

女川原子力発電所 2号炉

外部事象の考慮について

平成30年5月

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

### <目次>

1. 基本方針
  - 1.1 要求事項の整理
2. 追加要求事項に対する適合方針
  - 2.1 その他自然現象等
    - 2.1.1 設計基準上考慮すべき事象の抽出及び当該事象に対する設計方針
      - 2.1.1.1 自然現象
      - 2.1.1.2 人為事象
    - 2.1.2 自然現象の組合せ
    - 2.1.3 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対する重要安全施設への考慮
  - 2.2 竜巻
    - 2.2.1 竜巻に対する防護に関して、設計上対処すべき施設を抽出するための方針
    - 2.2.2 発生を想定する竜巻の設定
      - 2.2.2.1 竜巻検討地域の設定
      - 2.2.2.2 基準竜巻の設定
      - 2.2.2.3 設計竜巻の設定
    - 2.2.3 設計荷重の設定
      - 2.2.3.1 設計竜巻荷重
        - (1) 風圧力の設定
        - (2) 気圧差による圧力
        - (3) 飛来物の衝撃荷重
        - (4) 設計竜巻荷重の組合せ
      - 2.2.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重
    - 2.2.4 評価対象施設の設計方針
      - 2.2.4.1 設計方針
    - 2.2.5 竜巻随伴事象に対する評価対象施設の設計方針
    - 2.2.6 参考文献
  - 2.3 火山
    - 2.3.1 火山活動に対する防護に関して、設計対象施設を抽出するための方針
    - 2.3.2 降下火砕物による影響の選定

- 2.3.3 設計荷重の設定
- 2.3.4 降下火砕物の直接的影響に対する設計方針
- 2.3.5 降下火砕物の間接的影響に対する設計方針
- 2.3.6 参考文献
- 2.4 外部火災
  - 2.4.1 外部火災に対して，設計上対処すべき施設を抽出するための方針
  - 2.4.2 考慮すべき外部火災
  - 2.4.3 外部火災に対する設計方針
    - 2.4.3.1 森林火災
      - (1) 発生を想定する発電所敷地外における森林火災の想定及び影響評価
      - (2) 森林火災に対する設計方針
    - 2.4.3.2 近隣の産業施設の火災・爆発
      - (1) 近隣の産業施設からの火災及びガス爆発の想定及び影響評価
      - (2) 想定される近隣の産業施設の火災・爆発に対する設計方針
    - 2.4.3.3 発電所敷地内における航空機墜落等による火災
      - (1) 発生を想定する発電所敷地内における航空機墜落等による火災の設定及び影響評価
      - (2) 航空機墜落等による火災に対する設計方針
    - 2.4.3.4 ばい煙及び有毒ガス
- 3. 外部からの衝撃による損傷の防止
  - 別添 1-1 外部事象の考慮について
  - 別添 2-1 竜巻影響評価について
  - 別添 2-2 竜巻影響評価におけるフジタモデルの適用について
  - 別添 3-1 火山影響評価について
  - 別添 4-1 外部火災影響評価について
- 4. 運用，手順能力説明資料
  - 別添 1-2 運用，手順能力説明資料（外部事象）
  - 別添 3-2 運用，手順能力説明資料（火山）
  - 別添 4-2 運用，手順能力説明資料（外部火災）
- 5. 現場確認のプロセス
  - 別添 4-3 森林火災評価に係る植生確認プロセスについて

下線部：今回説明範囲

別添 2 - 1

女川原子力発電所 2 号炉

竜巻影響評価について

## 目 次

### 別添 2-1

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

### 添付資料

- 1.1 重大事故等対処施設に対する考慮について
- 1.2 評価対象施設の抽出について
- 1.3 防護施設（竜巻）に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出について
- 2.1 気候区分について
- 2.2 数値気象解析にもとづく竜巻検討地域の設定について
- 2.3 竜巻検討地域及び全国で発生した竜巻
- 2.4 竜巻最大風速のハザード曲線の求め方
- 2.5 地形効果による竜巻風速への影響について
- 2.6 設計竜巻の特性値の設定
- 2.7 米国及び関東平野の竜巻の類似性
- 3.1 竜巻影響評価の概要及び保守性について
- 3.2 竜巻影響評価及び竜巻対策の概要
- 3.3 設計飛来物の選定について
- 3.4 竜巻随件事象の抽出について
- 3.5 飛来物化する可能性がある物品等の管理について

## 1. 竜巻に対する防護

### 1.1 概要

原子力規制委員会の定める「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（以下「設置許可基準規則」という。）」第六条において、外部からの衝撃による損傷の防止として、安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならずとしており、敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、竜巻の影響を挙げている。

発電用原子炉施設の供用期間中に極めてまれに突風・強風を引き起こす自然現象としての竜巻及びその随伴事象等によって発電用原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であることを評価・確認するため、原子力規制委員会の定める「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（平成25年6月19日原子力規制委員会決定、平成26年9月17日改正）」（以下「ガイド」\*という。）を参照し、竜巻影響評価として以下を実施し、発電用原子炉施設の安全機能が維持されることを確認する。

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

また、第四十三条の要求を踏まえ、設計竜巻によって、設計基準対象施設の安全機能と重大事故等対処設備の機能が同時に損なわれることがないことを確認するとともに、重大事故等対処設備の機能が喪失した場合においても、位置的分散又は頑健性のある外殻となる建屋による防護に期待できるといった観点から、代替手段により必要な安全機能を維持できることを確認する。【添付資料 1.1】

※「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説（平成25年10月、独立行政法人原子力安全基盤機構）」を含む。

### 1.2 竜巻影響評価の対象施設

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

#### (1) 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設【添付資料 1.2】

設置許可基準規則第六条における要求事項を踏まえ外部事象防護対象施設を抽出し、竜巻に対する要求事項（ガイド）を踏まえて、網羅的に防護施設を抽出する。

第 1.2-1 図及び第 1.2-2 図に評価対象施設の抽出フローと抽出結果を示す。

### 【STEP 1：外部事象防護対象施設の抽出】

安全重要度クラス1，2に属する施設，安全評価上期待する安全重要度クラス3に属する施設，及びそれらを内包する建屋等を，外部事象防護対象施設として選定する。

上記以外の，「その他の施設」については，外部事象防護対象施設への波及的影響の有無を確認する。

### 【STEP 2：防護施設（竜巻）の抽出】

外部事象防護対象施設に対し，耐震Sクラス施設<sup>※1</sup>又はそれを内包する建屋等に該当し，かつ竜巻発生時に必要となる施設<sup>※2</sup>を防護施設（竜巻）として抽出する。

※1：竜巻影響評価ガイドにおける設計対象施設である「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震Sクラス設計を要求される設備（系統，機器）及びそれを内包する建屋・構築物

※2：竜巻発生時に発電用原子炉を停止するため，また，停止状態にある場合は引き続きその状態を維持するために必要な，異常の発生防止の機能，又は異常の影響緩和機能を有する構築物，系統及び機器，並びに，使用済燃料プールの冷却機能及び給水機能を維持するために必要な異常の発生防止の機能，又は異常の影響緩和機能を有する構築物，系統及び機器

上記以外の施設については，外部事象防護対象施設への波及的影響がない場合には，竜巻及びその随件事象に対して機能維持，又は竜巻及びその随件事象による損傷を考慮して，代替設備により必要な機能を確保すること，必要に応じプラントを停止し，安全上支障のない期間に修復する等の対応により安全機能を損なわない設計とする。

### 【STEP 3：評価対象施設の抽出】

防護施設（竜巻）に対し，屋外設備又は建屋等，外気と繋がる設備及び外殻となる施設による防護が期待できない設備<sup>※3</sup>を評価対象施設（竜巻）として抽出する。

※3：外殻となる施設による防護が期待できない施設については，建屋，構築物の構造健全性の確認結果より，設計飛来物の衝突による開口部の開口又は開口部建具の貫通の観点から設備を抽出

(屋外設備)

- ・原子炉補機冷却海水ポンプ，電動機（配管等を含む）
- ・高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプ，電動機（配管等を含む）

(外殻となる施設)

- ・2号原子炉建屋
- ・2号制御建屋
- ・2号地下軽油タンクピット
- ・2号海水ポンプ室竜巻防護対策設備（竜巻防護ネット）

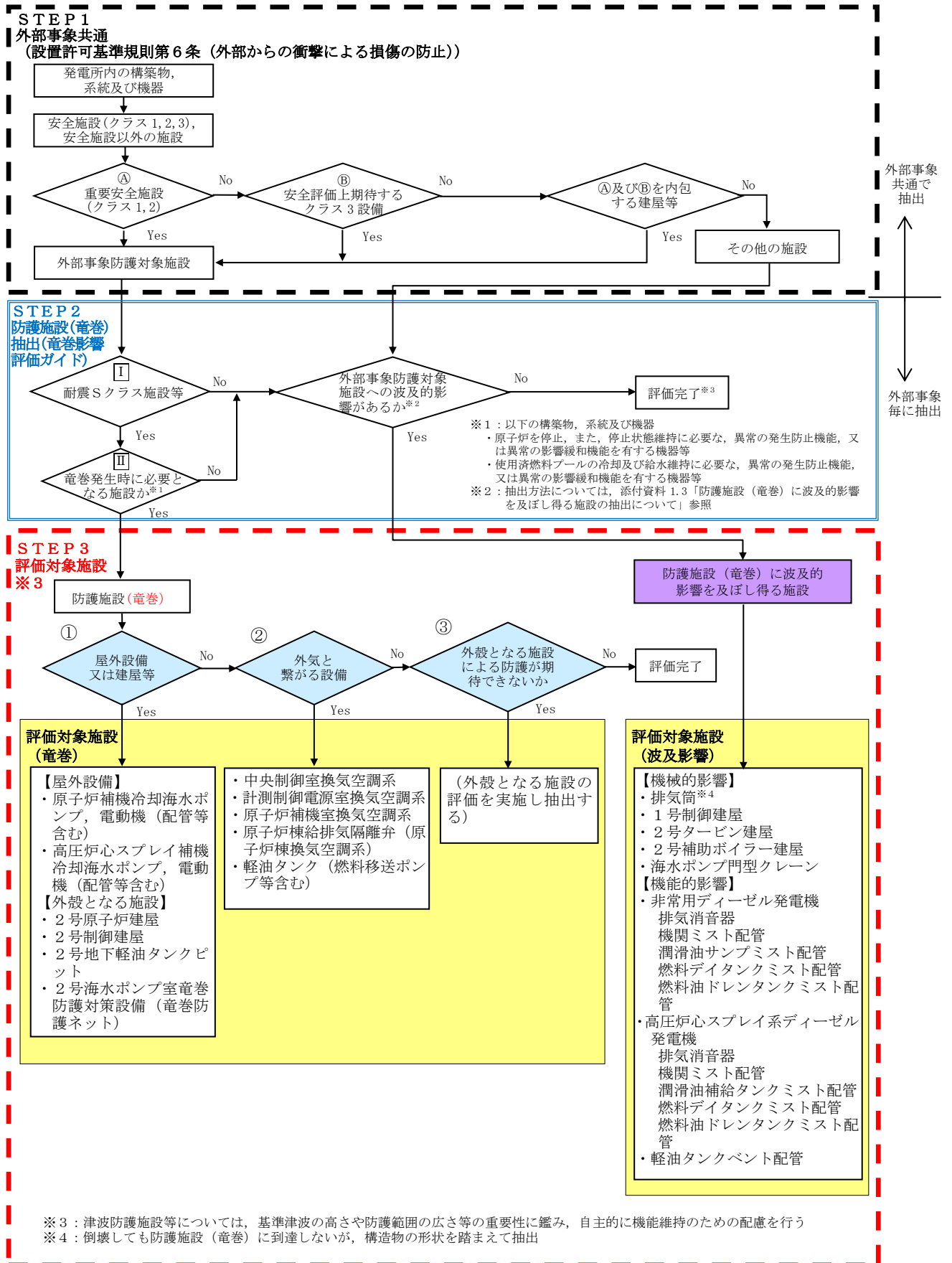
(外気と繋がる設備)

- ・中央制御室換気空調系
- ・計測制御電源室換気空調系
- ・原子炉補機室換気空調系
- ・原子炉棟給排気隔離弁（原子炉棟換気空調系）
- ・軽油タンク（燃料移送ポンプ等含む）

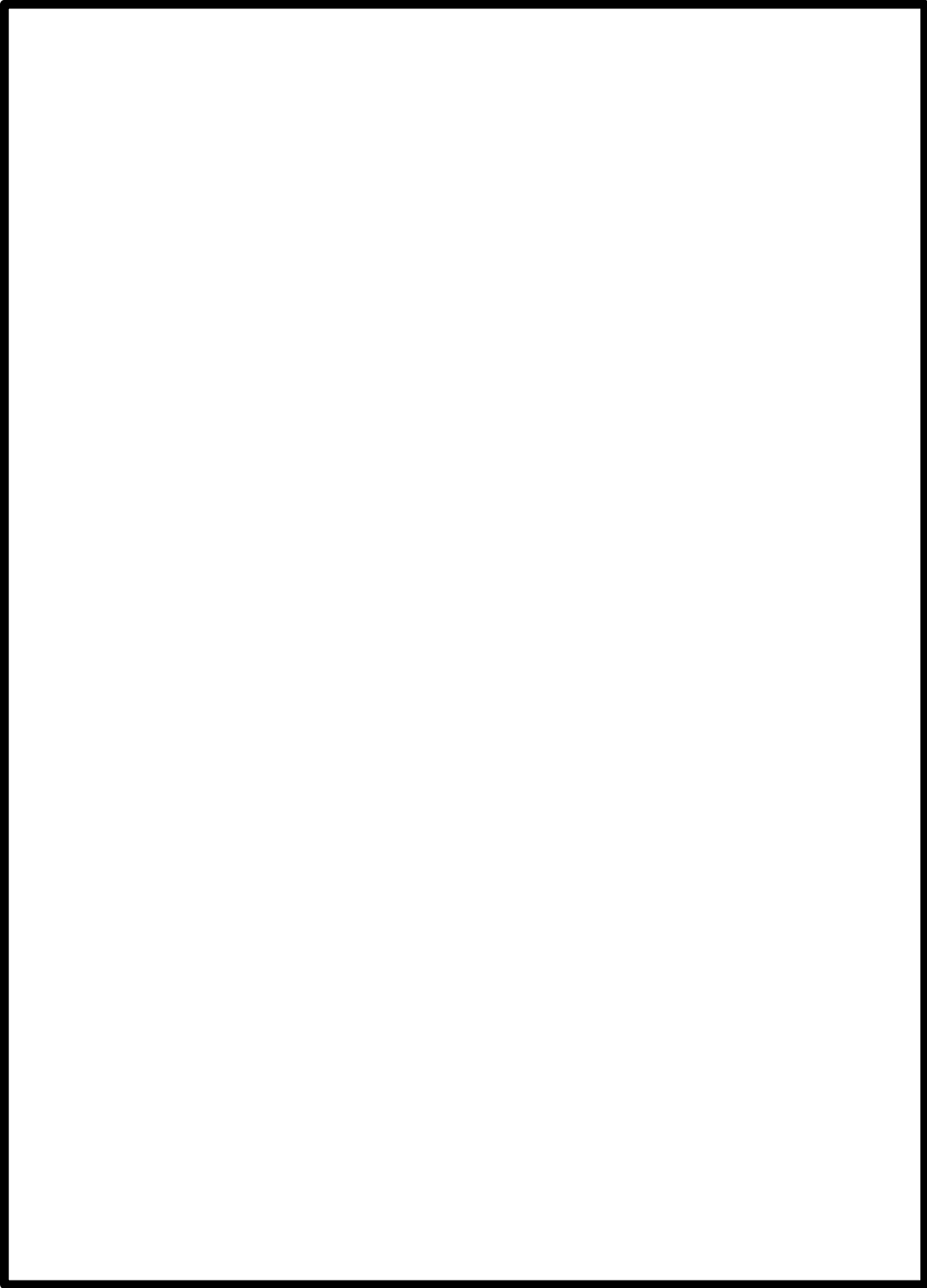
(外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備)

- ・外殻となる施設の評価を実施し抽出





第1.2-1 図 評価対象施設の抽出フロー



第1.2-2 図 防護施設（竜巻）のうち評価対象施設

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

(2) 防護施設（竜巻）に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設【添付資料 1.4】

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

防護施設（竜巻）に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設としては、発電所構内の設備及び建物・構築物の中から、以下の①、②及び③に示す施設を評価対象施設（波及影響）として抽出する。

なお、津波防護施設等は、基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性を鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う。

第 1.2-3 図及び第 1.2-4 図に防護施設（竜巻）に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出フローと抽出結果を示す。

① 機械的影響の観点での抽出

発電所構内の設備及び建物・構築物のうち、倒壊により防護施設（竜巻）を機能喪失させる可能性がある施設として、以下を抽出し、評価する。

【防護施設（竜巻）に隣接している建物・構築物】

- ・ 1 号制御建屋
- ・ 2 号タービン建屋
- ・ 2 号補助ボイラー建屋

【倒壊により防護施設（竜巻）に損傷を及ぼす可能性がある構築物】

- ・ 排気筒※
- ・ 海水ポンプ室門型クレーン

※：倒壊しても防護施設（竜巻）に到達しないが、構造物の形状を踏まえて抽出する。

② 機能的影響の観点での抽出

発電所構内の設備及び建物・構築物のうち、屋外にある防護施設（竜巻）の付属設備として、以下を抽出し、評価を実施する。

【屋外にある防護施設（竜巻）の付属設備】

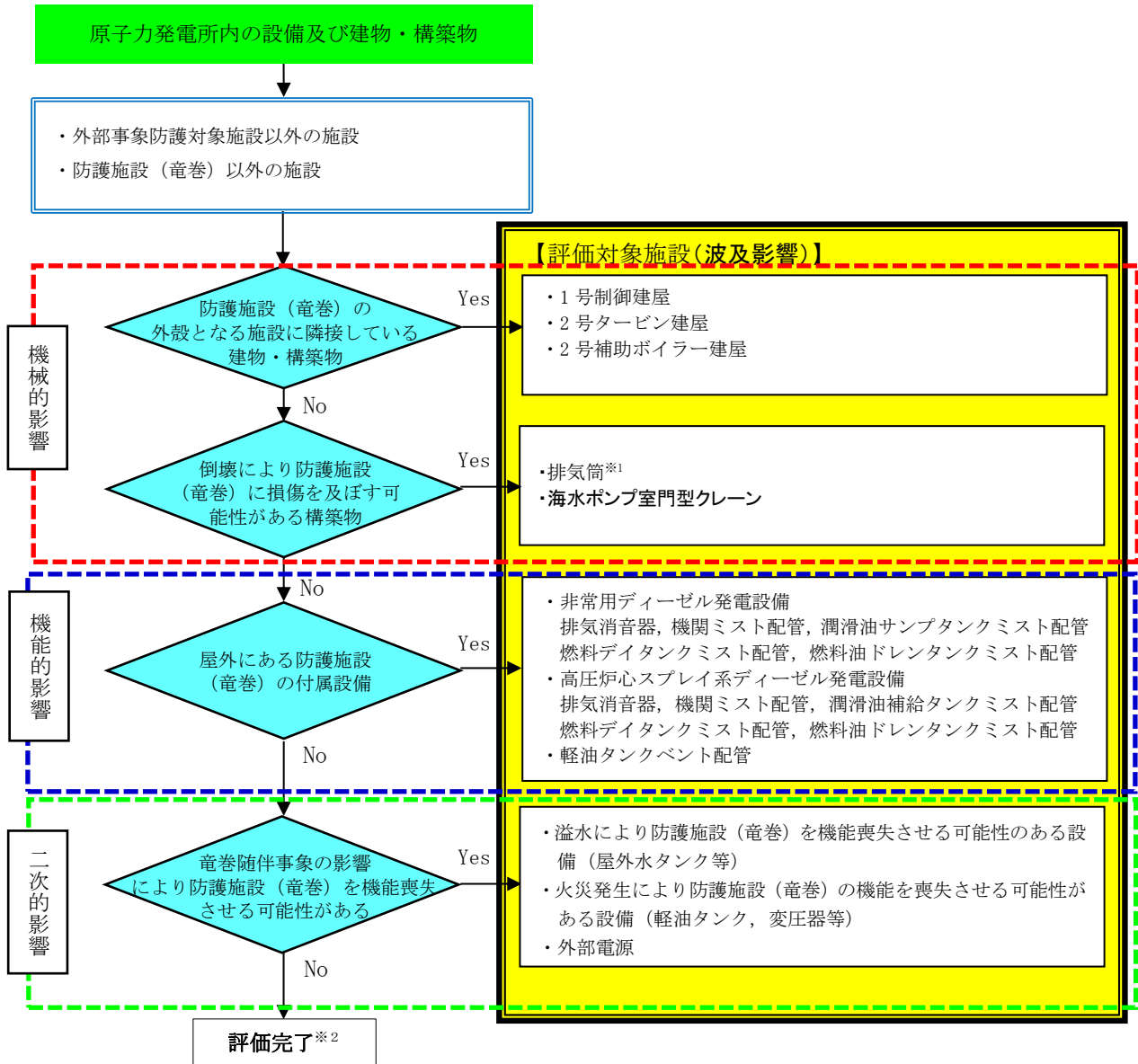
- ・ 非常用ディーゼル発電設備  
(排気消音器, 機関ミスト配管, 潤滑油サンプタンクミスト配管, 燃料デイトンクミスト配管, 燃料油ドレンタンクミスト配管)
- ・ 高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備  
(排気消音器, 機関ミスト配管, 潤滑油補給タンクミスト配管, 燃料デイトンクミスト配管, 燃料油ドレンタンクミスト配管)
- ・ 軽油タンク  
(軽油タンクベント配管)

③ 二次的影響の観点での抽出

発電所構内の設備及び建物・構築物のうち、二次的影響の観点から、竜巻随伴事象の影響により防護施設（竜巻）を機能喪失させる可能性がある施設として、以下を抽出し、評価を実施する。

【竜巻随伴事象の影響により防護施設（竜巻）を機能喪失させる可能性がある施設）

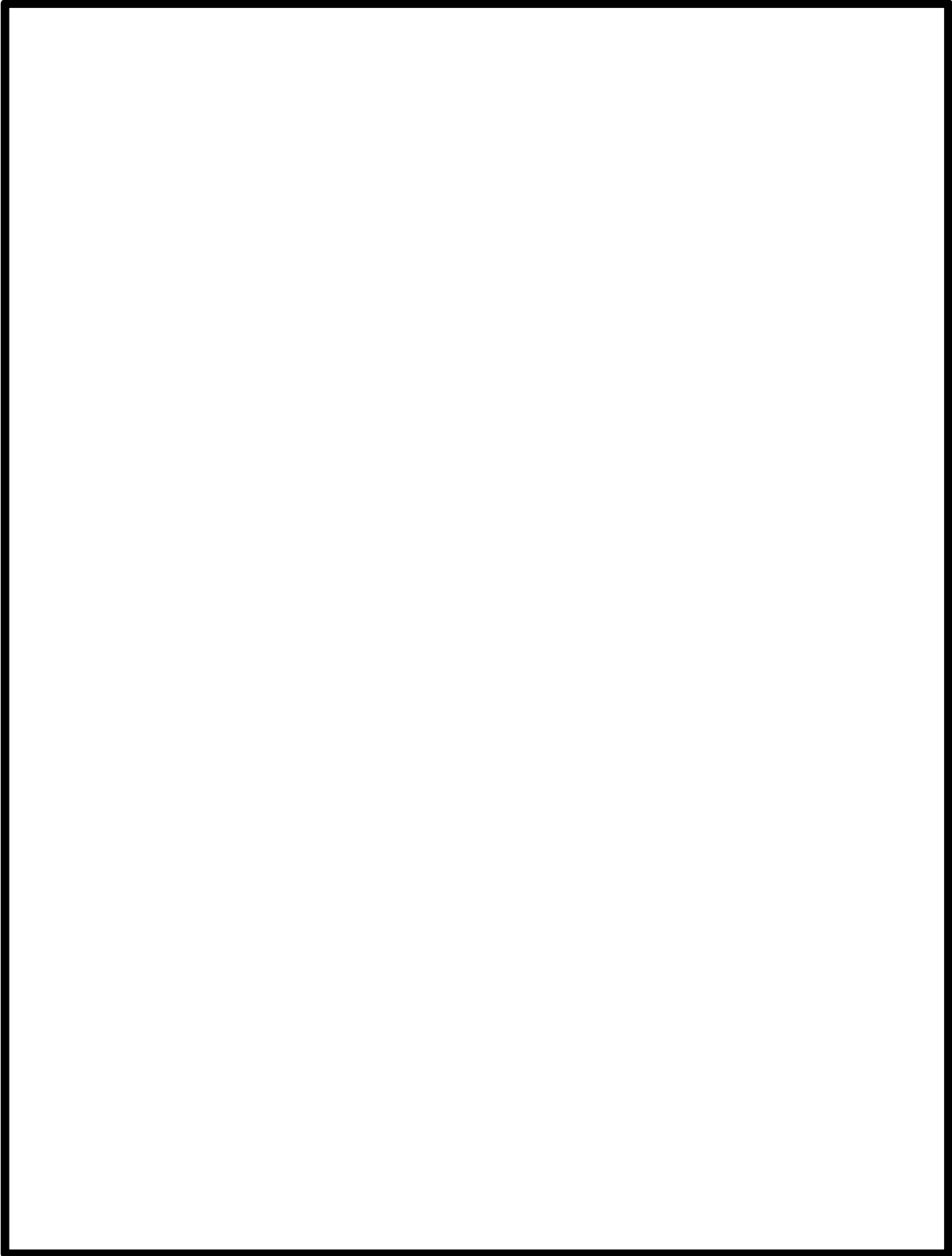
- ・ 溢水により防護施設（竜巻）を機能喪失させる可能性のある設備  
（屋外水タンク等）
- ・ 火災発生により防護施設（竜巻）の機能を喪失させる可能性がある設備  
（軽油タンク，変圧器等）



※1：倒壊しても防護施設（竜巻）に到達しないが，構造物の形状を踏まえて抽出

※2：津波防護施設等については，基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性に鑑み，自主的に機能維持のための配慮を行う

第 1.2-3 図 防護施設（竜巻）に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出フロー



第 1.2-4 図 防護施設（竜巻）に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設

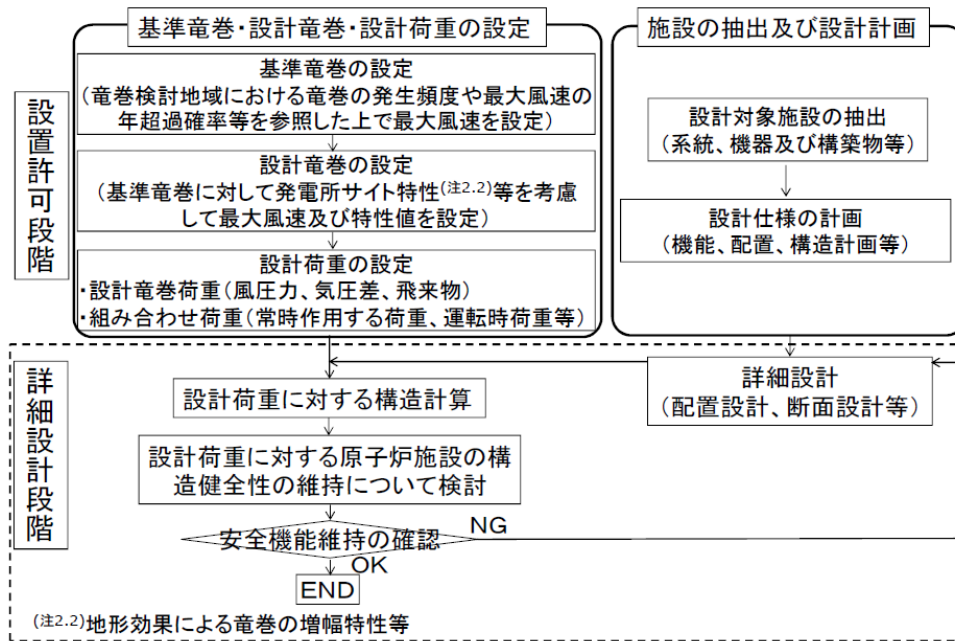
枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

### 1.3 評価の基本的な考え方

#### 1.3.1 評価の基本フロー

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

第 1.3.1-1 図に竜巻影響評価の基本フローを示す。



第 1.3.1-1 図 竜巻影響評価の基本フロー

#### 1.3.2 評価対象施設に作用する荷重

以下に示す設計荷重を適切に設定する。

##### (1) 設計竜巻荷重

設計竜巻荷重を以下に示す。

##### 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，b. の荷重については，竜巻以外の自然現象及び事故の発生頻度等を参照して，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。

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

### 1.3.3 施設の安全性の確認方針

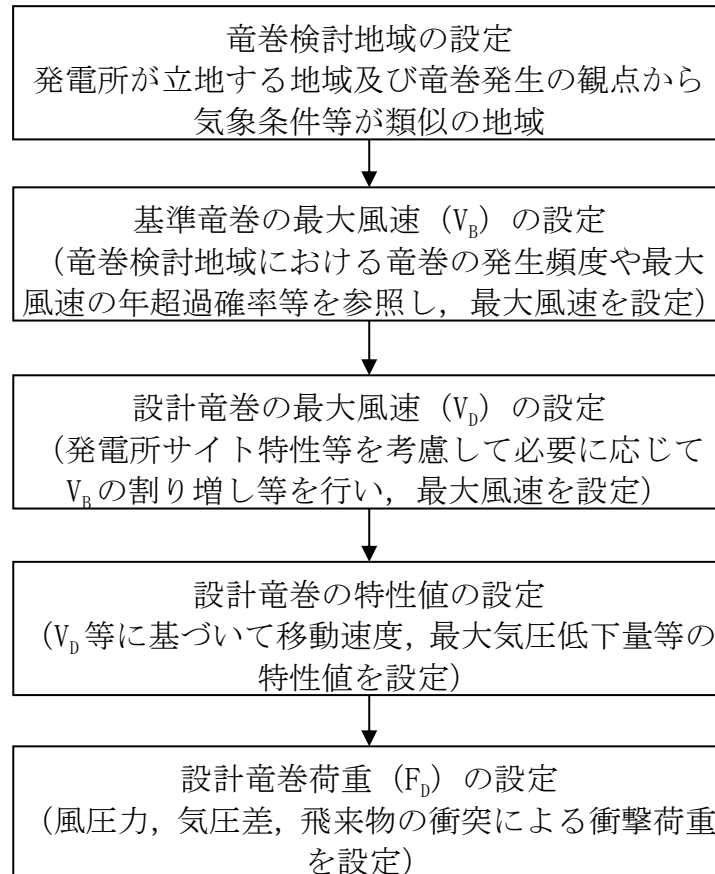
設計竜巻荷重及びその他組み合わせ荷重（常時作用している荷重，竜巻以外の自然現象による荷重，設計基準事故時荷重等）を適切に組み合わせた設計荷重に対して，評価対象施設，あるいはその特定の区画の構造健全性等の評価を行い，必要に応じて対策を行うことで，大規模な損傷に至らない構造とすること，又は損傷した場合には，取替，補修が可能なこと，波及影響も考慮した上で安全機能が維持されることを確認する。



## 2. 基準竜巻・設計竜巻の設定

### 2.1 概要

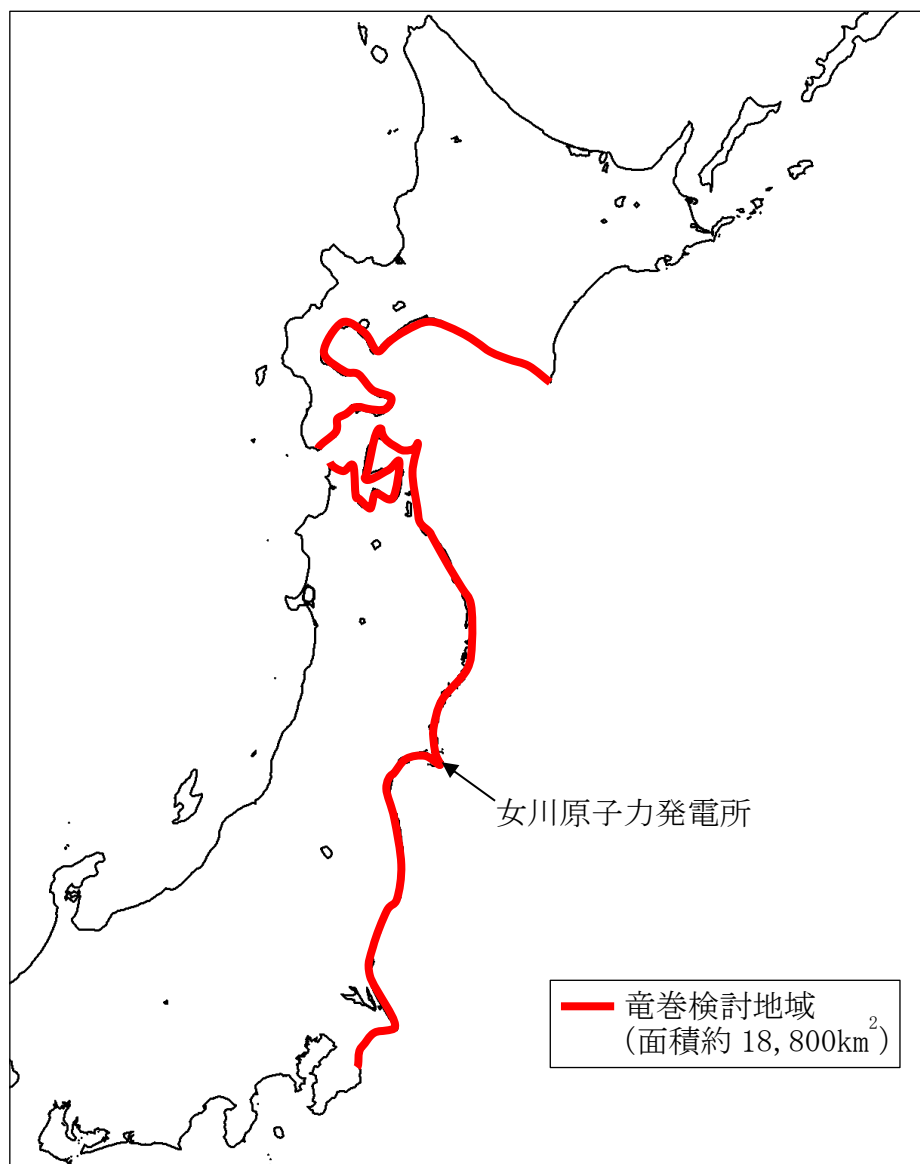
基準竜巻及び設計竜巻の設定は、第 2.1-1 図に示すとおり竜巻検討地域の設定、基準竜巻の最大風速の設定及び設計竜巻の最大風速の設定の流れで実施する。



第 2.1-1 図 基準竜巻・設計竜巻の設定に係る基本フロー

## 2.2 竜巻検討地域の設定

女川原子力発電所に対する竜巻検討地域について、ガイドを参考に、発電所が立地する地域と気象条件の類似性の観点で検討を行い、第2.2-1図に示すとおり北海道襟裳岬から千葉県九十九里町までの海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲を竜巻検討地域に設定した（面積約18,800km<sup>2</sup>）。以下にその妥当性確認の結果を示す。



第2.2-1図 竜巻検討地域

## 2.2.1 竜巻検討地域の妥当性確認

竜巻検討地域の妥当性について、以下の観点から確認を実施した。

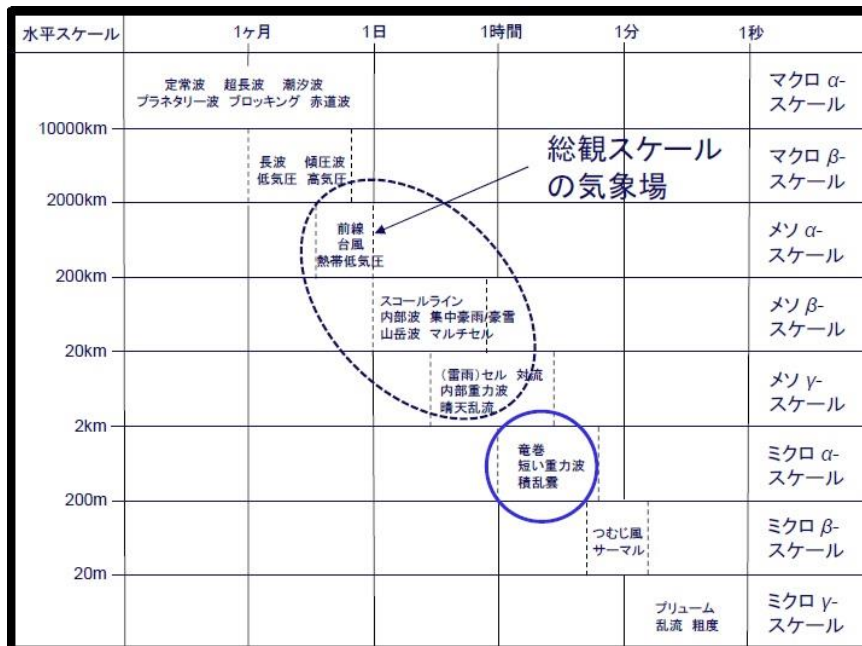
- (1) 気候区分による確認
- (2) 総観場の分析に基づく地域特性の検討
- (3) 突風関連指数に基づく地域特性の検討

竜巻検討地域は、(1)の確認により、日本海側と太平洋側が気候特性が異なる地域に整理されることを確認するとともに、女川原子力発電所が立地する気候区分(区分IV3)を確認した。

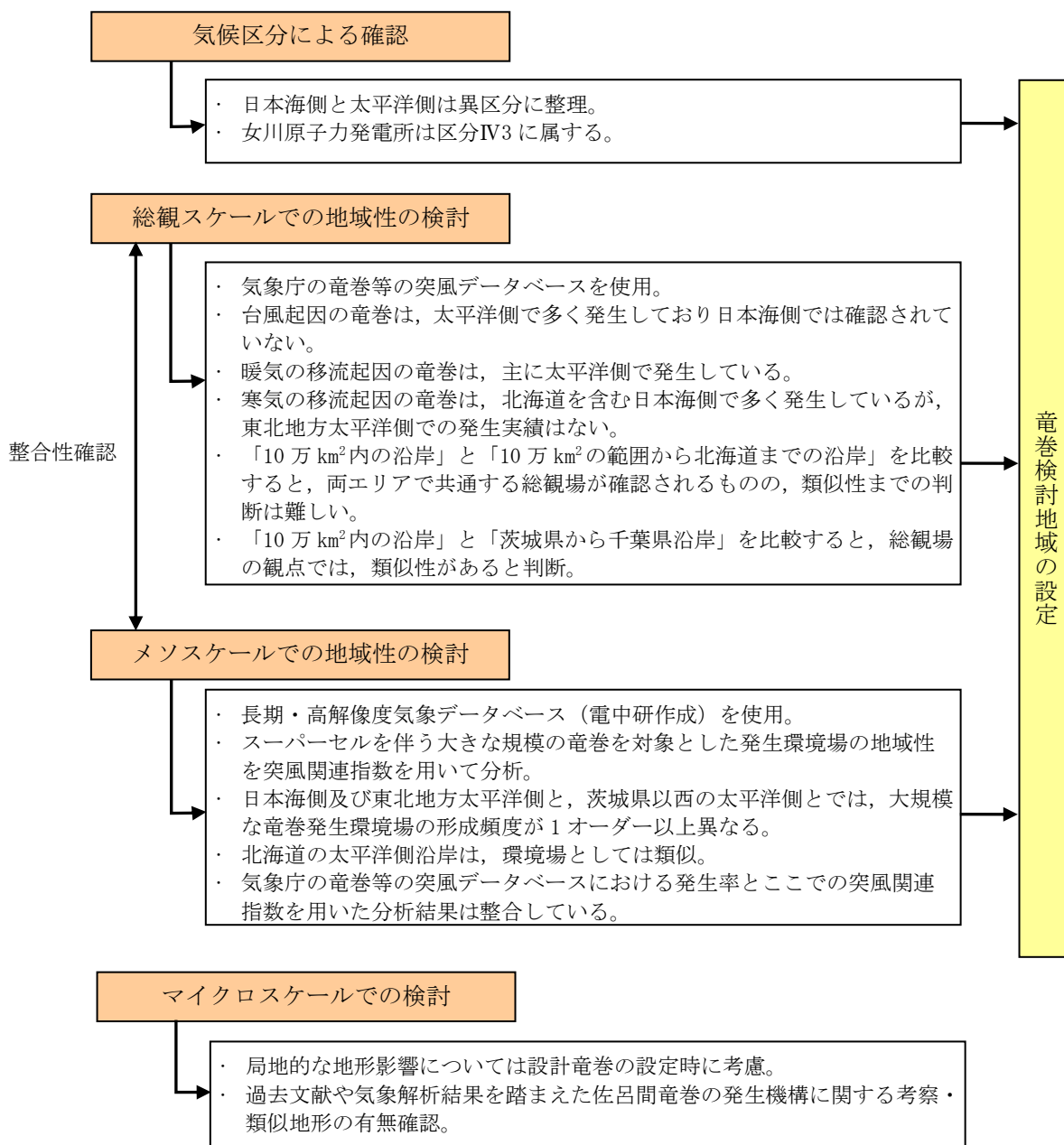
その上で、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説」の考え方に基づき、竜巻発生要因となる気象条件(総観場)を確認する観点から、(2)の分析により地域特性を確認した。

また、一般的に大気現象は時空間スケールの階層構造が見られ、ある大気現象はスケールの小さな現象を内包しているため、大きな竜巻の発生要因となる環境場の形成のし易さを把握する観点から、(3)の分析により、竜巻の発生スケールに近いメソスケールの気象場が有する地域性と齟齬がないことについても確認した。竜巻とその関連気象の時空間スケールを第2.2.1-1図に、検討の流れを示したフローを第2.2.1-2図に示す。

なお、(3)の突風関連指数を用いた分析は、“大きな竜巻の発生に対する大気場の必要条件”を把握する上で有効であることを踏まえ、(3)の分析結果のみで竜巻検討地域を設定するものではなく、設定した竜巻検討地域の妥当性確認するために用いている。



第2.2.1-1図 竜巻とその関連気象の時空間スケール



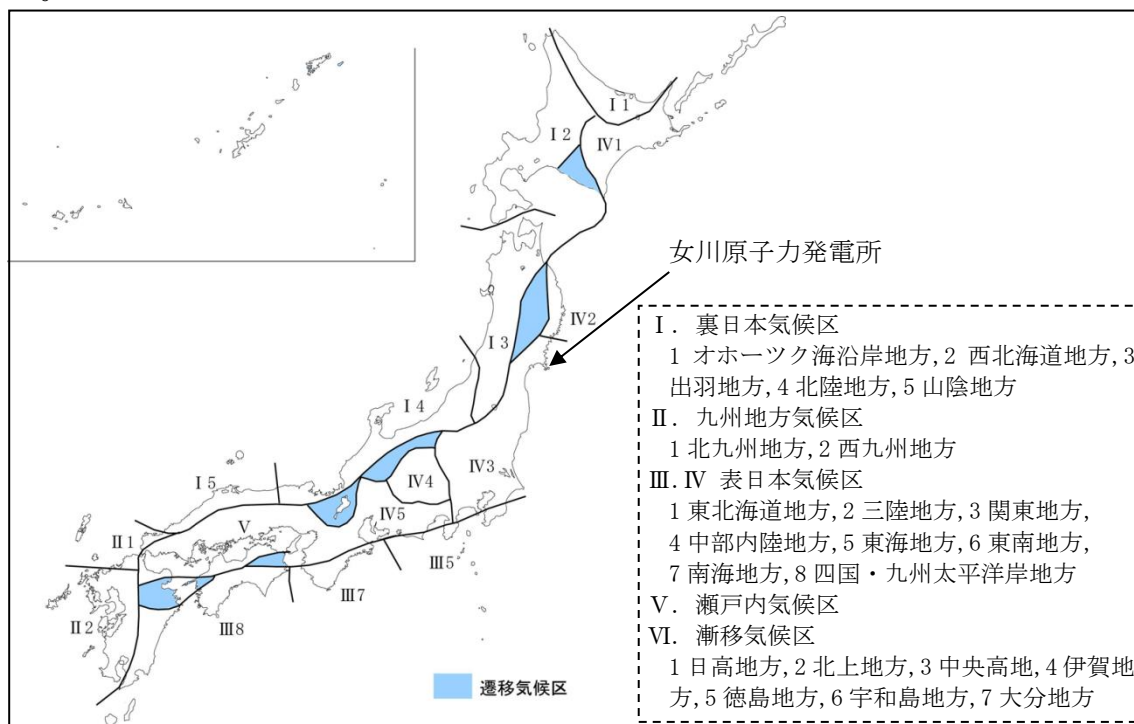
第 2.2.1-2 図 竜巻検討地域の検討フロー

## 2.2.2 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、第2.2.2-1図に示す日本の気候区分において、区分IV3に属している。

区分IV3の沿岸部は、およそ宮城県から千葉県九十九里町までの広範囲な太平洋側をカバーする区域となっている。

また、ガイドにおいては、日本海側と太平洋側は気象条件が異なることが例示されており、気候区分においても日本海側と太平洋側は異なる区分であるとされている。



出展：関口武「日本の気候区分」東京教育大学地理学研究所報告（1959）

第2.2.2-1図 日本の気候区分

## 2.2.3 総観場の分析に基づく地域特性の検討

### 2.2.3.1 総観場ごとのFスケール別竜巻発生分布

気象庁の竜巻等の突風データベース<sup>\*</sup>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8種に再編し、発生分布の特徴を分析した。第2.2.3.1-1表に総観場の分類法と発生分布の特徴、第2.2.3.1-1図に全国で発生した竜巻の総観場ごとのFスケール別竜巻発生分布、第2.2.3.1-2図にF2以上の竜巻発生箇所を示す。

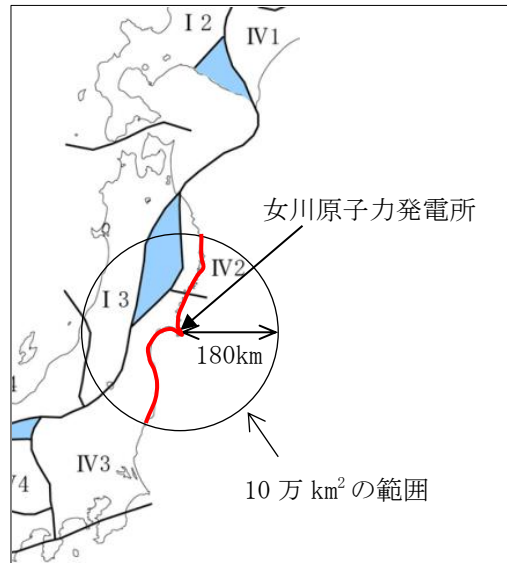
<sup>\*</sup> 気象庁 竜巻等の突風データベース (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>)

