

## 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（以下「Fスケール」という。）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 観測記録（過去に発生した竜巻による最大風速 $V_{B1}$ ）」及び「8.3 年超過確率評価（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。

#### 8.1.1 竜巻検討地域の設定

島根原子力発電所に対する竜巻検討地域について、島根原子力発電所が立地する地域と気象条件の類似性の観点で検討を行い、第8.1-1図に示すとおり北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸の海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲を竜巻検討地域に設定する（面積約33,395km<sup>2</sup>）。

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、設定する。

また、一般的に大気現象は時空間スケールの階層構造が見られ、ある大気現象はスケールの小さな現象を内包しているため、大きな竜巻の発生要因となる環境場の形成のし易さ（大きな竜巻の発生に対する大気場の必要条件）を把握する観点から、「突風関連指数に基づく地域特性の確認」により竜巻の発生スケールに近いメソスケールの気象場が有する地域性と齟齬がないことについても確認する。

(1) 総観場の分析に基づく地域特性の確認

竜巻を発生させる親雲の発生要因<sup>(1)</sup>を考慮して7種の総観場に再編し、発生分布の特徴を分析する。第8.1-2図の総観場ごとの竜巻発生地点の分布、第8.1-3図の竜巻検討地域（日本海沿岸）と太平洋側地域の総観場の特徴の比較に示すとおり、日本海側と太平洋側では竜巻の発生要因となる総観場が大きく異なっていることから、地域特性に大きな違いがある。

(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」<sup>(1)</sup>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、島根原子力発電所は、竜巻集中地域⑦（島根県の一部）に立地している。

気象庁「竜巻等の突風データベース」<sup>(2)</sup>によると、1961年1月から2012年6月の51.5年間に発生が確認された竜巻の個数は竜巻集中地域⑦で8個であり、この期間に竜巻集中地域⑦で観測されている最も強い竜巻はF2となる。

竜巻発生の影響評価の観点からすると、データ数は多い方がよいため、竜巻検討地域としては北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸を設定する。竜巻検討地域での竜巻個数は192個であり、観測された最も強い竜巻はF2である。

なお、竜巻検討地域と竜巻集中地域⑦の竜巻発生確率は、 $1.1 \times 10^{-4}$ 、 $1.3 \times 10^{-4}$ （個/年/km<sup>2</sup>）であり、単位面積あたりの竜巻発生数は竜巻集中地域⑦の方がやや大きくなるものの、両者はおおむね同程度である。竜巻集中地域⑦における竜巻の観測記録は8事例とかなり少なく、影響評価を行うにはデータ数が乏しい。

竜巻の地域特性を確認するため、第8.1-5図に示すとおり、竜巻集中地域⑦と竜巻検討地域、竜巻集中地域⑦に隣接する竜巻集中地域⑥（鳥取県の一部）における総観場の比較を行い、いずれの地域でも”季節

風（冬）”と”温帯低気圧”あるいは”季節風（夏）”が竜巻発生的主要因素となっており，竜巻の発生要因には共通性がある。

(3) 突風関連指数に基づく地域特性の確認<sup>(3)</sup>~<sup>(39)</sup>

総観場での検討に加え，大きな被害をもたらす強い竜巻の発生要因となる環境場の形成のし易さについての地域特性を確認するため，気象庁や米国気象局においても竜巻探知・予測に活用されており，竜巻の発生のし易さを数値的に示すことができる突風関連指数を用いて地域特性の確認を行った。

大きな被害をもたらす竜巻の親雲の多くはスーパーセルであり，スーパーセルが発生しやすい環境場として，大気下層の鉛直シア（異なる高度間での風向・風速差）と，強い上昇気流を発生させるきっかけとしての不安定な大気場が必要であることから，突風関連指数としては，竜巻の発生実態を解明する研究において国内外で広く利用され，大気の不安定度を表す指標である「CAPE」，鉛直シアに伴って発生する水平渦度が親雲に取り込まれる度合いを表す指標である「SR e H」を採用し，両者の指標が同時に高くなる頻度について，地域的な特徴を確認する分析を実施する。（第 8.1-6 図）

これらの分析より，スーパーセルに伴って発生する大規模な竜巻形成につながる環境場の発生頻度分布の観点からも，日本海側と太平洋側で大きな地域特性の違いがある。

## 8.2 観測記録（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 F2 であり, F スケールと風速の関係より風速は 50~69m/s であることから,  $V_{B1}$  は F2 の風速範囲の上限値 69m/s とする。

第 8.2-1 表に竜巻検討地域における竜巻の観測記録を示す。

### 8.3 年超過確率評価（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、気象庁「竜巻等の突風データベース」<sup>(2)</sup>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<sup>(40)</sup> 及び Garson et al.<sup>(41)</sup>）に基づき算定する。具体的な算定方法は、東京工芸大学委託成果<sup>(42)</sup>を参考とし、ハザード曲線を算定する。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海側及び陸側それぞれ5 kmの範囲内で算定する。加えて、竜巻検討地域において過去に発生した竜巻は、海上発生 of F スケール不明の竜巻が半数以上を占める偏った発生となっていることや竜巻発生確認数にばらつきがあることを踏まえ、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1 km 範囲ごとに短冊状に細分化した場合のハザード曲線も算定する。

#### 8.3.1 海岸線から陸側及び海側それぞれ5 km 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。

#### 8.3.2 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」<sup>(2)</sup>をもとに、1961年1月～2012年6月までの51.5年間の統計量をFスケール別に算出する。なお、観測体制の変遷による観測データ品質のばらつきを踏まえ、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F0及びFスケール不明竜巻に対しては、観測体制が強化された2007年以降の年間発生数や標準偏差を用いる。

b. 被害が比較的軽微なF1竜巻に対しては、観測体制が整備された1991年以降の年間発生数や標準偏差を用いる。

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 F2 及び F3 竜巻に対しては、観測記録が整備された 1961 年以降の全期間の年間発生数や標準偏差を用いる。

また、F スケール不明の竜巻については、以下の取扱いを行う。

陸上で発生した竜巻（以下「陸上竜巻」という。）及び海上で発生して陸上へ移動した竜巻については、被害があつて初めてその F スケールが推定されるため、陸上での F スケール不明の竜巻は、被害が少ない F0 竜巻とみなす。

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 5 km の範囲における海上竜巻の発生特性が、海岸線から内陸 5 km 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。（第 8.3-1 表）

### 8.3.3 年発生数の確率密度分布の設定

設定に当たっては、竜巻は気象事象の中でも極めて稀に発生する事象であり、発生数の変動（標準偏差）が大きい分布であることから、東京工芸大学委託成果<sup>(42)</sup>にならってポリヤ分布により設定する。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。

### 8.3.4 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もとに、確率密度分布についてはガイド及びガイドが参考としている東京工芸大学委託成果<sup>(42)</sup>を参照し、対数正規分布に従うものとする。（第 8.3-1 図～第 8.3-6 図）

なお、擬似的な竜巻の作成において被害幅又は被害長さの情報がない竜

巻には、観測された竜巻と同程度の竜巻を想定し、それに相当する被害幅又は被害長さを与えている。その際は、被害幅又は被害長さが大きいほうから優先的に用いることにより、保守的に評価を行う。

また、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)

### 8.3.5 竜巻影響エリアの設定

竜巻影響エリアは島根原子力発電所2号炉の評価対象施設を包絡する円形のエリア(直径450m, 面積約 $1.6 \times 10^5 \text{m}^2$ )として設定する。(第8.3-7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。

### 8.3.6 ハザードの算定

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る。竜巻の年発生数の確率密度分布としてポリヤ分布の適合性が高い。ポリヤ分布は式(1)<sup>(40)</sup>で示される。

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

ここで、

N: 竜巻の年発生数

v: 竜巻の年平均発生数

T: 年数

$\beta$ は分布パラメータであり式(2)で示される。

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

ここで、

$\sigma$  : 竜巻の年発生数の標準偏差

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

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

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

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

ここで、 $E[DA(V_0)]$  は、 $DA(V_0)$  の期待値を意味する。

本評価では、以下のようにして  $DA(V_0)$  の期待値を算出し、式(4)により  $R(V_0)$  を推定して、式(3)により  $P_{V_0, T}(D)$  を求める。風速を  $V$ 、被害幅  $w$ 、被害長さ  $l$ 、移動方向  $\alpha$  及び構造物の寸法を  $A, B$  とし、 $f(V, w, l)$  等の同時確率密度関数を用いると、 $DA(V_0)$  の期待値は式(5)で示される。<sup>(41)</sup>

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

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

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

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



ここで,

$V_{\min}$  : 被害幅  $w$  内の最小竜巻風速

$V_0$  : 被害が発生する最小風速

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

本評価ではリスク評価対象構造物を円形構造物（竜巻影響エリア）で設定しているため、 $H(\alpha)$ 、 $G(\alpha)$ とも竜巻影響エリアの直径 450m で一定（竜巻の移動方向に依存しない）となる。円の直径を  $D_0$  とした場合の計算式は式(8)で示される。

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

$V_{\min}$  は、竜巻被害が発生する最小風速であり、Garson は gale intensity velocity と呼んでいる（Gale とは非常に強い風の意）。米国の気象局（National Weather Service）では、34～47 ノット（17.5～24.2m/s）とされている。日本の気象庁では、気象通報にも用いられている風力階級において、風力 8 が疾強風（gale, 17.2～20.7m/s）、風力 9 は大強風（strong gale, 20.8～24.4m/s）と分類されており、風力 9 では「屋根瓦が飛ぶ。人家に被害が出始める。」とされている。

