

# 女川原子力発電所 2 号炉

## 竜巻影響評価について

平成 27 年 2 月 3 日

東北電力株式会社

第6条：外部からの衝撃による損傷の防止  
(竜巻)

目次

1. 概要	1
2. 評価の基本方針	2
3. 基準竜巻・設計竜巻の設定	10
4. 竜巻影響評価	
5. 竜巻随件事象に対する評価	
6. 飛来物対策	

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. 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	
3. 津波防護施設等の取扱いについて	
4. 地域特性の分析について	
5. 竜巻最大風速のハザード曲線の算定について	
6. 地形効果による竜巻の増幅の可能性について	
7. フジタモデルにおける最大気圧低下量・最大気圧低下率について	
8. 飛来物に係る調査結果について	
9. 飛散有無の判断方法について	
10. 竜巻防護施設の外殻となる施設の概要および建屋健全性に関する評価手法について	
11. 建物、構築物等の構造健全性の確認について	
12. 設備（系統・機器）の構造健全性の確認	

参考

原子力発電所の竜巻影響評価ガイドへの適合状況について

 : 今回説明範囲

## 1. 概要

原子力規制委員会の定める「実用発電用原子炉およびその附属施設の位置、構造および設備の基準に関する規則」（以下、「設置許可基準規則」という。）第六条において、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（地震および津波を除く。）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。

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、竜巻およびその随件事象等によって原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であることを評価するため、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（以下、「ガイド」という。）を参照し、竜巻影響評価を以下のとおり実施し、安全機能が維持されることを確認する。

図 1-1 に設計の基本フローを示す。

- ・ 設計竜巻および設計荷重（設計竜巻荷重およびその他の組み合わせ荷重）の設定
- ・ 飛来物調査に基づく設計飛来物を選定
- ・ 飛来物防止対策
- ・ 飛来物を含め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

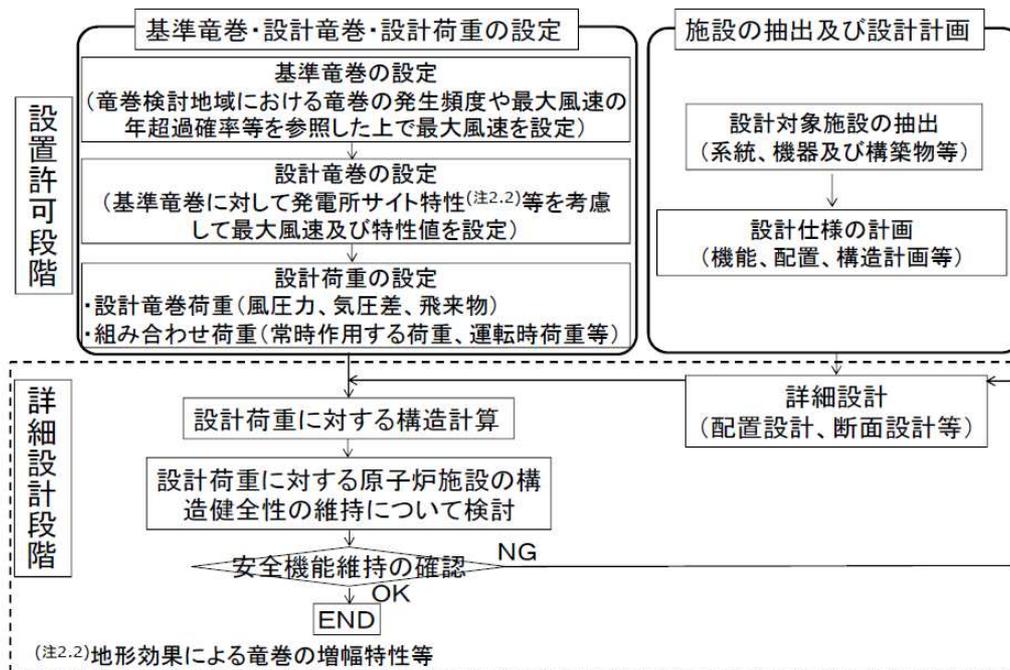


図 1-1 設計の基本フロー

## 2. 評価の基本方針

### 2.1 竜巻防護施設に関する規制要求の整理

#### 2.1.1 設置許可基準規則における安全施設および重要安全施設の解釈

設置許可基準規則第六条（表 2-1 参照）において、安全施設とは、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」（以下、「重要度分類指針」という。）におけるクラス 1, 2, 3 の設備を指している。また、設置許可基準規則第六条の解釈第 4 項において、想定される自然現象により作用する衝撃に対して機能維持すべき重要安全施設は、重要度分類指針の「V. 2. (2) 自然現象に対する設計上の考慮」を参照しており、クラス 1 およびクラス 2 のうち、特に自然現象の影響を受けやすく、かつ、代替手段によってその機能の維持が困難であるか、または、その修復が著しく困難な構築物、系統および機器と定義されている。

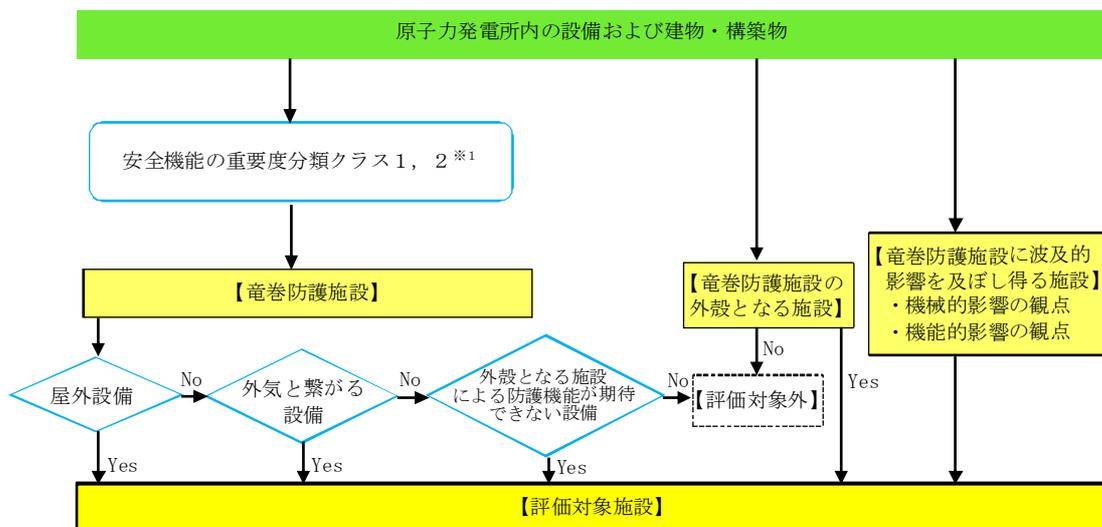
表 2-1 設置許可基準規則（抜粋）

設置許可基準規則	解釈
(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。	1 第 6 条は、設計基準において想定される自然現象（地震及び津波を除く。）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。）への措置を含む。
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。	4 第 2 項に規定する「重要安全施設」については、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」（平成 2 年 8 月 30 日原子力安全委員会決定）の「V. 2. (2) 自然現象に対する設計上の考慮」に示されるものとする。

### 2.2 竜巻影響評価の対象施設

評価対象施設の抽出フローを図 2-1 に示す。

本フローによって抽出した評価対象施設については、重要度分類指針のクラス 1 およびクラス 2 の構築物、系統および機器から抽出した構築物、系統および機器と比較して抜けがないことを確認している。



※1 安全重要度クラス3に属する施設については、竜巻およ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、安全機能を損なわないことから評価対象から除外する。

図 2-1 評価対象施設の抽出フロー

### 2.2.1 竜巻防護施設

竜巻防護施設としては、重要度分類指針において、安全重要度クラス1, 2に属する施設を竜巻防護施設とする。

なお、竜巻防護施設のうち、本評価における対象施設として屋外設備、外気と繋がっている設備および外殻となる施設による防護機能が期待できない設備を抽出した。

図 2-2 に竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出結果を示す。

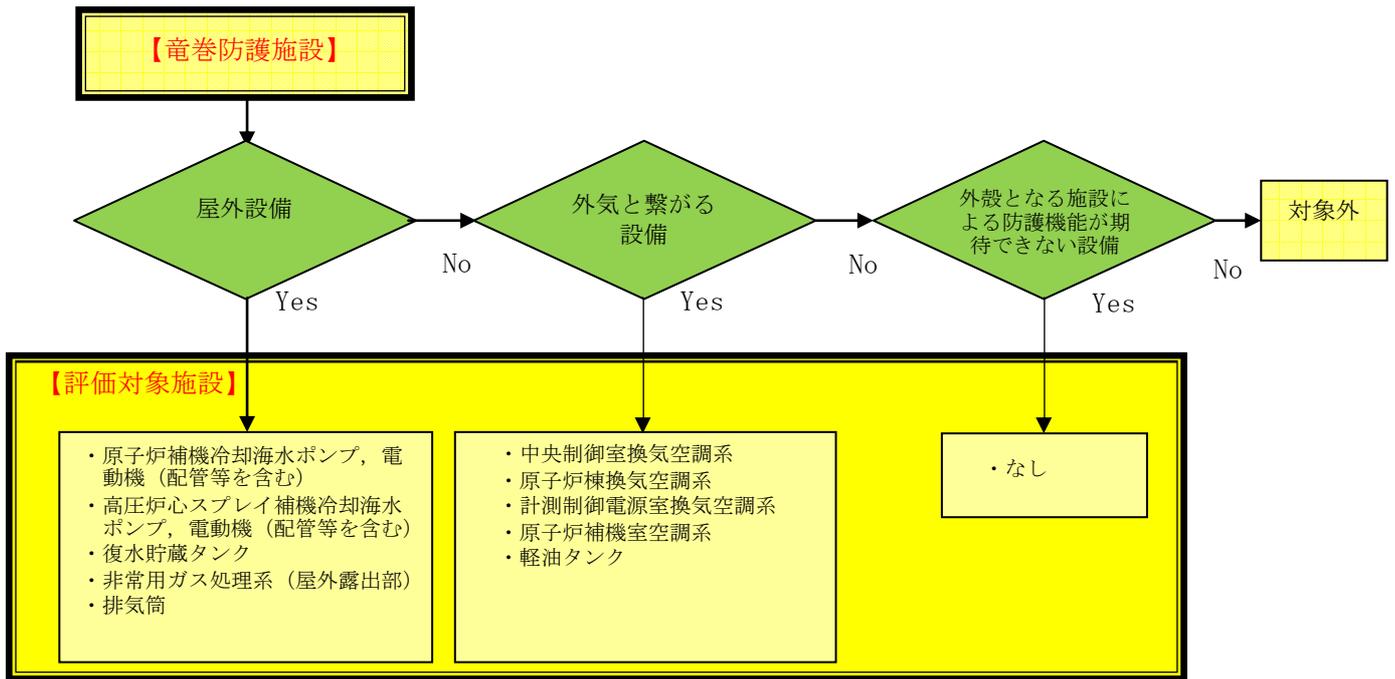


図 2-2 竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出結果

### 2.2.2 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影響を及ぼし，安全機能を喪失させる可能性が否定できない施設，または，その施設の特定の区画とする。

図 2-3 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と抽出結果を示す。

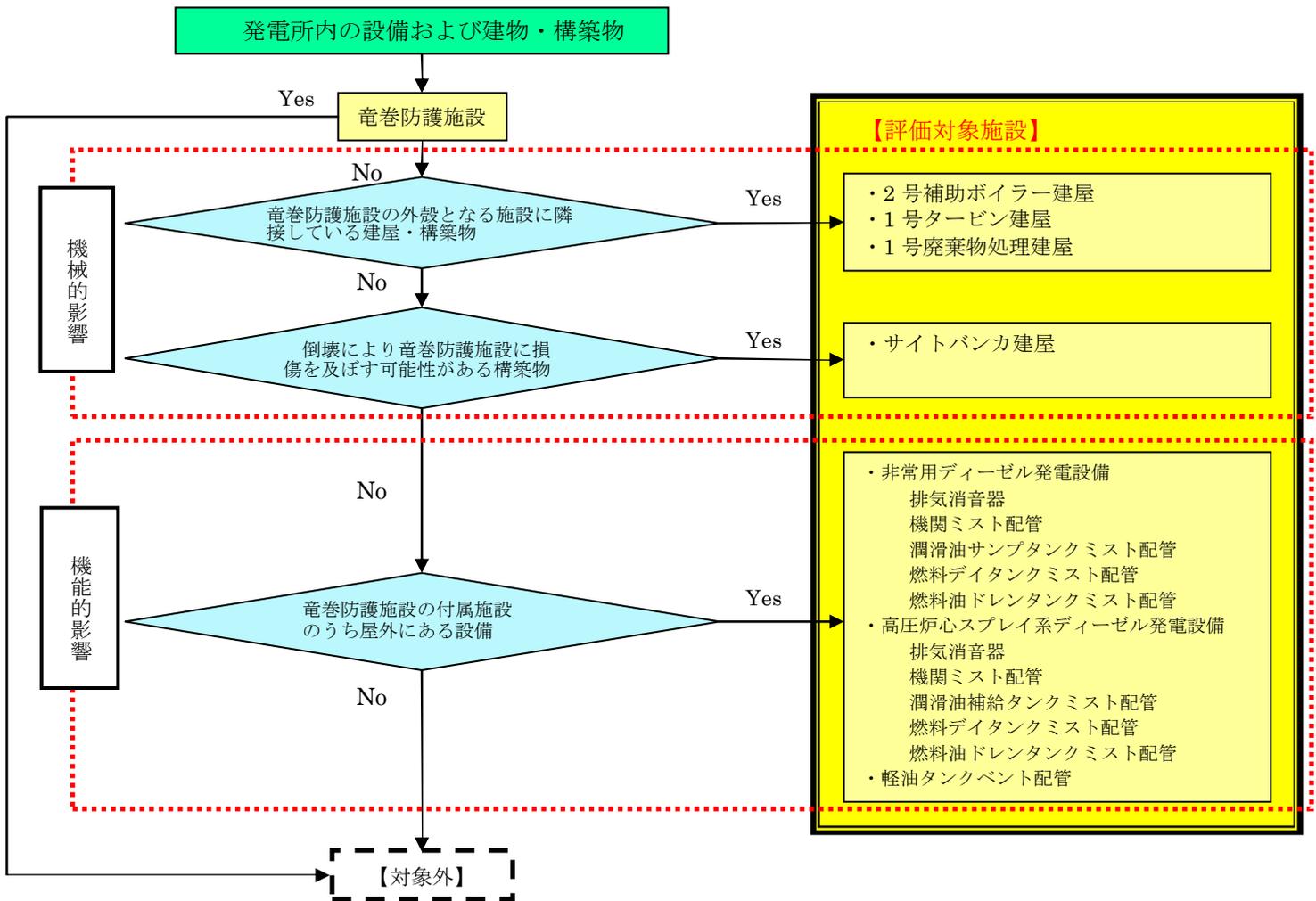


図 2-3 波及的影響を及ぼし得る施設の抽出フローと抽出結果

### 2.2.3 竜巻防護施設の外殻となる施設

竜巻防護施設の外殻となり得る施設（竜巻防護施設を内包する建屋・構築物等）を、表 2-2 に整理する。

なお、海水ポンプ室に設置する竜巻防護対策設備は、竜巻防護施設の外殻となる施設となるため、竜巻による影響評価を実施する。

表 2-2 竜巻防護施設の外殻となる施設の抽出

竜巻防護施設の外殻となる施設 (評価対象施設)	内包する竜巻防護施設
2号原子炉建屋	原子炉圧力容器 他
1, 2号制御建屋	中央制御室 他
2号タービン建屋	活性炭式希ガスホールドアップ装置 他
2号軽油タンク室 (仮称)	軽油タンク
2号海水ポンプ室竜巻防護対策設備	原子炉補機冷却海水ポンプ, 電動機 (配管等含む) 他

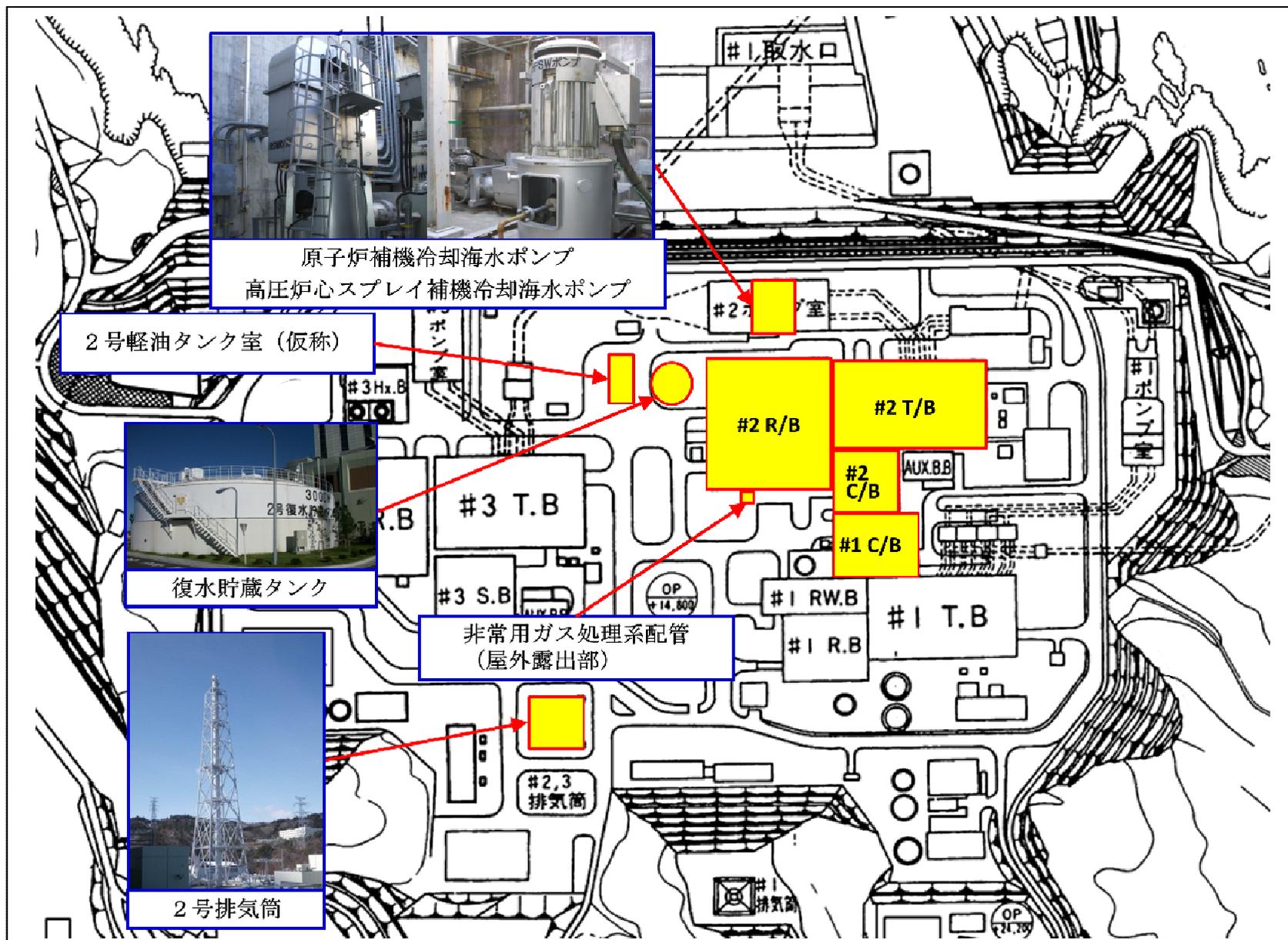


図 2-4 竜巻防護施設のうち評価対象施設の配置図

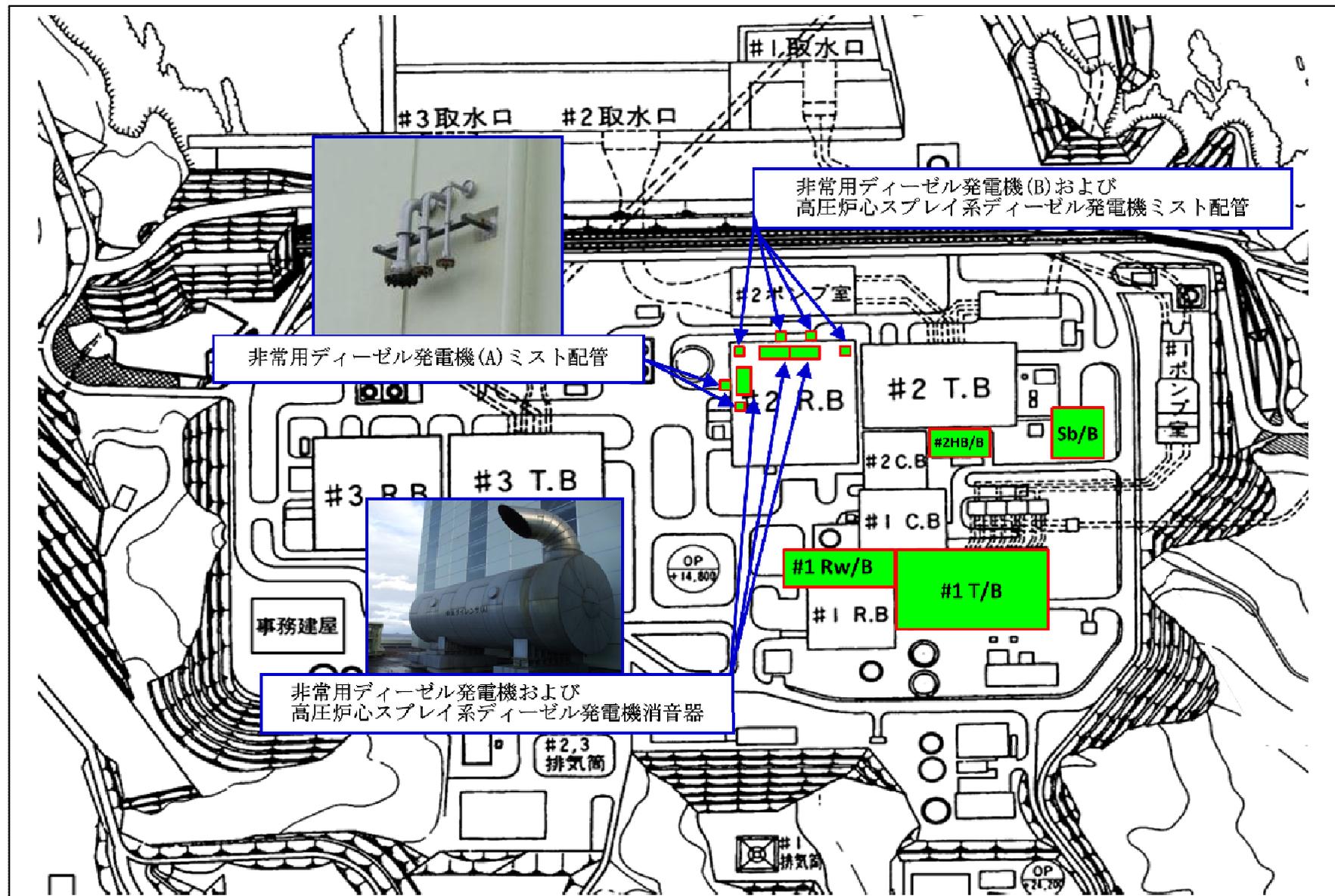


図 2-5 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設のうち評価対象施設の配置図

## 2.3 評価の基本的な考え方

### 2.3.1 評価の基本フロー

基準竜巻，設計竜巻およ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検討を行い，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を行う。

### 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

設計竜巻の最大風速による風圧力

##### b. 気圧差による圧力

設計竜巻における気圧低下によって生じる評価対象施設内外の気圧差による圧力

##### c. 飛来物の衝撃荷重

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

#### (2) 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重

設計竜巻荷重と組み合わせる荷重を以下に示す。

##### 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およ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考慮して判断する。

### 2.3.3 施設の安全性の確認方針

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

### 3. 基準竜巻・設計竜巻の設定

#### 3.1 基準竜巻，設計竜巻の設定フロー

基準竜巻，設計竜巻の設定フローを図 3-1 に示す。

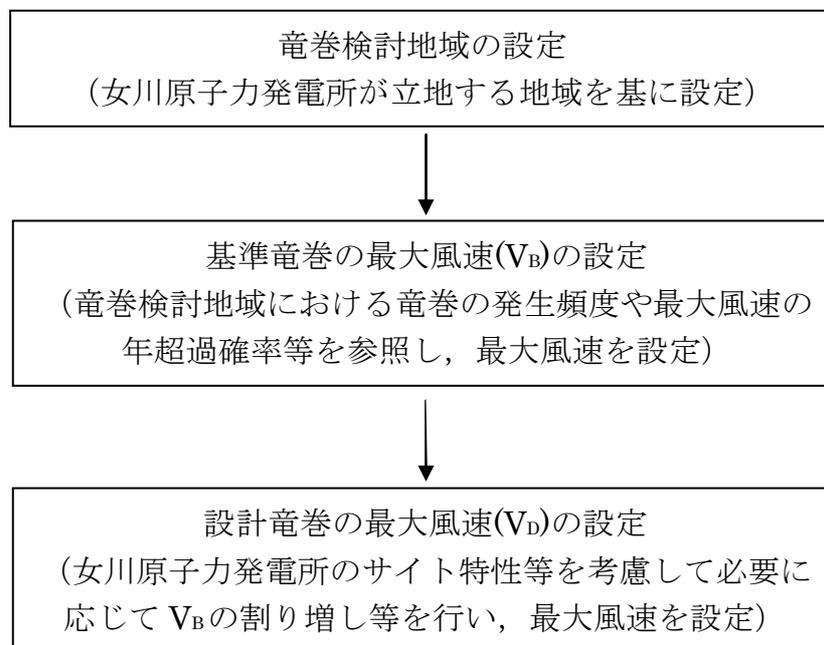


図 3-1 基準竜巻，設計竜巻の設定フロー

#### 3.2 竜巻検討地域の設定

竜巻検討地域はガイドに記載されている IAEA の基準<sup>※</sup>を参考とし，図 3-2 に示すとおり，女川原子力発電所を中心とする 10 万 km<sup>2</sup> (半径 180km) のうち，海岸線から陸側および海側 5km の範囲 (約 5,800km<sup>2</sup>) を竜巻検討地域として設定した。

この竜巻検討地域を設定する上では，ガイドに示された考え方を適用しているが，設定した地域の妥当性については次項 3.3 に示す。

※ IAEA Safety Standards, Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, Specific Safety Guide No. SSG-18, 2011

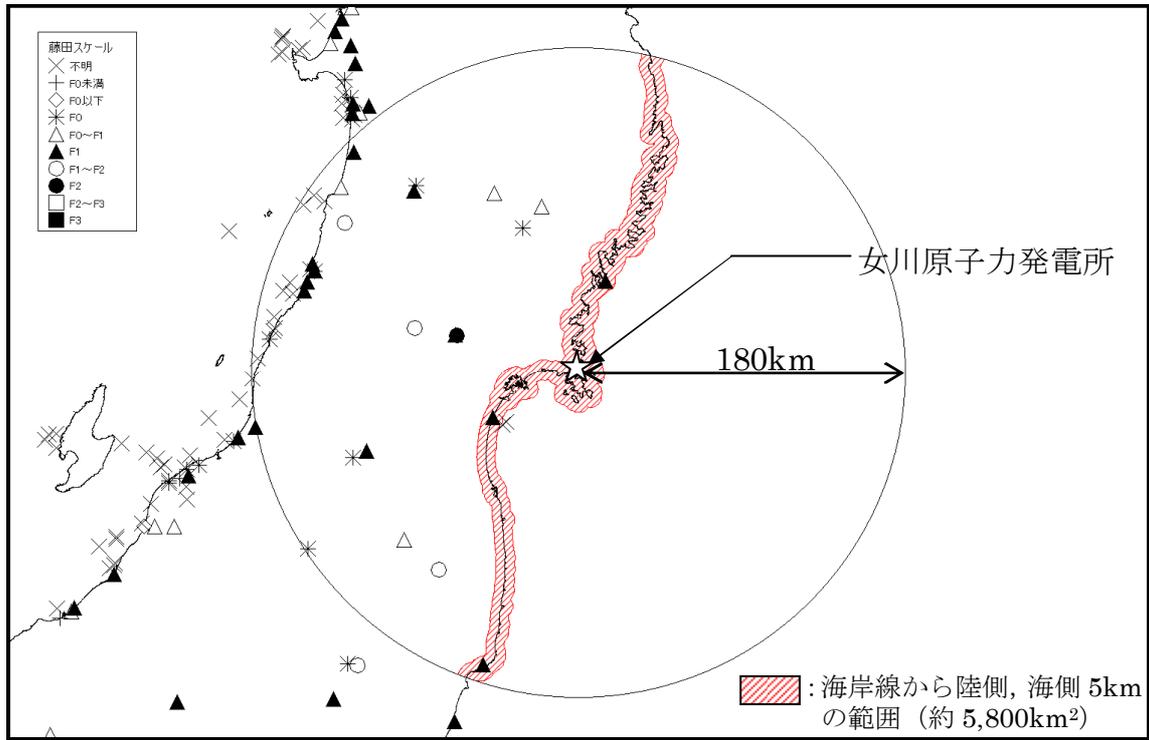


図 3-2 女川原子力発電所の竜巻検討地域

### 3.3 竜巻検討地域の妥当性確認

竜巻検討地域の妥当性については、以下の観点から確認を実施した。

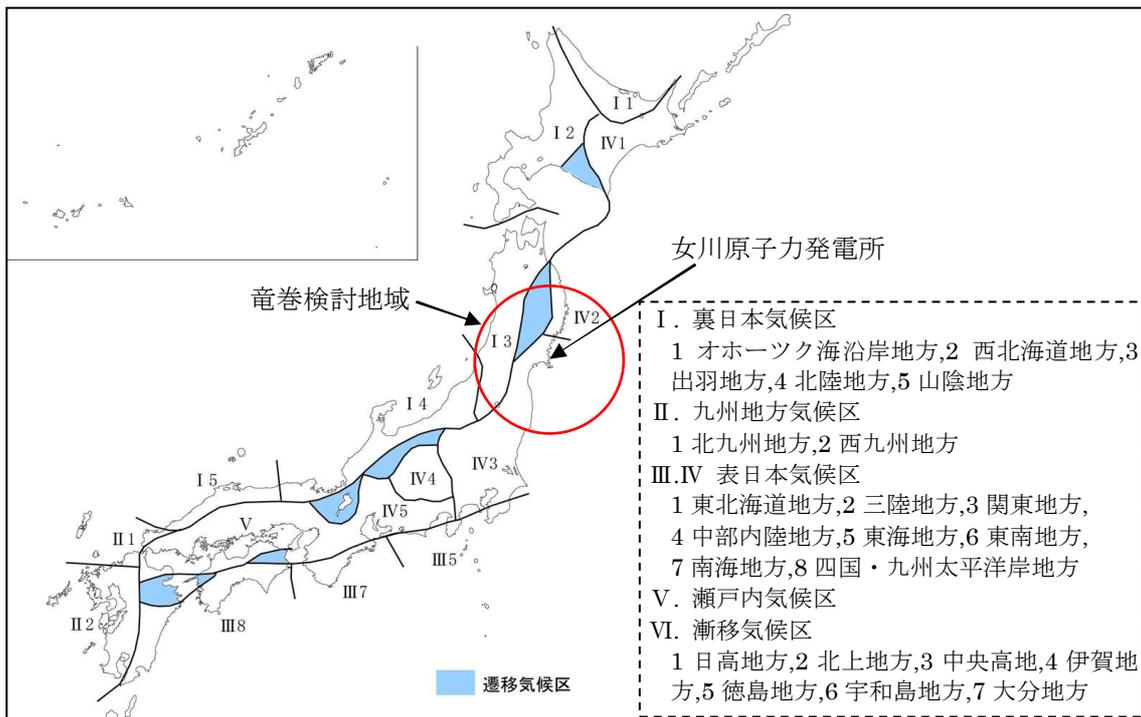
- ① 気候区分
- ② 突風関連指数 (SReH, CAPE, EHI)
- ③ 総観場

#### 3.3.1 気候区分による確認

女川原子力発電所が立地している宮城県の牡鹿半島は、図 3-3 に示す日本の気候区分において、IV3 エリアに属している。

女川原子力発電所の竜巻検討地域の設定において IAEA の基準を用いると、日本海側の気候区分 I 3 および I 4 エリアが含まれるが、これらのエリアは女川原子力発電所が立地している太平洋側とは異区分に整理されている。

また、ガイドにおいても例示されているように日本海側と太平洋側では気象条件が異なるため、女川原子力発電所の竜巻検討地域の設定においては、日本海側は除外できると考えられる。



出展：関口武「日本の気候区分」東京教育大学地理学研究報告（1959）

図 3-3 日本の気候区分

### 3.3.2 突風関連指数による確認

女川原子力発電所の立地地域における竜巻の発生頻度に関して、気象庁の竜巻注意情報の発令においても指標として活用されている突風関連指数による確認を実施した。

#### (1) 検討に用いた突風関連指数

突風関連指数としては、SReH、CAPE および両指数の複合指数であるEHIを用いた。

SReH の概念図を図 3-4 に、CAPE の算出概念を図 3-5 に示す。また、それぞれの指数について以下に示す。

##### a. SReH

風向・風速差により発生した渦度が親雲に取り込まれる度合であり、値が大きいほど、積乱雲はスーパーセルに発達しやすい。

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

$\mathbf{V}$  : 水平風速ベクトル

$\mathbf{C}$  : ストームの移動速度

$\boldsymbol{\omega}$  : 鉛直シアに伴う水平渦度

##### b. CAPE

上昇気流の発生しやすさを表し、値が大きいほど背の高い積乱雲に発達しうるため、大気的不安定度の指標となる。

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

$g$  : 重力加速度

$\theta_e'$  : 持ち上げ空気塊の相当温位

$\theta_e$  : ストーム周囲の相当温位

$dz$  : 鉛直方向の層厚

##### c. EHI

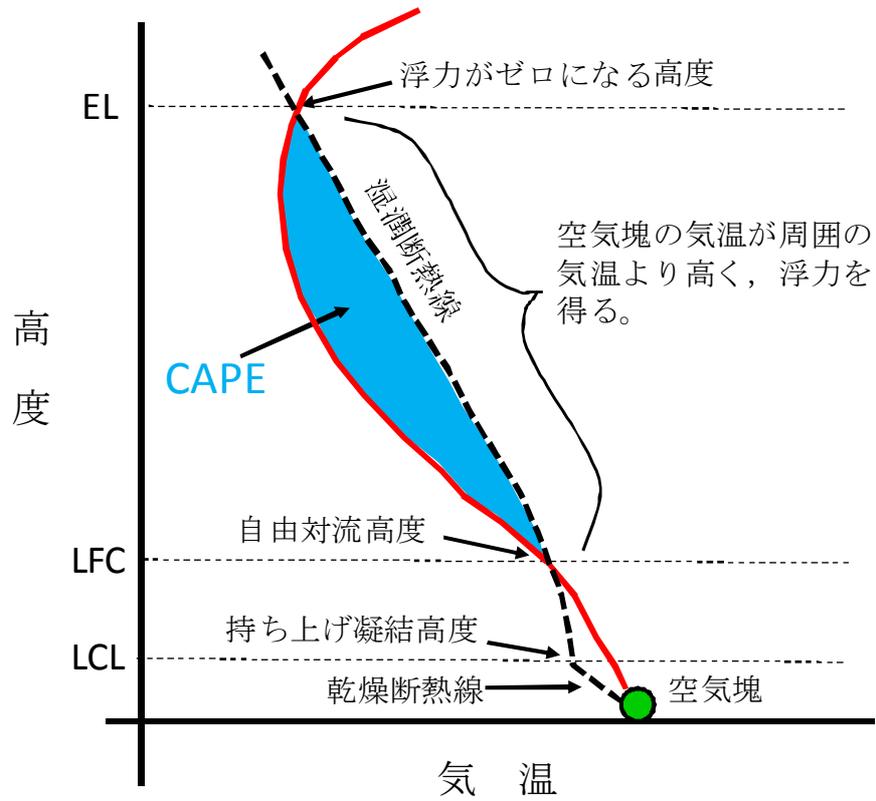
SReHおよびCAPEを用いて算出し、スーパーセルや竜巻の発生しやすさを経験的に指標化したものであり、米国ではCAPE単独またはSReH単独に比べると、竜巻発生との相関関係が高いとされている。

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



「水平軸周り」に回転する渦が親雲に吸い上げられて、「鉛直軸周り」の回転となる

図 3-4 SReH の概念図



- ..... : 空気塊の温度
- : 大気温度
- : CAPE の大きさ

図 3-5 CAPE の算出概念

## (2) 突風関連指数の地域性

突風関連指数を用いた地域性を分析するにあたり、F3 および F2 クラスの竜巻の発生ポテンシャルを評価した。

本評価では、過去の竜巻実績を元に SReH および CAPE に閾値を設定し、両指数ともに閾値を超える頻度（同時超過頻度）を算出している。

SReH および CAPE の閾値は、表 3-1 に示す過去に発生した F3, F1-F2 および F2 竜巻の SReH および CAPE の値から設定した。また、表 3-1 に示す各竜巻の SReH および CAPE の関係を図 3-6 に示す。

図 3-6 より、F3 竜巻においては、暖候期と寒候期では CAPE の値が大きく異なっており、寒候期では暖候期に比べて小さい。また、SReH が非常に大きい。

F2 竜巻の発生環境場では、SReH および CAPE が小さな値でも竜巻が発生しており、F3 竜巻の発生環境場とは異なっている。

### a. F3 規模竜巻が発生しうる環境場の分析

図 3-6 より、SReH は  $250\sim 300\text{m}^2/\text{s}^2$  程度以上、CAPE が  $1600\text{ J/kg}$ （暖候期：5月～10月）および  $600\text{ J/kg}$ （寒候期：11月～4月）程度以上の環境場において、F3 竜巻が発生している。EHI に対しては、3.3 程度を超える場合に F3 竜巻が発生している。

以上より、F3 竜巻が発生しうる環境場の閾値を以下のとおり設定した。

#### 【F3 規模の竜巻が発生しうる環境場の閾値】

- ・[5月～10月（暖候期）] SReH :  $250\text{ m}^2/\text{s}^2$  CAPE :  $1600\text{ J/kg}$
- ・[11月～4月（寒候期）] SReH :  $250\text{ m}^2/\text{s}^2$  CAPE :  $600\text{ J/kg}$
- ・EHI : 3.3

暖候期および寒候期別に、F3 規模の竜巻が発生しうる環境場の閾値の同時超過頻度を算出した結果を図 3-7 に示す。また、過去の F3 竜巻および F2 竜巻の発生箇所を図 3-8 に示す。

図 3-7 より、暖候期および寒候期ともに同時超過頻度が高い地域（茨城県以西の太平洋側および九州沿岸域の平野部）は、実際に F3 規模の竜巻が発生した箇所を包含している。一方、日本海側、東北地方太平洋側および北海道などの同時超過頻度の値は、頻度が高い地域と比較して、1～2 オーダ以上小さな値となっている。

EHI による超過頻度分布を図 3-9 に示すが、SReH および CAPE の同時超過頻度（図 3-7）と同様に、茨城県以西の太平洋側および九州沿岸域の平野部で高い値となっている。

表 3-1 過去に発生した竜巻の SReH および CAPE

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

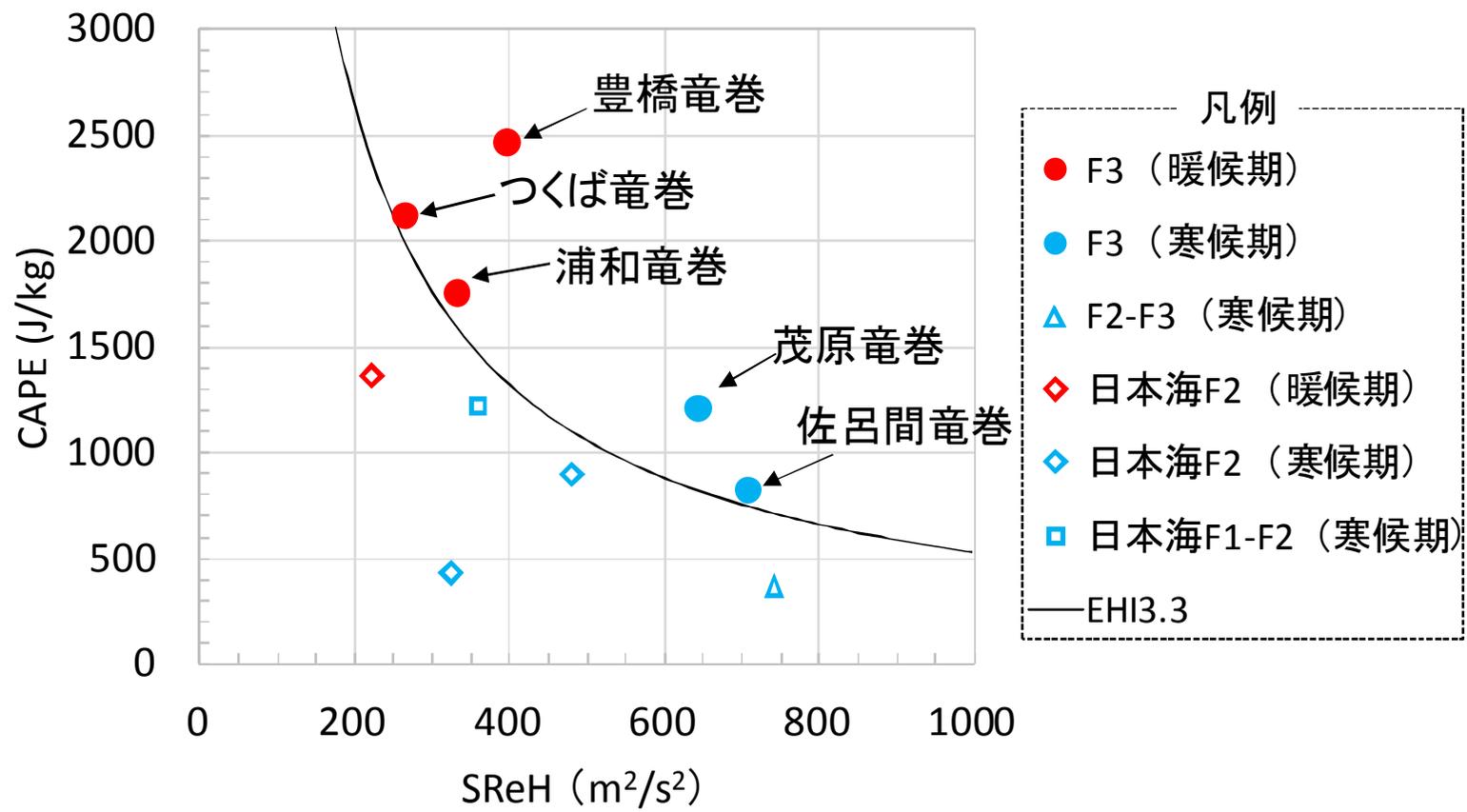


図 3-6 SReH と CAPE の関係

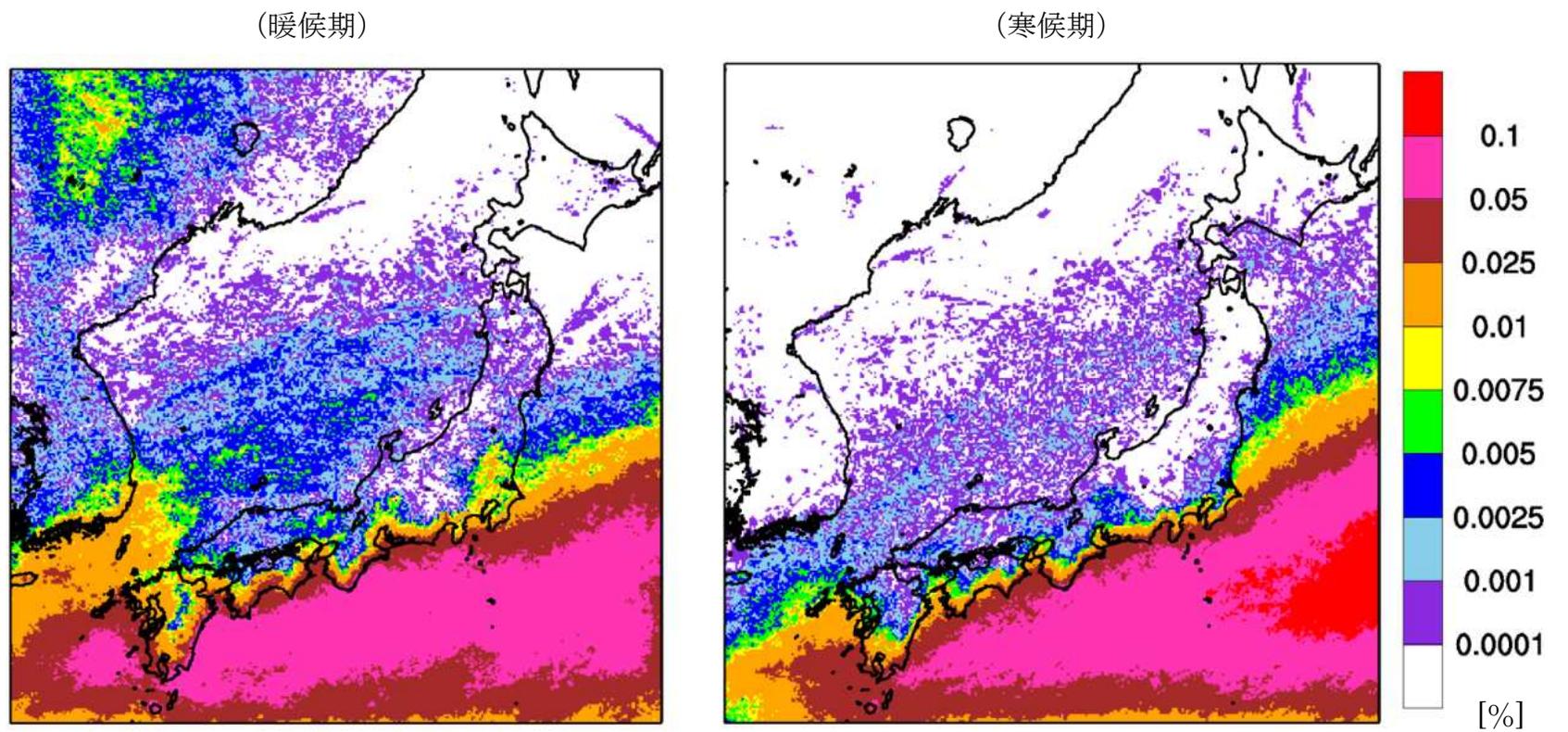


図 3-7 F3 規模の竜巻が発生しうる環境場の閾値の同時超過頻度分布

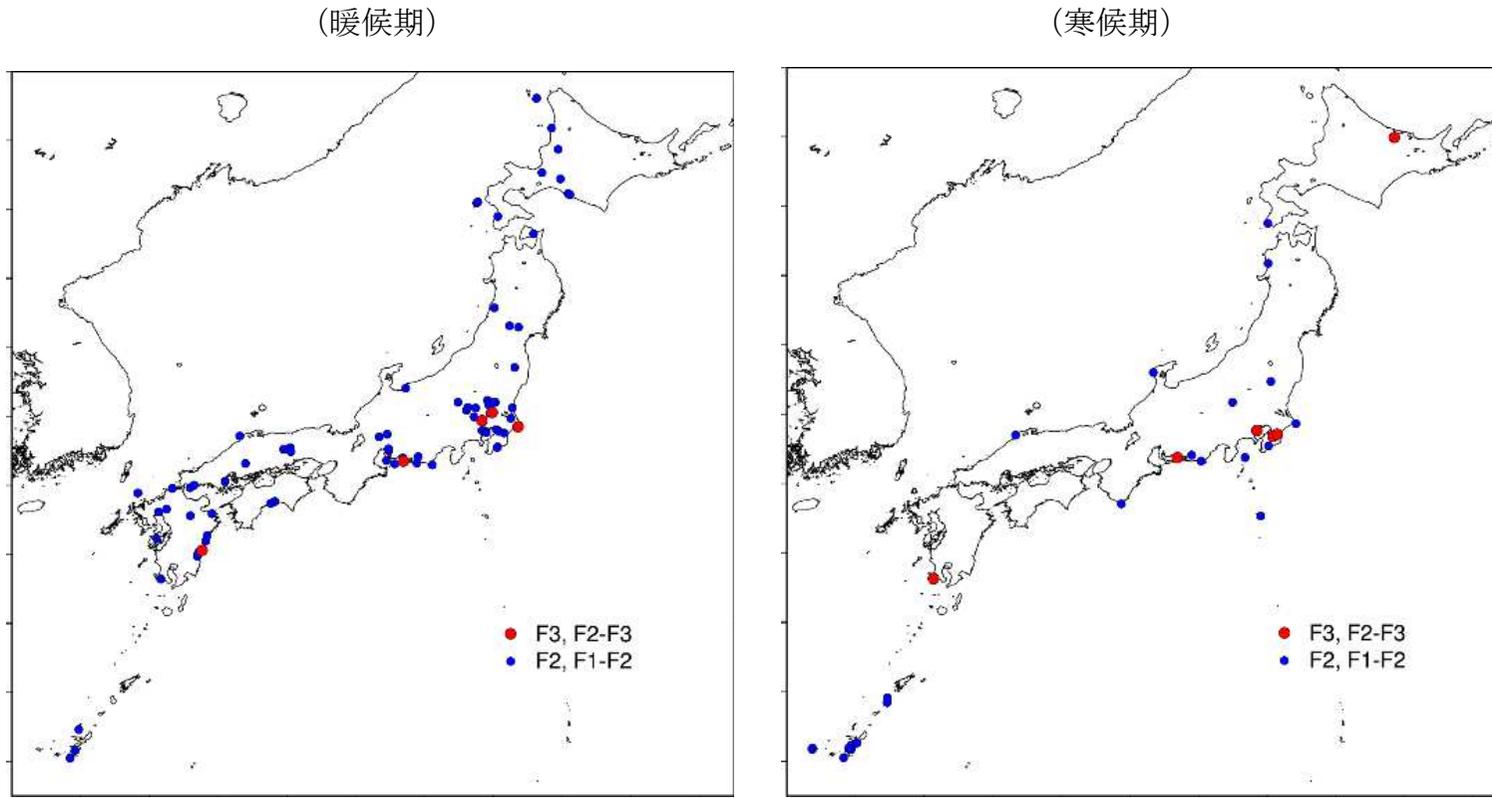


図 3-8 F3 竜巻 (F2-F3 を含む) および F2 竜巻 (F1-F2 を含む) の発生箇所

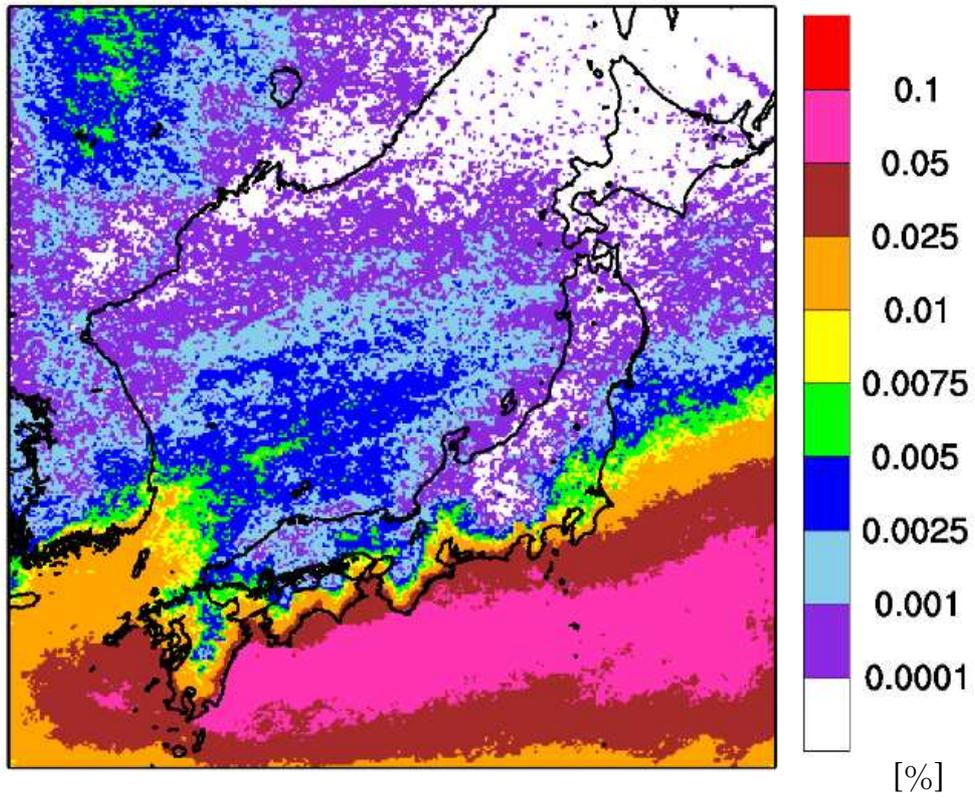


図 3-9 超過頻度分布 (F3 規模 : EHI 3.3)

b. F2 規模竜巻が発生しうる環境場の分析

F3 規模の竜巻の閾値と同様に、図 3-6 より、SReH として  $200\text{m}^2/\text{s}^2$  程度以上、CAPE として  $1000\text{ J/kg}$  (暖候期：5 月～10 月)、 $350\text{ J/kg}$  (寒候期：11 月～4 月) 程度以上の環境場において、F2 竜巻が発生している。ただし、暖候期については竜巻が 1 事例しかいないため、 $650\text{ J/kg}$  の閾値についても検討した。

EHI に対しては、1989 年 3 月 16 日に島根県で発生した F2 竜巻は 0.8 強にとどまっているが、この事象以外は 1.5～2.0 前後に入っていることから、閾値は 0.8 および 1.5 の 2 つを設定した。

以上より、F2 竜巻が発生しうる環境場の閾値を以下のとおり設定した。

**【F2 規模の竜巻が発生しうる環境場の閾値】**

[5 月～10 月(暖候期)] SReH :  $200\text{ m}^2/\text{s}^2$  CAPE : 1000 , 650 J/kg

[11 月～4 月(寒候期)] SReH :  $200\text{ m}^2/\text{s}^2$  CAPE : 350 J/kg

EHI : 0.8, 1.5

F2 規模の竜巻が発生しうる環境場の閾値の同時超過頻度を算出した結果を図 3-10(a), (b)に示す。

F3 規模の閾値による分析結果 (図 3-7) では九州より南方は本州 (茨城県以西) 太平洋側に比べて頻度がやや低くなる傾向がみられたが、F2 規模の閾値による分析結果 (図 3-10(a)) では九州より南方でも値が高い傾向がみられ、実際の発生箇所 (図 3-8) に整合している。

また、暖候期、寒候期別にみると、図 3-10(a)より暖候期においては、福島県から宮城県の太平洋側および本州日本海側沿岸での頻度が高まり、中部地方以西では内陸も含めて頻度が高く、東日本も内陸深くまで頻度が高くなっている。

また、図 3-10(b)より寒候期においても福島県から宮城県の太平洋側、北海道襟裳岬から道南方面の沿岸部および本州・道南の日本海側沿岸で頻度が高くなっている。

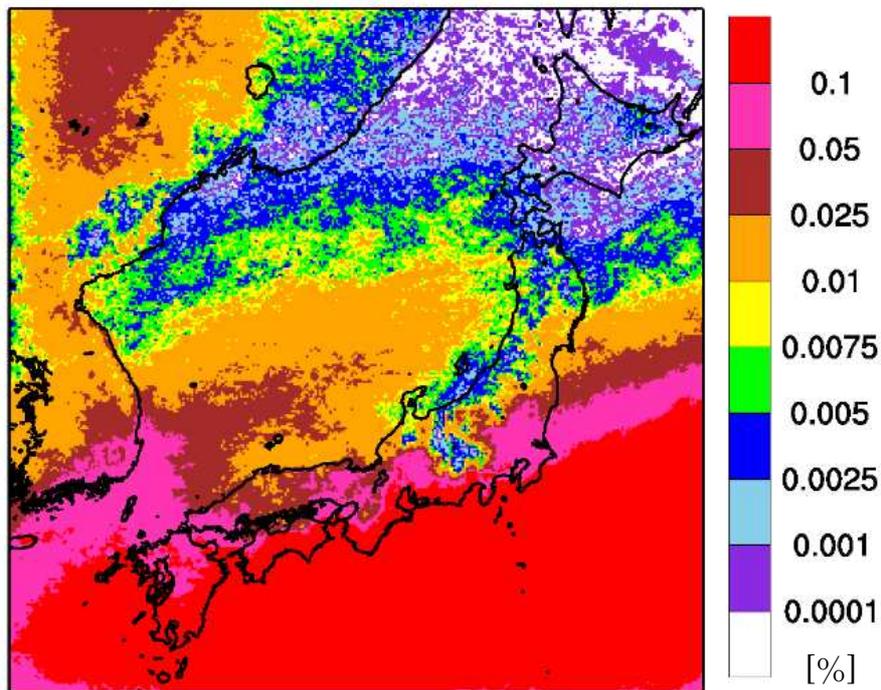
EHI を用いた分析においても、図 3-11(a), (b)に示すとおり、SReH および CAPE の同時超過頻度分布 (図 3-10(a), (b)) と同様の傾向がみられ、F3 規模以上の竜巻を対象とする場合よりも、頻度は全体的に上がっている。

(3) 突風関連指数による地域性評価のまとめ

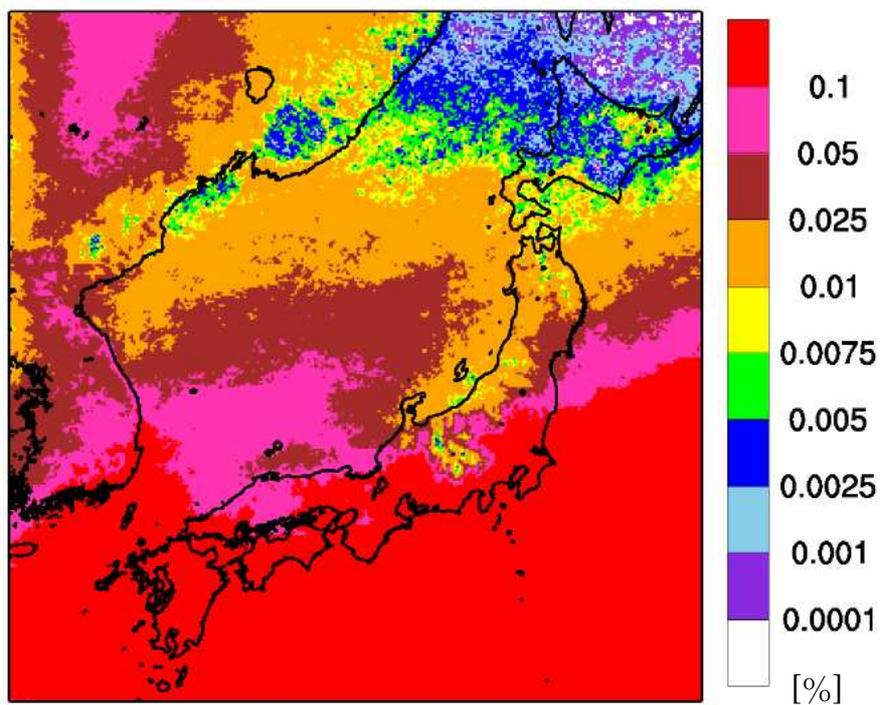
突風関連指数の地域性について分析した結果、女川原子力発電所が立地

する東北地方太平洋側は、F3 規模の大きな竜巻生成につながる環境場の発生頻度が、茨城県以西の太平洋側沿岸よりも、1~2 オーダ以上小さな値となっていた。

以上より、茨城県以西の太平洋側は、竜巻発生観点から女川原子力発電所の立地地域とは地域特性が異なる地域であると区別できると考えられる。

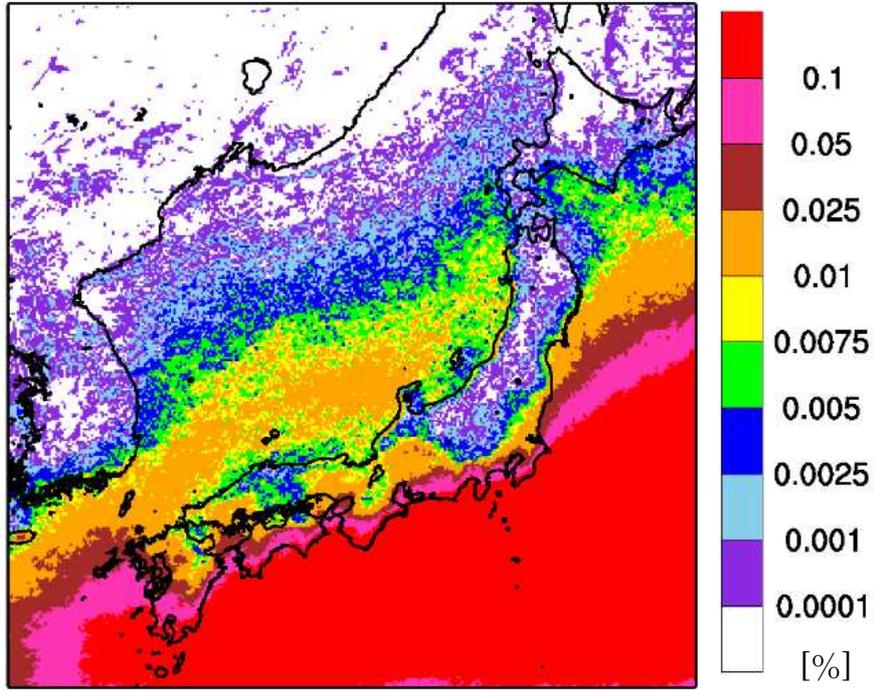


[SReH : 200 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>, CAPE : 1000 J/kg (暖候期)]



[SReH : 200 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>, CAPE : 650 J/kg (暖候期)]

図 3-10(a) F2 規模の竜巻が発生しうる環境場の閾値の同時超過頻度分布 (暖候期)



[SReH : 200 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>, CAPE : 350 J/kg (寒候期)]

図 3-10(b) F2 規模の竜巻が発生しうる環境場の閾値の同時超過頻度分布 (寒候期)

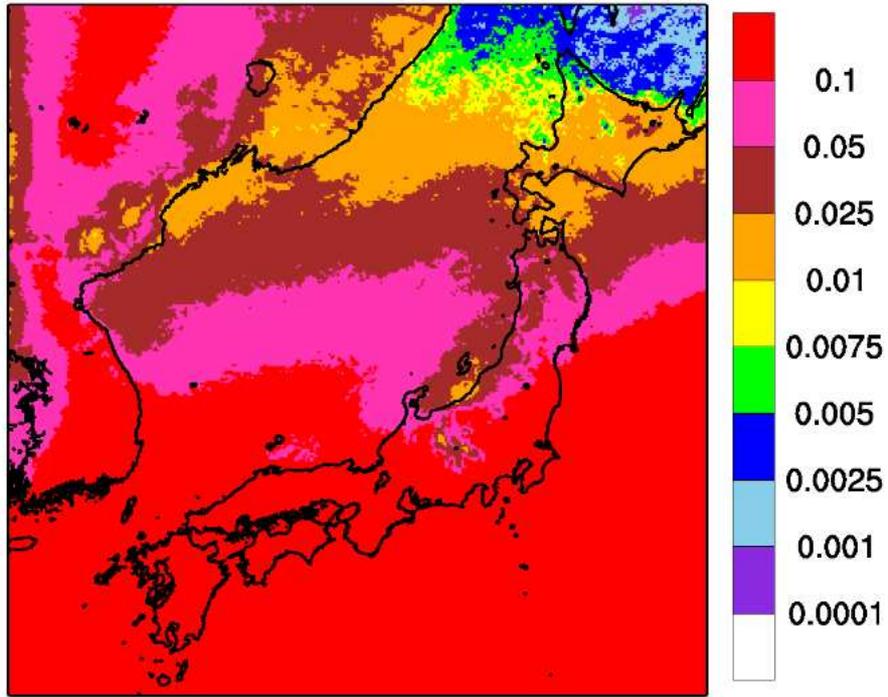


图 3-11 (a) 超過頻度分布 (F2 規模 EHI : 0.8)

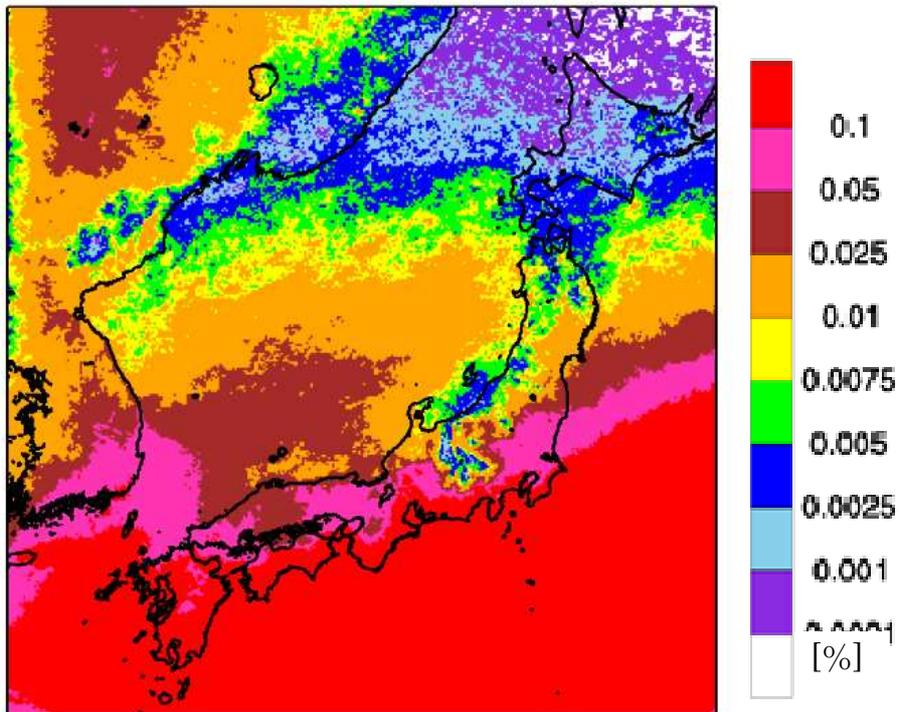


图 3-11 (b) 超過頻度分布 (F2 規模 EHI : 1.5)

### 3.3.3 竜巻検討地域の検討において除外できる地域

気候区分および突風関連指数による分析結果より、竜巻検討地域から除外できる地域を図 3-12 に示す。

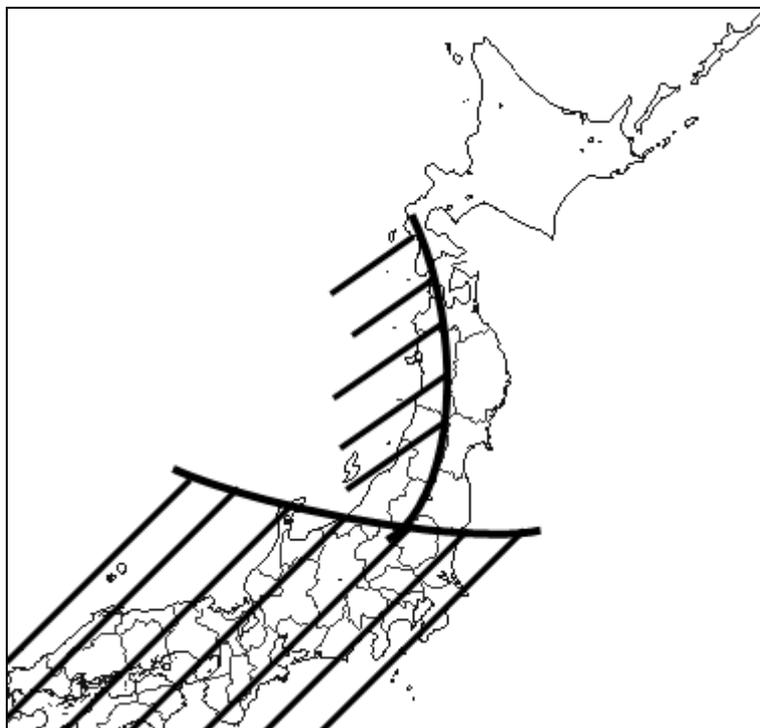


図 3-12 竜巻検討地域から除外できる地域（斜線部）

### 3.3.4 総観場による確認

気象庁の「竜巻等の突風データベース」では、竜巻を発生させた総観場を約 40 種に分類しているが、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」を参考に、竜巻を発生させる親雲の発生要因を考慮して 7 種に再編し、発生分布の特徴を分析した。

ここでは、竜巻検討地域を含む周辺地域を対象に、竜巻検討地域との総観場の類似性の有無について確認した。

#### (1) 総観場の分析地域

図 3-13 に示すとおり、総観場の分析対象地域を設定し竜巻検討地域との類似性の有無について以下の区分に基づき確認した。

- ①：竜巻検討地域
- ②：福島県～北海道の襟裳岬までの海岸線から海側，陸側 5km の範囲
- ③：東北地方内陸（福島，宮城，岩手）
- ④：福島県～青森県竜飛崎の海岸線から海側，陸側 5km の範囲

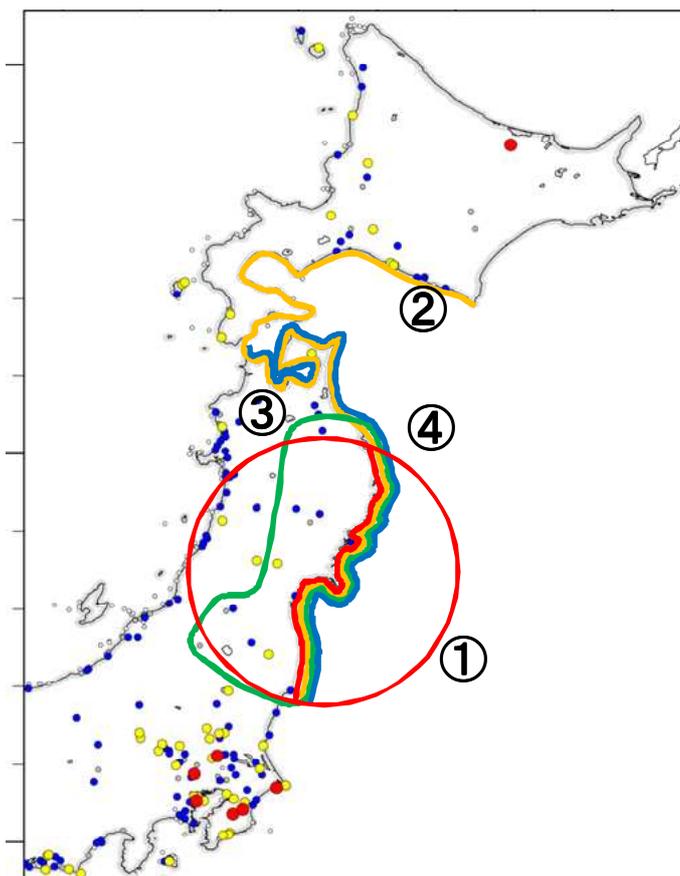


図 3-13 総観場の分析対象地域

## (2) 総観場の分析結果

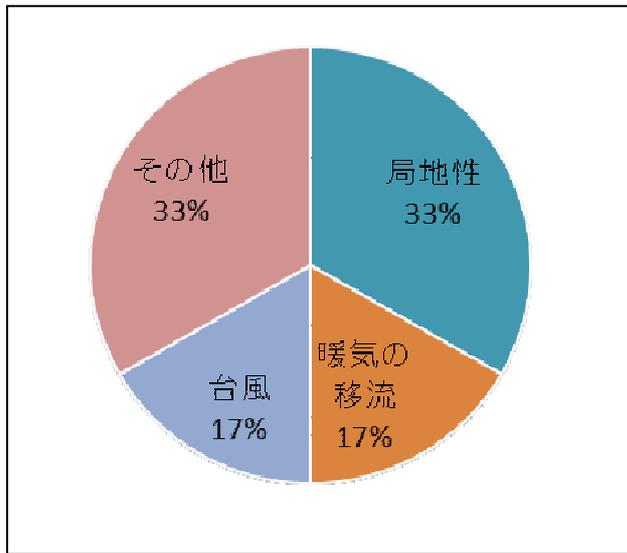
検討地域①～④の総観場を分析した結果を図3-14に示す。図3-14より、以下の傾向が見られた。

- ・ 竜巻検討地域として設定した検討地域①は局地性が強い。
- ・ 検討地域②は寒冷前線が半数以上を占めており、北海道日高地方の竜巻集中エリアの影響が支配的である。
- ・ いくつかの竜巻実績があり、検討地域①を含んだ検討地域③は検討地域①とは総観場の類似性は確認されなかった。
- ・ 検討地域④はその他前線が全体の1/4を占めており、この傾向は検討地域①とは主な総観場の要因が異なっている。