### 2.2.3.2 総観場を用いた分析対象範囲

ガイドでは、竜巻検討地域を設定する際に、IAEA の基準<sup>※</sup>が参考になるとされており、およそ 10 万 km<sup>2</sup> の範囲を目安とすることが挙げられている。

日本海側は太平洋側と気候的にも異なることを踏まえ、女川原子力発電所を中心とする 10 万 km<sup>2</sup> (半径 180km) の範囲の太平洋側沿岸を確認したところ、第 2.2.3.2-1 図に示すとおり、気候区分IV3 及びIV2 にまたがった範囲が該当する。

日本海側と太平洋側の気候的な類似性が無いことについては、以下に示す総観場の観点からも確認を行っている。



第 2.2.3.2-1 図 女川原子力発電所を中心とする 10 万 km<sup>2</sup> の範囲

竜巻検討地域として、第 2.2.3.2-1 図に示した 10 万 km<sup>2</sup> (半径 180km) の範囲が適切であるか、又はさらに広げたエリアを設定することが適切であるかについて、総観場を用い、その類似性を確認することで評価を行う。

総観場の確認において、10 万 km<sup>2</sup> の範囲の北側に対しては、北海道の竜巻集中地域を含む襟裳岬までを対象とした。また、南側については、太平洋側における気候区分IV3 のエリアに当たる千葉県九十九里町までを対象とした。

第 2.2.3.2-2 図に各エリア毎の総観場の確認結果を示す。

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

### 2.2.3.3 総観場の分析結果

全国で発生した竜巻の総観場ごとの F スケール別竜巻発生分布 (第 2.2.3.1-1 図) より、以下に示す①～③の地域性を確認した。また、総観場ごとの確認結果を第 2.2.3.3-1 表に示す。

- ① 台風起因の竜巻は、太平洋側で多く発生しており日本海側では確認されていない。規模的には、関東以西の太平洋側では F3 を含む規模の大きな

竜巻が発生しているが、東北地方太平洋側ではF1が1件発生しているのみである。台風は北上するにつれて衰弱しやすい特性を有しているため、この特徴が発生傾向にも現れている（第2.2.3.1-1図(a)）。

- ② 暖気の移流起因の竜巻は、主に太平洋側で発生している。規模的には、関東以西の太平洋側ではF3を含む規模の大きな竜巻が多く発生しているが、東北地方太平洋側ではF1が1件発生しているのみである。主に太平洋側で発生している要因としては、太平洋側は暖湿流が大気下層に流入することが多いためと考えられる。特に関東平野では太平洋側から流入する暖気が遮られずに内陸深くまで流入するため、内陸部でも発生が集中している（第2.2.3.1-1図(b)）。

なお、類似の特徴は米国におけるロッキー山脈とアパラチア山脈との間の竜巻街道（トルネード・アレー）と呼ばれる領域においても確認されている（添付資料2.7参照）。

- ③ 寒気の移流起因の竜巻は、北海道を含む日本海側で多く発生しているが、東北地方太平洋側での発生実績はない。北海道を含む日本海側で発生数が多い要因としては、北からの寒気が山岳等に遮られずに直接流入するためと考えられる（第2.2.3.1-1図(c)）。

また、地域ごとの竜巻発生総観場及び寄与割合の比較結果（第2.2.3.2-2図）より、以下の内容を確認した。

- ④ 「日本海側」と「太平洋側」を比較すると、総観場の分布が大きく異なっており、この点からも気候区分として差別化することが可能と考えられる（第2.2.3.2-2図(a), (b)）。
- ⑤ 「10万km<sup>2</sup>内の沿岸」と「10万km<sup>2</sup>の範囲から北海道までの沿岸」を比較すると、両エリアで暖気の移流や局地性など共通する総観場が確認できるが、竜巻の発生実績が少ないエリアということもあり、総観場の観点から明確に差別化はできない（第2.2.3.2-2図(c), (d)）。
- ⑥ 「10万km<sup>2</sup>内の沿岸」と「茨城県から千葉県沿岸」を比較すると、竜巻の発生数は少ないものの「10万km<sup>2</sup>内の沿岸」で確認された総観場全てが、「茨城県から千葉県沿岸」において確認できるため、類似性のあるエリアとして取り扱うことが適切と考えられる（第2.2.3.2-2図(d), (e)）。

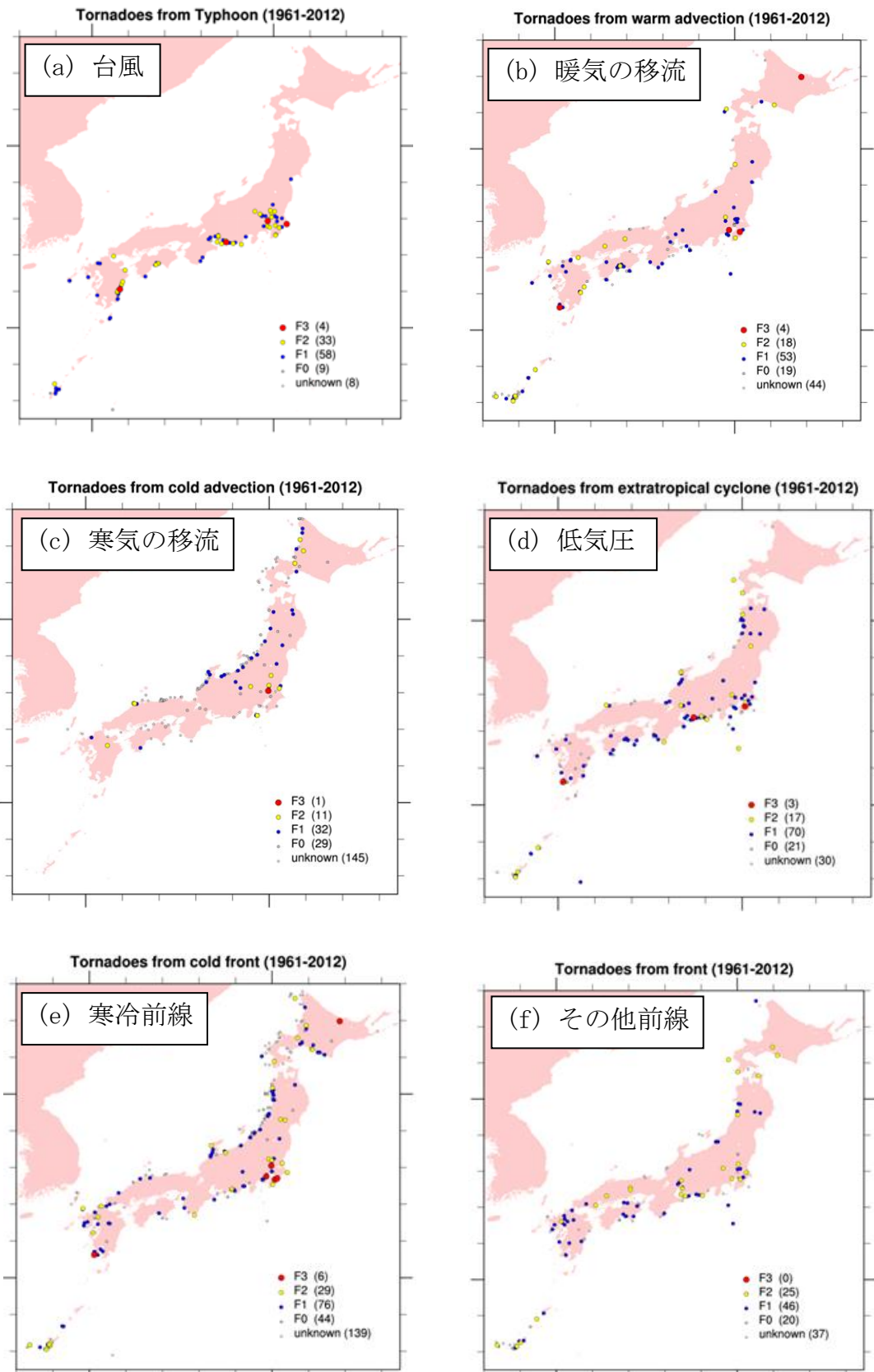
以上の分析結果より、発電所の立地地域より北側のエリア（竜巻集中地域を含んだ北海道までの沿岸）は、総観場的に地域性が異なると明確に差別化することはできず、また、南側のエリア（千葉県までの沿岸）については、発生数は少ないものの総観場的に類似性のあるエリアとして考慮する必要があると判断した。

よって、北海道から千葉県までの太平洋側沿岸を竜巻検討地域として設定することが適切と判断した。

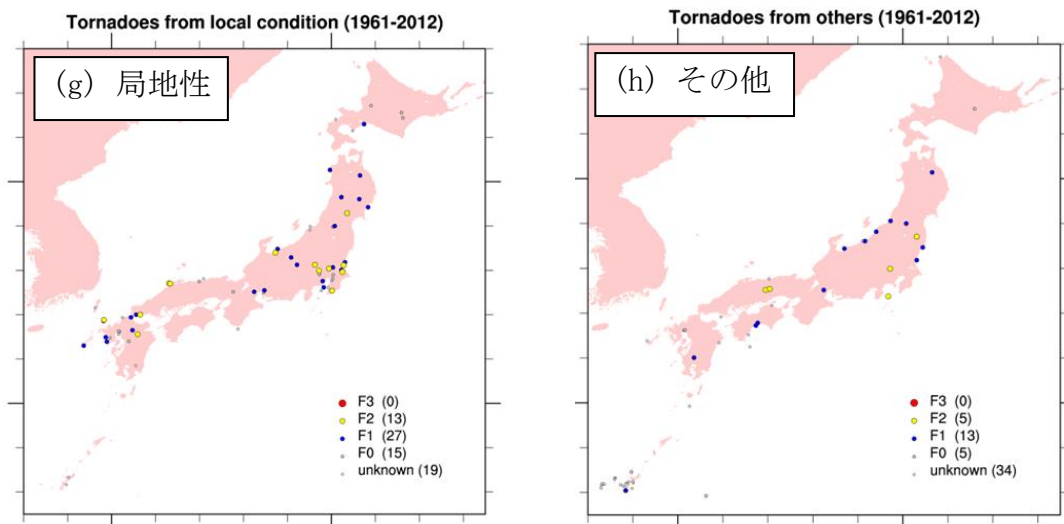
第 2.2.3.1-1 表 総観場の分類と特徴

総観場	気象庁 DB の分類	特徴
寒気の移流	寒気の移流	大気上層に寒気が流入することで大気が不安定になり竜巻の親雲を形成する環境場。下層に暖気の移流があると、親雲の更なる発達を促すため、F3 竜巻も見られる。
低気圧	熱帯低気圧(台風以外)、南岸低気圧、日本海低気圧、二つ玉低気圧、東シナ海低気圧、オホーツク海低気圧、その他(低気圧)	寒気と暖気が接し傾圧不安定による組織的な雲を形成する環境場。南からの下層の暖湿流がある場合、親雲の更なる発達を促すため、F3 竜巻も見られる。
寒冷前線	寒冷前線、気圧の谷	大気上層への寒気の移流と、それにとまなう組織的な前線の形成により親雲を形成する環境場。南からの下層の暖湿流がある場合、親雲の更なる発達を促すため、F3 竜巻も見られる。
その他前線	温暖前線、閉塞前線、停滞前線、梅雨前線、前線帯、不安定線、その他(前線)	寒冷前線以外の前線により親雲を形成する環境場。暖湿流が主要因となる場合が多い。
局地性	局地性擾乱、雷雨(熱雷)、雷雨(熱雷を除く)、地形効果、局地性降水	地域的な大気循環により親雲を形成する環境場。親雲の形成に地形的な影響も受けることも多い。
暖気の移流	暖気の移流、湿舌	大気下層に暖湿流が流入することで竜巻の親雲を形成する環境場。上層の寒気の移流がある場合、親雲の更なる発達を促す。
台風	台風	台風により竜巻の親雲を形成する環境場。台風中心の北東方向では、南東からの強い暖気移流があるため、非常に活発な積乱雲が発生しやすいため、F3 竜巻も多くみられる。
その他	移動性高気圧、中緯度高気圧、太平洋高気圧、大陸高気圧、オホーツク海高気圧、帯状高気圧、その他(高気圧)、季節風、大循環異常、その他	上記に当てはまらない環境場。気圧配置の変わり目が多いが、全体の個数は少ない。

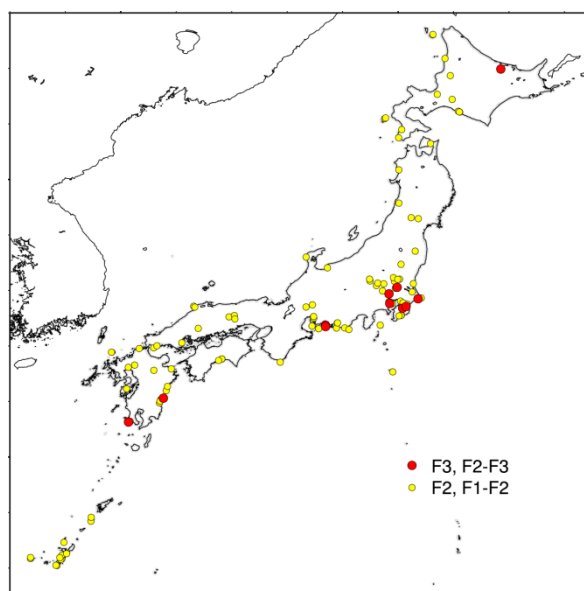




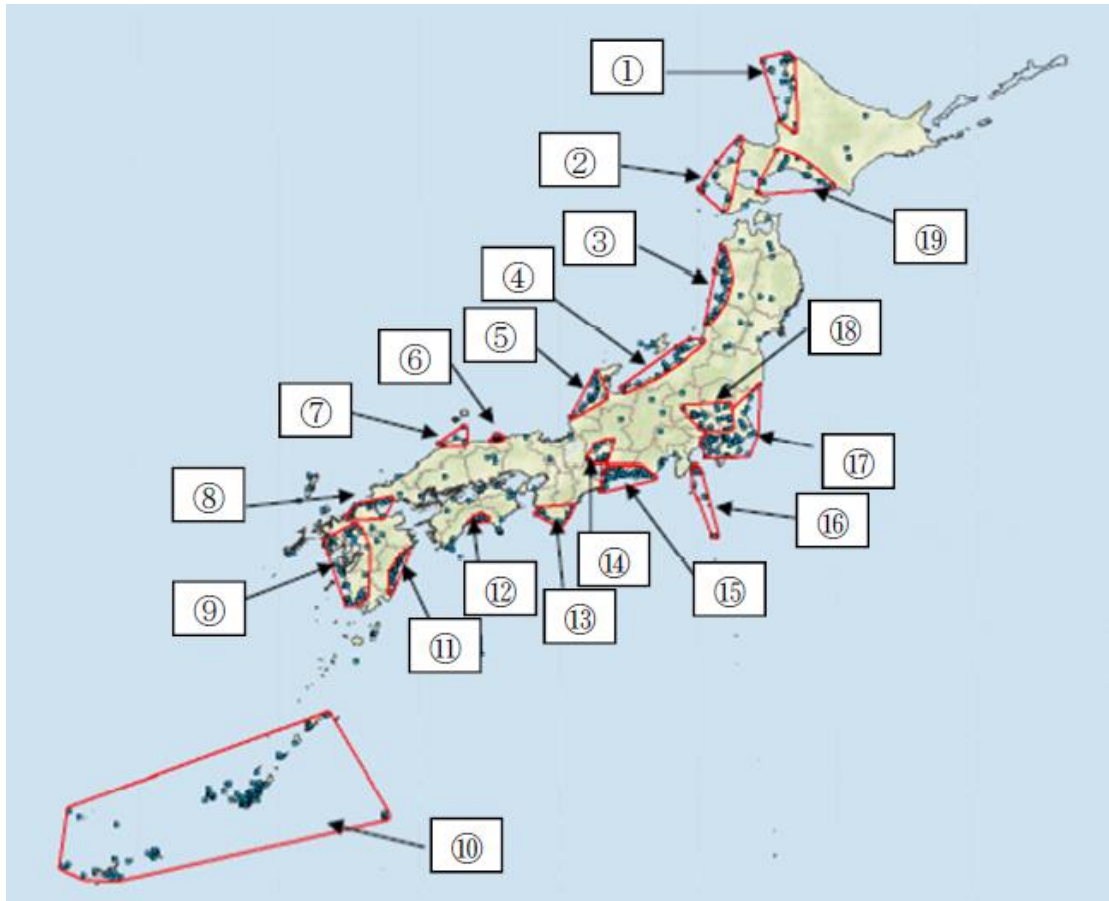
第 2.2.3.1-1 図 総観場ごとの F スケール別竜巻発生分布 (1/2)



第 2.2.3.1-1 図 総観場ごとの F スケール別竜巻発生分布 (2/2)



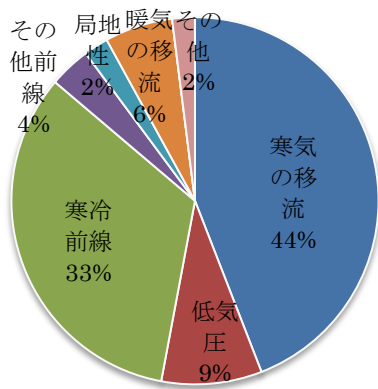
第 2.2.3.1-2 図 F2 以上の竜巻発生箇所  
(気象庁「竜巻等の突風データベース」をもとに作成)



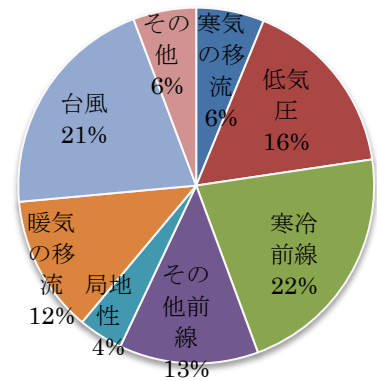
第 2. 2. 3. 1-3 図 竜巻集中地域  
(JNES「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説」より引用)

第 2.2.3.3-1 表 総観場毎の竜巻発生分布の傾向

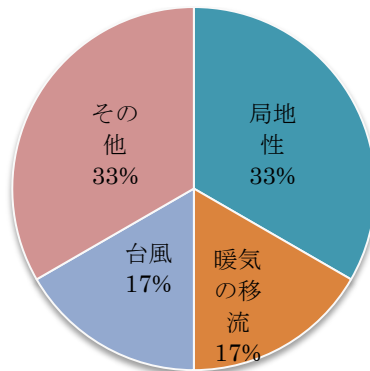
総観場	傾向
台風	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 太平洋側で多く発生しており日本海側では確認されていない。規模的には、関東以西の太平洋側では F3 を含む規模の大きな竜巻が発生しているが、東北地方太平洋側では F1 が 1 件発生しているのみである。</li> <li>・ 関東地方，中部地方の太平洋側及び九州地方の太平洋側では発生が集中しており，これらの地域は太平洋側の竜巻集中地域に整理されている（第 2.2.3.1-3 図参照）。</li> <li>・ 台風は北上（低緯度から中高緯度に移動）するに従い減衰するため，東北地方や北海道など，北部での発生数は少なく，規模も小さくなると考えられる。本州に接近・上陸する台風の減衰は，地表面摩擦の増大による風速の減衰に加え，海水温が低下するため，台風の維持，発達に必要な，海から供給される水蒸気量が減少し減衰する。</li> </ul>
暖気の移流	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 日本海側での発生数は少なく，主に太平洋側の関東以西で発生している。</li> <li>・ 規模的には，関東以西の太平洋側では F3 を含む規模の大きな竜巻が多く発生しているが，東北地方太平洋側では F1 が 1 件発生しているのみである。</li> <li>・ 太平洋側では，暖湿流が大気下層に流入することが多いため，関東以西で発生数が多くなる。特に関東平野では太平洋側から流入する暖気が遮られずに内陸深くまで流入するため，内陸部でも発生が集中している。</li> </ul>
寒気の移流	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 北海道を含む日本海側で多く発生しているが，東北地方太平洋側での発生実績はない。</li> <li>・ 日本海側は北からの寒気が山岳等に遮られずに直接流入するため，発生数が多いと考えられる。</li> </ul>
低気圧	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 主に太平洋側の関東以西で多く発生している。</li> <li>・ 太平洋側では，大気下層に流入する南からの暖気の移流と上層の寒気が親雲の更なる発達を促すため，関東以西の太平洋側で発生頻度が高くなる。</li> </ul>
寒冷前線	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 日本海側の沿岸部及び関東以西の太平洋側で多く発生している。</li> <li>・ 太平洋側では，大気下層に流入する南からの暖気の移流による影響も寄与するため，太平洋側で強い竜巻の発生数が多くなる。</li> </ul>
その他前線	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 日本海側での発生数は少なく，主に太平洋側の関東以西で多く発生しており，関東平野で発生が集中している。</li> <li>・ 太平洋側では，大気下層に流入する南からの暖気の移流による影響も寄与するため，関東の平野部では発生数が多くなる。</li> </ul>
局地性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地形的な影響によるものであり，全国で発生している。</li> </ul>
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 全国的に発生数は少なく，地域差はみられない。</li> </ul>



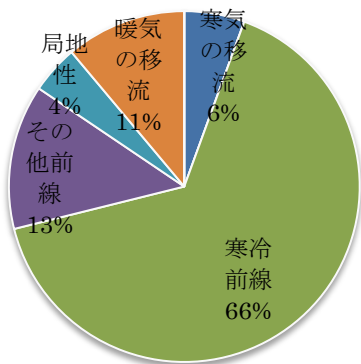
(a) 日本海側沿岸(192 個)



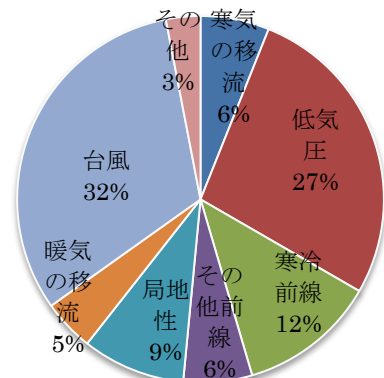
(b) 太平洋側沿岸(337 個)



(d) 10 万 km<sup>2</sup> 内の沿岸(3 個)



(c) 北海道から 10 万 km<sup>2</sup> 範囲  
までの沿岸(15 個)



(e) 茨城県から千葉県\*の沿岸(11 個)  
\*房総半島を横切る気候区分IV3の区分線まで

( )は竜巻個数を示す

第 2.2.3.2-2 図 地域ごとの竜巻発生総観場及び寄与割合の比較

## 2.2.4 突風関連指数に基づく地域特性の検討

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

### 2.2.4.1 突風関連指数を用いた竜巻予測の技術について

竜巻の主な発生メカニズムは、二つに大別されると考えられている。一つは局地的な前線（寒気団と暖気団との境界線）に伴って生じた渦が上昇流によって引き伸ばされて竜巻となるもので、比較的寿命が短く強い竜巻になりにくいとされている。

もう一つは「スーパーセル」と呼ばれる、回転する継続した上昇気流域（メソサイクロン）を伴った非常に巨大な積乱雲に伴って竜巻が発生するものである。スーパーセル内では、下降流域と上昇流域が分離されるため、巨大な積乱雲が長時間持続する傾向にある。近年、ドップラーレーダによる解析を基にした竜巻の事例調査が進んだことにより、大きな被害をもたらす強い竜巻の多くはスーパーセルに伴って発生することが判明している。現状、竜巻を直接予測することは困難であるが、大規模竜巻の発生と関係が深いスーパーセルの発生環境を予測することにより竜巻発生を間接的に予測できる。以下に、竜巻発生予測について、突風関連指数を適用している例を示す。

#### 気象庁での突風関連指数の適用状況

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

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

- ・気象ドップラーレーダ観測によるメソサイクロン（親雲）検出技術
- ・メソ数値予測（MSM）を用いた突風危険指数の算出技術

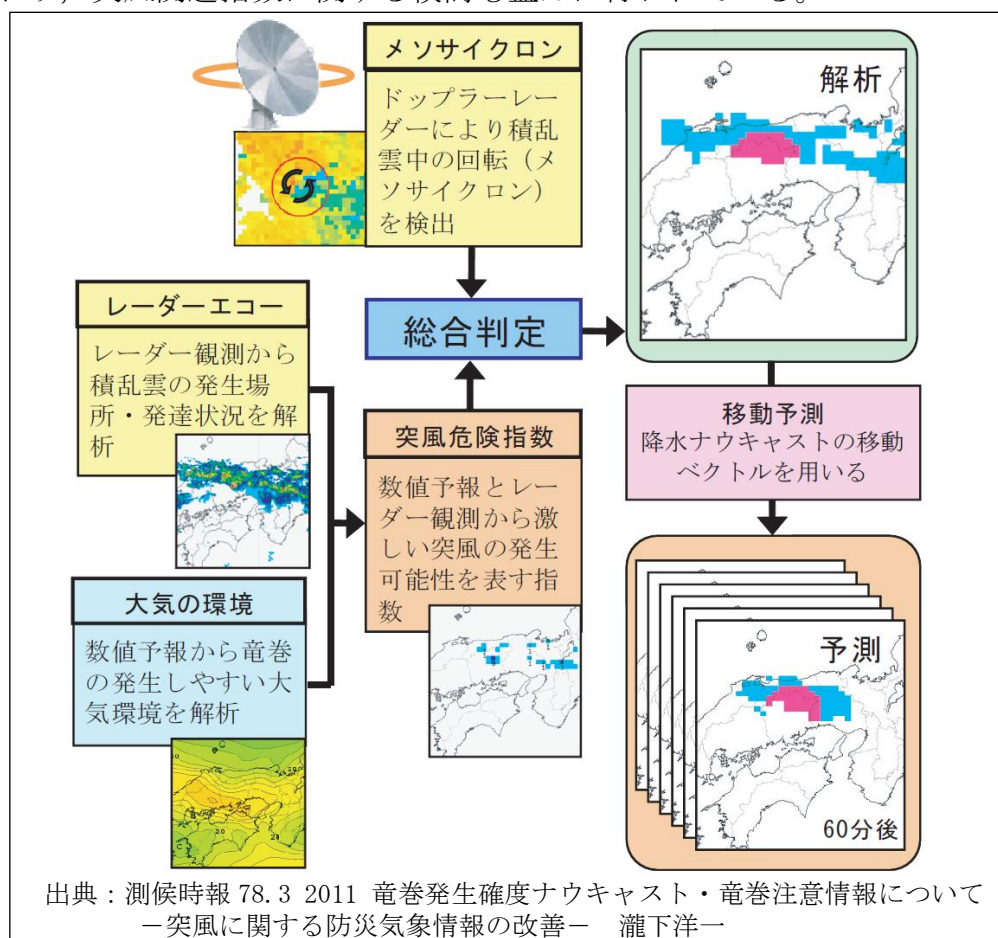
竜巻発生確度ナウキャストにおけるデータ等の流れを第2.2.4.1-1図に示す。竜巻発生確度ナウキャストは最新の観測・解析データをもって短いリードタイムの予

測を迅速に行うことが主目的のため、レーダプロダクトに重みを置いている。また、小さな竜巻も見逃しなく予測できるような説明変数として突風関連指数を選択している。

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

### 海外での突風関連指数の適用状況

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



第 2.2.4.1-1 図 竜巻発生確度ナウキャストの解析・予測技術

### 2.2.4.2 検討に用いる突風関連指数について

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

第 2.2.4.2-1 図に竜巻の発生メカニズムを示す。スーパーセルが発生しやすい環境場として、大気下層の鉛直シア（異なる高度間での風向・風速差）と、強い上昇気流を起こすきっかけとしての不安定な大気場が必要である。本検討では、大気の

不安定度を表す指標として「CAPE」、鉛直シアに伴って発生する水平渦度が親雲に取り込まれる度合いを表す指標として「SReH」を採用し、両者の指標が同時に高くなる頻度について、地域的な特徴を確認する分析を行った。また、両者を掛け合わせた指標である EHI による分析も行い、SReH・CAPE の同時超過頻度分析との比較を行った。

SReH, CAPE, EHI については、竜巻の発生実態を解明する研究において国内外で広く利用され、竜巻発生環境場との関連づけ等の知見が多く蓄積されており、気象庁での竜巻予測に用いる突風関連指数の中でも主な指標として紹介されているため、本検討を行う上でも妥当なものと考えられる。

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



風向・風速差による渦の発生      上昇気流の発生      竜巻の発生

第 2. 2. 4. 2-1 図 竜巻の発生メカニズム

(1) SReH (Storm Relative Helicity : ストームの動きに相対的なヘリシティ)  
 風向・風速差により発生した渦度が親雲に取り込まれる度合であり、値が大きいほど、積乱雲はスーパーセルに発達しやすい (第2. 2. 4. 2-2図)。

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

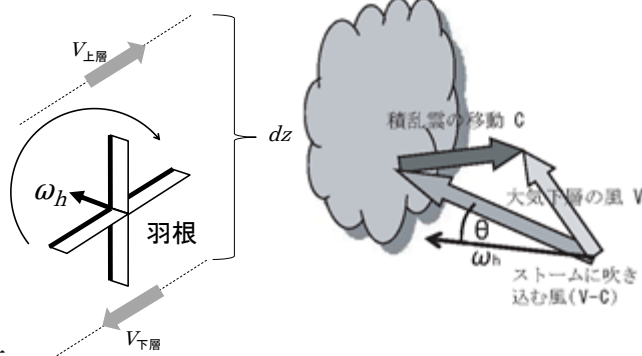
$\mathbf{V}$  : 水平風速ベクトル

$\mathbf{C}$  : ストームの移動速度

$\boldsymbol{\omega}$  : 鉛直シアに伴う水平渦度



「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



積乱雲の移動と積乱雲に吹き込む風

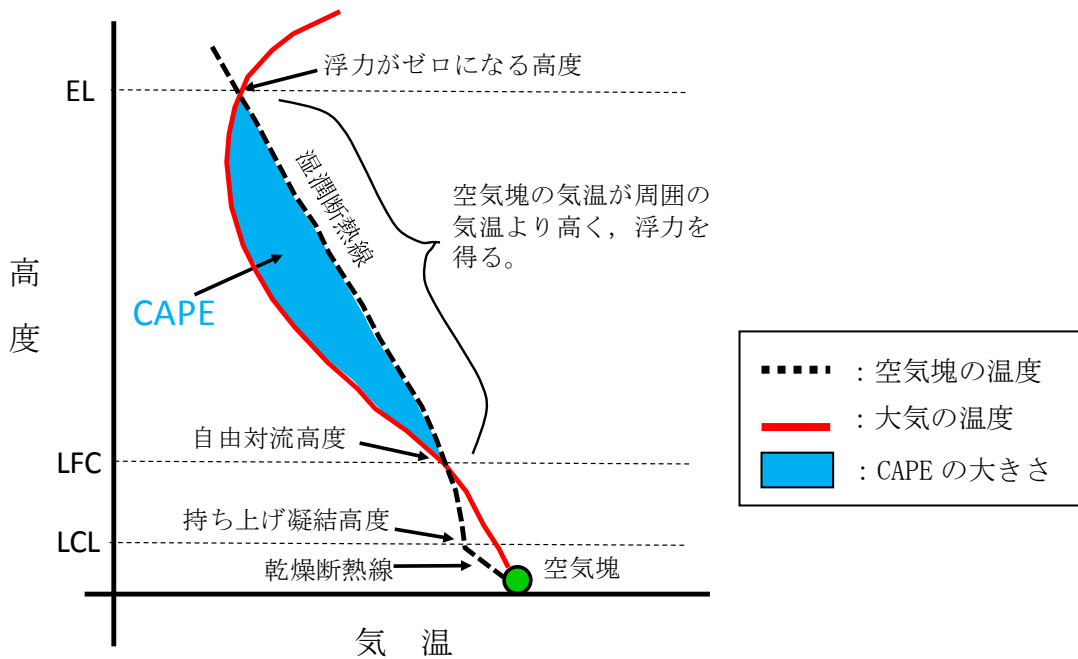
第 2. 2. 4. 2-2 図 SReH の概念図



(2) CAPE (Convective Available Potential Energy : 対流有効位置エネルギー)  
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 (第 2.2.4.2-3 図)。

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

$g$  : 重力加速度  
 $\theta_e$  : ストーム周囲の相当温位  
 $\theta'_e$  : 持ち上げ空気塊の相当温位  
 $dz$  : 鉛直方向の層厚



第 2.2.4.2-3 図 CAPE の算出概念

(3) EHI (Energy Helicity Index)

SReH及び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単独又は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。

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

(参考) 相当温位

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

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

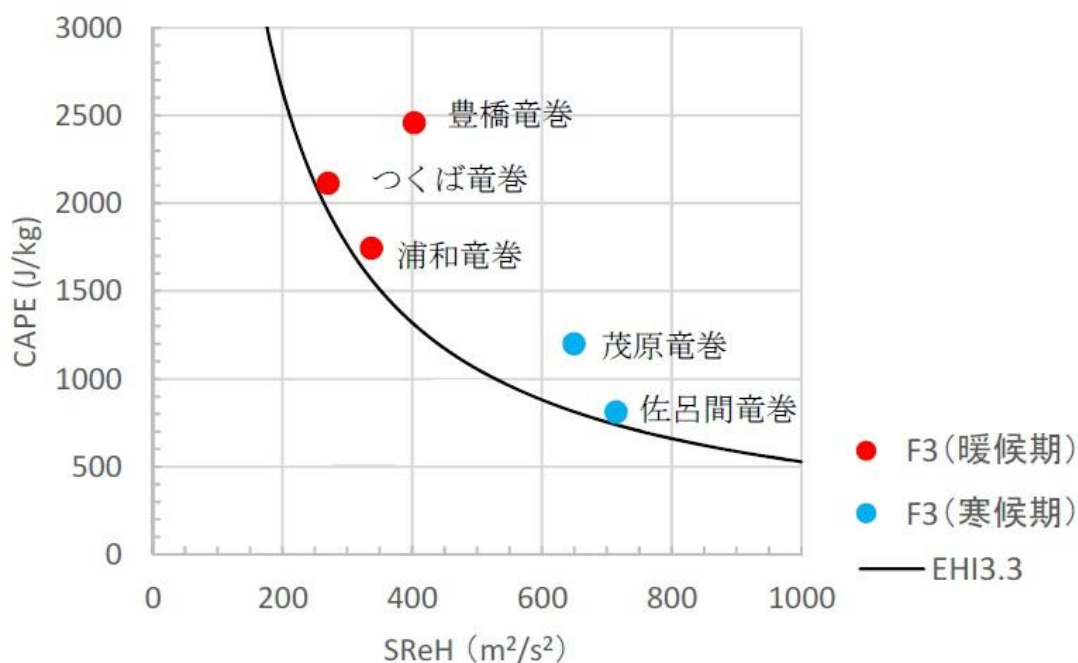
相当温位は、空気塊に含まれる水蒸気の持っている潜熱 (水蒸気が凝結する際

に空気塊の温度が上昇)の影響も考慮された温位である。

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

### 2.2.4.3 突風関連指数の地域特性

これまでに発生した F3 竜巻に対する突風関連指数の分析結果を第 2.2.4.3-1 図に示す。WRF モデル (Weather Research and Forecasting model) と呼ばれる数値気象モデルを用いて当時の気象場を解析 (再現) し, それをもとに突風関連指数を算出している。第 2.2.4.3-1 図をみると, 季節によって CAPE の値が大きく異なるものの, F3 竜巻事例では共通して SReH と CAPE の両方が大きくなる傾向が見られた。



第 2.2.4.3-1 図 F3 竜巻における SReH と CAPE の関係

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

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

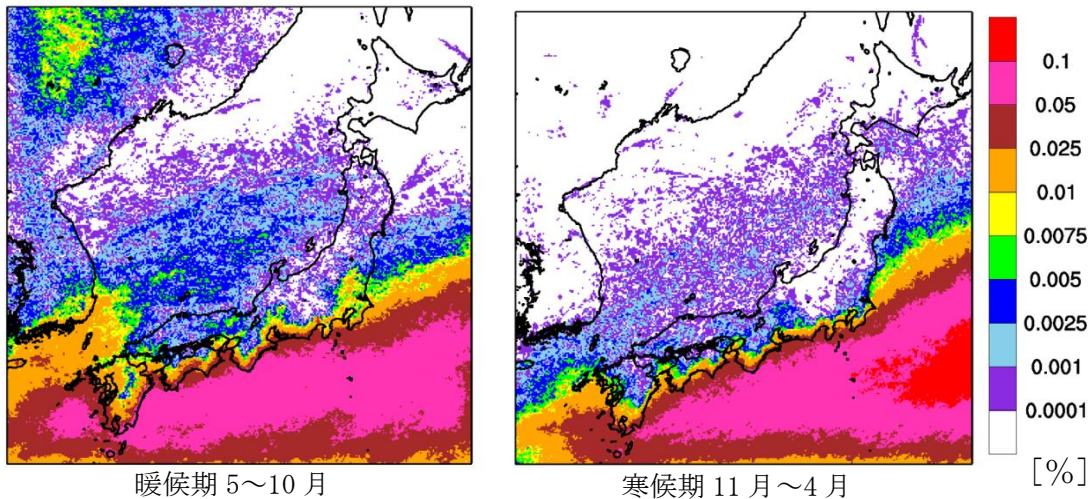
#### 2.2.4.4 突風関連指数の同時超過頻度による地域性の検討

SReH と CAPE の閾値については、第 2.2.4.4-1 図の F3 竜巻のデータをもとに、実際の竜巻発生地点と対応するよう、下記のように設定した。また、CAPE の閾値については、緯度・季節で絶対値が大きく変わるため、5 月～10 月（暖候期）及び 11 月～4 月（寒候期）に分けて閾値を設定した。

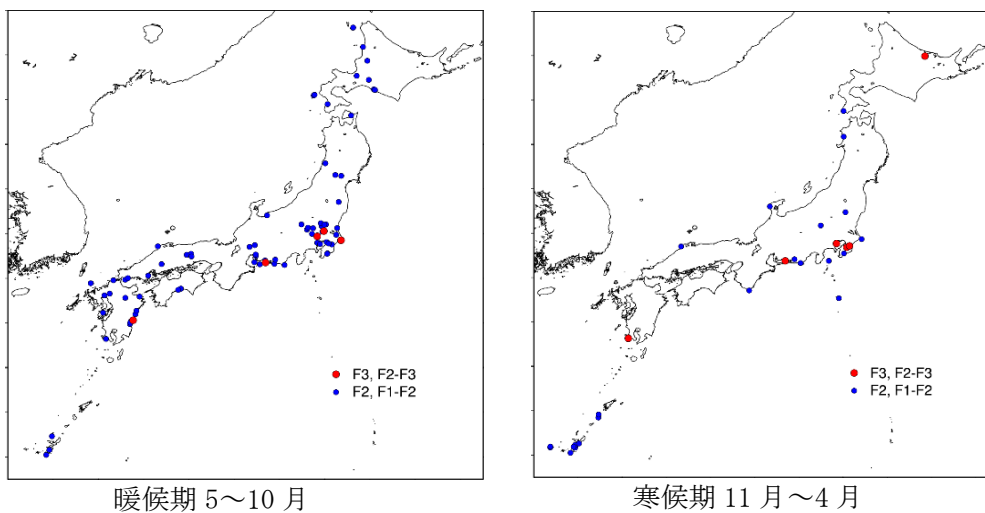
[5 月～10 月（暖候期）] SReH :  $250\text{m}^2/\text{s}^2$ , CAPE :  $1600\text{J}/\text{kg}$

[11 月～4 月（寒候期）] SReH :  $250\text{m}^2/\text{s}^2$ , CAPE :  $600\text{J}/\text{kg}$

第 2.2.4.4-1 図は、1961 年～2010 年までの 50 年間にわたって 1 時間毎に解析されたデータをもとに、SReH と CAPE の同時超過頻度分布をマップ化したものである。また、気象庁「竜巻等の突風データベース」で確認された F2-F3 竜巻及び F3 竜巻の発生箇所を第 2.2.4.4-2 図に示す。



第 2.2.4.4-1 図 F3 規模以上を対象とした SReH, CAPE 同時超過頻度分布



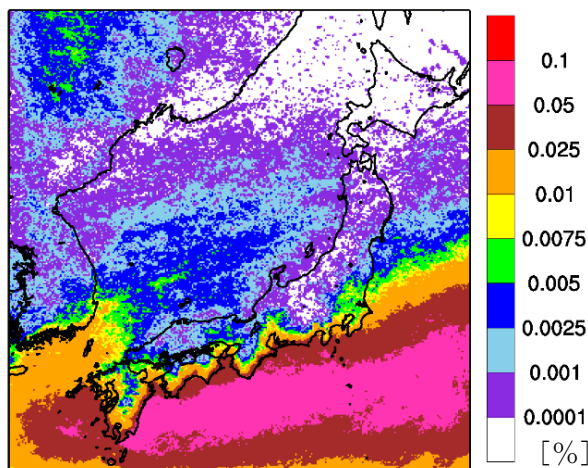
第 2.2.4.4-2 図 F2 規模以上の発生箇所  
(気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成)

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

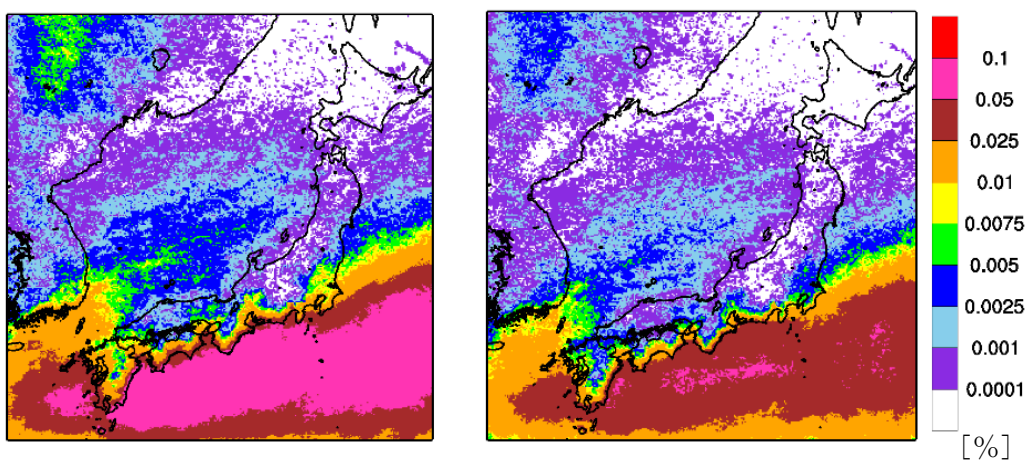
EHI の超過頻度分布をマップ化したものについても第 2.2.4.4-3 図に示す。SReH, CAPE の同時超過頻度分布（第 2.2.4.4-1 図）に対応した結果となっており、EHI を用いて通年レベルの評価を行った場合でも地域特性がはっきり表れている。

以上により、CAPE, SReH, EHI について F3 以上を想定した特定の閾値を設けた場合の分析を実施したが、突風関連指数については不確実性が存在するため、EHI:3.0 及び 3.6 を設定した場合についても同様の地域性が現れることを確認した（第 2.2.4.4-4 図）。ただし、閾値を大きくした場合、実際に F3 が発生した関東平野内を包含できなくなる。また閾値を小さくした場合、小さな竜巻が発生する環境場をカウントすることから、地域性は薄れていくことがわかる。

なお、CAPE, SReH についても同様の感度解析を実施しており、同様の傾向が得られることを確認した。【添付資料 2.2 付録 E】



第 2.2.4.4-3 図 EHI の超過頻度分布（閾値 3.3）



閾値 3.0

閾値 3.6

第 2.2.4.4-4 図 EHI の超過頻度分布

突風関連指数による、大規模な竜巻形成につながる環境場の発生頻度分析を行った結果、福島県以北の東北地方太平洋側及び日本海側は、茨城県以西の太平洋側沿岸よりも1~2オーダー以下の頻度となることが分かった。

スーパーセルに伴って発生する大規模な竜巻形成につながる環境場の発生頻度分布の観点からも、東北地方太平洋側及び日本海側は、茨城県以西の太平洋側と地域特性の違いがあることを確認した。

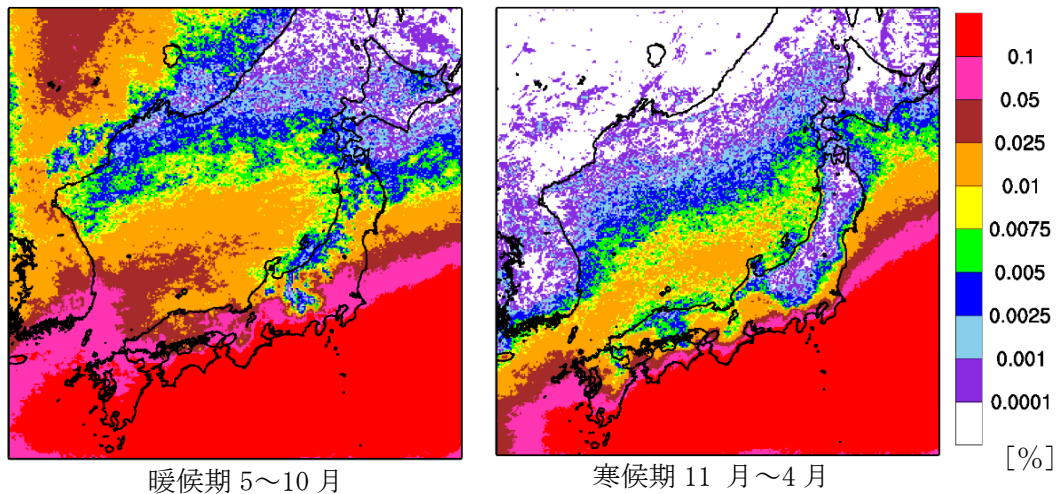
参考として、F2規模の竜巻について同様の検討を行った。閾値の設定はF2規模の竜巻発生時の実績をもとに以下の様に設定した。