以上より、これらの風速を包括するよう、 $V_{\min}=25\text{m/s}$  とする。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 5 km 範囲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、60.8m/s となる。

### 8.3.7 1 km 範囲に細分化した評価

海側の竜巻発生位置は不明な場合が多く、セグメント長さ（短冊内の竜巻の移動長さ）が精度良く求められないため、海側 0-1km のセグメント長さの評価に陸側 0-1km 短冊の値などを代用する方法を用いて評価する。陸側 0-1km の長さで代用した場合、ハザードの風速は 61.4m/s と ± 5 km ケースとほぼ同じとなる。海側 0-1km のハザードは、不確実性が最も大きな短冊であり、そのセグメント長さの取り方によって結果が 62~64m/s の範囲となることから、基準値設定に影響しない。

### 8.3.8 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 ( $V_{B2}$ )

海岸線から陸側及び海側それぞれ 5 km 全域（竜巻検討地域）を対象に算定したハザード曲線，1 km 範囲ごとに短冊状に細分化して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第 8.3-8 図に示すとおりそれぞれ 61m/s, 62m/s となった。

また，使用した竜巻の統計データの不確実性については検討を実施しており，F スケール不明の海上竜巻の発生数は，陸上竜巻の F スケール別発生比率で按分して取り扱っているが，竜巻検討地域を「北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸」にすることに伴う竜巻ハザード曲線算出のためのデータの不確実性を踏まえ，参照する年超過確率を  $10^{-5}$  から一桁下げた年超過確率  $10^{-6}$  における風速とすると，陸側及び海側 5 km 全域での評価，1 km 範囲ごとに細分化した評価ともに 78m/s となる。

以上より，竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速  $V_{B2}$  は 78m/s とする。

#### 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  $V_{B1}=69\text{m/s}$  及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速  $V_{B2}=78\text{m/s}$  のうち、大きい風速である  $78\text{m/s}$  を島根原子力発電所における基準竜巻の最大風速  $V_B$  とする。

## 8.5 設計竜巻の最大風速の設定

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

### 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、(1)地形起伏による影響、(2)地表面粗度による影響、について既往の研究において示されており、その知見を踏まえ、島根原子力発電所周辺の地形効果による竜巻の増幅可能性について検討する。

#### (1) 地形起伏による影響<sup>(43)~(45)</sup>

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。

#### (2) 地表面粗度による影響<sup>(46)~(60)</sup>

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

### 8.5.2 島根原子力発電所周辺の地形

島根原子力発電所周辺の地形を第8.5-1図、島根原子力発電所東西方向の鉛直断面での地形起伏を第8.5-2図、島根原子力発電所周辺の地表面粗度を第8.5-3図に示す。島根原子力発電所が立地する敷地は、北側を輪谷湾に面し、他の三方を山で囲まれている。

### 8.5.3 竜巻の移動方向の分析

島根原子力発電所の周辺地域を対象に竜巻の移動方向に関する分析を行う。なお、分析の対象とする地域は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」<sup>(1)</sup>に示されている竜巻集中地域を参考に、竜巻集中地域⑥（鳥取県の一部）及び⑦（島根県の一部）とする。

第8.5-4図に竜巻集中地域⑥及び⑦で発生した竜巻の移動方向、第8.5-5図に竜巻集中地域⑥及び⑦において過去に発生した竜巻の移動方向の頻度を分析した結果を示す。竜巻の移動方向の分析の結果、島根原子力発電所周辺で発生する竜巻は、その大部分が海上又は沿岸部で発生しており、その移動方向は東に向かう頻度が高いことが確認できる。また、島根原子力発電所が立地する竜巻集中地域⑦では、発電所北方の海上から南（陸側）へ向かう頻度が高いことが確認できる。

### 8.5.4 竜巻風速の増幅に関する検討

#### (1) 地形起伏による竜巻増幅

島根原子力発電所周辺で発生する竜巻は、発電所北方又は西方の海上あるいは沿岸部で発生し、竜巻が発電所の北方で発生し南方向（陸側）へ移動する場合には、地形が平坦な海側から発電所敷地に進入することとなり、発電所敷地自体も平坦であるため竜巻が増幅することはないと考えられる。また、発電所西方で発生する竜巻は、上り斜面・下り斜面の影響をほぼ同程度受け発電所敷地に進入する可能性が高く発電所敷地はほぼ平坦であるため竜巻が増幅することはないと考えられる。万が一発電所敷地外の南側（例えば鹿島町の平地）で竜巻が発生し、その竜巻が海側に向かって移動し、発電所敷地内に進入した場合、竜巻は山を越える必要がある。この場合の地形効果による増幅は、山の上り勾配と下り勾配で相殺される。

#### (2) 地表面粗度による竜巻増幅

島根原子力発電所周辺では、竜巻の移動経路となり得る発電所西方に

着目すると森林などに相当する粗度区分Ⅲの領域が2 km以上にわたり存在していることから、粗度による減衰効果が期待できる。発電所北方又は西方の海上あるいは沿岸から南又は東方向へ向かう竜巻が極めて多く、発電所北方の海上で発生した竜巻が南方向へ移動する場合には、地表面粗度の小さい海上から粗度の大きな陸上に上陸するため、粗度により減衰するものと考えられる。

#### 8.5.5 設計竜巻の最大風速 $V_D$

以上のことから、島根原子力発電所では、地形効果による竜巻の増幅を考慮しない。一方、将来的な気候変動による竜巻発生の不確実性を踏まえ、 $V_B$ の値がF3の風速範囲（70～92m/s）にあることから設計竜巻の最大風速  $V_D$ はF3の風速範囲の上限値92m/sとする。

## 8.6 設計竜巻の特性値の設定

設計竜巻の特性値については、第 8.6-1 表のとおり設定する。また、飛来物の運動モデルについてはフジタモデル<sup>(61)</sup>を適用する。

### 8.6.1 設計竜巻の移動速度 ( $V_T$ )

設計竜巻の移動速度 ( $V_T$ ) は、風速場モデルに依存しない日本の竜巻観測記録（気象庁「竜巻等の突風データベース」<sup>(2)</sup>）に基づいた竜巻移動速度（平均値）と最大風速との関係<sup>(42)</sup>を参照して設定した以下の算定式を用いて  $V_D$  から  $V_T$  を算定する。

$$V_T = 0.15 \cdot V_D \quad (9)$$

### 8.6.2 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、米国 N R C の基準類<sup>(62)</sup>を参考として、風速場モデルに依存しない以下の算定式を用いて算定する。

$$V_{Rm} = V_D - V_T \quad (10)$$

### 8.6.3 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、風速場モデルに依存しない以下の値を用いる。

$$R_m = 30 \text{ (m)} \quad (11)$$

### 8.6.4 設計竜巻の最大気圧低下量 ( $\Delta P_{max}$ )・最大気圧低下率 ( $(dp/dt)_{max}$ )

設計竜巻の最大気圧低下量 ( $\Delta P_{max}$ ) は、ガイドに基づき、米国 N R C の基準類<sup>(62)</sup>を参考に設定されてい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。

$$\Delta P_{max} = \rho \cdot V_{Rm}^2 \quad \rho : \text{空気密度 (kg/m}^3\text{)} \quad (12)$$

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 N R C の基準類<sup>(62)</sup>を参考に設定されてい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。

$$(dp/dt)_{\max} = (V_T/R_m) \cdot \Delta P_{\max} \quad (13)$$



## 8.7 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) Bluestein, H. B. (2013):Severe Convective Storms and Tornadoes. Springer, 456 pp.
- (4) Brady, R. H. , and E. J. Szoke(1989):A case study of nonmesocyclone tornado development in northeast Colorado:similarities to waterspout formation. Mon. Wea. Rev. , 843-856.
- (5) Browning, K. A. (1964):Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. J. Atmos. Sci. , 21, 634-639.
- (6) Bunkers, M. J. , B. A. Klimowski, J. W. Zeitler, R. L. Thompson, and M. L. Weisman(2000):Predicting supercell motion using a new hodograph technique. Wea. Forecasting, 15, 61-79.
- (7) Burgess, D. W. , M. A. Magsig, J. Wurman, D. C. Dowell, and Y. Richardson(2002):Radar observations of the 3 May 1999 Oklahoma City tornado. Wea. Forecasting, 17, 456-471.
- (8) Chuda, T. , and H. Niino(2005):Climatology of environmental parameters for mesoscale convections in Japan. J. Meteor. Soc. Japan, 83, 391-408.
- (9) Davies, J. M. (1993):Hourly helicity, instability, and EHI in forecasting supercell tornadoes. 17th Conf. on Severe Local Storms, St. Louis, MO, Amer. Meteor. Soc. , 107-111.
- (10) Davies-Jones, R. , D. Burgess, and M. Foster(1990):Test of