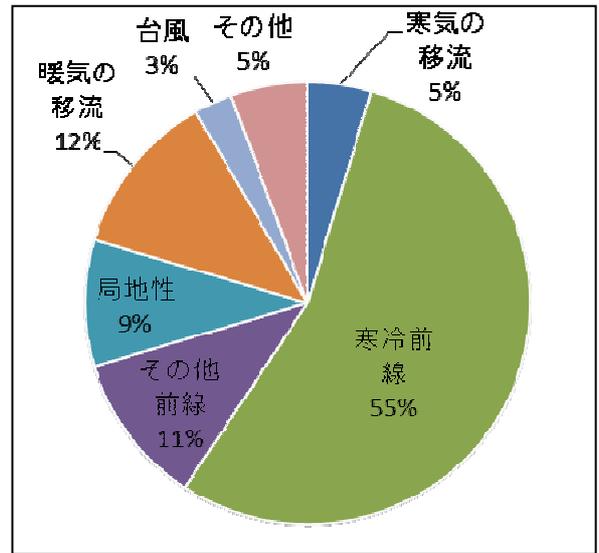
以上の分析より、竜巻検討地域（検討地域①）は周辺のどの地域とも総観場が類似しているとは言えないため、検討地域②～④はガイドで示されている竜巻発生観点から類似している地域には該当しないと判断している。

### 3.3.5 竜巻検討地域の確認結果

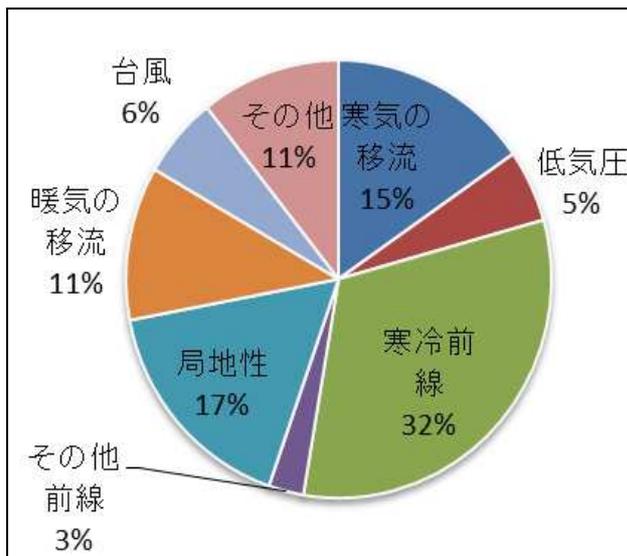
気候区分、突風関連指数および総観場による確認の結果、女川原子力発電所から半径180km（10万km<sup>2</sup>）の範囲のうち、海岸線から陸側および海側5kmの範囲を竜巻検討地域として設定した。



検討地域①



検討地域②



検討地域③



検討地域④

気象庁の「竜巻等の突風データベース」による

図 3-14 各検討地域における総観場の分析結果

### 3.4 基準竜巻の最大風速( $V_B$ )の設定

基準竜巻の最大風速は、竜巻検討地域において過去に発生した竜巻による最大風速( $V_{B1}$ )、およ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。

#### 3.4.1 竜巻検討地域において過去に発生した竜巻( $V_{B1}$ )

気象庁「竜巻等の突風データベース」より、過去 51.5 年間（1961 年～2012 年 6 月）の竜巻実績を分析したところ、竜巻検討地域においては 3 件の F1 竜巻の発生実績が報告されている。

竜巻検討地域で発生した竜巻一覧を表 3-2 に、藤田スケールと風速の関係を表 3-3 に示す。

表 3-2, 表 3-3 より、竜巻検討地域において過去に発生した竜巻の最大風速  $V_{B1}$  は F1 スケールの上限値である 49m/s とする。

表 3-2 竜巻検討地域において発生した竜巻一覧

No.	発生日	発生場所		F スケール
		都道府県	市町村	
1	1974 年 3 月 13 日	福島県	いわき市	F1
2	1992 年 8 月 7 日	宮城県	本吉郡唐桑町	F1
3	1998 年 9 月 16 日	宮城県	名取市	F1

表 3-3 藤田スケールと風速の関係

スケール	風速
F0	17～32m/s (約 15 秒間の平均)
F1	33～49m/s (約 10 秒間の平均)
F2	50～69m/s (約 7 秒間の平均)
F3	70～92m/s (約 4 秒間の平均)
F4	93～116m/s (約 3 秒間の平均)

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

#### (1) 竜巻ハザードの算定フロー

竜巻最大風速のハザード曲線はガイドに従い、既往の算定方法「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究（東京工芸大学）」を参照して算定する。

図 3-15 に竜巻ハザードの算定フローを示す。

竜巻最大風速のハザード曲線の算定に当たっては、竜巻検討地域（海岸線から陸側および海側それぞれ 5km の範囲）の評価および竜巻検討地域を海岸線に沿って 1km 範囲ごとに細分化した評価にて算定し、そのうち大きな風速を  $V_{B2}$  として設定する。

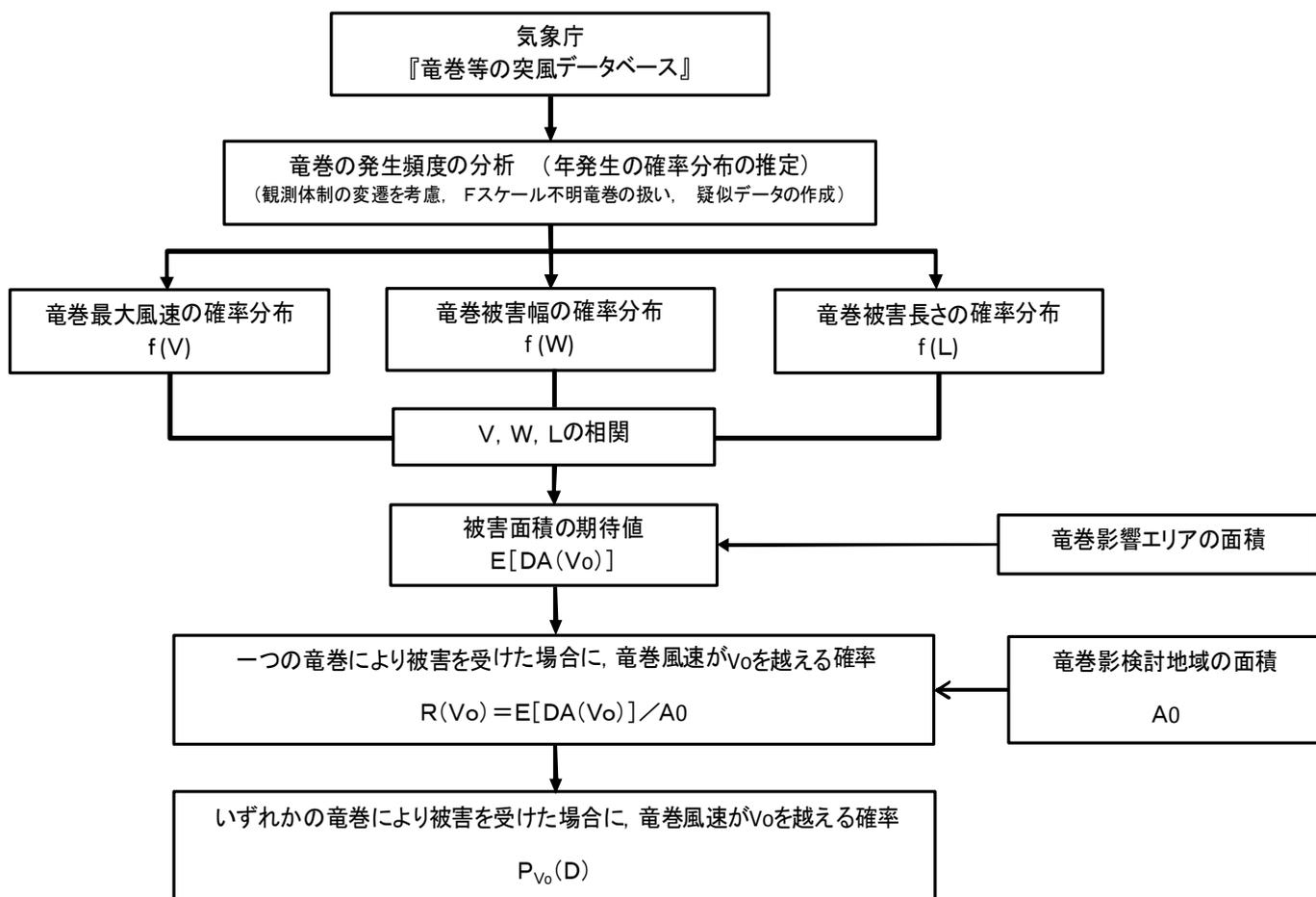


図 3-15 竜巻ハザードの算定フロー

(2) 海岸線から陸側および海側それぞれ 5km 全域の評価

a. 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」を基に 1961 年 1 月～2012 年 6 月までの 51.5 年間の統計量を F スケール別に算出した。

なお、観測体制は近年になるほど強化されており観測データの品質にばらつきがあるため、以下の①～④の基本的な考え方に基づいて整理を行った。

- ① 被害が比較的大きく見逃されることが少ない F2, F3 竜巻については、観測データが整備された 1961 年以降の全期間の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ② 被害が比較的軽微な F1 竜巻については、観測体制が整備された 1991 年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ③ 被害が小さくて見過ごされやすい F0 および F 不明竜巻は、観測体制が強化された 2007 年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ④ 51.5 年間の発生数を、①～③の観測期間との比率から F スケール毎に推計する。

また、F スケールが不明な竜巻については、以下の考え方に基づいて分類した。

- ⑤ 陸上で発生した F スケールが不明な竜巻、および海上で発生しその後上陸した F 不明竜巻は F0 に含める。これにより、全ての陸上竜巻を F0～F3 に分類する。
- ⑥ 沿岸部近傍での海上竜巻の特性は、陸上竜巻の特性と類似しているとの仮定の下、不明な海上竜巻の発生数を陸上竜巻の F スケール別発生比率で按分する。(按分後の期間内発生数は切り上げて整数化)

以上より、竜巻発生数の分析結果を表 3-4、竜巻発生数の推計結果（擬似 51.5 年間）を表 3-5 に示す。

なお、本竜巻検討地域では、海上の F スケールが不明な竜巻が観測されていないため、⑤、⑥の分類による F スケール別発生数に変化は無い。

表 3-4 竜巻発生数の分析結果

	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	3	0	3	0	0	0	0	3
	平均値(年)	0.06	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06
	標準偏差(年)	0.24	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	2	0	2	0	0	0	0	2
	平均値(年)	0.09	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均値(年)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	5	0	5	0	0	0	0	5
	平均値(年)	0.09	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	5	0	5	0	0	0	0	0
	平均値(年)	0.09	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 3-5 竜巻発生数の推計結果 (擬似 51.5 年間)

	発生数の統計	小計	竜巻スケール			
			F0	F1	F2	F3
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	5	0	5	0	0
	平均値(年)	0.10	0.00	0.10	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.00	0.00

b. 竜巻風速・被害域幅・長さの確率分布および相関係数

竜巻発生数と同様にして、竜巻被害幅および竜巻被害長さの統計量を以下の手順に従い推計した。

- ① 1961 年以降の全観測データを使用し、F スケール別に被害幅データを抽出する。F スケール別のデータから、被害幅の発生数や平均値・標準偏差を求める。
- ② 各スケール別の 51.5 年間のデータ数は、①で得られる観測値ではなく、表 3-4 で推定された 51.5 年間の疑似データの発生数とする。
- ③ ①で抽出された F スケール別の被害幅データを大きい順に並び替え、②で設定した 51.5 年間の発生数分だけ繰り返しサンプリングを行い、51.5 年間の疑似データを作成する。
- ④ 作成された疑似データの平均値や標準偏差を求める。

表 3-6 に竜巻被害幅の分析結果、表 3-7 に竜巻被害長さの分析結果を示す。

竜巻風速、被害域幅、被害長さの分布系は「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究（東京工芸大学）」によれば、分布形は、対数正規分布への適合度が良いことが示されている。この成果およびガイドに基づき、一つの竜巻が発生した際の、竜巻風速・被害域幅・長さの確率分布は対数正規分布に従うものとした。

表 3-8 に竜巻の発生数、被害幅、被害長さの統計量、図 3-16 に竜巻風速の確率分布の推定結果と観測値との比較、図 3-17 に竜巻被害幅の確率分布の推定結果と観測値との比較、図 3-18 に竜巻被害長さの確率分布の推定結果と観測値との比較、表 3-9 に竜巻風速、被害幅、被害長さの相関係数を示す。

表 3-6 竜巻被害幅の分析結果

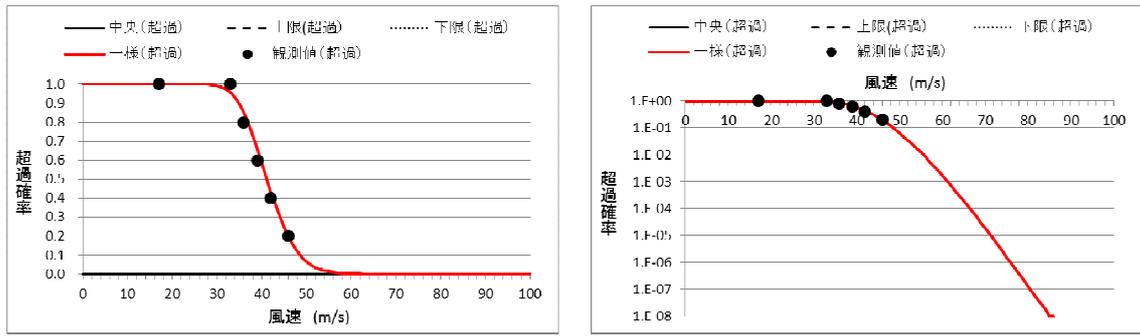
	竜巻幅 の統計 (m)	小計	竜巻スケール				不 明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	2	0	2	0	0	1	0	3
	平均値 (m)	225	NaN	225	NaN	NaN			
	標準偏差 (m)	187	0	247	0	0			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	2	0	2	0	0	0	0	2
	平均値 (m)	225	NaN	225	NaN	NaN			
	標準偏差 (m)	187	0	247	0	0			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均値 (m)	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN			
	標準偏差 (m)	0	0	0	0	0			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	5	0	5	0	0	0	0	0
	平均値 (m)	260	NaN	260	NaN	NaN			
	標準偏差 (m)	192	0	192	0	0			

表 3-7 竜巻被害長さの分析結果

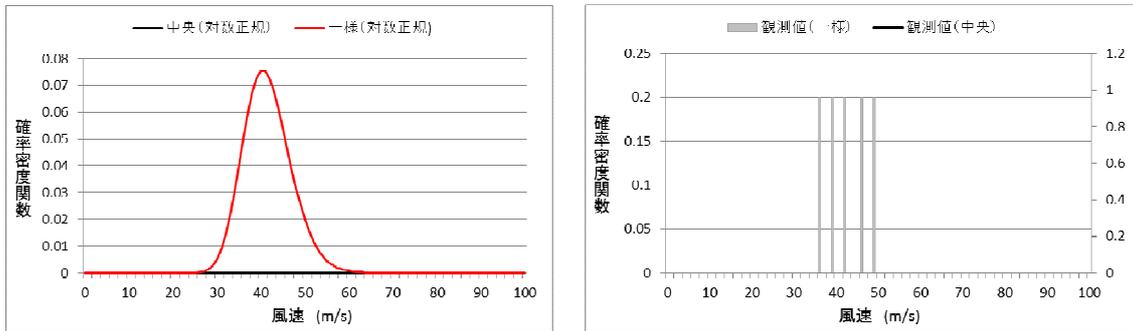
	被害長さ の統計(km)	小計	竜巻スケール				不 明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	2	0	2	0	0	1	0	3
	平均値 (km)	0.850	NaN	0.850	NaN	NaN			
	標準偏差 (km)	0.160	0.000	0.212	0.000	0.000			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	2	0	2	0	0	0	0	2
	平均値 (km)	0.850	NaN	0.850	NaN	NaN			
	標準偏差 (km)	0.160	0.000	0.212	0.000	0.000			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均値 (km)	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN			
	標準偏差 (km)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	5	0	5	0	0	0	0	0
	平均値 (km)	0.880	NaN	0.880	NaN	NaN			
	標準偏差 (km)	0.164	0.000	0.164	0.000	0.000			

表 3-8 竜巻の発生数, 被害幅, 被害長さの統計量

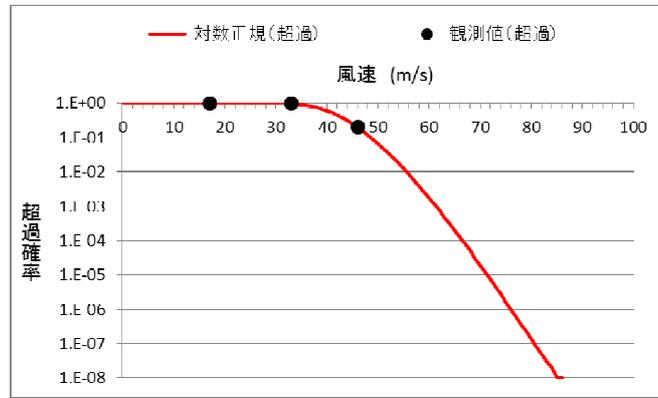
	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
疑似 51.5年間 (全竜巻)	発生数	期間内総数	5	0	5	0	0
		平均値(年)	0.10	0.00	0.10	0.00	0.00
		標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.00	0.00
	被害幅	期間内総数	5	0	5	0	0
		平均値 (m)	260	NaN	260	NaN	NaN
		標準偏差 (m)	192	0	192	0	0
	被害長	期間内総数	5	0	5	0	0
		平均値 (km)	0.880	NaN	0.880	NaN	NaN
		標準偏差 (km)	0.164	0.000	0.164	0.000	0.000



(a) 超過確率

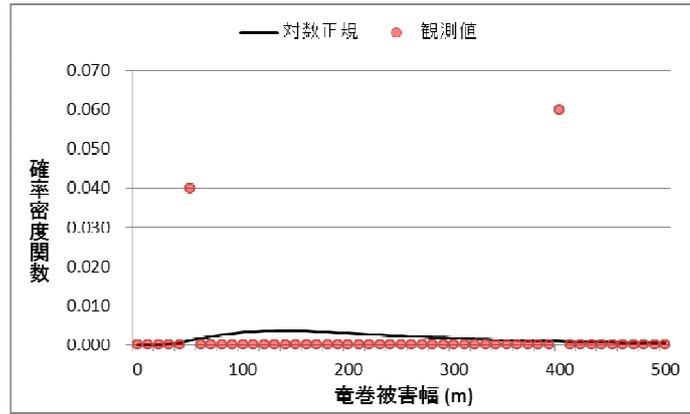


(b) 一様分布の場合の確率密度関数推定値 (左) と観測値(右)

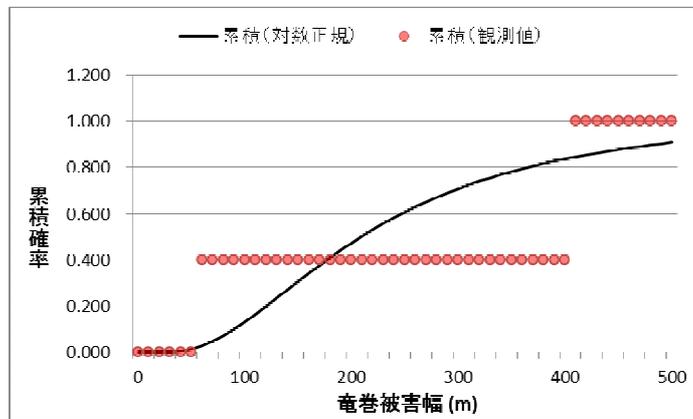


(c) 採用した風速分布 (中央集中型)

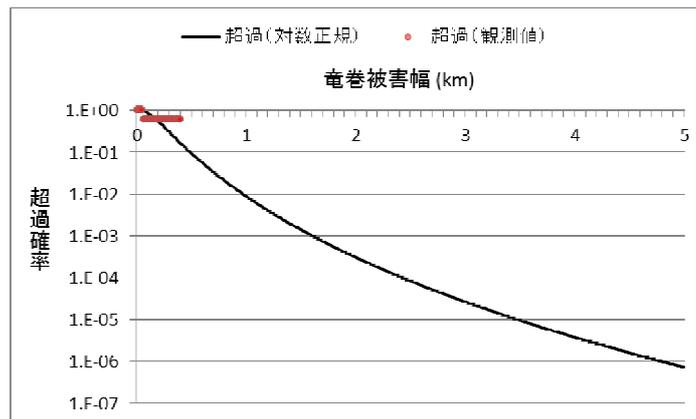
図 3-16 竜巻風速の確率分布の推定結果と観測値との比較



(a) 確率関数

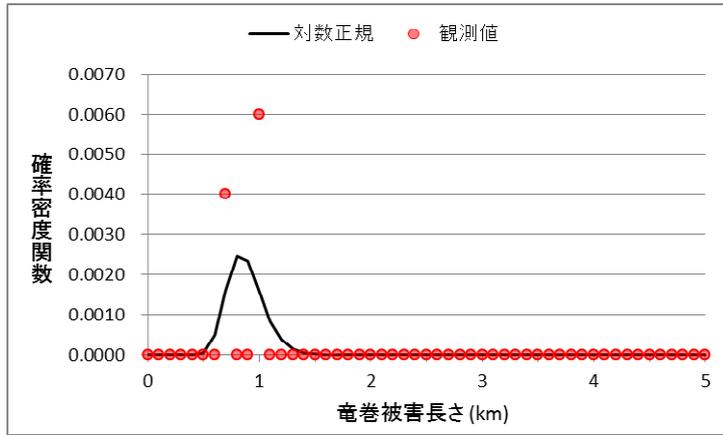


(b) 累積確率

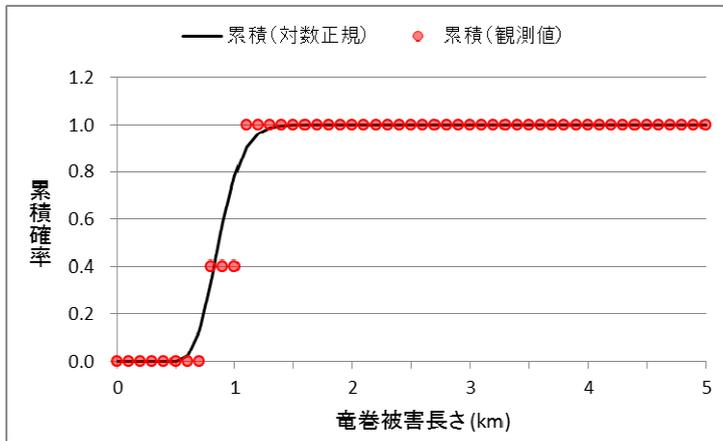


(c) 超過確率

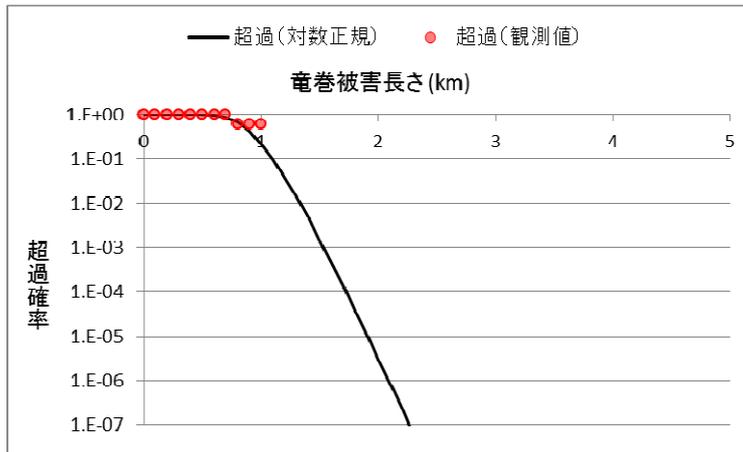
図 3-17 電巻被害域幅の確率分布の推定結果と観測値との比較



(a) 確率分布



(b) 累積確率



(c) 超過確率

図 3-18 電巻被害域長さの確率分布の推定結果と観測値との比較

表 3-9 竜巻風速，被害幅，被害長さの相関係数（全国沿岸±5km）

相関係数	風速	被害幅	被害長さ
風速	1.000	0.271	0.417
被害幅	0.271	1.000	0.397
被害長さ	0.417	0.397	1.000

c. 竜巻影響エリアの設定

女川原子力発電所 2 号における評価対象施設の位置を図 3-19 に，評価対象施設の面積を表 3-10 に示す。

評価対象施設の位置が分散しているため，保守的にそれぞれを包含する円形エリアを竜巻影響エリア（面積約 114,000m<sup>2</sup>（直径 380m の円））として設定した（図 3-20）。

なお，竜巻影響エリアを円形とするため，竜巻の移動方向は考慮する必要はない。

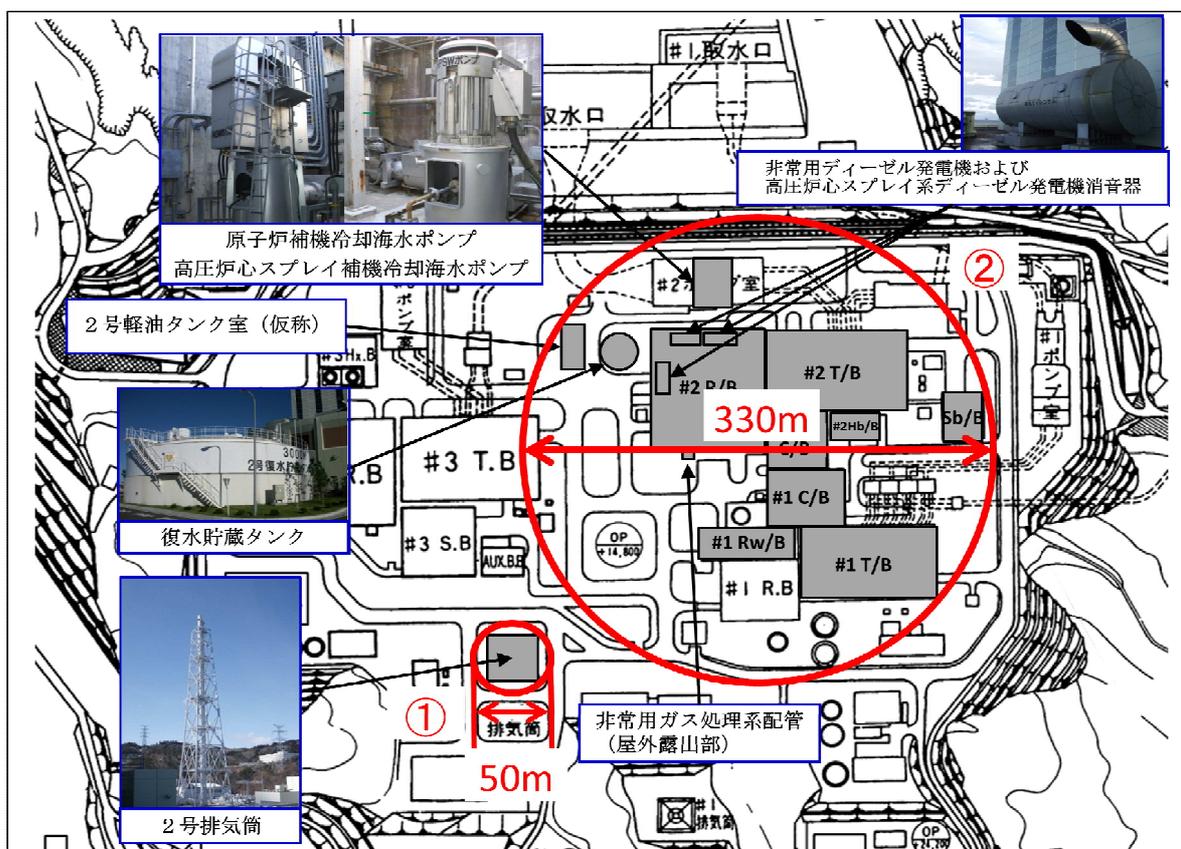


図 3-19 評価対象施設の位置

表 3-10 評価対象施設の面積

施設名	面積 (m <sup>2</sup> )
2号原子炉建屋	約 6,620
1号制御建屋	約 2,030
2号制御建屋	約 1,860
2号海水ポンプ室	約 610
復水貯蔵タンク	約 420
2号軽油タンク室 (仮称)	約 670
1号タービン建屋	約 4,920
2号タービン建屋	約 5,660
2号補助ボイラー建屋	約 560
サイトバンカ建屋	約 1,080
2号排気筒	約 1,230
合 計	約 25,660

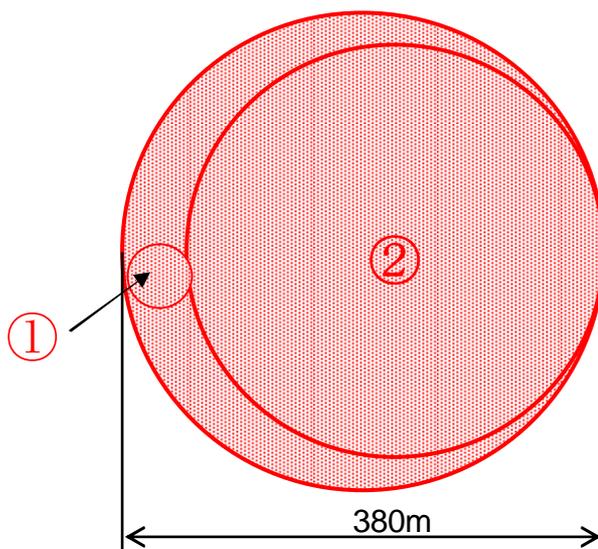


図 3-20 竜巻影響エリア

d. 竜巻ハザード曲線の算定

以下に示す式により、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。

海岸線から陸側および海側それぞれ 5km を対象に算定した竜巻最大風速のハザード曲線を図 3-21 に示す。

図 3-21 より、年超過確率  $10^{-5}$  に相当する風速は 36.1m/s となる。

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

ここで、

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

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

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

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

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

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

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

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

V	: 竜巻風速	$E[DA(V_0)]$	: 1 つの竜巻の風速が $V_0$ 以上となる面積の期待値
W	: 竜巻被害幅	N	: 竜巻の年発生数
l	: 竜巻被害長さ	$\nu$	: 竜巻の年平均発生数
$\alpha$	: 竜巻移動方向	T	: 年数
$\beta$	: 竜巻の年平均発生数と標準偏差で表されるパラメータ	$\sigma$	: 竜巻の年発生数の標準偏差
D	: 対象とする構造物が風速 $V_0$ 以上の竜巻に遭遇する事象	$H(\alpha)$	: 竜巻の幅方向への構造物の投影長さ
$R(V_0)$	: 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	$G(\alpha)$	: 竜巻の長さ方向への構造物の投影長さ

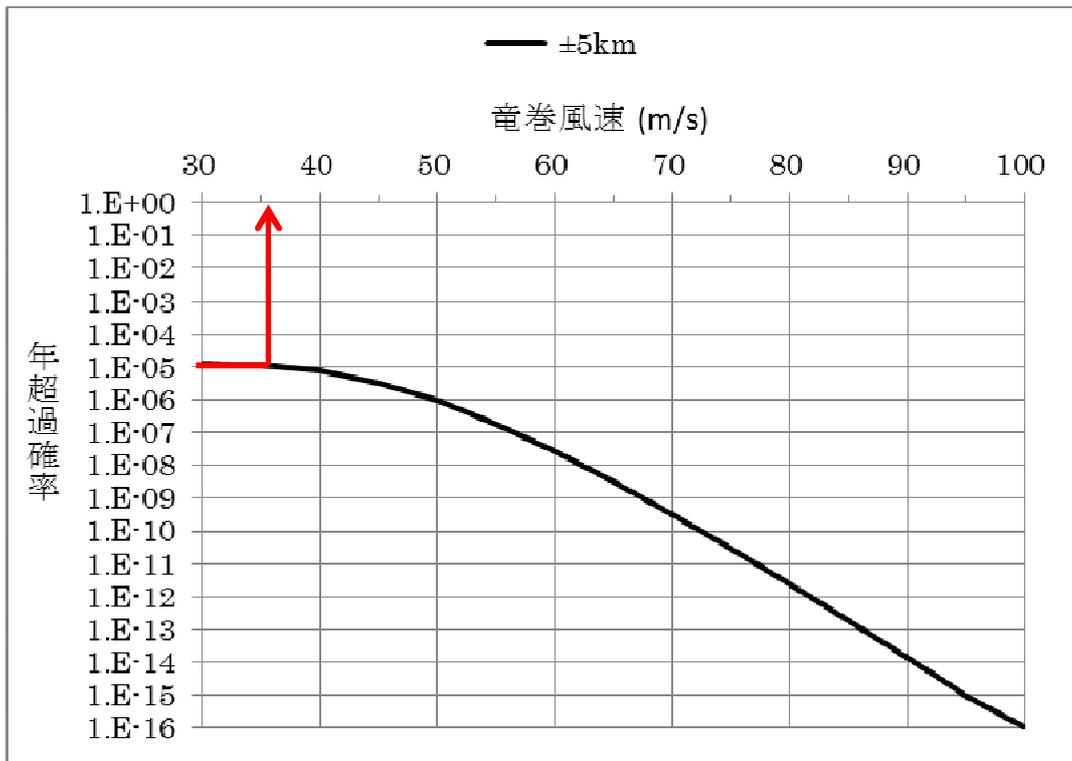


図 3-21 竜巻最大風速のハザード曲線

(3) 1km 範囲ごとに細分化した評価

竜巻検討地域（海岸線から陸側および海側 5km の範囲）を 1km 範囲ごとの短冊状に区切った範囲の検討を実施した。

検討範囲は竜巻検討地域での竜巻観測記録が陸側 0～1km の範囲でのみ竜巻が観測されているため、陸側 0～1km の範囲において実施した。

なお、ハザードの算定にあたっては以下を考慮し、海岸線から陸側および海側 5km の範囲の評価と同様の方法で算定した。

- ・ 発生数は評価対象の短冊領域を通過した竜巻も含む
- ・ 被害幅および被害長さは評価対象の短冊領域内の被害幅および被害長さ

竜巻最大風速のハザード曲線（短冊ケース）を図 3-22 に示す。図 3-22 より、年超過確率  $10^{-5}$  に相当する竜巻風速は 49.0m/s（陸側 0～1km）となる。

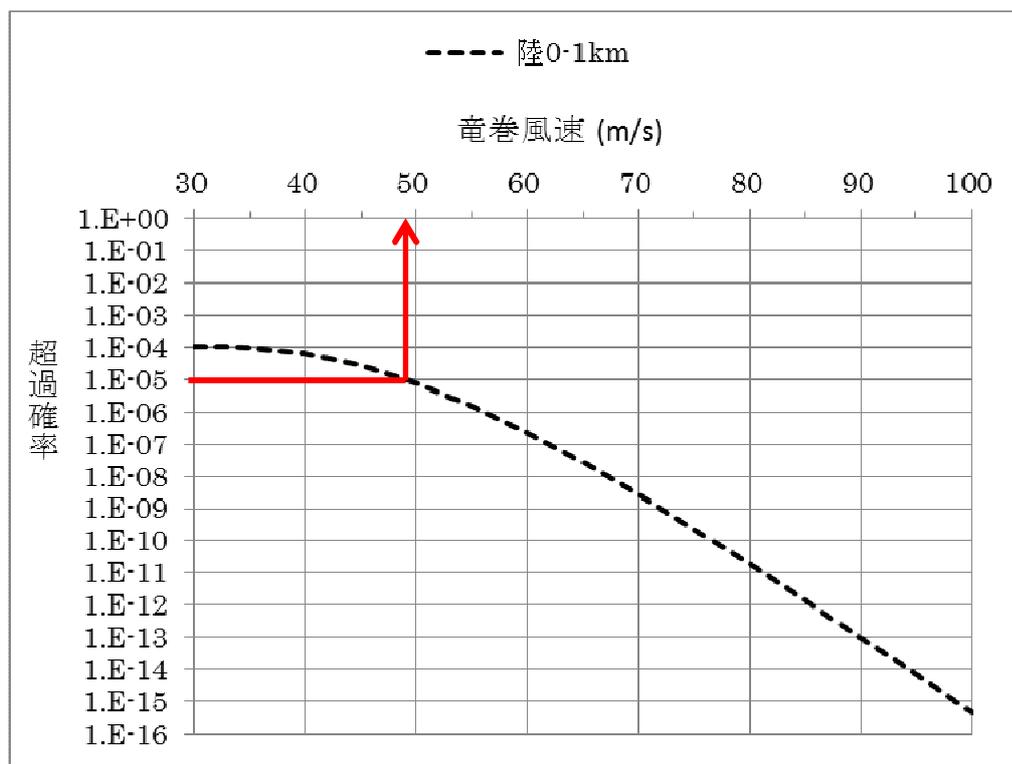


図 3-22 竜巻最大風速のハザード曲線（短冊ケース）

(4) 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速  $V_{B2}$

海側および陸側それぞれ 5km および 1km 範囲ごとのハザード評価結果を表 3-11 および図 3-23 に示す。

表 3-11 および図 3-23 より，陸側 0~1km 範囲を対象に算定した 49m/s を  $V_{B2}$  として設定する。

表 3-11 年超過確率  $10^{-5}$  に対応する風速

項目	最大風速
海側および陸側それぞれ5kmの評価	36.1m/s
1km範囲ごとの評価（陸側0~1km）	49.0m/s

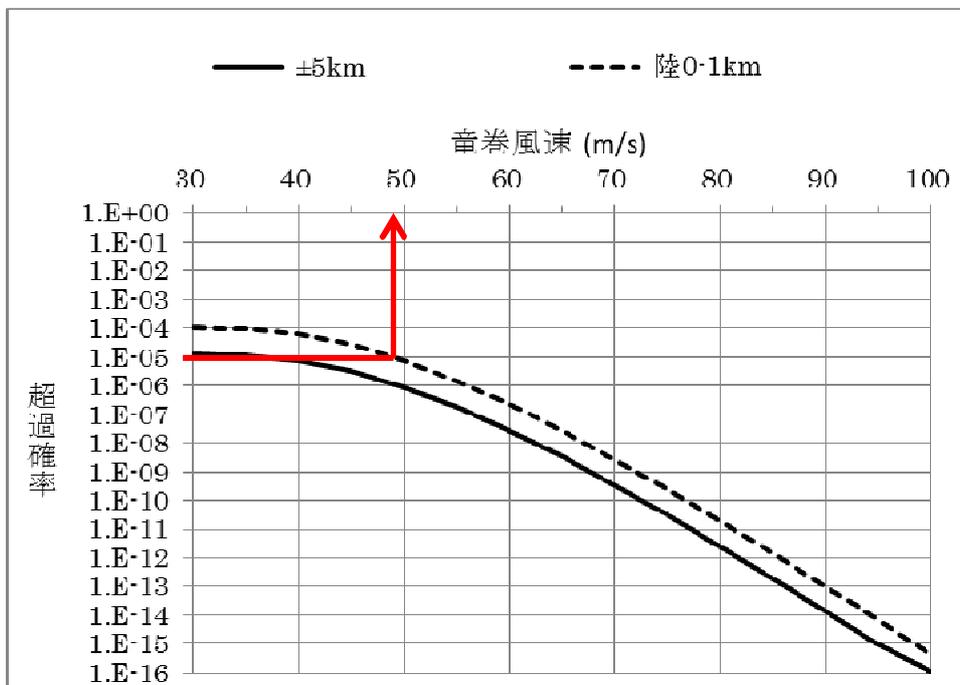


図 3-23 竜巻最大風速のハザード曲線

### 3.4.3 周辺地域の竜巻最大風速の分析

3.3.4 で総観場を分析した検討地域②, ③, ④ (図 3-24) に対し, 過去に発生した竜巻の最大風速および竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速を分析した。分析結果を表 3-12 に示す。

検討地域②, ③, ④の各地域において, 過去に F2 竜巻が発生しており, 各地域の竜巻最大風速は, F2 の上限値である 69m/s となった。

この結果は 3.3.2 の突風関連指数の分析において, F2 規模の竜巻の発生頻度が東北地方で比較的高い値を示していた, という分析結果とも整合している。

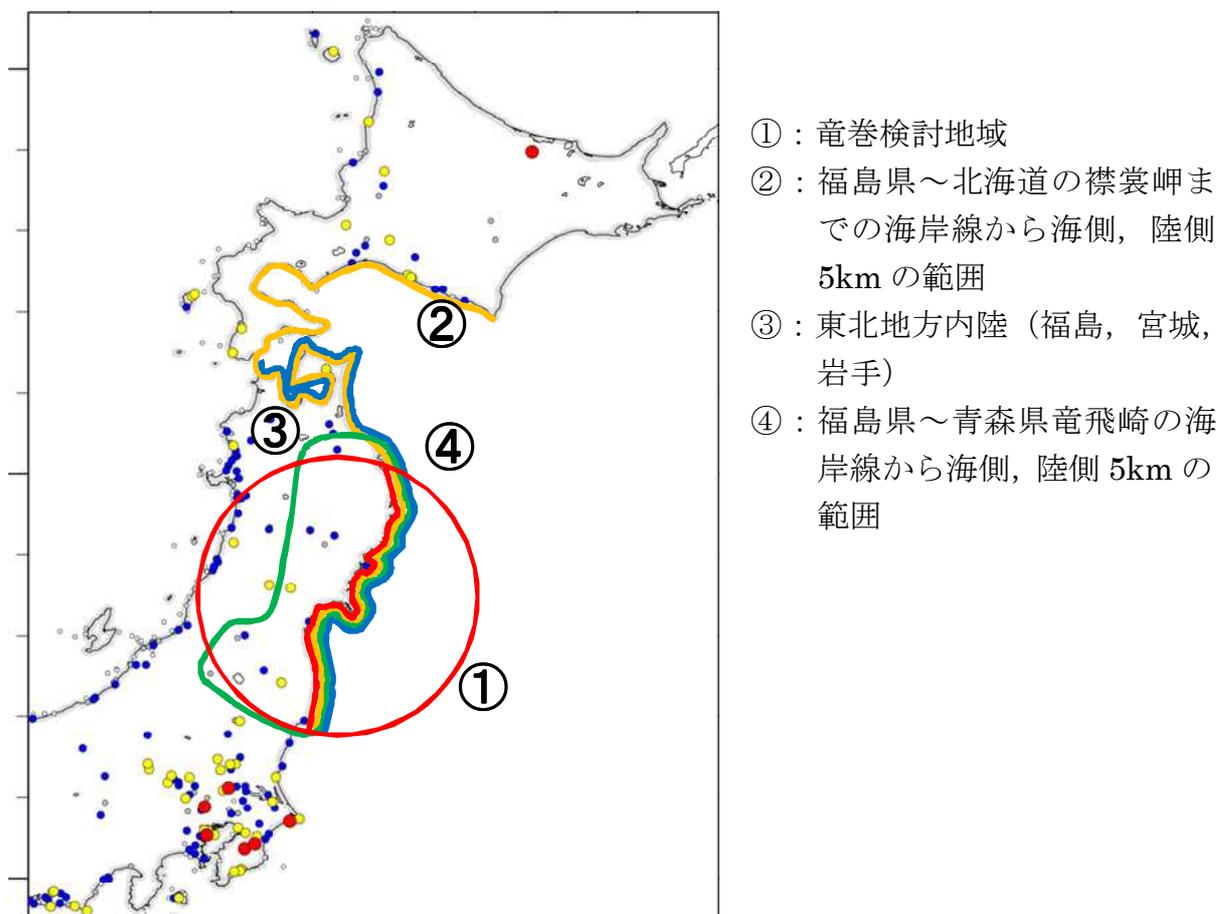


図 3-24 分析対象地域

表 3-12 検討地域毎の竜巻最大風速

検討対象地域		過去に発生した竜巻による最大風速	竜巻最大風速のハザード曲線(10 <sup>-5</sup> )による最大風速	結果
①	竜巻検討地域	F1 (49m/s)	5km 範囲 : 36.1m/s 1km 範囲 : 49.0m/s	F1 (49m/s)
②	福島県～ 北海道襟裳岬	F2 (69m/s)	5km 範囲 : 50.7m/s 1km 範囲 : 57.6m/s	F2 (69m/s)
③	東北地方内陸	F2 (69m/s)	36.2m/s	F2 (69m/s)
④	福島県～ 青森県竜飛崎	F2 (69m/s)	5km 範囲 : 30m/s 未満 1km 範囲 : 55.2m/s	F2 (69m/s)

### 3.4.4 基準竜巻の最大風速

過去に発生した竜巻による最大風速( $V_{B1}$ )および竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速( $V_{B2}$ )の結果を表 3-13 にまとめる。

表 3-13 竜巻最大風速の評価結果

項目	最大風速
過去に発生した竜巻による最大風速( $V_{B1}$ )	F1 (49m/s)
竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速( $V_{B2}$ )	49m/s

以上より、基準竜巻の最大風速 ( $V_B$ ) は 49m/s となるが、竜巻は非常に稀な事象であるため、以下の 2 点の検討結果を踏まえ、F2 (50~69m/s) の上限値である 69m/s とする。

なお、69m/s は年超過確率評価上、 $4.2 \times 10^{-9}$  相当する風速である。

- ・ 突風関連指数による分析 (3.3.2 参照) において、東北地方太平洋側は、F2 規模の竜巻の発生ポテンシャルがある。
- ・ 竜巻検討地域を含む周辺地域の竜巻最大風速は F2 (69m/s)。

### 3.5 設計竜巻の最大風速( $V_D$ )の設定

発電所のサイト特性（地形効果や竜巻の移動方向）等を考慮して基準竜巻( $V_B$ )の割り増しを検討し、設計竜巻の最大風速を設定する。

#### 3.5.1 地形起伏および地表面粗度による竜巻風速への影響

竜巻の渦が上り斜面を移動する際は竜巻の渦は弱まり、下り斜面を移動する時には強まる（図 3-25）。

また、地表面粗度の増加とともに竜巻風速が低下することが知られている。

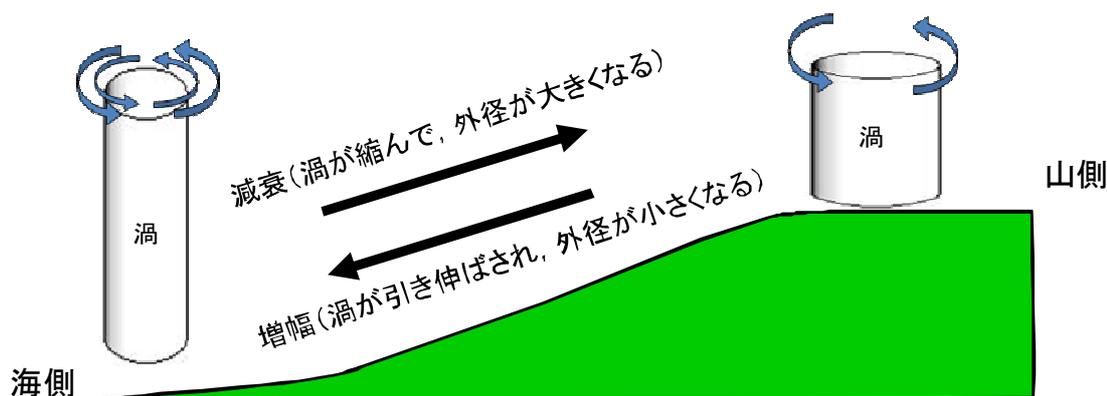


図 3-25 竜巻旋回流の地形影響に関する模式図

#### 3.5.2 設計竜巻の最大風速( $V_D$ )

図 3-26, 図 3-27, 図 3-28 に竜巻検討地域において観測された竜巻の移動方向, 図 3-29 に女川原子力発電所周辺の地表面粗度区分を示す。

図 3-26, 図 3-27, 図 3-28 に示すように、竜巻検討地域で観測された竜巻のうち、移動方向が確認されている竜巻に関しては、全て沿岸部で発生しており、海上から陸側へ向かう方向（斜面を上る方向）で減衰する方向となる。

また、図 3-29 に示すとおり、海上から竜巻が侵入した場合においても、女川原子力発電所の立地する地形は、三方を山に囲まれ北東が開かれた狭隘な地形であることおよび周辺の森林等によって海上よりも地表面粗度が増加する地形であるため減速する方向となる。

よって、女川原子力発電所において地形効果による竜巻の増幅は考慮する必要はないため、基準竜巻の割り増しは行わず、設計竜巻の最大風速( $V_D$ )は 69m/s とする。

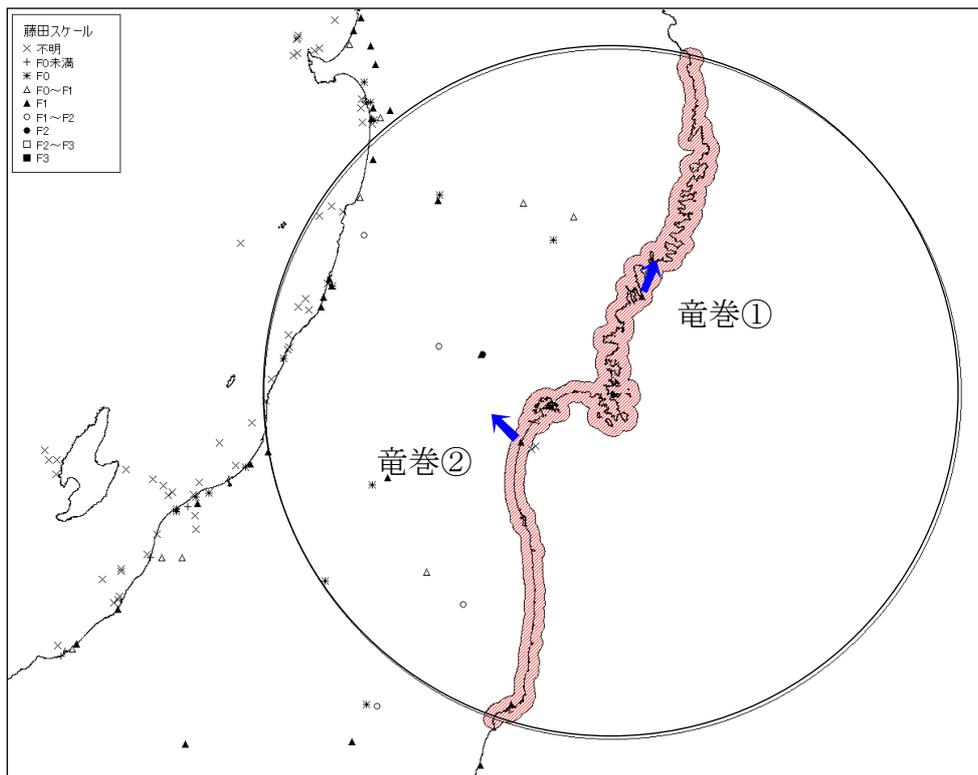


図 3-26 竜巻検討地域で観察された竜巻の移動方向

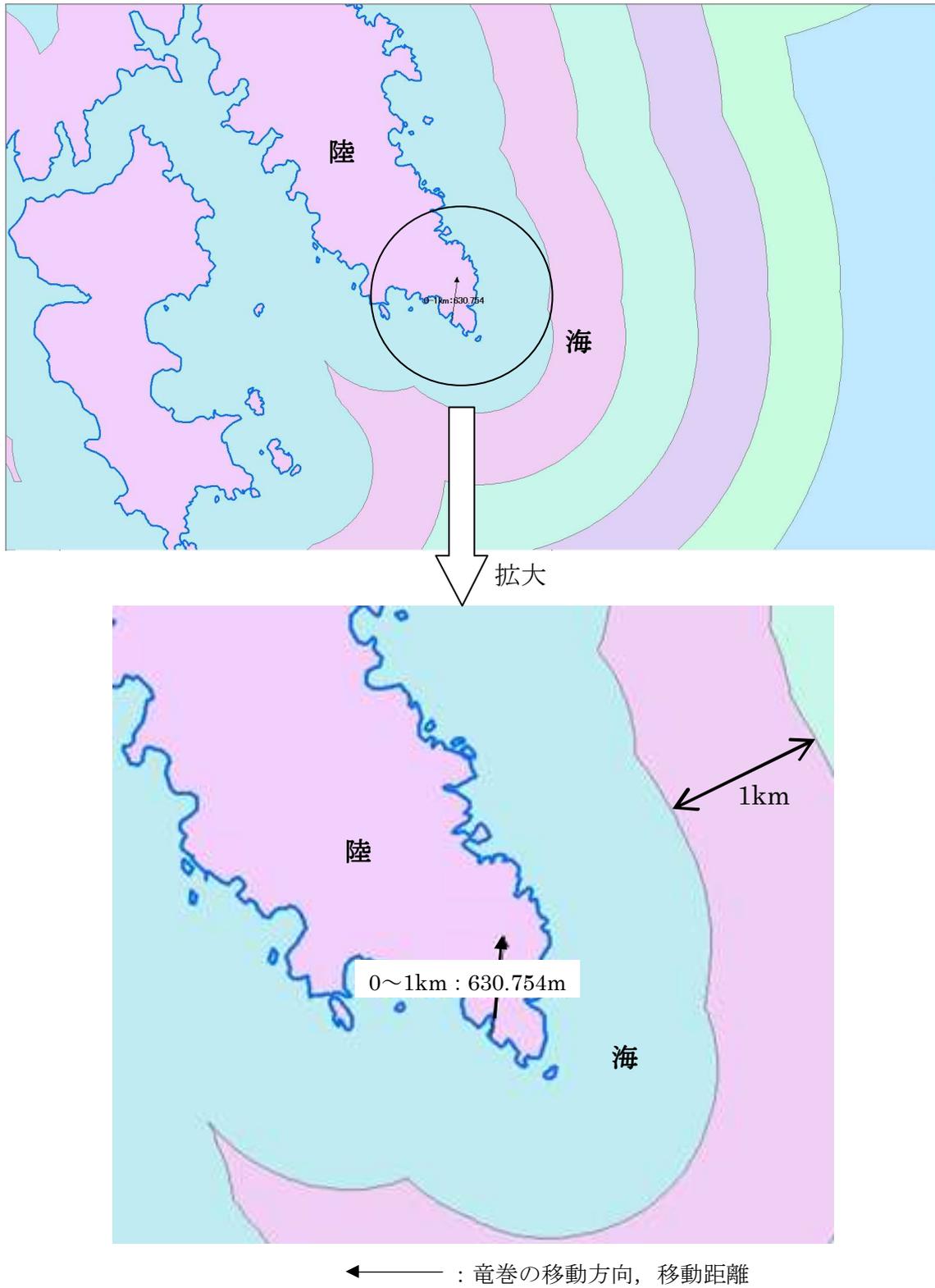


図 3-27 1992 年 8 月 7 日宮城県唐桑町での発生竜巻①の移動方向, 移動距離

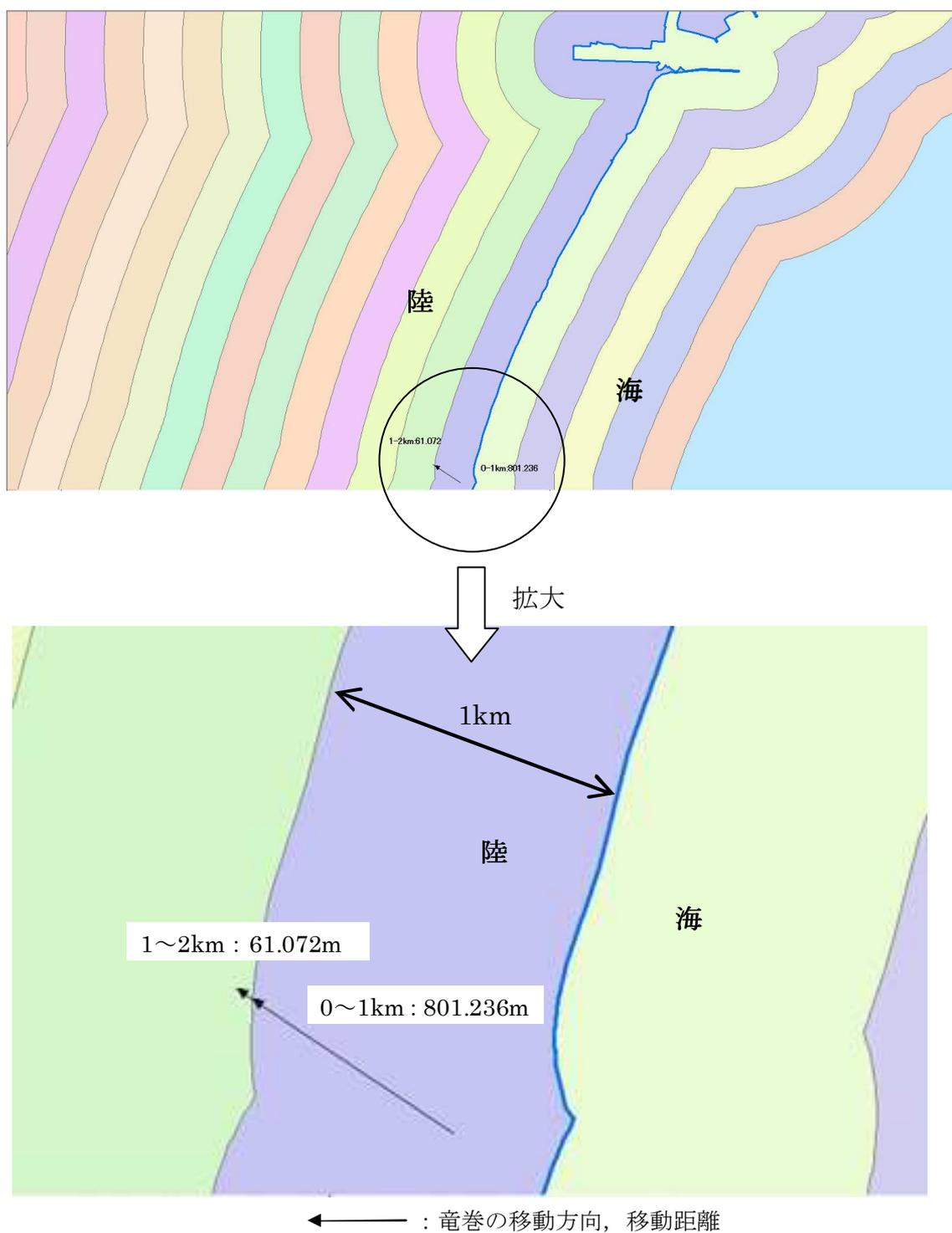


図 3-28 1998 年 9 月 16 日宮城県名取市での発生竜巻②の移動方向, 移動距離

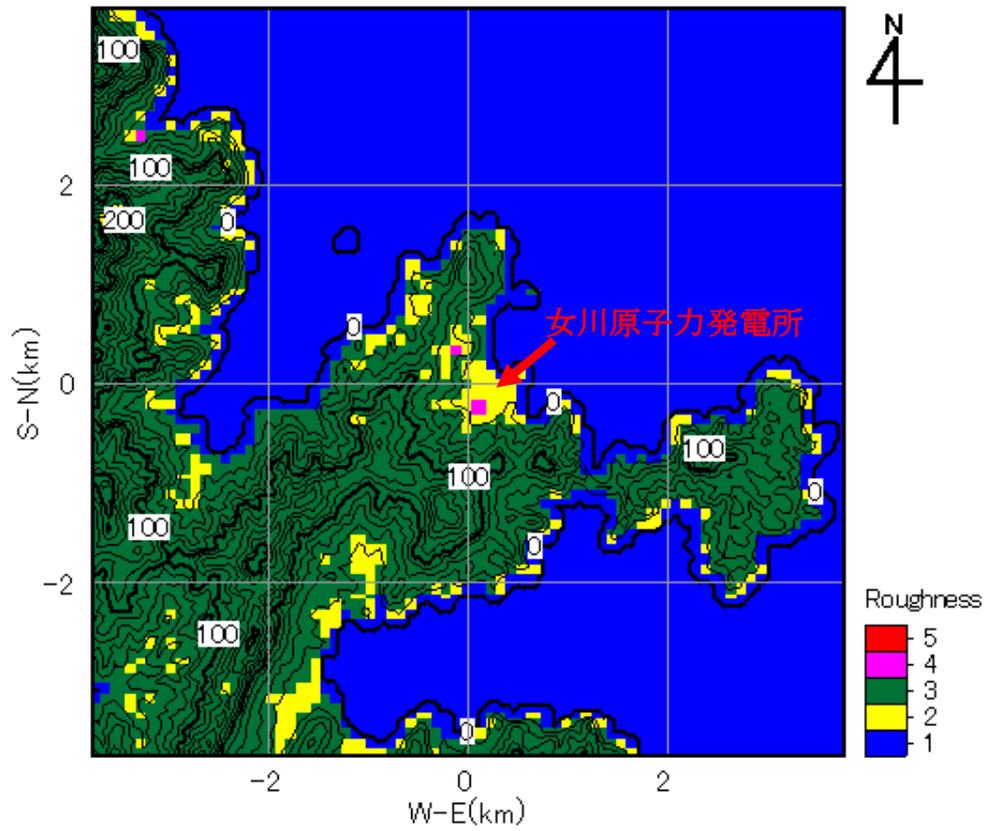


図 3-29 女川原子力発電所周辺の地表面粗度

### 3.5.3 設計竜巻の特性値

設計竜巻の特性値はフジタモデルを適用し、以下の(1)～(5)に従い設定した。  
設計竜巻の特性値を表 3-14 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( $\Delta P_{\max}$ )

数値解析による

- (5) 設計竜巻の最大気圧低下率( $(dp/dt)_{\max}$ )

数値解析による

表 3-14 設計竜巻の特性値

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 $\Delta P_{\max}$ (hPa)	最大気圧低下率 $(dp/dt)_{\max}$ (hPa/s)
69	10	59	30	37	17

竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出について

評価対象施設は「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」（以下、「重要度分類指針」という。）におけるクラス1，2に該当する施設（竜巻防護施設）から以下の観点に基づき抽出を行った。

- ①屋外設備か。
- ②外気と繋がる設備か。
- ③外殻となる施設による防護機能が期待できない設備か。

添1-1

重要度分類指針				女川原子力発電所2号炉		抽出の観点			外殻施設 （※1）	評価対象施設	備考
分類	定義	機能	構築物，系統又は機器	構築物，系統又は機器		①	②	③			
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。）	原子炉圧力容器	-	-	-	R	-		
				原子炉再循環ポンプ	-	-	-	R	-		
				配管，弁	-	-	-	R	-		
				原子炉圧力容器バウンダリ隔離弁	-	-	-	R	-		
				制御棒駆動機構ハウジング	-	-	-	R	-		
				中性子束モニタハウジング	-	-	-	R	-		
		2) 過剰反応度の印加防止機能	制御棒カップリング	制御棒カップリング	-	-	-	R	-		
				炉心シュラウド	-	-	-	R	-		
		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。）	シュラウドサポート	-	-	-	R	-		
				上部格子板	-	-	-	R	-		
				炉心支持板	-	-	-	R	-		
				燃料支持金具	-	-	-	R	-		
				制御棒案内管	-	-	-	R	-		
				制御棒駆動機構ハウジング	チャンネルボックス	-	-	-	R	-	
燃料集合体（上部タイププレート）	-			-	-	R	-				
燃料集合体（下部タイププレート）	-			-	-	R	-				
燃料集合体（スパーサ）	-	-	-	R	-						
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））	制御棒	-	-	-	R	-		
				制御棒案内管	-	-	-	R	-		
				制御棒駆動機構	水圧制御ユニット（スクラムパイロット弁，スクラム弁，アキュムレータ，窒素容器，配管，弁）	-	-	-	R	-	
				制御棒	-	-	-	R	-		
		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）	制御棒カップリング	-	-	-	R	-		
				-	制御棒駆動機構	-	-	-	R	-	
				-	制御棒駆動機構ハウジング	-	-	-	R	-	
				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）	-	-	-	R	-		
				制御棒	-	-	-	R	-		
				制御棒案内管	-	-	-	R	-		
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）	主蒸気逃がし安全弁（安全弁としての開機能）	-	-	-	R	-				

※1 R：2号原子炉建屋，C：1,2号制御建屋，T：2号タービン建屋，L0：2号軽油タンク室（仮称）

※2 竜巻防護施設の付属設備のうち屋外にある設備（波及的影響を及ぼし得る施設）

添付資料1

重要度分類指針				女川原子力発電所 2号炉			抽出の観点			外殻施設 (※1)	評価対象施設	備考
分類	定義	機能	構築物, 系統又は機器	構築物, 系統又は機器			①	②	③			
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及び弁)	熱交換器 バイパス配管及び弁	-	-	-	R	-		
				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)	タービンへの蒸気供給配管, 弁	-	-	-	R	-		
					ポンプミニマムフローラインの配管, 弁	-	-	-	R	-		
					サプレッションプールストレーナ	-	-	-	R	-		
					復水貯蔵タンク	○	-	-	-	○		
					復水貯蔵タンク出口水源切替弁	-	-	-	R	-		
					ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込配管, 弁	-	-	-	R	-		
				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)	潤滑油冷却系及びその冷却器までの冷却水供給配管	-	-	-	R	-		
					ポンプミニマムフローラインの配管, 弁	-	-	-	R	-		
					サプレッションプールストレーナ	-	-	-	R	-		
					復水貯蔵タンク	○	-	-	-	○		
					復水貯蔵タンク出口水源切替弁	-	-	-	R	-		
		ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込配管, 弁	-		-	-	R	-				
		主蒸気逃がし安全弁 (手動逃がし機能)	原子炉圧力容器から主蒸気逃がし安全弁までの主蒸気配管	-	-	-	R	-				
			駆動用窒素源 (アキュムレータ, アキュムレータから主蒸気逃がし安全弁までの配管, 弁)	-	-	-	R	-				
自動減圧系 (手動逃がし機能)	原子炉圧力容器から主蒸気逃がし安全弁までの主蒸気配管	-	-	-	R	-						
	駆動用窒素源 (アキュムレータ, アキュムレータから主蒸気逃がし安全弁までの配管, 弁)	-	-	-	R	-						
5) 炉心冷却機能	非常用炉心冷却系 (低圧炉心スプレイ系, 低圧注水系, 高圧炉心スプレイ系, 自動減圧系)	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 (熱交換器バイパスライン含む), 注水ヘッド)	ポンプミニマムフローラインの配管, 弁	-	-	-	R	-				
		サプレッションプールストレーナ	-	-	-	R	-					

※1 R: 2号原子炉建屋, C: 1, 2号制御建屋, T: 2号タービン建屋, LO: 2号軽油タンク室 (仮称)

※2 竜巻防護施設の付属設備のうち屋外にある設備 (波及的影響を及ぼし得る施設)

重要度分類指針				女川原子力発電所 2号炉			抽出の観点			外殻施設 (※1)	評価対象施設	備考
分類	定義	機能	構築物, 系統又は機器	構築物, 系統又は機器			①	②	③			
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 (低圧炉心スプレイ系, 低圧注水系, 高圧炉心スプレイ系, 自動減圧系)	低圧炉心スプレイ系 (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, スプレイヘッダ)	ポンプミニマムフローラインの配管, 弁	-	-	-	R	-		
					サプレッションプールストレナ	-	-	-	R	-		
					ポンプミニマムフローラインの配管, 弁	-	-	-	R	-		
					サプレッションプールストレナ	-	-	-	R	-		
					復水貯蔵タンク	○	-	-	-	○		
					復水貯蔵タンク出口水源切替弁	-	-	-	R	-		
					ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込配管, 弁	-	-	-	R	-		
					原子炉圧力容器から主蒸気逃がし安全弁までの主蒸気配管	-	-	-	R	-		
					自動減圧系 (主蒸気逃がし安全弁)	駆動用窒素源 (アキュムレータ, アキュムレータから主蒸気逃がし安全弁までの配管, 弁)	-	-	-	R	-	
						ベント管	-	-	-	R	-	
			原子炉格納容器 (格納容器本体, 貫通部, 所員用エアロック, 機器搬出入用ハッチ)	スプレイ管	-	-	-	R	-			
				真空破壊弁	-	-	-	R	-			
				主蒸気逃がし安全弁排気管のクエンチャ	-	-	-	R	-			
			原子炉建屋 (原子炉建屋原子炉棟)	原子炉棟給排気隔離弁	-	○	-	R	○			
			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	原子炉格納容器隔離弁及び格納容器バウンダリ配管	主蒸気隔離弁駆動用空気又は窒素源 (アキュムレータ, アキュムレータから主蒸気隔離弁までの配管, 弁)	-	-	-	R	-		
				主蒸気流量制限器		-	-	-	R	-		
				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プレッションプール))	ポンプミニマムフローラインの配管, 弁	-	-	-	R	-		
					サプレッションプールストレナ	-	-	-	R	-		

※1 R: 2号原子炉建屋, C: 1,2号制御建屋, T: 2号タービン建屋, LO: 2号軽油タンク室 (仮称)

※2 竜巻防護施設の付属設備のうち屋外にある設備 (波及的影響を及ぼし得る施設)

重要度分類指針				女川原子力発電所 2 号炉			抽出の観点			外設 施設 (※1)	評価 対象 施設	備考
分類	定義	機能	構築物, 系統又は機器	構築物, 系統又は機器			①	②	③			
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	非常用ガス処理系 (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までの配管, 排気筒, 弁)	乾燥装置 (乾燥機能部分)	○	-	-	R	○	一部の配管は屋外に設置	
				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)	残留熱除去系 (再結合装置への冷却水供給をつかさどる部分)	-	-	-	R	-		
				遮へい設備 (原子炉遮へい壁, 一次遮へい壁, 二次遮へい壁)		-	-	-	R	-		
	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)	原子炉保護系の安全保護回路		-	-	-	R, C	-		
				・非常用炉心冷却系作動の安全保護回路		-	-	-	R, C	-		
				・主蒸気隔離の安全保護回路		-	-	-	R, C	-		
				・原子炉格納容器隔離の安全保護回路		-	-	-	R, C	-		
				・非常用ガス処理系作動の安全保護回路		-	-	-	R, C	-		
				燃料系 (デイトンクからディーゼル機関まで)	○	-	-	R	○	燃料油ドレンタンクミスト配管(※2)		
					※2	-	-	R	-			
				始動用空気系 (空気だめからディーゼル機関まで)	-	-	-	R	-			
					-	-	-	R	-			
				吸気系	○	-	-	R	○	排気消音器(※2)		
	※2	-	-		R	-						
	冷却水系	-	-	-	R	-						
		-	-	-	R	-						
潤滑油系	○	-	-	R	○	機関ミスト配管, 潤滑油サンブタンクミスト配管, 潤滑油補給タンクミスト配管(※2)						
	※2	-	-	R	○							
燃料移送系 (軽油タンクからデイトンクまで)	○	-	-	R, LO	○	燃料デイトンクミスト配管(※2)						
	※2	-	-	R, LO	○							
軽油タンク	○	○	-	LO	○	軽油タンクベント配管(※2)						
	※2	○	-	LO	○							
中央制御室及び中央制御室遮へい		-	-	-	C	-						
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) (再循環送風機, 再循環フィルタ装置, 空気調和装置, 送風機, 排風機, ダクト及びダンバ)		-	○	-	C	○						
原子炉補機冷却水系 (ポンプ, 熱交換器, 非常用系負荷冷却ライン配管, 弁 (MS-1 関連))	サージタンク	-	-	-	R	-						
	サージタンク	-	-	-	R	-						

※1 R: 2号原子炉建屋, C: 1, 2号制御建屋, T: 2号タービン建屋, LO: 2号軽油タンク室 (仮称)

※2 竜巻防護施設の付属設備のうち屋外にある設備 (波及的影響を及ぼし得る施設)

重要度分類指針				女川原子力発電所 2号炉		抽出の観点			外設 施設 (※1)	評価 対象 施設	備考	
分類	定義	機能	構築物, 系統又は機器	構築物, 系統又は機器		①	②	③				
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)	原子炉補機冷却海水系 (ポンプ, 配管, 弁, ストレーナ (MS-1 関連))	ストレーナ (異物除去機能をつかさどる部分)	○	-	-	R	○	ポンプ, 一部の配管及び弁は屋外に設置	
				取水路 (屋外トレンチ含む)		-	-	-	-	-	-	地下埋設
				高圧炉心スプレイ補機冷却海水系 (ポンプ, 配管, 弁, ストレーナ)	ストレーナ (異物除去機能をつかさどる部分)	○	-	-	R	○	ポンプ, ストレーナ, 一部の配管及び弁は屋外に設置	
				取水路 (屋外トレンチ含む)		-	-	-	-	-	-	地下埋設
				直流電源設備 (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))		-	-	-	R, C	-		
				計測制御用電源設備 (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))		-	-	-	R, C	-		
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以外の部分)		-	-	-	R	-		
				主蒸気系 (原子炉冷却材圧力バウンダリ以外の部分)		-	-	-	R, T	-		
				原子炉隔離時冷却系 (原子炉冷却材圧力バウンダリ以外の部分でタービン止め弁まで)		-	-	-	R	-		
				気体廃棄物処理系 (活性炭式希ガスホールドアップ装置)		-	-	-	T	-		
	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。)	使用済燃料プール (使用済燃料貯蔵ラックを含む)		-	-	-	R	-			
			新燃料貯蔵庫 (臨界を防止する機能) (新燃料貯蔵ラック)		-	-	-	R	-			
			燃料交換機	原子炉ウエル	-	-	-	R	-			
	3) 燃料を安全に取り扱う機能	燃料取扱設備	原子炉建屋クレーン		-	-	-	R	-			
			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)	主蒸気逃がし安全弁 (吹き止まり機能)		-	-	-	R	-
	1) PS-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)	ポンプミニマムフローラインの配管, 弁	-	-	-	R
サブプレッションプールストレーナ				-	-		-	R	-			
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管の支持機能以外)	気体廃棄物処理系の隔離弁		-	-	-	T	-			
			排気筒		○	-	-	-	○			
燃料プール冷却浄化系の燃料プール入口逆止弁		-	-	-	R	-						