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

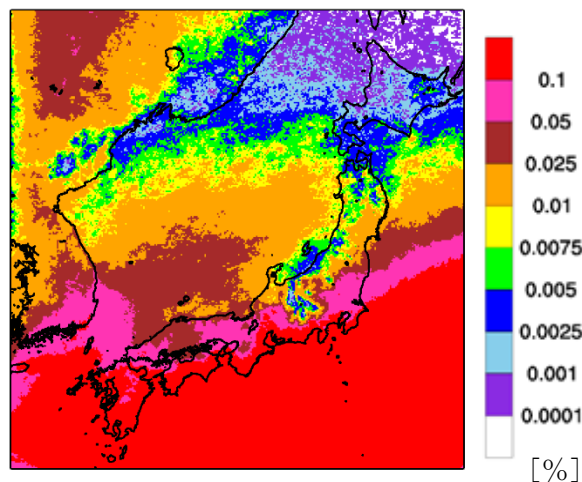
[11月~4月(寒候期)] SReH :  $200\text{m}^2/\text{s}^2$ , CAPE :  $350\text{J}/\text{kg}$

EHI を用いる場合の閾値 EHI : 1.5

SReH, CAPE の同時超過頻度分析の結果を第2.2.4.4-5図に、EHI の超過頻度分布を第2.2.4.4-6図に示す。F3規模以上を対象とした閾値の分析結果に比べ、頻度は全体的に上がったが、概ね同様の傾向が確認できた。



第2.2.4.4-5図 F2規模の竜巻形成につながる環境場の閾値の同時超過頻度分布



第2.2.4.4-6図 EHI の超過頻度分布 (閾値 : 1.5)

F2 規模相当の閾値での同時超過頻度を解析した結果をみても、東北地方太平洋側及び日本海側は、茨城県以西の太平洋側と比較して頻度が低くなっていることが確認できる。

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

#### 2.2.4.5 佐呂間町で発生した竜巻について

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

佐呂間竜巻は、太平洋沿岸で発生した竜巻と比較すると、

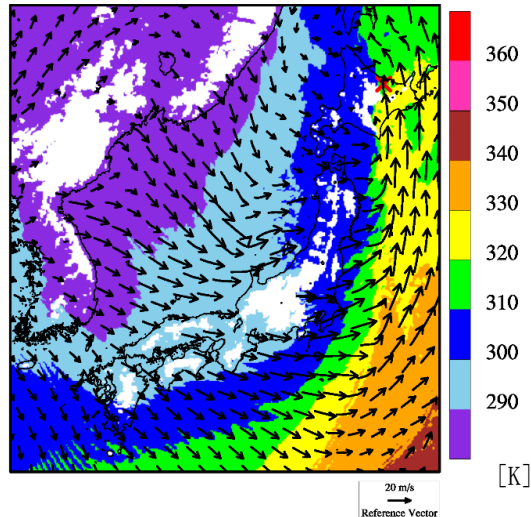
- ・ 国内で唯一内陸部（丘陵地の麓）において発生した竜巻である。
- ・ F3 竜巻としては継続時間（1分）と移動距離（約1.4km）が非常に短かった。

という点で異なっている。

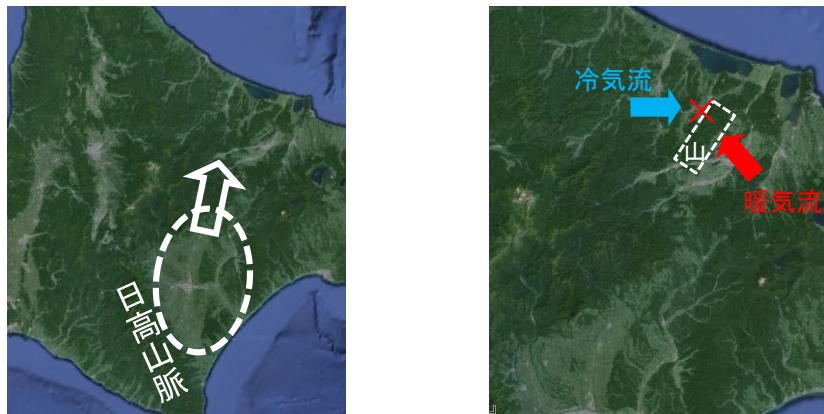
佐呂間竜巻の発生した地域では、太平洋側からの暖湿流が小高い丘を越えて流入するような地形になっており、平野部の冷気流とぶつかることにより大きな上層・下層間の風向差が生じる環境場となっていた（第2.2.4.5-1図、第2.2.4.5-2図）。

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

これらの発生メカニズムについて、第2.2.4.5-3図に模式的に示す。



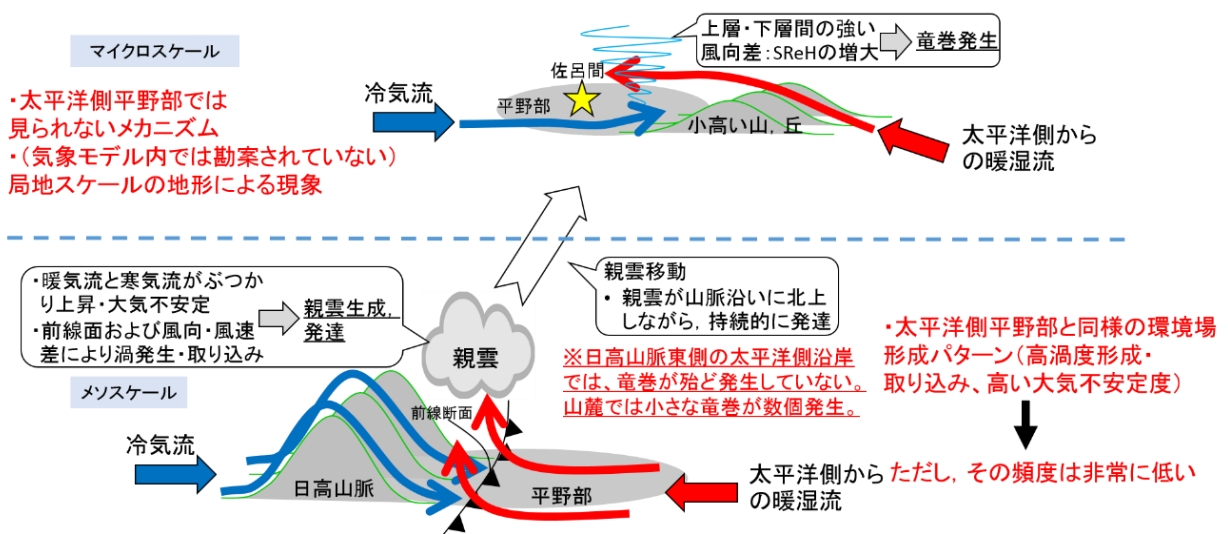
第 2.2.4.5-1 図 佐呂間竜巻発生時の風向・風速及び相当温位の分布（海拔 500m 高度）



親雲の発生位置（点線内）と移動方向

竜巻の発生位置（×）と影響が指摘される山（点線部）

第 2.2.4.5-2 図 親雲の発生箇所と移動方向（左）及び竜巻の発生箇所（右）



第 2.2.4.5-3 図 佐呂間竜巻の発生メカニズムに関する模式図\*

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

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

竜巻影響評価における取り扱いとしては、基準竜巻設定で対象としている地域性・空間スケールよりも局地的な地形影響を受けており、そういった影響については、設計竜巻 $V_D$ の設定時に考慮するのがガイドの趣旨に沿ったものとなる。

考慮する際のポイントは、以下の2点である。

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

その観点で女川原子力発電所周辺の地形を確認すると、以下のように整理できる。

- ・ 太平洋側沿岸部に立地しているため暖湿流が直接流入するが、気流の流入する風上側は海域であるため、尾根状の丘・山は存在しない。

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

#### 2.2.5 竜巻検討地域の妥当性確認結果

総観場ごとのFスケール別竜巻発生分布より、発生する竜巻の規模には地域差があり、また、突風関連指数の分析結果から、東北地方太平洋側は茨城県以西の太平洋側と大規模な竜巻形成につながる環境場の傾向が異なることが確認できた。

一方、総観場による分析では、北海道から千葉県にかけての太平洋側沿岸部は、地域を差別化するには至らない。

以上の分析結果を踏まえれば、女川原子力発電所の竜巻検討地域として、北海道から千葉県にかけての太平洋側沿岸を設定することが妥当と判断した。



## 2.3 基準竜巻の最大風速( $V_B$ )の設定

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

### 2.3.1 過去に発生した竜巻による最大風速( $V_{B1}$ )

女川原子力発電所が立地する東北地方太平洋側は、過去の発生実績及び突風関連指数を用いた分析結果から、大規模な竜巻は発生しにくいものと考えられる。

また、竜巻は観測の歴史が浅いこと及び気象庁における竜巻観測体制の変遷を踏まえると、他の気象観測データに比べ不確かさがあると考えられる。

上記を勘案し、日本で過去に発生した竜巻の最大風速を $V_{B1}$ として設定する。

日本で過去に発生した最大の竜巻はF3スケールである。Fスケールと風速の関係より、F3スケールの風速は70~92m/sであるため、過去に発生した竜巻による最大風速 $V_{B1}$ は、F3スケールの上限値である92m/sとする。

第2.3.1-1表に日本で過去に発生したF3竜巻を示す。

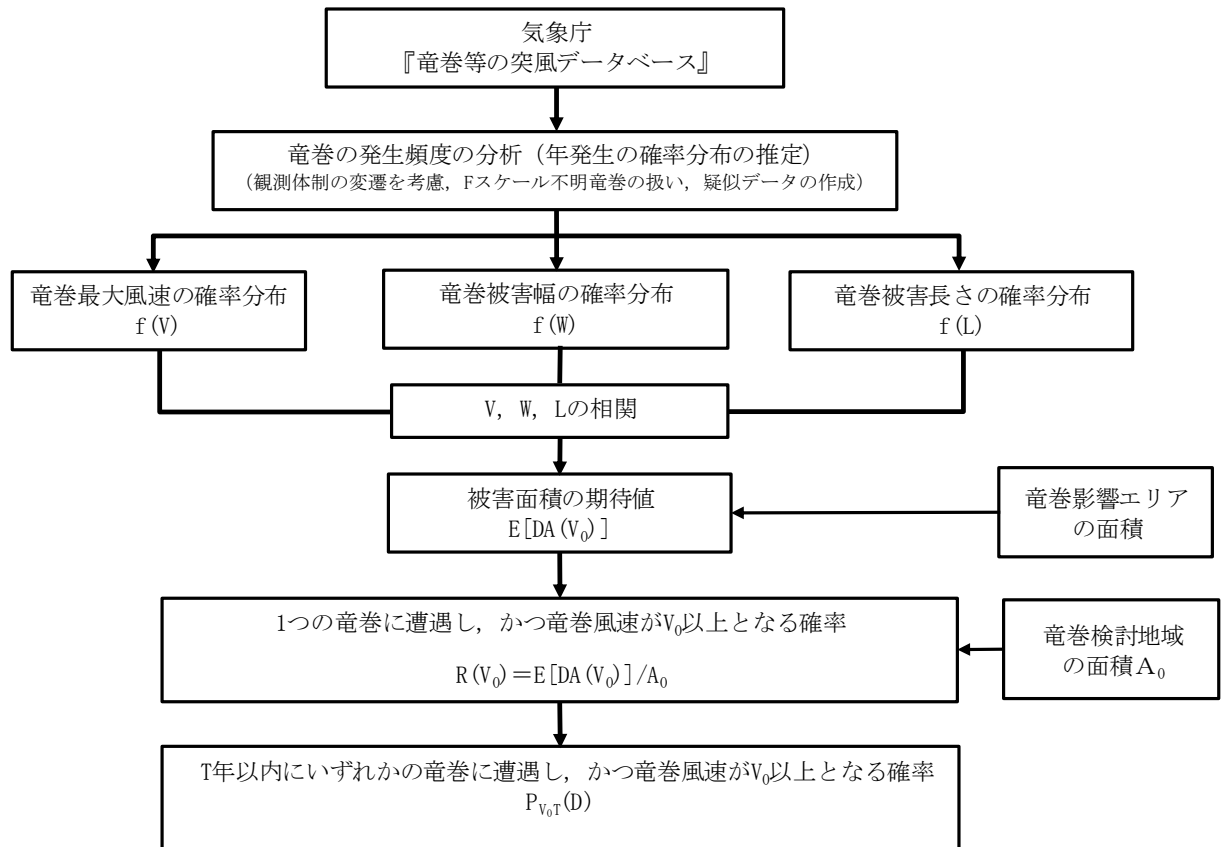
第2.3.1-1表 日本で過去に発生したF3竜巻  
(気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成)

Fスケール	発生日時	発生場所緯度	発生場所経度	発生場所
F3	1971年07月07日07時50分	35度52分45秒	139度40分13秒	埼玉県浦和市
F3	1990年12月11日19時13分	35度25分27秒	140度17分19秒	千葉県茂原市
F3	1999年09月24日11時07分	34度42分4秒	137度23分5秒	愛知県豊橋市
F3	2006年11月07日13時23分	43度58分39秒	143度42分12秒	北海道網走支庁 佐呂間町
F3	2012年05月06日12時35分	36度6分38秒	139度56分44秒	茨城県常総市

### 2.3.2 竜巻最大風速のハザード曲線の求め方【添付資料 2.4 1.】

竜巻最大風速のハザード曲線は、気象庁「竜巻等の突風データベース」より竜巻検討地域における竜巻の観測記録を抽出・評価し、既往の算定法(Wen and Chu 及び Garson et. al)に基づき算定した。具体的な算定方法は、JNES 委託研究成果報告書\*を参考とし、第 2.3.2-1 図に示すフローに従いハザード曲線を算定した。なお、ハザード曲線は、竜巻検討地域の竜巻特性を適切に考慮できる海岸線から海側、陸側それぞれ 5km の範囲内で算定した。加えて、竜巻検討地域において過去に発生した竜巻は、竜巻発生確認数にばらつきがあることを踏まえ、ガイドに基づき、ハザード曲線に保守性をもたせるために竜巻検討地域を海岸線に沿って 1km 範囲ごとに短冊状に細分化した場合のハザード曲線も算定した。

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



第 2.3.2-1 図 竜巻最大風速ハザード曲線の算定フロー

### 2.3.3 海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域の評価

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

### 2.3.4 竜巻の発生頻度の分析【添付資料 2.4 2.】

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、観測体制の変遷による観測データ品質のばらつき（第 2.3.4-1 図参照）を踏まえ、以下の①～④の基本的な考え方に基づいて整理を行った。

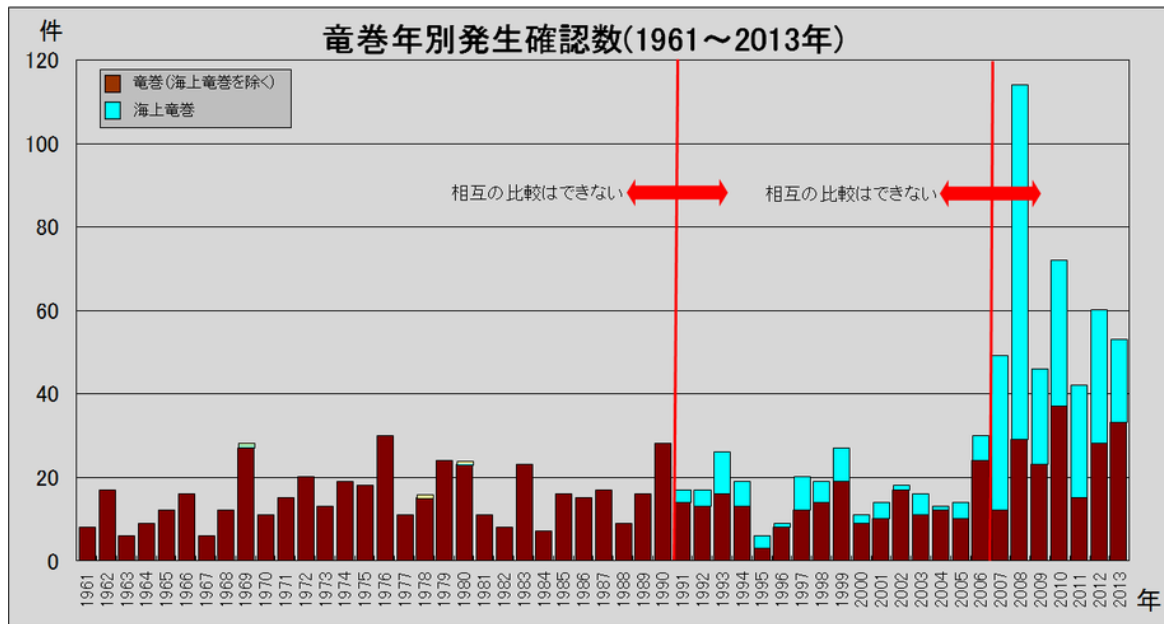
- ① 被害が比較的大きく見逃されることが少ない F2, F3 竜巻については、観測データが整備された 1961 年 1 月以降の全期間の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ② 被害が比較的軽微な F1 竜巻については、観測体制が整備された 1991 年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ③ 被害が小さくて見過ごされやすい F0 及び F 不明竜巻は、観測体制が強化された 2007 年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ④ 51.5 年間の発生数を、①～③の観測期間との比率から F スケール毎に推計する。

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及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。

上記の基本的な考え方に基づいて観測記録を整理・推定した結果を第 2.3.4-1 表に示す。

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



第 2.3.4-1 図 竜巻の年別発生確認数（気象庁 HP より）

第 2.3.4-1 表 竜巻発生数の分析結果

竜巻検討地域 (沿岸 ±5 km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	23	2	13	7	1	3	3	29
	平均値(年)	0.45	0.04	0.25	0.14	0.02	0.06	0.06	0.56
	標準偏差(年)	0.67	0.20	0.56	0.35	0.14	0.31	0.31	0.81
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	14	2	10	2	0	1	3	18
	平均値(年)	0.65	0.09	0.47	0.09	0.00	0.05	0.14	0.84
	標準偏差(年)	0.80	0.30	0.75	0.30	0.00	0.22	0.47	0.97
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	3	1	2	0	0	0	2	5
	平均値(年)	0.55	0.18	0.36	0.00	0.00	0.00	0.36	0.91
	標準偏差(年)	0.58	0.43	0.55	0.00	0.00	0.00	0.86	0.80
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	42	10	24	7	1	0	19	61
	平均値(年)	0.80	0.18	0.47	0.14	0.02	0.00	0.36	1.17
	標準偏差(年)	0.93	0.43	0.75	0.35	0.14	0.00	0.86	1.27
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	63	15	35	11	2	0	0	0
	平均値(年)	1.17	0.26	0.68	0.20	0.03	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	1.13	0.52	0.90	0.42	0.17	0.00	0.00	0.00

#### 2.3.5 竜巻風速，被害幅，被害長さの確率分布及び相関係数【添付資料 2.4 4】

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

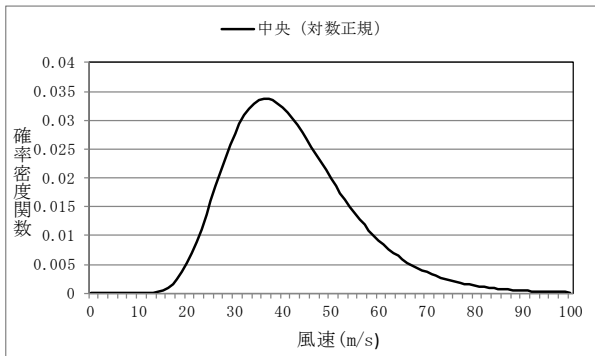
なお，竜巻風速の確率密度分布は，F スケール別の竜巻発生数から求める。

竜巻検討地域における 51.5 年間の竜巻の発生数，被害幅及び被害長さを基に，確率密度分布についてはガイド及びガイドが参考としている JNES 委託研究成果報告書を参照し，対数正規分布に従うものとする（第 2.3.5-1 図～第 2.3.5-6 図）。

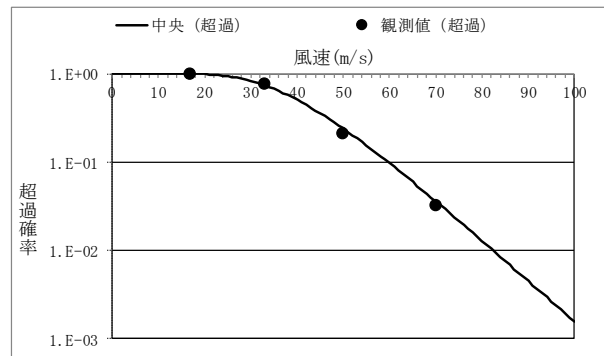
なお，疑似的な竜巻の作成に伴う被害幅又は被害長さの情報がない竜巻には，被害幅又は被害長さを有する竜巻の観測値を与えている。その際は，被害幅又は被害長さが大きいほうから優先的に用いることで，被害幅又は被害長さの平均値が大きくなるように工夫しているとともに，被害幅又は被害長さ 0 のデータについては計算に用いておらず，保守的な評価を行っている。

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

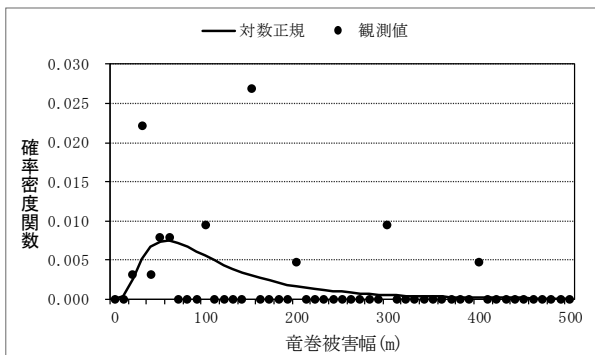
また，竜巻のハザードの計算においては，2 変量あるいは 3 変量の確率分布関数を対象とするため，竜巻風速，被害幅及び被害長さについての相関係数を求めた。第 2.3.5-1 表に 1961 年以降の観測データのみを用いて，竜巻風速，被害幅及び被害長さについて相関係数を求めた結果を示す。



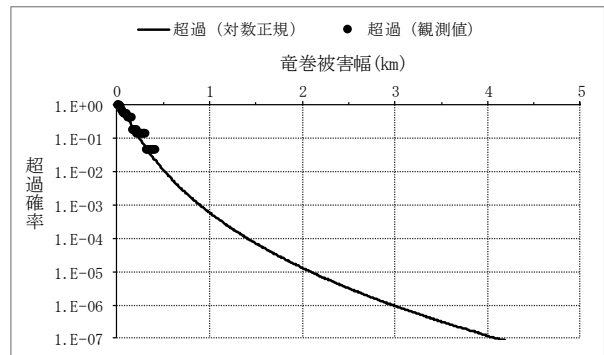
第 2.3.5-1 図 竜巻風速の確率密度分布



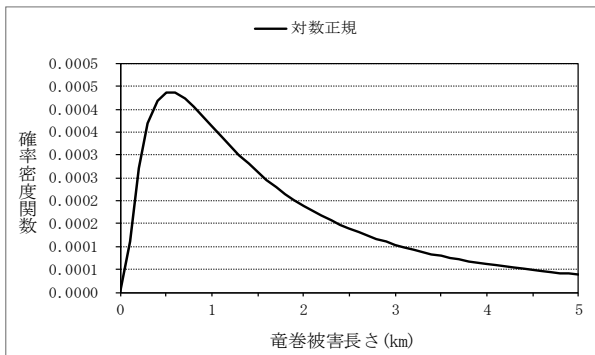
第 2.3.5-2 図 竜巻風速の超過確率分布



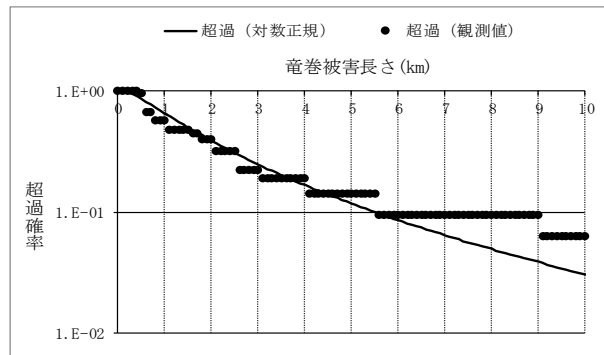
第 2.3.5-3 図 被害幅の確率密度分布



第 2.3.5-4 図 被害幅の超過確率分布



第 2.3.5-5 図 被害長さの確率密度分布



第 2.3.5-6 図 被害長さの超過確率分布

第 2.3.5-1 表 竜巻風速，被害幅，被害長さの相関係数（単位無し）

	風速	被害幅	被害長さ
風速	1.000	-0.073*	0.590
被害幅	-0.073*	1.000	0.173
被害長さ	0.590	0.173	1.000

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

### 2.3.6 竜巻影響エリアの設定【添付資料 2.4 5.】

竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 ( $V_{B2}$ ) の算定にあたり、 $V_{B2}$  の発生エリアである竜巻影響エリアを設定する。竜巻影響エリアは、女川原子力発電所 2 号炉の評価対象施設の設置面積の合計値及び推定される竜巻被害域(被害幅, 被害長さから設定)に基づいて設定する。

女川原子力発電所 2 号炉における評価対象施設の位置を第 2.3.6-1 図に示す。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 413,000 $m^2$ (直径 725m の円))として設定した。

なお、竜巻影響エリアを円形とするため、竜巻移動方向の依存性はない。



第 2.3.6-1 図 評価対象施設の位置

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

### 2.3.7 竜巻ハザード曲線の算定【添付資料 2.4 6.】

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

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

ここで、

$N$  : 竜巻の年発生数

$v$  : 竜巻の年平均発生数

$T$  : 年数

$\beta$ は分布パラメータであり式(2)で示される。

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

ここで、

$\sigma$  : 竜巻の年発生数の標準偏差

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

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

この  $R(V_0)$ は、竜巻影響評価の対象地域の面積を  $A_0$  (つまり竜巻検討地域の面積約 18,800km<sup>2</sup>)、1つの竜巻の風速が  $V_0$ 以上となる面積を  $DA(V_0)$ とすると式(4)で示される。

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

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

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



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

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

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

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

ここで、

$V_{min}$  : 被害幅  $w$  内の最小竜巻風速

$V_0$  : 被害が発生する最小風速

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

本評価ではリスク評価対象構造物を円形構造物（竜巻影響エリア）で設定しているため、 $H(\alpha)$ 、 $G(\alpha)$ ともに竜巻影響エリアの直径725mで一定（竜巻の移動方向に依存しない）となる。円の直径を $D_0$ とした場合の計算式は式(8)で示される。

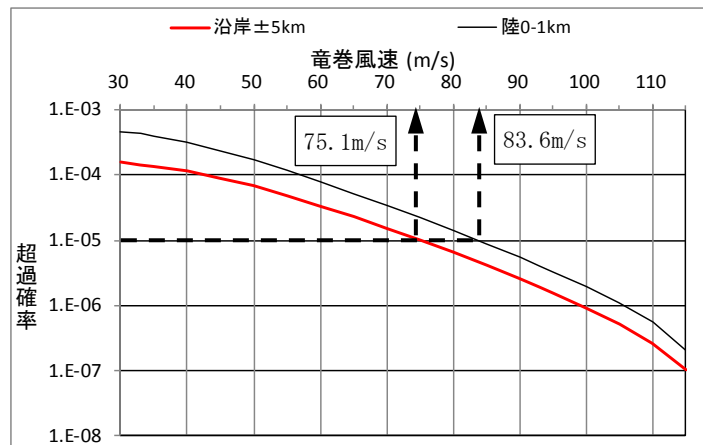
$$\begin{aligned}
E[DA(V_0)] &= \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_{V_0}^{\infty} W(V_0) f(V, w, l) dV dw dl \\
&+ D_0 \int_0^{\infty} \int_{V_0}^{\infty} l f(V, l) dV dl + D_0 \int_0^{\infty} \int_{V_0}^{\infty} W(V_0) f(V, w) dV dw \\
&+ \left( D_0^2 \pi / 4 \right) \int_{V_0}^{\infty} f(V) dV
\end{aligned}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

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

第 2.3.8-1 図に、海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域（竜巻検討地域）及びガイドに従い竜巻検討地域を 1km 範囲ごとに細分化した場合のハザード曲線を示す。

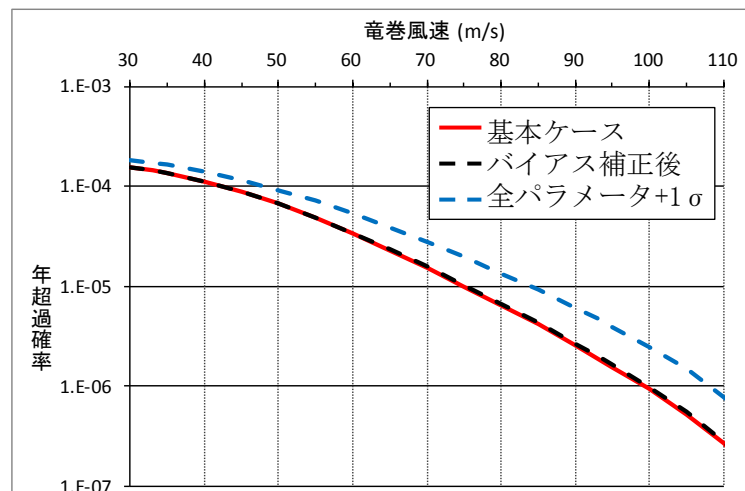
第 2.3.8-1 図より、5km 全域を対象とした場合の年超過確率  $10^{-5}$  における風速は 75.1m/s、竜巻検討地域を 1km 範囲ごとに細分化した場合の年超過確率  $10^{-5}$  における風速は 83.6m/s（陸側 0~1km）となった。

よって、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 ( $V_{B2}$ ) は、5km 全域及び 1km 範囲のハザード評価結果のうち大きい方を採用し、 $V_{B2}=83.6\text{m/s}$  とする。



第 2.3.8-1 図 ±5km 範囲のハザード曲線と 1km 範囲毎のハザード曲線

また、不確かさ要素のハザード算定結果への影響を検討した結果を第 2.3.8-2 図に示す【添付資料 2.4 参考資料 3】。第 2.3.8-2 図より、データ、確率分布形選択及びデータ量が少ないことによる不確かさを表したハザード曲線により、これらの不確かさが小さいことを確認した。



バイアス補正後及び全パラメータ+1σ のハザード

第 2.3.8-2 図 ハザード不確かさ検討結果

### 2.3.9 基準竜巻の最大風速 ( $V_B$ )

過去に発生した竜巻による最大風速  $V_{B1}=92\text{m/s}$  及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速  $V_{B2}=83.6\text{m/s}$  のうち、大きい風速は  $92\text{m/s}$  である（第 2.3.9-1 表）。よって、基準竜巻の最大風速 ( $V_B$ ) は  $92\text{m/s}$  とする。

使用した竜巻の統計データの不確実性については前項までで検討を実施しているが、今後も最新のデータ・知見をもって竜巻検討地域や基準竜巻の最大風速について、必要に応じ見直しを行っていくものとする。

第 2.3.9-1 表 竜巻の最大風速の評価結果

項目	最大風速[m/s]
過去に発生した竜巻による最大風速 ( $V_{B1}$ )	92 (F3)
竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 ( $V_{B2}$ )	83.6
基準竜巻の最大風速 ( $V_B$ )	92

### 2.3.10 竜巻データの更新に関する対応

#### (1) 評価時点以降のデータ更新分について

上記の基準竜巻の検討には、検討実施時点で最新であった 1961 年 1 月～2012 年 6 月までの気象庁竜巻データベースを用いているが、その後、気象庁により継続的にデータベースが更新されている<sup>※1</sup>。本状況においても、以下の理由より、最新データを参照した場合でも基準竜巻の最大風速は上記の評価結果を上回るものではなく、現時点での見直しは不要と判断している。

- ・2012 年 6 月以降、現時点での  $V_{B1}$  の風速  $92\text{m/s}$  を超える竜巻の報告はない。
- ・2012 年 6 月以降、竜巻検討地域で観測された竜巻は F0 若しくは F1 相当のものがほとんどであり、竜巻強度の分布はハザードを下げる方向に変化していると考えられるため、現時点での  $V_{B2}$  が更新されることはない。

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

#### (2) 将来の気候変動について

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

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

## 2.4 設計竜巻の最大風速( $V_D$ )の設定【添付資料 2.5】

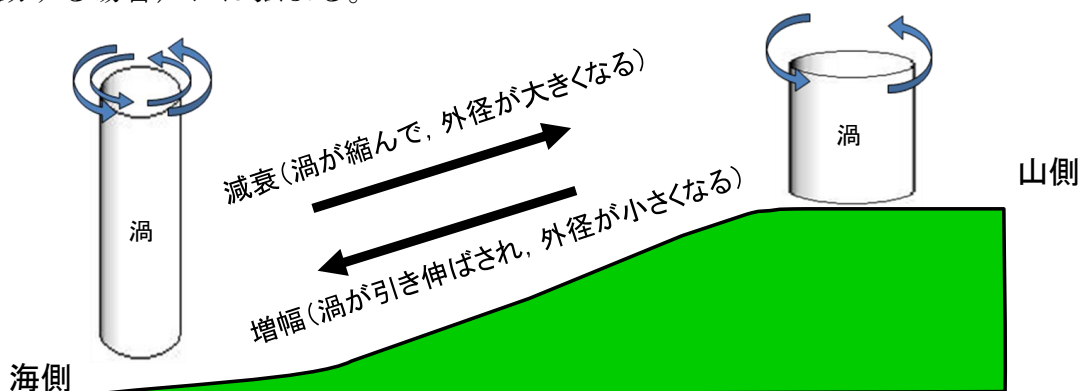
発電所が立地する地域の特性として、周辺の地形や竜巻の移動方向を考慮して、基準竜巻( $V_B$ )の割り増しを検討し、設計竜巻の最大風速を設定する。

### 2.4.1 地形効果による竜巻風速への影響

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

#### (1) 地形起伏による影響

竜巻のような回転する流れでは、角運動量保存則により「回転の中心からの距離」及び「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質がある。そのため、第 2.4.1-1 図に示すとおり、竜巻の渦が上り斜面を移動する時（海側から山側へ移動する場合）、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動する時（山側から海側へ移動する場合）には強まる。



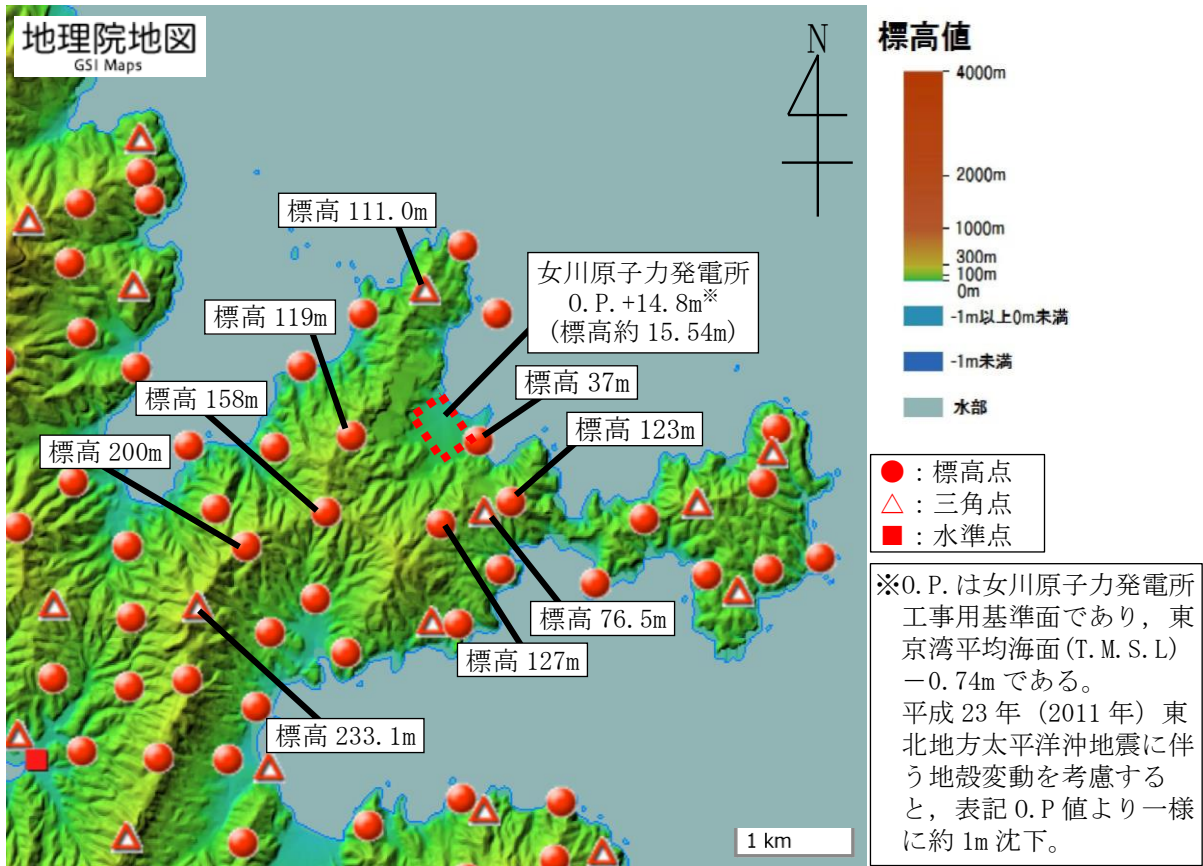
第 2.4.1-1 図 竜巻旋回流の地形影響に関する模式図

#### (2) 地表面粗度による影響

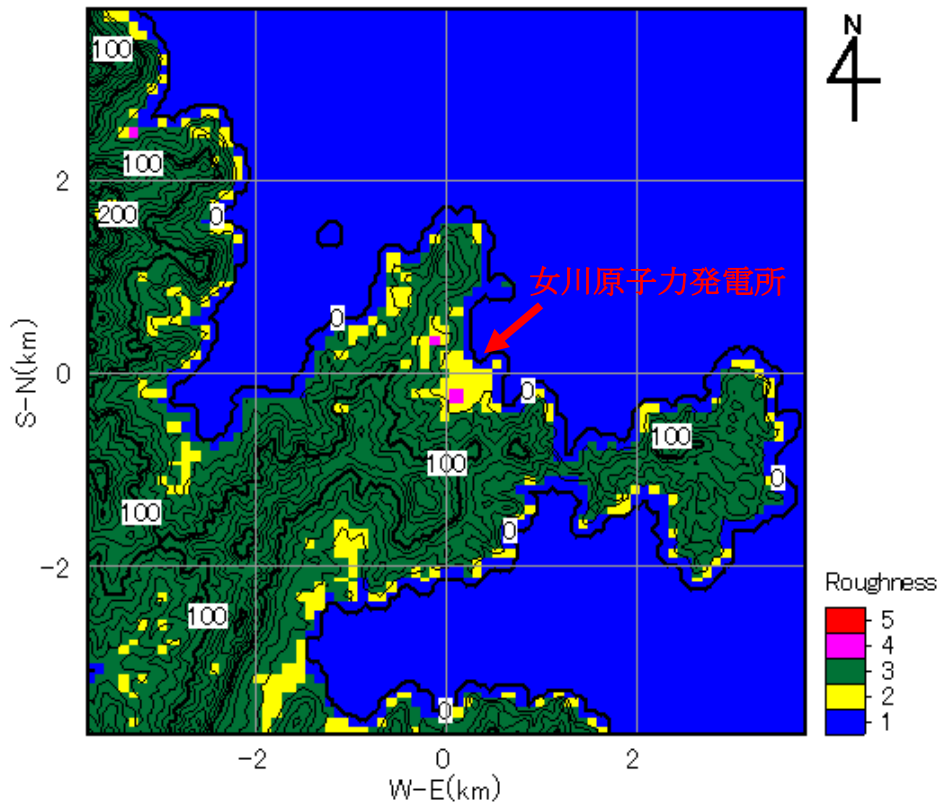
風は地表面の細かな凸凹が与える摩擦抵抗の影響を受けやすく、風速は、地表面において 0 となり上空に向かうにつれて増加する。地表面粗度は竜巻の旋回流を減衰させる効果を有し、地表面粗度の構成物が飛来物として運動することで風速が減衰することも示唆されていることから、地表面粗度の増加とともに竜巻に起因する強風の風速を低下させるといえる。

### 2.4.2 女川原子力発電所周辺の地形

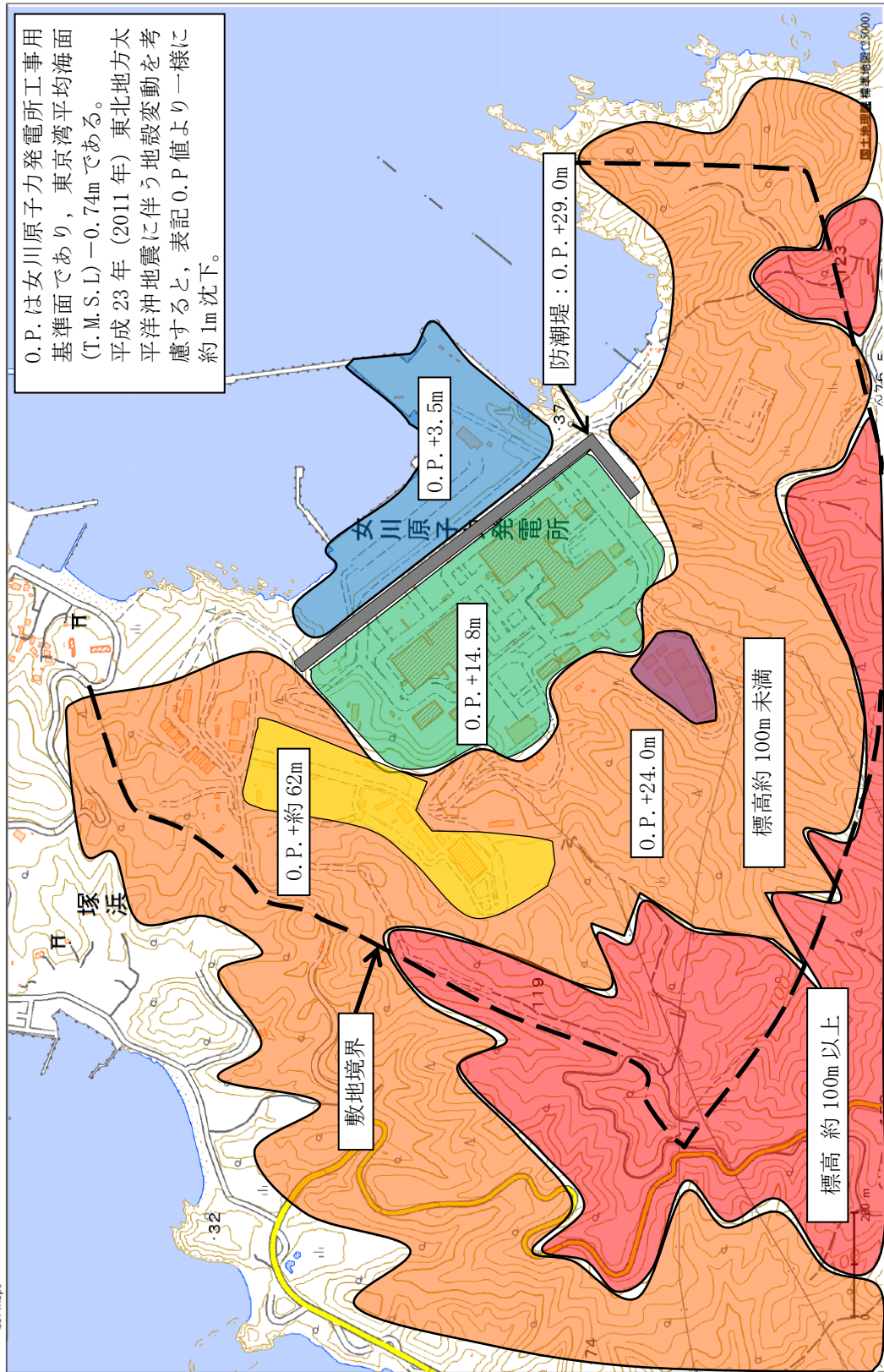
第 2.4.2-1 図に女川原子力発電所周辺の地形図、第 2.4.2-2 図に女川原子力発電所周辺の地表面粗度、第 2.4.2-3 図に女川原子力発電所周辺の標高及び防潮堤高さを示す。発電所が立地する敷地は、北東が太平洋に面し、三方を山及び森林に囲まれた狭隘な地形である。



第 2. 4. 2-1 図 女川原子力発電所周辺の地形 (国土地理院「電子国土 Web」より作成)



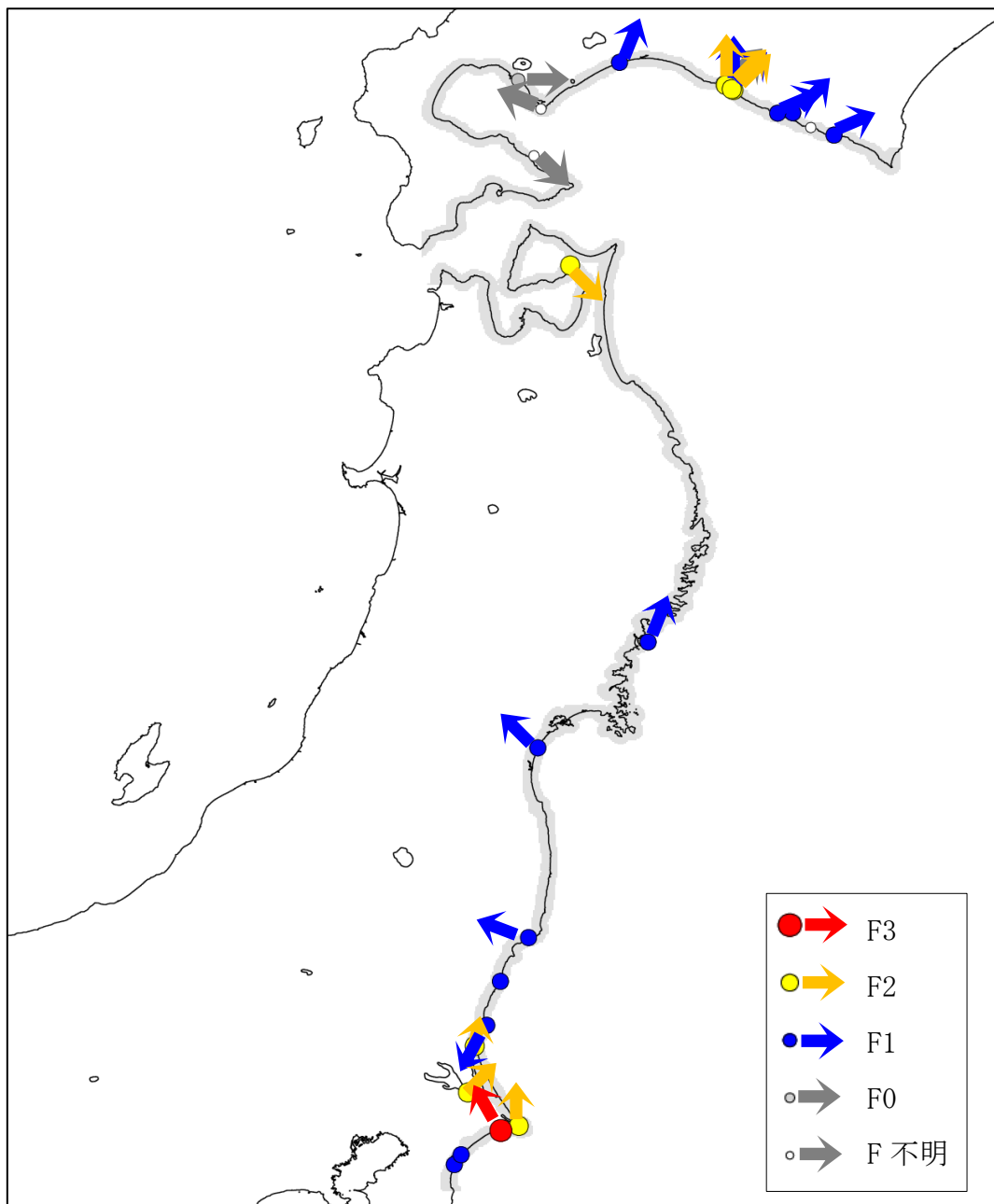
第 2. 4. 2-2 図 女川原子力発電所周辺の地表面粗度



第 2.4.2-3 図 女川原子力発電所の周辺の標高及び防潮堤高さ

### 2.4.3 竜巻の移動方向の分析

竜巻検討地域で発生した竜巻のうち、移動方向が判明している竜巻の移動方向を第2.4.3-1図に示す。第2.4.3-1図より、竜巻検討地域で発生した竜巻は、多くが海側から陸側の方向に移動していた。



