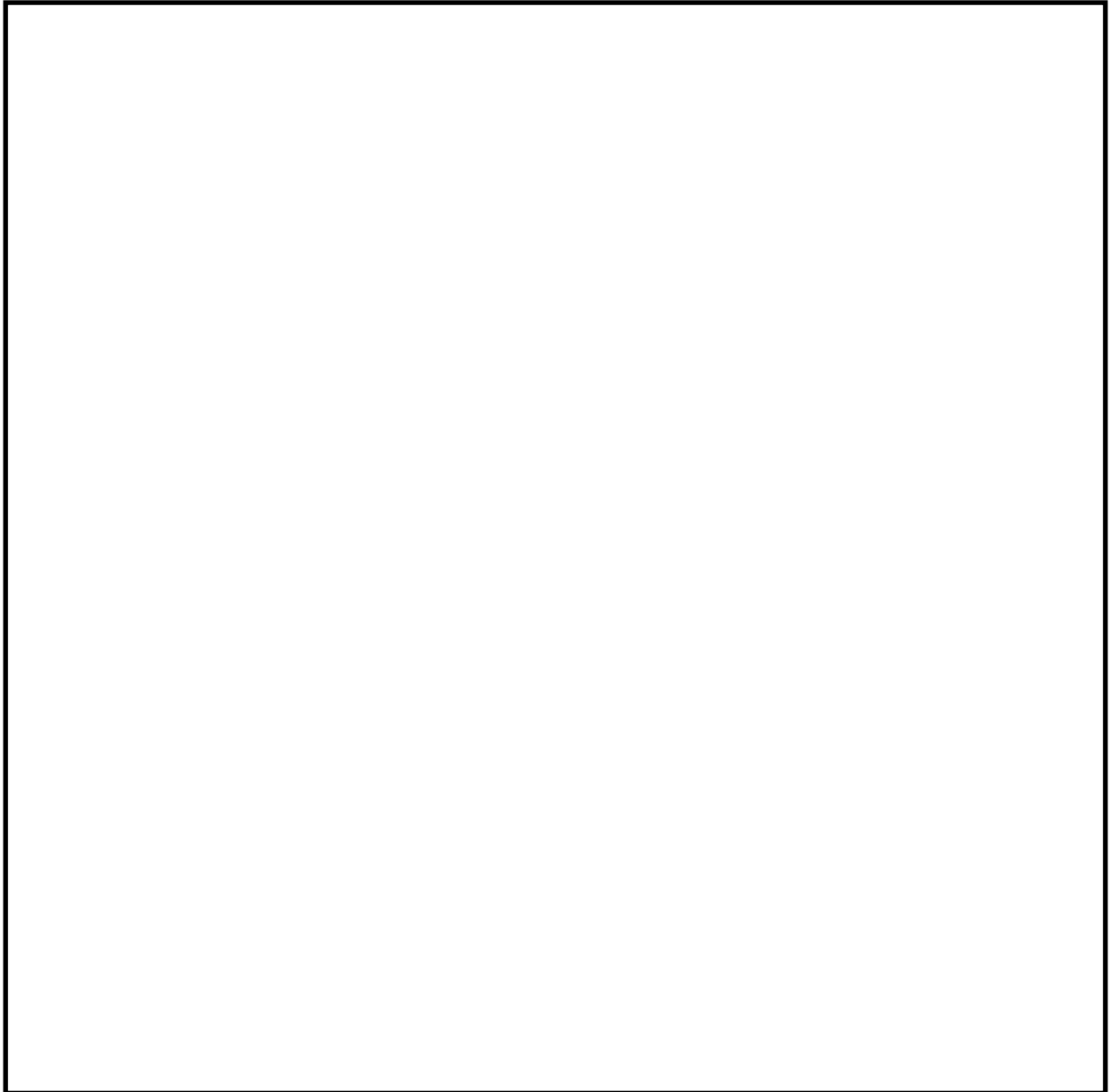
設計飛来物以外の飛来物源については、設計竜巻の最大風速 100 m/s における衝突時の運動エネルギー及び貫通力の大きさを、設計飛来物のうちこれらが最大となる鋼製材と比較し、鋼製材を上回る飛来物源（コンテナ等）については、飛散防止対策（固縛等）を施すか、竜巻防護施設等からの離隔及び頑健な建物内への移動等の運用により、設計飛来物による影響を上回らないものとする。

ii) 管理が困難な飛来物源の影響について

固縛等の管理が困難な飛来物源として、一般道を走行する車両及び近隣施設内の物品が想定されるが、上述のとおり、保守性を含めた解析によれば設計飛来物よりも影響の大きな飛来物源の飛散距離が最大 250m 程度であることを考慮すると、敷地外からの飛来物が到達する可能性を現実的に無視出来ないと考えられる防護対象施設は、使用済燃料乾式貯蔵建屋と、重大事故等対処設備の可搬型設備及び常設代替高圧電源装置が挙げられる。

使用済燃料乾式貯蔵建屋については、もっとも近い一般道である国道 245 号線とは十分な離隔を有しており、車両が衝突することは考え難い。また建屋の壁は十分な厚さのある鉄筋コンクリートであり、その他の飛来物の衝突荷重に対しては相当の耐力を有していることから、敷地外からの飛来物により建屋内の使用済燃料乾式貯蔵容器に悪影響を及ぼす可能性は低いと判断している。

また、重大事故等対処設備に関しては、設計基準事故対処設備を含めて分散配置することで飛来物に対する残存性を確保する設計としており、敷地外からの飛来物に対しても同様に残存性を期待できるもの



第 3.3.1-2 図 管理が困難な飛来物源の影響範囲の一例

と判断している。(第 3.3.1-2 図参照)

iii) 東海発電所廃止措置に伴い生じ得る飛来物源への対応

東海第二発電所に隣接する東海発電所においては廃止措置関連作業が実施されている。施設の解体作業等に関連してどのような飛来物源が生じ得るかを現時点で正確に特定することは困難であるが、以下のとおり東海第二発電所への悪影響は回避可能と判断している。

- ・飛来物源の現地調査においては、東海発電所の敷地も対象としており、資機材や設備の種類や形状に関しては、東海第二発電所の資機材等との大きな違いは無いことを確認している。従って、作業用資機材や取り外しが完了した物品については、固縛、離隔、収納等、一般の飛来物源と同様の措置が可能。
- ・取外し前の施設の据付状況についても、東海第二発電所の施設の状況と有意な差はないと考えられる。東海第二発電所の防護対象施設は風荷重に対し十分に余裕があることを参照すれば、これらが竜巻により基礎等から引き剥がされ、飛来物化することは考え難い。
- ・廃止措置特有の状況として考えられるケースとしては、解体、撤去の途中の状態が一定期間継続すると想定される場合（例：大規模設備や建屋壁面の解体）が考えられるが、このケースに対して、作業の計画段階及び実施段階で、適宜風荷重に対し脆弱な形状が生じていないかを確認し、想定される脱落片（飛来物）が設計飛来物を超える影響を有する恐れが認められた場合でも、そのような状況に至らない様な工法の工夫や、作業中であれば早急な除去や仮補強等の対応を行うことは可能であり、悪影響のある飛来物の発生を防止出来ない状況は生じないと考えられる。

b. 設計飛来物の速度の設定

設計竜巻による設計飛来物の最大水平速度 (MV_{Hmax}) 及び最大鉛直速度 (MV_{Vmax}) は、衝撃荷重による影響を保守的に評価するため、「竜巻影響評価ガイド」の解説表 4.1 に示されるものと同じ値とし、第 3.3.1-2 表のとおりとする。

ただし、「竜巻影響評価ガイド」に記載のない設計飛来物である砂利の速度については、文献⁽¹⁾⁽²⁾を参考にして、ランキン渦を仮定した風速場の中での速度を算出した。

第 3.3.1-2 表 東海第二発電所における設計飛来物の速度

飛来物の種類	砂利	鋼製材
サイズ (m)	長さ×幅×高さ 0.04×0.04×0.04	長さ×幅×高さ 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	0.18	135
最大水平速度 (m/s)	62	51
最大鉛直速度 (m/s)	42	34

c. 設計飛来物の衝撃荷重の設定

設計竜巻の最大風速 100m/s による設計飛来物の衝撃荷重は、砂利と比べ運動エネルギーが大きくなる鋼製材の衝突方向及び衝突面積を考慮し、鋼製材が評価対象施設に衝突した場合の影響が大きくなる衝突方向で算出する。

鋼製材の最大速度は第 3.3.1-2 表のとおりであり、静的な構造評価を実施する場合の衝撃荷重は、重量分布を均一な直方体として、Riera の方法⁽³⁾を踏まえた下式にて算出した。

$$W_w = F_{MAX} = MV^2 / L_{MIN}$$

M : 飛来物の質量

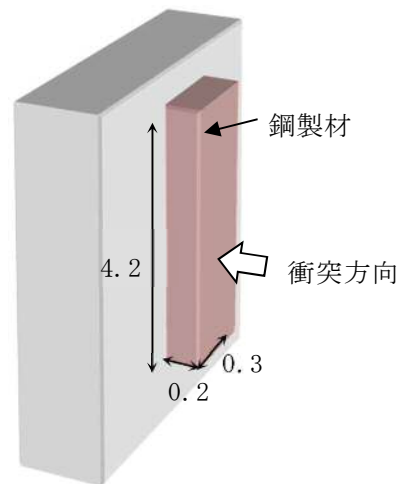
V : 飛来物の衝突速度

L_{MIN} : 飛来物の衝突方向長さ

この場合、衝撃荷重が最大となるのは第 3.3.1-3 図に示す向きの衝突

(荷重：1760kN)となるが，評価においては，対象部位の構造を考慮した上で衝突姿勢を決定し，上記式の考え方にに基づき，その都度衝撃荷重を算出する。

なお，有限要素法による飛来物衝突評価を行う場合には，衝撃荷重は計算の中で自動的に求められる。



第 3.3.1-3 図 最大衝撃荷重となる鋼製材衝突方向 (Riera の方法⁽³⁾)

d. 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，以下の式による。

$$W_{T1} = W_p$$

$$W_{T2} = W_w + 0.5W_p + W_M$$

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（自重，死荷重及び活荷重）及び運転時荷重を適切に組み合わせる。

(2) 竜巻以外の自然現象による荷重

竜巻は積乱雲や積雲に伴って発生する現象であり⁽⁴⁾，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。

a. 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。

b. 雪

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は，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，雪による荷重は十分小さく設計竜巻荷重に包絡される。

c. 雹

雹は積乱雲から降る直径 5mm 以上の氷の粒⁽⁵⁾であり，仮に直径 10cm 程度の大型の雹を想定した場合でも，その重量は約 0.5kg である。直径

10cm 程度の雹の終端速度は $59\text{m/s}^{(6)}$ 、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、雹の衝突荷重は設計竜巻荷重に包絡される。【添付資料 10】

d. 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。

(3) 設計基準事故時荷重

設計竜巻は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。

仮に、風速が低く発生頻度が高い竜巻と設計基準事故が同時に発生する場合、竜巻防護施設等のうち設計基準事故時荷重が生じる設備としては動的機器である残留熱除去系海水系ポンプ等が考えられるが、設計基準事故時においても残留熱除去系海水系ポンプ等の圧力、温度が変わらず、機械的荷重が変化することはないため、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 評価対象施設的设计方針

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を維持され、評価対象施設以外の設備については、竜巻及びその随件事象に対して機能維持する、若しくは、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設計とすることにより、竜巻防護施設の安全機能を損なうこ

とのない設計とする。

3.4.1 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部材厚（貫通限界厚さ及び裏面剥離限界厚さ）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 J E A G 4601-1987（日本電気協会）
- ・ 原子力エネルギー協会（N E I）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，貫通が発生する部材厚（貫通限界厚さ）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 J E A G 4601-1987（日本電気協会）

等

3.4.2 設計方針

(1) 屋外施設（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、防護ネットの設置等の防護対策を講じる方針とする。

なお、屋内に配置される施設のうち、外殻となる施設等の防護機能が期待できる施設の内部に配置される施設は、その防護機能により設計荷重に対して安全機能を損なうことのない方針とする。

a. ディーゼル発電機吸気フィルタ

ディーゼル発電機吸気フィルタは、設計飛来物が衝突により貫通することを考慮しても、閉塞することがなく、吸気機能が維持される設計とする。また、風圧力による荷重及び気圧差による荷重、ディーゼル発電機吸気フィルタに常時作用する荷重に対して、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。

b. ディーゼル発電機室ルーフトファン

ディーゼル発電機室ルーフトファンは、防護ネットの設置等の飛来物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。したがって、風圧力による荷重、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。

c. 中央制御室換気系冷凍機

中央制御室換気系冷凍機は、防護ネットの設置等の飛来物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。したがって、風圧力による荷重、気圧差による荷重、中央制御室換気系冷凍機に常時作用する荷重に対して、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。

d. 海水ポンプ室内設備

海水ポンプ室内設備は、防護ネットの設置等の飛来物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。したがって、風圧力による荷重、気圧差による荷重、海水ポンプ室内設備に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され安全機能を損なわれない設計とする。

e. 非常用ガス処理系排気配管

非常用ガス処理系排気配管は、設計飛来物が衝突により貫通することを考慮しても、閉塞することはなく、安全機能を損なうことのない設計とする。なお、非常用ガス処理系排気配管は開かれた構造物であることから気圧差荷重は作用しない。したがって、風圧力による荷重及び非常用ガス処理系排気配管に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され安全機能を損なわれない設計とする。

f. 排気筒

排気筒は、設計飛来物が衝突により貫通することを考慮しても、閉塞することはなく、安全機能を損なうことのない設計とする。なお、排気筒は開かれた構造物であることから気圧差荷重は作用しない。したがって、風圧力による荷重及び排気筒に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され安全機能を損なわれない設計とする。

また、排気筒の支持機能に対しては設計飛来物の衝突により部材が損傷した場合においても、構造健全性が維持され安全機能を損なわれない設計とする。

g. 原子炉建屋, タービン建屋, 使用済燃料乾式貯蔵建屋

原子炉建屋, タービン建屋, 使用済燃料乾式貯蔵建屋は、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対して、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れない設計とする。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れない設計とする。

h. 軽油貯蔵タンクタンク室

軽油貯蔵タンクタンク室は地下埋設されていることを考慮すると、風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重は作用しない。したがって、気圧差による荷重に対して、構造健全性が維持され、安全機能を損なわれない設計とする。

(2) 屋内の施設で外気と繋がっている施設

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、防護ネットの設置等の防護対策を講じる方針とする。

a. 中央制御室換気系隔離弁，ファン

中央制御室換気系隔離弁，ファンは、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。さらに、中央制御室換気系の取入口等の建屋開口部には防護ネットの設置等の飛来物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も作用しない。したがって、気圧差による荷重，中央制御室換気系に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され安全機能を損なわれない設計とする。

b. ディーゼル発電機室換気系ダクト

ディーゼル発電機室換気系ダクトは、建屋に内包されていることを考慮すると、風圧力による荷重及び設計飛来物による衝突荷重は作用しない。したがって、気圧差による荷重，ディーゼル発電機室換気系に常時作用する荷重に対して、構造健全性が維持され安全機能を損なわれない設計とする。

c. 原子炉建屋換気系隔離弁，ダクト

原子炉建屋換気系隔離弁，ダクトは，設計飛来物が衝突により貫通することを考慮しても，補修が可能な設計とすることにより，安全機能を損なわれない設計とする。また，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。したがって，気圧差による荷重，原子炉建屋換気系に常時作用する荷重に対して，構造健全性が維持され安全機能を損なわれない設計とする。

(3) 外殻となる施設（建屋，構築物）による防護機能が期待できない施設

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。

a. 中央制御室換気系ファン

中央制御室換気系ファンは，設計飛来物の衝突により，原子炉建屋附属棟4階壁面の貫通が発生することを考慮し，建屋壁面の補強等の防護対策を行うことにより，中央制御室換気系ファンの安全機能を損なわない設計とする。

b. 非常用電源盤

非常用電源盤は，設計飛来物の衝突により，原子炉建屋附属棟1階電気室扉の貫通が発生することを考慮し，電気室扉の補強等の防護対策を行うことにより，非常用電源盤の安全機能を損なわない設計とする。

c. 非常用ガス処理系設備，非常用ガス再循環系設備

非常用ガス処理系設備，非常用ガス再循環系設備は，竜巻襲来による気圧差により，原子炉建屋のブローアウトパネルが開放されるが，ブローアウトパネルの配置高さを考慮すると，設計飛来物は到達せず，設計飛来物による衝撃荷重は作用しない。したがって，設計竜巻荷重に対し，安全機能を損なわない。

d. 使用済燃料プール，燃料プール冷却浄化系真空破壊弁

使用済燃料プール，燃料プール冷却浄化系真空破壊弁は，竜巻襲来による気圧差により，原子炉建屋のブローアウトパネルが開放されるが，ブローアウトパネルの配置高さを考慮すると，設計飛来物は到達せず，設計飛来物による衝撃荷重は作用しない。したがって，設計竜巻荷重に対し，安全機能を損なわない。

e. 使用済燃料乾式貯蔵容器

使用済燃料乾式貯蔵容器は，使用済燃料乾式貯蔵建屋に内包されていることを考慮すると，風圧力による荷重及び気圧差荷重は作用しない。建屋上部からの開口から設計飛来物による衝突が考えられるため，衝撃荷重に対して，使用済燃料乾式貯蔵容器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) 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設

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。

a. サービス建屋

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突荷重に対して，倒壊により竜巻防護施設を内包する施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

b. 海水ポンプ室

海水ポンプ室は，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突荷重に対して，壁面の補強等を行うことで倒壊により，竜巻防護施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

c. 鋼製防護壁

鋼製防護壁は，風圧力による荷重，気圧差による荷重，設計飛来物に

よる衝突荷重に対して、倒壊により、竜巻防護施設を内包する施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

d. 排気筒

排気筒は、竜巻防護施設として構造健全性が維持される設計とすることにより、竜巻防護施設を内包する施設へ波及的影響を及ぼさない。

e. ディーゼル発電機排気消音器

ディーゼル発電機排気消音器は、設計飛来物が衝突により貫通して損傷することを考慮しても、ディーゼル発電機排気消音器が閉塞することがなく、ディーゼル発電機等の排気機能を損なわない設計とする。また、ディーゼル発電機排気消音器が風圧力による荷重及び気圧差による荷重に対して、構造健全性を維持し安全機能を損なわない設計とする。

f. ディーゼル発電機附属設備配管

ディーゼル発電機附属設備配管は、設計飛来物が衝突により貫通して損傷することを考慮しても、ディーゼル発電機附属設備配管が閉塞することがなく、ディーゼル発電機の排気機能等を損なわない設計とする。また、ディーゼル発電機附属設備配管が風圧力による荷重、気圧差による荷重、ディーゼル発電機附属設備配管に常時作用する荷重に対して、構造健全性を維持し安全機能を損なわない設計とする。

g. 海水ポンプ室内設備附属配管（放出側）

海水ポンプ室内設備附属配管（放出側）は、設計飛来物が衝突により貫通して損傷することを考慮しても、海水ポンプ室内設備附属配管（放出側）が閉塞することがなく、海水ポンプ室内設備の機能等を損なわない設計とする。また、海水ポンプ室内設備附属配管（放出側）が風圧力による荷重、気圧差による荷重、海水ポンプ室内設備附属配管（放出側）に常時作用する荷重に対して、構造健全性を維持し安全機能を損な

わなない設計とする。

3.5 竜巻随件事象に対する評価

竜巻随件事象として、過去の竜巻被害事例及び東海第二発電所の施設の配置から想定される以下の事象を抽出し、竜巻防護施設の安全機能を損なうことのないことを確認した。【添付資料 11】

(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、竜巻防護施設を設置している区画の開口部には防護ネット設置等の飛来物防護対策を行うことを考慮すると設計飛来物が到達することはない。仮に、設計飛来物が到達する場合でも、飛来物衝突位置となる開口部付近に、原子炉施設の安全機能を損なう可能性を有する発火性又は引火性物質を内包する機器が配置されていないことから、建屋内の竜巻防護施設の安全機能を損なうことはないことを確認している。

建屋外については、設計竜巻による発電所敷地内の危険物タンクの火災があり、外部火災評価における発電所敷地内の危険物タンクの火災影響評価と同様であり、竜巻防護施設の安全機能を損なうことのないことを確認している。なお、建屋外の火災については、竜巻通過後、速やかに消火活動を行う運用により対応する。

以上により、竜巻による火災により竜巻防護施設の安全機能を損なうことはない。

(2) 溢水

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、竜巻防護施設を設置している区画の開口部には防護ネット設置等の飛来物防護対策を行うことを考慮すると設計飛来物が到達することはない。仮に、設計飛来物が到達する場合でも、飛来物衝突位置となる開口部付近に、原子炉施設の安全機能を損なう可能性を有する溢水源が配置されていないことから、建屋内の竜巻防護施設の安全機能を損なうことはないことを確認している。

建屋外については、溢水評価における屋外タンクの評価に包絡されるため、竜巻防護施設の安全機能を損なうことはないことを確認している。

以上により、竜巻による溢水により竜巻防護施設の安全機能を損なうことはない。

(3) 外部電源喪失

設計竜巻と同時に発生する雷等により外部電源が喪失した場合でも、非常用ディーゼル発電機は原子炉建屋内に収納しており、外殻機能が期待できることから、設計竜巻による風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物による衝突荷重による機関への影響はないため、竜巻による外部電源喪失により、竜巻防護施設の安全機能を損なうことはない。

なお、非常用ディーゼル発電機の附属設備について、安全機能を損なうことがないことを以下のとおり確認している。

- ・吸排気については外気と繋がっているが、竜巻襲来時の短時間での圧力差による影響はない。
- ・排気消音器出口に風圧力による荷重が作用して消音器内に大気が逆流した場合において、排気が阻害され系統内が閉塞気味になり、排気系統内が閉塞気味になり、排気ガス温度が徐々に上昇し、許容限界温度（通常運転時の約 420℃を大幅に超える温度）となり出力制限となる

ことが予想されるが、竜巻は長期間停滞することなく数秒～10 数秒のオーダーで通過するため、この程度であれば排気ガス温度の急激な上昇はなくディーゼル発電機運転に支障をきたすことはない。

<参考文献>

- (1) 東京工芸大学 (2011) : 平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究 (平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構
- (2) E. Simiu and M. Cordes, NBSIR76-1050. Tornado-Borne Missile Speeds, 1976
- (3) J.D. Riera, "A Critical Reappraisal of Nuclear Power Plant safety against Accidental Aircraft Impact", Nuclear Engineering and Design 57, (1980)
- (4) 雷雨とメソ気象 大野久雄, 東京堂出版
- (5) 気象庁ホームページ
(http://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/yougo_hp/kousui.html)
- (6) 一般気象学 小倉義光, 東京大学出版会

添付資料 目次

1. 竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出について
2. 耐震Sクラス施設について
3. 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出について
4. 竜巻検討地域の設定について
5. 竜巻最大風速のハザード計算について
 - 別紙 5-1 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
 - 別紙 5-2 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について
6. 地形効果による竜巻の増幅の可能性について
7. 竜巻影響評価の概要及び保守性について
8. 竜巻影響評価及び竜巻防護対策の概要
 - 別紙 8-1 評価対象施設の設計荷重について
 - 別紙 8-2 竜巻防護対策のうち飛散防止対策の概要について
9. 設計飛来物の設定について
 - 別紙 9-1 分解され小型軽量となる物品及び倒壊するが飛来物とならない物品について
 - 別紙 9-2 空力パラメータについて
10. 竜巻時に発生する雹の影響について
11. 竜巻随件事象の抽出について

竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出について

1. 抽出方針

東海第二発電所における竜巻防護施設から、以下の手順により、評価対象施設を抽出した。

Step1: 竜巻防護施設として抽出された設備の設置場所を確認し、竜巻襲来時に風圧、気圧差及び設計飛来物衝突の影響を受ける屋外施設（当該施設を内包する施設含む）を評価対象とする。

Step2: 屋内施設であるが外気と繋がっているため、竜巻襲来時に気圧差の影響を受ける施設を評価対象とする。

Step3: 外殻となる（竜巻防護施設を内包する）施設（建屋、構築物）による防護機能が期待できない施設（の区画）の内部に配置されているため、竜巻襲来時に風圧、気圧差及び設計飛来物衝突の影響を受ける施設を評価対象とする。

なお、外殻による防護機能に期待できるかは、外殻となる施設（建屋、構築物）の竜巻荷重に対する構造健全性の確認結果により、評価する。

2. 抽出結果

2.1 竜巻防護施設を内包する施設

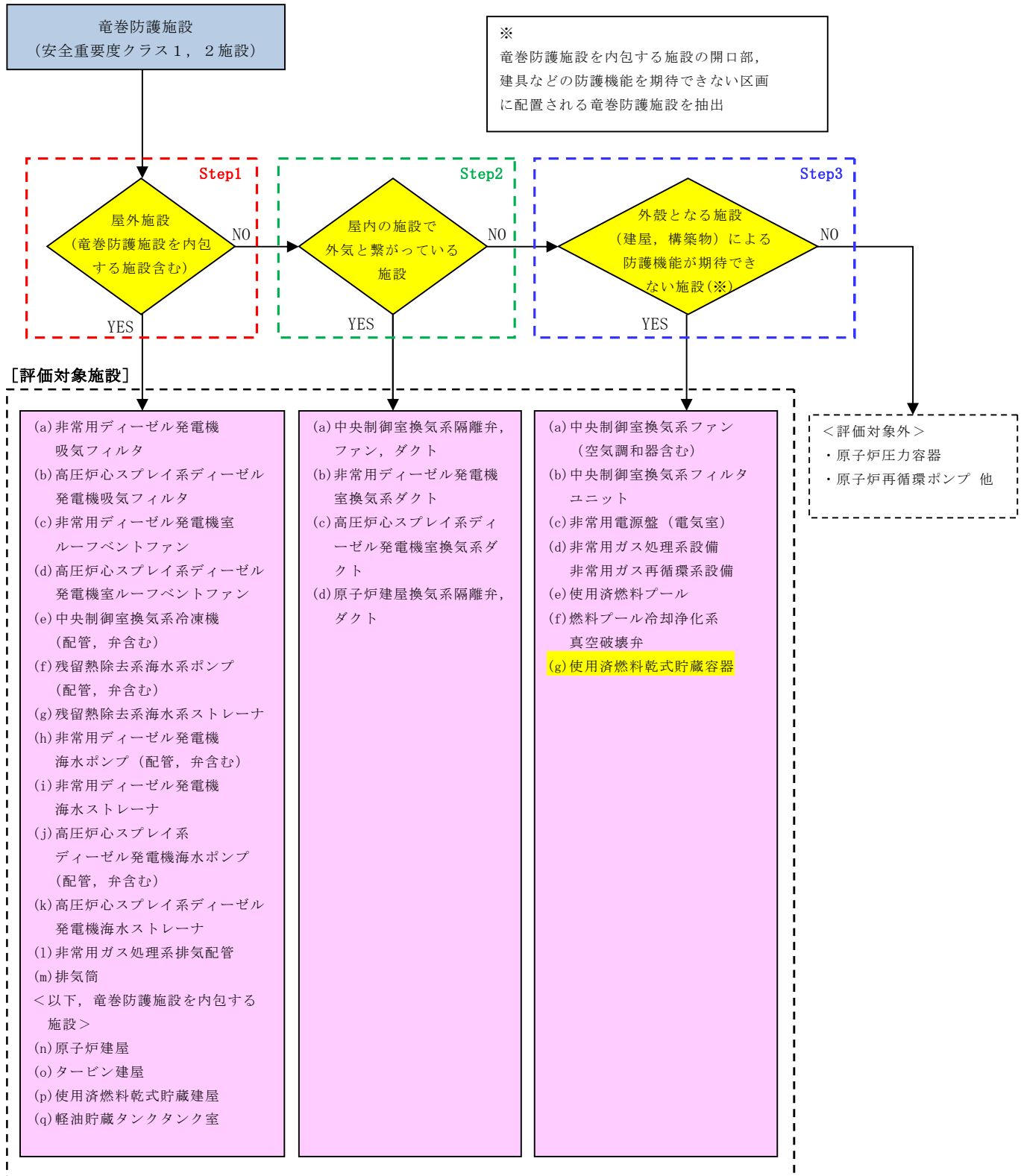
竜巻防護施設を内包する施設を以下のとおり抽出した。

- (1) 原子炉建屋（原子炉圧力容器，原子炉再循環ポンプ等を内包）
- (2) タービン建屋（気体廃棄物処理系隔離弁等を内包）
- (3) 使用済燃料乾式貯蔵建屋（使用済燃料乾式貯蔵容器を内包）
- (4) 軽油貯蔵タンクタンク室（軽油貯蔵タンクを内包）

2.2 竜巻防護施設

第 2.2-1 図に，竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出フローを示し，その結果を第 2.2-1 表に示す。

なお，安全重要度クラス 3 に属する施設については，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，必要によりプラントを停止し，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設計とすることにより，安全機能を損なわないことから評価対象から除外する。確認結果を第 2.2-2 表に示す。



第 2.2-1 図 竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出フロー

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（1/16）

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		抽出結果	
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設 (竜巻防護施設を内包する施設含む)	屋内の施設 で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物)	外殻防護機能を期待できない	評価対象	評価対象施設名称
PS-1	その損傷又は故障により発生する事象によって, (a) 炉心の著しい損傷又は (b) 燃料の大量の破損を引き起こすおそれのある構築物, 系統及び機器	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 (計装等の小口径配管・機器は除く。)	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉圧力容器 原子炉再循環ポンプ 配管, 弁 隔離弁 制御棒駆動機構ハウジング 中性子束計装管ハウジング 	×	×	原子炉建屋	×	×	-
		2) 過剰反応度の印加防止機能	制御棒カップリング	<ul style="list-style-type: none"> 制御棒カップリング 制御棒駆動機構カップリング 	×	×	原子炉建屋	×	×	-
		3) 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 (ただし, 燃料を除く。)	<ul style="list-style-type: none"> 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 燃料支持金具 制御棒案内管 制御棒駆動機構ハウジング 燃料集合体の下記部分 〔上部タイプレート〕 〔下部タイプレート〕 燃料集合体 (スペーサ) 	×	×	原子炉建屋	×	×	-

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（2/16）

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		抽出結果	
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設 (竜巻防護施設を内包する施設含む)	屋内の施設 で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物)	外殻防護機能を期待できない	評価対象	評価対象施設名称
MS-1	1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し, 残留熱を除去し, 原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し, 敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物, 系統及び機器	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 (制御棒及び制御棒駆動系 (スクラム機能))	<ul style="list-style-type: none"> 制御棒 制御棒案内管 制御棒駆動機構 	×	×	原子炉建屋	×	×	-
		2) 未臨界維持機能	原子炉停止系 (制御棒による系, ほう酸水注入系)	<ul style="list-style-type: none"> 制御棒 制御棒カップリング 制御棒駆動機構カップリング ほう酸水注入系 (ほう酸水注入ポンプ, 注入弁, タンク出口弁, ほう酸水貯蔵タンク, ポンプ吸込配管及び弁, 注入配管及び弁) 	×	×	原子炉建屋	×	×	-
		3) 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)	<ul style="list-style-type: none"> 逃がし安全弁 (安全弁開機能) 	×	×	原子炉建屋	×	×	-

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（3/16）

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		抽出結果	
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設 (竜巻防護施設を内包する施設含む)	屋内の施設 で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物)	外殻防護機能を期待できない	評価対象	評価対象施設名称
MS-1	1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し, 残留熱を除去し, 原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し, 敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物, 系統及び機器	4) 原子炉停止後の除熱機能	残留熱を除去する系統 (残留熱除去系 (原子炉停止時冷却モード), 原子炉隔離時冷却系, 高圧炉心スプレイ系, 逃がし安全弁, (手動逃がし機能), 自動減圧系 (手動逃がし機能))	・残留熱除去系 (ポンプ, 熱交換器, 原子炉停止時冷却モードのルートとなる配管, 弁)	×	×	原子炉建屋	×	×	—
				・原子炉隔離時冷却系 (ポンプ, サプレッション・プール, タービン, サプレッション・プールから注水先までの配管, 弁)	×	×	原子炉建屋	×	×	—
				・高圧炉心スプレイ系 (ポンプ, サプレッション・プール, サプレッション・プールからスプレイ先までの配管, 弁, スプレイヘッド)	×	×	原子炉建屋	×	×	—
				・逃がし安全弁 (手動逃がし機能)	×	×	原子炉建屋	×	×	—
				・自動減圧系 (手動逃がし機能)	×	×	原子炉建屋	×	×	—

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（4/16）

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		抽出結果	
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設 (竜巻防護施設を内包する施設含む)	屋内の施設 で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物)	外殻防護機能を期待できない	評価対象	評価対象施設名称
MS-1	1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し, 残留熱を除去し, 原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し, 敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物, 系統及び機器	5) 炉心冷却機能	非常用炉心冷却系 (低圧炉心スプレィ系, 低圧注水系, 高圧炉心スプレィ系, 自動減圧系)	・低圧炉心スプレィ系 (ポンプ, サプレッション・プール, サプレッション・プールからスプレィ先までの配管, 弁, スプレィヘッド)	×	×	原子炉建屋	×	×	—
				・残留熱除去系 (低圧注水モード) (ポンプ, サプレッション・プール, サプレッション・プールから注水先までの配管, 弁 (熱交換器パイパスライン含む), 注水ヘッド)	×	×	原子炉建屋	×	×	—
				・高圧炉心スプレィ系 (ポンプ, サプレッション・プール, サプレッション・プールからスプレィ先までの配管, 弁, スプレィヘッド)	×	×	原子炉建屋	×	×	—
				・自動減圧系 (逃がし安全弁)	×	×	原子炉建屋	×	×	—

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（5/16）

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		抽出結果	
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設 (竜巻防護施設を内包する施設含む)	屋内の施設 で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物)	外殻防護機能を期待できない	評価対象	評価対象施設名称
MS-1	1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し, 残留熱を除去し, 原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し, 敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物, 系統及び機器	6) 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	原子炉格納容器, 原子炉格納容器隔離弁, 原子炉格納容器スプレイ冷却系, 原子炉建屋, 非常用ガス処理系, 非常用再循環ガス処理系, 可燃性ガス濃度制御系	・格納容器 (格納容器本体, 貫通部, 所員用エアロック, 機器搬入ハッチ)	×	×	原子炉建屋	×	×	—
				・原子炉建屋原子炉棟	○	×	—	—	○	・原子炉建屋
				・格納容器隔離弁及び格納容器バウンダリ配管	×	×	原子炉建屋	×	×	—
				・主蒸気流量制限器	×	×	原子炉建屋	×	×	—
				・残留熱除去系 (格納容器スプレイ冷却モード) (ポンプ, 熱交換器, サプレッション・プール, サプレッション・プールからスプレイ先 (ドライウエル及びサブプレッション・プール気相部) までの配管, 弁, スプレイヘッダ (ドライウエル及びサブプレッション・プール))	×	×	原子炉建屋	×	×	—

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（6/16）

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		抽出結果	
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設 (竜巻防護施設を内包する施設含む)	屋内の施設で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物)	外殻防護機能を期待できない	評価対象	評価対象施設名称
MS-1	1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し, 残留熱を除去し, 原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し, 敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物, 系統及び機器	6) 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	原子炉格納容器, 原子炉格納容器隔離弁, 原子炉格納容器スプレイ冷却系, 原子炉建屋, 非常用ガス処理系, 非常用再循環ガス処理系, 可燃性ガス濃度制御系	・原子炉建屋ガス処理系 (乾燥装置, 排風機, フィルタ装置, 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)	×	×	原子炉建屋	×	×	—
					○	×	—	—	○	・非常用ガス処理系排気配管
					×	○	原子炉建屋	×	○	・原子炉建屋換気系隔離弁, ダクト
					×	×	原子炉建屋	○	○	・非常用ガス処理系設備 ・非常用ガス再循環系設備

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（7/16）

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		抽出結果	
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設 (竜巻防護施設を内包する施設含む)	屋内の施設 で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物)	外殻防護機能を期待できない	評価対象	評価対象施設名称
MS-1	1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し, 残留熱を除去し, 原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し, 敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物, 系統及び機器	6) 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	原子炉格納容器, 原子炉格納容器隔離弁, 原子炉格納容器スプレイ冷却系, 原子炉建屋, 非常用ガス処理系, 非常用再循環ガス処理系, 可燃性ガス濃度制御系	・可燃性ガス濃度制御系 (再結合装置, 格納容器から再結合装置までの配管, 弁, 再結合装置から格納容器までの配管, 弁)	×	×	原子炉建屋	×	×	—
				・遮へい設備 (原子炉遮へい壁, 一次遮へい壁, 二次遮へい壁)	×	×	原子炉建屋	×	×	—
	2) 安全上必須なその他の構築物, 系統及び機器	1) 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	・原子炉緊急停止の安全保護回路	×	×	原子炉建屋	×	×	—
				・非常用炉心冷却系作動の安全保護回路 ・原子炉格納容器隔離の安全保護回路 ・原子炉建屋ガス処理系作動の安全保護回路 ・主蒸気隔離の安全保護回路	×	×	原子炉建屋	×	×	—

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（8/16）

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		抽出結果	
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設 (竜巻防護施設を内包する施設含む)	屋内の施設 で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物)	外殻防護機能を期待できない	評価対象	評価対象施設名称
MS-1	2)安全上必要なその他の構築物, 系統及び機器	2)安全上特に重要な関連機能	非常用所内電源系, 制御室及びその遮へい・非常用換気空調系, 非常用補機冷却水系, 直流電源系 (いずれも, MS-1関連のもの)	・非常用所内電源系 (ディーゼル機関, 発電機, 発電機から非常用負荷までの配電設備及び電路)	×	×	原子炉建屋	×	×	—
							軽油貯蔵タンクタンク室	×	×	—
					○	×	—	—	○	・非常用ディーゼル発電機 吸気フィルタ ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機 吸気フィルタ ・非常用ディーゼル発電機室 ルーフバントファン ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室 ルーフバントファン

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（9/16）

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		抽出結果	
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設 (竜巻防護施設を内包する施設含む)	屋内の施設 で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物)	外殻防護機能を期待できない	評価対象	評価対象施設名称
MS-1	2)安全上必要なその他の構築物, 系統及び機器	2)安全上特に重要な関連機能	非常用所内電源系, 制御室及びその遮へい・非常用換気空調系, 非常用補機冷却水系, 直流電源系 (いずれも, MS-1関連のもの)	・非常用所内電源系 (ディーゼル機関, 発電機, 発電機から非常用負荷までの配電設備及び電路)	×	○	原子炉建屋	×	○	・非常用ディーゼル発電機室換気系ダクト ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室換気系ダクト
				・中央制御室及び中央制御室遮へい	○	×	-	-	○※1	・原子炉建屋
				・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) (非常用再循環送風機, 非常用再循環フィルタ装置, 空調ユニット, 送風機, 排風機, ダクト及びダンパ)	×	×	原子炉建屋	×	×	-
					○	×	-	-	○	・中央制御室換気系冷凍機 (配管, 弁含む)
					×	○	原子炉建屋	×	○	・中央制御室換気系隔離弁, ファン, ダクト
					×	×	原子炉建屋	○	○	・中央制御室換気系ファン ・中央制御室換気系フィルタユニット

※1 : 原子炉建屋としての評価に包絡される。

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（10/16）

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		抽出結果		
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設 (竜巻防護施設を内包する施設含む)	屋内の施設 で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物)	外殻防護機能を期待できない	評価対象	評価対象施設名称	
MS-1	2)安全上必要なその他の構築物, 系統及び機器	2)安全上特に重要な関連機能	非常用所内電源系, 制御室及びその遮へい・非常用換気空調系, 非常用補機冷却水系, 直流電源系 (いずれも, MS-1関連のもの)	・残留熱除去系海水系 (ポンプ, 熱交換器, 配管, 弁, ストレーナ (MS-1関連))	×	×	原子炉建屋	×	×	—	
					○	×	—	—	○	・残留熱除去系海水系ポンプ (配管, 弁含む) ・残留熱除去系海水系ストレーナ	
					×	×	原子炉建屋	×	×	×	・取水路 (屋外トレンチ含む)
				・ディーゼル発電機海水系 (ポンプ, 配管, 弁, ストレーナ)	×	×	原子炉建屋	×	×	×	—
				○	×	—	—	○	・非常用ディーゼル発電機海水ポンプ (配管, 弁含む) ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水ポンプ (配管, 弁含む)		

※2 : 竜巻の影響により取水路が閉塞することは考え難いため, 評価対象としない。

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（11/16）

○：Yes ×：No -：該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		抽出結果		
	定義	機能	構築物，系統又は機器	該当する電気，機械装置のうち主な施設	屋外施設（竜巻防護施設を内包する施設含む）	屋内の施設で外気と繋がっている施設	外殻となる施設（建屋，構築物）	外殻防護機能を期待できない	評価対象	評価対象施設名称	
MS-1	2)安全上必要なその他の構築物，系統及び機器	2)安全上特に重要な関連機能	非常用所内電源系，制御室及びその遮へい・非常用換気空調系，非常用補機冷却水系，直流電源系（いずれも，MS-1関連のもの）	・ディーゼル発電機海水系（ポンプ，配管，弁，ストレーナ） (続き)	○	×	-	-		・非常用ディーゼル発電機海水ストレーナ ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水ストレーナ	
									×	×	・取水路（屋外トレンチ含む）
				・直流電源系（蓄電池，蓄電池から非常用負荷までの配電設備及び電路（MS-1関連））	×	×	原子炉建屋	×	×	-	
				・計測制御電源系（蓄電池から非常用計測制御装置までの配電設備及び電路（MS-1関連））	×	×	原子炉建屋	×	×	・非常用電源盤（電気室）	

※2：竜巻の影響により取水路が閉塞することは考え難いため，評価対象としない。

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（12/16）

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		抽出結果	
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設 (竜巻防護施設を内包する施設含む)	屋内の施設 で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物)	外殻防護機能を期待できない	評価対象	評価対象施設名称
PS-2	1) その損傷又は故障により発生する事象によって、炉心の著しい損傷又は燃料の大量の破損を直ちに引き起こすおそれはないが、敷地外への過度の放射性物質の放出のおそれのある構築物, 系統及び機器	1) 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。）	主蒸気系, 原子炉冷却材浄化系（いずれも、格納容器隔離弁の外側のみ）	• 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）	×	×	原子炉建屋	×	×	—
				• 主蒸気系	×	×	原子炉建屋 タービン建屋	×	×	—
				• 原子炉隔離時冷却系タービン蒸気供給ライン（原子炉冷却材圧力バウンダリから外れる部分であって外側隔離弁下流からタービン止め弁まで）	×	×	原子炉建屋	×	×	—
		2) 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	放射性廃棄物処理施設（放射能インベントリの大きいもの）、使用済燃料プール（使用済燃料貯蔵ラックを含む。）	• 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）	×	×	原子炉建屋	×	×	—
				• 使用済燃料プール（使用済燃料貯蔵ラックを含む）	×	×	原子炉建屋	○	○	• 使用済燃料プール
				• 新燃料貯蔵庫（臨界防止する機能）（新燃料貯蔵ラック）	×	×	原子炉建屋	×	×	—

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（13/16）

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		抽出結果	
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設 (竜巻防護施設を内包する施設含む)	屋内の施設 で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物)	外殻防護機能を期待できない	評価対象	評価対象施設名称
PS-2	1) その損傷又は故障により発生する事象によって、炉心の著しい損傷又は燃料の大量の破損を直ちに引き起こすおそれはないが、敷地外への過度の放射性物質の放出のおそれのある構築物, 系統及び機器	2) 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	放射性廃棄物処理施設（放射能インベントリの大きいもの）、使用済燃料プール（使用済燃料貯蔵ラックを含む。）	・使用済燃料乾式貯蔵容器	×	×	使用済燃料乾式貯蔵建屋	○	○	・使用済燃料乾式貯蔵容器
		3) 燃料を安全に取り扱う機能	燃料取扱設備	・燃料交換機 ・原子炉建屋クレーン	×	×	原子炉建屋	○	× ※3	—
				・使用済燃料乾式貯蔵建屋天井クレーン	×	×	使用済燃料乾式貯蔵建屋	○	× ※3	—
	2) 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に作動を要求されるものであって、その故障により、炉心冷却が損なわれる可能性の高い構築物, 系統及び機器	1) 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）	・逃がし安全弁（吹き止まり機能に関連する部分）	×	×	原子炉建屋	×	×	—

※3：竜巻襲来時が予想される場合には、燃料取扱作業の中止措置を行う運用とすることから、評価対象施設としない。

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（14/16）

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		抽出結果	
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設 (竜巻防護施設を内包する施設含む)	屋内の施設 で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物)	外殻防護機能を期待できない	評価対象	評価対象施設名称
MS-2	1) P S - 2 の構築物, 系統及び機器の損傷又は故障により敷地周辺公衆に与える放射線の影響を十分小さくするようにする構築物, 系統及び機器	1) 燃料プール水の補給機能	非常用補給水系	・ 残留熱除去系 (ポンプ, サプレッション・プール, サプレッション・プールから燃料プールまでの配管, 弁)	×	×	原子炉建屋	×	×	—
		2) 放射性物質放出の防止機能	放射性気体廃棄物処理系の隔離弁, 排気筒 (非常用ガス処理系排気筒の支持機能以外)	・ 放射性気体廃棄物処理系 (オフガス) 隔離弁	×	×	タービン建屋	×	×	—
				・ 排気筒	○	×	—	—	○	・ 排気筒
			・ 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	○	○	・ 燃料プール冷却浄化系真空破壊弁	
			燃料集合体落下事故時放射能放出を低減する系	・ 原子炉建屋原子炉棟	○	×	—	—	○	・ 原子炉建屋
				・ 原子炉建屋ガス処理系	×	×	原子炉建屋	×	×	—
		○	×	—	—	○	・ 非常用ガス処理系排気配管			
・ 排気筒										

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（15/16）

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		抽出結果	
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設 (竜巻防護施設を内包する施設含む)	屋内の施設 で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物)	外殻防護機能を期待できない	評価対象	評価対象施設名称
MS-2	1) P-S-2 の構築物, 系統及び機器の損傷又は故障により敷地周辺公衆に与える放射線の影響を十分小さくするようにする構築物, 系統及び機器	2) 放射性物質放出の防止機能	燃料集合体落下事故時放射能放出を低減する系	・原子炉建屋ガス処理系	×	○	原子炉建屋	×	○	・原子炉建屋換気系隔離弁, ダクト
					×	×	原子炉建屋	○	○	・非常用ガス処理系設備 ・非常用ガス再循環系設備
	2) 異常状態への対応上特に重要な構築物, 系統及び機器	1) 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	・中性子束 (起動領域計装) ・原子炉スクラム用電磁接触器の状態 ・制御棒位置	×	×	原子炉建屋	×	×	—
					×	×	原子炉建屋	×	×	—
					×	×	原子炉建屋	×	×	—

第 2.2-1 表 評価対象施設抽出結果（クラス 1 及びクラス 2 の設備）（16/16）

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		抽出結果	
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設 (竜巻防護施設を内包する施設含む)	屋内の施設 で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物)	外殻防護機能を期待できない	評価対象	評価対象施設名称
MS-2	2) 異常状態への対応上特に重要な構築物, 系統及び機器	1) 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	[低温停止への移行] ・原子炉圧力 ・原子炉水位 (広帯域) [ドライウェルスプレイ] ・原子炉水位 (広帯域, 燃料域) ・原子炉格納容器圧力 [サブプレッション・プール冷却] ・原子炉水位 (広帯域, 燃料域) ・サブプレッション・プール水温度 [可燃性ガス濃度制御系起動] ・原子炉格納容器水素濃度 ・原子炉格納容器酸素濃度	×	×	原子炉建屋	×	×	-
		2) 異常状態の緩和機能	BWRには対象機能なし	-	-	-	-	-	×	-
		3) 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)	・制御室外原子炉停止装置 (安全停止に関連するもの) の操作回路	×	×	原子炉建屋	×	×	-

第 2.2-2 表 安全重要度クラス 3 に属する施設の確認結果 (1/9)

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3	確認結果		
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設	屋内の施設で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物) 外殻防護機能を (期待できない: ○) (期待できる: ×)	主な対象施設の名称	代替措置等	
P S - 3	1) 異常状態の起因事象となるものであって P S - 1, P S - 2 以外の構築物, 系統及び機器	1) 原子炉冷却材保持機能 (P S - 1, P S - 2 以外のもの)	計装配管, 試料採取管	<ul style="list-style-type: none"> 計装配管, 弁 試料採取管, 弁 ドレン配管, 弁 ベント配管, 弁 	×	×	原子炉建屋	×	-	-
		2) 原子炉冷却材の循環機能	原子炉再循環系	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉再循環ポンプ, 配管, 弁, ライザー管 (炉内), ジェットポンプ 	×	×	原子炉建屋	×	-	-
		3) 放射性物質の貯蔵機能	サプレッションプール水排水系, 復水貯蔵タンク, 放射性廃棄物処理施設 (放射能インベントリの小さいもの)	<ul style="list-style-type: none"> 復水貯蔵タンク 	○	×	-	-	<ul style="list-style-type: none"> 復水貯蔵タンク 	必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。
				<ul style="list-style-type: none"> 液体廃棄物処理系 (低電導度廃液収集槽, 高電導度廃液収集槽) 	×	○	原子炉建屋 廃棄物処理建屋	○	<ul style="list-style-type: none"> 低電導度廃液収集槽 高電導度廃液収集槽 	補修を実施
				<ul style="list-style-type: none"> 固体廃棄物処理系 (C U W 粉末樹脂沈降分離槽, 使用済樹脂槽, 濃縮廃液タンク, 固体廃棄物貯蔵庫 (ドラム缶)) 	×	○	原子炉建屋 固体廃棄物貯蔵庫 固体廃棄物作業建屋	○	<ul style="list-style-type: none"> C U W 粉末樹脂沈降分離槽 使用済樹脂槽 濃縮廃液タンク 固体廃棄物貯蔵庫 (ドラム缶) 	補修を実施
				<ul style="list-style-type: none"> 新燃料貯蔵庫 (新燃料貯蔵ラック) 	×	×	原子炉建屋	×	-	-

第 2.2-2 表 安全重要度クラス 3 に属する施設の確認結果 (2/9)

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		確認結果	代替措置等
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設	屋内の施設で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物) 外殻防護機能を [期待できない:○] [期待できる :×]	主な対象施設の名称 -		
P S - 3	1) 異常状態の起因事象となるものであって P S - 1, P S - 2 以外の構築物, 系統及び機器	3) 放射性物質の貯蔵機能	サプレッションプール水排水系, 復水貯蔵タンク, 放射性廃棄物処理施設 (放射能インベントリの小さいもの)	・給水加熱器保管庫	○	×	-	-	・給水加熱器保管庫	補修を実施
				・セメント混練固化装置及び雑固体減容処理設備 (液体及び固体の放射性廃棄物処理系)	×	×	廃棄物処理建屋	○	・セメント混練固化装置 ・雑固体減容処理設備	補修を実施
		4) 電源供給機能 (非常用を除く)	タービン, 発電機及びその励磁装置, 復水系 (復水器を含む), 給水系, 循環水系, 送電線, 変圧器, 開閉所	・発電機及びその励磁装置 (発電機, 励磁器)	×	×	タービン建屋	○	・発電機 ・励磁器	必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。
				・蒸気タービン (主タービン, 主要弁, 配管)	×	×	タービン建屋	○	・主タービン	必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。
				・復水系 (復水器を含む) (復水器, 復水ポンプ, 配管/弁)	×	×	タービン建屋	×	-	-
・給水系 (電動駆動給水ポンプ, タービン駆動給水ポンプ, 給水加熱器, 配管/弁)	×	×	タービン建屋	×	-	-				

第 2.2-2 表 安全重要度クラス 3 に属する施設の確認結果 (3/9)

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		確認結果	代替措置等
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設	屋内の施設で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物) 外殻防護機能を (期待できない : ○ 期待できる : ×)	主な対象施設の名称		
P S - 3	1) 異常状態の起因事象となるものであって P S - 1, P S - 2 以外の構築物, 系統及び機器	4) 電源供給機能 (非常用を除く)	タービン, 発電機及びその励磁装置, 復水系 (復水器を含む), 給水系, 循環水系, 送電線, 変圧器, 開閉所	・循環水系 (循環水ポンプ, 配管/弁)	×	×	タービン建屋	×	-	-
					○	×	-	-	・循環水ポンプ ・配管/弁	必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。
				・常用所内電源系 (発電機又は外部電源系から所内負荷までの配電設備及び電路 (MS-1 関連以外))	×	×	原子炉建屋	×	-	-
				・直流電源系 (蓄電池, 蓄電池から常用負荷までの配電設備及び電路 (MS-1 関連以外))	×	×	原子炉建屋	×	-	-
				・計装制御電源系 (電源装置から常用計測制御装置までの配電設備及び電路 (MS-1 関連以外))	×	×	原子炉建屋	×	-	-
			・送電線	○	×	-	-	・送電線	必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。	

第 2.2-2 表 安全重要度クラス 3 に属する施設の確認結果 (4/9)

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		確認結果	代替措置等	
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設	屋内の施設で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物) 外殻防護機能を [期待できない:○] [期待できる :×]	主な対象施設の名称 (期待できない:○) (期待できる :×)			
P S - 3	1) 異常状態の起因事象となるものであって P S - 1, P S - 2 以外の構築物, 系統及び機器	4) 電源供給機能 (非常用を除く)	タービン, 発電機及びその励磁装置, 復水系 (復水器を含む), 給水系, 循環水系, 送電線, 変圧器, 開閉所	・変圧器 (所内変圧器, 起動変圧器, 予備変圧器, 電路)	○	×	-	-	・所内変圧器 ・起動変圧器 ・予備変圧器	必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。	
				・開閉所 (母線, 遮断器, 断路器, 電路)	×	×	屋内開閉所	○	・母線 ・遮断器 ・断路器	必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。	
		5) 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, 運転監視補助装置 (制御棒価値ミニマイザ), 原子炉核計装の一部, 原子炉プラントプロセス計装の一部	・原子炉制御系 (制御棒価値ミニマイザを含む) ・原子炉核計装 ・原子炉プラントプロセス計装	×	×	原子炉建屋	×	-	-	
				・補助ボイラ設備 (補助ボイラ, 給水タンク, 給水ポンプ, 配管/弁)	×	×	タービン建屋	×	-	-	
		6) プラント運転補助機能	所内ボイラ, 計装用圧縮空気系	・補助ボイラ設備 (補助ボイラ, 給水タンク, 給水ポンプ, 配管/弁)	×	×	タービン建屋	×	-	-	-
				・配管/弁	○	×	-	-	・配管/弁	必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。	

第 2.2-2 表 安全重要度クラス 3 に属する施設の確認結果 (5/9)

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		確認結果	代替措置等
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設	屋内の施設で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物) 外殻防護機能を [期待できない : ○] [期待できる : ×]		主な対象施設の名称	
P S - 3	1) 異常状態の起因事象となるものであって P S - 1, P S - 2 以外の構築物, 系統及び機器	6) プラント運転補助機能	所内ボイラ, 計装用圧縮空気系	・ 所内蒸気系及び戻り系 (ポンプ, 配管/弁)	×	×	タービン建屋	×	-	-
					○	×	-	-	・ 配管/弁	必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。
				×	×	タービン建屋	○	・ ポンプ ・ 配管/弁	必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。	
				・ 計装用圧縮空気設備 (空気圧縮機, 中間冷却器, 配管/弁)	×	×	タービン建屋	×	-	-
					×	×	タービン建屋	○	・ 配管/弁	必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。
				・ 原子炉補機冷却水系 (原子炉補機冷却ポンプ, 熱交換器, 配管/弁)	×	×	タービン建屋	×	-	-
					×	×	タービン建屋	○	・ 原子炉補機冷却水系サージタンク	必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。
				・ タービン補機冷却水系 (タービン補機冷却ポンプ, 熱交換器, 配管/弁)	×	×	タービン建屋	×	-	-
					×	×	タービン建屋	○	・ タービン補機冷却水系サージタンク	必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。

第 2.2-2 表 安全重要度クラス 3 に属する施設の確認結果 (6/9)

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		確認結果	代替措置等
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設	屋内の施設で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物) 外殻防護機能を [期待できない : ○] [期待できる : ×]		主な対象施設の名称	
P S - 3	1) 異常状態の起因事象となるものであって P S - 1, P S - 2 以外の構築物, 系統及び機器	6) プラント運転補助機能	所内ボイラ, 計装用圧縮空気系	・タービン補機冷却海水系 (補機冷却海水ポンプ, 配管/弁, ストレーナ)	×	×	タービン建屋	×	-	-
				・復水補給水系 (復水移送ポンプ, 配管/弁)	×	×	原子炉建屋 タービン建屋	×	-	-
				・タービン補機冷却海水系 (補機冷却海水ポンプ, 配管/弁, ストレーナ)	○	×	-	-	・補機冷却海水ポンプ ・配管/弁 ・ストレーナ	必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。
				・復水補給水系 (復水移送ポンプ, 配管/弁)	○	×	-	-	・復水貯蔵タンク	必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。
	2) 原子炉冷却材中放射性物質濃度を通常運転に支障のない程度に低く抑える構築物, 系統及び機器	1) 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	・燃料被覆管 ・上/下部端栓 ・タイロッド	×	×	原子炉建屋	×	-	-
				2) 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	×	×	原子炉建屋	×	-
		2) 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	・原子炉冷却材浄化系 (再生熱交換器, 非再生熱交換器, CUWポンプ, ろ過脱塩装置, 配管/弁)	×	×	原子炉建屋	×	-	-
				・復水浄化系 (復水脱塩装置, 配管/弁)	×	×	タービン建屋	×	-	-

第 2.2-2 表 安全重要度クラス 3 に属する施設の確認結果 (7/9)

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		確認結果			
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設	屋内の施設で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物) 外殻防護機能を 期待できない : ○ 期待できる : ×		主な対象施設の名称	代替措置等		
MS-3	1) 運転時の異常な過渡変化があってもMS-1, MS-2とあいまって, 事象を緩和する構築物, 系統及び機器	1) 原子炉圧力上昇の緩和状態	逃がし安全弁 (逃がし弁機能), タービンバイパス弁	・逃がし安全弁 (逃がし弁機能)	×	×	原子炉建屋	×	-	-		
				・タービンバイパス弁	×	×	タービン建屋	×	-	-		
		2) 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), 制御棒引抜監視装置	・原子炉再循環制御系 ・制御棒引抜阻止インターロック ・選択制御棒挿入系の操作回路	×	×	原子炉建屋	×	-	-		
				3) 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	・制御棒駆動水圧系 (ポンプ, 復水貯蔵タンク, 復水貯蔵タンクから制御棒駆動機構までの配管及び弁)	×	×	原子炉建屋 タービン建屋	×	-	-
						・原子炉隔離時冷却系 (ポンプ, タービン)	○	×	-	-	・復水貯蔵タンク	必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。
		・原子炉隔離時冷却系 (ポンプ, タービン)	×	×	原子炉建屋 タービン建屋	×	-	-	-			
		○	×	-	-	・復水貯蔵タンク	必要に応じプラントを停止し, 補修を行う。					

第 2.2-2 表 安全重要度クラス 3 に属する施設の確認結果 (8/9)

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		確認結果	代替措置等
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設	屋内の施設で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物) 外殻防護機能を (期待できない: ○) 期待できる : ×	主な対象施設の名称 -	緊急時対策所 -	
MS-3	2) 異常状態への対応上必要な構築物, 系統及び機器	1) 緊急時対策上重要なもの及び異常状態の把握機能	原子力発電所緊急時対策所, 試料採取系, 通信連絡設備, 放射能監視設備, 事故時監視計器の一部, 消火系, 安全避難通路, 非常用照明	・緊急時対策所	○	×	-	-	・緊急時対策所	(設計竜巻に対する構造健全性を確保できる設計であり, 代替措置不要)
				・試料採取系 (異常時に必要な下記の機能を有するもの。原子炉冷却材放射性物質濃度サンプリング分析, 原子炉格納容器雰囲気放射性物質濃度サンプリング分析)	×	×	原子炉建屋	×	-	-
				・通信連絡設備 (1つの専用回路を含む複数の回路を有する通信連絡設備)	○	×	-	-	・携帯型有線通話装置 ・無線連絡設備 (固定型, 携帯型)	有線回路等にて代替
				×	×	各建屋	○			
			・放射線監視設備	○	×	-	-	・モニタリングポスト	可搬型モニタリングポストにて代替	