※1 R: 2号原子炉建屋, C: 1, 2号制御建屋, T: 2号タービン建屋, L0: 2号軽油タンク室 (仮称)

※2 竜巻防護施設の付属設備のうち屋外にある設備 (波及的影響を及ぼし得る施設)

重要度分類指針				女川原子力発電所 2 号炉			抽出の観点			外殻施設 (※1)	評価対象施設	備考
分類	定義	機能	構築物, 系統又は機器	構築物, 系統又は機器			①	②	③			
MS-2	1) PS-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 (原子炉建屋原子炉棟)	原子炉棟給排気隔離弁	-	○	-	R	○		
				非常用ガス処理系 (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までの配管, 排気筒, 弁)	乾燥装置 (乾燥機能部分)	○	-	-	R	○	一部の配管は屋外に設置	
	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 (起動領域モニタ)		-	-	-	R, C	-		
				・原子炉スクラム用電磁接触器の状態								
				・制御棒位置								
・原子炉水位 (広帯域, 燃料域)	[低温停止への移行]	・原子炉圧力	-	-	-	-	-	-				
・原子炉圧力												
・原子炉格納容器圧力	[ドライウェルスプレイ]	・原子炉水位 (広帯域)	-	-	-	-	-	-	-			
・サブプレッションプール水温度												
・格納容器内雰囲気モニタ (放射線レベル)	[サブプレッションプール冷却]	・原子炉水位 (広帯域, 燃料域)	-	-	-	-	-	-	-			
・原子炉格納容器圧力												
2) 異常状態の緩和機能	3) 制御室外からの安全停止機能	BWR には対象機能なし	制御室外原子炉停止装置 (安全停止に関連するもの)	(対象外)	-	-	-	-	-	-		
				中央制御室外原子炉停止装置	-	-	-	C	-			

※1 R: 2号原子炉建屋, C: 1, 2号制御建屋, T: 2号タービン建屋, L0: 2号軽油タンク室 (仮称)

※2 竜巻防護施設の付属設備のうち屋外にある設備 (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の抽出について

竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設として、竜巻防護施設の外壳となる建物等に隣接する施設、倒壊により竜巻防護施設または竜巻防護施設の外壳となる建物等に損傷を及ぼし得る施設および竜巻防護施設の付属施設のうち屋外にある施設を抽出し、竜巻影響評価対象施設とした。

竜巻防護施設等に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出フローを図1に示す。

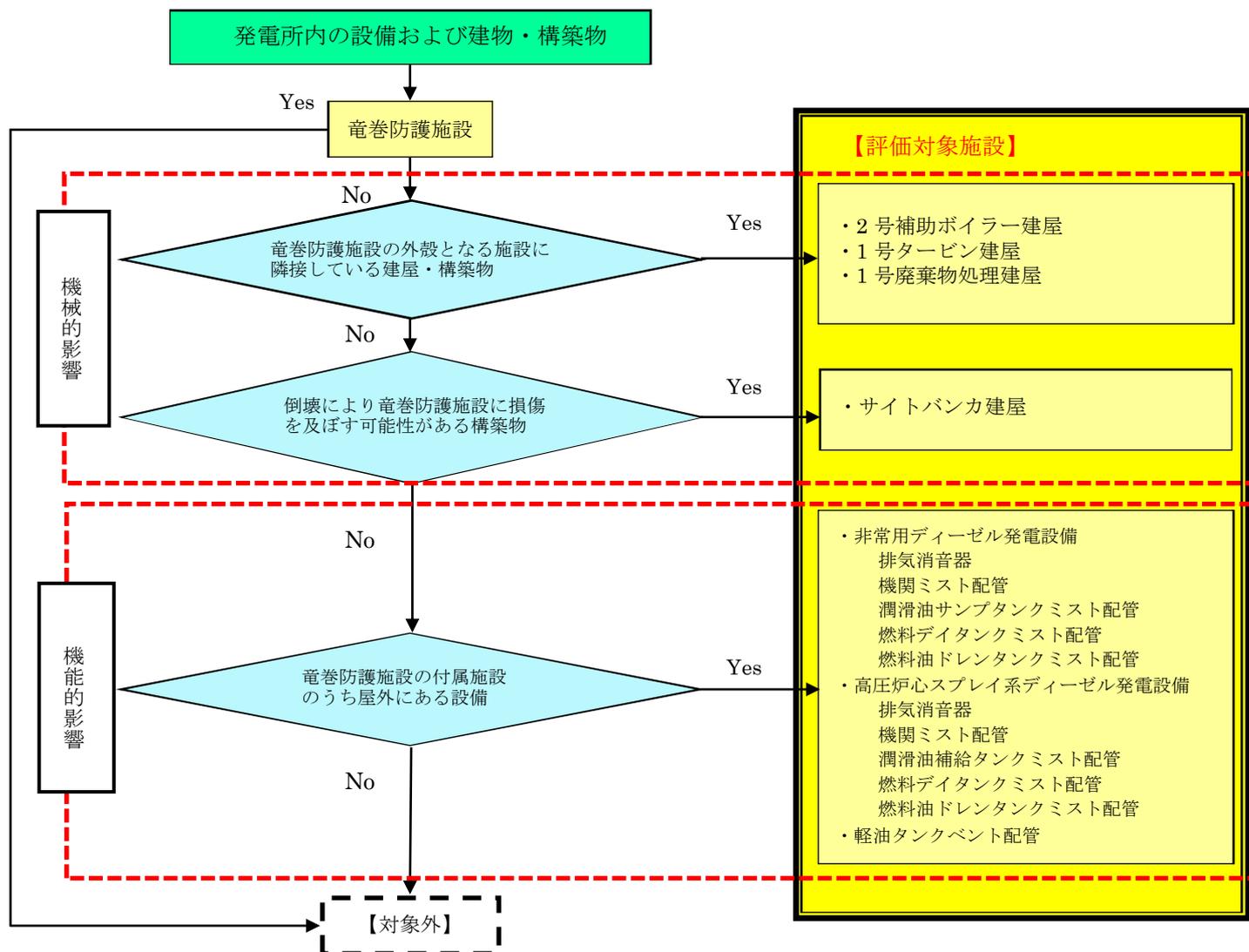


図1 竜巻影響評価対象施設抽出フロー  
(竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設)

- (1) 竜巻防護施設または竜巻防護施設の外殻となる建物等に隣接する施設  
 竜巻防護施設または竜巻防護施設の外殻となる建物等に隣接する施設について機械的な影響を考慮し、竜巻影響評価対象施設として抽出した。具体的な位置関係を図2に示す。抽出結果を表1および図4に示す。

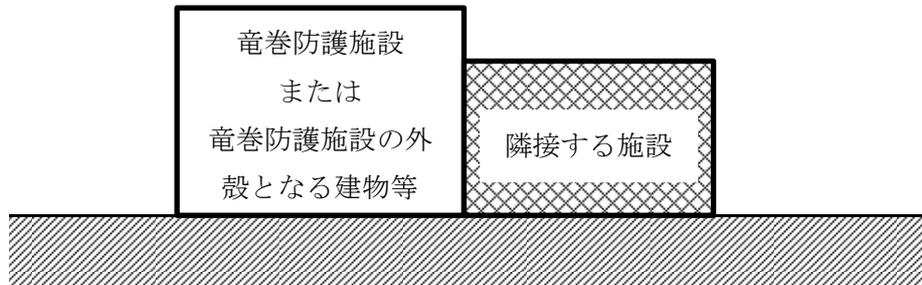


図2 竜巻防護施設または竜巻防護施設の外殻となる建物等に隣接する施設

- (2) 倒壊により竜巻防護施設または竜巻防護施設の外殻となる建物等に損傷を及ぼし得る施設

倒壊により竜巻防護施設または竜巻防護施設の外殻となる建物等に損傷を及ぼし得る施設について機械的な影響を考慮し、竜巻影響評価対象施設として抽出した。

具体的には、図3に示すとおり、地上高さが竜巻防護施設または竜巻防護施設の外殻となる建物等との距離以上である施設を抽出した。抽出結果を表1および図4に示す。

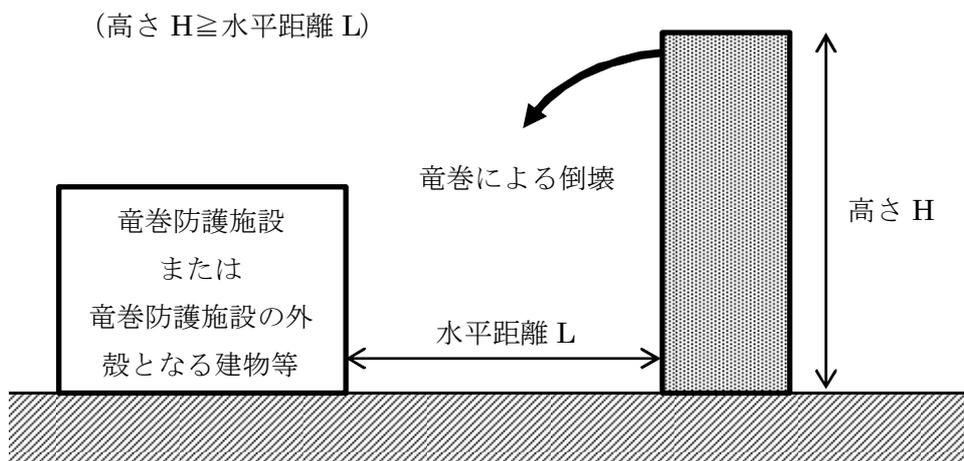


図3 倒壊により竜巻防護施設または竜巻防護施設の外殻となる建物等に損傷を及ぼし得る施設

表1 機械的影響の観点からの抽出結果

竜巻防護施設および竜巻防護施設の外殻施設へ損傷を及ぼす可能性のある建屋および構築物等	竜巻防護施設および竜巻防護施設の外殻となる建屋および構築物等	地上高(m)	竜巻防護施設等までの最短距離(m)	抽出結果
2号補助ボイラー建屋	2号制御建屋 2号タービン建屋	—	隣接	○
1号タービン建屋	1号制御建屋	—	隣接	○
1号廃棄物処理建屋	1号制御建屋	—	隣接	○
海水ポンプ室門型クレーン	原子炉補機冷却海水ポンプ等	約23	約36	—
窒素貯槽	2号原子炉建屋	約4	約9	—
サイトバンカ建屋	2号タービン建屋	約44	約22	○
275kV送電鉄塔(No.3)	2号排気筒	約78	約140	—
固化剤タンク	2号原子炉建屋	約6	約12	—
VVVF変圧器	2号原子炉建屋	約3	約8	—
2号除塵装置電源室	2号軽油タンク室(仮称)	約5	約11	—

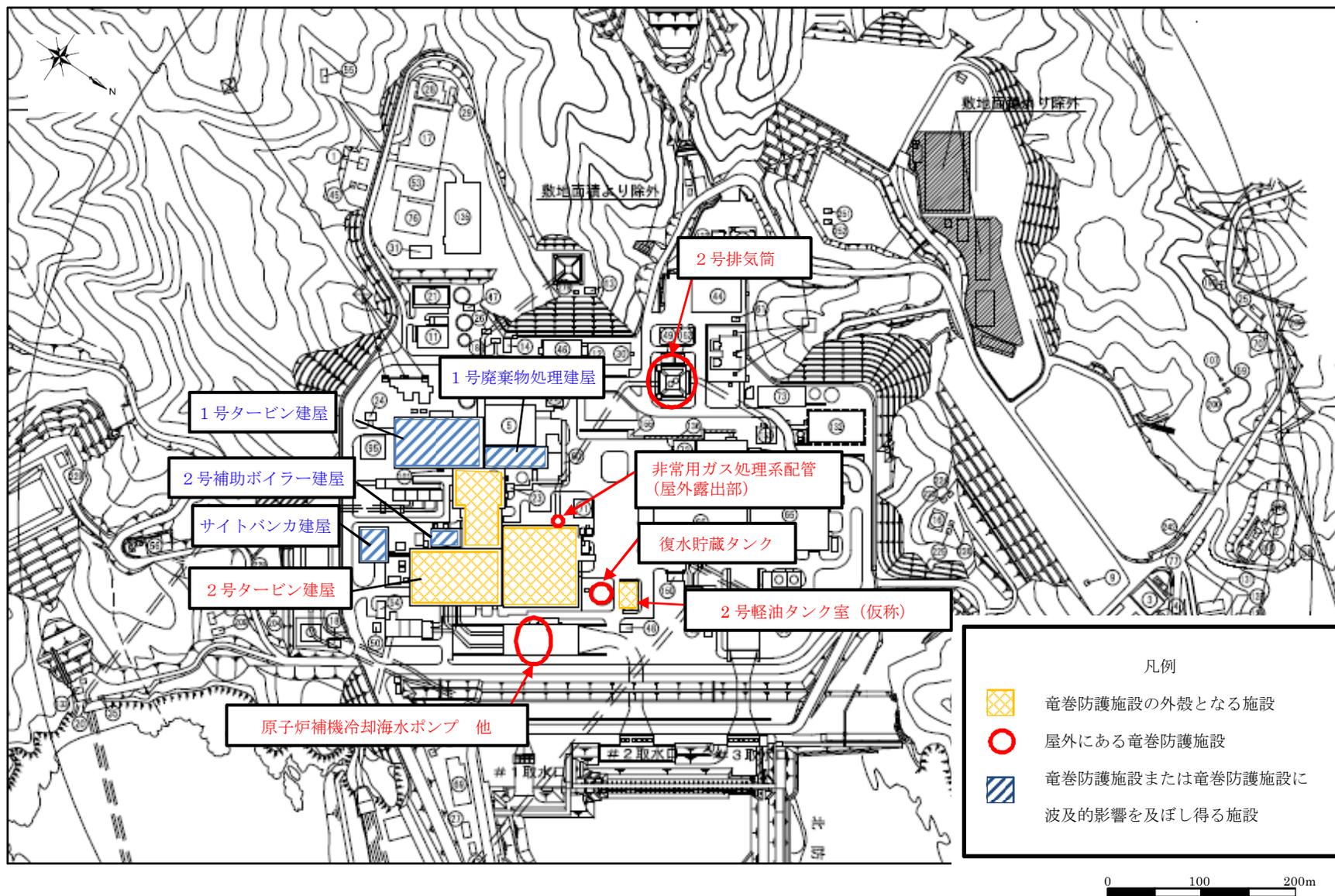


図 4 機械的影響の観点からの抽出結果

(3) 竜巻防護施設の付属施設のうち屋外にある設備

竜巻防護施設の付属施設のうち屋外にある設備について、竜巻防護施設に対する機能的な影響を考慮し、竜巻評価対象施設として抽出した。抽出結果を表2に示す。

表2 機能的影響の観点からの抽出結果

竜巻防護施設	屋外にある付属施設
非常用ディーゼル発電設備	排気消音器
	機関ミスト配管
	潤滑油サンプタンクミスト配管
	燃料デイトンクミスト配管
	燃料油ドレンタンクミスト配管
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備	排気消音器
	機関ミスト配管
	潤滑油補給タンクミスト配管
	燃料デイトンクミスト配管
	燃料油ドレンタンクミスト配管
軽油タンク	軽油タンクベント配管

## 津波防護施設等の取扱いについて

竜巻防護施設は重要度分類指針に基づくクラス1，クラス2の施設をもとに抽出している。

一方、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」における竜巻防護施設は，耐震Sクラスの設計を要求される設備（系統・機能）および建屋・構築物等とされている。上記クラス1，クラス2以外で耐震Sクラスの設計を要求される設備（系統・機能）および建屋・構築物等としては，津波防護施設（防潮堤，防潮壁）等の津波に対処する設備がある。

しかし，こうした津波防護施設等は竜巻発生時にその機能を期待するものではないため，竜巻と津波の重畳事象が発生する頻度の観点から，この取扱いについて検討した。

設計竜巻の発生頻度は $4.2 \times 10^{-9}$ /年と低く，竜巻と津波の重畳事象の発生頻度を考えた場合，さらに発生頻度は低くなることから，考慮すべき重畳事象としては十分にスクリーニングレベルにある。

また，津波防護施設等は，竜巻防護対象設備に対し波及的影響を及ぼさないと評価している。

以 上

## 地域特性の分析について

## 1. 気候区分による分析

気候区分（関口 1959）は、以下の 4 種類の気候要素を基に、気候の境界を表したものである。

- ① 気温の日較差（1 日の最高気温と最低気温の差）
- ② 雨天日数
- ③ 日照率
- ④ 気候の乾湿

4 つの気候要素を基に作成された気候区分を図 1-1 に示す。図 1-1 より、日本海側（裏日本）と太平洋側（表日本）は判然と区別されていることが分かる。

なお、図 1-2～5 に示すとおり、①～④の各気候要素の気候区分、いずれにおいても日本海側（裏日本）と太平洋側（表日本）は判然と区別されている。

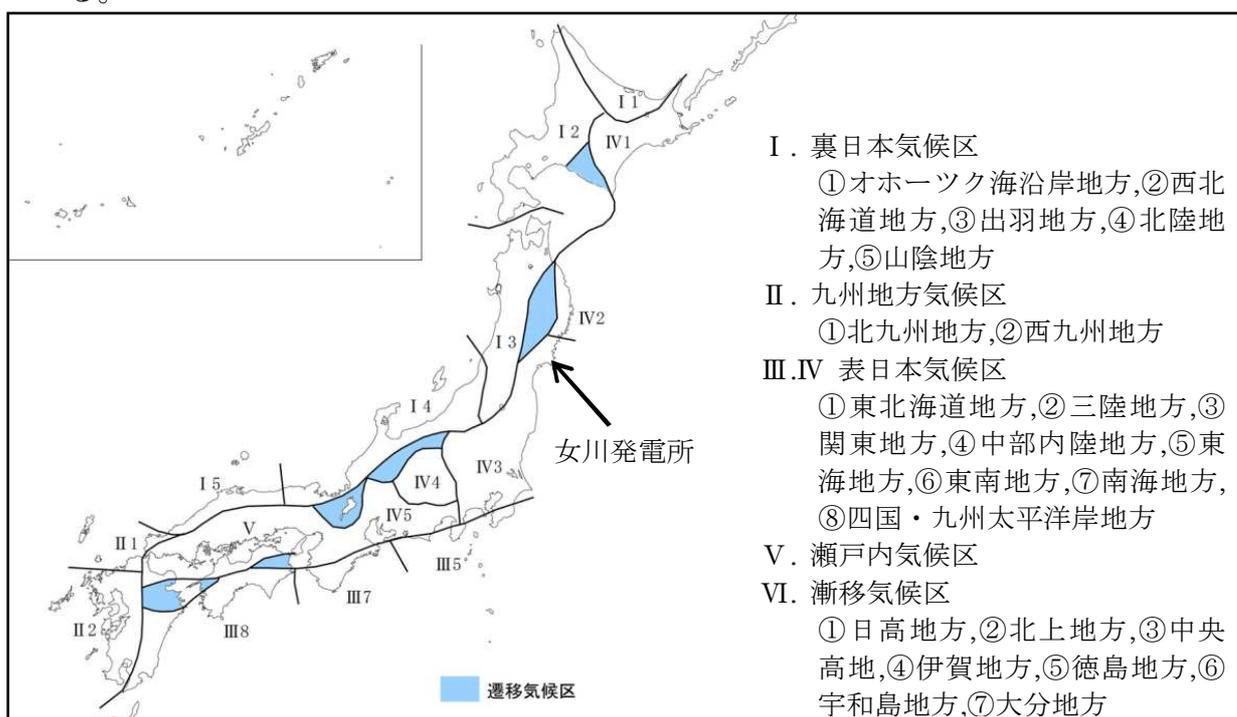


図 1-1 日本の気候区分（関口）

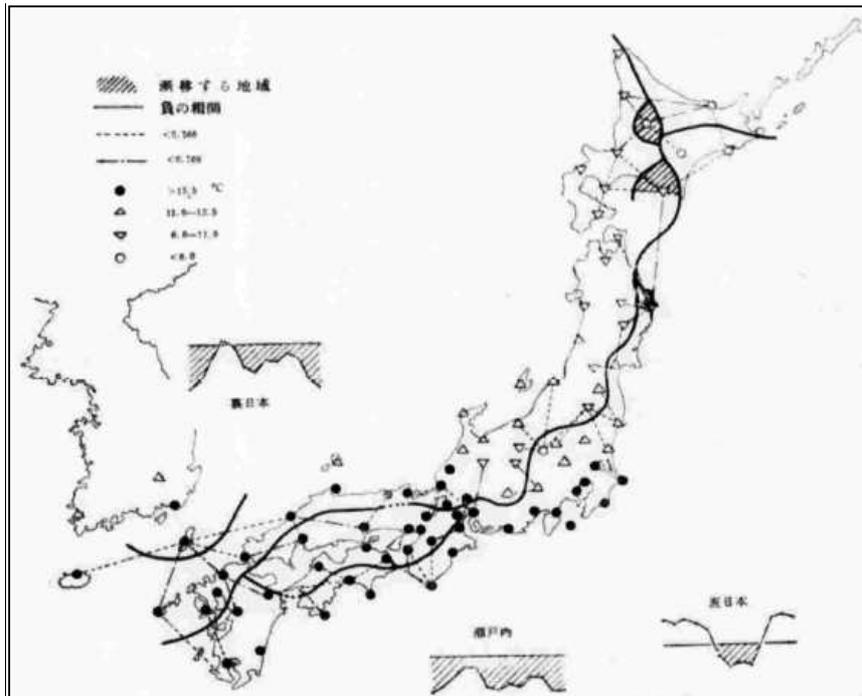


図 1-2 気温の日較差の年変化型による気候区分

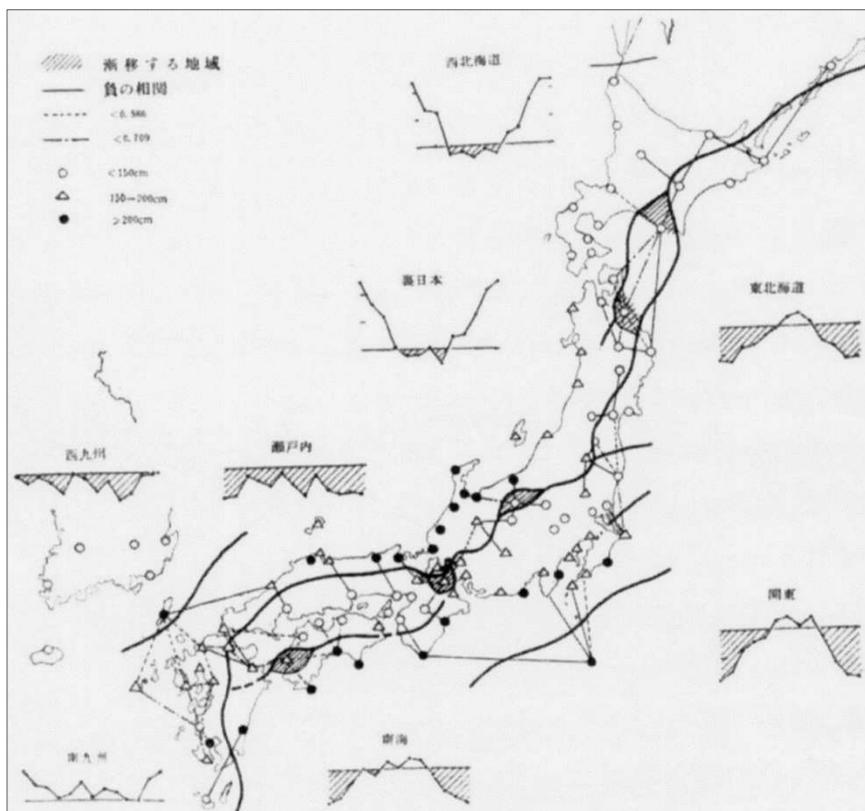


図 1-3 雨天日数による気候区分

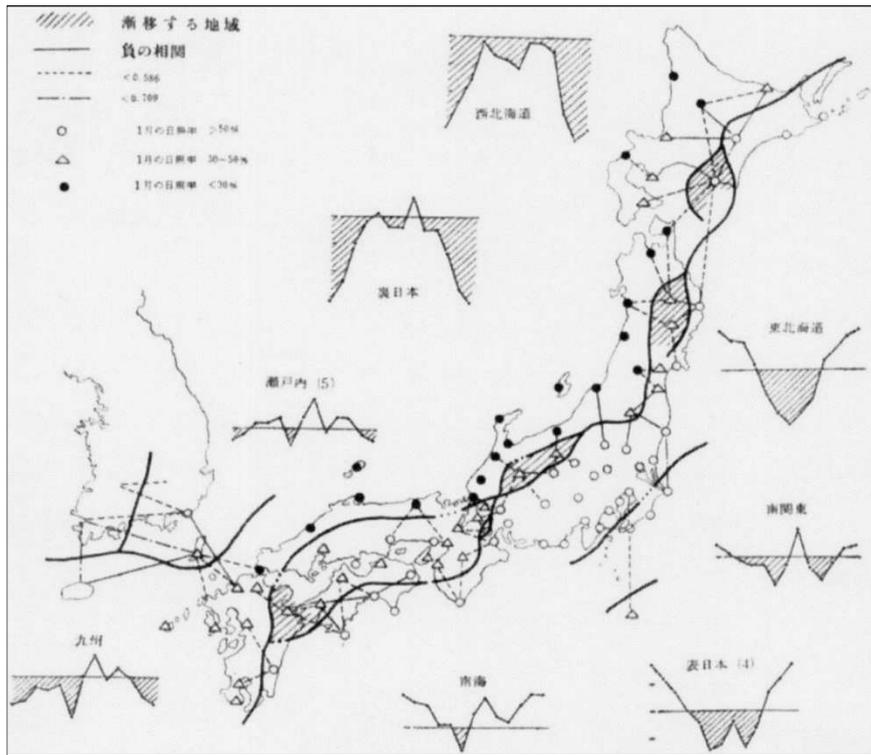


図 1-4 日照率による気候区分

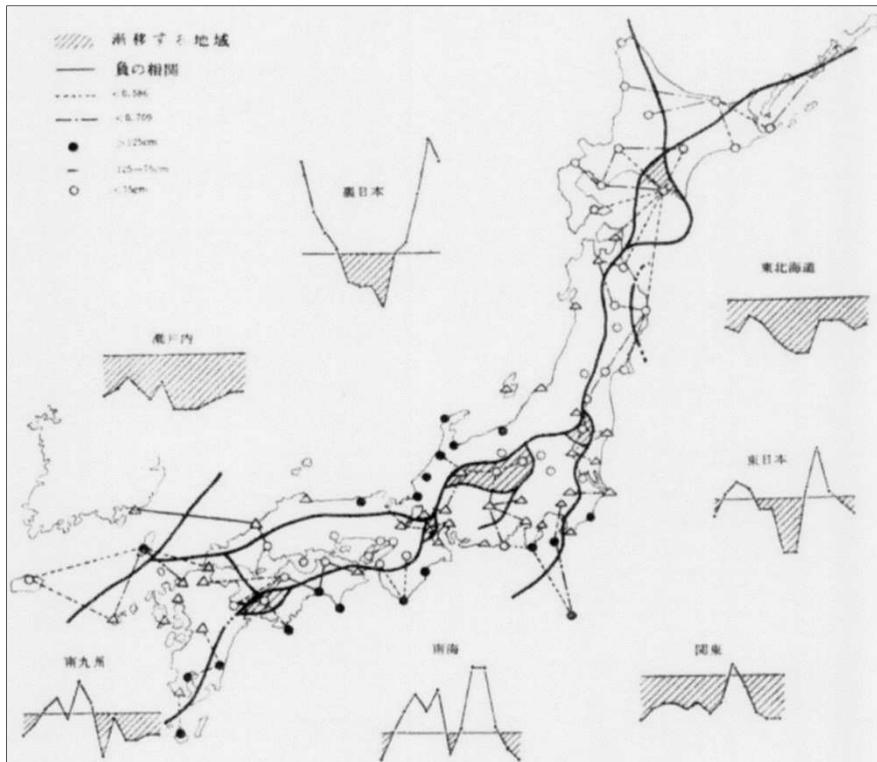


図 1-5 気候の乾湿による気候区分

## 2. 突風関連指数による分析

### 2.1 突風関連指数

突風関連指数はこれまで数多く提案されており，気象庁においても竜巻探知・予測に活用されている。ここでは，国内外で最も知見が蓄積された指数として SReH (Storm Relative Helicity : ストームの動きに相対的なヘリシティ； Davies-Jones et al. 1990)，CAPE (Convective Available Potential Energy : 対流位置有効エネルギー； Moncrieff and Miller 1976) を用いる。

図 2.1-1 および図 2.1-2 にそれぞれ，両指数の算出概念を表す。概して，SReH は風の鉛直シア（高度方向の風向・風速差）に伴って発生する大気の水平渦度が親雲に取り込まれる度合，CAPE は大気的不安定度合の指標である。値が大きいほどその度合が高くなる。大気下層の空気塊を「持ち上げて」乾燥断熱線および湿潤断熱線を求め，空気塊が自由対流高度に達した際に積乱雲の発達するポテンシャルとして CAPE を計算する。



図 2.1-1 SReH の算出概念

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

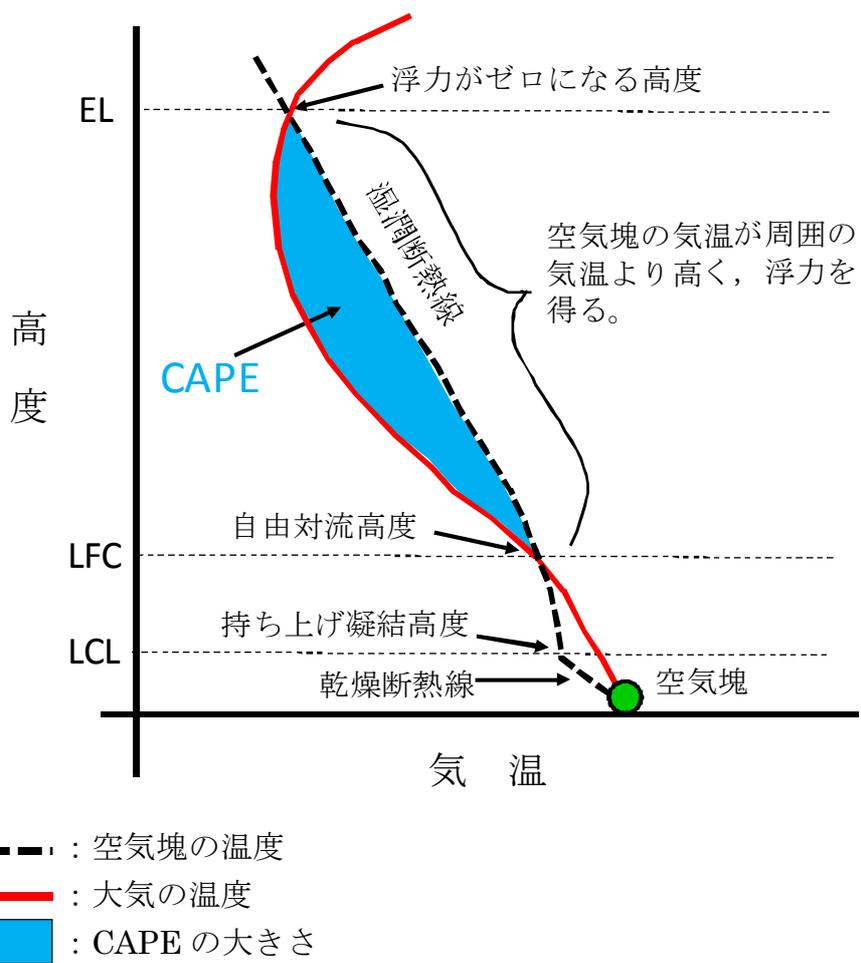


図 2.1-2 CAPE の算出概念

両指数の算出式は以下のとおりである。

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

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

ここで、式 (1) の  $\mathbf{V}$  は水平風速ベクトル、 $\boldsymbol{\omega}$  は鉛直シアに伴う水平渦度であり、 $\mathbf{C}$  のストームの移動速度は Bunkers et al. (2000) にしたがって求めた。式 (2) の  $g$  は重力加速度、 $\theta_e$  はストーム周囲の相当温位、 $\theta_e'$  は持ち上げ空気塊の相当温位であり、 $dz$  は鉛直方向の層厚である。LFC は自由対流高度と呼ばれ、前線周辺の風の水平方向の収束、太陽による地表面加熱、地

形による強制上昇等によって、空気塊がこの高度まで何らかの要因で持ち上げられると ( $\theta_e < \theta_e'$  となり) 自身の浮力だけで上昇し、平衡高度 EL ( $\theta_e = \theta_e'$  となる) に達するまで積乱雲が発達する (図 2.1-2)。なお、温位とは、式 (3) に示すように気温  $T$  と気圧  $p$  に関する量であり、ある空気塊を断熱的に基準圧力 1000 hPa に戻したときの絶対温度である。気温は高度によって変わるが、温位は同じ空気塊では常に一定 (断熱過程では温位は保存される) な物理量であるため、空気塊のあたたかさ、浮力特性、および不安定性を把握するのに用いられる (補足-1 参照)。

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

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

式 (1) を見ればわかるように、SReH は、上端高度の違いによって値が変わる。上端を地上から 3 km とした場合、その殆どが地上から 1 km までの大気によるヘリシティであるという指摘 (Rasmussen 2003) があるが、1 km 高さは夏場では境界層高さ (雲底高度) 程度と低めであるため、本検討では多くの既往検討と同様に 3 km とする。また、持ち上げる空気塊の性質によって CAPE の値は変わる。地表から 500 m 程度上空までの平均的な性質を持つ空気塊を持ち上げたときの MLCAPE (Mean Layer CAPE) がよく用いられる。本検討では、地表から 500 m 上空までで最も不安定な空気塊を持ち上げる。このようにして求められた CAPE は MUCAPE (Most Unstable CAPE) と呼ばれる。大気下層に冷気がありその上空で対流が発生する場合を考慮することができる。このような場合、MLCAPE では安定な大気とみなされることにより CAPE 値が非常に小さくなる傾向にある (補足-2 参照)。

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

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

## 2.2 突風関連指数の評価概要

竜巻発生時の気象場（風向・風速，気温，気圧，水蒸気量等）を数値気象モデルにより解析し，その解析結果をもとに突風関連指数を算出する。気象モデルとして WRF（Weather Research and Forecasting）モデル（Skamarock et al. 2005）バージョン 3.2.1 を用いた。主な計算条件は，表 2.2-1 に記すとおりであり，電力中央研究所による長期高解像度再解析データセット（橋本ら 2013）と同様の条件を採用しており，水平解像度 15 km で解析した結果をもとに水平解像度 5 km の結果を導出している。

これにより，粗い水平空間分解能（ECMWF-Interim：約 70 km，ERA40：約 250 km）の初期・境界値データからも詳細なメッシュの気象場が解析可能となっている。

なお，突風関連指数の解析結果は 30 分間隔で，その結果を出力している。

表 2.2-1 WRF モデルセットアップの概要

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

## 2.3 分析対象事例

分析対象事例は、表 2.3-1 に示すとおり、過去に発生した F3 竜巻（1987 年以前の F2-F3 竜巻は除く）、1988 年以降に日本海側で発生した F1-F2、F2 竜巻とした（F3 竜巻は 5 事例、F2-F3 竜巻は 1 事例、F2 竜巻は 3 事例、F1-F2 竜巻は 1 事例）。1987 年以前に発生した竜巻については、対象外とした（初期値・境界値データとして使用している ECMWF ERA40 の水平空間分解能が約 250 km と粗いために、竜巻通過時刻や発生箇所が実際に比べて乖離する場合があるため）。

ただし、F3 竜巻に対しては 1987 年以前の竜巻に対しても解析を行い、計算結果の適切性も確認している。なお、対象事例に対して適切性が低いことを理由に除外した事例はない。

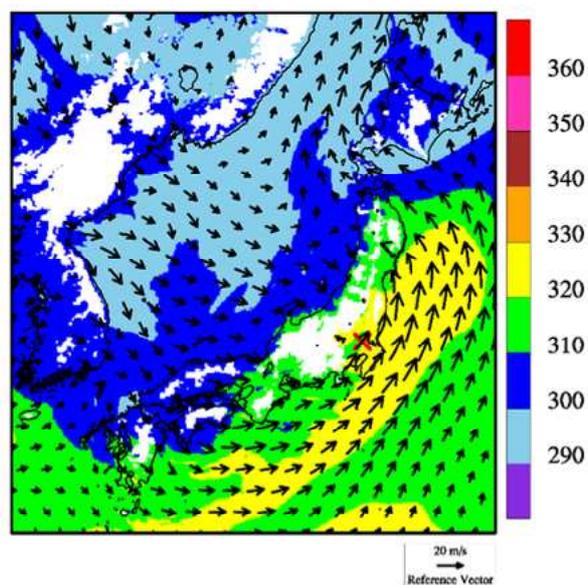
表 2.3-1 分析対象事例の概要

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

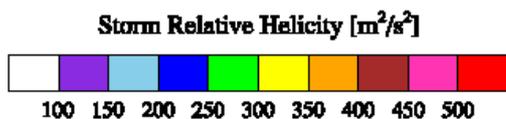
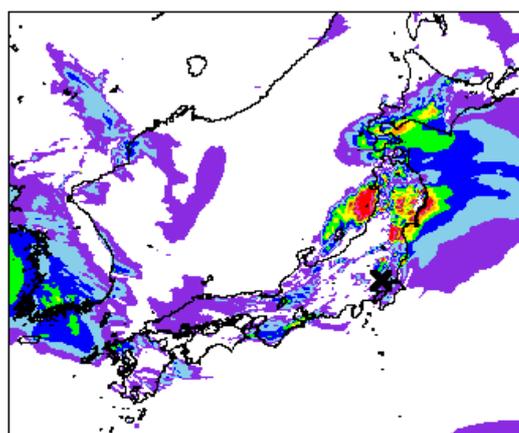
以下に、表 2.3-1 に示す分析対象事例について、突風関連指数を分析した結果を示す。ここでは、その結果として、500 m 高度における風向・風速と相当温位の分布図、SReH および CAPE の分布図を示す。

(1) 茨城県常総市(2012/05/06) F3 事例 (気圧の谷・寒気移流)

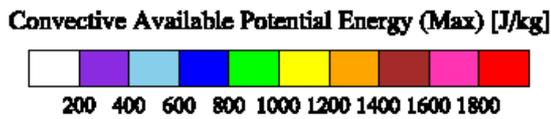
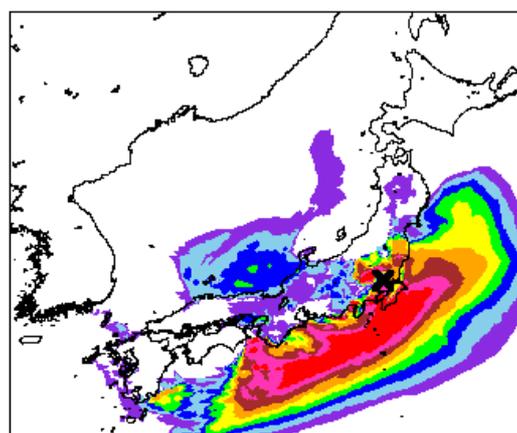
太平洋側から南西風が吹き込む一方、(中層では)大陸・日本海側側から寒気を伴う北よりの風が吹いており、風のシアと大気不安定度が高まっている。SReH の値は東日本の太平洋側で非常に高いが、関東平野周辺ではCAPE が非常に高く、3 個の竜巻がほぼ同時に発生した。



(a) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)



(b) SReH

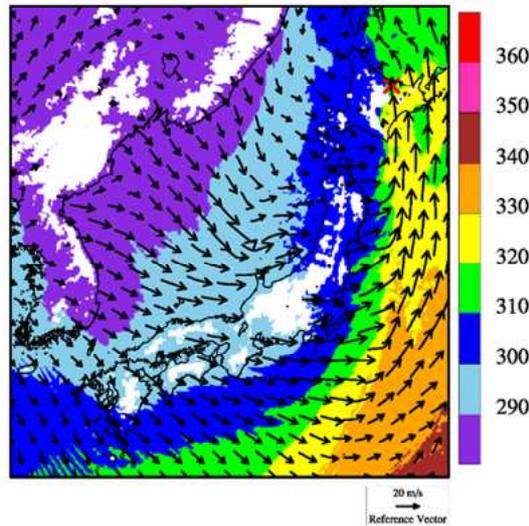


(c) CAPE

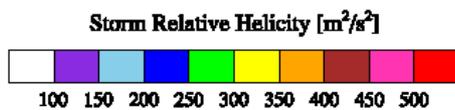
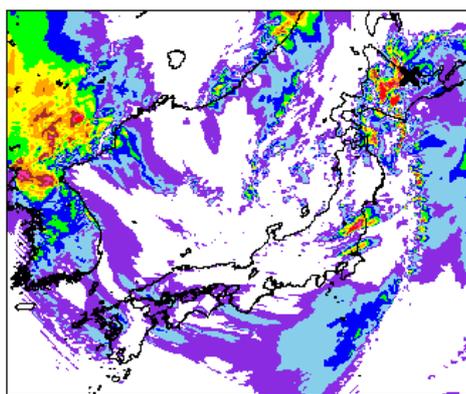
図 2.3-1 気象場と突風関連指数

(2) 北海道佐呂間町(2006/11/07) F3 事例 (寒冷前線・暖気の移流)

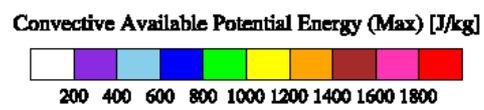
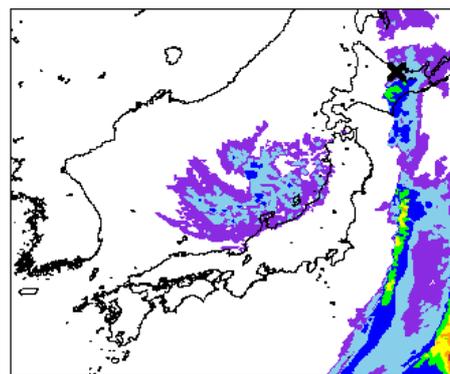
寒冷前線の西側では北西～西よりの冷たい風 (寒色系) が、東側では南よりの暖かい風 (暖色系) が吹いており、気温差と風の収束により積乱雲が発生・発達しやすい状況にある。特に、道東・オホーツク地方には太平洋から暖たく、不安定な空気塊が流入している。大気不安定度は道東の中でも南側で高くなっており、非常に高い風のシア (高い SReH) と相まって親雲が発達しやすい状況が解析されている。なお、同日に、周辺地域において 2 個の小さな竜巻も発生した。日本海側の中でも能登半島周辺より北側で季節風が吹き込み、大気がやや不安定になっている (CAPE が高めに becoming) が、SReH が低く、道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



(a) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)



(b) SReH

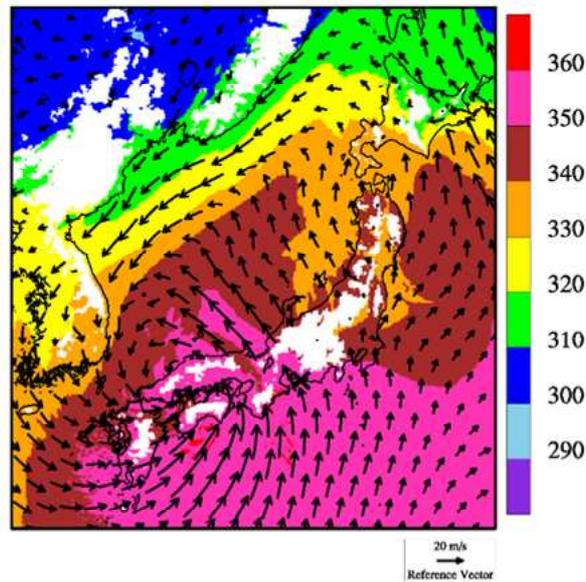


(c) CAPE

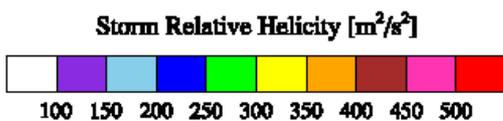
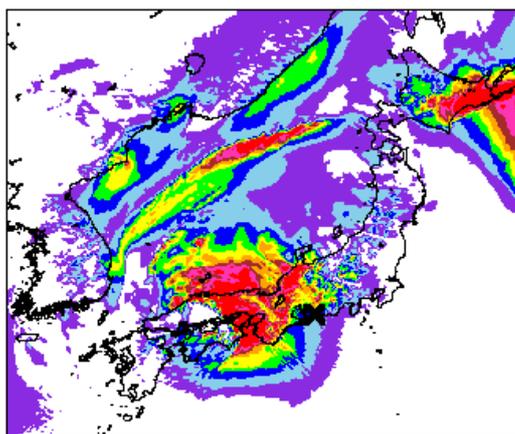
図 2.3-2 気象場と突風関連指数

(3) 愛知県豊橋市(1999/09/24) F3 事例 (台風)

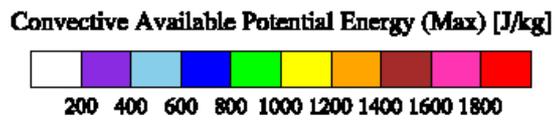
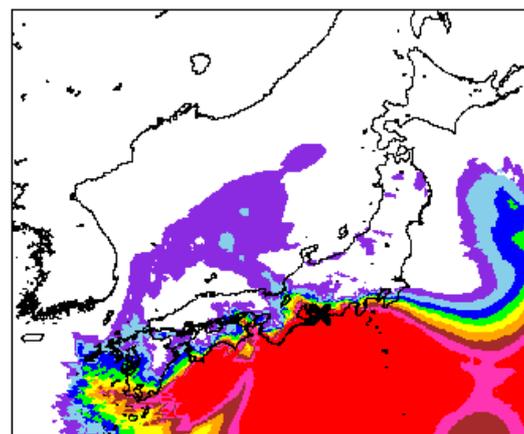
台風を中心は隠岐の南西沖にあり、四国東部・紀伊半島の沿岸部および濃尾平野では、台風中心から遠く離れているが、太平洋側からの非常に不安定な暖湿流が流れ込み (CAPE が非常に大きく)、SReH も高くなっている。濃尾平野では 4 個の竜巻 (2 個の F1, 1 個の F2, 1 個の F3) が発生した。台風中心が日本海側にあり、日本海側の SReH は太平洋側に比べて決して小さくはないが、不安定度は格段に小さいのが見てとれる。



(a) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)



(b) SReH



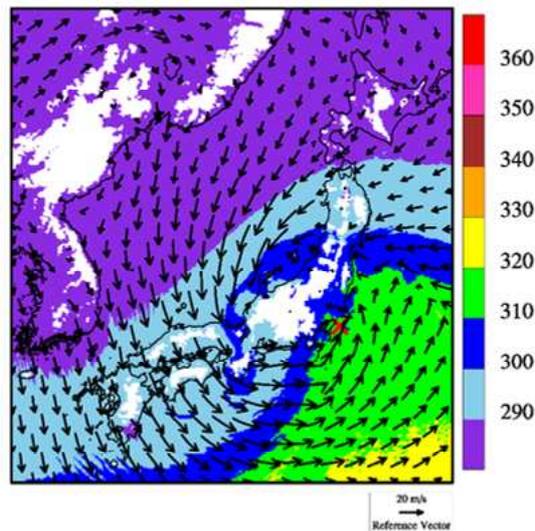
(c) CAPE

図 2.3-3 気象場と突風関連指数

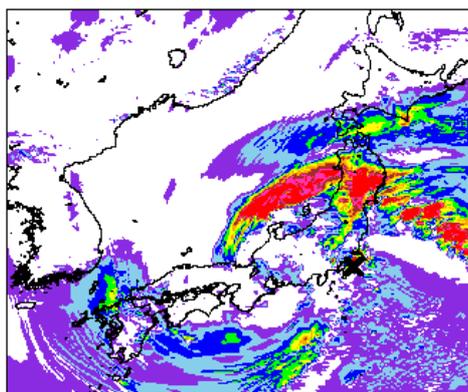
(4) 千葉県茂原市(1990/12/11) F3 事例 (暖気の移流・気圧の谷, 寒冷前線)

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

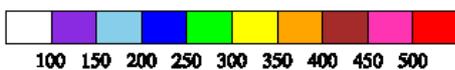
日本海側の低気圧をとりまくように, 特に北側で SReH が非常に高くなっているが, 温位が低く, CAPE の値も小さくなっている。一方, 福島県沖に CAPE の高い領域が見られるが, SReH の値は小さくなく, 相当温位も比較的 low, 房総半島周辺とは状況が異なる。



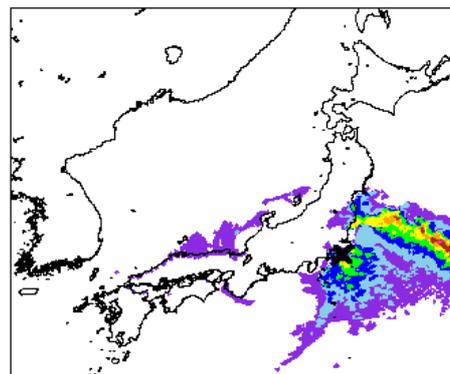
(a) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)



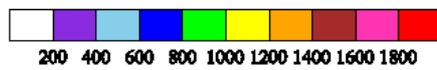
Storm Relative Helicity [ $\text{m}^2/\text{s}^2$ ]



(b) SReH



Convective Available Potential Energy (Max) [ $\text{J}/\text{kg}$ ]

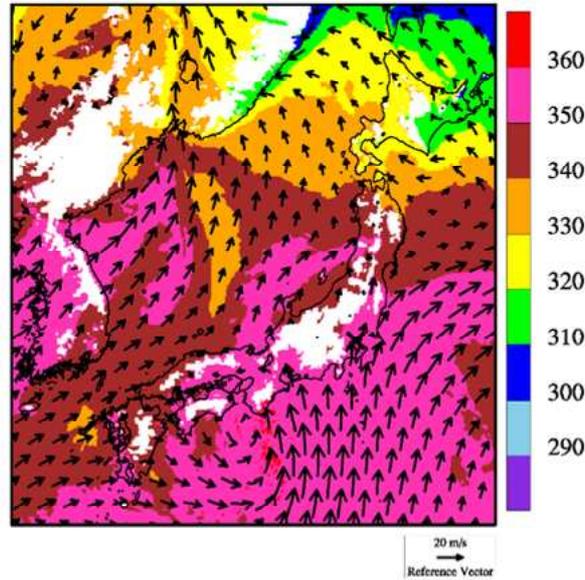


(c) CAPE

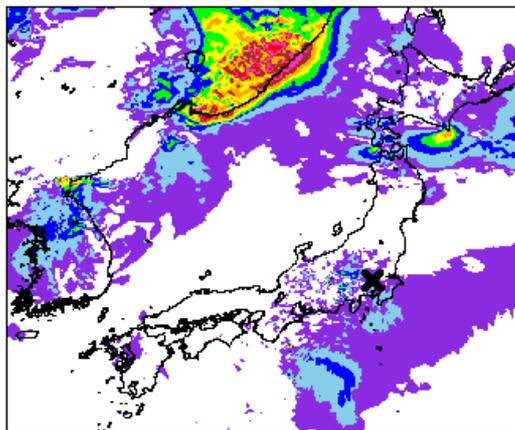
図 2.3-4 気象場と突風関連指数

(5) 埼玉県浦和市(1971/07/07) F3 事例 (台風)

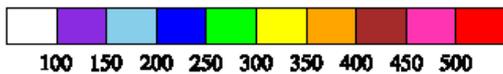
台風を中心は紀伊半島の南西沖にあり，中部から東日本にかけては，太平洋側から非常に CAPE が高く，不安定な空気塊が流入している。SReH は，1999/09/24 F3 事例 (豊橋竜巻) ほど大きくはないが，発生地点周辺では SReH が比較的高くなっており (×でやや見づらい)，SReH と CAPE の両方が共に大きい環境場となっていた。



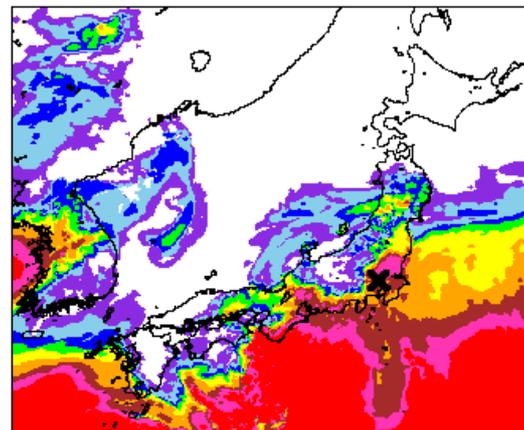
(a) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)



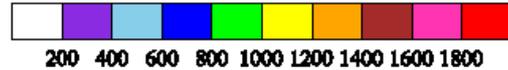
Storm Relative Helicity [ $\text{m}^2/\text{s}^2$ ]



(b) SReH



Convective Available Potential Energy (Max) [ $\text{J}/\text{kg}$ ]

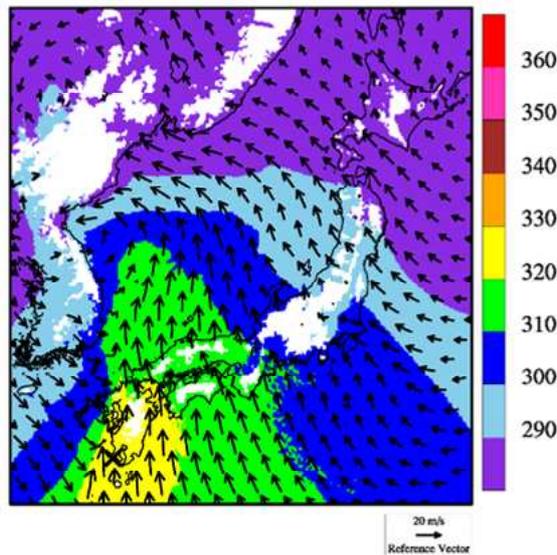


(c) CAPE

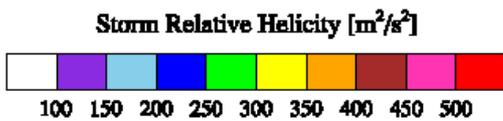
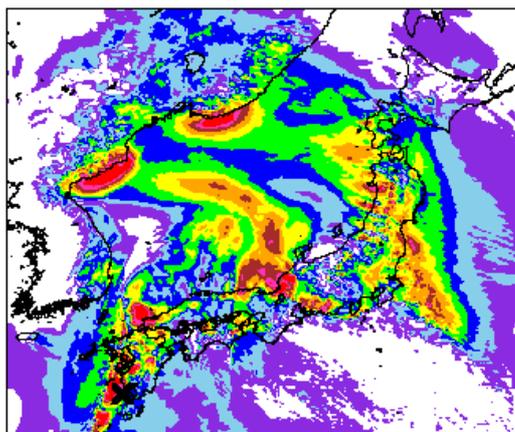
図 2.3-5 気象場と突風関連指数

(6) 鹿児島県枕崎市(1990/02/19) F2-F3 事例 (寒冷前線・暖気の移流・その他 (低気圧))

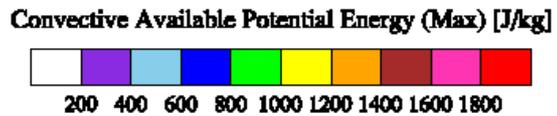
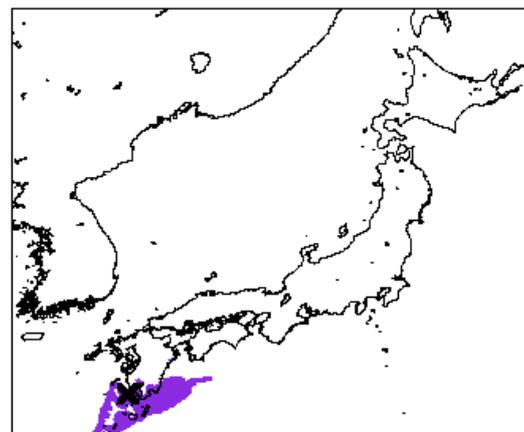
朝鮮半島東部の沖合にある低気圧から寒冷前線と温暖前線が伸び、九州から近畿にかけては比較的暖かい気流が太平洋側から流入している。その中でも発生地点周辺には最も暖かい空気塊が流入しており、鹿児島県南部では局所的に CAPE の値がやや高くなっている。しかし、CAPE 値は F3 竜巻事例に見られるほど高くない。一方、寒冷前線に沿って SReH が非常に高かった。不安定性にやや欠けていたのが、F3 規模には至らなかった理由の一つであると考えられる。



(a) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)



(b) SReH

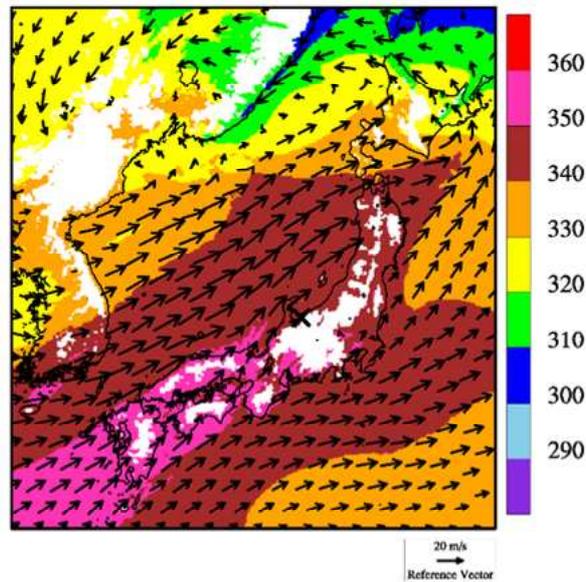


(c) CAPE

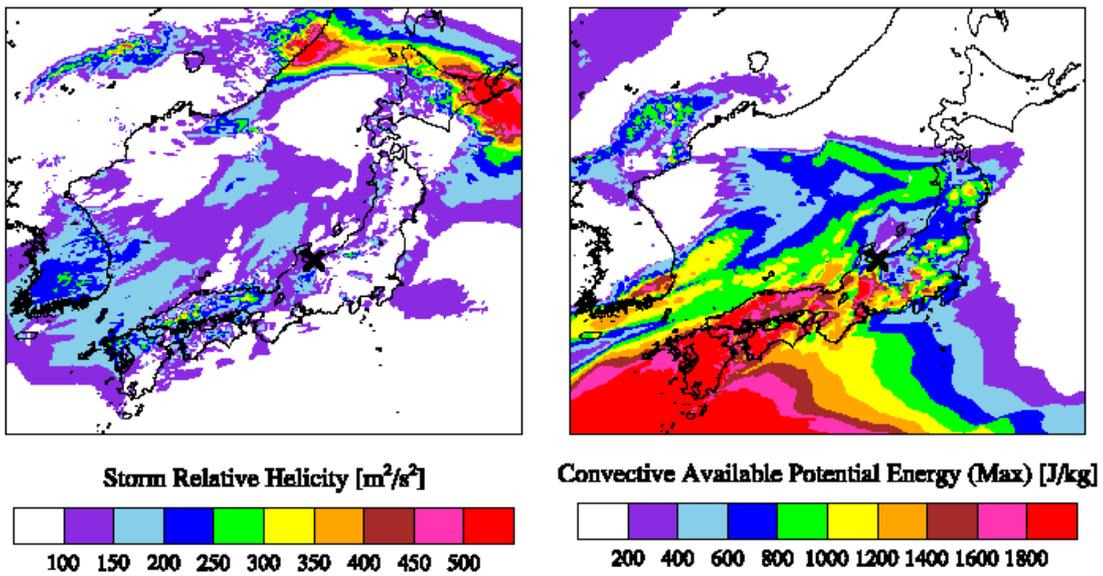
図 2.3-6 気象場と突風関連指数

(7) 富山県魚津市(1991/06/12) 日本海側 F2 事例 (寒冷前線・局地性擾乱)

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



(a) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)



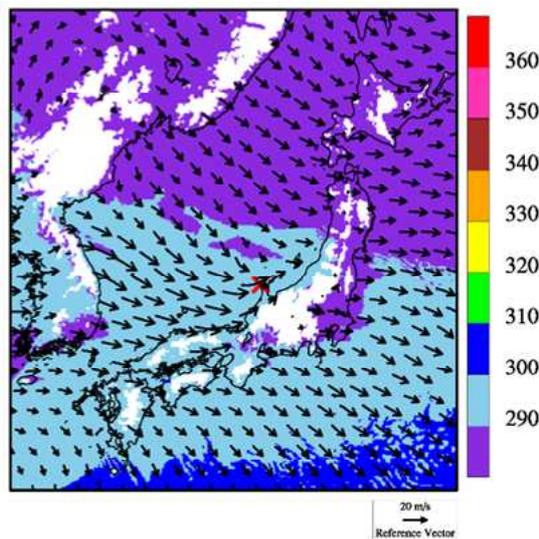
(b) SReH

(c) CAPE

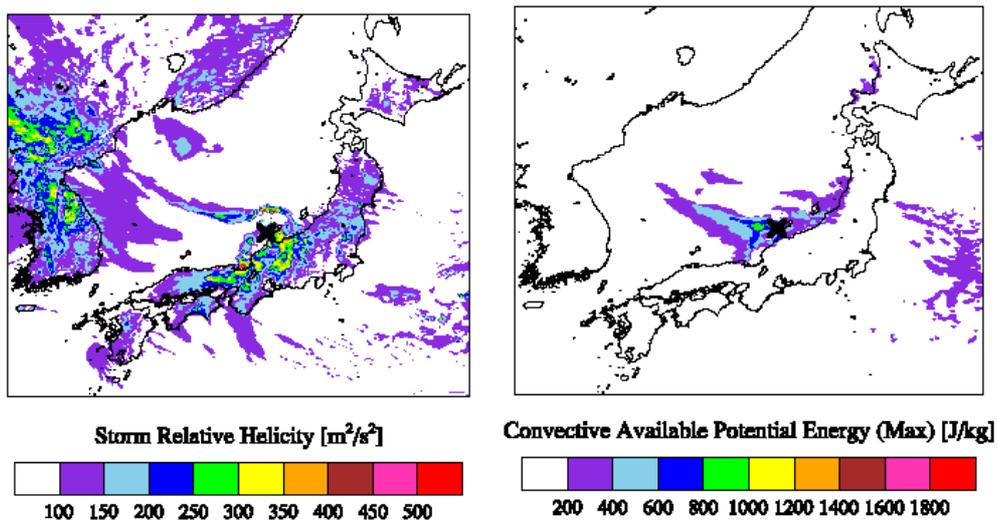
図 2.3-7 気象場と突風関連指数

(8) 石川県羽咋郡(1990/04/06) 日本海側 F2 事例 (オホーツク海低気圧・気圧の谷)

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



(a) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)

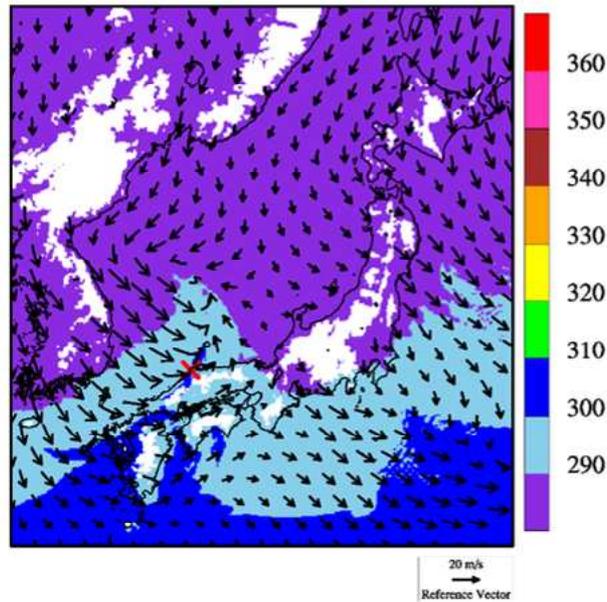


(b) SReH

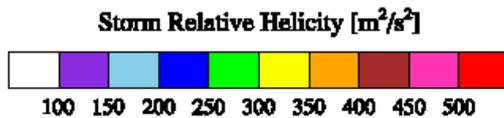
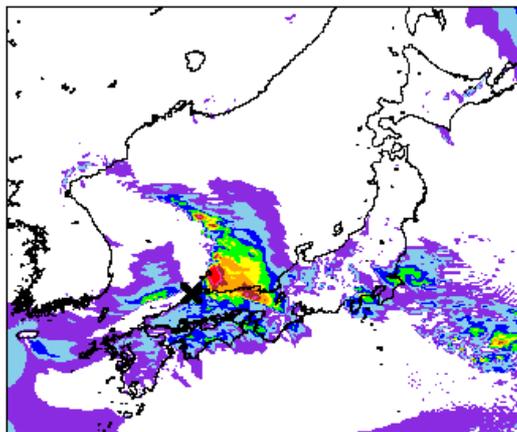
(c) CAPE

図 2.3-8 気象場と突風関連指数

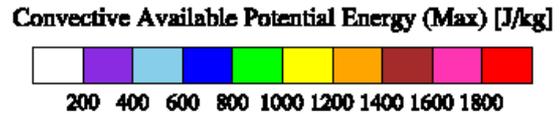
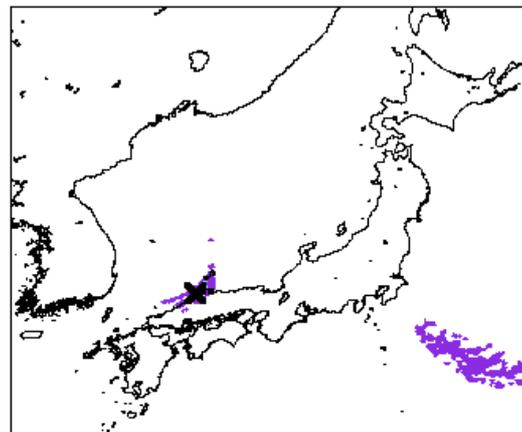
- (9) 島根県簸川郡(1989/03/16) 日本海側 F2 事例 (局地性擾乱・寒気の移流)  
 西高東低の弱い冬型の気圧配置にあり、朝鮮半島から寒気が流入している。島根県の沖で渦状の流れが形成されており、SReH がかなり高くなっている。しかし、やや不安定な大気になっているものの、他の日本海側 F2 事例よりもさらに不安定度が低くなっており、環境場の観点では、F3 規模まで発達するには不安定度合が欠如していたと考えられる。



(a) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)



(b) SReH

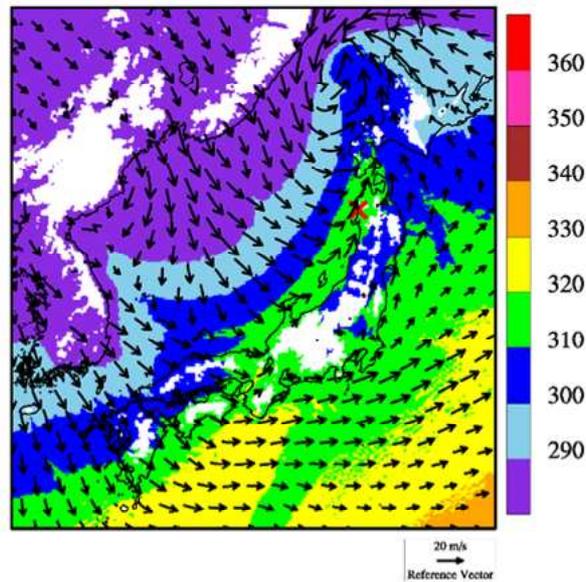


(c) CAPE

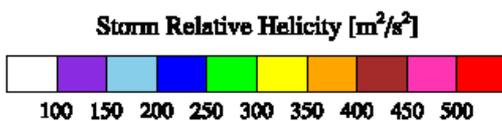
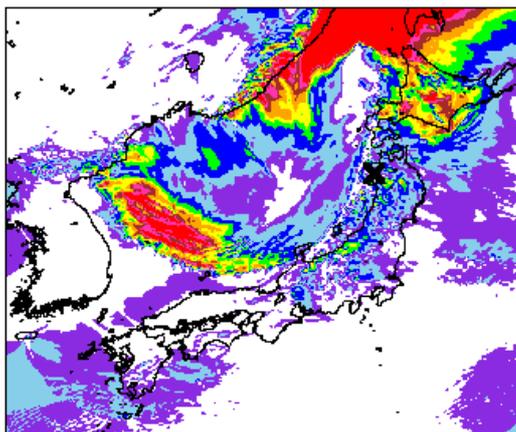
図 2.3-9 気象場と突風関連指数

(10) 秋田県八森町(1999/11/25) 日本海側 F1-F2 事例（日本海低気圧・寒冷前線）

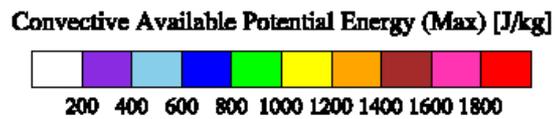
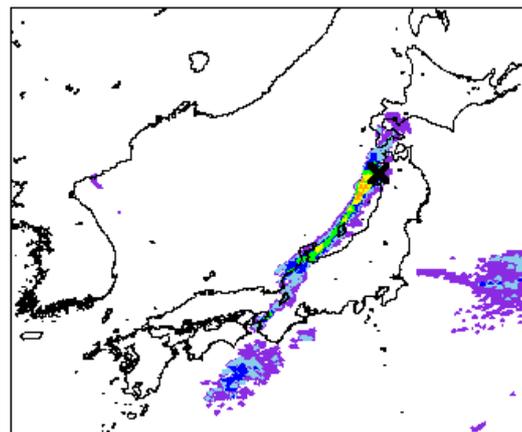
北海道の西海上にある低気圧から延びた寒冷前線が日本海沿岸を通過した際に発生した。寒冷前線上では温位のコントラスト（青色と緑色）が明瞭であり，寒冷前線に沿った地域の中でも発生地点周辺は SReH が比較的高く，CAPE の高い範囲の北端部に位置している。CAPE の大きさは，寒候期に発生した F3 竜巻事例を上回ったが，SReH は低かった。



(a) 500 m 高度における風向・風速および相当温位（単位：K）



(b) SReH



(c) CAPE

図 2.3-10 気象場と突風関連指数

## 2.4 SReH・CAPEと竜巻強度との関係性

10 事例を分析した結果から、以下の傾向が見られた。

- ① F3 竜巻事例では共通して、SReH と CAPE の両方が大きく、太平洋側からの暖湿流の流入が見られた。寒候期（11 月～4 月）に発生した事例では CAPE が暖候期（5 月～10 月）に比べて小さいが、SReH が非常に大きく、大気不安定度の小ささを補っているようである。
- ② 今回分析した F2-F3 竜巻時の発生環境場は、CAPE（大気不安定度）が F3 竜巻発生時に比べてかなり低かった。F2 規模と F3 規模では風速レベルで違いが大きいため、F2-F3 竜巻を F3 竜巻と混合して扱うべきではない。
- ③ F2 竜巻でも SReH は F3 竜巻事例と同レベルの大きさになりうる。冬季の西高東低型の気圧配置下での日本海上での気団変質時、寒冷前線通過時、暖候期の場合是对馬海峡から日本海に向かって空気塊が流れ込む時に大気がやや不安定性な状況が見られたが、多くの事例で大気不安定度は F3 竜巻発生時よりも小さかった。不安定度（CAPE）が大きかった事例もあるが、その場合 SReH は小さく両指数が共に大きくなる状況は見られなかった\*。

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

また、図 2.4-1 は表 2.3-1 における SReH と CAPE の値を竜巻のカテゴリ別にプロットしたものである。F3 竜巻においては、暖候期と寒候期で CAPE の大きさが大きく異なっており、寒候期では暖候期に比べて値が小さいが、SReH が非常に大きい傾向が見られる。

日本海側の F2 規模竜巻の発生環境場では小さな指数値の下でも竜巻が発生しているという点において、F3 規模竜巻の発生環境場との違いが見られる。SReH として 250 ~ 300  $\text{m}^2/\text{s}^2$  程度以上、CAPE として 1600 J/kg（暖候期）あるいは 600 J/kg（寒候期）程度以上の環境場において F3 竜巻が発生しているとみなすことができる。EHI に対しては、3.3 程度を超える場合に F3 竜巻が発生している。