第2.4.3-1図 竜巻移動方向

#### 2.4.4 竜巻風速の増幅に関する検討

竜巻検討地域で発生した竜巻は、海側から陸側に進入する可能性が高く、竜巻が増幅することはないと考えられる。竜巻が海上から発電所に進入してきた場合は、地表面粗度の影響を受けて竜巻は減衰した後、さらに防潮堤(0. P. 29. 0m)で大幅に減衰するため、竜巻による施設への影響は限定的となると考えられる。また、山側から発電所の敷地に移動してきた場合についても、発電所周辺は広い丘陵地に森林が存在しており、森林による粗度の影響を大きく受けるため減衰する。

従って、女川原子力発電所において地形効果による竜巻の増幅の影響は受けないものと考えられる。

#### 2.4.5 設計竜巻の最大風速( $V_D$ )

検討の結果、女川原子力発電所において地形効果による竜巻の増幅を考慮する必要はないと考えられるため、基準竜巻の割増しは不要と考えるが、将来的な気候変動による竜巻発生の不確実性を考慮し、基準竜巻の92m/sを安全側に切り上げて、設計竜巻の最大風速( $V_D$ )は100m/sとする。

#### 2.5 設計竜巻の特性値【添付資料 2.6】

竜巻風速場としてフジタモデルを選定した場合の設計竜巻の特性値については、第2.5-1表のとおり設定する。

なお、最大気圧低下量と最大気圧低下率は、数値解析によって計算する。

第2.5-1表 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]
100	15	85	30	76	53



### 3. 竜巻影響評価

#### 3.1 評価概要

評価の概要は以下のとおり。

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

#### 3.2 評価対象施設

「1.2 竜巻影響評価の対象施設」に示すとおり。

#### 3.3 設計荷重の設定

##### 3.3.1 設計竜巻荷重の設定

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

##### (1) 設計竜巻による風圧力の設定

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

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

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

$q$  : 設計用速度圧

$G$  : ガスト影響係数 (=1.0)

$C$  : 風力係数

$A$  : 施設の受圧面積

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

$\rho$  : 空気密度

$V_D$  : 設計竜巻の最大風速

ただし、竜巻による最大風速は、一般的には水平方向の風速として算定されるが、鉛直方向の風圧力に対してせい弱と考えられる評価対象施設が存在する場合には、フジタモデルを用いた飛散評価手法の風速場により求まる鉛直方向の風速等に基づいて算出した鉛直方向の風圧力についても考慮する。

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

設計竜巻による評価対象施設内外の気圧差による圧力は、最大気圧低下量  $\Delta P_{max}$  に基づき設定する。

a. 建屋・構造物等

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

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

$\Delta P_{max}$  : フジタモデルにより求まる最大気圧低下量

$A$  : 施設の受圧面積

防護施設（竜巻）を内包する建屋・構築物について、影響評価を実施し、当該施設が破損した場合には安全機能維持について確認を行う。

b. 設備（系統，機器）

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

(3) 設計竜巻による飛来物が評価対象施設に衝突する際の衝突荷重の設定

a. 設計飛来物の選定について

設計飛来物は、飛来物に係るウォークダウン結果及びガイドの解説表 4.1 に示されている設計飛来物の設定例を参照し設定する。

以下に女川原子力発電所にて実施した飛来物のウォークダウンの結果と、その結果を元に抽出した設計飛来物の設定の考え方を示す。【添付資料 3.3】

(a) 評価に用いる設計竜巻の特性

評価に用いる設計竜巻の最大風速は、100m/s とする。（表 2.5-1 参照）

(b) 飛来物に対する考え方

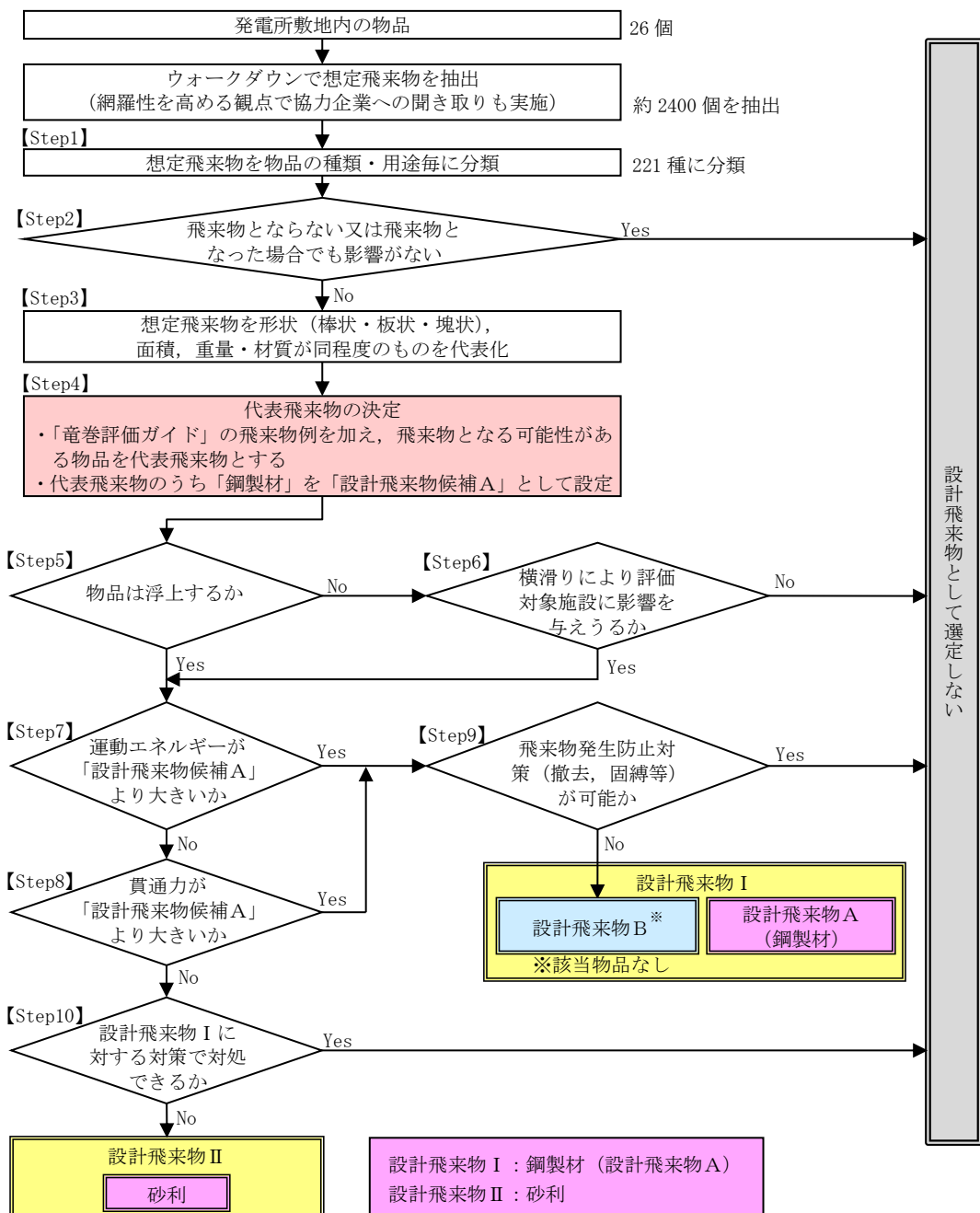
飛来物のうち、後述する設計飛来物（極小飛来物である砂利を除く。）に選定した鋼製材より運動エネルギーまたは貫通力（コンクリートの貫通限界厚さ、鋼板の貫通限界厚さ）が大きいものについては、設置場所等に応じ固縛や離隔などの飛来物発生防止対策を行うことで飛散させないものとする。また、衝突時に防護施設に与えるエネルギー及び貫通力が鋼製材の運動エネルギーより小さいものについては、適切な飛散防止対策を行う。

(c) 設計飛来物の選定

設計飛来物の選定フローを第 3.3.1-1 図，選定結果を第 3.3.1-1 表に示す。

飛来物の選定に係るウォークダウンの結果，女川原子力発電所において飛来物となる可能性があるもののうち，浮き上がりの有無，運動エネルギー及び貫通力の大きさから，鋼製材を設計飛来物として選定した。鋼製材のサイズ，重量は，ウォークダウンの結果及びガイドに基づいて設定した。

また，後述の原子炉補機冷却海水ポンプ，電動機(配管等を含む)，高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプ，電動機(配管等を含む)の防護対策として設置する竜巻防護ネットをすり抜ける可能性のある飛来物として砂利を選定した。



第 3.3.1-1 図 設計飛来物の選定フロー

b. 設計飛来物の速度等の設定【添付資料 3.1】

設計竜巻の最大風速（100m/s）による設計飛来物の最大水平速度  $MV_{Hmax}$  は、フジタモデルの風速場を用いて算出した。また、設計飛来物の浮き上がり高さ及び飛散距離も同様に算出した。その結果を第 3.3.1-1 表に示す。竜巻影響評価においては、敷地の高台等を適切に考慮し評価を実施する。また、影響範囲は「設計飛来物が到達する高さ」以上の範囲もカバーする観点から、評価対象施設の全面に設計飛来物が影響を及ぼすものとして評価する。

第 3.3.1-1 表 女川原子力発電所における設計飛来物

項目	飛来物の種類		
	砂利	鋼製材	
サイズ (m)	縦×横×高さ 0.04×0.04×0.04 <sup>※1</sup>	縦×横×高さ 4.2×0.3×0.2	
質量 (kg)	0.2	135	
初期高さ (m) <sup>※2</sup>	8.0	11.5	
計算結果 <sup>※3</sup>	最大水平速度 (m/s)	59.3	46.6
	最大鉛直速度 (m/s)	22.6~37.9 <sup>※4</sup>	16.7~34.7 <sup>※4</sup>
	浮き上がり高さ (m)	18.0	2.6
	飛散距離 (m)	209.5	139.4

※1 砂利のサイズは、竜巻防護ネットの金網が目開き 5cm×5cm を 2 枚重ね、4cm×4cm を 1 枚重ねの構造となっていることを考慮して選定

※2 初期高さは感度解析の結果を踏まえて、最大水平速度の算出条件を適用

※3 設計竜巻風速 100m/s, 当社が実施するフジタモデルの風速場を用いた飛散評価手法による結果

※4 敷地内の高台を考慮して設定

c. 設計竜巻荷重の組み合わせ

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

$$W_{T1} = W_p$$

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

ここで、

$W_{T1}, W_{T2}$ : 設計竜巻による複合荷重

$W_w$ : 設計竜巻の風圧力による荷重

$W_p$ : 設計竜巻の気圧差による荷重

$W_M$ : 設計飛来物による衝撃荷重

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

### 3.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定

設計竜巻荷重と組み合わせる荷重は、以下のとおりとする。

#### (1) 評価対象施設に常時作用する荷重、運転時荷重等

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

#### (2) 竜巻以外の自然現象による荷重

竜巻は積乱雲や積雲に伴って発生する現象であり<sup>(2)</sup>、積乱雲の発達時に竜巻と同時発生する可能性がある自然現象は、雷、雪、雹及び降水である。これらの自然現象の組み合わせにより発生する荷重は、以下のとおり影響は十分小さい。

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

##### ①雷

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

##### ②雪

竜巻と積雪については、冬季、降雪による積雪荷重の影響を考慮する必要があるが、設計竜巻の風荷重の継続時間が極短時間であることに加え、設計竜巻の風荷重（100m/s 時）の発生頻度が  $1.9 \times 10^{-6}$ 、及び積雪荷重<sup>\*</sup>の発生頻度が  $2 \times 10^{-2}$  であり、同時に発生する頻度は極めて小さいため、本組み合わせは考慮しない。また、積雪荷重における最大荷重の継続時間や荷重の大きさは、除雪により低減することが可能であることから、除雪の運用管理を定め、適切に実施していく。

※：50年再現期待値

##### ③雹

雹は積乱雲から直径 5mm 以上の氷の粒<sup>(3)</sup>であり、仮に直径 10cm 程度の大型の雹を想定した場合、その重量は約 0.5kg となる。直径 10cm 程度の雹の終端速度は 59m/s<sup>(4)</sup>、運動エネルギーは約 0.9kJ であり、設計飛来物の運動エネルギーと比べ十分に小さく、雹の衝突による荷重は設計竜巻荷重に包絡される。

##### ④降水

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

### (3) 設計基準事故時荷重

設計竜巻は原子炉冷却材喪失事故などの設計基準事故の起因とはならないため、設計竜巻と設計基準事故は独立事象となる。

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

なお、防護施設（竜巻）のうち設計基準事故時荷重が生じる屋外設備としては、原子炉補機冷却海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプが考えられるが、設計基準事故時においても、通常運転時の系統内圧力及び温度と変わらないため、設計基準事故により考慮すべき荷重はなく、竜巻と設計基準事故時荷重の組み合わせは考慮しない。

## 3.4 評価対象施設の設計方針

評価対象施設（竜巻）については、設計荷重に対して大規模な損傷に至らないこと、又は、損傷した場合には、取替、補修が可能なこと、波及影響も考慮した上で、安全機能を損なわない設計とする。

評価対象施設（波及影響）については、竜巻及びその随件事象に対して機能維持する、もしくは、竜巻及びその随件事象による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保（例えば、外部電源喪失時における非常用ディーゼル発電機からの受電）すること、安全上支障のない期間に修復（例えば、非常用ディーゼル発電設備のミス配管が飛来物により損傷したとしても、閉塞しない様な措置を行う）すること等の対応が可能な設計とすることにより、防護施設（竜巻）の安全機能を損なわない設計とする。

### (1) 許容限界

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

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

系統及び機器の設計において、設計飛来物の衝突による貫通の有無の評価については、貫通が発生する限界厚さと部材の最小厚さを比較することにより行う。

設計飛来物が貫通することを考慮する場合には、設計荷重に対して防護対策を考慮した上で、系統及び機器に発生する応力が以下の規格、基準及び指針類に準拠し算定した許容応力度等に基づく許容限界を下回る設計とする。

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

## (2) 屋外設備

設計荷重に対して、安全機能を損なわない設計とし、必要に応じて防護対策を講じる方針とする。

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

なお、設計飛来物は評価対象施設の全面に影響を及ぼすものとして評価及び対策を行う。

### ① 原子炉補機冷却海水ポンプ、電動機（配管等を含む）及び高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ、電動機（配管等を含む）

上記設備は、風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物による衝撃荷重、設備に常時作用する荷重、運転時荷重を考慮する。

設計飛来物である鋼製材の衝突については、竜巻防護ネットにより衝突を防止するため、竜巻防護ネットの金網を通過する可能性がある設計飛来物として設定した砂利にて評価する。

設計飛来物（砂利）の衝突に対して、ポンプ、電動機等の部材を貫通しない厚さを確保し、安全機能を損なわない設計とする。

## (3) 外気と繋がる設備

設計荷重に対して、安全機能を損なわない設計とし、必要に応じて防護対策を講じる方針とする。

### ① 中央制御室換気空調系、計測制御電源室換気空調系、原子炉補機室空調系及び原子炉棟給排気隔離弁（原子炉棟換気空調系）

上記設備は、原子炉建屋及び制御建屋に内包されていることを考慮すると、風圧力による荷重は作用しない。また、気圧差による荷重に対しても構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

設計飛来物による衝突については、建屋開口部の状況や上記設備に対する影響を考慮し、安全機能を損なわない設計とする。

②軽油タンク（燃料移送ポンプ等を含む）

軽油タンク及び燃料移送ポンプ等（以下軽油タンク等という。）は、地下化されていることを考慮すると、風圧力による荷重及び、設計飛来物による衝撃荷重は作用しない。また、気圧差による荷重に対して、軽油タンクの構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

(4) 外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備

設計荷重に対して、安全機能を損なわない設計とし、必要に応じて防護対策を講じる方針とする。

(5) 防護施設（竜巻）に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設

設計荷重に対する当該施設の波及的影響を評価し、必要に応じ防護対策を講じる方針とする。

①排気筒<sup>※1</sup>

風圧力による荷重に対して、構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。設計飛来物による衝突については、筒身が貫通した場合でも排気機能を維持する設計とする。また損傷状況を踏まえて、必要に応じてプラントを停止して補修する。支持鉄塔が損傷した場合でも、倒壊により防護施設（竜巻）に波及的影響を及ぼさないように、構造成立性の配慮を行うこととする。

※1:排気筒については、倒壊した場合であっても、防護施設（竜巻）に到達しないが、構造物の形状を踏まえて抽出

② 1号制御建屋，2号タービン建屋，2号補助ボイラー建屋，海水ポンプ室門型クレーン

上記設備については、風圧力による荷重，気圧差による荷重，設計飛来物による衝撃荷重に対して，倒壊により防護施設（竜巻）へ波及的影響を及ぼさない設計とする。

②非常用ディーゼル発電設備（排気消音器，機関ミスト配管，潤滑油サンプルタンクミスト配管，燃料デイタンクミスト配管，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，燃料デイタンクミスト配管，燃料油ドレンタンクミスト配管）及び軽油タンクベント配管

上記設備は，風圧力による荷重及び気圧差による荷重に対して，構造健全性を維持し安全機能を損なわない設計とし，設計飛来物の衝突を考慮して，修復が可能な設計とすることによりディーゼル発電設備及び軽油タンクに波及的影響を及ぼさない設計とする。



③竜巻随件事象の影響により防護施設（竜巻）を機能喪失させる可能性がある施設（溢水により防護施設（竜巻）の機能を喪失させる可能性がある設備，火災発生により防護施設（竜巻）の機能を喪失させる可能性がある設備，外部電源）  
竜巻随件事象の影響により防護施設（竜巻）の機能を喪失させる可能性がある施設の設計方針は，「3.5 竜巻随件事象に対する評価」に記載する。

(6) 防護施設（竜巻）の外殻となりえる施設（防護施設（竜巻）を内包する建屋・構築物等）

① 2号原子炉建屋

構造に合わせて考慮すべき風圧力による荷重，気圧差による荷重に対して構造健全性を維持する設計とする。飛来物の衝突により，壁面の裏面剥離や屋根，開口部（扉類）の破損等が発生した場合でも，建屋内の防護施設（竜巻）が損傷せず，当該建屋内の防護施設（竜巻）が安全機能を損なわない設計とする。ブローアウトパネルの貫通に対し，閉止可能な設計とすることで安全機能を損なわない設計とする。

② 2号制御建屋

構造に合わせて考慮すべき風圧力による荷重，気圧差による荷重に対して構造健全性を維持する設計とする。飛来物の衝突により，壁面の裏面剥離や屋根，開口部（扉類）の破損等が発生した場合でも，建屋内の防護施設（竜巻）が損傷せず，当該建屋内の防護施設（竜巻）が安全機能を損なわない設計とする。

③ 2号地下軽油タンクピット

構造に合わせて考慮すべき風圧力による荷重，気圧差による荷重に対して構造健全性を維持する設計とする。飛来物の衝突により，ピット頂版（鉄筋コンクリート造）は構造健全性を維持する設計とする。ハッチ（鋼製）は設計飛来物の衝突においても貫通せず，変形に留まる設計とすることで，ピットに内包する軽油タンク等の安全機能を損なわない設計とする。

④ 2号海水ポンプ室竜巻防護設備（竜巻防護ネット）

構造に合わせて考慮すべき風圧力による荷重に対して構造健全性を維持する設計とする。飛来物の衝突については，竜巻防護ネットは設計飛来物の衝突時にたわむことによって，衝突エネルギーを吸収する構造とする。ネット間及び海水ポンプ室（ピット）との隙間に設置する防護板及びフレームについては貫通せず，変形に留まる設計とする。これにより海水ポンプ室内の非常用海水ポンプを防護し，波及影響を及ぼさないことで安全機能を損なわない設計とする。

(7) 基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性に鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う施設

①防潮堤

風圧力による荷重に対して、構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

設計飛来物による衝突については、衝撃荷重に対して、倒壊せず構造健全性を確保することで、安全機能に影響を及ぼさない設計とする。また、貫通により津波防護施設としての機能に影響が及ぶ可能性がある場合には、損傷状況を踏まえ、必要に応じ、プラントを停止して修復する。

②防潮壁

風圧力による荷重に対して、構造健全性が維持され安全機能を損なわない設計とする。

防潮壁の構造は主に構造的に強度を確保した複数の部材（支柱と壁部材）を組み合わせる構造とすることで、設計飛来物による衝突時の損傷は局所的となり、大規模な損傷に至らない設計とする。損傷した場合には損傷状況を踏まえ、必要に応じ、プラントを停止して修復する。

3.5 竜巻随件事象に対する評価

竜巻随件事象は過去の竜巻被害状況及び女川原子力発電所のプラント配置から、想定される事象として、火災、溢水及び外部電源喪失を抽出し、事象が発生した場合の影響評価を行い、防護施設（竜巻）が安全機能を損なわないことを確認した。

【添付資料 3.4】

(1) 火災

竜巻随件事象として、竜巻による飛来物が建屋開口部付近の発火性又は引火性物質を内包する機器、屋外の軽油タンク、変圧器等に飛来物が衝突する場合の火災が想定される。

建屋内については、防護施設（竜巻）を設置している区画の開口部が、設計飛来物による衝撃荷重を考慮しても安全機能を損なわない設計とする。

建屋外については、屋外にある軽油タンク、変圧器等からの火災がある。火災源と防護施設（竜巻）の位置関係を踏まえた外部火災影響評価において、航空機墜落や敷地内の軽油タンク、変圧器等からの火災が発生した場合においても、安全上重要な設備が収納されている原子炉建屋、制御建屋や屋外設置の防護施設（竜巻）に影響を及ぼさないことを確認している。

以上より、竜巻による火災が防護施設（竜巻）の安全機能に影響を与えることはない。

## (2) 溢水

竜巻随伴事象として、竜巻による飛来物が屋外水タンク等の溢水源に衝突する場合、溢水が想定される。

建屋内については、防護施設（竜巻）を設置している区画の開口部が、設計飛来物による衝撃荷重を考慮しても安全機能を損なわない設計とする。

建屋外については、内部溢水影響評価において、地震時の屋外水タンク等の破損を想定し、原子炉建屋、制御建屋等の水密扉や建屋貫通部の止水処置等により、地震起因の溢水が防護施設（竜巻）に影響を及ぼさないことを確認している。竜巻による飛来物で屋外水タンク等が損傷して発生する溢水は、上記に包絡されることから、防護施設（竜巻）の安全機能維持に影響を与えることはない。

以上より、竜巻による溢水が防護施設（竜巻）の安全機能に影響を与えることはない。

## (3) 外部電源喪失

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

<参考文献>

- (1) J. D. Riera, “A Critical Reappraisal of Nuclear Power Plant safety against Accidental Aircraft Impact”, Nuclear Engineering and Design 57, (1980)
- (2) 雷雨とメソ気象 大野久雄, 東京堂出版
- (3) 気象庁ホームページ  
([http://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/yougo\\_hp/kousui.html](http://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/yougo_hp/kousui.html))
- (4) 一般気象学 小倉義光, 東京大学出版会

女川原子力発電所 2 号炉

竜巻影響評価について  
(添付資料)

## 添付資料

- 1.1 重大事故等対処施設に対する考慮について
- 1.2 外部事象防護対象施設及び評価対象施設の抽出について
- 1.3 防護施設（竜巻）に波及的影響を及ぼし得る評価対象施設の抽出について
- 2.1 気候区分について
- 2.2 数値気象解析にもとづく竜巻検討地域の設定について
- 2.3 竜巻検討地域及び全国で発生した竜巻
- 2.4 竜巻最大風速のハザード曲線の求め方
- 2.5 地形効果による竜巻風速への影響について
- 2.6 設計竜巻の特性値の設定
- 2.7 米国及び関東平野の竜巻の類似性
- 3.1 竜巻影響評価の概要及び保守性について
- 3.2 竜巻影響評価及び竜巻対策の概要
- 3.3 設計飛来物の選定について
- 3.4 竜巻随伴事象の抽出について
- 3.5 飛来物化する可能性がある物品等の管理について

## 重大事故等対処施設に対する考慮について

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

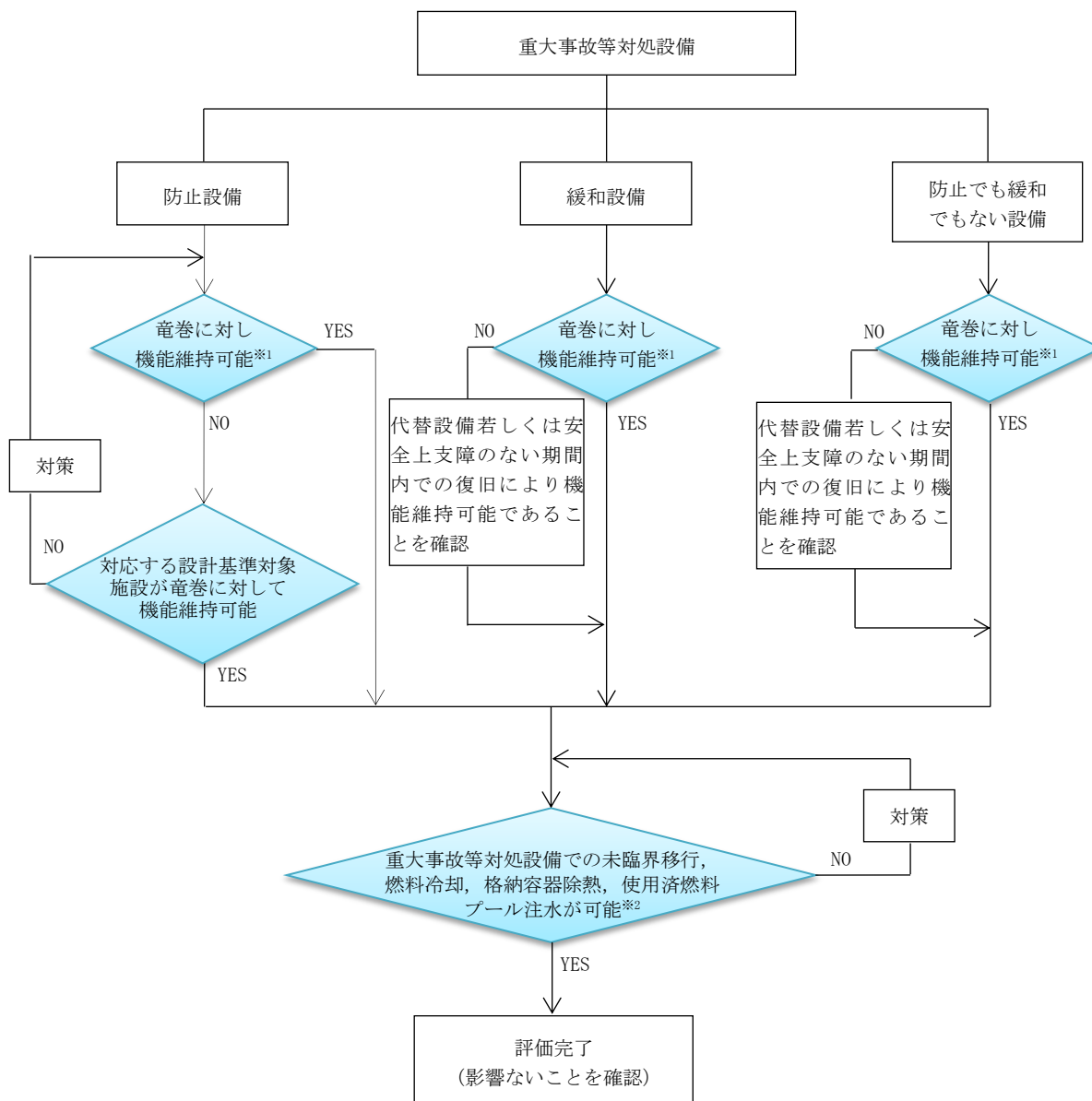
重大事故等対処設備の機能維持は、以下の方針に従い評価を実施する。

- (1) 重大事故防止設備は、竜巻によって対応する設計基準対象施設の安全機能と同時にその機能が損なわれるおそれのないこと
- (2) 重大事故等対処設備であって、重大事故防止設備でない設備は、代替設備若しくは安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であること
- (3) 竜巻が発生した場合においても、重大事故等対処設備によりプラント安全性に関する主要な機能（未臨界移行機能、燃料冷却機能、格納容器除熱機能、使用済燃料プール注水機能）が維持できること（竜巻により重大事故等対処設備と設計基準対象施設の機能が同時に損なわれることはないが、安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であることを確認する）

竜巻に対する重大事故等対処施設の影響評価フロー並びに方針（1）及び（2）に対する評価結果をそれぞれ第 1 図、第 1 表に示す。また、方針（3）のプラント安全性に関する主要な機能は、以下に例示するとおり重大事故等対処設備により維持される。

- ・ 未臨界移行機能：代替制御棒挿入機能、代替原子炉再循環ポンプトリップ機能
- ・ 燃料冷却機能：低圧代替注水系（可搬型）
- ・ 格納容器除熱機能：原子炉補機代替冷却水系
- ・ 使用済燃料プール注水機能：燃料プール代替注水系（可搬型）

なお、重大事故等対処施設の設計方針は、設置許可基準規則第 43 条（重大事故等対処設備）にて考慮する。



※1：屋内設備については、当該設備を内包する建屋の影響評価を実施し、安全機能が維持されるかを確認  
 ※2：竜巻により重大事故等対処設備と設計基準対象施設の機能が同時に損なわれることはないが、安全上支障のない期間内での復旧により機能維持可能であることを確認

第1図 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価フロー



第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (1/8)

設置許可基準	重大事故等対処設備	分類	保管・設置箇所*	竜巻		
				評価	防護方法	
第37条(重大事故等の拡大の防止等)	—	—	—	—	—	
第38条(重大事故等対処施設の地盤)	—	—	—	—	—	
第39条(地震による損傷の防止)	—	—	—	—	—	
第40条(津波による損傷の防止)	—	—	—	—	—	
第41条(火災による損傷の防止)	—	—	—	—	—	
第42条(特定重大事故等対処施設)	特定重大事故等対処施設	→申請範囲外	—	—	—	
第43条(重大事故等対処設備)	ブルドーザ	防止でも緩和でもない設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	分散配置	
第44条(緊急停止失敗時に発電用原子炉を未臨界にするための設備)	ATWS 緩和設備 (代替制御棒挿入機能), 制御棒, 制御棒駆動機構, 制御棒駆動水圧系 (水圧制御ユニット, 制御棒駆動水圧系配管)	防止設備	R/B, C/B	○	建屋内	
	ATWS 緩和設備 (代替原子炉再循環ポンプトリップ機能)	防止設備	R/B, C/B	○	建屋内	
	ほう酸水注入系	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内	
	ATWS 緩和設備 (自動減圧系作動阻止機能)	防止設備	R/B, C/B	○	建屋内	
第45条(原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧時に発電用原子炉を冷却するための設備)	高圧代替注水系	高圧代替注水系ポンプ, 配管等 復水貯蔵タンク	56条に記載	—	—	
	原子炉隔離時冷却系	原子炉隔離時冷却系ポンプ, 配管等 復水貯蔵タンク	(設計基準対象施設) 56条に記載	R/B	○	
	高圧炉心スプレイ系	高圧炉心スプレイ系ポンプ, 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		復水貯蔵タンク	56条に記載	—	—	
	サプレッションチェンパ	56条に記載	—	—		
	ほう酸水注入系	44条に記載	—	—		
第46条(原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するための設備)	主蒸気逃がし安全弁, 逃がし弁機能用アキュムレータ, 自動減圧機能用アキュムレータ, 主蒸気系配管 (排気管含む)	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内	
	代替自動減圧回路 (代替自動減圧機能)	防止設備	R/B, C/B	○	建屋内	
	ATWS 緩和設備 (自動減圧系作動阻止機能)	44条に記載	—	—		
	可搬型代替直流電源設備	57条に記載	—	—		
	高圧窒素ガス供給系 (非常用)	高圧窒素ガスポンプ, 主蒸気逃がし安全弁自動減圧機能用アキュムレータ, 配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
	代替高圧窒素ガス供給系	高圧窒素ガスポンプ, ホース, 配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
	HPCS 注入隔離弁	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内	
原子炉建屋ブローアウトパネル	防止設備	屋外 R/B 廻り	○	影響なし (ブローアウトパネルが開放した場合は, 補修を実施又は必要に応じプラント停止)		

○: 竜巻に対し安全機能を維持できる  
 又は竜巻による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる (防止設備)  
 又は竜巻による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)  
 —: 他の項目にて整理  
 ※ SA 設備: 重大事故等対処設備, R/B: 原子炉建屋, C/B: 制御建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (2/8)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	竜巻		
					評価	防護方法	
第47条(原子炉冷却材圧力バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備)	低圧代替注水系(常設)(復水移送ポンプ)	復水移送ポンプ, 配管等	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内	
		復水貯蔵タンク	56条に記載		—	—	
	低圧代替注水系(常設)(直流駆動低圧注水ポンプ)	直流駆動低圧注水ポンプ, 配管等	防止設備		R/B	○	建屋内
		復水貯蔵タンク	56条に記載		—	—	
	低圧代替注水系(可搬型)	可搬箇所: 大容量送水ポンプ(タイプI), ホース延長回収車, ホース等	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所		○	分散配置
		常設箇所: 接続口, 配管等	防止設備・緩和設備	屋外 R/B 廻り		○	分散配置
		常設箇所: 配管等	防止設備・緩和設備	R/B		○	建屋内
		淡水貯水槽 (No. 1), 淡水貯水槽 (No. 2)	56条に記載		—	—	
	残留熱除去系(低圧注水モード)	残留熱除去系ポンプ, 配管等	(設計基準対象施設)		R/B	○	建屋内
		サブプレッションチェンバ	56条に記載		—	—	
	残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)	残留熱除去系ポンプ, 配管等	(設計基準対象施設)		R/B	○	建屋内
	低圧炉心スプレイ系	低圧炉心スプレイ系ポンプ, 配管等	(設計基準対象施設)		R/B	○	建屋内
		サブプレッションチェンバ	56条に記載		—	—	
	原子炉補機冷却水系(原子炉補機冷却海水系を含む)			48条に記載		—	—
非常用取水設備			その他の設備に記載		—	—	
第48条(最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備)	原子炉補機代替冷却水系	可搬箇所: 熱交換器ユニット, 大容量送水ポンプ(タイプI), ホース延長回収車, ホース等	防止設備	可搬型 SA 設備保管場所		○	分散配置
		常設箇所: 残留熱除去系熱交換器, 配管等	防止設備	R/B		○	建屋内
		常設箇所: 接続口, 配管等	防止設備	屋外 R/B 廻り		○	分散配置
	耐圧強化ベント系	配管, 弁等	防止設備		R/B	○	建屋内
		排気筒	(設計基準対象施設)	屋外		○	代替設備(原子炉補機代替冷却水系)
	原子炉格納容器フィルタベント系	フィルタ装置等	50条に記載		—	—	
		淡水貯水槽 (No. 1), 淡水貯水槽 (No. 2)	56条に記載		—	—	
	残留熱除去系(原子炉停止時冷却モード)	47条に記載		—	—		
	残留熱除去系(格納容器スプレイ冷却モード)	49条に記載		—	—		
	残留熱除去系(サブプレッションプール水冷却モード)	49条に記載		—	—		
	原子炉補機冷却水系(原子炉補機冷却海水系を含む)	原子炉補機冷却水ポンプ, 配管等	(設計基準対象施設)		R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却海水ポンプ, 配管等	(設計基準対象施設)	屋外		○	防護対策実施
	高圧炉心スプレイ補機冷却水系(高圧炉心スプレイ補機冷却海水系を含む)	高圧炉心スプレイ補機冷却水ポンプ, 配管等	(設計基準対象施設)		R/B	○	建屋内
		高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ, 配管等	(設計基準対象施設)	屋外		○	防護対策実施
非常用取水設備			その他の設備に記載		—	—	

○: 竜巻に対し安全機能を維持できる  
 又は竜巻による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる(防止設備)  
 又は竜巻による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)  
 —: 他の項目にて整理  
 ※ SA設備: 重大事故等対処設備, R/B: 原子炉建屋, C/B: 制御建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (3/8)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	竜巻	
					評価	防護方法
第49条(原子炉格納容器内の冷却等のための設備)	原子炉格納容器代替スプレィ冷却系	可搬箇所：大容量送水ポンプ(タイプI)，ホース延長回収車，ホース等	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	分散配置
		常設箇所：接続口，配管等	防止設備・緩和設備	屋外 R/B 廻り	○	分散配置
		常設箇所：配管等	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
		淡水貯水槽 (No.1)，淡水貯水槽 (No.2)	56条に記載		—	—
	残留熱除去系(格納容器スプレィ冷却モード)	残留熱除去系ポンプ，配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		サプレッションチェンバ	56条に記載		—	—
	残留熱除去系(サプレッションプール水冷却モード)	残留熱除去系ポンプ，配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		サプレッションチェンバ	56条に記載		—	—
	原子炉補機冷却水系(原子炉補機冷却海水系を含む)	48条に記載		—	—	
	非常用取水設備	その他の設備に記載		—	—	
第50条(原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備)	代替循環冷却系	代替循環冷却ポンプ，残留熱除去系熱交換器，配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		原子炉補機代替冷却水系(可搬箇所：熱交換器ユニット，大容量送水ポンプ(タイプI)，ホース延長回収車，ホース等)	緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	分散配置
		原子炉補機代替冷却水系(常設箇所：残留熱除去系熱交換器，配管等)	緩和設備	R/B	○	建屋内
		原子炉補機代替冷却水系(常設箇所：接続口，配管等)	緩和設備	屋外 R/B 廻り	○	分散配置
		サプレッションチェンバ	56条に記載		—	—
		非常用取水設備	その他の設備に記載		—	—
	原子炉格納容器フィルタベント系	常設箇所：フィルタ装置，圧力開放板，配管，遠隔手動弁操作設備等	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
		常設箇所：配管	防止設備・緩和設備	屋外 R/B 廻り	○	代替設備(代替循環冷却系)
		可搬箇所：可搬型窒素ガス供給装置，ホース等	緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	分散配置
		常設箇所：接続口，配管等	緩和設備	R/B内及び屋外 R/B 廻り	○	分散配置(一方は建屋内)
		可搬箇所：大容量送水ポンプ(タイプI)，ホース延長回収車，ホース等	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	分散配置
		常設箇所：接続口，配管等	防止設備・緩和設備	R/B内及び屋外 R/B 廻り	○	分散配置(一方は建屋内)
		淡水貯水槽 (No.1)，淡水貯水槽 (No.2)	56条に記載		—	—

○：竜巻に対し安全機能を維持できる  
 又は竜巻による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる(防止設備)  
 又は竜巻による損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備，防止でも緩和でもない設備)  
 —：他の項目にて整理  
 ※ SA設備：重大事故等対処設備，R/B：原子炉建屋，C/B：制御建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (4/8)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	竜巻	
					評価	防護方法
第51条(原子炉格納容器下部注水系(常設))	原子炉格納容器下部注水系(常設)	復水移送ポンプ, 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		復水貯蔵タンク	56条に記載		—	—
	原子炉格納容器下部注水系(可搬型)	大容量送水ポンプ(タイプI), ホース延長回収車, ホース等	緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置
		常設箇所: 接続口, 配管等	緩和設備	屋外R/B廻り	○	分散配置
		淡水貯水槽(No.1), 淡水貯水槽(No.2)	56条に記載		—	—
	高压代替注水系	45条に記載		—	—	
	ほう酸水注入系	44条に記載		—	—	
	低压代替注水系(常設)	47条に記載		—	—	
	低压代替注水系(可搬型)	47条に記載		—	—	
第52条(水素爆発による原子炉格納容器の破損を防止するための設備)	(原子炉格納容器調気系)		(設計基準対象施設)		—	—
	原子炉格納容器フィルタベント系	フィルタ装置等	50条に記載		—	—
		フィルタ装置出口水素濃度, フィルタ装置出口放射線モニタ	58条に記載		—	—
		淡水貯水槽(No.1), 淡水貯水槽(No.2)	56条に記載		—	—
格納容器内水素濃度(D/W), 格納容器内水素濃度(S/C), 格納容器内雰囲気水素濃度, 格納容器内雰囲気酸素濃度	緩和設備		R/B	○	建屋内	
第53条(水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備)	静的触媒式水素再結合装置, 静的触媒式水素再結合装置動作監視装置		緩和設備	R/B	○	建屋内
	原子炉建屋原子炉棟		その他の設備に記載		—	—
	原子炉建屋内水素濃度		緩和設備	R/B	○	建屋内

○: 竜巻に対し安全機能を維持できる  
 又は竜巻による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる(防止設備)  
 又は竜巻による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)  
 —: 他の項目にて整理  
 ※ SA設備: 重大事故等対処設備, R/B: 原子炉建屋, C/B: 制御建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (5/8)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	竜巻	
					評価	防護方法
第54条(使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備)	燃料プール代替注水系(常設配管)	可搬箇所: 大容量送水ポンプ(タイプI), ホース延長回収車, ホース等	防止設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	分散配置
		常設箇所: 接続口, 配管等	防止設備	屋外 R/B 廻り	○	分散配置
		常設箇所: 配管等	防止設備	R/B	○	建屋内
		淡水貯水槽 (No.1), 淡水貯水槽 (No.2)	56条に記載		—	—
	燃料プール代替注水系(可搬型)	可搬箇所: 大容量送水ポンプ(タイプI), ホース延長回収車, ホース等	防止設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	分散配置
		淡水貯水槽 (No.1), 淡水貯水槽 (No.2)	56条に記載		—	—
	燃料プールのプレイ系	可搬箇所: 大容量送水ポンプ(タイプI), ホース延長回収車, ホース等	緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	分散配置
		可搬箇所: スプレインゾル, ホース	緩和設備	R/B	○	建屋内
		淡水貯水槽 (No.1), 淡水貯水槽 (No.2)	56条に記載		—	—
	大気への放射性物質の拡散抑制		55条に記載		—	—
	使用済燃料プール水位/温度(ヒートサーモ式), 使用済燃料プール水位/温度(ガイドパルス式), 使用済燃料プール上部空間放射線モニタ(高線量, 低線量), 使用済燃料プール監視カメラ		防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	重大事故等時における使用済燃料プールの除熱	燃料プール冷却浄化系(燃料プール冷却浄化系ポンプ, 熱交換器, 配管等)	防止設備	R/B	○	建屋内
		原子炉補機代替冷却水系(可搬箇所: 熱交換器ユニット, 大容量送水ポンプ(タイプI), ホース延長回収車, ホース等)	防止設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	分散配置
		原子炉補機代替冷却水系(常設箇所: 燃料プール冷却浄化系熱交換器, 配管等)	防止設備	R/B	○	建屋内
原子炉補機代替冷却水系(常設箇所: 接続口, 配管等)		防止設備	屋外 R/B 廻り	○	分散配置	
非常用取水設備		その他の設備に記載		—	—	
第55条(工場等外への放射性物質の拡散を抑制するための設備)	大気への放射性物質の拡散抑制(大容量送水ポンプ(タイプII), ホース延長回収車, ホース, 放水砲)		緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	分散配置
	航空機燃料火災への泡消火(大容量送水ポンプ(タイプII), ホース延長回収車, ホース, 泡消火薬剤混合装置, 放水砲)		緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	分散配置
	海洋への放射性物質の拡散抑制(放射性物質吸着材, シルトフェンス)		緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	分散配置
第56条(重大事故等の収束に必要な水の供給設備)	復水貯蔵タンク		防止設備・緩和設備	屋外	○	代替設備(サブプレッションチェンバ, 淡水貯水槽(No.1), 淡水貯水槽(No.2))
	サブプレッションチェンバ		緩和設備	R/B	○	建屋内
	淡水貯水槽(No.1), 淡水貯水槽(No.2)		—(代替淡水源)	屋外(地下)	○	地下設置
	ほう酸水注入系貯蔵タンク		44条に記載		—	—
	水の供給	大容量送水ポンプ(タイプI), 大容量送水ポンプ(タイプII), ホース延長回収車, ホース等	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	分散配置
		常設箇所: 接続口, 配管等	防止設備・緩和設備	屋外及び屋外(地下)	○	分散配置(一方は地下)
非常用取水設備		その他の設備に記載		—	—	