第 2.2-2 表 安全重要度クラス 3 に属する施設の確認結果 (9/9)

○ : Yes × : No - : 該当せず

分類	安全機能の重要度分類				Step1	Step2	Step3		確認結果		
	定義	機能	構築物, 系統又は機器	該当する電気, 機械装置のうち主な施設	屋外施設	屋内の施設で外気と繋がっている施設	外殻となる施設 (建屋, 構築物) 外殻防護機能を (期待できない:○) (期待できる :×)		主な対象施設の名称	代替措置等	
MS-3	2) 異常状態への対応上必要な構築物, 系統及び機器	1) 緊急時対策上重要なもの及び異常状態の把握機能	原子力発電所緊急時対策所, 試料採取系, 通信連絡設備, 放射能監視設備, 事故時監視計器の一部, 消火系, 安全避難通路, 非常用照明	・事故時監視計器の一部	×	×	原子炉建屋	×	-	-	
					○	×	-	-	・気象観測装置	可搬型気象観測設備にて代替	
				・消火系 (水消火設備, 泡消火設備, 二酸化炭素消火設備, 等)	×	×	原子炉建屋 タービン建屋	×	-	-	[消火設備] 消防自動車等にて代替
					○	×	-	-	・水消火設備 ・火災検出装置 (受信機含む)		
					×	×	各建屋	○	・水消火設備 ・泡消火設備 ・二酸化炭素消火設備 ・火災検出装置 (受信機含む)	[検出装置] 運転員, 作業員等の監視による代替	
				・安全避難通路	×	×	原子炉建屋	×	-	-	
・非常用照明	×	×	原子炉建屋	×	-	-					

耐震 S クラス施設について

「竜巻影響評価ガイド」においては、竜巻防護施設は「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震 S クラスの設計を要求される設備（系統、機能）及び建屋、構築物等とされている。一方、今回の竜巻影響評価では、安全重要度クラス 1，2 に属する施設を竜巻防護施設として選定しているため、安全重要度クラス 1，2 に該当しない耐震 S クラス施設の有無について確認した結果、第 1 表に示すとおり、津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備が抽出されたが、以下の理由により、竜巻影響評価の評価対象施設として追加する必要はないと判断した。

〈津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備を評価対象施設としない理由〉

- ・津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備は、津波に対して機能を発揮する施設であり、竜巻と津波の重畳の考慮要否を検討することで、竜巻に対する機能維持の要否が判断可能である。
- ・竜巻及びその随件事象によりこれらの施設が損傷することを想定した場合、敷地レベル（EL3.0m）を超える津波に対する影響を考慮する必要があるが、津波と竜巻は発生原因が異なり独立事象であること、及び敷地レベルを超える津波の発生頻度（ 9.5×10^{-3} / 年程度）と設計竜巻（ $V_D=100\text{m/s}$ ）の発生頻度（ 2.0×10^{-6} / 年程度）を踏まえると、敷地レベルを超える津波と設計竜巻が同時に発生する可能性は小さい。また、敷地レベルを超える津波と設計竜巻の発生頻度を踏まえると、竜巻及びその随件事象により津波防護施設等が損傷した場合でも当該機能が必要となる前に修復等の対応が可能と考えられる。

第1表 安全重要度クラス1, 2以外の耐震Sクラス施設の確認結果(1/2)

耐震重要度	機能別分類	設備別分類	対象施設	安全重要度 クラス1 or 2
S	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, ポンプ及び弁	○
		補助設備	・隔離弁を閉とするために必要な電気計装設備	○
	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 ・使用済燃料乾式貯蔵容器	○
		補助設備	・使用済燃料プール水補給設備 (残留熱除去系) ・非常用電源及び計装設備 (非常用ディーゼル発電機及びその冷却系, 補助施設を含む)	○
	原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための施設, 及び原子炉の停止状態を維持するための施設	主要設備	・制御棒, 制御棒駆動機構及び制御棒駆動水圧系 (スクラム機能に関する部分)	○
		補助設備	・炉心支持構造物 ・電気計装設備 ・チャンネル・ボックス	○
	原子炉停止後, 炉心から崩壊熱を除去するための施設	主要設備	・原子炉隔離時冷却系 ・高圧炉心スプレイ系 ・残留熱除去系 (原子炉停止時冷却モード運転に必要な設備) ・冷却水源としてのサブプレッション・プール	○
		補助設備	・残留熱除去系海水系 ・炉心支持構造物 ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機及びその冷却系, 補助施設 ・非常用電源及び計装設備 (非常用ディーゼル発電機及びその冷却系, 補助施設を含む。)	○
	原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後, 炉心から崩壊熱を除去するための施設	主要設備	・非常用炉心冷却系 1) 高圧炉心スプレイ系 2) 低圧炉心スプレイ系 3) 残留熱除去系 (低圧注入モード運転に必要な設備) 4) 自動減圧系 ・冷却水源としてのサブプレッション・プール	○
		補助設備	・残留熱除去系海水系 ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機及びその冷却系, 補助施設 ・非常用電源及び計装設備 (非常用ディーゼル発電機及びその冷却系, 補助施設を含む。) ・中央制御室の遮へい及び空調設備	○
	原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に, 圧力障壁となり放射性物質の放散を直接防ぐための施設	主要設備	・原子炉格納容器 ・原子炉格納容器バウンダリに属する配管及び弁	○
		補助設備	・隔離弁を閉とするために必要な電気計装設備	○

第1表 安全重要度クラス1，2以外の耐震Sクラス施設の確認結果（2/2）

耐震重要度	機能別分類	設備別分類	対象施設	安全重要度クラス1 or 2
S	放射性物質の放出を伴うような事故の際に，その外部放散を抑制するための施設であり，上記の「放射性物質の放散を直接防ぐための施設」以外の施設	主要設備	<ul style="list-style-type: none"> ・残留熱除去系（格納容器スプレイ冷却モード運転に必要な設備） ・可燃性ガス濃度制御系 ・原子炉建屋 ・非常用ガス処理系 ・非常用ガス再循環系 ・原子炉格納容器圧力低減装置（ダイヤフラムフロア及びベント管） ・冷却水源としてのサブプレッション・プール 	○
		補助設備	<ul style="list-style-type: none"> ・残留熱除去系海水系 ・非常用電源及び計装設備（非常用ディーゼル発電機及びその冷却系，補助施設を含む。） 	○
	津波防護機能を有する設備及び浸水防止機能を有する設備	主要設備	<ul style="list-style-type: none"> ・津波防護施設 ・浸水防止設備 	該当しない
		補助設備	—	—
敷地における津波監視機能を有する施設	主要設備	<ul style="list-style-type: none"> ・津波監視設備 	該当しない	
	補助設備	<ul style="list-style-type: none"> ・非常用電源及び計装設備（非常用ディーゼル発電機及びその冷却系，補助施設を含む。） 	○	

竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出について

1. 抽出方針

発電所構内の構築物，系統及び機器のうち，竜巻防護施設の機能に，次の観点から波及的影響を及ぼし得る施設を抽出する。

第 1-1 図に抽出フローを示す。

(1) 機械的影響の観点

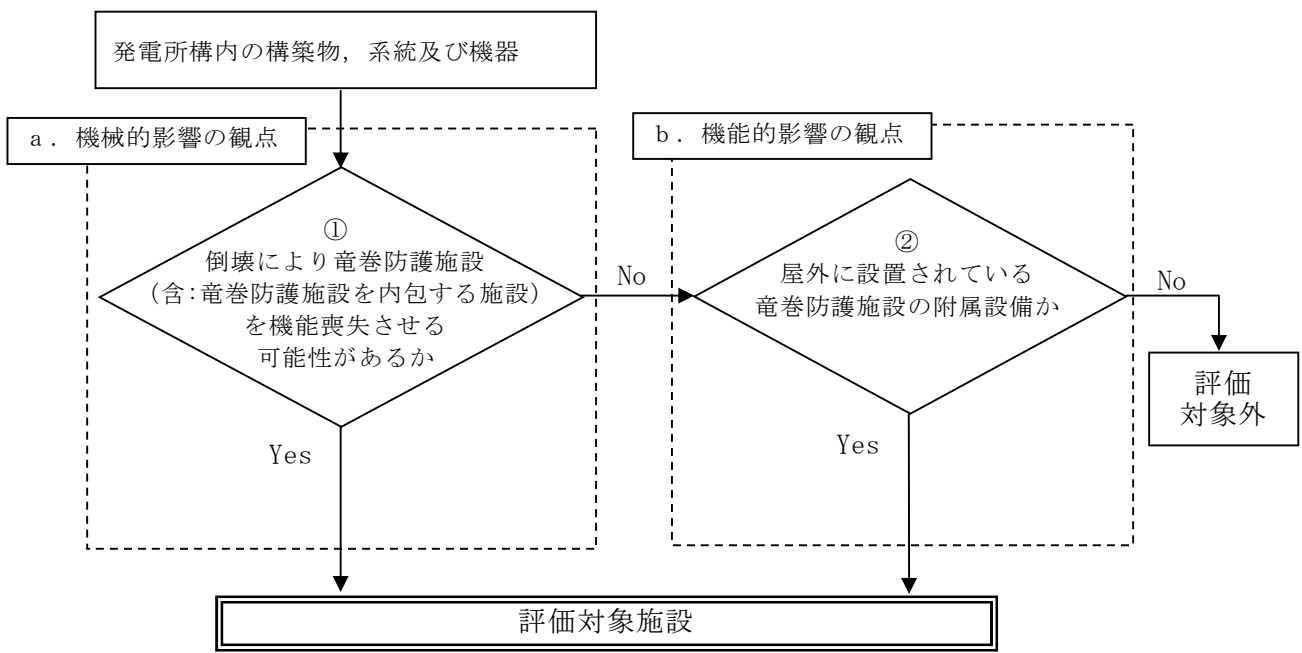
発電所構内の構築物，系統及び機器のうち，竜巻により倒壊して，竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設を機能喪失させる可能性がある施設，またはその施設の特定の区画を抽出する。

(2) 機能的影響の観点

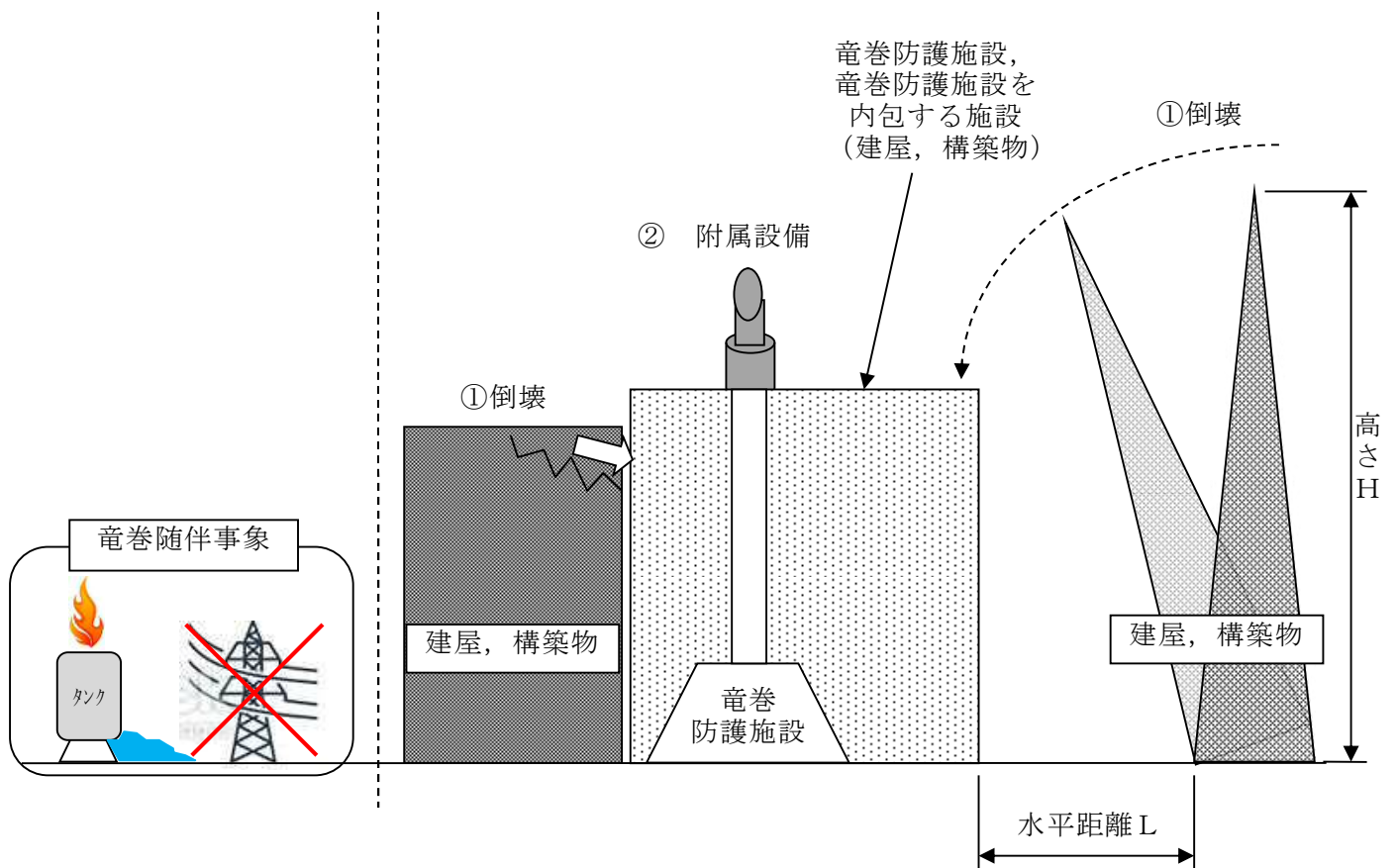
発電所構内の構築物，系統及び機器のうち，竜巻により損傷して，竜巻防護施設の機能喪失させる可能性がある屋外に設置されている竜巻防護施設の附属設備を抽出する。

第 1-2 図に波及的影響を及ぼし得る施設のイメージを示す。

なお，波及的影響として，火災，溢水，外部電源喪失も考えられるが，竜巻随件事象として「添付資料 11」にて整理する。



第1-1図 評価対象抽出フロー



第1-2図 波及的影響を及ぼし得る施設のイメージ

2. 抽出結果

2.1 機械的影響の観点

機械的影響の観点から、発電所構内の構築物、系統及び機器のうち、「倒壊により竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設を機能喪失させる可能性がある施設」を確認した結果を第 2.1-1 表及び第 2.1-1 図に示す。

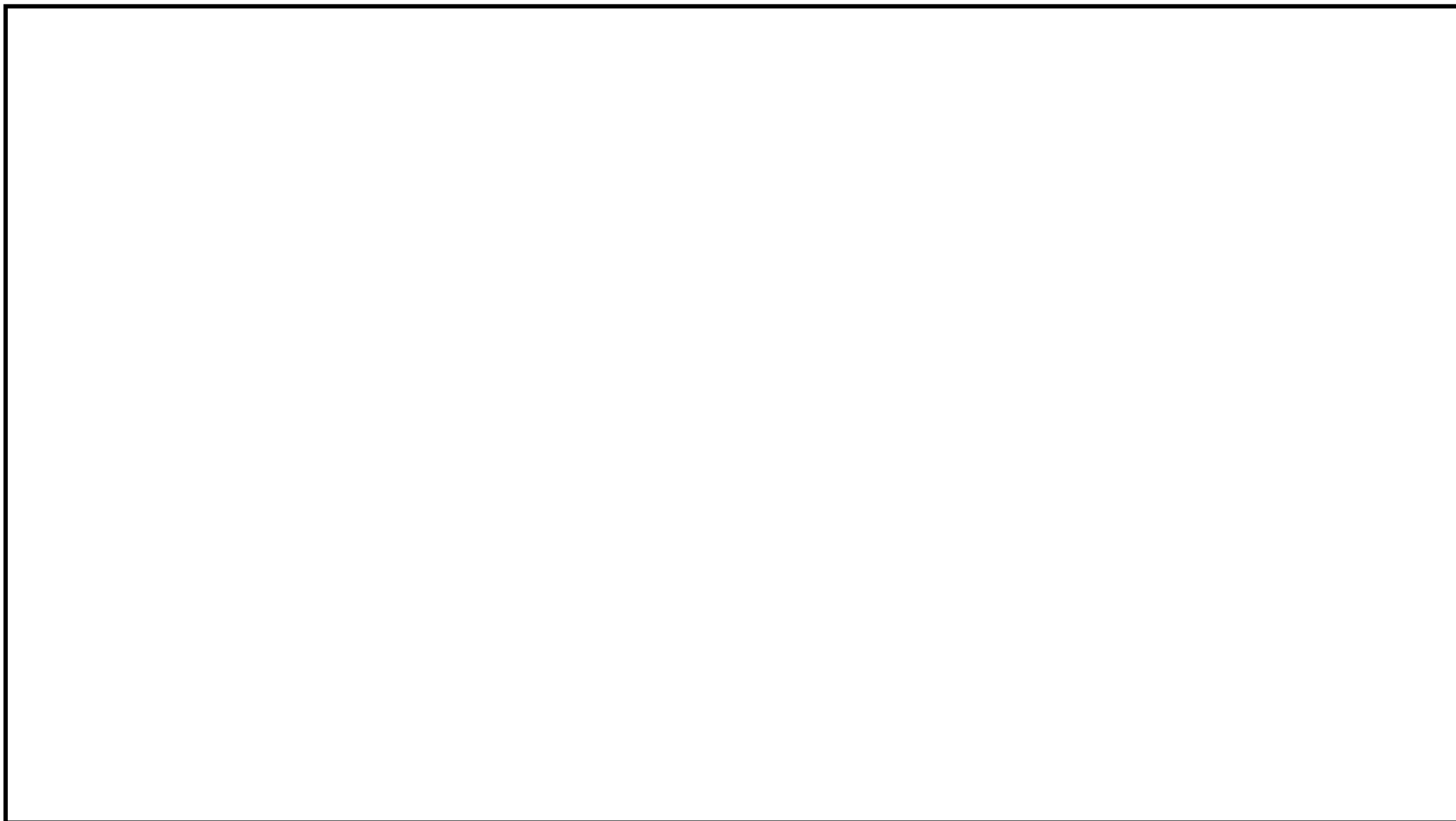
確認の結果、倒壊により竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設を機能喪失させる可能性がある施設として、サービス建屋等の 3 施設を評価対象施設として抽出した。

上記以外の構築物、系統及び機器については、「高さ $H <$ 竜巻防護施設又は竜巻防護施設を内包する施設までの水平距離 L 」であることを確認し、評価対象施設とはならない。

第 2.1-1 表 機械的影響の観点の抽出結果

評価対象施設	近傍の竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設	高さ H	竜巻防護施設等 までの 水平距離 L	波及的 影響の 有無
サービス建屋	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋 タービン建屋 	約 19m	隣接	○
海水ポンプ室 鋼製防護壁	<ul style="list-style-type: none"> 残留熱除去系海水系ポンプ（配管，弁含む） 残留熱除去系海水系ストレーナ 非常用ディーゼル発電機海水ポンプ（配管，弁含む） 非常用ディーゼル発電機海水ストレーナ 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水ポンプ（配管，弁含む） 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水ストレーナ 	約 5m 約 17m	隣接	○
排気筒	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋 タービン建屋 	約 140m	約 25m	○ [※]

※ 排気筒は、竜巻防護施設として、構造健全性が維持される設計とすることにより、波及的影響を及ぼすことはない。



第 2.1-1 図 竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設に波及的影響を及ぼし得る施設の配置図

2.2 機能的影響の観点

機能的影響の観点から、発電所構内の構築物、系統及び機器のうち、竜巻による損傷により、竜巻防護施設の機能喪失させる可能性がある「屋外に設置されている竜巻防護施設の附属設備」を確認した結果を第 2.2-1 表に示す。

第 2.2-1 表 機能的影響の観点の抽出結果

設備名称	波及的影響の有無
非常用ディーゼル発電機排気消音器	○
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器	○
非常用ディーゼル発電機排気配管	○
非常用ディーゼル発電機燃料デイトンクベント管	○
非常用ディーゼル発電機機関ベント管	○
非常用ディーゼル発電機潤滑油サンプタンクベント管	○
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気配管	○
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料デイトンクベント管	○
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機機関ベント管	○
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機潤滑油サンプタンクベント管	○
残留熱除去系海水系配管（放出側）	○
非常用ディーゼル発電機海水配管（放出側）	○
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水配管（放出側）	○

竜巻検討地域の設定について

1. 総観場に基づく気象条件

気象条件は、気象庁の総観場を基に、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「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽¹⁾等を参考に、低気圧、台風、停滞前線、局所性降雨、季節風、その他（高気圧等）の6つに分類した。

「竜巻等の突風データベース」⁽²⁾において1961年1月から2012年6月に発生位置が示された竜巻の発生位置を第1-1図に示す。さらに、それぞれの発生要因別に図示し、第1-2図～第1-7図に示す。

これらより、低気圧起因の竜巻は全国的に一様に発生していること、一方で、台風起因の竜巻は日本海側には発生しておらず、概ね宮城県以南の太平洋側及び九州で発生していることがわかる。また、停滞前線起因の竜巻は北海道では発生していないこと、局所性降雨は内陸部での竜巻発生も促すこと、季節風や高気圧等の起因とされる竜巻の発生数は比較的少ないことがわかる。

これらの特徴をさらに詳細に分析するために、各都道府県での要因別発生数及び発生要因比率を算定した結果を第1-8図に示す。同図では、近隣の地域との連続性を考慮し並べた。

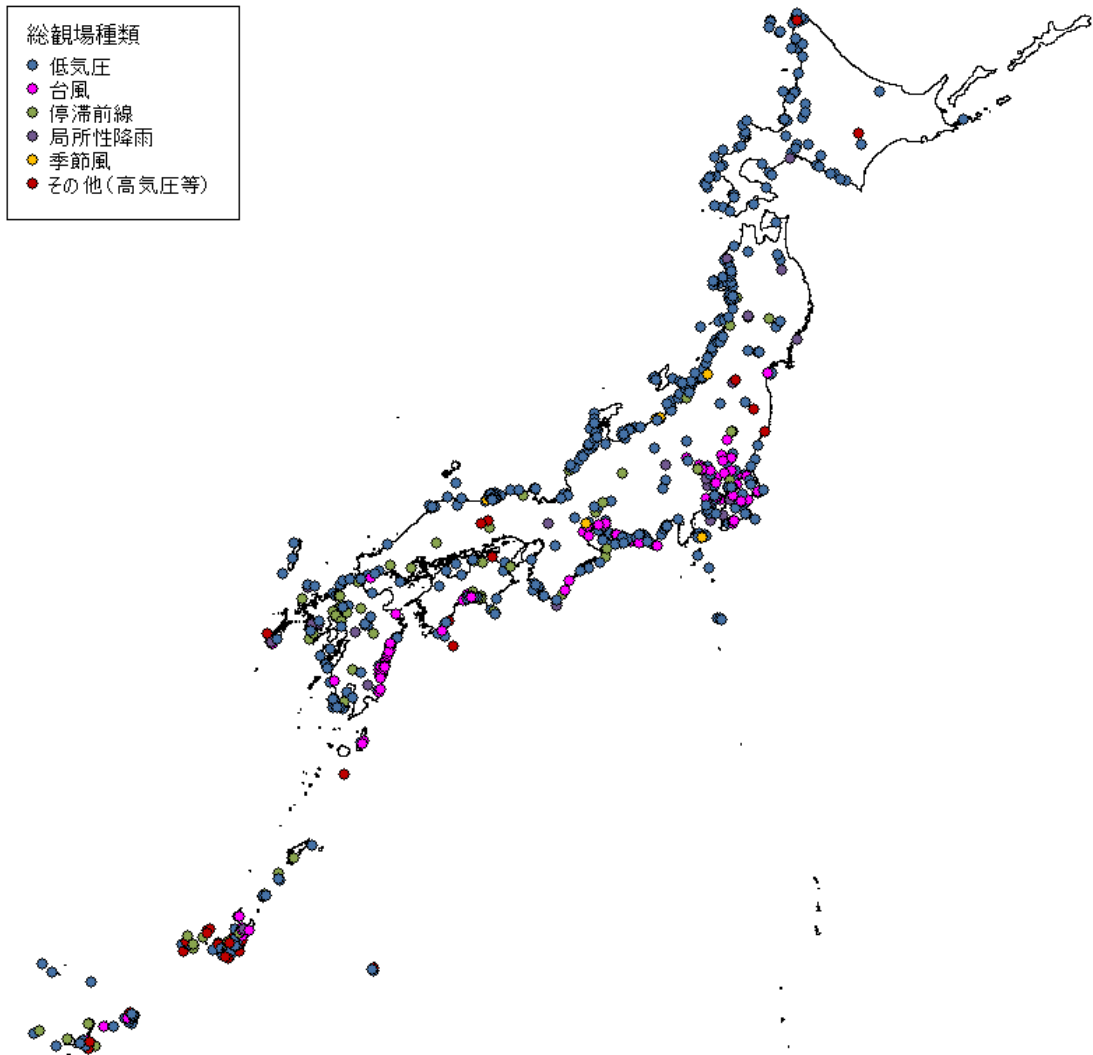
都道府県別発生数について、太平洋側では沖縄県での発生数が多い。次に多いのは、南海沿いの高知県、宮崎県、鹿児島県である。千葉県、愛知県、静岡県なども比較的多い。日本海側では、北海道西部、新潟県、秋田県、鳥取県、石川県で多く発生している。

都道府県別発生要因について、全国的には低気圧起因の比率が多い。特に、日本海側、北海道西部及び南部では、ほとんどが低気圧起因である。台風起

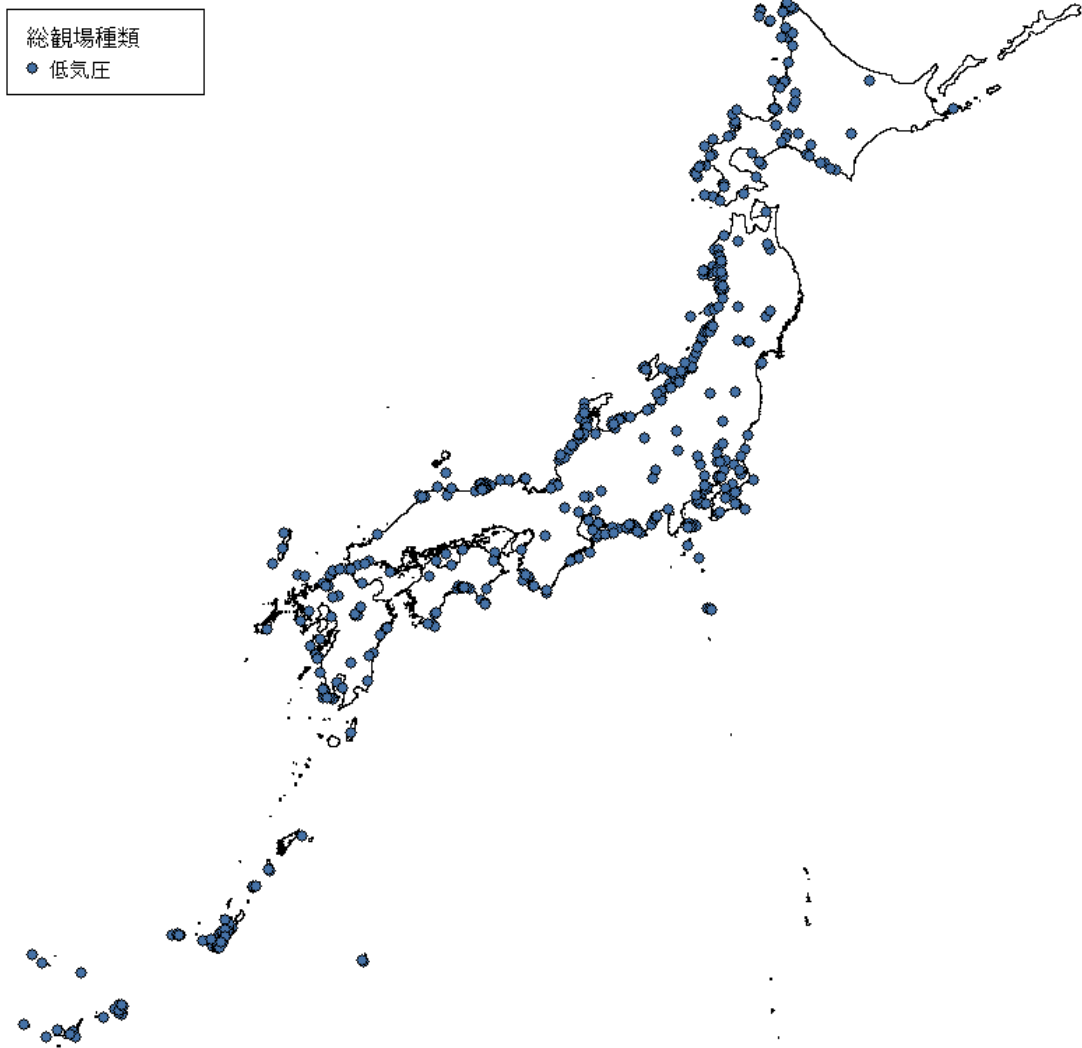
因については、太平洋側に偏っており、宮城県～沖縄県に至る太平洋岸の都道府県、関東平野内の都道府県、大分県、山口県、長崎県などで、台風起因の竜巻が発生している。

都道府県別発生要因の比率について、宮城県、埼玉県では台風起因の比率が60%を超える。また、茨城県、千葉県、栃木県、静岡県、愛知県、三重県で台風起因による竜巻が30%を超える。一方、日本海側、北海道、内陸の都道府県では、台風起因による竜巻はなく、低気圧起因による竜巻が多くを占める。

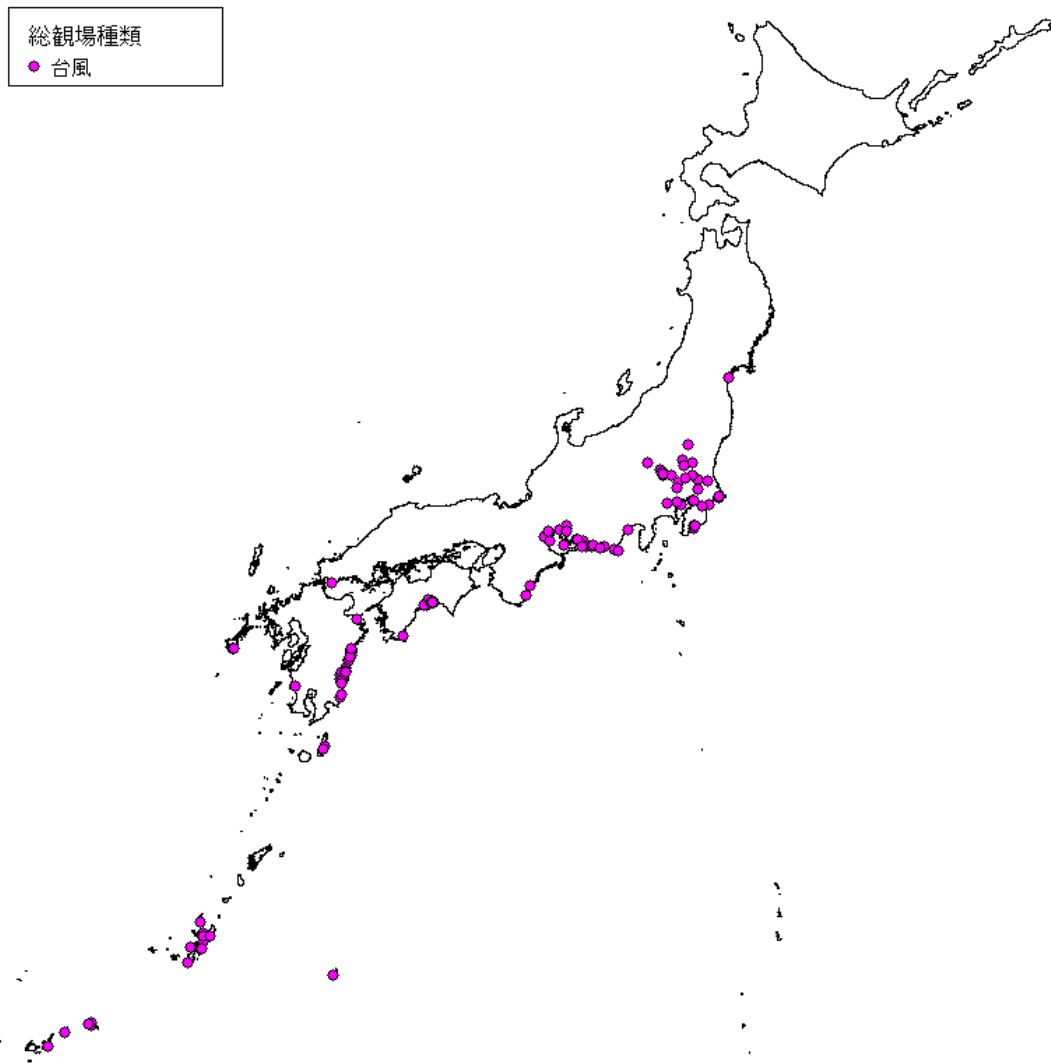
以上より、台風起因以外の竜巻については、地域性が見られない。台風起因の竜巻については、日本海側では発生しておらず、太平洋側の宮城県～沖縄県で多く発生している。



第1-1図 1961年1月～2012年6月に発生した竜巻の総観場の分布



第1-2図 1961年1月～2012年6月に発生した「低気圧」起因の
竜巻発生位置



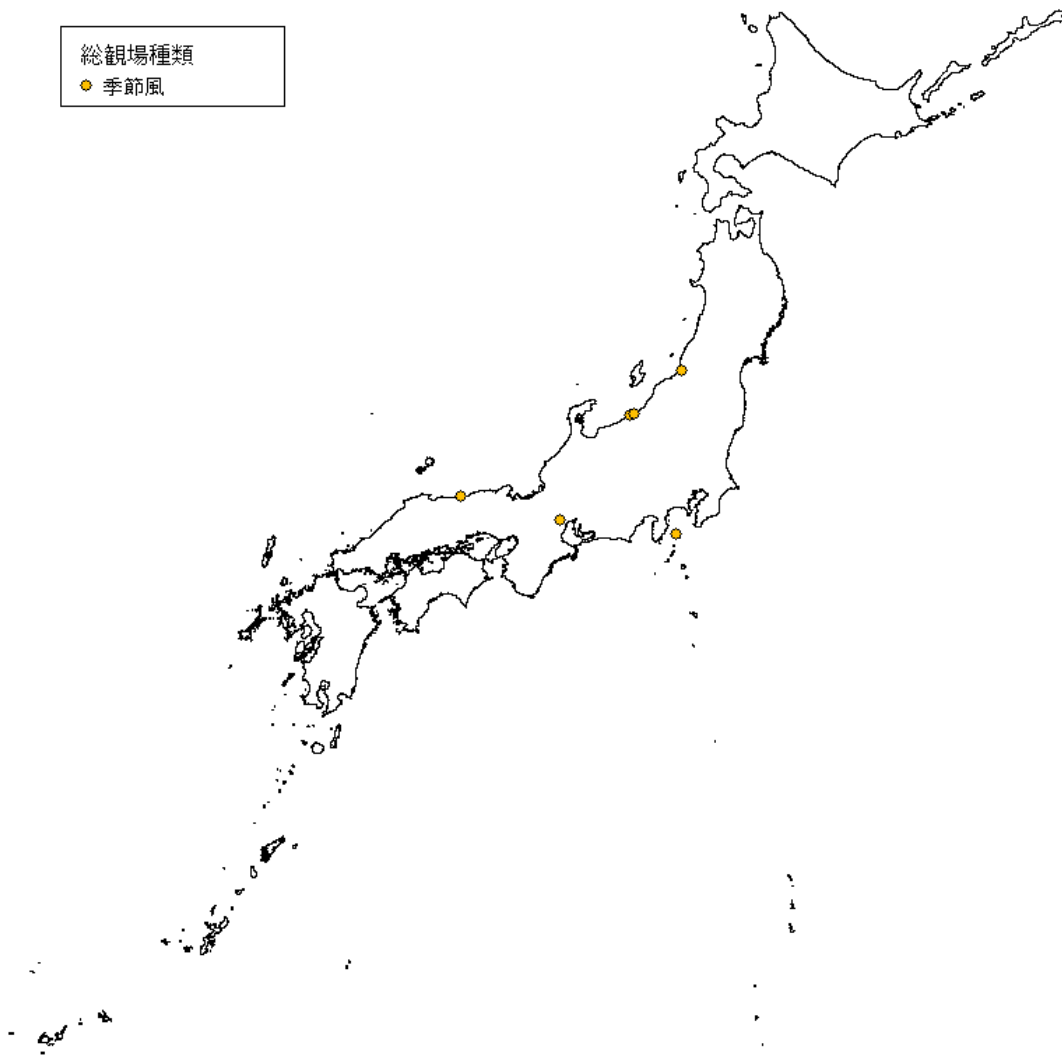
第1-3図 1961年1月～2012年6月に発生した「台風」起因の竜巻発生位置



第1-4図 1961年1月～2012年6月に発生した「停滞前線」起因の
竜巻発生位置



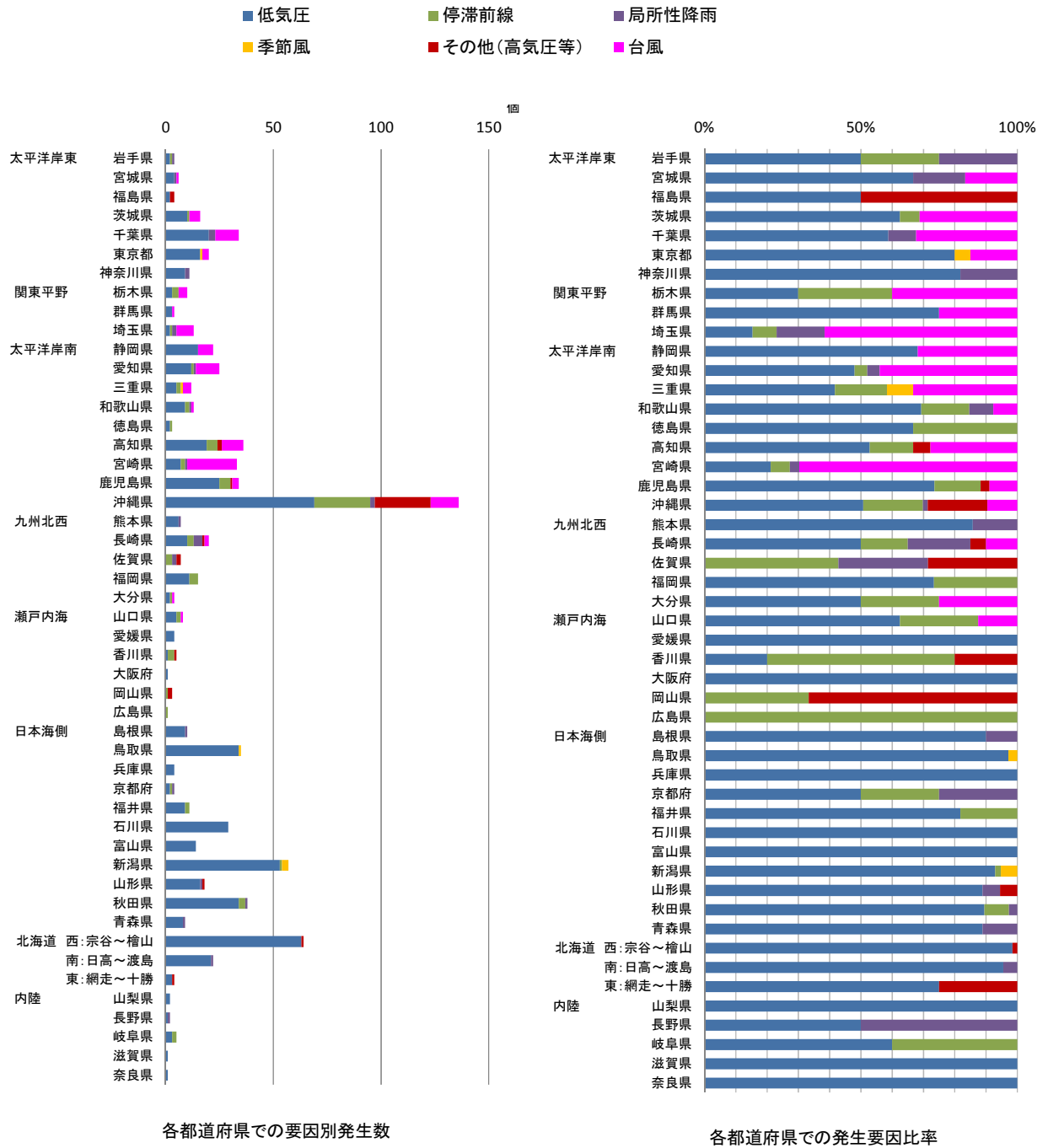
第1-5図 1961年1月～2012年6月に発生した「局所性降雨」起因の
竜巻発生位置



第 1-6 図 1961 年 1 月～2012 年 6 月に発生した「季節風」起因の
竜巻発生位置



第1-7図 1961年1月～2012年6月に発生した「その他(高気圧等)」起因の
竜巻発生位置



第1-8図 各都道府県での竜巻の要因別発生数と発生要因比率

2. 竜巻検討地域の設定

2.1 総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域 TA_1

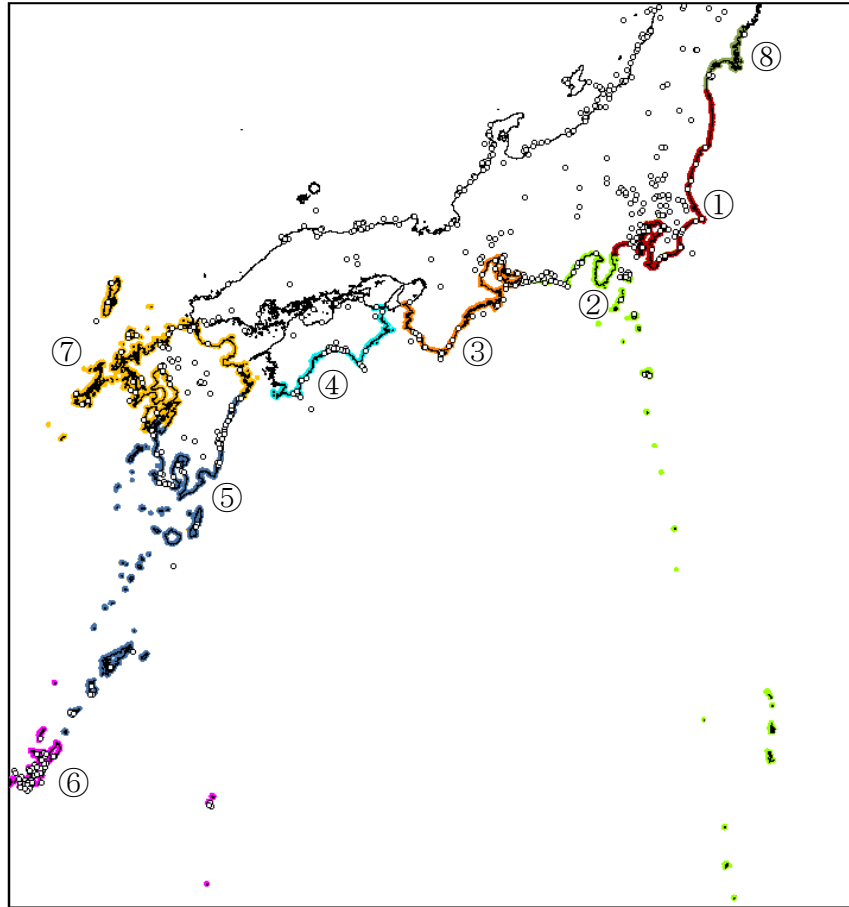
前記の総観場に基づく気象条件から、台風起因の竜巻は、太平洋側の宮城県～沖縄県で多く発生しており、この範囲に東海第二発電所が立地している。太平洋側の宮城県～沖縄県の海岸線より海側及び陸側各 5 km について、複数の竜巻検討地域 TA_1 の候補領域を想定し、各領域内での発生個数を調査し、単位面積当たりの発生数を比較する。

竜巻検討地域 TA_1 の候補の領域 8 ケース及び竜巻の個数と単位面積当たりの発生数の比較を第 2.1-1 図及び第 2.1-1 表に示す。

これより、もっとも単位面積当たりの発生数の大きい $TA_{1.6}$ を、総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域 TA_1 とする。

総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域 TA_1 :

福島県、茨城県、千葉県、東京都、神奈川県、静岡県、愛知県、
三重県、和歌山県、徳島県、高知県、宮崎県、鹿児島県、沖縄県の
海岸線より海側及び陸側各 5 km の地域 (約 57,000km²)



第 2.1-1 図 竜巻検討地域 T A₁ の検討領域

第 2.1-1 表 竜巻検討地域 T A₁ の候補毎の竜巻の個数と
単位面積当たり発生数

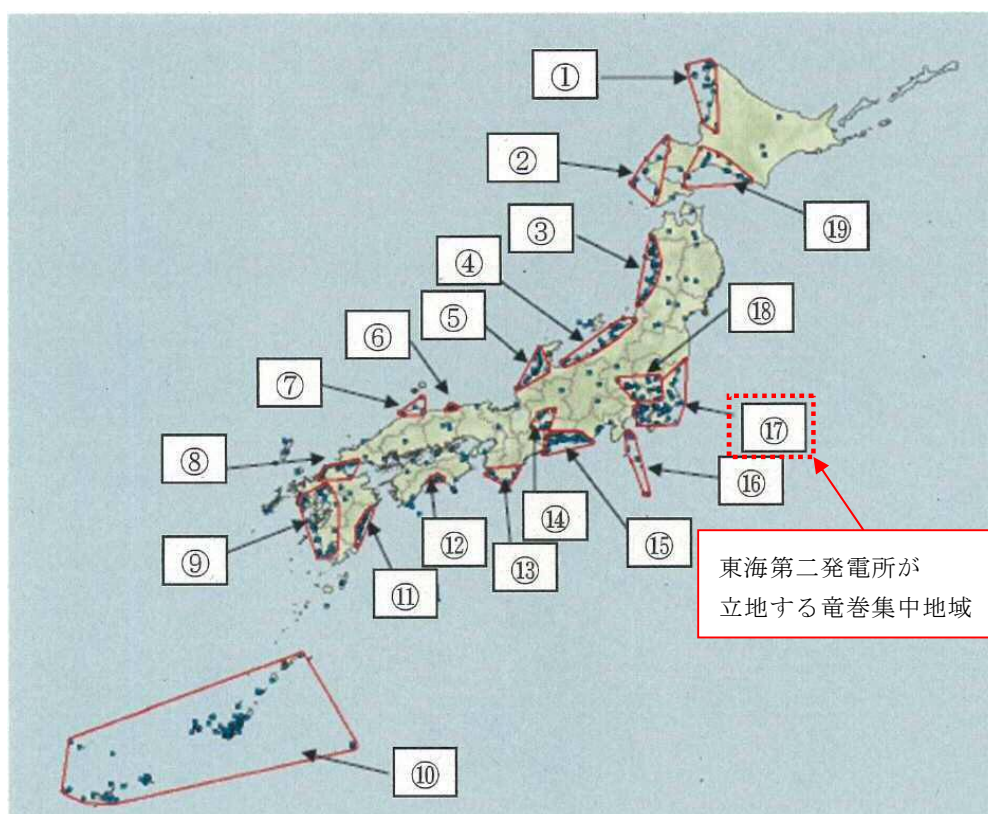
領域		領域面積 (km ²)	51.5 年間に 領域内で発 生した個数	単位面積当たり 発生数 (個/年/km ²)	
T A _{1. 1}	①	福島県～神奈川県	7,900	40	0.98E-04
T A _{1. 2}	①～②	福島県～静岡県	15,700	68	0.84E-04
T A _{1. 3}	①～③	福島県～和歌山県	23,400	104	0.86E-04
T A _{1. 4}	①～④	福島県～高知県	28,600	138	0.94E-04
T A _{1. 5}	①～⑤	福島県～鹿児島県	46,700	194	0.81E-04
T A_{1. 6}	①～⑥	福島県～沖縄県	57,000	300	1.02E-04
T A _{1. 7}	①～⑦	福島県～九州全県	79,700	337	0.82E-04
T A _{1. 8}	①～⑥, ⑧	宮城県～沖縄県	59,700	302	0.98E-04

2.2 竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域 T A₂

「ガイド（案）及び解説」⁽³⁾では、19箇所の竜巻集中地域として、第2.2-1図を示している。東海第二発電所は、これらの竜巻集中地域のうち、⑰に立地している。これに基づき、近接地域の180km圏を考慮した上で、下記を竜巻検討地域 T A₂とする。この地域は前記の第2.1-1図及び第2.1-1表で示した T A_{1.1}に相当する。

竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域 T A₂：

福島県、茨城県、千葉県、東京都、神奈川県
の海岸線より海側及び陸側各5kmの地域（約7,900km²）



第2.2-1図 竜巻の発生する地点と竜巻が集中する19の地域

（「ガイド（案）及び解説」より引用）

2.3 竜巻検討地域 T A

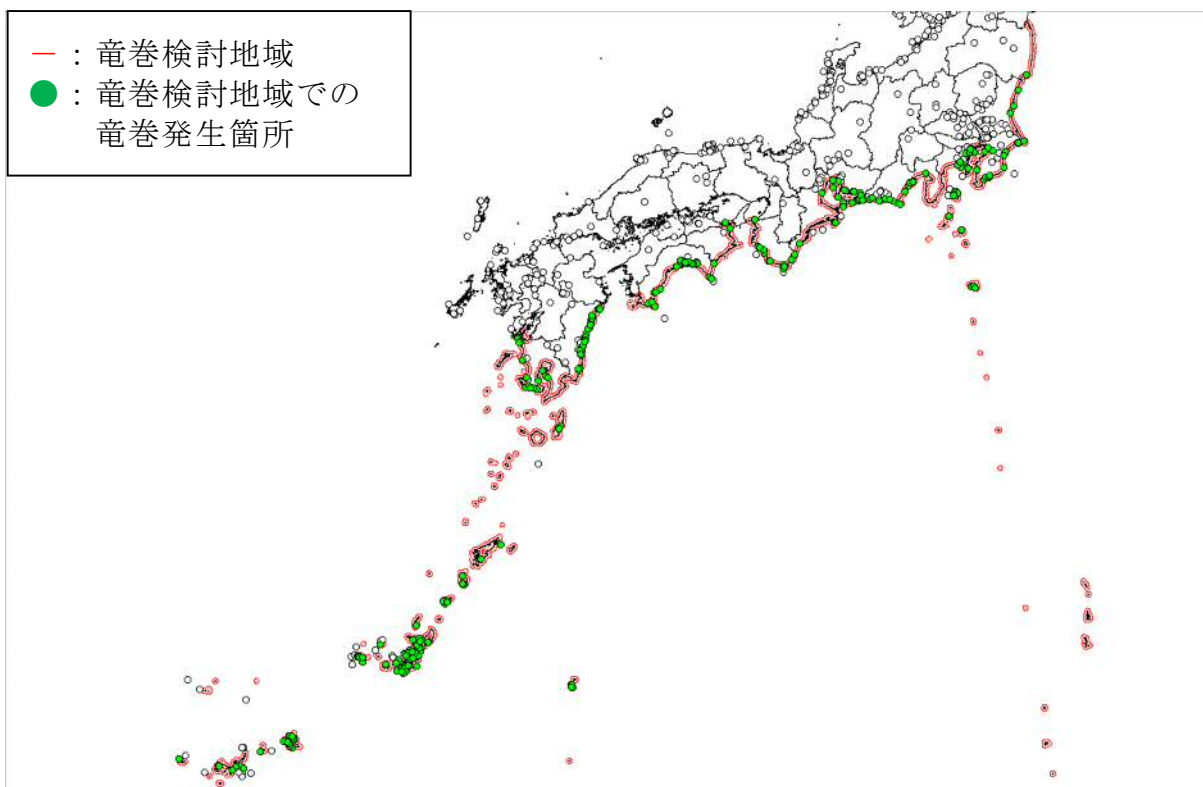
前記の竜巻検討地域 T A₁ 及び T A₂ について、1961 年 1 月から 2012 年 6 月（51.5 年間）の「竜巻等の突風データベース」により発生が確認された竜巻の個数を調査し、単位面積当たりの発生数を算定する。その結果を第 2.3-1 表に示す。

ここで、竜巻検討地域内の竜巻の発生個数の評価は、地理情報システム（M a p I n f o）を用い、発生地点と消滅地点を結ぶ線分が当該地域に掛かるか否かで判断した。

これより、竜巻の個数及び単位面積当たりの発生数の大きさから、T A₁ を竜巻検討地域 T A とする。第 2.3-1 図に竜巻検討地域 T A を示す。

第 2.3-1 表 竜巻検討地域内で発生が確認された竜巻の個数と
単位面積当たりの発生数

	領域面積 (km ²)	51.5 年間に 領域内で発 生した個数	単位面積当たり発生数 (個/年/km ²)
総観場の気象条件に基づく竜巻検討地域 T A 1	57,000	300	1.02×10^{-4}
竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域 T A 2	7,900	40	0.98×10^{-4}



第 2.3-1 図 竜巻検討地域 T A

<参考文献>

- (1) 東京工芸大学 (2011) : 平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究 (平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構
- (2) 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>)
- (3) 井上博登, 福西史郎, 鈴木哲夫 (2013): 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案) 及び解説, 独立行政法人原子力安全基盤機構, JNES-RE-2013-9009.