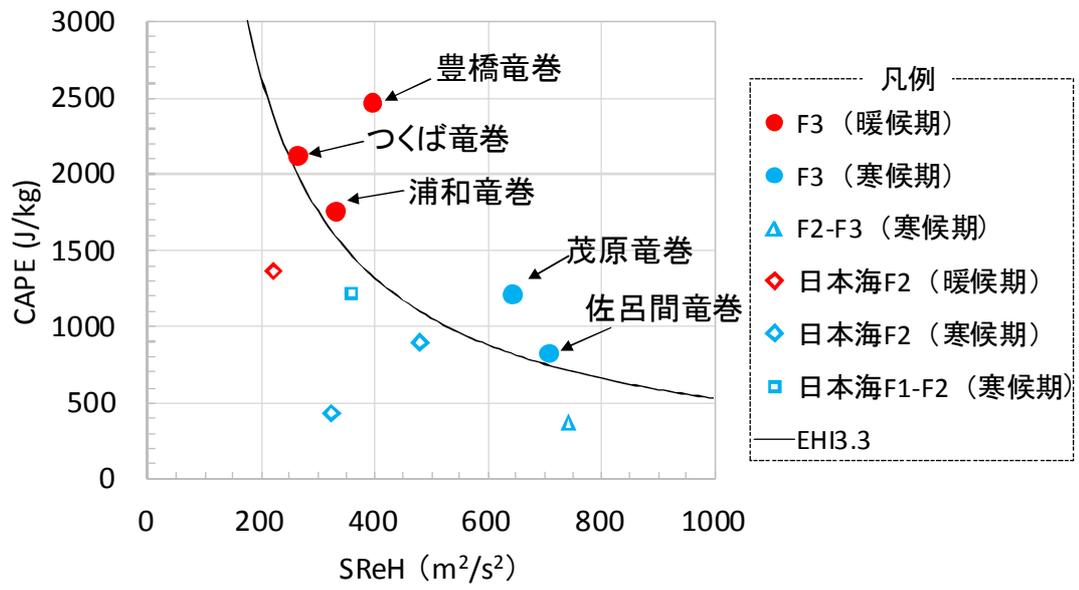


図 2.4-1 SReH と CAPE の関係

## 2.5 竜巻発生環境場の生起頻度分析

前述の 2.4 において、過去に発生した竜巻に対する環境場を分析したところ、国内で（太平洋側で）発生した F3 竜巻は、SReH と CAPE の両方が大きな値をとる傾向が見られた。

また、SReH と CAPE それぞれに対して閾値を設け、その閾値を同時に超える頻度を分析することにより、国内最大規模の F3 竜巻あるいはそれ以上の規模の竜巻発生を観点とした地域性についても評価がなされている。

なお、EHI に対しても同様に検討が行われている。（杉本ら 2014a）

### (1) 季節間の傾向差

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

図 2.5-1 は、SReH の閾値を  $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、CAPE (CAPE ではない) の閾値を  $250 \text{ J/kg}$  に設定し、各指数に対する超過頻度（全体の母数に対する割合 (%)）を各モデル格子点に対して月別に算出したものである。ここでは小さな閾値を設定している。SReH に対しては、日本海および沿岸域では冬季に頻度が大きく、大きな値をとる傾向が示唆されている。また、関東平野、および日高山脈周辺では年間を通じて他地域に比べて高い頻度を有している。7 月は全体的に低くなっている。

一方、CAPE に対しては、寒候期で低い値をとり、暖候期で高い値をとる傾向が見られ、緯度依存性も見られ、Chuda and Niino (2005) の分析結果と整合している。この緯度依存性は、熱帯域ほど暖かく、高い雲ができやすいことと関係している。CAPE については、季節・緯度依存性が強く、南に行くほど、暖かい季節になるほど絶対値が大きくなっている。加藤 (2008a) でも指摘されているように超過頻度を検討する上ではこの特徴を踏まえる必要がある。そのため、以下の検討では、季節に応じた CAPE の閾値を設定して超過頻度を求めている。

なお、閾値が変わると図 2.5-1 で見られる頻度分布もそれに依って変わるが、相対的な頻度大小関係はある程度保持される。国内最大規模 F3 の竜巻は太平洋側沿岸の平野部で発生しているが、CAPE の値は基本的に南ほど高い値をとるため、CAPE の地域性とは整合しない（例えば、沖縄では F3 竜巻は発生していない）。また、SReH においても整合しない（例えば、日本海側で F3 竜巻は発生していない）。

よって、片方の指数だけではなく、両方の指数 (SReH・CAPE) の関係性 (図 2.4-1) を用いて F3 竜巻発生地点の地域傾向を評価する必要がある。

## (2) 同時超過頻度分布に見られる傾向

前節における検討結果(図 2.4-1)を踏まえ、SReH の閾値を  $250 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、CAPE の閾値を  $1600 \text{ J/kg}$  (暖候期)あるいは  $600 \text{ J/kg}$  (寒候期)として、同時超過頻度を算出する。また、竜巻発生時には降水現象を伴うものと考えられることから、降水量の閾値  $2 \text{ mm/hr}$  を条件に追加した。なお、降水量の閾値については頻度値の大小に若干影響を及ぼすが、結果の解釈には全く影響しないことを確認している。

暖候期・寒候期別に同時超過頻度を算出した結果を図 2.5-2 に示す。また、図 2.5-3 は、気象庁の「竜巻等の突風データベース」で確認された F2-F3 竜巻および F3 竜巻の発生箇所を示したものである。暖候期においては、同時超過頻度 0.01 % 前後の地域が茨城県以西の太平洋側および九州の沿岸域の平野部に広がっており、超過頻度の高い地域は F3 規模の竜巻の発生箇所を含包している。つまり、超過頻度の高い地域で F3 規模以上の竜巻発生に適した環境場が整いやすいことが示唆されている。それに対し、日本海側、東北太平洋側、下北半島および北海道といった北日本での超過頻度の値は、1~2 オーダ以上小さな値となっている。

また、寒候期の超過頻度分布では、頻度が高い地域が南側にシフトしているが、F3 竜巻発生箇所がより沿岸に近い地点に限られていることに対応している。全体的に暖候期に見られる傾向と同様であり、また F3 規模竜巻の発生数に季節間の差が見られないことも反映されている。このように、過去の F3 竜巻発生時の環境場の解析結果を踏まえて設定した SReH と CAPE の閾値を両方超過する頻度の分布は、実際の F3 竜巻の発生箇所の傾向と整合している。同時超過頻度分布は、閾値を「超過する」という意味において、F3 規模あるいはそれ以上の規模の竜巻が発生するのに適した環境場の生起しやすさを表現していると解釈できる。この分布では、高標高山岳(九州山地、四国山地、中国山地、中央アルプス等)の南北で頻度が大きく異なっており、高標高山岳によって太平洋側からの暖気流が遮断される効果が竜巻の発生に影響していると考えられる。(補足-3 参照)。

EHI を用いた場合、図 2.5-2 に見られる両季節の傾向の中間的な傾向が見られる。図 2.5-4 は、EHI の閾値を 3.3 (図 2.4-1 参照)にした際の超過頻度分布である。通年単位で閾値を設定しているため、中間的な傾向を示すのは妥当である。また、SReH と CAPE の両方の指数を用いる方法においても問題がないことを示唆している。つまり、米国とは異なり(補足-2 参照)、国内においては、SReH あるいは CAPE の片方が異常に大きく、EHI がある程度高い値を示すような事例が稀であるからである。

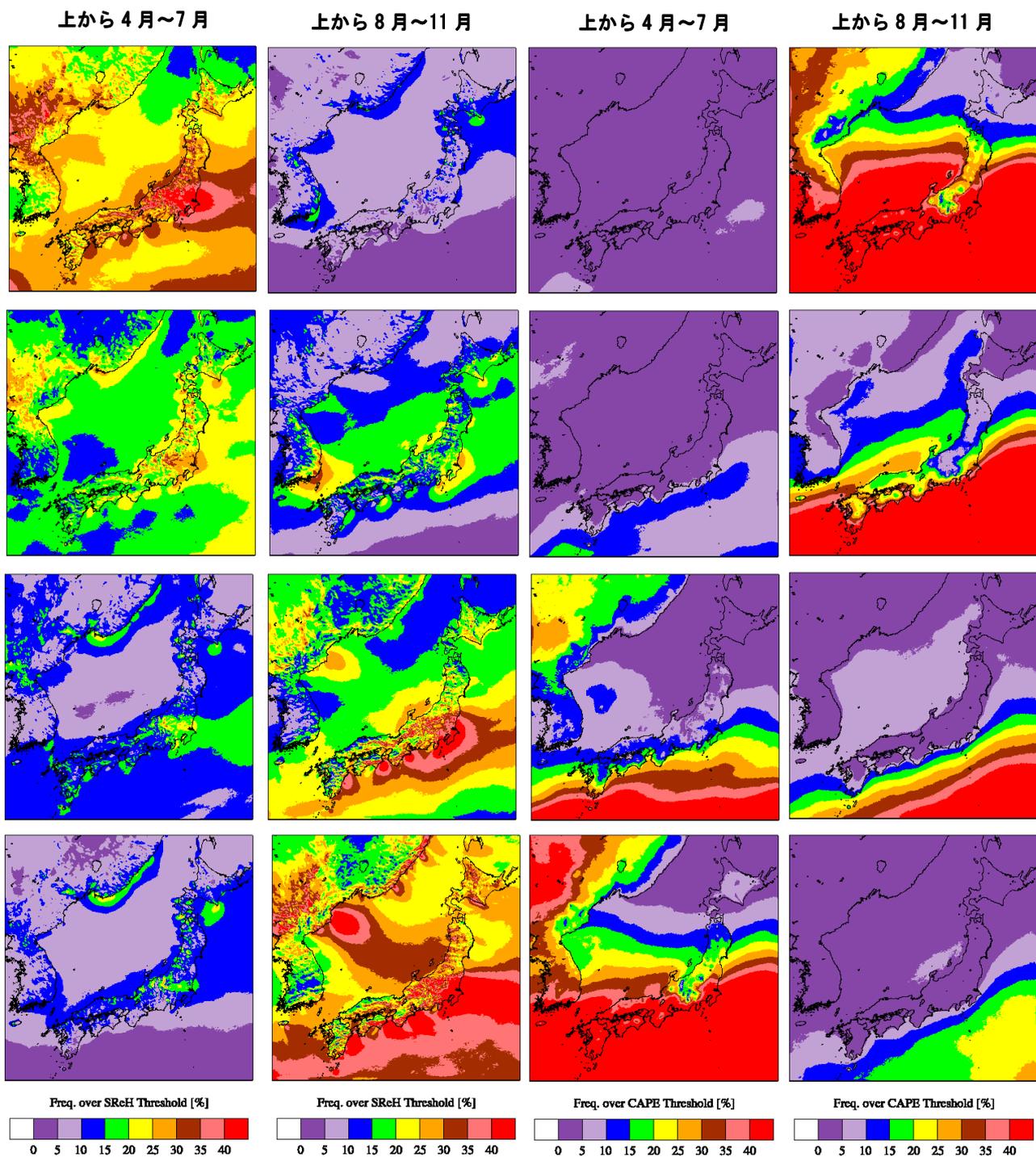


図 2.5-1 月別の SReH (左側 2 列) および CAPE (右側 2 列) の超過頻度分布

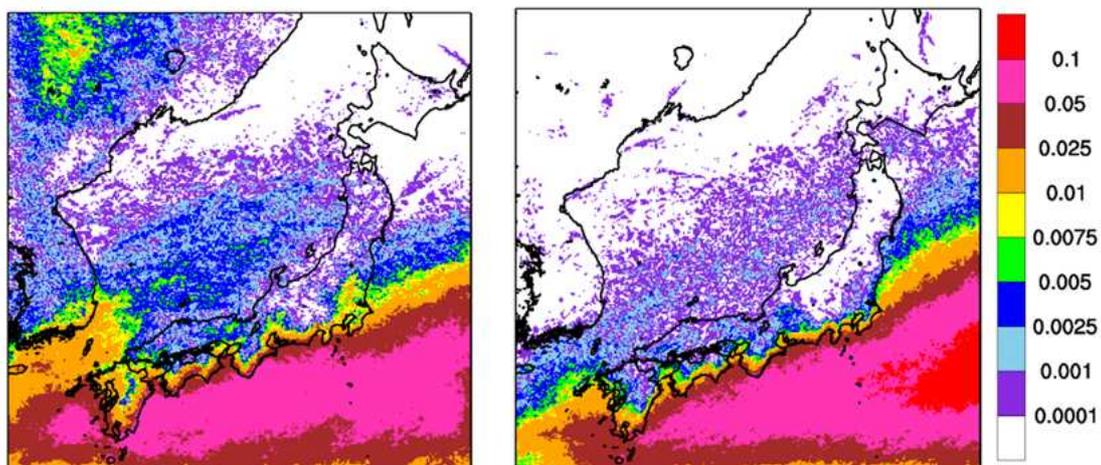


図 2.5-2 同時超過頻度分布

(単位：%，F3 規模以上を対象；左：暖候期，右：寒候期)

(実績ベースの閾値 (SReH：250 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>，CAPE：1600 J/kg (暖候期) 600 J/kg (寒候期)))

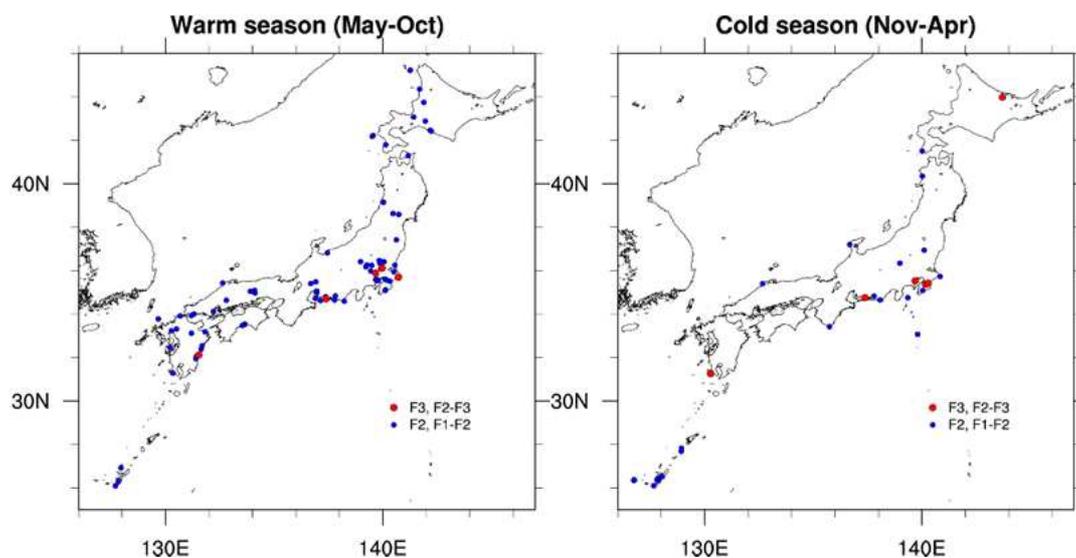


図 2.5-3 F3 竜巻 (F2-F3 を含む) および

F2 竜巻 (F1-F2 を含む) の発生箇所

(左：暖候期，右：寒候期)

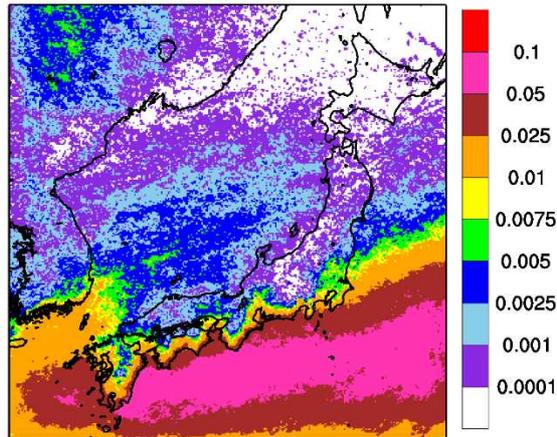


図 2.5-4 超過頻度分布（単位は %；通年；EHI の閾値：3.3）

### (3) F3 規模の最大風速を考慮すべき地域

図 2.5-2 より国内最大規模の F3 竜巻が発生するのに適した環境場が形成される頻度には地域差があることがわかった。この分布形態から実際に F3 規模の竜巻を考慮すべき地域を特定するには確率論的な議論が必要である。つまり、国内の竜巻影響評価ガイドで記載されている超過確率  $10^{-5}$ 、米国の評価ガイド等 (Ramsdell and Rishel 2007, U.S. NRC 2007) で記載されている超過確率  $10^{-7}$  を参考として必要となる風速レベルを考慮する必要がある。

図 2.5-5 は、ハザード評価と同様に海上 F 不明竜巻を按分して各 F スケール竜巻の 51.5 年間（1961 年～2012 年 6 月）の擬似発生数を分析し、F スケール毎に発生率（対象 F スケールの発生数/擬似発生数）を地域別にプロットしたものである。太平洋側と北日本とでは竜巻の全発生数に大差はないことから、この発生率で対象 F スケール竜巻の発生しやすさを概ね把握することができる。Dotzek et al. (2005) と同様、F スケールが大きくなるほど指数的に頻度が低減しているが、F3 規模の発生率は、茨城県以西太平洋側・九州沿岸では、その他の地域に比べ 1 オーダ程度発生率が高くなっており、突風関連指数の分析結果と整合していることがわかる。日本海側沿岸や東北太平洋側・下北半島では、F3 竜巻が発生していないため、さらに頻度が小さくなると想定される。また、F2 規模になると地域差が小さくなり、F0 規模ではむしろ太平洋側の方が若干少なくなることも見てとれる。

上記のように、日本海側を含む北日本では F3 規模竜巻の発生しやすさ、および発生数は、太平洋側に比べて少なくとも 1 オーダは低いことを考慮すると、F3 規模竜巻の風速が生起する確率は、超過確率にして  $10^{-7} \sim 10^{-8}$  を下回る。この超過確率レベルは米国の評価ガイドに規定されているレベルを

下回っている。そのため、北日本・日本海側の地域では、F3 規模竜巻の風速レベルは基準竜巻風速としては想定範囲外の範疇に入ると考えることができる。

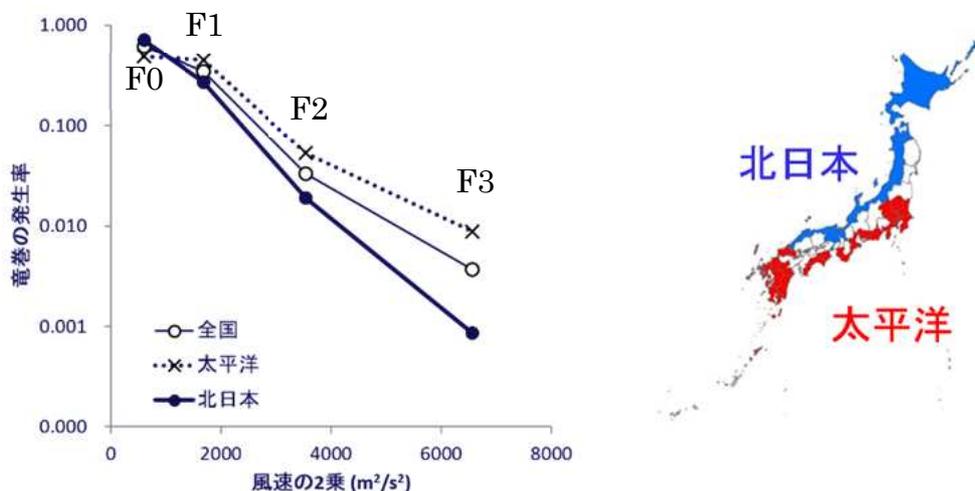


図 2.5-5 各 F スケールの発生率

(4) 閾値が同時超過頻度の分析結果に及ぼす感度

小さな閾値を設定すると、雷雨（非竜巻）・小さな竜巻の発生を勘案することとなるため、全体的に頻度値が上昇し、（発生実績と同様に）地域性が明瞭でなくなる。一方、非常に大きな閾値を設定すると、F4・F5 規模の非常に大きな竜巻に着目することになり、高頻度域は太平洋側のさらに限定された地域になる。杉本ら (2014b)は、国内最大規模の F3 規模が発生する環境場として適切な閾値を、SReH については 150~550 m²/s² の範囲 (100 m²/s² 刻み)、CAPE に対しては、200~1500 J/kg (100 J/kg 刻み) の範囲の値の組み合わせで検討した。最適とみなされた組み合わせに対する結果は図 2.5-2 に示した結果に概ね沿ったものとなっている（補足-4 参照）。ここでは F2 規模以上の竜巻の発生頻度を念頭においた閾値について検討した。図 2.4-1 の結果から両指数の閾値を

SReH : 200 m²/s²

CAPE : 1000 J/kg (暖候期), 350 J/kg (寒候期)

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

同時超過頻度の算出結果を図 2.5-6 に示す。F3 規模以上の竜巻を対象と

する場合よりも頻度は全体的に上がっている。図 2.5-2 では九州より南方は本州（茨城県以西）太平洋側に比べて頻度がやや低くなる傾向が推測されるが、図 2.5-6 では九州より南方でも値が高い傾向が推測され、実際の発生箇所（図 2.5-3）に整合している。

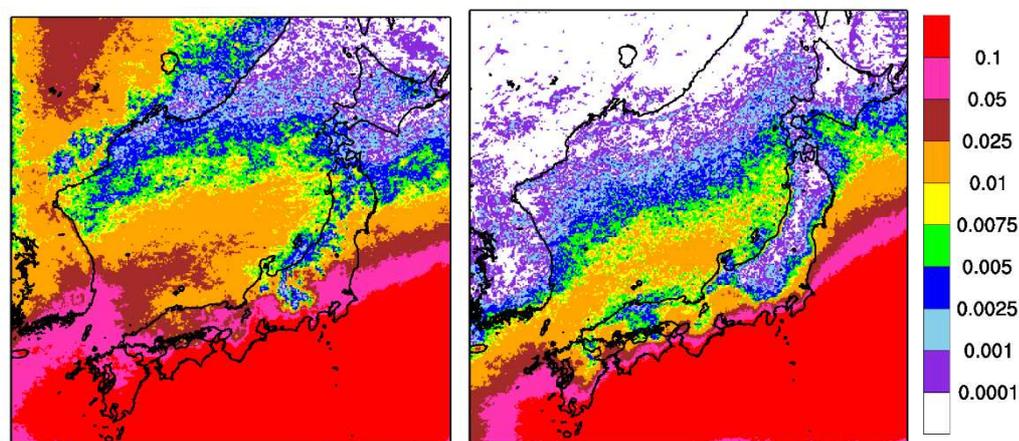


図 2.5-6 同時超過頻度分布

（単位：%，F2 規模以上を対象；左：暖候期，右：寒候期）

（SReH の閾値：200  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ，CAPE の閾値：1000 J/kg（暖）350 J/kg（寒））

暖候期においては、福島県から宮城県の太平洋側および本州日本海側沿岸での頻度が高まり、中部地方以西では内陸も含めて頻度が高く、東日本も内陸深くまで頻度が高くなっている。実際の F2 規模以上の発生箇所の多くを包含できている。しかし、北海道の石狩地方以北で F2 竜巻が計 4 個発生しているが、同時超過頻度はかなり低い。CAPE の閾値を 1000 J/kg から 650 J/kg 程度まで落とすと対応性は高まり（図 2.5-7）、能登半島以北の日本海側・北日本における頻度は本州・中日本以南に比べて少し低い程度となつて、全体的に地域間の差は薄れる。図 2.5-5（F2 規模以上の場合、全国平均からの差は、太平洋側とそれ以外の地域ともに 1 オーダの差はない）を踏まえると、図 2.5-7 の方が F2 規模以上の竜巻に対しては整合がよいと考えられる。オホーツク地方で頻度が高く、F2 規模程度の竜巻が発生する環境場は東北・道南地方に匹敵した確率で形成されうるといえる。

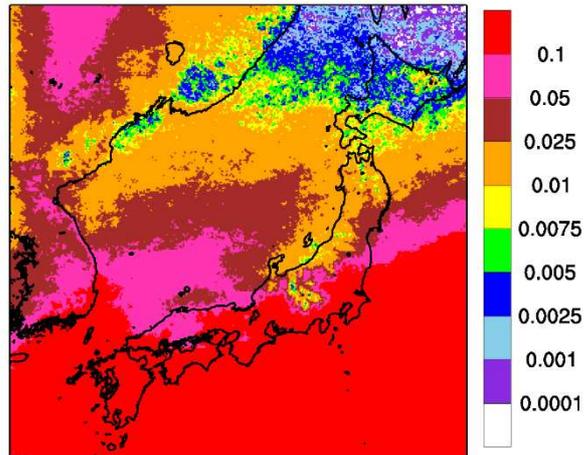


図 2.5-7 同時超過頻度分布 (単位：%，暖候期)  
(SReH の閾値：200 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>，CAPE の閾値：650 J/kg)

寒候期においても福島県から宮城県の太平洋側，襟裳岬から道南方面の沿岸部，および本州・道南の日本海側沿岸で頻度が大きくなっている。道南より北側の日本海側沿岸で頻度が増えていないのは実態と整合している。中央アルプス以北の中央山地で頻度は低目である。この地域で竜巻は 2 箇所発生している (図 2.5-3) が，共に F1-F2 規模の小さな竜巻である (図 2.5-8)。

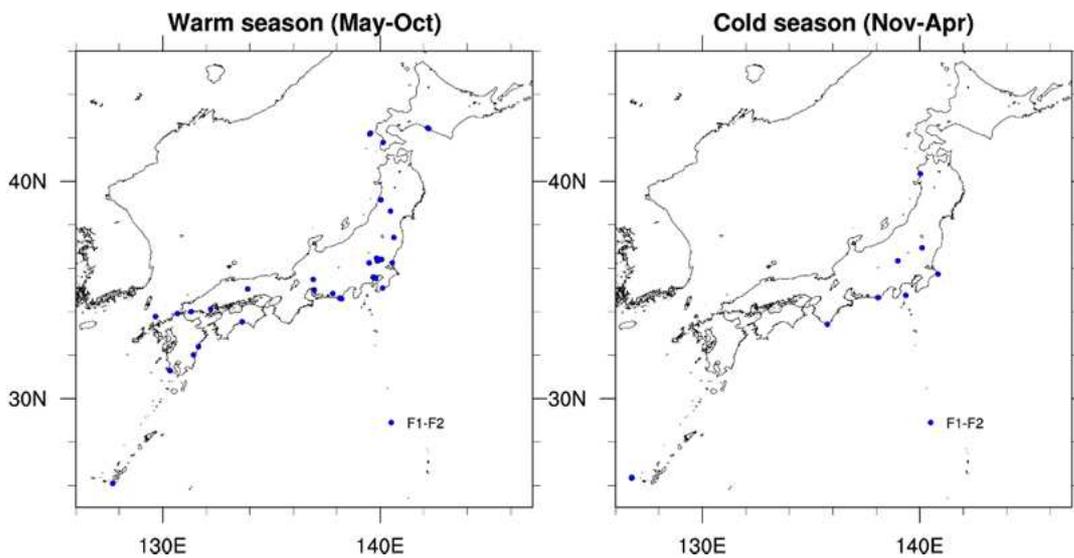


図 2.5-8 F1-F2 竜巻の発生箇所

2.2(1)～(10)における個別竜巻の分析事例において、暖候期に対しては1988年以降に発生したF2あるいはF1-F2竜巻が1事例しかない。図2.5-6に示した東北太平洋側沿岸から道南・道東にかけての頻度において、暖候期の方が低いというのは海水温の高さの季節性と整合しないため、CAPEの閾値は1000 J/kgよりも小さくした、650 J/kg (図2.5-7)が概ね発生状況の地域性を表現できている。

EHIを用いた場合、EHI 1.5では、図2.5-6の暖候期、寒候期の状況を平均的に見た時の頻度分布におおおよそあてはまる(図2.5-9左図)。なお参考までに、島根県簸川郡(1989/03/16)のF2事例を参考に0.8まで閾値を下げた場合の検討を実施してみたが、地域性はほとんど見られなかった(図2.5-9右図)。

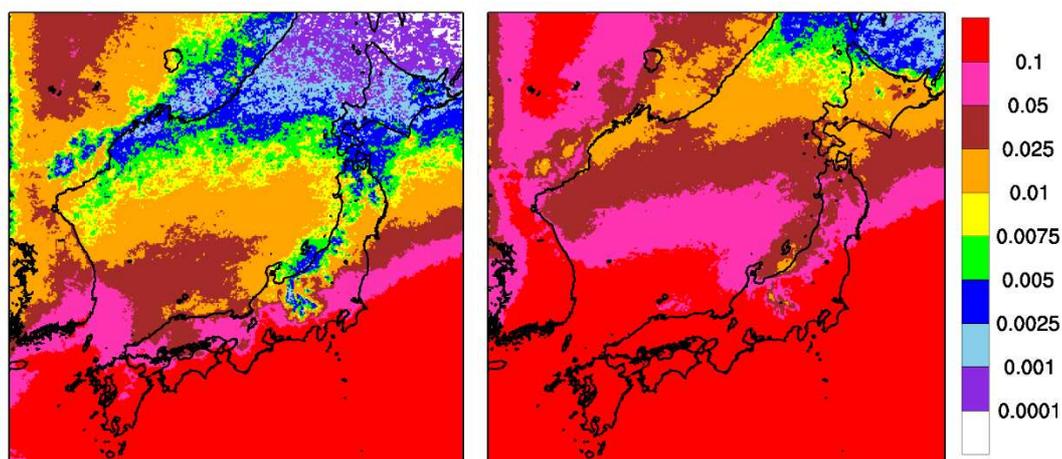


図 2.5-9 超過頻度分布 (単位は % ; 通年 ; EHI の閾値 : (左) 1.5, (右) 0.8)

## 2.6 佐呂間竜巻に対する考察

北海道の佐呂間町において過去に F3 竜巻が発生しているが、図 2.5-2 の同時超過頻度分布においては、北海道の超過頻度は非常に低かった。

佐呂間竜巻の発生メカニズムについて図 2.6-1 のように示す。図 2.3-2 に示したように、当竜巻発生時においては、太平洋側からの暖気流が道東・オホーツク地方に流入している環境下で、高い SReH を伴う寒冷前線が通過しており、図 2.4-1 に示すように、SReH、CAPE とともに一定の高さを保持していた。この意味で、太平洋側で過去に発生した F3 竜巻の環境場の特徴と同様の特徴を有する。ただし、CAPE については、図 2.3-2 に示したように、SReH とは異なり、降水域が発達した日高山脈の東側に広く高い値をとっているわけではなかった。一方、加藤 (2008b) が以下のように指摘しているように、この竜巻に対しては周辺地形によるマイクロスケールの影響を無視できない。

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

このマイクロスケールの効果は環境場では考慮できない（解像できない）ため、両指数の値は、特に SReH では図 2.4-1 でプロットした結果よりも高まっている可能性が高い。

2.5(4)でも述べたとおり、オホーツク地方は北海道の中でも F2 規模以上の竜巻であれば本州北日本と同等の頻度で環境場が形成されやすい地域であるが、F3 規模以上の竜巻に対しては環境場が形成されがたい。つまり F3 規模に到る程度に大気不安定な空気塊の流入と高渦度を有した総観場の通過が同時に発生する頻度が極めて低い。

佐呂間竜巻が地形影響を受けていることを踏まえると、竜巻発生を観点とした気候としては、この地域で F3 規模の竜巻発生に適した環境場は極めて生起しがたく、佐呂間竜巻発生時においても F3 規模竜巻の発生には相当しない環境場であった。よって、近隣の周辺地形の影響を強く受けて F3 規模の竜巻発生に到ったと解釈できる。

以上より、発電所立地地点における佐呂間竜巻と同様の竜巻の発生可能性については、気象場（総観場（寒冷前線）、気流場、大気不安定度）と周辺地形に対して、以下の 2 点の確認を実施すべきである。

- ① 太平洋側からの暖湿流が高標高山岳等に遮断されずに直接流入しうる地域であるか。
- ② 太平洋側から暖湿流が流入する場合、近隣地形（数キロ程度四方の範囲）において、（太平洋側からの）暖気流の流入方向に尾根状の丘・山が存在するか。

これらの条件を満たせば、寒冷前線通過時に、暖かい空気塊が尾根を乗り越えて寒冷前線起因の冷氣流の上側に流入し、佐呂間竜巻と同様の竜巻が発生する可能性が生じる。

女川原子力発電所においては、発電所前面が海に面しており太平洋側から暖湿流が流入するが、その流入方向に尾根状の丘・山などは存在しないため、佐呂間竜巻と同様のメカニズムで竜巻が発生および増速することはない。

### 3. まとめ

F3 規模の竜巻、F2-F3 規模の竜巻（1988 年以降）、日本海側 F2 規模の竜巻（1988 年以降）、および日本海側 F1-F2 規模の竜巻（1988 年以降）を対象に、WRF モデルと ECMWF 再解析データを用いた気象解析を行い、5 km 解像度での気象場と突風関連指数（SReH・CAPE）を用い、F3 規模以上および F2 規模以上の場合に対して分析を実施した。

- ・ F3 規模以上の竜巻を対象とした閾値を同時に超過する頻度の分布を 50 年間の長期再解析データをもとに算定した。  
その結果、茨城県以西の太平洋側沿岸および九州沿岸の平野部で頻度が高く、実際の竜巻発生箇所とも整合していた。  
一方、その他の地域では、上記太平洋側地域に比べて 1~2 オーダ以下の頻度であった。
- ・ 同時超過頻度分布の特徴は、擬似竜巻発生数を用いた F3 竜巻の発生率の地域差と対応していた。SReH および CAPE を用いた分析は地域特性の検討に有効であることが分かった。
- ・ 佐呂間竜巻に関連して、オホーツク地方は気候的には F2 竜巻が一定以上の生起確率で発生しうる地域であるが、F3 規模以上の竜巻発生環境場は極めて形成されがたい地域であった。
- ・ 佐呂間竜巻に対しては、周辺地形の影響を受けたことが報告されており、同様な竜巻の発生および増速の可能性については、佐呂間と同様の地形の有無について確認する必要がある。

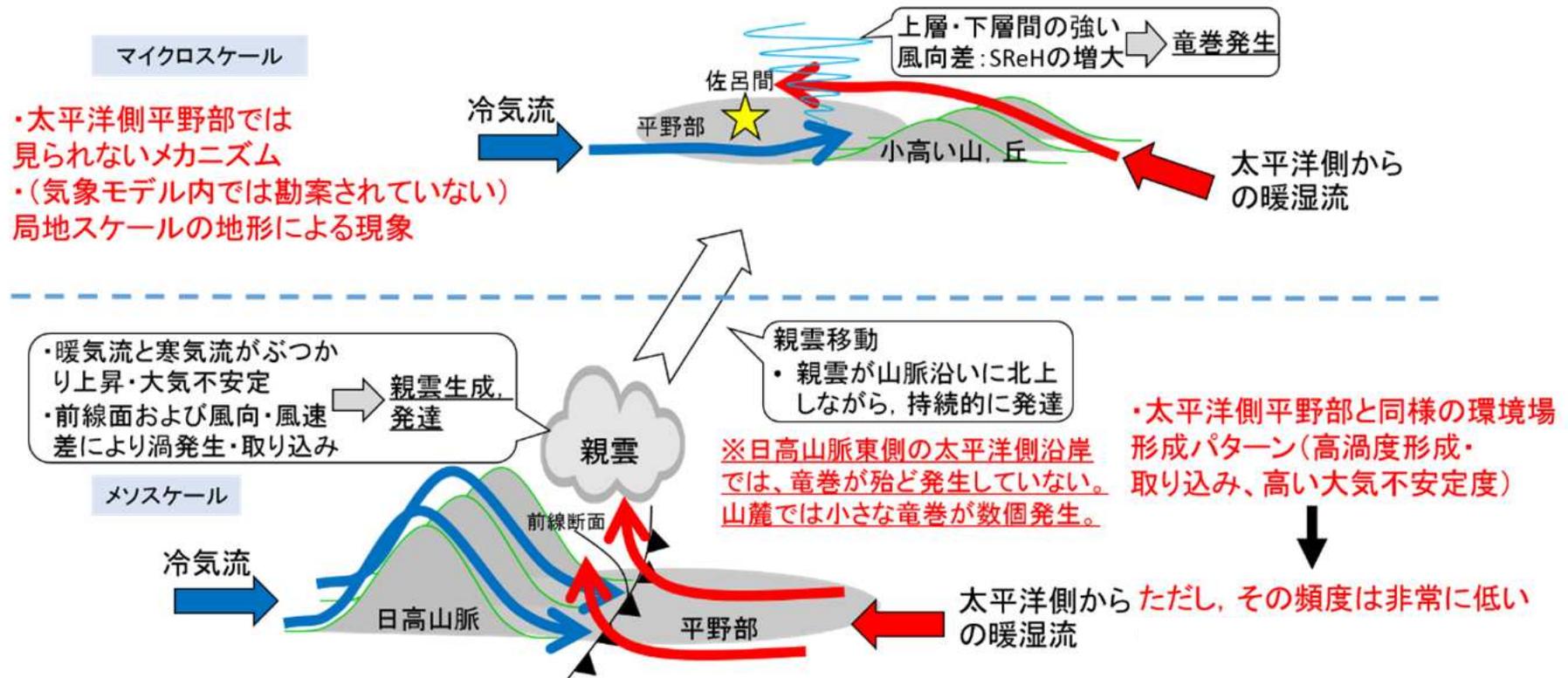


図 2.6-1 佐呂間竜巻の発生メカニズムに関する模式図 (保全学会 HP より)

## 参考文献

- 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.
- Chuda, T., and H. Niino, 2005: Climatology of environmental parameters for mesoscale convections in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, 391-408.
- Davies, J. M., 1993: Hourly helicity, instability, and EHI in forecasting supercell tornadoes. 17th Conf. on Severe Local Storms, St. Louis, MO, Amer. Meteor. Soc., 107-111.
- Davis-Jones, R., D. Burgess, and M. Foster, 1990: Test of helicity as a tornado forecast parameter. 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB., Canada, Amer. Meteor. Soc., 588-592.
- 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.
- Moncrieff, M., and M. J. Miller, 1976: The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 373-394.
- Ramsdell, J. V. Jr., and J. P. Rishel, 2007: Tornado climatology of the contiguous United States. NUREG/CR-4461, Revision 2.
- Rasmussen, E. N.: 2003: Refined supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 18, 530-535.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers : A description of the advanced research WRF version 2. *NCAR Tech. Note*, NCAR/TN-468+STR, 88 pp., 2005.
- U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, 2007: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1.
- 加藤輝之, 2008a: 竜巻発生の環境場に関する研究 (I) - 竜巻をもたらす発生環境に関する統計的研究 -, 平成 19 年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進, 6-12.
- 加藤輝之, 2008b: 竜巻発生の環境場に関する研究 (III) - スーパーセルを伴う竜巻の発生機構の研究 -, 平成 19 年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進, 39-44.
- 杉本聡一郎, 野原大輔, 平口博丸, 2014a: 国内既往最大規模の竜巻を対象と

した発生頻度の地域性について. 2014 年度保全学会年次学術講演会,  
395-402.

- ・ 杉本聡一郎, 野原大輔, 平口博丸, 2014b: 突風関連指数を用いた大きな竜巻の発生環境場の地域性に関する検討. 2014 年度日本気象学会春季大会講演予稿集, B464.
- ・ 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.
- ・ 関口武, 1959 「日本の気候区分」東京教育大学地理学研究報告

## 補足-1 温位について

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

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

### 参考文献

- ・ 吉崎正憲, 加藤輝之, 2007: 豪雨・豪雪の気象学. 朝倉書店, 187 pp.

補足-2 SReH および CAPE と竜巻強度との関係に関する知見の整理

知見 1

Davies and Johns (1993)は、竜巻に最も近い観測点で得られたラジオゾンデデータから SReH をはじめとした鉛直シア関係の指数に関する調査を行い、0-3km の SReH について、F2・F3 竜巻の場合  $369 \text{ m}^2/\text{s}^2$  (21 事例)、F4・F5 竜巻の場合  $539 \text{ m}^2/\text{s}^2$  (10 事例) と報告している。ただし、竜巻のポテンシャルの見積もりには、大気不安定性と風のシアもしくは SReH の組み合わせを調べるべきであると指摘している。

知見 2

Johns 他は、F2 規模以上の竜巻に対して、0-2km SReH と CAPE との関係性について、図 1 に示すとおり、F2 規模以上の竜巻は  $\text{EHI} (= \text{CAPE} \times \text{SReH} / 160000)$  がおおよそ 2 を超える場合に発生していると報告している。

また、F4・F5 規模の竜巻 (図中の凡例○) は、より大きな EHI で発生している傾向にあることも報告されている。

こうした報告に関連し、Davies (1993)は、EHI がおおよそ 2 を超える場合でスーパーセルが発達する可能性が非常に高く、EHI がおおよそ 4 を超える場合に非常に大きな竜巻が発生する可能性が高いとする文献にも見られる。

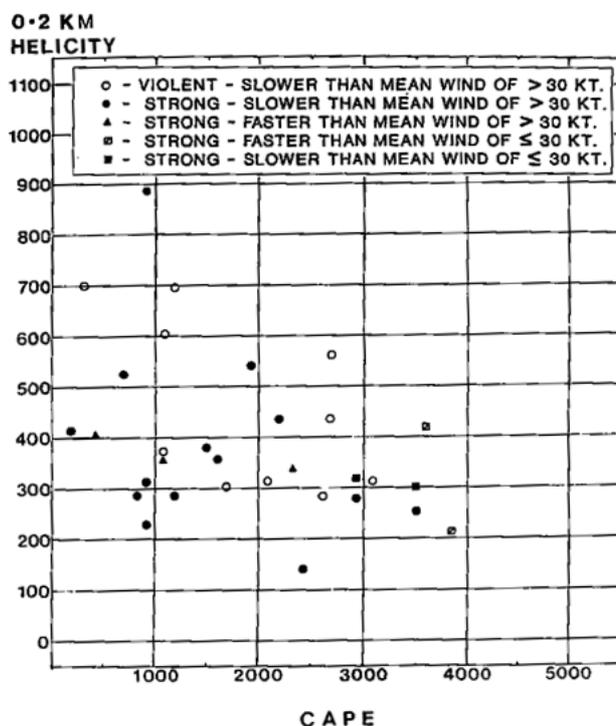


図 1 CAPE と 0-2km SReH の関係 (F2 規模以上をプロット, ○は F4・F5 規模)

### 知見 3

Rasmussen and Blanchard (1998)は、1992年に米国で実施されたラジオゾンデデータ約3000のデータ(0時 UTC(世界標準時))を分析し、竜巻発生地点から400 km以内の竜巻発生時の突風関連指数について評価している。

この結果、F2規模以上の竜巻とそれ以外では、SReHとCAPEを単独で用いる場合よりも、両指数を複合させたEHIの方が区別できていることが報告されている(図2参照)。

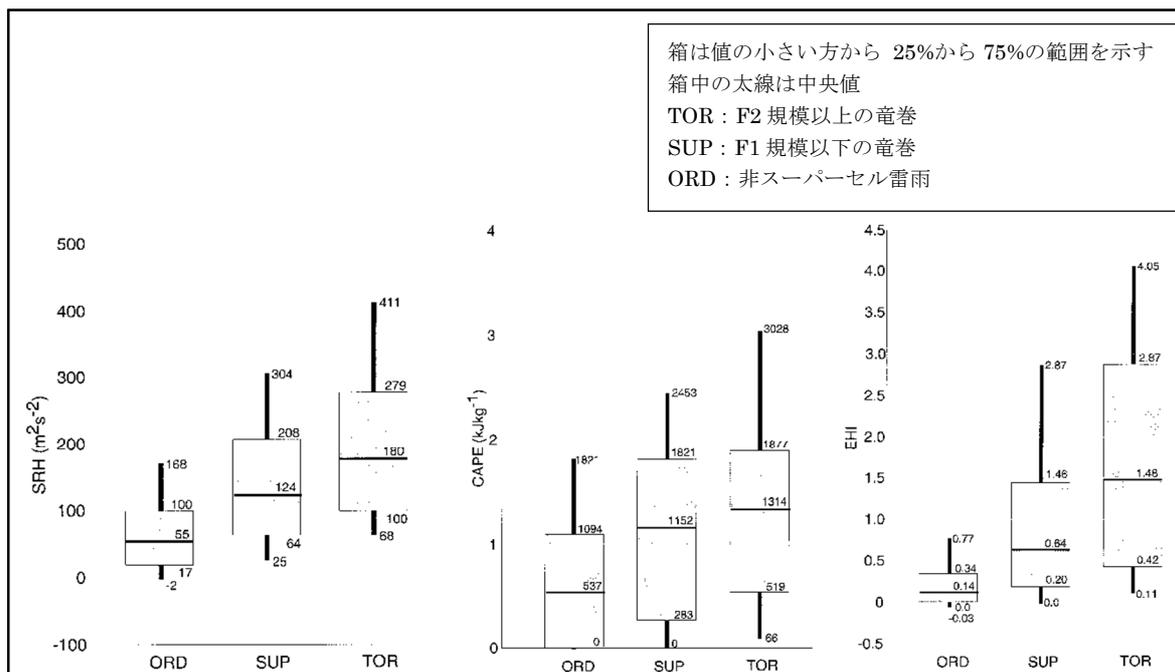


図2 各突風指数(左: SReH, 中: CAPE, 右: EHI)に対する箱ひげ図

上記の知見から、突風関連指数はF2規模以上の竜巻の分析には適用性が高いと考えられる。

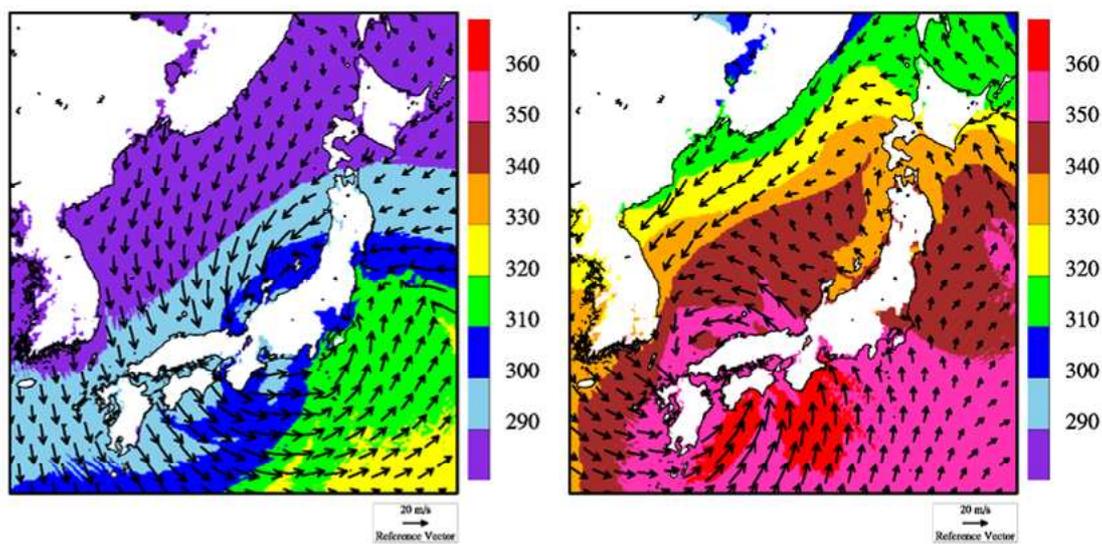
## 参考文献

- Davies, J. M., and R. H. Johns, 1993: Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes. 1. Wind shear and instability. *The Tornado: Its structure dynamics, prediction, and hazards*. C. Church, D. Burgess, C. Doswell and R. Davies-Jones, Eds., American Geophysical Union, 573-582.
- Johns, R. H., J. M. Davies, and P. W. Leftwich, 1993: Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes. 2. Variations in the combination of wind and instability parameters. *The Tornado: Its structure dynamics, prediction, and hazards*. C. Church, D. Burgess, C. Doswell and R. Davies-Jones, Eds., American Geophysical Union, 573-582.
- Rasmussen, E. N., and D. O. Blanchard, 1998: A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 13, 1148-1164.

### 補足-3 高標高山岳が及ぼす影響

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

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



(a) 1990/12/11 F3 事例

(b) 1999/09/24 F3 事例

図 1 海拔 100 m 高度における風向・風速および相当温位（単位：K）

#### 補足-4 閾値の感度（初期の検討内容）

杉本ら（2014）では、本文にて用いた同じ長期再解析データを用いて、SReH および（最大）CAPE の閾値を同時に超過する頻度についてさまざまな閾値の組み合わせで検討し、F3 規模以上の竜巻発生を観点とした地域性検討に適切な閾値を探索した。その際、CAPE の季節・緯度依存性を踏まえ、閾値の探索範囲を以下のように設定した。

SReH : 150~550 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> (100 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> 刻み)

CAPE : 200~1500 J/kg (100 J/kg 刻み)

降水量 : 4 mm/hr

同時超過頻度分布を各 SReH-CAPE の組み合わせに対して算出し、結果を実際の竜巻発生位置と比較した結果、以下の閾値を設定した。分析結果を図 1 に示す。

[5 月-10 月 (暖候期)] SReH : 350 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> CAPE : 1200 J/kg

[11 月-4 月 (寒候期)] SReH : 350 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> CAPE : 500 J/kg

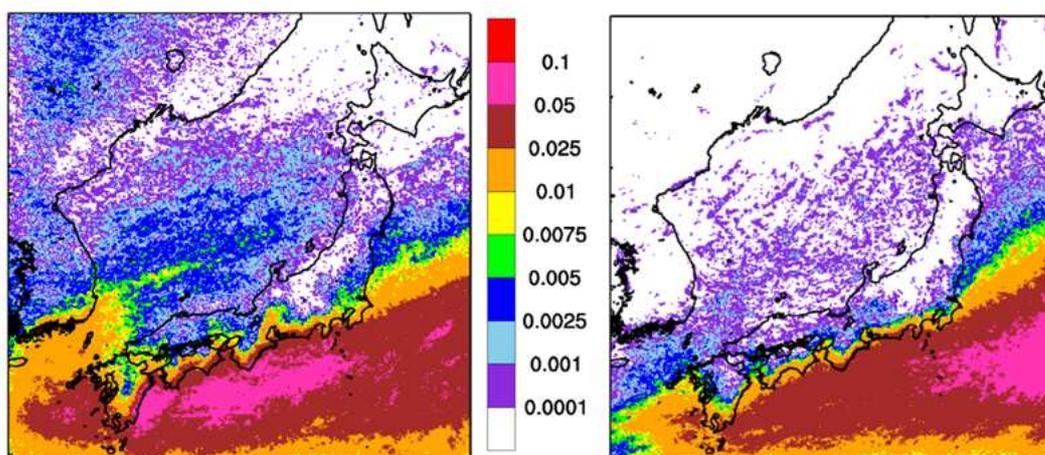


図 1 同時超過頻度分布（左：暖候期，右：寒候期）

例えば、寒候期の CAPE の閾値を 800 J/kg に引き上げると、図 2 のように、神奈川県周辺の頻度値が下がり、図 1 右図と比べると、神奈川県川崎市にて発生した F2-F3 竜巻（1978 年 2 月 28 日）や千葉県茂原市にて発生した最大級 F3 竜巻（1990 年 12 月 11 日）への対応性が低くなる。

図 2.5-3 と比較すると、寒候期の分布には大差はない。暖候期においては、関東平野の高頻度域が図 2.5-3 の方が平野部全体に広がっている点異なる点である。図 2.5-3 は過去の竜巻発生時の環境場を踏まえた検討結果であるため、こちらの方がより適切であるが、感度分析的に検討した結果においても、図 2.5-3 で採用した閾値が概ね妥当であることが示唆されているといえる。

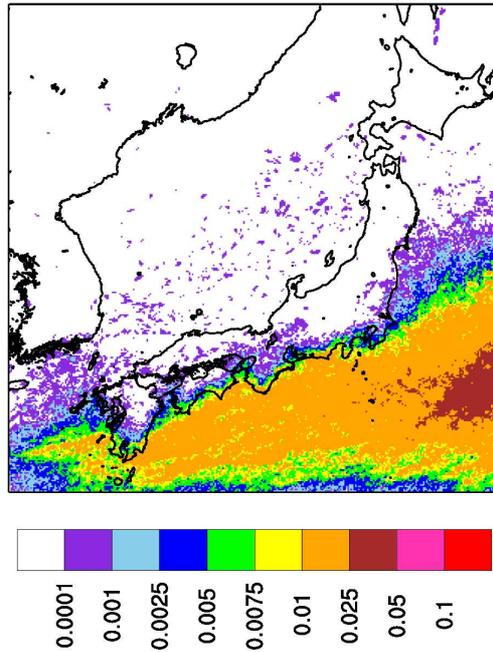


図2 同時超過頻度分布（単位 %，寒候期，CAPE 閾値：800 J/kg）

#### 参考文献

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

【参考】国内で発生した竜巻

気象庁の竜巻等の突風データベースより、1961年～2012年6月の51.5年間を対象とした、過去に発生した竜巻の一覧を示す。

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
1	1961年1月24日	13:45:00	鹿児島県	川辺郡知覧町	31.252	130.374	1
2	1961年1月24日	13:50:00	福岡県	北九州市	33.902	130.937	1
3	1961年4月2日		石川県	石川郡吉野谷村			—
4	1961年9月15日	7:40:00	宮崎県	宮崎市			—
5	1961年9月15日	10:15:00	愛知県	知多郡大府町	35.005	136.958	1～2
6	1961年10月2日	22:50:00	宮崎県	宮崎市			—
7	1961年10月7日	10:10:00	静岡県	清水市	34.993	138.490	1
8	1961年11月22日	6:37:00	静岡県	浜北町	34.823	137.799	2
9	1962年3月7日	10:00:00	沖縄県	八重山支庁石垣市			—
10	1962年5月18日	9:20:00	北海道	十勝支庁 中札内村			—
11	1962年7月2日	14:30:00	茨城県	稲敷郡東村	35.947	140.506	2
12	1962年8月26日	4:00:00	静岡県	浜松市	34.647	137.776	2
13	1962年8月26日	4:10:00	静岡県	浜松市			—
14	1962年8月26日	7:00:00	茨城県	稲敷郡阿見町			—
15	1962年8月26日	8:25:00	静岡県	榛原郡御前崎町	34.595	138.225	1～2
16	1962年9月3日	12:00:00	長崎県	南松浦郡有川町			—
17	1962年9月13日	4:50:00	長崎県	諫早市			—
18	1962年9月28日	14:20:00	北海道	東利尻町	45.225	141.257	2
19	1962年10月9日	16:45:00	新潟県	直江津市			—
20	1962年10月10日	21:25:00	長崎県	福江市			—
21	1962年10月13日	20:30:00	北海道	由仁町	42.883	141.950	2
22	1962年11月3日	10:40:00	三重県	南牟婁郡紀宝町			—
23	1962年11月4日	12:30:00	石川県	鳳至郡能都町			—
24	1962年12月23日	10:30:00	新潟県	佐渡郡相川町			—
25	1962年12月30日	8:25:00	静岡県	千浜村	34.652	138.073	1～2
26	1963年1月19日	14:00:00	神奈川県	川崎市			—
27	1963年7月14日	13:55:00	青森県	十和田市	40.621	141.205	1
28	1963年7月14日	14:00:00	青森県	十和田市			—
29	1963年8月30日	17:50:00	熊本県	葦北郡津奈木町			—
30	1963年9月18日	8:40:00	石川県	鳳至郡穴水町			—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
31	1963年9月18日	10:00:00	秋田県	本荘市			—
32	1964年1月17日	15:40:00	東京都	八丈町	33.067	139.807	2
33	1964年3月25日	11:00:00	東京都	八丈町			—
34	1964年4月26日	11:00:00	和歌山県	西牟婁郡上富田町			—
35	1964年5月24日	14:55:00	東京都	世田谷区	35.630	139.635	—
36	1964年6月16日	14:30:00	宮城県	桃生郡桃生町			—
37	1964年7月4日	14:00:00	山梨県	東八代郡石和町			—
38	1964年8月1日	10:30:00	宮崎県	児湯郡新富町			—
39	1964年8月20日	3:35:00	宮崎県	児湯郡新富町			—
40	1964年9月28日	6:45:00	東京都	八丈町			—
41	1965年5月1日	10:00:00	秋田県	南秋田郡昭和町			—
42	1965年8月21日	9:15:00	東京都	大田区または世田谷区	35.590	139.667	1~2
43	1965年8月21日	14:30:00	茨城県	猿島郡境町			—
44	1965年8月21日	19:00:00	茨城県	稲敷郡阿見町			—
45	1965年8月21日		埼玉県	川口市			—
46	1965年8月25日	5:00:00	山形県	酒田市			—
47	1965年9月5日	11:40:00	青森県	むつ市	41.292	141.167	2
48	1965年9月19日	15:05:00	秋田県	能代市			—
49	1965年9月30日	2:35:00	秋田県	秋田市	39.743	140.079	1
50	1965年9月30日	2:35:00	秋田県	秋田市			—
51	1965年9月30日	3:00:00	秋田県	西目村	39.325	140.003	0~1
52	1965年10月14日	21:40:00	東京都	大田区	35.589	139.711	1~2
53	1966年1月1日	10:45:00	新潟県	西頸城郡名立町			—
54	1966年1月4日	12:48:00	千葉県	南総町	35.364	140.163	2~3
55	1966年1月17日	6:50:00	山形県	酒田市			—
56	1966年1月17日	7:30:00	新潟県	岩船郡山北町			—
57	1966年1月18日	5:50:00	沖縄県	コザ市			—
58	1966年2月16日	0:01:00	秋田県	秋田市			—
59	1966年5月30日	23:40:00	沖縄県	八重山支庁石垣市			—
60	1966年6月6日	11:13:00	静岡県	浜松市	34.761	137.708	0~1
61	1966年6月8日	15:10:00	沖縄県	与那城村			—
62	1966年6月27日	17:00:00	宮城県	加美郡小野田町	38.588	140.730	2
63	1966年9月13日	13:45:00	北海道	石狩支庁 札幌市			—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
64	1966年9月27日	11:20:00	山形県	酒田市			—
65	1966年10月5日	16:02:00	青森県	青森市			—
66	1966年10月17日	15:45:00	秋田県	秋田市			—
67	1966年11月14日	5:15:00	秋田県	秋田市			—
68	1966年11月19日	18:50:00	秋田県	南秋田郡飯田川町			—
69	1967年3月23日	15:04:00	千葉県	銚子市	35.731	140.835	1~2
70	1967年10月28日	2:05:00	千葉県	鴨川町	35.118	140.123	2
71	1967年10月28日	2:33:00	千葉県	大網白里町	35.515	140.314	2
72	1967年10月28日	3:12:00	千葉県	飯岡町	35.701	140.719	2~3
73	1967年10月28日	7:30:00	山形県	尾花沢市	38.624	140.469	1~2
74	1967年10月31日	7:30:00	秋田県	仙北郡角館町			—
75	1968年1月8日	9:50:00	新潟県	中頸城郡大潟町	37.230	138.323	1
76	1968年1月26日	0:30:00	青森県	北津軽郡金木町			—
77	1968年8月28日	12:30:00	高知県	南国市	33.533	133.650	1~2
78	1968年9月1日	12:35:00	北海道	渡島支庁 松前町			—
79	1968年9月24日	15:30:00	宮崎県	宮崎市	31.858	131.433	1
80	1968年9月24日	17:25:00	宮崎県	高鍋町	32.088	131.521	2
81	1968年9月24日	19:05:00	宮崎県	高鍋町	32.121	131.536	2~3
82	1968年9月24日	19:20:00	宮崎県	高鍋町	32.112	131.531	2
83	1968年11月19日	18:45:00	秋田県	南秋田郡天王町			—
84	1968年12月10日	8:15:00	神奈川県	三浦市			—
85	1968年12月17日	17:10:00	新潟県	新潟市			—
86	1968年12月19日	12:30:00	東京都	八丈町			—
87	1969年1月16日	22:20:00	鹿児島県	沖永良部島知名町			—
88	1969年1月16日		鹿児島県	与論島			—
89	1969年2月5日	6:40:00	千葉県	銚子市			—
90	1969年2月5日	6:40:00	千葉県	銚子市			—
91	1969年2月5日	6:43:00	千葉県	銚子市			—
92	1969年6月22日	8:15:00	鹿児島県	鹿屋市			—
93	1969年6月22日	9:00:00	山口県	阿武郡須佐町	34.625	131.603	1
94	1969年6月23日		沖縄県	南大東島村			—
95	1969年7月8日	15:45:00	長崎県	島原市			—
96	1969年8月23日	9:30:00	茨城県	猿島郡猿島町	36.083	139.897	2

	発生日時		発生場所		発生位置		F
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	スケール
97	1969年8月23日	10:15:00	千葉県	鴨川町	35.097	140.108	1~2
98	1969年8月23日	10:45:00	東京都	八丈町			—
99	1969年8月23日	10:50:00	栃木県	小山市	36.336	139.867	1~2
100	1969年8月23日	11:30:00	茨城県	行方郡麻生町	36.031	140.453	1
101	1969年8月23日	14:20:00	福島県	いわき市			—
102	1969年8月23日	15:00:00	大分県	湯布院町			—
103	1969年8月28日		宮城県	志田郡松山町			—
104	1969年9月2日	16:40:00	東京都	武蔵野市			—
105	1969年9月24日	1:00:00	静岡県	浜松市			—
106	1969年9月24日	4:00:00	静岡県	焼津市			—
107	1969年9月24日	7:05:00	静岡県	磐田郡豊田村			—
108	1969年9月24日	9:30:00	静岡県	浜松市			—
109	1969年10月2日	21:00:00	沖縄県	八重山支庁竹富町			—
110	1969年10月6日	9:30:00	沖縄県	与那城村			—
111	1969年10月11日	9:25:00	北海道	(海上)	43.420	145.769	—
112	1969年11月18日	7:08:00	山形県	酒田市	38.909	139.835	1
113	1969年12月7日	1:00:00	高知県	南国市			—
114	1969年12月7日	18:00:00	愛知県	豊橋市	34.751	137.379	2~3
115	1970年1月31日	13:30:00	新潟県	両津市			—
116	1970年2月1日	14:30:00	新潟県	西蒲原郡岩室村			—
117	1970年5月31日		沖縄県	名護町			—
118	1970年6月25日	15:10:00	岩手県	江刺市	39.231	141.269	0~1
119	1970年7月7日	2:10:00	長崎県	福江市	32.653	128.874	1
120	1970年7月27日	16:05:00	大分県	九重町	33.124	131.191	2
121	1970年7月28日	17:00:00	福島県	大沼郡昭和村			—
122	1970年8月21日	11:00:00	埼玉県	熊谷市	36.183	139.350	1
123	1970年8月25日	13:00:00	青森県	五所川原市			—
124	1970年9月5日	11:30:00	沖縄県	本部町			—
125	1970年10月17日	12:10:00	沖縄県	豊見城村			—
126	1971年2月1日	0:20:00	石川県	河北郡内灘町	36.686	136.675	1
127	1971年3月4日	14:32:00	栃木県	那須塩原市	36.942	140.106	1~2
128	1971年7月7日	7:50:00	埼玉県	浦和市	35.879	139.670	3
129	1971年7月18日	14:00:00	長野県	飯田市			—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
130	1971年8月23日	14:00:00	福岡県	久留米市	33.313	130.498	2
131	1971年8月28日	14:20:00	高知県	土佐清水市			—
132	1971年8月31日	1:20:00	静岡県	浜北市			—
133	1971年8月31日	4:00:00	静岡県	清水市	35.015	138.481	0~1
134	1971年8月31日	4:00:00	静岡県	清水市			—
135	1971年8月31日	7:15:00	千葉県	鴨川市	35.064	140.102	—
136	1971年8月31日	9:00:00	千葉県	千葉市	35.621	140.084	2
137	1971年8月31日	10:50:00	千葉県	飯岡町	35.700	140.703	—
138	1971年9月8日	2:00:00	千葉県	飯岡町	35.700	140.725	—
139	1971年10月17日	5:00:00	北海道	羽幌町	44.356	141.692	2
140	1971年10月17日	5:00:00	北海道	羽幌町	44.356	141.692	0~1
141	1972年4月1日	15:30:00	東京都	府中市			—
142	1972年4月30日	12:15:00	鹿児島県	大島郡知名町			—
143	1972年5月2日	12:55:00	群馬県	前橋市			—
144	1972年6月6日	20:30:00	沖縄県	糸満市	26.144	127.686	—
145	1972年6月6日	20:30:00	沖縄県	糸満市	26.092	127.697	1~2
146	1972年6月6日	23:30:00	鹿児島県	大島郡知名町	27.358	128.599	1
147	1972年7月12日	15:15:00	岐阜県	関市	35.485	136.911	1~2
148	1972年7月30日	17:00:00	茨城県	新治郡出島村			—
149	1972年8月4日	11:52:00	青森県	三戸郡倉石村	40.506	141.253	1
150	1972年8月13日	17:00:00	福島県	浪江町			—
151	1972年8月13日	18:30:00	福島県	船引町	37.417	140.617	1~2
152	1972年9月16日	16:00:00	埼玉県	東松山市			—
153	1972年9月20日	8:27:00	鹿児島県	種子島中種子町			—
154	1972年10月27日	15:15:00	山形県	鶴岡市			—
155	1972年11月14日	20:58:00	宮崎県	日向市			—
156	1972年11月15日	12:00:00	鹿児島県	種子島南種子町			—
157	1972年11月20日	16:30:00	佐賀県	鳥栖市			—
158	1972年11月21日	17:05:00	富山県	黒部市	36.891	137.416	1
159	1972年12月17日	13:00:00	沖縄県	糸満市			—
160	1972年12月23日	5:03:00	鹿児島県	中種子町			—
161	1973年1月19日	11:45:00	三重県	菰野町	35.042	136.498	1
162	1973年1月30日	11:00:00	福島県	二本松市	37.567	140.400	0~1