○: 竜巻に対し安全機能を維持できる  
 又は竜巻による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる(防止設備)  
 又は竜巻による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)  
 —: 他の項目にて整理  
 ※ SA設備: 重大事故等対処設備, R/B: 原子炉建屋, C/B: 制御建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (6/8)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	竜巻	
					評価	防護方法
第57条(電源設備)	常設代替交流電源設備	ガスタービン発電機	防止設備・緩和設備	屋外(緊急用電気品建屋)	○	代替設備(非常用交流電源設備)
		ガスタービン発電設備軽油タンク	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	地下設置
		ガスタービン発電設備燃料移送ポンプ, 配管等	防止設備・緩和設備	屋外	○	代替設備(非常用交流電源設備)
	可搬型代替交流電源設備	電源車	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置
		軽油タンク	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	地下設置
		ガスタービン発電設備軽油タンク	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	地下設置
		タンクローリ	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置
		電源車接続口	防止設備・緩和設備	R/B内及び屋外R/B廻り	○	分散配置(一方は建屋内)
	所内常設蓄電式直流電源設備	125V蓄電池2A, 125V蓄電池2B, 125V充電器盤2A, 125V充電器盤2B	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
	常設代替直流電源設備	125V代替蓄電池	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
		250V蓄電池	防止設備	C/B	○	建屋内
	可搬型代替直流電源設備	125V代替蓄電池, 125V代替充電器盤	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
		250V蓄電池, 250V充電器盤	防止設備	C/B	○	建屋内
		電源車	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置
		軽油タンク	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	地下設置
		ガスタービン発電設備軽油タンク	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	地下設置
		タンクローリ	防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置
		電源車接続口	防止設備・緩和設備	R/B内及び屋外R/B廻り	○	分散配置(一方は建屋内)
		代替所内電気設備	ガスタービン発電機接続盤, 緊急用高圧母線2F系, 緊急用高圧母線2G系, 緊急用動力変圧器2G系, 緊急用低圧母線2G系, 緊急用交流電源切替盤2G系, 緊急用交流電源切替盤2C系, 緊急用交流電源切替盤2D系, 非常用高圧母線2C系, 非常用高圧母線2D系	防止設備・緩和設備	R/B, 緊急用電気品建屋	○
	非常用交流電源設備	非常用ディーゼル発電機, 燃料デイトタンク, 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		非常用ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ	(設計基準対象施設)	屋外(地下)	○	地下設置
		軽油タンク, 配管等	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	地下設置
	高圧炉心スプレイ系用交流電源設備	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機, 燃料デイトタンク, 配管等	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備燃料移送ポンプ	(設計基準対象施設)	屋外(地下)	○	地下設置
		軽油タンク, 配管等	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	地下設置
	高圧炉心スプレイ系用直流電源設備	125V蓄電池2H, 125V充電器盤2H	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
	燃料補給設備	軽油タンク, ガスタービン発電設備軽油タンク	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	地下設置
タンクローリ		防止設備・緩和設備	可搬型SA設備保管場所	○	分散配置	

○: 竜巻に対し安全機能を維持できる  
 又は竜巻による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる(防止設備)  
 又は竜巻による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)  
 一: 他の項目にて整理  
 ※ SA設備: 重大事故等対処設備, R/B: 原子炉建屋, C/B: 制御建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (7/8)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	竜巻	
					評価	防護方法
第58条(計装設備)	重大事故等時の計装 (SA 時計装一式) [原子炉圧力容器内の温度・圧力・水位] [原子炉圧力容器・原子炉格納容器への注水量] [原子炉格納容器内の温度・圧力・水位・水素濃度・放射線量率] [未臨界の維持又は監視] [最終ヒートシンクの確保 (代替循環冷却系・原子炉格納容器フィルタベント系・耐圧強化ベント系・残留熱除去系)] [格納容器バイパスの監視] [水源の確保] [原子炉建屋内の水素濃度] [原子炉格納容器内の酸素濃度] [使用済燃料プールの監視]		防止設備・緩和設備・(設計基準対象施設)	R/B, 屋外(地下)	○	建屋内又は地下設置
	[発電所内の通信連絡]		防止でも緩和でもない設備	C/B, 緊急時対策建屋	○	建屋内
	[温度, 圧力, 水位, 注水量の計測・監視]		防止でも緩和でもない設備	C/B, 緊急時対策建屋	○	建屋内
第59条(運転員が原子炉制御室にとどまるための設備)	居住性の確保	中央制御室, 中央制御室待避所	(重大事故等対処施設)	C/B	○	建屋内
		中央制御室遮蔽, 中央制御室送風機, 中央制御室排風機, 中央制御室再循環送風機, 中央制御室再循環フィルタ装置, ダクト等	防止設備・緩和設備	C/B	○	建屋内
		中央制御室待避所遮蔽, 中央制御室待避所加圧設備(空気ボンベ, 配管等)	緩和設備	C/B	○	建屋内
		差圧計, 酸素濃度計, 二酸化炭素濃度計, データ表示装置(待避所)	防止でも緩和でもない設備	C/B	○	建屋内
		トランシーバ(固定), 衛星電話(固定)	62条に記載		—	—
	照明の確保	可搬型照明(SA)	防止でも緩和でもない設備	C/B	○	建屋内
	被ばく線量の低減	非常用ガス処理系(排風機, 配管等)	緩和設備	R/B	○	建屋内
排気筒		(設計基準対象施設)	屋外	○	影響なし (損傷した場合は, 補修を実施又は必要に応じプラント停止)	
原子炉建屋ブローアウト閉止装置		緩和設備	R/B	○	建屋内	
第60条(監視測定設備)	可搬型モニタリングポスト, 代替気象観測設備		防止でも緩和でもない設備	可搬型 SA 設備保管場所 (コンテナ内), 緊急時対策建屋	○	分散配置, 建屋内
	可搬型放射線計測装置(可搬型ダスト・よう素サンプラ, $\gamma$ 線サーベイメータ, $\beta$ 線サーベイメータ, $\alpha$ 線サーベイメータ, 電離箱サーベイメータ)		防止でも緩和でもない設備	緊急時対策建屋	○	建屋内
	小型船舶		防止でも緩和でもない設備	可搬型 SA 設備保管場所	○	分散配置
	常設代替交流電源設備		57条に記載		—	—

○: 竜巻に対し安全機能を維持できる  
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる(防止設備)  
又は竜巻による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)  
—: 他の項目にて整理  
※ SA設備: 重大事故等対処設備, R/B: 原子炉建屋, C/B: 制御建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (8/8)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所*	竜巻	
					評価	防護方法
第61条(緊急時対策所)	居住性の確保	緊急時対策所	(重大事故等対処施設)	緊急時対策建屋	○	建屋内
		緊急時対策所遮蔽, 緊急時対策建屋非常用送風機, 緊急時対策建屋非常用フィルタ装置, 配管等	緩和設備	緊急時対策建屋	○	建屋内
		緊急時対策所加圧設備(空気ポンペ, 配管等)	緩和設備	緊急時対策建屋	○	建屋内
		差圧計, 酸素濃度計, 二酸化炭素濃度計	防止でも緩和でもない設備	緊急時対策建屋	○	建屋内
		緊急時対策所可搬型エリアモニタ	緩和設備	緊急時対策建屋	○	建屋内
		可搬型モニタリングポスト	60条に記載		—	—
	電源の確保(緊急時対策所)	ガスタービン発電機, ガスタービン発電設備軽油タンク, ガスタービン発電設備燃料移送ポンプ, ガスタービン発電機接続盤, 緊急用高圧母線2F系	57条に記載		—	—
		電源車	防止設備・緩和設備	屋外緊急時対策建屋廻り及び可搬型SA設備保管場所	○	代替設備(非常用交流電源設備)
		緊急時対策所軽油タンク, 緊急時対策所燃料移送系配管等	防止設備・緩和設備	緊急時対策建屋	○	建屋内
		緊急時対策所用高圧母線J系	防止設備・緩和設備	緊急時対策建屋	○	建屋内
	必要な情報の把握	安全パラメータ表示システム(SPDS)	62条に記載		—	—
	通信連絡(緊急時対策所)	トランシーバ(固定), トランシーバ(携帯), 衛星電話(固定), 衛星電話(携帯), 統合原子力防災ネットワークを用いた通信連絡設備	62条に記載		—	—
	第62条(通信連絡を行うために必要な設備)	所内通信	携行型通話装置	防止設備・緩和設備	C/B	○
トランシーバ(固定), トランシーバ(携帯)			防止設備・緩和設備	C/B, 緊急時対策建屋(屋外設備含む)	○	影響なし(建屋内設置, 屋外設備は分散配置された代替設備(有線系, 衛星系)により機能維持)
安全パラメータ表示システム(SPDS)			緩和設備	C/B, 緊急時対策建屋(屋外設備含む)	○	影響なし(建屋内設置, 屋外設備は代替設備(有線系)にて機能維持)
所内外通信		衛星電話(固定), 衛星電話(携帯)	防止設備・緩和設備	C/B, 緊急時対策建屋(屋外設備含む)	○	影響なし(建屋内設置, 屋外設備は分散配置された代替設備(有線系, 無線系)により機能維持)
所外通信		統合原子力防災ネットワークを用いた通信連絡設備, データ伝送設備	防止でも緩和でもない設備	緊急時対策建屋(屋外設備含む)	○	影響なし(建屋内設置, 屋外設備は分散配置された代替設備(有線系, 衛星系)により機能維持)
その他の設備	重大事故等時に対処するための流路, 注水先, 注入先, 排出元等	原子炉圧力容器, 原子炉格納容器, 使用済燃料プール	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
		原子炉建屋原子炉棟	緩和設備	R/B	○	影響なし(荷重評価, ブローアウトパネルが開放した場合は, 補修を実施又は必要に応じプラント停止)
	非常用取水設備	取水口, 取水路, 海水ポンプ室	防止設備・緩和設備	屋外	○	分散配置

○: 竜巻に対し安全機能を維持できる  
 又は竜巻による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる(防止設備)  
 又は竜巻による損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)  
 —: 他の項目にて整理  
 ※ SA設備: 重大事故等対処設備, R/B: 原子炉建屋, C/B: 制御建屋



## 評価対象施設の抽出について

女川原子力発電所 2 号炉における評価対象施設の抽出フローを図 1，抽出結果を表 1 に示す。具体的には，以下の手順で抽出した。

- (1) 安全施設（安全重要度クラス 1， 2， 3）及び安全施設以外の施設から外部事象防護対象施設<sup>\*</sup>を抽出する。

※：外部事象防護対象施設は，「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。）における安全重要度クラス 1， 2 に属する施設，安全評価上期待する安全重要度クラス 3 に属する施設及び，それらを内包する建屋等を選定する。

また，上記以外の「その他の施設」については，外部事象防護対象施設への波及的影響がない場合は，竜巻及びその随伴事象に対して機能維持，又は，竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して，代替設備により必要な機能を確保すること，必要に応じプラントを停止し，安全上支障のない期間に修復すること等の対応により安全機能を損なわない設計とすることから評価完了とする。

- (2) 外部事象防護対象施設に対し，以下の観点で防護施設（竜巻）を抽出する。

- a. 耐震 S クラス施設又はそれを内包する建屋等

竜巻影響評価ガイドを基に「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震 S クラスの設計を要求される設備（系統，機器）及びそれを内包する建屋・構築物（以下「耐震 S クラス施設等」という。）を抽出する。

- b. 竜巻発生時に必要となる施設

竜巻発生時に発電用原子炉を停止するため，また，停止状態にある場合は引き続きその状態を維持するために必要な異常の発生防止の機能，又は異常の影響緩和の機能を有する構築物，系統及び機器，並びに，使用済燃料プールの冷却機能及び給水機能を維持するために必要な異常の発生防止の機能，又は異常の影響緩和機能を有する構築物，系統及び機器を抽出する。

また，上記以外の施設については，外部事象防護対象施設への波及的影響がない場合は，竜巻及びその随伴事象に対して機能維持，又は，竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して，代替設備により必要な機能を確保すること，必要に応じプラントを停止し，安全上支障のない期間に修復すること等の対応により安全機能を損なわない設計とすることから評価完了とする。

### (3) 評価対象施設の抽出

評価対象施設は、防護施設（竜巻）から抽出する竜巻影響評価の対象施設（以下「評価対象施設（竜巻）」という。）と、防護施設（竜巻）以外から抽出する防護施設（竜巻）に波及的影響を及ぼし得る施設（以下「評価対象施設（波及影響）」という。）に分類する。

評価対象施設（竜巻）については、以下の観点に基づき防護施設（竜巻）のなかから抽出している。評価対象施設の抽出フローを第1図、評価対象施設（竜巻）の抽出結果を第1表に示す。

#### ① 屋外設備又は建屋等

設備の設置場所を確認し、竜巻襲来時に風圧、気圧差及び飛来物衝突の影響を受ける屋外設備又は建屋等を評価対象とする。

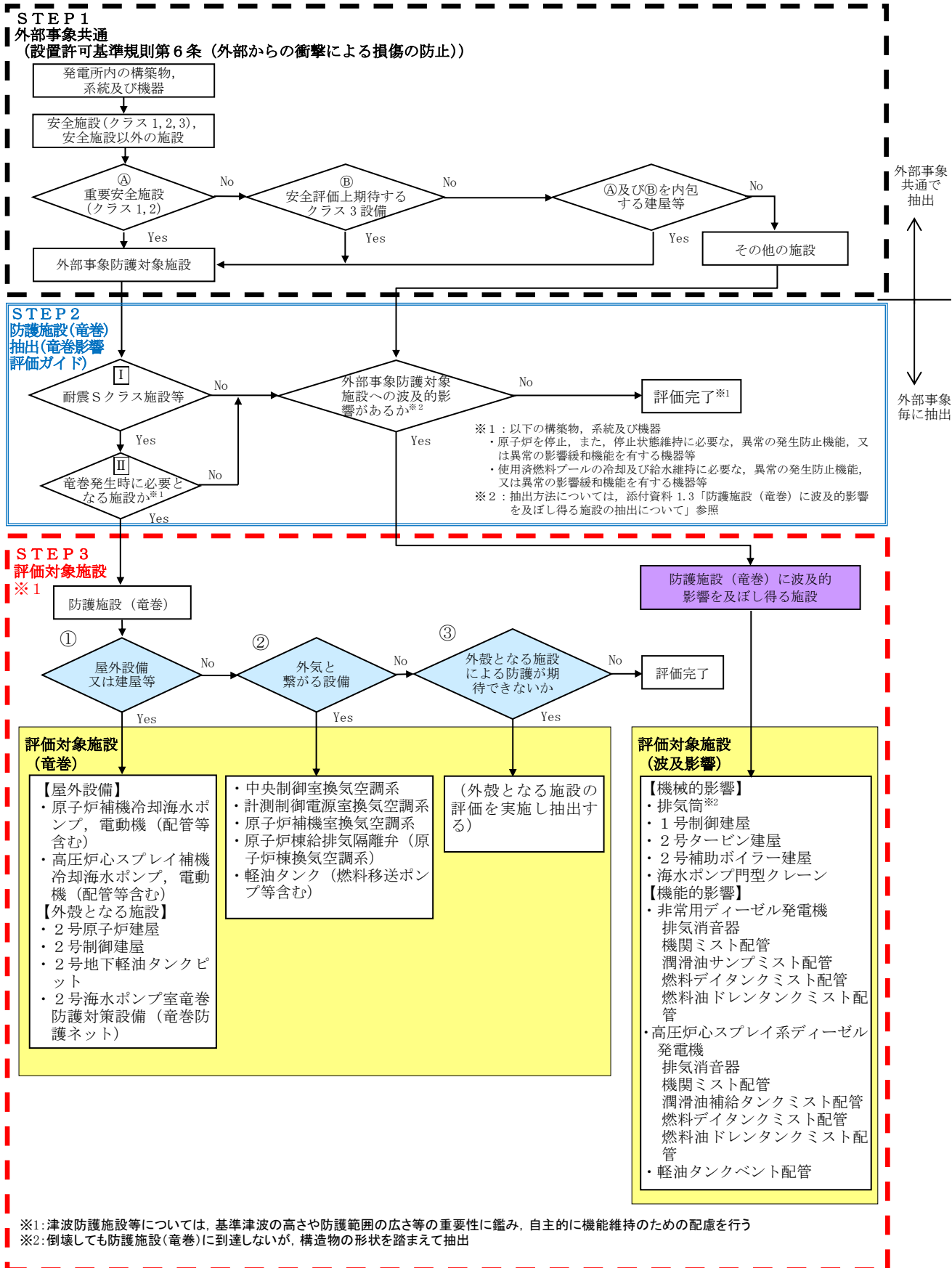
#### ② 外気と繋がる設備

外気との接続があるため、竜巻襲来時に気圧差荷重の影響を受ける換気空調設備等を評価対象とする。

#### ③ 外殻となる施設による防護が期待できない設備

防護施設（竜巻）が設置されている施設等の外殻による防護機能が期待できないものを評価対象とする。なお、外殻による防護に期待できるかは、建屋・構築物等の竜巻荷重に対する健全性の確認結果による。

防護施設（竜巻）以外で、防護施設（竜巻）に波及的影響を及ぼし得る施設（以下「評価対象施設（波及影響）」という。）については、添付資料 1.4「防護施設（竜巻）に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出について」にて詳細を記載する。



第1図 評価対象施設の抽出フロー

第1表 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設（竜巻）の抽出結果（1/7）

○：Yes ×：No -：該当せず※3

分類	定義	重要度分類指針	機能	構造物、系統又は機器	抽出の観点※1				設置場所※2	評価対象施設	備考
					STEP2		STEP3				
					I	II	①	②			
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造物、系統及び機器	1) 原子炉冷却材圧力バウンダリ機能 2) 過剰反応度の印加防止機能	構造物、系統又は機器 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。） 制御棒カブリング	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	-
				中性子束計装ハウジング	○	○	×	×	×	R	-
				制御棒カブリング	○	○	×	×	×	R	-
				制御棒駆動機構カブリング	○	○	×	×	×	R	-
				炉心シェラウド	○	○	×	×	×	R	-
				シェラウドサポート	○	○	×	×	×	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造物、系統及び機器	1) 原子炉の緊急停止機能 2) 未臨界維持機能 3) 原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止機能	炉心支持構造物（炉心シェラウド、シェラウドサポート、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。） 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）） 原子炉停止系（制御棒による系、ほう酸水注入系） 逃がし安全弁（安全弁としての開機能）	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	○	○	×	×	×	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（スベーパー）	○	○	×	×	×	R	-
				直接関連系（燃料集合体）	○	○	×	×	×	R	-
				制御棒	○	○	×	×	×	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造物、系統及び機器	1) 原子炉の緊急停止機能 2) 未臨界維持機能 3) 原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止機能	制御棒カブリング 直接関連系（制御棒駆動水圧系） ほう酸水注入系（ポンプ、注入弁、タンク出口弁、貯蔵タンク、ポンプ吸込配管及び弁） 主蒸気逃がし安全弁（安全弁としての開機能）	制御棒カブリング	○	○	×	×	×	R	-
				直接関連系（制御棒駆動水圧系）	○	○	×	×	×	R	-
				ほう酸水注入系（ポンプ、注入弁、タンク出口弁、貯蔵タンク、ポンプ吸込配管及び弁）	○	○	×	×	×	R	-
				主蒸気逃がし安全弁（安全弁としての開機能）	○	○	×	×	×	R	-
				制御棒カブリング	○	○	×	×	×	R	-
				直接関連系（制御棒駆動水圧系）	○	○	×	×	×	R	-
				ほう酸水注入系（ポンプ、注入弁、タンク出口弁、貯蔵タンク、ポンプ吸込配管及び弁）	○	○	×	×	×	R	-
				主蒸気逃がし安全弁（安全弁としての開機能）	○	○	×	×	×	R	-
				制御棒カブリング	○	○	×	×	×	R	-
				直接関連系（制御棒駆動水圧系）	○	○	×	×	×	R	-

※1：I＝耐震スクラス又はそれを内包する施設，II＝竜巻に対し必要となる施設，①＝屋外設備，②＝外気と繋がる設備，③＝外殻となる施設による防護機能が期待できない設備  
 ※2：R＝2号原子炉建屋，C＝2号制御建屋，T＝2号タービン建屋，L0＝2号地下軽油タンクピット，D＝固体廃棄物貯蔵所，HB＝補助ボイラー建屋，TSC＝緊急時対策所  
 ※3：抽出の観点①～③の評価の結果，該当せず  
 ※4：屋外にある防護施設（竜巻）の付属設備（波及的影響（機能的影響）を及ぼし得る施設）として抽出

第1表 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設（竜巻）の抽出結果（2/7）

○：Yes X：No -：該当せず※3

分類	定義	機能	構造物、系統又は機器	抽出の観点※1			設置場所※2	評価対象施設	備考	
				STEP2	STEP3					
					I	II				①
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造物、系統及び機器  4) 原子炉停止後の除熱機能		構造物、系統又は機器  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） 直接関連系（残留熱除去系） 原子炉隔離時冷却系（ポンプ、サブプレッションチェンバ、タービン、サブプレッションチェンバから注水先までの配管、弁） タービンへの蒸気供給配管、弁 ポンプミニニウムフローラインの配管、弁 サプレッションチェンバ内のストレーナ 復水貯蔵タンク ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込弁 ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込配管、弁 潤滑油冷却器及びその冷却器までの冷却水供給配管 高圧炉心スプレイス（ポンプ、サブプレッションチェンバ、サブプレッションチェンバからスプレイスパーージャ） 直接関連系（高圧炉心スプレイス） 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 駆動用窒素源（アキウムレータ、アキウムレータから主蒸気逃がし安全弁までの配管、弁） 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 駆動用窒素源（アキウムレータ、アキウムレータから主蒸気逃がし安全弁までの配管、弁） 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 駆動用窒素源（アキウムレータ、アキウムレータから主蒸気逃がし安全弁までの配管、弁）	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、高圧炉心スプレイス、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））	〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇	〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇	〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇 〇	R R R R R R R R R R R R R R R	- - - - - - - - - - - - - - -	備考

※1：I＝耐震Sクラス又はそれを内包する施設，II＝竜巻に対して必要となる施設，①＝屋外設備，②＝外殻となる施設による防護機能が期待できない設備  
 ※2：R＝2号原子炉建屋，C＝2号制御建屋，T＝2号タービン建屋，L0＝2号地下軽抽タンクピット，D＝固体廃棄物貯蔵所，HB＝補助ボイラー建屋，TSC＝緊急時対策所  
 ※3：抽出の観点①～③の評価の結果，該当せず  
 ※4：屋外にある防護施設（竜巻）の付属設備（波及的影響（機能的影響）を及ぼし得る施設）として抽出

第1表 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設（竜巻）の抽出結果（3/7）

○：Yes ×：No -：該当せず※3

分類	定義	機能	構造物、系統又は機器	抽出の観点※1				設置場所※2	評価対象施設	備考
				STEP2			STEP3			
				I	II	①				
			構造物、系統又は機器				③			
			残留熱除去系（低圧注水モード）（ポンプ、サブプレッショントラップ、サブプレッショントラップからの注水先までの配管、弁（熱交換器バイパスライン含む）、注水ヘッド）	○	○	×	×	R	-	
			直接関連系（残留熱除去系（低圧注水モード））	○	○	×	×	R	-	
			低圧炉心スプレイス系（ポンプ、サブプレッショントラップ、サブプレッショントラップからの注水先までの配管、弁、スプレイスバナー）	○	○	×	×	R	-	
			直接関連系（低圧炉心スプレイス系）	○	○	×	×	R	-	
			非常用炉心冷却系（低圧炉心スプレイス系、低圧注水系、高圧炉心スプレイス系、自動減圧系）	○	○	×	×	R	-	
	5) 炉心冷却機能			○	○	×	×	R	-	
			直接関連系（高圧炉心スプレイス系）	×	×	△	△	屋外	-	
			直接関連系（高圧炉心スプレイス系）	○	×	△	△	R	-	
			自動減圧系（主蒸気逃がし安全弁）	○	○	×	×	R	-	
			直接関連系（自動減圧系（主蒸気逃がし安全弁））	○	○	×	×	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）	○	○	×	×	R	-	
			直接関連系（原子炉格納容器）	○	○	×	×	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ス冷却系、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	○	○	×	×	R	-	
	6) 放射性物質の閉じ込め機能、放射線の遮蔽能力及び放出低減機能			○	○	×	×	R	-	
			原子炉格納容器（原子炉建屋）	○	○	×	×	R	-	
			直接関連系（原子炉建屋（原子炉建屋原子炉棟））	○	○	×	×	R	-	
			原子炉格納容器隔離弁及び格納容器バウンダリ配管	○	○	×	×	R	-	
			直接関連系（原子炉格納容器隔離弁及び格納容器バウンダリ配管）	○	○	×	×	R	-	
			主蒸気流量制限器	○	○	×	×	R	-	

※1：I＝耐震Sクラス又はそれを内包する施設，II＝竜巻に対し必要となる施設，①＝屋外設備，②＝外気と繋がる設備，③＝外殻となる施設による防護機能が期待できない設備  
 ※2：R＝2号原子炉建屋，C＝2号制御建屋，T＝2号タービン建屋，L0＝2号地下軽油タンクピット，D＝固体廃棄物貯蔵所，HB＝補助ボイラー建屋，TSC＝緊急時対策所  
 ※3：抽出の観点①～③の評価の結果，該当せず  
 ※4：屋外にある防護施設（竜巻）の付属設備（波及的影響（機能的影響）を及ぼし得る施設）として抽出

第1表 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設（竜巻）の抽出結果（4/7）

○：Yes ×：No -：該当せず※3

分類	定義	機能	構築物、系統又は機器	重要度分類指針	抽出の観点※1				設置場所※2	評価対象施設	備考	
					STEP2	STEP3						
						I	II	①				②
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、原子炉冷却材圧力パウンタリの過圧を防止し、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ト冷却系、原子炉建屋、非常用ガス処理系、非常用循環ガス処理系、可燃性ガス濃度制御系	構築物、系統又は機器 残留熱除去系（格納容器スプレイト冷却器、サブプレッションチェンバ、サブプレッションチェンバからスプレイト先（ドライウエル及びサブプレッションチェンバ）までの配管、弁、スプレイトヘッド（ドライウエル及びサブプレッションチェンバ）） 直接関連系（残留熱除去系（格納容器スプレイト冷却モード）） 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、弁） 直接関連系（非常用ガス処理系） 可燃性ガス濃度制御系（再結合装置、格納容器から再結合装置までの配管、弁、再結合装置から格納容器までの配管、弁） 直接関連系（可燃性ガス濃度制御系） 遮へい設備（原子炉遮へい壁、一次遮へい壁、二次遮へい壁） 原子炉停止系への作動信号の発生機構 原子炉保護系の安全保護回路 • 原子炉保護系の安全保護回路 工業的安全施設への作動信号の発生機構 • 非常用炉心冷却系作動の安全保護回路 • 主蒸気隔離の安全保護回路 • 原子炉格納容器隔離の安全保護回路 • 非常用ガス処理系作動の安全保護回路	○	○	○	○	○	R	-	
					○	○	○	○	○	R	-	
	2) 安全上必須なその他の構築物、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、直流通電系（いずれも、MS-1 関連のもの）	非常用所内電源設備（ディーゼル機関、発電機、発電機から非常用負荷までの配電設備及び回路） 燃料系（ダイタンクからディーゼル機関まで） 始動用空気系（空気だめからディーゼル機関まで） 吸気系 冷却水系 潤滑油系 燃料移送系（軽油タンクからダイタンクまで） 軽油タンク	○	○	○	○	○	R	○	関連設備として原子炉補機室換気空調系を抽出 燃料油ドレンタンクミスト配管※4 排気消音器※4 機関ミスト配管、潤滑油サンプタンクミスト配管、潤滑油補給タンクミスト配管※4 燃料ダイタンクミスト配管※4 軽油タンクベント配管※4

※1：I＝耐震Sクラス又はそれを内包する施設，II＝竜巻に対し必要となる施設，①＝屋外設備，②＝外気と繋がる設備，③＝外殻となる施設による防護機能が期待できない設備  
 ※2：R＝2号原子炉建屋，C＝2号制御建屋，T＝2号タービン建屋，L0＝2号地下軽油タンクピット，D＝固体廃棄物貯蔵所，HB＝補助ボイラー建屋，TSC＝緊急時対策所  
 ※3：抽出の観点①～③の評価の結果，該当せず  
 ※4：屋外にある防護施設（竜巻）の付属設備（波及的影響（機能的影響）を及ぼし得る施設）として抽出







第1表 外部事象防護対象施設のうち評価対象施設（竜巻）の抽出結果（7/7）

○：Yes ×：No -：該当せず※3

分類	定義	重要度分類指針	機能	構築物、系統又は機器	抽出の観点※1						評価対象施設	備考		
					STEP2		STEP3			設置場所※2				
					I	II	①	②	③					
MS-2	2) 異常状態への対応上特に重要な構築物、系統及び機器	1) 事故時のプラント状態の把握機能	構築物、系統又は機器	<ul style="list-style-type: none"> <li>中性子束（起動領域モニタ）</li> <li>原子炉スクラム用電磁接触器の状態</li> <li>制御棒位置</li> <li>原子炉水位（広帯域、燃料域）</li> <li>原子炉圧力</li> <li>原子炉格納容器圧力</li> <li>サブレッシュヨンプール水温度</li> <li>格納容器内雰囲気モニタ（放射線レベル）</li> </ul> [低温停止への移行] <ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉圧力</li> <li>原子炉水位（広帯域）</li> </ul> [ドライヴェルズブレイ] <ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉水位（広帯域、燃料域）</li> <li>原子炉格納容器圧力</li> </ul> [サブレッシュヨンプエンバ冷却] <ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉水位（広帯域、燃料域）</li> <li>サブレッシュヨンプール水温度</li> </ul> [可燃性ガス濃度制御系起動] <ul style="list-style-type: none"> <li>格納容器内雰囲気モニタ（水素・酸素濃度）</li> </ul> （対象外）	○	○	○	○	○	○	R, C	-		
					2) 異常状態の緩和機能	BWR には対象機能なし	○	○	○	○	○	○	○	R, C
MS-3	2) 異常状態への対応上必要な構築物、系統及び機器	3) 制御室外からの安全停止機能	構築物、系統又は機器	原子力発電所緊急時対策所、燃料採取系、通信連絡設備、放射能監視設備、事故時監視計器の一部、消火系、安全避難通路、非常用照明	中央制御室外原子炉停止装置  放射線監視設備（気体廃棄物処理設備排気放射線モニタ）	○	○	○	○	○	○	-	-	
						1) 緊急時対策上重要なもの及び異常状態の把握機能	○	×	×	×	×	×	×	×
					2号海水ポンプ室竜巻防護対策設備（竜巻防護ネット）	○	○	○	○	○	○	○	○	外殻施設
					2号制御建屋	○	○	○	○	○	○	○	○	外殻施設
					軽油タンクピット	○	○	○	○	○	○	○	○	外殻施設

※1：I＝耐震Sクラス又はそれを内包する施設，II＝竜巻に対し必要となる施設，①＝屋外設備，②＝外気と繋がる設備，③＝外殻となる施設による防護機能が期待できない設備  
 ※2：R＝2号原子炉建屋，C＝2号制御建屋，T＝2号タービン建屋，L0＝2号地下軽油タンクピット，D＝固体廃棄物貯蔵所，HB＝補助ボイラー建屋，TSC＝緊急時対策所  
 ※3：抽出の観点①～③の評価の結果，該当せず  
 ※4：防護施設（竜巻）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）として抽出

○津波防護施設等については，防護施設（竜巻）から抽出する竜巻影響評価の対象施設と，防護施設（竜巻）以外から抽出する防護施設（竜巻）に波及的影響を及ぼし得る施設に抽出されないが，別紙2に示すとおり，女川電子力発電所の津波防護施設等については，基準津波の高さや防護範囲の広さ等その重要性に鑑み，自主的に機能維持のための配慮を行う。

原子炉建屋ブローアウトパネルに対する対応方針について

1. はじめに

原子炉建屋原子炉棟外壁に設置されているブローアウトパネル（以下「BOP」という。）の竜巻に対する対応方針について整理した。

2. BOPの設置状況について

屋外境界のBOPは原子炉建屋原子炉棟 3 階の 1 箇所を設置されている。図 1 に設置状況を示す。

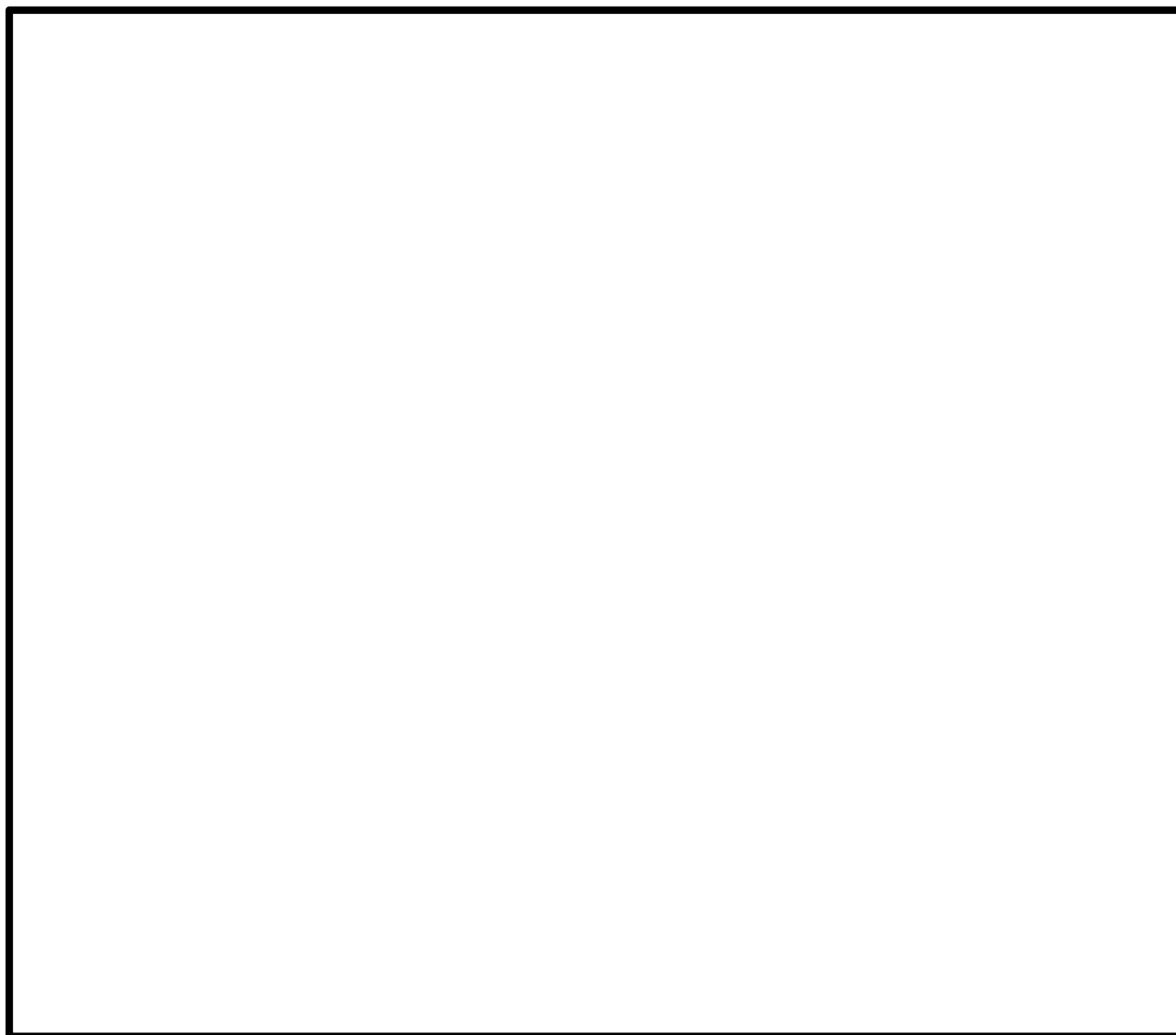


図 1 BOPの設置状況

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

### 3. BOPの開放に伴う影響評価

BOPが開放した場合に、竜巻の影響を受ける可能性があるMSトンネル室内の防護施設（竜巻）の設置状況は図2のとおりである。



図2 MSトンネル室内の防護施設（竜巻）の設置状況

BOPが開放、損傷した場合に、BOP開放部から原子炉建屋内部（MSトンネル室）に作用し得る竜巻に関連する荷重を表1に示す。

表1 BOP開口部からMSトンネル室に作用し得る竜巻に関連する荷重

荷重		評価	考慮の 要否
風圧力による荷重 ( $W_w$ )		同一区画に外気に対して開放するBOPが1枚のみであり、流路が形成されないため考慮不要	否
気圧差による荷重 ( $W_p$ )		MSトンネル室には、密閉され気圧差の影響を受ける設備がないため考慮不要	否
設計飛来物による 衝撃荷重 ( $W_M$ )		開口部付近に防護施設（竜巻）はないため設計飛来物による影響の考慮不要。 なお、BOP開放により開口部に設計飛来物「砂利」が侵入した場合でも、隔離弁駆動部等の動的機能を有する設備は、図2のとおり影響を受ける配置ではない	否
随 伴 事 象	雷	建屋開口部から雷の侵入は考え難いため考慮不要	否
	降水	雨の影響は開口部近傍に限られるとともに、特に重要な安全機能を有する設備への影響は、内部溢水評価に包含されることから、影響はない	否
	雹	施設への影響がない設計飛来物である「砂利」と寸法及び運動エネルギーが同程度であり、施設への影響はない	否

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

#### 4. 安全機能への影響と対応方針

竜巻襲来時にBOPに想定される状態、プラントへの影響及び対応方針を整理した結果を表2に示す。プラントへの影響を踏まえて以下の対応を行うことにより、安全機能を損なわないことを確認した。

表2 BOPの竜巻影響について

竜巻襲来時のBOPの状態	プラントへの影響	対応方針
気圧差による開放	原子炉建屋原子炉棟の閉じ込め機能の喪失が考えられるが、竜巻と設計基準事故が同時に発生する頻度は十分小さい	開放した場合は速やかに再開止措置を行う設計とする
	建屋内部の評価対象施設への竜巻荷重（風圧力）の影響	各評価対象施設は、風圧力により安全機能を損なわない設計とする
飛来物による損傷（貫通）	原子炉建屋原子炉棟の閉じ込め機能の喪失が考えられるが、竜巻と設計基準事故が同時に発生する頻度は十分小さい	貫通に対し、修復により閉止可能な設計とすることで安全機能を損なわない設計とする
	飛来物の侵入による、建屋内部の防護施設（竜巻）の損傷	損傷により、裏面の防護施設（竜巻）の安全機能に影響を及ぼさない設計とする

以上

外部事象に対する津波防護施設，浸水防止設備  
及び津波監視設備の防護方針について

1. 概要

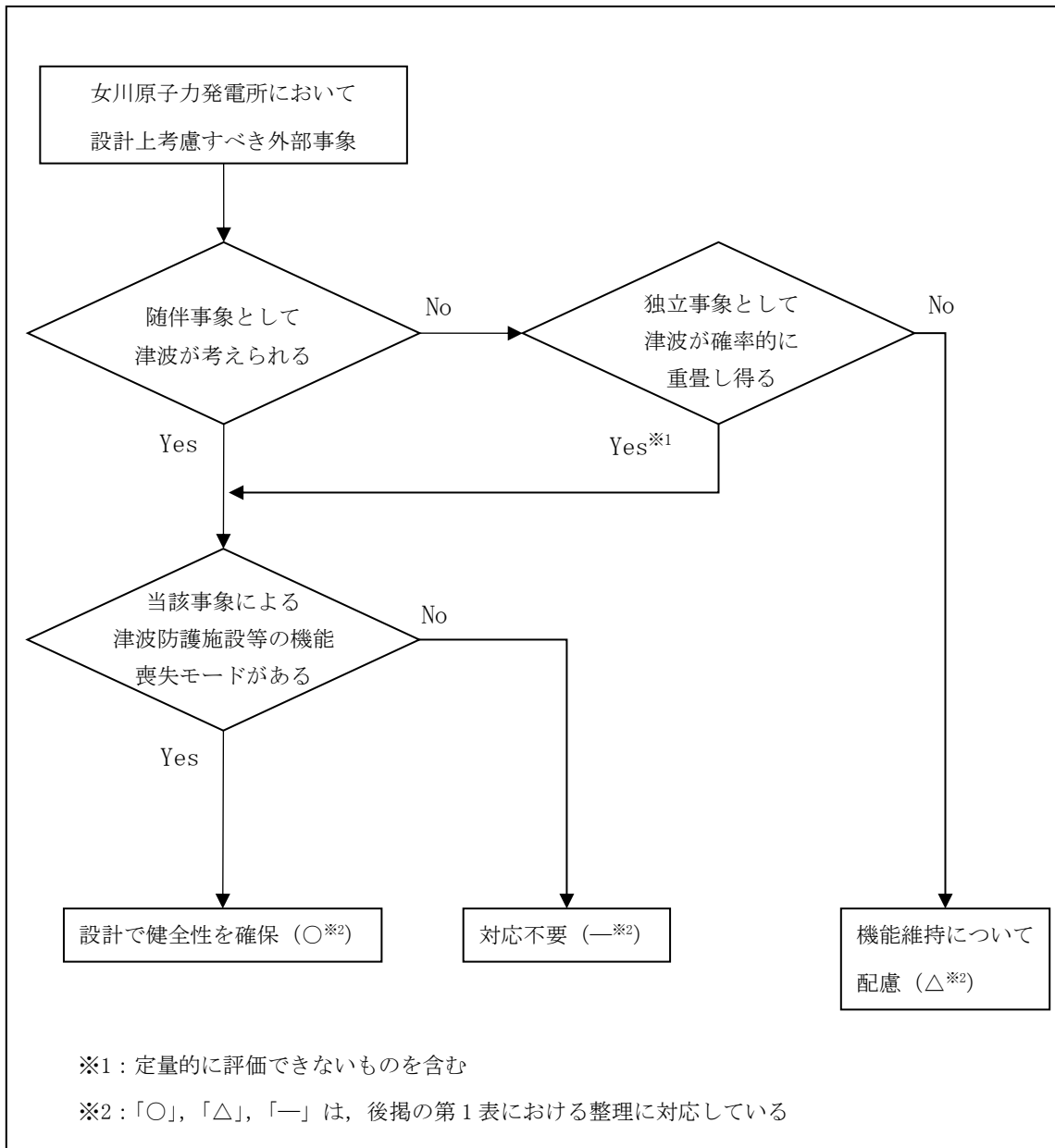
津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備（以下「津波防護施設等」という。）の外部事象に対する防護方針を以下に示す。

2. 防護に関する考え方

以下の考え方に基づき，女川原子力発電所において設計上考慮すべき外部事象に対する津波防護施設等の機能維持のための対応の要否について整理した。

外部事象に対する津波防護施設等の機能維持対応要否判断フローを第 2-1 図に示す。

- (1) 設計上考慮すべき事象が，津波もしくは津波の随伴，重畳が否定できない事象に該当するかを確認する。定量的な重畳確率が求められない事象については，保守的にその影響を考慮する。
- (2) 津波の随伴，重畳が否定できない場合は，当該事象による津波防護施設の機能喪失モードの有無を確認する。機能喪失モードが認められる場合は，設計により健全性を確保する。
- (3) 津波の随伴，重畳が有意でないと評価される事象についても，女川原子力発電所の津波防護施設については，基準津波の高さや防護範囲の広さ等その重要性に鑑み，自主的に機能維持のための配慮を行う。



第 2-1 図 外部事象に対する津波防護施設等の機能維持対応要否判断フロー

### 3. 検討結果

上記フローに基づく各事象に対する防護方針の検討結果を以下に示す。

(詳細は第 3-1 表のとおり)

#### (1) 津波の随伴，重畳が否定できない事象<sup>\*</sup>に対する防護方針

これらの外部事象に対しては，津波との随伴もしくは重畳の可能性を否定できないため，荷重の重ね合わせのタイミングも考慮した上で設計への反映の要否を検討し，津波防護施設等への影響が考えられる事象に対しては，津波防護施設等の機能を維持する設計とする。

※：地震，洪水，風（台風），凍結，降水，積雪，落雷，地すべり，生物学的事象，森林火災

#### (2) 津波の随伴，重畳が有意ではない事象（竜巻，火山の影響）に対する防護方針

「竜巻」，「火山の影響」の 2 つの外部事象に津波は随伴せず，また，基準津波との重畳の確率も有意ではないため，津波防護施設等を防護対象施設とはしないものの，津波防護施設等の機能が要求される時にはその機能を期待できるように以下の対応を自主的に実施する。

##### a. 「竜巻」

設計竜巻と基準津波が重畳する年超過確率は約  $1.9 \times 10^{-12} \sim 1.9 \times 10^{-13}$  (/年) であり，竜巻と津波の重畳は有意ではないと評価されるが，竜巻が襲来した場合には必ず作用する風荷重に対しては，津波防護施設等の健全性を維持する設計とする。また，竜巻が襲来した場合でも，必ずしも津波防護施設に作用するとは限らない竜巻飛来物の衝撃荷重に対しては，大規模な損傷に至り難い構造とする。

##### b. 「火山の影響」

設計で想定する降下火砕物の噴火と基準津波が重畳する年超過確率は約  $1.2 \times 10^{-10} \sim 1.2 \times 10^{-11}$  (/年) であり，火山の影響と基準津波の重畳は有意ではないと評価されるが，降下火砕物の堆積荷重について長期荷重に対する構造健全性を確保するとともに，降灰後に適宜除去が可能な設計とする。



○	：津波の随伴，重量が否定できないため，設計で健全性を確保する事象 (○)
○	：津波の随伴，重量は有意ではないが，機能維持について設計上配慮する事象 (△)
○	：対応が不要な事象 (—)

第3-1表 外部事象に対する津波防護施設等の対応方針整理表 (1/2)

設計上考慮すべき外部事象	① 随伴事象として津波を考慮要	② 独立事象として津波が重量し得る	津波との重量を考慮要 (①か②が○)	津波防護施設の機能喪失による安全施設等の機能喪失の可能性	設計への反映要否	機能維持のための対応方針
地震	○	—	○	あり 地震荷重により損傷した場合，安全施設等への津波の到達，浸水による機能喪失が想定される。	○	耐震Sクラスとして基準地震動Ssに対し健全性を維持し，津波に対する防護機能を維持する。 また，津波と余震の組み合わせも考慮する。
洪水	—	—	—	なし 安全施設が設置される敷地を含む流域内には河川が存在しないことから，敷地が洪水による被害を受けることはない。	—	—
風 (台風)	—	○	○	あり 風荷重により損傷した場合，安全施設等への津波の到達，浸水による機能喪失が想定される。	○	・風荷重，津波荷重を考慮した設計とする。 ・津波監視カメラは，風荷重を考慮した設計とする。
竜巻	—	—	—	なし 以下のとおり，重量の頻度は無視し得る。 ・設計竜巻の確率：約 $1.9 \times 10^{-6}$ /年 ・基準津波の年超過確率 ： $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$ /年 ⇒重量確率：約 $1.9 \times 10^{-12} \sim 1.9 \times 10^{-13}$ /年 年超過確率が $1 \times 10^{-7}$ /年未満であり，有意ではない。	△	防朝堤・防朝壁の設計においては，自主的に以下の配慮を行い，信頼性を高める。 ・風圧力に対しては，健全性を維持する設計とする。 ・飛来物については，大規模な損傷に至り難い構造とする。
凍結	—	○	○	あり 凍害により止水目地が損傷した場合，安全施設への津波の到達，浸水による機能喪失が想定される。	○	止水目地は最低気温を考慮した設計とする。
降水	—	○	○	なし 降雨による海水面上昇の影響は無視し得る。	—	—