- helicity as a tornado forecast parameter. , 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB., Canada, Amer. Meteor. Soc., 588-592.
- (11) Doswell III, C. A., and J. S. Evans(2003):Proximity sounding analysis for derechos and supercells: an assessment of similarities and differences. *Atmos. Res.*, 67-68, 117-133.
- (12) Dotzek, N., M. V. Kurgansky, J. Grieser, B. Feuerstein, and P. Nevir(2005):Observational evidence for exponential tornado intensity distributions over specific kinetic energy. *Geophys. Res. Letters*, 32, L24813, doi:10.1029/2005GL024583.
- (13) Fujita, T. T. (1981):Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. *J. Atmos. Sci.*, 38, 1511-1534.
- (14) Klemp, J. B., and R. B. Wilhelmson(1978):Simulations of right-and left-moving storms produced through storm splitting. *J. Atmos. Sci.*, 35, 1097-1110.
- (15) Lee, B. D., and R. B. Wilhelmson(1997):The numerical simulation of nonsupercell tornadogenesis. Part II: Evolution of a family of tornadoes along a weak outflow boundary. *J. Atmos. Sci.*, 54, 2387-2415.
- (16) Mashiko, W., H. Niino, and T. Kato(2009):Numerical simulation of tornadogenesis in an outer-rainband minisupercell of typhoon Shanshan on 17 September 2006. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 4238-4260.
- (17) Moncrieff, M. W., and M. J. Miller(1976): The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 373-394.
- (18) Noda, A. T., and H. Niino(2010):A numerical investigation of a supercell tornado: Genesis and vorticity budget. *J. Meteor. Soc. Japan*, 88, 135-159.
- (19) Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi,

- H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira(2007):The JRA-25 Reanalysis. J. Meteor. Soc. Japan, 85, 369-432.
- (20) Orlandi, I. (1975):A rational subdivision of scales for atmospheric processes. Bull. Amer. Meteor. Soc., 56, 527-530.
- (21) Rasmussen, E. N. (2003):Refined supercell and tornado forecast parameters. Wea. Forecasting, 18, 530-535.
- (22) Rasmussen, E. N., and D. O. Blanchard(1998):A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. Wea. Forecasting, 13, 1148-1164.
- (23) 櫻井溪太, 川村隆一(2008):日本における竜巻発生環境場と予測可能性. 天気, 55, 7-22.
- (24) Roberts, R. D., and J. W. Wilson(1995):The genesis of three nonsupercell tornadoes observed with dual-Doppler radar. Mon. Wea. Rev., 123, 3408-3436.
- (25) Rotunno, R., and J. Klemp(1985):On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms. J. Atmos. Sci., 42, 271-292.
- (26) Suzuki, O, H. Niino, H. Ohno, and H. Nirasawa(2000):Tornado-producing mini supercells associated with Typhoon 9019. Mon. Wea. Rev., 128, 1868-1882.
- (27) Trapp, R. J. (2013):Mesoscale-Convective Processes in the Atmosphere. Cambridge, 346 pp.
- (28) Wakimoto, R. M., and J. W. Wilson(1989):Non-supercell tornadoes. Mon. Wea. Rev., 117, 1113-1140.
- (29) 飯塚義浩, 加治屋秋実(2011):数値予報資料から求めた竜巻に関連する大気環境指数の統計的検証, 天気, 58, 19-30.
- (30) 大野久雄(2001):雷雨とメソ気象, 東京堂出版, 309 pp.

- (31) 加藤輝之(2008): 竜巻発生環境場に関する研究 (I) - 竜巻をもたらす積乱雲の発生環境に関する統計的研究 -, 平成 19 年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進, 6-12.
- (32) 加藤輝之(2008): スーパーセルに伴う竜巻の発生機構の研究 (III) - 2006 年の佐呂間竜巻に対する解析 -, 平成 19 年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進, 39-44.
- (33) 杉本聡一郎, 野原大輔, 平口博丸(2014): 国内既往最大規模の竜巻を対象とした発生頻度の地域性について, 第 11 回学術講演会要旨集, 日本保全学会, 395-402.
- (34) 杉本聡一郎, 野原大輔, 平口博丸(2014): 突風関連指数を用いた大きな竜巻の発生環境場の地域性に関する検討, 2014 年度春季大会講演予稿集, 日本気象学会, B464.
- (35) 杉本聡一郎, 野原大輔, 平口博丸(2016): 突風関連指数の長期再解析にもとづくスーパーセル型竜巻発生地域気候特性, 電力中央研究所報告, 015007, 22pp.
- (36) 瀧下洋一(2011): 竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報について - 突風に関する防災気象情報の改善 -, 測候時報, 78, 57-93.
- (37) 新野 宏(2007): 竜巻, 天気, 54, 933-936.
- (38) 橋本篤, 平口博丸, 豊田康嗣, 中屋耕(2011): 温暖化に伴う日本の気候変化予測 (その 1) - 気象予測・解析システム NuWFAS の長期気候予測への適用性評価 -, 電力中央研究所報告, N10044, 22pp.
- (39) 橋本篤, 平口博丸, 田村英寿, 服部康男, 松梨史郎(2013): 領域気候モデルを用いた過去 53 年間の気象・気候再現, 電力中央研究所報告, N13004, 18 pp.
- (40) Wen. Y. K and Chu. S. L. (1973): Tornado Risks and Design Wind Speed. Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.99, No. ST12, 2409-2421.
- (41) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C. A. (1975): Tornado

- Design Winds Based on Risk. Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 101, No. ST9, 1883-1897.
- (42) 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.
- (43) Forbes GS(1998):Topographic influences on tornadoes in Pennsylvania. 19th Conf. on Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc., Minneapolis, MN, 269-272.
- (44) Karstens CD(2012):Observations and laboratory simulations of tornadoes in complex topographical regions. Graduate theses and dissertations of Iowa State Univ., paper12778.
- (45) Lewellen DC(2012):Effects of topography on tornado dynamics: A simulation study. 26th Conf. on Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc., Nashville, TN, 4B.1.
- (46) Church, C. R., J. T. Snow(1993):Laboratory models of tornadoes. The tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards, Geophysical Monograph 79, Amer. Geophys. Union, 277-295.
- (47) Hattori Y et al.(2010):Wind-tunnel experiment on logarithmic layer turbulence under the influence of overlying detached eddies. Bound.-Layer Meteor., 134, 269-283.
- (48) James R. Holton(1992):An Introduction to Dynamic Meteorology, 511pp.
- (49) 近藤(2000):地表面に近い大気の科学, 336pp
- (50) 塩谷(1992):強風の性質—構造物の耐風設計に関連して, 開発, 201pp
- (51) 竹内・近藤(1981):大気科学講座 1 地表に近い大気, 東大出版, 226pp
- (52) 日本建築学会(2004):建築物荷重指針・同解説 丸善, 651pp
- (53) Dessens, J., Jr.(1972):Influence of ground roughness on tornadoes : A Laboratory Simulation. J. Appl. Meteor., 11, 72-75.

- (54) Leslie F W(1977):Surface roughness effects on suction vortex formation : A Laboratory Simulation. J. Atmos. Sci., 34, 1022-1027.
- (55) Lewellen WS, Sheng YP(1979):Influence of surface conditions on tornado wind distributions. 11th Conf. on Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc., Boston, 375-381.
- (56) Lewellen DC, Gong B, Lewellen WS(2008):Effects of finescale debris on near-surface tornado dynamics. J. Atmos. Sci., 65, 3247-3262.
- (57) Natarajan D, Hangan H(2012):Large eddy simulations of translation and surface roughness effects on tornado-like vortices. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 104-106, 577-584.
- (58) Maruyama, T.(2011):Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 99, 249-256.
- (59) Lewellen, D. C., and W. S. Lewellen(2007):Near-surface intensification of tornado vortices. J. Atmos. Sci., 64, 2176-2194.
- (60) Rostek, W. F., and J. T. Snow(1985):Surface roughness effects on tornado like vortices. 14th Conf. on Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc., Indianapolis, IN, 252-255.
- (61) Fujita, T. T.(1978):Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications. SMRP Research Paper 165, Department of Geophysical Sciences, University of Chicago, 142pp.
- (62) U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION : REGULATORY GUIDE 1.76(2007):DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision 1.

第8.1-1表 藤田スケール

藤田スケール	風速[m/s]
F0	17-32
F1	33-49
F2	50-69
F3	70-92
F4	93-116
F5	117-142

第8.2-1表 竜巻検討地域における竜巻の観測記録 (F1より大きい竜巻) ※1

発生日時	発生場所		Fスケール※2	総観場
	都道府県	市町村		
1962年09月28日 14時20分	北海道 宗谷支庁	東利尻町	(F2)	寒冷前線
1971年10月17日 05時00分	北海道 留萌支庁	羽幌町	(F2)	寒気の移流
1974年10月03日 19時05分	北海道 檜山支庁	奥尻郡奥尻町	(F1～F2)	温暖前線
1974年10月20日 15時00分	北海道 檜山支庁	檜山郡上ノ国町	(F1～F2)	寒冷前線
1975年05月31日 18時10分	島根県	簸川郡大社町	(F2)	日本海低気圧 局地性じょう乱 寒気の移流
1975年09月08日 01時30分	北海道 檜山支庁	奥尻郡奥尻町	(F1～F2)	日本海低気圧 暖気の移流
1979年11月02日 01時58分	北海道 渡島支庁	松前郡松前町	(F2)	日本海低気圧 温暖前線
1989年03月16日 19時20分	島根県	簸川郡大社町	(F2)	局地性じょう乱 寒気の移流
1990年04月06日 02時55分	石川県	羽咋郡富来町	F2	オホーツク海低 気圧 気圧の谷
1999年11月25日 15時40分	秋田県	八森町	(F1～F2)	日本海低気圧 寒冷前線