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
163	1973年4月29日	16:40:00	茨城県	那珂町			—
164	1973年5月11日	6:00:00	新潟県	村上市			—
165	1973年5月21日	16:30:00	石川県	羽咋郡押水町	36.832	136.746	0~1
166	1973年6月22日	14:35:00	青森県	田舎館村			—
167	1973年7月2日	12:30:00	京都府	府 南区川島後反町			—
168	1973年9月27日	23:00:00	北海道	礼文町	45.439	141.036	1
169	1973年10月3日	15:05:00	秋田県	山本郡八森町			—
170	1973年10月22日	13:20:00	秋田県	秋田市	39.695	140.072	1
171	1973年11月19日	15:30:00	新潟県	荒川町	38.128	139.461	1
172	1973年11月25日	1:50:00	秋田県	秋田市	39.696	140.122	0~1
173	1973年12月3日	19:30:00	富山県	黒部市			—
174	1974年3月11日	14:35:00	群馬県	高崎市	36.344	138.986	1~2
175	1974年3月13日	13:20:00	福島県	いわき市	36.948	140.898	1
176	1974年4月21日	5:45:00	長崎県	西彼杵郡外海町	32.841	129.700	1
177	1974年4月25日	12:40:00	宮崎県	宮崎市			—
178	1974年6月6日	10:10:00	静岡県	浜北市	34.834	137.814	1~2
179	1974年6月6日	12:50:00	静岡県	静岡市	34.987	138.427	0~1
180	1974年6月25日	16:15:00	埼玉県	和光市			—
181	1974年7月6日	16:40:00	高知県	南国市	33.534	133.642	1~2
182	1974年7月8日	3:00:00	静岡県	磐田郡福田町	34.688	137.889	1
183	1974年7月8日	3:30:00	静岡県	周智郡森町			—
184	1974年7月8日	3:30:00	静岡県	小笠郡浜岡町	34.623	138.135	1~2
185	1974年7月8日	7:16:00	神奈川県	剣崎灯台付近			—
186	1974年8月8日	5:05:00	秋田県	山本郡峰浜村	40.281	140.057	0~1
187	1974年8月11日	13:30:00	福岡県	福岡市			—
188	1974年8月27日	10:30:00	静岡県	周智郡森町	34.808	137.901	1
189	1974年9月7日	9:50:00	静岡県	浜松市	34.732	137.747	1
190	1974年9月9日	3:30:00	高知県	香我美町			—
191	1974年10月3日	19:05:00	北海道	奥尻郡奥尻町	42.189	139.517	1~2
192	1974年10月20日	15:00:00	北海道	檜山郡上ノ国町	41.796	140.130	1~2
193	1975年2月6日	7:00:00	鹿児島県	大島郡伊仙町	27.689	128.922	2
194	1975年2月15日	16:20:00	東京都	大島町	34.753	139.354	1~2
195	1975年4月8日	10:00:00	高知県	安芸郡奈半利町			—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
196	1975年4月27日	5:17:00	沖縄県	名護市			—
197	1975年5月31日	18:10:00	島根県	簸川郡大社町	35.433	132.628	2
198	1975年5月31日	18:10:00	島根県	簸川郡大社町	35.435	132.633	0~1
199	1975年5月31日	18:40:00	島根県	簸川郡大社町	35.419	132.631	0~1
200	1975年7月5日	17:30:00	沖縄県	沖縄市			—
201	1975年7月17日	6:40:00	秋田県	秋田市	39.731	140.180	1
202	1975年8月20日	2:07:00	秋田県	山本郡琴丘町			—
203	1975年8月22日	14:30:00	三重県	熊野市	33.876	136.086	1
204	1975年9月8日	1:30:00	北海道	奥尻郡奥尻町	42.214	139.549	1~2
205	1975年10月12日	3:50:00	長崎県	東彼杵郡東彼杵町	33.036	129.913	1
206	1975年10月12日	5:15:00	熊本県	本渡市	32.458	130.208	2
207	1975年11月14日	20:40:00	高知県	安芸郡東洋町	33.508	134.274	1
208	1975年11月15日	16:22:00	東京都	三宅島三宅村	34.118	139.516	1
209	1975年11月15日	18:15:00	千葉県	大網白里町	35.481	140.418	1
210	1975年12月22日	12:00:00	兵庫県	淡路島一宮町			—
211	1976年1月14日	9:30:00	石川県	羽咋市			—
212	1976年2月28日	14:00:00	鹿児島県	阿久根市	32.086	130.172	1
213	1976年4月7日	1:00:00	千葉県	佐原市	35.867	140.533	1
214	1976年6月5日	12:40:00	埼玉県	本庄市			—
215	1976年6月10日	19:00:00	鹿児島県	枕崎市			—
216	1976年6月11日	4:30:00	岐阜県	加茂郡富加町			—
217	1976年6月11日	4:40:00	岐阜県	大野郡久々野町			—
218	1976年7月18日	15:00:00	群馬県	桐生市			—
219	1976年7月18日	16:00:00	茨城県	総和町			—
220	1976年7月19日	5:50:00	埼玉県	大里郡岡部町	36.179	139.217	2
221	1976年8月3日	18:00:00	愛知県	名古屋市	35.113	136.981	1
222	1976年8月16日	5:20:00	福岡県	遠賀郡芦屋町	33.909	130.665	1~2
223	1976年8月20日	3:50:00	沖縄県	東村			—
224	1976年9月3日	1:30:00	鹿児島県	阿久根市			—
225	1976年9月9日	4:45:00	茨城県	岩井市			—
226	1976年9月9日	5:30:00	茨城県	下妻市			—
227	1976年9月9日	8:20:00	栃木県	二宮町			—
228	1976年9月9日	8:30:00	茨城県	下館市			—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
229	1976年9月9日	9:30:00	栃木県	真岡市	36.408	140.054	1~2
230	1976年9月9日	22:52:00	群馬県	太田市			—
231	1976年9月10日	14:45:00	静岡県	磐田郡浅羽町			—
232	1976年9月13日	5:20:00	高知県	香美郡香我美町			—
233	1976年9月19日	20:30:00	宮城県	石巻市			—
234	1976年9月23日	13:30:00	青森県	八戸市			—
235	1976年10月20日	1:00:00	鹿児島県	出水郡野田町			—
236	1976年10月20日	16:50:00	静岡県	小笠郡菊川町			—
237	1976年10月20日	19:35:00	茨城県	稲敷郡新利根村			—
238	1976年10月23日	7:20:00	沖縄県	南風原村	26.185	127.717	1
239	1976年11月17日	5:40:00	鹿児島県	口之永良部島本村			—
240	1976年12月25日	10:00:00	東京都	八丈島八丈町			—
241	1977年1月13日	1:30:00	石川県	金沢市	36.568	136.567	0~1
242	1977年2月22日	12:00:00	群馬県	北群馬郡子持村			—
243	1977年3月27日	7:25:00	静岡県	磐田市			—
244	1977年9月8日	10:20:00	福岡県	福岡市	33.552	130.320	1
245	1977年9月9日	10:20:00	茨城県	岩井市			—
246	1977年9月9日	10:50:00	埼玉県	大里郡川本町			—
247	1977年9月9日	10:50:00	茨城県	結城市			—
248	1977年9月9日	13:00:00	茨城県	下妻市			—
249	1977年11月16日	6:30:00	千葉県	勝浦市			—
250	1977年11月19日	8:30:00	秋田県	男鹿市			—
251	1977年12月16日	12:00:00	鹿児島県	加世田市			—
252	1978年1月5日	12:00:00	福井県	三国町			—
253	1978年2月3日	16:50:00	静岡県	静岡市			—
254	1978年2月10日	5:30:00	鹿児島県	加世田市	31.430	130.278	1
255	1978年2月28日	21:20:00	神奈川県	川崎市	35.534	139.697	2~3
256	1978年5月9日	10:05:00	鹿児島県	西之表市			—
257	1978年6月20日	15:00:00	熊本県	球磨郡多良木町			—
258	1978年6月20日	18:40:00	秋田県	湯沢市			—
259	1978年7月12日	16:00:00	静岡県	小笠町			—
260	1978年8月14日	10:40:00	北海道	豊富町	45.083	141.633	—
261	1978年9月15日	22:45:00	和歌山県	日高郡南部町			—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
262	1978年9月16日	0:10:00	和歌山県	西牟婁郡串本潮岬			—
263	1978年9月26日	12:00:00	山形県	酒田市			—
264	1978年9月29日	6:00:00	鹿児島県	(海上)			—
265	1978年9月29日	14:20:00	和歌山県	田辺市			—
266	1978年10月27日	8:30:00	長崎県	西彼杵郡西彼町	32.983	129.740	1
267	1978年12月4日	13:40:00	鹿児島県	出水郡東町			—
268	1979年2月23日	4:15:00	高知県	安芸市			—
269	1979年3月14日	15:20:00	沖縄県	糸満市			—
270	1979年4月2日	9:00:00	沖縄県	宜野湾市			—
271	1979年5月8日	6:00:00	静岡県	浜名郡舞阪町			—
272	1979年5月23日	17:00:00	埼玉県	入間市			—
273	1979年5月27日	12:25:00	茨城県	鹿島郡旭村	36.247	140.550	1~2
274	1979年8月17日	18:00:00	高知県	香美郡土佐山田町			—
275	1979年8月22日	14:00:00	福岡県	福岡市	33.549	130.446	1
276	1979年9月2日	12:15:00	鹿児島県	肝属郡内之浦町			—
277	1979年9月3日	3:00:00	高知県	室戸市			—
278	1979年9月3日	16:15:00	宮崎県	国富町			—
279	1979年9月3日	16:29:00	宮崎県	宮崎市	31.922	131.419	1
280	1979年9月4日	9:30:00	三重県	四日市	34.981	136.530	1
281	1979年9月4日	13:27:00	愛知県	名古屋市	35.111	136.956	1
282	1979年9月4日	18:55:00	千葉県	松戸市			—
283	1979年9月22日	12:15:00	静岡県	浜北市			—
284	1979年9月22日	16:15:00	鹿児島県	鹿屋市			—
285	1979年9月30日	6:05:00	宮崎県	宮崎市			—
286	1979年9月30日	7:00:00	宮崎県	国富町			—
287	1979年9月30日	7:05:00	宮崎県	宮崎市			—
288	1979年10月11日	15:00:00	佐賀県	佐賀市			—
289	1979年10月31日	13:00:00	石川県	羽咋郡富来町	37.139	136.684	0~1
290	1979年11月2日	1:58:00	北海道	松前郡松前町	41.502	140.018	2
291	1979年12月21日	14:25:00	鹿児島県	揖宿郡開聞町			—
292	1980年2月1日	12:30:00	沖縄県	糸満市			—
293	1980年2月2日	8:20:00	福井県	坂井郡三国町			—
294	1980年4月27日	22:20:00	高知県	安芸郡黒鳥村			—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
295	1980年7月25日	15:50:00	三重県	度会郡小俣町			—
296	1980年7月30日	1:00:00	鹿児島県	出水郡長島町			—
297	1980年7月30日	9:20:00	鹿児島県	日置郡東市			—
298	1980年8月8日	3:15:00	宮崎県	宮崎市			—
299	1980年8月19日	4:00:00	千葉県	(海上)	35.146	140.641	—
300	1980年8月28日	23:40:00	長崎県	富江町	32.603	128.740	1
301	1980年9月10日	10:35:00	宮崎県	児湯郡高鍋町			—
302	1980年9月10日	23:00:00	宮崎県	東臼杵郡門川町			—
303	1980年10月13日	20:10:00	鹿児島県	中種子町	30.510	130.978	1
304	1980年10月14日	0:40:00	宮崎県	日南市			—
305	1980年10月14日	1:30:00	宮崎県	宮崎市	31.846	131.447	1
306	1980年10月14日	2:15:00	宮崎県	宮崎市	32.014	131.486	1
307	1980年10月14日	2:20:00	宮崎県	宮崎市	31.951	131.394	2
308	1980年10月14日	3:00:00	宮崎県	宮崎市			—
309	1980年10月14日	7:00:00	宮崎県	日南市			—
310	1980年10月19日	0:20:00	鹿児島県	川辺郡知覧町			—
311	1980年10月31日	9:30:00	北海道	門別町	42.425	142.223	1~2
312	1980年11月6日	0:30:00	沖縄県	八重山支庁小浜島			—
313	1980年12月4日	4:30:00	北海道	檜山支庁 奥尻町			—
314	1980年12月12日	18:50:00	山梨県	南都留郡山中湖村			—
315	1980年12月28日	9:00:00	山形県	酒田市			—
316	1981年3月15日	13:27:00	千葉県	松戸市	35.794	139	0~1
317	1981年6月18日	15:35:00	山形県	山形市			—
318	1981年6月29日	15:35:00	佐賀県	佐賀郡川副町	33.153	130.326	1
319	1981年6月29日	16:00:00	熊本県	上益城郡嘉島町			—
320	1981年6月29日	16:20:00	大分県	日田市	33.305	130.953	1
321	1981年6月30日		福岡県	柳川市			—
322	1981年7月12日	6:10:00	愛知県	渥美町			—
323	1981年7月15日	16:00:00	青森県	南津軽郡田舎館村			—
324	1981年8月22日	11:30:00	群馬県	群馬郡箕郷町	36.411	138.971	2
325	1981年9月13日		宮城県	仙台市			—
326	1981年11月2日	19:00:00	東京都	三宅島阿古村			—
327	1982年2月28日	7:20:00	秋田県	男鹿市			—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
328	1982年4月9日	15:00:00	千葉県	君津郡袖ヶ浦町			—
329	1982年4月15日	10:50:00	埼玉県	深谷市			—
330	1982年5月6日	15:40:00	鹿児島県	西之表市			—
331	1982年10月24日	18:00:00	宮城県	河南町			—
332	1982年11月11日	9:30:00	愛知県	田原町			—
333	1982年11月25日	6:30:00	北海道	留萌支庁 苫前町			—
334	1982年11月30日	6:00:00	愛知県	豊橋市			—
335	1983年1月20日	16:20:00	北海道	渡島支庁 松前町			—
336	1983年1月22日	7:35:00	秋田県	山本郡峰浜村			—
337	1983年2月2日	4:30:00	鹿児島県	揖宿郡穎娃町			—
338	1983年3月12日	6:20:00	沖縄県	糸満市	26.093	127.685	1
339	1983年4月4日	0:30:00	熊本県	玉名郡長洲町	32.928	130.467	1
340	1983年4月4日	0:40:00	熊本県	阿蘇郡阿蘇町	32.975	131.058	1
341	1983年4月4日	0:40:00	熊本県	阿蘇郡一の宮町	32.958	131.125	1
342	1983年6月10日	15:10:00	千葉県	君津市			—
343	1983年6月29日	15:00:00	福岡県	豊前市			—
344	1983年7月5日	3:20:00	佐賀県	神埼郡三瀬村			—
345	1983年7月27日	15:00:00	茨城県	結城市			—
346	1983年7月27日	15:20:00	茨城県	結城市			—
347	1983年7月27日	16:00:00	千葉県	白井町	35.794	140.067	—
348	1983年7月30日	17:30:00	岡山県	津山市	35.049	133.903	1~2
349	1983年8月15日	11:55:00	千葉県	夷隅郡大原町			—
350	1983年9月1日	10:17:00	長崎県	西彼杵郡琴海町			—
351	1983年9月25日	4:30:00	新潟県	岩船郡荒川町			—
352	1983年9月25日	15:00:00	沖縄県	伊是名村	26.926	127.948	2
353	1983年9月25日	15:30:00	沖縄県	東村	26.630	128.200	1
354	1983年9月27日	7:05:00	長崎県	南松浦郡富江町	32.588	128.774	1
355	1983年9月27日	23:40:00	高知県	土佐市			—
356	1983年10月3日	4:00:00	新潟県	岩船郡神林村			—
357	1983年10月3日	5:30:00	新潟県	刈羽村			—
358	1984年2月1日	22:00:00	秋田県	男鹿市			—
359	1984年8月26日	12:30:00	熊本県	菊池市			—
360	1984年9月4日	9:00:00	長崎県	佐世保市			—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
361	1984年9月25日	14:05:00	新潟県	村上市			—
362	1984年10月6日	10:50:00	沖縄県	浦添市			—
363	1984年11月19日	22:00:00	鳥取県	米子市	35.434	133.323	1
364	1984年12月28日	10:20:00	石川県	小松市			—
365	1985年4月20日	8:30:00	静岡県	志太郡大井川町			—
366	1985年5月28日	3:30:00	沖縄県	国頭村			—
367	1985年6月11日	13:30:00	沖縄県	糸満市			—
368	1985年6月23日	14:30:00	福岡県	北九州市	33.846	130.868	1
369	1985年7月11日	1:30:00	岐阜県	本巣郡穂積町	35.405	136.681	2
370	1985年8月12日	6:50:00	長崎県	富江町			—
371	1985年8月12日	9:00:00	宮崎県	児湯郡新富町	32.075	131.443	2
372	1985年8月12日	16:30:00	埼玉県	秩父市			—
373	1985年8月31日	5:30:00	宮崎県	日向市	32.394	131.637	1~2
374	1985年9月28日	13:55:00	鹿児島県	枕崎市	31.284	130.339	1~2
375	1985年10月3日	23:00:00	沖縄県	宮古支庁多良間島			—
376	1985年10月5日	18:40:00	高知県	土佐市	33.456	133.471	1
377	1985年10月5日	18:45:00	高知県	高知市	33.568	133.561	1
378	1985年10月13日	9:30:00	岩手県	岩手郡松尾村			—
379	1985年11月11日	11:40:00	熊本県	八代市			—
380	1985年11月12日	9:05:00	北海道	日高支庁 三石町			—
381	1986年4月6日	19:10:00	新潟県	三島郡寺泊町			—
382	1986年6月24日	15:35:00	広島県	三和町	34.636	132.793	2
383	1986年7月12日	18:00:00	山口県	玖珂郡周東町			—
384	1986年7月15日	13:50:00	岐阜県	恵那市			—
385	1986年9月7日	11:30:00	青森県	弘前市			—
386	1986年9月7日	12:00:00	宮城県	桃生郡河北町			—
387	1986年9月20日	17:50:00	長崎県	平戸市			—
388	1986年10月2日	0:00:00	高知県	香美郡夜須町			—
389	1986年10月5日		鹿児島県	曾於郡末吉町			—
390	1986年10月10日	15:30:00	佐賀県	相知町			—
391	1986年10月10日	15:50:00	佐賀県	巖木町			—
392	1986年12月18日	16:10:00	高知県	南国市			—
393	1986年12月18日		高知県	幡多郡大方町			—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
394	1986年12月19日	1:30:00	愛知県	渥美郡赤羽根町	34.613	137.204	1
395	1986年12月19日	12:00:00	静岡県	湖西市	34.723	137.519	0~1
396	1987年1月5日	7:55:00	沖縄県	勝連町	26.329	127.870	2
397	1987年1月8日	2:00:00	石川県	能美郡寺井町			—
398	1987年1月8日	5:00:00	石川県	羽咋市			—
399	1987年1月8日	6:30:00	石川県	七塚町			—
400	1987年1月11日	1:32:00	秋田県	南秋田郡若美町	40.041	139.939	0~1
401	1987年1月11日	2:00:00	秋田県	八竜町	40.103	139.966	1
402	1987年1月13日	9:05:00	島根県	江津市			—
403	1987年5月1日	2:12:00	鹿児島県	枕崎市			—
404	1987年5月1日	3:10:00	鹿児島県	知覧町			—
405	1987年7月17日	17:00:00	福島県	福島市			—
406	1987年8月5日	13:10:00	熊本県	八代郡竜北町			—
407	1987年8月8日		鹿児島県	阿久根市			—
408	1987年8月10日	13:05:00	岩手県	二戸市	40.297	141.304	0~1
409	1987年8月30日	1:10:00	宮城県	東諸			—
410	1987年8月30日	16:45:00	長崎県	富江町	32.584	128.754	1
411	1987年9月23日	20:00:00	高知県	土佐市			—
412	1987年10月23日	15:20:00	沖縄県	宮古支庁下地町			—
413	1988年1月18日	14:30:00	千葉県	安房郡千倉町			—
414	1988年4月28日	1:30:00	沖縄県	宮古支庁平良市			—
415	1988年4月28日	19:40:00	沖縄県	糸満市			—
416	1988年6月18日	13:30:00	宮城県	小野田町	38.590	140.723	1
417	1988年7月20日	15:30:00	鹿児島県	阿久根市			—
418	1988年8月10日	11:52:00	埼玉県	川島町	35.989	139.438	2
419	1988年9月25日	9:40:00	和歌山県	串本町	33.456	135.758	1
420	1988年10月2日	20:30:00	北海道	日高支庁 えりも町			—
421	1988年10月13日	11:30:00	北海道	日高支庁 静内町			—
422	1989年1月20日	13:30:00	神奈川県	綾瀬市	35.425	139.425	—
423	1989年3月16日	19:20:00	島根県	簸川郡大社町	35.400	132.667	2
424	1989年3月24日	16:00:00	岐阜県	岐阜市			—
425	1989年4月24日	21:50:00	東京都	八丈島八丈町			—
426	1989年5月18日	12:50:00	沖縄県	嘉手納町			—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
427	1989年7月4日	16:15:00	沖縄県	沖縄市	26.314	127.835	2
428	1989年7月11日	17:40:00	岡山県	津山市	35.097	134.096	2
429	1989年7月19日	14:30:00	熊本県	菊池郡旭志村			—
430	1989年8月27日		埼玉県	騎西町			—
431	1989年9月18日		高知県	幡多郡大月町			—
432	1989年9月19日	10:40:00	宮崎県	佐土原町			—
433	1989年9月19日	14:20:00	愛媛県	南宇和郡一本松町			—
434	1989年9月19日	22:15:00	三重県	熊野市			—
435	1989年9月22日	14:00:00	大阪府	泉南郡岬町	34.317	135.133	1
436	1989年10月6日	21:00:00	北海道	後志支庁 小樽市			—
437	1989年11月29日	13:30:00	新潟県	三島郡寺泊町			—
438	1990年2月19日	15:15:00	鹿児島県	枕崎市	31.261	130.276	2~3
439	1990年3月12日	6:30:00	三重県	志摩郡志摩町	34.256	136.843	1
440	1990年3月31日	4:40:00	沖縄県	糸満市			—
441	1990年4月3日	22:15:00	沖縄県	国頭郡金武町	26.456	127.864	2
442	1990年4月6日	2:55:00	石川県	羽咋郡富来町	37.203	136.682	2
443	1990年6月16日	11:30:00	東京都	田無市			—
444	1990年7月24日	12:20:00	沖縄県	南風原町			—
445	1990年7月24日	15:03:00	沖縄県	豊見城村			—
446	1990年7月24日	15:10:00	山梨県	河口湖			—
447	1990年8月26日	23:45:00	山形県	温海町			—
448	1990年9月14日	15:30:00	広島県	比婆郡東城町			—
449	1990年9月19日	4:30:00	宮崎県	都農町			—
450	1990年9月19日	5:30:00	宮崎県	都農町			—
451	1990年9月19日	14:00:00	静岡県	浜松市, 舞阪町, 雄踏町	34.703	137.628	—
452	1990年9月19日	19:10:00	東京都	稲城市			—
453	1990年9月19日	22:20:00	栃木県	壬生町	36.466	139.831	1~2
454	1990年9月19日		茨城県	下妻市			—
455	1990年9月19日		茨城県	稲敷郡東村			—
456	1990年10月5日	8:35:00	鹿児島県	大島郡和泊町			—
457	1990年10月6日	10:50:00	鹿児島県	川内市	31.785	130.299	1
458	1990年10月18日	4:40:00	北海道	渡島支庁 長万部町			—
459	1990年10月26日	13:30:00	宮城県	矢本町			—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
460	1990年12月11日	17:47:00	千葉県	鴨川市	35.087	140.036	2
461	1990年12月11日	18:00:00	千葉県	安房郡丸山町			—
462	1990年12月11日	18:50:00	千葉県	富津市			—
463	1990年12月11日	19:13:00	千葉県	茂原市	35.424	140.289	3
464	1990年12月11日		千葉県	山武郡大網白里町			—
465	1990年12月12日	0:20:00	茨城県	海上～那珂湊市	36.381	140.628	1
466	1991年1月13日	14:48:00	新潟県	(海上)	38.024	138.206	—
467	1991年2月4日	9:40:00	兵庫県	(海上)	35.733	134.850	—
468	1991年2月13日	18:00:00	沖縄県	国頭郡恩納村	26.434	127.780	—
469	1991年2月13日	22:27:00	沖縄県	那覇市	26.198	127.684	1
470	1991年2月15日	11:00:00	福井県	(湖上)	35.565	135.881	1
471	1991年4月7日	0:03:00	沖縄県	島尻郡具志川村	26.346	126.739	2
472	1991年4月7日	0:05:00	沖縄県	島尻郡具志川村	26.347	126.747	1～2
473	1991年5月13日	13:05:00	北海道	幕別町	42.888	143.252	0
474	1991年6月12日	13:30:00	富山県	魚津市	36.816	137.453	2
475	1991年6月25日	11:30:00	鹿児島県	姶良郡吉松町	32.025	130.733	1
476	1991年8月8日	14:55:00	新潟県	白根市	37.767	139.033	—
477	1991年9月17日	8:50:00	北海道	(海上)	42.820	140.214	—
478	1991年11月3日	23:07:00	島根県	簸川郡斐川町	35.385	132.785	1
479	1991年11月28日	11:45:00	宮崎県	日南市	31.599	131.381	1
480	1991年11月28日	16:30:00	和歌山県	日置川町	33.558	135.447	0～1
481	1991年11月28日	22:00:00	東京都	新島若郷	34.375	139.250	0
482	1991年12月11日	20:10:00	石川県	金沢市	36.600	136.633	1
483	1992年1月6日	3:30:00	鹿児島県	大島郡知名町	27.369	128.530	1
484	1992年2月15日	9:25:00	沖縄県	島尻郡具志川村	26.360	126.725	1
485	1992年3月31日	14:55:00	沖縄県	(海上)	26.433	127.933	—
486	1992年4月15日	16:55:00	和歌山県	日置川町	33.558	135.417	—
487	1992年5月17日	14:33:00	沖縄県	(海上)	26.364	126.686	—
488	1992年5月23日	19:30:00	栃木県	益子町	36.489	140.109	1
489	1992年7月9日	11:25:00	北海道	札幌市	43.065	141.412	2
490	1992年8月7日	16:04:00	宮城県	本吉郡唐桑町	38.858	141.671	1
491	1992年8月12日	18:50:00	岐阜県	岐阜市	35.392	136.809	1
492	1992年9月13日	8:50:00	北海道	(海上)	45.447	141.667	—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
493	1992年9月17日	9:05:00	北海道	増毛町	43.847	141.499	1
494	1992年9月17日	9:05:00	北海道	(海上)	43.847	141.499	—
495	1992年9月19日	14:45:00	宮崎県	北諸県郡三股町	31.714	131.110	—
496	1992年9月22日	10:00:00	沖縄県	名護市	26.633	128.035	1
497	1992年10月30日	18:15:00	静岡県	掛川市	34.761	137.964	1
498	1992年11月19日	11:10:00	宮崎県	北浦町	32.685	131.843	—
499	1992年12月13日	17:41:00	山梨県	北巨摩郡武川村	35.775	138.391	1
500	1993年1月7日	10:30:00	和歌山県	印南町	33.797	135.242	—
501	1993年1月23日	17:30:00	沖縄県	竹富町	24.376	123.753	0
502	1993年2月12日	21:05:00	新潟県	西蒲原郡分水町	37.634	138.828	0~1
503	1993年3月2日	6:20:00	神奈川県	(海上)	35.097	139.546	—
504	1993年5月2日	8:20:00	愛媛県	東温市	33.756	132.873	0~1
505	1993年5月27日	1:50:00	沖縄県	西原町	26.232	127.752	1
506	1993年6月18日	10:15:00	福岡県	大牟田市	33.046	130.463	1
507	1993年7月14日	16:20:00	岐阜県	加茂郡七宗町	35.523	137.114	1
508	1993年7月17日	21:00:00	宮崎県	西臼杵郡高千穂町	32.775	131.257	—
509	1993年9月1日	9:00:00	北海道	天塩町	44.963	141.821	1
510	1993年9月3日	13:00:00	高知県	土佐清水市	32.823	132.946	1
511	1993年9月3日	15:45:00	宮崎県	延岡市	32.509	131.675	0~1
512	1993年9月3日	20:22:00	高知県	吾川郡春野町	33.480	133.526	2
513	1993年9月4日	7:40:00	茨城県	つくば市	36.133	140.067	1
514	1993年9月26日	15:52:00	北海道	留萌市	43.955	141.615	—
515	1993年10月17日	9:20:00	新潟県	(海上)	37.989	138.074	—
516	1993年10月17日	9:30:00	石川県	(海上)	36.919	136.731	—
517	1993年10月17日	9:30:00	新潟県	(海上)	38.055	137.890	—
518	1993年10月17日	9:35:00	新潟県	(海上)	37.989	138.074	—
519	1993年10月22日	9:00:00	鳥取県	(海上)	35.567	133.433	—
520	1993年10月22日	9:00:00	鳥取県	(海上)	35.567	133.433	—
521	1993年10月22日	9:00:00	鳥取県	(海上)	35.567	133.433	—
522	1993年10月23日	17:00:00	新潟県	(海上)	38.092	138.208	—
523	1993年11月24日	13:50:00	新潟県	(海上)	37.224	138.214	—
524	1993年12月1日	0:30:00	鹿児島県	指宿郡穎娃町	31.251	130.441	1
525	1993年12月1日	1:10:00	鹿児島県	垂水市	31.441	130.739	1

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
526	1994年2月9日	9:20:00	山口県	(海上)	33.835	131.917	—
527	1994年3月23日	2:00:00	鹿児島県	大島郡伊仙町	27.671	128.968	0~1
528	1994年3月26日	11:40:00	山形県	酒田市	38.809	139.772	1
529	1994年8月20日	10:18:00	沖縄県	伊良部町	24.809	125.218	2
530	1994年9月1日	16:00:00	新潟県	(海上)	37.985	139.049	—
531	1994年9月1日	17:20:00	新潟県	白根市	37.829	139.025	—
532	1994年9月29日	17:30:00	愛知県	豊橋市	34.681	137.358	1
533	1994年9月29日	17:35:00	愛知県	蒲郡市	34.816	137.236	1
534	1994年9月29日	19:00:00	静岡県	新居町	34.682	137.569	0~1
535	1994年10月4日	17:05:00	高知県	(海上)	33.521	133.703	—
536	1994年10月4日	17:05:00	高知県	(海上)	33.519	133.692	—
537	1994年10月4日	17:05:00	高知県	(海上)	33.521	133.696	—
538	1994年10月4日	17:15:00	高知県	香美郡赤岡町	33.538	133.725	0
539	1994年10月4日	17:30:00	高知県	南国市	33.536	133.681	0
540	1994年10月5日	6:15:00	北海道	門別町	42.462	142.161	1
541	1994年10月5日	6:35:00	北海道	門別町	42.458	142.173	1~2
542	1994年10月6日	7:50:00	石川県	金沢市	36.693	136.583	—
543	1994年10月12日	10:22:00	高知県	芸西村	33.520	133.789	0~1
544	1994年12月19日	8:40:00	東京都	(海上)	34.750	139.233	—
545	1995年1月13日	8:50:00	高知県	(海上)	33.183	134.250	—
546	1995年5月1日	14:00:00	宮崎県	西都市	32.121	131.394	1
547	1995年8月14日	17:17:00	沖縄県	(海上)	26.356	127.455	—
548	1995年9月23日	8:50:00	沖縄県	読谷村	26.405	127.716	0
549	1995年9月23日	9:05:00	沖縄県	与那城町	26.386	127.995	1
550	1995年12月1日	13:51:00	石川県	(海上)	36.437	136.418	—
551	1996年3月30日	5:30:00	鹿児島県	枕崎市	31.253	130.364	1
552	1996年7月1日	6:10:00	鹿児島県	喜入町	31.374	130.541	1
553	1996年7月5日	14:40:00	千葉県	千葉市	35.558	140.174	2
554	1996年7月5日	15:00:00	千葉県	八街市	35.671	140.344	1
555	1996年8月4日	13:52:00	長崎県	大村市	32.963	129.930	0
556	1996年9月5日	10:20:00	秋田県	由利郡金浦町	39.255	139.900	—
557	1996年10月4日	8:45:00	愛媛県	(海上)	34.062	133.032	—
558	1996年10月8日	23:07:00	北海道	遠別町	44.719	141.804	1

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
559	1996年11月30日	7:05:00	新潟県	柏崎市	37.394	138.571	1
560	1997年1月22日	9:20:00	新潟県	新潟市	37.916	139.033	0
561	1997年3月29日	12:00:00	沖縄県	糸満市	26.100	127.659	2
562	1997年4月7日	17:20:00	神奈川県	横浜市	35.518	139.614	0~1
563	1997年5月3日	10:50:00	沖縄県	(海上)	26.108	127.542	—
564	1997年5月20日	13:30:00	和歌山県	(海上)	33.667	135.167	—
565	1997年5月23日	11:50:00	高知県	(海上)	32.509	133.209	—
566	1997年8月26日	18:20:00	新潟県	(海上)	38.000	138.775	—
567	1997年9月6日	15:30:00	高知県	(海上)	33.244	134.222	—
568	1997年9月14日	6:50:00	鹿児島県	熊毛郡中種子町	30.554	131.006	1
569	1997年9月16日	13:19:00	高知県	南国市	33.547	133.674	1
570	1997年9月28日	6:50:00	愛媛県	(海上)	33.992	133.425	—
571	1997年10月5日	9:40:00	福岡県	(海上)	33.600	130.281	—
572	1997年10月7日	12:50:00	北海道	苫小牧市	42.604	141.486	1
573	1997年10月14日	13:45:00	長崎県	壱岐郡郷ノ浦町	33.777	129.661	1~2
574	1997年10月14日	14:15:00	長崎県	壱岐郡郷ノ浦町	33.722	129.647	1
575	1997年10月15日	11:57:00	沖縄県	(海上)	24.558	123.053	—
576	1997年10月20日	9:45:00	北海道	苫小牧市	42.729	141.537	1
577	1997年10月20日	10:00:00	北海道	千歳市	42.815	141.648	1
578	1997年11月17日	8:00:00	東京都	八丈町	33.100	139.778	1
579	1997年11月28日	9:30:00	鹿児島県	知名町	27.329	128.560	0
580	1998年1月14日	10:50:00	沖縄県	豊見城村	26.173	127.648	0
581	1998年2月14日	19:55:00	沖縄県	竹富町	24.391	123.749	0
582	1998年2月17日	2:30:00	沖縄県	久米島具志川村	26.381	126.746	1~2
583	1998年2月19日	23:43:00	沖縄県	南大東村	25.817	131.229	1
584	1998年4月18日	13:15:00	高知県	(海上)	32.997	133.034	—
585	1998年7月28日	16:00:00	秋田県	平鹿郡大雄村	39.334	140.475	0
586	1998年8月31日	15:10:00	熊本県	上益城郡益城町	32.803	130.799	0
587	1998年9月2日	10:30:00	長崎県	(海上)	34.320	129.257	—
588	1998年9月15日	8:50:00	北海道	新十津川市	43.558	141.873	1
589	1998年9月16日	5:23:00	宮城県	名取市	38.174	140.958	1
590	1998年9月18日	16:02:00	宮崎県	宮崎市	31.908	131.451	1
591	1998年9月21日	11:30:00	埼玉県	深谷市	36.216	139.294	0~1

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
592	1998年9月24日	15:00:00	京都府	久美浜町	35.641	134.925	—
593	1998年9月24日	17:27:00	沖縄県	(海上)	26.150	127.645	—
594	1998年10月17日	14:50:00	宮崎県	児湯郡川南町	32.169	131.533	0~1
595	1998年10月17日	15:00:00	宮崎県	日向市	32.420	131.664	0
596	1998年10月30日	9:49:00	沖縄県	(海上)	24.253	124.186	—
597	1998年10月31日	8:40:00	石川県	(海上)	37.318	136.703	—
598	1998年11月15日	22:30:00	山形県	酒田市	38.944	139.823	1
599	1999年4月10日	16:00:00	高知県	芸西村	33.517	133.801	1
600	1999年5月4日	9:50:00	愛知県	渥美郡赤羽根町	34.618	137.213	1
601	1999年5月10日	10:10:00	高知県	(海上)	33.210	134.244	—
602	1999年6月30日	9:30:00	静岡県	富士市	35.152	138.765	0
603	1999年7月3日	12:30:00	沖縄県	(海上)	26.575	127.967	—
604	1999年7月21日	11:20:00	沖縄県	(海上)	26.101	127.639	—
605	1999年8月12日	10:18:00	沖縄県	(海上)	26.361	126.687	—
606	1999年8月21日	11:00:00	山口県	阿知須町	34.008	131.303	1~2
607	1999年8月23日	13:30:00	福岡県	八女郡黒木町	33.219	130.623	1
608	1999年9月18日	14:30:00	沖縄県	(海上)	24.655	124.875	—
609	1999年9月23日	18:55:00	長崎県	式見町	32.788	129.791	0~1
610	1999年9月24日	3:00:00	高知県	南国市	33.524	133.621	1
611	1999年9月24日	8:00:00	山口県	小野田市	33.934	131.189	2
612	1999年9月24日	11:07:00	愛知県	豊橋市	34.701	137.385	3
613	1999年9月24日	11:56:00	愛知県	蒲郡市	34.823	137.219	1
614	1999年9月24日	12:10:00	愛知県	小坂井町	34.796	137.365	2
615	1999年9月24日	12:51:00	愛知県	海部郡弥富町	35.021	136.796	1
616	1999年10月7日	11:40:00	北海道	(海上)	45.597	141.678	—
617	1999年10月8日	9:30:00	石川県	(海上)	36.732	136.672	—
618	1999年10月20日	7:30:00	香川県	(海上)	34.364	134.179	—
619	1999年10月27日	21:00:00	茨城県	多賀郡十王町	36.665	140.716	1
620	1999年10月28日	7:35:00	群馬県	群馬県水上町	36.763	138.969	1
621	1999年10月29日	21:25:00	秋田県	能代市	40.219	140.070	0~1
622	1999年11月1日	7:00:00	愛知県	西尾市	34.843	137.033	1
623	1999年11月2日	16:40:00	静岡県	静岡市	34.928	138.397	—
624	1999年11月15日	5:07:00	高知県	大方町	32.987	132.998	0~1

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
625	1999年11月25日	15:40:00	秋田県	八森町	40.347	140.027	1~2
626	2000年5月8日	17:20:00	秋田県	平鹿郡平鹿町	39.307	140.464	1
627	2000年7月4日	14:50:00	長野県	佐久市	36.259	138.443	1
628	2000年7月25日	6:20:00	福井県	福井市	36.134	136.070	—
629	2000年7月25日	6:30:00	福井県	坂井郡三国町	36.224	136.134	—
630	2000年8月2日	16:20:00	山形県	高島町	38.007	140.166	1
631	2000年8月7日	17:55:00	千葉県	(海上)	35.542	140.014	—
632	2000年9月5日	13:00:00	鹿児島県	(海上)	29.865	130.531	—
633	2000年9月11日	8:10:00	和歌山県	新宮市	33.676	135.973	0~1
634	2000年9月11日	17:55:00	愛知県	南知多町	34.720	136.893	2
635	2000年9月11日	19:55:00	愛知県	名古屋市	35.063	136.953	2
636	2000年12月25日	13:37:00	東京都	大島町	34.750	139.292	1
637	2001年1月13日	7:35:00	沖縄県	糸満市	26.145	127.691	0
638	2001年5月29日	13:00:00	愛知県	東海市	35.006	136.918	0
639	2001年6月1日	13:20:00	青森県	西津軽郡岩崎村	40.535	139.946	1
640	2001年6月19日	14:50:00	福井県	敦賀市	35.633	136.053	1
641	2001年6月19日	16:14:00	愛知県	尾西市	35.292	136.728	1
642	2001年6月27日	6:05:00	岐阜県	大野郡朝日村	36.090	137.371	1
643	2001年6月29日	14:28:00	北海道	北竜町	43.739	141.883	2
644	2001年7月8日	16:14:00	沖縄県	(海上)	24.782	125.245	—
645	2001年7月9日	17:59:00	沖縄県	(海上)	24.828	125.129	—
646	2001年8月4日	15:00:00	沖縄県	(海上)	26.364	126.687	—
647	2001年8月4日	15:27:00	沖縄県	(海上)	26.364	126.687	—
648	2001年8月22日	3:40:00	埼玉県	羽生市	36.139	139.551	0~1
649	2001年9月10日	10:10:00	東京都	町田市	35.584	139.453	1
650	2001年10月1日	7:00:00	和歌山県	南部町	33.760	135.314	0~1
651	2002年1月21日	12:15:00	愛知県	田原町	34.649	137.327	1
652	2002年1月21日	15:20:00	埼玉県	さいたま市	35.837	139.631	0~1
653	2002年4月3日	7:50:00	沖縄県	沖縄市	26.375	127.803	2
654	2002年7月10日	16:00:00	埼玉県	深谷市	36.266	139.263	2
655	2002年7月16日	16:40:00	京都府	亀岡市	35.042	135.548	0
656	2002年8月10日	11:50:00	秋田県	にかほ市	39.146	140.028	1~2
657	2002年9月23日	14:30:00	富山県	下新川郡朝日町	36.971	137.554	0~1

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
658	2002年9月24日	13:15:00	秋田県	由利本荘市	39.502	140.082	1
659	2002年10月6日	14:30:00	鹿児島県	加世田市	31.401	130.316	1
660	2002年10月6日	14:50:00	鹿児島県	鹿児島市	31.561	130.620	1
661	2002年10月6日	22:38:00	愛知県	南知多町	34.720	136.896	1
662	2002年10月7日	3:05:00	東京都	大島町	34.784	139.353	1
663	2002年10月7日	3:50:00	神奈川県	横須賀市	35.244	139.664	1
664	2002年10月15日	21:30:00	静岡県	磐田郡浅羽町, 小笠郡大須賀町, 小笠郡大東町	34.669	137.993	0
665	2002年11月3日	16:00:00	香川県	(海上)	34.299	133.709	—
666	2002年11月4日	11:20:00	石川県	加賀市	36.354	136.326	0
667	2002年11月5日	10:30:00	福井県	(海上)	35.646	135.938	—
668	2002年12月16日	18:10:00	高知県	室戸市	33.271	134.161	0~1
669	2003年1月11日	15:40:00	東京都	(海上)	33.090	139.722	—
670	2003年6月7日	18:10:00	和歌山県	(海上)	33.350	135.750	—
671	2003年6月19日	9:00:00	宮崎県	東臼杵郡門川町	32.476	131.658	1
672	2003年7月18日	23:30:00	山口県	佐波郡徳地町	34.185	131.658	1
673	2003年7月19日	7:20:00	山口県	岩国市	34.117	132.200	1~2
674	2003年8月8日	1:40:00	宮崎県	日南市	31.610	131.427	0~1
675	2003年8月8日	7:20:00	宮崎県	日向市	32.318	131.598	0~1
676	2003年8月8日	20:30:00	埼玉県	熊谷市	36.147	139.352	0~1
677	2003年8月25日	15:30:00	岩手県	北上市	39.296	140.970	0~1
678	2003年8月28日	8:15:00	山口県	山陽町	34.000	131.128	1
679	2003年9月12日	13:00:00	高知県	高知市	33.491	133.559	1
680	2003年9月29日	14:40:00	北海道	(海上)	42.183	142.723	—
681	2003年10月12日	4:25:00	宮崎県	延岡市	32.547	131.682	0
682	2003年10月12日	10:00:00	高知県	安芸市	33.500	133.833	0~1
683	2003年10月18日	16:25:00	福井県	(海上)	36.198	136.117	—
684	2003年11月12日	9:20:00	長崎県	(海上)	34.002	129.030	—
685	2004年6月1日	14:15:00	沖縄県	北中城村	26.296	127.813	—
686	2004年6月27日	7:17:00	佐賀県	佐賀市	33.232	130.269	2
687	2004年6月27日	7:50:00	佐賀県	鳥栖市	33.364	130.468	1
688	2004年8月15日	12:10:00	北海道	礼文郡礼文町	45.456	141.034	1

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
689	2004年8月15日	12:30:00	北海道	(海上)	45.388	141.556	—
690	2004年8月25日	12:10:00	北海道	音更町	43.118	143.196	0
691	2004年9月16日	14:00:00	福岡県	北九州市	33.887	130.890	1
692	2004年9月22日	11:56:00	茨城県	伊奈町	35.956	140.031	—
693	2004年9月27日	20:30:00	沖縄県	名護市	26.520	128.019	1
694	2004年9月27日	20:50:00	沖縄県	今帰仁村	26.696	128.019	1
695	2004年9月29日	23:01:00	愛知県	豊橋市	34.675	137.450	0~1
696	2004年9月30日	3:07:00	東京都	大田区	35.533	139.795	1~2
697	2004年10月22日	16:50:00	北海道	門別町	42.431	142.212	2
698	2005年1月12日	7:50:00	鳥取県	(海上)	35.533	134.058	—
699	2005年1月27日	17:00:00	沖縄県	読谷村	26.365	127.738	1
700	2005年5月1日	15:00:00	高知県	高知市	33.563	133.606	0~1
701	2005年6月4日	12:40:00	長野県	長野市	36.599	138.170	0~1
702	2005年8月10日	13:30:00	新潟県	三条市	37.635	138.950	0~1
703	2005年9月5日	10:10:00	宮崎県	宮崎市	31.940	131.458	1
704	2005年9月5日	10:30:00	宮崎県	宮崎市	32.015	131.412	1~2
705	2005年10月2日	19:30:00	北海道	伊達市	42.490	140.831	0
706	2005年11月8日	12:05:00	秋田県	南秋田郡大潟村	40.032	140.065	1
707	2005年11月18日	13:00:00	石川県	(海上)	36.650	136.648	—
708	2005年12月5日	11:50:00	島根県	出雲市	35.391	132.714	1
709	2005年12月7日	11:03:00	北海道	(海上)	41.650	140.606	—
710	2005年12月7日	11:08:00	北海道	(海上)	41.650	140.606	—
711	2005年12月25日	19:10:00	山形県	酒田市	38.854	139.788	1
712	2006年1月19日	19:10:00	鹿児島県	瀬戸内町	28.143	129.316	1
713	2006年2月6日	10:45:00	沖縄県	(海上)	24.258	123.458	—
714	2006年3月28日	16:00:00	和歌山県	串本町	33.417	135.750	1~2
715	2006年4月20日	12:10:00	神奈川県	藤沢市	35.354	139.481	1
716	2006年5月20日	15:30:00	埼玉県	所沢市	35.821	139.464	0
717	2006年6月12日	16:30:00	熊本県	阿蘇市	32.959	131.051	0
718	2006年6月12日	16:45:00	熊本県	阿蘇市	32.958	131.056	—
719	2006年7月5日	4:30:00	高知県	香美市	33.633	133.710	0~1
720	2006年8月13日	16:30:00	佐賀県	佐賀市	33.234	130.354	0
721	2006年8月13日	17:05:00	佐賀県	(海上)	33.133	130.324	—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
722	2006年8月28日	15:50:00	沖縄県	(海上)	26.447	128.032	—
723	2006年8月29日	14:16:00	沖縄県	(海上)	26.667	127.875	—
724	2006年9月17日	12:10:00	宮崎県	日南市	31.571	131.402	1
725	2006年9月17日	13:30:00	宮崎県	日向市	32.338	131.619	1
726	2006年9月17日	14:03:00	宮崎県	延岡市	32.544	131.684	2
727	2006年9月17日	15:05:00	大分県	臼杵市	33.177	131.821	2
728	2006年9月19日	17:30:00	高知県	(海上)	33.493	133.571	—
729	2006年9月25日	11:40:00	沖縄県	南大東村	25.856	131.253	0
730	2006年10月11日	22:10:00	北海道	平取町	42.675	142.262	1
731	2006年10月11日	22:15:00	北海道	新ひだか町	42.278	142.606	1
732	2006年10月11日	22:30:00	北海道	新ひだか町	42.276	142.509	1
733	2006年11月6日	12:00:00	和歌山県	(海上)	33.700	135.333	—
734	2006年11月7日	11:20:00	北海道	日高町	42.429	142.224	—
735	2006年11月7日	11:40:00	北海道	日高町	42.427	142.223	1
736	2006年11月7日	13:23:00	北海道	佐呂間町	43.978	143.703	3
737	2006年11月9日	12:05:00	北海道	奥尻郡奥尻町	42.059	139.447	1
738	2006年11月11日	7:20:00	山口県	山口市	34.065	131.405	0
739	2006年11月18日	12:47:00	沖縄県	名護市	26.522	128.045	2
740	2006年11月22日	13:00:00	沖縄県	東村	26.630	128.215	1
741	2006年11月26日	15:35:00	高知県	土佐清水市	32.785	132.859	1
742	2007年2月14日	6:20:00	沖縄県	島尻郡座間味村	26.225	127.303	0~1
743	2007年2月14日	15:40:00	和歌山県	日高郡印南町	33.815	135.202	1
744	2007年3月3日	7:20:00	沖縄県	(海上)	25.938	123.102	—
745	2007年3月3日	7:20:00	沖縄県	(海上)	25.938	123.102	—
746	2007年3月3日	7:20:00	沖縄県	(海上)	25.938	123.102	—
747	2007年3月3日	7:20:00	沖縄県	(海上)	25.938	123.102	—
748	2007年3月15日	14:55:00	沖縄県	中頭郡読谷村	26.364	127.739	1
749	2007年4月4日	10:29:00	鳥取県	(海上)	35.628	134.190	—
750	2007年4月18日	7:55:00	沖縄県	宮古島市	24.739	125.263	1
751	2007年5月31日	14:00:00	北海道	長沼町	42.891	141.666	0
752	2007年5月31日	17:30:00	千葉県	(海上)	35.217	139.850	—
753	2007年6月10日	11:37:00	千葉県	白井市	35.800	140.083	0
754	2007年7月30日	10:00:00	沖縄県	(海上)	24.499	122.920	—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
755	2007年8月3日	18:00:00	佐賀県	佐賀市	33.252	130.330	0
756	2007年8月23日	17:40:00	秋田県	(海上)	39.238	139.764	—
757	2007年8月23日	17:40:00	山形県	(海上)	39.107	139.296	—
758	2007年8月24日	8:20:00	山形県	(海上)	38.794	139.700	—
759	2007年8月24日	8:20:00	山形県	(海上)	38.794	139.700	—
760	2007年8月28日	15:40:00	沖縄県	(海上)	26.344	127.933	—
761	2007年8月28日	17:30:00	沖縄県	(海上)	26.670	128.060	—
762	2007年8月29日	13:10:00	徳島県	徳島市	34.080	134.474	1
763	2007年8月29日	13:25:00	沖縄県	(海上)	26.085	127.635	—
764	2007年8月29日	13:40:00	沖縄県	(海上)	26.058	127.680	—
765	2007年9月2日	12:27:00	沖縄県	(海上)	24.187	124.254	—
766	2007年9月2日	12:42:00	沖縄県	(海上)	24.250	124.256	—
767	2007年9月2日	13:02:00	沖縄県	(海上)	24.325	124.279	—
768	2007年9月6日	12:00:00	埼玉県	深谷市	36.196	139.324	0
769	2007年9月9日	9:54:00	福岡県	(海上)	33.881	130.513	—
770	2007年9月14日	15:05:00	宮崎県	延岡市	32.572	131.674	—
771	2007年9月25日	16:45:00	沖縄県	(海上)	26.130	127.590	—
772	2007年10月1日	10:38:00	北海道	(海上)	42.623	139.642	—
773	2007年10月1日	11:12:00	北海道	(海上)	41.623	139.642	—
774	2007年10月1日	14:10:00	北海道	(海上)	42.776	139.842	—
775	2007年10月1日	14:25:00	北海道	(海上)	43.383	140.442	—
776	2007年10月1日	14:27:00	北海道	(海上)	43.286	140.338	—
777	2007年10月1日	15:30:00	北海道	(海上)	42.441	139.792	—
778	2007年10月4日	7:50:00	北海道	(海上)	42.303	140.978	—
779	2007年10月4日	12:45:00	北海道	(海上)	44.888	141.540	—
780	2007年10月4日	13:36:00	北海道	(海上)	44.883	141.683	—
781	2007年10月4日	15:20:00	佐賀県	佐賀市	33.237	130.296	0
782	2007年10月4日	16:30:00	北海道	(海上)	42.454	139.839	—
783	2007年10月9日	12:30:00	鹿児島県	長島町	32.146	130.104	—
784	2007年10月9日	14:00:00	鹿児島県	(海上)	32.153	130.093	—
785	2007年10月9日	16:00:00	鹿児島県	(海上)	32.069	130.140	—
786	2007年10月11日	9:55:00	青森県	(海上)	40.789	140.132	—
787	2007年10月11日	10:25:00	青森県	(海上)	40.789	140.132	—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
788	2007年10月14日	12:55:00	三重県	(海上)	34.543	137.008	—
789	2007年10月14日	17:30:00	長崎県	(海上)	34.642	129.318	—
790	2007年10月14日	17:30:00	長崎県	(海上)	34.650	129.298	—
791	2007年10月16日	14:41:00	島根県	(海上)	35.877	133.298	—
792	2007年10月16日	14:41:00	島根県	(海上)	35.877	133.298	—
793	2007年10月16日	15:23:00	島根県	(海上)	35.610	133.086	—
794	2007年10月17日	7:45:00	北海道	(海上)	42.000	140.933	—
795	2007年11月22日	9:00:00	富山県	(海上)	36.909	137.416	—
796	2007年12月2日	1:30:00	山形県	酒田市	38.907	139.838	0
797	2008年1月4日	9:50:00	北海道	(海上)	42.258	141.050	—
798	2008年1月4日	9:50:00	北海道	(海上)	42.258	141.050	—
799	2008年3月25日	20:53:00	神奈川県	(海上)	35.304	139.443	—
800	2008年3月25日	20:57:00	神奈川県	(海上)	35.261	139.499	—
801	2008年3月25日	21:04:00	神奈川県	(海上)	35.283	139.527	—
802	2008年3月27日	17:20:00	鹿児島県	いちき串木野市	31.756	130.198	1
803	2008年3月27日	19:00:00	鹿児島県	垂水市	31.464	130.698	1
804	2008年4月7日	11:20:00	高知県	土佐清水市	32.723	133.008	0
805	2008年4月9日	17:00:00	鹿児島県	枕崎市	31.260	130.264	0
806	2008年4月23日	16:23:00	愛知県	豊橋市	34.662	137.412	—
807	2008年5月1日	18:00:00	鹿児島県	熊毛郡中種子町	30.526	130.955	0
808	2008年5月19日	16:50:00	愛知県	(海上)	34.612	137.021	—
809	2008年5月27日	11:41:00	沖縄県	(海上)	24.878	125.312	—
810	2008年5月27日	12:30:00	沖縄県	(海上)	24.919	125.325	—
811	2008年5月27日	13:00:00	沖縄県	(海上)	24.876	125.337	—
812	2008年6月1日	12:50:00	秋田県	(海上)	40.389	139.982	—
813	2008年6月13日	10:40:00	青森県	北津軽郡板柳町	40.683	140.483	1
814	2008年6月13日	15:50:00	沖縄県	(海上)	24.702	124.259	—
815	2008年6月13日	16:30:00	沖縄県	(海上)	24.703	124.285	—
816	2008年6月29日	2:30:00	高知県	安芸市	33.507	133.904	0
817	2008年7月3日	15:00:00	沖縄県	(海上)	26.501	128.000	—
818	2008年7月7日	9:30:00	沖縄県	(海上)	26.196	127.969	—
819	2008年7月7日	14:55:00	沖縄県	(海上)	26.664	127.229	—
820	2008年7月7日	14:55:00	沖縄県	(海上)	26.644	127.185	—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
821	2008年7月8日	13:50:00	富山県	高岡市	36.686	136.962	0
822	2008年7月8日	18:54:00	沖縄県	(海上)	26.216	126.594	—
823	2008年7月22日	17:05:00	沖縄県	(海上)	26.185	127.786	—
824	2008年7月22日	17:08:00	沖縄県	(海上)	26.185	127.786	—
825	2008年7月22日	17:30:00	沖縄県	島尻郡与那原町	26.202	127.766	—
826	2008年7月22日	17:40:00	沖縄県	(海上)	26.198	127.786	—
827	2008年7月22日	17:40:00	沖縄県	島尻郡与那原町付近	26.198	127.769	—
828	2008年7月22日	17:40:00	沖縄県	島尻郡与那原町付近	26.198	127.769	—
829	2008年7月30日	8:03:00	鳥取県	(海上)	35.572	134.218	—
830	2008年7月30日	8:28:00	鳥取県	(海上)	35.551	134.182	—
831	2008年7月30日	8:28:00	鳥取県	(海上)	35.551	134.182	—
832	2008年7月30日	8:41:00	鳥取県	(海上)	35.560	134.191	—
833	2008年7月30日	8:55:00	鳥取県	(海上)	35.580	134.158	—
834	2008年7月30日	9:01:00	鳥取県	(海上)	35.571	134.157	—
835	2008年7月30日	9:18:00	鳥取県	(海上)	35.568	134.138	—
836	2008年8月8日	13:40:00	沖縄県	(海上)	26.250	127.517	—
837	2008年8月8日	16:45:00	沖縄県	石垣市	24.352	124.120	—
838	2008年8月12日	16:05:00	福岡県	(海上)	33.788	130.438	—
839	2008年8月12日	16:10:00	福岡県	福津市	33.793	130.458	0
840	2008年8月14日	11:25:00	山形県	(海上)	38.919	139.809	—
841	2008年8月15日	16:20:00	鳥取県	鳥取市	35.514	133.994	0
842	2008年8月16日	13:25:00	千葉県	千葉市	35.620	140.062	0
843	2008年8月16日	13:45:00	千葉県	(海上)	35.616	140.056	—
844	2008年8月26日	14:12:00	鹿児島県	(海上)	28.400	129.750	—
845	2008年8月28日	16:55:00	茨城県	つくば市	36.127	140.027	1
846	2008年8月28日	20:00:00	茨城県	土浦市	36.135	140.173	1
847	2008年9月6日	6:11:00	愛媛県	(海上)	34.213	133.273	—
848	2008年9月14日	8:33:00	北海道	(海上)	45.481	141.837	—
849	2008年9月14日	8:37:00	北海道	(海上)	45.502	141.780	—
850	2008年9月14日	8:39:00	北海道	(海上)	45.508	141.711	—
851	2008年9月14日	8:39:00	北海道	(海上)	45.504	141.659	—
852	2008年9月14日	8:40:00	北海道	(海上)	45.496	141.693	—
853	2008年9月14日	8:40:00	北海道	(海上)	45.509	141.641	—

	発生日時		発生場所		発生位置		F
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	スケール
854	2008年9月14日	8:41:00	北海道	(海上)	45.509	141.633	—
855	2008年9月14日	8:47:00	北海道	(海上)	45.489	141.625	—
856	2008年9月21日	10:50:00	香川県	仲多度郡多度津町	34.269	133.739	1
857	2008年9月21日	11:03:00	三重県	(海上)	34.367	136.967	—
858	2008年9月21日	11:07:00	新潟県	(海上)	38.471	139.478	—
859	2008年9月21日	13:00:00	徳島県	鳴門市	34.156	134.614	—
860	2008年10月1日	11:28:00	秋田県	(海上)	40.062	139.627	—
861	2008年10月1日	11:28:00	秋田県	(海上)	40.071	139.631	—
862	2008年10月1日	11:28:00	秋田県	(海上)	40.080	139.640	—
863	2008年10月1日	11:41:00	秋田県	(海上)	39.986	139.608	—
864	2008年10月1日	11:47:00	秋田県	(海上)	3—9	139.633	—
865	2008年10月1日	11:55:00	秋田県	(海上)	40.021	139.763	—
866	2008年10月1日	11:55:00	秋田県	(海上)	40.010	139.736	—
867	2008年10月4日	15:30:00	新潟県	(海上)	37.941	138.891	—
868	2008年10月7日	11:00:00	沖縄県	(海上)	26.267	126.817	—
869	2008年10月7日	11:30:00	沖縄県	(海上)	26.333	126.817	—
870	2008年10月7日	12:20:00	沖縄県	島尻郡久米島町	26.333	126.812	—
871	2008年10月7日	12:35:00	沖縄県	(海上)	26.351	126.817	—
872	2008年10月7日	14:30:00	沖縄県	名護市	26.595	127.959	0~1
873	2008年10月10日	9:05:00	秋田県	(海上)	39.785	140.015	—
874	2008年10月10日	10:20:00	秋田県	(海上)	39.743	140.006	—
875	2008年10月10日	12:07:00	秋田県	(海上)	39.672	140.019	—
876	2008年10月10日	17:20:00	沖縄県	糸満市	26.094	127.727	—
877	2008年10月11日	0:45:00	北海道	檜山郡江差町	41.852	140.127	0
878	2008年10月15日	13:48:00	新潟県	新潟市	37.860	138.916	0
879	2008年10月15日	14:39:00	山形県	(海上)	38.810	139.640	—
880	2008年10月15日	14:40:00	山形県	(海上)	38.850	139.680	—
881	2008年10月15日	14:47:00	山形県	(海上)	38.680	139.580	—
882	2008年10月15日	16:10:00	新潟県	(海上)	38.367	139.446	—
883	2008年10月24日	2:30:00	三重県	志摩市	34.251	136.829	1
884	2008年10月26日	16:30:00	秋田県	(海上)	39.283	139.833	—
885	2008年10月26日	18:30:00	新潟県	新潟市	37.936	139.107	0
886	2008年10月27日	14:55:00	福井県	(海上)	36.153	136.071	—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
887	2008年10月27日	15:30:00	千葉県	(海上)	35.256	140.417	—
888	2008年10月27日	15:40:00	千葉県	(海上)	35.256	140.422	—
889	2008年10月27日	15:50:00	千葉県	(海上)	35.256	140.425	—
890	2008年10月27日	15:50:00	千葉県	(海上)	35.256	140.428	—
891	2008年10月27日	16:00:00	千葉県	(海上)	35.256	140.428	—
892	2008年10月30日	12:33:00	鳥取県	(海上)	35.548	134.207	—
893	2008年10月30日	12:38:00	鳥取県	岩美郡岩美町	35.584	134.293	0
894	2008年10月30日	12:50:00	鳥取県	(海上)	35.576	134.269	—
895	2008年10月31日	7:30:00	石川県	(海上)	37.126	136.707	—
896	2008年11月2日	8:30:00	秋田県	南秋田郡八郎潟町	39.944	140.093	1
897	2008年11月2日	16:20:00	新潟県	(海上)	37.743	138.802	—
898	2008年11月3日	11:55:00	徳島県	(海上)	34.250	134.500	—
899	2008年11月6日	9:00:00	秋田県	(海上)	40.153	139.855	—
900	2008年11月7日	8:50:00	北海道	様似郡様似町	42.134	142.873	0~1
901	2008年11月8日	10:25:00	沖縄県	(海上)	25.794	131.274	—
902	2008年11月10日	12:10:00	新潟県	(海上)	37.925	138.868	—
903	2008年11月10日	12:10:00	新潟県	(海上)	37.925	138.868	—
904	2008年11月10日	12:10:00	新潟県	(海上)	37.925	138.868	—
905	2008年11月19日	8:36:00	石川県	(海上)	36.457	136.395	—
906	2008年11月19日	11:45:00	新潟県	(海上)	37.928	139.018	—
907	2008年11月20日	8:30:00	新潟県	(海上)	37.439	138.571	—
908	2008年11月20日	8:40:00	石川県	(海上)	36.944	136.743	—
909	2008年11月20日	8:42:00	石川県	(海上)	36.944	136.743	—
910	2008年11月20日	8:42:00	石川県	(海上)	36.944	136.743	—
911	2008年11月20日	9:40:00	新潟県	(海上)	37.452	138.579	—
912	2008年11月20日	10:00:00	石川県	(海上)	36.692	136.551	—
913	2008年11月20日	12:30:00	石川県	(海上)	36.671	136.550	—
914	2008年11月20日	12:30:00	石川県	(海上)	36.671	136.550	—
915	2008年11月23日	10:20:00	石川県	羽咋郡志賀町	36.988	136.774	0~1
916	2008年12月4日	16:05:00	沖縄県	(海上)	25.770	123.357	—
917	2008年12月4日	16:05:00	沖縄県	(海上)	25.770	123.357	—
918	2008年12月4日	16:05:00	沖縄県	(海上)	25.770	123.357	—
919	2008年12月4日	16:05:00	沖縄県	(海上)	25.770	123.357	—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
920	2008年12月5日	15:25:00	神奈川県	横浜市	35.405	139.557	1
921	2008年12月5日	15:30:00	東京都	品川区	35.608	139.710	1
922	2008年12月6日	14:30:00	大分県	(海上)	33.612	131.214	—
923	2008年12月8日	16:16:00	沖縄県	(海上)	26.160	127.550	—
924	2008年12月31日	11:05:00	新潟県	(海上)	37.582	138.588	—
925	2008年12月31日	11:05:00	新潟県	(海上)	37.570	138.588	—
926	2009年1月1日	14:51:00	東京都	(海上)	34.863	139.267	—
927	2009年1月21日	11:08:00	沖縄県	(海上)	25.583	124.333	—
928	2009年1月24日	11:05:00	北海道	(海上)	42.091	139.399	—
929	2009年1月24日	11:15:00	北海道	(海上)	42.008	139.463	—
930	2009年2月7日	20:15:00	秋田県	秋田市	39.685	140.086	0
931	2009年2月26日	11:50:00	沖縄県	(海上)	24.924	125.268	—
932	2009年3月9日	12:30:00	沖縄県	糸満市	26.094	127.693	0
933	2009年3月14日	17:26:00	鳥取県	(海上)	35.598	134.224	—
934	2009年4月1日	13:30:00	鳥取県	(海上)	35.663	134.144	—
935	2009年6月15日	17:30:00	沖縄県	(海上)	24.242	124.433	—
936	2009年6月18日	14:29:00	滋賀県	愛知郡愛荘町	35.166	136.222	—
937	2009年6月26日	13:10:00	沖縄県	(海上)	26.240	127.651	—
938	2009年7月2日	13:09:00	沖縄県	(海上)	26.533	126.683	—
939	2009年7月2日	14:15:00	沖縄県	(海上)	26.480	127.080	—
940	2009年7月2日	16:57:00	沖縄県	(海上)	26.383	127.433	—
941	2009年7月3日	14:28:00	沖縄県	(海上)	24.875	125.380	—
942	2009年7月3日	16:30:00	山形県	米沢市	37.973	140.076	0
943	2009年7月6日	16:35:00	沖縄県	(海上)	26.583	127.950	—
944	2009年7月6日	18:54:00	沖縄県	石垣市	24.304	124.051	—
945	2009年7月19日	19:00:00	岡山県	美作市	34.976	134.113	2
946	2009年7月25日	11:00:00	高知県	安芸市	33.544	133.894	0
947	2009年7月27日	14:00:00	群馬県	館林市	36.243	139.485	1~2
948	2009年7月30日	17:50:00	沖縄県	(海上)	26.300	127.567	—
949	2009年8月8日	15:10:00	沖縄県	宮古島市	24.783	125.267	—
950	2009年8月8日	15:20:00	沖縄県	宮古島市	24.858	125.289	0
951	2009年8月8日	15:30:00	沖縄県	(海上)	24.633	124.633	—
952	2009年8月23日	18:37:00	山形県	鶴岡市	38.610	139.574	—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
953	2009年8月23日	18:51:00	山形県	鶴岡市	38.624	139.585	—
954	2009年9月10日	13:30:00	新潟県	(海上)	37.424	138.544	—
955	2009年9月10日	13:35:00	新潟県	(海上)	37.424	138.544	—
956	2009年9月11日	12:17:00	石川県	(海上)	37.000	136.583	—
957	2009年9月13日	3:40:00	山形県	鶴岡市	38.569	139.553	0
958	2009年9月13日	9:39:00	鳥取県	(海上)	35.650	134.206	—
959	2009年9月15日	11:40:00	沖縄県	(海上)	26.433	127.967	—
960	2009年10月4日	12:50:00	秋田県	秋田市	39.665	140.074	—
961	2009年10月8日	4:30:00	千葉県	山武郡九十九里町	35.545	140.462	1
962	2009年10月8日	4:50:00	茨城県	北相馬郡利根町	35.866	140.198	1
963	2009年10月8日	5:00:00	茨城県	土浦市	36.075	140.180	1
964	2009年10月10日	9:58:00	新潟県	(海上)	37.533	138.477	—
965	2009年10月10日	9:58:00	新潟県	(海上)	37.533	138.477	—
966	2009年10月10日	9:58:00	新潟県	(海上)	37.533	138.477	—
967	2009年10月10日	13:58:00	新潟県	(海上)	37.970	138.840	—
968	2009年10月10日	13:58:00	新潟県	(海上)	37.970	138.840	—
969	2009年10月10日	17:19:00	新潟県	(海上)	38.170	139.170	—
970	2009年10月10日	17:19:00	新潟県	(海上)	38.170	139.170	—
971	2009年10月27日	13:10:00	新潟県	糸魚川市	37.035	137.821	—
972	2009年10月30日	7:26:00	青森県	西津軽郡深浦町	40.505	139-9	0
973	2009年10月30日	9:20:00	秋田県	能代市	40.166	140.007	1
974	2009年11月3日	6:25:00	富山県	(海上)	36.881	137.366	—
975	2009年11月3日	6:37:00	富山県	(海上)	36.902	137.377	—
976	2009年11月3日	6:38:00	富山県	(海上)	36.902	137.377	—
977	2009年11月3日	6:39:00	富山県	(海上)	36.891	137.369	—
978	2009年11月3日	6:43:00	富山県	(海上)	36.916	137.398	—
979	2009年11月6日	17:10:00	熊本県	(海上)	32.327	129.965	—
980	2009年11月11日	9:00:00	静岡県	掛川市	34.652	138.070	0
981	2009年11月13日	17:00:00	宮崎県	児湯郡川南町	32.174	131.519	0
982	2009年11月14日	6:10:00	愛知県	西尾市	34.842	137.065	0
983	2009年12月16日	9:45:00	鳥取県	(海上)	35.651	134.103	—
984	2009年12月18日	2:00:00	石川県	金沢市	36.572	136.565	0
985	2009年12月18日	9:35:00	鳥取県	(海上)	35.609	134.210	—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
986	2009年12月18日	10:40:00	鳥取県	(海上)	35.606	134.113	—
987	2009年12月18日	10:42:00	鳥取県	(海上)	35.608	134.152	—
988	2009年12月18日	10:48:00	鳥取県	(海上)	35.617	134.173	—
989	2009年12月18日	11:03:00	鳥取県	(海上)	35.573	134.241	—
990	2010年1月7日	8:29:00	鳥取県	(海上)	35.617	134.169	—
991	2010年2月1日	9:10:00	鹿児島県	南さつま市	31.431	130.284	0
992	2010年2月1日	9:30:00	鹿児島県	南九州市	31.229	130.499	0
993	2010年4月3日	10:15:00	石川県	(海上)	36.650	136.550	—
994	2010年4月22日	13:00:00	宮崎県	小林市	31.976	130.950	0
995	2010年4月24日	6:39:00	長崎県	(海上)	32.768	128.636	—
996	2010年4月29日	2:00:00	高知県	安芸市	33.504	133.874	0
997	2010年6月25日	19:00:00	宮崎県	児湯郡都農町	32.250	131.559	0
998	2010年7月4日	15:00:00	北海道	樺戸郡浦臼町	43.436	141.816	0
999	2010年7月9日	14:40:00	和歌山県	東牟婁郡那智勝浦町	33.588	135.910	0
1000	2010年7月9日	16:25:00	沖縄県	(海上)	26.362	126.568	—
1001	2010年7月9日	19:00:00	栃木県	那須塩原市	36.949	140.044	0
1002	2010年7月9日	19:00:00	栃木県	那須塩原市	36.949	140.044	0
1003	2010年7月9日	19:00:00	栃木県	那須塩原市	36.949	140.044	0
1004	2010年7月25日	14:45:00	沖縄県	(海上)	26.583	127.183	—
1005	2010年7月26日	16:05:00	埼玉県	鴻巣市	36.058	139.542	0
1006	2010年7月26日	16:50:00	茨城県	(湖上)	36.050	140.366	—
1007	2010年7月26日	18:06:00	山梨県	北杜市	35.933	138.446	0
1008	2010年7月28日	16:20:00	沖縄県	(海上)	26.500	128.017	—
1009	2010年8月4日	12:25:00	愛知県	(海上)	34.550	137.017	—
1010	2010年8月11日	16:55:00	高知県	香南市	33.539	133.717	0
1011	2010年8月14日	17:20:00	沖縄県	(海上)	26.383	127.733	—
1012	2010年8月18日	11:36:00	沖縄県	(海上)	26.417	127.700	—
1013	2010年8月23日	15:07:00	沖縄県	(海上)	26.333	126.600	—
1014	2010年8月25日	12:30:00	北海道	(海上)	43.957	141.586	—
1015	2010年8月25日	13:05:00	北海道	留萌市	43.983	141.654	—
1016	2010年9月7日	3:45:00	秋田県	秋田市	39.770	140.066	0
1017	2010年9月13日	14:20:00	沖縄県	島尻郡伊是名村	26.933	127.942	0
1018	2010年9月14日	11:20:00	富山県	(海上)	37.025	137.562	—

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
1019	2010年9月14日	11:53:00	兵庫県	(海上)	35.733	134.627	—
1020	2010年9月14日	12:55:00	兵庫県	(海上)	35.733	134.627	—
1021	2010年9月16日	14:30:00	兵庫県	(海上)	35.617	134.401	—
1022	2010年9月17日	10:45:00	新潟県	(海上)	37.649	138.745	—
1023	2010年9月17日	10:55:00	新潟県	長岡市	37.634	138.760	0
1024	2010年9月23日	6:40:00	香川県	綾歌郡綾川町	34.243	133.944	1
1025	2010年9月23日	6:50:00	香川県	綾歌郡綾川町	34.239	133.926	0
1026	2010年9月23日	10:05:00	和歌山県	(海上)	33.480	135.746	—
1027	2010年9月28日	9:15:00	静岡県	焼津市	34.822	138.324	0
1028	2010年9月28日	15:54:00	鳥取県	(海上)	35.630	134.180	—
1029	2010年9月28日	15:55:00	鳥取県	(海上)	35.610	134.100	—
1030	2010年9月28日	15:55:00	鳥取県	(海上)	35.680	134.240	—
1031	2010年10月2日	15:50:00	沖縄県	(海上)	26.383	126.717	—
1032	2010年10月2日	17:00:00	沖縄県	(海上)	26.367	126.700	—
1033	2010年10月7日	17:00:00	高知県	(海上)	33.047	133.134	—
1034	2010年10月9日	18:00:00	千葉県	南房総市	35.043	133-2	0
1035	2010年10月15日	4:30:00	石川県	羽咋郡志賀町	37.168	136.676	0
1036	2010年10月15日	17:00:00	新潟県	胎内市	38.056	139.323	0
1037	2010年10月15日	17:05:00	新潟県	胎内市	38.073	139.353	1
1038	2010年10月17日	12:40:00	秋田県	山本郡八峰町	40.381	139-5	0
1039	2010年10月17日	13:20:00	秋田県	潟上市	39.862	140.026	0
1040	2010年10月17日	13:40:00	新潟県	(海上)	38.263	139.364	—
1041	2010年10月22日	10:50:00	沖縄県	島尻郡久米島町	26.363	126.748	0
1042	2010年10月26日	7:00:00	北海道	(海上)	43.408	141.367	—
1043	2010年10月26日	7:05:00	北海道	(海上)	43.408	141.317	—
1044	2010年10月26日	7:05:00	北海道	(海上)	43.141	140.385	—
1045	2010年10月26日	7:10:00	北海道	石狩市	43.394	141.431	—
1046	2010年10月26日	7:10:00	北海道	(海上)	43.400	141.411	—
1047	2010年10月26日	7:38:00	北海道	(海上)	43.375	141.404	—
1048	2010年10月26日	8:10:00	北海道	(海上)	43.144	140.385	—
1049	2010年10月26日	15:50:00	北海道	(海上)	41.861	140.107	—
1050	2010年10月28日	14:10:00	北海道	(海上)	44.000	141.333	—
1051	2010年11月1日	5:20:00	千葉県	山武郡九十九里町	35.504	140.431	0

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
1052	2010年11月12日	13:15:00	秋田県	山本郡八峰町	40.317	140.030	0
1053	2010年11月22日	15:30:00	鹿児島県	大島郡和泊町	27.384	128.575	0
1054	2010年11月29日	9:20:00	石川県	羽咋郡志賀町	37.001	136.772	0
1055	2010年11月29日	12:18:00	福井県	(海上)	36.256	136.114	—
1056	2010年11月29日	12:24:00	福井県	(海上)	36.256	136.116	—
1057	2010年11月29日	12:25:00	福井県	(海上)	36.255	136.110	—
1058	2010年12月3日	7:30:00	神奈川県	鎌倉市	35.304	139.551	0~1
1059	2010年12月3日	8:20:00	茨城県	牛久市	35.958	140.143	1
1060	2010年12月3日	15:30:00	新潟県	新潟市	37.849	138.918	0
1061	2010年12月3日	15:36:00	新潟県	新潟市	37.871	138.983	0
1062	2010年12月3日	15:45:00	新潟県	新潟市	37.886	139.040	1
1063	2010年12月9日	17:10:00	新潟県	上越市	37.210	138.302	0~1
1064	2010年12月15日	7:56:00	富山県	(海上)	36.856	137.385	—
1065	2010年12月16日	8:00:00	新潟県	(海上)	38.045	138.619	—
1066	2010年12月17日	10:20:00	北海道	(海上)	42.870	140.313	—
1067	2010年12月18日	7:18:00	鳥取県	(海上)	35.571	134.168	—
1068	2010年12月24日	15:57:00	鳥取県	(海上)	35.571	134.168	—
1069	2010年12月27日	1:30:00	石川県	羽咋郡志賀町	37.018	136.744	0
1070	2010年12月29日	13:50:00	京都府	(海上)	35.782	135.233	—
1071	2010年12月29日	14:00:00	京都府	(海上)	35.782	135.202	—
1072	2011年1月2日	8:05:00	長崎県	(海上)	33.752	129.825	—
1073	2011年1月2日	8:21:00	長崎県	(海上)	33.752	129.825	—
1074	2011年1月3日	14:52:00	新潟県	(海上)	38.063	139.269	—
1075	2011年1月16日	8:00:00	鳥取県	(海上)	35.560	133.410	—
1076	2011年2月3日	10:00:00	沖縄県	(海上)	26.117	127.650	—
1077	2011年2月11日	0:20:00	沖縄県	豊見城市	26.167	127.656	0
1078	2011年2月25日	17:20:00	沖縄県	(海上)	26.233	127.650	—
1079	2011年3月9日	11:30:00	福井県	あわら市	36.217	136.198	—
1080	2011年3月9日	17:25:00	鳥取県	(海上)	35.568	134.149	—
1081	2011年3月31日	9:50:00	新潟県	(海上)	37.175	138.233	—
1082	2011年4月25日	13:10:00	千葉県	柏市	35.844	139.973	0
1083	2011年4月25日	13:10:00	千葉県	鎌ヶ谷市	35.787	139.985	0
1084	2011年5月8日	13:30:00	岩手県	奥州市	39.123	141.148	0

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
1085	2011年5月28日	5:00:00	沖縄県	石垣市	24.373	124.215	1
1086	2011年7月18日	19:10:00	三重県	津市	34.787	136.553	0
1087	2011年7月18日	19:30:00	三重県	亀山市	34.871	136.418	1
1088	2011年7月19日	10:00:00	栃木県	矢板市	36.776	139.958	1
1089	2011年7月25日	12:29:00	三重県	いなべ市	35.086	136.546	1
1090	2011年7月29日	17:15:00	沖縄県	(海上)	26.400	126.640	—
1091	2011年8月13日	17:32:00	青森県	(海上)	40.486	139.889	—
1092	2011年8月20日	10:13:00	北海道	(海上)	42.242	139.667	—
1093	2011年8月20日	14:48:00	北海道	(海上)	41.590	139.860	—
1094	2011年8月20日	18:30:00	北海道	(海上)	43.084	140.379	—
1095	2011年8月20日	18:40:00	北海道	(海上)	43.082	140.399	—
1096	2011年8月20日	18:45:00	北海道	(海上)	43.081	140.410	—
1097	2011年8月21日	5:10:00	長崎県	平戸市	33.488	129.524	0
1098	2011年8月21日	6:10:00	福岡県	久留米市	33.352	130.636	0
1099	2011年8月21日	6:41:00	福岡県	福岡市	33.563	130.419	1
1100	2011年8月22日	12:05:00	北海道	(海上)	45.317	140.980	—
1101	2011年8月22日	14:15:00	沖縄県	(海上)	24.850	125.350	—
1102	2011年8月22日	16:17:00	沖縄県	(海上)	26.483	127.817	—
1103	2011年8月23日	15:57:00	長崎県	(海上)	32.650	129.672	—
1104	2011年9月1日	13:30:00	宮城県	(海上)	38.154	141.043	—
1105	2011年9月1日	13:40:00	宮城県	(海上)	38.138	141.021	—
1106	2011年9月15日	9:00:00	三重県	(海上)	34.078	136.361	—
1107	2011年9月15日	9:30:00	三重県	(海上)	34.128	136.567	—
1108	2011年9月20日	5:50:00	北海道	(海上)	45.424	141.693	—
1109	2011年9月21日	12:30:00	埼玉県	さいたま市	35.994	139.704	0
1110	2011年10月14日	7:30:00	宮崎県	延岡市	32.687	131.808	0
1111	2011年10月21日	21:30:00	高知県	土佐清水市	32.779	132.949	0
1112	2011年11月15日	16:10:00	新潟県	(海上)	37.033	137.700	—
1113	2011年11月15日	16:12:00	新潟県	(海上)	37.033	137.700	—
1114	2011年11月15日	16:14:00	新潟県	(海上)	37.033	137.700	—
1115	2011年11月15日	16:15:00	新潟県	(海上)	37.033	137.700	—
1116	2011年11月15日	16:20:00	新潟県	(海上)	37.033	137.700	—
1117	2011年11月18日	19:10:00	鹿児島県	大島郡徳之島町	27.829	128.933	2