○	津波の随伴，重量が否定できないため，設計で健全性を確保する事象 (○)
△	津波の随伴，重量は有意ではないが，機能維持について設計上配慮する事象 (△)
—	対応が不要な事象 (—)

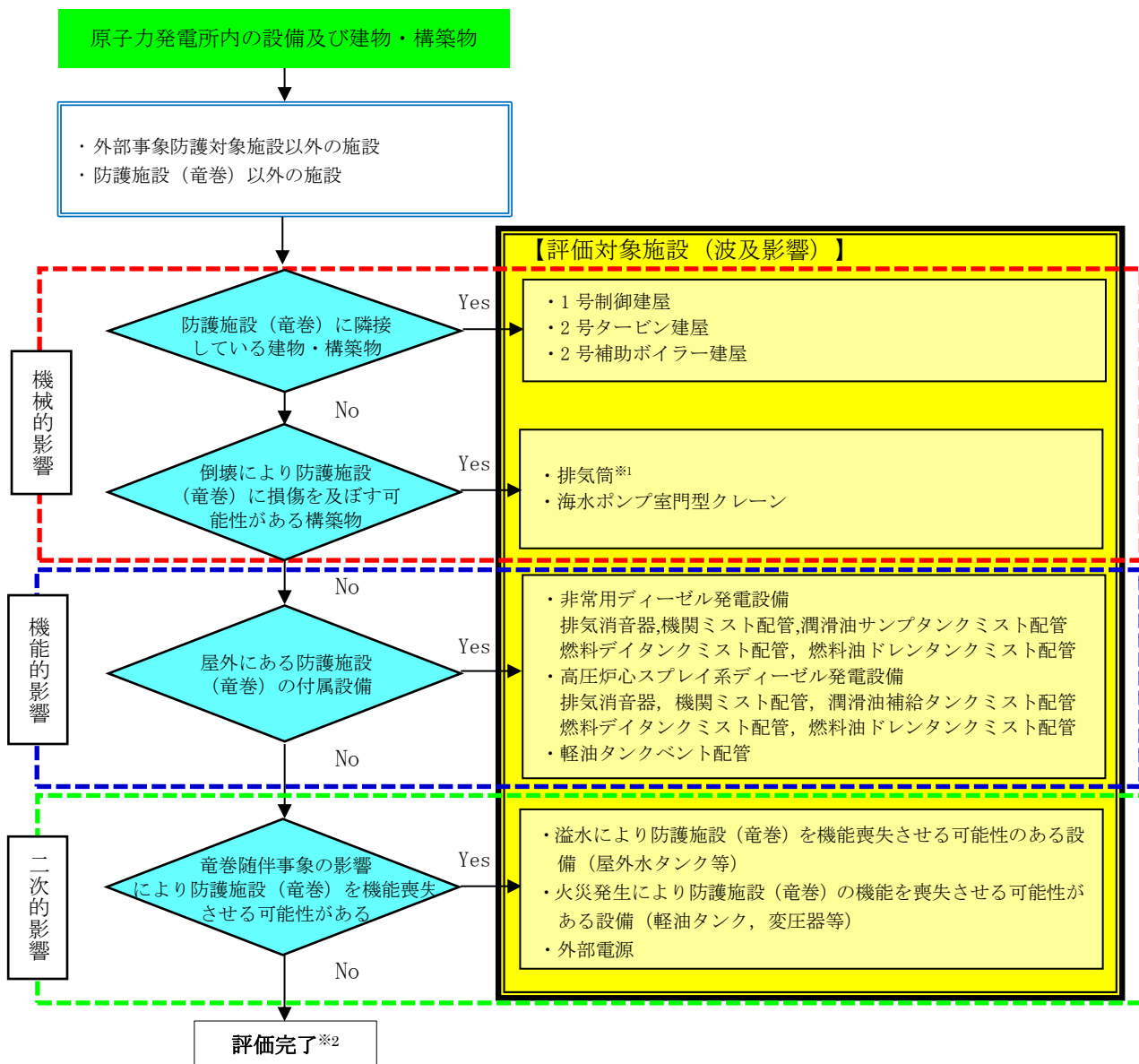
第3-1表 外部事象に対する津波防護施設等の対応方針整理表 (2/2)

設計上考慮すべき外部事象	① 随伴事象として津波を考慮要	② 独立事象として津波が重量し得る	津波との重量を考慮要 (①か②が○)	津波防護施設の機能喪失による安全施設等の機能喪失の可能性	設計への反映要否	機能維持のための対応方針
積雪	—	○	○	あり 積雪荷重により損傷した場合，安全施設等への津波の到達，浸水による機能喪失が想定される。	○	積雪荷重と津波荷重を考慮した設計とする。
落雷	—	○	○	あり 落雷による津波監視設備の機能喪失が想定される。	○	津波監視設備については，既設避雷設備の遮へい範囲内への設置を行う。
地すべり	—	—	—	なし 発電所の敷地及びその近傍には地すべりを起こすような地形は存在しない。	—	—
火山	—	—	—	なし 以下のとおり，重量の頻度は無視し得る。 ・想定する火山の確率：約 $1.2 \times 10^{-4}$ /年 ・基準津波の年超過確率 ： $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$ /年 ⇒重量確率：約 $1.2 \times 10^{-10} \sim 1.2 \times 10^{-11}$ /年 年超過確率が $1 \times 10^{-7}$ /年未満であり，有意ではない。	△	設計にて長期荷重に対する構造健全性を確保するとともに，降灰後に降下火砕物を適宜除去が可能な設計とする。
生物学的事象	—	—	—	なし 生物による影響（閉塞，侵入）による機能喪失モードを有しない。	—	—
森林火災	—	○	○	なし 防火帯により森林との離隔距離が確保されるため，熱影響を受けることはない。	—	—

防護施設（竜巻）に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出について

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

添付資料 1.2 の STEP2 のフローにおける「外部事象防護対象施設への波及的影響があるか」の詳細を第 1 図に示す。



※1：倒壊しても防護施設（竜巻）に到達しないが、建造物の形状を踏まえて抽出

※2：津波防護施設等については、基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性に鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う

第 1 図 防護施設（竜巻）に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出フロー

## 1. 機械的影響の観点での抽出

防護施設（竜巻）に対して、機械的影響の観点から、施設が倒壊することにより、防護施設（竜巻）の機能を喪失させる可能性がある施設を抽出する。

### 1.1 防護施設（竜巻）に隣接する施設

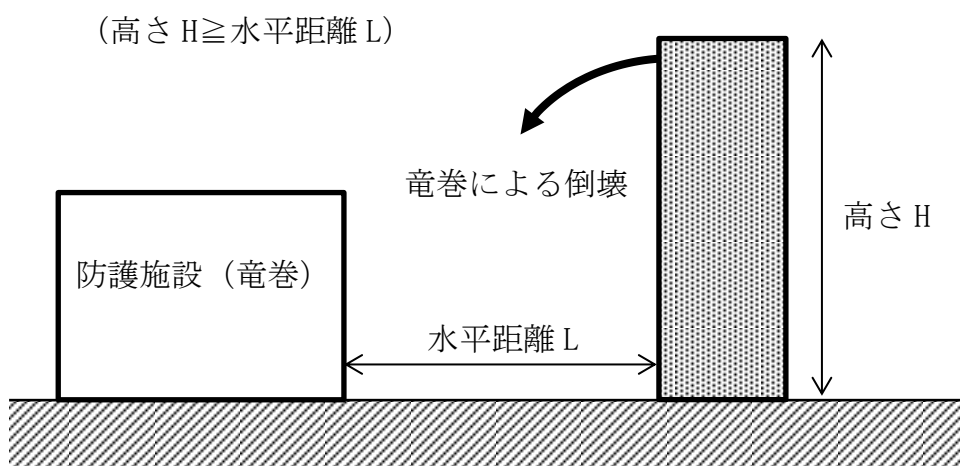
第 1.1-1 図に示すとおり、防護施設（竜巻）に隣接する施設を抽出した。抽出結果を第 1.1-1 表及び第 1.1-2 図に示す。また、抽出結果の詳細を、別紙 1「防護施設（竜巻）に波及的影響を及ぼし得る施設に係る調査結果について」に示す。



第 1.1-1 図 防護施設（竜巻）に隣接する施設

### 1.2 倒壊により防護施設（竜巻）に損傷を及ぼし得る施設

第 1.2-1 図に示すとおり、施設の高さが防護施設（竜巻）との距離以上である施設を抽出した。抽出結果を第 1.1-1 表及び第 1.1-2 図に示す。また、抽出結果の詳細を、別紙 1「防護施設（竜巻）に波及的影響を及ぼし得る施設に係る調査結果について」に示す。



第 1.2-1 図 倒壊により防護施設（竜巻）に損傷を及ぼし得る施設

第 1.1-1 表 機械的影響の観点からの抽出結果

防護施設（竜巻）へ損傷を及ぼす可能性のある建物及び構築物等	防護施設（竜巻）	地上高（m）	防護施設（竜巻）までの最短距離（m）	抽出結果
1号制御建屋	2号制御建屋	—	隣接	○
2号補助ボイラー建屋	2号制御建屋	—	隣接	○
2号タービン建屋	2号原子炉建屋	—	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 <sup>*1</sup>	○ <sup>*2</sup>
窒素貯槽	2号原子炉建屋	約 4	約 9	—
2号排気筒	2号原子炉建屋	約 160	約 180	○ <sup>*3</sup>
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号地下軽油タンクピット	約 5	約 11	—
2号復水貯蔵タンク	2号原子炉建屋	約 6	約 13	—
2号非常用ガス処理系（屋外露出部）	2号原子炉建屋	—	隣接	—

（注）機械的影響の観点からの主な抽出結果を記載している。

※1：通常待機位置における最短距離

※2：海水ポンプ室門型クレーンはストッパー等により固定されているが、破損した場合には竜巻の風圧を受け移動し、原子炉補機冷却海水ポンプ等に隣接する可能性があるため抽出する

※3：倒壊しても防護施設（竜巻）に到達しないが、構造物の形状を踏まえて抽出する



第 1. 1-2 図 機械的影響の観点からの抽出結果

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

## 2. 機能的影響の観点での抽出

### 2.1 防護施設（竜巻）の付属施設のうち屋外にある設備

防護施設（竜巻）に対して、機能的影響の観点（「屋外にある防護施設（竜巻）の付属設備」）から、機能喪失に陥った場合に、防護施設（竜巻）も機能喪失する可能性がある施設を抽出した。抽出結果を第 2.1-1 表に示す。

第 2.1-1 表 機能的影響の観点からの抽出結果

防護施設（竜巻）	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ank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ank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

### 3. 二次的影響の観点での抽出

発電所構内の構築物、系統及び機器のうち、二次的影響の観点から、竜巻随件事象の影響により防護施設（竜巻）を機能喪失させる可能性がある施設を抽出する。

建屋内においては、建屋開口部から防護施設（竜巻）へ影響を及ぼすような飛来物の侵入が想定される場合には、適切な防護対策を実施する。そのため、飛来物の侵入による溢水や火災は発生しないことから、防護施設（竜巻）の安全機能に影響は与えない。

また、建屋外においては、防護施設（竜巻）の安全機能に影響がないことを確認するため、防護施設（竜巻）の周辺にある溢水源、発火源となる設備として、以下を抽出した。

なお、2号軽油タンクについては、防護施設（竜巻）として抽出済であることから、本項目では抽出しない。

（竜巻随件事象の影響により防護施設（竜巻）を機能喪失させる可能性がある施設）

- ・溢水により防護施設（竜巻）を機能喪失させる可能性のある設備  
（屋外水タンク等（添付資料 3.4 参照））
- ・火災発生により防護施設（竜巻）の機能を喪失させる可能性がある設備  
（軽油タンク、変圧器等（添付資料 3.4 参照））
- ・外部電源

抽出結果の詳細を、添付資料 3.4「竜巻随件事象の抽出について」に示す。

防護施設（竜巻）に波及的影響を及ぼし得る施設に係る調査結果について

女川原子力発電所における波及的影響を及ぼし得る施設に係るウォークダウンは、平成 25 年 9 月 10 日～12 日、平成 27 年 2 月 12 日～13 日に実施した。

調査では、防護施設（竜巻）及び防護施設（竜巻）の外殻に波及的影響を及ぼし得る施設を抽出し、倒壊による影響を及ぼす可能性について確認を行った。

### 1. 調査範囲

防護施設（竜巻）の周りの最も高い建物である事務建屋の高さを基準として、約 40m の範囲とした。

### 2. 調査方法

調査範囲内にある施設について、防護施設（竜巻）の周辺の状態を確認し、隣接施設及び比較的近接している施設を抽出するとともに、倒壊による影響の可能性の観点から寸法測定、設置場所の確認、写真撮影等を行った。具体的な内容については以下のとおり。

#### (1) 寸法測定

防護施設（竜巻）からの離隔距離の測定、対象物の平面寸法及び高さを、計測器による測定及び図面等により確認した。

#### (2) 設置場所

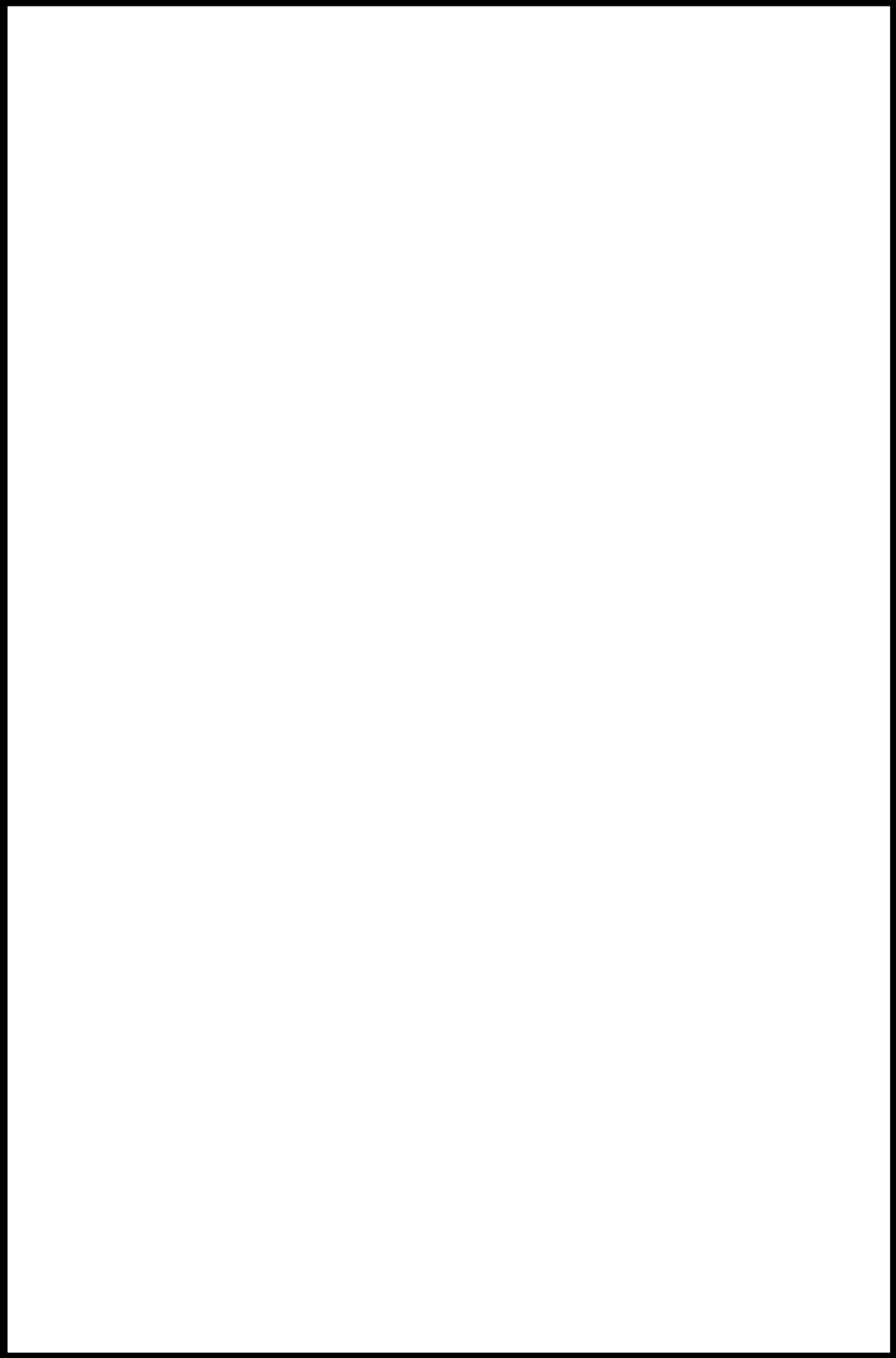
確認した施設について、配置図の作成及び、写真撮影を実施した。

その他、現地で確認できない情報（重量、寸法等）については、設計図書等により確認した。

### 3. 調査結果

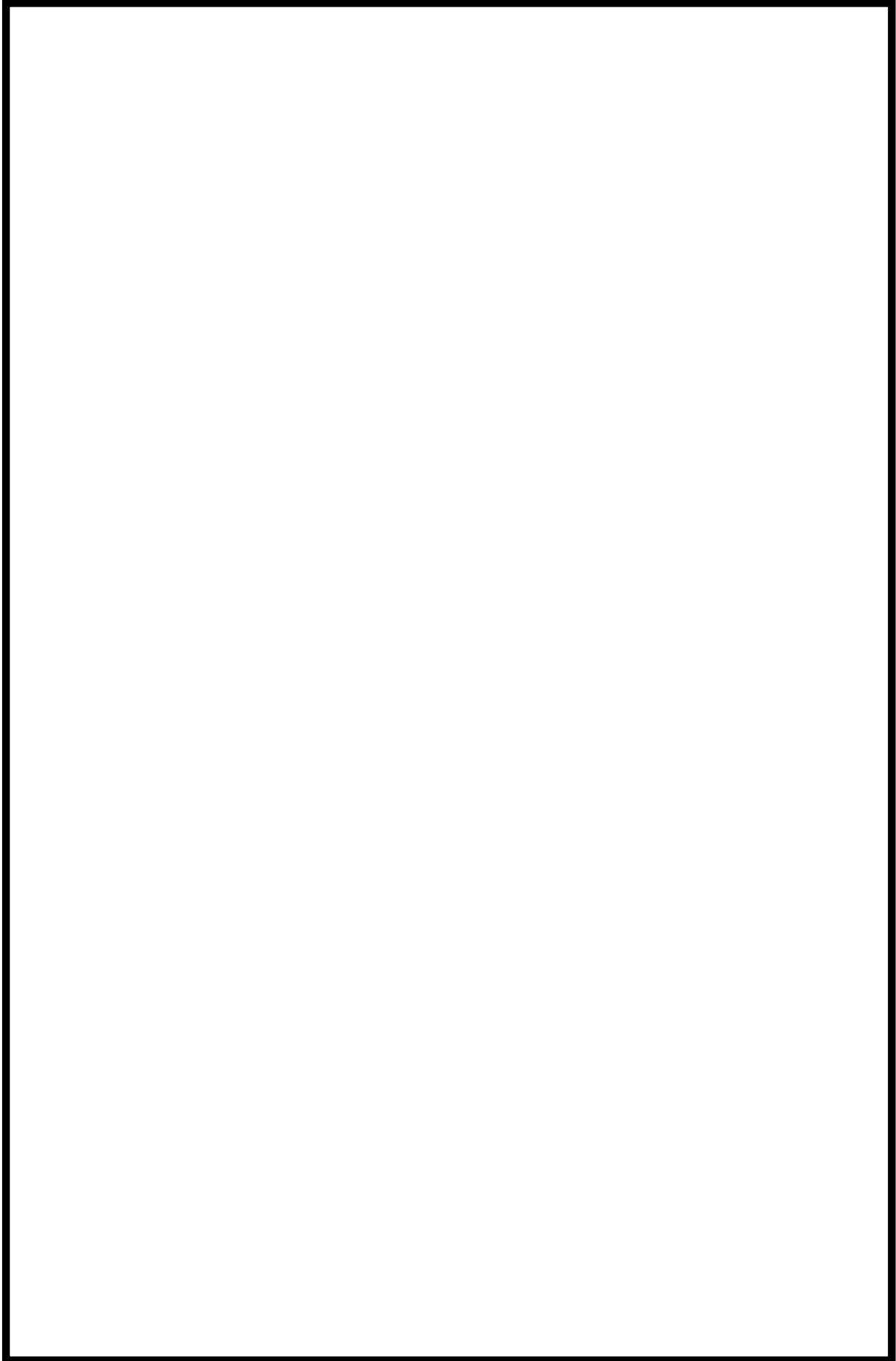
本調査で抽出された、波及的影響を及ぼし得る施設を第 3-1 図～第 3-2 図及び第 3-1 表～第 3-3 表に示す。防護施設（竜巻）から約 40m の範囲内に設置されている設備及び建物・構築物として 58 施設を抽出し、それらについて第 3-4 図のフローに基づいて評価を行った。その結果、防護施設（竜巻）に波及的影響を及ぼし得る施設の評価対象として、排気筒、2 号タービン建屋、1 号制御建屋、2 号補助ボイラー建屋、海水ポンプ室門型クレーン、防潮堤及び防潮壁、の 7 施設を選定した。





第3-1図 波及的影響を及ぼし得る可能性のある施設配置図（調査エリア）

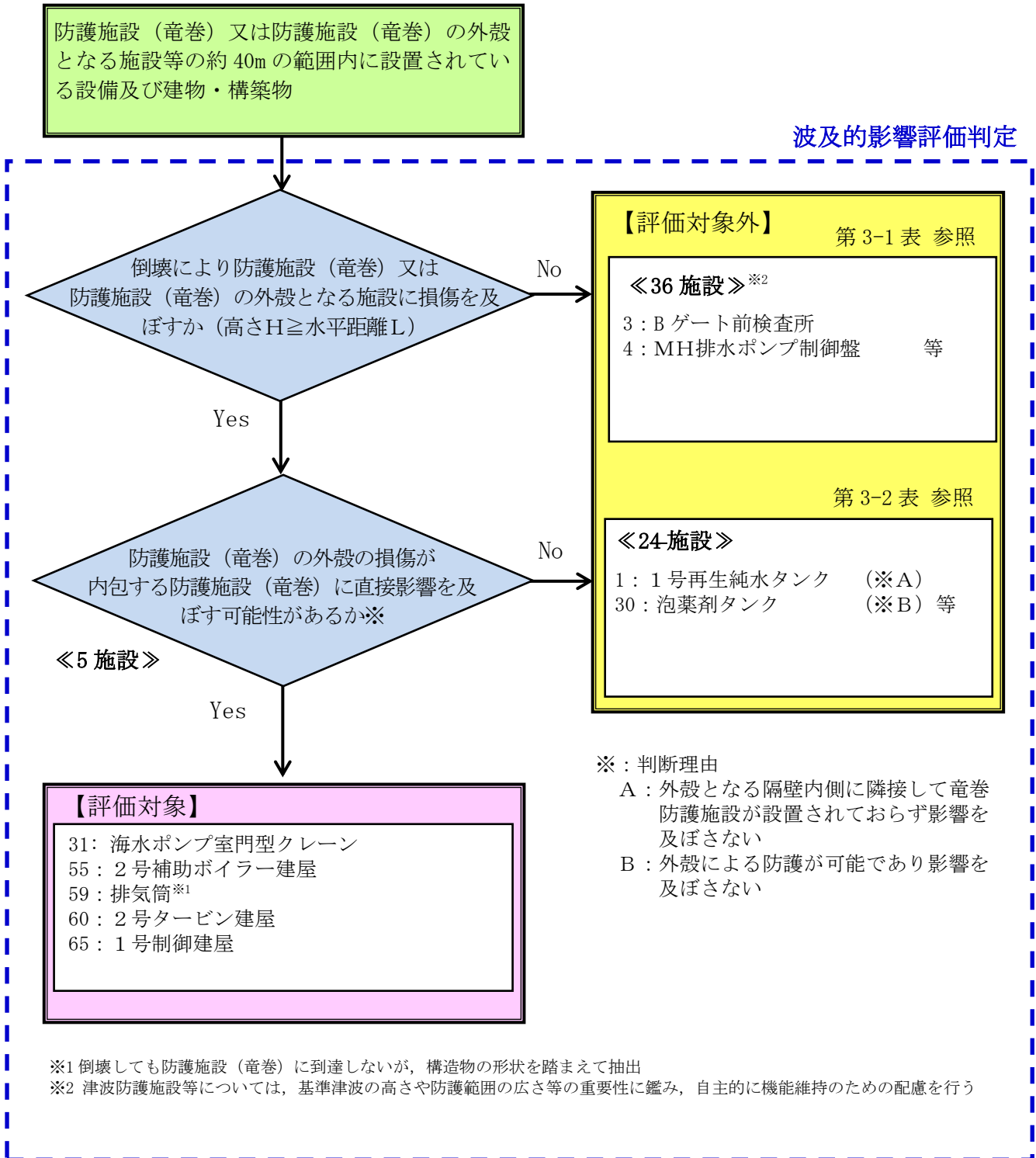
枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません



第3-2図 波及的影響を及ぼし得る可能性のある施設配置図（詳細図）

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。

波及的影響評価判定



第 3-3 図 倒壊による波及的影響を及ぼし得る可能性のある施設の評価判定フロー

第3-1表 倒壊による波及的影響を及ぼし得る可能性のある施設 評価対象外一覧表【36施設】

No.	施設名	No.	施設名	No.	施設名
3	Bゲート前検査所	17	屋外作業用分電盤	32	補助ボイラー変圧器クーラー制御盤(A)
4	MH排水ポンプ制御盤	18	PLR-VVVF入力変圧器	33	補助ボイラー変圧器クーラー制御盤(B)
5	窒素ガス供給装置制御盤	19	3号タービン建屋	34	補助ボイラー用変圧器A
6	窒素貯槽	20	3号硫酸貯槽	35	補助ボイラー用変圧器B
7	常時補給用液体窒素蒸発器(送ガス)	21	3号苛性ソーダ貯槽	36	1号主復水器電解鉄イオン注入装置電解槽A
8	常時補給用液体窒素蒸発器(加圧用)	22	3号ガスボンベ庫	37	1号主復水器電解鉄イオン注入装置電解槽B
10	計器収納箱(A)	23	除塵装置電源室	38	1号主復水器電解鉄イオン供給装置直流電源装置盤
11	計器収納箱(B)	25	揚水ポンプ制御盤(No.8)	54	渡り廊下
13	固化剤タンク	26	揚水ポンプ制御盤(No.9)	61	防潮堤 <sup>※1</sup>
14	固化材ポンプ(A)	27	揚水ポンプ制御盤(No.11)	62	防潮壁 <sup>※1</sup>
15	固化材ポンプ(B)	28	No.9揚水ポンプ遠方操作盤	63	2号復水貯蔵タンク
16	SOL固化剤タンク水位計架台	29	屋外作業用電源盤	64	2号非常用ガス処理系(屋外露出部)

※1 基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性を鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う

第3-2表 倒壊による波及的影響を及ぼし得る可能性のある施設 評価対象外一覧表【24施設】

No.	施設名	No.	施設名	No.	施設名
1	1号再生純水タンク(※A)	41	1号吸気フィルタサイレンサ(C)(※B)	49	1号CVCF設置エリア用屋外機(B-1)(※B)
2	1号化学分析室用ボンベ庫(※A)	42	1号吸気フィルタサイレンサ(D)(※B)	50	1号CVCF設置エリア用屋外機(B-2)(※B)
9	ページ用液体窒素蒸発器(※A)	43	1号排気サイレンサ(A)(※B)	51	1号給湯系統高置水槽(※B)
12	空冷チラーユニット(※A)	44	1号排気サイレンサ(B)(※B)	52	1号給水系統高置水槽(※B)
24	軽油タンク(A)(B)泡消火設備現場盤(※B)	45	1号中央制御室用凝縮機(A)(※B)	53	補助ボイラーサイレンサー(※A)
30	泡薬剤タンク(※B)	46	1号中央制御室用凝縮機(B)(※B)	56	2号原子炉建屋避雷針(※B)
39	1号吸気フィルタサイレンサ(A)(※B)	47	1号CVCF設置エリア用屋外機(A-1)(※B)	57	2号タービン建屋避雷針(※B)
40	1号吸気フィルタサイレンサ(B)(※B)	48	1号CVCF設置エリア用屋外機(A-2)(※B)	58	1号制御建屋避雷針(※B)

※：判断理由

A：外殻となる隔壁内側に隣接して防護施設(竜巻)が設置されておらず影響を及ぼさない。

B：外殻による防護が可能であり影響を及ぼさない。

第3-3表 現地調査結果における波及的影響を及ぼし得る施設の抽出結果(1/3)

No.	設備名称	安全 重要度 クラス	防護施設(竜巻)及び防 護施設(竜巻)の外殻と なる建屋及び構築物等	地上高(m) H	防護施設(竜巻)ま での最短距離(m) L	L-H(m)	波及的影響		評価対象
							倒壊により防護施設(竜 巻)又は防護施設(竜巻) の外殻となる施設に損傷 を及ぼすか (高さH≧水平距離L)	防護施設(竜巻)の外殻 の損傷が内包する防護施 設(竜巻)に直接影響を 及ぼす可能性があるか	
1	1号再生純水タンク	NON	1号制御建屋	11.8	11.1	-0.7	○	-	-
2	1号化学分析室用ボンベ庫	NON	1号制御建屋	2.6	1.5	-1.1	○	-	-
3	Bゲート前検査所	NON	1号制御建屋	3.6	10.0	6.4	-	-	-
4	MH排水ポンプ制御盤	NON	1号制御建屋	1.7	7.0	5.3	-	-	-
5	窒素ガス供給装置制御盤	MS-3	2号原子炉建屋	2.7	13.0	10.3	-	-	-
6	窒素貯槽	MS-3	2号原子炉建屋	4.0	9.0	5.0	-	-	-
7	常時補給用液体窒素蒸発器(送ガス)	MS-3	2号原子炉建屋	2.8	7.0	4.2	-	-	-
8	常時補給用液体窒素蒸発器(加圧用)	NON	2号原子炉建屋	2.7	5.8	3.1	-	-	-
9	バーズ用液体窒素蒸発器	NON	2号原子炉建屋	3.4	0.8	-2.6	○	-	-
10	計器収納箱(A)	NON	2号原子炉建屋	1.8	4.0	2.2	-	-	-
11	計器収納箱(B)	MS-3	2号原子炉建屋	1.8	10.0	8.2	-	-	-
12	空冷チラーユニット	NON	2号原子炉建屋	3.7	0.6	-3.1	○	-	-
13	固化剤タンク	NON	2号原子炉建屋	6.5	10.0	3.5	-	-	-
14	固化材ポンプ(A)	NON	2号原子炉建屋	0.6	4.3	3.7	-	-	-
15	固化材ポンプ(B)	NON	2号原子炉建屋	0.6	6.1	5.5	-	-	-
16	SOL 固化剤タンク水位計架台	NON	2号原子炉建屋	1.8	10.0	8.2	-	-	-
17	屋外作業用分電盤	NON	2号原子炉建屋	1.6	1.7	0.1	-	-	-
18	PLR-VWVF 入力変圧器	PS-3	2号原子炉建屋	3.3	8.0	4.7	-	-	-
19	3号タービン建屋	PS-2	2号地下軽油タンクピット	24.5	35.0	10.5	-	-	-
20	3号硫酸貯槽	NON	2号地下軽油タンクピット	2.5	30.0	27.5	-	-	-
21	3号苛性ソーダ貯槽	NON	2号地下軽油タンクピット	2.7	35.0	32.3	-	-	-
22	3号ガスボンベ庫	NON	2号地下軽油タンクピット	4.7	34.0	29.3	-	-	-

○：該当  
-：該当せず

第3-3表 現地調査結果における波及的影響を及ぼし得る施設の抽出結果(2/3)

No.	設備名称	安全 重要度 クラス	防護施設(竜巻)及び防 護施設(竜巻)の外殻と なる建屋及び構造物等	地上高(m) H	防護施設(竜巻)ま での最短距離(m) L	L-H(m)	波及的影響		評価対象
							倒壊により防護施設(竜 巻)又は防護施設(竜巻) の外殻となる施設に損傷 を及ぼすか (高さH≧水平距離L)	防護施設(竜巻)の外殻 の損傷が内包する防護施 設(竜巻)に直接影響を 及ぼす可能性があるか	
23	除塵装置電源室	NON	2号地下軽油タンクピット	4.8	13.0	8.2	-	-	-
24	軽油タンク(A)(B)消火設備現場盤	MS-3	2号原子炉建屋	2.3	2.0	-0.3	○	-	-
25	揚水ポンプ制御盤(No.8)	NON	2号原子炉建屋	2.4	15.0	12.6	-	-	-
26	揚水ポンプ制御盤(No.9)	NON	2号原子炉建屋	2.4	15.0	12.6	-	-	-
27	揚水ポンプ制御盤(No.11)	NON	2号原子炉建屋	2.4	15.0	12.6	-	-	-
28	No.9揚水ポンプ遠方操作盤	NON	海水ポンプ室	1.6	3.5	1.9	-	-	-
29	屋外作業用電源盤	NON	海水ポンプ室	2.7	3.0	0.3	-	-	-
30	泡薬剤タンク	MS-3	2号原子炉建屋	2.2	1.1	-1.1	○	-	-
31	海水ポンプ室門型クレーン	NON	2号タービン建屋	22.7	19.6	-3.1	○*	-	○
32	補助ボイラー変圧器クローラー制御盤(A)	PS-3	2号制御建屋	1.7	19.0	17.3	-	-	-
33	補助ボイラー変圧器クローラー制御盤(B)	PS-3	2号制御建屋	1.7	29.0	27.3	-	-	-
34	補助ボイラー用変圧器A	PS-3	2号制御建屋	5.7	13.0	7.3	-	-	-
35	補助ボイラー用変圧器B	PS-3	2号制御建屋	5.7	23.0	17.3	-	-	-
36	1号主復水器電解鉄イオン注入装置電解槽A	NON	1号制御建屋	4.0	10.0	6.0	-	-	-
37	1号主復水器電解鉄イオン注入装置電解槽B	NON	1号制御建屋	4.0	14.0	10.0	-	-	-
38	1号主復水器電解鉄イオン供給装置直流電源装置	NON	1号制御建屋	2.4	20.0	17.6	-	-	-
39	1号吸気フィルタサイレンサ(A)	MS-1	1号制御建屋	5.2	屋上	-	○	-	-
40	1号吸気フィルタサイレンサ(B)	MS-1	1号制御建屋	5.2	屋上	-	○	-	-
41	1号吸気フィルタサイレンサ(C)	MS-1	1号制御建屋	5.2	屋上	-	○	-	-
42	1号吸気フィルタサイレンサ(D)	MS-1	1号制御建屋	5.2	屋上	-	○	-	-
43	1号排気サイレンサ(A)	MS-3	1号制御建屋	10.6	屋上	-	○	-	-
44	1号排気サイレンサ(B)	MS-3	1号制御建屋	10.6	屋上	-	○	-	-

※海水ポンプ室門型クレーンについては、ストッパにより固定されるが、ストッパが破損した場合には竜巻の風により移動し、原子炉補機冷却海水ポンプ等に隣接する可能性があるため抽出する。

○：該当  
-：該当せず

第3-3表 現地調査結果における波及的影響を及ぼし得る施設の抽出結果(3/3)

No.	設備名称	安全 重要度 クラス	防護施設(竜巻)及び防 護施設(竜巻)の外設と なる建屋及び構築物等	地上高(m) H	防護施設(竜巻)ま での最短距離(m) L	L-H(m)	波及的影響		評価対象	
							倒壊により防護施設(竜 巻)又は防護施設(竜巻) の外設となる施設に損傷 を及ぼすか (高さH≧水平距離L)	防護施設(竜巻)の外設 の損傷が内包する防護施 設(竜巻)に直接影響を 及ぼす可能性があるか		
45	1号中央制御室用凝縮機(A)	MS-1	1号制御建屋	4.6	屋上	-	○	-	-	
46	1号中央制御室用凝縮機(B)	MS-1	1号制御建屋	4.6	屋上	-	○	-	-	
47	1号CVCF設置エリア用屋外機(A-1)	NON	1号制御建屋	0.8	屋上	-	○	-	-	
48	1号CVCF設置エリア用屋外機(A-2)	NON	1号制御建屋	0.8	屋上	-	○	-	-	
49	1号CVCF設置エリア用屋外機(B-1)	NON	1号制御建屋	0.8	屋上	-	○	-	-	
50	1号CVCF設置エリア用屋外機(B-2)	NON	1号制御建屋	0.8	屋上	-	○	-	-	
51	1号給湯系統高置水槽	NON	1号制御建屋	2.2	屋上	-	○	-	-	
52	1号給水系統高置水槽	NON	1号制御建屋	2.2	屋上	-	○	-	-	
53	補助ボイラーサイレンサー	NON	2号タービン建屋	0.9	10.5	9.6	-	-	-	
54	渡り廊下	NON	2号原子炉建屋	5.2	37.7	32.5	-	-	-	
55	2号補助ボイラー建屋	PS-3	2号制御建屋, 2号タービン建屋	-	隣接	-	○	○	○	
56	2号原子炉建屋避雷針	NON	2号原子炉建屋	10.4	屋上	-	○	-	-	
57	2号タービン建屋避雷針	NON	2号タービン建屋	10.4	屋上	-	○	-	-	
58	1号制御建屋避雷針	NON	1号制御建屋	13.0	屋上	-	○	-	-	
59	排気筒	MS-1	-	約160	約180	-	-	-	○ <sup>※1</sup>	
60	2号タービン建屋	PS-2	2号原子炉建屋	-	隣接	-	○	○	○	
61	防潮堤	NON (津波防護施設)	基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性を鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う							
62	防潮壁	NON (津波防護施設)	基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性を鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う							
63	2号復水貯蔵タンク	MS-1	2号原子炉建屋	約6	約13	約7	-	-	-	
64	非常用ガス処理系(屋外露出部)	MS-1	2号原子炉建屋	-	隣接	-	○	-	-	
65	1号制御建屋	NON	2号制御建屋	-	隣接	-	○	○	○	

※1 倒壊しても、防護施設(竜巻)に到達しないが、構造物の形状を踏まえ、抽出

○：該当  
一：該当せず

## 気候区分について

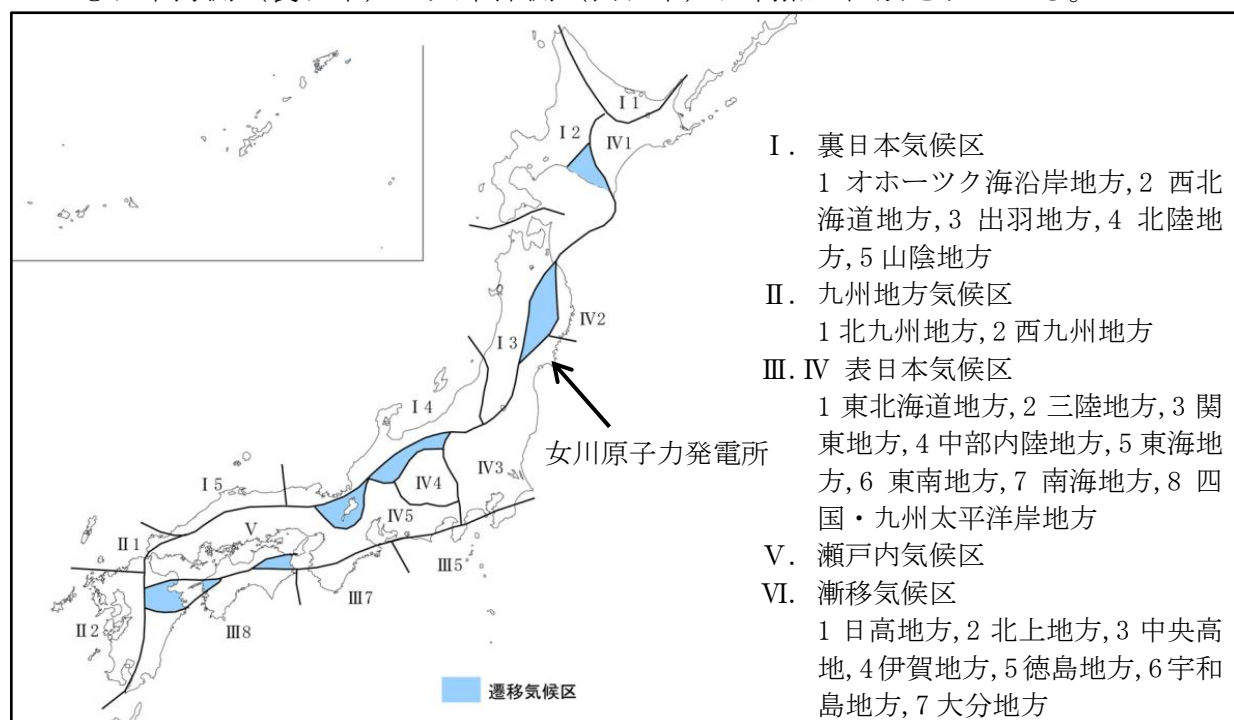
気候区分（関口 1959）は、以下の 4 種類の気候要素を基に、気候の境界を表したものである。

- 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第 1 図に示す。

第 1 図より、女川原子力発電所は区分 IV3 に属している。また、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。

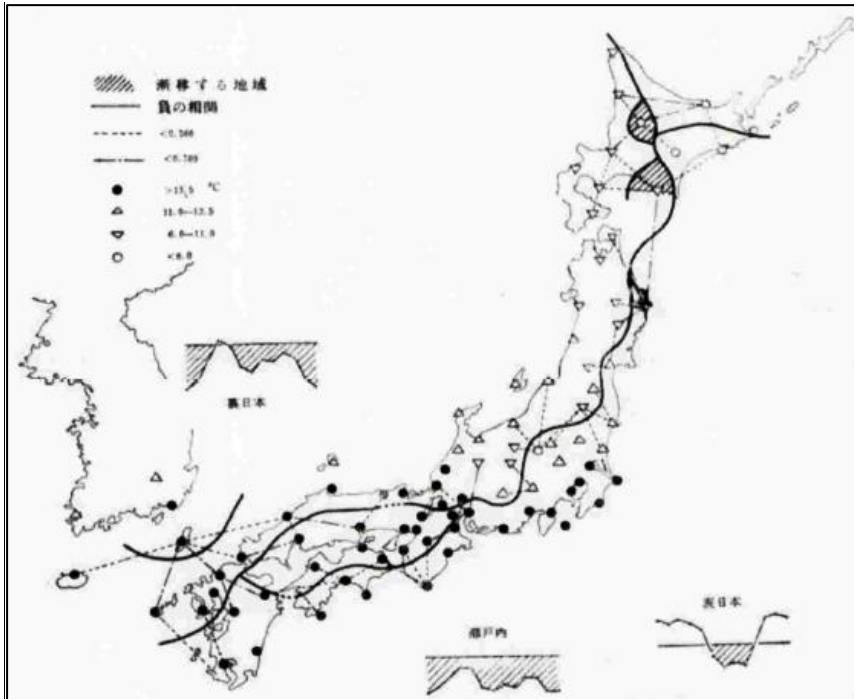
なお、第 2 図～第 5 図に示すとおり、①～④の各気候要素の気候区分、いずれにおいても日本海側（裏日本）と太平洋側（表日本）は判然と区別されている。