※1 気象庁「竜巻等の突風データベース」<sup>(2)</sup>より作成

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



第8.3-1表 竜巻発生数の解析結果

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

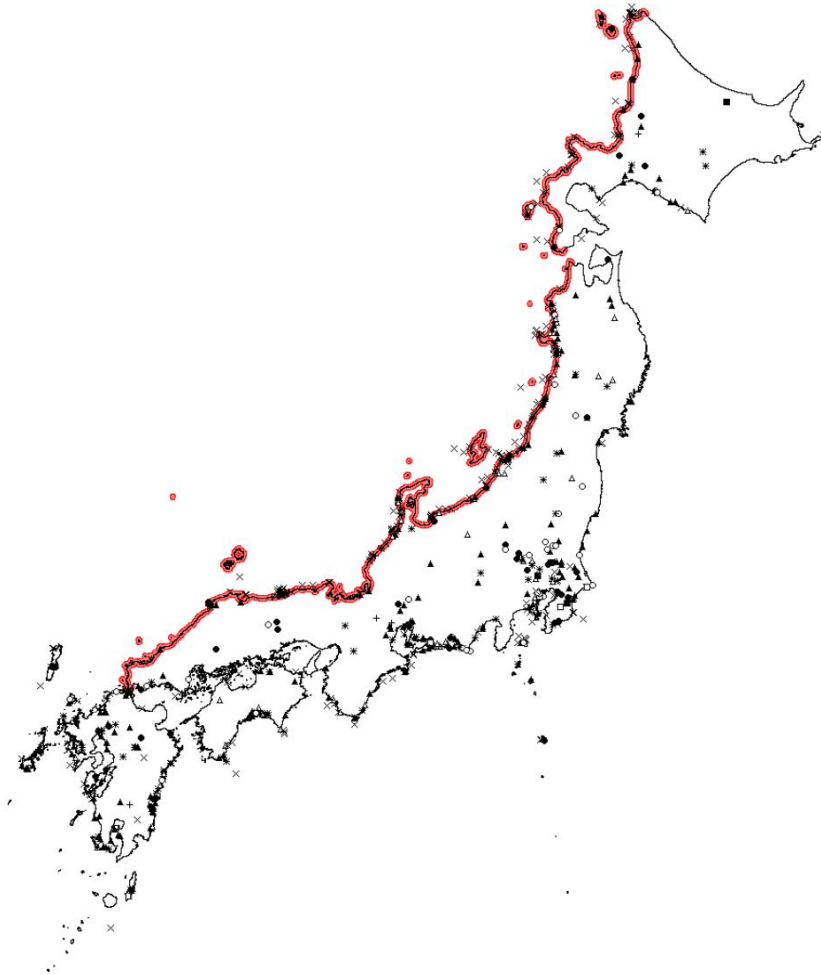
第8.3-2表 竜巻風速，被害幅，被害長さの相関係数（単位無し）

相関係数	風速	被害幅	被害長さ
風速	1.000	-0.050 <sup>*</sup>	0.312
被害幅	-0.050 <sup>*</sup>	1.000	0.462
被害長さ	0.312	0.462	1.000

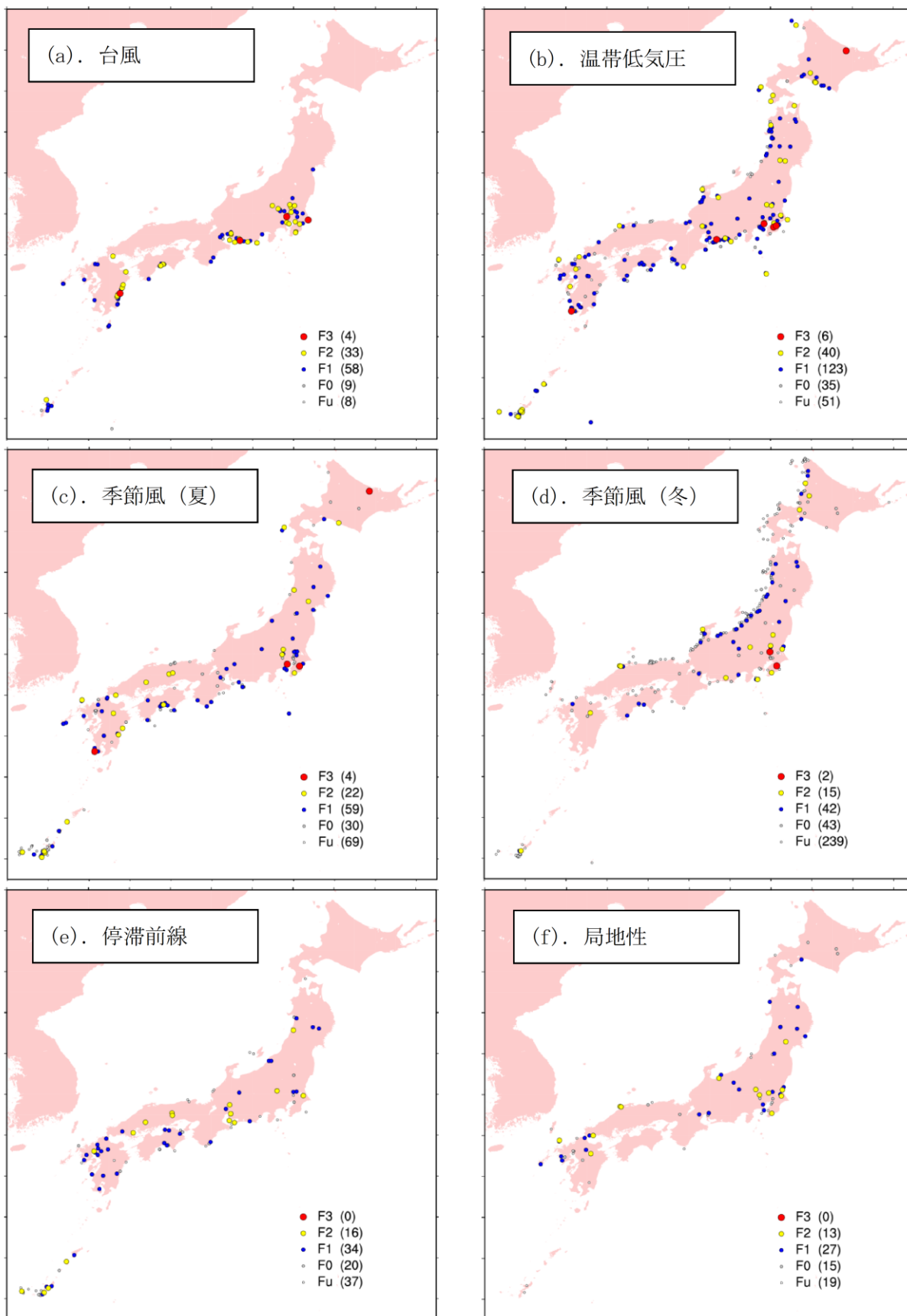
※風速と被害幅は無相関との知見が得られたため，ハザード算定の際には，相関係数0として計算

第8.6-1表 設計竜巻の特性値

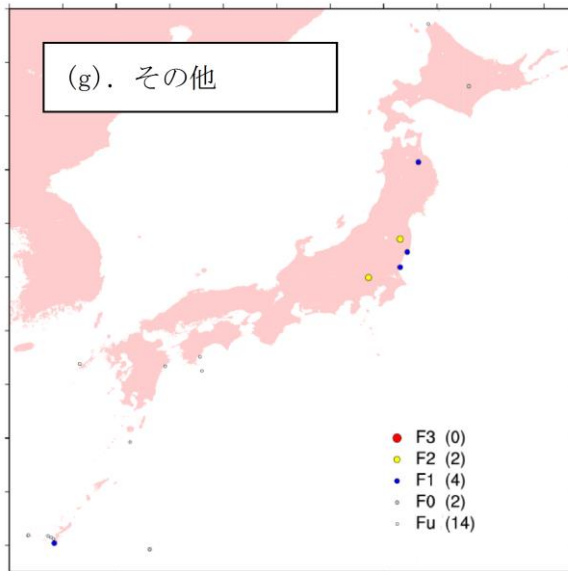
風速 $V_D$ (m/s)	移動速度 $V_T$ (m/s)	最大接線 風速 $V_{R_m}$ (m/s)	最大接線 風速半径 $R_m$ (m)	最大気圧 低下量 $\Delta P_{\max}$ (hPa)	最大気圧 低下率 $(dp/dt)_{\max}$ (hPa/s)
92	14	78	30	75	35