	発生日時		発生場所		発生位置		F スケール
	年月日	時刻	都道府県	市町村	緯度	経度	
1118	2011年11月24日	12:10:00	富山県	(海上)	36.940	137.392	－
1119	2011年11月25日	6:27:00	富山県	(海上)	36.896	137.383	－
1120	2011年11月30日	11:08:00	沖縄県	(海上)	26.414	127.698	－
1121	2011年12月4日	6:45:00	東京都	(海上)	34.797	139.429	－
1122	2011年12月4日	7:00:00	東京都	(海上)	34.824	139.392	－
1123	2011年12月4日	7:10:00	東京都	(海上)	34.817	139.411	－
1124	2011年12月4日	7:10:00	東京都	(海上)	34.817	139.411	－
1125	2011年12月24日	12:10:00	石川県	(海上)	36.808	136.700	－
1126	2012年2月1日	4:15:00	島根県	出雲市	35.361	132.678	0
1127	2012年2月28日	17:40:00	沖縄県	うるま市	26.356	127.971	0
1128	2012年5月6日	11:20:00	福島県	大沼郡会津美里町	37.523	139.796	0
1129	2012年5月6日	12:30:00	茨城県	筑西市	36.298	139.938	1
1130	2012年5月6日	12:35:00	茨城県	常総市	36.111	139.946	3
1131	2012年5月6日	12:40:00	栃木県	真岡市	36.398	139.983	1～2
1132	2012年5月9日	8:40:00	愛知県	(海上)	34.897	136.800	－
1133	2012年5月13日	12:56:00	沖縄県	(海上)	24.712	125.318	－
1134	2012年5月13日	16:57:00	沖縄県	(海上)	24.898	125.258	－
1135	2012年6月2日	15:40:00	奈良県	生駒郡斑鳩町	34.596	135.732	0
1136	2012年6月5日	3:20:00	沖縄県	島尻郡南大東村	25.822	131.237	0

## 竜巻最大風速のハザード曲線の算定について

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」(以下、「ガイド」という)に基づき、竜巻に遭遇し、かつ竜巻がある風速以上になる確率モデルの推定法 (Wen and Chu 1973 およびGarson et al.(1975 Vol. 101) によって、竜巻最大風速のハザード曲線を算定し $V_{B2}$  を評価する。その際、独立行政法人原子力安全基盤機構が東京工芸大学に委託した研究の成果 (東京工芸大学2011) ; 以下、「JNES 委託成果」という) も参考とした。

## 1. 竜巻ハザード算定フロー

本評価は、竜巻の発生頻度の分析、竜巻風速・被害幅・被害長さの確率密度分布および相関係数の算定、ならびにハザード曲線の算出によって構成されている。評価フローを図 1-1 に示す。

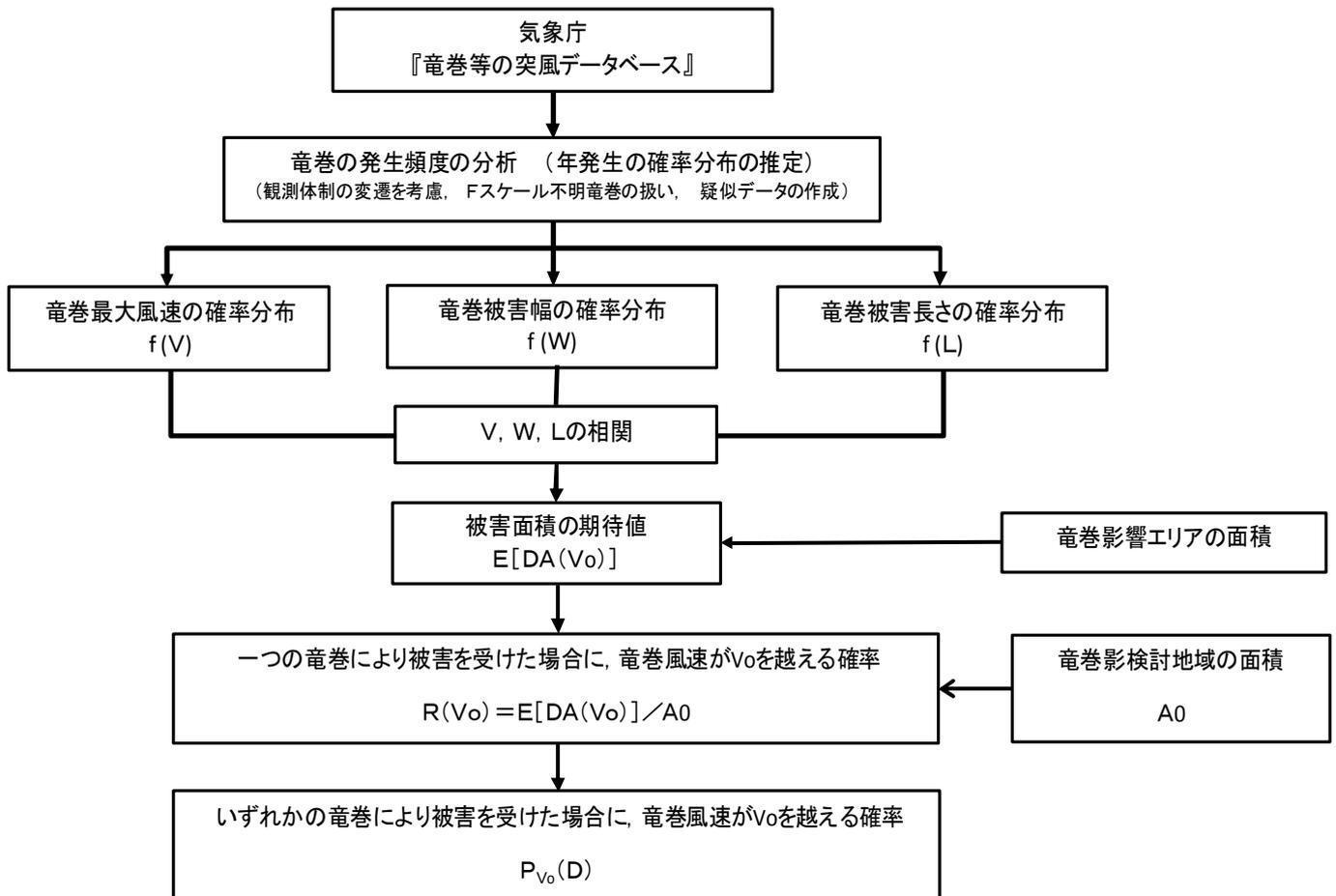


図 1-1 竜巻ハザードの算定フロー

## 2. 竜巻の発生頻度の分析

### 2.1 対象とする竜巻事例

気象庁の「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1月～2012年6月までに発生した竜巻事例を抽出した。

### 2.2 竜巻の発生頻度

竜巻発生数の年平均値および標準偏差を評価するため、気象庁の「竜巻等の突風データベース」を使用しており、1961年1月以降のデータがデータベース化されている。竜巻の観測体制は近年になるほど強化されており、年代により観測値の質にばらつきがある。観測体制が強化された2007年以降は、発生数が非常に多くなっており、海上竜巻の増加が特に顕著となっている。ただし、これら海上竜巻の多くは、その詳細が“不明”となっているのも特徴である。

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

- a. 観測体制が強化された2007年1月～2012年6月（5.5年間）
- b. 観測体制が整備された1991年1月～2012年6月（21.5年間）
- c. 観測記録が整備された1961年1月～2012年6月（51.5年間）

このような観測体制の変遷を踏まえ、疑似的な51.5年間のデータや統計量を以下の考え方に基づきFスケール毎に作成した。

- ① 被害が小さくて見過ごされやすいF0およびF不明竜巻については、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採用する。
- ② 被害が比較的軽微なF1竜巻については、観測体制が整備された1991年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ③ 被害が比較的大きく見逃されることが少ないF2、F3竜巻については、観測データが整備された1961年1月以降の全期間の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ④ 51.5年間の発生数を、①～③の観測期間との比率からFスケール毎に推計する。

上記3つの観測期間について、竜巻検討地域を対象に、竜巻発生数、年間平均発生数およびその標準偏差をFスケール毎に調査した一例を表2-1に示す。

表 2-1 竜巻発生数の解析結果

	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	3	0	3	0	0	0	0	3
	平均値(年)	0.06	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06
	標準偏差(年)	0.24	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	2	0	2	0	0	0	0	2
	平均値(年)	0.09	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均値(年)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	5	0	5	0	0	0	0	5
	平均値(年)	0.09	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	5	0	5	0	0	0	0	0
	平均値(年)	0.09	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 2-2 竜巻発生数の推計結果 (疑似 51.5 年間)

	発生数の統計	小計	竜巻スケール			
			F0	F1	F2	F3
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	5	0	5	0	0
	平均値(年)	0.10	0.00	0.10	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.00	0.00

表2-1の1～3段目までは、1961年1月～2012年6月、1991年1月～2012年6月、2007年1月～2012年6月の結果をそれぞれ表し、小計はF0からF3竜巻の発生数の合計、総数は不明(陸上・海上)も含めた合計を表す。

なお、ここでの陸上竜巻とは、陸上で発生した竜巻に加え、海上(水上)で発生しその後上陸した竜巻を含んでいる(図2-1参照)。また、気象庁データベースでFスケールがF0～F1、F1～F2等と記された竜巻は、大きい方に区分する。

表2-1から分かるように、1961年1月以降の51.5年間で、3個の竜巻が観測されているが、それら全てはF1竜巻である。前述した①～④の考え方により推定した結果(以下、疑似データと呼ぶ)を表2-1の4段目に示す。

ここでの小計には、陸上での不明竜巻を含める。

これらの結果、51.5年間に発生した竜巻5個は全てF1竜巻と推定された。F1竜巻は、実際の観測は51.5年間で3個であるが、ここでは $2 \times (51.5/21.5) = 4.79$ を切り上げて5個と推定している。

竜巻は、被害があつて初めてそのFスケールが推定されるため、陸上での不明竜巻（上陸竜巻を含む）は、被害が少ないF0竜巻に分類するのが合理的と考えられる。一方、海上竜巻（非上陸）については、その竜巻スケールを推定することは困難であるが、沿岸部近傍での竜巻の発生特性は陸上と海上では類似していると考えられる。そこで、以下の考え方に従い、検討地域の竜巻発生数を推計する。

- ⑤ 陸上で発生したF不明竜巻、および海上で発生しその後上陸したF不明竜巻はF0に含める。これにより、全ての陸上竜巻をF0～F3に分類する。
- ⑥ 沿岸部近傍での海上竜巻の発生特性は、陸上竜巻の発生特性と類似しているとの仮定の下、不明な海上竜巻の発生数を陸上竜巻のFスケール別発生比率で按分する。（按分後の期間内発生数は切り上げて整数化する）

このようにして得られた結果を表2-1の5段目に示す。本竜巻検討地域では、海上のF不明竜巻が観測されていないため、⑤、⑥の操作によるFスケール別発生数に変化は無い。

以上のようにして疑似的な51.5年間の発生数を求めたが、期間内の発生数は海上竜巻を按分する際に切り上げを行っているため、期間内発生数を51.5年間で割った平均値と、確率分布の再生性から求めた平均値とが一致しない場合がある。そこで、平均値は期間内発生数を51.5年で割った値とし、標準偏差は再生性から求めた値を採用する。最終的に推定された疑似データの統計量を表2-2に示す。

図2-2は、求められた年発生数の平均値（0.097個）と標準偏差（0.298個）に対するポアソン分布とポリヤ分布である。ポアソン分布（破線）は平均値のみで決まるが、ポリヤ分布（実線）は標準偏差の影響を受けるため、幅の広い分布形への適合度が高い。

### 2.3 年発生数の確率密度分布の設定

竜巻の年発生数の確率分布は、ガイドに従い、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の記録等に基づいてポアソン過程により設定する。竜巻のような稀な事象の発生数を表現するモデルとして、式(2.1)の確率分布(ポアソン分布)に従うポアソン過程が参照される。

$$P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} \exp(-vT) \quad (2.1)$$

ここで、 $N$  は竜巻の年発生数、 $v$  は竜巻の年平均発生数、 $T$  は年数とする。このように、ポアソン分布では、基本的に年平均発生数のみを考慮して年発生数を表現している。

一方、ポリヤ分布は、 $\beta$  を分布パラメータとして、以下の式で表される(Wen and Chu 1973)。

$$P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} (1 + \beta vT)^{-N-1/\beta} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (2.2)$$

$$\beta = \left( \frac{\sigma^2}{v} - 1 \right) \times \frac{1}{v} \quad (2.3)$$

ここで、 $\sigma$  は竜巻の年発生数の標準偏差である。 $\beta$  を限りなくゼロに近づけるとポアソン分布に近づく。そのため、ポリヤ分布は年発生数の変動(年ごとのばらつき)を考慮できるようにポアソン分布を拡張したものである。

Wen and Chu (1973) は、一つのストームで複数の竜巻が発生する(Tornado Outbreakと呼ばれる)事象は、年発生数の平均値だけでなく、標準偏差を考慮するポリヤ分布の方がより適合性が高くなると述べている。

ポアソン分布は、生起確率は分からないが稀な現象の場合に有用な分布である。一方、ポリヤ分布は、発生状況が必ずしも独立でない稀現象(ある現象が生ずるのは稀であるが、一旦ある現象が発生するとその周囲にもその現象が生じやすくなる性質)の場合に有用な分布である(例えば伝染病の発生件数など)。台風や前線により同時多発的に複数の竜巻が発生する状況が考えられるため、ポリヤ分布の方が実現象をより反映できると考えられる。

なお、国内を対象とした分布の適合性に関する検討結果としては、JNES委託成果で示されている。JNES委託成果では、陸上竜巻及び海上竜巻の両方の発生数について、ポリヤ分布の適合性がポアソン分布に比べて優れているとしている。

竜巻検討地域において、過去 51.5 年間に観測された竜巻の発生数の推移を示した結果を図 2-3(a)に示す。竜巻検討地域の竜巻発生数は非常に少ないことが確認できる。このデータから分布関数形を推定した結果を同図(b)(c)に示す。

ここでは、疑似データを作成した時の基本的な考え方に則り、発生数のシミュレーションを行い、どのような竜巻発生数の推移を想定しているかを示す。

- ・ F スケール毎に採用した期間内の観測値および不明な陸上・海上竜巻が、繰り返しランダムに現れるものとして、各年の発生数をシミュレーションし、疑似 51.5 年間の発生数データを作成する。そのデータを観測値と見なした場合に、関数形を推定し図 2-2 の結果と比較する。

具体的なシミュレーション法は以下のようである。例えば F0 の場合、信頼できるデータは最近 5~6 年間のデータしかないため、この内の一個のデータを乱数により抽出し、その年の F0 の発生数のデータとする。F0 に加えるべき陸上の不明や、海上竜巻についても、乱数を発生させて毎年の発生数をシミュレーションする。F1~F3 についても同様であり、これら全ての発生数を加算し、その年の発生数とする。

図 2-4(a)は、このようにして作成した疑似 51.5 年間の発生数時系列の一例である。F1 竜巻の最近 21.5 年間の発生特性を 51.5 年間に拡張しているため、同図(a)の年間発生数は、年ごとの変動はあるものの、図 2-3(a)に比べて多くなっている。図 2-4 (b)は、シミュレーションされた発生数の確率分布を推定した結果である。この結果は、図 2-2 の結果と非常に類似していることがわかる。本ケースでは、発生数が少ないため、ポアソン分布とポリヤ分布は同じような分布形を示しているが、ポアソン分布は平均値のみがパラメータ（分散は平均値と同じ）であるのに対し、ポリヤ分布は平均値と分散（標準偏差）をパラメータとするため自由度が大きいため、一般的にはポリヤ分布の方がシミュレーション結果への適合度が高い。

以上より、竜巻年発生数の確率密度分布にはポリヤ分布を採用する。

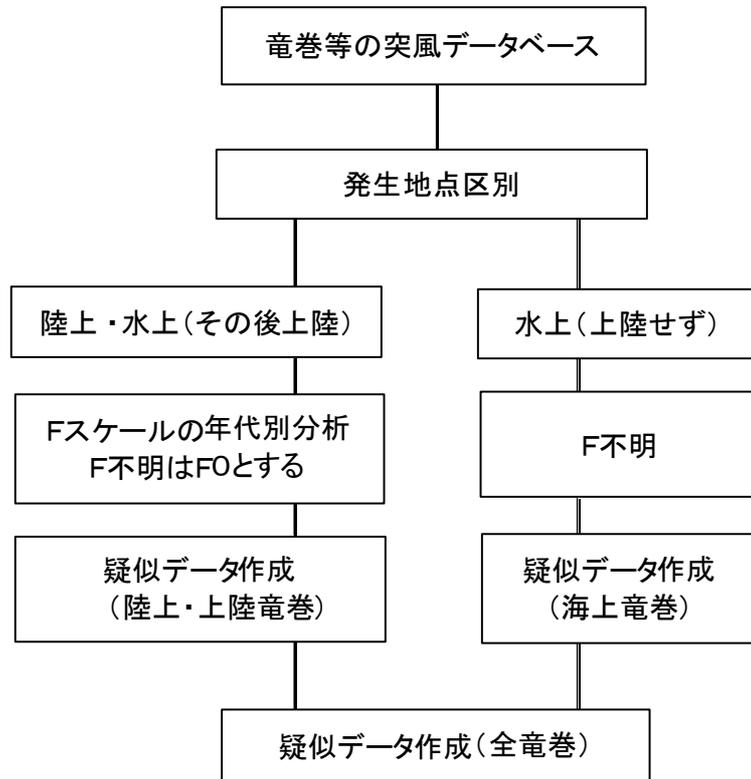


図 2-1 竜巻発生数の解析フロー

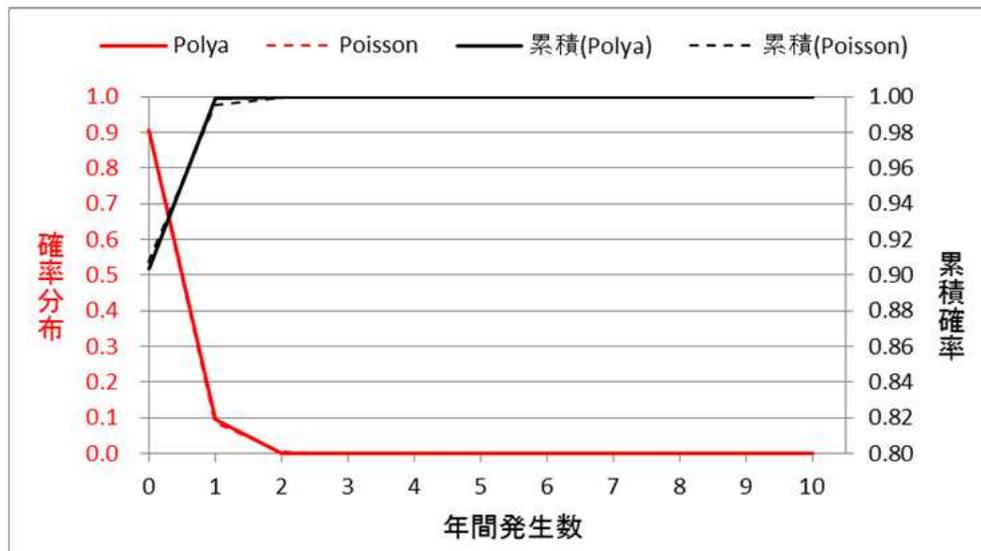
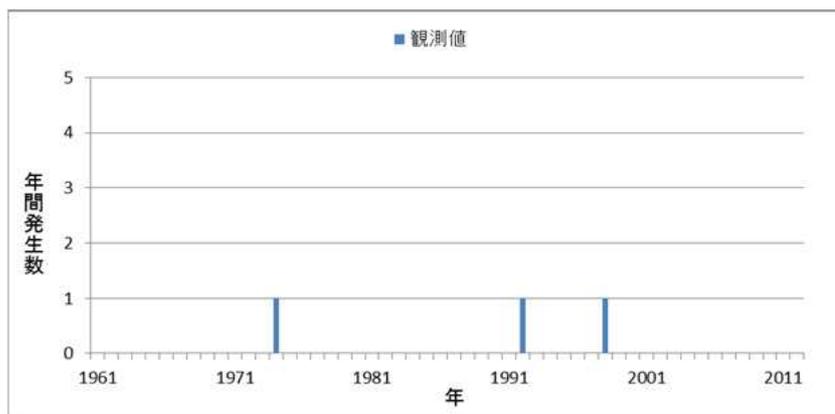
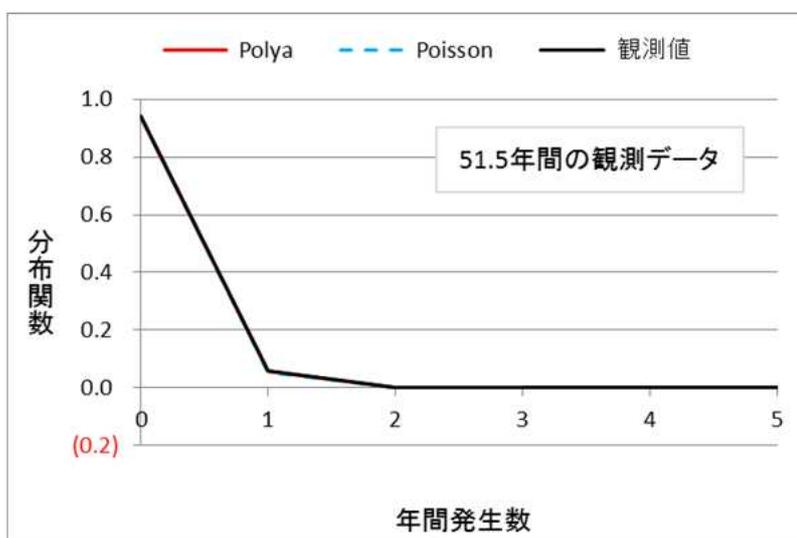


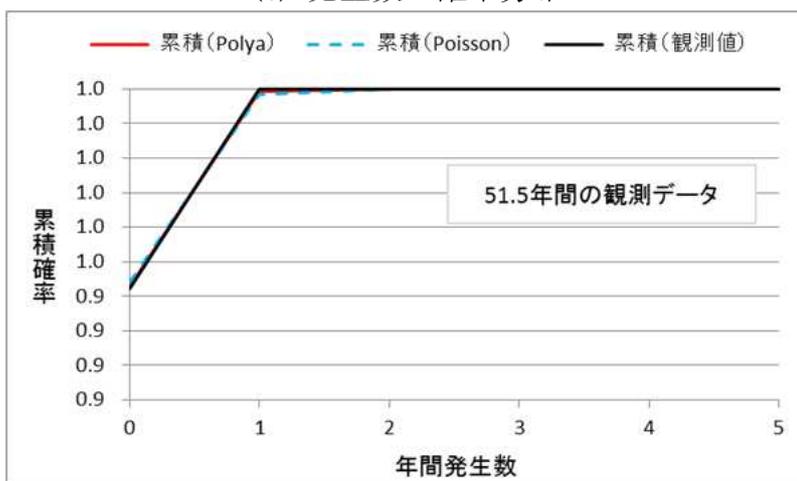
図 2-2 竜巻発生数の分布



(a) 発生数の推移 (観測値)

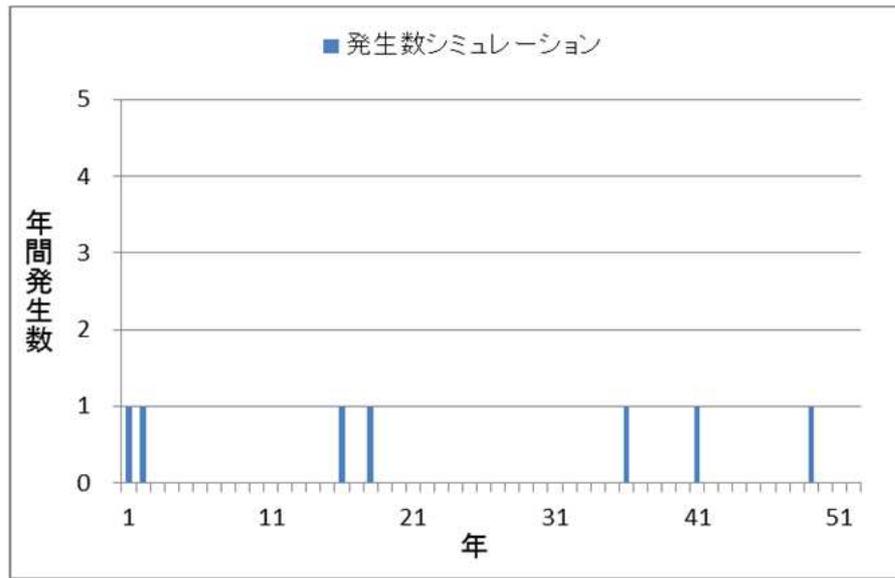


(b) 発生数の確率分布

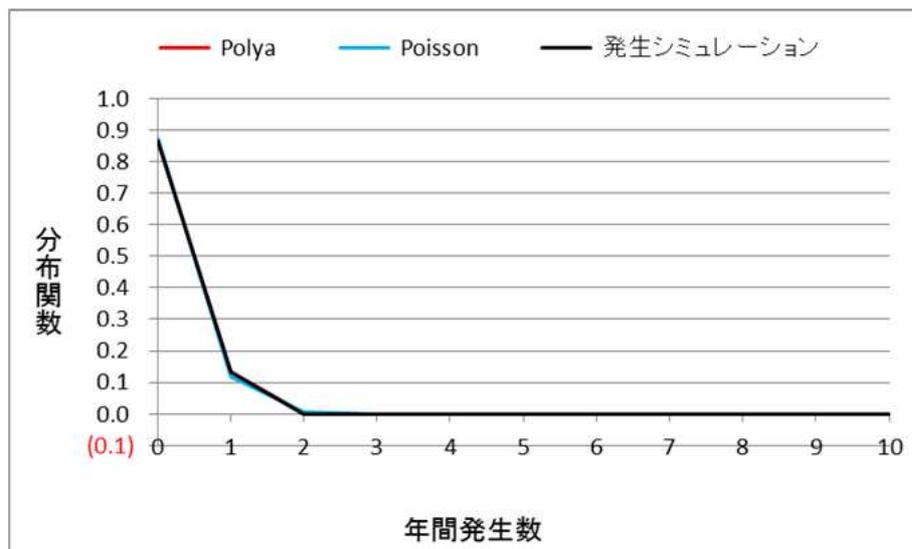


(c) 発生数の累積確率

図 2-3 発生数の観測値



(a) 年間発生数の時系列



(b) 発生数の確率分布

図 2-4 発生数シミュレーション

### 3. 竜巻被害幅・長さの統計

竜巻発生数と同様に、3つの観測期間を対象として、竜巻検討地域での被害幅の観測データを解析した結果を表 3-1 に示す。ここでの不明とは、被害幅と F スケールの両方もしくは片方が不明であることを表す。気象庁のデータベース上で、被害幅が 0m と記録されている竜巻も不明扱いとした。また、被害域幅や被害域長さが「○～○」のような範囲で指定されている場合は、その大きい方を採用した。

竜巻検討地域では、51.5年間に3個の竜巻が観測されているが、Fスケールが分かっているものが3個、Fスケールと幅の両方が分かっているものが2個である。一般に、被害幅の解析に利用可能なデータ数は、発生数のデータ数に比べてかなり少ない。

安定した統計値を算出するためには、データ数を確保する必要がある。また、先に推定した発生数との整合性も確保する必要がある。そこで、以下のようにして51.5年間の被害幅の統計量を推定した。

- ① 統計量を確保するために、1961年1月以降の全観測データを使用し、Fスケール別に被害幅データを抽出する。Fスケール別のデータから、被害幅の発生数や平均値・標準偏差を求める。
- ② 各スケール別の51.5年間のデータ数は、①で得られる観測値ではなく、表 1.2-1 で推定された51.5年間の疑似データの発生数とする。
- ③ ①で抽出されたFスケール別の被害幅データを大きい順に並び替え、②で設定した51.5年間の発生数分だけ繰り返しサンプリングを行い、51.5年間の疑似データ（幅のデータ）を作成する。
- ④ 作成された疑似データの平均値や標準偏差を求める。

このようにして求めた結果を表 3-1 の最下段に示す。Fスケール別の平均値や標準偏差は、繰り返しサンプリングを行っている関係で、最上段の観測値とは若干異なっている（若干大きい）。疑似データのF0、F2以上の個数は0個であるため、これら竜巻の幅については推定できなかった。このため、小計の値は、F1のデータの平均値や標準偏差から求められた。

以上により、Fスケール毎の被害幅の発生特性を保持しつつ、発生数との整合性を確保することができる。竜巻被害長さについても、被害域幅と同様の解析を行った。結果を表 3-2 に示す。

表 3-1 竜巻被害域幅の解析結果

	竜巻幅 の統計 (m)	小計	竜巻スケール				不 明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	2	0	2	0	0	1	0	3
	平均値 (m)	225	NaN	225	NaN	NaN			
	標準偏差 (m)	187	0	247	0	0			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	2	0	2	0	0	0	0	2
	平均値 (m)	225	NaN	225	NaN	NaN			
	標準偏差 (m)	187	0	247	0	0			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均値 (m)	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN			
	標準偏差 (m)	0	0	0	0	0			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	5	0	5	0	0	0	0	0
	平均値 (m)	260	NaN	260	NaN	NaN			
	標準偏差 (m)	192	0	192	0	0			

表 3-2 竜巻被害域長さの解析結果

	被害長さ の統計(km)	小計	竜巻スケール				不 明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	2	0	2	0	0	1	0	3
	平均値 (km)	0.850	NaN	0.850	NaN	NaN			
	標準偏差 (km)	0.160	0.000	0.212	0.000	0.000			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	2	0	2	0	0	0	0	2
	平均値 (km)	0.850	NaN	0.850	NaN	NaN			
	標準偏差 (km)	0.160	0.000	0.212	0.000	0.000			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均値 (km)	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN			
	標準偏差 (km)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	5	0	5	0	0	0	0	0
	平均値 (km)	0.880	NaN	0.880	NaN	NaN			
	標準偏差 (km)	0.164	0.000	0.164	0.000	0.000			

## 4. 竜巻風速・被害域幅・長さの確率分布・相関係数

### 4.1 対数正規分布

竜巻ハザードを評価するためには、一つの竜巻が発生した際の、竜巻風速・被害域幅・長さの確率分布が必要となる。本章では、これらの確率密度関数を求める。

前述の結果から、51.5年間の竜巻パラメータは表4-1のようにまとめられる。この表を基に、それぞれの竜巻パラメータの確率密度分布関数  $f(x)$  を求めるが、それに先立ち、対数正規分布について概説する。

平均値  $\mu$ 、標準偏差  $\sigma$  の正規分布は次式で表される。

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (4.1)$$

ここで、確率変数  $X$  の自然対数を取った変数  $\ln(x)$  が、正規分布で表されるとき、 $X$  は対数正規分布に従う。

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\ln}^2}} \frac{1}{x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x) - \mu_{\ln}}{\sigma_{\ln}}\right)^2\right] \quad (4.2)$$

上式中の  $\mu_{\ln}$ 、 $\sigma_{\ln}$  は  $\ln(x)$  の平均値と標準偏差であり、変数  $x$  の平均値  $\mu$  や標準偏差  $\sigma$  とは以下の関係にある。

$$\sigma_{\ln}^2 = \ln(CV^2 + 1) \quad (4.3)$$

$$\mu_{\ln} = \ln(\mu) - \frac{\sigma_{\ln}^2}{2} \quad (4.4)$$

ここで、 $CV$  は変動係数 ( $= \sigma / \mu$ ) である。

即ち、対数正規分布とは、変数  $x$  を対数変換したものが正規分布で表される場合に使用され、大きな値が希に出現するような現象を表す場合に適合度が良くなる。**JNES** の報告書によれば、竜巻の風速・幅・長さに関する分布形は、対数正規分布への適合度が良いことが示されていることから、ここでは対数正規分布を用いている。

### 4.2 竜巻風速の確率分布

表4-1の **F** スケール別の発生数から、竜巻風速の確率分布を求める。竜巻の場合、被害の程度から **F** スケールが推定されており、竜巻の最大風速が直接観測されているわけではない。**F** スケールの竜巻風速は、表4-2に示すような幅があるため、発生した竜巻の具体的な風速の設定法には任意性がある。

例えば、発生した竜巻の全ての風速を、F スケールの範囲内の上限値（あるいは下限値，中央値）に設定する方法，あるいは F スケールの風速範囲内で一様に分布すると仮定する方法などが考えられる。

図 4-1 は、竜巻風速が各 F スケールの上限値，下限値，中央値に集中した場合，および一様に分布とした場合について，風速の分布形（超過確率）を推定した結果である。

#### 4.3 被害幅の確率分布

竜巻風速と同様に，竜巻被害幅の確率分布を推定する。被害幅の推定には，繰り返しサンプリングにより作成した 51.5 年間の疑似データを用いた。この疑似データの平均値と標準偏差を求め（図 4-1 参照），式(4.3)(4.4)から対数正規分布を推定した。

推定された対数正規分布の確率分布，超過確率，および疑似データの超過確率を図 4-2 に示す。幅の観測値はデータ数が十分では無く，解像度も 10m 程度の離散的な値をとるため，確率分布との直接的な比較は難しいが，累積値や超過確率の結果から，妥当な推定値と判断される。

#### 4.4 被害長さの確率分布

被害長さについても，被害幅と同様の方法で確率分布を推定した。図 4-3 によると，被害長さは 1km 未満の竜巻が多いことが分かる。

#### 4.5 相関係数

後述するように，竜巻のハザードの計算においては，2 変量あるいは 3 変量の確率分布関数を対象とするため，竜巻風速・被害幅・被害長さについての相関係数が必要となる。

ここでは，2 変量の確率分布関数について示す。

確率変量 X,Y があり，それぞれの確率分布が  $f(x)$ ,  $f(y)$  で表されるとする。また，X,Y の同時確率分布を  $f(x,y)$  とする。x を竜巻風速，y を竜巻幅とすると，同時確率分布  $f(x,y)$  とは，例えば風速 50m/s，幅 100m の竜巻が発生する確率などを表す。

風速と竜巻幅の間に相関が無い場合は，同時確率分布はそれぞれの分布形の積で表すことができる。

$$f(x, y) = f(x) \times f(y) \quad (4.5)$$

一方，両者の間に相関がある場合，例えば，風速が大きいほど（F スケールが大きいほど）竜巻の被害幅も大きくなるような場合には，相関係数を考慮する必要がある。この相関関係の有無により，同時確率分布は図 4-4 のよ

うに変化する。

なお、同時確率分布を  $x$  あるいは  $y$  について積分した結果は、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \int f(x, y) dx &= f_1(y) \\ \int f(x, y) dy &= f_2(x) \\ \iint f(x, y) dx dy &= 1 \end{aligned} \quad (4.6)$$

ここに、 $f_1(y)$ ,  $f_2(x)$  は  $x$ ,  $y$  の 1 変量確率分布である。

竜巻風速，被害域幅，被害域長さの相関を求める。本来ならば，これら 3 つが同時に観測されているデータを用いるのが望ましいが，十分なデータ数が確保されないため，1961 年以 1 月降の利用可能なデータを全て用いて相関を取ることとする。ただし，幅や長さが 0m のデータは解析対象外とした。

また，それぞれの変数の確率分布の推定では，データ総数の整合性を確保したが，相関係数の推定ではそのような補正は行わない。これは，相関の高い（と思われる）F2 以上のデータを重視するためである。

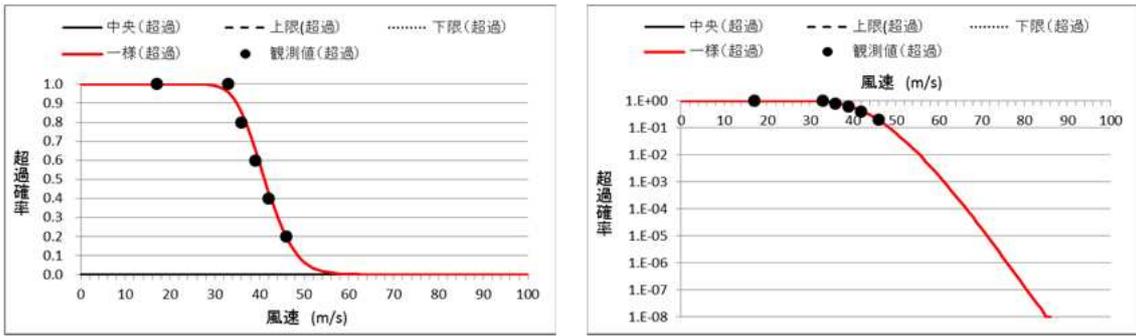
竜巻検討地域では，3 個の竜巻しか観測されておらず，しかもそのうちの 1 個は被害域長さ・幅は不明となっているため，相関係数を求める事ができない。そこで，全国の沿岸±5km 幅での風速・幅・長さの相関を求め（表 4-3），それを代用した。

表 4-1 竜巻検討地域における竜巻パラメータの比較  
(51.5 年間の疑似データ推定結果)

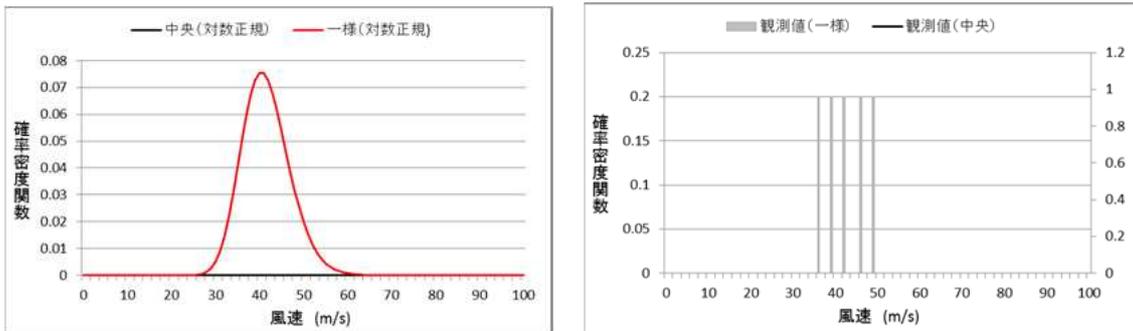
	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
疑似 51.5年間 (全竜巻)	発生数	期間内総数	5	0	5	0	0
		平均値(年)	0.10	0.00	0.10	0.00	0.00
		標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.00	0.00
	被害幅	期間内総数	5	0	5	0	0
		平均値(m)	260	NaN	260	NaN	NaN
		標準偏差(m)	192	0	192	0	0
	被害長	期間内総数	5	0	5	0	0
		平均値(km)	0.880	NaN	0.880	NaN	NaN
		標準偏差(km)	0.164	0.000	0.164	0.000	0.000

表 4-2 藤田スケールと最大風速の幅

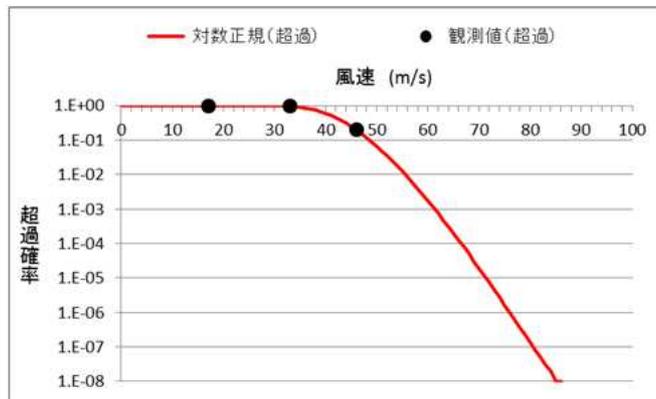
藤田 スケール	竜巻風速の下限値 (m/s)	竜巻風速の上限値 (m/s)
F0	17	32
F1	33	49
F2	50	69
F3	70	92
F4	93	116
F5	117	142



(a) 超過確率

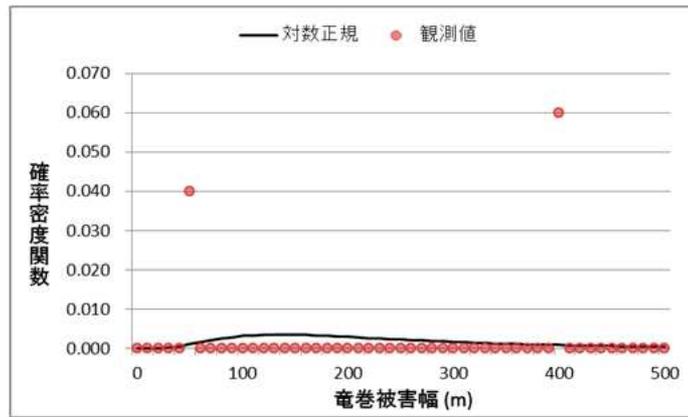


(b) 一様分布の場合の確率密度関数推定値 (左) と観測値(右)

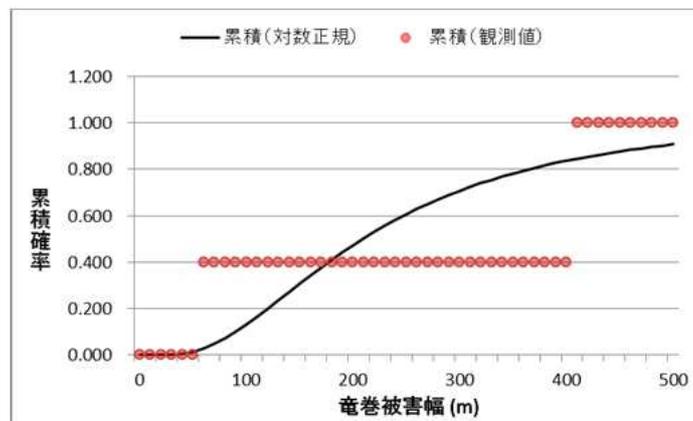


(c) 採用した風速分布 (中央集中型)

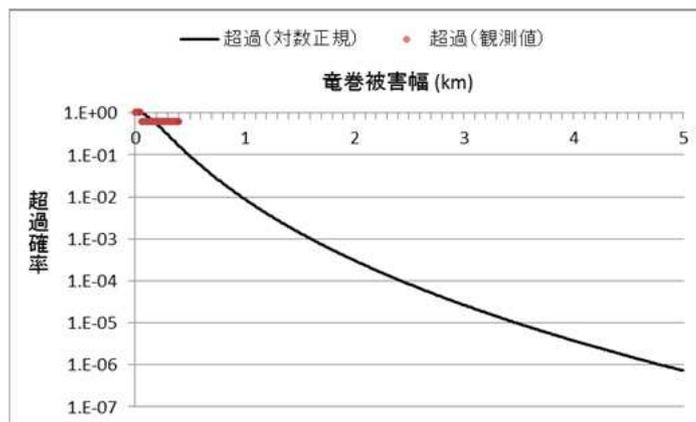
図 4-1 竜巻風速の確率分布の推定結果と観測値との比較



(a) 確率関数

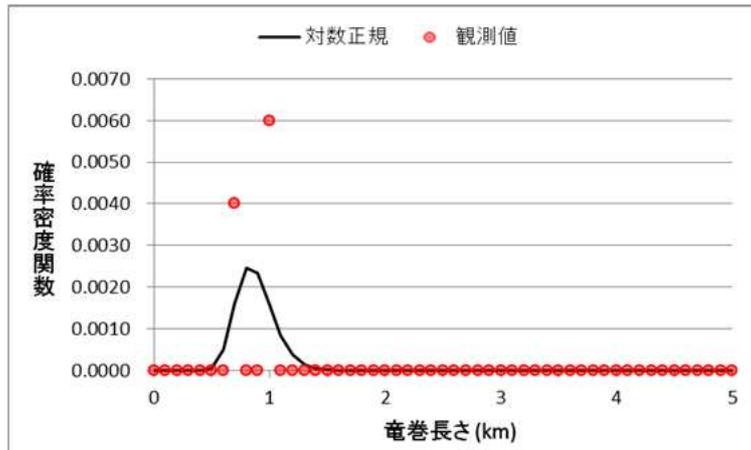


(b) 累積確率

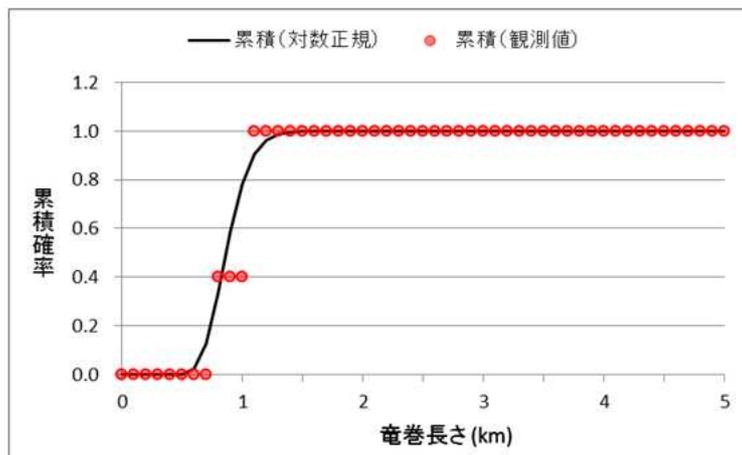


(c) 超過確率

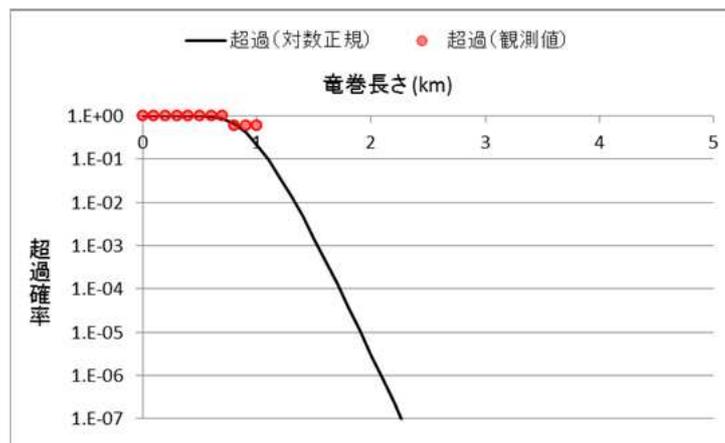
図 4-2 竜巻被害域幅の確率分布の推定結果と観測値との比較



(a) 確率分布

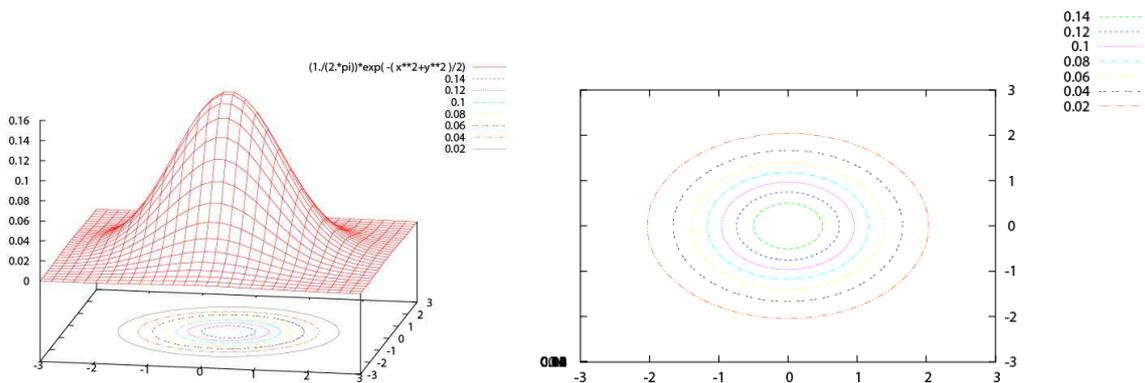


(b) 累積確率

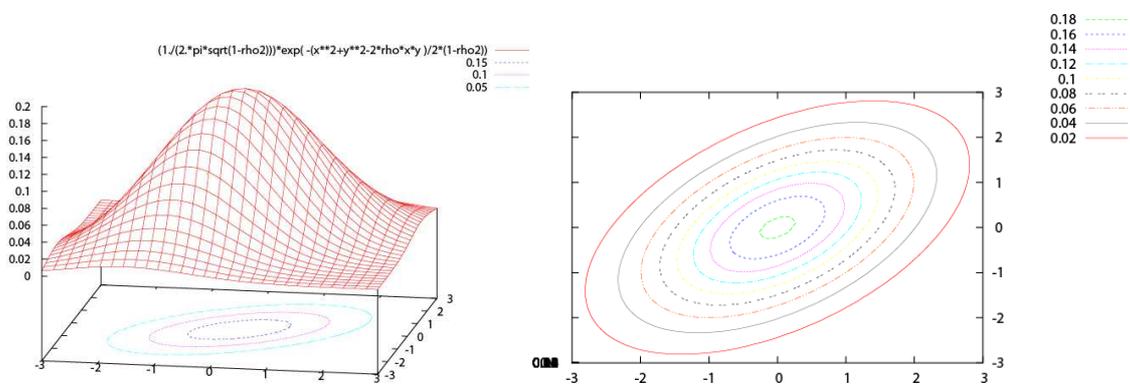


(c) 超過確率

図 4-3 ケーブル被害域長さの確率分布の推定結果と観測値との比較



(a) 2変量正規分布 (相関無しの場合)



(b) 2変量の正規分布 (相関有りの場合)

図 4-4 2変量確率分布に関する説明図

表 4-3 風速, 幅, 長さのデータ数と相関係数

データ数	風速	幅	長さ
風速	309	254	267
幅	254	263	255
長さ	267	255	273

相関係数	風速	幅	長さ
風速	1.000	0.271	0.417
幅	0.271	1.000	0.397
長さ	0.417	0.397	1.000

5. 竜巻影響エリア

女川原子力発電所 2号炉における評価対象施設の位置と面積を図5-1および表5-1に示す。評価対象施設の位置が分散しているため、保守的にそれぞれを包含する円形エリアを包含する円形を竜巻影響エリアの面積(約114,000m<sup>2</sup>(直径380mの円))として設定した(図5-2)。

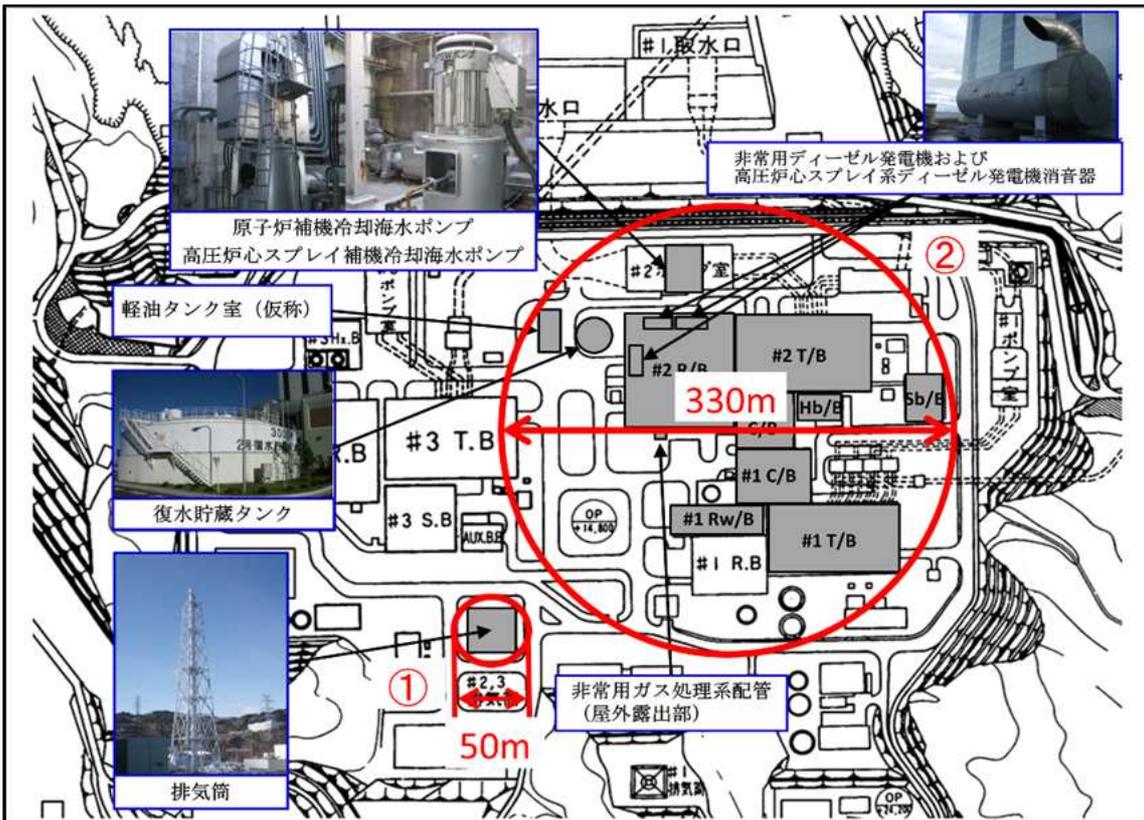


図 5-1 評価対象施設の位置

表 5-1 設計対象施設の面積

施設名	面積 (m <sup>2</sup> )
2号原子炉建屋	約6,620
1号制御建屋	約2,030
2号制御建屋	約1,860
2号海水ポンプ室	約610
復水貯蔵タンク	約420
2号軽油タンク室 (仮称)	約670
1号タービン建屋	約4,920
2号タービン建屋	約5,660
2号補助ボイラー建屋	約560
サイトバンカ建屋	約1,080
2号排気筒	約1,230
合計	約25,660

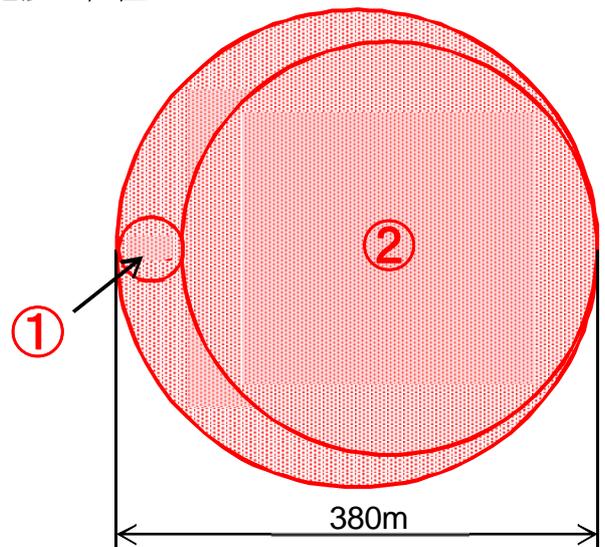


図 5-2 竜巻影響エリア

## 6. 竜巻ハザードの算定

### 6.1 竜巻風速 $V_0$ 以上となる面積の期待値

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

$$\begin{aligned} DA(V_0) &= WL + HL + WG + AB \quad ; V_i \geq V_0 \\ DA(V_0) &= 0 \quad ; V_i < V_0 \end{aligned} \quad (6.1)$$

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

上記の関係を、竜巻風速  $V$  ・ 幅  $w$  ・ 長さ  $l$  ・ 竜巻移動方向  $\alpha$  の確率分布を用いて表すと以下のようなになる。

$$\begin{aligned} E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\ &+ \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty H(\alpha) l f(V, l, \alpha) dV dl d\alpha + \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) G(\alpha) f(V, w, \alpha) dV dw d\alpha \quad (6.2) \\ &+ AB \int_{V_0}^\infty f(V) dV \end{aligned}$$

$$W(V_0) = \left( \frac{V_{\min}}{V_0} \right)^{1/1.6} w \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} H(\alpha) &= B |\sin \alpha| + A |\cos \alpha| \\ G(\alpha) &= A |\sin \alpha| + B |\cos \alpha| \end{aligned} \quad (6.4)$$

ここで、 $E[\cdot]$  は期待値を表し、 $A, B$  は四角形構造物の寸法、 $V_{\min}$  は被害が発生する最小風速、 $H(\alpha)$  と  $G(\alpha)$  は竜巻の幅・長さ方向への構造物の投影長さであり、3 変数の対数正規分布は以下で表される。

$$\begin{aligned} f(x, y, z) &= \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \left| \begin{array}{ccc} \sigma_x^2 & \sigma_x \sigma_y \rho_{xy} & \sigma_x \sigma_z \rho_{xz} \\ \sigma_x \sigma_y \rho_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_y \sigma_z \rho_{yz} \\ \sigma_x \sigma_z \rho_{xz} & \sigma_y \sigma_z \rho_{yz} & \sigma_z^2 \end{array} \right|^{1/2}} \times \frac{1}{xyz} \\ &\times \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \ln(x) - \mu_x \quad \ln(y) - \mu_y \quad \ln(z) - \mu_z \right) \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x \sigma_y \rho_{xy} & \sigma_x \sigma_z \rho_{xz} \\ \sigma_x \sigma_y \rho_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_y \sigma_z \rho_{yz} \\ \sigma_x \sigma_z \rho_{xz} & \sigma_y \sigma_z \rho_{yz} & \sigma_z^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \ln(x) - \mu_x \\ \ln(y) - \mu_y \\ \ln(z) - \mu_z \end{pmatrix} \right] \end{aligned} \quad (6.5)$$

式(6.5)の  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $\rho$  は  $\ln(x)$ ,  $\ln(y)$ ,  $\ln(z)$  の平均値、標準偏差および相関係数である。

式(6.2)の右辺第1項は、竜巻長さ・幅の積、即ち被害面積を表しており、いわゆる点構造物に対する被害に対応する。第2項と第3項は、竜巻長さ・幅と構造物寸法の積、即ち面構造物あるいは線状構造物の被害面積を表す。竜巻の幅は長さに比べて短いため、第3項の寄与は第2項に比べて1オーダー小さい。第4項は建物面積ABに依存する項であり、一般には第3項よりも小さい。従って、式(6.2)の右辺第1項と第2項の寄与が支配的になる。

## 6.2 竜巻移動方向

ガイドでは、竜巻の移動方向に配慮するよう求めている。ここでは、竜巻の移動特性を考慮した場合について示す。

竜巻の移動方向を $\alpha$ 、移動方向の確率分布を $p(\alpha)$ 、建物寸法をA,Bとすると、被害面積の期待値に関する項は以下で与えられる。

$$\int_0^{2\pi} H(\alpha) p(\alpha) d\alpha = \int_0^{2\pi} (B|\sin(\alpha)| + A|\cos(\alpha)|) p(\alpha) d\alpha \quad (6.6)$$

竜巻の移動に方向性が無い（一様分布の）場合は、 $p(\alpha)=1/(2\pi)$ であるから、上式は以下のようなになる。

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} H(\alpha) d\alpha = \frac{1}{2\pi} [2B[-\cos\alpha]_0^\pi + 2A[\sin\alpha]_{-\pi/2}^{\pi/2}] = \frac{2(A+B)}{\pi} \quad (6.7)$$

従って、A=Bの場合（正方形の構造物）には、 $4A/\pi$ （ $\approx 1.273A$ ）となることが分かる。

一方、構造物を円形構造物（直径 $D_0$ ）とした場合、竜巻の幅や長さ方向に構造物を投影した長さ $H(\alpha)$ や $G(\alpha)$ は、竜巻の移動方向には依存せず、一定値となる。

$$H(\alpha) = G(\alpha) = D_0 \quad ; \text{円形構造物} \quad (6.8)$$

従って、たとえ竜巻の移動方向に方向依存性があり、 $p(\alpha)$ に分布があったとしても、全方向について積分した式(6.7)の結果は $D_0$ となる。

上記の議論は、 $\alpha$ とV,W,lの間が無相関である場合に成り立つ。JNES報告書(H23)の表2.1.1.21~22(45頁)によると、 $\alpha$ とV,W,lの相関係数は-0.09~0.01の範囲内にあり、ほとんど相関が認められない（日本全国の1961~2008/12までのデータ）。

以上のことから、建物として円形構造物を仮定する限り（長方形や方向性のある線状構造物を対象としない限り）、竜巻の移動方向の特性を考慮する

必要はないことが分かる。

従って、円形構造物に対しては、式(6.2)は次のように簡単になる。

$$\begin{aligned}
 E[DA(V_0)] = & \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
 & + D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty l f(V, l) dV dl + D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw \quad (6.9) \\
 & + (D_0^2 \pi / 4) \int_{V_0}^\infty f(V) dV
 \end{aligned}$$

また、2変量の対数正規分布は以下のように書ける。

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \frac{1}{xy} \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left\{\left(\frac{\ln(x)-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2 - 2\rho\left(\frac{\ln(x)-\mu_x}{\sigma_x}\right)\left(\frac{\ln(y)-\mu_y}{\sigma_y}\right) + \left(\frac{\ln(y)-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right\}\right] \quad (6.10)$$

### 6.3 被害幅の補正

式(6.3)の  $W(V_0)$  の項は、風速が  $V_0$  以上となる被害幅の比率を表しており、いわゆる被害面積補正の一種（幅方向の補正）である。

$V_{\min}$  は、竜巻被害が発生する最小風速であり、図 6-1 のエッジ部分の風速に相当する。Garson et al.(1975 Vol.101)は、この  $V_{\min}$  を **gale intensity velocity** と呼んでいる。Gale とは非常に強い風のこと、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。

日本の気象通報にも用いられている風力階級では、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」とされる。これらのことを参考にして、本検討では

$$V_{\min} = 25.0 \text{ m/s} \quad (6.12)$$

を被害が発生する最小風速とした。この値は、F0 (17~32m/s) のほぼ中央値に相当する。

なお、この値よりも小さな  $V_{\min}$  (例えば、F0 の最小風速 17m/s) を用いると、風速  $V_0$  以上となる被害面積は小さくなる。

#### 6.4 竜巻ハザードの評価法

前述のとおり，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(6.13)で表される (Wen and Chu 1973)。

$$\text{ポリヤ分布} : P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} (1 + \beta vT)^{-N-1/\beta} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (6.13)$$

$$\beta = \left( \frac{\sigma^2}{v} - 1 \right) \times \frac{1}{v} \quad (6.14)$$

ここに，

- $N$  : 竜巻の年発生数
- $v$  : 竜巻の年平均発生数
- $T$  : 年数
- $\sigma$  : 竜巻の年発生数の標準偏差

$T$  年以内にいずれかの竜巻に遭遇し， $V_0$  以上の竜巻風速に遭遇する確率  $P_{v_0,T}(D)$  は，次式で表される (Wen and Chu)。

$$\text{ポリヤ分布} : P_{V_0,T}(D) = 1 - [1 + \beta vR(V_0)T]^{-1/\beta} \quad (6.15)$$

ここに，

- $D$  : 対象とする構造物が風速  $V_0$  以上の竜巻に遭遇する事象
- $R(V_0)$  : リスク評価対象構造物が 1 つの竜巻に増遇し，竜巻風速が  $V_0$  以上となる確率

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \quad (6.16)$$

- $DA(V_0)$  : 竜巻による構造物の被害面積
- $A_0$  : リスクの評価対象とする地域の面積

式(6.16)は，式(6.2)を積分することで評価できる。式(6.16)を式(6.15)に代入すれば，ハザード曲線を求めることができる。

### 6.5 竜巻最大風速のハザード曲線

竜巻最大風速のハザード曲線の算定結果を図 6-1 に示す。年超過確率  $10^{-5}$  に相当する竜巻風速は 36.1m/s となる。

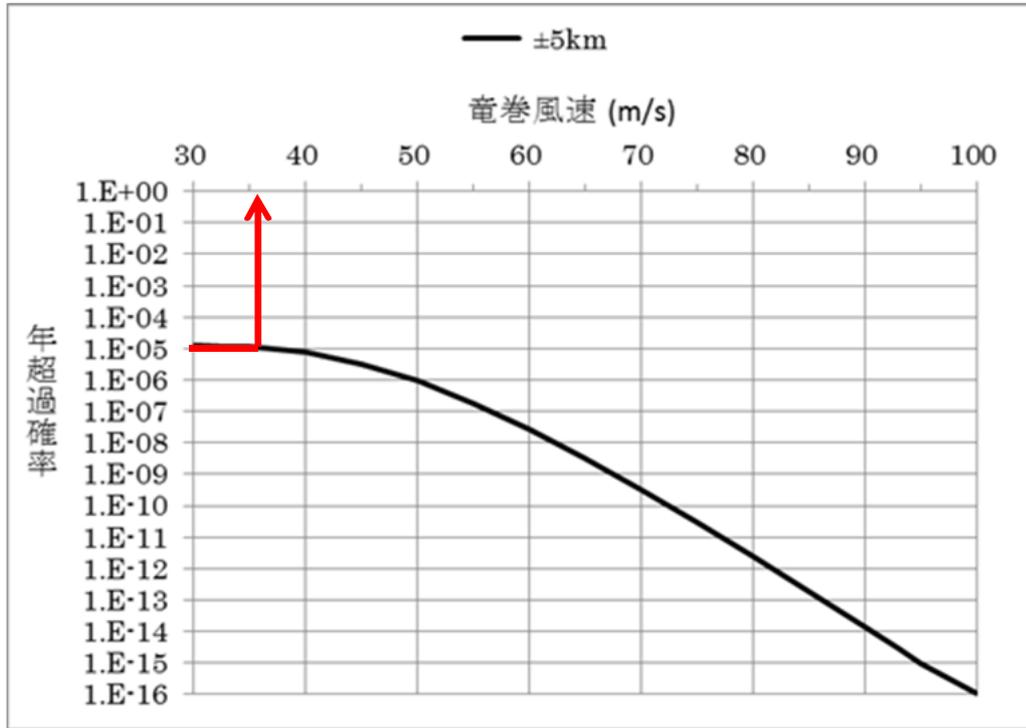


図 6-1 竜巻最大風速のハザード曲線

## 7. 1km 範囲ごとの検討

### 7.1 1km 短冊での発生数の解析

気象庁の竜巻等の突風データベースでは、以下のような項目がデータベース化されており、本検討の解析に用いている。

1. 発生場所： 緯度・経度，誤差範囲
2. 消滅場所： 緯度・経度，誤差範囲
3. 藤田スケール：
4. 被害域幅(m)：
5. 被害域長さ(km)：
6. 移動方向： 16 方位：
7. 発生地点区別： 陸上 | 水上（上陸せず） | 水上（その後上陸）

沿岸域を 1km 毎の短冊領域で評価する場合，発生・消滅場所の緯度・経度から竜巻の移動経路を求め，その移動経路が対象とする短冊内に含まれるか，もしくは横切るかを判断し，発生数（通過数を含む）および短冊内の竜巻長さ（セグメントの長さ）を解析する。

発生地点区別で“水上（その後上陸）”とされている竜巻の場合，その発生場所の緯度・経度は陸上を指す場合が多く，上陸地点もしくは被害の発生地点（陸上部）がデータベースに記されているものと考えられる。図 7-1 は，2004 年 10 月 22 日および 2006 年 11 月 7 日に北海道日高町で発生した F2，F1 竜巻の発生位置と消滅位置を示す。いずれの竜巻も“水上発生（その後上陸）”，即ち上陸竜巻であるが，データベース上の発生位置は海岸の陸上部にある。

そこで，海側 0-1km 短冊では，発生地点区別から上陸竜巻か否かを判断することにより，緯度・経度情報だけでは捕捉できない上陸竜巻の発生・通過数を考慮した。1km 短冊での発生数の解析フローを図 7-2 に示す。

なお，ハザードの算定にあたっては以上のフローを除き，海岸線から陸側および海側 5km 範囲の評価と同様の方法で算定した。



図 7-1 上陸竜巻のデータベース上の発生位置と消滅位置の一例

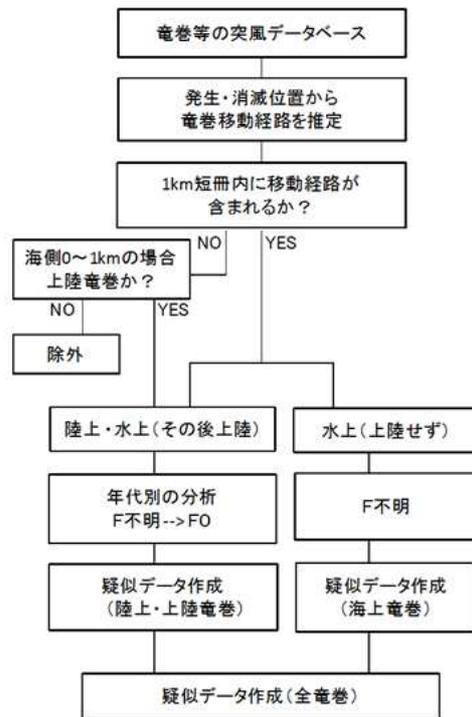


図 7-2 竜巻発生数の解析フロー（1km 短冊の場合）

## 7.2 竜巻パラメータの推定結果

1km 短冊での発生数の推定結果を表 7-1 に示す。ここでは、1km 短冊の通過数も発生数に加えて評価している。データ数が少ないため、陸側 0-1km 短冊のみを解析対象とした。短冊内での疑似データの作り方は、基本ケース（±5km 幅）と同じ方法を用いた。

陸側 0-1km では 3 個の F1 竜巻が観測されているが、疑似データでは 5 個の F1 竜巻を推定している。これは、±5km 幅と同じであり、海岸付近でのみ竜巻が観測されていることを示している。

表 7-2 は、1km 短冊での竜巻パラメータ（51.5 年間の疑似データ）の推定結果である。陸側のセグメント長さは約 730m であるが標準偏差は 100m 以下と非常に小さい。

陸側 0-1km のセグメント長さを求めた結果を表 7-3 に示す。前述したように、海岸線付近でのみ竜巻が観測されていることから、±5km と陸側 0-1km の風速の確率分布は一致する。

表 7-1 発生数の推定結果（陸側 0-1km）

1km短冊 (陸 0-1km)	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	3	0	3	0	0	0	0	3
	平均値(年)	0.06	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06
	標準偏差(年)	0.24	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	2	0	2	0	0	0	0	2
	平均値(年)	0.09	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均値(年)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	5	0	5	0	0	0	0	5
	平均値(年)	0.09	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	5	0	5	0	0	0	0	0
	平均値(年)	0.09	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 7-2 竜巻パラメータの推定結果（陸側 0-1km の疑似データ）

	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
1km短冊 (陸 0-1km)	発生数	期間内総数	5	0	5	0	0
		平均値(年)	0.10	0.00	0.10	0.00	0.00
		標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.00	0.00
疑似 51.5年間 (全竜巻)	被害幅	期間内総数	5	0	5	0	0
		平均値(m)	260	NaN	260	NaN	NaN
		標準偏差(m)	192	0	192	0	0
被害長	期間内総数	5	0	5	0	0	
	平均値(km)	0.733	NaN	0.733	NaN	NaN	
	標準偏差(km)	0.093	0.000	0.093	0.000	0.000	

表 7-3 陸側 0-1km のセグメント長さ

1km短冊 (陸 0-1km)	被害長さ の統計(km)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	2	0	2	0	0	1	0	3
	平均値(km)	0.716	NaN	0.716	NaN	NaN			
	標準偏差(km)	0.091	0.000	0.120	0.000	0.000			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	2	0	2	0	0	0	0	2
	平均値(km)	0.716	NaN	0.716	NaN	NaN			
	標準偏差(km)	0.091	0.000	0.120	0.000	0.000			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均値(km)	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN			
	標準偏差(km)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	5	0	5	0	0	0	0	0
	平均値(km)	0.733	NaN	0.733	NaN	NaN			
	標準偏差(km)	0.093	0.000	0.093	0.000	0.000			

### 7.3 竜巻ハザードの算定結果

ハザードの計算条件を表 7-4 に示す。また、ハザードの推定結果を図 7-3 に示す。1km 短冊の面積は、10km 幅の面積を短冊幅の比率で等分した。

陸側 0-1km の場合において、年超過確率が  $10^{-5}$  となる風速は 49m/s となった。この値は、±5km の結果 (36.1m/s) に比べて厳しいハザード結果となっている。これは、観測された竜巻は全て沿岸部にあるため、±5km 幅と陸側 0-1km 幅とでは竜巻特性が同じであるが、面積が 1/10 になる分だけ陸側 0-1km のハザードが厳しくなるためである。

表 7-4 竜巻ハザードの計算条件

竜巻検討地域	統計量	発生数	風速	幅	長さ	相関係数 LN		
		(個)	m/s	m	m	U ~ W	U ~ L	W ~ L
±5km	平均値	0.097	41.5	260	880	0.27	0.42	0.40
	標準偏差	0.298	5.4	192	164			
陸側 0-1km	平均値	0.097	41.5	260	733	0.27	0.42	0.40
	標準偏差	0.298	5.4	192	93			