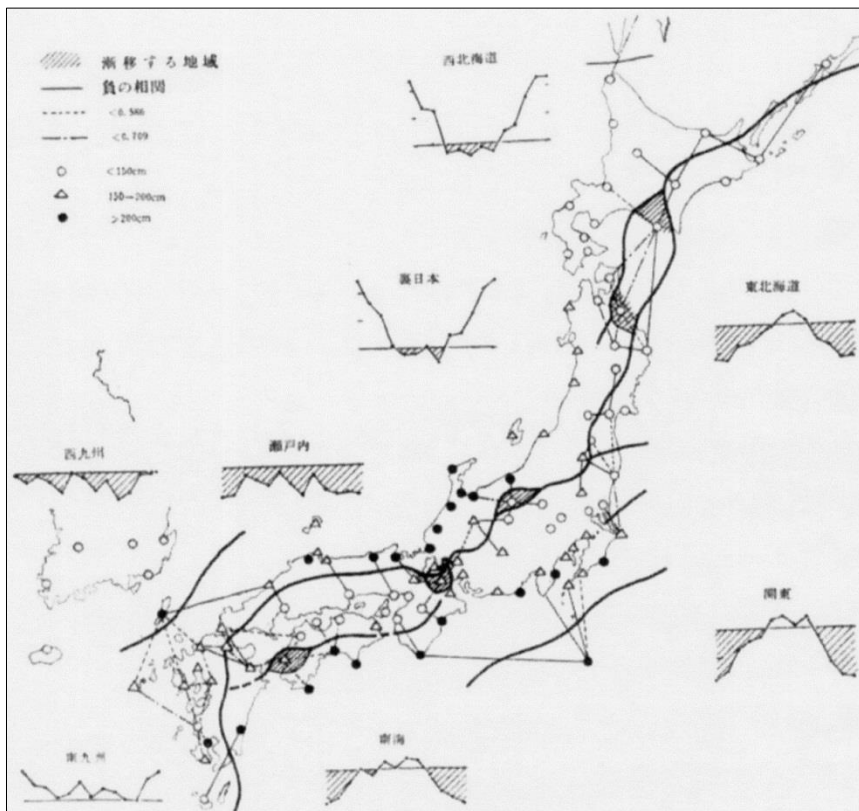
出展：関口武「日本の気候区分」東京教育大学地理学研究報告（1959）

第 1 図 日本の気候区分（関口）

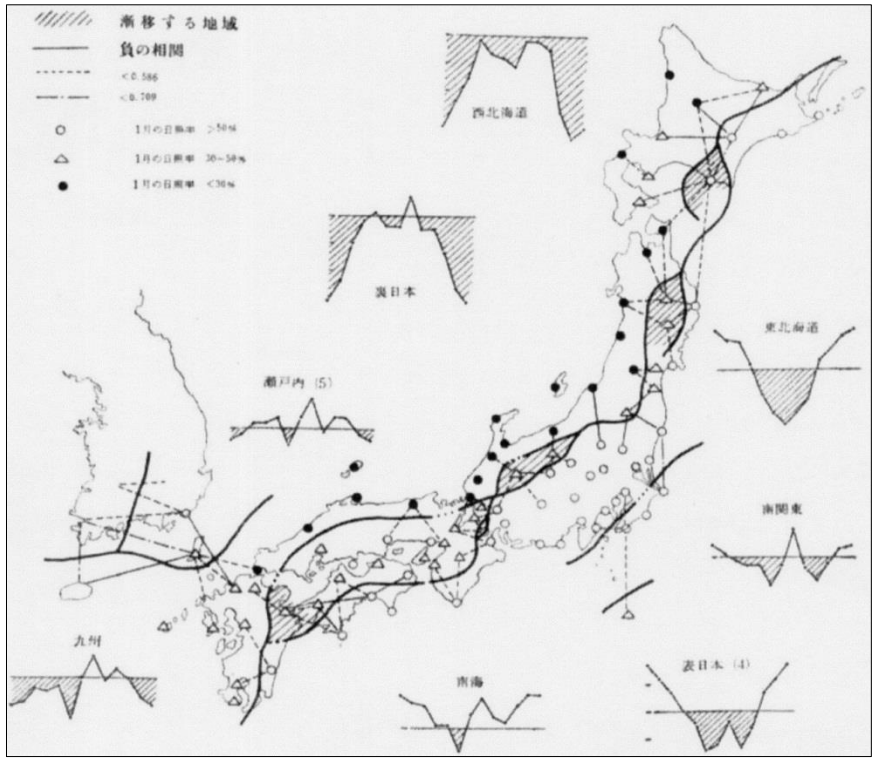




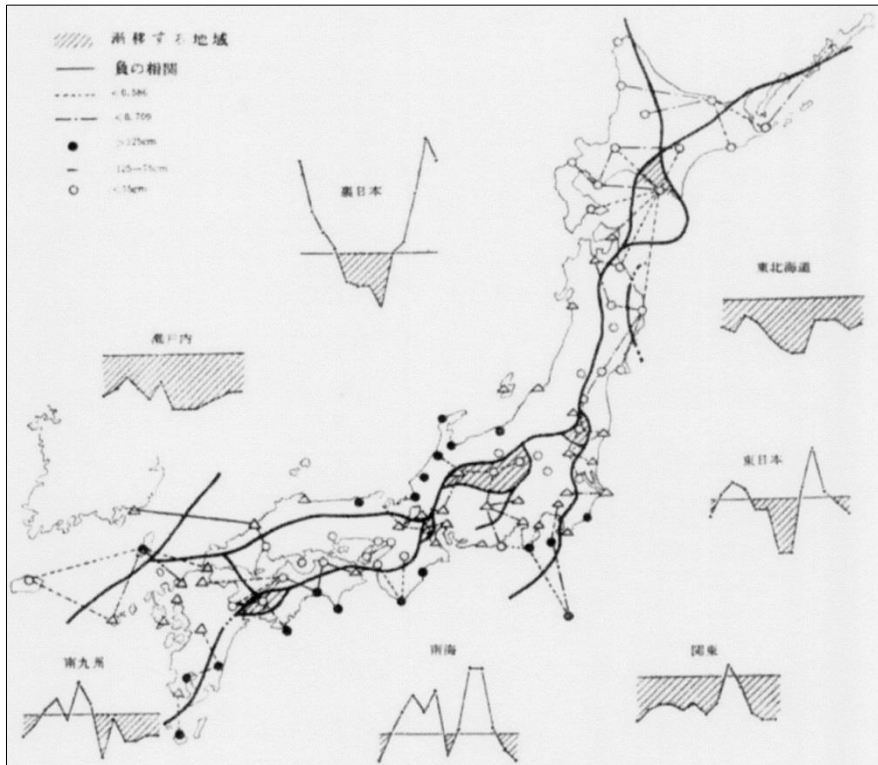
第2図 気温の日較差の年変化型による気候区分



第3図 雨天日数による気候区分



第4図 日照率による気候区分



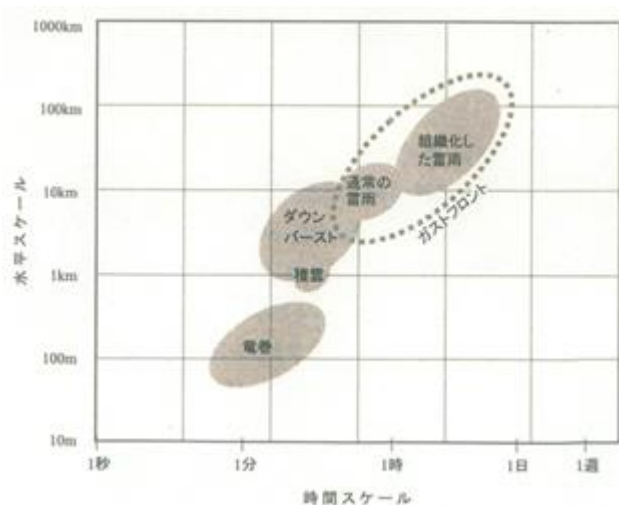
第5図 気候の乾湿による気候区分

## 数値気象解析にもとづく竜巻検討地域の設定について

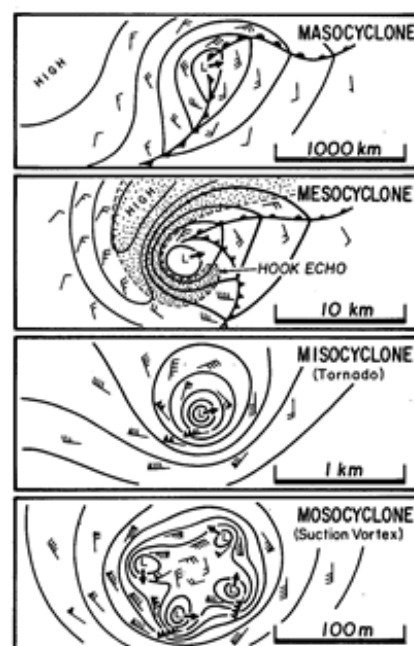
## 1. はじめに

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

竜巻の発生メカニズムを考える際、時空間スケールの階層構造が重要である（第1-2図）。ある大気現象は、スケールのより小さな現象を内包しており、竜巻の場合、竜巻の漏斗雲内の気流は数十メートル～数百メートル規模（マイクロスケールと呼ばれる（Orlanski 1975）；第1-2図では“MISOCYCLONE”と記載されている）の現象であるのに対し、竜巻を引き起こすもとの積乱雲である親雲のスケールは数キロメートル～数十キロメートル規模（メソスケールと呼ばれる。第1-2図では“MESOCYCLONE”と記載されている）である。台風、低気圧、前線等のいわゆる総観場は、数百キロメートル～数千キロメートル規模（総観スケールと呼ばれる。第1-2図では“MASOCYCLONE”と記載されている）として扱われる。また、竜巻内部には吸い込み渦（第1-2図では“Suction Vortex”と記載されている）と呼ばれるさらに強い渦が形成されることもある。



第1-1図 雷雨とその関連現象の時空間スケール（大野 2001）



第1-2図 竜巻発生時の渦の多重構造（Fujita 1981）

このように、竜巻の発生にはさまざまなスケールの現象が介在し、異なるスケールの現象が相互作用しているため、竜巻の発生頻度や強度の地域性は複数の時空間スケールで議論する必要がある。気象学における現状として、観測データの欠如や数値シ

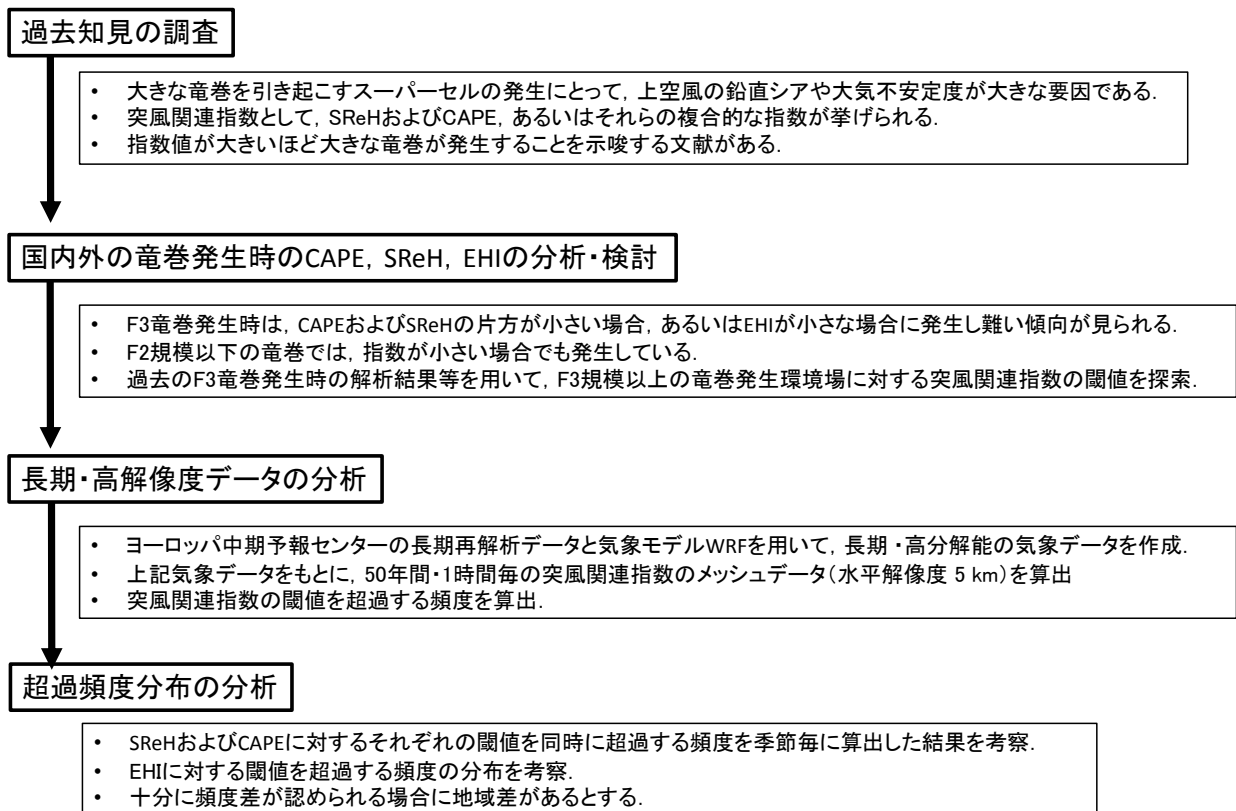
ミュレーション技術の不十分さゆえにマイクロスケールの現象の理解が難しく、未知なメカニズムもあると認識されている。一方、総観場の観点では、さまざまなパターンで竜巻が発生していることがわかっており、「日本海側では台風性竜巻の発生が確認されていない」ことや、地域に応じて総観場の割合が異なる等の分析結果が得られている。しかし、例えば、寒冷前線起因のF3竜巻が実際に発生している（1990年茂原竜巻や2006年佐呂間竜巻等）が、寒冷前線自体は国内どこでも通過しうるため、ある地域においてF3竜巻が発生し難いことを総観場の分析結果だけで示すのは難しい。

竜巻影響評価ガイド（原子力規制委員会2013）では、基準竜巻風速 $V_{BI}$ の設定の際に国内最大規模の竜巻ではなく竜巻検討地域内における記録等を参照する場合には、その明確な根拠を提示する必要があると記載されている。そのため、総観スケールの気象場の分析結果のみではなく、メソスケールあるいはマイクロスケールの気象場の特徴から地域性が見られる理由、及び竜巻検討地域内の記録を参照して $V_{BI}$ を設定できる根拠をより気象力学的に明らかにすることが必要である。ただし、上述のように、マイクロスケールでの議論は極めて困難である。

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

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

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



第1-3図 メソスケールでの分析フロー

## 2. 竜巻の発生メカニズム・分類とメソスケール分析の有効性

### 2.1 竜巻の発生メカニズム

竜巻の発生メカニズムは二つに大別されると考えられている(新野 2007)。一つは、スーパーセルと呼ばれる特徴的な構造を有する巨大積乱雲に伴うもの(第2.3-1図に例示した模式図参照)であり、もう一つは、気温・湿度や風向・風速が急変する局地的な前線(第2.3-2図に例示した模式図参照)に伴うものである。

スーパーセルに伴う竜巻では、大気下層における鉛直シア(風向が上下で逆転する、あるいは風速が上下で大きく異なる場合に生じる)に伴って水平軸を有した渦管が形成され、それが上昇気流によって数キロメートル上空まで持ち上がる。その際、メソサイクロンと呼ばれる直径3・4km~10km程度の鉛直軸回りの強い渦が積乱雲中にでき、その下部に竜巻が発生する(Klemp and Wilhelmson 1978 ; 図4参照)。このように、メソサイクロンの形成がこの種の竜巻の最大の特徴である(新野2007)。第2.3-1図に示すように、鉛直シアによりスーパーセル内では降水粒子の落下域(下降流域)と上昇流域が分離されるため、巨大な積乱雲にまで発達し、長時間持続しうる。国内で発生したF2規模以上の竜巻に対し、スーパーセルあるいはミニチュア(ミニ)スーパーセルが存在したことを観測・解析した成果も得られている(Suzuki et al. 2000, Mashiko et al. 2009等)。また、水平風速のマイクロスケールの空間スケールを有する竜巻漏斗雲の形成メカニズムについては、水平渦が上昇気流により引き伸ばされる

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

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

## 2.2 竜巻の分類

上記にて説明した発生メカニズムの観点から、メソサイクロンの形成が大きな竜巻の発生と深く関わっていることがわかる。米国では、メソサイクロンが形成される竜巻は、スーパーセル型と呼ばれるF2~F5規模を想定した顕著な竜巻として分類され、F1規模以下の竜巻は局地前線等に伴う非スーパーセル型と分類されている (Rasmussen and Blanchard 1998, Doswell and Evans 2003)。国内にて発生したF2-F3を含めた全てのF3竜巻(6事例)<sup>1</sup>もメソサイクロンを伴うスーパーセル型であったと報告されている (第2.3-1表)。

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

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

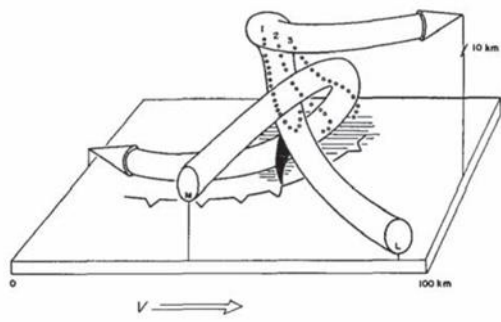
---

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

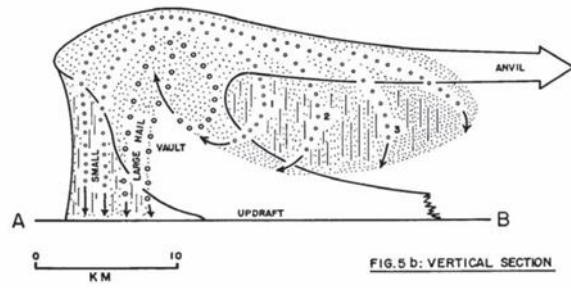
### 2.3 メソスケールでの分析の有効性

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

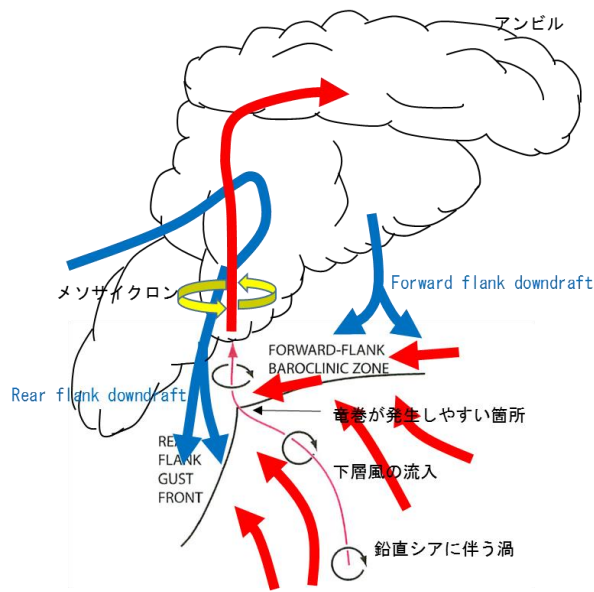
そこで、3節以降では、突風関連指数と呼ばれる竜巻の発生しやすさを指数化した量を用いて、大きな竜巻の発生しやすさについて分析し、その地域性について検討する。その際、スーパーセル型竜巻はメソサイクロンを有する点が特徴的であり、その発生はメソスケールにおける風の鉛直シアや大気不安定性と深く関わっている（Bluestein 2013, Klemp and Wilhelmson 1978, Rotunno and Klemp 1985, Trapp 2013）ことから、SReH及びCAPE、あるいはEHIと呼ばれる突風関連指数を用いる。



風況場

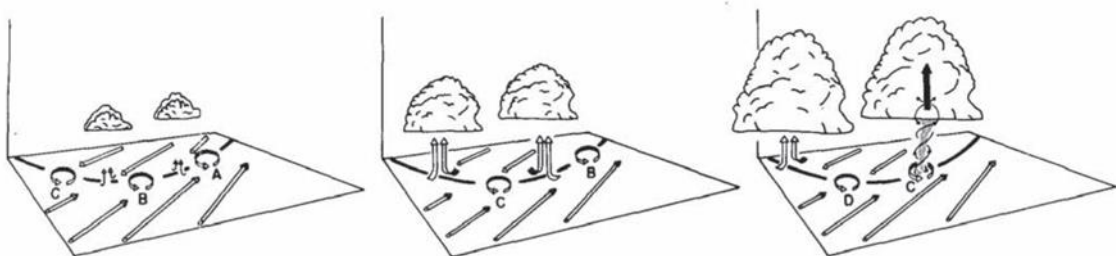


鉛直断面構造



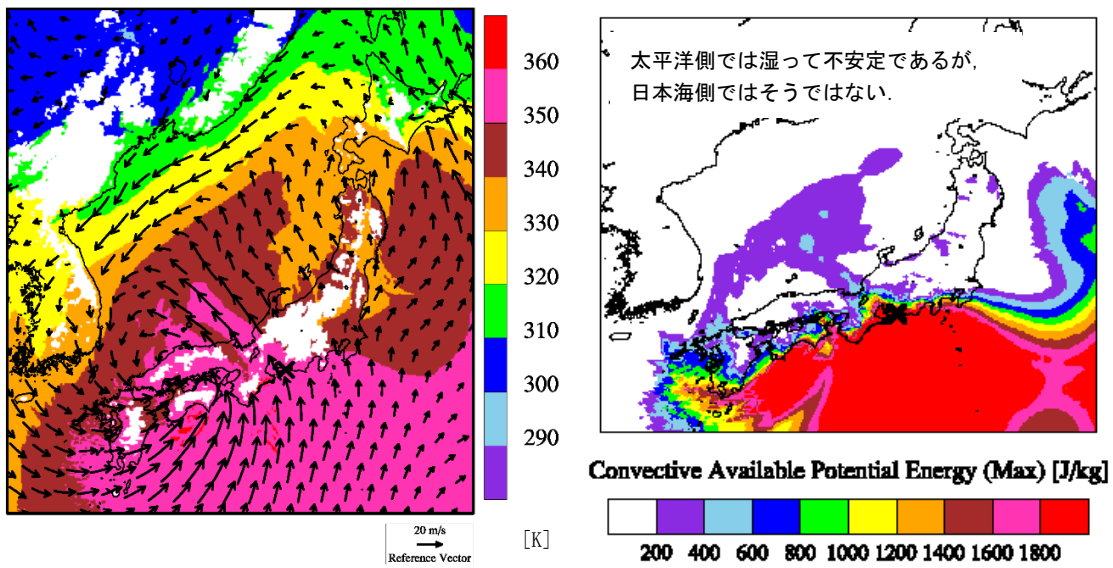
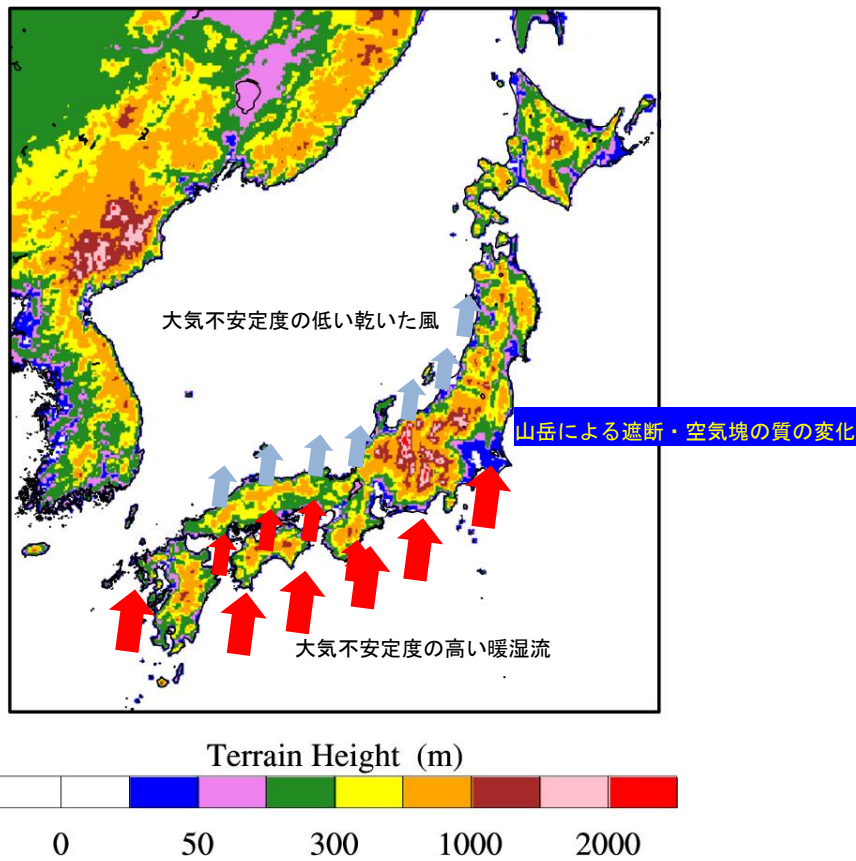
メソサイクロンの形成メカニズム

第 2.3-1 図 スーパーセル型雷雨の構造 (Browning 1964, Bluestein 2013 に加筆)



第2.3-2図 局地前線に伴う竜巻の発生機構に関する模式図 (Wakimoto and Wilson 1989) (上向きの黒い⇒が上昇気流を表す)





500m 高度における温位 (カラー) 及び風向・風速

大気不安定度 (CAPE) の分布

第2.3-3図 (上) 総観スケールでの気流場の模式図 (カラーは標高を表す) 及び  
(下) 1999年9月に豊橋にて発生したF3竜巻の事例

6 条—別添 2-1(竜巻)—添付 2.2-7

第 2.3-1 表 過去に国内にて発生した F3 規模竜巻の概要

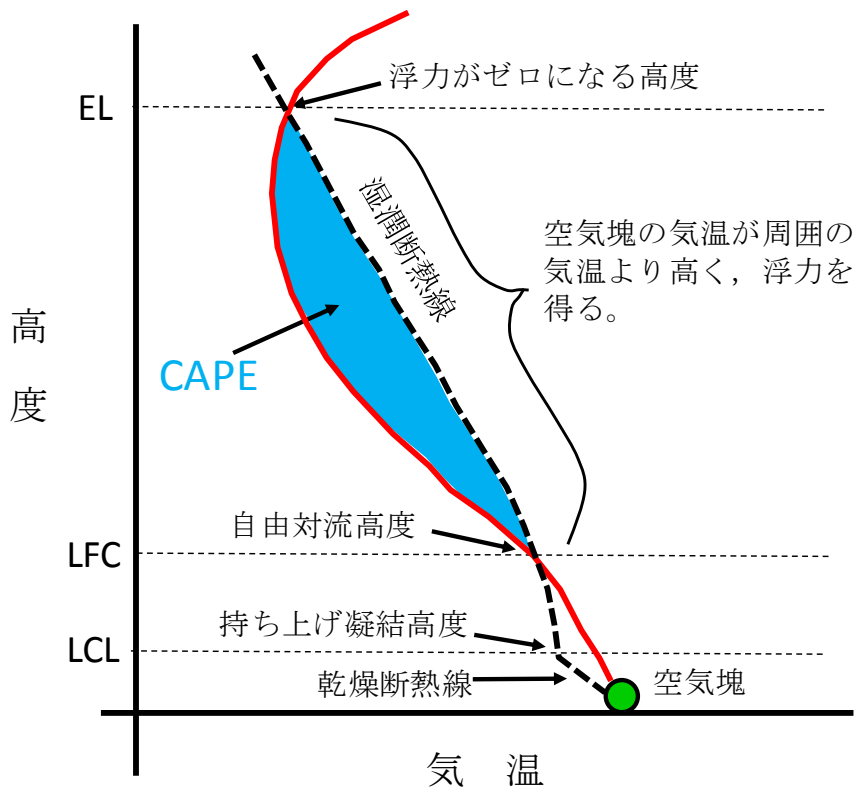
発生日	発生場所 (県・市町村)	F スケール	主な総観場	メソサイクロンの存在を 報告した資料・文献
1971/7/7	埼玉県浦和市	(F3)	台風	Fujita et al. (1972)
1978/2/28	神奈川県川崎市	F2-F3	寒冷前線	村松 (1979)
1990/12/11	千葉県茂原市	F3	暖気の移流	鈴木・新野 (1991), Niino et al. (1993)
1999/9/24	愛知県豊橋市	F3	台風	坪木ら (2000)
2006/11/7	網走支庁佐呂間町	F3	寒冷前線	Kato and Niino (2007)
2012/5/6	茨城県常総市	F3	気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

### 3. 突風関連指数

突風関連指数はこれまで数多く提案されており、気象庁における現業においても竜巻探知・予測に活用されている（瀧下 2011 等）。ここでは、国内外で最も知見が蓄積された指数として SReH (Storm Relative Helicity: ストームの動きに相対的なヘリシティー; Davies-Jones et al. 1990), CAPE (Convective Available Potential Energy: 対流位置有効エネルギー; Moncrieff and Miller 1976) を用いる。第 3-1 図及び第 3-2 図にそれぞれ、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」乾燥断熱線及び湿潤断熱線を求め、空気塊が自由対流高度に達した際に積乱雲の発達するポテンシャルとして CAPE を計算する。



第 3-1 図 SReH の算出概念



- : 空気塊の温度
- : 大気温度
- : CAPE の大きさ

第 3-2 図 CAPE の算出概念

両指数の算出式は以下のとおりである。

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

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

ここで、式(1)の  $\mathbf{V}$  は水平風速ベクトル、 $\boldsymbol{\omega}$  は鉛直シアに伴う水平渦度であり、 $\mathbf{C}$  のストームの移動速度は Bunkers et al. (2000)にしたがって、長期再解析データから得られる地上高 6km の平均風速と、シアベクトル（地上高 5.5~6km 層の水平風ベクトルと 0~0.5km 層の水平風ベクトルの差）から算出する関係式にて求めた。式(2)の  $g$  は重力加速度、 $\theta_e$  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 (第 3-2 図)。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 1000hPa に戻したときの絶対温度である。気温は高度によって変わるが，温位は同じ空気塊では常に一定 (断熱過程では温位は保存される) な物理量であるため，空気塊のあたたかさ，浮力特性，及び不安定性を把握するのに用いられる (付録 A 参照)。

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

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 3km とした場合，その殆どが地上から 1km までの大気によるヘリシテューであるという指摘 (Rasmussen 2003) があるが，1km 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 3km 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 500m 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 500m 上空までで最も不安定な空気塊を持ち上げる。このようにして求められた CAPE は MUCAPE (Most Unstable CAPE) と呼ばれる。大気下層に冷気がありその上空で対流が発生する場合を考慮することができる。このような場合，MLCAPE では安定な大気とみなされることにより CAPE 値が非常に小さくなる傾向にある (付録 B 参照)。

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

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

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

竜巻発生時の気象場（風向・風速，気温，気圧，水蒸気量等）を数値気象モデルにより解析し，その解析結果をもとに突風関連指数を算出する。気象モデルとしてWRF（Weather Research and Forecasting）モデル（Skamarock et al. 2005）バージョン3.2.1を用いた。

WRFモデルは，気象力学・物理現象を数値モデル化したものであり，（竜巻の親雲の水平スケールに対応する）メソスケール（水平方向2km～20km程度）の気象要素を解析できるコミュニティモデルとして世界的に利用されている（付録C参照）。主な計算条件は第4-1表に記すとおりである。電力中央研究所による長期高解像度再解析データセット（橋本ら 2013）と同様の条件を採用しており，ネスティングと呼ばれる技法を用いて，水平解像度15kmで解析した結果をもとに水平解像度5kmの解析結果を得る。これにより，粗い水平空間分解能（ECMWF ERA-Interim: 約70 km, ECMWF ERA-40: 約250km）の初期・境界値データから詳細メッシュの気象場を解析できる。なお，30 分間隔で計算結果を出力し，当時の天気図や気象レーダ画像等を参考にして竜巻発生時刻と解析結果における降雨域の通過時刻との違いや，対応する降雨域の有無を確認することにより，計算結果に大きな問題がないことを確認した。気象庁の竜巻等の突風データベースでは，1988年以降の事例に対しては天気図に加え，レーダ画像も掲載されている。1988年以降の事例については WRFモデルによる解析結果の適切性をレーダ画像と天気図から判断した。1987年以前の事例についてはF3竜巻については天気図から判断した。基本的に，発生時刻から±1時間内に擾乱が竜巻発生地点周辺を通過することを適切性の判断基準とした。

第 4-1 表 WRF モデルセットアップの概要

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

分析対象事例は，第4-2表に示すとおり，過去に発生したF3竜巻（1987年以前のF2-F3竜巻は除く），1988年以降に日本海側で発生したF1-F2，F2竜巻とした（F3竜巻は5事

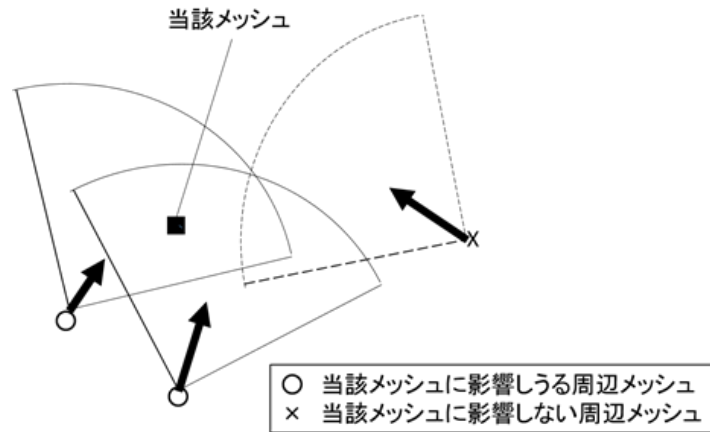
例，F2-F3竜巻は1事例，F2竜巻は3事例，F1-F2竜巻は1事例)。1987年以前に発生した竜巻については，(初期値・境界値データとして使用しているECMWF ERA40の水平空間分解能が約250kmと粗いために，竜巻通過時刻や発生箇所が実際に比べて乖離する場合がある<sup>1</sup>ため) この資料では対象としていない。ただし，F3竜巻に対しては1987年以前の竜巻に対しても解析を行い，計算結果の適切性も確認している。なお，対象事例に対して適切性が低いことを理由に除外した事例はない。

第 4-2 表 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

第4-2表中のSReHと最大CAPEの値は，発生地点を中心とした東西・南北100km四方内の最大値である。ここで，最大CAPEを求めた理由と方法は以下のとおりである。雲物理過程により擾乱（竜巻を伴う積乱雲）が発生すると，発生前の大気不安定な状況が解消されるため，竜巻発生地点のCAPE値は周囲に比べて低くなる傾向がある。つまり，解析データでは，ある格子点（メッシュ）で竜巻を伴う擾乱が発生している時，その格子点に対するCAPE値は周辺のメッシュ値に比べて小さめになりうる（瀧下2011等）。これは，CAPE値の大きさをもって竜巻の規模を定量的に検討する際に問題となる。そこで，Rasmussen and Blanchard (1998)を参考に，各格子点に対して，地上～500m高度までの平均風向を算出し，その風向に対して当該地点から風下側に扇形の影響範囲を設け，影響範囲内のCAPE値の最大値を求めるように工夫した（第4-1図）。その際，扇形の半径は15km，中心角として平均風向を中心に±45度の範囲をとった。この最大値が最大CAPEにあたる。このように算定することにより，周辺のCAPE値の大きな空気塊が当該メッシュを含むスーパーセルに向かって流入することを考慮できる。

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

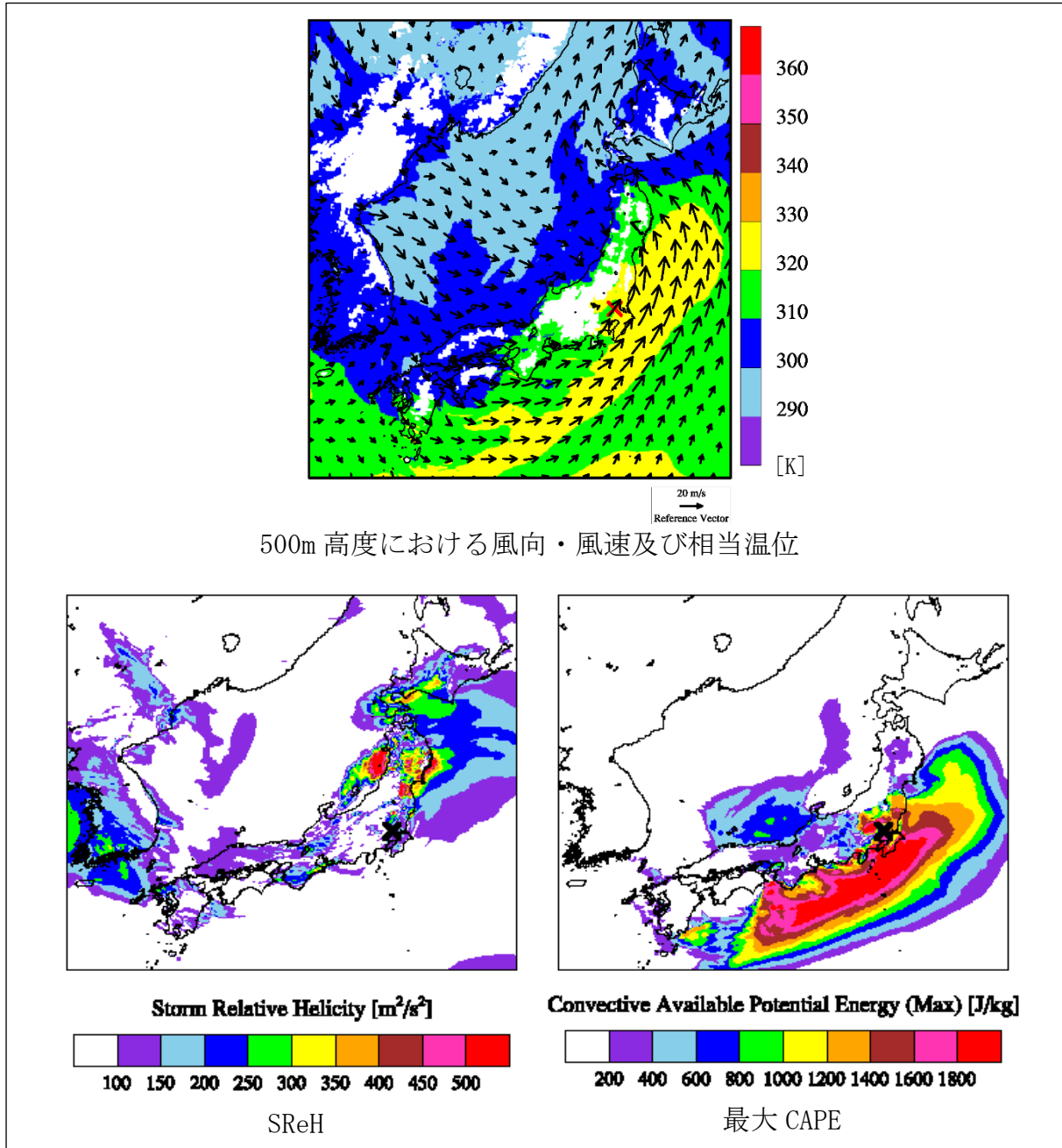


第 4-1 図 最大 CAPE 値の抽出方法の概念図

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

#### 4.1 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(図略)、風のシアと大気不安定度が高まっている。SReHの値は東日本の太平洋側で非常に高いが、関東平野周辺ではCAPEが非常に高く、3個の竜巻がほぼ同時に発生した。



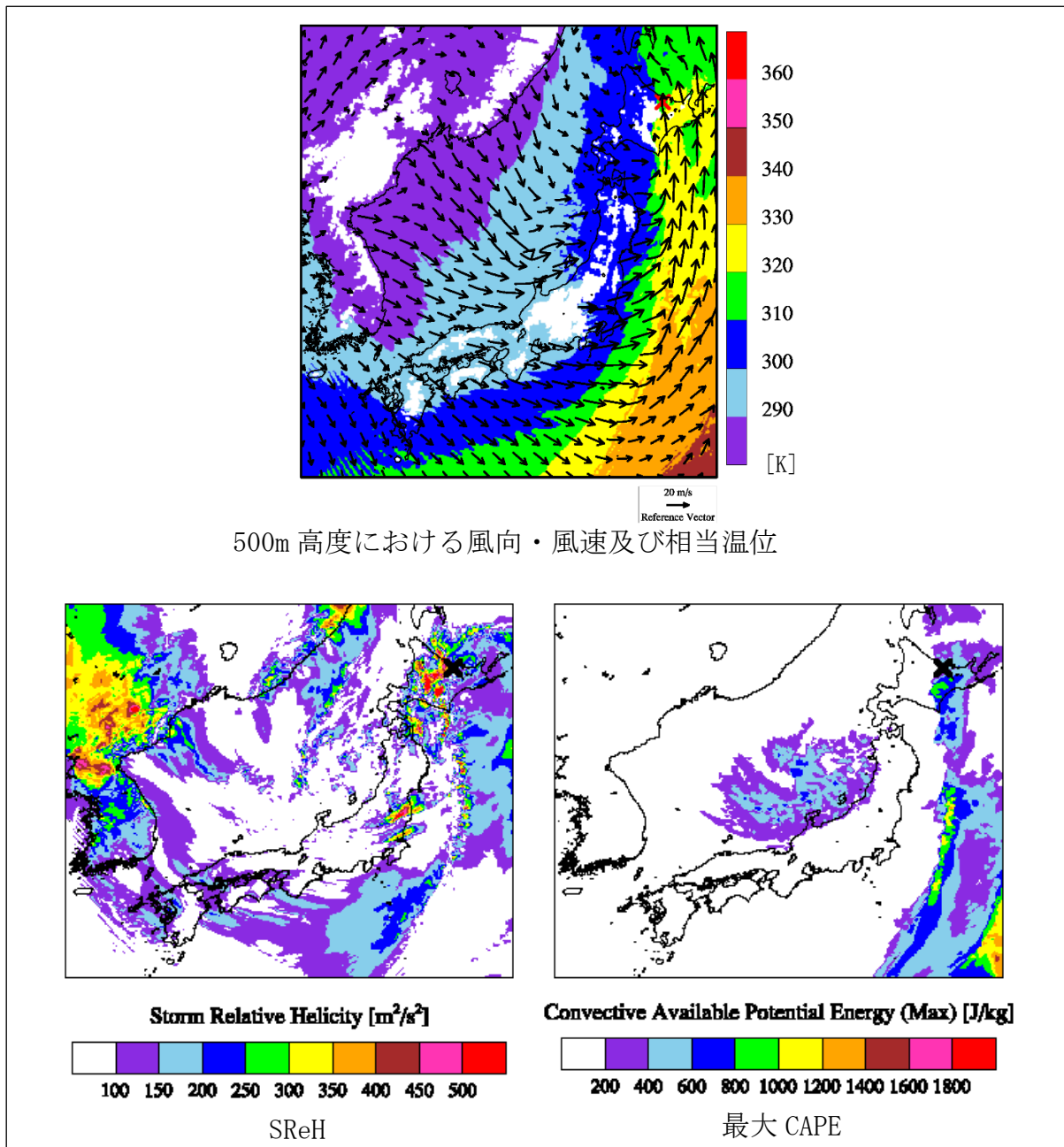
第 4.1-1 図 12/05/06 の F3 事例における気象場と突風関連指数



#### 4.2 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かく、不安定な空気塊が流入している。

大気不安定度は道東の中でも南側で高くなっており、非常に高い風のシア（高いSReH）と相まって親雲が発達しやすい状況が解析されている。なお、同日に、周辺地域において2個の小さな竜巻も発生した。日本海側の中でも能登半島周辺より北側で季節風が吹き込み、大気がやや不安定になっている（CAPEが高めになっている）が、SReHが低く、道東・オホーツク海地方の状況とは異なる。

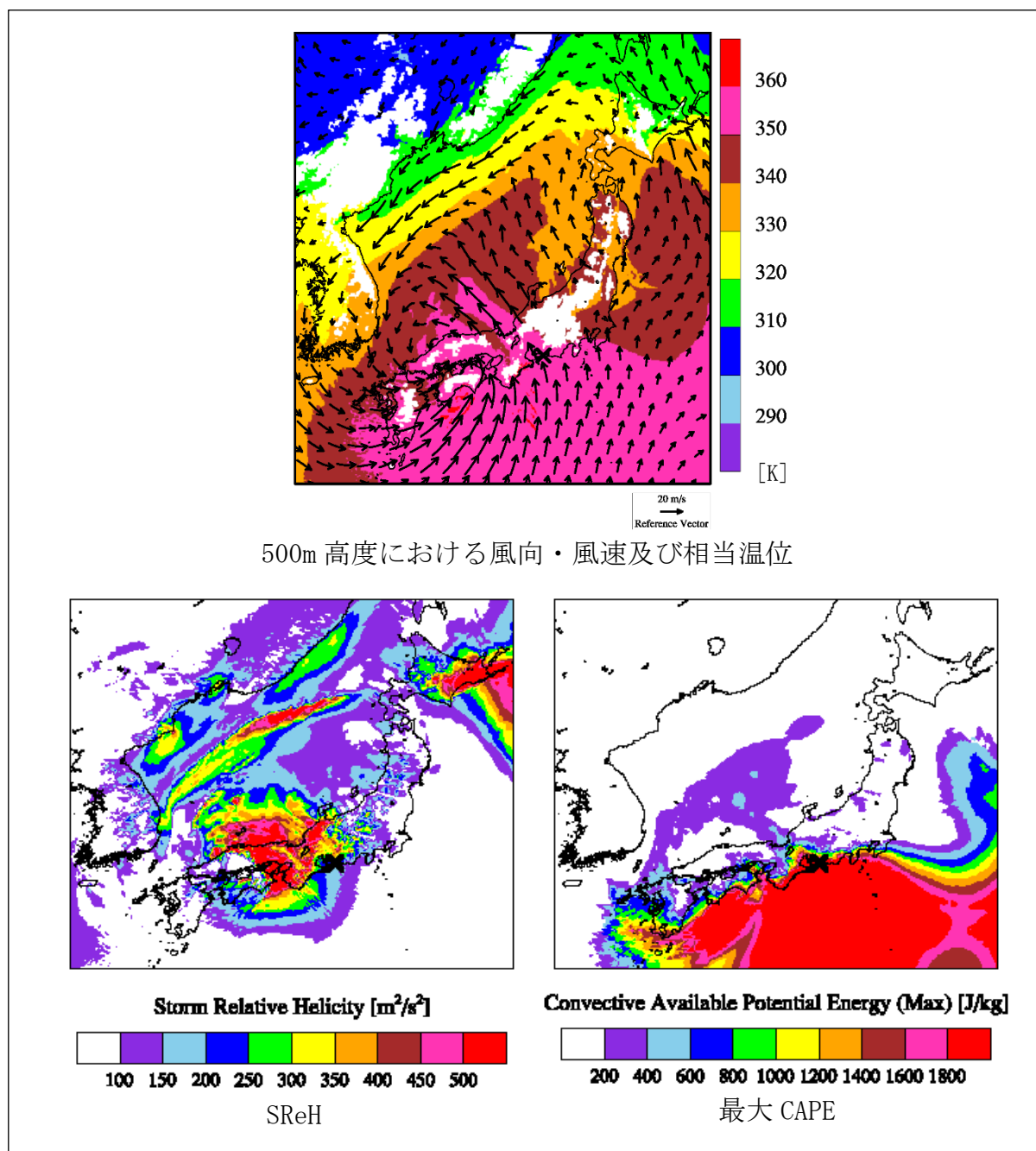


第 4.2-1 06/11/07 の F3 事例における気象場と突風関連指数

6 条—別添 2-1(竜巻)—添付 2.2—15

#### 4.3 愛知県豊橋市(1999/09/24)F3 事例 (台風)

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

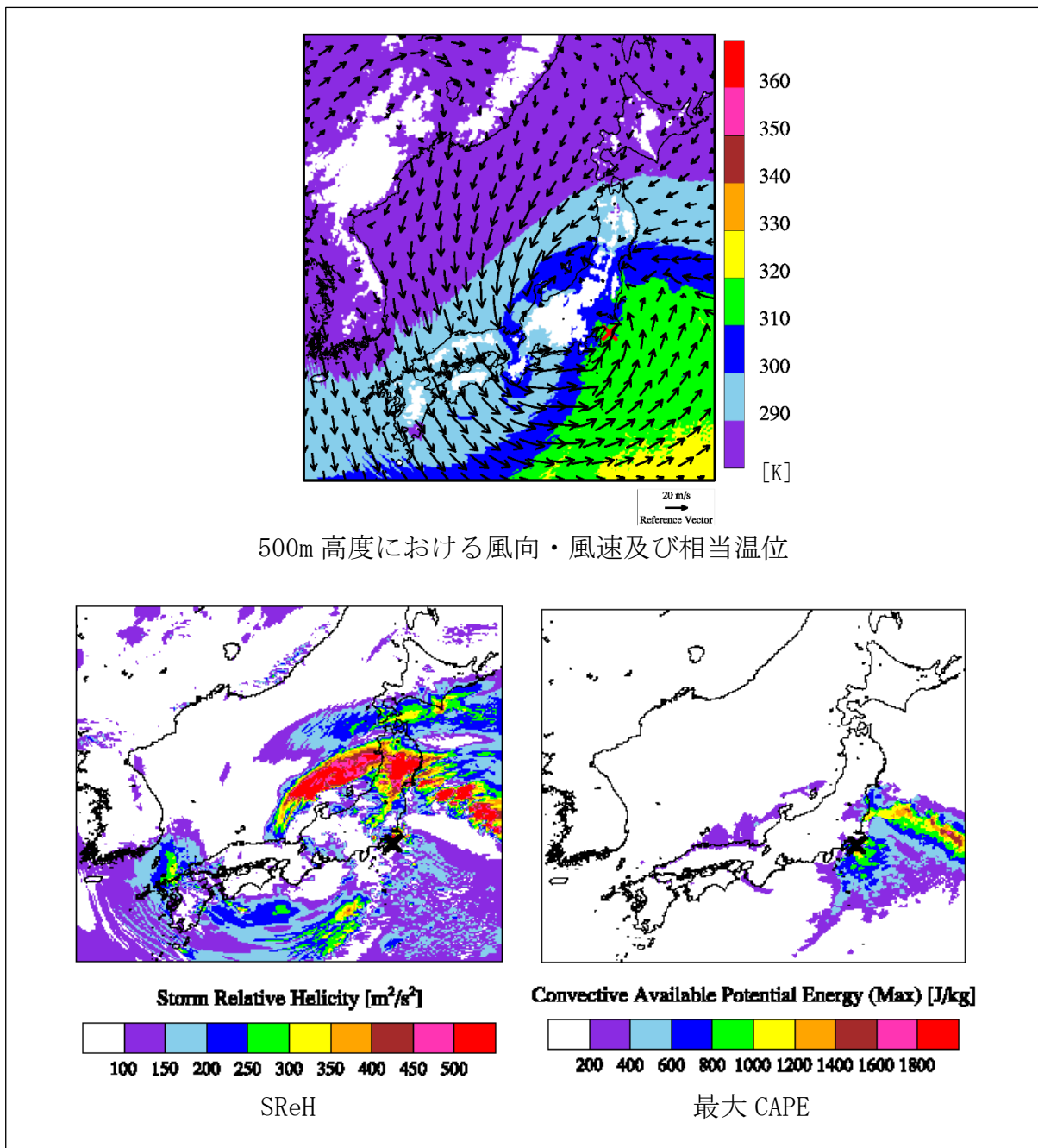


第 4.3-1 図 1999/09/24 の F3 事例における気象場と突風関連指数

#### 4.4 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、寒冷前線及び房総半島にある低気圧を境に温位差が大きくなっている(寒色系と暖色系(緑色)の境が明瞭である)。房総半島には低気圧中心に向かって暖かく、不安定な空気塊が流入しており、房総半島では局所的に SReH の値も高い。房総半島周辺では大小7個の竜巻が発生した。