【参考】 竜巻検討地域TAにおいて発生した竜巻について

気象庁「竜巻等の突風データベース」をもとに、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示す。

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村	スケール	
F3相当								
1	竜巻	1999年09月24日11時07分	34度42分4秒	137度23分5秒	愛知県	豊橋市	F3	台風
2	竜巻	1990年02月19日15時15分	31度15分38秒	130度16分35秒	鹿児島県	枕崎市	F2~F3	寒冷前線 暖気の移流 その他(低気圧)
3	竜巻	1978年02月28日21時20分	35度32分1秒	139度41分50秒	神奈川県	川崎市	F2~F3	寒冷前線 暖気の移流
4	竜巻	1969年12月07日18時00分	34度45分4秒	137度22分46秒	愛知県	豊橋市	F2~F3	二つ玉低気圧
5	竜巻	1968年09月24日19時05分	32度7分16秒	131度32分8秒	宮崎県	高鍋町	F2~F3	台風
6	竜巻	1967年10月28日03時12分	35度42分3秒	140度43分10秒	千葉県	飯岡町	F2~F3	台風
F2相当								
7	竜巻	2011年11月18日19時10分	27度49分44秒	128度55分58秒	鹿児島県	大島郡徳之島町	F2	停滞前線 暖気の移流
8	竜巻	2006年11月18日12時47分	26度31分18秒	128度2分42秒	沖縄県	名護市	F2	停滞前線

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
9	竜巻	2006年09月17日14時03分	32度32分39秒	131度41分1秒	宮崎県	延岡市	F2	台風
10	竜巻	2006年03月28日16時00分	33度25分0秒	135度45分0秒	和歌山県	串本町	F1~F2	日本海低気圧 寒冷前線
11	竜巻	2004年09月30日03時07分	35度31分59秒	139度47分41秒	東京都	大田区	F1~F2	台風
12	竜巻	2002年04月03日07時50分	26度22分30秒	127度48分10秒	沖縄県	沖縄市	F2	東シ海低気圧 気圧の谷 暖気の移流
13	竜巻	2000年09月11日17時55分	34度43分12秒	136度53分35秒	愛知県	南知多町	F2	台風 停滞前線
14	竜巻	1999年09月24日12時10分	34度47分45秒	137度21分54秒	愛知県	小坂井町	F2	台風
15	竜巻	1998年02月17日02時30分	26度22分53秒	126度44分45秒	沖縄県	久米島具志川村	F1~F2	停滞前線
16	竜巻	1997年03月29日12時00分	26度6分1秒	127度39分34秒	沖縄県	糸満市	F2	寒冷前線
17	竜巻	1996年07月05日14時40分	35度33分27秒	140度10分28秒	千葉県	千葉市	F2	日本海低気圧 温暖前線
18	竜巻	1994年08月20日10時18分	24度48分34秒	125度13分4秒	沖縄県	伊良部町	F2	台風
19	竜巻	1993年09月03日20時22分	33度28分48秒	133度31分33秒	高知県	吾川郡春野町	F2	台風
20	竜巻	1991年04月07日00時05分	26度20分48秒	126度44分48秒	沖縄県	島尻郡具志川村	F1~F2	暖気の移流 寒冷前線

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
21	竜巻	1991年04月07日00時03分	26度20分46秒	126度44分22秒	沖縄県	島尻郡具志川村	F2	暖気の移流 寒冷前線
22	竜巻	1990年12月11日17時47分	35度5分14秒	140度2分10秒	千葉県	鴨川市	F2	暖気の移流 気圧の谷 雷雨(熱雷を除く)
23	竜巻	1990年04月03日22時15分	26度27分23秒	127度51分52秒	沖縄県	国頭郡金武町	F2	寒冷前線
24	竜巻	1989年07月04日16時15分	26度18分50秒	127度50分6秒	沖縄県	沖縄市	F2	停滞前線 暖気の移流
25	竜巻	1987年01月05日07時55分	26度19分43秒	127度52分13秒	沖縄県	勝連町	F2	寒冷前線
26	竜巻	1985年09月28日13時55分	31度17分3秒	130度20分20秒	鹿児島県	枕崎市	F1~F2	東シ海低気圧
27	竜巻	1985年08月31日05時30分	32度23分39秒	131度38分14秒	宮崎県	日向市	F1~F2	台風 暖気の移流
28	竜巻	1983年09月25日15時00分	26度55分34秒	127度56分53秒	沖縄県	伊是名村	F2	台風
29	竜巻	1979年05月27日12時25分	36度14分50秒	140度33分0秒	茨城県	鹿島郡旭村	F1~F2	気圧の谷 寒気の移流 雷雨(熱雷を除く)
30	竜巻	1975年02月15日16時20分	34度45分10秒	139度21分13秒	東京都	大島町	F1~F2	季節風 寒気の移流
31	竜巻	1975年02月06日07時00分	27度41分20秒	128度55分18秒	鹿児島県	大島郡伊仙町	F2	南岸低気圧
32	竜巻	1974年07月08日03時30分	34度37分24秒	138度8分7秒	静岡県	小笠郡浜岡町	F1~F2	台風 梅雨前線

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
33	竜巻	1974年07月06日16時40分	33度32分4秒	133度38分30秒	高知県	南国市	F1～F2	台風 暖気の移流
34	竜巻	1972年06月06日20時30分	26度5分30秒	127度41分48秒	沖縄県	糸満市	F1～F2	東シ海低気圧 暖気の移流
35	竜巻	1971年08月31日09時00分	35度37分14秒	140度5分3秒	千葉県	千葉市	F2	台風
36	竜巻	1969年08月23日10時15分	35度5分48秒	140度6分29秒	千葉県	鴨川町	F1～F2	台風
37	竜巻	1968年09月24日19時20分	32度6分44秒	131度31分52秒	宮崎県	高鍋町	F2	台風
38	竜巻	1968年09月24日17時25分	32度5分16秒	131度31分16秒	宮崎県	高鍋町	F2	台風
39	竜巻	1968年08月28日12時30分	33度32分0秒	133度39分0秒	高知県	南国市	F1～F2	台風
40	竜巻	1967年10月28日02時05分	35度7分6秒	140度7分22秒	千葉県	鴨川町	F2	台風
41	竜巻	1967年03月23日15時04分	35度43分50秒	140度50分6秒	千葉県	銚子市	F1～F2	寒冷前線
42	竜巻	1965年10月14日21時40分	35度35分20秒	139度42分40秒	東京都	大田区	F1～F2	温暖前線
43	竜巻	1964年01月17日15時40分	33度4分2秒	139度48分26秒	東京都	八丈町	F2	南岸低気圧
44	竜巻	1962年12月30日08時25分	34度39分7秒	138度4分21秒	静岡県	千浜村	F1～F2	二つ玉低気圧 温暖前線

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
45	竜巻	1962年08月26日08時25分	34度35分43秒	138度13分29秒	静岡県	榛原郡御前崎町	F1~F2	台風
46	竜巻	1962年08月26日04時00分	34度38分49秒	137度46分34秒	静岡県	浜松市	F2	台風
47	竜巻	1962年07月02日14時30分	35度56分50秒	140度30分20秒	茨城県	稲敷郡東村	F2	温暖前線 梅雨前線 局地性じょう乱
F1相当								
48	竜巻	2011年05月28日05時00分	24度22分21秒	124度12分54秒	沖縄県	石垣市	F1	台風
49	竜巻	2010年12月03日07時30分	35度18分16秒	139度33分4秒	神奈川県	鎌倉市	F0~F1	日本海低気圧 暖気の移流
50	竜巻	2009年10月08日04時30分	35度32分42秒	140度27分43秒	千葉県	山武郡九十九里町	F1	台風 暖気の移流
51	竜巻	2008年12月05日15時30分	35度36分28秒	139度42分37秒	東京都	品川区	F1	寒冷前線
52	竜巻	2008年10月24日02時30分	34度15分5秒	136度49分44秒	三重県	志摩市	F1	南岸低気圧
53	竜巻	2008年10月07日14時30分	26度35分41秒	127度57分31秒	沖縄県	名護市	F0~F1	停滞前線
54	竜巻	2008年03月27日19時00分	31度27分51秒	130度41分52秒	鹿児島県	垂水市	F1	東シ海低気圧
55	竜巻	2008年03月27日17時20分	31度45分23秒	130度11分54秒	鹿児島県	いちき串木野市	F1	東シ海低気圧

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
56	竜巻	2007年04月18日07時55分	24度44分21秒	125度15分48秒	沖縄県	宮古島市	F1	寒冷前線
57	竜巻	2007年03月15日14時55分	26度21分50秒	127度44分22秒	沖縄県	中頭郡読谷村	F1	気圧の谷 暖気の移流
58	竜巻	2007年02月14日15時40分	33度48分53秒	135度12分8秒	和歌山県	日高郡印南町	F1	日本海低気圧 寒冷前線
59	竜巻	2007年02月14日06時20分	26度13分30秒	127度18分12秒	沖縄県	島尻郡座間味村	F0~F1	寒冷前線 暖気の移流
60	竜巻	2006年11月26日15時35分	32度47分5秒	132度51分31秒	高知県	土佐清水市	F1	南岸低気圧 暖気の移流
61	竜巻	2006年11月22日13時00分	26度37分48秒	128度12分54秒	沖縄県	東村	F1	停滞前線 暖気の移流
62	竜巻	2006年09月17日13時30分	32度20分17秒	131度37分10秒	宮崎県	日向市	F1	台風
63	竜巻	2006年09月17日12時10分	31度34分15秒	131度24分8秒	宮崎県	日南市	F1	台風
64	竜巻	2006年04月20日12時10分	35度21分15秒	139度28分50秒	神奈川県	藤沢市	F1	寒冷前線
65	竜巻	2006年01月19日19時10分	28度8分35秒	129度18分56秒	鹿児島県	瀬戸内町	F1	停滞前線
66	竜巻	2005年09月05日10時10分	31度56分25秒	131度27分29秒	宮崎県	宮崎市	F1	台風
67	竜巻	2005年05月01日15時00分	33度33分45秒	133度36分20秒	高知県	高知市	F0~F1	その他(低気圧) 暖気の移流

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
68	竜巻	2005年01月27日17時00分	26度21分53秒	127度44分16秒	沖縄県	読谷村	F1	寒冷前線 暖気の移流
69	竜巻	2004年09月29日23時01分	34度40分30秒	137度27分0秒	愛知県	豊橋市	F0~F1	台風
70	竜巻	2004年09月27日20時50分	26度41分44秒	128度1分10秒	沖縄県	今帰仁村	F1	台風
71	竜巻	2004年09月27日20時30分	26度31分11秒	128度1分7秒	沖縄県	名護市	F1	台風
72	竜巻	2003年10月12日10時00分	33度30分0秒	133度50分0秒	高知県	安芸市	F0~F1	停滞前線 暖気の移流
73	竜巻	2003年09月12日13時00分	33度29分29秒	133度33分34秒	高知県	高知市	F1	台風 暖気の移流
74	竜巻	2003年08月08日07時20分	32度19分3秒	131度35分52秒	宮崎県	日向市	F0~F1	台風
75	竜巻	2003年08月08日01時40分	31度36分36秒	131度25分37秒	宮崎県	日南市	F0~F1	台風
76	竜巻	2003年06月19日09時00分	32度28分32秒	131度39分29秒	宮崎県	東臼杵郡門川町	F1	台風
77	竜巻	2002年12月16日18時10分	33度16分14秒	134度9分40秒	高知県	室戸市	F0~F1	日本海低気圧 暖気の移流
78	竜巻	2002年10月07日03時50分	35度14分40秒	139度39分50秒	神奈川県	横須賀市	F1	日本海低気圧 雷雨(熱雷を除く) 暖気の移流
79	竜巻	2002年10月07日03時05分	34度47分1秒	139度21分11秒	東京都	大島町	F1	日本海低気圧

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
80	竜巻または ダウンバースト	2002年10月06日22時38分	34度43分13秒	136度53分46秒	愛知県	南知多町	F1	二つ玉低気圧
81	竜巻	2002年10月06日14時50分	31度33分38秒	130度37分11秒	鹿児島県	鹿児島市	F1	寒冷前線
82	竜巻	2002年01月21日12時15分	34度38分57秒	137度19分36秒	愛知県	田原町	F1	二つ玉低気圧 温暖前線 暖気の移流
83	竜巻	2001年10月01日07時00分	33度45分36秒	135度18分50秒	和歌山県	南部町	F0~F1	日本海低気圧 暖気の移流
84	竜巻	2000年12月25日13時37分	34度45分0秒	139度17分30秒	東京都	大島町	F1	寒気の移流
85	竜巻	2000年09月11日08時10分	33度40分33秒	135度58分23秒	和歌山県	新宮市	F0~F1	台風 停滞前線 暖気の移流
86	竜巻	1999年11月15日05時07分	32度59分12秒	132度59分51秒	高知県	大方町	F0~F1	日本海低気圧 寒気の移流
87	竜巻	1999年11月01日07時00分	34度50分36秒	137度1分59秒	愛知県	西尾市	F1	日本海低気圧
88	竜巻	1999年10月27日21時00分	36度39分54秒	140度42分59秒	茨城県	多賀郡十王町	F1	南岸低気圧
89	竜巻	1999年09月24日12時51分	35度1分16秒	136度47分45秒	愛知県	海部郡弥富町	F1	台風
90	竜巻	1999年09月24日11時56分	34度49分24秒	137度13分7秒	愛知県	蒲都市	F1	台風
91	竜巻	1999年09月24日03時00分	33度31分27秒	133度37分17秒	高知県	南国市	F1	台風 暖気の移流

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
92	竜巻	1999年05月04日09時50分	34度37分5秒	137度12分46秒	愛知県	渥美郡赤羽根町	F1	日本海低気圧
93	竜巻	1999年04月10日16時00分	33度31分1秒	133度48分5秒	高知県	芸西村	F1	その他(低気圧) 気圧の谷
94	竜巻	1998年10月17日14時50分	32度10分10秒	131度32分0秒	宮崎県	児湯郡川南町	F0~F1	台風
95	竜巻	1998年09月18日16時02分	31度54分29秒	131度27分3秒	宮崎県	宮崎市	F1	台風
96	竜巻	1998年02月19日23時43分	25度49分1秒	131度13分45秒	沖縄県	南大東村	F1	その他(低気圧)
97	竜巻	1997年11月17日08時00分	33度6分0秒	139度46分40秒	東京都	八丈町	F1	温暖前線 暖気の移流
98	竜巻	1997年09月16日13時19分	33度32分50秒	133度40分27秒	高知県	南国市	F1	台風 暖気の移流
99	竜巻	1997年09月14日06時50分	30度33分13秒	131度0分20秒	鹿児島県	熊毛郡中種子町	F1	台風
100	竜巻	1997年04月07日17時20分	35度31分6秒	139度36分50秒	神奈川県	横浜市	F0~F1	雷雨(熱雷を除く)
101	竜巻	1996年07月01日06時10分	31度22分28秒	130度32分27秒	鹿児島県	喜入町	F1	停滞前線
102	竜巻	1996年03月30日05時30分	31度15分10秒	130度21分52秒	鹿児島県	枕崎市	F1	寒冷前線 日本海低気圧
103	竜巻	1995年09月23日09時05分	26度23分9秒	127度59分42秒	沖縄県	与那城町	F1	台風

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
104	竜巻	1994年10月12日10時22分	33度31分11秒	133度47分22秒	高知県	芸西村	F0~F1	日本海低気圧 暖気の移流
105	竜巻	1994年09月29日19時00分	34度40分56秒	137度34分8秒	静岡県	新居町	F0~F1	台風
106	竜巻	1994年09月29日17時35分	34度48分57秒	137度14分8秒	愛知県	蒲郡市	F1	台風
107	竜巻	1994年09月29日17時30分	34度40分50秒	137度21分30秒	愛知県	豊橋市	F1	台風
108	竜巻	1994年03月23日02時00分	27度40分14秒	128度58分4秒	鹿児島県	大島郡伊仙町	F0~F1	その他(低気圧)
109	竜巻	1993年12月01日01時10分	31度26分28秒	130度44分21秒	鹿児島県	垂水市	F1	寒冷前線
110	竜巻	1993年12月01日00時30分	31度15分5秒	130度26分26秒	鹿児島県	指宿郡穎娃町	F1	寒冷前線 暖気の移流
111	竜巻	1993年09月03日15時45分	32度30分31秒	131度40分30秒	宮崎県	延岡市	F0~F1	台風
112	竜巻	1993年09月03日13時00分	32度49分23秒	132度56分45秒	高知県	土佐清水市	F1	台風
113	竜巻	1993年05月27日01時50分	26度13分56秒	127度45分8秒	沖縄県	西原町	F1	梅雨前線
114	竜巻	1992年09月22日10時00分	26度38分0秒	128度2分6秒	沖縄県	名護市	F1	台風
115	竜巻	1992年02月15日09時25分	26度21分36秒	126度43分31秒	沖縄県	島尻郡具志川村	F1	寒冷前線

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
116	竜巻	1992年01月06日03時30分	27度22分7秒	128度31分47秒	鹿児島県	大島郡知名町	F1	東シ海低気圧 寒冷前線 暖気の移流
117	竜巻	1991年11月28日16時30分	33度33分30秒	135度26分50秒	和歌山県	日置川町	F0~F1	南岸低気圧
118	竜巻	1991年11月28日11時45分	31度35分58秒	131度22分51秒	宮崎県	日南市	F1	南岸低気圧
119	竜巻	1991年02月13日22時27分	26度11分52秒	127度41分4秒	沖縄県	那覇市	F1	東シ海低気圧 暖気の移流
120	竜巻	1990年12月12日00時20分	36度22分50秒	140度37分40秒	茨城県	海上~那珂湊市	F1	寒気の移流 局地性じょう乱 その他
121	竜巻	1990年03月12日06時30分	34度15分23秒	136度50分34秒	三重県	志摩郡志摩町	F1	日本海低気圧 寒冷前線
122	竜巻	1989年09月22日14時00分	34度19分0秒	135度8分0秒	大阪府	泉南郡岬町	F1	寒冷前線
123	竜巻	1988年09月25日09時40分	33度27分22秒	135度45分29秒	和歌山県	串本町	F1	寒冷前線 暖気の移流
124	竜巻	1986年12月19日01時30分	34度36分45秒	137度12分15秒	愛知県	渥美郡赤羽根町	F1	閉塞前線
125	竜巻	1985年10月05日18時45分	33度34分6秒	133度33分40秒	高知県	高知市	F1	台風 大陸高気圧 暖気の移流
126	竜巻	1985年10月05日18時40分	33度27分22秒	133度28分17秒	高知県	土佐市	F1	台風 太平洋高気圧 暖気の移流
127	竜巻または ダウンバースト	1983年09月25日15時30分	26度37分48秒	128度11分59秒	沖縄県	東村	F1	台風

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
128	竜巻	1983年03月12日06時20分	26度5分33秒	127度41分5秒	沖縄県	糸満市	F1	東シ海低気圧 その他
129	竜巻	1980年10月14日02時15分	32度0分51秒	131度29分11秒	宮崎県	宮崎市	F1	台風
130	竜巻	1980年10月14日01時30分	31度50分46秒	131度26分50秒	宮崎県	宮崎市	F1	台風
131	竜巻	1980年10月13日20時10分	30度30分35秒	130度58分39秒	鹿児島県	中種子町	F1	台風
132	竜巻	1979年09月03日16時29分	31度55分20秒	131度25分10秒	宮崎県	宮崎市	F1	台風
133	竜巻	1978年02月10日05時30分	31度25分49秒	130度16分40秒	鹿児島県	加世田市	F1	寒冷前線 暖気の移流
134	竜巻	1976年10月23日07時20分	26度11分6秒	127度43分2秒	沖縄県	南風原村	F1	東シ海低気圧 暖気の移流
135	竜巻	1976年02月28日14時00分	32度5分8秒	130度10分20秒	鹿児島県	阿久根市	F1	不安定線
136	竜巻	1975年11月15日18時15分	35度28分51秒	140度25分6秒	千葉県	大網白里町	F1	南岸低気圧
137	竜巻	1975年11月15日16時22分	34度7分5秒	139度30分56秒	東京都	三宅島三宅村	F1	南岸低気圧 温暖前線
138	竜巻	1975年11月14日20時40分	33度30分28秒	134度16分28秒	高知県	安芸郡東洋町	F1	南岸低気圧 温暖前線
139	竜巻	1975年08月22日14時30分	33度52分32秒	136度5分10秒	三重県	熊野市	F1	台風

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
140	竜巻	1974年07月08日03時00分	34度41分18秒	137度53分20秒	静岡県	磐田郡福田町	F1	台風 停滞前線
141	竜巻	1974年06月06日12時50分	34度59分14秒	138度25分37秒	静岡県	静岡市	F0~F1	気圧の谷
142	竜巻	1974年03月13日13時20分	36度56分52秒	140度53分52秒	福島県	いわき市	F1	移動性高気圧
143	竜巻	1972年06月06日23時30分	27度21分30秒	128度35分57秒	鹿児島県	大島郡知名町	F1	寒冷前線
144	竜巻	1971年08月31日04時00分	35度0分53秒	138度28分52秒	静岡県	清水市	F0~F1	台風
145	竜巻	1968年09月24日15時30分	31度51分30秒	131度26分0秒	宮崎県	宮崎市	F1	台風
146	竜巻	1961年10月07日10時10分	34度59分33秒	138度29分24秒	静岡県	清水市	F1	寒冷前線
147	竜巻	1961年01月24日13時45分	31度15分7秒	130度22分26秒	鹿児島県	川辺郡知覧町	F1	寒冷前線
F0相当								
148	竜巻	2012年06月05日03時20分	25度49分20秒	131度14分14秒	沖縄県	島尻郡南大東村	F0	台風
149	竜巻	2012年02月28日17時40分	26度21分20秒	127度58分15秒	沖縄県	うるま市	F0	停滞前線
150	竜巻	2011年10月21日21時30分	32度46分44秒	132度56分57秒	高知県	土佐清水市	F0	暖気の移流

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
151	竜巻	2011年10月14日07時30分	32度41分12秒	131度48分29秒	宮崎県	延岡市	F0	暖気の移流
152	竜巻	2011年07月18日19時10分	34度47分13秒	136度33分11秒	三重県	津市	F0	台風 暖気の移流
153	竜巻	2011年02月11日00時20分	26度10分0秒	127度39分20秒	沖縄県	豊見城市	F0	停滞前線
154	竜巻	2010年11月22日15時30分	27度23分1秒	128度34分31秒	鹿児島県	大島郡和泊町	F0	停滞前線 暖気の移流
155	竜巻	2010年11月01日05時20分	35度30分16秒	140度25分50秒	千葉県	山武郡九十九里町	F0	南岸低気圧
156	竜巻	2010年10月22日10時50分	26度21分45秒	126度44分51秒	沖縄県	島尻郡久米島町	F0以下	停滞前線 暖気の移流
157	竜巻	2010年10月09日18時00分	35度2分34秒	139度59分30秒	千葉県	南房総市	F0	その他(低気圧)
158	竜巻	2010年09月28日09時15分	34度49分20秒	138度19分25秒	静岡県	焼津市	F0	二つ玉低気圧
159	竜巻	2010年09月13日14時20分	26度55分57秒	127度56分32秒	沖縄県	島尻郡伊是名村	F0	太平洋高気圧
160	竜巻	2010年08月11日16時55分	33度32分20秒	133度43分1秒	高知県	香南市	F0	台風 暖気の移流
161	竜巻	2010年07月09日14時40分	33度35分18秒	135度54分36秒	和歌山県	東牟婁郡 那智勝浦町	F0	梅雨前線
162	竜巻	2010年06月25日19時00分	32度14分59秒	131度33分33秒	宮崎県	児湯郡都農町	F0	梅雨前線

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
163	竜巻	2010年04月29日02時00分	33度30分14秒	133度52分26秒	高知県	安芸市	F0	寒冷前線
164	竜巻	2010年02月01日09時30分	31度13分43秒	130度29分55秒	鹿児島県	南九州市	F0	東シ海低気圧 寒冷前線
165	竜巻	2010年02月01日09時10分	31度25分51秒	130度17分2秒	鹿児島県	南さつま市	F0	東シ海低気圧 寒冷前線
166	竜巻	2009年11月13日17時00分	32度10分27秒	131度31分7秒	宮崎県	児湯郡川南町	F0	その他(低気圧)
167	竜巻	2009年11月11日09時00分	34度39分7秒	138度4分11秒	静岡県	掛川市	F0	寒気の移流
168	竜巻	2009年08月08日15時20分	24度51分28秒	125度17分19秒	沖縄県	宮古島市	F0	台風
169	竜巻	2009年07月25日11時00分	33度32分39秒	133度53分40秒	高知県	安芸市	F0	梅雨前線
170	竜巻	2009年03月09日12時30分	26度5分40秒	127度41分35秒	沖縄県	糸満市	F0	寒冷前線
171	竜巻	2008年10月07日12時20分	26度20分0秒	126度48分43秒	沖縄県	島尻郡久米島町	F0未満	停滞前線
172	竜巻	2008年09月21日13時00分	34度9分20秒	134度36分50秒	徳島県	鳴門市	F0未満	停滞前線
173	竜巻	2008年08月16日13時25分	35度37分13秒	140度3分43秒	千葉県	千葉市	F0以下	台風 停滞前線 雷雨(熱雷)
174	竜巻	2008年07月22日17時30分	26度12分7秒	127度45分56秒	沖縄県	島尻郡与那原町	F0未満	気圧の谷

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
175	竜巻	2008年06月29日02時30分	33度30分24秒	133度54分15秒	高知県	安芸市	F0	梅雨前線
176	竜巻	2008年05月01日18時00分	30度31分33秒	130度57分19秒	鹿児島県	熊毛郡中種子町	F0	その他(低気圧)
177	竜巻	2008年04月09日17時00分	31度15分37秒	130度15分50秒	鹿児島県	枕崎市	F0	東シ海低気圧
178	竜巻	2008年04月07日11時20分	32度43分21秒	133度0分30秒	高知県	土佐清水市	F0	その他(低気圧)
179	竜巻	2006年09月25日11時40分	25度51分20秒	131度15分10秒	沖縄県	南大東村	F0	その他
180	竜巻	2003年10月12日04時25分	32度32分49秒	131度40分54秒	宮崎県	延岡市	F0	その他(低気圧)
181	竜巻または ダウンバースト	2002年10月15日21時30分	34度40分8秒	137度59分34秒	静岡県	磐田郡浅羽町,小笠 郡大須賀町,小笠郡 大東町	F0	日本海低気圧 寒冷前線
182	竜巻	2001年05月29日13時00分	35度0分20秒	136度55分5秒	愛知県	東海市	F0	局地性降水
183	竜巻	2001年01月13日07時35分	26度8分43秒	127度41分26秒	沖縄県	糸満市	F0	寒冷前線
184	竜巻	1999年06月30日09時30分	35度9分8秒	138度45分55秒	静岡県	富士市	F0	日本海低気圧 寒冷前線
185	竜巻	1998年10月17日15時00分	32度25分13秒	131度39分49秒	宮崎県	日向市	F0	台風
186	竜巻	1998年02月14日19時55分	24度23分26秒	123度44分55秒	沖縄県	竹富町	F0	寒冷前線

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
187	竜巻	1998年01月14日10時50分	26度10分23秒	127度38分51秒	沖縄県	豊見城村	F0	寒冷前線 暖気の移流
188	竜巻	1997年11月28日09時30分	27度19分45秒	128度33分35秒	鹿児島県	知名町	F0	東シ海低気圧 暖気の移流
189	竜巻	1995年09月23日08時50分	26度24分18秒	127度42分59秒	沖縄県	読谷村	F0	台風
190	竜巻	1994年10月04日17時30分	33度32分8秒	133度40分50秒	高知県	南国市	F0	暖気の移流
191	竜巻	1994年10月04日17時15分	33度32分17秒	133度43分31秒	高知県	香美郡赤岡町	F0	暖気の移流
192	竜巻	1993年01月23日17時30分	24度22分35秒	123度45分11秒	沖縄県	竹富町	F0	停滞前線
193	竜巻	1991年11月28日22時00分	34度22分30秒	139度15分0秒	東京都	新島若郷	F0	南岸低気圧
Fスケール不明の陸上竜巻								
194	竜巻	2012年05月13日12時56分	24度42分42秒	125度19分3秒	沖縄県	(海上)	不明	気圧の谷
195	竜巻または 漏斗雲	2010年08月14日17時20分	26度23分0秒	127度44分0秒	沖縄県	(海上)	不明	太平洋高気圧
196	竜巻	2010年08月04日12時25分	34度33分0秒	137度1分0秒	愛知県	(海上)	不明	暖気の移流
197	竜巻	2009年08月08日15時10分	24度47分0秒	125度16分0秒	沖縄県	宮古島市	不明	台風

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
198	竜巻または 漏斗雲	2008年10月07日12時35分	26度21分5秒	126度49分0秒	沖縄県	(海上)	不明	停滞前線
199	竜巻または 漏斗雲	2008年07月22日17時40分	26度11分54秒	127度46分7秒	沖縄県	島尻郡与那原町付 近	不明	気圧の谷
200	竜巻または 漏斗雲	2008年07月22日17時40分	26度11分54秒	127度46分7秒	沖縄県	島尻郡与那原町付 近	不明	気圧の谷
201	竜巻	2007年10月09日12時30分	32度8分44秒	130度6分16秒	鹿児島県	長島町	不明	東シ海低気圧
202	竜巻または 漏斗雲	2007年09月14日15時05分	32度34分19秒	131度40分28秒	宮崎県	延岡市	不明	台風
203	竜巻	2004年06月01日14時15分	26度17分47秒	127度48分45秒	沖縄県	北中城村	不明	梅雨前線 暖気の移流
204	竜巻	1999年07月03日12時30分	26度34分30秒	127度58分0秒	沖縄県	(海上)	不明	停滞前線 暖気の移流
205	竜巻	1997年05月20日13時30分	33度40分0秒	135度10分0秒	和歌山県	(海上)	不明	南岸低気圧 寒気の移流
206	竜巻	1993年01月07日10時30分	33度47分50秒	135度14分30秒	和歌山県	印南町	不明	南岸低気圧
207	竜巻	1992年11月19日11時10分	32度41分5秒	131度50分33秒	宮崎県	北浦町	不明	不安定線 移動性高気圧
208	竜巻	1991年02月13日18時00分	26度26分4秒	127度46分49秒	沖縄県	国頭郡恩納村	不明	東シ海低気圧 暖気の移流
209	竜巻	1990年09月19日14時00分	34度42分10秒	137度37分40秒	静岡県	浜松市, 舞阪町, 雄 踏町	不明	台風

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
210	竜巻	1972年06月06日20時30分	26度8分40秒	127度41分8秒	沖縄県	糸満市	不明	東シナ海低気圧 暖気の移流
211	竜巻	1971年09月08日02時00分	35度42分0秒	140度43分30秒	千葉県	飯岡町	不明	台風
212	竜巻	1971年08月31日10時50分	35度42分1秒	140度42分11秒	千葉県	飯岡町	不明	台風
213	竜巻	1964年05月24日14時55分	35度37分47秒	139度38分7秒	東京都	世田谷区	不明	寒冷前線 暖気の移流
214	竜巻	2012年05月13日16時57分	24度53分54秒	125度15分27秒	沖縄県	(海上)	不明	気圧の谷
215	竜巻	2012年05月09日08時40分	34度53分50秒	136度48分0秒	愛知県	(海上)	不明	気圧の谷 寒気の移流
216	竜巻	2011年12月04日07時10分	34度49分0秒	139度24分40秒	東京都	(海上)	不明	寒気の移流
217	竜巻	2011年12月04日07時10分	34度49分0秒	139度24分40秒	東京都	(海上)	不明	寒気の移流
218	竜巻	2011年12月04日07時00分	34度49分25秒	139度23分30秒	東京都	(海上)	不明	寒気の移流
219	竜巻	2011年12月04日06時45分	34度47分50秒	139度25分45秒	東京都	(海上)	不明	寒気の移流
220	竜巻または 漏斗雲	2011年11月30日11時08分	26度24分52秒	127度41分54秒	沖縄県	(海上)	不明	停滞前線 気圧の谷
221	竜巻	2011年08月22日16時17分	26度29分0秒	127度49分0秒	沖縄県	(海上)	不明	太平洋高気圧

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
222	竜巻または 漏斗雲	2011年08月22日14時15分	24度51分0秒	125度21分0秒	沖縄県	(海上)	不明	太平洋高気圧
223	竜巻	2011年02月25日17時20分	26度14分0秒	127度39分0秒	沖縄県	(海上)	不明	その他(高気圧)
224	竜巻	2011年02月03日10時00分	26度7分0秒	127度39分0秒	沖縄県	(海上)	不明	気圧の谷
225	竜巻	2010年10月07日17時00分	33度2分48秒	133度8分2秒	高知県	(海上)	不明	その他(高気圧)
226	竜巻	2010年10月02日17時00分	26度22分0秒	126度42分0秒	沖縄県	(海上)	不明	その他(高気圧)
227	竜巻	2010年10月02日15時50分	26度23分0秒	126度43分0秒	沖縄県	(海上)	不明	その他(高気圧)
228	竜巻	2010年09月23日10時05分	33度28分47秒	135度44分45秒	和歌山県	(海上)	不明	停滞前線
229	竜巻	2010年08月18日11時36分	26度25分0秒	127度42分0秒	沖縄県	(海上)	不明	太平洋高気圧
230	竜巻	2010年07月28日16時20分	26度30分0秒	128度1分0秒	沖縄県	(海上)	不明	暖気の移流
231	竜巻または 漏斗雲	2010年07月25日14時45分	26度35分0秒	127度11分0秒	沖縄県	(海上)	不明	太平洋高気圧
232	竜巻	2009年09月15日11時40分	26度26分0秒	127度58分0秒	沖縄県	(海上)	不明	暖気の移流
233	竜巻	2009年08月08日15時30分	24度38分0秒	124度38分0秒	沖縄県	(海上)	不明	台風

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
234	竜巻	2009年07月30日17時50分	26度18分0秒	127度34分0秒	沖縄県	(海上)	不明	その他(高気圧)
235	竜巻	2009年07月06日16時35分	26度35分0秒	127度57分0秒	沖縄県	(海上)	不明	暖気の移流
236	竜巻または 漏斗雲	2009年07月06日18時54分	24度18分16秒	124度3分2秒	沖縄県	石垣市	不明	暖気の移流
237	竜巻	2009年06月26日13時10分	26度14分24秒	127度39分3秒	沖縄県	(海上)	不明	梅雨前線
238	竜巻または 漏斗雲	2009年02月26日11時50分	24度55分27秒	125度16分4秒	沖縄県	(海上)	不明	その他(高気圧)
239	竜巻	2008年11月08日10時25分	25度47分38秒	131度16分25秒	沖縄県	(海上)	不明	気圧の谷
240	竜巻	2008年11月03日11時55分	34度15分0秒	134度30分0秒	徳島県	(海上)	不明	その他(前線) 寒気の移流
241	竜巻	2008年10月27日16時00分	35度15分20秒	140度25分40秒	千葉県	(海上)	不明	寒気の移流
242	竜巻	2008年10月27日15時50分	35度15分20秒	140度25分40秒	千葉県	(海上)	不明	寒気の移流
243	竜巻	2008年10月27日15時50分	35度15分20秒	140度25分30秒	千葉県	(海上)	不明	寒気の移流
244	竜巻	2008年10月27日15時40分	35度15分20秒	140度25分20秒	千葉県	(海上)	不明	寒気の移流
245	竜巻	2008年10月27日15時30分	35度15分20秒	140度25分0秒	千葉県	(海上)	不明	寒気の移流

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
246	竜巻または 漏斗雲	2008年10月10日17時20分	26度5分38秒	127度43分38秒	沖縄県	糸満市	不明	気圧の谷
247	竜巻	2008年10月07日11時30分	26度20分0秒	126度49分0秒	沖縄県	(海上)	不明	停滞前線
248	竜巻	2008年10月07日11時00分	26度16分0秒	126度49分0秒	沖縄県	(海上)	不明	停滞前線
249	竜巻	2008年08月26日14時12分	28度24分0秒	129度45分0秒	鹿児島県	(海上)	不明	暖気の移流
250	竜巻	2008年08月16日13時45分	35度36分57秒	140度3分20秒	千葉県	(海上)	不明	台風 停滞前線 雷雨(熱雷)
251	竜巻	2008年08月08日16時45分	24度21分8秒	124度7分13秒	沖縄県	石垣市	不明	その他(低気圧)
252	竜巻または 漏斗雲	2008年08月08日13時40分	26度15分0秒	127度31分0秒	沖縄県	(海上)	不明	その他(低気圧)
253	竜巻	2008年07月22日17時40分	26度11分54秒	127度47分10秒	沖縄県	(海上)	不明	気圧の谷
254	竜巻	2008年07月22日17時08分	26度11分6秒	127度47分8秒	沖縄県	(海上)	不明	気圧の谷
255	竜巻	2008年07月22日17時05分	26度11分6秒	127度47分8秒	沖縄県	(海上)	不明	気圧の谷
256	竜巻	2008年07月07日09時30分	26度11分46秒	127度58分7秒	沖縄県	(海上)	不明	太平洋高気圧
257	竜巻	2008年07月03日15時00分	26度30分2秒	128度0分1秒	沖縄県	(海上)	不明	太平洋高気圧 気圧の谷

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
258	竜巻または 漏斗雲	2008年05月27日13時00分	24度52分35秒	125度20分14秒	沖縄県	(海上)	不明	気圧の谷
259	竜巻または 漏斗雲	2008年05月27日12時30分	24度55分7秒	125度19分31秒	沖縄県	(海上)	不明	気圧の谷
260	竜巻	2008年05月27日11時41分	24度52分39秒	125度18分42秒	沖縄県	(海上)	不明	気圧の谷
261	竜巻	2008年05月19日16時50分	34度36分44秒	137度1分14秒	愛知県	(海上)	不明	気圧の谷 南岸低気圧
262	竜巻または 漏斗雲	2008年04月23日16時23分	34度39分43秒	137度24分43秒	愛知県	豊橋市	不明	気圧の谷
263	竜巻	2008年03月25日21時04分	35度16分57秒	139度31分36秒	神奈川県	(海上)	不明	気圧の谷 寒気の移流
264	竜巻	2008年03月25日20時57分	35度15分40秒	139度29分57秒	神奈川県	(海上)	不明	気圧の谷 寒気の移流
265	竜巻	2008年03月25日20時53分	35度18分16秒	139度26分34秒	神奈川県	(海上)	不明	気圧の谷 寒気の移流
266	竜巻	2007年10月14日12時55分	34度32分35秒	137度0分30秒	三重県	(海上)	不明	停滞前線 気圧の谷
267	竜巻または 漏斗雲	2007年10月09日16時00分	32度4分8秒	130度8分23秒	鹿児島県	(海上)	不明	東シ海低気圧
268	竜巻	2007年10月09日14時00分	32度9分12秒	130度5分33秒	鹿児島県	(海上)	不明	東シ海低気圧
269	竜巻	2007年09月25日16時45分	26度7分48秒	127度35分24秒	沖縄県	(海上)	不明	気圧の谷 熱帯低気圧(台風以外)

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
270	竜巻または 漏斗雲	2007年09月02日13時02分	24度19分29秒	124度16分44秒	沖縄県	(海上)	不明	太平洋高気圧 雷雨(熱雷)
271	竜巻または 漏斗雲	2007年08月29日13時40分	26度3分29秒	127度40分48秒	沖縄県	(海上)	不明	その他(高気圧) 気圧の谷
272	竜巻または 漏斗雲	2007年08月29日13時25分	26度5分6秒	127度38分6秒	沖縄県	(海上)	不明	その他(高気圧) 気圧の谷
273	竜巻	2007年08月28日17時30分	26度40分12秒	128度3分36秒	沖縄県	(海上)	不明	雷雨(熱雷)
274	竜巻	2007年08月28日15時40分	26度20分40秒	127度56分0秒	沖縄県	(海上)	不明	雷雨(熱雷)
275	竜巻	2007年07月30日10時00分	24度29分57秒	122度55分11秒	沖縄県	(海上)	不明	気圧の谷
276	竜巻	2007年05月31日17時30分	35度13分0秒	139度51分0秒	千葉県	(海上)	不明	雷雨(熱雷を除く) 寒気の移流
277	竜巻	2006年11月06日12時00分	33度42分0秒	135度20分0秒	和歌山県	(海上)	不明	日本海低気圧
278	竜巻	2006年09月19日17時30分	33度29分33秒	133度34分14秒	高知県	(海上)	不明	寒気の移流
279	竜巻	2006年08月29日14時16分	26度40分0秒	127度52分30秒	沖縄県	(海上)	不明	気圧の谷
280	竜巻	2006年08月28日15時50分	26度26分49秒	128度1分56秒	沖縄県	(海上)	不明	太平洋高気圧
281	竜巻	2003年01月11日15時40分	33度5分25秒	139度43分19秒	東京都	(海上)	不明	気圧の谷

No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
282	竜巻	2001年08月04日15時27分	26度21分52秒	126度41分12秒	沖縄県	(海上)	不明	気圧の谷
283	竜巻	2001年08月04日15時00分	26度21分52秒	126度41分12秒	沖縄県	(海上)	不明	気圧の谷
284	竜巻	2001年07月09日17時59分	24度49分39秒	125度7分44秒	沖縄県	(海上)	不明	気圧の谷
285	竜巻	2001年07月08日16時14分	24度46分54秒	125度14分41秒	沖縄県	(海上)	不明	気圧の谷
286	竜巻	2000年08月07日17時55分	35度32分30秒	140度0分52秒	千葉県	(海上)	不明	雷雨(熱雷)
287	竜巻	1999年11月02日16時40分	34度55分40秒	138度23分50秒	静岡県	静岡市	不明	その他(前線) 寒気の移流
288	竜巻	1999年08月12日10時18分	26度21分40秒	126度41分12秒	沖縄県	(海上)	不明	気圧の谷
289	竜巻	1999年07月21日11時20分	26度6分3秒	127度38分19秒	沖縄県	(海上)	不明	熱帯低気圧(台風以外)
290	竜巻	1998年09月24日17時27分	26度9分1秒	127度38分41秒	沖縄県	(海上)	不明	気圧の谷
291	竜巻	1998年04月18日13時15分	32度59分50秒	133度2分2秒	高知県	(海上)	不明	南岸低気圧
292	竜巻	1997年09月06日15時30分	33度14分37秒	134度13分20秒	高知県	(海上)	不明	停滞前線 暖気の移流
293	竜巻	1997年05月03日10時50分	26度6分30秒	127度32分30秒	沖縄県	(海上)	不明	寒冷前線

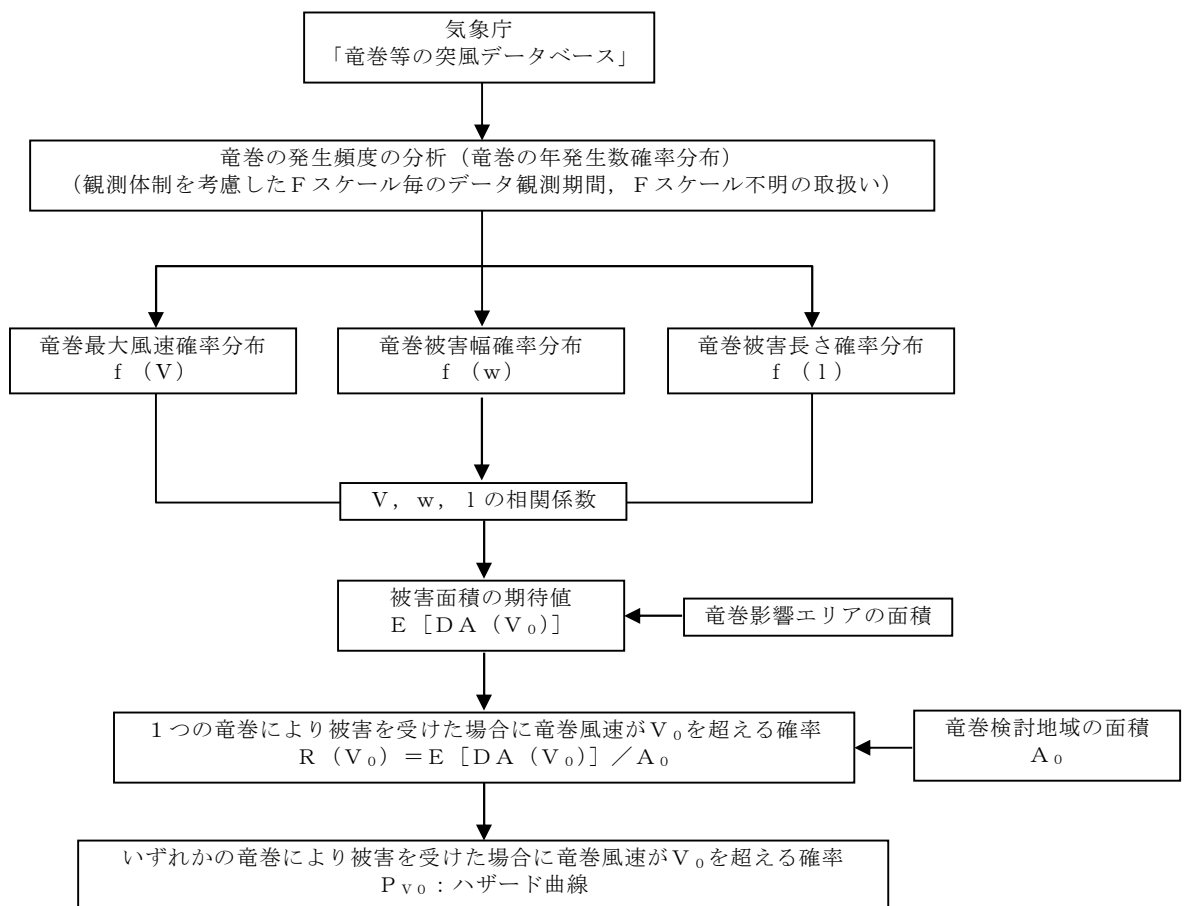
No.	現象 区別	発生日時	発生場所				藤田 スケール	総観場
			緯度	経度	都道府県	市町村		
294	竜巻	1994年10月04日17時05分	33度31分15秒	133度41分47秒	高知県	(海上)	不明	暖気の移流
295	竜巻	1994年10月04日17時05分	33度31分8秒	133度41分30秒	高知県	(海上)	不明	暖気の移流
296	竜巻	1994年10月04日17時05分	33度31分17秒	133度42分9秒	高知県	(海上)	不明	暖気の移流
297	竜巻	1992年05月17日14時33分	26度21分49秒	126度41分8秒	沖縄県	(海上)	不明	東シ海低気圧 暖気の移流
298	竜巻	1992年04月15日16時55分	33度33分30秒	135度25分0秒	和歌山県	日置川町	不明	寒冷前線
299	竜巻	1992年03月31日14時55分	26度26分0秒	127度56分0秒	沖縄県	(海上)	不明	東シ海低気圧 暖気の移流
300	竜巻	1971年08月31日07時15分	35度3分51秒	140度6分7秒	千葉県	鴨川市	不明	台風

竜巻最大風速のハザード計算について

1. 評価フロー

「竜巻影響評価ガイド」⁽¹⁾の解説 3.3.2 に例示された Wen & Chu⁽²⁾及び Garsonet al.⁽³⁾⁽⁴⁾による方法に沿って、竜巻最大風速のハザード曲線を算定し、ハザード曲線による最大風速 V_{B2} を算定する。具体的な算定方法については、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「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽⁵⁾を参考とする。

第1-1図に算定フローを示す。



第1-1図 ハザード曲線の算定フロー

2. 竜巻の発生頻度の分析

竜巻についての過去の観測データは少なく、また、観測年代によって精度が異なる。そこで、下記のとおり、観測データの補正を行い、年発生数の確率分布に供する統計データを推定する。

(1) 適用データ

気象庁「竜巻等の突風データベース」⁽⁶⁾より、竜巻検討地域における 1961 年 1 月から 2012 年 6 月の竜巻のデータを用いる。

(2) 竜巻の発生頻度の補正

「竜巻等の突風データベース」は 1961 年以降に観測された竜巻がデータベース化されているが、観測体制が段階的に強化された結果、特に 2007 年以降のデータにおいては発生数が非常に多く、海上竜巻の増加も顕著である。そこで、観測体制が強化されたことによる補正を以下のとおり行い、疑似 51.5 年間の統計量を評価する。

a. ハザード曲線評価に用いるデータの観測期間を以下の(a)～(c)の3期間に分ける。

(a) 2007 年 1 月～2012 年 6 月 (5.5 年間)

(b) 1991 年 1 月～2012 年 6 月 (21.5 年間)

(c) 1961 年 1 月～2012 年 6 月 (51.5 年間)

b. 次に、各年代において F スケール毎に、統計量（竜巻発生数、年間平均発生数、標準偏差）を算定する。

c. F 0 及び F スケール不明の竜巻については、観測体制が強化される以前は見過ごされた可能性が大きいことから、観測体制が強化された 2007 年以降の統計量を基にする。

d. F 1 の竜巻については、1991 年以降の年間発生数がそれ以前の 30 年間の発生数を明らかに上回ることから、1991 年以降の統計量を基にする。

- e. F 2以上の竜巻については、見逃されることが少なかったとして、1961年以降の全期間の統計量を基にする。
- f. 51.5年間の発生数を、(a)～(c)の観測期間との比率からFスケール毎に推計する。
- g. 海上竜巻でFスケール不明の場合、被害痕跡等が残っていないため、そのFスケールを推定することは難しい。そこで、沿岸部近傍では竜巻の発生状況については陸上と海上で変わらないと仮定し、「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、陸上竜巻（上陸竜巻含む）でのFスケール別発生比率で按分し、各Fスケールで発生した竜巻に加える。【添付資料5 別紙1】
- 一方、Fスケール不明の陸上竜巻は、痕跡等が残らないほど小さかったとし、F 0相当の竜巻であったとする。

竜巻検討地域について、発生数に関する統計量の算定結果を第2-1表に示す。竜巻検討地域において51.5年間に300個の竜巻が観測されたことに対し、1188個の竜巻が発生したと推定した。

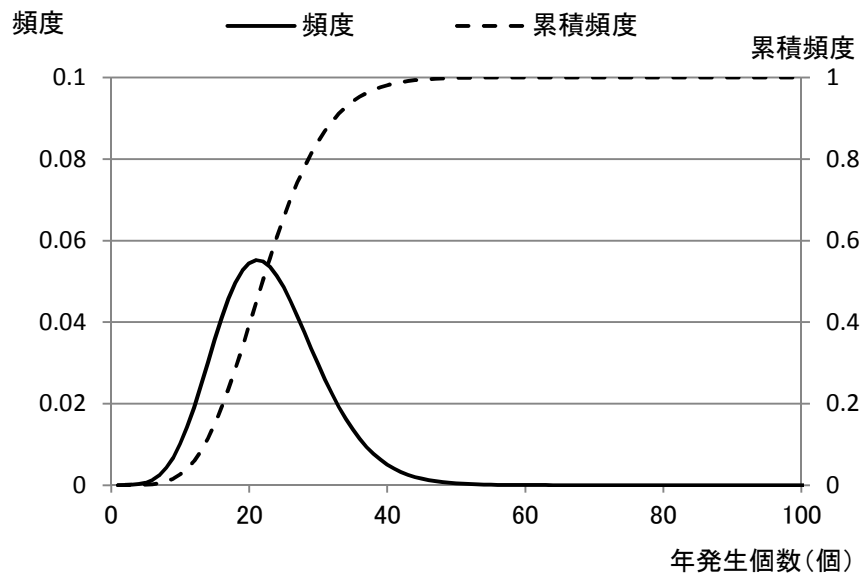
第2-1表 竜巻発生数の分析結果

		F3	F2	F1	F0	小計	陸上不明	海上不明	合計	
過去に観測された竜巻	1961.1-2012.6 51.5年間	期間内個数	6	41	100	46	193	20	87	300
		平均値(個/年)	0.12	0.80	1.94	0.89	3.75	0.39	1.69	5.83
		標準偏差(個/年)	0.32	0.94	1.96	2.17	3.25	0.69	4.35	7.26
	1991.1-2012.6 21.5年間	期間内個数	1	15	72	46	134	15	86	235
		平均値(個/年)	0.05	0.70	3.35	2.14	6.23	0.70	4.00	10.93
		標準偏差(個/年)	0.22	0.78	2.03	2.96	3.24	0.84	6.08	8.81
	2007.1-2012.6 5.5年間	期間内個数	0	1	12	31	44	9	63	116
		平均値(個/年)	0.00	0.18	2.18	5.64	8.00	1.64	11.45	21.09
		標準偏差(個/年)	0.00	0.43	1.99	4.17	4.16	0.97	8.32	11.75

		F3	F2	F1	F0	計	
疑似51.5年間の竜巻	疑似51.5年間 (陸上竜巻)	期間内個数	6	41	173	376	596
		平均値(個/年)	0.12	0.80	3.36	7.30	11.57
		標準偏差(個/年)	0.32	0.94	2.03	4.74	5.25
	疑似51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	12	82	345	749	1188
		平均値(個/年)	0.23	1.59	6.70	14.54	23.07
		標準偏差(個/年)	0.46	1.33	2.87	6.69	7.42

(3) 年発生数の確率密度分布の設定

竜巻の年発生数の確率密度分布の設定に当たっては、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)が大きいことから、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の記録等に基づき平均値と標準偏差を評価し、「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」の成果を参考とし、第2-1図に示すポリヤ分布とした。



第 2-1 図 竜巻の年発生数の確率密度分布（ポリヤ分布）

3. 竜巻の被害幅、被害長さの分析

被害幅及び被害長さについても発生数と同様に疑似 51.5 年間の統計量を基にする。被害幅及び被害長さの分析に利用可能なデータ数は、竜巻発生数評価時のデータ数に比べて少ない。そこで、先に作成した疑似 51.5 年間の竜巻発生数と対応した被害幅及び被害長さの統計量の分析は、以下の手順で行った。

Step1：基となる観測データ数を確保するために、1961 年以降の被害幅及び被害長さのデータを基にする。そのデータを F スケール毎に仕分ける。

Step2：各 F スケールに対し、上記で抽出された被害幅や被害長さのデータを大きい順に並び替え、51.5 年間の発生数分だけ繰り返しサンプリングを行い、疑似 51.5 年間のデータとする。例えば、被害幅が観測されている 7 個のデータを大きい順から並べたものを 7 回繰り返し、計 49 個のデータを作成する。

Step3：疑似 51.5 年間のデータについて、統計量（平均値及び標準偏差）を求める。

第 3-1 表、第 3-2 表に、疑似 51.5 年間のデータを基に評価した被害幅及び被害長さの統計量を示す。

第 3-1 表 被害幅の統計量

		F3	F2	F1	F0	計
1961.1-2012.6 51.5 年間 観測値	期間内個数	6	36	84	37	163
	平均値 (m)	525	206	115	55	137
	標準偏差 (m)	741	367	173	45	265
疑似 51.5 年間	期間内個数	12	82	345	749	1188
	平均値 (m)	525	250	124	56	94
	標準偏差 (m)	706	408	187	45	179

第 3-2 表 被害長さの統計量

		F3	F2	F1	F0	計
1961.1-2012.6 51.5 年間 観測値	期間内個数	6	38	88	38	170
	平均値 (km)	14	5.02	2.38	1.17	3.11
	標準偏差 (km)	15	4.55	3.03	0.98	4.70
疑似 51.5 年間	期間内個数	12	82	345	749	1188
	平均値 (km)	14	5.63	2.43	1.18	1.98
	標準偏差 (km)	14	4.94	3.03	0.97	3.10

4. 竜巻風速、被害幅及び被害長さの確率密度分布及び相関係数

(1) 最大風速、被害幅及び被害長さの確率密度分布

最大風速、被害幅及び被害長さは、前記で評価した統計量を有する対数正規分布に従うものとする。第 4-1 表に統計量を示す。それぞれが独立であるとした場合の確率密度分布について、第 4-1 図～第 4-6 図に示す。

最大風速の超過確率は、観測結果がトレースでき、風速の大きいエリアにおいても不自然な形となっていないことが確認できる。竜巻の被害幅及び長さの超過確率からは、観測結果を概ねトレースしていることが確認できる。

(2) 最大風速、被害幅及び被害長さの相関係数

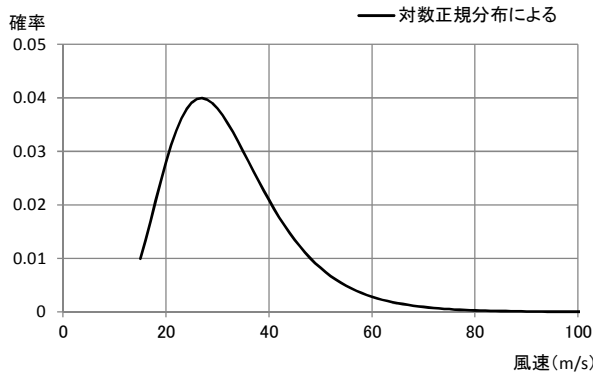
相関係数は、過去に発生した竜巻の最大風速、被害幅及び被害長さの関係を評価することから、繰り返しサンプリングを行った推定 51.5 年間ではなく、観測データを基に、その対数値の相関係数を算出した。観測データのみを用いるのは、F スケール不明や F 0 の竜巻では、被害規模が小さいために、被害幅や被害長さの観測データが F 2、F 3 の竜巻と比べ観測値として示されている場合が少なく、そのようなデータを繰り返しサンプリングにより増やすと、F 2、F 3 の竜巻で見られる相関性が反映されない結果が懸念されるためである。

また、相関係数を算出する際には、竜巻の最大風速、被害幅及び被害長さの 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であるが、3 変量が揃っているデータは少ないので、データ数を極力確保することを目的として、例えば最大風速と被害幅のみが観測されている等、少なくとも 2 変量の比較が行えるデータを用いた。

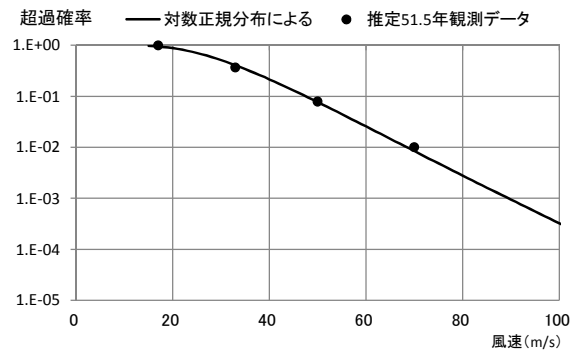
相関係数の算出結果を、第 4-2 表に示す。

第 4-1 表 発生数、被害幅及び被害長さの統計量

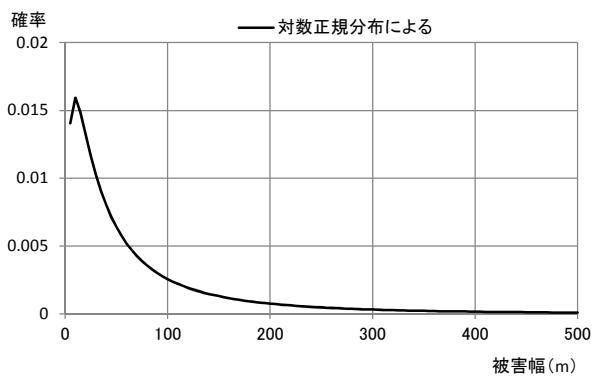
			F3	F2	F1	F0	計
疑似 51.5 年間	発生数	期間内個数	12	82	345	749	1188
		平均値 (個/年)	0.23	1.59	6.70	14.54	23.07
		標準偏差 (個/年)	0.46	1.33	2.87	6.69	7.42
	被害幅	期間内個数	12	82	345	749	1188
		平均値 (m)	525	250	124	56	94
		標準偏差 (m)	706	408	187	45	179
	被害長さ	期間内個数	12	82	345	749	1188
		平均値 (km)	14	5.63	2.43	1.18	1.98
		標準偏差 (km)	14	4.94	3.03	0.97	3.10



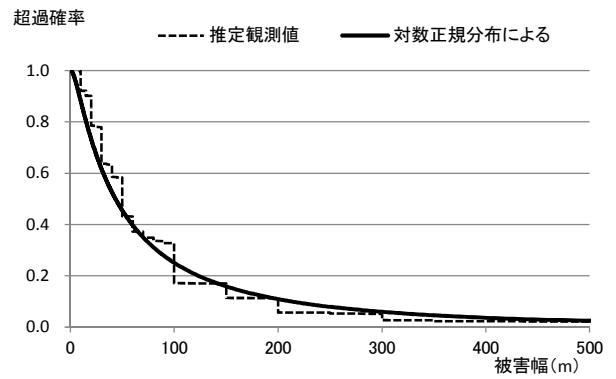
第 4-1 図 最大風速の確率密度分布



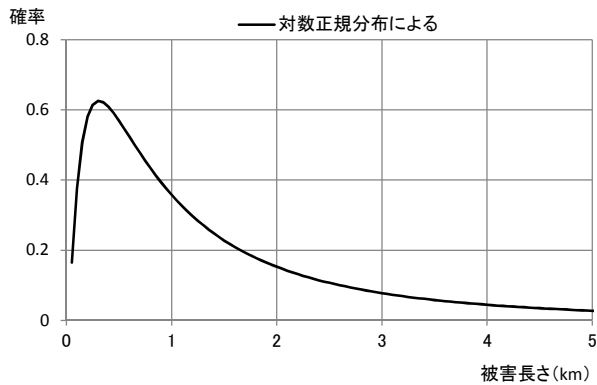
第 4-2 図 最大風速の超過確率



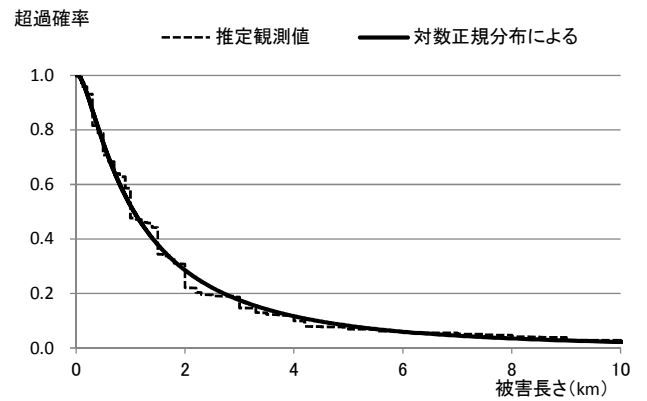
第 4-3 図 被害幅の確率密度分布



第 4-4 図 被害幅の超過確率



第 4-5 図 被害長さの確率密度分布



第 4-6 図 被害長さの超過確率

第 4-2 表 最大風速，被害幅及び被害長さの対数値の相関係数

相関係数の値	最大風速	被害幅	被害長さ
最大風速	1.000	0.381	0.452
被害幅	—	1.000	0.381
被害長さ	—	—	1.000

5. 竜巻影響エリアの設定

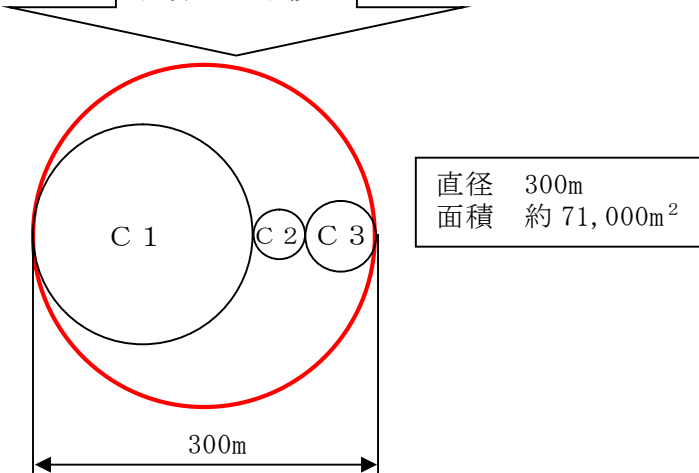
東海第二発電所の構築物，系統及び機器のうち，竜巻防護施設を包絡する円形領域を竜巻影響エリアとして設定した。竜巻影響エリアを第5-1図に示す。

なお，竜巻影響エリアは，原子炉建屋周辺，海水ポンプ室及び使用済燃料乾式貯蔵建屋が離れているため，それぞれをまず直径188m，直径44m及び直径60mの円形領域に包絡させ，さらにこれらの領域を包絡させた直径300mの円形領域(面積約71,000m²)として設定した。

また，竜巻影響エリアを円形としたため，ハザード計算において竜巻の移動方向に対する依存性は生じない。



計算上の取扱い



第5-1図 竜巻影響エリア

6. ハザード曲線の算定方法

前記で設定した竜巻の年発生数の確率分布及び最大風速の確率分布をもとに、以下に示すとおり「竜巻影響評価ガイド」の解説 3.3.2 に例示された Wen & Chu 及び Garson et al. の方法に沿って、ハザード曲線を算定する。

(1) 評価方法

D を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し、ある竜巻が評価対象構造物を襲い、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率を $R(V_0)$ とする。また、ある竜巻の風速が V_0 以上となる面積を $DA(V_0)$ とする。また、その期待値を $E[DA(V_0)]$ にて表す。

a. 前記に基づき、竜巻の最大風速 V 、被害幅 w 及び被害長さ l の統計値から、次式のと対数正規分布型の確率分布を与える。

$$f(V, w, l) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 |\Sigma|^{1/2}} \frac{1}{Vwl} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \Sigma^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})\right)$$

$$\text{ここで、 } \mathbf{x} = \begin{Bmatrix} \ln(V) \\ \ln(w) \\ \ln(l) \end{Bmatrix}, \quad \boldsymbol{\mu} = \begin{Bmatrix} \mu_V \\ \mu_w \\ \mu_l \end{Bmatrix}, \quad \Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_V^2 & \sigma_V \sigma_w \rho_{Vw} & \sigma_V \sigma_l \rho_{Vl} \\ \sigma_V \sigma_w \rho_{Vw} & \sigma_w^2 & \sigma_w \sigma_l \rho_{wl} \\ \sigma_V \sigma_l \rho_{Vl} & \sigma_w \sigma_l \rho_{wl} & \sigma_l^2 \end{bmatrix}$$

\mathbf{x} は最大風速、被害幅及び被害長さの対数値 $\ln(V)$ 、 $\ln(w)$ 、 $\ln(l)$ によるベクトル、 $\boldsymbol{\mu}$ は各統計値から評価した最大風速、被害幅及び被害長さの対数値の平均からなるベクトル、 Σ は $\ln(V)$ 、 $\ln(w)$ 、 $\ln(l)$ から評価した標準偏差 σ_V 、 σ_w 、 σ_l と相関係数 ρ_{Vw} 、 ρ_{wl} 、 ρ_{Vl} からなる分散共分散行列である。

b. 被災領域内には、竜巻の被害幅のうち風速が V_0 を超える部分の幅を与える次式を考慮する。

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

ここで、 V_{\min} は、Gale intensity と呼ばれ (Gale は「非常に強い風」という意味)、被害が発生し始める風速に位置づけられる。米国気象局 NWS (National Weather Service) では、34~47ノット (17.5~24.2 m/s) とされ、また、気象庁が使用している風力階級では、風力9は大強風 (strong gale : 20.8~24.4 m/s) と分類され、「屋根瓦が飛ぶ。人家に被害が出始める。」とされていることを参考に、 $V_{\min} = 25 \text{ m/s}$ とした。なお、この値は F 0 (17~32 m/s) のほぼ中央値に相当する。

c. 得られた平均と分散共分散行列を基に、竜巻影響エリアの代表幅 D_0 を考慮し、次式にて、被災面積期待値 $E[DA(V_0)]$ を算定する。なお、竜巻影響エリアが円形のため、以下の式にて表わされる。

$$E[DA(V_0)] = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl + D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty l f(V, l) dV dl + D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw + S \int_0^\infty f(V) dV$$