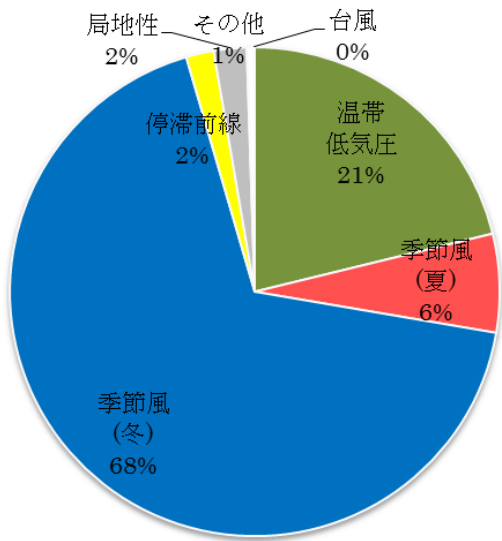
第8.1-1図 竜巻検討地域（赤線部）



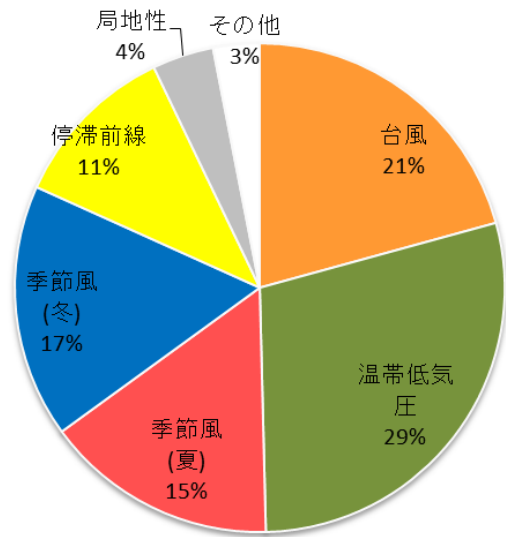
第8.1-2図(1) 総観場ごとの竜巻発生地点の分布 (1961年~2012年)  
 (気象庁「竜巻等の突風データベース」<sup>(2)</sup>のデータをもとに作成)



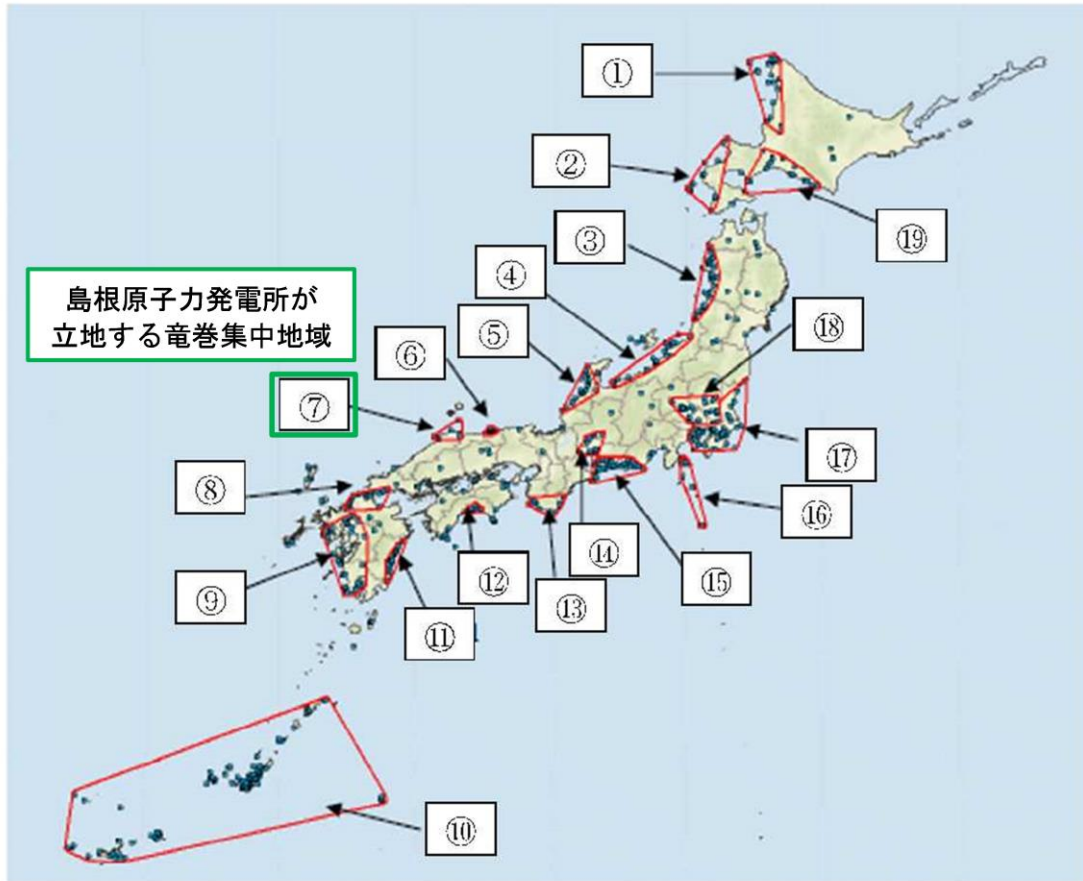
第8.1-2図(2) 総観場ごとの竜巻発生地点の分布 (1961年～2012年)  
 (気象庁「竜巻等の突風データベース」<sup>(2)</sup>のデータをもとに作成)



竜巻検討地域（日本海沿岸）

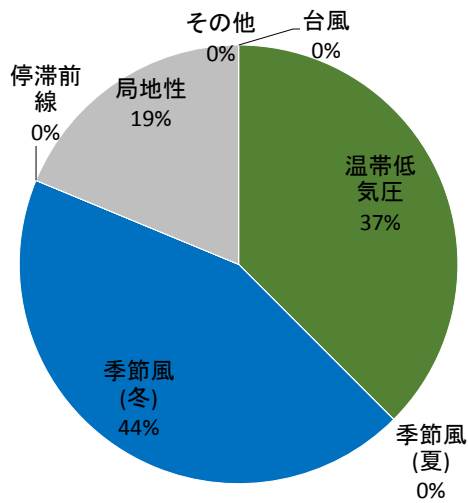


太平洋側地域

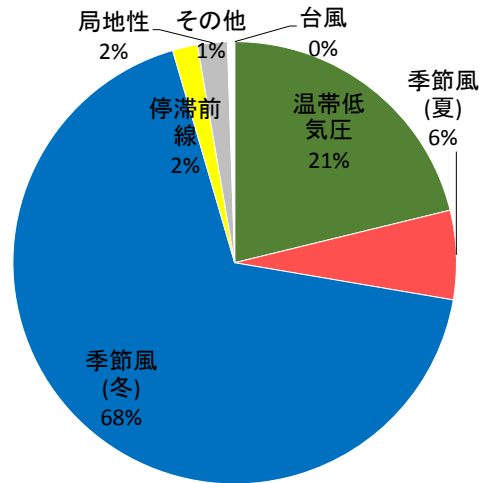


第8.1-4図 竜巻の発生する地点と竜巻が集中する19個の地域  
 (「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説」<sup>(1)</sup>より引用)