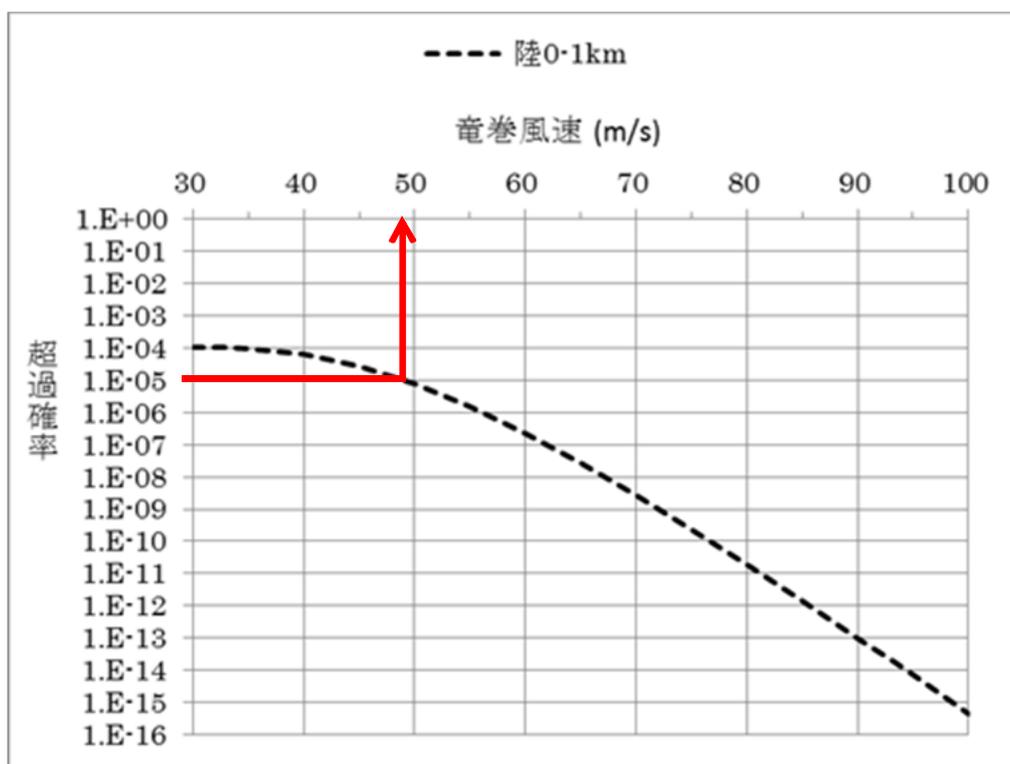


図 7-3 竜巻最大風速のハザード曲線 (短冊ケース)

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

海側，陸側それぞれ5kmおよび1km範囲ごとのハザード曲線による最大風速を算定した結果を表7-5および図7-4に示す。

表7-5および図7-4より，陸側0~1km範囲を対象に算定した49.0m/sが最も大きな風速値であった。

従って，ハザード曲線による最大風速 ( $V_{B2}$ ) は49.0m/sとする。

表 7-5 年超過確率  $10^{-5}$  風速の検討結果

項目	最大風速
海側および陸側それぞれ5kmの評価	36.1m/s
1km範囲ごとの評価 (陸側0~1km)	49.0m/s

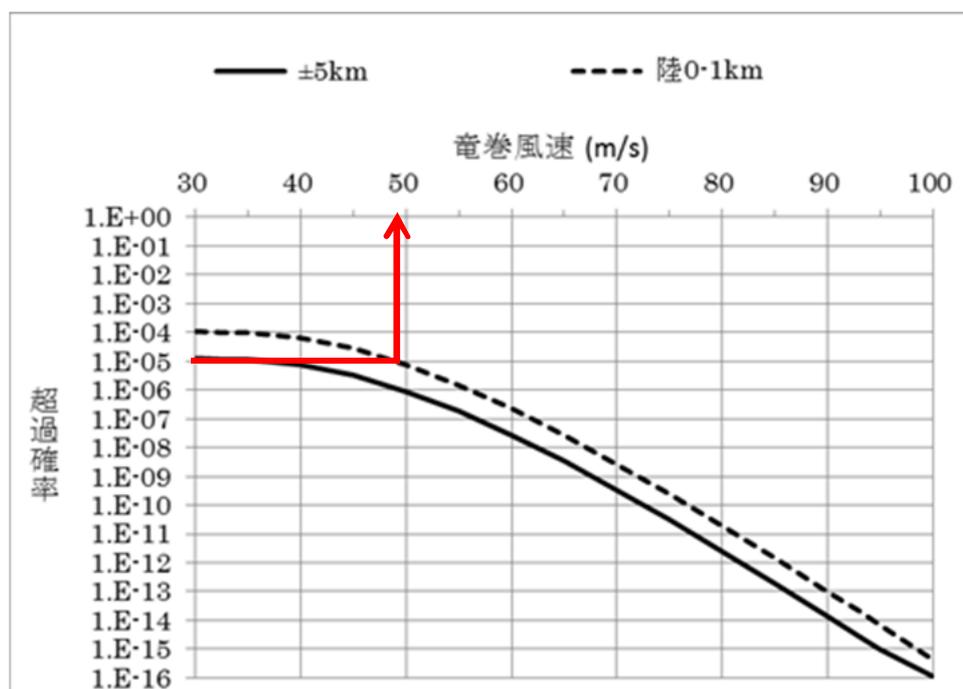
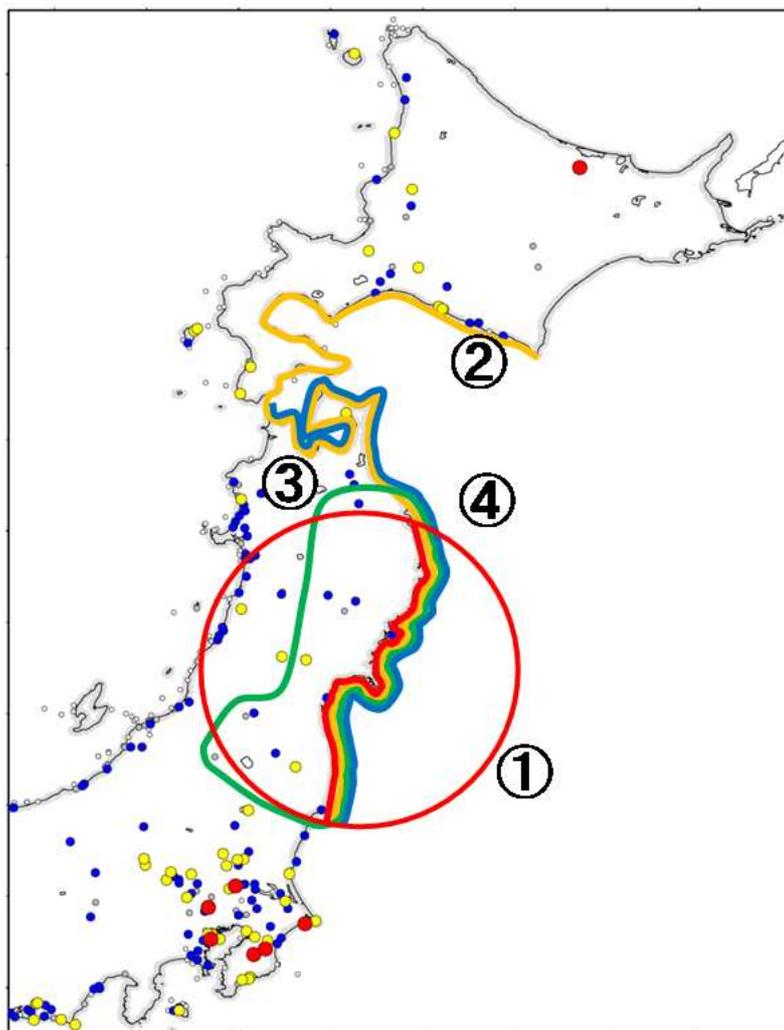


図 7-4 竜巻最大風速のハザード曲線

## 7.5 周辺地域の竜巻最大風速の分析

### (1) 検討地域

竜巻検討地域を含む周辺地域で過去に発生した竜巻の最大風速および竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速を分析した。検討対象地域を図7-5に示す検討地域②、③、④である。なお、検討地域①は女川原子力発電所の竜巻検討地域である。



- ①：竜巻検討地域
- ②：福島県～北海道の襟裳岬までの海岸線から海側，陸側 5km の範囲
- ③：東北地方内陸（福島，宮城，岩手）
- ④：福島県～青森県竜飛崎の海岸線から海側，陸側 5km の範囲

図 7-5 分析対象地域

- (2) 過去に発生した竜巻の最大風速  
検討地域②. ③. ④で観測された竜巻一覧を表 7-6 に示す。  
表 7-6 より、いずれの地域においても F2 竜巻が発生していた。
- (3) ハザード曲線の算定  
検討地域②. ③. ④のハザード曲線による最大風速の算定方法は、竜巻検討地域（検討地域①）と同じ手法により算定した。
- a. 海岸線から海側および陸側 5km の範囲
- (a) 竜巻発生数，被害幅，被害長さの統計  
検討地域②，③，④における竜巻発生数の分析結果を表 7-7 および表 7-8，被害幅の分析結果を表 7-9，被害長さの分析結果を表 7-10 に示す。  
これらの分析結果のまとめを表 7-11 に示す。
- (b) 竜巻風速，被害幅，被害長さの確率分布  
表 7-11 の F スケール別の分析結果より，竜巻風速，被害幅，被害長さの確率分布を算定した。竜巻風速の確率分布の算定結果を図 7-6，図 7-7，図 7-8，被害幅の確率分布の算定結果を図 7-9，図 7-10，図 7-11，被害長さの確率分布の算定結果を図 7-12，図 7-13，図 7-14 に示す。
- b. 1km 範囲ごとの検討
- (a) 竜巻発生数，被害幅，被害長さの統計  
1km 範囲における竜巻発生数の分析結果を表 7-12 および表 7-13，被害幅の分析結果を表 7-14，被害長さの分析結果を表 7-15 に示す。  
またこれらの分析結果のまとめを表 7-16 に示す。
- (b) 竜巻風速，被害幅，被害長さの確率分布  
1km 範囲の分析における竜巻風速の確率分布の算定結果を図 7-15，図 7-16，図 7-17，図 7-18，被害幅の確率分布の算定結果を図 7-19，図 7-20，図 7-21，図 7-22，被害長さの確率分布の算定結果を図 7-23，図 7-24，図 7-25 に示す。
- (4) 竜巻ハザードの算定結果  
検討地域②，③，④のハザード曲線を図 7-26，図 7-27，図 7-28 に示す。

(5) 周辺地域における竜巻最大風速

検討地域②, ③, ④において, 過去に発生した竜巻の最大風速および竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速の分析結果を表 7-17 に示す。

いずれの地域においても竜巻最大風速は, F2 の上限値である 69m/s となった。

表 7-6 竜巻観測実績

## (a) 検討地域②

No.	発生日	発生場所		F スケール
		都道府県	市町村	
1	1980年10月31日	北海道	門別町	1~2
2	1994年10月5日	北海道	門別町	1~2
3	1994年10月5日	北海道	門別町	1
4	1997年10月7日	北海道	苫小牧市	1
5	2003年9月29日	北海道	(海上)	不明
6	2004年10月22日	北海道	門別町	2
7	2005年10月2日	北海道	伊達市	0
8	2006年10月11日	北海道	新ひだか町	1
9	2006年10月11日	北海道	新ひだか町	1
10	2006年11月7日	北海道	日高町	1
11	2006年11月7日	北海道	日高町	不明
12	2007年10月4日	北海道	(海上)	不明
13	2007年10月17日	北海道	(海上)	不明
14	2008年11月7日	北海道	様似郡様似町	0~1
15	1965年9月5日	青森県	むつ市	2
16	1992年8月7日	宮城県	本吉郡唐桑町	1
17	1998年9月16日	宮城県	名取市	1
18	1974年3月13日	福島県	いわき市	1

## (b) 検討地域③

No.	発生日	発生場所		F スケール
		都道府県	市町村	
1	1970年6月25日	岩手県	江刺市	0~1
2	1987年8月10日	岩手県	二戸市	0~1
3	2003年8月25日	岩手県	北上市	0~1
4	2011年5月8日	岩手県	奥州市	0
5	1966年6月27日	宮城県	加美郡小野田町	2
6	1988年6月18日	宮城県	小野田町	1
7	1992年8月7日	宮城県	本吉郡唐桑町	1
8	1998年9月16日	宮城県	名取市	1
9	1972年8月13日	福島県	船引町	1~2
10	1973年1月30日	福島県	二本松市	0~1
11	1974年3月13日	福島県	いわき市	1
12	2012年5月6日	福島県	大沼郡会津美里町	0

## (c) 検討地域④

No.	発生日	発生場所		F スケール
		都道府県	市町村	
1	1965年9月5日	青森県	むつ市	2
3	1992年8月7日	宮城県	本吉郡唐桑町	1
2	1998年9月16日	宮城県	名取市	1
4	1974年3月13日	福島県	いわき市	1

表 7-7 竜巻発生数の解析結果

(a) 検討地域②

検討地域② (±5km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	14	1	9	4	0	1	3	18
	平均値(年)	0.27	0.02	0.17	0.08	0.00	0.02	0.06	0.35
	標準偏差(年)	0.60	0.14	0.52	0.27	0.00	0.14	0.31	0.74
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	11	1	8	2	0	1	3	15
	平均値(年)	0.51	0.05	0.37	0.09	0.00	0.05	0.14	0.70
	標準偏差(年)	0.81	0.22	0.74	0.30	0.00	0.22	0.47	1.01
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	1	0	1	0	0	0	2	3
	平均値(年)	0.18	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.36	0.55
	標準偏差(年)	0.43	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00	0.86	0.88
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	24	0	20	4	0	0	19	43
	平均値(年)	0.45	0.00	0.37	0.08	0.00	0.00	0.36	0.81
	標準偏差(年)	0.78	0.00	0.74	0.27	0.00	0.00	0.86	1.16
	CV(年)	1.74	NaN	1.98	3.48	NaN	NaN	2.37	1.43
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	44	0	36	8	0	0	0	0
	平均値(年)	0.81	0.00	0.67	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	1.05	0.00	0.98	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00

(b) 検討地域③

検討地域③	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	12	2	8	2	0	0	0	12
	平均値(年)	0.23	0.04	0.16	0.04	0.00	0.00	0.00	0.23
	標準偏差(年)	0.43	0.20	0.37	0.20	0.00	0.00	0.00	0.43
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	5	2	3	0	0	0	0	5
	平均値(年)	0.23	0.09	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23
	標準偏差(年)	0.43	0.30	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	2	2	0	0	0	0	0	2
	平均値(年)	0.36	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36
	標準偏差(年)	0.55	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	29	19	8	2	0	0	0	29
	平均値(年)	0.54	0.36	0.14	0.04	0.00	0.00	0.00	0.54
	標準偏差(年)	0.68	0.55	0.36	0.20	0.00	0.00	0.00	0.68
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	29	19	8	2	0	0	0	0
	平均値(年)	0.54	0.36	0.14	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.68	0.55	0.36	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00

## (c) 検討地域④

検討地域④ (±5km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	4	0	3	1	0	0	0	4
	平均値(年)	0.08	0.00	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.08
	標準偏差(年)	0.27	0.00	0.24	0.14	0.00	0.00	0.00	0.27
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	2	0	2	0	0	0	0	2
	平均値(年)	0.09	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均値(年)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	6	0	5	1	0	0	0	6
	平均値(年)	0.11	0.00	0.09	0.02	0.00	0.00	0.00	0.11
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.14	0.00	0.00	0.00	0.30
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	6	0	5	1	0	0	0	6
	平均値(年)	0.11	0.00	0.09	0.02	0.00	0.00	0.00	0.11
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.14	0.00	0.00	0.00	0.30

表 7-8 竜巻発生数の推計結果 (擬似 51.5 年)

## (a) 検討地域②

検討地域② (±5km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール			
			F0	F1	F2	F3
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	44	0	36	8	0
	平均値(年)	0.85	0.00	0.70	0.16	0.00
	標準偏差(年)	1.05	0.00	0.98	0.36	0.00

## (b) 検討地域③

検討地域③	発生数の統計	小計	竜巻スケール			
			F0	F1	F2	F3
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	29	19	8	2	0
	平均値(年)	0.56	0.37	0.16	0.04	0.00
	標準偏差(年)	0.68	0.55	0.36	0.20	0.00

## (c) 検討地域④

検討地域④ (±5km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール			
			F0	F1	F2	F3
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	6	0	5	1	0
	平均値(年)	0.12	0.00	0.10	0.02	0.00
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.14	0.00

表 7-9 竜巻被害幅の解析結果

(a) 検討地域②

検討地域② (±5km)	竜巻幅 の統計 (m)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	10	0	8	2	0	5	3	18
	平均値 (m)	106	NaN	124	33	NaN			
	標準偏差 (m)	128	0	144	4	0			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	9	0	8	1	0	3	3	15
	平均値 (m)	113	NaN	124	30	NaN			
	標準偏差 (m)	132	0	144	NaN	0			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	1	0	1	0	0	0	2	3
	平均値 (m)	20	NaN	20	NaN	NaN			
	標準偏差 (m)	0	0	NaN	0	0			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	44	0	36	8	0	0	0	0
	平均値 (m)	115	NaN	134	33	NaN			
	標準偏差 (m)	133	0	141	3	0			

(b) 検討地域③

検討地域③	竜巻幅 の統計 (m)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	7	2	4	1	0	5	0	12
	平均値 (m)	264	250	313	100	NaN			
	標準偏差 (m)	151	71	193	NaN	0			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	5	2	3	0	0	0	0	5
	平均値 (m)	290	250	317	NaN	NaN			
	標準偏差 (m)	160	71	236	0	0			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	2	2	0	0	0	0	0	2
	平均値 (m)	250	250	NaN	NaN	NaN			
	標準偏差 (m)	53	71	0	0	0			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	29	19	8	2	0	0	0	0
	平均値 (m)	259	253	313	100	NaN			
	標準偏差 (m)	111	51	179	0	0			

(c) 検討地域④

検討地域④ (±5km)	竜巻幅 の統計 (m)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	3	0	2	1	0	1	0	4
	平均値 (m)	162	NaN	225	35	NaN			
	標準偏差 (m)	176	0	247	NaN	0			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	2	0	2	0	0	0	0	2
	平均値 (m)	225	NaN	225	NaN	NaN			
	標準偏差 (m)	187	0	247	0	0			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均値 (m)	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN			
	標準偏差 (m)	0	0	0	0	0			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	6	0	5	1	0	0	0	0
	平均値 (m)	223	NaN	260	35	NaN			
	標準偏差 (m)	195	0	192	NaN	0			

表 7-10 竜巻被害長さの解析結果

(a) 検討地域②

検討地域② (±5km)	被害長さ の統計(km)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	12	1	8	3	0	3	3	18
	平均値(km)	1.275	0.500	1.163	1.833	NaN			
	標準偏差(km)	0.917	NaN	0.852	1.258	0.000			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	11	1	8	2	0	1	3	15
	平均値(km)	1.209	0.500	1.163	1.750	NaN			
	標準偏差(km)	0.931	NaN	0.852	1.768	0.000			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	1	0	1	0	0	0	2	3
	平均値(km)	0.700	NaN	0.700	NaN	NaN			
	標準偏差(km)	0.000	0.000	NaN	0.000	0.000			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	44	0	36	8	0	0	0	0
	平均値(km)	1.368	NaN	1.228	2.000	NaN			
	標準偏差(km)	0.905	0.000	0.824	1.035	0.000			

(b) 検討地域③

検討地域③	被害長さ の統計(km)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	7	2	4	1	0	5	0	12
	平均値(km)	2.571	2.900	2.175	3.500	NaN			
	標準偏差(km)	1.842	1.273	2.554	NaN	0.000			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	5	2	3	0	0	0	0	5
	平均値(km)	2.700	2.900	2.567	NaN	NaN			
	標準偏差(km)	2.025	1.273	2.977	0.000	0.000			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	2	2	0	0	0	0	0	2
	平均値(km)	2.900	2.900	NaN	NaN	NaN			
	標準偏差(km)	0.962	1.273	0.000	0.000	0.000			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	29	19	8	2	0	0	0	0
	平均値(km)	2.772	2.947	2.175	3.500	NaN			
	標準偏差(km)	1.451	0.923	2.364	0.000	0.000			

(c) 検討地域④

検討地域④ (±5km)	被害長さ の統計(km)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	3	0	2	1	0	1	0	4
	平均値(km)	1.233	NaN	0.850	2.000	NaN			
	標準偏差(km)	0.580	0.000	0.212	NaN	0.000			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	2	0	2	0	0	0	0	2
	平均値(km)	0.850	NaN	0.850	NaN	NaN			
	標準偏差(km)	0.160	0.000	0.212	0.000	0.000			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均値(km)	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN			
	標準偏差(km)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	6	0	5	1	0	0	0	0
	平均値(km)	1.067	NaN	0.880	2.000	NaN			
	標準偏差(km)	0.480	0.000	0.164	NaN	0.000			

表 7-11 竜巻パラメータの比較 (51.5年間の擬似データの推定結果)

(a) 検討地域②

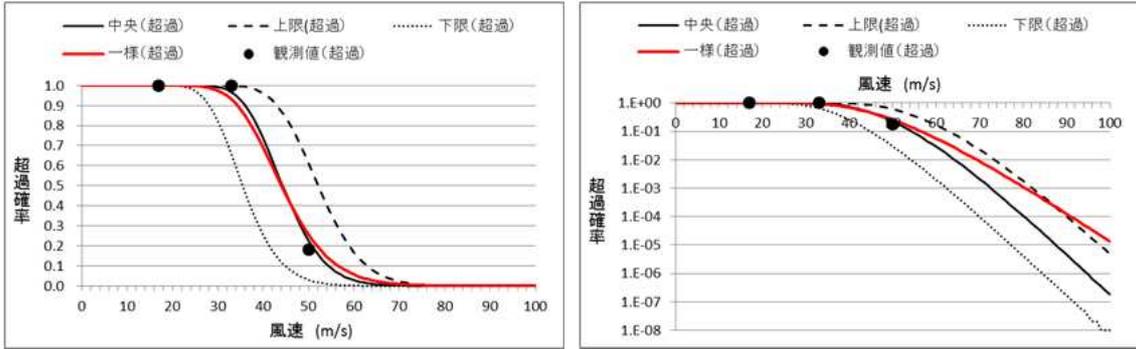
	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
検討地域② (±5 km)	発生数	期間内総数	44	0	36	8	0
		平均値(年)	0.85	0.00	0.70	0.16	0.00
		標準偏差(年)	1.05	0.00	0.98	0.36	0.00
疑似 51.5年間 (全竜巻)	被害幅	期間内総数	44	0	36	8	0
		平均値(m)	115	NaN	134	33	NaN
		標準偏差(m)	133	0	141	3	0
被害長	被害長	期間内総数	44	0	36	8	0
		平均値(km)	1.368	NaN	1.228	2.000	NaN
		標準偏差(km)	0.905	0.000	0.824	1.035	0.000

(b) 検討地域③

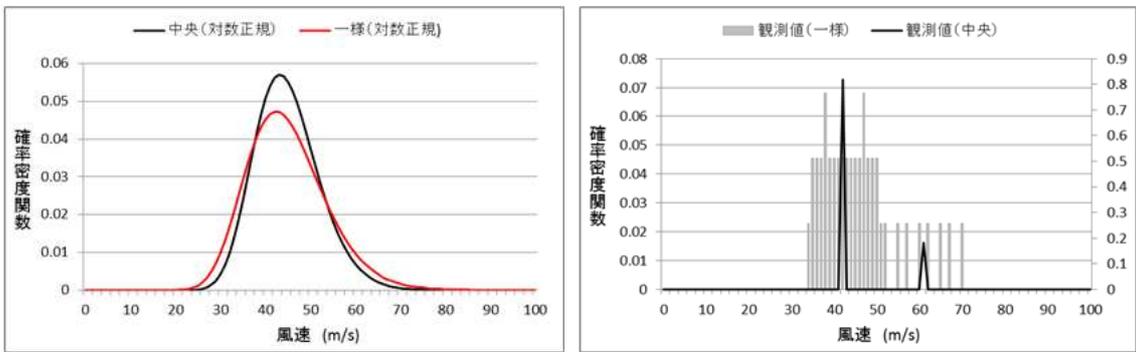
	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
検討地域③	発生数	期間内総数	29	19	8	2	0
		平均値(年)	0.56	0.37	0.16	0.04	0.00
		標準偏差(年)	0.68	0.55	0.36	0.20	0.00
疑似 51.5年間 (全竜巻)	被害幅	期間内総数	29	19	8	2	0
		平均値(m)	259	253	313	100	NaN
		標準偏差(m)	111	51	179	0	0
被害長	被害長	期間内総数	29	19	8	2	0
		平均値(km)	2.772	2.947	2.175	3.500	NaN
		標準偏差(km)	1.451	0.923	2.364	0.000	0.000

(c) 検討地域④

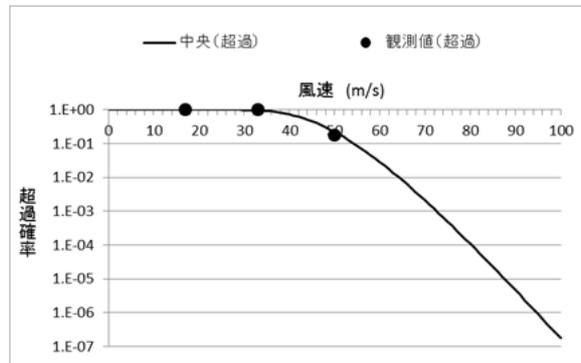
	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
検討地域④ (±5km)	発生数	期間内総数	6	0	5	1	0
		平均値(年)	0.12	0.00	0.10	0.02	0.00
		標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.14	0.00
疑似 51.5年間 (全竜巻)	被害幅	期間内総数	6	0	5	1	0
		平均値(m)	223	NaN	260	35	NaN
		標準偏差(m)	195	0	192	NaN	0
被害長	被害長	期間内総数	6	0	5	1	0
		平均値(km)	1.067	NaN	0.880	2.000	NaN
		標準偏差(km)	0.480	0.000	0.164	NaN	0.000



(a) 超過確率

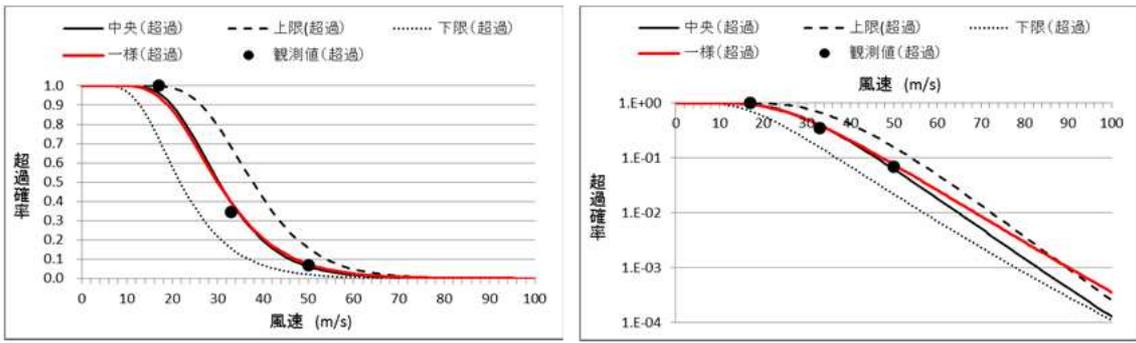


(b) 中央地と一様分布の場合の確率密度関数推定値 (左), 観測地 (右)

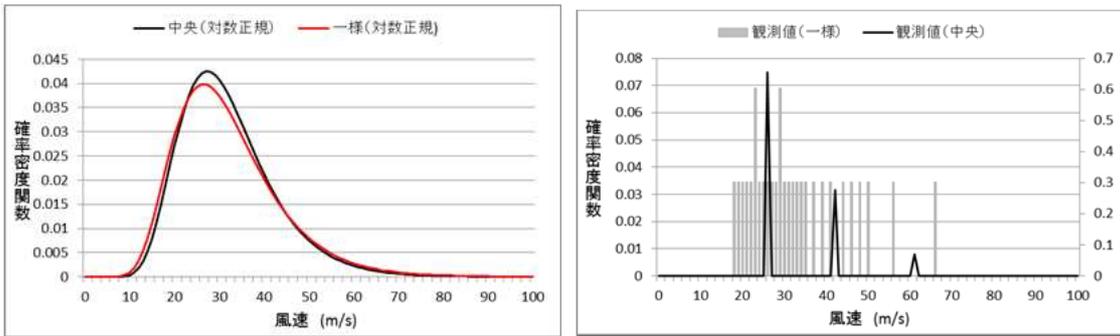


(c) 採用した風速分布 (中央集中型)

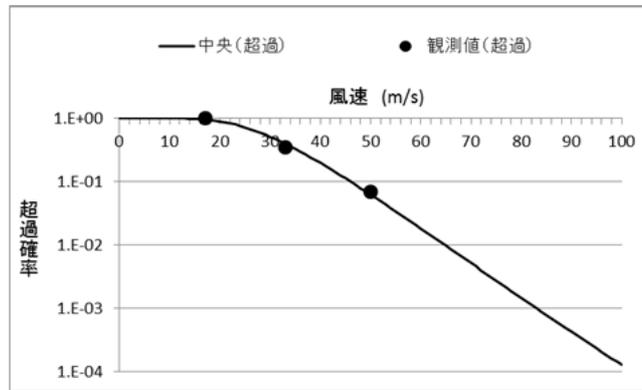
図 7-6 竜巻風速の確率分布と観測値との比較 (検討地域②)



(a) 超過確率

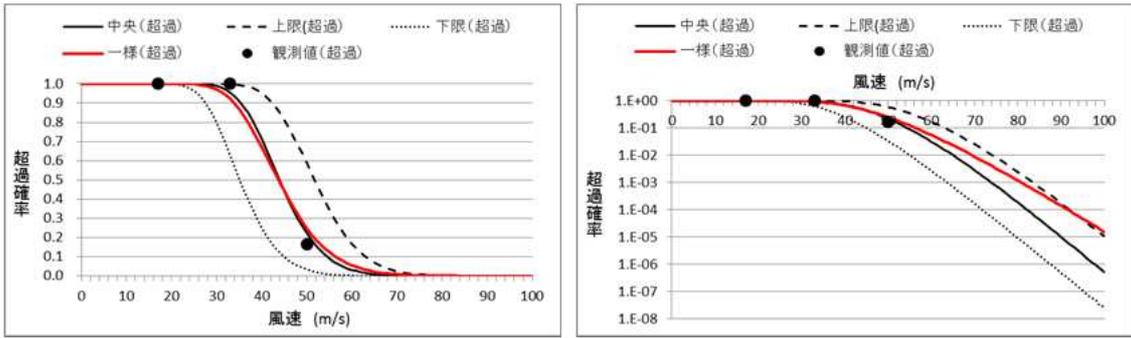


(b) 中央地と一樣分布の場合の確率密度関数推定値 (左), 観測地 (右)

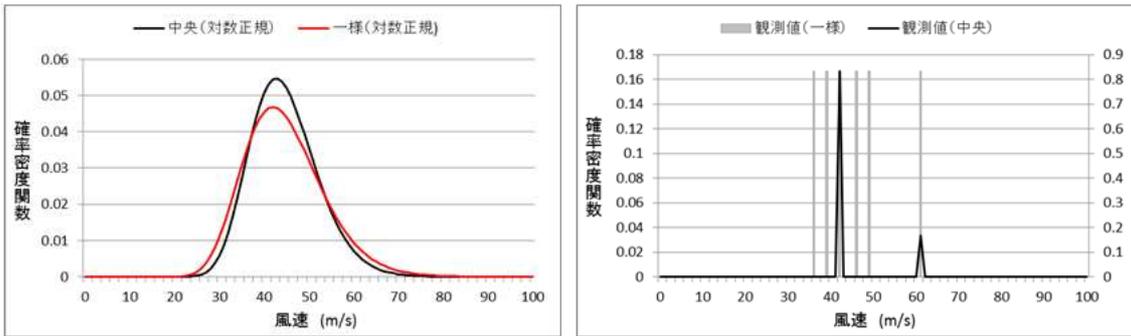


(c) 採用した風速分布 (中央集中型)

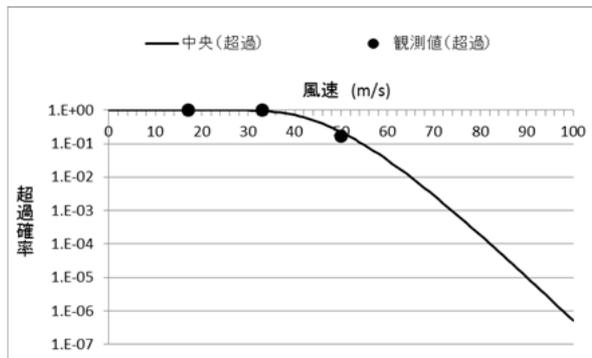
図 7-7 竜巻風速の確率分布と観測値との比較 (検討地域③)



(a) 超過確率

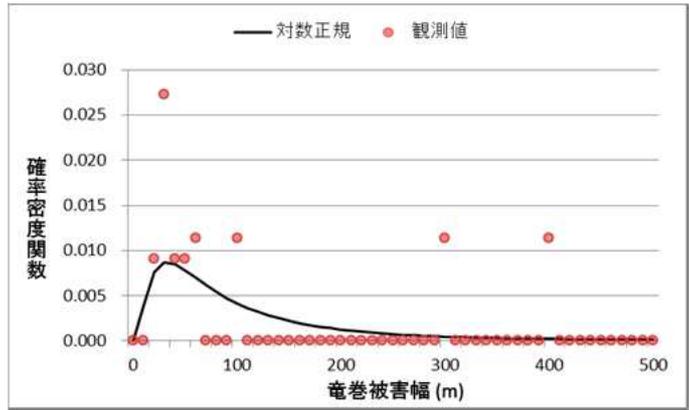


(b) 中央地と一様分布の場合の確率密度関数推定値 (左), 観測地 (右)

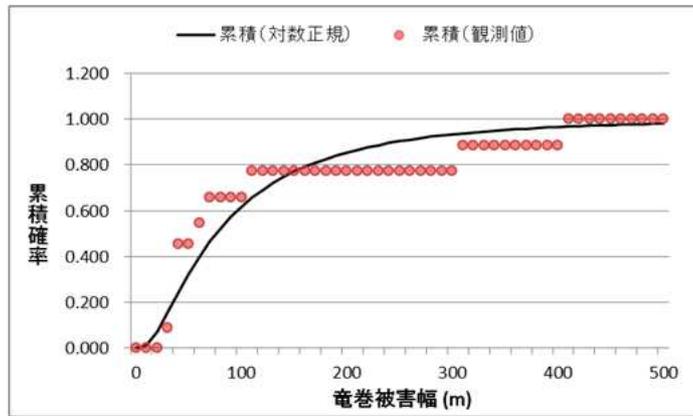


(c) 採用した風速分布 (中央集中型)

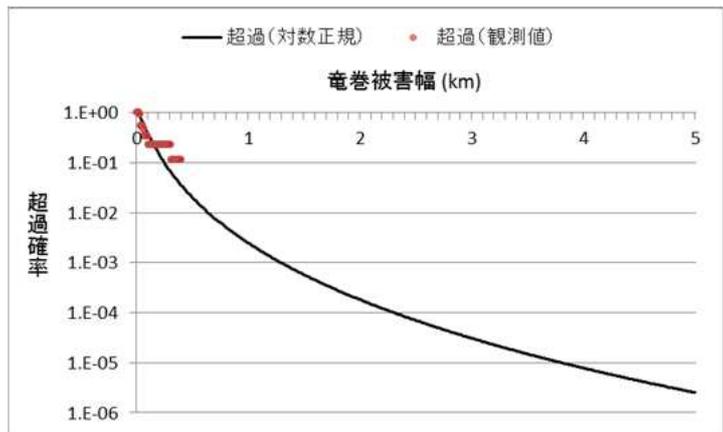
図 7-8 竜巻風速の確率分布と観測値との比較 (検討地域④)



(a) 確率関数

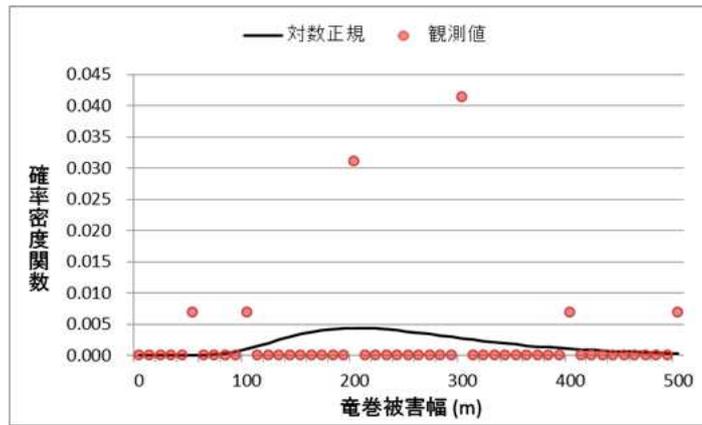


(b) 累積確率

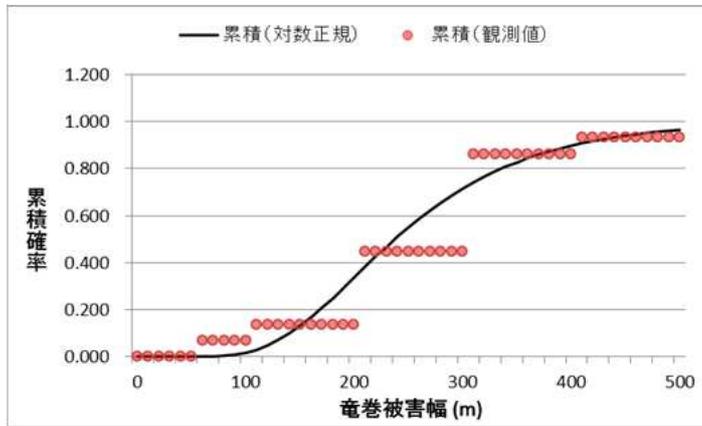


(c) 超過確率

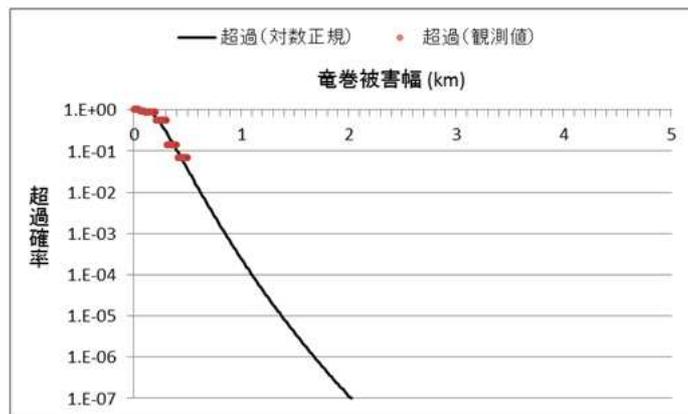
図 7-9 竜巻被害幅の確率分布の推定結果と観測値との比較 (検討地域②)



(a) 確率関数

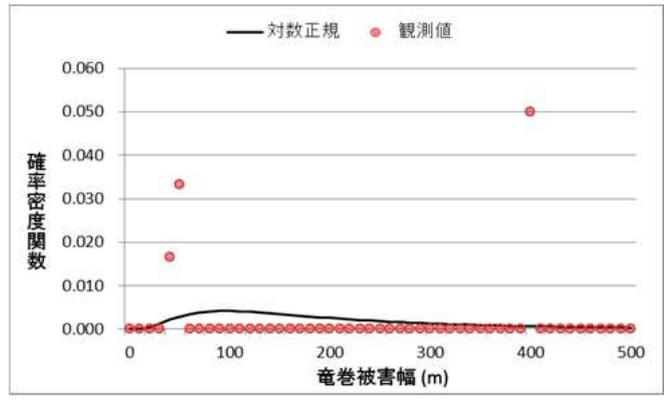


(b) 累積確率

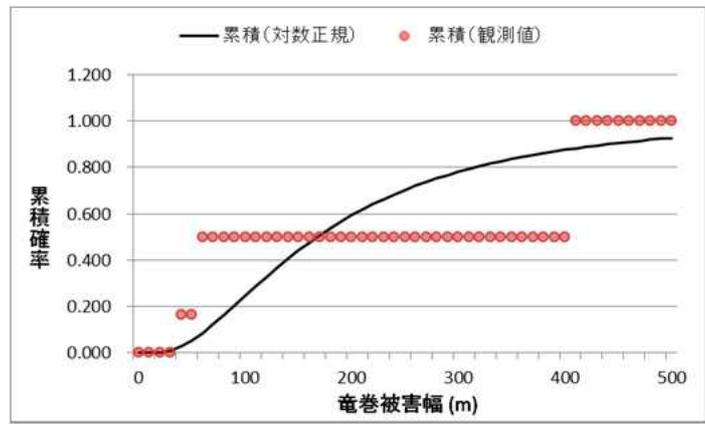


(c) 超過確率

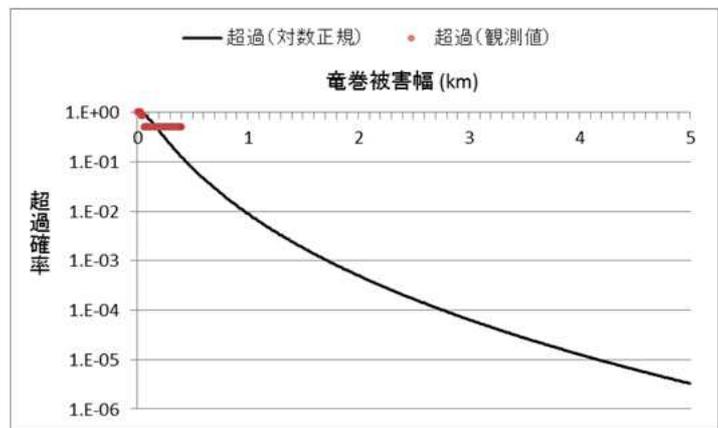
図 7-10 竜巻被害幅の確率分布の推定結果と観測値との比較 (検討地域③)



(a) 確率関数

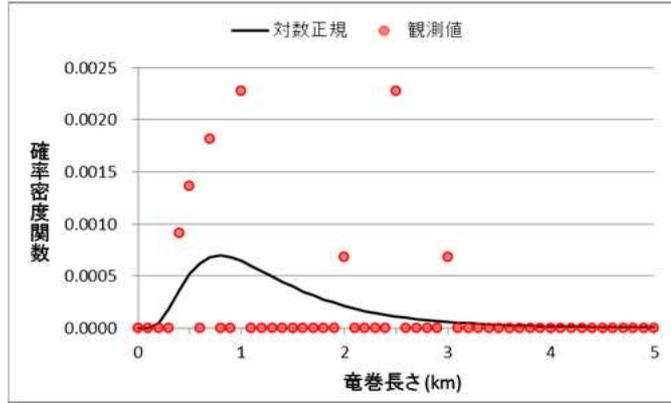


(b) 累積確率

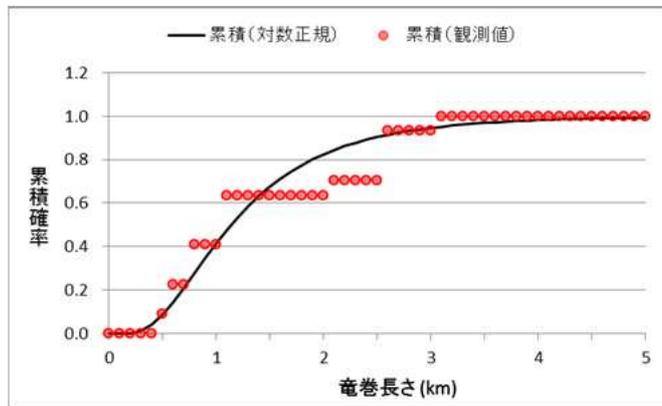


(c) 超過確率

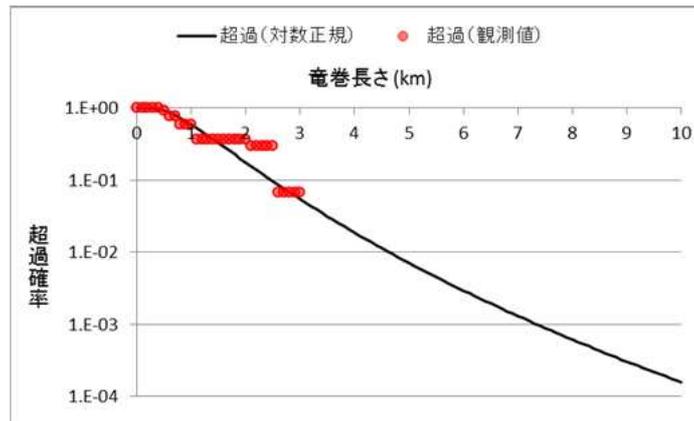
図 7-11 竜巻被害幅の確率分布の推定結果と観測値との比較 (検討地域④)



(a) 確率分布

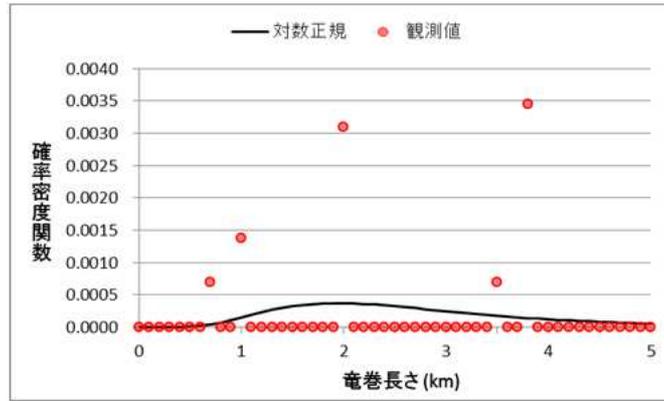


(b) 累積確率

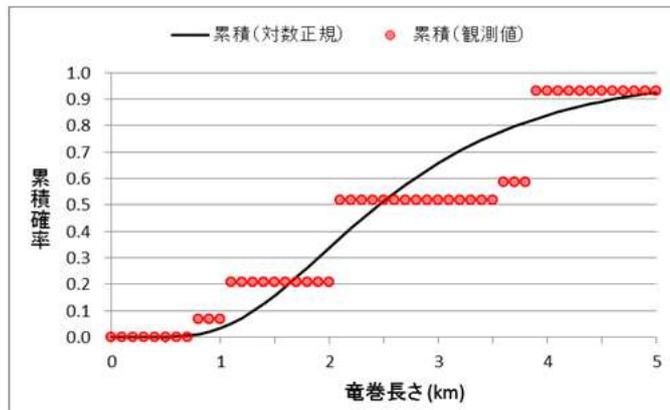


(c) 超過確率

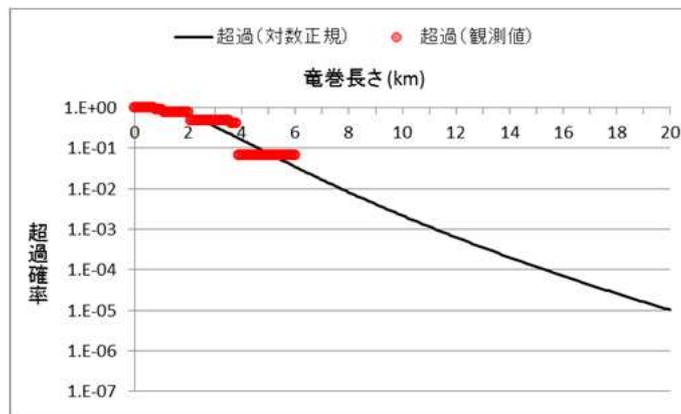
図 7-12 竜巻被害長さの確率分布の推定結果と観測値との比較 (検討地域②)



(a) 確率分布

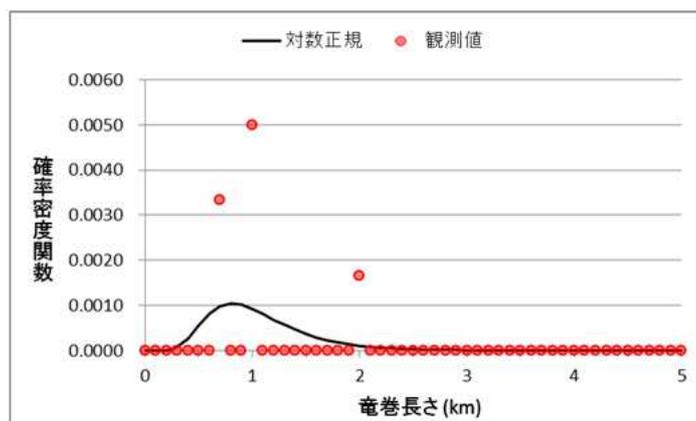


(b) 累積確率

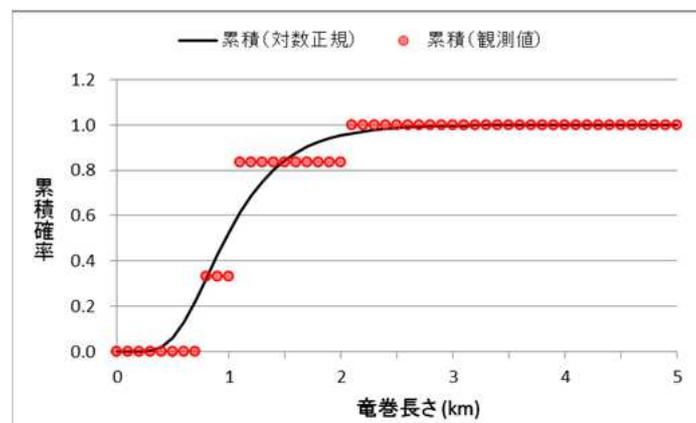


(c) 超過確率

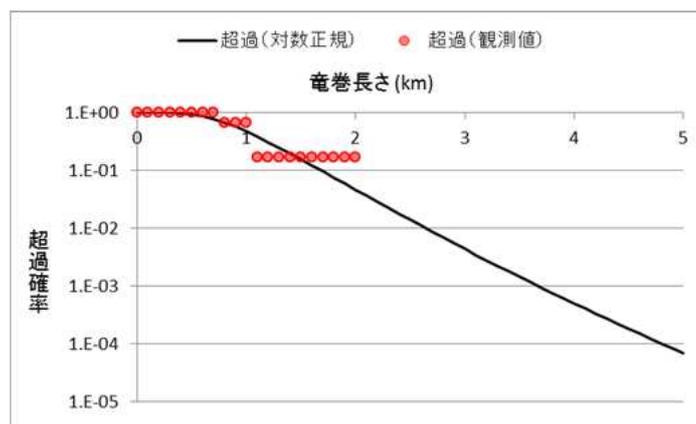
図 7-13 蛇巻被害長さの確率分布の推定結果と観測値との比較 (検討地域③)



(a) 確率分布



(b) 累積確率



(c) 超過確率

図 7-14 竜巻被害長さの確率分布の推定結果と観測値との比較 (検討地域④)

表 7-12 竜巻発生数の解析結果 (1km 短冊)

(a-1) 検討地域② (陸 0-1km)

検討地域② (陸側 0-1 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	11	0	7	4	0	1	0	12
	平均値(年)	0.21	0.00	0.14	0.08	0.00	0.02	0.00	0.23
	標準偏差(年)	0.46	0.00	0.35	0.27	0.00	0.14	0.00	0.51
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	8	0	6	2	0	1	0	9
	平均値(年)	0.37	0.00	0.28	0.09	0.00	0.05	0.00	0.42
	標準偏差(年)	0.59	0.00	0.46	0.30	0.00	0.22	0.00	0.67
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	1	0	1	0	0	0	0	1
	平均値(年)	0.18	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18
	標準偏差(年)	0.43	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	19	0	15	4	0	0	0	19
	平均値(年)	0.36	0.00	0.28	0.08	0.00	0.00	0.00	0.36
	標準偏差(年)	0.53	0.00	0.46	0.27	0.00	0.00	0.00	0.53
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	19	0	15	4	0	0	0	0
	平均値(年)	0.36	0.00	0.28	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.53	0.00	0.46	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00

(a-2) 検討地域② (陸 1-2km)

検討地域② (陸側 1-2 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	7	1	4	2	0	0	0	7
	平均値(年)	0.14	0.02	0.08	0.04	0.00	0.00	0.00	0.14
	標準偏差(年)	0.40	0.14	0.34	0.20	0.00	0.00	0.00	0.40
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	6	1	4	1	0	0	0	6
	平均値(年)	0.28	0.05	0.19	0.05	0.00	0.00	0.00	0.28
	標準偏差(年)	0.56	0.22	0.51	0.22	0.00	0.00	0.00	0.56
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均値(年)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	12	0	10	2	0	0	0	12
	平均値(年)	0.22	0.00	0.19	0.04	0.00	0.00	0.00	0.22
	標準偏差(年)	0.54	0.00	0.51	0.20	0.00	0.00	0.00	0.54
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	12	0	10	2	0	0	0	0
	平均値(年)	0.22	0.00	0.19	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.54	0.00	0.51	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00

## (a-3) 検討地域② (海 0-1km)

検討地域② (海側 0-1km)	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	7	0	5	2	0	1	2	10
	平均値(年)	0.14	0.00	0.10	0.04	0.00	0.02	0.04	0.19
	標準偏差(年)	0.40	0.00	0.30	0.20	0.00	0.14	0.20	0.49
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	7	0	5	2	0	1	2	10
	平均値(年)	0.33	0.00	0.23	0.09	0.00	0.05	0.09	0.47
	標準偏差(年)	0.57	0.00	0.43	0.30	0.00	0.22	0.30	0.68
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	1	0	1	0	0	0	1	2
	平均値(年)	0.18	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.18	0.36
	標準偏差(年)	0.43	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00	0.43	0.55
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	14	0	12	2	0	0	10	24
	平均値(年)	0.27	0.00	0.23	0.04	0.00	0.00	0.18	0.45
	標準偏差(年)	0.48	0.00	0.43	0.20	0.00	0.00	0.43	0.64
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	25	0	21	4	0	0	0	0
	平均値(年)	0.47	0.00	0.40	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.62	0.00	0.57	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00

## (b) 検討地域④ (陸 0-1km)

検討地域④ (陸 0-1km)	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	4	0	3	1	0	0	0	4
	平均値(年)	0.08	0.00	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.08
	標準偏差(年)	0.27	0.00	0.24	0.14	0.00	0.00	0.00	0.27
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	2	0	2	0	0	0	0	2
	平均値(年)	0.09	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均値(年)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	6	0	5	1	0	0	0	6
	平均値(年)	0.11	0.00	0.09	0.02	0.00	0.00	0.00	0.11
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.14	0.00	0.00	0.00	0.30
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	6	0	5	1	0	0	0	0
	平均値(年)	0.11	0.00	0.09	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00

表 7-13 竜巻発生数の推計結果（擬似 51.5 年）

(a-1) 検討地域②（陸 0-1km）

疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	19	0	15	4	0
	平均値(年)	0.37	0.00	0.29	0.08	0.00
	標準偏差(年)	0.53	0.00	0.46	0.27	0.00

(a-2) 検討地域②（陸 1-2km）

疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	12	0	10	2	0
	平均値(年)	0.23	0.00	0.19	0.04	0.00
	標準偏差(年)	0.54	0.00	0.51	0.20	0.00

(a-3) 検討地域②（海 0-1km）

疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	25	0	21	4	0
	平均値(年)	0.49	0.00	0.41	0.08	0.00
	標準偏差(年)	0.62	0.00	0.57	0.26	0.00

(b) 検討地域④（陸 0-1km）

疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	6	0	5	1	0
	平均値(年)	0.12	0.00	0.10	0.02	0.00
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.14	0.00

表 7-14 竜巻被害幅の解析結果  
(a-1) 検討地域② (陸 0-1km)

検討地域② (陸側 0-1 km)	竜巻幅 の統計 (m)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	8	0	6	2	0	4	0	12
	平均値 (m)	124	NaN	155	33	NaN			
	標準偏差 (m)	137	0	156	4	0			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	7	0	6	1	0	2	0	9
	平均値 (m)	137	NaN	155	30	NaN			
	標準偏差 (m)	142	0	156	NaN	0			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	1	0	1	0	0	0	0	1
	平均値 (m)	20	NaN	20	NaN	NaN			
	標準偏差 (m)	0	0	NaN	0	0			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	19	0	15	4	0	0	0	0
	平均値 (m)	147	NaN	177	33	NaN			
	標準偏差 (m)	147	0	151	3	0			

(a-2) 検討地域② (陸 1-2km)

検討地域② (陸側 1-2 km)	竜巻幅 の統計 (m)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	6	0	4	2	0	1	0	7
	平均値 (m)	91	NaN	120	33	NaN			
	標準偏差 (m)	99	0	124	4	0			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	5	0	4	1	0	1	0	6
	平均値 (m)	102	NaN	120	30	NaN			
	標準偏差 (m)	105	0	124	NaN	0			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均値 (m)	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN			
	標準偏差 (m)	0	0	0	0	0			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	12	0	10	2	0	0	0	0
	平均値 (m)	119	NaN	136	33	NaN			
	標準偏差 (m)	113	0	116	4	0			

(a-3) 検討地域② (海 0-1km)

検討地域② (海側 0-1 km)	竜巻幅 の統計 (m)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	6	0	5	1	0	2	2	10
	平均値 (m)	110	NaN	126	30	NaN			
	標準偏差 (m)	135	0	156	NaN	0			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	6	0	5	1	0	2	2	10
	平均値 (m)	110	NaN	126	30	NaN			
	標準偏差 (m)	135	0	156	NaN	0			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	1	0	1	0	0	0	1	2
	平均値 (m)	20	NaN	20	NaN	NaN			
	標準偏差 (m)	0	0	NaN	0	0			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	25	0	21	4	0	0	0	0
	平均値 (m)	122	NaN	139	30	NaN			
	標準偏差 (m)	144	0	152	0	0			

(b) 検討地域④ (陸 0-1km)

検討地域④ (陸 0-1km)	竜巻幅 の統計 (m)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	3	0	2	1	0	1	0	4
	平均値 (m)	162	NaN	225	35	NaN			
	標準偏差 (m)	176	0	247	NaN	0			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	2	0	2	0	0	0	0	2
	平均値 (m)	225	NaN	225	NaN	NaN			
	標準偏差 (m)	187	0	247	0	0			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均値 (m)	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN			
	標準偏差 (m)	0	0	0	0	0			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	6	0	5	1	0	0	0	0
	平均値 (m)	223	NaN	260	35	NaN			
	標準偏差 (m)	195	0	192	NaN	0			

表 7-15 竜巻被害長さの解析結果  
(a-1) 検討地域② (陸 0-1km)

検討地域② (陸側 0-1 km)	被害長さ の統計(km)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	9	0	6	3	0	3	0	12
	平均値 (km)	0.847	NaN	0.860	0.820	NaN			
	標準偏差 (km)	0.241	0.000	0.262	0.284	0.000			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	8	0	6	2	0	1	0	9
	平均値 (km)	0.834	NaN	0.860	0.756	NaN			
	標準偏差 (km)	0.253	0.000	0.262	0.368	0.000			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	1	0	1	0	0	0	0	1
	平均値 (km)	1.351	NaN	1.351	NaN	NaN			
	標準偏差 (km)	0.000	0.000	NaN	0.000	0.000			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	19	0	15	4	0	0	0	0
	平均値 (km)	0.889	NaN	0.894	0.869	NaN			
	標準偏差 (km)	0.248	0.000	0.256	0.251	0.000			

(a-2) 検討地域② (陸 1-2km)

検討地域② (陸側 1-2 km)	被害長さ の統計(km)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	7	1	4	2	0	0	0	7
	平均値 (km)	0.644	0.413	0.669	0.708	NaN			
	標準偏差 (km)	0.403	NaN	0.495	0.543	0.000			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	6	1	4	1	0	0	0	6
	平均値 (km)	0.697	0.413	0.669	1.092	NaN			
	標準偏差 (km)	0.412	NaN	0.495	NaN	0.000			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均値 (km)	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN			
	標準偏差 (km)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	12	0	10	2	0	0	0	0
	平均値 (km)	0.741	NaN	0.748	0.708	NaN			
	標準偏差 (km)	0.430	0.000	0.440	0.543	0.000			

(a-3) 検討地域② (海 0-1km)

検討地域② (海側 0-1 km)	被害長さ の統計(km)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	0	0	0	0	0	8	2	10
	平均値 (km)	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN			
	標準偏差 (km)	0	0	0	0	0			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	0	0	0	0	0	8	2	10
	平均値 (km)	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN			
	標準偏差 (km)	0	0	0	0	0			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	0	0	0	0	0	1	1	2
	平均値 (km)	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN			
	標準偏差 (km)	0	0	0	0	0			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	25	0	21	4	0	0	0	0
	平均値 (km)	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN			
	標準偏差 (km)	0	0	0	0	0			

## (b) 検討地域④

検討地域④ (陸 0-1km)	被害長さ の統計(km)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	3	0	2	1	0	1	0	4
	平均値(km)	0.794	NaN	0.716	0.950	NaN			
	標準偏差(km)	0.136	0.000	0.120	NaN	0.000			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	2	0	2	0	0	0	0	2
	平均値(km)	0.716	NaN	0.716	NaN	NaN			
	標準偏差(km)	0.091	0.000	0.120	0.000	0.000			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均値(km)	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN			
	標準偏差(km)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	6	0	5	1	0	0	0	0
	平均値(km)	0.769	NaN	0.733	0.950	NaN			
	標準偏差(km)	0.122	0.000	0.093	NaN	0.000			

表 7-16 竜巻パラメータの比較 (51.5年間の擬似データの推定結果)  
(a-1) 検討地域②

	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
検討地域② (陸側 0-1 km)	発生数	期間内総数	19	0	15	4	0
		平均値(年)	0.37	0.00	0.29	0.08	0.00
		標準偏差(年)	0.53	0.00	0.46	0.27	0.00
疑似 51.5年間 (全竜巻)	被害幅	期間内総数	19	0	15	4	0
		平均値(m)	147	NaN	177	33	NaN
		標準偏差(m)	147	0	151	3	0
被害長	期間内総数	19	0	15	4	0	
	平均値(km)	0.889	NaN	0.894	0.869	NaN	
	標準偏差(km)	0.248	0.000	0.256	0.251	0.000	

(a-2) 検討地域② (陸 1-2km)

	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
検討地域② (陸側 1-2 km)	発生数	期間内総数	12	0	10	2	0
		平均値(年)	0.23	0.00	0.19	0.04	0.00
		標準偏差(年)	0.54	0.00	0.51	0.20	0.00
疑似 51.5年間 (全竜巻)	被害幅	期間内総数	12	0	10	2	0
		平均値(m)	119	NaN	136	33	NaN
		標準偏差(m)	113	0	116	4	0
被害長	期間内総数	12	0	10	2	0	
	平均値(km)	0.741	NaN	0.748	0.708	NaN	
	標準偏差(km)	0.430	0.000	0.440	0.543	0.000	

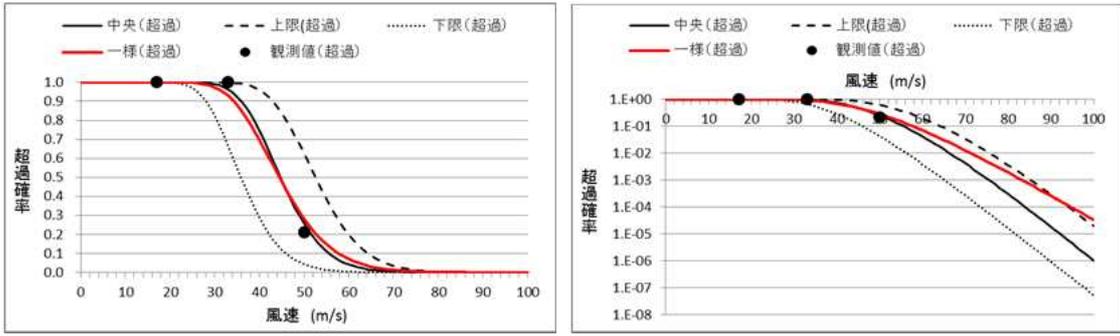
(a-3) 検討地域② (海 0-1km)

	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
検討地域② (海側 0-1 km)	発生数	期間内総数	25	0	21	4	0
		平均値(年)	0.49	0.00	0.41	0.08	0.00
		標準偏差(年)	0.62	0.00	0.57	0.26	0.00
疑似 51.5年間 (全竜巻)	被害幅	期間内総数	25	0	21	4	0
		平均値(m)	122	NaN	139	30	NaN
		標準偏差(m)	144	0	152	0	0

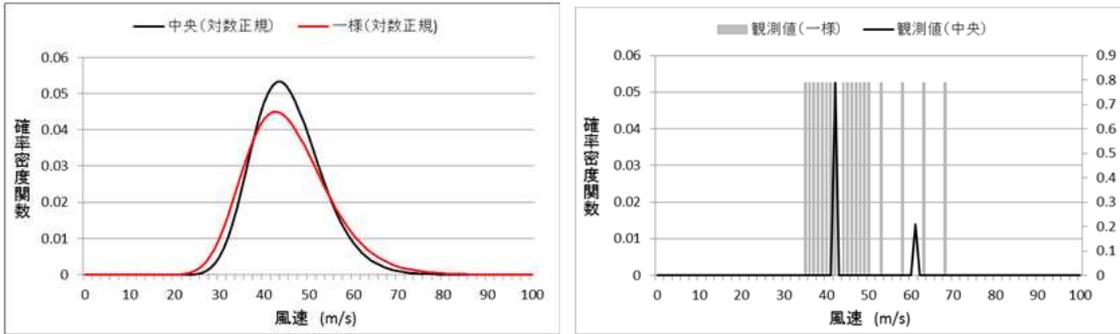
被害長さは算定できないため、全国の陸側 0-1km の値を代用

## (b) 検討地域④

パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール				
			F0	F1	F2	F3	
検討地域④ (陸 0-1km)	発生数	期間内総数	6	0	5	1	0
		平均値(年)	0.12	0.00	0.10	0.02	0.00
		標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.14	0.00
疑似 51.5年間 (全竜巻)	被害幅	期間内総数	6	0	5	1	0
		平均値(m)	223	NaN	260	35	NaN
		標準偏差(m)	195	0	192	NaN	0
	被害長	期間内総数	6	0	5	1	0
		平均値(km)	0.769	NaN	0.733	0.950	NaN
		標準偏差(km)	0.122	0.000	0.093	NaN	0.000



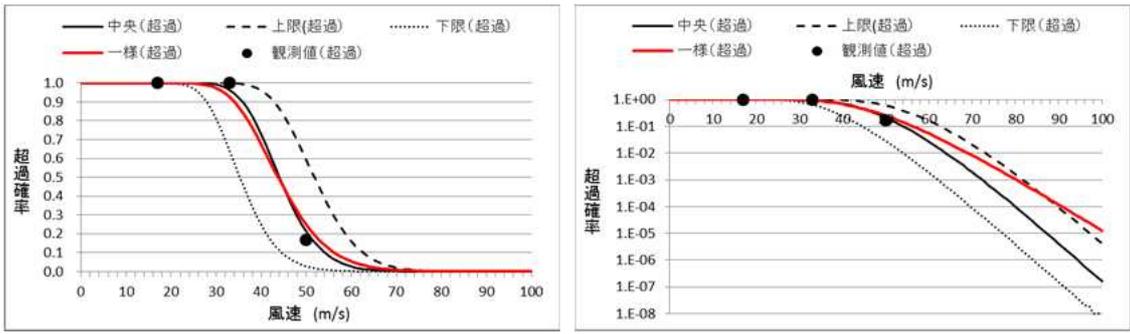
(a) 超過確率



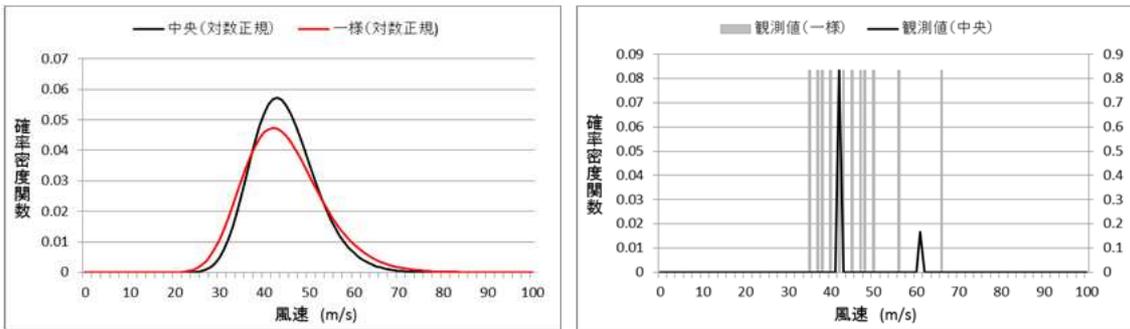
(b) 中央地と一様分布の場合の確率密度関数推定値 (左), 観測地 (右)

(c) 採用した風速分布 (中央集中型)

図 7-15 竜巻風速の確率分布と観測値との比較(検討地域②, 陸 0-1km)



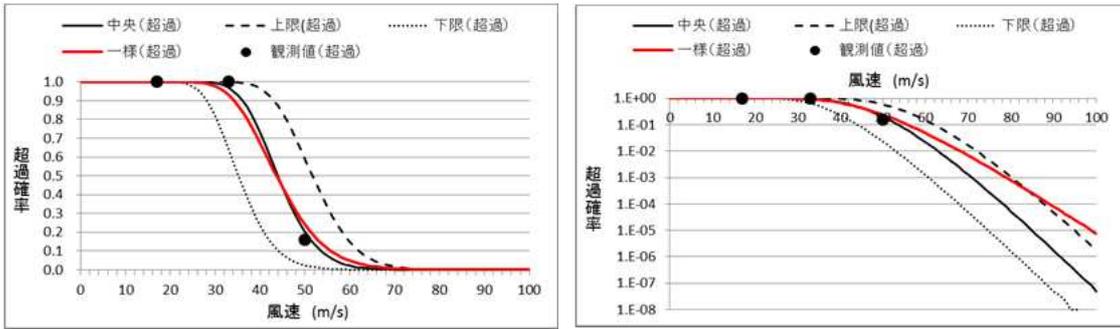
(a) 超過確率



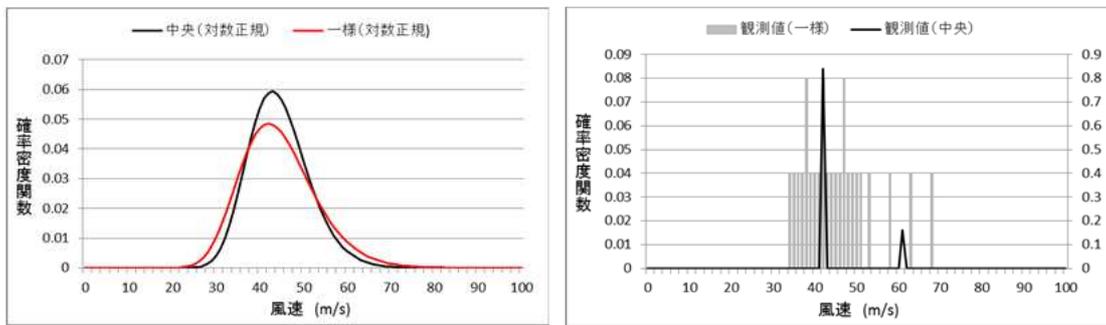
(b) 中央地と一様分布の場合の確率密度関数推定値 (左), 観測地 (右)

(c) 採用した風速分布 (中央集中型)

図 7-16 竜巻風速の確率分布と観測値との比較(検討地域②, 陸 1-2km)



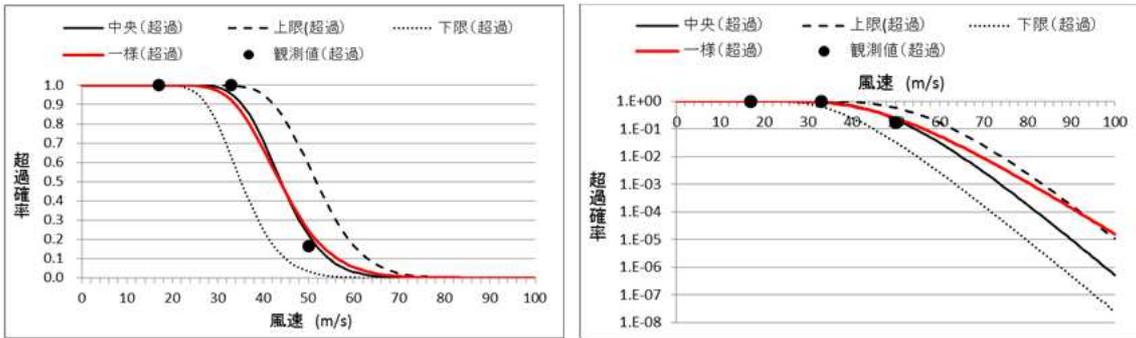
(a) 超過確率



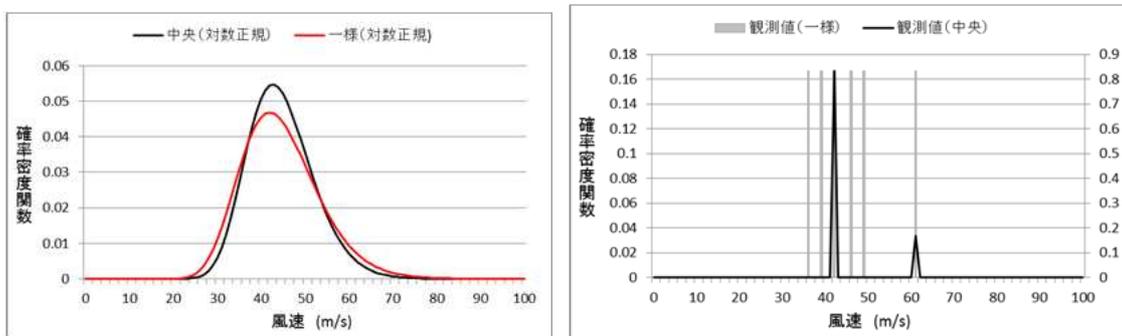
(b) 中央地と一様分布の場合の確率密度関数推定値 (左), 観測地 (右)