ここで、 D_0 は竜巻影響エリアの代表幅

s は竜巻影響エリアの面積 ($= \pi D_0^2 / 4$)

$f(V, l)$, $f(V, w)$, $f(V)$ は $f(V, w, l)$ をもとに各成分を抽出した関数

d. 竜巻検討地域の面積 A_0 及び上記の被災面積期待値 $E[DA(V_0)]$ から、評価対象構造物が竜巻による被害を受け、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率 $R(V_0)$ を次式にて算定する。

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

e. 評価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、かつ竜巻風速が V_0 以上となる確率 P_{V_0} を算定する。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。【添付資料 5 別紙 2】

ポリヤ分布は次式で示される。

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

ここで、 N : 竜巻の年発生数

ν : 竜巻の年平均発生数

T : 年数

β は分布パラメータであり次式で示される。

$$\beta = (\sigma^2 - \nu) / \nu^2$$

ここで、 σ : 竜巻の年発生数の標準偏差

なお、年被災確率は十分小さいので、Garson et al. が示す以下の近似式を用いると、評価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、かつ竜巻風速が V_0 以上となる確率 P_{V_0} は次式にて算定できる。

$$P_{V_0} = 1 - [1 + \beta \nu R(V_0)]^{-1/\beta} = 1 - [1 - \frac{1}{\beta} (\beta \nu R(V_0)) + \dots]$$
$$\approx \nu R(V_0) = \frac{\nu}{A_0} E[DA(V_0)] = p E[DA(V_0)]$$

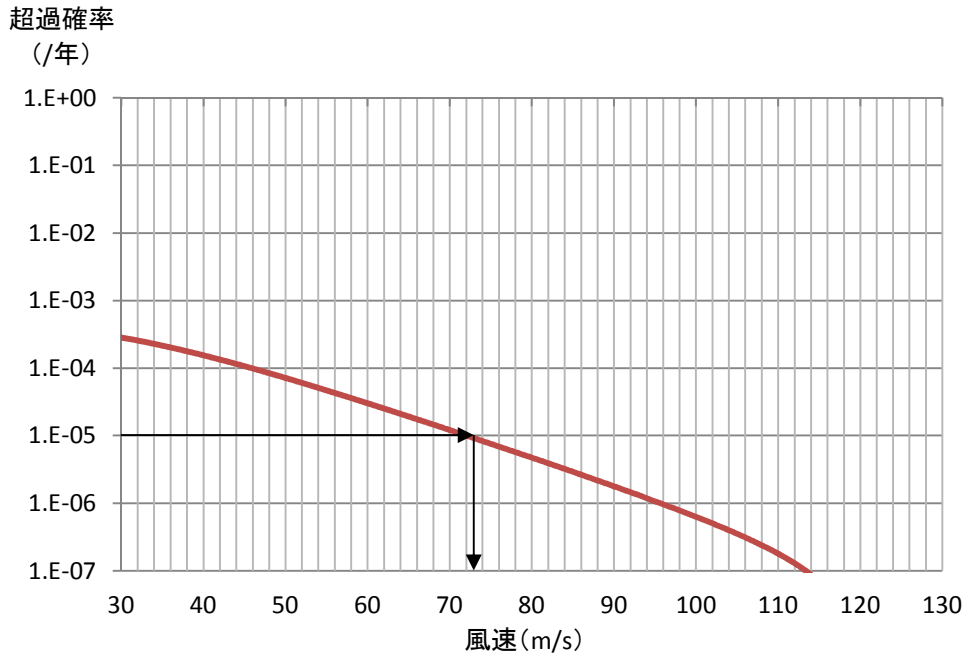
ここで、 p は単位面積当たりの年被災確率

7. 竜巻最大風速のハザード曲線

算出したハザード曲線を、第7-1図に示す。

得られたハザード曲線より、年超過確率 10^{-5} での風速を読み取り、ハザード曲線による最大風速を以下とする。

竜巻検討地域全域（10 km幅）でのハザード曲線による最大風速：73m/s



第 7-1 図 竜巻検討地域全域（10 km幅）でのハザード曲線

竜巻検討地域全域（10 km幅）に加え、「竜巻影響評価ガイド」解説 3.3.2 では、少なくとも 1km 幅毎に竜巻の年発生数の確率分布を算定するとしている。ここでは、ハザード曲線の保守性を持たせるために、竜巻検討地域を 1 km幅に細分化した場合について算定した。

なお、海側の 1km 以遠については、全てが F スケール不明であるため、ハザード曲線の算定は不可能である。

算定に用いた諸元を第 7-1 表から第 7-6 表に示す。相関係数は、全て竜巻検討地域全域（10 km幅）内で発生した竜巻で評価した第 4-2 表の値とする。

算定したハザード曲線を、竜巻検討地域全域（10 km幅）でのハザード曲線と重ね、第 7-2 図に示す。

得られたハザード曲線において、年超過確率 10^{-5} での風速値を読み取り、第 7-7 表にあわせて示す。

第7-1表 海側1-0kmでの統計量

(a) 発生数

			F3	F2	F1	F0	小計	陸上不明	海上不明	合計
過去に観測された竜巻	1961.1-2012.6 51.5年間	期間内個数	1	12	30	10	53	8	28	89
		平均値(個/年)	0.02	0.23	0.58	0.19	1.03	0.16	0.54	1.73
		標準偏差(個/年)	0.14	0.47	1.04	0.63	1.48	0.37	1.55	2.79
	1991.1-2012.6 21.5年間	期間内個数	0	5	24	10	39	7	27	73
		平均値(個/年)	0.00	0.23	1.12	0.47	1.81	0.33	1.26	3.40
		標準偏差(個/年)	0.00	0.53	1.31	0.92	1.88	0.48	2.22	3.65
	2007.1-2012.6 5.5年間	期間内個数	0	0	5	7	12	3	18	33
		平均値(個/年)	0.00	0.00	0.91	1.27	2.18	0.55	3.27	6.00
		標準偏差(個/年)	0.00	0.00	1.37	1.50	2.57	0.55	3.74	5.91

			F3	F2	F1	F0	計
疑似51.5年間の竜巻	疑似51.5年間 (陸上竜巻)	期間内個数	1	12	58	95	166
		平均値(個/年)	0.02	0.23	1.13	1.84	3.22
		標準偏差(個/年)	0.14	0.47	1.31	1.80	2.28
	疑似51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	3	25	118	192	338
		平均値(個/年)	0.06	0.49	2.29	3.73	6.56
		標準偏差(個/年)	0.24	0.68	1.87	2.55	3.25

(b) 被害幅

		F3	F2	F1	F0	計
1961.1-2012.6 51.5年間	期間内個数	1	11	27	6	45
	平均値(m)	2000	133	100	38	142
	標準偏差(m)	0	77	124	38	303
疑似51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	3	25	118	192	338
	平均値(m)	2000	145	108	38	88
	標準偏差(m)	0	79	129	35	203

(c) 被害長さ

		F3	F2	F1	F0	計
1961.1-2012.6 51.5年間	期間内個数	1	12	29	9	51
	平均値(km)	8	0.91	0.59	0.24	0.75
	標準偏差(km)	0	1.71	0.67	0.33	1.43
疑似51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	3	25	118	192	338
	平均値(km)	8	1.09	0.61	0.25	0.51
	標準偏差(km)	0	1.88	0.69	0.31	1.02

※ 被害長さの統計量は、各竜巻の発生地点と消滅地点をもとに1km幅に掛かる長さをもとに評価

第7-2表 陸側0-1kmでの統計量

(a) 発生数

			F3	F2	F1	F0	小計	陸上不明	海上不明	合計
過去に観測された竜巻	1961.1-2012.6 51.5年間	期間内個数	4	34	75	33	146	16	0	162
		平均値(個/年)	0.08	0.66	1.46	0.64	2.83	0.31	0.00	3.15
		標準偏差(個/年)	0.27	0.93	1.71	1.58	2.47	0.65	0.00	2.86
	1991.1-2012.6 21.5年間	期間内個数	0	11	55	33	99	14	0	113
		平均値(個/年)	0.00	0.51	2.56	1.53	4.60	0.65	0.00	5.26
		標準偏差(個/年)	0.00	0.81	1.88	2.17	2.45	0.79	0.00	2.92
	2007.1-2012.6 5.5年間	期間内個数	0	0	10	23	33	8	0	41
		平均値(個/年)	0.00	0.00	1.82	4.18	6.00	1.45	0.00	7.45
		標準偏差(個/年)	0.00	0.00	1.87	2.70	2.79	0.98	0.00	3.63

			F3	F2	F1	F0	計
疑似51.5年間の竜巻	疑似51.5年間 (陸上竜巻)	期間内個数	4	34	132	291	461
		平均値(個/年)	0.08	0.66	2.56	5.65	8.95
		標準偏差(個/年)	0.27	0.93	1.88	3.13	3.78
	疑似51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	4	34	132	291	461
		平均値(個/年)	0.08	0.66	2.56	5.65	8.95
		標準偏差(個/年)	0.27	0.93	1.88	3.13	3.78

(b) 被害幅

		F3	F2	F1	F0	計
1961.1-2012.6 51.5年間	期間内個数	4	29	66	27	126
	平均値(m)	613	116	126	62	114
	標準偏差(m)	926	106	190	49	207
疑似51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	4	34	132	291	461
	平均値(m)	613	143	126	63	92
	標準偏差(m)	926	126	190	48	148

(c) 被害長さ

		F3	F2	F1	F0	計
1961.1-2012.6 51.5年間	期間内個数	4	31	67	28	130
	平均値(km)	3	1.54	1.02	0.76	1.18
	標準偏差(km)	3	1.43	0.93	0.59	1.16
疑似51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	4	34	132	291	461
	平均値(km)	3	1.84	1.03	0.78	0.95
	標準偏差(km)	3	1.75	0.93	0.59	0.93

※ 被害長さの統計量は、各竜巻の発生地点と消滅地点をもとに1km幅に掛かる長さをもとに評価

第7-3表 陸側1-2kmでの統計量

(a) 発生数

			F3	F2	F1	F0	小計	陸上不明	海上不明	合計
過去に観測された竜巻	1961.1-2012.6 51.5年間	期間内個数	4	19	42	16	81	3	0	84
		平均値(個/年)	0.08	0.37	0.82	0.31	1.57	0.06	0.00	1.63
		標準偏差(個/年)	0.27	0.63	1.01	1.17	1.60	0.24	0.00	1.62
	1991.1-2012.6 21.5年間	期間内個数	0	6	30	16	52	1	0	53
		平均値(個/年)	0.00	0.28	1.40	0.74	2.42	0.05	0.00	2.47
		標準偏差(個/年)	0.00	0.46	1.13	1.74	1.85	0.22	0.00	1.85
	2007.1-2012.6 5.5年間	期間内個数	0	0	6	13	19	1	0	20
		平均値(個/年)	0.00	0.00	1.09	2.36	3.45	0.18	0.00	3.64
		標準偏差(個/年)	0.00	0.00	0.57	2.99	2.88	0.43	0.00	2.80

			F3	F2	F1	F0	計
疑似51.5年間の竜巻	疑似51.5年間 (陸上竜巻)	期間内個数	4	19	72	132	227
		平均値(個/年)	0.08	0.37	1.40	2.56	4.41
		標準偏差(個/年)	0.27	0.63	1.13	3.11	3.38
	疑似51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	4	19	72	132	227
		平均値(個/年)	0.08	0.37	1.40	2.56	4.41
		標準偏差(個/年)	0.27	0.63	1.13	3.11	3.38

(b) 被害幅

		F3	F2	F1	F0	計
1961.1-2012.6 51.5年間	期間内個数	4	19	40	14	77
	平均値(m)	613	163	140	54	155
	標準偏差(m)	926	234	233	42	297
疑似51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	4	19	72	132	227
	平均値(m)	613	163	153	56	105
	標準偏差(m)	926	234	241	41	205

(c) 被害長さ

		F3	F2	F1	F0	計
1961.1-2012.6 51.5年間	期間内個数	4	19	40	12	75
	平均値(km)	1	1.29	0.94	0.85	1.03
	標準偏差(km)	0	1.00	0.89	0.50	0.86
疑似51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	4	19	72	132	227
	平均値(km)	1	1.29	1.03	0.85	0.95
	標準偏差(km)	0	1.00	0.89	0.48	0.70

※ 被害長さの統計量は、各竜巻の発生地点と消滅地点をもとに1km幅に掛かる長さをもとに評価

第7-4表 陸側2-3kmでの統計量

(a) 発生数

			F3	F2	F1	F0	小計	陸上不明	海上不明	合計
過去に観測された竜巻	1961.1-2012.6 51.5年間	期間内個数	3	14	25	8	50	2	0	52
		平均値(個/年)	0.06	0.27	0.49	0.16	0.97	0.04	0.00	1.01
		標準偏差(個/年)	0.24	0.63	0.76	0.42	1.07	0.20	0.00	1.09
	1991.1-2012.6 21.5年間	期間内個数	0	4	15	8	27	0	0	27
		平均値(個/年)	0.00	0.19	0.70	0.37	1.26	0.00	0.00	1.26
		標準偏差(個/年)	0.00	0.40	0.84	0.59	1.01	0.00	0.00	1.01
	2007.1-2012.6 5.5年間	期間内個数	0	0	3	4	7	0	0	7
		平均値(個/年)	0.00	0.00	0.55	0.73	1.27	0.00	0.00	1.27
		標準偏差(個/年)	0.00	0.00	0.55	0.83	0.68	0.00	0.00	0.68

			F3	F2	F1	F0	計
疑似51.5年間の竜巻	疑似51.5年間 (陸上竜巻)	期間内個数	3	14	36	38	91
		平均値(個/年)	0.06	0.27	0.70	0.74	1.77
		標準偏差(個/年)	0.24	0.63	0.84	0.83	1.36
	疑似51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	3	14	36	38	91
		平均値(個/年)	0.06	0.27	0.70	0.74	1.77
		標準偏差(個/年)	0.24	0.63	0.84	0.83	1.36

(b) 被害幅

		F3	F2	F1	F0	計
1961.1-2012.6 51.5年間	期間内個数	3	14	24	7	48
	平均値(m)	750	327	177	41	237
	標準偏差(m)	1083	550	277	49	445
疑似51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	3	14	36	38	91
	平均値(m)	750	327	218	44	180
	標準偏差(m)	1083	550	307	47	360

(c) 被害長さ

		F3	F2	F1	F0	計
1961.1-2012.6 51.5年間	期間内個数	3	14	24	7	48
	平均値(km)	1	1.82	1.20	0.69	1.32
	標準偏差(km)	1	1.94	0.85	0.30	1.26
疑似51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	3	14	36	38	91
	平均値(km)	1	1.82	1.39	0.71	1.18
	標準偏差(km)	1	1.94	0.87	0.28	1.03

※ 被害長さの統計量は、各竜巻の発生地点と消滅地点をもとに1km幅に掛かる長さをもとに評価

第7-5表 陸側3-4kmでの統計量

(a) 発生数

			F3	F2	F1	F0	小計	陸上不明	海上不明	合計
過去に観測された竜巻	1961.1-2012.6 51.5年間	期間内個数	5	12	16	2	35	0	0	35
		平均値(個/年)	0.10	0.23	0.31	0.04	0.68	0.00	0.00	0.68
		標準偏差(個/年)	0.30	0.55	0.51	0.20	0.84	0.00	0.00	0.84
	1991.1-2012.6 21.5年間	期間内個数	1	5	10	2	18	0	0	18
		平均値(個/年)	0.05	0.23	0.47	0.09	0.84	0.00	0.00	0.84
		標準偏差(個/年)	0.22	0.43	0.51	0.30	0.85	0.00	0.00	0.85
	2007.1-2012.6 5.5年間	期間内個数	0	1	4	1	6	0	0	6
		平均値(個/年)	0.00	0.18	0.73	0.18	1.09	0.00	0.00	1.09
		標準偏差(個/年)	0.00	0.43	0.49	0.43	0.57	0.00	0.00	0.57

			F3	F2	F1	F0	計
疑似51.5年間の竜巻	疑似51.5年間 (陸上竜巻)	期間内個数	5	12	24	10	51
		平均値(個/年)	0.10	0.23	0.47	0.19	0.99
		標準偏差(個/年)	0.30	0.55	0.51	0.43	0.91
	疑似51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	5	12	24	10	51
		平均値(個/年)	0.10	0.23	0.47	0.19	0.99
		標準偏差(個/年)	0.30	0.55	0.51	0.43	0.91

(b) 被害幅

		F3	F2	F1	F0	計
1961.1-2012.6 51.5年間	期間内個数	5	12	14	2	33
	平均値(m)	590	363	149	15	285
	標準偏差(m)	809	590	99	7	484
疑似51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	5	12	24	10	51
	平均値(m)	590	363	166	15	224
	標準偏差(m)	809	590	95	5	402

(c) 被害長さ

		F3	F2	F1	F0	計
1961.1-2012.6 51.5年間	期間内個数	5	12	13	2	32
	平均値(km)	2	1.38	0.94	0.84	1.33
	標準偏差(km)	3	0.64	0.49	0.71	1.23
疑似51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	5	12	24	10	51
	平均値(km)	2	1.38	1.01	0.84	1.20
	標準偏差(km)	3	0.64	0.43	0.53	1.02

※ 被害長さの統計量は、各竜巻の発生地点と消滅地点をもとに1km幅に掛かる長さをもとに評価

第7-6表 陸側4-5kmでの統計量

(a) 発生数

			F3	F2	F1	F0	小計	陸上不明	海上不明	合計
過去に観測された竜巻	1961.1-2012.6 51.5年間	期間内個数	4	10	14	2	30	1	0	31
		平均値(個/年)	0.08	0.19	0.27	0.04	0.58	0.02	0.00	0.60
		標準偏差(個/年)	0.27	0.53	0.53	0.20	0.87	0.14	0.00	0.87
	1991.1-2012.6 21.5年間	期間内個数	1	4	7	2	14	0	0	14
		平均値(個/年)	0.05	0.19	0.33	0.09	0.65	0.00	0.00	0.65
		標準偏差(個/年)	0.22	0.40	0.57	0.30	0.96	0.00	0.00	0.96
	2007.1-2012.6 5.5年間	期間内個数	0	0	1	1	2	0	0	2
		平均値(個/年)	0.00	0.00	0.18	0.18	0.36	0.00	0.00	0.36
		標準偏差(個/年)	0.00	0.00	0.43	0.43	0.53	0.00	0.00	0.53

			F3	F2	F1	F0	計
疑似51.5年間の竜巻	疑似51.5年間 (陸上竜巻)	期間内個数	4	10	17	10	41
		平均値(個/年)	0.08	0.19	0.33	0.19	0.80
		標準偏差(個/年)	0.27	0.53	0.57	0.43	0.93
	疑似51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	4	10	17	10	41
		平均値(個/年)	0.08	0.19	0.33	0.19	0.80
		標準偏差(個/年)	0.27	0.53	0.57	0.43	0.93

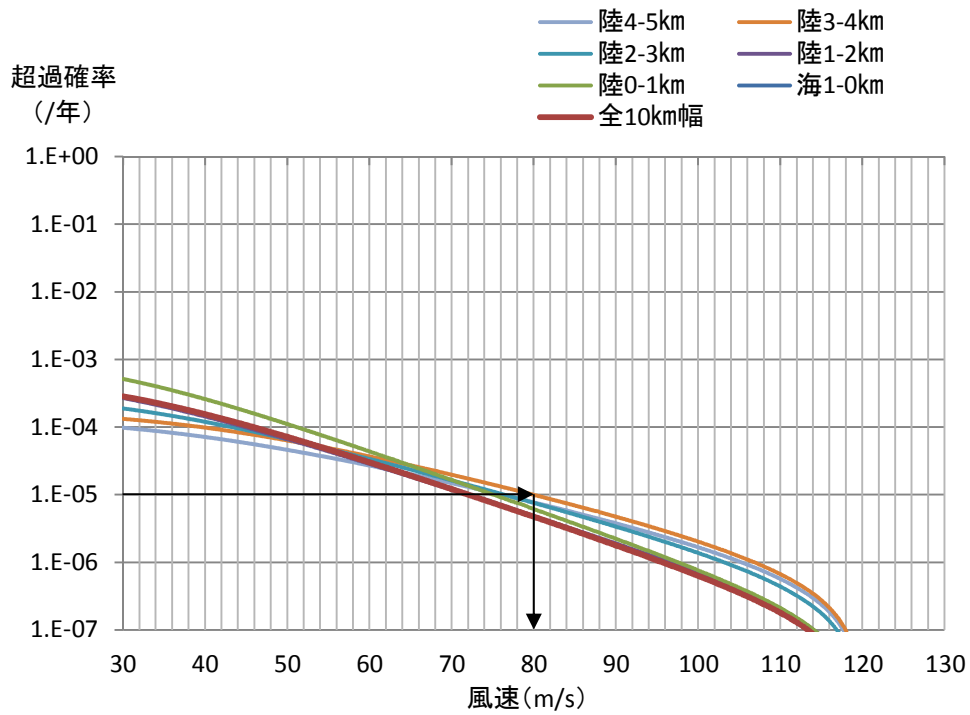
(b) 被害幅

		F3	F2	F1	F0	計
1961.1-2012.6 51.5年間	期間内個数	4	10	12	1	27
	平均値(m)	713	391	118	50	305
	標準偏差(m)	879	610	85	0	518
疑似51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	4	10	17	10	41
	平均値(m)	713	391	142	50	236
	標準偏差(m)	879	610	86	0	431

(c) 被害長さ

		F3	F2	F1	F0	計
1961.1-2012.6 51.5年間	期間内個数	4	10	12	1	27
	平均値(km)	3	1.28	0.93	0.20	1.34
	標準偏差(km)	1	0.48	0.41	0.00	0.93
疑似51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	4	10	17	10	41
	平均値(km)	3	1.28	1.03	0.20	1.08
	標準偏差(km)	1	0.48	0.40	0.00	0.89

※ 被害長さの統計量は、各竜巻の発生地点と消滅地点をもとに1km幅に掛かる長さをもとに評価



第7-2図 竜巻検討地域を1 km幅毎に細分化した場合のハザード曲線
(10 km幅でのハザード曲線も合わせて記載)

第7-7表 評価結果のまとめ

領域	10 km幅	海 1-0 km	陸 0-1 km	陸 1-2km	陸 2-3km	陸 3-4km	陸 4-5 km
10 ⁻⁵ /年での 最大風速* (m/s)	73	73	76	72	77	<u>80</u>	77

*太字下線ありの値は最大値

8. 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

前記の第7-7表に示すとおり、竜巻検討地域全域(10 km幅)、及び1 km幅毎のハザード曲線において、年超過確率 10^{-5} での風速の最大値は 80m/s であり、これを最大風速 V_{B2} とする。最大風速評価結果を第8-1表に示す。

第8-1表 ハザード曲線による最大風速評価結果

ハザード曲線の算定範囲	年超過確率 10^{-5} での最大風速
竜巻検討地域全域(10 km幅)	73m/s
1 km幅毎の最大	80m/s (陸側3-4km)

9. 竜巻ハザードの不確かさの検討

竜巻検討地域は竜巻についての過去観測データが少なく、統計処理として必ずしも十分ではない可能性も考えられることから、竜巻ハザードの不確かさ要素について、以下の検討を実施した。

① 確率分布形選択に伴う不確かさ（認識論的不確かさ）

確率分布形選択に伴うパラメータ不確かさ

…Jackknife 法を用いたハザードの推定誤差の検討

② データ量が少ないことに伴う不確かさ（認識論的不確かさ）

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かさ

…F 3 竜巻が 1 つ見落とされていたと仮定した場合のハザードへ与える影響の検討

③ データの不確かさ

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かさ

…疑似データ無しの場合の解析

(1) Jackknife 法を用いたハザードの推定誤差の検討

a. Jackknife 法について

Jackknife 法は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。また、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のに用いられている。

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、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。算定式を以下に示す。

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

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

- P_0 : 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)
- P^* : バイアス補正した推定値 (以下「Jackknife 推定値」という。)
- ΔP^* : P^* の標準偏差の推定値 (以下「Jackknife 推定幅」という。)
- \bar{P} : 分布を仮定した場合の推定値 (以下「推定値」という。)
- ΔP : n セットの風速平均データの標準偏差
- (1) 式の下線部 : バイアス (母数の真の値と推定値の差)

b. 検討結果

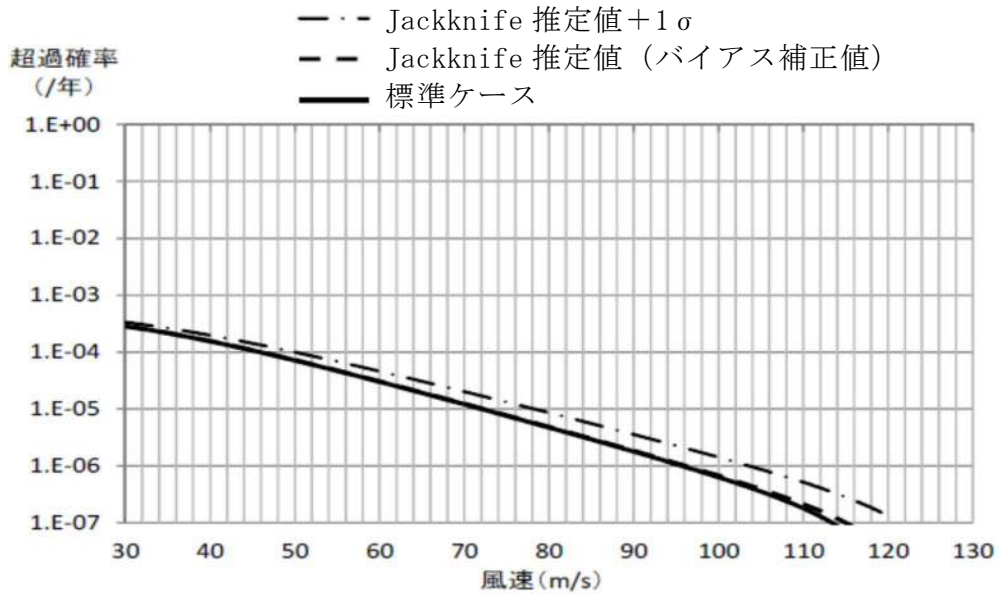
Jackknife 法を適用した特性値及びこれらの平均値と標準偏差及びそれぞれの推定幅を基に全てのパラメータを $+1\sigma$ とした場合のハザードを計算した。特性値の評価結果を第 9-1 表に、また、ハザードの推定結果を第 9-2 表及び第 9-1 図に示す。

ここで、標準ケースとは、ここまでに評価した 10 km 幅のハザード評価結果を示す。

ハザード評価の結果、年超過確率 10^{-5} に相当する風速は、Jackknife 法によるバイアス補正後で 73m/s となり、標準ケースの 73m/s と同じ風速になった。また、サンプリング誤差に伴う不確かさについては (バイアス補正值 $+1\sigma$)、年超超過確率 10^{-5} において 79m/s となった。

第9-1表 Jackknife法による特性値の評価結果

項目	平均値			標準偏差			相関係数		
	最大風速 V (m/s)	被害幅 W (m)	被害長さ L (km)	最大風速 V (m/s)	被害幅 W (m)	被害長さ L (km)	V-W	V-L	W-L
サンプル数	1188	1188	1188	1188	1188	1188	163	170	161
全データによる値 P_0	32.28	93.8	1.98	11.63	179.1	3.10	0.381	0.452	0.381
標本を一つ抜いた 平均値 ΔP	32.28	93.8	1.98	11.63	179.1	3.10	0.381	0.452	0.381
バイアス値	0.00	0.0	0.00	-0.01	-1.4	-0.02	-0.002	-0.001	-0.003
Jackknife 推定値 P^* (バイアス補正值)	32.28	93.8	1.98	11.64	180.5	3.12	0.382	0.453	0.385
Jackknife 推定幅 ΔP^*	0.34	5.2	0.09	0.36	21.8	0.34	0.065	0.057	0.077
$P^* + \Delta P^*$ (バイアス補正值+1 σ)	32.62	99.0	2.07	12.00	203.0	3.47	0.447	0.510	0.462



第9-1図 標準ケースと Jackknife 推定値ケース,
Jackknife 推定値+1 σ ケースのハザード算定結果の比較

第9-2表 ハザードの推定結果の比較表

ケース	標準ケース	Jackknife 推定値 P* (バイアス補正值)	P* + ΔP* (バイアス補正值 + σ)
領域面積 (km ²)	57000	57000	57000
想定総数 (個)	1188	1188	1188
被災確率 (個/年/km ²)	4.05E-04	4.05E-04	4.05E-04
風速平均値 (m/s)	32.28	32.28	32.62
風速標準偏差 (m/s)	11.64	11.64	12.00
被害幅平均 (km)	0.094	0.094	0.099
被害幅標準偏差 (km)	0.179	0.181	0.203
被害長さ平均 (km)	1.98	1.98	2.07
被害長さ標準偏差 (km)	3.10	3.12	3.47
相関係数 V-W	0.381	0.382	0.447
相関係数 V-L	0.452	0.453	0.510
相関係数 W-L	0.381	0.385	0.462
10 ⁻⁵ 年での最大風速 (m/s)	73	73	79

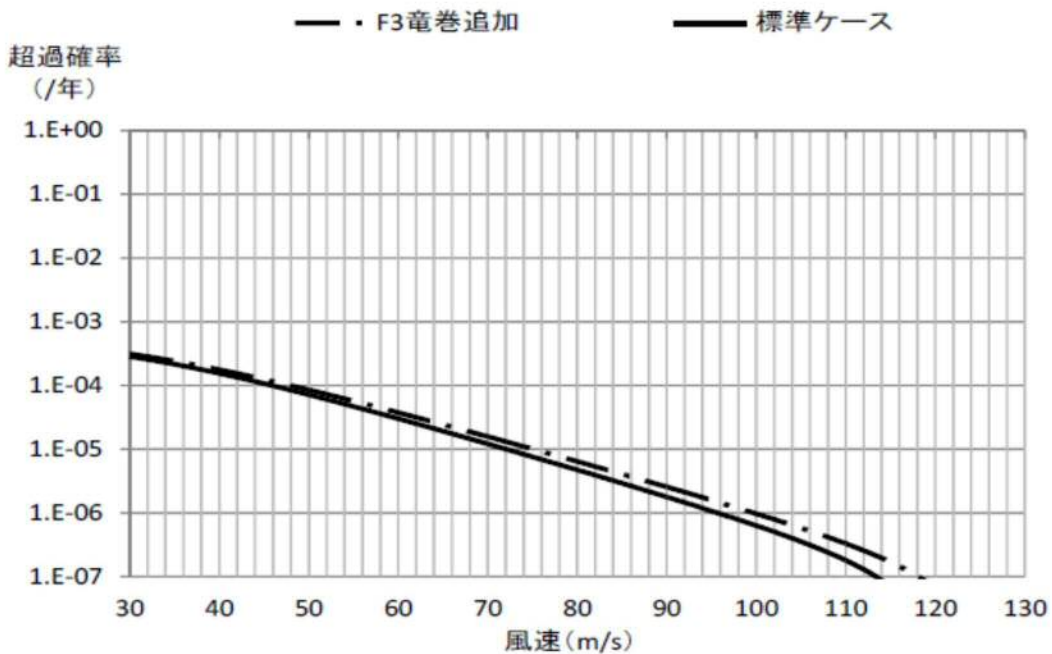
(2) F 3 竜巻の見落としを仮定した場合のハザードに与える影響

竜巻検討地域で、F 3 竜巻が1つ見落とされていたと仮定した場合のハザードへの影響を検討した。

データに、竜巻検討地域内で観測されたF 3 竜巻のうち最も被害幅、被害長さの大きい竜巻（被害幅 2000m，被害長さ 42 km：1978 年川崎市）を1つ加えて疑似データを作成した。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 76m/s となった。

ハザードの推定結果を、第 9-2 図に示す。

標準ケースと比較して、年超過確率 10^{-5} に相当する風速との差は 3m/s であり、2つのケースに対して、有意な差は認められない。



第 9-2 図 標準ケースと F 3 竜巻発生を仮定した場合の
ハザード算定結果の比較

(3) 疑似データ無しの場合の解析

疑似データ有とした場合，Fスケールの小さな竜巻の割合が多くなり，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（最大風速，被害幅及び被害長さ）がすべて判明している161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。

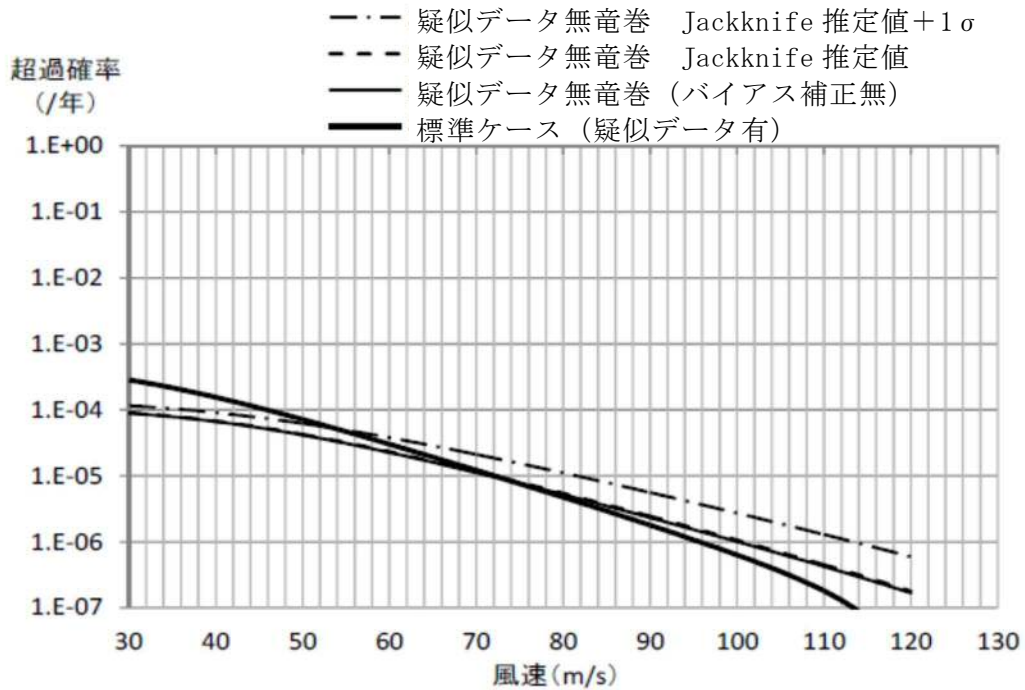
特性値の評価結果を第9-3表，ハザードの推定結果を第9-4表及び第9-3図に示す。疑似データ無竜巻での年超過確率 10^{-5} に相当する風速は，72m/sとなり，標準ケースの73m/sと有意な差は認められない。

第9-3表 Jackknife法による特性値の評価結果（疑似データ無）

項目	平均値			標準偏差			相関係数		
	最大風速 V (m/s)	被害幅 W (m)	被害長さ L (km)	最大風速 V (m/s)	被害幅 W (m)	被害長さ L (km)	V-W	V-L	W-L
サンプル数	161	161	161	161	161	161	161	161	161
全データによる値 P_0	42.94	137.9	3.22	13.90	265.7	4.79	0.381	0.467	0.381
標本を一つ抜いた 平均値 ΔP	42.94	137.9	3.22	13.90	265.6	4.78	0.381	0.467	0.381
バイアス値	0.00	0.0	0.00	-0.07	-9.0	-0.15	-0.002	-0.001	-0.003
Jackknife 推定値 P^* (バイアス補正值)	42.94	137.9	3.22	13.97	274.6	4.94	0.382	0.468	0.385
Jackknife 推定幅 ΔP^*	1.10	21.0	0.38	0.83	65.8	1.14	0.066	0.057	0.077
$P^* + \Delta P^*$ (バイアス補正值 + 1σ)	44.04	158.9	3.60	14.81	340.4	6.08	0.448	0.525	0.462

第9-4表 ハザードの推定結果の比較表

ケース	不明竜巻含む	疑似データ無竜巻		
	標準ケース	バイアス補正無	Jackknife 推定値 P* (バイアス補正值)	P* + ΔP* (バイアス補正值 + σ)
領域面積 (km ²)	57000	57000	57000	57000
想定総数 (個)	1188	161	161	161
被災確率 (個/年/km ²)	4.05E-04	5.48E-05	5.48E-05	5.48E-05
風速平均値 (m/s)	32.28	42.94	42.94	44.04
風速標準偏差(m/s)	11.64	13.95	13.97	14.81
被害幅平均 (km)	0.094	0.138	0.138	0.159
被害幅標準偏差 (km)	0.179	0.266	0.275	0.340
被害長さ平均 (km)	1.98	3.22	3.22	3.60
被害長さ標準偏差 (km)	3.10	4.80	4.94	6.08
相関係数 V-W	0.381	0.381	0.382	0.448
相関係数 V-L	0.452	0.467	0.468	0.525
相関係数 W-L	0.381	0.381	0.385	0.462
10 ⁻⁵ 年での最大風速 (m/s)	73	72	72	82



第9-3図 標準ケース（疑似データ有）と疑似データ無竜巻のバイアス補正無しと Jackknife 推定値（バイアス補正值），Jackknife 推定値 + 1 σ のハザード算定結果の比較

以上のことから、竜巻ハザードの不確かさについて、確率分布形の選択、データ量が少ないこと及びデータの不確かさによる、ハザードへの影響はほとんどないことから、データの高い安定性を確認した。

<参考文献>

- (1) 井上博登, 福西史郎, 鈴木哲夫, (2013):原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説, 独立行政法人原子力安全基盤機構,
JNES-RE-2013-9009.
- (2) Wen. Y. K and Chu. S. L. (1973) : Tornado risks and design wind speed, Proceedings of American Society of Civil Engineering, Journal of the Structural Division 99, 2409-2421
- (3) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C. A. (1975) : Tornado risk evaluation using wind speed profiles, Journal of the Structural. Division, Proceedings of American Society of Civil Engineering, pp.1167-1171
- (4) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C. A. (1975) : “Tornado Design Winds Based on Risk,” Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 101, No. 9, pp.1883-1897
- (5) 東京工芸大学 (2011) : 平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究 (平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構
- (6) 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>)

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（上陸竜巻含む）のFスケール毎の発生比率で按分している。ここでは、「沿岸部近傍での竜巻の発生特性は陸上と海上とでは類似している」と仮定している。他の合理的な按分方法もな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（以下「陸上竜巻」という。）と海上で発生しその後上陸した竜巻（以下「上陸竜巻」という。）を区別して考える。

別表1-1及び別図1-1は、陸上竜巻、上陸竜巻及び（陸上＋上陸）竜巻のそれぞれの竜巻区分に対して、F0、F1、F2以上の竜巻が占める割合である。全国の上陸竜巻の場合、Fスケール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ない（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スケール不明竜巻を、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、東海第二発電所の上陸竜巻の場合は、Fスケール毎の割合はそれぞれ、26、49、25%であり、全国と同様、陸上竜巻との間に大きな差は無い。また、陸上竜巻、上陸竜巻、及び（陸上＋上陸）竜巻のいずれにおいても、全国沿岸竜巻の発生数の割合と大きな差はない（5%以内）。以上より、全国沿岸と東海第二発電所の竜巻検討地域との間には地域特性による影響はないことが確認できた。

従って、海上のFスケール不明竜巻を（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。

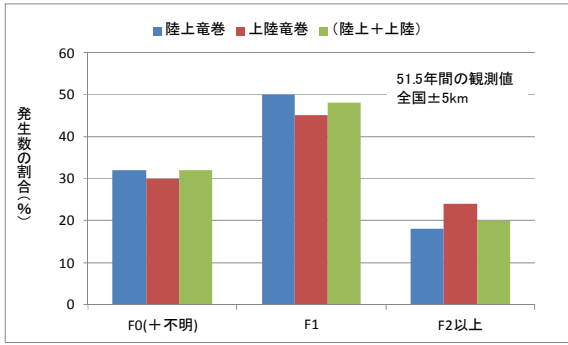
別表 1-1 Fスケール毎の竜巻発生数の割合

① 全国沿岸±5km

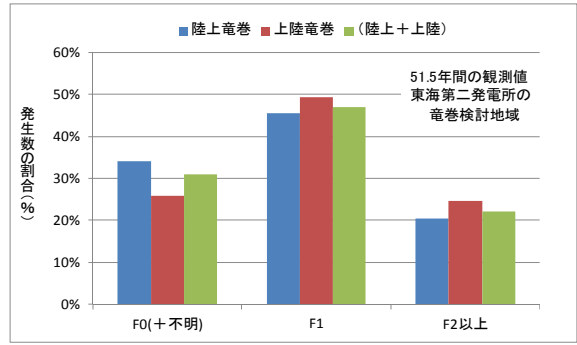
発生数の割合 (%)	F 0 (+不明)	F 1	F 2以上
陸上竜巻	32	50	18
上陸竜巻	30	45	24
(陸上＋上陸)	32	48	20

② 東海第二発電所の竜巻検討地域

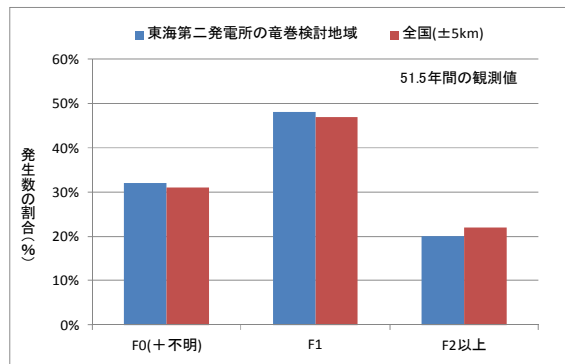
発生数の割合 (%)	F 0 (+不明)	F 1	F 2以上
陸上竜巻	34	45	21
上陸竜巻	26	49	25
(陸上＋上陸)	31	47	22



① 全国沿岸±5km



② 東海第二発電所の竜巻検討地域



③ (陸上+上陸) 竜巻

別図 1-1 F スケール毎の発生数の割合

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 & Chu⁽¹⁾は、竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速がある値以上となり確率の推定法を対案している。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密度分布はポアソン分布もしくはポリヤ分布に適合する。

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

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

ここで、 N は竜巻の年発生数、 ν は竜巻の年平均発生数、 T は年数である。また、 T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、 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。

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

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

ここで、 $R(V_0)$ は、評価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、 $\beta \rightarrow 0$ のときにはポアソン分布に近づく。Thom(1963)⁽²⁾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可能性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⁽³⁾では、陸上竜巻（含む上陸竜巻）及び海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 & Chu, 1973) ⁽¹⁾

3. 確率論から見た近似式

前項にて示した (3) (4) 式に基づき、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)。

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

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。

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

従って、一年間に 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，は通常 10^{-3} 以下であるから，式の近似は非常に良い精度で成り立つ。

以上のことから，式より 1 年間にいずれかかの竜巻により被害を受ける確率は次式で近似できる。

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

即ち，被害確率は竜巻発生数の平均値のみに依存し，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，(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，

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

となることを考慮すると，(11) 式の厳密な式は以下のとおりである。

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

即ち，ポアソン分布によるハザード評価の(3)式が導かれる。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。

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

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、発生数の確率密度分布形状にはほとんど無関係であることがわかる。

<参考文献>

- (1) Wen, Y. K and Chu, S. L. (1973) : Tornado risks and design wind speed, Proceedings of American Society of Civil Engineering, Journal of the Structural Division 99, 2409-2421
- (2) Thom H. CS., 1963: Tornado probabilities. Mon. Wea. Rev., 91, 730-736
- (3) 東京工芸大学 (2011) : 平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究 (平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構

地形効果による竜巻の増幅の可能性について

1. 概要

「竜巻影響評価ガイド」では、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、評価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の竜巻風速への影響に関する知見を取りまとめ、東海第二発電所における、地形効果による竜巻増幅の可能性について検討した。

2. 考慮対象となる地形のスケール

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できる。このうち、設計竜巻の最大風速 V_D を設定する際には、タッチダウンした漏斗雲により発生する旋回流及びそれに随伴して生じる強風への地形影響を検討すべきであり、マイクロスケール（数百 m）規模の地形の起伏を考慮すべきと考えられる⁽¹⁾⁽²⁾。

3. マイクロスケールの地形起伏が竜巻の旋回流強度及び強風に与える影響

マイクロスケールの地形の起伏が竜巻の旋回流及び強風に与える影響について、定性的な知見を与える研究で用いられる主な手法としては、以下の 3 つが挙げられる。

(1) 被害状況調査⁽¹⁾⁽³⁾

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とにより，被害が発生しやすい地形特性を分析し，そこから旋回流強度及び風速の強弱を類推する。

(2) 風洞実験⁽¹⁾

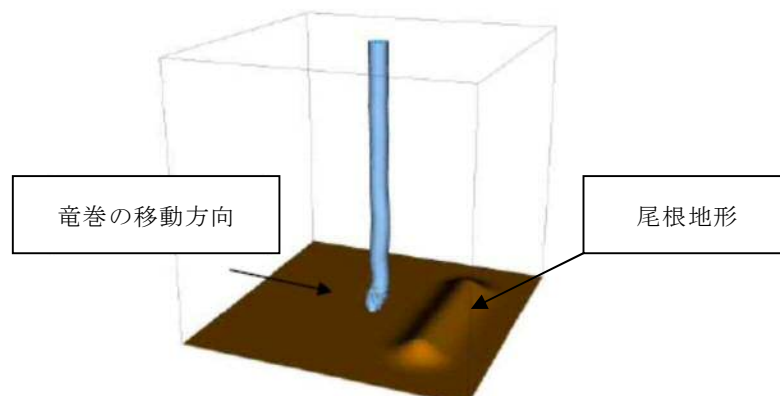
風洞実験の測定部に尾根や斜面といった地形模型を入れ，その上部に竜巻発生装置を設置し，それを移動させたときの，地表面近傍の圧力，風速の分布を調べる。



第3-1図 風洞実験の様子(Karstens 2012)⁽¹⁾

(3) 数値シミュレーション⁽²⁾

竜巻の旋回流や移動及び地形の起伏を模擬した流体解析により，旋回流の強度や風速及び竜巻の構造に関連する圧力分布を調べる。



第3-2図 数値シミュレーションのモデル例

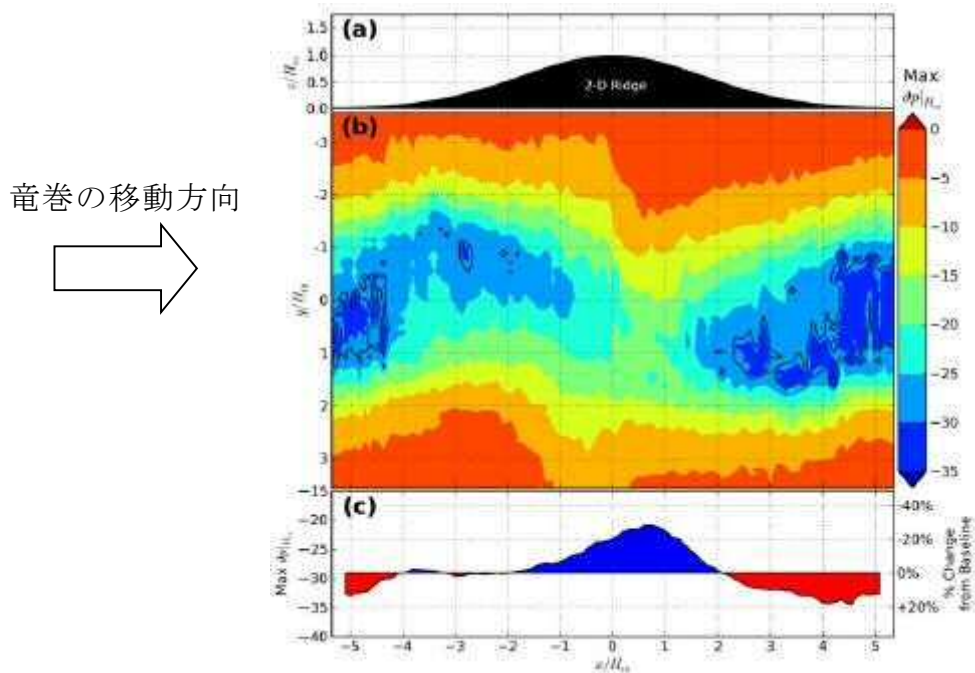
被害状況調査によれば、竜巻の強化が下り斜面や尾根の裾で生じる可能性が示唆されている⁽¹⁾⁽³⁾。

また、実被害調査の知見を支持する結果が風洞実験及び数値シミュレーションにおいても確認されている。二次元尾根地形を対象とした場合の風洞実験⁽¹⁾及び数値シミュレーション⁽²⁾の結果を、それぞれ第 3-3 図及び第 3-4 図に示す。

風洞実験の結果である第 3-3 図においては、竜巻を模擬した旋回流が (a) に示す二次元尾根地形※を図の左から右に移動する時に地表面で測定された圧力の最大値を (b) に、圧力勾配（風の駆動力になり、風速に相当する）を (c) に示しており、(c) から以下のことが分かる。

※：過去の竜巻被害を受けた斜面の傾斜等を考慮し、尾根高さ H に対し前後 5H の領域を模擬している。

- ① 圧力勾配は、斜面において正及び負の値を持つ（旋回流が強弱する）
- ② 圧力勾配は、尾根の上流及び下流の平坦部ではほぼフラットとなる（旋回流の強度が変化しない）

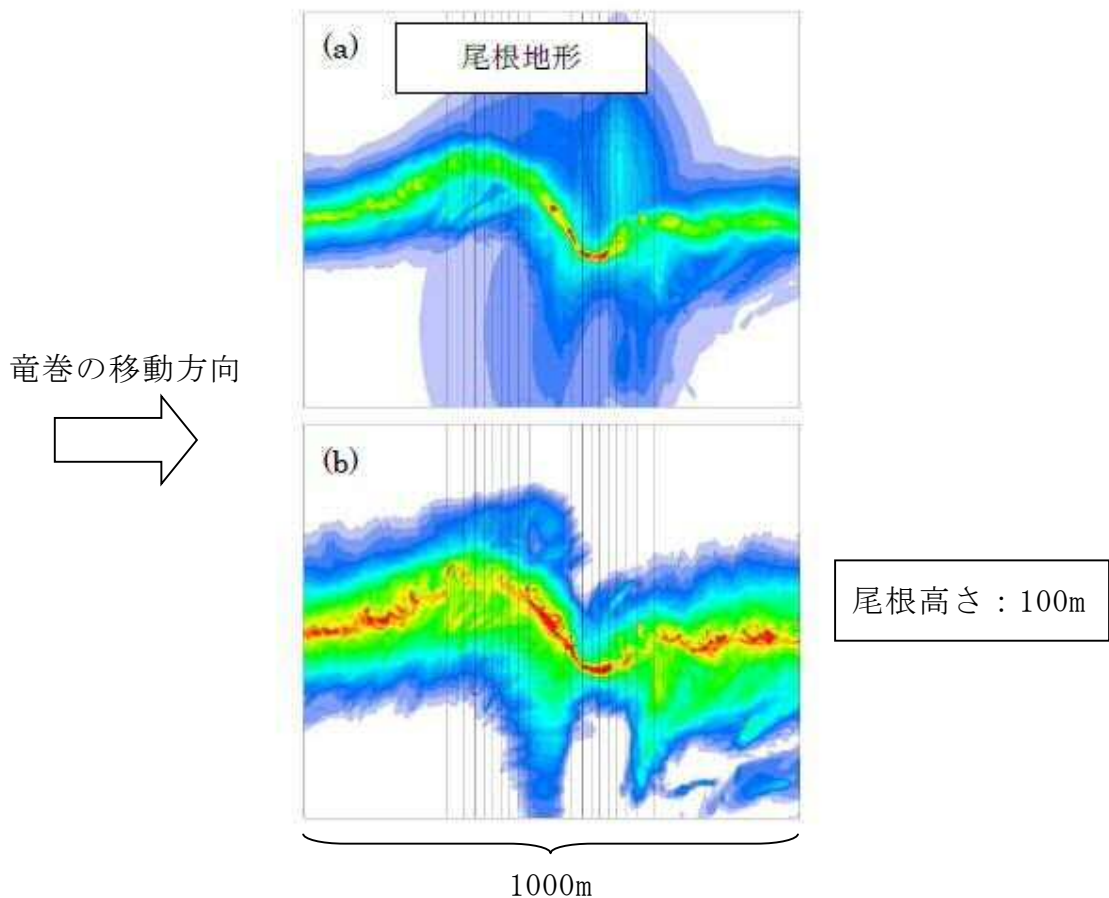


第 3-3 図 尾根地形を竜巻が通過するときの地表面圧力 (b) 及び
圧力勾配 (c) ⁽¹⁾

数値シミュレーションの結果である第3-4図においては、(a)にピーク圧力を、(b)に風速を示す。図中の黒色実線は等高線を意味し、以下に示すように、風洞実験の結果（第3-3図）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（前述の風洞実験の知見①に対応）
- ・ ピーク圧力の高い領域は尾根頂部に限定され、平坦部の圧力は上流及び下流側と同レベルとなる。（前述の風洞実験の知見②に対応）

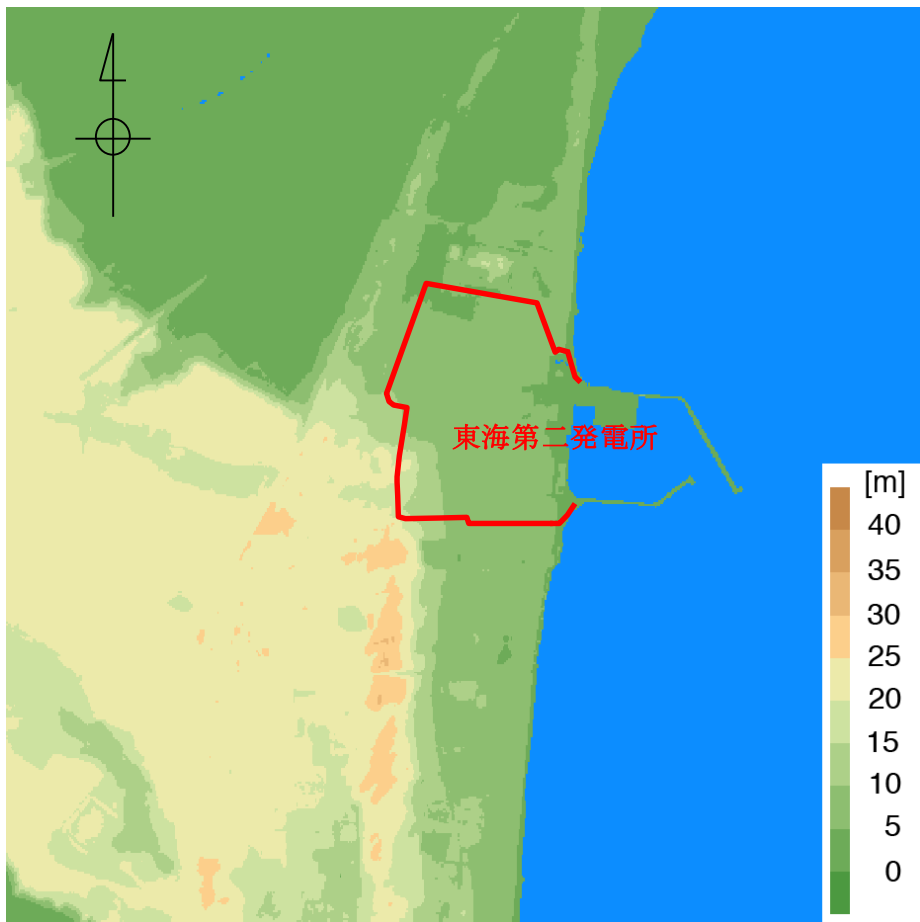
また、これらの研究結果は、地形の起伏の影響範囲が、斜面及び尾根、山の頂、裾部に限定されることを示唆しており、地形の下流側の平坦部における風速や圧力の値は、地形を乗り越える前の上流部の値に相当する。



第3-4図 尾根地形を竜巻が通過するときの地表面ピーク圧力(a)及び風速(b)⁽²⁾

4. 東海第二発電所敷地周辺の地形効果の考慮要否

東海第二発電所敷地周辺の地形を第4-1図に示す。敷地周辺は最大でも標高40m程度のなだらかな地形であり、地形効果の影響の研究において想定するようなマイクロスケール（数百m）規模の起伏は認められないことから、地形効果による竜巻の増幅の可能性は低く、考慮不要と判断した。



第4-1図 東海第二発電所を中心とした東西3km×南北3kmの地形標高

(国土地理院5mメッシュ標高データに**加筆**)

<参考文献>

- (1) Karstens, C.D. Observations and laboratory simulations of tornadoes in complex topographical regions, Graduate theses and dissertations of Iowa state univ, paper12778, 2012
- (2) Lewellen, D. C., Effects of Topography on Tornado Dynamics: A Simulation Study, 26th Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, 4B.1., 2012
- (3) Forbes, G. S. Topographic Influences on Tornadoes in Pennsylvania, Proc 19th Conf Severe local storms American Meteorological Society, pp.269-272, 1998

参考資料：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) の結果も支持している。

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 (角運動量保存則) がある。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・収縮に伴う旋回風速の増速・減速機構を以下に導く。

竜巻のコア部分を1つの鉛直軸を有する気柱と仮定すると、上り坂を越える場合 (第1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。

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

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

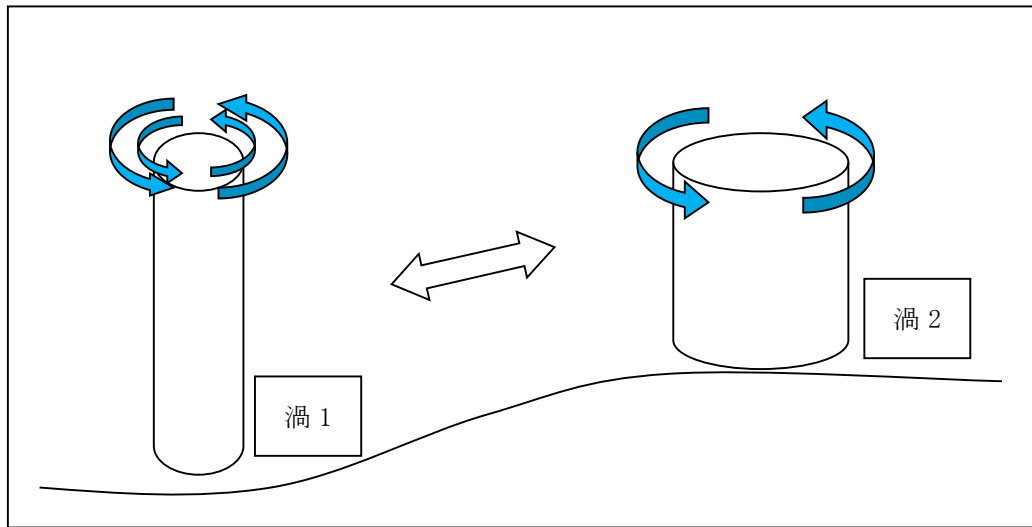
ここで、 ω は角速度、 r は渦コア (気柱) の半径、 h は渦コア (気柱) の高さ、 ρ は空気密度であり、添字の1と2はそれぞれ渦1と渦2を示す。また、気柱の体積が保存されるので、式③が成立する。