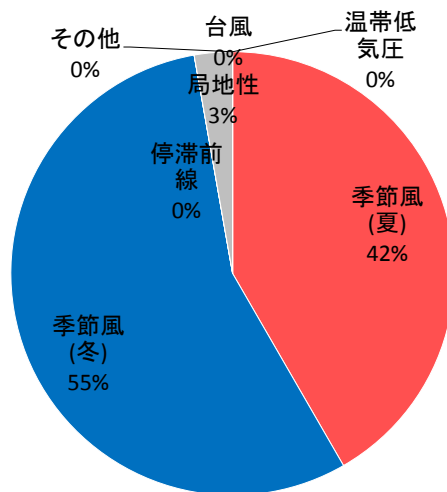




竜巻集中地域⑦（島根県の一部）

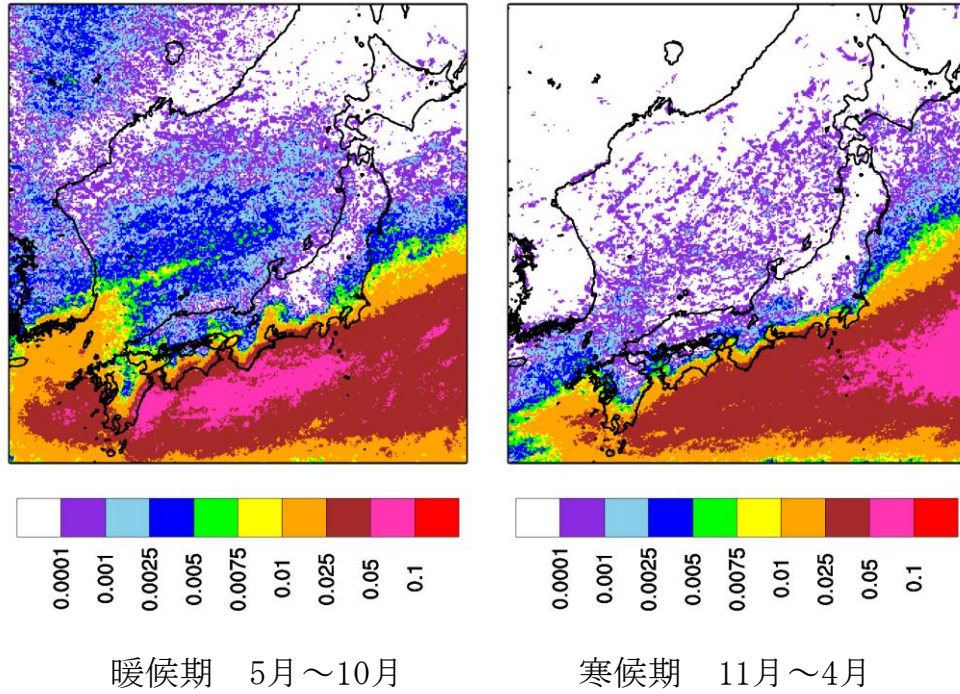


竜巻検討地域（日本海沿岸）

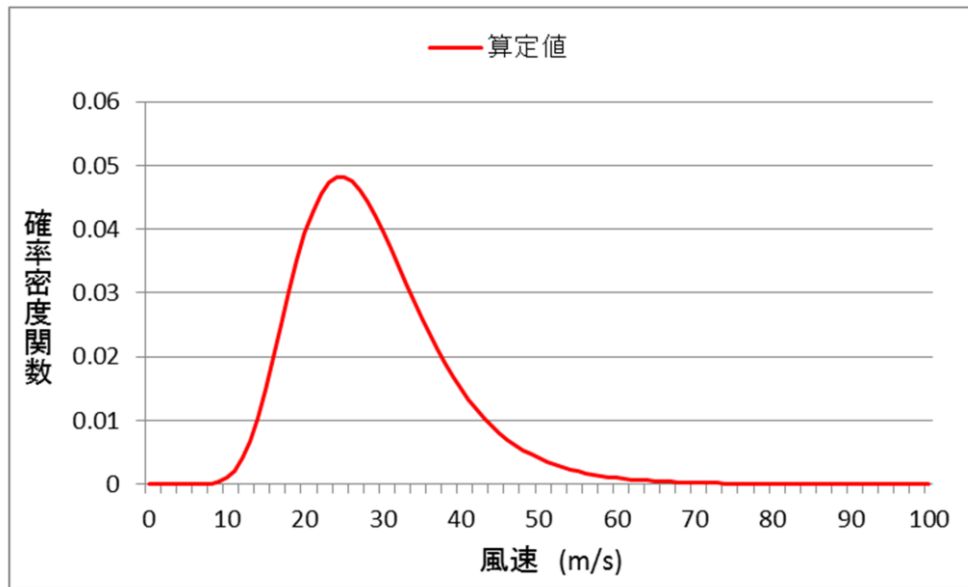


竜巻集中地域⑥（鳥取県の一部）

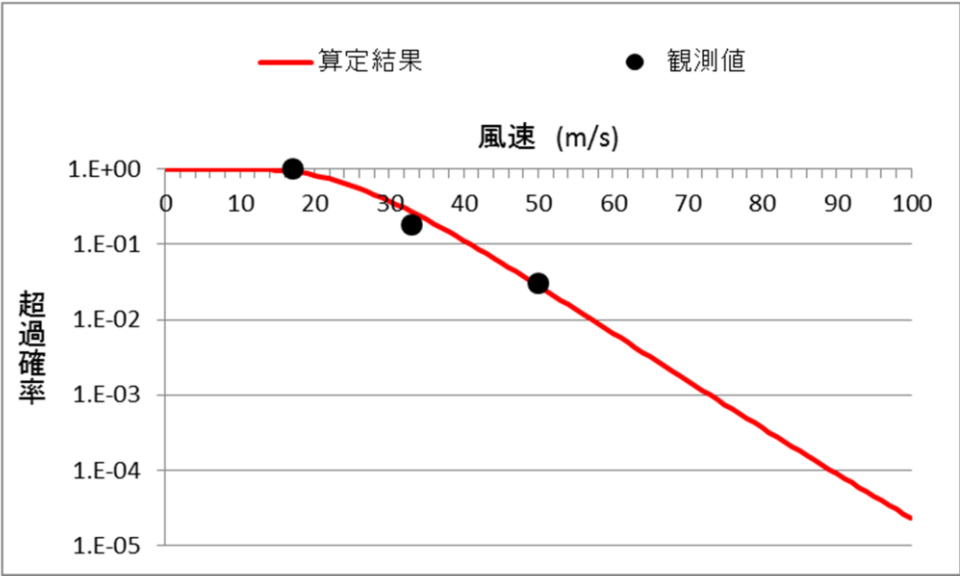
第8.1-5図 各地域の竜巻発生要因に関する総観場の特徴



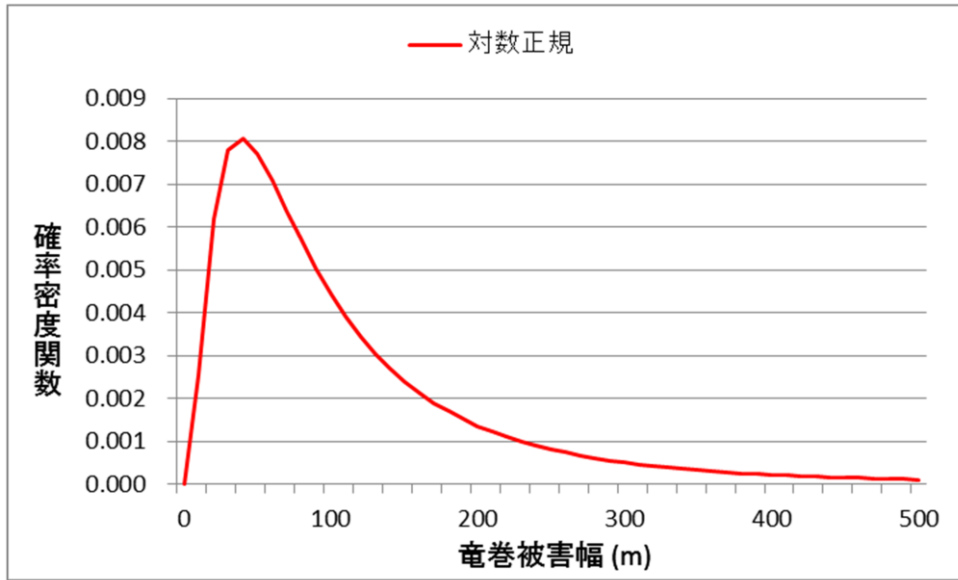
第8.1-6図 F3規模以上を対象としたSR e H, CAPE同時超過頻度分布  
(単位: %)