(c) 採用した風速分布 (中央集中型)

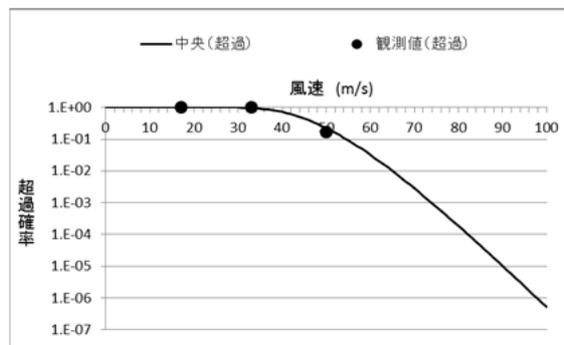
図 7-17 竜巻風速の確率分布と観測値との比較(検討地域②, 海 0-1km)



(a) 超過確率

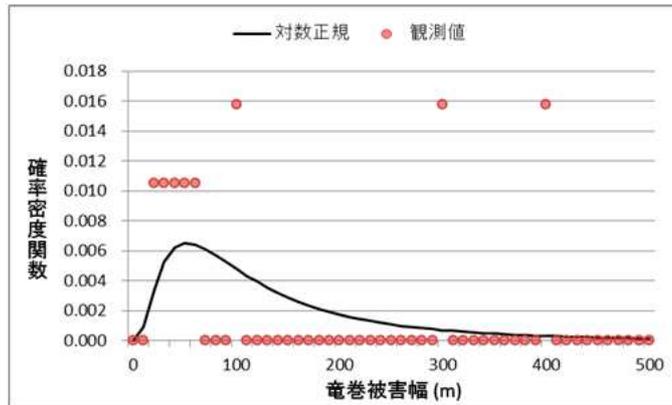


(b) 中央地と一樣分布の場合の確率密度関数推定値 (左), 観測地 (右)

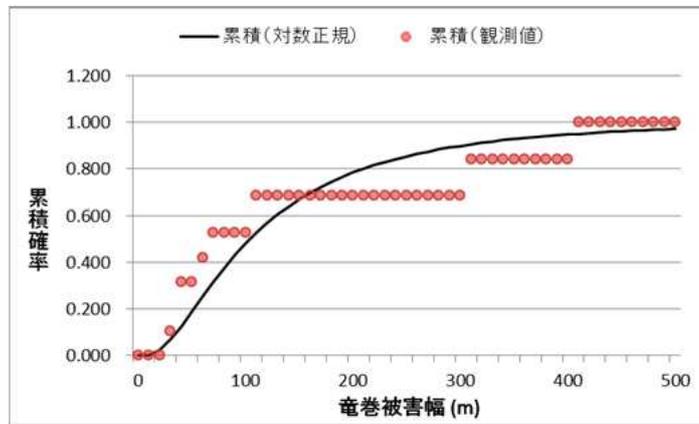


(c) 採用した風速分布 (中央集中型)

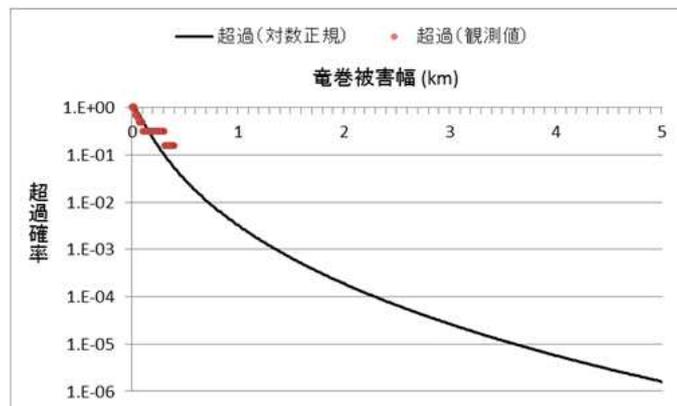
図 7-18 竜巻風速の確率分布と観測値との比較(検討地域④, 陸 0-1km)



(a) 確率関数

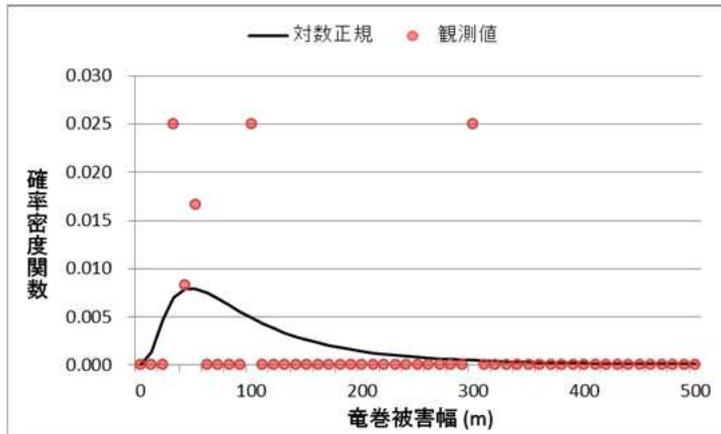


(b) 累積確率

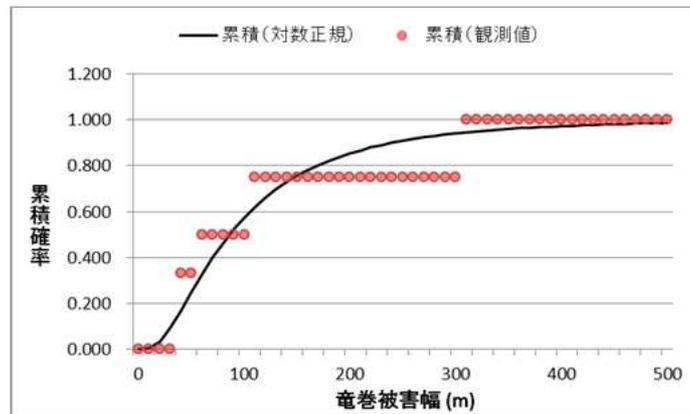


(c) 超過確率

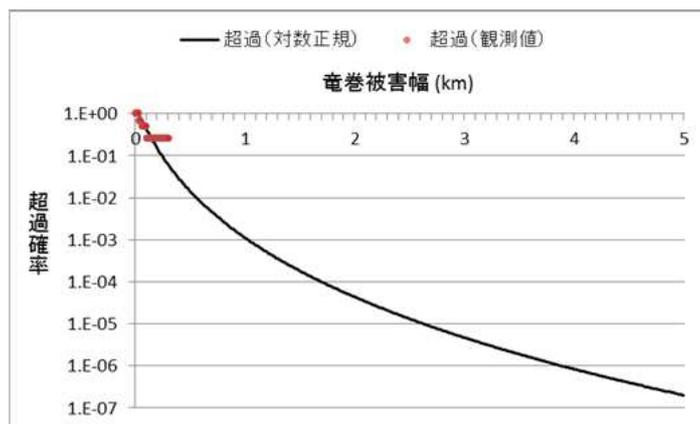
図 7-19 竜巻被害幅の確率分布の推定結果と観測値との比較  
(検討地域②, 陸 0-1km)



(a) 確率関数

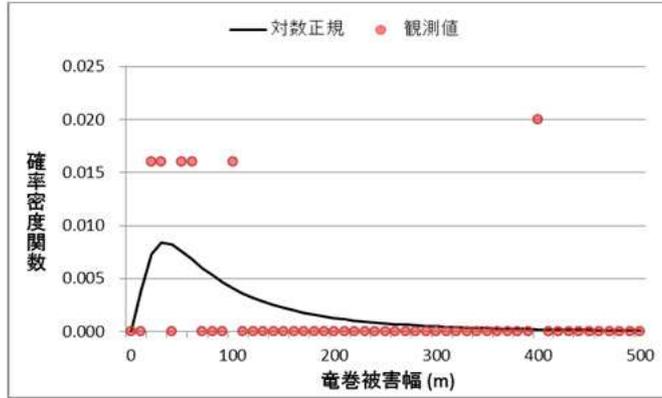


(b) 累積確率

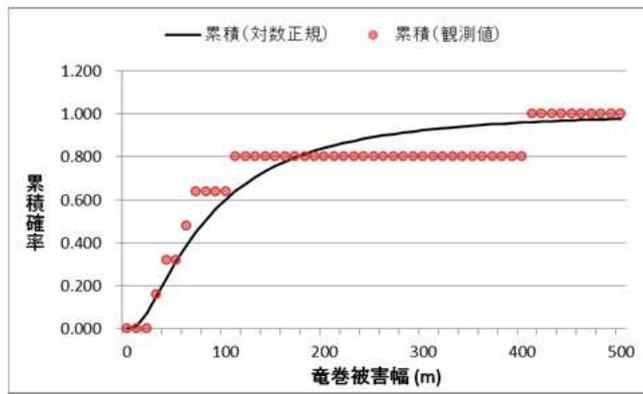


(c) 超過確率

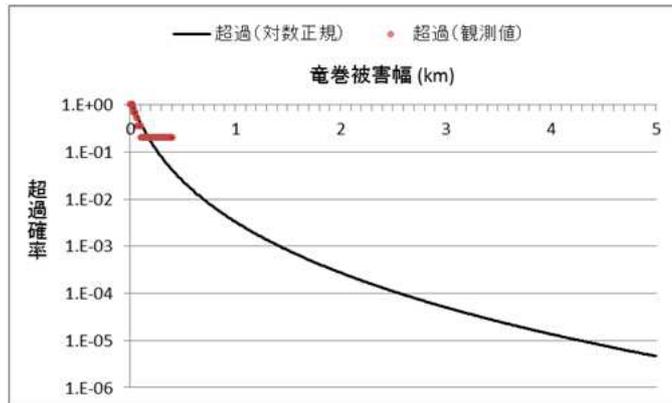
図 7-20 竜巻被害幅の確率分布の推定結果と観測値との比較  
(検討地域②, 陸 1-2km)



(a) 確率関数

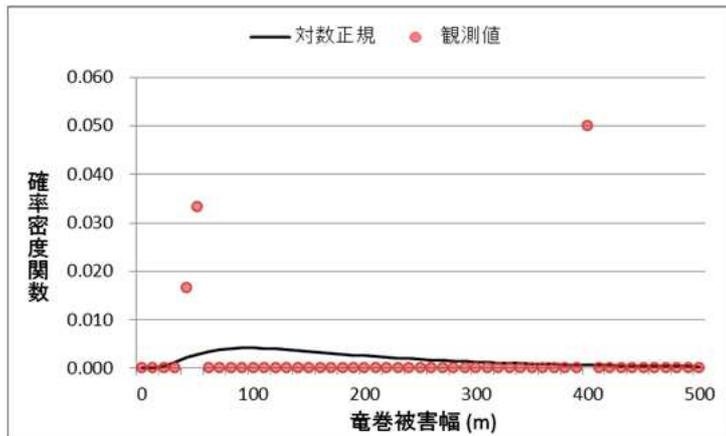


(b) 累積確率

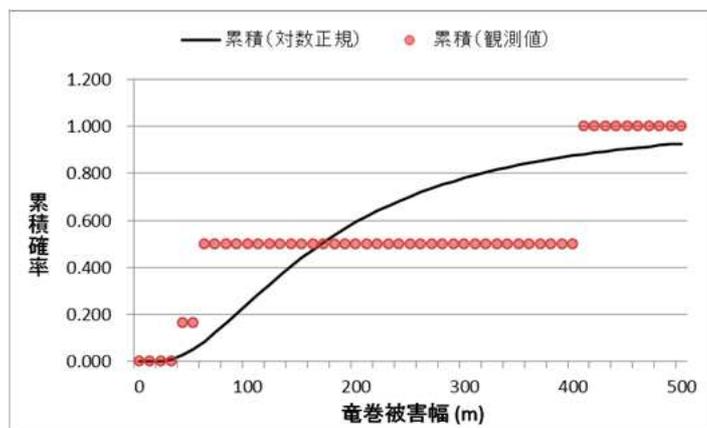


(c) 超過確率

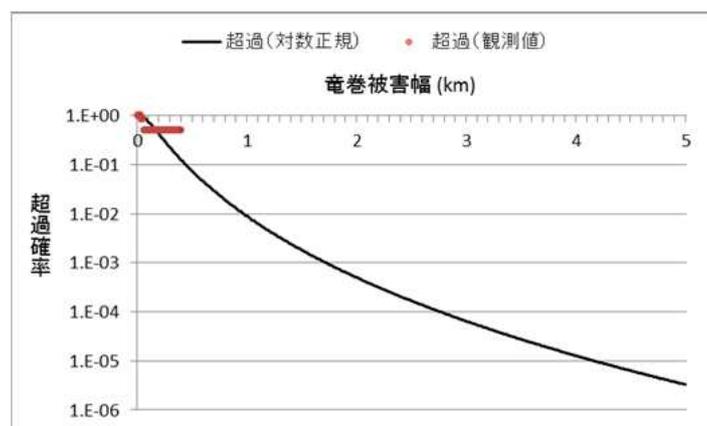
図 7-21 電巻被害幅の確率分布の推定結果と観測値との比較  
(検討地域②, 海 0-1km)



(a) 確率関数

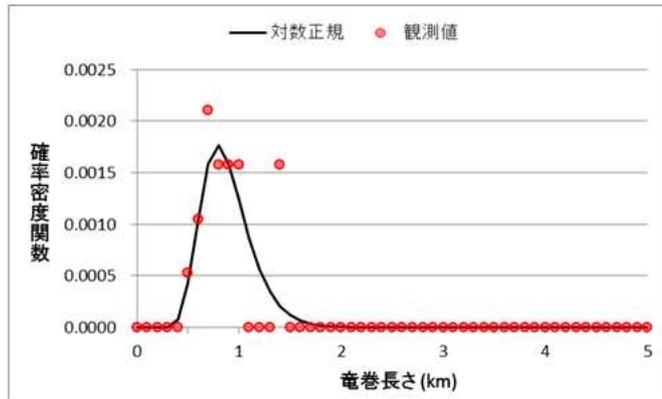


(b) 累積確率

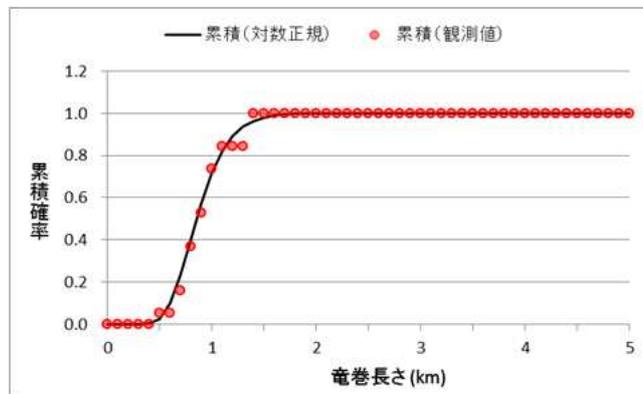


(c) 超過確率

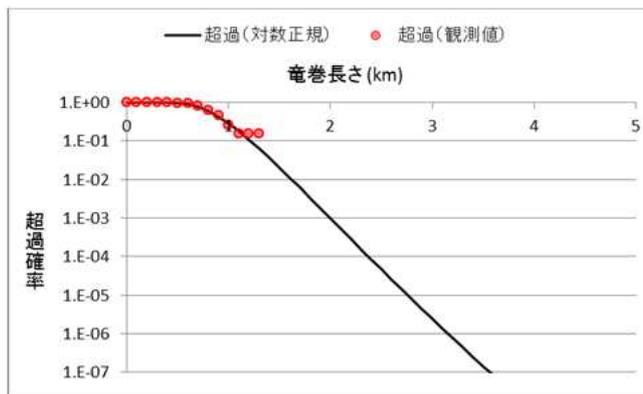
図 7-22 竜巻被害幅の確率分布の推定結果と観測値との比較  
(検討地域④, 陸 0-1km)



(a) 確率分布

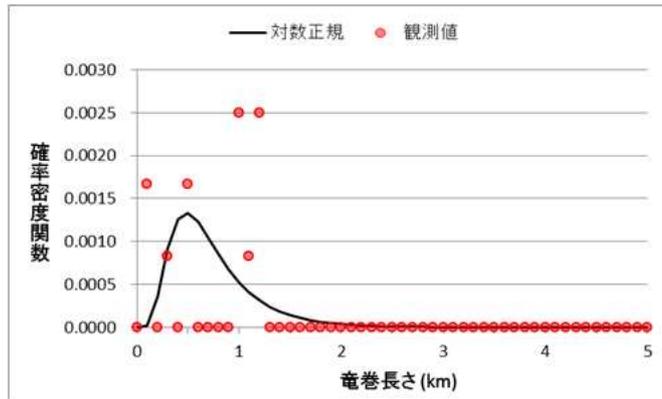


(b) 累積確率

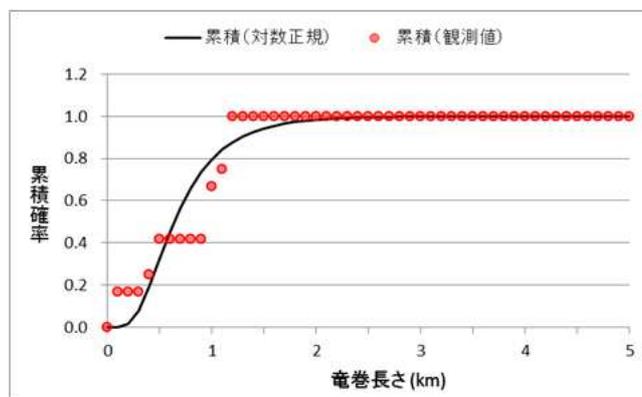


(c) 超過確率

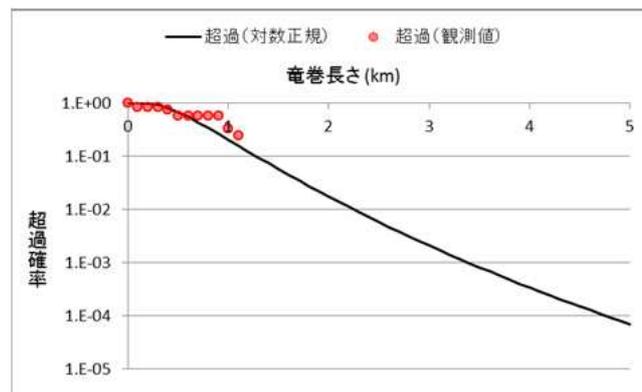
図 7-23 竜巻被害長さの確率分布の推定結果と観測値との比較  
(検討地域②, 陸 0-1km)



(a) 確率分布

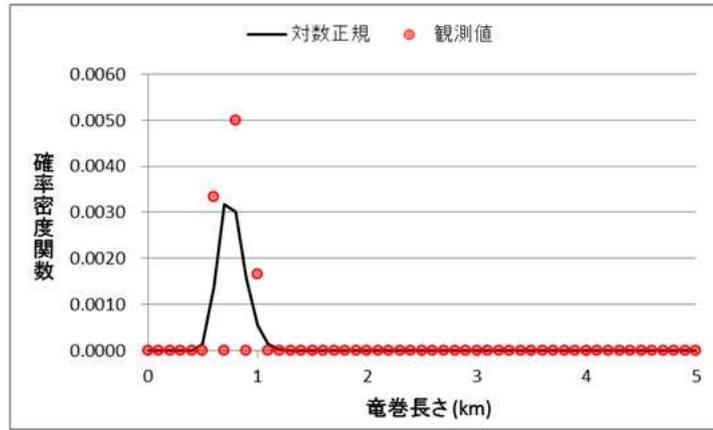


(b) 累積確率

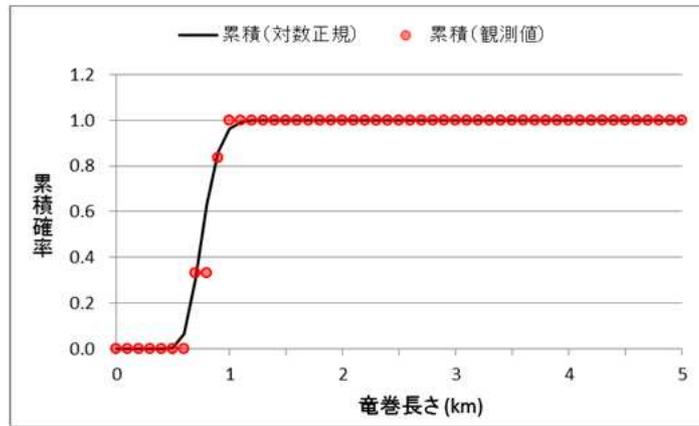


(c) 超過確率

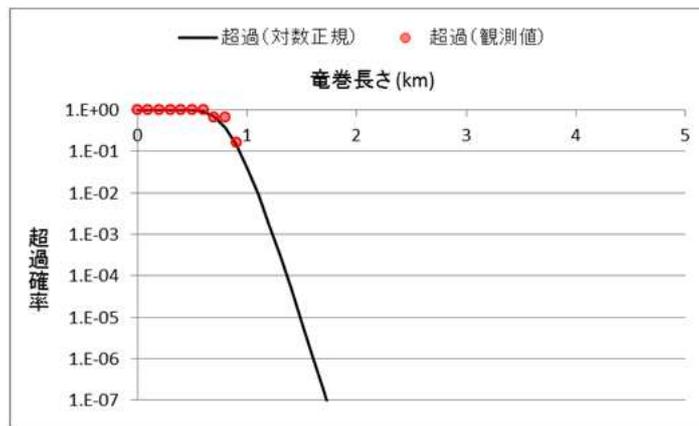
図 7-24 竜巻被害長さの確率分布の推定結果と観測値との比較  
(検討地域②, 陸 1-2km)



(a) 確率分布



(b) 累積確率



(c) 超過確率

図 7-25 雹巻被害長さの確率分布の推定結果と観測値との比較 (検討地域④, 陸 0-1km)

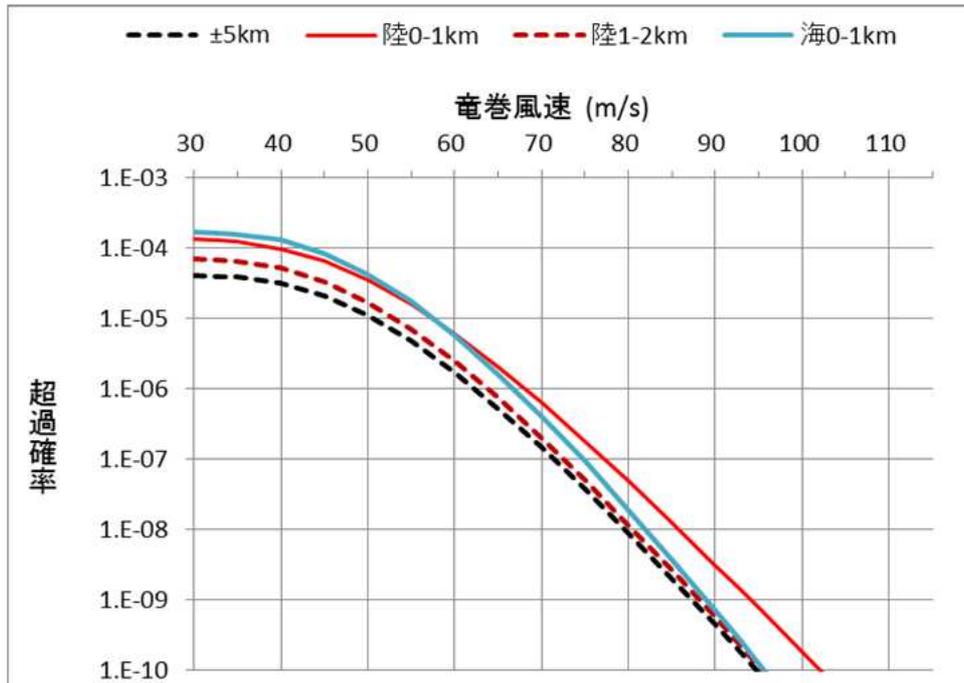


図 7-26 検討地域②の分析結果

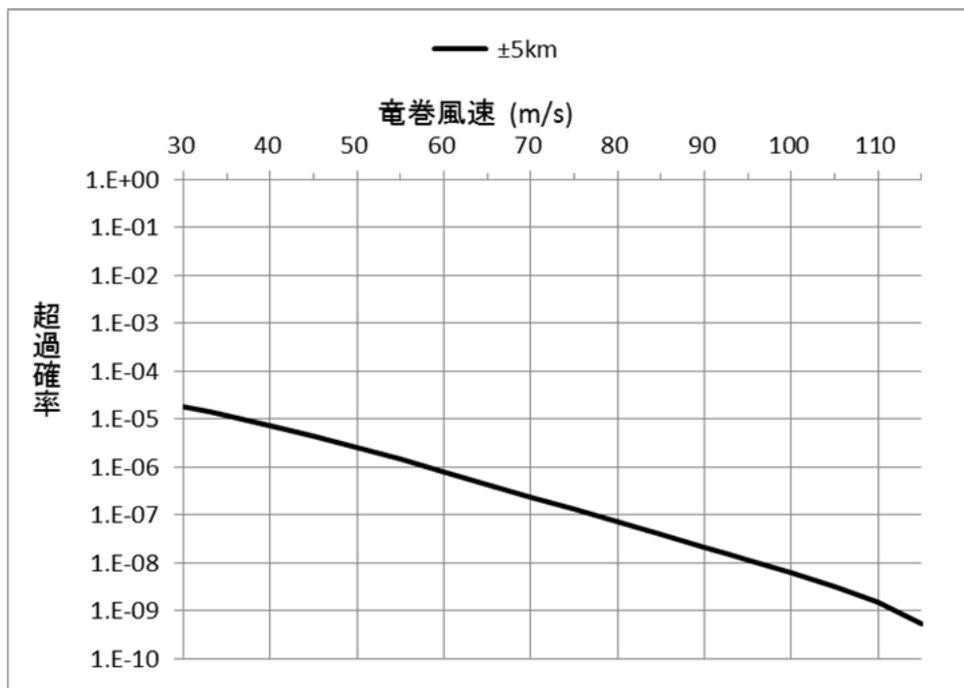


図 7-27 検討地域③の分析結果

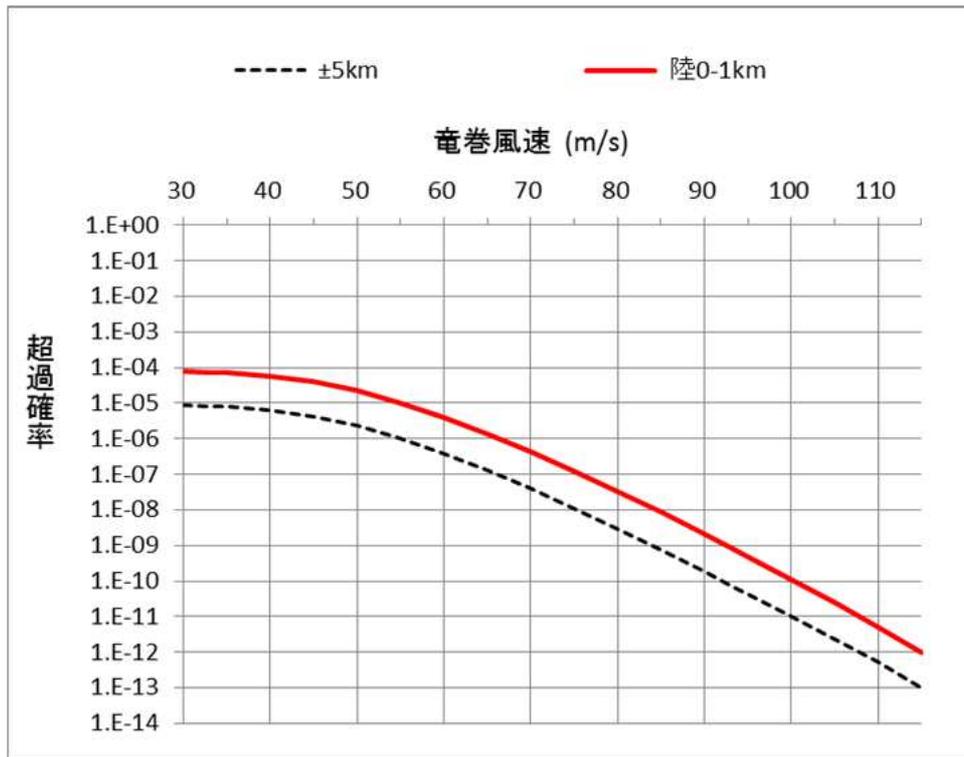


図 7-28 検討地域④の分析結果

表 7-17 検討地域毎の竜巻最大風速

検討対象地域		過去に発生した竜巻による最大風速	竜巻最大風速のハザード曲線(10 <sup>-5</sup> )による最大風速	結果
①	竜巻検討地域	F1 (49m/s)	5km 範囲 : 36.1m/s 1km 範囲 : 49.0m/s	F1 (49m/s)
②	福島県～北海道襟裳岬	F2 (69m/s)	5km 範囲 : 50.7m/s 1km 範囲 : 57.6m/s	F2 (69m/s)
③	東北地方内陸	F2 (69m/s)	36.2m/s	F2 (69m/s)
④	福島県～青森県竜飛崎	F2 (69m/s)	5km 範囲 : 30m/s 未満 1km 範囲 : 55.2m/s	F2 (69m/s)

#### 参考文献

- ・ Wen, Y.K. and Chu, S.L. (1973) : Tornado risks and design wind speed, Proceedings of American society of Civil Engineering, Journal of Structural Division, Vol.99, No.ST12, 2409-2421.
- ・ Garson, R.C., Morla-Catalan J. and Cornell C.A.(1975) : Tornado risk evaluation using wind speed profiles, Journal of Structural Division, Proceedings of American Society of Civil Engineering, Vol.101, No.St5, 1167-1171.
- ・ Garson, R.C., Morla-Catalan J. and Cornell C.A. (1975) :Tornado Design Winds Based on Risk, Journal of Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineering, Vol. 101, No.ST9, 1883-1897.
- ・ 東京工芸大学(2010) : 平成 21～22 年度原子力安全基盤調査研究 (その 1) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 256p.
- ・ 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, 424p.

## 地形効果による竜巻の増幅の可能性について

## 1. 地形起伏による竜巻増幅可能性に関する知見

## (1) 対象とする地形起伏スケールの整理

竜巻に対する地形の効果は、スーパーセルスケールへの関与によるメソスケールでの「発生」などへの影響と、渦の旋回流への関与によるマイクロスケールでの「風速」などへの影響が報告されている。

設計竜巻風速 ( $V_D$ ) の設定に関しては、タッチダウンした漏斗雲により発生する旋回流、およびそれに随伴して生じる強風への地形影響を考慮する必要があり、地形の規模としては、マイクロスケール (数百 m 規模) での影響を考える必要がある (参考文献②, ③参照)。

## (2) マイクロスケールの地形起伏が竜巻の旋回流強度および強風に与える影響

マクロスケールの地形起伏が竜巻の旋回流および強風に与える影響について定性的な知見を与える関連研究で用いられている主な手法は、①被害状況調査、②風洞実験、③数値シミュレーション があり、マイクロスケールの地形の起伏に起因する竜巻の旋回流や風速の強化に対する知見が得られている。

## ① 被害状況調査

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、旋回流強度および風速の強弱を類推するもので、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 (参考文献①, ②参照)。

## ② 風洞実験

風洞実験の測定部に尾根や斜面といった地形モデルを入れ、その上部に竜巻発生装置を設置し、それを移動させたときの、地表面近傍の圧力・風速分布を測定するもので、実際の風洞実験の結果を図 1-1 に示す (参考文献②参照)。

図中(a)に示す二次元尾根地形を図中左側から右側に竜巻を模擬した旋回流が移動するとき、地表面で測定された圧力の最大値が(b)になる。ここで実験仕様の制約上、風速のデータは取得されておらず、風速に相当するものとして、圧力勾配 (圧力の高いところから低いところに流れる風の駆動力になり、風速に相当する) を(c)に示しており、以下のことが分かる。

- a. 圧力勾配(c)が斜面において、正・負の値を持つこと (旋回流が強弱する)
- b. 尾根の上・下流の平坦部では、ほぼフラットとなること (旋回流の強度が変化しない)

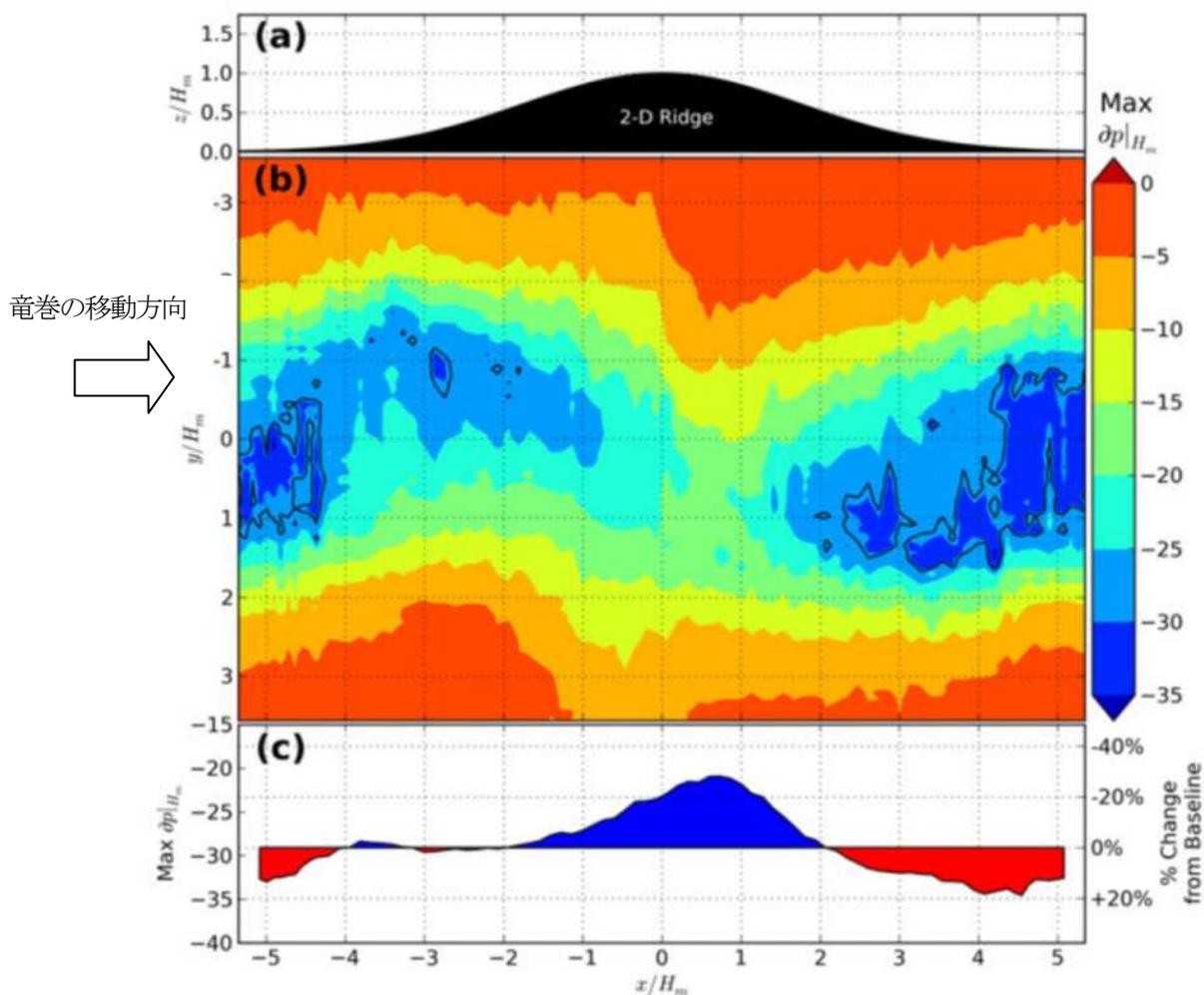


図 1-1 尾根地形を竜巻が通過するときの地表面圧力  
および圧力勾配（風速に相当）

### ③ 数値シミュレーション

竜巻の旋回流や移動および地形の起伏を模擬した流体解析により、旋回流の強度や風速および竜巻の構造に関連する圧力分布を測定するもので、実際のシミュレーション結果を図 1-2 に示す（参考文献③参照）。

図中(a)がピーク圧力、(b)が風速であり、黒色の実線が等高線を意味しており、以下に示すように、風洞実験の結果（図 1-1）と整合している。

- a. 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（②風洞実験の a. と整合）。
- b. 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側と下流側とで同レベルとなる（②風洞実験の b. と整合）。

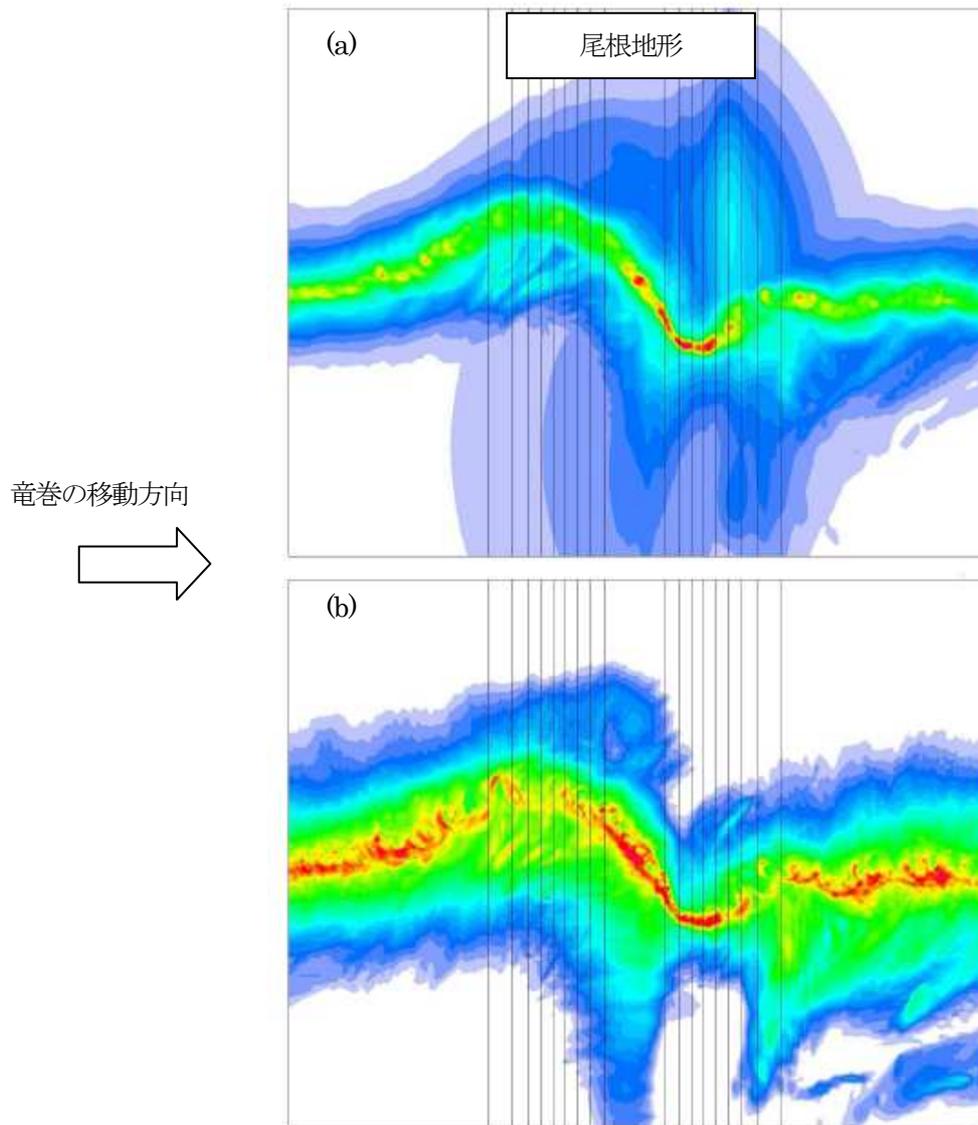


図 1-2 尾根地形を竜巻が通過するときの地表面ピーク圧力および風速

これらの研究結果は、地形起伏の影響範囲が、斜面および尾根・山の頂部および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。

(3) 地形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

一般的に、回転する流れでは、「回転の中心からの距離」と「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質がある。

竜巻のコア部分を一つの鉛直軸を有する剛体運動の気柱と仮定すると、図 1-3 に示すように、上り坂を越える場合（渦 1 から渦 2 へ異動する場合）には渦の長さが短くなる。その際、角運動量の保存則は次式のように表される。

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

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

ここで、 $\omega$  は角速度、 $r$  は渦コア（気柱）の半径、 $h$  は渦コア（気柱）の高さ、 $\rho$  は空気密度であり、添字の 1 と 2 はそれぞれ、渦 1 と渦 2 に対する値を表す。また、気柱の体積が保存されるので、式③が成立する。

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

この関係を式②に代入すると、式④が得られる。

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

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 $\omega$ は地上高さ $h$ に比例することがわかる。また、③より、渦の半径 $r$ は $h^{1/2}$ に反比例するので、竜巻の最大接線風速（ $\omega \times r$ ）は $h^{1/2}$ に比例する。そのため、竜巻の渦が上り斜面を移動する時、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動する時には強まる。

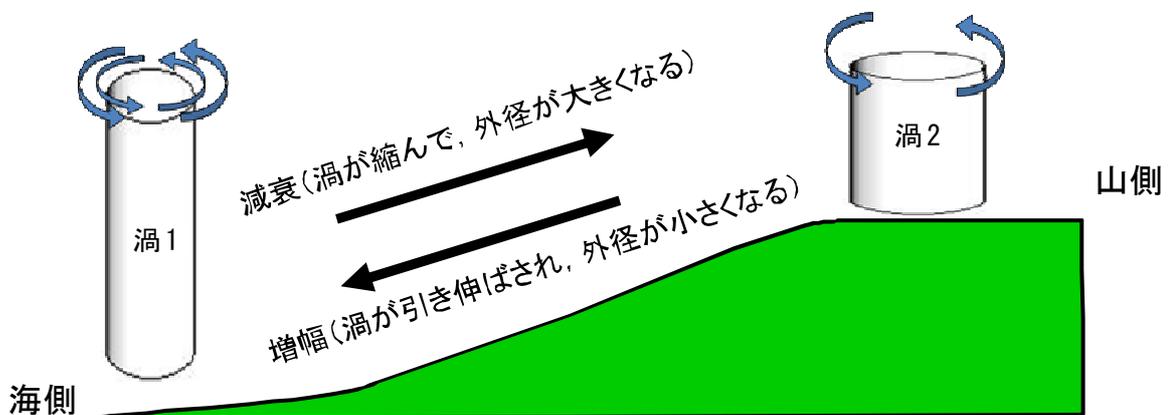


図 1-3 竜巻旋回流の地形影響に関する模式図

## 2. 地表面粗度による竜巻風速の増幅特性に関する知見

### (1) 概要

既往の研究に基づく地表面粗度の物理的意味および竜巻などの暴風時の風速への影響に関する知見を以下に整理する。

### (2) 地表面粗度の定義

大気の運動（風）は、地表面の影響を受けるが、地表面に近いほどその影響は強い。影響を受ける範囲は1-2 kmに及ぶことが一般的で、その範囲を大気境界層と呼ぶ。その中でも表面から数十メートルまでの領域は特にその影響が著しく、「接地層」といわれる（参考文献⑥）。

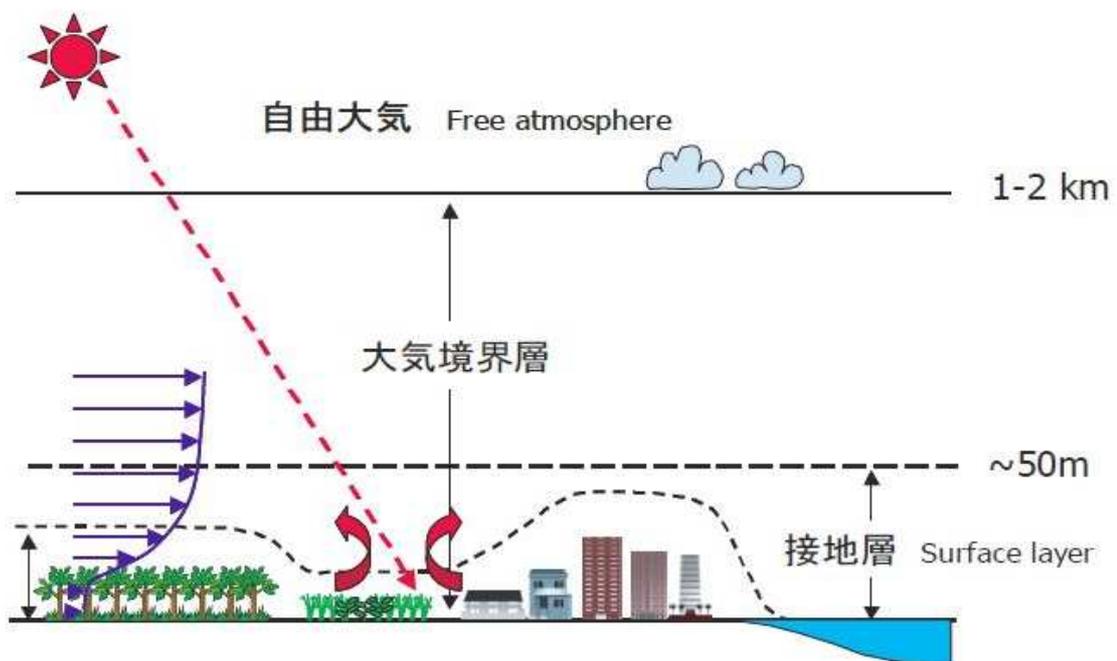


図2-1 大気の鉛直構造の模式図

風速は地表面において0となり上空に向かうにつれて増加する。強風状態において、この風速の鉛直分布は対数分布と合致する。この対数分布の性状は、地表面の細かな凸凹が与える摩擦抵抗により定まる。この摩擦抵抗による風速分布への効果を示す指標を「粗度長」（地表面粗度）と定義する（参考文献④，⑤参照）。

接地層内の風速  $U$  は、地表面からの高さ  $z$  に対して、粗度長  $z_0$  を用いて

$$U(z) = c \ln(z/z_0) \quad (1)$$

により整理される（ここで、 $c$  は係数）。

(3) 粗度長の値

粗度長の値は、既往の研究において、様々な地表面状態に対して示されている。そこで得られている概略値を表 2-1、表 2-2 に示す。粗度長が地表面の細かな凹凸の度合いに呼応し増減することが分かる。

表 2-1 粗度長の値 (その 1)

地表面	粗度長 [m]
水 (広くて静かな面)	$10^6 - 10^5$
砂・砂漠	0.0003
土	0.001 - 0.01
草 (草丈 0.02 - 0.1 m)	0.003 - 0.01
草 (草丈 0.25 - 1.0 m)	0.04 - 0.10
農地	0.04 - 0.20
果樹園	0.5 - 1.0
森林	1.0 - 6.0
大都市 (東京)	2.0

(参考文献⑥参照)

表 2-2 粗度長の値 (その 2)

地表面	粗度長 [m]
湖や海面	$10^3 - 10^5$
水田	0.01 - 0.05
草 (草丈 0.1 m)	0.01 - 0.03
草 (草丈 1.0 m)	0.1 - 0.3
田園集落	0.2 - 0.5
森林	0.3 - 1.0
大都市	1 - 3

(参考文献④参照)

(4) 粗度長を加味した風速の算定

この粗度長を考慮した建築物の耐風設計（強風を対象とした建築物の風荷重設定）手順を日本建築学会が取りまとめており，表 2-3 に示す（参考文献⑦参照）。ここでは，地表面の状況に応じた粗度長の変化を 5 つの区分に分類して取り扱うことにしている。

表 2-3 粗度長を考慮した建築物の耐風設計

粗度区分	評価地点および風上の地表面の状況
1	海面または湖面のような，ほとんど障害物のない地域
2	田園地帯や草原のような農作物程度の障害物がある地域，樹木，低層建築物などが散在している地域
3	樹木・低層建築物が多数存在する地域，あるいは中層建築物（4～9 階）が散在している地域
4	中層建築物（4～9 階）が主となる市街地
5	高層建築物（10 階以上）が密集する市街地

そして，式(1)の対数分布を近似するものとして，次式で示されるべき分布とともに，各粗度区分に対して式中のパラメータとして表 2-4 の値を提示している。地表面の凹凸が大きくなるほど， $z_b$ ， $z_g$ ， $\alpha$ （べき指数）の値も大きくなる。

粗度区分 1-5 に対して，式(2)から得られる風速の鉛直分布を図 2-2 に示す。

$$U(z) = c(z/z_g)^\alpha \quad (z_b < z \leq z_g) \quad (2)$$

表 2-4 粗度区分とべき指数

粗度区分	1	2	3	4	5
$z_b$ (m)	5	5	10	20	30
$z_g$ (m)	250	350	450	550	650
$\alpha$	0.1	0.15	0.2	0.27	0.35

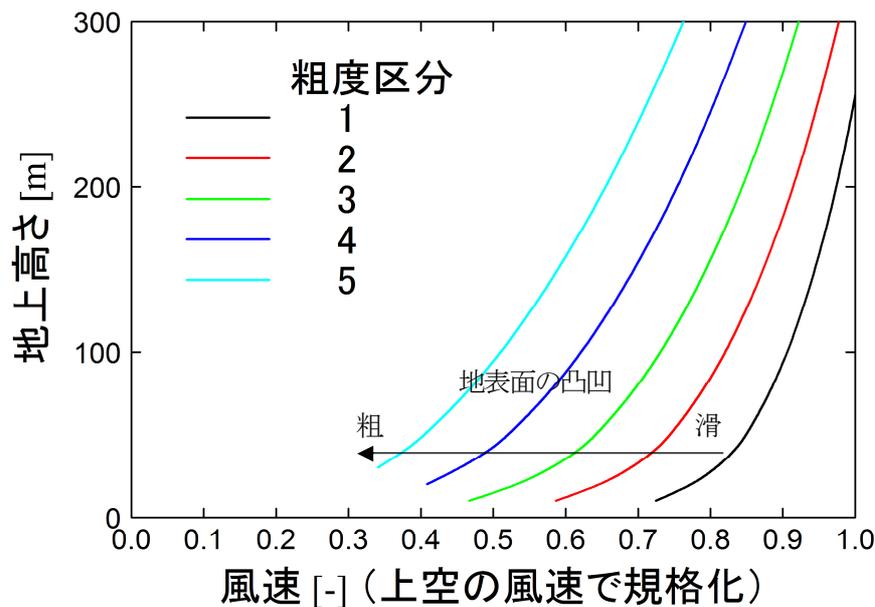


図 2-2 粗度区分と風速の鉛直分布との関係

ここで、地表面の凹凸による地表面近傍における風速の減速を議論するため、同一の上空風速 ( $z = z_G$  の風速) に対する分布を提示している。すなわち、横軸の数字は地表面粗度の影響に起因する減速の度合いを意味する。

地上に近づくにつれて・粗度区分が大きくなるにつれて、地表面近傍の風速が小さくなることを確認できる。例えば、地上高さ 10 m の風速は、粗度区分が 1 から 2 に変化することで 20% 程度低下し、3 に変化することで 35% 程度低下する。

(5) 竜巻の風速に対する粗度長の効果

1.(3)に示した風速の算定手順は、強風を対象としたものであり、地表面状態が森林など柔なものからビルなどの剛なものまでを包括して、地表面の凹凸が、強風の減衰をもたらすことを示唆している。

なお、竜巻は通常の強風と異なり、強い渦 (旋回流) 構造を有する。地表面粗度は、この竜巻の旋回流を減衰させる効果を有する (参考文献⑧,⑨,⑩,⑫,⑬参照)。

また、地表面粗度の構成物が飛来物として運動することも竜巻の風速を大きく減少させることも示唆されている (参考文献⑪参照)。

これらの知見から、表面の凹凸、すなわち粗度の増加とともに風速が低下することが分かる。

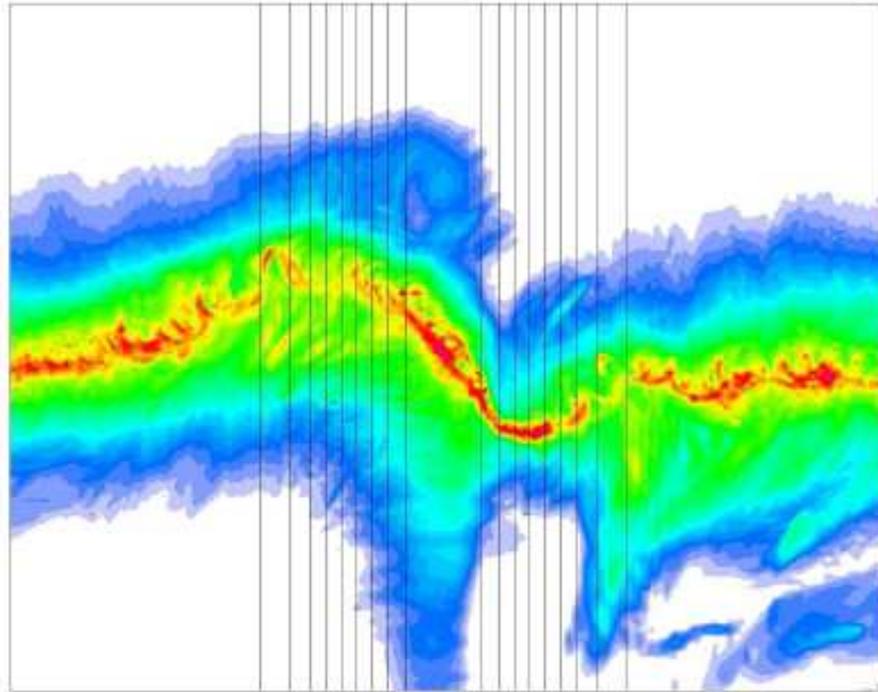
(6) 地形と粗度との重畳について

地表面の粗度による竜巻の減衰について、地形効果との重畳について整理した。

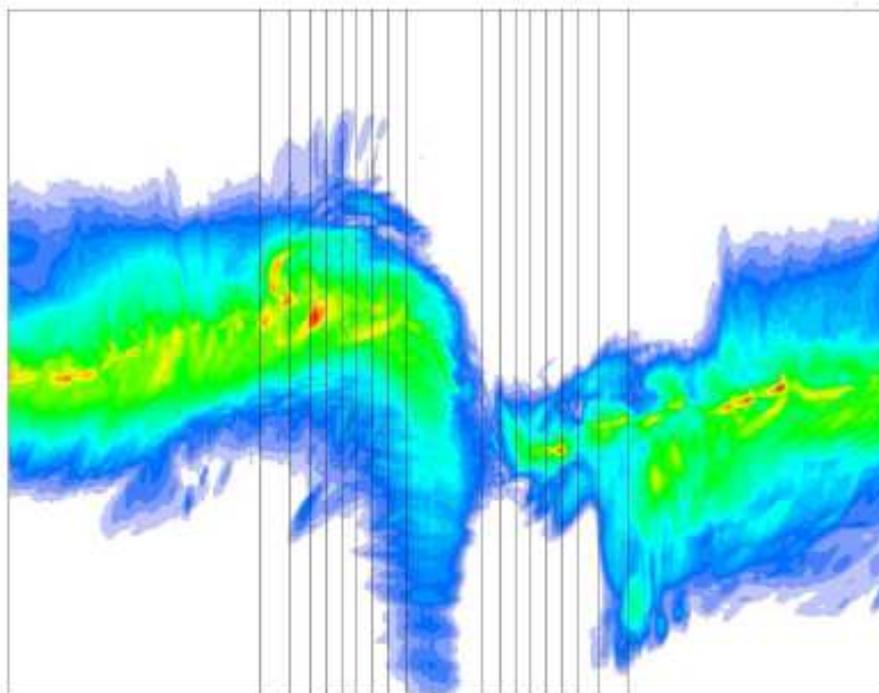
地表面粗度と地形効果との重畳について、Lewellen（参考文献③参照）により実施されたLESが一つの知見を与えている。このLESでは、高さ100mの尾根を越える竜巻の減衰を2種類の地表面粗度（ $z_0 = 2\text{ cm}$  と  $20\text{ cm}$ ）に対して調べている。それにより得られた最大風速のカラーコンタを図2-3に示す。

地表面粗度の値によらず、地形の起伏に伴う竜巻進路は蛇行している。竜巻の移動に伴う、最大瞬間風速の値の強弱は、地表面粗度に伴い異なる挙動を呈するが、地表面粗度の増加は、最大風速の低下に寄与していることを確認できる。

この結果は地表面粗度による竜巻風速の減衰について、地形の起伏が重畳する場合も同様の結論となることを示唆している。



地表面粗度  $z_0=2\text{cm}$  の場合



地表面粗度  $z_0=20\text{cm}$  の場合

図 2-3 最大風速のカラーコンタ

### 3. 女川原子力発電所における地形効果による竜巻の増幅可能性について

#### (1) 地形起伏と粗度の影響

図 3-1, 図 3-2, 図 3-3 に竜巻検討地域において観測された竜巻の発生地点および竜巻の移動方向を示す。また, 図 3-4 に女川原子力発電所周辺の地表面粗度区分のカラーコンタを示す。

図 3-1, 図 3-2, 図 3-3 より, 竜巻検討地域で観測された竜巻は全て沿岸部で発生しており, その移動方向は海上から陸側へ向かう方向(斜面を上る方向)である。

また, 図 3-4 より, 海上から竜巻が侵入した場合においても, 女川原子力発電所の立地する地形は三方を山に囲まれ北東が開かれた狭隘な地形であることおよび周辺の森林等によって海上よりも地表面粗度が増加する。

よって, 女川原子力発電所において, 地形影響による竜巻の増幅の可能性は極めて低いと考えられる。

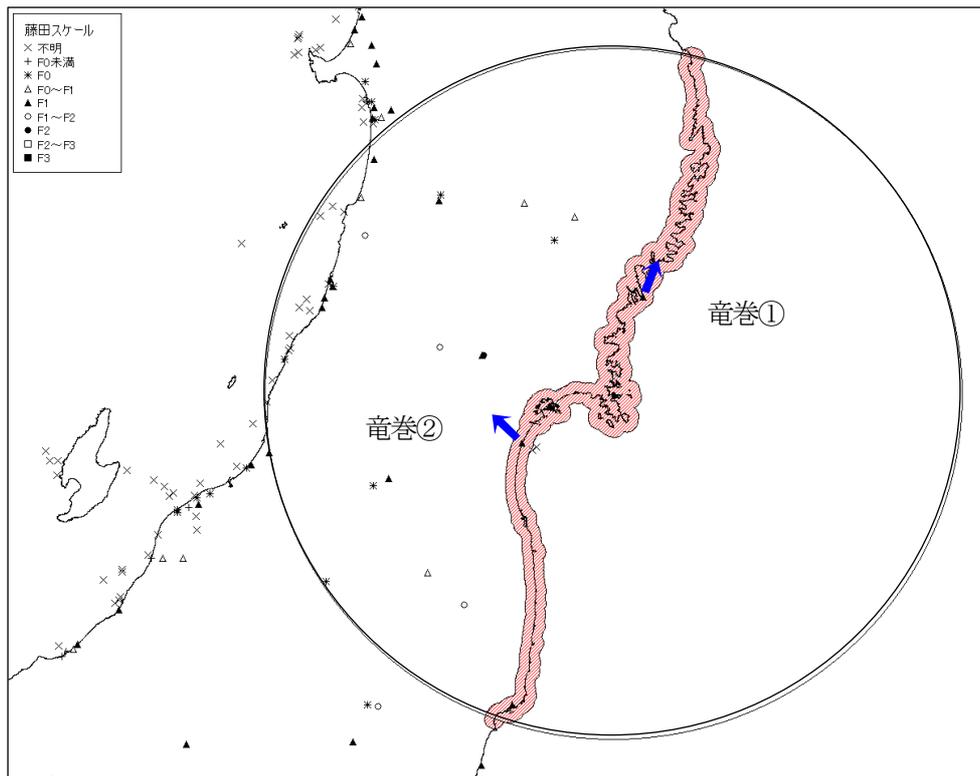
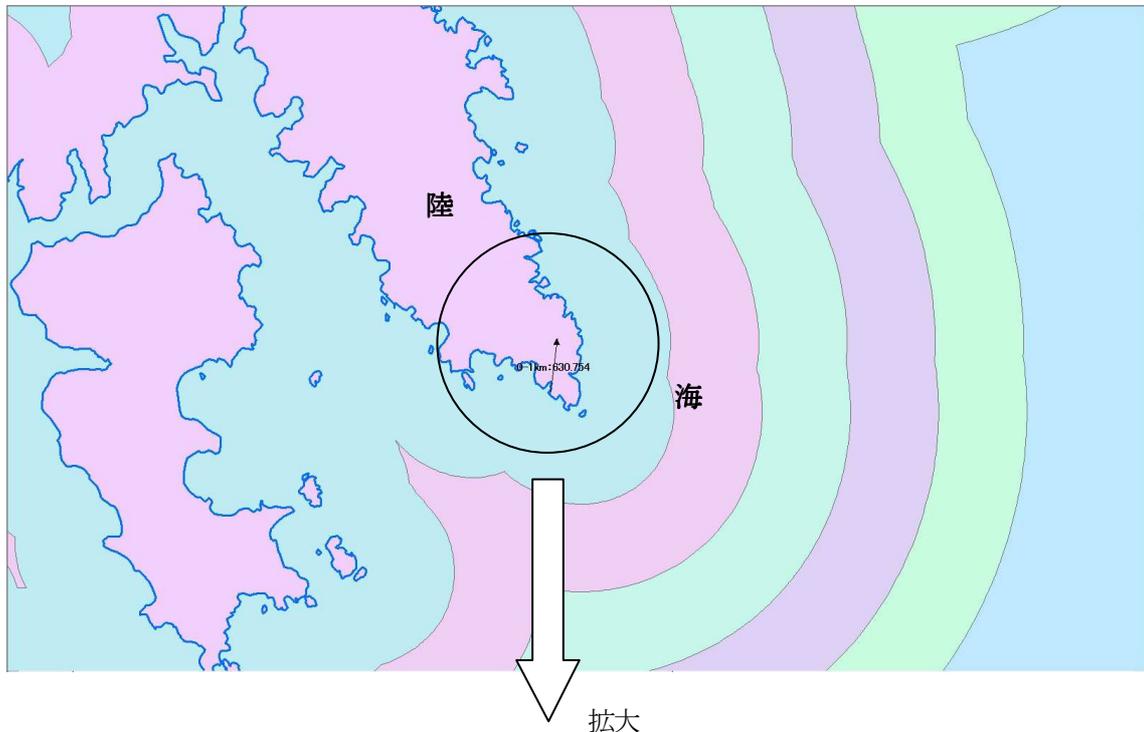


図 3-1 竜巻検討地域で観察された竜巻の移動方向



← : 竜巻の移動方向, 移動距離

図3-2 1992年8月7日に宮城県唐桑町で発生した竜巻①の移動方向, 移動距離

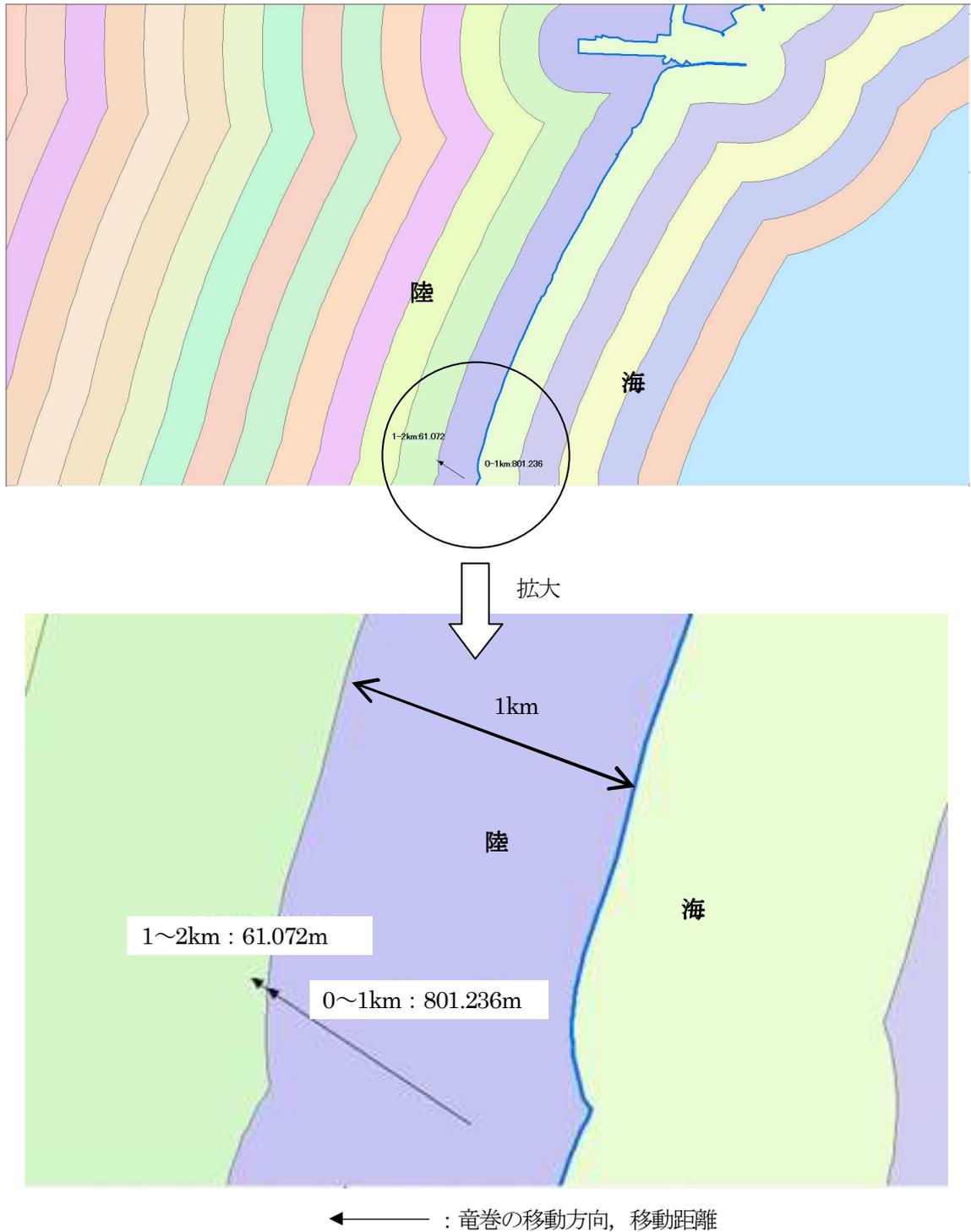


図3-3 1998年9月16日に宮城県名取市で発生した竜巻②の移動方向, 移動距離

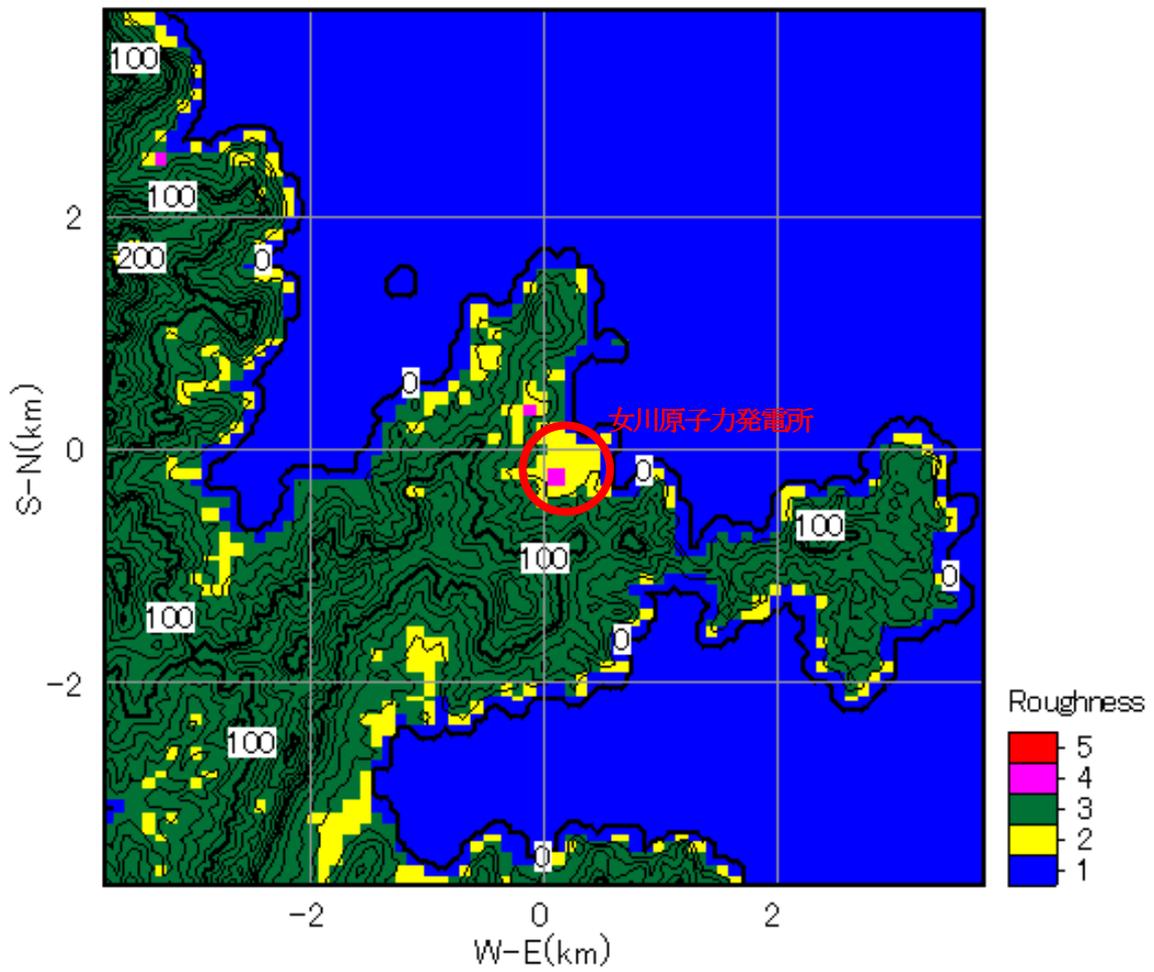


図3-4 女川原子力発電所周辺の地表面粗度

## 参考文献

- ① Forbes GS (1998) Topographic influences on tornadoes in Pennsylvania. Proc 19th Conf Severe local storms Amer Meteorol Soc, Minneapolis, MN, pp.269-272.
- ② Karstens CD (2012) Observations and laboratory simulations of tornadoes in complex topographical regions. Graduate theses and dissertations of Iowa state univ, paper12778.
- ③ Lewellen DC (2012) Effects of topography on tornado dynamics: A simulation study. 26th Conference on Severe Local Storms Amer Meteorol Soc, Nashville, TN, 4B.1.
- ④ 近藤 (2000) 地表面に近い大気の科学 324pp
- ⑤ 塩谷 (1992) 強風の性質 開発者 201pp
- ⑥ 竹内・近藤 (1981) 大気科学講座 1 地表に近い大気 東大出版 226pp
- ⑦ 日本建築学会 (2004) 建築物荷重指針・同解説 丸善 651pp
- ⑧ Church CR (1993) The tornado: its structure, dynamics, prediction and hazards. American Geophysics Union.
- ⑨ Leslie F W (1997) Surface roughness effects on suction vortex formation. J Atmos Sci 34, pp.1022-1027.
- ⑩ Lewellen WS, Sheng YP (1979) Influence of surface conditions on tornado wind distribution. Proc 11th Conf Severe local storms, pp.375-378.
- ⑪ Lewellen DC, Gong B, Lewellen WS (2008) Effects of finescale debris on near-surface tornado dynamics. J Atmos Scipp.3247-3262.
- ⑫ Natarajan D, Hangan H (2012) Large eddy simulations of translation and surface roughness effects on tornado-like vortices. J Wind Eng Ind Aerodyn 104-106, pp.577-584.
- ⑬ Rostek WF, Snow JT (1985) Surface roughness effects on tornado like vortices. Proc. 15th Conf Severe local storms, pp.252-255.