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

この関係を式②に代入すると、式④が得られる。

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

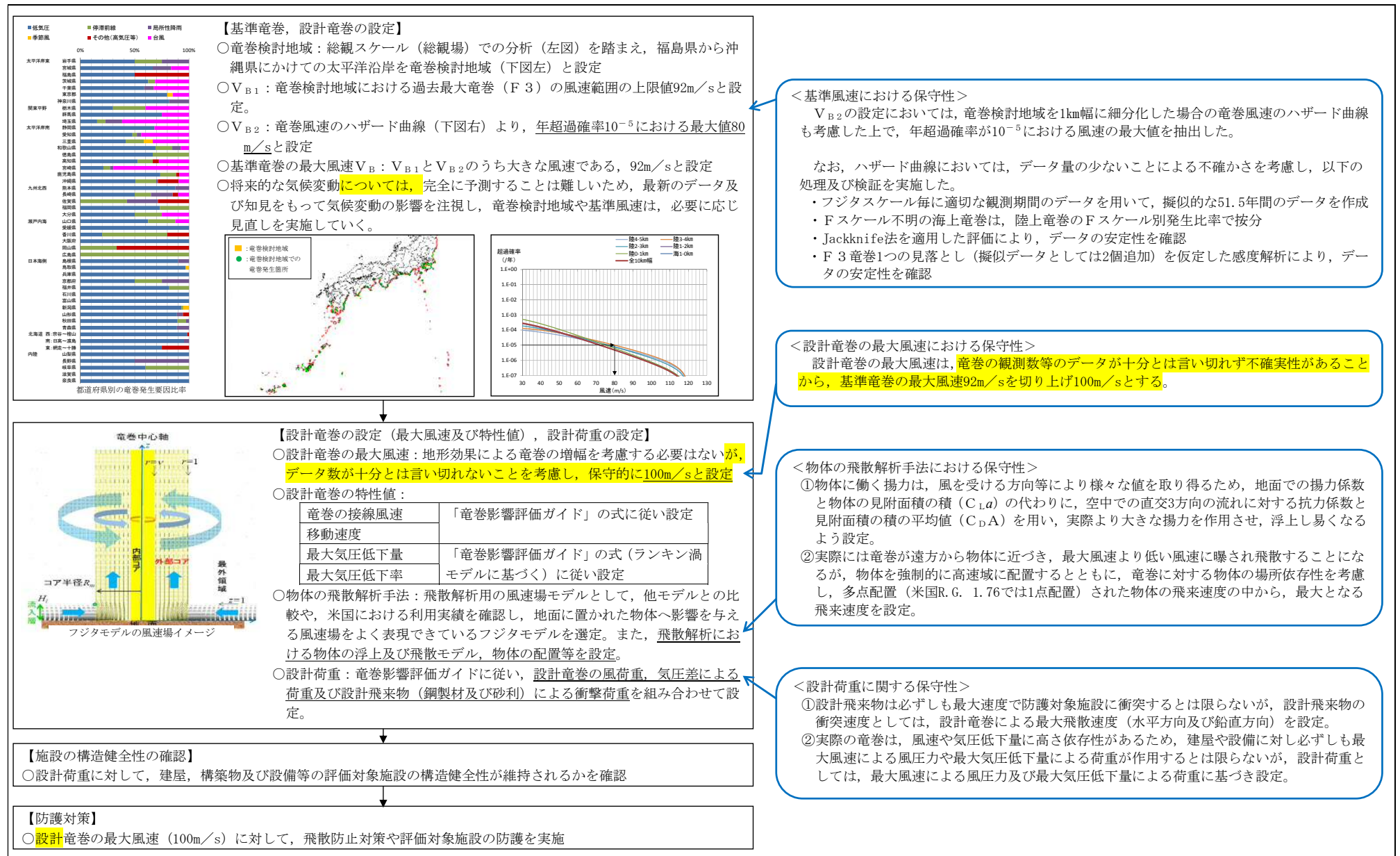
④の関係式は「渦位（ポテンシャル渦度）の保存式」に相当するものであり、角速度は地上高さ h に比例することが分かる。また、③より、渦の半径 r は $h^{1/2}$ に反比例するので、竜巻の最大接線風速 ($\omega \times r$) は $h^{1/2}$ に比例する。そのため、竜巻の渦が上り斜面を移動する時、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動する時には強まる。



第 1 図 竜巻の旋回流の地形影響に関する模式図

添付資料7. 竜巻影響評価の概要及び保守性について

第7-1図に竜巻影響評価の概要及び保守性確保の状況を示す。竜巻影響評価については、その不確実性を踏まえて、各ステップに対し保守性を考慮している。

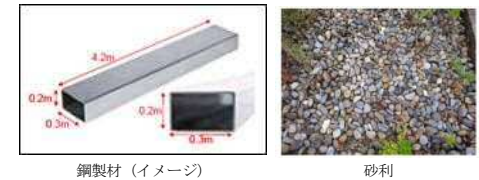


第7-1図 竜巻影響評価の概要及び保守性確保の状況

添付資料 8. 竜巻影響評価及び竜巻防護対策の概要

【1. 設計竜巻荷重, 設計荷重の設定】(別紙-1参照)

- 「竜巻影響評価ガイド」に基づき, 設計竜巻荷重は, 設計竜巻の風圧力による荷重 (W_w), 気圧差による荷重 (W_p) 及び設計飛来物による衝突荷重 (W_M) を適切に組み合わせた荷重を設定するとともに, 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重(竜巻以外の自然現象による荷重等)は, 設計竜巻荷重に包絡される若しくは考慮すべき荷重ではないことを確認する。
 - W_w, W_p, W_M は, 設計竜巻の最大風速 $V_D=100m/s$, 風速場モデルをランキン渦モデル(「竜巻影響評価ガイド」に例示)とした場合の荷重を設定する。
- 【設計飛来物の設定】
- 東海第二発電所の飛来物に係る現地調査を行い, 発電所構内の常設物(マンホール蓋等), 仮設物(資機材等)及び建築物附属物(屋根等)の中から, それらの飛散防止対策の可否, 固定状況, 過去の被害事例や評価パラメータ(運動エネルギー及び貫通力)を踏まえ, 第1-1図のとおり設計飛来物を設定した。



第1-1図 東海第二発電所の設計飛来物

【2. 竜巻影響評価】

- 設計荷重に対し, 第2-1表の評価対象施設(構築物, 系統及び機器)の構造安全性が維持され安全機能が維持されていることを確認する。
- <竜巻防護施設の評価>
- 評価対象施設(屋外施設(竜巻防護施設を内包する施設を除く), 屋内の施設で外気と繋がっている施設: 第2-1表 □)に対する設計飛来物による貫通評価, 設計荷重に対する強度評価を実施し, 評価対象施設の構造健全性が維持されることを確認し, 評価対象施設の安全機能維持に影響を及ぼす場合には, 防護対策を実施する。
- 評価対象施設(竜巻防護施設を内包する施設: 第2-1表 □)の構造骨組評価, 設計飛来物の衝突に関する貫通及び裏面剝離評価, 局部評価及び建屋外周部建具(扉等)に関する評価を実施し, 内包する竜巻防護施設が影響を受けないことを確認し, 竜巻防護施設の安全機能維持に影響を及ぼす場合には, 評価対象施設の補強, 防護対策を実施する。
- 評価対象施設(外殻となる施設による防護機能が期待できない施設: 第2-1表 □)の外殻となる施設の外周部建具(扉等)に関する評価結果より, 評価対象施設が影響を受けないことを確認し, 評価対象施設の安全機能維持に影響を及ぼす場合には, 外殻となる施設の建具の補強, 防護対策及び運用による対策を実施する。
- <竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の評価>
- 評価対象施設(倒壊により竜巻防護施設を機能喪失させる可能性がある施設: 第2-1表 □)の構造骨組評価を実施し, 竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設に影響を及ぼすことがないことを確認し, 竜巻防護施設を機能喪失させる可能性がある場合には, 防護対策を実施する。
- 評価対象施設(屋外に設置されている竜巻防護施設の附属施設: 第2-1表 □)に対する設計飛来物による貫通評価, 設計荷重に対する強度評価を実施し, 評価対象施設の構造健全性が維持されることを確認する。竜巻防護施設を機能喪失させる可能性がある場合には, 損傷箇所の補修及び取替等の対策を実施するものとし, 手順と必要部材の整備を実施する。

第2-1表 評価対象施設

竜巻防護施設	屋外施設	<ul style="list-style-type: none"> ・ディーゼル発電機吸気フィルタ ・ディーゼル発電機室ルーフベントファン ・中央制御室換気系冷凍機 ・海水ポンプ室内設備 ・非常用ガス処理系排気配管 ・排気筒
	竜巻防護施設を内包する施設	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋, タービン建屋・使用済燃料乾式貯蔵建屋 ・軽油貯蔵タンクタンク室
	屋内の施設で外気と繋がっている施設	<ul style="list-style-type: none"> ・中央制御室換気系隔離弁, ファン(ダクト含む) ・ディーゼル発電機室換気系ダクト ・原子炉建屋換気系隔離弁, ダクト
	外殻となる施設による防護機能が期待できない施設	<ul style="list-style-type: none"> ・中央制御室換気系ファン ・非常用電源盤 ・非常用ガス処理系設備, 非常用ガス再循環系設備 ・使用済燃料プール, 燃料プール冷却浄化系真空破壊弁
竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設	倒壊により, 竜巻防護施設を機能喪失させる可能性がある施設	<ul style="list-style-type: none"> ・サービス建屋 ・海水ポンプ室 ・排気筒
	屋外に設置されている竜巻防護施設の附属施設	<ul style="list-style-type: none"> ・ディーゼル発電機排気消音器 ・ディーゼル発電機附属設備配管 ・海水ポンプ室内設備附属配管

【3. 飛散防止対策】

- 設計飛来物に設定した鋼製材より運動エネルギー又は貫通力が上回る飛来物源については, 竜巻防護施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼさないよう, 別紙-2に基づき, 飛散防止対策を実施する。

<対策方針>

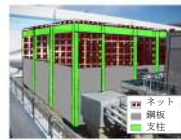
- ・対策エリア内に設置した資機材等の飛散防止対策としては, 移設, 撤去又は浮き上がりや横滑りを考慮した固縛等を実施する。
- ・対策エリア内の車両は, 浮き上がり, 横滑り及び転倒を考慮した固縛等に加え, 可能な限りエリア外への退避を実施する。

【4. 飛来物防護対策】

- 設計飛来物の衝突によって損傷する可能性がある竜巻防護施設について, 下記のとおりの飛来物防護対策を実施する。

<竜巻防護ネット等による飛来物防護対策>

- ・設計飛来物に対する防護として, 竜巻防護施設及び竜巻防護施設を内包する施設に対し防護ネット等を設置する。
- ・防護ネットは設計飛来物の運動エネルギーを吸収可能な設計とするとともに小径の飛来物(設計飛来物である砂利を除く)の通り抜けを防止する設計とする。



第4-1図 MCR換気系冷凍機防護壁(案)



第4-2図 海水ポンプ室防護壁(案)

<鋼製扉追設による防護対策>

- ・設計飛来物の衝突により既設扉建具が破損し, 竜巻防護施設への影響を及ぼし得ることから, 鋼製扉を新たに追設し, 外殻としての防護機能対策を実施する。



第4-3図 鋼製扉追設(案)

第8-1図 竜巻影響評価及び竜巻防護対策(飛散防止対策, 飛来物防護対策)の概要

評価対象施設の設計荷重について

1. 概要

設計竜巻に対し，評価対象施設の構造健全性の安全機能が維持されることの確認を行った結果を整理する。

2. 評価結果

2.1 評価荷重の設定

竜巻防護施設の評価に用いる評価荷重について別表1-2-1に，竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の評価に用いる評価荷重について別表1-2-2に整理する。

別表 1-2-1 竜巻防護施設の評価に用いる評価荷重一覧表 (1/3)

評価対象施設	設計竜巻荷重								その他の 評価荷重 ^{※1}
	W _W , W _M , W _P の選定				複合荷重の設定 ^{※2}				
	設置 場所	W _W ^{※1}	W _M ^{※1}	W _P ^{※1}	W _{T1}	W _{T2}			
					W _P	W _W	W _W +0.5W _P	W _W +0.5W _P +W _M	
<屋外施設>									
非常用ディーゼル発電機吸気フィルタ	屋外	○	×	○	○	—	○	—	無し
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機吸気フィルタ	屋外	○	×	○	○	—	○	—	無し
非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン	屋外	○	×	×	—	○	—	—	自重
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフトファン	屋外	○	×	×	—	○	—	—	自重
中央制御室換気系冷凍機	屋外	○	×	×	—	○	—	—	自重
残留熱除去系海水系ポンプ	屋外	○	×	○	○	—	○	—	無し
残留熱除去系海水系ストレーナ	屋外	○	×	○	○	—	○	—	自重
非常用ディーゼル発電機海水ポンプ	屋外	○	×	○	○	—	○	—	無し
非常用ディーゼル発電機海水ストレーナ	屋外	○	×	○	○	—	○	—	自重
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水ポンプ	屋外	○	×	○	○	—	○	—	無し
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水ストレーナ	屋外	○	×	○	○	—	○	—	自重
非常用ガス処理系排気配管	屋外	○	×	○	○	—	○	—	自重, 内圧
主排気筒	屋外	○	○ ^{※3}	×	—	○ ^{※3}	—	— ^{※3}	自重

注記) ※1 表中記号について対象とする荷重の考慮の有無を示す。 ○ : 考慮する × : 考慮しない , その他の荷重は評価で使用するものを記載する。

※2 複合荷重の構成について, ○のついた構成で評価を実施。 ○ : 実施ケース — : 該当しないケース

※3 W_Mは選定するが, 鉄塔主要部材を破損させるものとして考慮し, 主排気筒の複合荷重を構成する荷重としては考慮しない。

別表 1-2-1 竜巻防護施設の評価に用いる評価荷重一覧表 (2/3)

評価対象施設	設計竜巻荷重								その他の 評価荷重 ^{※1}
	W _W , W _M , W _P の選定				複合荷重の設定 ^{※2}				
	設置 場所	W _W ^{※1}	W _M ^{※1}	W _P ^{※1}	W _{T1}	W _{T2}			
					W _P	W _W	W _W +0.5W _P	W _W +0.5W _P +W _M	
<屋外施設（竜巻施設を内包する施設）>									
原子炉建屋	屋外	○	○	○	○	—	—	○	無し
タービン建屋	屋外	○	○	○	○	—	—	○	無し
使用済燃料乾式貯蔵建屋	屋外	○	○	○	○	—	—	○	無し
軽油貯蔵タンクタンク室	屋外 (埋設)	×	×	○	○	—	—	—	

注記) ※1 表中記号について対象とする荷重の考慮の有無を示す。 ○：考慮する ×：考慮しない

※2 複合荷重の構成について、○のついた構成で評価を実施。 ○：実施ケース —：該当しないケース

別表 1-2-1 竜巻防護施設評価に用いる評価荷重一覧表 (3/3)

評価対象施設	設計竜巻荷重								その他の 評価荷重 ^{※1}
	W _w , W _M , W _P の選定				複合荷重の設定 ^{※2}				
	設置 場所	W _w ^{※1}	W _M ^{※1}	W _P ^{※1}	W _{T1}	W _{T2}			
					W _P	W _w	W _w +0.5W _P	W _w +0.5W _P +W _M	
<屋内の施設で外気と繋がっている施設>									
中央制御室換気系隔離弁, ファン	屋内	×	×	○	○	—	—	—	自重, 運転圧力
非常用ディーゼル発電機室換気系ダクト	屋内	×	×	○	○	—	—	—	自重, 運転圧力
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室換気系ダクト	屋内	×	×	○	○	—	—	—	自重, 運転圧力
原子炉建屋換気系隔離弁, ダクト	屋内	×	×	○	○	—	—	—	自重, 運転圧力
<外殻となる施設による防護機能が期待できない施設>									
中央制御室換気系ファン	屋内	×	× ^{※3}	○	○	—	—	—	無し
中央制御室換気系フィルタユニット	屋内	×	×	○	○	—	—	—	無し
非常用電源盤	屋内	×	× ^{※3}	×	—	—	—	—	無し
非常用ガス処理系設備, 非常用ガス再循環系設備	屋内	×	× ^{※3}	×	—	—	—	—	無し
使用済燃料プール	屋内	×	× ^{※3}	×	—	—	—	—	無し
燃料プール冷却浄化系真空破壊弁	屋内	×	× ^{※3}	×	—	—	—	—	無し
使用済燃料乾式貯蔵容器	屋内	×	○	×	—	—	—	○	無し

注記) ※1 表中記号について対象とする荷重の考慮の有無を示す。 ○ : 考慮する × : 考慮しない
 ※2 複合荷重の構成について, ○のついた構成で評価を実施。 ○ : 実施ケース — : 該当しないケース
 ※3 W_Mに対して, 防護対策を実施するため, 衝撃荷重は作用しない。

別表 1-2-2 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の評価に用いる評価荷重一覧表 (1/2)

評価対象施設	設計竜巻荷重								その他の 評価荷重 ^{※1}
	W _w , W _M , W _P の選定				複合荷重の設定 ^{※2}				
	設置 場所	W _w ^{※1}	W _M ^{※1}	W _P ^{※1}	W _{T1}	W _{T2}			
W _P					W _w	W _w +0.5W _P	W _w +0.5W _P +W _M		
<機械的影響の観点>									
サービス建屋	屋外	○	○	○	○	—	—	○	無し
海水ポンプ室	屋外	○	○	×	—	—	—	○	無し
鋼製防護壁	屋外	○	○	×	—	—	—	○	無し
排気筒	屋外	○	○ ^{※3}	×	—	○ ^{※3}	—	— ^{※3}	自重
<機能的影響の観点>									
非常用ディーゼル発電機排気消音器	屋外	○	× ^{※4}	○	○	—	○	—	無し
非常用ディーゼル発電機排気配管	屋外	○	× ^{※4}	○	○	—	○	—	自重, 内圧
非常用ディーゼル発電機燃料デイトンクベント管	屋外	○	× ^{※4}	○	○	—	○	—	自重, 内圧
非常用ディーゼル発電機機関ベント管	屋外	○	× ^{※4}	○	○	—	○	—	自重, 内圧
非常用ディーゼル発電機潤滑油サンプタンクベント管	屋外	○	× ^{※4}	○	○	—	○	—	自重, 内圧

注記) ※1 表中記号について対象とする荷重の考慮の有無を示す。 ○:考慮する ×:考慮しない

※2 複合荷重の構成について, ○のついた構成で評価を実施。 ○:実施ケース —:該当しないケース

※3 W_Mは選定するが, 鉄塔主要部材を破損させるものとして考慮し, 主排気筒の複合荷重を構成する荷重としては考慮しない。

※4 W_Mに対して, 防護対策を実施するため, 衝撃荷重は作用しない。

別表 1-2-2 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の評価に用いる評価荷重一覧表 (2/2)

評価対象施設	設計竜巻荷重								その他の 評価荷重 ^{※1}
	W _W , W _M , W _P の選定				複合荷重の設定 ^{※2}				
	設置 場所	W _W ^{※1}	W _M ^{※1}	W _P ^{※1}	W _{T1}	W _{T2}			
					W _P	W _W	W _W +0.5W _P	W _W +0.5W _P +W _M	
<機能的影響の観点>									
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気消音器	屋外	○	× ^{※4}	○	○	—	○	—	自重
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機排気配管	屋外	○	× ^{※4}	○	○	—	○	—	自重, 内圧
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料デイトンク ベント管	屋外	○	× ^{※4}	○	○	—	○	—	自重, 内圧
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機機関ベント管	屋外	○	× ^{※3}	○	○	—	○	—	自重, 内圧
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機潤滑油サンプタンク ベント管	屋外	○	× ^{※3}	○	○	—	○	—	自重, 内圧
残留熱除去系海水系配管 (放出側)	屋外	○	× ^{※3}	○	○	—	○	—	自重, 内圧
非常用ディーゼル発電機海水配管 (放出側)	屋外	○	× ^{※3}	○	○	—	○	—	自重, 内圧
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機海水配管 (放出側)	屋外	○	× ^{※3}	○	○	—	○	—	自重, 内圧

注記) ※1 表中記号について対象とする荷重の考慮の有無を示す。 ○: 考慮する ×: 考慮しない

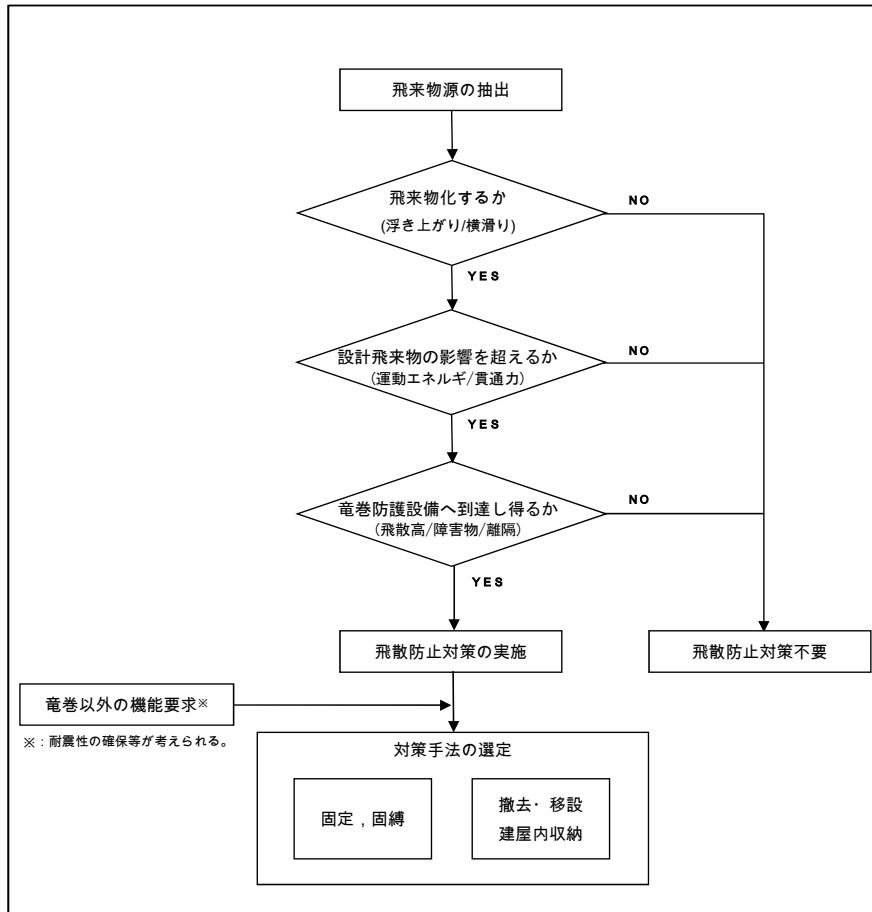
※2 複合荷重の構成について, ○のついた構成で評価を実施。 ○: 実施ケース —: 該当しないケース

※3 W_Mにより, 対象が破損することを想定するため, 設計荷重としては考慮しない。

竜巻防護対策のうち飛散防止対策の概要について

【1. 飛散防止対策のフロー図】

・ 現地調査による飛来物源に対して、飛散防止対策の選定フローを別図2-1-1に示す。



別図2-1-1 東海第二発電所の飛散防止対策の選定フロー

【2. 飛散防止対策の基本方針】

・ 竜巻防護施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼす施設に悪影響を及ぼす可能性のある飛来物源に対して飛来物発生防止対策を実施する。

飛散防止対策の実施条件：①～③を全て満たす飛来物源

- ① 飛散（浮き上がり、横滑り）する
- ② 設計飛来物（鋼製材）の運動エネルギー及び貫通力を上回る
- ③ 竜巻防護施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼす施設に到達する

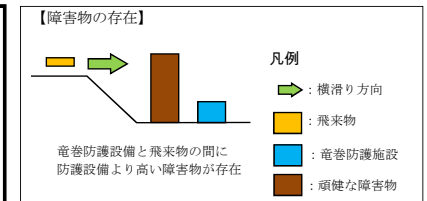
【3. 竜巻防護施設等への到達、離隔】

・ 竜巻防護施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼす施設に到達しないケースを下記に示す。

- ① 竜巻防護施設等に到達できない距離を確保した配置とする。（離隔距離の確保）
(別図2-3-1に車両の場合の離隔（退避）範囲案を示す。)
- ② 竜巻防護施設等に到達できない障害物の配置である。
(別図2-3-2に横滑りする飛来物に対して障害物となる例を示す。)



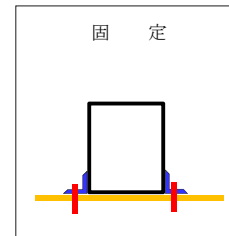
別図2-3-1 車両管理エリア図



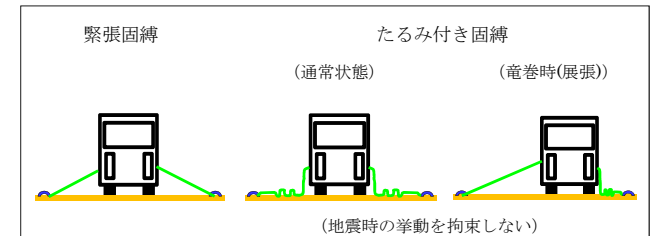
別図2-3-2 障害物による未到達の例

【4. 固定、固縛の例】

・ 飛散防止対策のうち、新たな設備で対策する固定及び固縛の例を別図2-4-1、2-4-2に示す。



別図2-4-1図 固定の一例



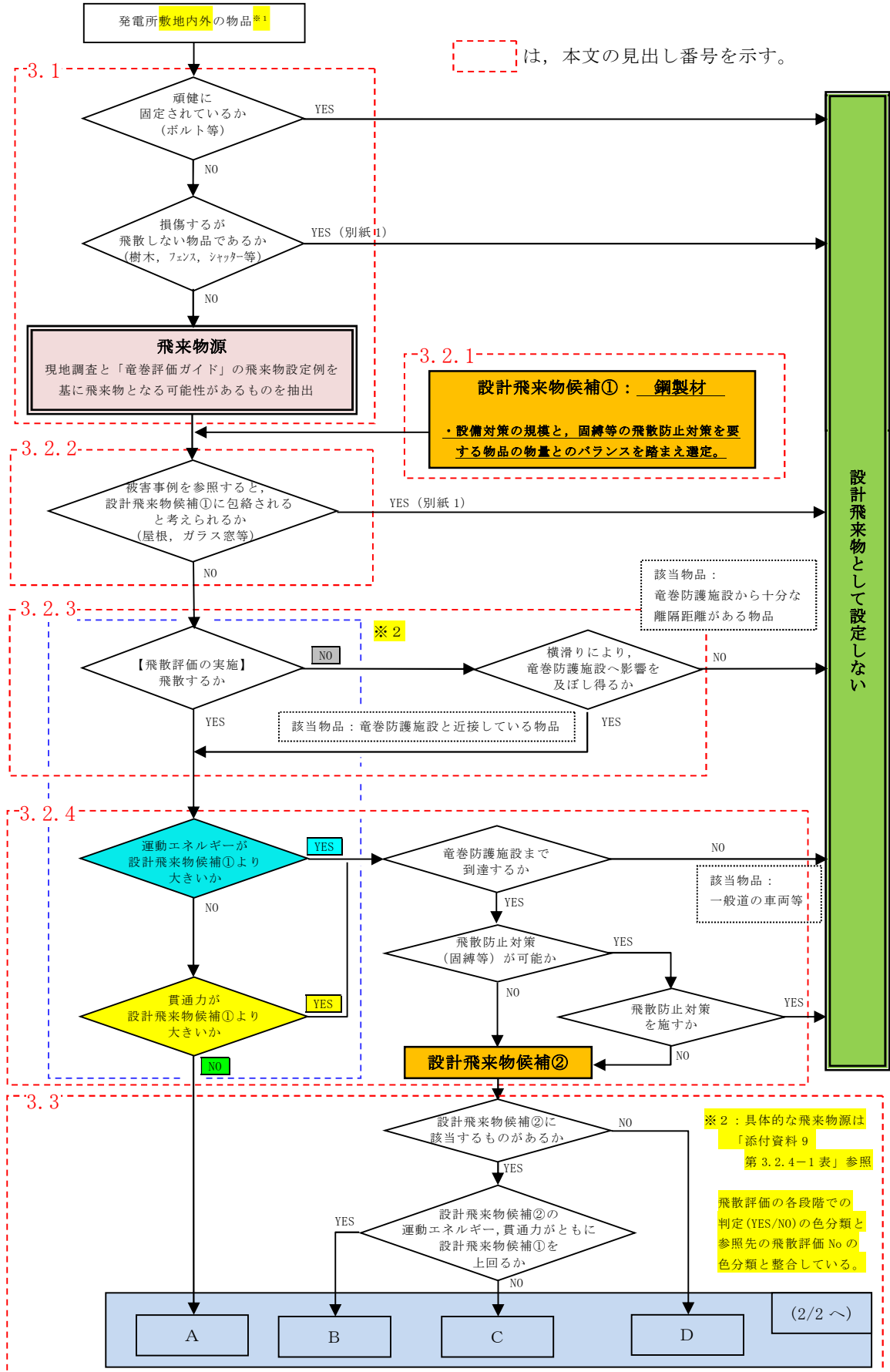
別図2-4-2図 固縛の一例

設計飛来物の設定について

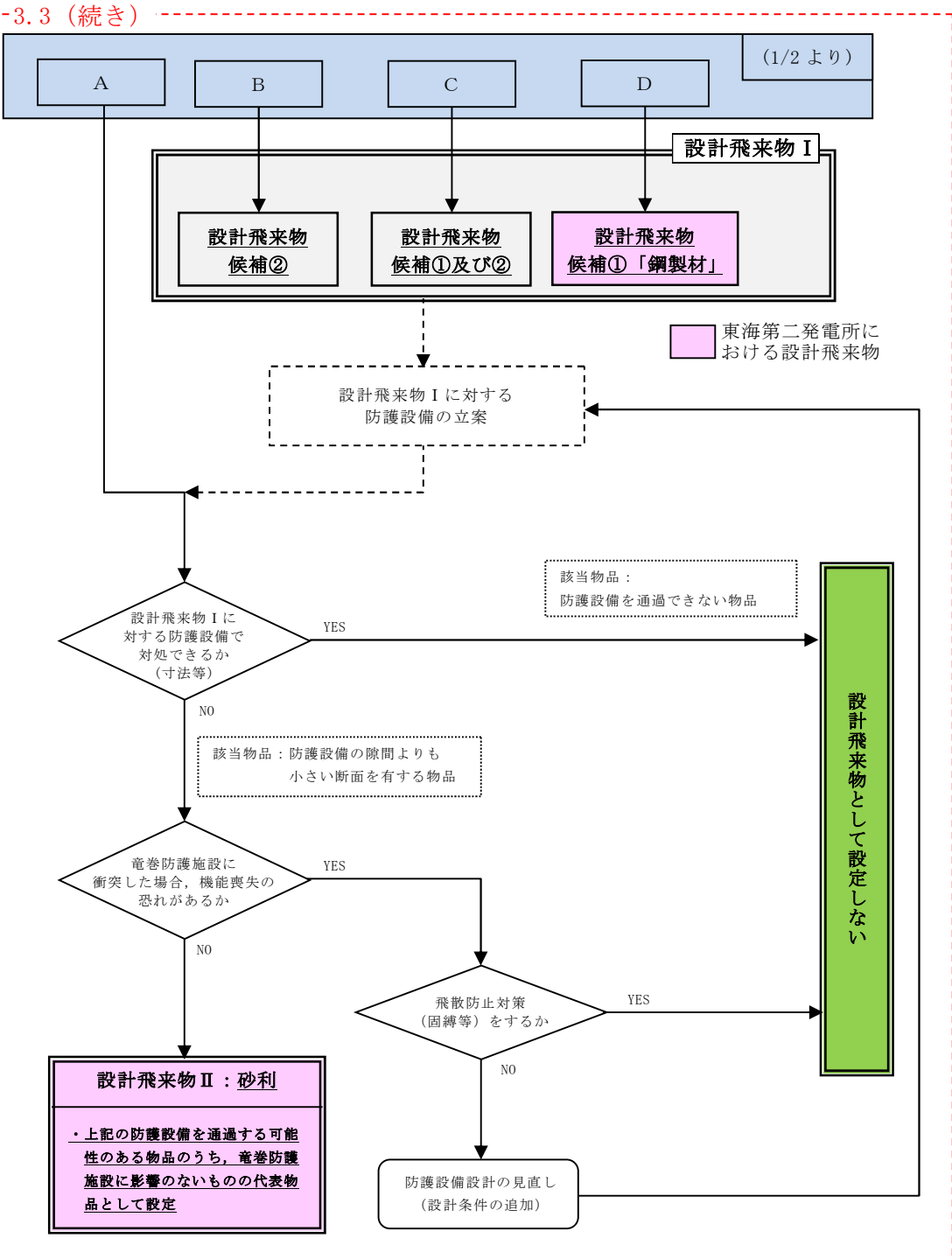
1. 設計飛来物の設定方針

東海第二発電所の竜巻影響評価に用いる設計飛来物を, 第 1-1 図に示すフローに基づき設定した。

※1：発電所敷地内及び周辺の現地調査等を踏まえ抽出



第 1-1 図 設計飛来物の設定フロー(1/2)



第 1-1 図 設計飛来物の設定フロー (2/2)

2. 発電所構内の物品調査

2.1 調査範囲

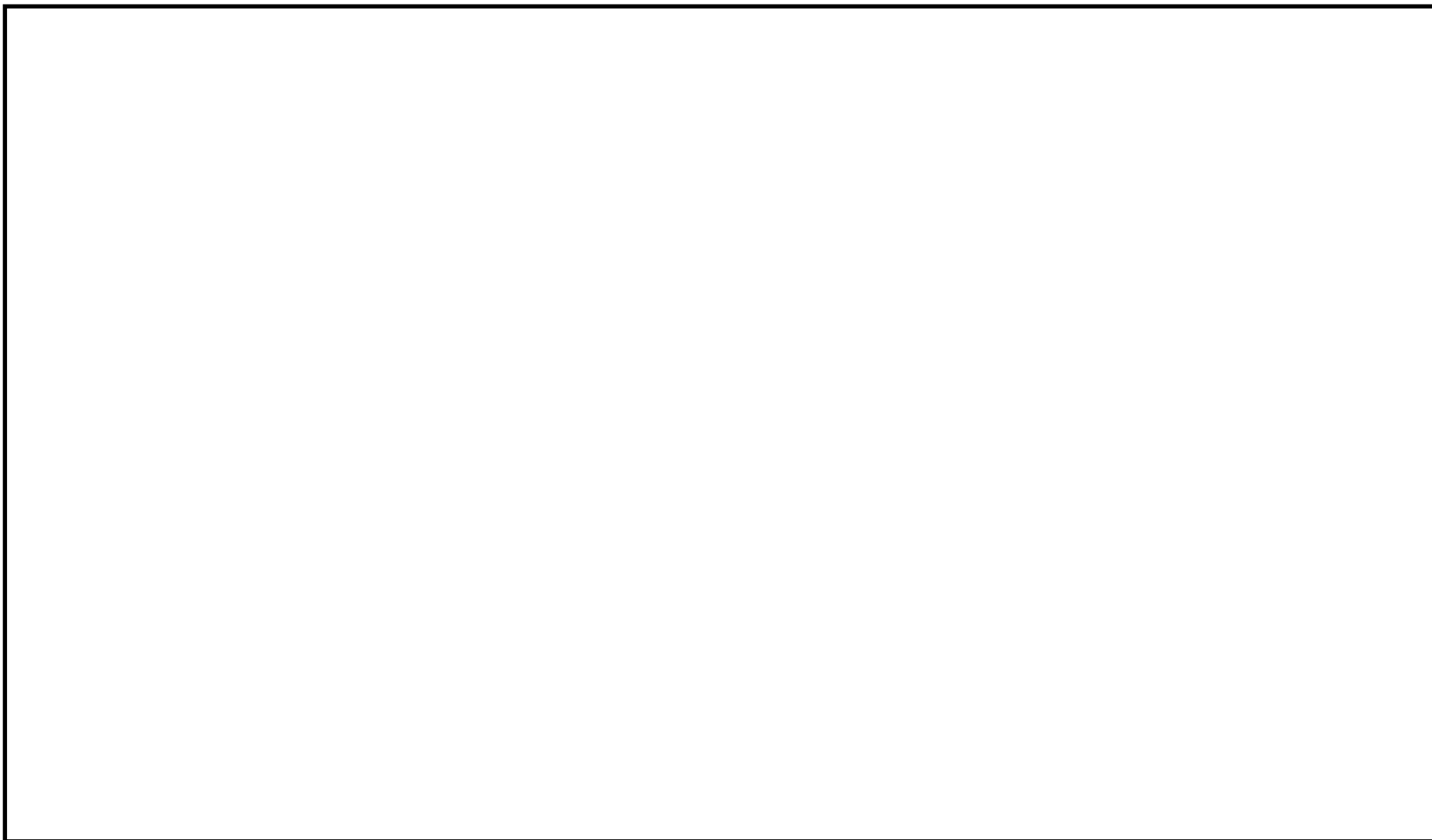
東海第二発電所構内の物品調査は、1回目を平成26年1月15日から16日（発電所敷地内）、及び2回目を平成28年7月22日に実施した。調査範囲は、米国Regulatory Guideを参考に、第2.1-1図に示すとおり、原子炉建屋から半径800mの範囲とした。なお、後述の代表的な飛来物源の飛散評価結果において、飛散距離は最大でも400m程度であることから、調査範囲は十分と考えられる。

2回の調査において認められた物品の種類に有意な違いは認められなかったことから、定期検査の有無や季節性を加味しても、考慮すべき物品の種類としては、今回認められたものの中に包絡されるものと考えられる。

なお、今後も飛来物源について継続的に確認し、新たに考慮すべき物品の種類が認められた場合は、新たな飛来物源として評価する。

第2.1-1表 調査エリア区分

エリア番号	エリア内の主な施設
①	東海発電所 タービン建屋 使用済燃料乾式貯蔵建屋 屋外開閉所，事務本館
②	資材置場，駐車場
③	東海発電所 取水口，放水口 資材倉庫
④	固体廃棄物貯蔵庫 東海第二発電所 取水口，放水口，海水ポンプ室
⑤	東海発電所 原子炉建屋 東海第二発電所 原子炉建屋，タービン建屋 廃棄物処理建屋



第 2.1-1 図 物品調査エリア

2.2 発電所構内の物品の調査結果

調査の結果, 第 2.2-1 表に示す種類の物品が東海第二発電所において確認された。調査エリア毎の主な物品を以降に示す。

第 2.2-1 表 東海第二発電所における主な飛来物源の種類

棒状※	板状※	塊状※	
<ul style="list-style-type: none"> ・バリケード ・ベンチ (常設) ・樹木 (倒木, 伐採木), 材木 ・鉄骨 ・鋼管 ・ボンベ ・樹脂製パイプ 	<ul style="list-style-type: none"> ・樹脂製蓋 ・コンクリ製蓋 ・マンホール蓋 ・グレーチング ・カーブミラー ・看板, 標識 ・鋼製敷板 ・鋼製スロープ ・鋼製蓋 ・ベンチ (仮設) ・足場板, 足場枠 ・パレット (鋼製) ・パレット (木製, 樹脂製) ・脚立, 梯子 ・時計 ・仮囲い板, 仮設フェンス 	<ul style="list-style-type: none"> ・ドラム缶 ・消防車 ・トラック ・社用バス ・乗用車 ・コンテナ ・物置 ・洗濯機 ・仮設電源 ・建設機械 ・運搬台車 ・鋼製ボックス ・下駄箱 ・カラーコーン ・消火器 ・消火設備格納箱 ・フォークリフト 	<ul style="list-style-type: none"> ・バイク, 自転車 ・土嚢 ・自動販売機 ・ケーブルドラム ・仮設トイレ ・オブジェ ・鋼製ブロック ・コンクリートブロック ・サッカーゴール ・木片, 木製品 ・プレハブ小屋 ・プラスチック容器 ・什器類 ・ホース, ケーブル類 ・空調室外機 ・鋼製ステップ

※: 各ジャンルにおける代表的な形状にて整理した表であり, ジャンル内の物品全てが同一の形状となる訳ではない。

エリア①で確認された主な飛来物源



#1 乗用車



#2 プレハブ小屋



#6 パレット（木製又は樹脂製）



#8 鋼管



#9 ポンプ



#10 脚立, 梯子



#11 ドラム缶



#13 ケーブルドラム



#17 ケーブルドラム



#19 物置



#20 物置



#21 コンテナ



#22 トラック



#27 フォークリフト



#28 乗用車



#32 消火器



#33 消火設備格納箱



#34 鋼製スロープ



#38 足場板, 足場枠



#46 洗濯機



#47 プラスチック容器



#49 マンホール蓋



#50 バイク, 自転車



#51 カーブミラー



#53 看板, 標識



#54 コンクリ製蓋



#56 バリケード



#58 樹脂製蓋



#61 鋼製敷板



#62 鋼製ボックス



#63, #64 仮設電源



#65 フレコンバッグ入資材



#66 プレハブ小屋



#67 運搬台車



#68 プラスチック容器



#69 鉄骨



#73 コンテナ



#74 空調室外機



#75 プレハブ小屋



#76 ケーブルドラム



#77 建設機械



#79 消防車



#81 コンクリ製蓋



#121 コンクリートブロック



#122 コンクリートブロック

エリア②で確認された主な飛来物源



#84 鋼製蓋



#85 物置



#87 グレーチング



#89 鋼製ステップ



#90 ケーブルドラム



#92 仮設電源



#93 ドラム缶



#94 脚立, 梯子



#97 鉄骨



#100 ケーブルドラム



#101 ホース, ケーブル類



#102 鋼製ボックス



#106 コンテナ



#107 樹木 (倒木, 伐採木), 材木



#110 鉄骨



#112 鋼管



#115 トラック



#116 運搬台車



#117 バイク，自転車

エリア③で確認された主な飛来物源



#131 コンテナ



#138 鋼管



#139 仮設電源



#141 建設機械



#142 仮設トイレ



#143 鋼管



#144 空調室外機



#145 空調室外機



#152 消火設備格納箱



#153 消火設備格納箱



#155 プレハブ小屋



#156 資機材類



#163 鉄骨



#164 鋼製蓋



#165 バリケード



#176 ドラム缶



#177 鋼製ステップ

エリア④で確認された主な飛来物源



#181 バリケード



#182 消防車



#183 消防車



#186 マンホール蓋



#188 カラーコーン



#190 ベンチ (常設)



#194 看板, 標識



#198 プラスチック容器



#199 オブジェ (タービン)



#201 コンクリートブロック



#203 ベンチ (常設)



#204 下駄箱



#205 自動販売機



#210 空調室外機



#215, #216 社用バス



#217 鋼製ステップ



#219 乗用車



#220 カーブミラー



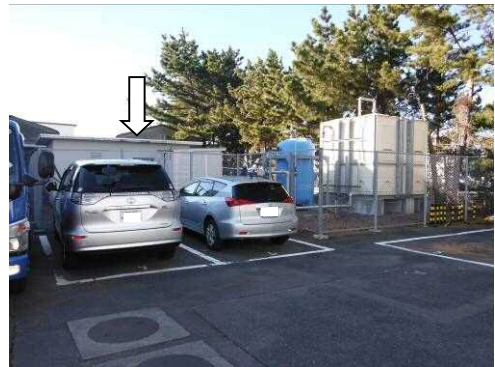
#222 物置



#225 鋼製ステップ



#226 トラック



#228 プレハブ小屋



#347 物置



#350 鋼製ボックス



#351 木片, 木製品



#352 鋼管



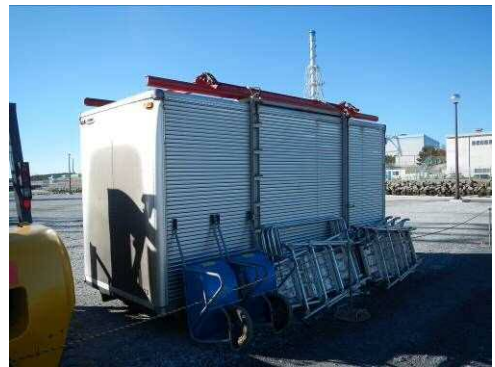
#370 プレハブ小屋



#371 物置



#372 フォークリフト



#373 物置



#376 鋼管



#379 パレット (木製又は樹脂製)



#380, #381 鋼製ブロック



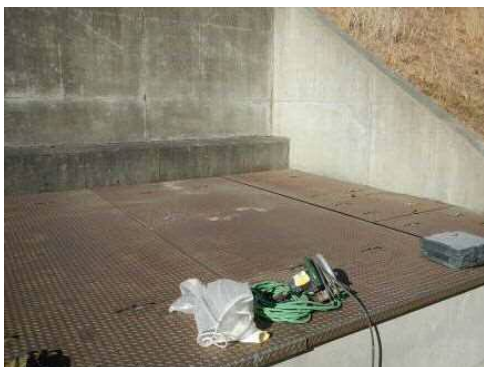
#382 看板, 標識



#383 物置



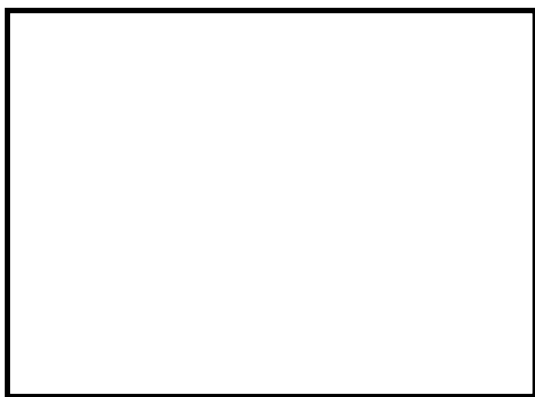
#388 コンクリ製蓋



#392 鋼製蓋



#394 鋼製敷板



#398 仮設トイレ



#400 鋼製ボックス



#405 樹脂製パイプ



#409 倉庫, #410 自動販売機



#411 鋼製蓋



#412 鋼製蓋



#413 鋼製蓋



#414 プレハブ小屋



#417 コンクリートブロック



#418 コンクリ製蓋



#421 ケーブルドラム



#422 鋼製ボックス



#423 鋼製ステップ



#424 プレハブ小屋



#431 樹脂製蓋



#435 コンテナ



#436 鋼製ボックス



#437 鋼製ボックス



#469 鋼管



#472 運搬台車



#475 鋼製ステップ



#478 物置



#479 プレハブ小屋



#483 ベンチ



#484 サッカーゴール



#485 樹木 (倒木, 伐採木), 材木



#486 バイク，自転車



#487 バイク，自転車



#488 バイク，自転車



#490 空調室外機

エリア⑤で確認された主な飛来物源



#244 グレーチング



#246 マンホール蓋



#247 プレハブ小屋



#250 運搬台車



#251 ベンチ（仮設）



#252 トラック



#253 鋼製蓋



#258 プラスチック容器



#259 物置



#260 プレハブ小屋



#262 仮設電源



#267 物置



#272 足場材, 足場枠



#276 建設機械



#279 プレハブ小屋



#281 空調室外機



#284 鋼製敷板



#286 鋼管



#287, #288 鋼製ボックス



#289 空調室外機



#293 ポンプ



#295 ホース, ケーブル類



#298 鋼製スロープ



#301 足場板, 足場枠



#305 鋼製敷板



#307 プレハブ小屋



#309 プラスチック容器



#314 コンクリートブロック



#316 マンホール蓋



#320 パレット (鋼製)



#330 物置



#335 鋼製スロープ



#336 什器類



#337 敷鉄板



#338 ケーブルドラム



#339 パレット（木製又は樹脂製）



#340 プレハブ小屋



#343 仮囲い板, 仮設フェンス



#495 仮設電源

3. 設計飛来物の設定

3.1 固定状況等を踏まえた飛来物源の抽出

現地調査にて確認された物品のうち以下に示すもののうち、過去の竜巻被害事例（【添付資料9 別紙1】）も参考とし、以下の観点のいずれにも当てはまらない物品を飛来物源として抽出した。

- (1) 溶接やボルト等により頑健に固定されている物品
- (2) 竜巻の影響により損傷はするが、飛散しない物品

3.2 飛来物源の飛散評価

3.2.1 設計飛来物候補の設定

設備対策の規模と、固縛等の飛散防止対策を要する物品の物量等のバランスを考え、竜巻影響評価ガイドに例示される鋼製材を、設計飛来物候補として設定した。

3.2.2 評価不要物品の抽出

飛来物源のうち、過去の竜巻被害事例（添付資料9 別紙1）を参考とし、設計飛来物候補である鋼製材の影響を下回ると判断した物品については、設計飛来物にならないものとして、飛散評価を不要とした。

3.2.3 飛来物源の飛散評価

3.2.2にて抽出された飛来物源に対し、設計竜巻の最大風速 100m/s、風速場モデルとしてフジタモデルを適用した場合における飛散評価を実施した。

(1) 初期高さ

フジタモデルを使用した飛散評価においては、評価対象物品の配置位置と敷地高さとの高低差を示す初期高さの設定が必要となる。評価対象物品の初期高さは現地調査結果を踏まえて設定するものとし、基本は地表からの飛散を想定した評価を行うものとする。

但し、仮設材のように設置場所が特定できず、高所に置かれる可能性を有する飛来物源に対しては、この様な物品を持ち込む場合は、使用場所が地表高さであるか高所であるかを考慮の上、適切な初期高さからの飛散評価結果を踏まえ、固縛等の要否を判断する。

(2) 空力パラメータ

飛散評価に用いる空力パラメータは、疎な物品の場合においては、見付面の充実率に応じた割増係数を抗力係数に乗じたうえで算出する。

【添付資料 9 別紙 2】

(3) 飛散速度の選定と横滑りの考慮

飛来物源の飛散速度については、「竜巻影響評価ガイド」に基づき、飛散評価により算出される際の最大水平速度及び最大鉛直速度を設定した。

なお、浮上しないが横滑りにより竜巻防護施設に影響を与え得る物品については、浮上する物品同様、3.3の結果を踏まえ設計飛来物として選定する必要があるかを判断する。

3.2.4 飛散防止対策の可否を踏まえた飛来物源のスクリーニング

飛散評価の結果を踏まえ、設計飛来物候補である鋼製材に対し、その影響（運動エネルギーもしくは貫通力）を上回るパラメータを有する飛来物源に対し、固縛あるいは離隔及び撤去等の飛散防止対策の可否を考慮し、新たに設計飛来物候補とする必要の有無を評価した。

代表的な飛来物源の飛散評価結果とスクリーニングの結果を、第 3.2.4-1 表に示す。

第 3.2.4-1 表 代表的な飛来物源の飛散評価結果整理表 (1/9)

No.	カテゴリ (品目に則った整理)	寸法(m)			C _D A/m (m ² /kg)	最大 水平 速度 (m/s)	最大 飛散 距離 (m)	最大 浮上 高さ (m)	質量 (kg)	運動エネルギー		貫通力(コンクリ)		貫通力(鋼板)		固縛等の 検討が必要 【①,②,③の 何れかが“○”】
		高さ	高さ以外							最大 運動E (kJ)	鋼製材超 (E>176k J) 【条件①】	貫通 限界 厚さ (mm)	鋼製材超 (T>25.9mm) 【条件②】	貫通 限界 厚さ (mm)	鋼製材超 (T>9 [*] mm) 【条件②】	
<運動エネルギーが鋼製材より大きいもの>																
340	プレハブ小屋	2.2	6	10	0.0115	56	185.1	15.786	5500	8624	○	64.4	○	9	×	○
19	物置	2.3	3.2	6.5	0.0057	43	88.5	4.726	5000	4623	○	54.4	○	8	×	○
252	トラック	2.24	2.445	7.54	0.0073	48	120.2	6.56	3700	4263	○	54.7	○	8	×	○
260	プレハブ小屋	2.6	2.86	6.05	0.009	52	172.2	13.803	3000	4056	○	49.9	○	7	×	○
216	社用バス	2.34	2.96	8.99	0.0037	28	37.3	1.675	9910	3885	○	52.7	○	7	×	○
414	プレハブ小屋	2.3	2.7	5.5	0.0075	49	146.8	7.625	3000	3602	○	49	○	7	×	○
182	消防車	2.49	3.04	8	0.0033	25	30.7	1.216	10620	3319	○	48.4	○	6	×	○
155	プレハブ小屋	2.5	3.6	5	0.0145	59	210.8	21.932	1800	3133	○	41.8	○	5	×	○
215	社用バス	2.08	2.82	6.99	0.0041	30	41.3	1.907	6605	2973	○	47.3	○	6	×	○
183	消防車	2.28	2.8	7.15	0.0033	23	26.6	1.008	8635	2284	○	42	○	5	×	○
20	物置	2.3	3.05	3.05	0.0103	54	176.9	14.187	1500	2187	○	37.1	○	5	×	○
66	プレハブ小屋	2.4	2.7	5.4	0.0225	65	227.2	27.502	1000	2113	○	36.3	○	5	×	○
75	プレハブ小屋	2.4	2.7	5.4	0.0225	65	227.2	27.502	1000	2113	○	36.3	○	5	×	○
2	プレハブ小屋	2.3	2.6	4.6	0.0189	63	219.9	24.347	1000	1985	○	35.9	○	5	×	○
247	プレハブ小屋	2.3	2.8	4.4	0.0191	63	220.3	24.49	1000	1985	○	35.4	○	5	×	○
237	プレハブ小屋	2	3	4	0.0172	61	209.6	20.915	1000	1861	○	34.8	○	5	×	○
373	物置	1.9	2.2	4.4	0.0052	36	53.4	2.951	2836	1838	○	39.1	○	6	×	○
228	プレハブ小屋	2.4	2.4	3.6	0.0153	60	211.9	22.074	1000	1800	○	34.6	○	5	×	○
479	プレハブ小屋	2.4	2.4	3.6	0.0153	60	211.9	22.074	1000	1800	○	34.6	○	5	×	○
259	物置	2.4	2.65	3.5	0.0159	60	213.9	22.626	1000	1800	○	33.9	○	5	×	○
115	トラック	2.22	3.16	7.56	0.0032	21	22.6	0.815	7970	1758	○	36.5	○	4	×	○
370	プレハブ小屋	2.2	2.3	4.5	0.0186	62	217.6	23.438	900	1730	○	34.7	○	5	×	○
28	乗用車	1.69	1.81	4.39	0.0067	43	73.9	3.801	1825	1688	○	39.1	○	6	×	○

※ 鋼板貫通評価においても、コンクリートと同様に衝突方向の断面は中実断面として評価している。

第 3.2.4-1 表 代表的な飛来物源の飛散評価結果整理表 (2/9)

No.	カテゴリ (品目に則った整理)	寸法(m)			C _D A/m (m ² /kg)	最大 水平 速度 (m/s)	最大 飛散 距離 (m)	最大 浮上 高さ (m)	質量 (kg)	運動エネルギー		貫通力(コンクリ)		貫通力(鋼板)		固縛等の 検討が必要 【①,②,③の 何れかが“○”】
		高さ	高さ以外							最大 運動E (kJ)	鋼製材超 (E>176k J) 【条件①】	貫通 限界 厚さ (mm)	鋼製材超 (T>25.9mm) 【条件②】	貫通 限界 厚さ (mm)	鋼製材超 (T>9 [*] mm) 【条件②】	
22	トラック	1.695	1.9	4.69	0.0057	37	55.2	3.007	2340	1602	○	38.3	○	6	×	○
106	コンテナ	1.8	1.8	3.7	0.0116	55	170.1	12.251	950	1437	○	34.9	○	5	×	○
73	コンテナ	1.5	2.1	3.7	0.0115	54	163.1	8.195	950	1386	○	34.5	○	5	×	○
307	プレハブ小屋	1.85	2.6	3.65	0.0193	62	211.5	21.333	720	1384	○	31.4	○	4	×	○
1	乗用車	1.6	2	4.5	0.0052	33	44.3	2.293	2500	1362	○	35.8	○	5	×	○
219	乗用車	1.39	1.86	4.615	0.0069	40	56.7	2.987	1570	1256	○	35.2	○	6	×	○
424	プレハブ小屋	1.7	2.5	2.6	0.0147	59	186.9	15.804	685	1193	○	30	○	4	×	○
383	物置	1.9	1.9	2.25	0.0101	53	165.3	10.111	801	1126	○	30.4	○	4	×	○
371	物置	2	2	2.3	0.0137	58	194.1	17.348	640	1077	○	28.9	○	4	×	○
347	物置	1.9	2.05	2.4	0.0177	61	208.6	20.542	500	931	○	26.9	○	4	×	○
330	物置	1.9	2.3	2.9	0.0304	69	222.9	30.192	360	857	○	24.9	×	4	×	○
177	鋼製ステップ	1	1.3	4.3	0.0185	60	164.2	9.74	400	720	○	29.3	○	5	×	○
409	物置	1.4	2.1	3	0.0296	68	212.9	24.183	300	694	○	24.3	×	4	×	○
222	物置	1.8	2	3	0.0367	71	220.9	33.633	270	681	○	23	×	3	×	○
21	コンテナ	1	1.4	3.2	0.0134	54	141.3	4.521	450	657	○	27.9	○	5	×	○
85	物置	2	2.1	3.5	0.0583	78	-515.9	-44.356	210	639	○	21.5	×	3	×	○
63	仮設電源	1.68	2.12	3.69	0.0034	19	17.8	0.574	3460	625	○	25.2	×	3	×	○
79	消防車	2.5	2.5	8	0.0025	10	4.9	0.068	12500	625	○	24.1	×	3	×	○
435	コンテナ	1.2	1.712	3.7	0.0044	23	23.2	0.886	1960	519	○	25.1	×	4	×	○
398	仮設トイレ	0.9	1.4	2.5	0.0133	52	128.8	3.795	350	474	○	24.3	×	4	×	○
279	プレハブ小屋	1.3	2.2	2.4	0.0477	74	210.3	33.081	156	428	○	19	×	3	×	○
145	空調室外機	1	2.1	2.9	0.0058	28	29.9	1.404	1000	392	○	21.3	×	3	×	○
286	鋼管	0.8	1	3.4	0.0092	38	40.3	2.005	500	361	○	23.9	×	4	×	○
262	仮設電源	1.05	1.2	1.5	0.0153	57	157.2	6.695	200	325	○	20	×	3	×	○

※ 鋼板貫通評価においても、コンクリートと同様に衝突方向の断面は中実断面として評価している。

第 3.2.4-1 表 代表的な飛来物源の飛散評価結果整理表 (3/9)

No.	カテゴリ (品目に則った整理)	寸法(m)			C _D A/m (m ² /kg)	最大 水平 速度 (m/s)	最大 飛散 距離 (m)	最大 浮上 高さ (m)	質量 (kg)	運動エネルギー		貫通力(コンクリ)		貫通力(鋼板)		固縛等の 検討が必要 【①,②,③の 何れかが“○”】
		高さ	高さ以外							最大 運動E (kJ)	鋼製材超 (E>176k J) 【条件①】	貫通 限界 厚さ (mm)	鋼製材超 (T>25.9mm) 【条件②】	貫通 限界 厚さ (mm)	鋼製材超 (T>9 [*] mm) 【条件②】	
437	鋼製ボックス	1.05	1.35	1.35	0.0154	57	157.9	6.793	200	325	○	19.6	×	3	×	○
478	物置	1.1	1.3	2	0.0288	67	200.3	19.881	143	321	○	19.1	×	3	×	○
210	空調室外機	0.9	1.3	1.8	0.01	42	53.2	2.69	340	300	○	20.1	×	3	×	○
90	ケーブルドラム	0.9	1.5	1.5	0.0147	54	141.3	4.274	199	291	○	18.8	×	3	×	○
142	仮設トイレ	0.876	1.598	2.572	0.0458	72	207.1	25.417	112	291	○	18.1	×	3	×	○
485	樹木(倒木, 伐採 木), 材木	1	1	14.2	0.0184	60	161.6	9.626	151	272	○	20	×	4	×	○
144	空調室外機	1	1	1.3	0.0114	50	126.7	3.592	210	263	○	19.1	×	3	×	○
350	鋼製ボックス	0.98	1.65	1.8	0.042	72	201.5	25.554	100	260	○	16.7	×	3	×	○
421	ケーブルドラム	0.9	1.5	1.5	0.0143	53	134.5	4.133	179	252	○	17.5	×	3	×	○
84	鋼製蓋	0.1	5	5	0.0136	20	14.8	0.23	1250	250	○	23.2	×	4	×	○
422	鋼製ボックス	0.9	1	1.9	0.0082	36	39.3	2.041	366	238	○	19.1	×	3	×	○
205	自動販売機	0.9	1.2	1.8	0.0064	30	30	1.438	508	229	○	18.5	×	3	×	○
89	鋼製ステップ	1	1.8	2.4	0.0193	61	161.5	10.645	120	224	○	15.4	×	2	×	○
17	ケーブルドラム	0.8	1.5	1.5	0.0173	55	143.4	4.312	141	214	○	16.5	×	3	×	○
287	鋼製ボックス	0.75	1.3	1.6	0.0094	37	38	1.887	300	206	○	17.5	×	3	×	○
410	自動販売機	0.7	1.4	1.8	0.009	34	32.5	1.638	350	203	○	17.5	×	3	×	○
217	鋼製ステップ	1	1	4	0.01	45	61.7	3.115	200	203	○	17	×	3	×	○
258	プラスチック容器	0.9	1.2	1.2	0.0238	63	163.9	12.946	100	199	○	16	×	3	×	○
436	鋼製ボックス	0.8	1.05	1.38	0.0112	43	58.5	2.565	200	185	○	16.8	×	3	×	○
486	バイク, 自転車	0.76	1.2	2.1	0.0112	42	60	2.391	209	185	○	16.6	×	3	×	○
236	仮設トイレ	0.8	1.1	2	0.0436	71	200.7	22.91	71	179	○	15.6	×	3	×	○
<運動エネルギーは鋼製材を下回るが, 貫通力が鋼製材より大きいもの> …該当なし																