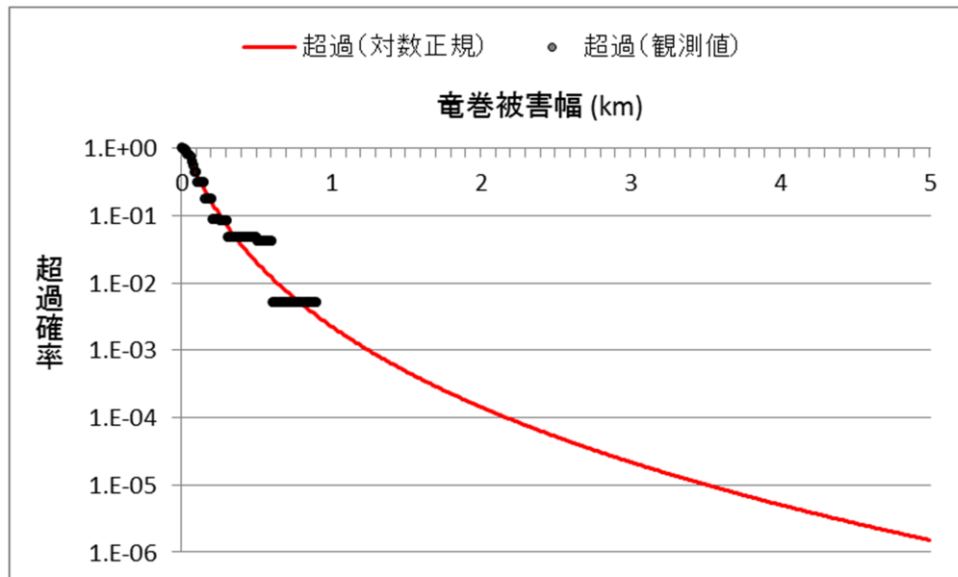
第8.3-1図 竜巻風速の確率密度分布



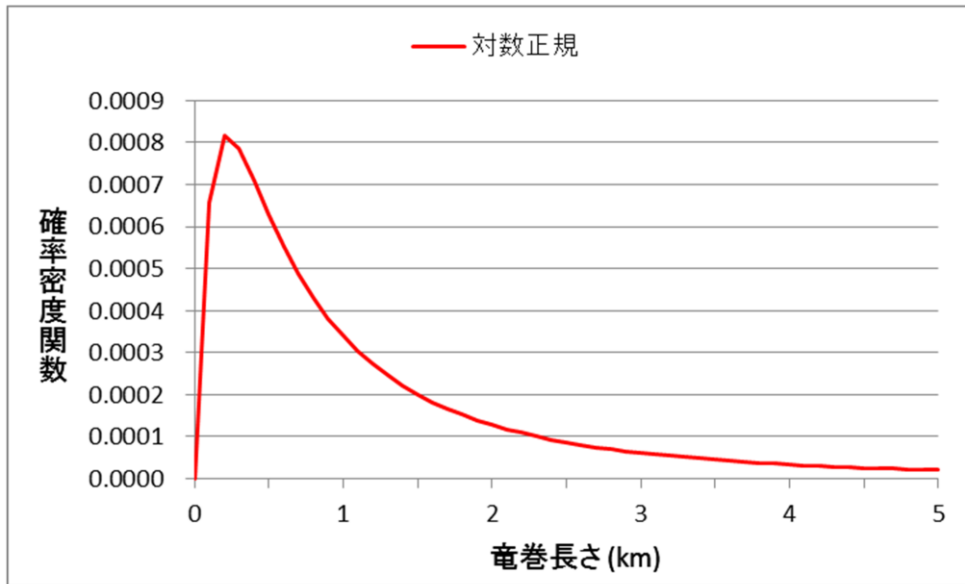
第8.3-2図 竜巻風速の超過確率分布



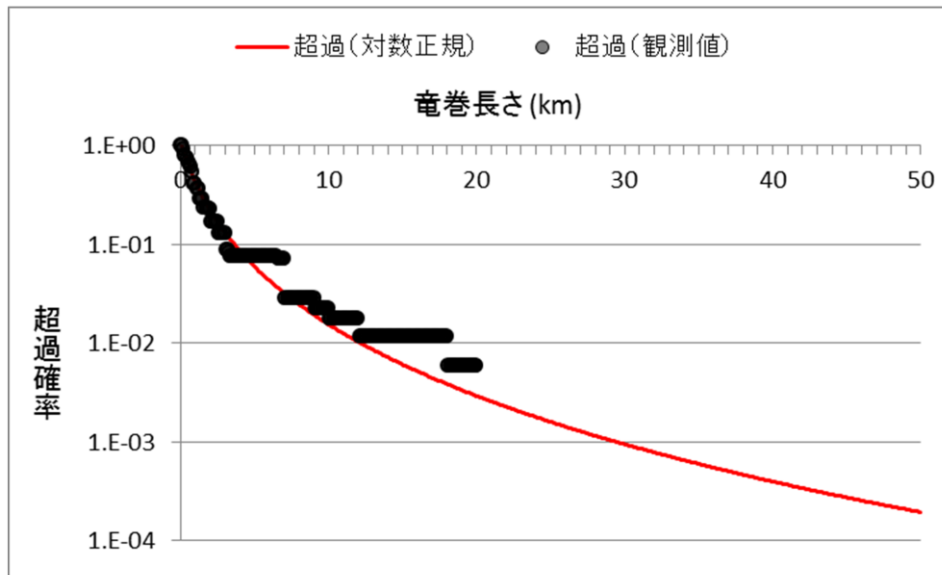
第8.3-3図 被害幅の確率密度分布



第8.3-4図 被害幅の超過確率分布

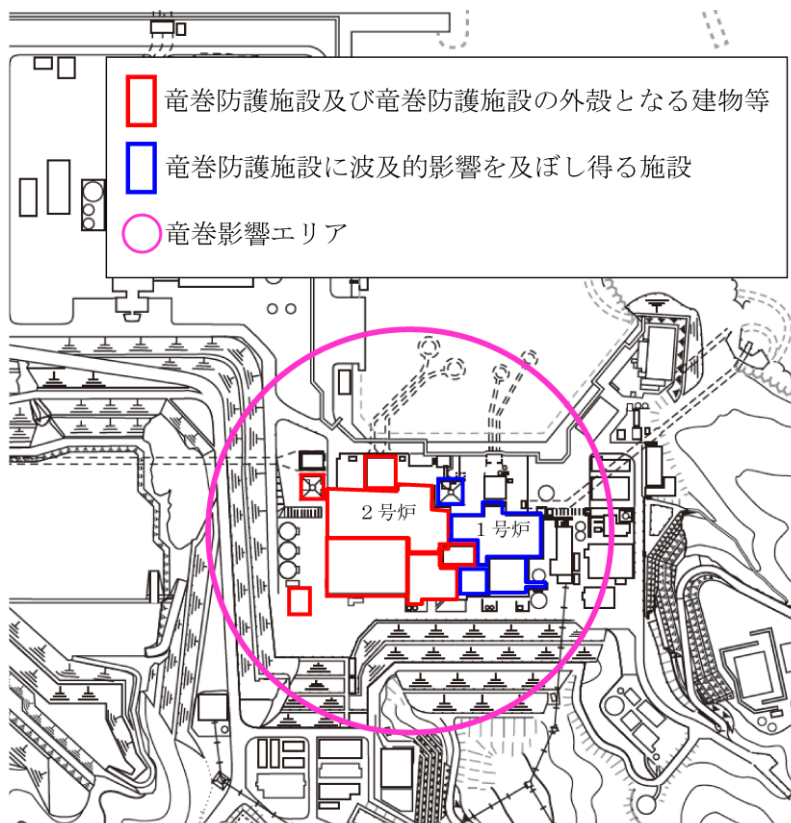


第8.3-5図 被害長さの確率密度分布

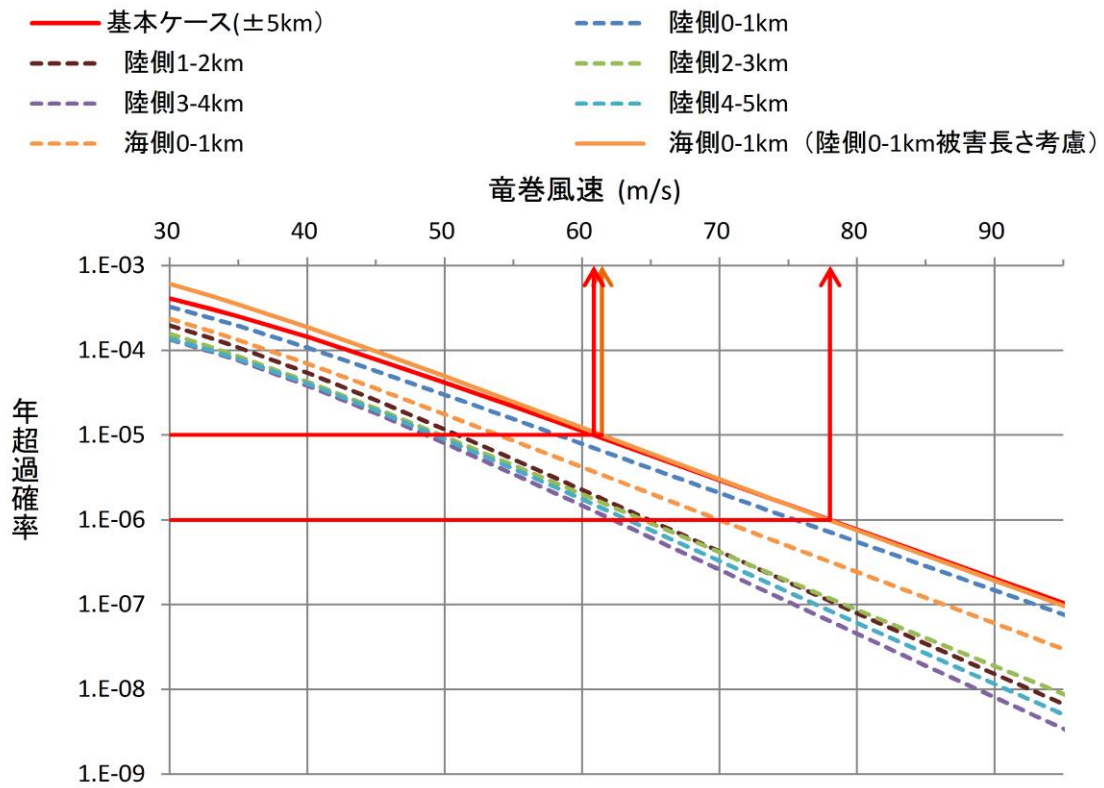


第8.3-6図 被害長さの超過確率分布

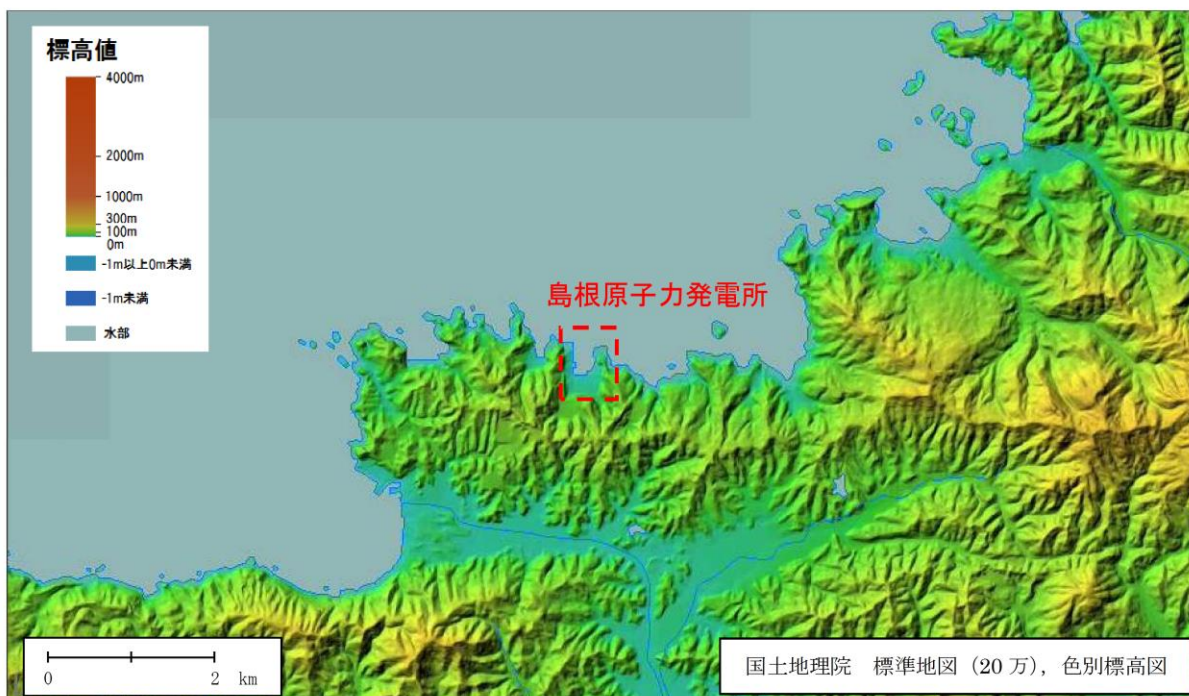