※ 鋼板貫通評価においても, コンクリートと同様に
衝突方向の断面は中実断面として評価している。

第 3.2.4-1 表 代表的な飛来物源の飛散評価結果整理表 (4/9)

No.	カテゴリ (品目に則った整理)	寸法(m)			C _D A/m (m ² /kg)	最大 水平 速度 (m/s)	最大 飛散 距離 (m)	最大 浮上 高さ (m)	質量 (kg)	運動エネルギー		貫通力(コンクリ)		貫通力(鋼板)		固縛等の 検討が必要 【①,②,③の 何れかが“○”】
		高さ	高さ以外							最大 運動E (kJ)	鋼製材超 (E>176k J) 【条件①】	貫通 限界 厚さ (mm)	鋼製材超 (T>25.9mm) 【条件②】	貫通 限界 厚さ (mm)	鋼製材超 (T>9 [*] mm) 【条件②】	
<飛散するが、鋼製材の影響を超えないため、設計飛来物として考慮不要なもの>																
102	鋼製ボックス	0.8	1.1	1.4	0.0293	66	167.4	14.694	80	175	×	15.5	×	3	×	×
488	バイク, 自転車	0.74	1.09	1.915	0.0154	51	119.1	3.327	130	170	×	16	×	3	×	×
484	サッカーゴール	1.3	2	3.2	0.0157	58	167.4	11.838	100	169	×	12.5	×	2	×	×
288	鋼製ボックス	0.75	0.8	4.3	0.0061	25	22.2	1.011	500	157	×	17.4	×	3	×	×
487	バイク, 自転車	0.725	1.07	2.04	0.0103	39	41.1	2.068	201	153	×	15.7	×	3	×	×
281	空調室外機	0.75	0.9	1.4	0.0104	40	43.8	2.185	190	152	×	16.1	×	3	×	×
62	鋼製ボックス	1	1.5	1.6	0.004	18	13.6	0.428	923	150	×	14.8	×	2	×	×
143	鋼管	0.65	0.65	8	0.0078	30	25.6	1.232	320	144	×	17.6	×	3	×	×
76	ケーブルドラム	0.8	1.12	1.12	0.0161	54	140.7	3.946	96	140	×	14.2	×	2	×	×
475	鋼製ステップ	0.6	1.2	2.2	0.011	37	35.2	1.718	200	137	×	15.2	×	3	×	×
74	空調室外機	0.7	1.2	1.3	0.0078	31	28	1.362	283	136	×	14.9	×	3	×	×
423	鋼製ステップ	0.6	0.9	1.8	0.0212	57	148	3.429	81	132	×	15.1	×	3	×	×
121	コンクリートブロック	0.6	1.2	1.2	0.0381	69	173.4	14.715	50	120	×	13.3	×	2	×	×
53	看板, 標識	0.2	0.85	4.85	0.0318	48	149.6	1.121	100	116	×	17.8	×	4	×	×
225	鋼製ステップ	0.6	1.2	2.2	0.01	34	30.7	1.512	200	116	×	14.1	×	2	×	×
101	ホース, ケーブル類	0.4	1.5	1.5	0.0396	66	155	6.613	50	109	×	13.3	×	3	×	×
117	バイク, 自転車	0.5	0.55	1.915	0.0159	45	114.4	1.983	95	97	×	15	×	3	×	×
116	運搬台車	0.9	2	2.5	0.0108	44	58.5	2.911	100	97	×	10.5	×	2	×	×
490	空調室外機	0.6	0.7	1.45	0.0102	35	31.3	1.545	150	92	×	13.9	×	3	×	×
138	鋼管	0.65	0.65	5	0.0067	26	21	0.972	247	84	×	13.6	×	3	×	×
267	物置	0.75	1.08	1.5	0.0047	18	14	0.484	500	81	×	12.3	×	2	×	×
68	プラスチック容器	0.6	0.7	1.3	0.0481	72	238.9	20.237	29	76	×	11.7	×	2	×	×
382	看板, 標識	0.1	1.8	2	0.0343	44	147.7	0.524	72	70	×	13.9	×	3	×	×

※ 鋼板貫通評価においても、コンクリートと同様に衝突方向の断面は中実断面として評価している。

第 3.2.4-1 表 代表的な飛来物源の飛散評価結果整理表 (5/9)

No.	カテゴリ (品目に則った整理)	寸法(m)			C _D A/m (m ² /kg)	最大 水平 速度 (m/s)	最大 飛散 距離 (m)	最大 浮上 高さ (m)	質量 (kg)	運動エネルギー		貫通力(コンクリ)		貫通力(鋼板)		固縛等の 検討が必要 【①,②,③の 何れかが“○”】
		高さ	高さ以外							最大 運動E (kJ)	鋼製材超 (E>176k J) 【条件①】	貫通 限界 厚さ (mm)	鋼製材超 (T>25.9mm) 【条件②】	貫通 限界 厚さ (mm)	鋼製材超 (T>9 [*] mm) 【条件②】	
164	鋼製蓋	0.15	2.3	2.3	0.0086	17	12.5	0.193	441	64	×	12.9	×	2	×	×
495	仮設電源	0.6	0.9	1.1	0.0067	24	19.8	0.867	216	63	×	11.3	×	2	×	×
152	消火設備格納箱	0.5	0.5	1.2	0.0192	49	132.9	2.372	50	61	×	12	×	3	×	×
194	看板, 標識	0.6	0.6	1.4	0.0272	63	157.5	6.893	30	60	×	10.9	×	2	×	×
56	バリケード	0.635	0.82	6.5	0.0239	61	157	5.378	31.4	59	×	10.1	×	2	×	×
13	ケーブルドラム	0.5	0.9	0.9	0.0093	29	24.1	1.096	122	52	×	10.5	×	2	×	×
11	ドラム缶	0.6	0.6	0.89	0.0472	72	214	19.804	20	52	×	10.1	×	2	×	×
93	ドラム缶	0.6	0.6	0.89	0.046	71	210.3	19.251	20.5	52	×	10.1	×	2	×	×
376	鋼管	0.55	0.55	2.4	0.0142	43	88.4	2.024	53.7	50	×	10.7	×	2	×	×
131	コンテナ	1	2.1	3.4	0.0031	6	1.4	0.017	2746	50	×	8.9	×	1	×	×
253	鋼製蓋	0.1	1.3	3.7	0.0141	20	15.4	0.24	241	49	×	13.4	×	3	×	×
153	消火設備格納箱	0.3	0.7	1.2	0.0233	47	143.4	1.442	40	45	×	10.8	×	2	×	×
201	コンクリートブロック	0.5	0.8	0.8	0.0096	30	24.6	1.139	100	45	×	10	×	2	×	×
46	洗濯機	0.5	0.5	0.8	0.0148	43	84.2	1.855	47	44	×	10.4	×	2	×	×
392	鋼製蓋	0.055	1.5	3.5	0.0127	17	12.3	0.099	283	41	×	13.6	×	3	×	×
67	運搬台車	0.6	0.9	0.9	0.0291	64	154.4	8.453	19.6	41	×	8.3	×	2	×	×
165	バリケード	1.1	1.1	1.4	0.0064	32	37	1.92	80	41	×	7.7	×	1	×	×
139	仮設電源	0.598	0.687	0.713	0.0066	24	19.8	0.84	134	39	×	9.5	×	2	×	×
92	仮設電源	0.3	0.7	0.9	0.0194	44	113.6	1.227	37.8	37	×	9.9	×	2	×	×
122	コンクリートブロック	0.45	0.5	0.8	0.0131	38	71.5	1.394	50	37	×	9.8	×	2	×	×
483	ベンチ(常設)	0.5	0.75	1.8	0.1157	84	229.4	32.677	10	36	×	8.1	×	2	×	×
181	バリケード	0.5	0.5	1.1	0.0268	59	154.2	3.346	20	35	×	9	×	2	×	×
338	ケーブルドラム	0.7	0.95	0.95	0.0043	15	9.8	0.287	302	34	×	8.5	×	1	×	×
6	パレット(木製または樹	0.15	1.1	1.1	0.0269	44	143.1	0.697	33	32	×	9.7	×	2	×	×

※ 鋼板貫通評価においても、コンクリートと同様に衝突方向の断面は中実断面として評価している。

第 3.2.4-1 表 代表的な飛来物源の飛散評価結果整理表 (6/9)

No.	カテゴリ (品目に則った整理)	寸法(m)			C _D A/m (m ² /kg)	最大 水平 速度 (m/s)	最大 飛散 距離 (m)	最大 浮上 高さ (m)	質量 (kg)	運動エネルギー		貫通力(コンクリ)		貫通力(鋼板)		固縛等の 検討が必要 【①,②,③の 何れかが“○”】
		高さ	高さ以外							最大 運動E (kJ)	鋼製材超 (E>176k J) 【条件①】	貫通 限界 厚さ (mm)	鋼製材超 (T>25.9mm) 【条件②】	貫通 限界 厚さ (mm)	鋼製材超 (T>9 [*] mm) 【条件②】	
	脂製)															
339	パレット (木製または樹脂製)	0.14	1.1	1.1	0.0267	43	139.7	0.639	33	31	×	9.6	×	2	×	×
301	足場板, 足場枠	0.24	0.36	3	0.0136	32	41.4	0.66	57	30	×	10.8	×	3	×	×
379	パレット (木製または樹脂製)	0.13	1.1	1.1	0.0385	48	146.7	0.774	23.7	28	×	9.1	×	2	×	×
203	ベンチ(常設)	0.4	0.6	0.9	0.0126	33	30.7	1.161	38.7	22	×	7.5	×	2	×	×
472	運搬台車	0.765	0.9	1.215	0.0074	31	28.2	1.427	44	22	×	6.2	×	1	×	×
176	ドラム缶	0.6	0.6	0.89	0.0045	14	9.1	0.259	211	21	×	7.5	×	1	×	×
298	鋼製スロープ	0.12	0.5	1.5	0.0206	38	77.5	0.427	27.7	20	×	9.4	×	3	×	×
220	カーブミラー	0.084	1	1	0.0369	44	148.7	0.453	19.7	20	×	8.5	×	2	×	×
190	ベンチ(常設)	0.4	0.4	1.2	0.0113	31	22.2	1.03	38.4	19	×	7.7	×	2	×	×
47	プラスチック容器	0.6	0.6	0.7	0.1584	87	256.7	39.584	5	19	×	6	×	1	×	×
343	仮囲い板, 仮設フェンス	0.049	1.8	1.8	0.07	44	257.4	0.392	17.5	17	×	8	×	2	×	×
94	脚立, 梯子	0.2	0.6	3	0.0299	47	147	1.069	15	17	×	7.4	×	2	×	×
251	ベンチ(仮設)	0.3	0.42	1.8	0.0243	47	143.6	1.494	15.1	17	×	7.3	×	2	×	×
204	下駄箱	0.4	0.6	1	0.0073	21	15.8	0.564	76	17	×	7	×	1	×	×
320	パレット(鋼製)	0.17	1.3	1.3	0.0161	30	31.7	0.512	33.8	16	×	6.6	×	1	×	×
405	樹脂製パイプ	0.3	0.3	6	0.0059	14	8.1	0.21	150	15	×	8.7	×	2	×	×
33	消火設備格納箱	0.3	0.3	0.7	0.0337	54	147.3	1.997	10	15	×	7.2	×	2	×	×
10	脚立, 梯子	0.2	0.5	1.8	0.0374	50	141.2	1.275	11	14	×	6.9	×	2	×	×
272	足場板, 足場枠	0.04	0.25	4	0.0582	43	126.1	0.278	12.5	12	×	9.8	×	4	×	×
351	木片, 木製品	0.26	0.26	0.77	0.0119	29	35	0.632	26	11	×	7	×	2	×	×

※ 鋼板貫通評価においても、コンクリートと同様に衝突方向の断面は中実断面として評価している。

第 3.2.4-1 表 代表的な飛来物源の飛散評価結果整理表 (7/9)

No.	カテゴリ (品目に則った整理)	寸法(m)			C _D A/m (m ² /kg)	最大 水平 速度 (m/s)	最大 飛散 距離 (m)	最大 浮上 高さ (m)	質量 (kg)	運動エネルギー		貫通力(コンクリ)		貫通力(鋼板)		固縛等の 検討が必要 【①,②,③の 何れかが“○”】
		高さ	高さ以外							最大 運動E (kJ)	鋼製材超 (E>176k J) 【条件①】	貫通 限界 厚さ (mm)	鋼製材超 (T>25.9mm) 【条件②】	貫通 限界 厚さ (mm)	鋼製材超 (T>9 [*] mm) 【条件②】	
188	カラーコーン	0.4	0.4	0.7	0.1092	84	367	28.881	3	11	×	5.3	×	1	×	×
295	ホース, ケーブル類	0.35	0.6	0.6	0.0052	12	7	0.169	100	8	×	5	×	1	×	×
51	カーブミラー	0.05	0.6	0.6	0.0297	38	102.4	0.21	8.8	7	×	6.1	×	2	×	×
107	樹木(倒木, 伐採 木), 材木	0.1	0.1	4	0.0162	22	17.5	0.277	20	5	×	6.9	×	3	×	×
58	樹脂製蓋	0.02	1	1	0.0188	15	9.2	0.046	36	5	×	5.8	×	2	×	×
34	鋼製スロープ	0.05	0.55	1.1	0.0203	21	17.1	0.152	21.4	5	×	5.7	×	2	×	×
198	プラスチック容器	0.7	0.7	0.9	0.0034	5	1.2	0.013	346	5	×	3.6	×	1	×	×
38	足場板, 足場枠	0.049	1.2	2	0.0152	18	12.8	0.109	22.9	4	×	4.5	×	1	×	×
32	消火器	0.153	0.154	0.5	0.0117	22	19.7	0.324	10	3	×	4.2	×	1	×	×
431	樹脂製蓋	0.015	0.5	0.67	0.0253	16	11.3	0.045	9	2	×	3.8	×	1	×	×
336	什器類	0.06	0.36	0.36	0.0227	25	25	0.207	4.5	2	×	3.3	×	1	×	×
316	マンホール蓋	0.006	0.65	0.65	0.0181	9	3.6	0.009	15.6	1	×	3.4	×	1	×	×
305	鋼製敷板	0.005	0.5	0.9	0.0181	8	2.9	0.007	16.6	1	×	3.4	×	1	×	×
232	コンクリ製蓋	0.03	0.5	0.6	0.0102	9	3.3	0.026	20.7	1	×	3	×	1	×	×
110	鉄骨	0.15	0.2	6	0.0048	2	0.1	0	179	1	×	2	×	1	×	×
418	コンクリ製蓋	0.022	0.26	0.26	0.0144	12	6.3	0.035	3.4	1	×	1.9	×	1	×	×
81	コンクリ製蓋	0.05	0.2	0.5	0.007	5	0.9	0.01	11.5	1	×	1.5	×	1	×	×
246	マンホール蓋	0.045	0.75	0.75	0.0063	1	0	0	64	1	×	0.7	×	1	×	×
<飛散しないもの>																
8	鋼管	0.17	0.17	5.5	0.0042	0	0	0	109	—	—	0	×	0	×	×
9	ボンベ	0.25	0.25	1.4	0.0038	0	0	0	52	—	—	0	×	0	×	×
27	フォークリフト	1.19	1.38	1.38	0.0011	0	0	0	3320	—	—	0	×	0	×	×
49	マンホール蓋	0.05	1	1	0.0058	0	0	0	122	—	—	0	×	0	×	×

※ 鋼板貫通評価においても、コンクリートと同様に
衝突方向の断面は中実断面として評価している。

第 3.2.4-1 表 代表的な飛来物源の飛散評価結果整理表 (8/9)

No.	カテゴリ (品目に則った整理)	寸法(m)			C _D A/m (m ² /kg)	最大 水平 速度 (m/s)	最大 飛散 距離 (m)	最大 浮上 高さ (m)	質量 (kg)	運動エネルギー		貫通力(コンクリ)		貫通力(鋼板)		固縛等の 検討が必要 【①,②,③の 何れかが“○”】
		高さ	高さ以外							最大 運動E (kJ)	鋼製材超 (E>176k J) 【条件①】	貫通 限界 厚さ (mm)	鋼製材超 (T>25.9mm) 【条件②】	貫通 限界 厚さ (mm)	鋼製材超 (T>9 [*] mm) 【条件②】	
50	バイク, 自転車	0.05	0.51	0.54	0.0043	0	0	0	12.5	—	—	0	×	0	×	×
54	コンクリ製蓋	0.13	0.7	1	0.0027	0	0	0	209	—	—	0	×	0	×	×
61	鋼製敷板	0.019	1.55	6	0.0045	0	0	0	1387	—	—	0	×	0	×	×
64	仮設電源	1.3	1.75	3.7	0.0022	0	0	0	4190	—	—	0	×	0	×	×
65	フレコンバッグ入資材	1.1	1.1	1.1	0.0024	0	0	0	1000	—	—	0	×	0	×	×
69	鉄骨	0.15	0.15	1	0.0043	0	0	0	31.1	—	—	0	×	0	×	×
77	建設機械	0.99	1.65	2.63	0.0025	0	0	0	1570	—	—	0	×	0	×	×
87	グレーチング	0.065	1	1	0.0027	0	0	0	63.3	—	—	0	×	0	×	×
97	鉄骨	0.125	0.125	4.5	0.0043	0	0	0	106	—	—	0	×	0	×	×
100	ケーブルドラム	0.9	1.5	1.5	0.0021	0	0	0	1399	—	—	0	×	0	×	×
112	鋼管	0.15	0.15	4	0.0034	0	0	0	86	—	—	0	×	0	×	×
141	建設機械	2.2	2.69	2.69	0.0016	0	0	0	8000	—	—	0	×	0	×	×
163	鉄骨	0.1	0.1	5.4	0.0048	0	0	0	91.3	—	—	0	×	0	×	×
186	マンホール蓋	0.05	1	1	0.0058	0	0	0	122	—	—	0	×	0	×	×
199	オブジェ	2	2	4	0.0003	0	0	0	22000	—	—	0	×	0	×	×
226	トラック	1.695	2.15	5.14	0.0021	0	0	0	7635	—	—	0	×	0	×	×
231	マンホール蓋	0.045	0.7	0.7	0.0062	0	0	0	57	—	—	0	×	0	×	×
233	グレーチング	0.1	0.5	0.6	0.0021	0	0	0	38.4	—	—	0	×	0	×	×
234	石碑	0.2	1	2	0.0015	0	0	0	1080	—	—	0	×	0	×	×
244	グレーチング	0.1	0.9	1	0.0016	0	0	0	115	—	—	0	×	0	×	×
250	運搬台車	0.29	0.49	0.77	0.0039	0	0	0	120	—	—	0	×	0	×	×
276	建設機械	0.72	1.2	2.39	0.0016	0	0	0	2250	—	—	0	×	0	×	×
284	鋼製敷板	0.019	1.5	6	0.0045	0	0	0	1342	—	—	0	×	0	×	×
289	空調室外機	0.4	0.8	0.95	0.002	0	0	0	500	—	—	0	×	0	×	×

※ 鋼板貫通評価においても、コンクリートと同様に衝突方向の断面は中実断面として評価している。

第 3.2.4-1 表 代表的な飛来物源の飛散評価結果整理表 (9/9)

No.	カテゴリ (品目に則った整理)	寸法(m)			C _D A/m (m ² /kg)	最大 水平 速度 (m/s)	最大 飛散 距離 (m)	最大 浮上 高さ (m)	質量 (kg)	運動エネルギー		貫通力(コンクリ)		貫通力(鋼板)		固縛等の 検討が必要 【①,②,③の 何れかが“○”】
		高さ	高さ以外							最大 運動E (kJ)	鋼製材超 (E>176k J) 【条件①】	貫通 限界 厚さ (mm)	鋼製材超 (T>25.9mm) 【条件②】	貫通 限界 厚さ (mm)	鋼製材超 (T>9 [*] mm) 【条件②】	
293	ボンベ	0.25	0.25	1.4	0.0035	0	0	0	57	—	—	0	×	0	×	×
309	プラスチック容器	0.68	0.87	1.07	0.0029	0	0	0	516	—	—	0	×	0	×	×
314	コンクリートブロック	0.15	0.25	0.6	0.0036	0	0	0	51.8	—	—	0	×	0	×	×
335	鋼製スロープ	0.15	0.5	1.6	0.004	0	0	0	180	—	—	0	×	0	×	×
337	鋼製スロープ	0.18	1.6	3.3	0.0037	0	0	0	1011	—	—	0	×	0	×	×
372	フォークリフト	1.48	2.07	2.23	0.0009	0	0	0	7400	—	—	0	×	0	×	×
380	鋼製ブロック	0.4	0.4	0.75	0.0006	0	0	0	942	—	—	0	×	0	×	×
381	鋼製ブロック	0.4	0.5	0.75	0.0005	0	0	0	1178	—	—	0	×	0	×	×
388	コンクリ製蓋	0.25	1.25	5	0.0029	0	0	0	1655	—	—	0	×	0	×	×
394	鋼製敷板	0.016	1.53	6	0.0053	0	0	0	1153	—	—	0	×	0	×	×
400	鋼製ボックス	1.5	2.1	2.1	0.0019	0	0	0	3800	—	—	0	×	0	×	×
411	鋼製蓋	0.07	1.2	3.7	0.0016	0	0	0	1220	—	—	0	×	0	×	×
412	鋼製蓋	0.03	2.1	2.1	0.0037	0	0	0	816	—	—	0	×	0	×	×
413	鋼製蓋	0.07	0.4	1.1	0.0014	0	0	0	242	—	—	0	×	0	×	×
417	コンクリートブロック	0.15	0.16	0.6	0.0042	0	0	0	33.1	—	—	0	×	0	×	×
469	鋼管	0.3	0.6	5.5	0.0028	0	0	0	745	—	—	0	×	0	×	×

※ 鋼板貫通評価においても、コンクリートと同様に衝突方向の断面は中実断面として評価している。

3.3 設計飛来物の設定

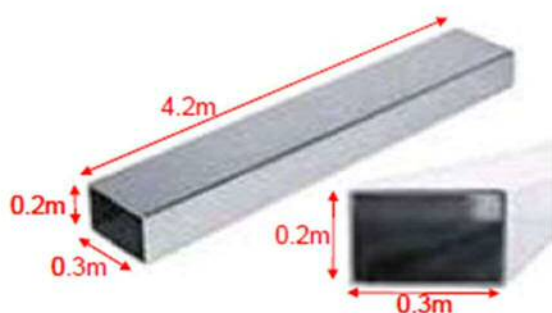
3.2におけるスクリーニングの結果，鋼製材の影響を上回る飛来物源については飛散防止対策を施すことが可能であると判断したため，鋼製材を設計飛来物として決定した。

また，設計飛来物に対する防護対策として想定する飛来物防護ネットを通過する可能性があり，鋼製材にて包含できないものとして，砂利も設計飛来物に設定した。

第3.3-1表に，東海第二発電所における設計飛来物の仕様を示す。

第3.3-1表 東海第二発電所における設計飛来物

名称	長さ (m)	幅 (m)	高さ (m)	質量 (kg)	空力 パラメータ (m^2/kg)	速度 (m/s)	運動 エネルギー (kJ)
砂利	0.04	0.04	0.04	0.18	0.0176	62	0.35
鋼製材	4.2	0.3	0.2	135	0.0065	51	176



(鋼製材のイメージ)



(砂利)

鋼製材の水平，鉛直速度については，竜巻風速場をLES（非定常乱流渦モデル）による乱流場とし飛来物速度を求めた「竜巻影響評価ガイド」の値を用いる。

また、砂利については、「竜巻影響評価ガイド」に記載がないことから、竜巻風速場をランキン渦モデルとした場合の水平速度を求め、鉛直速度については「竜巻影響評価ガイド」に基づき水平速度の2/3とした。

分解され小型軽量となる物品
及び損傷するが飛来物とならない物品について

設計飛来物の抽出フローにおいて、「分解され小型軽量となる物品」は設計飛来物のうち鋼製材に包絡されるため、また「損傷するが飛散しない物品」は飛散しないため、いずれも設計飛来物として選定しないとしている。これは、過去の主な竜巻の被害概要の調査結果から、このような物品の状況について検討を行った結果より判断した。

以下に、平成2年以降の主な竜巻による被害概要の調査結果に基づく検討結果を示す。

(1) 分解され小型軽量となる物品（屋外屋根及びガラス窓）

竜巻の被害概要調査結果において、分解され小型軽量となる物品として屋外屋根及びガラス窓が確認できた。これらの被害状況を以下に示す。

a. 屋外屋根

別図 1-1～5 に屋外屋根の被害状況を示す。これらより，屋外屋根については，F 0～F 3 の竜巻において，形を保ったままではなく，分解された状態で飛来していることが分かる。また，厚みが薄いことから形状が変形しており柔飛来物と見なせると考えられることから，衝突の際に与える衝撃荷重及び貫通力については，設計飛来物である鋼製材の評価に包絡されると考えられる。



別図 1-1 平成 16 年 6 月 27 日佐賀県で発生した F 2 竜巻による
屋外屋根の被害状況⁽¹⁾



屋外トイレ屋根の損傷



カーポート屋根の飛散及び骨組の損傷



カーポート屋根の破損

別図 1-2 平成 18 年 9 月 17 日宮崎県延岡市で発生した F 2 竜巻による
屋外屋根の被害状況⁽²⁾



折板の損傷



カーポートの被害

別図 1-3 平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市で発生した F 1 竜巻による
屋外屋根の被害状況⁽³⁾



周囲の田に散乱した屋根ふき材

別図 1-4 平成 24 年 2 月 1 日島根県出雲市で発生した F 0 竜巻による
屋外屋根の被害状況⁽⁴⁾



電線等に引っ掛かった飛来物（鋼板製屋根材）



飛来物（鋼板製屋根材）の衝突



飛散した鋼板製屋根材



飛散した折板屋根の状況



ガソリンスタンドの折板屋根の脱落



駐車場の折板屋根の著しい変形

別図 1-5 平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市で発生した F 3 竜巻による
屋外屋根の被害状況⁽⁵⁾

b. ガラス窓

別図 1-6~11 にガラス窓の被害状況を示す。これらより、ガラス窓については、F 0 ~ F 3 及び E F 5 の竜巻において損壊し、分解されていることが確認できる。分解された状態では小型軽量となっており、その影響は設計飛来物である鋼製材もしくは砂利に包絡されると考えられる。



エントランスの窓ガラスの破損



破損した窓ガラス片の屋内壁面への突き刺さり

別図 1-6 平成 18 年 9 月 17 日宮崎県延岡市で発生した F 2 竜巻による
ガラス窓の被害状況⁽²⁾



バスの窓ガラス破損

別図 1-7 平成 20 年 5 月 25 日米国アイオワ州で発生した E F 5 竜巻による
ガラス窓の被害状況⁽⁶⁾



窓ガラスの損壊



窓ガラスの飛来物衝突痕

別図 1-8 平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市での F 1 (F 2) 竜巻による
ガラス窓の被害状況⁽⁷⁾



倉庫の窓ガラスと屋根の被害状況



窓ガラスの破損



出窓部の窓ガラスの被害



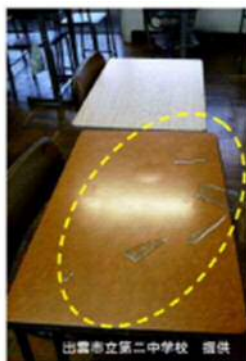
エントランスのガラス破損

別図 1-9 平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市で発生した F 1 竜巻による
ガラス窓の被害状況⁽³⁾



出雲市立第二中学校 提供

体育館窓ガラスの破損



出雲市立第二中学校 提供

教室



出雲市立第二中学校 提供

廊下



出雲市立第二中学校 提供

屋外に面した窓ガラス

別図 1-10 平成 24 年 2 月 1 日島根県出雲市で発生した F 0 竜巻による
ガラス窓の被害状況⁽⁴⁾



店舗の窓ガラスの被害状況



店舗の窓ガラスの被害状況（飛来物衝突痕）



ガラスへの飛来物の衝突痕



ガラスへの飛来物の衝突痕

別図 1-11 平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市で発生した F 3 竜巻による
ガラス窓の被害状況⁽⁵⁾

(2) 東海第二発電所の屋外屋根及びガラス窓の状況

東海第二発電所における屋外屋根の状況を別図 1-12、ガラス窓の状況を別図 1-13 に示す。東海第二発電所におけるこれらの物品の構造については、上記の被害にあった物品の構造と大きく変わらないことから、竜巻通過時には同様の被害状況になると考えられ、飛来物としては設計飛来物の影響に包絡されると考えられる。



別図 1-12 東海第二発電所における屋外屋根の状況



別図 1-13 東海第二発電所におけるガラス窓の状況

(3) 損傷するが飛散しない物品（樹木，フェンス）

竜巻の被害概要調査結果における「損傷するが飛散しない物品」に関し，東海第二発電所に存在する類似物品としてシャッター，樹木及びフェンスが確認できた。これらの被害状況を以下に示す。

a. シャッター

別図 1-14～18 にシャッターの被害状況を示す。これらより，シャッターについては，F 1～F 3 及び E F 5 の竜巻において形状は変形しているが，固定部は外れていないことが確認できる。なお，外れて飛来物となったとしても，衝突の際に与える衝撃荷重及び貫通力については，上記の屋外屋根と同様，設計飛来物である鋼製材の評価で包絡されると考えられる。



シャッターの外れ

別図 1-14 平成 20 年 5 月 25 日米国アイオワ州で発生した E F 5 竜巻による
シャッター被害状況⁽⁶⁾



シャッターの破損

別図 1-15 平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市で発生した F 1 竜巻による
シャッターの被害状況⁽³⁾



シャッターの外れ

別図 1-16 平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市で発生した F 1 (F 2) 竜巻によるシャッターの被害状況⁽⁷⁾



消防団施設のシャッターの被害状況

別図 1-17 平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市で発生した F 3 竜巻によるシャッターの被害状況⁽⁵⁾



シャッターの被害

別図 1-18 平成 25 年 9 月 2 日埼玉県発生した F2 竜巻によるシャッターの被害状況⁽⁸⁾

b. 樹木

別図 1-19～25 に樹木の被害状況を示す。これらより、樹木については、F 1～F 3 及び E F 5 の竜巻において幹の折損、根の引き抜き等が見られるが、折れた場合もしくは引き抜かれた場合のいずれにおいても、その場で倒壊しているのみであることが確認できる。これは、竜巻の風荷重により樹木が損壊を受けた後では、竜巻が既に通り過ぎていたためと考えられ、樹木が折損もしくは引き抜かれた後、さらに竜巻により巻き上げられ、飛来物となることは考え難い。



倒木（南から見る）
倒れなかった樹木も点在している。



倒木（北西から見る）

別図 1-19 平成 14 年 7 月 26 日群馬県境町で発生した F 2 竜巻による
樹木被害状況⁽⁹⁾



樹木の転倒



樹木の転倒

別図 1-20 平成 18 年 9 月 17 日宮崎県延岡市で発生した F 2 竜巻による
樹木被害状況⁽²⁾



樹木の折損

別図 1-21 平成 20 年 5 月 25 日米国アイオワ州で発生した E F 5 竜巻による
樹木被害状況⁽⁶⁾



倒木

別図 1-22 平成 21 年 7 月 19 日岡山県美作市で発生した F 2 竜巻による
樹木被害状況⁽¹⁰⁾



樹木の被害

別図 1-23 平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市で発生した F 1 竜巻による
樹木被害状況⁽³⁾



樹木の折損



樹木の折損と鳥居の被害



樹木の倒木



倒木による社の倒壊

別図 1-24 平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市で発生した F 3 竜巻による
樹木被害状況⁽⁵⁾



樹木の倒壊



樹木の倒壊による小屋組の被害



樹木の被害



樹木の被害



樹木の被害



樹木の被害

別図 1-25 平成 25 年 9 月 2 日埼玉県で発生した F 2 竜巻による
樹木被害状況⁽⁸⁾

c. フェンス

別図 1-26～28 にフェンスの被害状況を示す。これらより，フェンス類については，F 1～F 3 の竜巻において傾き，倒壊等が見られるが，樹木と同様にその場で倒壊しているのみであり，倒壊した後では，竜巻は既に通り過ぎていると考えられることから，竜巻により巻き上げられ，飛来物となることは考え難い。



フェンスの著しい変形



フェンスの変形

別図 1-26 平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市で発生した F 1 (F 2) 竜巻によるフェンスの被害状況⁽⁷⁾



フェンスの被害状況



道路標識の折損

別図 1-27 平成 24 年 5 月 6 日茨城県つくば市で発生した F 3 竜巻によるフェンス類の被害状況⁽⁵⁾



フェンスの倒壊



屋上フェンスの被害



フェンスの倒壊



支柱部の破断



フェンスの被害（工事中の建築物）



フェンスの被害



電柱の倒壊

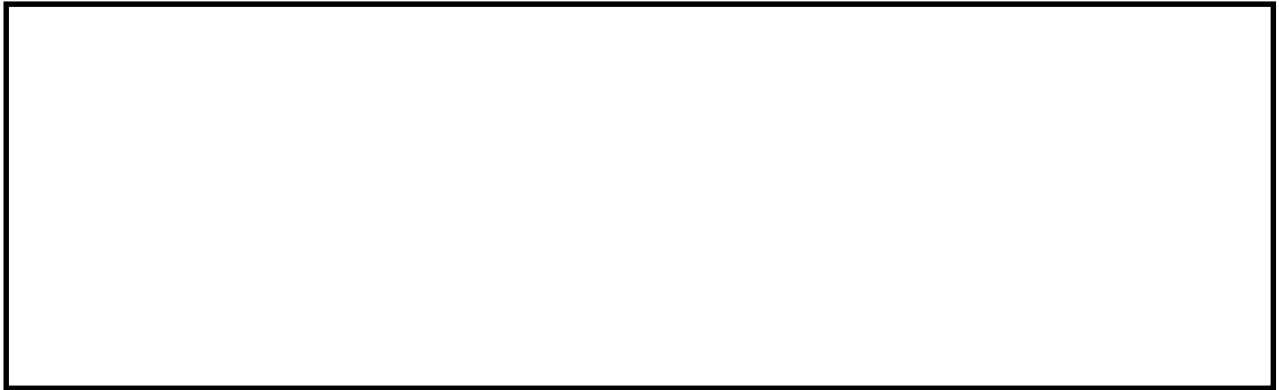


看板の被害

別図 1-28 平成 25 年 9 月 2 日埼玉県で発生した F 2 竜巻による
フェンス類の被害状況⁽⁸⁾

(4) 東海第二発電所のシャッター，樹木及びフェンスの状況

東海第二発電所におけるシャッターの状況を別図 1-29 に，樹木の状況を別図 1-30 に示す。上記の被害実績に示された樹木と大きく変わらないと考えられることから，竜巻通過時には，同様の被害状況になり，幹の折損もしくは根の引抜きによりその場で倒壊するのみと考えられる。

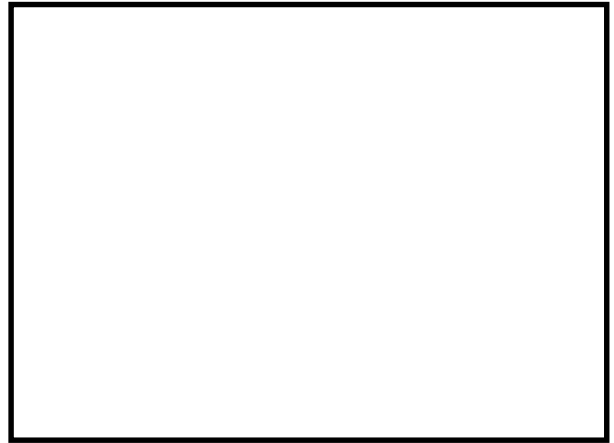


別図 1-29 東海第二発電所におけるシャッターの状況



別図 1-30 東海第二発電所におけ樹木の状況

東海第二発電所におけるフェンスの状況を別図 1-31 に示す。上記にて示した被害にあったフェンスの構造と大きく変わらないことから，竜巻通過時には，同様の被害状況になり変形もしくは倒壊すると考えられる。



別図 1-31 東海第二発電所におけるフェンスの状況

以上より，シャッター，樹木及びフェンスは，竜巻により損傷するが，飛散せず設計飛来物として選定が不要として，設計飛来物として選定しない。

<参考文献>

- (1) 「佐賀市・鳥栖市竜巻現地被害調査報告」 (平成 16 年 7 月 13 日)
- (2) 「2006 年台風 13 号被害調査報告 -延岡市の竜巻被害と飯塚市文化施設の屋根被害-」 (平成 18 年 10 月 10 日)
- (3) 「平成 21 年 10 月 8 日茨城県土浦市竜巻被害調査報告」 (平成 21 年 10 月 13 日)
- (4) 「平成 24 年 2 月 1 日島根県出雲市で発生した突風被害調査報告」 (平成 24 年 2 月 14 日)
- (5) 「平成 24 年 (2012 年) 5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した建築物等の竜巻被害調査報告」 (ISSN 1346-7328 国総研資料第 703 号 ISSN 0286-4630 建築研究資料第 141 号 平成 25 年 1 月)
- (6) 「米国アイオワ州におけるトルネード被害調査報告」 (平成 20 年 6 月 9 日)
- (7) 「平成 21 年 7 月 27 日群馬県館林市竜巻被害調査報告」 (平成 21 年 8 月 17 日一部修正)
- (8) 「平成 25 年 9 月 2 日に発生した竜巻による埼玉県越谷市, 北葛飾郡松伏町及び千葉県野田市での建築物等被害 (速報)」 (国土交通省国土技術政策総合研究所独立行政法人建築研究所平成 25 年 9 月 10 日一部修正)
- (9) 「群馬県境町で発生した突風による建築物等の被害について」 (平成 14 年 7 月 26 日独立行政法人建築研究所)
- (10) 「平成 21 年 7 月 19 日岡山県美作市竜巻被害調査報告」 (平成 21 年 8 月 4 日)

空力パラメータについて

物品の飛散解析に用いる空力パラメータは「竜巻影響評価ガイド」の参考文献⁽¹⁾及び米国NRCの竜巻設計のための飛来物特性を与えるNUREG-0800(1996)⁽²⁾に引用されていた文献⁽³⁾を参照し、下式により算出する。

$$\frac{C_D A}{m} = c \frac{(C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2 + C_{D3} A_3)}{m}$$

ここで、

$$\frac{C_D A}{m} : \text{空力パラメータ} \quad (\text{m}^2 / \text{kg})$$

$$m : \text{物品の質量} \quad (\text{kg})$$

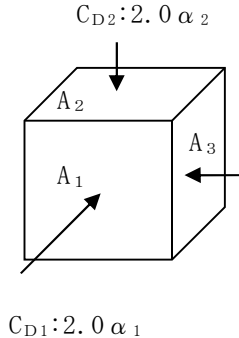
$$c : \text{係数} \quad (0.33)$$

C_{D1}, C_{D2}, C_{D3} : 直交3方向における物品の抗力係数(別表2-1より選定)

A_1, A_2, A_3 : $C_{D1} \sim C_{D3}$ を定義した各方向に対する見付面積 (m^2)

別表 2-1 空力パラメータ算出のための抗力係数

物体の形状	C_{D1}	C_{D2}	C_{D3}
塊状	$2.0 \alpha_1$	$2.0 \alpha_2$	$2.0 \alpha_3$
板状	$1.2 \alpha_1$	$1.2 \alpha_2$	$2.0 \alpha_3$
棒状	$2.0 \alpha_1$	$0.7 \alpha_2$ (円形断面) $1.2 \alpha_2$ (矩形断面)	$0.7 \alpha_3$ (円形断面) $1.2 \alpha_3$ (矩形断面)

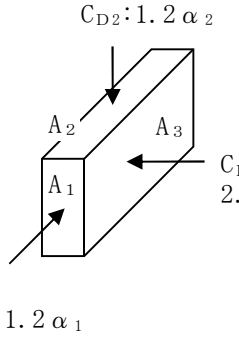


$C_{D2}: 2.0 \alpha_2$

$C_{D3}: 2.0 \alpha_3$

$C_{D1}: 2.0 \alpha_1$

塊状物体



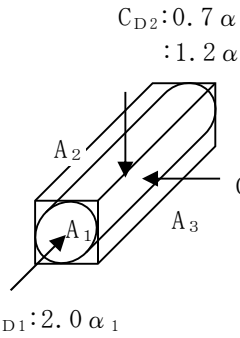
$C_{D2}: 1.2 \alpha_2$

$C_{D3}: 2.0 \alpha_3$

$C_{D1}: 1.2 \alpha_1$

板状物体

・ $A_3 > A_2, A_1$



$C_{D2}: 0.7 \alpha_2$ (円形断面)
: $1.2 \alpha_2$ (矩形断面)

$C_{D3}: 0.7 \alpha_3$ (円形断面)
: $1.2 \alpha_3$ (矩形断面)

$C_{D1}: 2.0 \alpha_1$

棒状物体

・ 円形断面の場合、 A_2, A_3 は「見付面積 (直径×長さ)」

また、抗力係数に対し、「建設省告示第 1454 号(平成 12 年 5 月 31 日)」⁽⁴⁾を参考とし、下記に示すような物品の見付面の充実率の影響に応じた割増係数を考慮する。

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: $C_{D1} \sim C_{D3}$ を定義した各方向に対する見付面の充実率の影響により設定される割増係数で、下式による。

$$\alpha = 1.8 \quad (\phi \leq 0.1)$$

$$\alpha = 1.96 - 1.6\phi \quad (0.1 < \phi < 0.6)$$

$$\alpha = 1.0 \quad (\phi \geq 0.6) \quad (\text{別図 2-1 参照})$$

ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 : $C_{D1} \sim C_{D3}$ を定義した各方向に対する見付面の充実率

図5 ラチス構造物(表7を用いるものとする。)

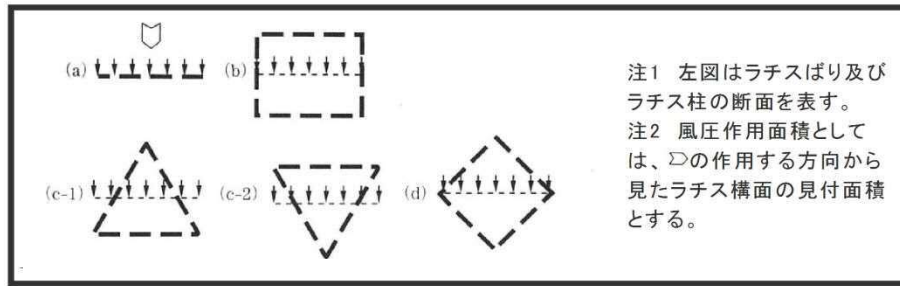


表7 ラチス構造物のCf

種類	ϕ	(1)	(2)	(3)
		0.1以下	0.1を超え0.6未満	0.6
鋼管	(a)	1.4kz	(1)と(3)とに掲げる数値を直線的に補間した数値	1.4kz
	(b)	2.2kz		1.5kz
	(c-1、2)	1.8kz		1.4kz
	(d)	1.7kz		1.3kz
形鋼	(a)	2.0kz	最大比 1.8 倍	1.6kz
	(b)	3.6kz		2.0kz
	(c-1、2)	3.2kz		1.8kz
	(d)	2.8kz		1.7kz

ここで、表7の記号は以下を示す。

ϕ : 充実率

kz : 高さ方向分布係数

【割増係数 α の設定】

表7のうち、最大の割増率である 1.8 (=3.6kz/2.0kz) を用い、密実面 (=充実率 1) に対する割増し係数 α を以下のとおり定める。

① $\phi \leq 0.1$ のとき

$$\alpha = 1.8$$

② $0.1 < \phi < 0.6$ のとき

$$\alpha = 1.8 - \{(1.8 - 1.0) / (0.6 - 0.1)\} \times (\phi - 0.1)$$

$$= 1.96 - 1.6\phi$$

③ $0.6 \leq \phi$ のとき

$$\alpha = 1.0$$

別図 2-1 「建設省告示第 1454 号」⁽⁴⁾ 及び割増係数の設定

<参考文献>

- (1) 東京工芸大学 (2011) : 平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究 (平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構
- (2) US-NRC: “3.5.1.4 MISSILE GENERATED BY NATURAL PHENOMENA,” Standard Review Plan, NUREG-0800, 1996.
- (3) E. Simiu, M. Cordes: “Tornado-Borne Missile Speeds,” NBSIR76-1050, National Bureau of Standards, Washington D.C., 1976.
- (4) 建設省告示第 1454 号 平成 12 年 5 月 31 日
「E の数値を算出する方法並びに V_0 及び風力係数の数値を定める件」

竜巻時に発生する雹の影響について

竜巻においては雹を伴うことがあるため、雹の影響について検討を行った。

雹はあられが大きく成長したもので、直径 5mm 以上の氷の粒子である。雹の粒径の上限は、文献⁽¹⁾によれば通常は直径が 5mm～50mm とされているが、雹の粒径の変化に対する影響度を確認するため、別の文献⁽²⁾に記載の雹のうち最大の 10cm の雹までを想定した評価を実施した。

空気中を落下する物体は空気抵抗を受けるので、時間が経てば空気抵抗と重力とが釣り合い等速運動となり、一定の速度（終端速度）となる。空気中を落下する雹もこの終端速度で落下する。雹の粒径毎の終端速度を第 1 表に示す。

第 1 表 雹の粒径毎の終端速度⁽²⁾

粒径 (cm)	終端速度 (m/s)
1	9
2	16
5	33
10	59

ここで、雹の影響を評価するため、運動エネルギー、貫通のしやすさ（貫通限界厚さ）を評価した結果を設計飛来物（鋼製材）と比較し第 2 表に示す。

その結果、雹の影響は設計飛来物（鋼製材）に十分包絡できると言える。

第2表 粒径5cm及び10cm雹の影響評価及び設計飛来物との比較結果

評価対象	運動エネルギー	貫通限界厚さ（鉛直）	
		コンクリート ($F_c = 225 \text{kgf/cm}^2$)	鋼板
粒径5cm雹	0.04kJ	0.8cm	0.2mm
粒径10cm雹	0.85kJ	2.9cm	0.8mm
設計飛来物（鋼製材）	79kJ	18.8cm	19mm

<参考文献>

- (1) 白木正規, 百万人の天気教室, 成山堂書店
- (2) 小倉義光, 一般気象学, 東京大学出版会

竜巻随件事象の抽出について

1. 概要

過去の竜巻被害事例及び東海第二発電所の施設の配置から想定される竜巻の随件事象を検討し、東海第二発電所において考慮する必要がある事象として、火災、溢水及び外部電源喪失を抽出した。

2. 過去の竜巻被害について

1990 年以降の主な竜巻による被害概要を調査した文献から検討を行った。第 2-1 表に、1990 年以降に日本で発生した最大級の竜巻である F 3 クラスの竜巻を示す。

第 2-1 表 1990 年以降の F 3 クラス竜巻

発生日時	発生場所	藤田 スケール	死者	負傷者	住宅 全壊	住宅 半壊
2012 年 5 月 6 日	茨城県常総市	F 3	1	37	76	158
2006 年 11 月 7 日	北海道佐呂間町	F 3	9	31	7	7
1999 年 9 月 24 日	愛知県豊橋市	F 3	0	415	40	309
1990 年 12 月 11 日	千葉県茂原市	F 3	1	73	82	161

竜巻被害の状況写真（第 2-1～3 図）から、竜巻被害としては風圧力及び気圧差による被害及び飛来物の衝突による損傷のみであり、また、竜巻の随件事象として電柱や電線の損傷による停電が発生していると判断される。



全壊した家屋



飛来物により被害を受けた住宅等



倒れた電柱(復旧作業時)



倒壊電柱に直撃された家屋

第2-1 図 2012年5月6日茨城県にて発生したF3竜巻による被害⁽¹⁾



全壊した工事事務所周辺



飛来物による被害を受けた建物



倒壊した道路標識支柱



道路側へ倒壊した電柱

第2-2 図 2006年11月7日北海道にて発生したF3竜巻による被害⁽²⁾⁽³⁾



残骸(飛散物)で埋め尽された道路



吹き飛ばされた建物



横転したバス



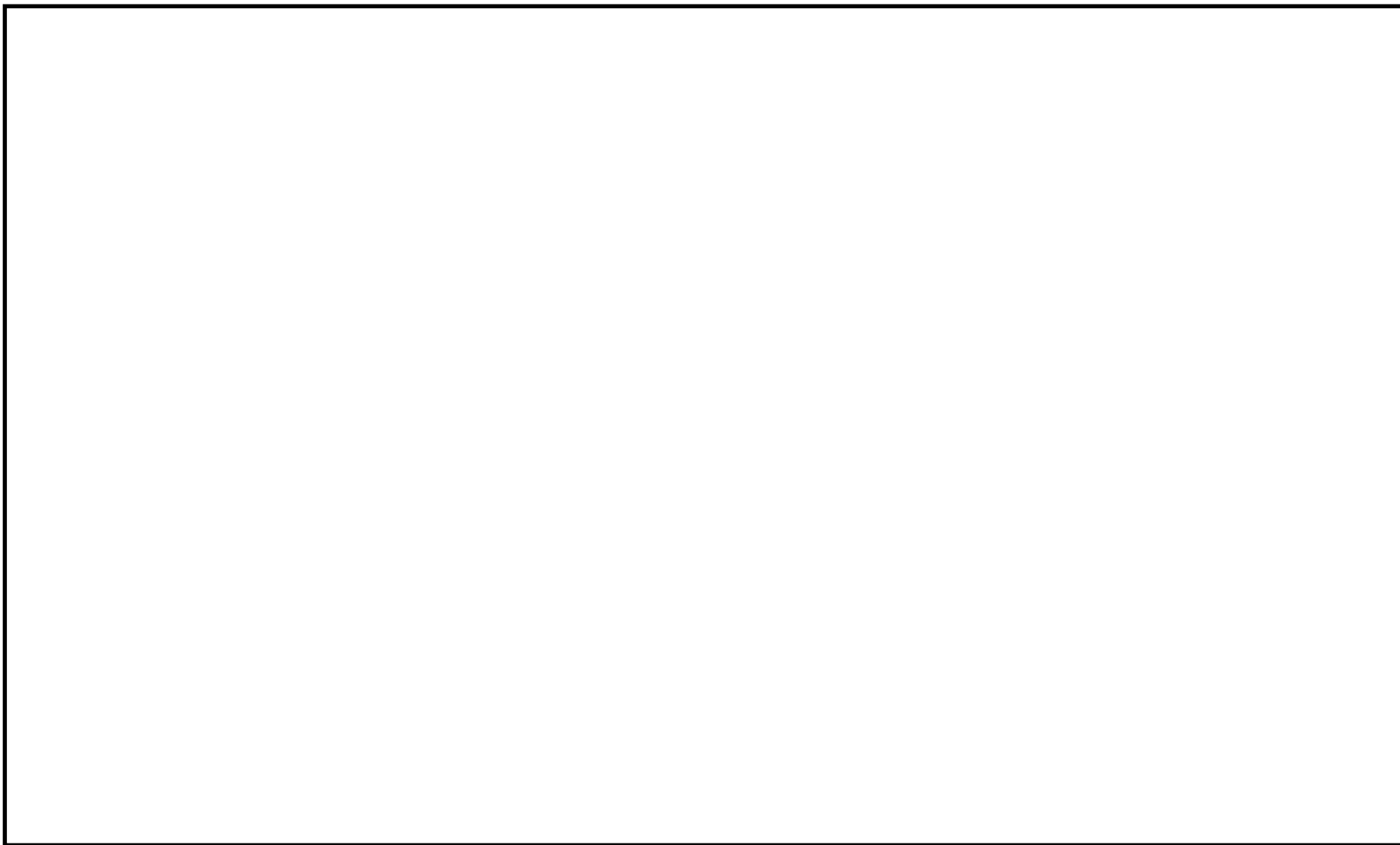
曲がった鉄筋 (工事現場)

第2-3図 1990年12月11日千葉県にて発生したF3竜巻による被害⁽⁴⁾

3. 東海第二発電所にて考慮すべき竜巻随件事象

上述の過去の竜巻による被害事例及び第3-1図に示す東海第二発電所の施設の配置から判断すると、東海第二発電所においては送電線等が竜巻による被害を受けることにより、外部電源喪失事象の発生が考えられる。さらに、屋外に油タンク及び水タンクが配備されていることから、飛来物の衝突により火災事象及び溢水事象が発生する可能性がある。

以上のことから、東海第二発電所における竜巻随件事象として、火災、溢水及び外部電源喪失を抽出する。



第 3-1 図 東海第二発電所の評価対象施設（屋外施設）及び竜巻随伴事象の検討対象施設の配置図

<参考文献>

- (1) (財) 消防科学総合センター, 平成24年(2012年)5月6日茨城県つくば市
竜巻災害写真報告, 2012
- (2) (財) 消防科学総合センター, 平成18年11月7日北海道佐呂間町竜巻災害
写真報告, 2006
- (3) (社) 土木学会 北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査団, 平成18年11月
北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査, 2007年4月
- (4) 千葉県総務部消防地震防災課, 防災誌「風水害との闘い」第3章 90m
超えの突風に街が飛ばされた!ー茂原で最大スケールの竜巻が発生ー,
平成22年3月

東海第二発電所

竜巻影響評価における フジタモデルの適用について

本資料のうち、 は商業機密又は核物質防護上の観点から公開できません。

目 次

1. はじめに	1
2 各風速場モデルの概要	4
2.1 フジタモデル	4
2.2 ランキン渦モデル	7
2.3 非定常乱流渦モデル（LESによる数値解析）	8
3. 各風速場モデルの比較	11
4. 米国におけるフジタモデルの取扱い	12
4.1 フジタモデルの利用実績	12
4.2 NRCガイドでの取扱い	14
5. 飛散解析における保守性の考慮	15
5.1 物体の浮上，飛散モデルにおける保守性の考慮	15
5.2 物体が受ける風速における保守性の考慮	31
5.3 飛散解析手法まとめ	34
6. 実際の飛散状況に対する検証	36
6.1 フジタスケールとの比較	36
6.2 米国Grand Gulf原子力発電所への竜巻来襲事例との比較	37
6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例との比較	39
7. 飛散以外の挙動に対する考慮	47
8. まとめ	49
<参考文献>	51

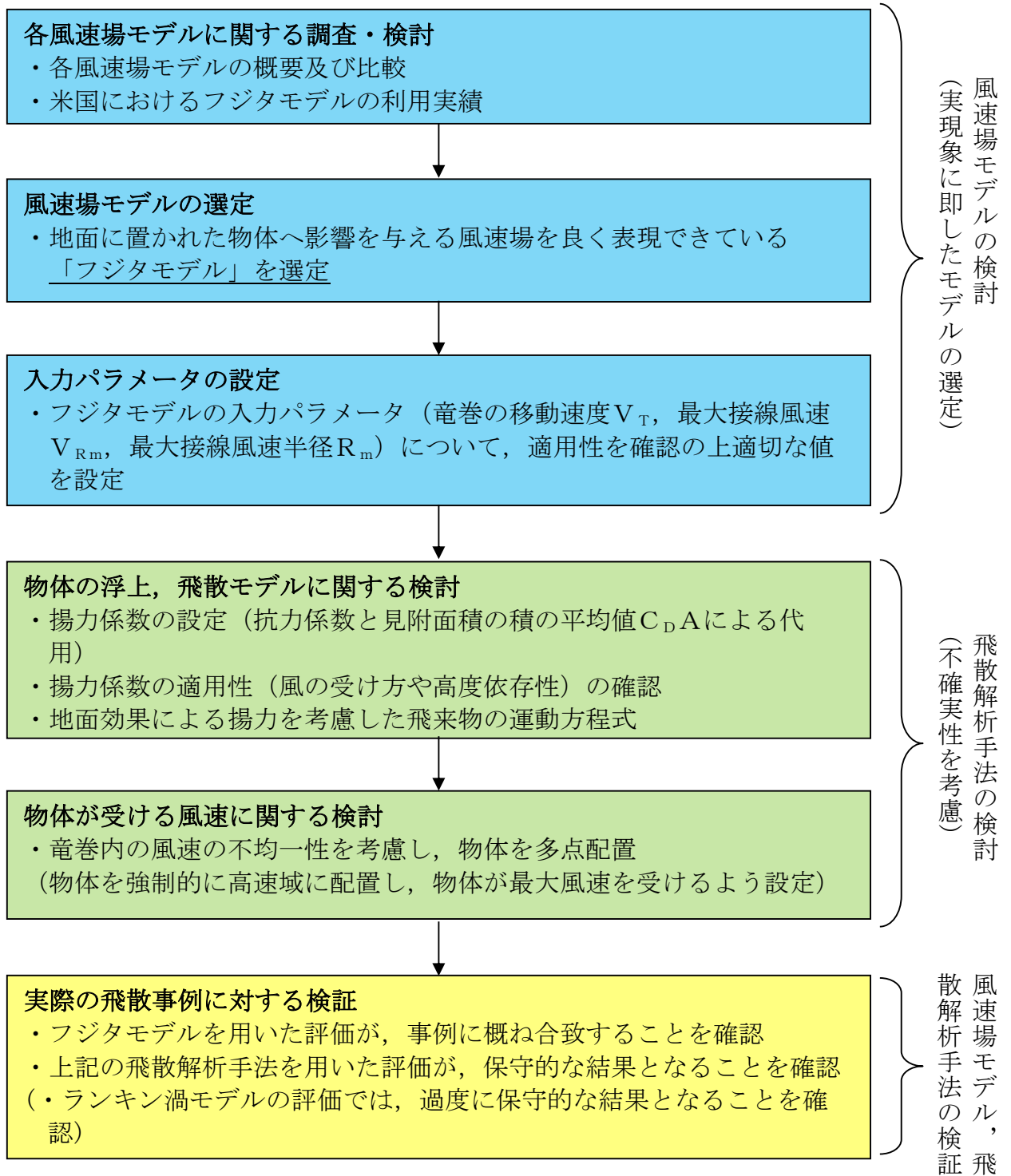
別紙「フジタモデル」及び「ランキン渦モデル」並びに「それぞれの風速場モデルを用いた際の飛散解析手法」の比較

1. はじめに

「竜巻影響評価ガイド」に従い竜巻影響評価を行う上で、飛来物の挙動（飛散速度、飛散距離等）を評価するための竜巻風速場モデルを選定する必要がある。これまでの竜巻飛来物評価において用いられている風速場モデルとしては、米国NRCの基準類に記載されている「ランキン渦モデル⁽¹⁾⁽²⁾」及び原子力安全基盤機構の「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」書に記載されている「非定常乱流渦モデル（LES:Large Eddy Simulation）」の数値解析⁽³⁾があるが、今回の評価においては、地面に置かれた物体への影響をより良く表現できている風速場モデルとして、藤田哲也シカゴ大学名誉教授が考案した竜巻工学モデルDBT-77(DBT: Design Basis Tornado)⁽⁴⁾（以下「フジタモデル」という。）を選定した。

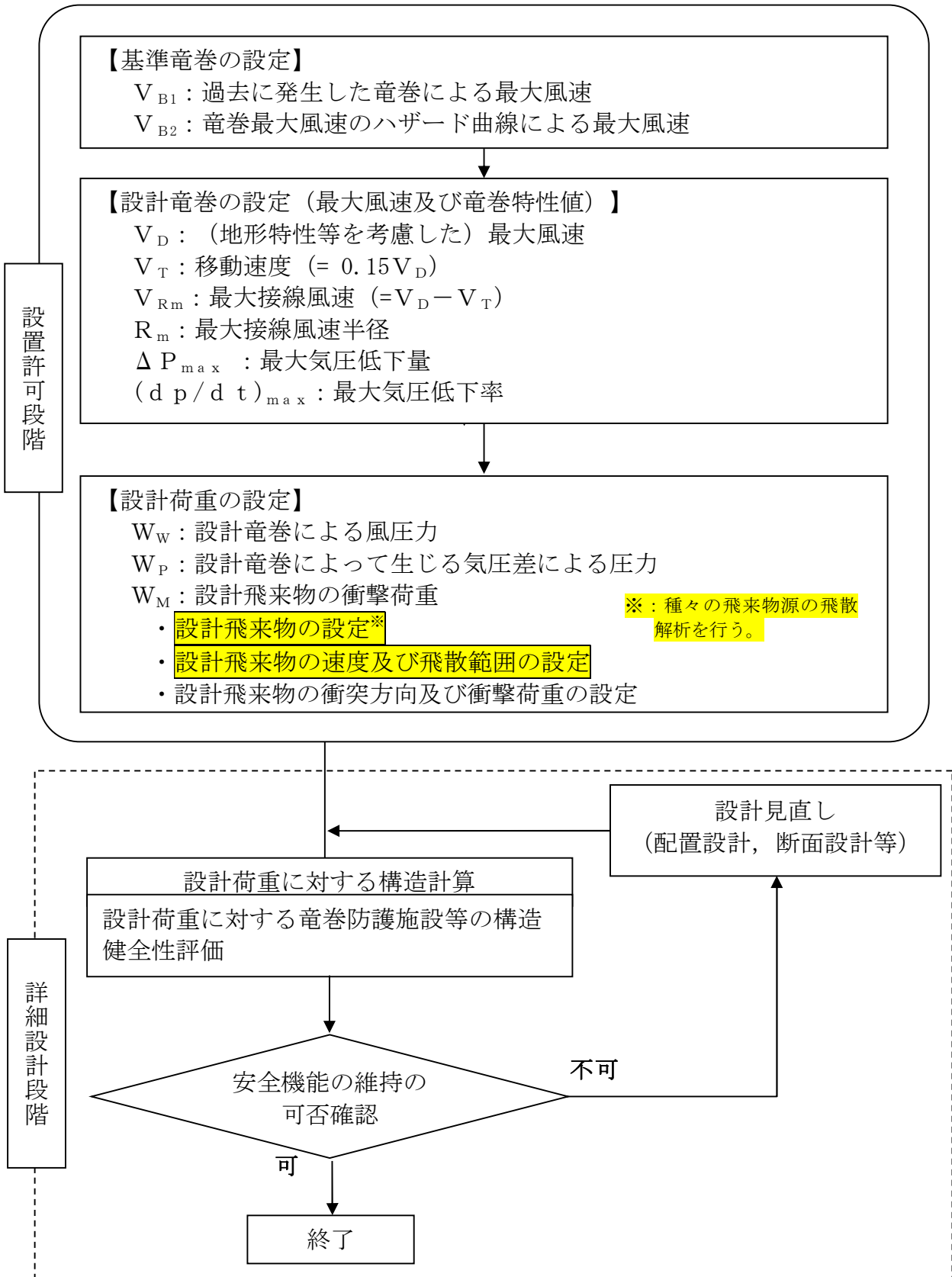
第1-1図に、風速場モデルの選定及び飛散解析手法に関する検討フローを示す。また、第1-2図に、竜巻影響評価の基本フローとフジタモデルを適用する箇所を示す。

次節以降にて、フジタモデルの詳細やフジタモデルを適用した理由等を説明する。



第 1-1 図 風速場モデルの選定及び飛散解析手法に関する検討フロー

フジタモデル関連箇所



第1-2図 竜巻影響評価フローとフジタモデルの関連箇所

2 各風速場モデルの概要

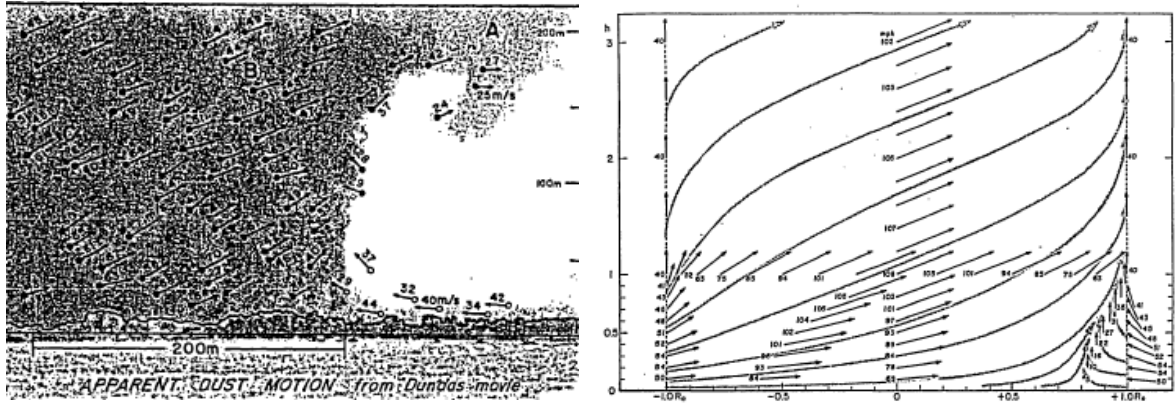
2.1 フジタモデル

フジタモデルは、米国NRCの実際の竜巻風速場をモデル化したいという要望により、藤田名誉教授が1978年に竜巻観測記録を基に考案した工学モデルである。モデル作成に当たっては、1974年8月に米国カンザス州 Ash Valley 等で発生した竜巻（第2.1-1図）のビデオ画像の写真図化分析を行い、竜巻の地上痕跡調査及び被災状況調査結果と照合することで風速ベクトルを作成し、そのベクトル図を基に作成した流線モデルから、竜巻風速場を代数式で表現している。（第2.1-2図）

フジタモデルの特徴は、地表面付近における竜巻中心に向かう強い水平方向流れ及び外部コアにおける上昇流といった、実際の竜巻風速場を良く表現している点にある。



第2.1-1図 Ash Valley 竜巻(1974.8.30)のビデオ画像



第 2.1-2 図 風速ベクトルの分析図 (左) とフジタモデルの流線 (右) ⁽⁴⁾

フジタモデルの風速場は、第 2.1-3 図に示すように半径方向に 3 つの領域 (内部コア、外部コア及び最外領域) で構成され、内部コアと外部コアの接線 (周) 方向風速 V_θ は半径に比例し、その外側の最外領域では周方向風速は半径に反比例するモデルとなっている。内部コアには上昇風速 V_z や半径方向風速 V_r は存在しないが、外部コアには存在する。高さ方向には地面から高さ H_i までを流入層としてモデル化しており、竜巻中心方向に向かう半径方向風速 V_r があり、この空気の流れ込みが外部コア内での上昇流となる。流入層より上部では外向きの半径方向風速が存在し、各風速成分は上部に向かうにつれて減衰する。フジタモデルは、流体力学の連続の式を満たす形で定式化されており、力学的に根拠のある風速場となっている。

フジタモデル (D B T-77) における接線風速等の関係式については、Fujita Work Book⁽⁴⁾の第 6 章に、第 2.1-3 図のとおり記載されている。

無次元座標 $r = R/R_m, \quad z = Z/H_i$

接線風速 $V_\theta = F_r(r)F_h(z)V_m$

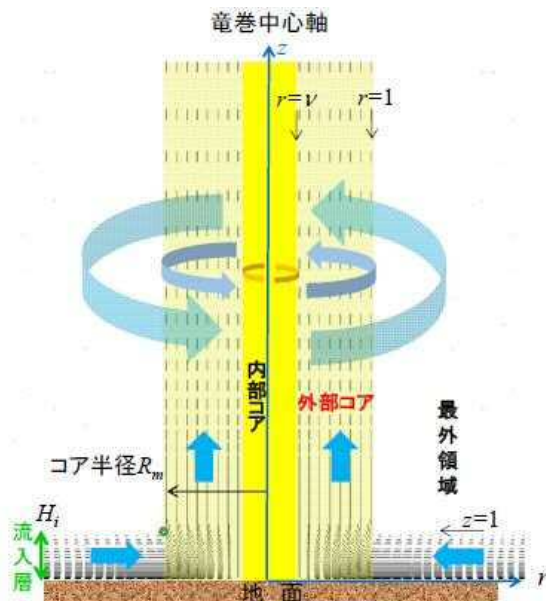
$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ 1/r & (r \geq 1) \end{cases} \quad F_h(z) = \begin{cases} z^{k_0} & (z < 1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases}$$

半径方向風速 $V_r = \begin{cases} 0 & (r \leq v) \\ \frac{V_\theta \tan \alpha_0}{1-v^2} \left(1 - \frac{v^2}{r^2}\right) & (v < r < 1) \\ V_\theta \tan \alpha_0 & (r \geq 1) \end{cases}$

$$\tan \alpha_0 = \begin{cases} -A(1-z^{1.5}) & (z < 1) \\ B\{1 - \exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

上昇風速 $V_z = \begin{cases} \frac{3}{28} \frac{\eta V_m}{1-v^2} A(16z^{\frac{7}{5}} - 7z^{\frac{8}{3}}) & (z < 1) \\ \frac{\eta V_m B \exp(-k(z-1))}{k(1-v^2)} \{2 - \exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$

k_0, k, v, η, A, B は定数



また、以下の連続の式を満足する。

$$c \equiv \frac{1}{R_m r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{R_m r} \frac{\partial (r V_r)}{\partial r} + \frac{1}{H_i} \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$$

V_θ	接線方向風速
V_r	半径方向風速 (内向きが正)
V_z	上昇風速
V_m	最大接線風速
R_m	外部コア半径

第 2.1-3 図 フジタモデルの概要

ここで、内部コアの半径 R_v と外部コアの半径 R_m の比 $v (=R_v/R_m)$ については、Fujita⁽⁴⁾ が以下の経験式を提案しているので、これを用いた。

$$v = 0.9 - 0.7 \exp(-0.005 R_m) \quad (1)$$

また、流入層は、地面との摩擦により低下した遠心力と圧力分布のバランスが崩れ、流体が竜巻中心方向の低圧部に引き込まれることにより形成されることから、摩擦の影響が及ぶ範囲のみで形成される。Fujita⁽⁴⁾ は、流入層高さ H_i を竜巻中心の低圧部の大きさ (外部コア半径) R_m に比例するものとして、以下の経験式を提案しており、これを用いた。

$$H_i = \eta R_m \quad (2)$$

ここで、 η は 1 以下の正の値であり、下式で定義される。

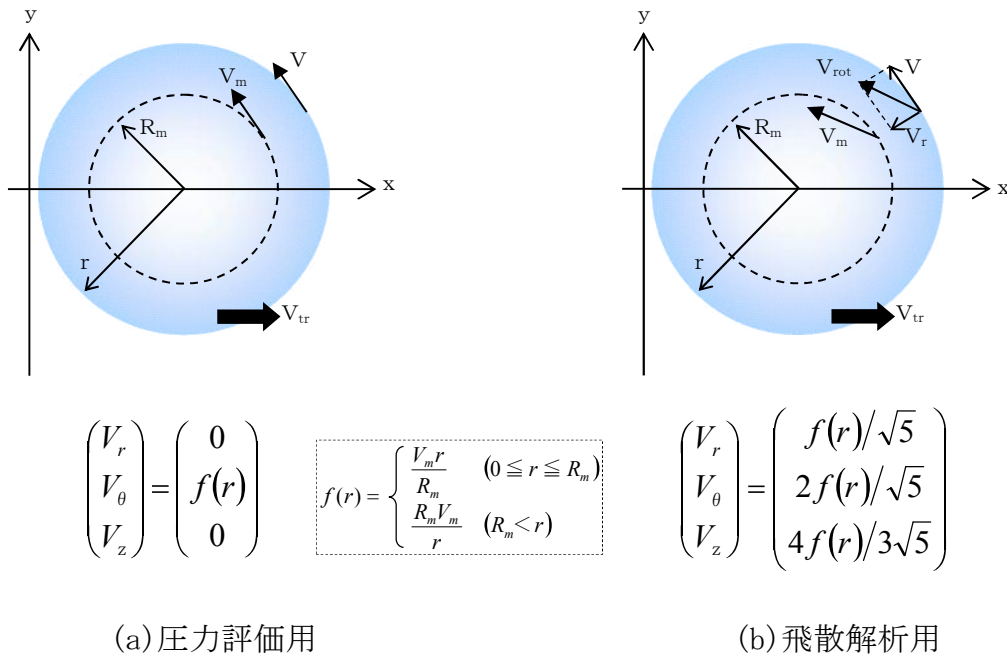
$$\eta = 0.55 (1 - v^2) \quad (3)$$

上式において、外部コア半径 $R_m = 30\text{m}$ の場合、 $\eta = 0.50$ ($H_i = 15\text{m}$) となり、「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」⁽³⁾の図 2.2.3.10 における流入層高さ と竜巻半径の比 ($\eta = 0.4$ 程度) や、Kosiba⁽⁵⁾により示されている流入層高さ ($H_i = 10$ から 14m 以下) と概ね同じである。

なお、その他の定数についても、Fujita⁽⁴⁾の提案している値として、 $k_0 = 1/6$, $k = 0.03$, $A = 0.75$, $B = 0.0217$ を用いた。

2.2 ランキン渦モデル

ランキン渦モデルは米国NRCガイドでも採用されており、設計竜巻の特性値を設定する際に用いられている。しかし、第 2.2-1 図(b)に示す飛散解析用のモデル⁽²⁾では、竜巻中心に向かう半径方向風速 V_r と上昇風速 V_z を特別に付加しているため、流体力学の連続の式を満たしておらず、第 2.2-2 図の様な地面から吹き出しが生じる流れとなっており、地上からの物体の浮上、飛散を現実的に模擬することができない。ランキン渦モデルを用いて飛散解析を行う場合、地上の物体であっても空中浮遊状態を仮定して評価することになる。



第 2.2-1 図 ランキン渦モデル

無次元座標 $r = R / R_m$

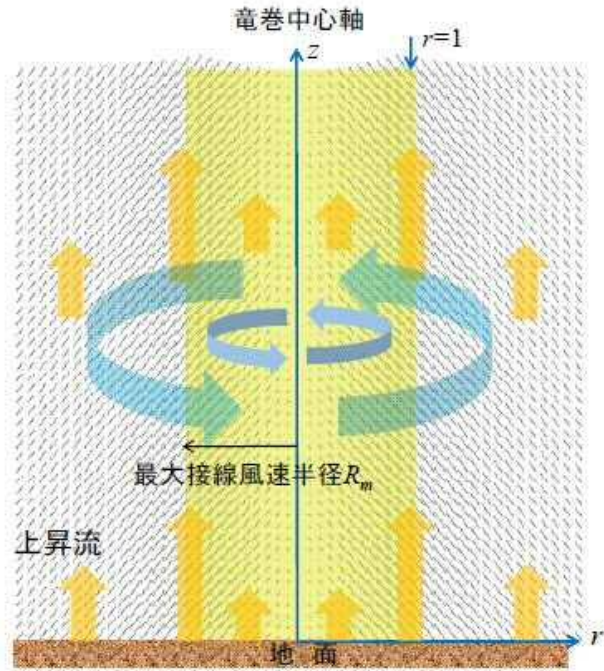
接線風速 $V_\theta = \frac{2V_m}{\sqrt{5}} F_r(r)$

$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ 1/r & (r \geq 1) \end{cases}$$

半径方向風速 $V_r = -\frac{1}{2} V_\theta$

上昇風速 $V_z = \frac{2}{3} V_\theta$

水平方向風速 $V_h = \sqrt{V_\theta^2 + V_r^2} = V_m F_r(r)$



$r < 1$ の領域では、（流体が消滅するため）以下の連続の式を満足しない。

$$c \equiv \frac{1}{R_m r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{R_m r} \frac{\partial (r V_r)}{\partial r} + \frac{1}{H_i} \frac{\partial V_z}{\partial z} = \begin{cases} -\frac{2V_m}{\sqrt{5}R_m} \cdot (r < 1) \\ 0 & (r > 1) \end{cases}$$

第 2.2-2 図 飛来物速度評価用ランキン渦モデル

2.3 非定常乱流渦モデル（LESによる数値解析）

LESは、非定常な乱流場を数値的に計算する手法として、「竜巻評価ガイド」における飛来物の最大速度の設定例にも活用されている。第 2.3-1 図に LESによる渦の発生状況を示す。

古典的な Smagorinsky モデルに基づく LESの基礎方程式（運動量保存式及び質量保存式）は、流体を非圧縮性と仮定する場合、以下のようになる。

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_1 \frac{\partial U_i}{\partial x_1} + U_2 \frac{\partial U_i}{\partial x_2} + U_3 \frac{\partial U_i}{\partial x_3} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + (\nu + \nu_s) \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_3^2} \right) - f_i \quad (i=1,2,3)$$

..... (4)

$$\frac{\partial U_1}{\partial x_1} + \frac{\partial U_2}{\partial x_2} + \frac{\partial U_3}{\partial x_3} = 0 \quad (5)$$

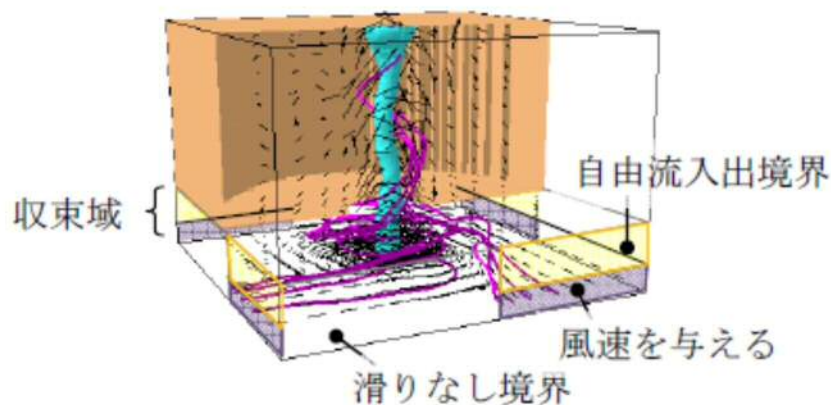
ここで、 U_i 及び P は、 i 方向の流速ベクトル及び圧力を表し、 ν は動粘性係数を、 f_i は i 方向の外力加速度を表す。また、 x_i は i 方向の座標を表す。

一方、Smagorinsky モデルの渦粘性係数 ν_s は以下のように定義される。

$$\nu_s = (C_s h)^2 \sqrt{\sum_{i,j=1}^3 2S_{ij}^2} \quad (6)$$

ここで、 h は解像スケール（メッシュ幅相当）、 C_s は Smagorinsky 定数を表し、ひずみ速度テンソル S_{ij} は $S_{ij} = 0.5(\partial U_i / \partial x_j + \partial U_j / \partial x_i)$ で定義される。

以上の通り、LES は風速の時間的な変動（乱流）を考慮できる点が特長となっている。



第 2.3-1 図 LES 計算領域内での竜巻状の渦の作成状況⁽⁶⁾

LES の手法自体は広く活用されているものであるが、実スケールでの精緻な評価を行うためには、必要なメッシュ解像度の確保に膨大な計算機資源が必要となる。また、「竜巻影響評価ガイド」で例示されている LES による数値解析については、条件設定等に関して下記のような問題点がある。

- ・「竜巻影響評価ガイド」で例示されている LES による解析では、境界条件（側面からの流入風速の分布等）や解析領域の形状（流入箇所を局所的に配

置等)を調整して人為的な乱れを与え、竜巻状の渦を生成しているが、渦の生成にあたって以下のような条件を仮定していることから、実スケールでの評価を実施するには課題があるものと考えられる。

- 人為的な流入境界条件(流入風速分布や流入箇所 of 局所的配置等)を設定していることから、流入境界条件の影響を受ける地表面付近の実際の竜巻風速場の再現はできていないものと考えられる。
- 小規模な計算領域によるシミュレーションであり、実スケールへの適用(飛散解析)の際には単純に速度を規格化して適用している。

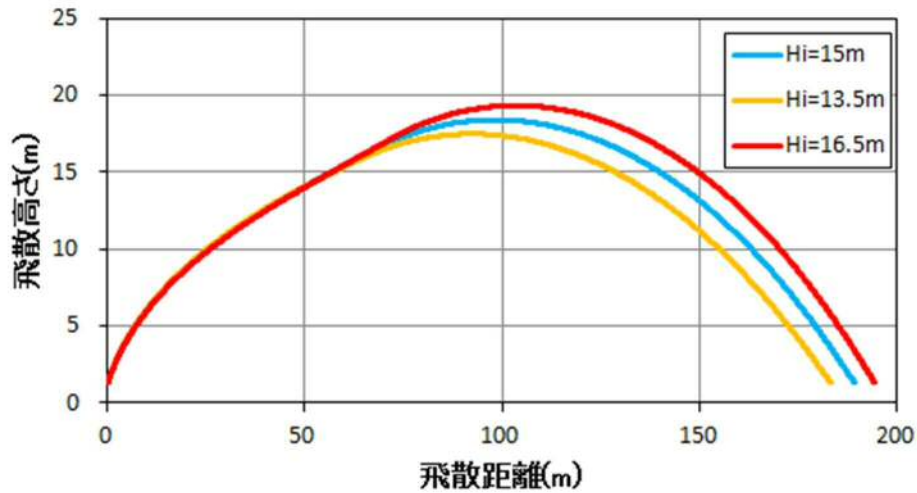
⇒風速の規格化の際には、時間平均の最大風速を 100m/s (風速+移動速度) に設定している。Maruyama⁽⁷⁾によれば、瞬間的な周方向風速は 1.7 倍程度まで大きくなる場合があり、移動速度と合わせると最大 160m/s 程度まで達するため、飛散解析の際に非常に保守的な結果が算出されることが考えられる。

⇒流速が早い場合には粘性の影響は小さくなる傾向となるが、その影響については考慮していないことから、特に地表面付近については実際の風速場の再現はできていないものと考えられる。

(参考：フジタモデルを適用した場合の飛来物の飛跡)

第 2.3-2 図に、フジタモデルを適用したコンテナの飛散解析(長さ 6m ×幅 2.4m ×高さ 2.6m 、質量 2300kg 、 $C_D A/m=0.0105$ 、最大風速 100m/s)における飛跡を示す。

また、フジタモデルの流入層高さ H_i は、外部コア半径 $R_m=30\text{m}$ の場合、 $H_i=15\text{m}$ であり、2.1 に記載のとおり他の文献⁽³⁾⁽⁵⁾とも概ね整合しているが、ここでは、その不確実性を考慮し、流入層高さ H_i を $\pm 10\%$ 変化させた場合の飛跡も示す。 $H_i=15\text{m}$ の際のコンテナの最大飛散距離 189.4m に対し、流入層高さ H_i を $\pm 10\%$ 変化された場合の最大飛散距離は $183.4\text{m}(-3.2\%)$ 、 $194.7\text{m}(+2.8\%)$ となり、流入層高さ H_i に対する最大飛散距離の感度は小さいことが分かる。



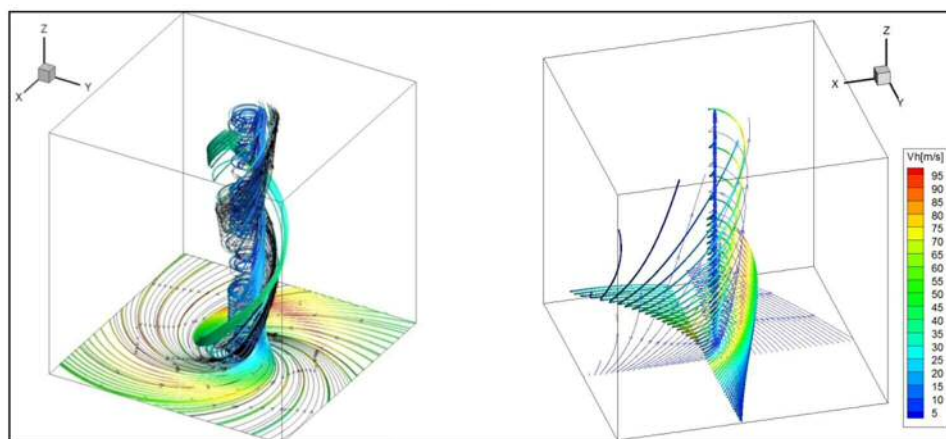
第 2.3-2 図 流入層高さを変化させた場合のコンテナの飛跡

3. 各風速場モデルの比較

上述の各風速場モデルの特徴の比較を第 3-1 表に示す。また、フジタモデルとランキン渦モデルの風速場構造の比較を第 3-1 図に示す。フジタモデルの風速場構造の流線は、地面付近を含めより実際の風速場に即した形で表現されており、これがフジタモデルの大きなメリットとなっている。それに対し、ランキン渦モデルは上空での水平方向風速の観点からは比較的良好に表現できると言えるものの、地上付近では実現象と乖離している。LES も同様に地上付近での風速場が実現象と乖離している。また、他のモデルと比較して、フジタモデルは特に問題となるような点も無いことから、竜巻影響評価に用いる風速場モデルとしてフジタモデルを選定することは妥当であると考えられる。

第3-1表 各風速場モデルの特徴の比較

風速場モデル	使用実績	特徴
フジタモデル	<ul style="list-style-type: none"> ・竜巻飛来物設計速度及び飛散高さに関する，米国DOE重要施設の設計基準作成に利用されている。（「4 米国におけるフジタモデルの取扱い」参照） 	<ul style="list-style-type: none"> ・実観測にもとづいて考案されたモデルであり，実際に近い風速場構造を表現している。 ・比較的簡易な代数式により風速場を表現できる。（ランキン渦モデルよりは複雑だが，計算機能力の向上及び評価ツールの高度化により実用可能となった） ・流体の連続式を満足する
ランキン渦モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・米国NRCのR.G 1.76に採用されている。 ・「竜巻影響評価ガイド」（竜巻の特性値の設定）において例示されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・簡易な式により風速場を表現できる。 ・風速場に高度依存性がなく，上昇流が全領域に存在し，地表近傍の風速場を模擬していない。 ・流体の連続式を満足しない。 ・。
非定常乱流渦モデル (LES)	<ul style="list-style-type: none"> ・「竜巻影響評価ガイド」において，飛来物の飛散速度等の評価例が示されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・風速の時間的な変動や乱れを，ある程度模擬できる。 ・人為的な境界条件を設定しており，地面や境界近傍で実現象と乖離している。 ・小規模領域での計算結果を実スケールに規格化した場合，最大瞬間風速が相当に保守的となる場合がある。 ・実スケールでの解析には膨大な計算機資源が必要であり，実用に供しにくい。



第3-1図 フジタモデル（左）とランキン渦モデル（右）の風速場の構造

4. 米国におけるフジタモデルの取扱い

4.1 フジタモデルの利用実績

米国エネルギー省DOE（Department of Energy）が管理するエネルギー関連施設等に適用する基準⁽⁸⁾において，竜巻飛来物速度，飛散高さの設定にフジタモデルを用いた計算結果が使用されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾（文献⁽⁸⁾のD.4節：

Windborne missile criteria specified herein are based on windstorm

damage documentation and computer simulation of missiles observed in the field. . . . Computer simulation of tornado missiles is accomplished using a methodology developed at Texas Tech University.) 。

この基準では、施設に要求される性能ごとにカテゴリ 0 から 4 まで分類し、カテゴリ 0 から 2 は一般的な建築物、カテゴリ 3 及び 4 は核物質や危険物質を取り扱う施設に適用される。カテゴリ 3 及び 4 に該当する施設として、Pantex Plant, Oak Ridge (X-10, K-25, Y-12), Savannah River Site が挙げられている。

フジタモデルの技術的な妥当性の検証については、米国 DOE 管轄のローレンス・リバモア国立研究所報告書⁽¹¹⁾にてまとめられている。この報告書では、フジタモデル D B T-77 を他の風速場モデルと比較検討しており、「流体力学の連続の式を満足する (Fluid mechanics equations of continuity are satisfied) 」こと、「モデル流況は、竜巻の映像分析で得られる流れの空間分布と整合する (Flow patterns are consistent with the spatial distribution of flow observed in photogrammetric analysis of tornado movies) 」こと等を利点として挙げている。

また、実際の事例に対するフジタモデルの検証としては、1978 年 12 月 3 日に米国ルイジアナ州 Bossier 市で発生した F4 竜巻による鋼製材の飛散について、フジタモデル D B T-77 で再現した事例⁽⁹⁾がローレンス・リバモア国立研究所報告書⁽¹¹⁾及び米国気象学会論文集⁽¹²⁾に掲載されている。

なお、米国 L E S (Louisiana Energy Services) の濃縮施設 N E F (National Enrichment Facility) では、上記の DOE 施設の基準に基づき竜巻飛来物 (鋼製パイプや木材の板等) を設定しており、米国 N R C は当該施設に対する安全評価報告書 (N U R E G-1827) ⁽¹³⁾の中で竜巻飛来物に対する L

ES の設計を是認している。

(“Based on the review of the information concerning tornados and tornado-generated missiles, NRC concludes: (i) the information is accurate and is from reliable sources; and (ii) the design bases tornado-generated missiles are acceptable because they were determined based on an appropriate DOE standard. The use of a DOE standard is an acceptable approach to NRC staff.”)

4.2 NRCガイドでの取扱い

2.1 節でも述べた通り、フジタモデルは実際の竜巻風速場をモデル化したいという米国NRCの要請を受けて考案されたものであるが、米国NRCのRegulatory Guide 1.76⁽¹⁾では、フジタモデルについて “The NRC staff chose the Rankine combined vortex model for its simplicity, as compared to the model developed by T. Fujita.” と述べられており、数式の簡易さを理由にランキン渦モデルが選定されている。また、NRCスタッフ自身で水平方向の飛散速度 (Simiu らの運動方程式⁽²⁾) を計算するプログラムを開発している (“The NRC staff developed a computer program to calculate the maximum horizontal missile speeds by solving these equations.”) ことが明記されている。

したがって、米国NRCガイドでランキン渦モデルが採用されているのは、フジタモデルより簡易であるという理由が主であり、竜巻風速場としての優劣を指摘されたものではない。

(参考) 米国におけるランキン渦モデル以外の風速場モデルの利用実績

米国NRCでは、竜巻防護対策の追加を検討しているプラントに対し、確率

論的竜巻飛来物評価手法TORMISの利用を承認している。

TORMISは、米国のEPRIで開発された原子力発電所の構造物、機器への竜巻飛来物の衝突及び損傷確率を予測する計算コードであり、同コードでは、ランキン渦モデル以外の風速場モデル（統合風速場モデル）が利用されている。（米国NRCにおいても、ランキン渦モデル以外の風速場モデルが認められていないわけではない）

5. 飛散解析における保守性の考慮

前節までに述べてきたとおり、フジタモデルの風速場を適用することで、より現実的な竜巻影響評価を行うことが可能と考えられるが、一方で、実際の竜巻による物体の飛散挙動の保守性についても考慮する必要がある。

本節では、フジタモデルを用いた地上からの飛散挙動解析に関する保守性や、物体が竜巻に晒される際の風速に関する不確定性等について、飛散解析の中でどのように考慮しているかについて説明する。

5.1 物体の浮上、飛散モデルにおける保守性の考慮

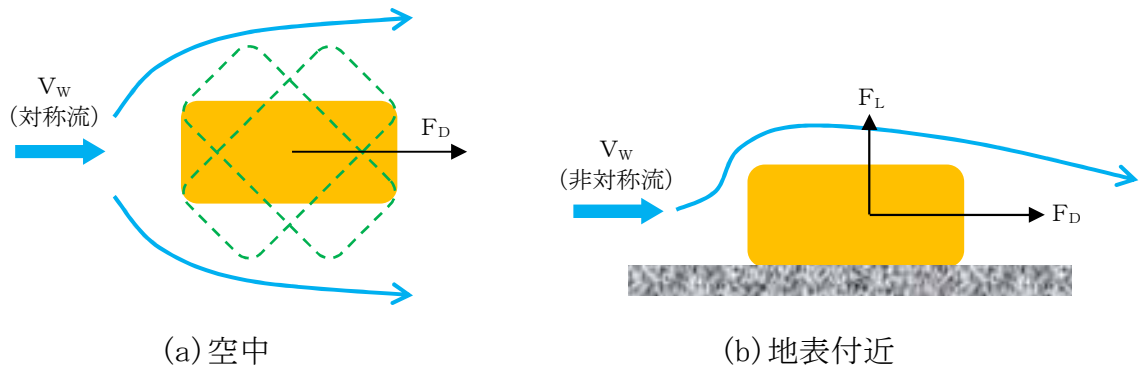
本評価における物体の浮上・飛散モデルの考え方と、その中で保守性の観点から考慮している点について説明する。

(1) 物体の揚力の計算式

物体が空中にある場合、物体に作用する力は、「竜巻影響評価ガイド」の飛来物運動モデル⁽²⁾⁽³⁾と同様に、飛来物は第5.1-1図(a)のようにランダムに回転しているものとし、平均的な抗力(流れの速度方向に平行な力) F_D と重力のみが作用する飛行モデルを採用している。

一方、物体が地面に置かれている場合や地面に近い場合は、地面効果による揚力を考慮している⁽¹⁴⁾。具体的には、物体の形状が流れ方向の軸に関し

て対称であっても，第 5.1-1 図(b)に示すように地面の存在により流れが非対称になり，物体上部の圧力が低くなることで物体を浮上させる駆動力が生じることから，これを揚力 F_L として考慮する。



第 5.1-1 図 物体へ作用する力

このような揚力 F_L は，地表付近での揚力係数 C_L 及び物体の見付面積（風方向から見た投影面積） a を用いて，以下のように表される。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L a |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M|_{x,y}^2 \quad (7)$$

ここで， ρ は空気密度， \mathbf{V}_M は飛来物の速度ベクトル， \mathbf{V}_w は風速ベクトル， $|\alpha|_{x,y}$ はベクトル α の x, y 成分（水平成分）の大きさを表す。

(参考) 地上の物体における地面効果による揚力について

物体や地面は完全な滑面ではなく凹凸を有しているため，完全接触と非接触の領域に区別される。物体の地面への投影面積を A とし，物体と地面の完全接触面積を s とした場合，無風時（第 5.1-2 図の(a)）は物体が流体に接する全表面で圧力は一定（ p_0 ）と見なせるため，鉛直方向（上向きを正とする）に作用する揚力 F_{L0} は以下で与えられる。

$$F_{L0} = -p_0 A + p_0 (A - s) = -p_0 s \quad (8)$$

ここで， $0 < s \leq A$ であることから， F_{L0} は負の値となり，揚力は発生しな

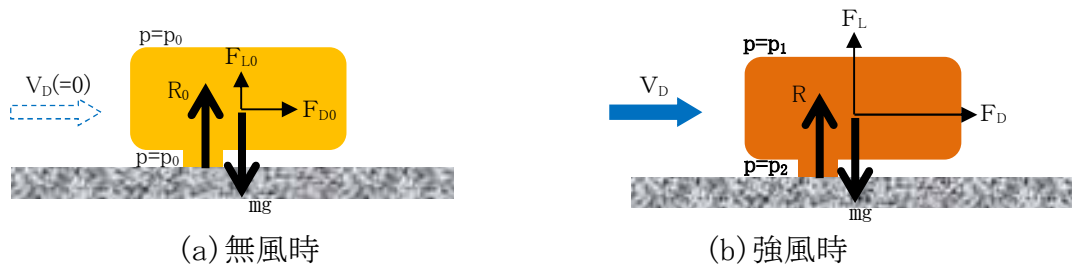
いことが分かる。

一方、竜巻通過時（第 5.1-2 図の(b)）の物体に圧力差に伴う流体力が作用（簡単のため上面での圧力を p_1 、下面での圧力を p_2 と仮定）する場合、鉛直方向の流体力 F_L は以下で与えられる（圧力分布がある任意形状の物体についても、圧力の表面積分を用いれば同様に計算可能）。

$$F_L = -p_1 A + p_2 (A - s) \quad (9)$$

吸盤の様に完全に地面に密着している場合は $s = A$ となるため、上面の圧力 p_1 に投影面積 A を乗じた力が下向きに作用するが、物体と地面の間に僅かに空隙が生じる場合には、地面と物体の接触状態によっては上向きの力が発生することがある。

実際には、地面と物体の接触状態を確認することは難しいことから、本評価においては、保守的に地上における物体に揚力が作用することとしている。



第 5.1-2 図 部分的に地面に接する物体に作用する力

(2) 揚力係数の設定

(7) 式の $C_L a$ は風洞実験から求められる値であるが、実験条件（風を受ける方向等）により様々な値を取り得るため、それを包含するような係数を設定することが望ましい。本評価では、条件によらず保守性を確保できるように、 $C_L a$ に代わり、以下で定義される抗力係数と見付面積の積の平均値 $C_D A$ を用いることとする。

$$C_D A = \frac{1}{3} (C_{Dx} A_x + C_{Dy} A_y + C_{Dz} A_{xz}) \quad (10)$$

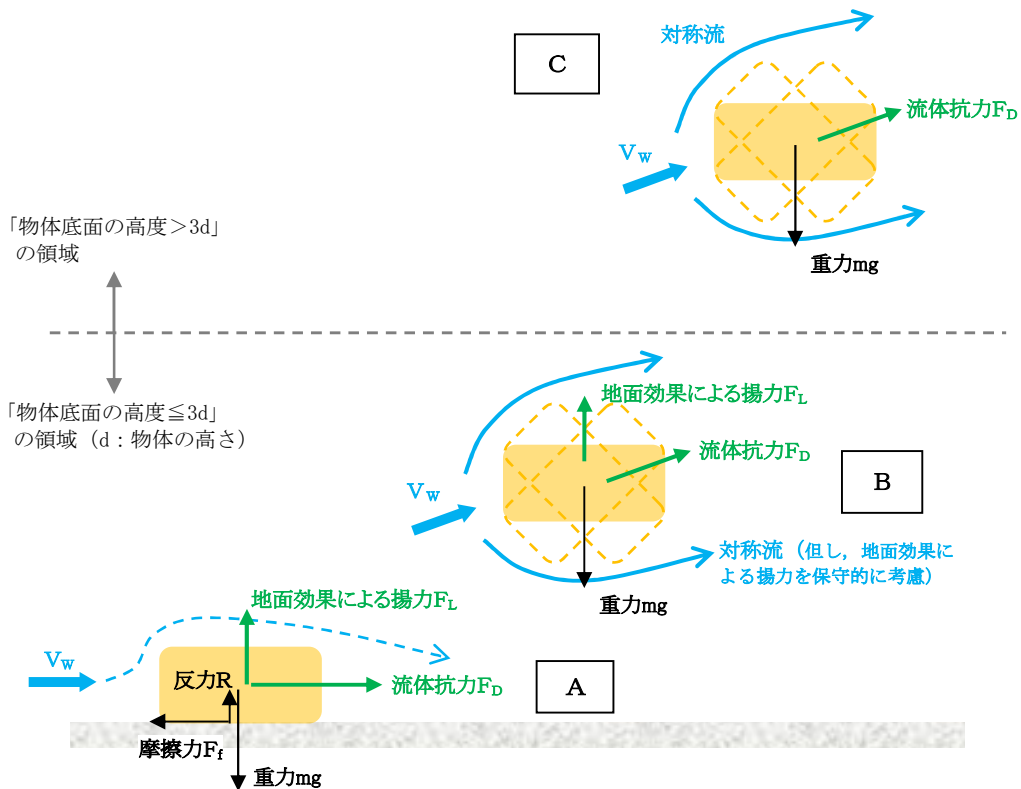
ここで、 C_{D_i} は空中での i 軸方向流れに対する抗力係数、 A_i は i 軸方向流れに対する見付面積を示す。

物体の運動モデルを第 5.1-3 図に示す。上述の、 $C_L a$ を $C_D A$ で代用する考え方を本図に基づき整理すると、以下の通りとなる。

- ・物体がある程度浮き上がった後の状態(B)であれば、物体はランダムに回転し、物体各面に均等に風を受けるものと考えられる。
- ・物体が地面に置かれた状態(A)から浮き上がる場合、実際には物体の上面や下面での圧力が均一ではなく、傾きながら浮き上がるようなことも考えられるが、このような挙動を理論的に評価することは難しい。

そのため、これに準ずる方法として、地面から浮かせた状態で実測された $C_L a$ のうち、物体が地面に置かれた状態(A)にできる限り近い場合の値よりも大きな係数 $C_D A$ を用いることで、保守性は確保できると考えられる（「 $C_D A > C_L a$ 」となることの説明は後述）。

- ・物体が地面に置かれた状態(A)と物体がある程度浮き上がった状態(B)での評価にて共通の係数を用いることは、地上からの物体浮上及び飛散解析における実用性の観点からも望ましい。



第 5.1-3 図 物体の運動モデルの模式図

物体の飛散解析におけるモデル化の基本的な考え方は、地面における揚力係数 C_L 見付面積 a の積 $C_L a$ をより大きな値で置き換えて、浮上現象を保守的に評価できるようにすることであり、この保守的な代用値として $C_D A$ の利用が適切であることを以下に説明する。

物体が風速 U を受ける場合の揚力係数 C_L は、一般にその定義により揚力 F_L と以下の関係にある。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 C_L a$$

$$C_L a = F_L / (\rho U^2 / 2)$$

ここで、典型的な塊状物体、柱状物体及び板状物体が地面に置かれた場合の $C_L a$ の最大値（または、それに近い値）の実測結果と、物体の幾何学形状のみで決定される $C_D A$ の値を比較した。（第 5.1-1 表）

同表より、「 $C_D A > C_L a$ 」の関係が成立しており、揚力の評価モデルとして $C_L a$ の代わりに $C_D A$ を用いることで保守性は確保できる。

また、以上の揚力のモデル化の説明は浮上時（第 5.1-3 図の状態 A）に対するものであるが、この揚力が物体高さの 3 倍までの飛散高度の範囲で連続的に低減するように作用するようにモデル化しており、第 5.1-3 図の状態 A, B 及び C の全領域で揚力の連続性が確保されている。

第 5.1-1 表 主な物体の C_{DA} と地面に置かれた物体の C_{La} (実測値) (1/2)

形状	物体	仕様	C_{DA} ※1	C_{La} (実測値)	C_{La} (実測値) に係る試験条件等
塊状	自動車	実物の Dodge Dart (長さ 16.7ft., 幅 5.8ft., 高さ 4.3ft.)	129ft. ²	48.7ft. ²	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁵⁾ (風速 22~31m/s, $Re=2.8 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6$) C_{La} が最大となる流入角での値を C_{La} (実測値) として記載
		1/6 縮尺模型 (セダン: 長さ 4.85m, 幅 1.79m, 高さ 1.42m, 質量 1633kg)	12.07m ²	7.76m ²	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁶⁾ (風速 0~150m/s, $Re=0 \sim 3 \times 10^6$) 4 つのタイヤに作用する地面からの反力のうち, 少なくとも 1 つが 0 となった時点の風速 U から C_{La} 値を計算 ($C_{La}=2mg/\rho U^2$) C_{La} が最大となる流入角での値を C_{La} (実測値) として記載
		1/6 縮尺模型 (ミニバン: 長さ 5.12m, 幅 1.94m, 高さ 1.69m, 質量 2086kg)	14.58m ²	7.89m ²	
	立方体	一辺の長さ D	$2D^2$	$0.2D^2$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁷⁾ ($Re=8000 \sim 28000$) 流入方向と立方体面の一面が垂直になる配置における値を C_{La} (実測値) として記載
柱状	円柱	長さ λ , 直径 D	$0.47D\lambda$	$0.2D\lambda$	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁵⁾ ($Re=1.3 \times 10^6$) 流入方向と円柱の軸直角方向が垂直になる配置 (円柱の軸方向は地面と平行) における値を C_{La} (実測値) として記載
				$0.05D\lambda \sim 0.23D\lambda$	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験 ($Re=3.5 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^5$) 流入方向と円柱の軸直角方向が垂直になる配置 (円柱の軸方向は地面と平行) における値を C_{La} (実測値) として記載
	角柱	長さ λ , 断面が一辺 D の正方形	$0.8D\lambda$ ($1.3D\lambda$)※2	$0.5D\lambda \sim 0.7D\lambda$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁷⁾ ($Re=8000 \sim 28000$) 長方形断面 (アスペクト比 4:3) の角柱は地面から $0.167D$ 以上離れると揚力は負となる (電中研風洞実験) 流入方向と角柱の軸方向が垂直となる配置 (角柱の軸方向は地面と平行) における値を C_{La} (実測値) として記載
					<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験 ($Re=3.8 \times 10^4$) 流入方向と角柱の軸方向が垂直になる配置 (角柱の軸方向は地面と平行)
		長さ λ , 高さ D , 幅 B の長方形断面	$0.4(D+B)\lambda$	負値 (地面との隙間が $0.167D$ 以上の場合)	

※1: 柱状及び板状では微小項を無視して記載

※2: 塊状と見なせる場合

第 5.1-1 表 主な物体の $C_D A$ と地面に置かれた物体の C_{La} (実測値) (2/2)

形状	物体	仕様	$C_D A$ ※ ¹	C_{La} (実測値)	C_{La} (実測値) に係る試験条件等
板状	薄い平板	長さ λ , 幅 B , 厚さ D ($B=200$ mm, $D=5$ mm, $\lambda=1000$ mm の場合)	0.66 $B\lambda$	0 に近い値 (地面から 0.25 B 離れた位置で $C_{La}=0.04B\lambda$)	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁸⁾ (幅 B に基づく $Re=2 \times 10^5$) 流入方向と平板の長さ方向が垂直になる配置 (平板は地面と平行) における値を C_{La} (実測値) として記載
	薄い翼	長さ λ , 幅 B , 厚さ D ($B=100$ mm, $D=15$ mm, $\lambda=300$ mm)		0.2 $B\lambda$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁹⁾ (幅 B (参考文献(19)では c) に基づく $Re=2.2 \times 10^5$) 流入方向と翼の長さ方向が垂直になる配置 (翼面は地面と平行)
	平板状ブロック	長さ λ , 幅 B , 厚さ D	0.66 $B\lambda$ 0.66($B\lambda + D(B + \lambda)$)※ ²	0.1 $B\lambda$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽²⁰⁾ ($Re=5 \times 10^4$ 程度) 流入方向と平板状ブロックの長さ方向が垂直になる配置 (平板状ブロックは地面と平行) における値を C_{La} (実測値) として記載

※1: 柱状及び板状では微小項を無視して記載

※2: 塊状と見なせる場合

(3) 設定した揚力係数の適用性の確認

第 5.1-1 表における $C_L a$ (実測値) が竜巻における物体の飛散解析に適用可能であることについて、レイノルズ数の観点から確認を行った。

第 5.1-1 表の各文献中の実験におけるレイノルズ数は、同表の備考欄に示す通り、 10^4 から 10^6 の範囲にある。

ここで、実物の自動車 (Dodge Dart : 長さ 16.7ft. , 幅 5.8ft. , 高さ 4.3ft.) では風速を 30mph (13m/s) から 120mph (54m/s) まで変化させてレイノルズ数の影響を調べた結果、風速は各空力係数に対して顕著な影響がないことが確認されている⁽¹⁵⁾。これは、剥離点が物体角部等に固定されてレイノルズ数にほとんど依存しないためであり、このような特性を有する立方体等についてもレイノルズ数依存性はないものと考えられる。

一方、円柱周りの流れのように剥離点が曲面上にある場合については、第 5.1-4 図に示すように、レイノルズ数が増えると剥離点が移動し、抗力係数等が増えることが知られている。第 5.1-1 表の E P R I の円柱の風洞試験結果⁽¹⁵⁾は $Re=1.3 \times 10^6$ の高レイノルズ数条件で得られたものであり、竜巻中の円柱状の飛来物のレイノルズ数範囲に入るものと考えられる (例えば、相対風速 92m/s の直径 0.1m のパイプのレイノルズ数は 6×10^5 程度)。また、電力中央研究所の吹出式開放型風洞 (吹出口寸法 : 高さ 2.5m × 幅 1.6m, 風速 : 3.0~16.5m/s) においても、壁 (地面) 近くに設置した円柱 (直径 100mm × 模型長 1000mm) を対象として、 $Re=3 \times 10^4$ から 1×10^5 程度までの揚力係数の測定試験が行われている。

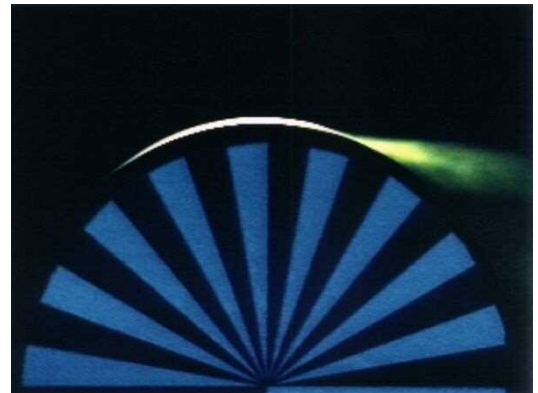
E P R I の風洞試験と電力中央研究所の風洞試験にはレイノルズ数条件に大きな違いがあるが、第 5.1-5 図に示す通り、風洞試験で得られた円柱揚力係数に顕著な相違は認められない。

以上より、地面における各物体の揚力係数 C_L と見付面積 a の積 $C_L a$ はレ

レイノルズ数にほとんど依存せず，第 5.1-1 表に示す風洞試験結果に基づくモデル化は妥当であると考えられる。

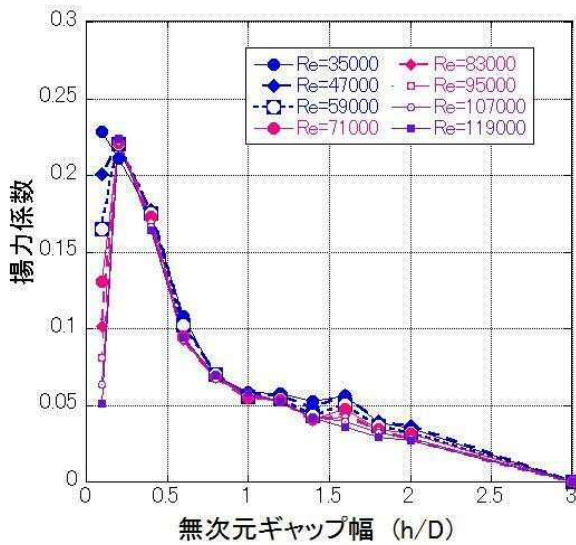


(a) $Re \approx 4 \times 10^4$

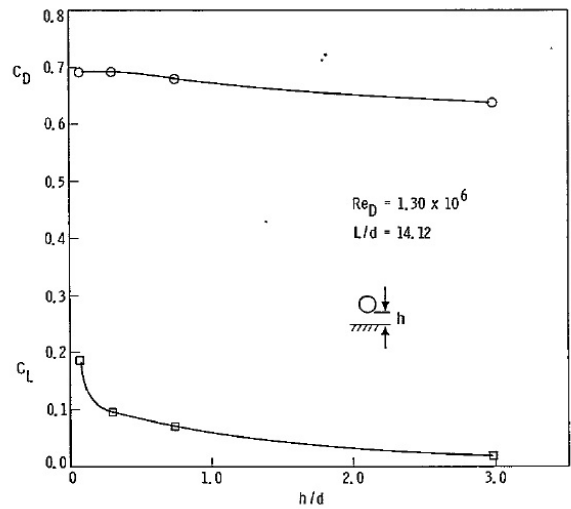


(b) $Re \approx 2 \times 10^5$

第 5.1-4 図 可視化した円柱まわりの流れ⁽²¹⁾



(a) 電力中央研究所
($Re=3 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$)



(b) E P R I
($Re=1.3 \times 10^6$)⁽¹⁵⁾

第 5.1-5 図 風洞実験による円柱の揚力係数

(4) 揚力の高さ依存性

地面効果による揚力は物体の上昇とともに減衰するので，既往の風洞実験の結果⁽¹⁵⁾⁽²²⁾を考慮して，高さ寸法 d の物体に働く揚力は，物体底面の高度

が地面から 3d となった時に消滅すると設定した。

具体的には、底面が地面から Z の距離（高度）にある物体に作用する揚力加速度 L を以下の関数形でモデル化した。

$$L = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M|_{x,y}^2 f(Z/d) \quad (11)$$

f(Z/d) は、E P R I の風洞実験結果⁽¹⁵⁾を参考に、以下の反比例式とした。

$$f(Z/d) = \{1 - (Z/3d)\} / \{1 + (Z/d)\} \quad (12)$$

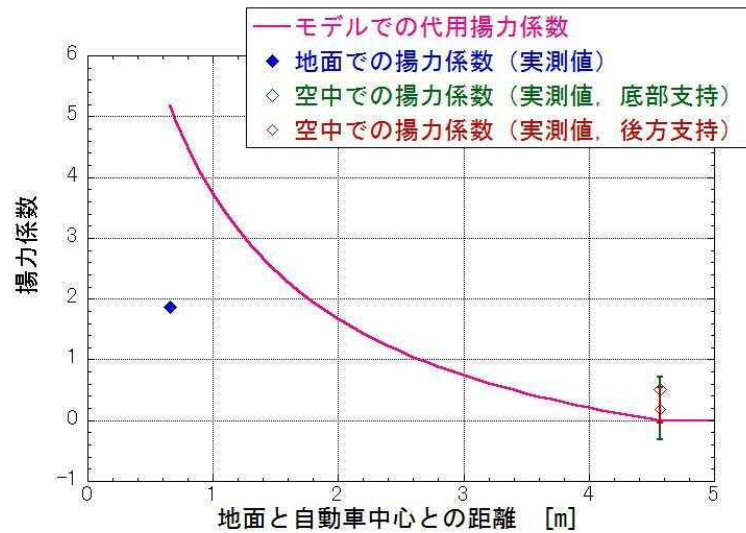
ここで、Z は下式により定義される（z : 物体中心の高度）

$$Z = \begin{cases} z - (d/2) & (d/2 \leq z \leq 7d/2) \\ 0 & (7d/2 \leq z) \end{cases} \quad (13)$$

また以下において、塊状物体（自動車）、柱状物体（角柱及び円柱）及び板状物体（平板）の風洞試験結果を踏まえ、「高さ寸法 d の物体に働く揚力は、物体底面の高度が地面から 3d となった時に消滅する」とした設定が適切であることを確認する。

a. 塊状物体（自動車）の揚力の高さ依存性

自動車の揚力係数は、E P R I の風洞試験⁽¹⁵⁾にて、地面及び風洞中央（h/d ≒ 3.5）に設置した場合にて計測されており、第 5.1-6 図に、E P R I の風洞試験によって得られた揚力係数と本モデルにて代用した揚力係数の関係を示す。E P R I の風洞試験では空中での自動車の姿勢は地面設置と同じ姿勢に保たれているため、空中においても揚力係数が 0 とはならないが、実際に飛散する自動車の姿勢はランダムに変化することから、平均的な揚力係数は本モデルでの代用揚力係数に近いものと考えられる。



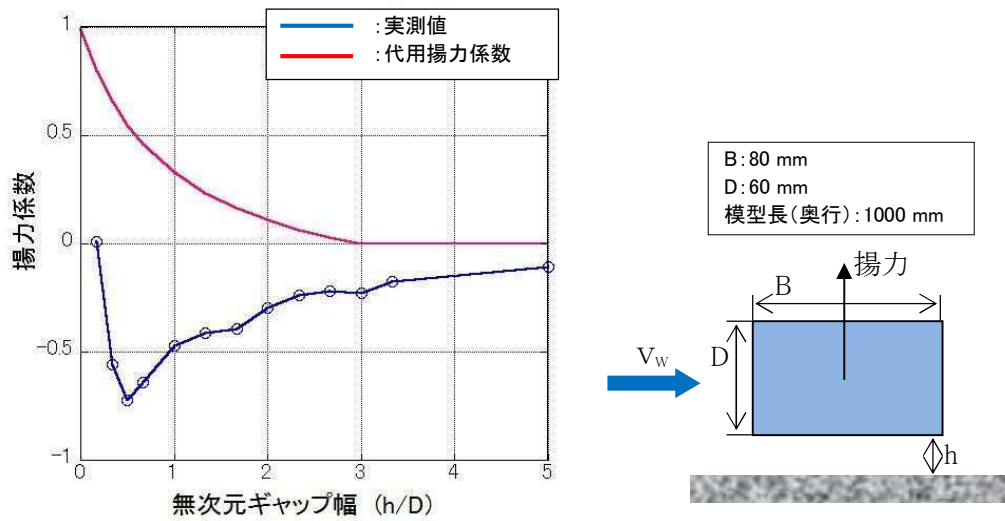
第 5.1-6 図 自動車の風洞実験による揚力係数と代用揚力係数

(文献⁽¹⁵⁾を基に作成及び代用揚力係数を加筆)

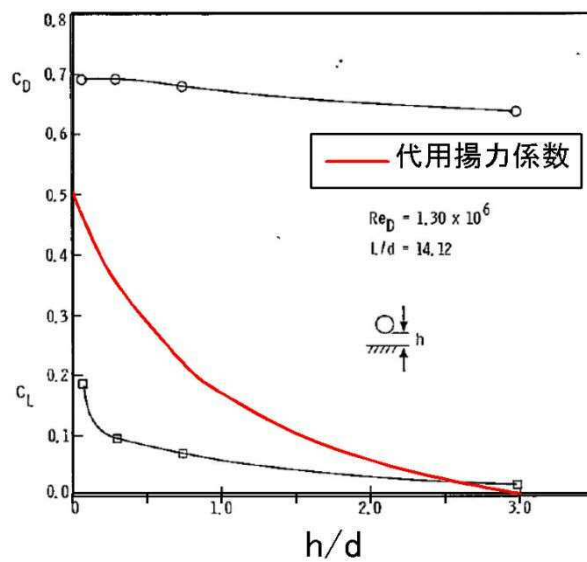
b. 柱状物体（角柱及び円柱）の揚力の高さ依存性

角柱の揚力係数は、電力中央研究所の吹出式開放型風洞（吹出口寸法：高さ 2.5m×幅 1.6m，風速：3.0 から 16.5m/s）にて測定しており，第 5.1-7 図に示すように，地面から 0.167D 以上離れると揚力は負となるので，正の揚力を与える本モデルの代用揚力係数（第 5.1-7 図の赤線）は保守的な結果となっていることが分かる。

円柱の揚力係数は，E P R I の風洞試験⁽¹⁵⁾にて測定しており，第 5.1-8 図に示すように，本モデルの代用揚力係数（第 5.1-8 図の赤線）は実際の円柱に働く揚力の最大揚力係数よりも大きな値となっているため，保守的な結果となっていることが分かる。



第 5.1-7 図 角柱の風洞試験による揚力係数と代用揚力係数



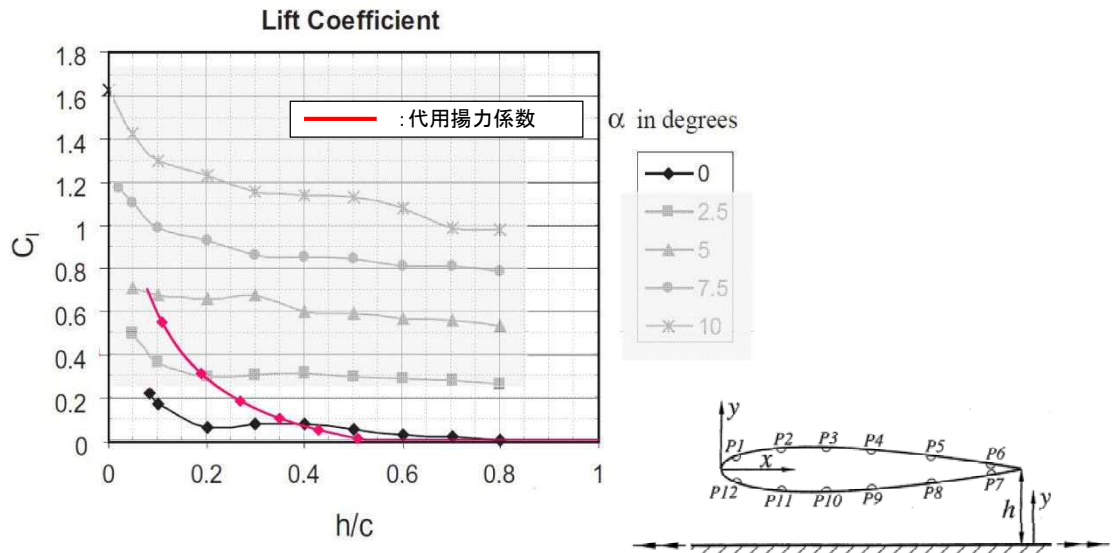
第 5.1-8 図 円柱の風洞試験による揚力係数と代用揚力係数

(文献⁽¹⁵⁾に代用揚力係数を加筆)

c. 板状物体（平板）の揚力の高さ依存性

平板の揚力係数は、平面的な形状を有する翼（迎角 0° ）の試験結果⁽¹⁹⁾に基づき考察すると、本モデルの代用揚力係数（第 5.1-9 図の赤線）は、実際の翼に働く地面効果による揚力係数よりも概ね大きな値となって