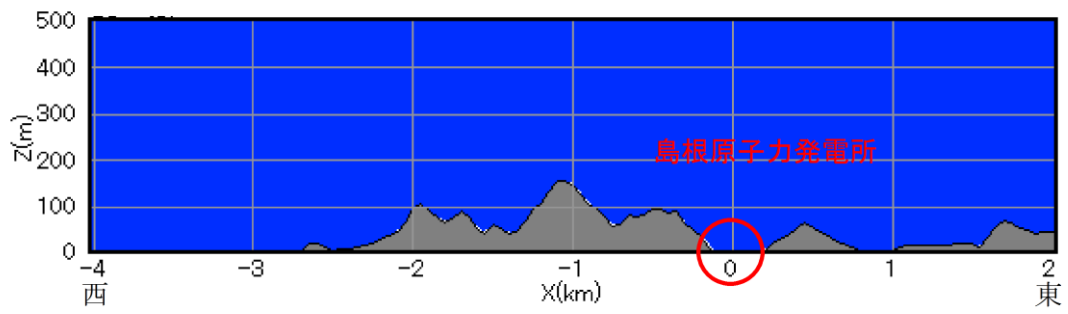
第8.3-7図 竜巻影響エリア



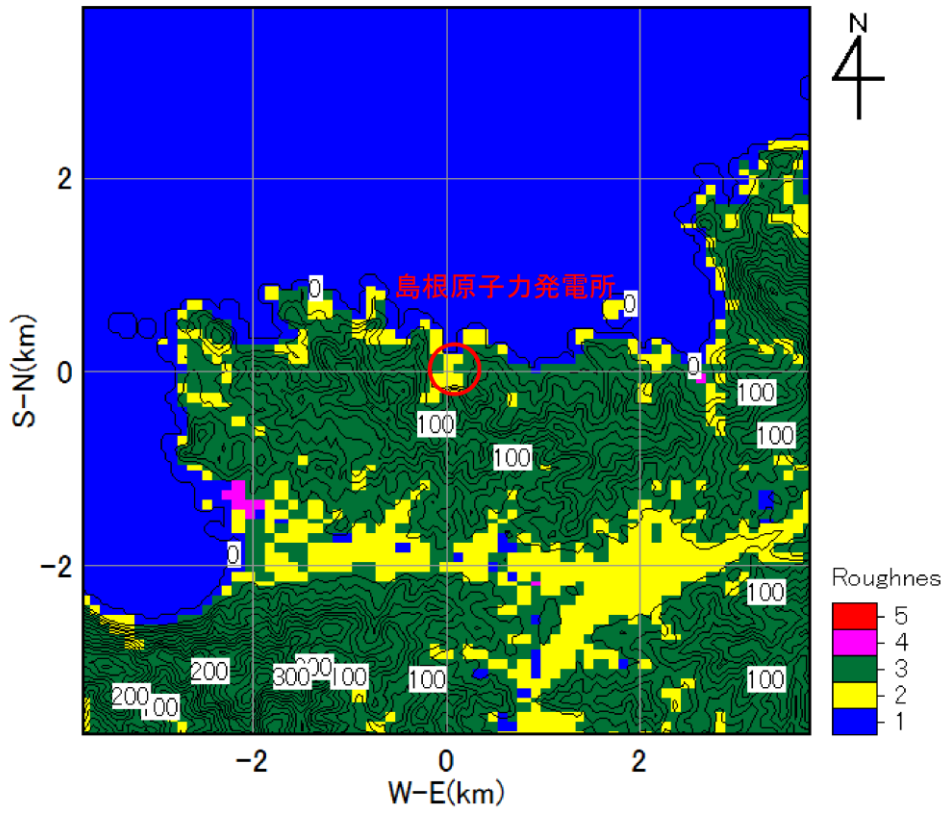
第8.3-8図 竜巻最大風速のハザード曲線



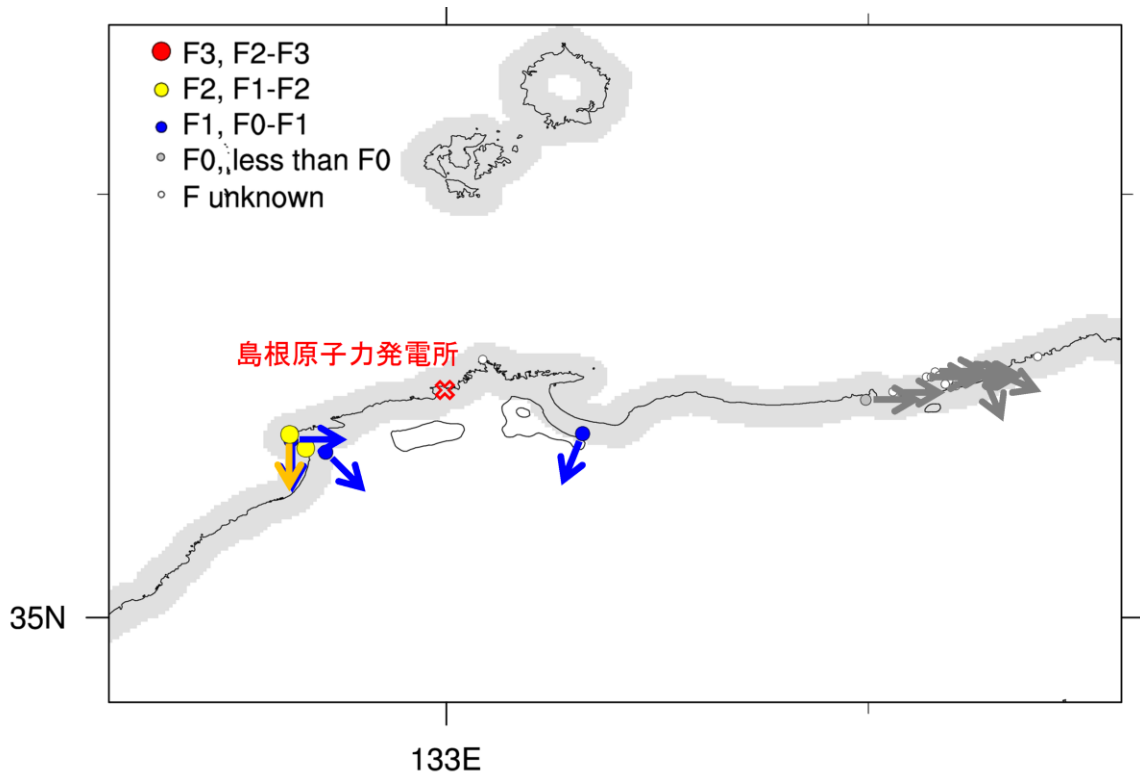
第8.5-1図 島根原子力発電所周辺の地形  
(国土地理院「電子国土Web」より作成)



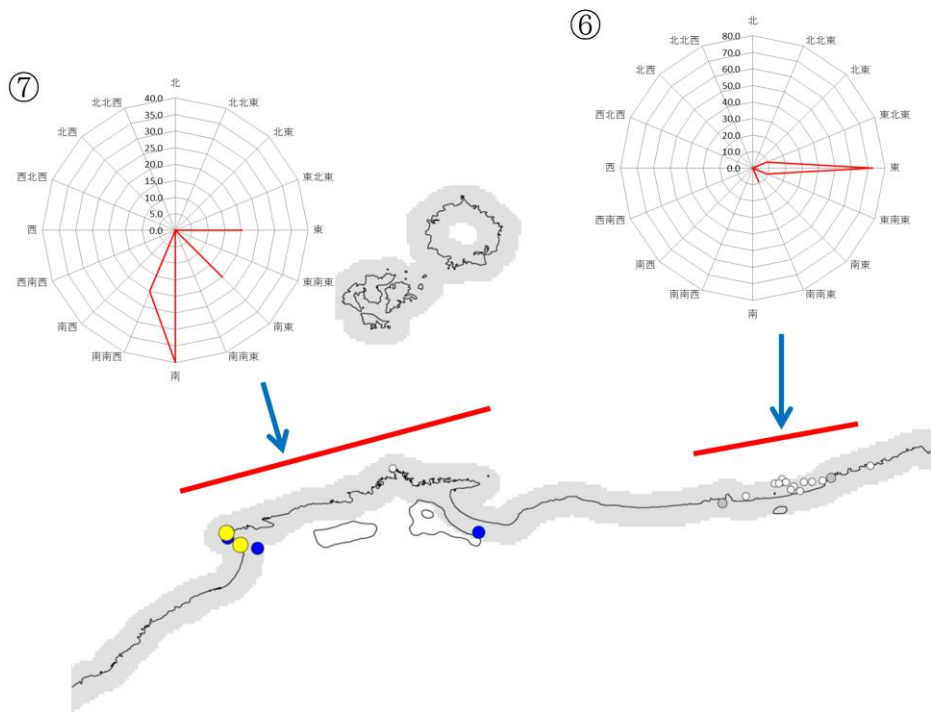
第8.5-2図 島根原子力発電所東西方向の鉛直断面での地形起伏



第8.5-3図 島根原子力発電所周辺の地表面粗度



第8.5-4図 竜巻集中地域⑥及び⑦における竜巻移動方向



第8.5-5図 竜巻集中地域⑥及び⑦における竜巻移動方向の頻度