いる。また、この翼は奥行方向が長い形状で流れに直交するような配置となっており、実際の平板に比べて揚力が作用しやすいことを考慮すると、実際の平板の揚力係数はさらに小さいものと考えられる。



第 5.1-9 図 翼の風洞試験による揚力係数と平板の代用揚力係数

(文献⁽¹⁹⁾に代用揚力係数を加筆)

(5) 物体の運動方程式

上記(1)から(4)を踏まえ、重力加速度 g 、上向きの単位ベクトル \mathbf{k} を用いて、飛行物体の運動方程式は以下のように記述される。

$$\frac{d\mathbf{V}_M}{dt} = \frac{l}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) - (g - L) \mathbf{k} \quad (14)$$

物体の位置 $\mathbf{X}_{M(t)}$ と速度 $\mathbf{V}_{M(t)}$ の時刻歴の計算には陽解法（一定加速度法）を用いた。具体的には、時刻 $t = \tau$ における物体の位置 $\mathbf{X}_{M(\tau)}$ と速度 $\mathbf{V}_{M(\tau)}$ を既知として、時刻 $t = \tau + \Delta \tau$ における物体の速度と位置を以下の式で求めた。ただし、 $\mathbf{A}(\tau)$ は上記運動方程式の右辺に対応する時刻 $t = \tau$ における加速度ベクトルである。

$$\mathbf{V}_M(\tau + \Delta \tau) = \mathbf{V}_M(\tau) + \mathbf{A}(\tau) \Delta \tau \quad (15)$$

$$\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) = \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_M(\tau)\Delta\tau + \frac{\mathbf{A}(\tau)\Delta\tau^2}{2} \quad (16)$$

$\mathbf{A}(\tau)$ の計算には、時刻 $t = \tau$ における風速場も必要であるが、初期に原点に位置する竜巻の中心が x 軸上を移動速度 V_{tr} で移動することを仮定しており、任意の時刻での風速場を陽的に求められるため、物体の速度及び位置を算出することができる。

(6) 物体の運動方程式 ((14)式) に関する考察

地上面の物体 (第 5.1-3 図 A) が浮上するには、地面からの反力が消滅する ($R < 0$, つまり $mg < F_L$) 条件で浮上し、浮上後は(14)式を成分表示した以下の運動方程式に従って飛散する。

$$\frac{dV_{Mx}}{dt} = \frac{1}{2}\rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} \times (V_{w,x} - V_{M,x}) \quad (17)$$

$$\frac{dV_{My}}{dt} = \frac{1}{2}\rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} \times (V_{w,y} - V_{M,y}) \quad (18)$$

$$\frac{dV_{Mz}}{dt} = \frac{1}{2}\rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} \times (V_{w,z} - V_{M,z}) - g + L$$

..... (19)

ここで、物体速度 $\mathbf{V}_M = (V_{M,x}, V_{M,y}, V_{M,z})$ 、竜巻風速 $\mathbf{V}_w = (V_{w,x}, V_{w,y}, V_{w,z})$ であり、右辺第 1 項が流体抗力 F_D による加速度を、(19)式の右辺第 3 項が地面効果による揚力 F_L による加速度を表している。上記の式で、物体が静止している状態 ((17)式~(19)式で物体速度 $\mathbf{V}_M = \mathbf{0}$) を仮定すると、以下の式となる。

$$\frac{dV_{Mx}}{dt} = \frac{1}{2}\rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,x} \quad (17')$$

$$\frac{dV_{My}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,y} \quad (18')$$

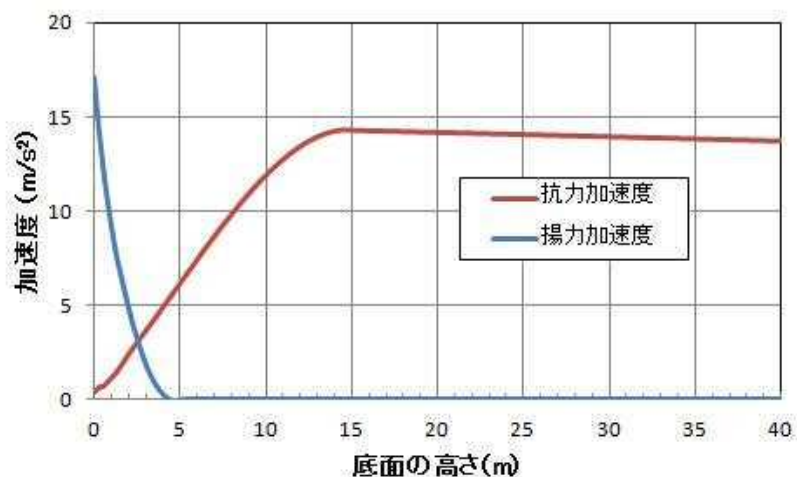
$$\frac{dV_{Mz}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,z} - g + L \quad (19')$$

フジタモデルでは、物体が地面近傍にある場合（第 5.1-3 図(A)）では鉛直方向の風速 $V_{w,z}$ はゼロに近いので、式(19')の右辺第 1 項は右辺第 2 項及び第 3 項に比べてはるかに小さな量となり、以下のとおり物理的に合理的な関係式が成立する。

$$\frac{dV_{Mz}}{dt} \approx -g + L \quad (20)$$

例として、竜巻コア半径 30m、最大風速 100m/s の竜巻が原点に位置し、x 方向に 15m/s で移動する場合、点(0, -30m)における式(19')の右辺第 1 項の値（z 方向抗力（流体抗力）による加速度）と第 3 項の値（地面効果による揚力加速度）を第 5.1-10 図に示す。

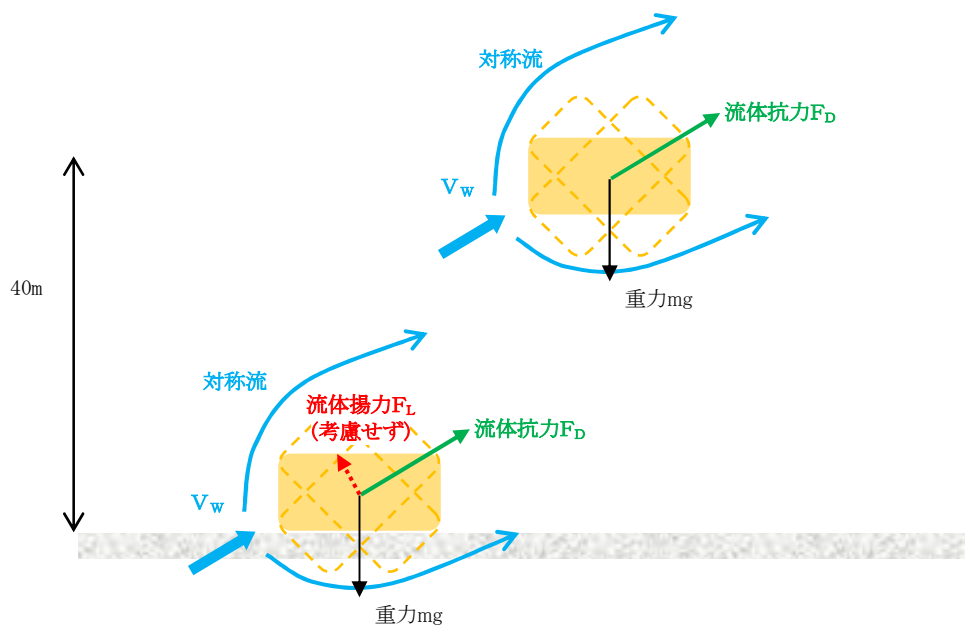
同図より、地面上（z=0）近傍においては、z 方向の抗力による加速度は十分小さく、地面効果による揚力加速度の影響が大きいことが分かる。



第 5.1-10 図 地面近傍の物体に作用する z 方向の加速度

$$\left(\frac{1}{2} \right) \rho C_D A / m = 0.004 \text{ m}^{-1}, \quad d = 1.31 \text{ m}$$

なお、高さ方向の依存性が考慮されていないランキン渦（飛散解析用）の場合は、地面から水平風速の約 60%にも達する上昇流の噴出を設定する。地面効果は地面の存在によって水平な風が物体付近で湾曲・剥離することによって生じるものであるが、ランキン渦の風速場では地面の有無によって物体周りの流況が大きく変化せず、地面効果は物理的に発現しにくいいため、ランキン渦モデルを用いた解析においては鉛直方向の揚力 L を付加していない（第 5.1-11 図）

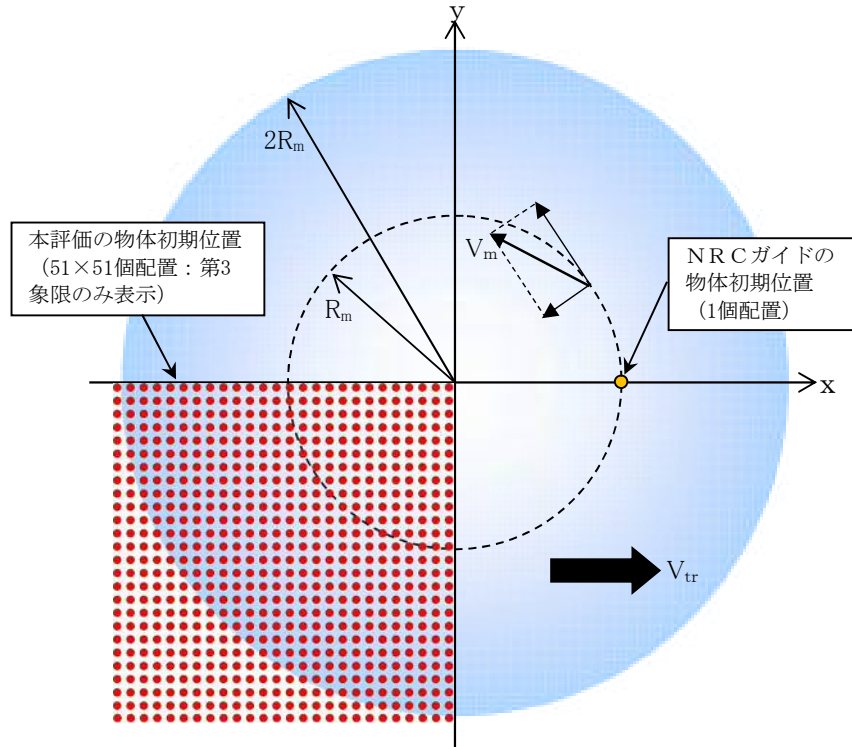


第 5.1-11 図 ランキン渦の場合の物体の運動モデルの模式図

5.2 物体が受ける風速における保守性の考慮

竜巻によって飛散する物体の飛散速度や飛散距離は、同じ竜巻内であっても物体が受ける風速（物体がある位置の竜巻風速）によって大きく変動する。その影響度合いを確認するため、米国 NRC ガイド⁽¹⁾に記載されている方法（物体の 1 点配置）と、物体を多点配置した場合の飛散速度の違いを比較した。配置の違いについて、第 5.2-1 図に示す。1 点配置の場合は、特定の位置（竜巻進行方向の最大接線風速半径の位置 $(x, y) = (R_m, 0)$ ）に物体 1 個を設置す

る。また多点配置の場合は、竜巻半径の4倍の辺長の正方形領域に51×51個の物体を配置する。その上で飛散させた物体の内、最も速度が大きくなったものをその物体の飛散速度とする。



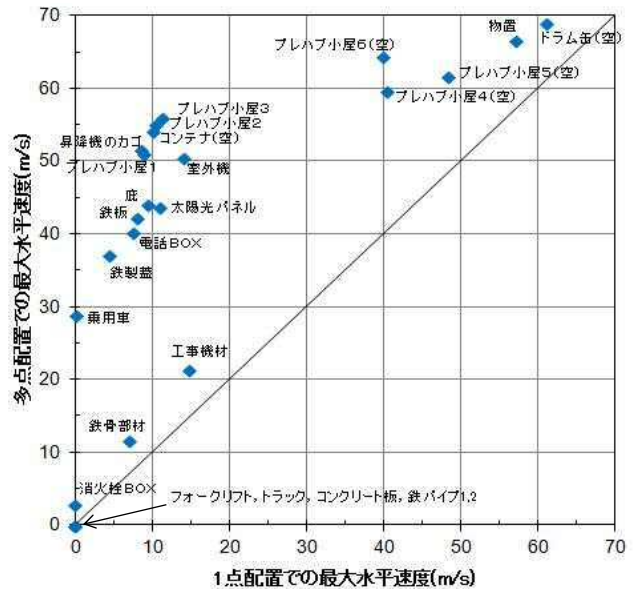
第 5.2-1 図 飛散解析における竜巻と物体の位置関係

評価条件として、竜巻の最大風速を 100m/s とし、フジタモデルの風速場を用いて地上から飛散させるものとする。また、評価ガイドの記載より竜巻の移動速度 V_{tr} を 15m/s 、竜巻コア半径 R_m を 30m とする。飛散させる物体としては、原子力安全基盤機構の調査研究報告書⁽³⁾に掲載されている物体を用いた。第 5.2-2 図に比較結果を示す。

米国 NRC で用いられている 1 点配置の手法と比較し、多点配置の手法では 1 点配置に比べて大きな飛散速度となった。多点配置することで、その竜巻風速場における最大風速（最大接線風速と半径方向風速のベクトル和が竜巻移動方向と重なる点）を受ける物体が出てくるため、このような結果になったと考えられる。

したがって、物体を多点配置することは、竜巻から受ける風速に関する不確
定性を考慮できるものと考えられるため、本検討における方法として適用する
こととする。

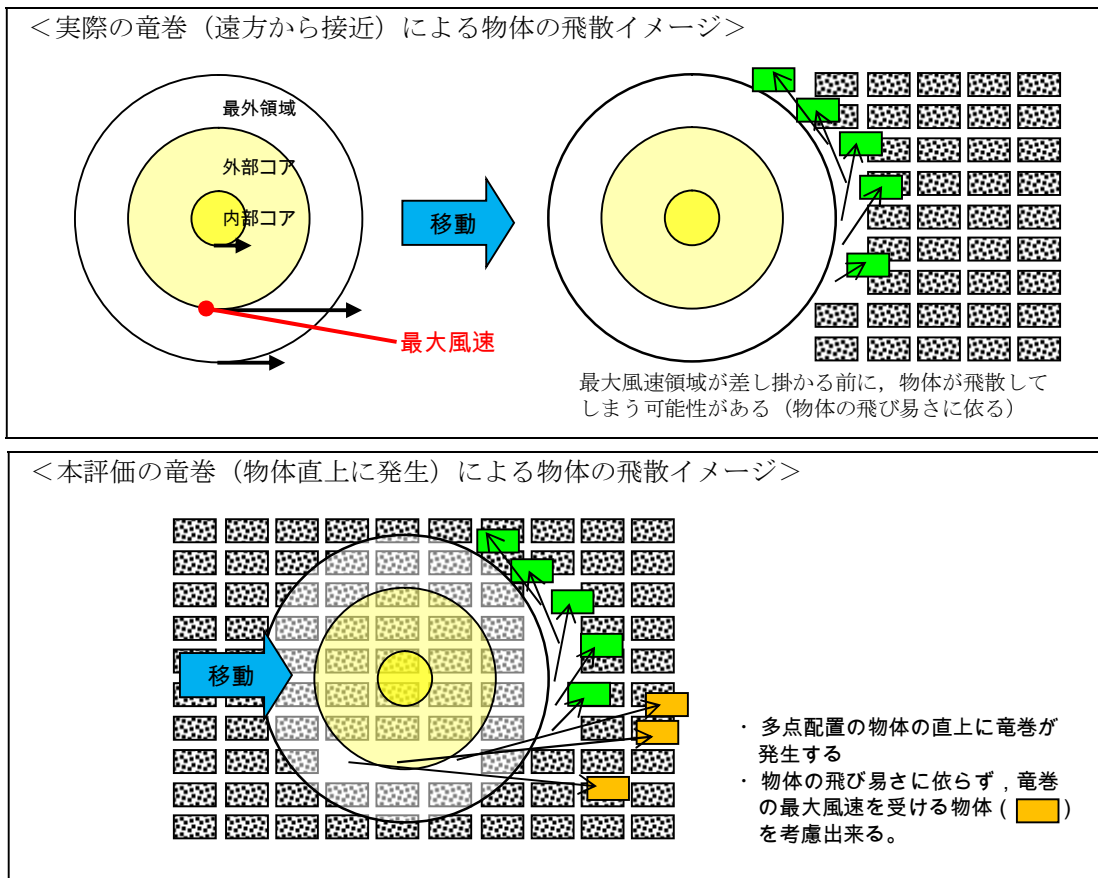
物品	高さ (m)	他の寸法		C _D A/m (m ² /kg)
		(m)	(m)	
フォークリフト	1.10	1.10	3.60	0.0026
トラック	1.30	1.90	5.00	0.0026
消火栓BOX	0.50	0.50	0.50	0.0036
乗用車	1.30	1.60	3.10	0.0052
工事機材	0.65	0.65	2.44	0.0058
プレハブ小屋1	3.00	5.00	5.00	0.0083
コンテナ(空)	2.40	2.40	2.60	0.0105
昇降機のカゴ	1.20	1.20	1.20	0.0113
プレハブ小屋2	1.85	1.85	1.85	0.0119
プレハブ小屋3	2.30	2.30	4.60	0.0120
プレハブ小屋4(空)	3.00	5.00	5.00	0.0153
電話BOX	0.30	0.30	0.30	0.0169
プレハブ小屋5(空)	1.85	1.85	1.85	0.0189
プレハブ小屋6(空)	2.30	2.30	4.60	0.0222
物置	0.90	0.90	1.80	0.0315
室外機	0.25	0.25	0.80	0.0343
コンクリート板	0.15	1.00	1.50	0.0021
庇	0.20	2.10	11.00	0.0242
鉄製蓋	0.03	0.50	0.70	0.0364
鉄板	0.04	0.25	2.00	0.0486
太陽光パネル	0.05	1.00	1.20	0.0582
鉄骨部材	0.20	0.30	4.20	0.0065
鉄パイプ1	0.05	0.05	2.00	0.0057
鉄パイプ2	0.05	0.05	1.00	0.0059
ドラム缶(空)	0.60	0.60	0.90	0.0400



第 5.2-2 図 1 点配置時と多点配置時における物体の最大速度の比較

本評価においては第 5.2-1 図に示す物体の多点配置（竜巻半径の 4 倍の辺長の正方形領域に 51×51 個の物体を配置）を初期状態として適用したが、この手法は、物体の直上に竜巻を発生させており、竜巻発生地点の不確定性についても考慮した設定となる。

第 5.2-3 図に、遠方から物体に接近する竜巻と物体直上に発生する竜巻による飛散の比較イメージ図を示す。実際の竜巻に遭遇する状況（海上で竜巻が発生して上陸する場合など）を考慮すると、竜巻は遠方から物体に近づくため、最大風速より低い風速に曝された時点で飛散する可能性がある。しかし、物体の直上に竜巻を発生させることで、実際の竜巻による飛散と比較して、より厳
しい結果を与えることになる。



第 5.2-3 図 物体に接近する竜巻と物体直上に発生する竜巻のイメージ

この物体を多点配置する方法と，竜巻を直上に発生させる方法を組み合わせることにより，必ずその竜巻の最大風速に曝される物体が発生するため，竜巻が物体に与える速度の不確定性を考慮することができると考えられる。

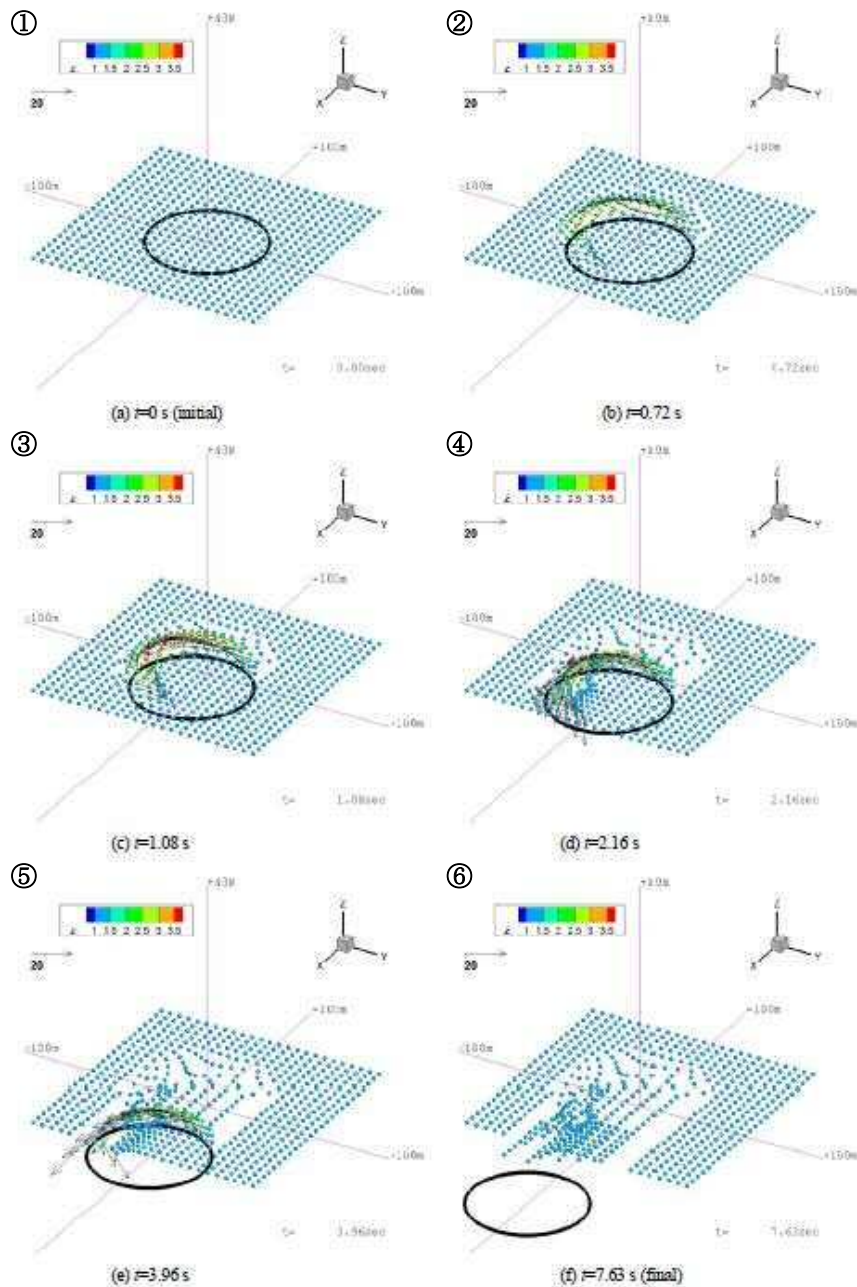
5.3 飛散解析手法まとめ

物体の浮上及び飛散モデルにおいて，実際の実験結果よりも浮上しやすい係数を設定することで，浮上に関する保守性を考慮できるような設定とした。

また，物体を多点配置し，その物体直上で竜巻が発生するという設定を組み合わせることにより，竜巻風速場内での物体が受ける風速の不確定性を考慮し，その竜巻において最大となる飛散速度が評価できるような設定とした。

以上により、フジタモデルを用いて物体の飛散解析を行う場合でも、保守性や不確定性を考慮した評価結果が得られると考えられる。

なお、参考として、第 5.3-1 図に本条件設定によるトラックの飛散イメージを示す。同じ物体でも、受ける風速によって大きく飛散状況が変わる様子分かる。



第 5.3-1 図 竜巻によるトラックの飛散イメージ^(2,3)

(第 6.3-5 表 (後述) の条件による)

6. 実際の飛散状況に対する検証

前節までで、フジタモデルの風速場を用いる利点や、飛散解析を行う上で考慮している事項等について説明した。

本節では、フジタモデルの風速場や前節の飛散解析手法を適用した場合、実際の事例等に比べて妥当な結果となるかどうかの検証を行った。

6.1 フジタスケールとの比較

フジタスケールは、竜巻等の突風により発生した建築物や車両等の被害状況から竜巻風速を推定するために考案された指標である。フジタスケールで示されている自動車の被災状況を第 6.1-1 表に示す。

ここで、各スケールに対応する最大風速（69m/s, 92m/s, 116m/s）を用いて、フジタモデルによる自動車飛散解析を行った結果を第 6.1-2 表に示す。

フジタモデルによる自動車飛散解析の結果は、各スケールに対応する自動車の被災状況と概ね合致していると考えられる。なお、ランキン渦モデルを用いた場合は、F 2 相当の風速（69m/s）でも大きく飛散することになり、フジタスケールの定義との比較からは過度に保守的な結果となる。

第 6.1-1 表 フジタスケールによる自動車の被災分類⁽²⁴⁾

フジタスケール	風速 (m/s)	自動車の被災状況
F 2	50~69	cars blown off highway (自動車が道路から逸れる。)
F 3	70~92	cars lifted off the ground (自動車が地面から浮上する。)
F 4	93~116	cars thrown some distances or rolled considerable distances (自動車がある距離を飛ばされる、またはかなりの距離を転がる。)

第 6.1-2 表 フジタモデルによる自動車 ($C_D A/m=0.0052\text{m}^2/\text{kg}$) の

飛散評価結果⁽²⁵⁾

フジタ スケール	竜巻の 最大水平風速 (m/s)	竜巻の 接線風速 (m/s)	竜巻の 移動速度 (m/s)	計算結果		
				最大水平速度 (m/s)	飛散距離 (m)	飛散高さ (m)
F 2	69	59	10	1.0	1, 4	0
F 3	92	79	13	23	34	1. 1
F 4	116	99	17	42	59	3. 1

6.2 米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例との比較

1978 年 4 月 17 日に、米国のミシシッピ州にて建設中の Grand Gulf 原子力発電所に F 3 の竜巻が来襲した。主な被害として、建設中の冷却塔内部に設置されていたクレーンが倒壊し、冷却塔の一部が破損したことが挙げられる。また、竜巻によりトレーラーが台から剥がれ移動したことや、直径 8 から 10 インチの木が折れた事例等も確認されている。

第 6.2-1 図は、竜巻による飛来物の飛散状況が定量的に分かる事例として、資材置場のパイプの飛散状況を示したものである。なお、資材置場通過時の竜巻規模は F 2 であったと考えられている。このパイプはコンクリート・石綿製で、長さは 8 フィート、直径（内径）は 8 インチであった。このパイプの飛散状況に対して、フジタモデル及びランキン渦モデルを風速場として用いた飛散解析を行った⁽²⁵⁾。解析条件は、過去の記録に基づき第 6.2-1 表の通りとした。



パイプを収納した木箱（一部 2 段重ね）は浮上せずに転倒し、パイプが周囲 7m～9m に散乱
 (Pieces of pipe were scattered over the area, but none travelled more than 25-30ft. The pipe joints are 8in. dia. x 8ft. long.)

第 6.2-1 図 Grand Gulf 原子力発電所資材置場におけるパイプの散乱状況⁽²⁶⁾

第 6.2-1 表 Grand Gulf 原子力発電所のパイプ飛散解析条件⁽²⁵⁾

竜巻条件	竜巻の最大風速	67 m/s
	最大接線風速	53.6 m/s
	移動速度	13.4 m/s
	コア半径	45.7 m
飛来物条件	直径（外径）	0.2286 m (=9 in.)
	物体高さ	0.229 m
	密度	1700 kg/m ³
	飛行定数 (C _D A/m)	0.0080 m ² /kg
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> ・ 物体個数：51×51 本を，最大接線風速半径の 4 倍を 1 辺とする正方形内(x, y=[-2R_m, +2R_m]) に等間隔配置。 ・ 設置高さ：1 m (パイプ収納箱が 2 段重ねされた状況を想定) 	

解析結果を第 6.2-2 表に示す。フジタモデルを風速場とした場合は、パイプが殆ど飛散せず、収納箱が倒れた影響で散乱したと思われる状況と概ね合致している。

なお、ランキン渦モデルで評価した場合は、飛散距離や最大水平速度に実際の報告と大きな違いがあり、過度に保守的な評価結果となる。

第 6.2-2 表 Gland Gulf 原子力発電所のパイプ飛散解析結果⁽²⁵⁾

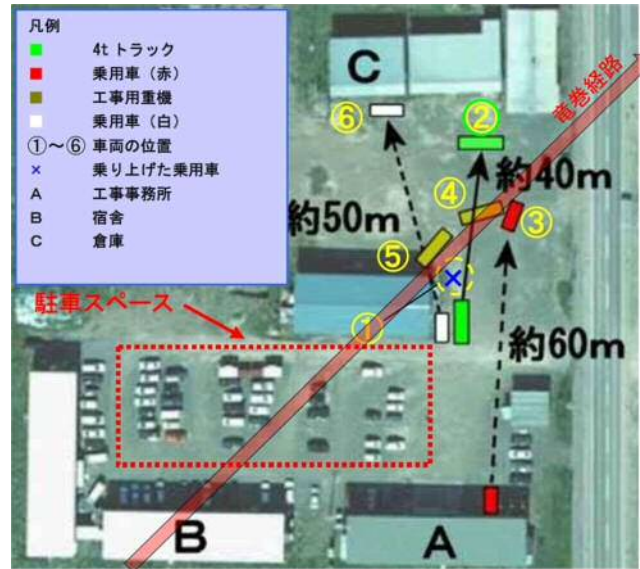
風速場モデル	初期 物体高さ	計算結果		
		飛散距離	飛散高さ ^{※2}	最大水平速度
フジタモデル	1 m (地上)	1.2 m	0.0 m	4.9 m/s
ランキン渦モデル	1 m ^{※1}	42.6 m	0.34 m	30.7 m/s
	40 m	227 m		40.9 m/s

※1：比較のため、フジタモデルと同条件とした。

※2：初期物体高さからの飛散（浮上）高さ。

6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例との比較

2006 年 11 月 7 日に北海道網走支庁佐呂間町に発生した竜巻（以下「佐呂間竜巻」という。）により、4t トラックが約 40m 移動したことが報告⁽²⁷⁾されている。被災状況を第 6.3-1 図に示す。この事例では被災時に 4t トラックに乗員 2 名が乗車しており、4t トラックの初期位置と移動位置が分かっている(②)。また、4t トラックの他に、2 台の自動車(③と⑥)の初期位置と被災後の移動位置が分かっている。このように竜巻被災前後で車両等の位置が明確になっている事例は極めて稀である。なお、竜巻による飛散物の再現計算は、竜巻が頻発する米国でも殆ど実施されていない。この理由としては、来襲した実際の竜巻特性を精度良く計測、推測することが困難であることや、自動車等の移動前後の位置が不明確な場合が多いことが挙げられる。



第 6.3-1 図 佐呂間竜巻による被災状況（工事事務所敷地内の車両被災）

（文献⁽²⁷⁾の写真に竜巻被害の方向を加筆）

ここでは、フジタモデルを風速場として用いた車両（4tトラック及び乗用車）の飛散解析を行い、実際の被害状況と比べて妥当な結果となるかどうかの確認を行った。方法としては、下記の2通りとした。

- ・ 竜巻特性や飛来物（4tトラック及び乗用車）の状況を現実的に設定した場合の再現解析
- ・ 今回の飛散解析手法による検証

(1) 竜巻特性や飛来物（4tトラック及び乗用車）の状況を現実的に設定した場合の再現解析

a. 4tトラックの飛散解析

解析条件として、入手可能なデータ⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾に基づき、合理的と考えられる竜巻特性条件と飛来物（4tトラック）の条件を第 6.3-1 表のとおり設定した。初期配置の条件として、配置数は1台とし、竜巻が遠方から近づく状況設定としている。また、風速 60m/s 以下では浮上しない設定⁽¹⁶⁾

とした。その上で、竜巻との距離を合理的な範囲で変化させ、佐呂間竜巻の再現性を確認した。

車両と竜巻中心との距離を 18m, 20m, 22m とした場合の解析結果を第 6.3-2 表及び第 6.3-2 図に示す。車両の軌跡は竜巻中心との相対位置関係に敏感であるが、各ケースとも飛散方向が実際の移動方向と概ね合致しており、特に車両と竜巻中心との距離を 20m としたケース 2 では飛散距離もほぼ正確に再現されている。このように、フジタモデルを風速場とした飛散解析で、物体が地上に設置された状況からの飛散挙動が再現できることが確認できた。

第 6.3-1 表 佐呂間竜巻による 4t トラックの飛散解析条件^(2 5)

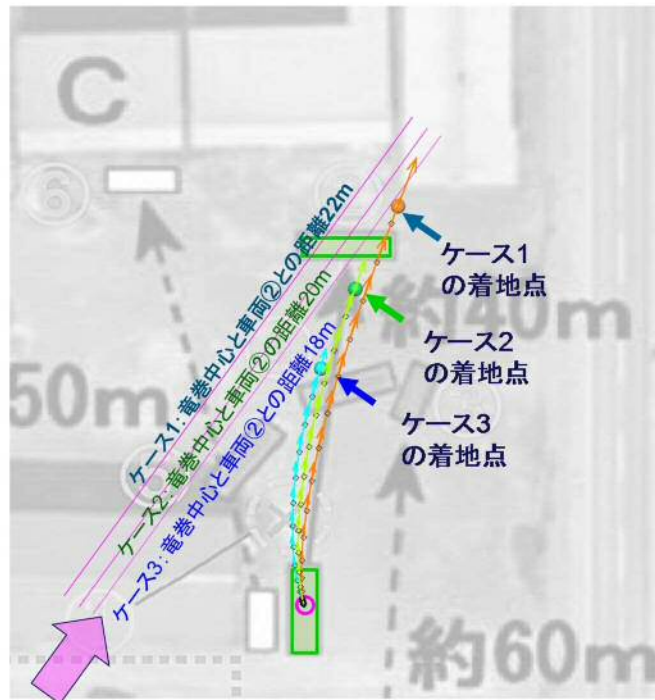
竜巻条件	竜巻の最大風速	92 m/s ^{※1}
	最大接線風速	70 m/s
	移動速度	22 m/s
	コア半径	20 m
飛来物条件	車両長さ ^{※2}	8.1 m
	車両幅 [*]	2.24 m
	車両高さ [*]	2.5 m
	車両重量	4000 kg
	飛行定数 (C _D A/m)	0.0056 m ² /kg
初期配置等	<ul style="list-style-type: none"> ・物体個数：1 台 ・設置高さ：0 m (地上) ・「竜巻は遠方から物体に近づくが、風速 60m/s 以下では浮上しない」ことを条件として付加 	

※1：佐呂間竜巻のフジタスケール (F 3) に基づく。

※2：車種不明のため、三菱ふそう PA-FK71D を仮定。

第 6.3-2 表 佐呂間竜巻による 4t トラックの飛散解析結果

ケース	車両と竜巻中心との距離	計算結果		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
1	22 m	45.4 m	2.8 m	25.8 m/s
2	20 m	35.5 m	2.3 m	22.2 m/s
3	18 m	25.9 m	1.7 m	18.8 m/s



第 6.3-2 図 フジタモデルによる 4t トラックの飛散解析結果

(文献⁽²⁷⁾の写真に軌跡を加筆)

b. 乗用車の飛散解析

白い乗用車（第 6.3-1 図の⑥）の被災事例を対象として、物体を 1 点初期配置した条件で最大水平速度等を計算した。

乗用車の計算条件について、第 6.3-3 表に示す。

第 6.3-3 表 佐呂間竜巻による乗用車の飛散解析条件

竜巻条件	トラック（第 6.3-1 表）に同じ	
飛来物条件	車両長さ ^{※2}	4.4 m
	車両幅 [*]	1.7 m
	車両高さ [*]	1.5 m
	飛行定数（ $C_D A/m$ ）	0.0097 m ² /kg
初期配置等	<ul style="list-style-type: none"> ・ 物体個数：1 台 ・ 設置高さ：0 m（地上） ・ 「竜巻は遠方から物体に近づくが、風速 60m/s 以下では浮上しない」ことを条件として付加 	

※1：佐呂間竜巻のフジタスケール（F 3）に基づく。

※2：車種不明のため、トヨタカローラを仮定。

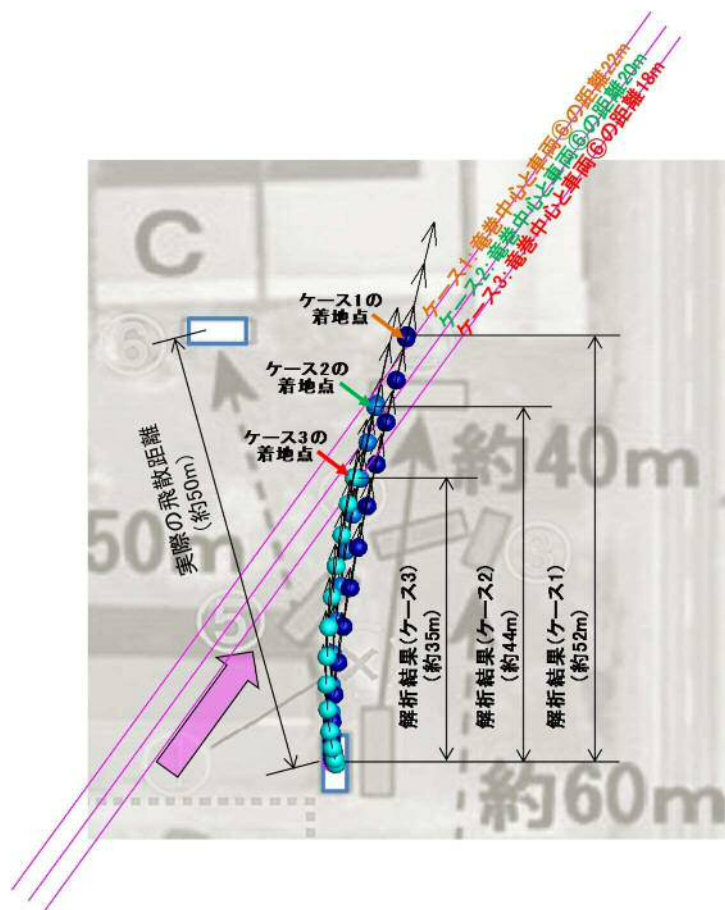
乗用車と竜巻中心との距離を 18m、20m 及び 22m とした場合の解析結果を、第 6.3-4 表及び第 6.3-3 図に示す。飛散距離については、ケース 1 で概ね合致している。

飛散方向については、飛び出し方向は概ね合致しているものの、最終的な着地点には多少のずれが生じている。これは乗用車（白）が建物（A 棟）に近接して駐車していたため、この建物の倒壊の影響を受けて飛散方向のずれが生じたものと推定される。

なお、赤い乗用車（第 6.3-1 図の③）について評価した場合は、竜巻中心との距離が大きいため飛散しない結果となった。ただし、実際には、赤い乗用車は全壊、飛散したプレハブ建物（軽量鉄骨造 2 階建、第 6.3-1 図の A）の直ぐ下流側に駐車しており、その瓦礫の影響を受けて一緒に移動したものと考えられる。

第 6.3-4 表 佐呂間竜巻による乗用車の飛散解析結果

ケース	車両と竜巻中心との距離	計算結果		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
1	22 m	51.9 m	3.6 m	28.9 m/s
2	20 m	43.5 m	3.4 m	24.7 m/s
3	18 m	34.7 m	2.9 m	21.1 m/s



第 6.3-3 図 フジタモデルによる乗用車の飛散解析結果⁽²³⁾

(別文献⁽²⁸⁾の写真に軌跡を加筆)

(2) 今回の飛散解析手法による検証

ここでは、今回の飛散解析手法で、前述の佐呂間竜巻における 4t トラック及び乗用車の被災事例を評価し、実際の被災状況（飛散距離等）と比較する。

a. 4tトラックの飛散解析

解析条件について第 6.3-5 表に示す。竜巻条件としては、最大風速を 92m/s とし、その他の特性量については、竜巻影響評価ガイドに例示されている方法に従い、移動速度 V_{tr} を 14m/s（最大風速の 15%）、竜巻コア半径 R_m を 30m とした。

第 6.3-5 表 今回の飛散解析手法に基づく計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92 m/s
	最大接線風速	78 m/s
	移動速度	14 m/s
	コア半径	30 m
飛来物条件	トラック（第 6.3-1 表）に同じ	
初期配置	・ 物体個数：51×51 台を、最大接線風速半径の 4 倍を 1 辺とする正方形内 ($x, y = [-2R_m, +2R_m]$) に等間隔配置。 ・ 設置高さ：0 m（地上）	

第 6.3-6 表に実際の被災状況と、今回の飛散解析手法による結果との比較を示す。また、第 6.3-4 図に被災後の 4t トラックの状況を示す。

フジタモデルによる評価結果として、4t トラックの最大飛散速度は 36m/s、最大飛散高さは 3.6m、最大飛散距離は 63.4m となった。

実際の 4t トラック飛散距離は約 40m であり、フジタモデルによる評価結果はこれを上回った。また、飛散高さや最大水平速度については、直接の比較は出来ないものの、4t トラックの乗員 2 名が存命であったこと、被災後の 4t トラックがほぼ元の外形を留めていることなどから、今回の飛散解析手法で評価をした場合でも、実際の被災状況と比較して妥当な結果となるものと考えられる。

なお、参考として同様の検証をランキン渦モデルでも実施した。ランキ

ン渦モデルによる評価では、最大飛散高さ、最大飛散距離ともに実際の被災状況と比較して非常に保守的な結果となっていることが分かる。

第 6.3-6 表 実際の被災状況と今回の飛散解析手法による評価結果
(4t トラック)

風速場モデル	初期 物体高さ	計算結果		
		飛散距離	飛散高さ※ ²	最大水平速度
フジタモデル	0 m (地上)	63.4 m	3.6 m	36.0 m/s
ランキン渦モデル 【参考】	0 m (地上※ ¹)	193.7 m	11.7 m	43.9 m/s
	40 m	254.9 m		
実際の被災状況	0 m (地上)	約 40 m	乗員 2 名が存命で、病院にて聞き取り調査が可能であったことから ⁽²⁷⁾ 、3.6m を超える高さからトラックが落下したとは考え難い	トラックは概ね外形を留めていることから、36m/s (約 130km/h) を超える飛散速度であったとは考え難い。

※1：比較のため、フジタモデルと同条件とした。

※2：初期物体高さからの飛散（浮上）高さ。



第 6.3-4 図 竜巻による被災後の 4 t トラックの様子⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾

b. 乗用車（白）の飛散解析

4tトラックの場合と同様に、今回の飛散解析手法で乗用車の評価を行った結果を第6.3-7表に示す。

乗用車の場合も、フジタモデルによる評価が、実際の被災状況を包含する結果となっている。

第6.3-7表 実際の被災状況と今回の飛散解析手法による評価結果（乗用車）

風速場モデル	初期 物体高さ	計算結果		
		飛散距離	飛散高さ※ ²	最大水平速度
フジタモデル	0 m（地上）	82.3 m	4.2 m	44.1 m/s
ランキン渦モデル 【参考】	0 m （地上※ ¹ ）	269.6 m	39.4 m	49.6 m/s
	40 m	305.8 m		
実際の被災状況	0 m（地上）	約50 m	—	—

※1：比較のため、フジタモデルと同条件とした。

※2：初期物体高さからの飛散（浮上）高さ。

7. 飛散以外の挙動に対する考慮

前節までで、飛来物の竜巻による挙動のうち、飛散に関する評価手法について説明をしたが、実際の竜巻による飛来物の挙動としては、飛散だけではなく横滑りや転がりが発生することも考えられる。

本節では、横滑りや転がりの影響について、以下2点に分けて考察する。

- ・ 飛散する物体における横滑りや転がりの影響
- ・ 飛散しない物体における横滑りや転がりの影響

(1) 飛散する物体における横滑りや転がりの影響

「5.2 物体が受ける風速における保守性の考慮」に記載の通り、本検討においては、竜巻を直上に発生させる方法を採用していることから、実際には

横滑りや転がりを伴い移動する物体も強制的に高速域に配置され、浮上をして飛散することになる。この場合、空中では地面の摩擦力を受けないため、実際に比べて大きな水平速度が得られることになる。

また、浮上後に地面に衝突する場合は、運動エネルギーの大部分は物体や地面の変形、破損等で消費されることから、落下後の横滑りや転がりによる移動距離は実際には小さいものと考えられる。

「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例との比較」における飛散した4tトラックや乗用車は、実際には飛散だけではなく横滑りや転がりを伴ったものと考えられるが、飛散解析より得られた飛散距離や最大水平速度は、実際の被災状況よりも保守的な評価となっていることから、飛散過程における不確実性を裕度として包含している。

(2) 飛散しない物体における横滑りや転がりの影響

飛散しない物体においても、竜巻による風荷重が静止摩擦力より大きい場合には、横滑りをする。また、横滑りをしない場合でも、風荷重によるモーメントが自重のモーメントよりも大きい場合には転がることになる。このように、竜巻により横滑りや転がりが生じる場合には、地面での摩擦力の影響を受けながら移動することから、移動距離や水平速度は十分に小さいものと考えられる。

また、物体と竜巻防護施設の間に障害物となるフェンス等がある場合には、横滑りや転がった物体が竜巻防護施設に到達することは阻止される。

以上より、飛散しない物体が、障害物の影響を受けずに、横滑りや転がりによって竜巻防護施設と衝突することが想定される場合については、横滑りや転がった物体の影響が設計飛来物の影響に包含されることを確認し、包含されない場合には固縛等の措置を実施する。固縛等の措置にあたっては、フ

ジタモデルの風速場より求まる風荷重や地面での摩擦力を適切に考慮した上で、設計用荷重を設定する。

8. まとめ

フジタモデルは、米国NRCの要望により実際の竜巻観測記録を基に考案された風速場モデルであり、米国DOEの重要施設に対する設計基準の作成の際にも用いられている。フジタモデルは、他のモデルではできなかった地上からの物体の浮上を現実的に評価することができる点が大きなメリットである。これは、「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例との比較」の「(1)竜巻特性や飛来物(4tトラック及び乗用車)の状況を現実的に設定した場合の再現解析」において、フジタモデルを風速場とした飛散解析結果が実際の飛散状況と概ね合致していることから確認できる。

また、フジタモデルにより算出される風速(V_w)は、飛来物の飛散評価のインプットとして用いるものであり、設計竜巻の最大風速の算出にあたっては保守性を確保したうえで、「5. 飛散解析における保守性の考慮」のとおり、竜巻を多数の物体の直上に瞬時に発生させて物体が最大風速を受けるような初期条件を用いる等の評価手法により、不確実性も含めて飛来物速度等を保守的に評価できるようにしている。

これにより、「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例との比較」の「(2)今回の飛散解析手法による検証」では、本評価手法を用いることで、フジタモデルにおいても実際の飛散状況に対し保守性を有した妥当な結果となることを確認している。

地上からの浮上、飛散評価を行うことのメリットは、発電所敷地内に数多く存在する物品の中から、竜巻による飛来物化の影響度合いを、浮上の有無の観点を含めより正確に把握できることである。竜巻飛来物の影響(浮上の有無、

飛散高さ、飛散距離、最大速度等)を正確に捉えることにより、飛来物発生防止対策や評価対象施設の防護対策の範囲や強度について、適切な保守性を確保した上で実効性の高い竜巻防護対策を実施することが可能になると考えられる。

評価全体として一定の保守性を確保しつつ、適切な竜巻対策によりプラント全体の安全性を向上させるため、竜巻影響評価における物体の浮上、飛散評価については、フジタモデルを適用することとする。

<参考文献>

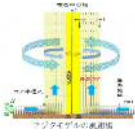
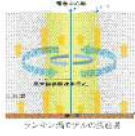
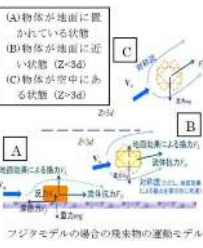
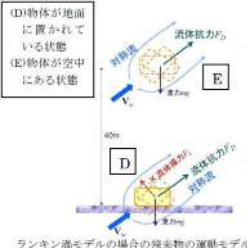
- (1) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.76: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March 2007.
- (2) Simiu, E. and Cordes, M., Tornado-Borne Missile Speeds, NBSIR 76-1050, 1976.
- (3) 東京工芸大学 (2011) : 平成21~22 年度原子力安全基盤調査研究 (平成22年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構
- (4) Fujita, T. T., Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications, U. Chicago, 1978.
- (5) Karen A. Kosiba and Joshua Wurman, 2013: The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. *Wea. Forecasting*, 28, 1552-1561.
- (6) 数値的に生成された竜巻状の渦の性質, 平成21年度京都大学防災研究所研究発表要
- (7) Maruyama, T., Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol.99(4), pp.249-256, 2011.
- (8) U.S. Department of Energy, Natural Phenomena Hazards Design and Evaluation Criteria for Department of Energy Facilities, OE-STD-1020-2002, 2002.
(<http://pbdupws.nrc.gov/docs/ML0302/ML030220224.pdf>)

-
- (9) Malaeb, D. A., Simulation of tornado-generated missiles. M.S. thesis, Texas Tech University, 1980
- (10) P.-H. Luan, Estimates of Missile Speeds in Tornadoes, M.S. thesis, Texas Tech University, 1987.
- (11) J. R. McDonald, Rationale for Wind-Borne Missile Criteria for DOE facilities, UCRL-CR-135687, Lawrence Livermore National Laboratory, 1999.
(<https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/236459.pdf>)
- (12) McDonald, J. R., T. Theodore Fujita: His contribution to tornado knowledge through damage documentation and the Fujita scale. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82, pp.63-72, 2001
- (13) NUREG-1827 Safety Evaluation Report for the National Enrichment Facility in Lea County, New Mexico (Docket No. 70-3103)
- (14) 江口讓, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 竜巻による物体の浮上・飛来解析コードTONBOSの開発, 電力中央研究所 研究報告N14002, 2014.
- (15) EPRI, Wind field and trajectory models for tornado-propelled objects, report NP-2898, 1978.
- (16) Schmidlin, T., B. Hammer, P. King, Y. Ono, L. S. Miller, and G. Thumann, 2002: Unsafe at any (wind) speed? Testing the stability of motor vehicles in severe winds. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83, 1821-1830.
- (17) 林建二郎・大井邦昭・前田稔・斉藤良, 開水路中に水没設置された立方体及び棧粗度の流体力, 土木学会論文集B1(水工学) Vol. 67, No. 4, I_1141-I_1146, 2011.

-
- (18) 松宮央登, 中岡宏一, 西原 崇, 木村吉郎: 太陽光発電パネルに作用する空気力の地面効果に関する風洞実験, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 446-454, 2014.
- (19) M.R. Ahmed, S.D. Sharma, An investigation on the aerodynamics of a symmetrical airfoil in ground effect, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29, pp. 633-647, 2005.
- (20) 山本晃一, 林建二郎, 関根正人, 藤田光一, 田村正秀, 西村晋, 浜口憲一郎, 護岸ブロックの抗力・揚力係数, 及び相当粗度の計測方法について, 水工学論文集, 第44 巻, pp1053~1058, 2000.
- (21) 江口 讓, 西原 崇, 水流動試験による電線の風荷重低減化のメカニズム解明, 電力中央研究所 研究報告U96050, 1997.
- (22) Lei, C., Cheng, L. and Kavanagh, K., Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 80, pp. 263-286, 1999.
- (23) 江口讓, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 原子力発電所での竜巻飛来物速度の合理的評価法 (Fujita の竜巻モデルを用いた数値解析コードの妥当性確認),
- (24) Fujita, T. T., 1971: Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity. SMRP Research Paper 91, University of Chicago, Chicago, IL, 42 pp
- (25) 日本保全学会 原子力規制関連事項検討会, 2015: 軽水型原子力発電所の竜巻影響評価における設計竜巻風速および飛来物速度の設定に関するガイドライン (JSM-NRE-009)

-
- (26) Fujita, T. T., and J. R. McDonald, Tornado damage at the Grand Gulf, Mississippi nuclear power plant site: Aerial and ground surveys, U.S. Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-0383, 1978.
- (27) 札幌管区気象台:平成18年11月7日から9日に北海道(佐呂間町他)で発生した竜巻等の突風. 災害時気象調査報告, 災害時自然現象報告書, 2006年第1号, 2006.
- (28) 奥田泰雄, 喜々津仁密, 村上知徳, 2006年佐呂間町竜巻被害調査報告. 建築研究所災害調査, 46, 2006.
- (29) 土木学会 平成18年11月北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査報告書

「フジタモデル」及び「ランキン渦モデル」並びに「それぞれの風速場モデルを用いた際の飛散解析手法」の比較

	フジタモデル (及び同モデルを用いた飛散解析手法)	ランキン渦モデル (及び同モデルを用いた飛散解析手法)																	
モデルの概要	 <ul style="list-style-type: none"> ・Fujitaにより実観測に基づき考案された竜巻風速場モデルであり、<u>実際に近い風速場構造を有する</u> ・半径方向に3つの領域（内部コア、外部コア及び最外領域）を有し、外部コアに上昇流が存在する ・<u>接線風速や上昇風速に高さ依存性がある</u> ・米国DOEの重要施設の基準において、竜巻飛来物の速度及び飛散高さの設定に使用 	 <ul style="list-style-type: none"> ・<u>簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現</u> ・上昇流は全領域に存在 ・<u>接線風速や上昇風速に高さ依存性がなく、地面から吹出しが生じる流れとなっている</u> (飛散評価を行う場合、地上からの物体の浮上、飛散挙動を表現できないため、地上の物体であっても空中浮遊状態を仮定し評価することになる) ・米国NRC Regulatory Guide 1.76にて採用 																	
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ・地面に置かれた物体へ影響を与える風速場をよく表現できており、地上からの物体の浮上、飛散解析が可能 →地上にある物体に対する力や挙動を表現するのに適しているモデルであり、防護対策や固縛対策の範囲や強度について、実効性の高い対策とすることが可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ・簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現可能 																	
デメリット	<p>特になし。 (ランキン渦モデルに比べ解析プログラムが複雑になるが、近年の計算機能力の向上や評価ツールの高度化により問題とならない)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・風速場に高度依存性がなく、上昇流が全領域に存在する（地面からも吹き出しがある）ため、実現象から乖離しており、地上からの物体の浮上、飛散挙動を表現できない →<u>地上における構造物に対し、過度に保守的な防護対策や固縛対策が必要となる。</u> 																	
主要パラメータ (設計竜巻の最大風速100m/sの場合)	<table border="1"> <tr> <td>竜巻の移動速度 V_T</td> <td>15 (m/s)</td> <td rowspan="3">評価ガイドの値や式が風速場モデルによらないことを確認のうえ、評価ガイドの値や式より算出</td> <td>竜巻の移動速度 V_T</td> <td>15 (m/s)</td> <td rowspan="3">評価ガイドの値や式より算出</td> </tr> <tr> <td>最大接線風速 V_{Rm}</td> <td>85 (m/s)</td> <td>最大接線風速 V_{Rm}</td> <td>85 (m/s)</td> </tr> <tr> <td>最大接線風速半径 R_0</td> <td>30 (m)</td> <td>最大接線風速半径 R_0</td> <td>30 (m)</td> </tr> </table>	竜巻の移動速度 V_T	15 (m/s)	評価ガイドの値や式が風速場モデルによらないことを確認のうえ、評価ガイドの値や式より算出	竜巻の移動速度 V_T	15 (m/s)	評価ガイドの値や式より算出	最大接線風速 V_{Rm}	85 (m/s)	最大接線風速 V_{Rm}	85 (m/s)	最大接線風速半径 R_0	30 (m)	最大接線風速半径 R_0	30 (m)				
	竜巻の移動速度 V_T	15 (m/s)	評価ガイドの値や式が風速場モデルによらないことを確認のうえ、評価ガイドの値や式より算出		竜巻の移動速度 V_T	15 (m/s)		評価ガイドの値や式より算出											
	最大接線風速 V_{Rm}	85 (m/s)			最大接線風速 V_{Rm}	85 (m/s)													
	最大接線風速半径 R_0	30 (m)		最大接線風速半径 R_0	30 (m)														
	<table border="1"> <tr> <td>最大気圧低下量 ΔP_{max}</td> <td>76 (hPa)</td> <td rowspan="2">フジタモデルの圧力分布は複雑であるため、有限要素法の数値解析により算出 ・フジタモデルは、地面との摩擦の影響を受けず回転するランキン渦に比べ、地面との摩擦の影響により回転が弱まり中心付近が低圧になりにくいモデルである。そのため、ランキン渦より最大気圧低下量が小さくなる</td> <td>最大気圧低下量 ΔP_{max}</td> <td>89 (hPa)</td> <td rowspan="2">: 施設の評価に使用する値（最大気圧低下量及び最大気圧低下率は、簡便のためランキンモデルを利用）</td> </tr> <tr> <td>最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$</td> <td>53 (hPa/s)</td> <td>最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$</td> <td>45 (hPa/s)</td> </tr> </table>	最大気圧低下量 ΔP_{max}	76 (hPa)	フジタモデルの圧力分布は複雑であるため、有限要素法の数値解析により算出 ・フジタモデルは、地面との摩擦の影響を受けず回転するランキン渦に比べ、地面との摩擦の影響により回転が弱まり中心付近が低圧になりにくいモデルである。そのため、ランキン渦より最大気圧低下量が小さくなる	最大気圧低下量 ΔP_{max}	89 (hPa)	: 施設の評価に使用する値（最大気圧低下量及び最大気圧低下率は、簡便のためランキンモデルを利用）	最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$	53 (hPa/s)	最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$	45 (hPa/s)								
最大気圧低下量 ΔP_{max}	76 (hPa)	フジタモデルの圧力分布は複雑であるため、有限要素法の数値解析により算出 ・フジタモデルは、地面との摩擦の影響を受けず回転するランキン渦に比べ、地面との摩擦の影響により回転が弱まり中心付近が低圧になりにくいモデルである。そのため、ランキン渦より最大気圧低下量が小さくなる	最大気圧低下量 ΔP_{max}		89 (hPa)	: 施設の評価に使用する値（最大気圧低下量及び最大気圧低下率は、簡便のためランキンモデルを利用）													
最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$	53 (hPa/s)		最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$	45 (hPa/s)															
内部コア半径と外部コア半径の比 ν	0.3	Fujitaにより提案された経験式より算出																	
流入層高さHi	15 (m)	流入層高さは他の文献に示されている値と概ね同じであることを確認 ・その他の定数についても、Fujitaにより提案された値を採用																	
物体の浮上、飛散モデル	 <p>物体の浮上、飛散モデル</p> <p>・物体の浮上、飛散モデル</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地面の存在により物体上面と下面の流れが非対象となることで生じる地面効果による揚力（左図A/B）と流れの速度方向に平行な抗力（左図A~C、但し地面付近では抗力の影響は小さい）を考慮し、地面に置かれた状態からの浮上高さや飛散速度等を評価 ・揚力係数 $C_{L a}$ ・地面から浮き上がる際の物体挙動を理論的に評価することは困難であるため、翼のような極端な形状を除き保守的となるよう、風洞実験の結果を踏まえ、代用の揚力係数を設定（物体の風の受け方や高度を変化させた場合でも、代用揚力係数が実測値より保守的になっていることを確認） 	 <p>物体の浮上、飛散モデル</p> <p>・物体に働く流れの速度方向に平均的な抗力（左図D/E）と自重の関係から、物体が飛来するか否かを判定し、飛来する場合には、風速場を表現できている空中浮遊状態からの浮上高さや飛散速度等を評価</p> <p>・抗力係数 $C_{D A}$</p> <ul style="list-style-type: none"> ・物体がランダム回転し、物体の各面に均等に力を受けるものとして、抗力係数は3方向の平均値を設定 																	
竜巻が物体に与える速度に関する設定	<ul style="list-style-type: none"> ・竜巻内の物体の場所依存性（風速場における竜巻風速の不均一性）を考慮し、<u>風速場における物体の中から、最大の飛散速度や飛散距離を設定</u> ・実際に竜巻が遠方から近づく場合には、最大風速より低い風速に曝された時点で飛散する可能性があるが、物体を強制的に高速域に配置し、物体が瞬時に最大風速を受けるよう設定 	同左																	