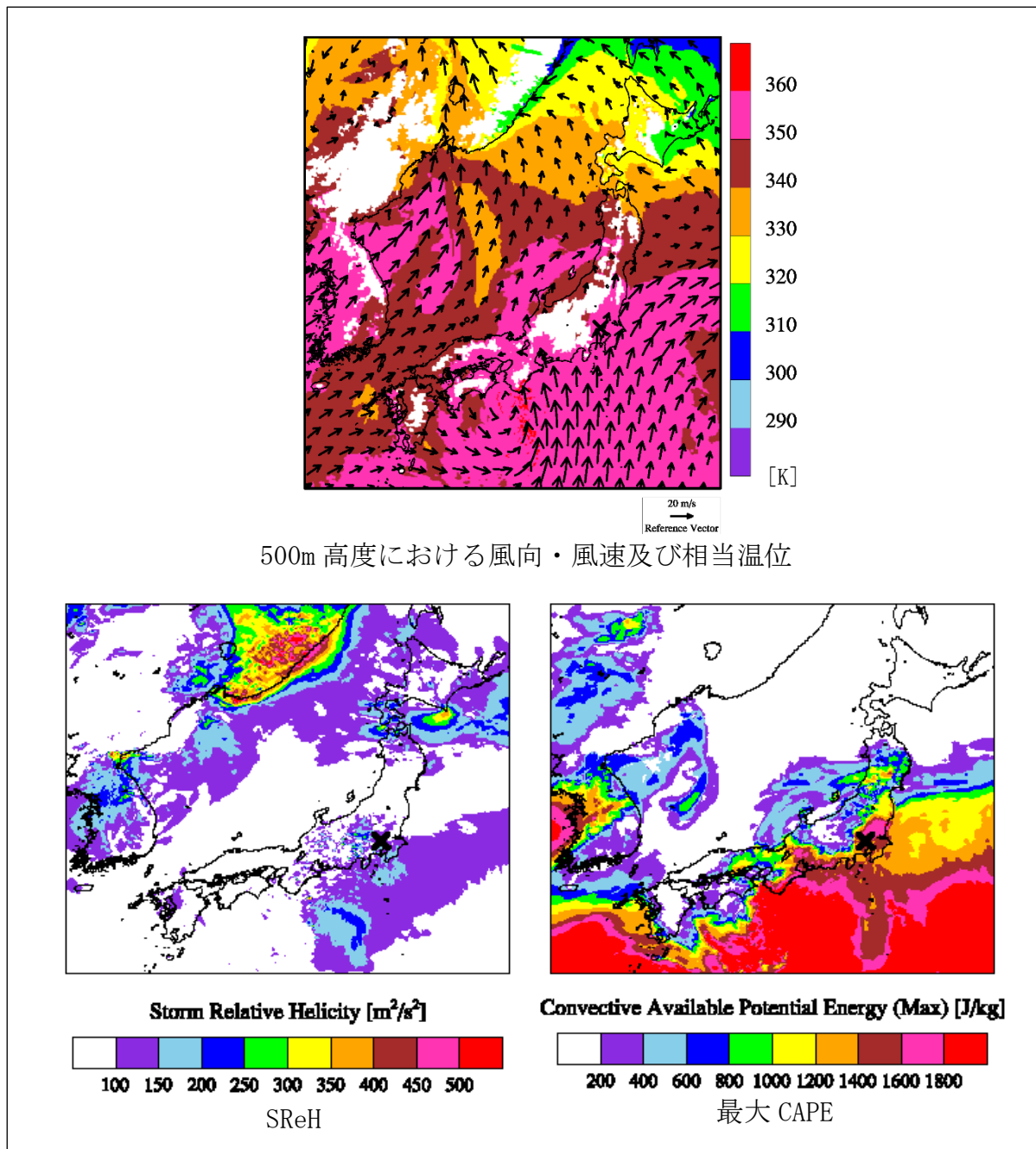
日本海側の低気圧をとりまくように、特に北側で SReH が非常に高くなっているが、温位が低く、CAPE の値も小さくなっている。一方、福島県沖に CAPE の高い領域が見られるが、SReH の値は小さくなく、相当温位も比較的 low、房総半島周辺とは状況が異なる。



第 4.4-1 図 1990/12/11 の F3 事例における気象場と突風関連指数

#### 4.5 埼玉県浦和市(1971/07/07)F3 事例 (台風)

台風の中核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。

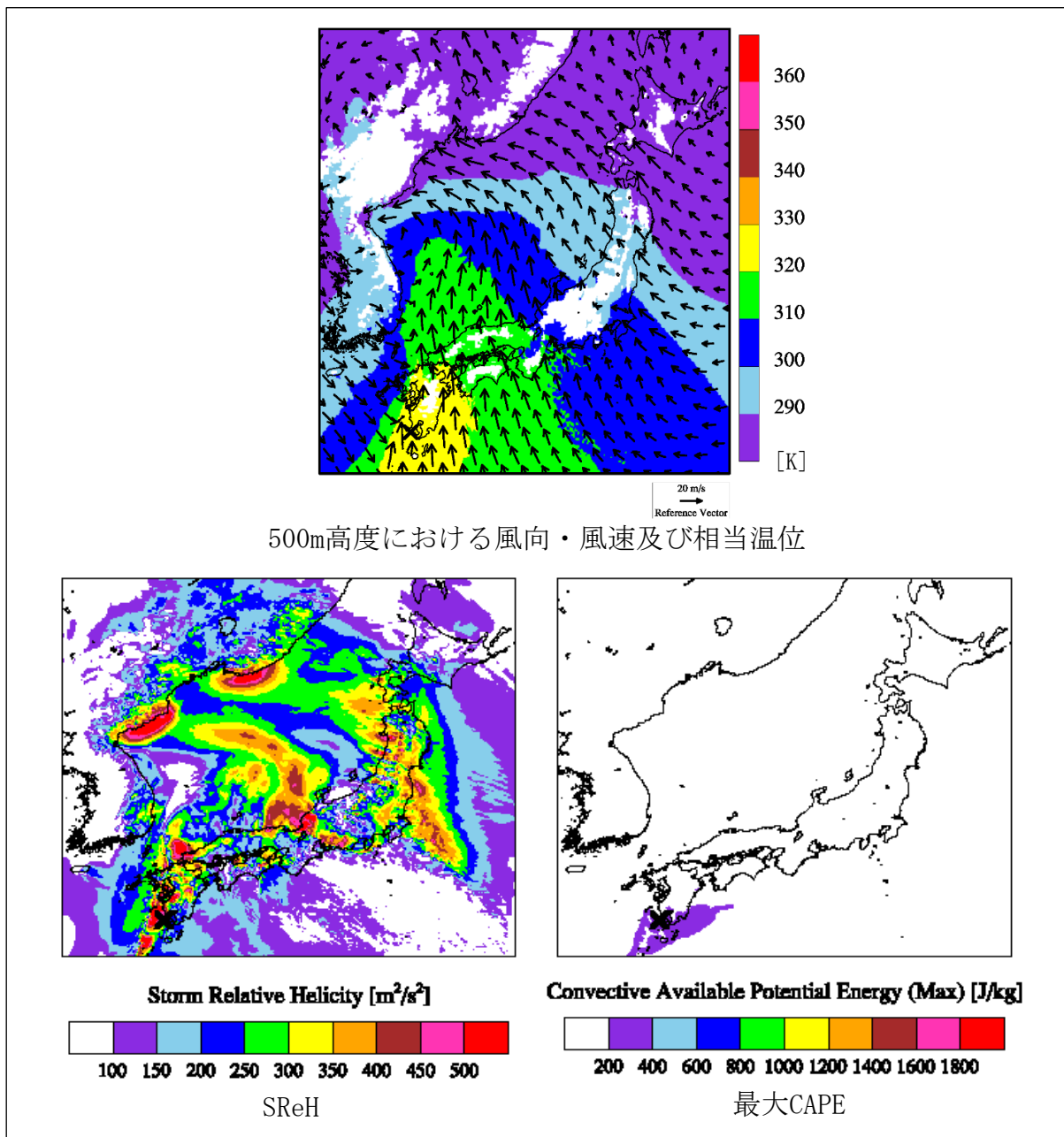


第 4.5-1 図 1971/07/07 の F3 事例における気象場と突風関連指数

#### 4.6 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。

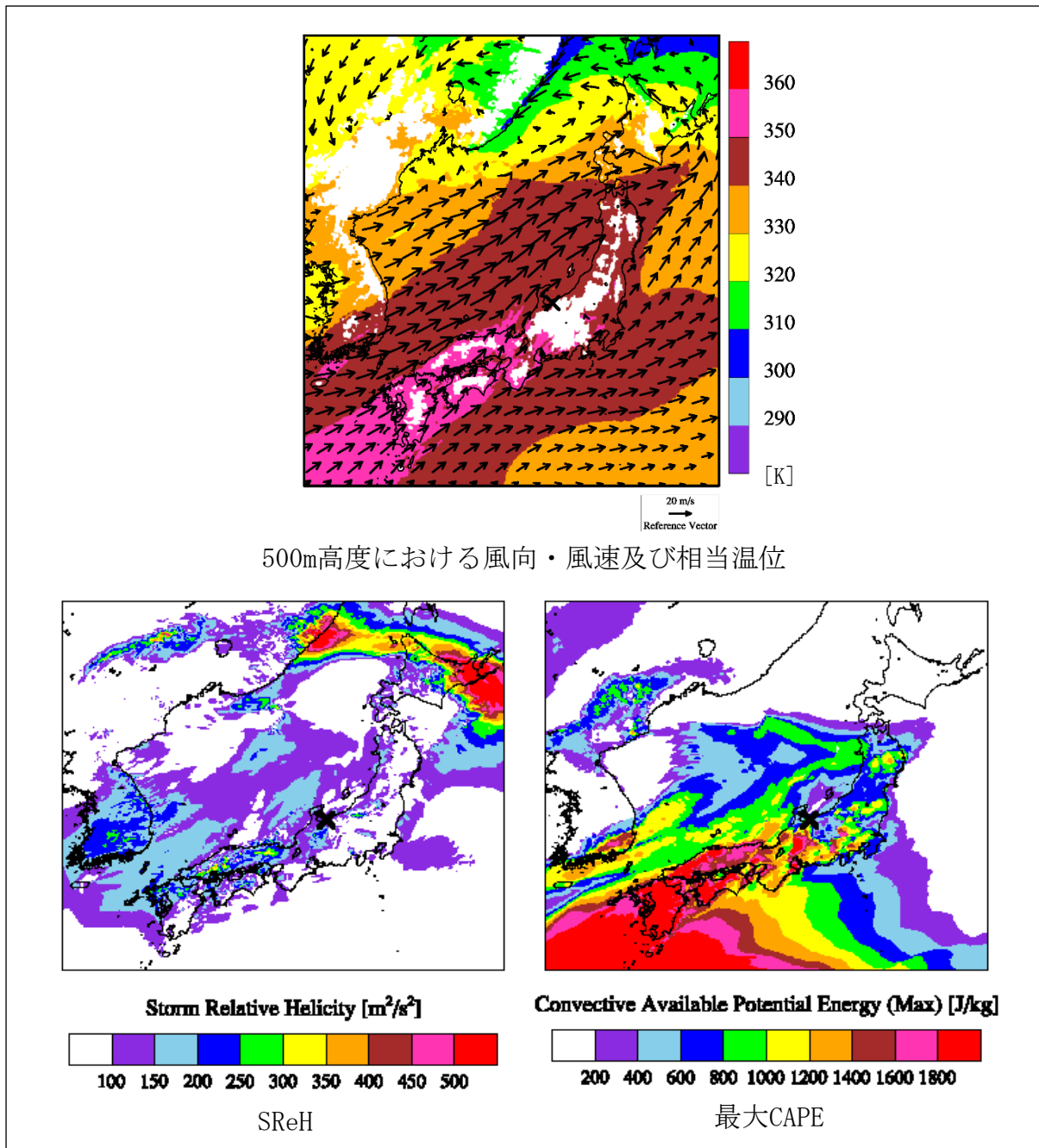
しかし、CAPE 値は F3 竜巻事例に見られるほど高くない。一方、寒冷前線に沿って SReH が非常に高かった。不安定性にやや欠けていたのが、F3 規模には至らなかった理由の一つであると考えられる。



第4.6-1図 1990/02/19のF2-F3事例における気象場と突風関連指数

#### 4.7 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）

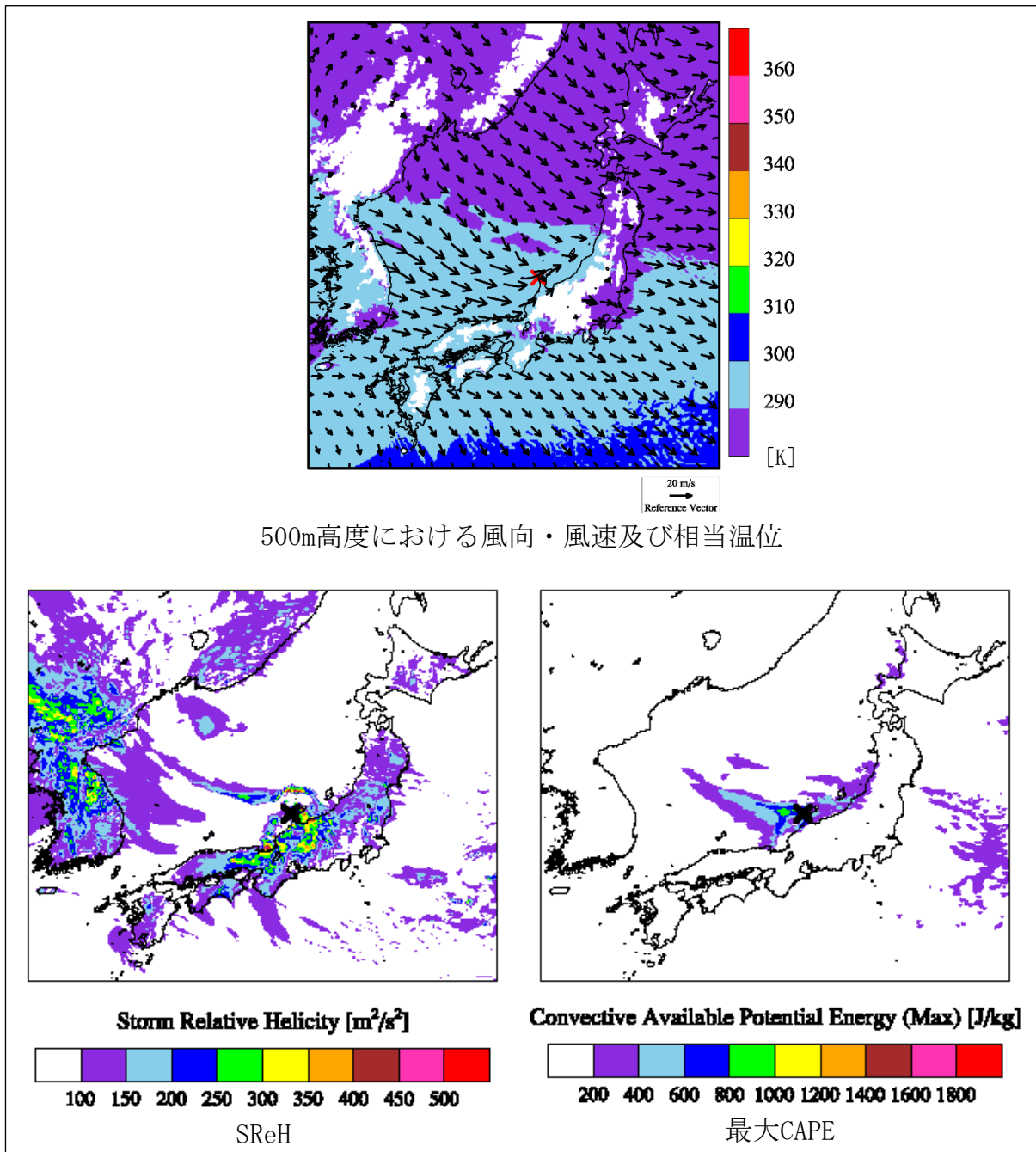
日本海側沿岸に沿って寒冷前線があり、その北側では西南西の風が吹いている。空気塊の暖かさとしては太平洋側と同等のもの（茶色）が、対馬海峡から日本海に入り込んでおり、青森県沖まで到達している。ただし、大気不安定度は暖候期にしては小さくなく、寒冷前線南側の九州から近畿にかけての不安定度（CAPE分布の赤い領域）と比べるとかなり小さい。SReHの値も特段高い傾向は見られず、F3発生時の環境場とは様相が異なる。



第4.7-1図 1991/06/12のF2事例における気象場と突風関連指数

4.8 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)

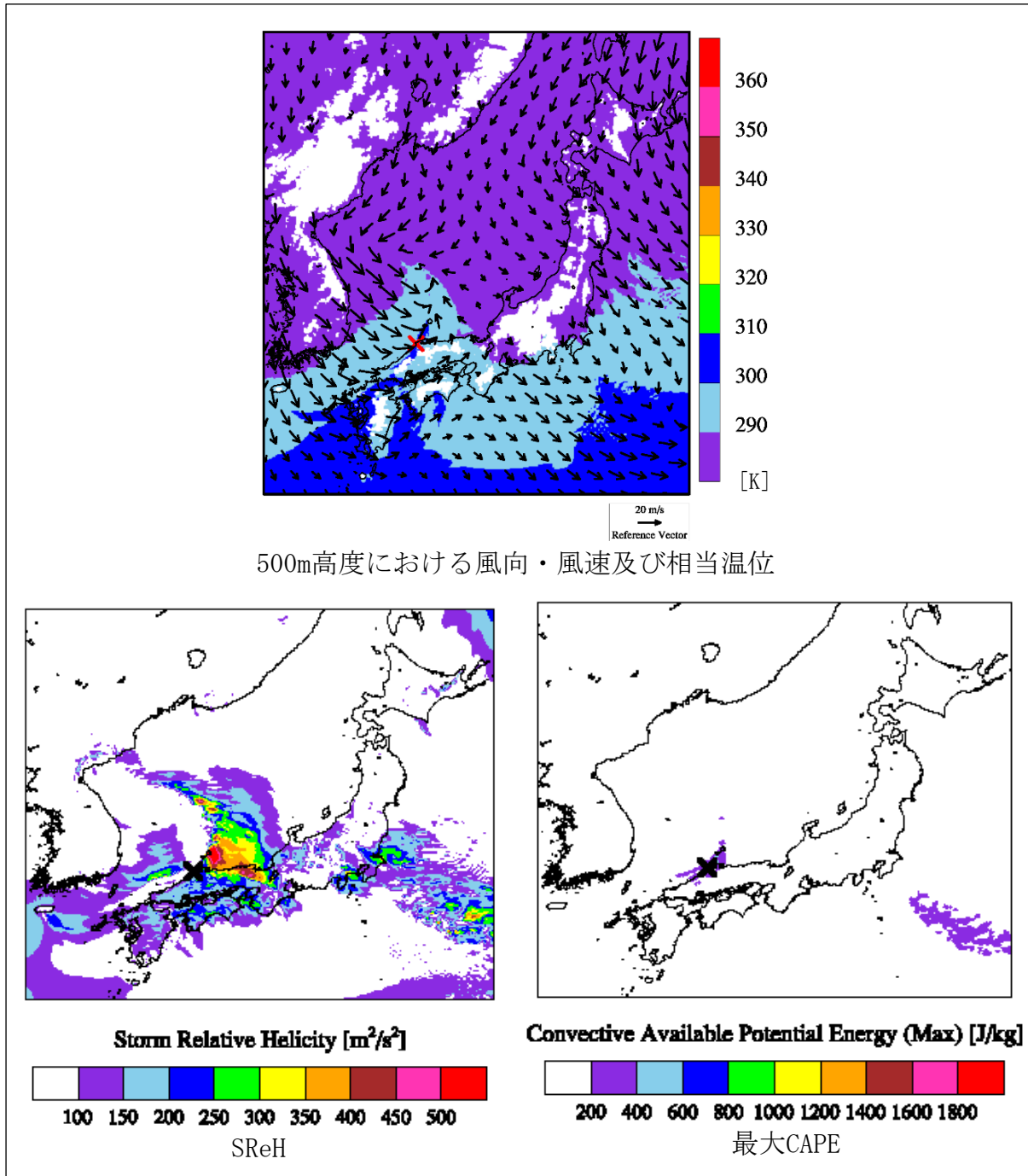
オホーツク海にある低気圧と九州の南西海上にある高気圧との間で、西高東低の気圧配置となっており、朝鮮半島東部から季節風が能登半島から敦賀湾に向かって流れ込んでいる。冬季によく見られる状況といえる。能登半島周辺での不安定度の高さは、海上で寒気が暖められて大気が不安定になったことが原因であり、SReH も高めである。特に能登半島周辺では高い。不安定化のメカニズムは異なるが2006/11/07 F3 竜巻 (佐呂間竜巻) と似た環境場になっている。ただし、SReH が佐呂間竜巻に比べて4割程度低く、これがF3規模に達しなかった理由の一つであると考えられる。



第4.8-1図 1990/04/06のF2事例における気象場と突風関連指数

#### 4.9 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。

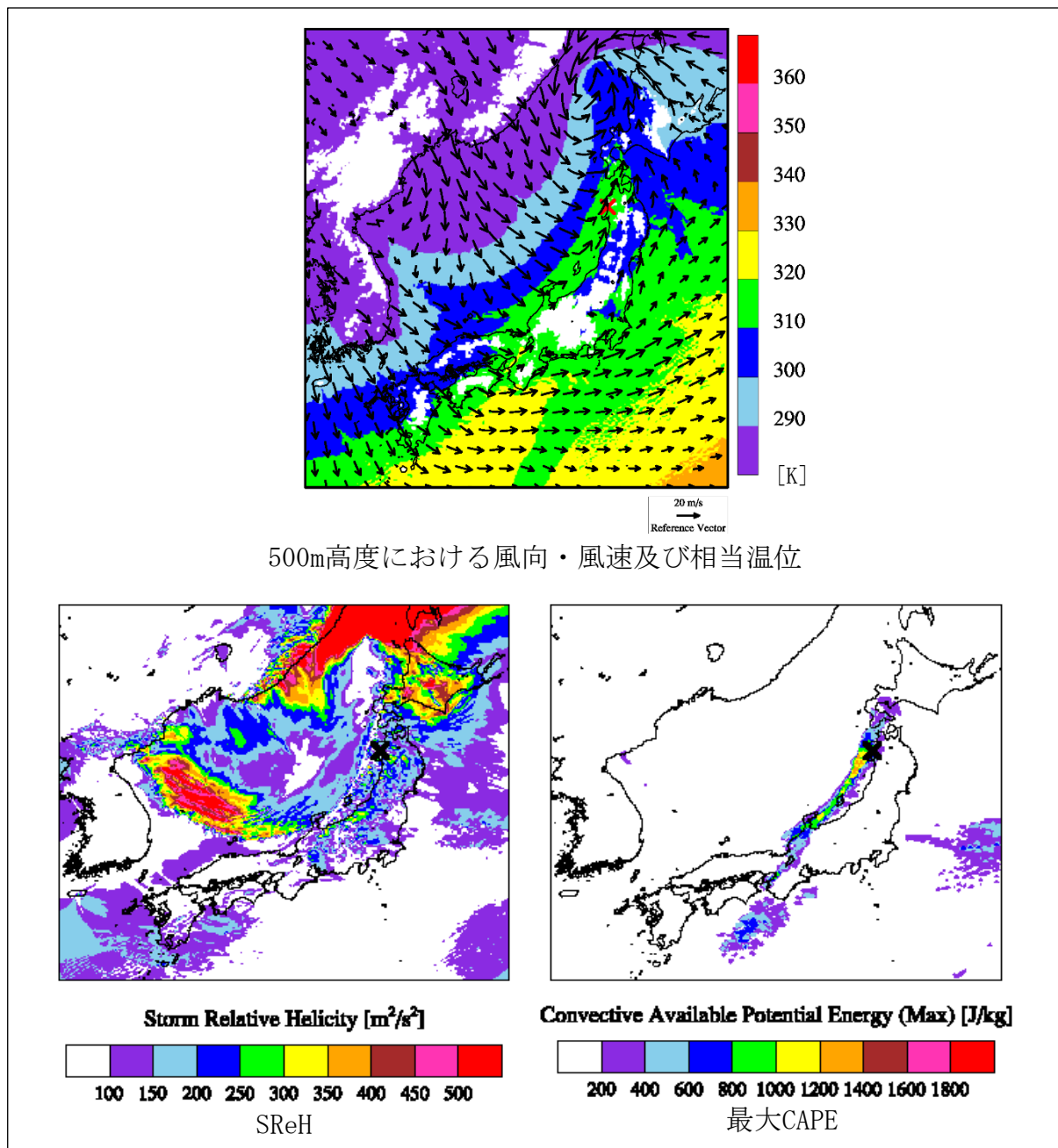


第4.9-1図 1989/03/16のF2事例における気象場と突風関連指数



#### 4.10 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。



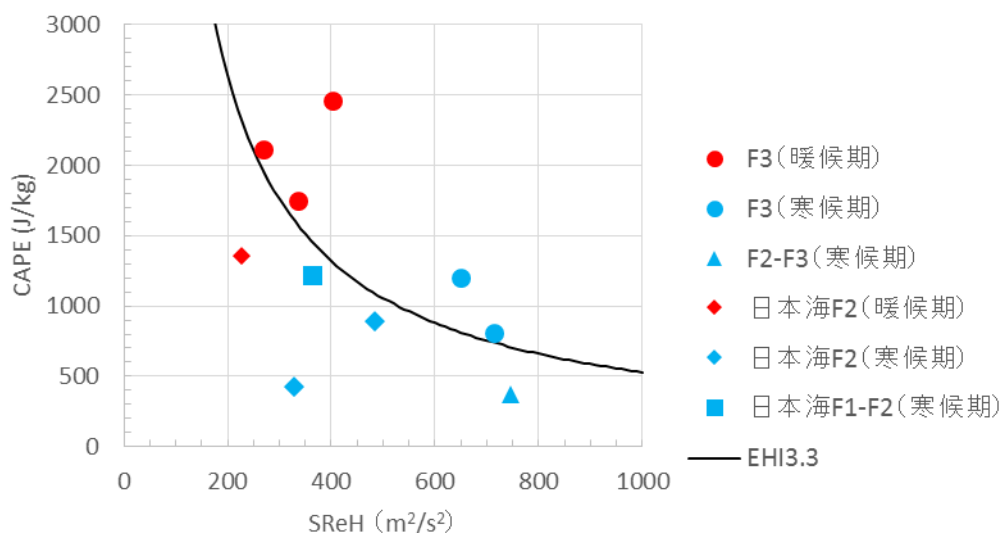
第4.10-1図 1999/11/25のF1-F2事例における気象場と突風関連指数

#### 4.11 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る。

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

第 4.11-1 図は第 4-2 表における SReH と最大 CAPE の値を竜巻のカテゴリ別にプロットしたものである。F3 竜巻においては、暖候期と寒候期で CAPE の大きさが大きく異なっており（5 章参照）、寒候期では暖候期に比べて値が小さいが、SReH が非常に大きい傾向が見られる。



第 4.11-1 図 SReH と最大 CAPE の関係

事例数が少ないことが課題であるが、日本海側の F2 規模竜巻の発生環境場では小

<sup>1</sup>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。

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 $250\sim 300\text{m}^2/\text{s}^2$ 程度以上、(最大)CAPEとして $1600\text{J}/\text{kg}$  (暖候期)あるいは $600\text{J}/\text{kg}$  (寒候期)程度以上の環境場においてF3竜巻が発生しているとみなすことができる。EHIに対しては、3.3程度を超える場合にF3竜巻が発生している。この場合、季節に分けずに通年単位で分析できる可能性がある。

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

## 5. 竜巻発生環境場の生起頻度分析

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

### 5.1 用いる気象データ

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

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

## 5.2 季節間の傾向差

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

第 5.3-1 図は、SReH の閾値を  $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、CAPE（最大 CAPE ではない）の閾値を  $250 \text{ J/kg}$  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<sup>1</sup>。SReH に対しては、日本海及び沿岸域では冬季に頻度が大きく、大きな値をとる傾向が示唆されている。また、関東平野、及び日高山脈周辺では年間を通じて他地域に比べて高い頻度を有している。7月 は全体的に低くなっている。一方、CAPE に対しては、寒候期で低い値をとり、暖候期で高い値をとる傾向が見られ、緯度依存性も見られ、 Chuda and Niino (2005) の分析結果と整合している。この緯度依存性は、熱帯域ほど暖かく、高い雲ができやすいことと関係している。CAPE については、季節・緯度依存性が強く、南に行くほど、暖かい季節になるほど絶対値が大きくなっている。加藤 (2008a) でも指摘されているように超過頻度を検討する上ではこの特徴を踏まえる必要がある。そのため、以下の検討では、季節に応じた最大 CAPE の閾値を設定して超過頻度を求めている。

ところで、閾値が変わると第 5.3-1 図で見られる頻度分布もそれに応じて変わるが、相対的な頻度大小関係はある程度保持される。国内最大規模 F3 の竜巻は太平洋側沿岸の平野部で発生しているが、CAPE の値は基本的に南ほど高い値をとるため、CAPE の地域性とは整合しない（例えば、沖縄では F3 竜巻は発生していない）。また、SReH においても整合しない（例えば、日本海側で F3 竜巻は発生していない）。少なくとも片方の指数だけでは F3 竜巻発生地点の地域傾向を説明することはできない。したがって、SReH・CAPE の関係性（第 4.11-1 図）から両方の指数を考慮した場合に説明づけられるか否かがポイントとなる。

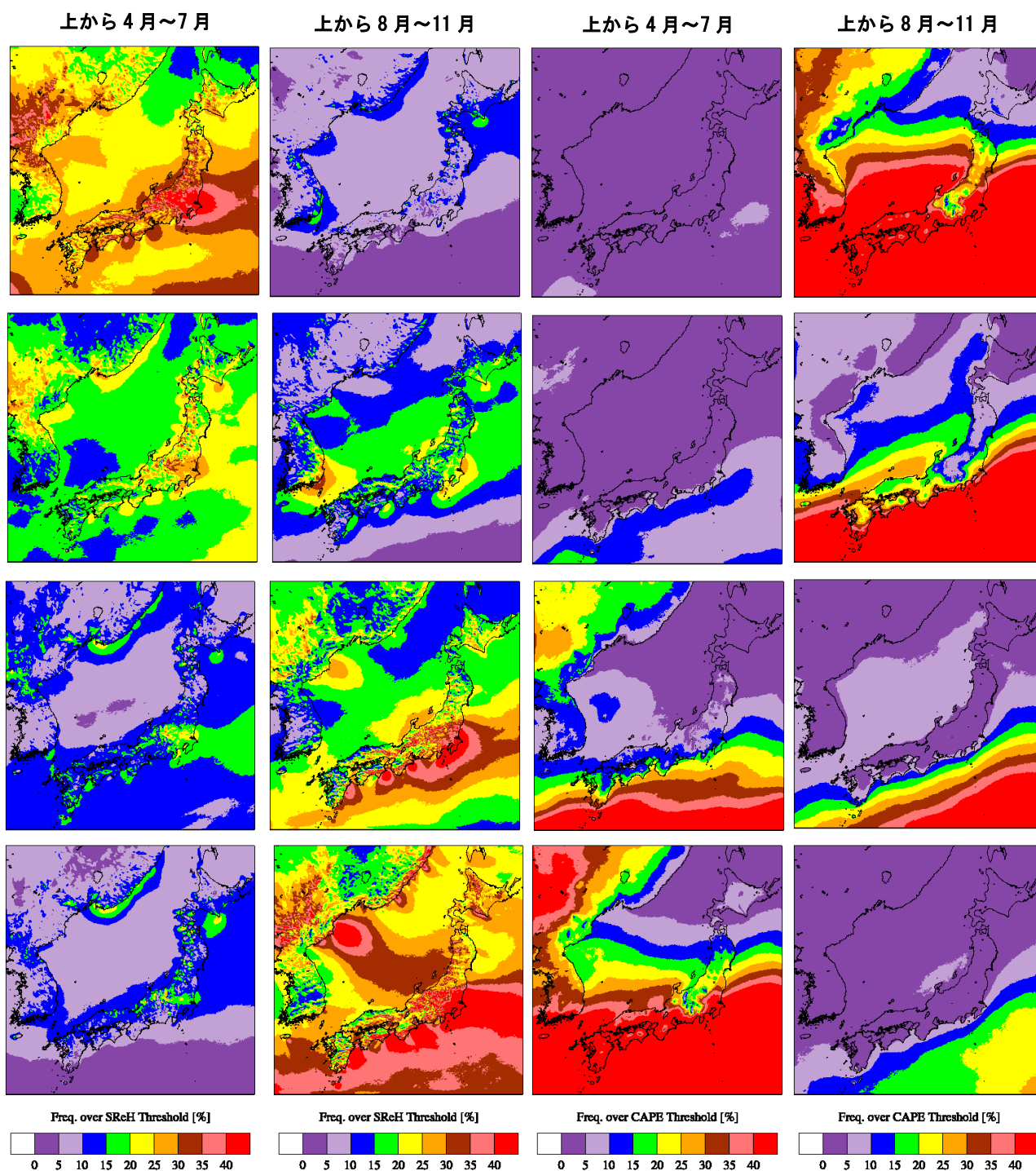
## 5.3 同時超過頻度分布に見られる傾向

前節における検討結果（第 4.11-1 図）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第 5.3-2 図に示す。また、第 5.3-3 図は、気象庁の「竜巻等の突風データベース」で確認された F2-F3 竜巻及び F3 竜巻の発生箇所を示したものである。暖候期においては、同時超過頻度 0.01%前後の地域が茨城県以西の太平洋側及び九州の沿岸域の平野部に広がっており、超過

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

頻度の高い地域は F3 規模の竜巻の発生箇所を含包している。つまり、超過頻度の高い地域で F3 規模以上の竜巻発生に適した環境場が整いやすいことが示唆されている。それに対し、日本海側、東北太平洋側、及び北海道・下北半島といった北日本での超過頻度の値は、1~2 オーダ以上小さな値となっている。



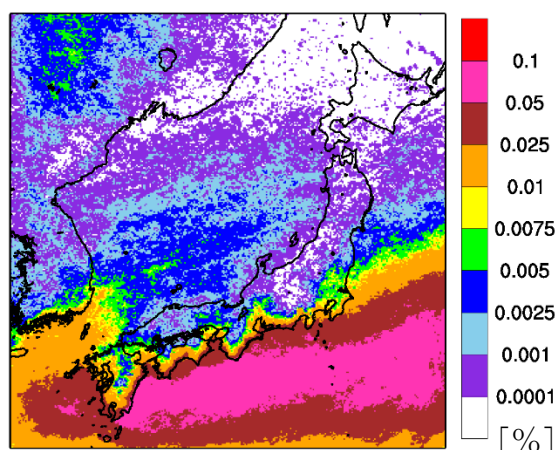
第 5. 3-1 図 月別の SRcH (左側 2 列) 及び CAPE (右側 2 列) の超過頻度分布

また、寒候期の超過頻度分布では、頻度が高い地域が南側にシフトしているが、F3 竜巻発生箇所がより沿岸に近い地点に限られていることと対応している。全体的に暖



遮断される効果（第 2.3-3 図参照）が大きな竜巻の発生に影響していることも示唆されている。

EHI を用いた場合、第 5.3-2 図に見られる両季節の傾向の中間的な傾向が見られる。図 24 は、EHI の閾値を 3.3（第 4.11-1 図参照）にした際の超過頻度分布である。通年単位で閾値を設定しているため、中間的な傾向を示すのは妥当である。また、SReH と CAPE の両方の指数を用いる方法においても問題がないことを示唆している。つまり、米国とは異なり（付録 B 参照）、国内においては、SReH あるいは CAPE の片方が異常に大きく、EHI がある程度高い値を示すような事例が稀であるからである。



第 5.3-4 図 超過頻度分布（通年；EHI の閾値：3.3）

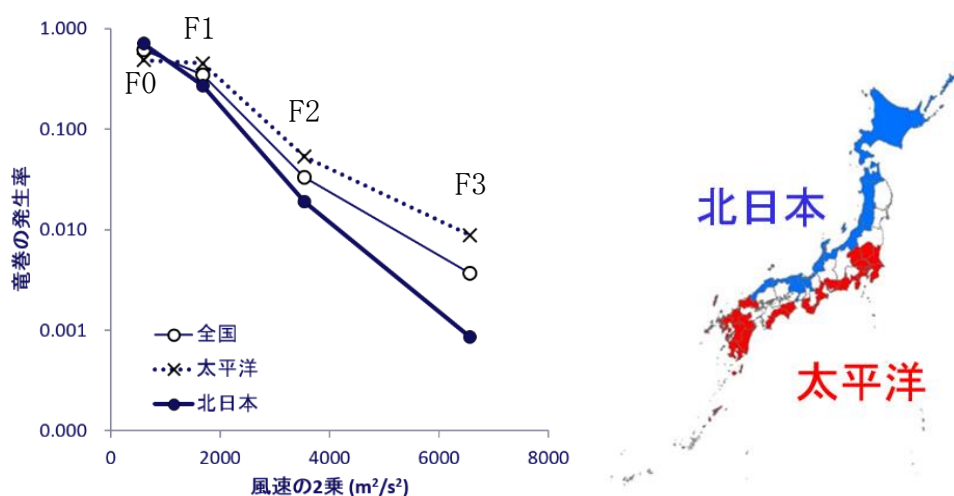
#### 5.4 F3 規模の最大風速を考慮すべき地域

第 5.3-2 図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。

第 5.4-1 図は、ハザード評価と同様に海上 F 不明竜巻を按分して各 F スケール竜巻の 51.5 年間（1961 年～2012 年 6 月）擬似発生数を分析し、F スケール毎に発生率（対象 F スケールの発生数/擬似発生数）を地域別にプロットしたものである。太平洋側と北日本とでは竜巻の全発生数に大差はないことから、この発生率で対象 F スケール竜巻の発生しやすさを概ね把握することができる。Dotzek et al. (2005) と同様、F スケールが大きくなるほど指数的に頻度が低減しているが、F3 規模の発生率は、茨城県以西太平洋側・九州沿岸では、その他の地域に比べ 1 オーダ程度発生率が高くなっており、突風関連指数の分析結果と整合していることがわかる。日本海側沿岸や東北太平洋側・下北半島では、F3 竜巻が発生していないため、もっと頻度が小さくなることが予想できる。また、F2 規模になると地域差が小さくなり、

F0 規模ではむしろ太平洋側の方が若干少なくなることも見てとれる。

九州電力川内原子力発電所を対象とした竜巻影響評価において、(海岸線に対して陸側・海側 5km の竜巻検討地域に対する) ハザード評価結果では、F3 規模竜巻 (風速 92m/s) に対する超過確率は大凡  $10^{-6} \sim 10^{-7}$  にある。上記のように、日本海側を含む北日本では F3 規模竜巻の発生しやすさ、及び発生数は、太平洋側に比べて少なくとも 1 オーダは低いことを考慮すると、F3 規模竜巻の風速が生起する確率は、超過確率にして  $10^{-7} \sim 10^{-8}$  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。



第 5.4-1 図 各 F スケールの発生率

### 5.5 閾値が同時超過頻度の分析結果に及ぼす感度

小さな閾値を設定すると、雷雨 (非竜巻)・小さな竜巻の発生を勘案することとなるため、全体的に頻度値が上昇し、(発生実績と同様に) 地域性が明瞭でなくなる。一方、非常に大きな閾値を設定すると、F4・F5 規模の非常に大きな竜巻に着目することになり、高頻度域は太平洋側のさらに限定された地域になる。杉本ら (2014b) は、国内最大規模の F3 規模が発生する環境場として適切な閾値を、SReH については  $150 \sim 550 \text{ m}^2/\text{s}^2$  の範囲 ( $100 \text{ m}^2/\text{s}^2$  刻み)、最大 CAPE に対しては、 $200 \sim 1500 \text{ J/kg}$  ( $100 \text{ J/kg}$  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第 5.3-2 図に示した結果に概ね沿ったものとなっている (付録 E)。

突風関連指数を用いたメソスケール分析はスーパーセル型竜巻に適するため、非スーパーセル型竜巻を含む F2 規模の竜巻を含めた分析に SReH や CAPE といった突風関連指数を用いる適用性は微妙ではあるが、ここでは F2 規模以上の竜巻の発生頻度を念頭においた閾値について考えてみる。第 4.11-1 図の結果から両指数の閾値を

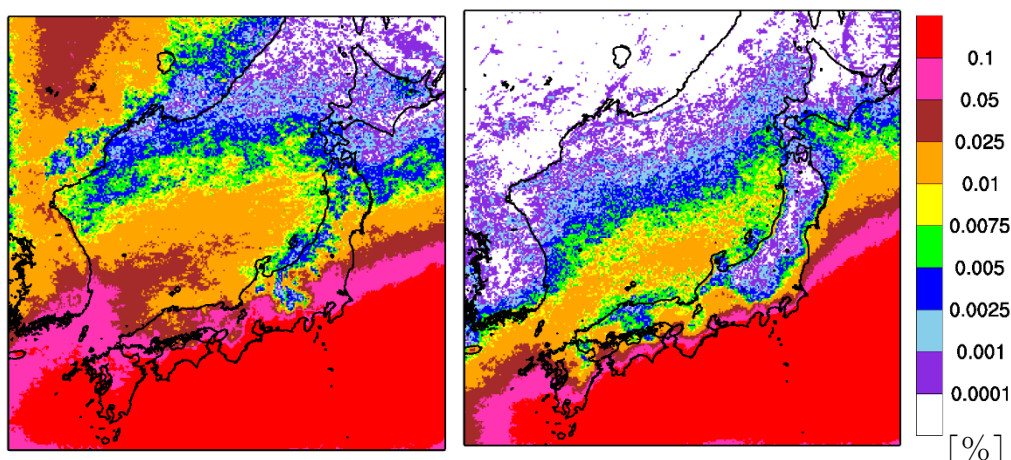
SReH :  $200 \text{ m}^2/\text{s}^2$

最大 CAPE :  $1000 \text{ J/kg}$  (暖候期),  $350 \text{ J/kg}$  (寒候期)



とする<sup>1</sup>。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、650J/kg の閾値についても検討する。EHI を用いる場合、島根県で発生した 1989/03/16 F2 事例以外は 1.5~2.0 前後の EHI に入っているが、1989/03/16 F2 事例では 0.8 強にとどまっている。そこで、1.5 と 0.8 を EHI の閾値として超過頻度の算出を試みる。

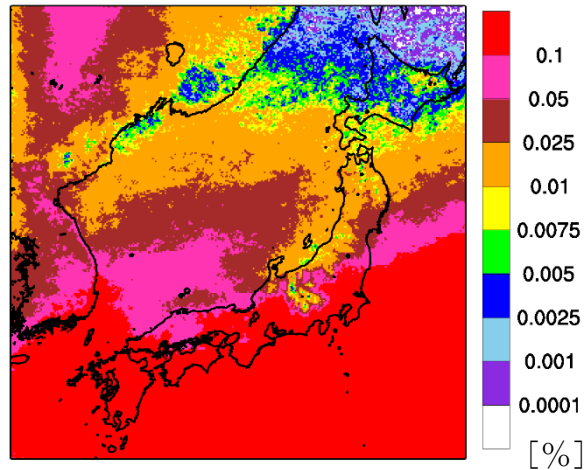
同時超過頻度の算出結果を第 5.5-1 図に示す。F3 規模以上の竜巻を対象とする場合よりも頻度は全体的に上がっている。第 5.3-2 図では奄美・沖縄方面では本州（茨城県以西）太平洋側に比べて頻度がやや低くなる傾向が推測されるが、第 5.5-1 図では奄美・沖縄地方でも値が高い傾向が推測され、実際の発生箇所（第 5.3-3 図）に整合している。



第 5.5-1 図 同時超過頻度分布 (F2 規模以上を対象；左：暖候期，右：寒候期)  
(SReH の閾値：200m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>，最大 CAPE の閾値：1000J/kg (暖) 350J/kg (寒))

暖候期においては、福島県から宮城県の太平洋側及び本州日本海側沿岸での頻度が高まり、中部地方以西では内陸も含めて頻度が高く、東日本も内陸深くまで頻度が高くなっている。実際の F2 規模以上の発生箇所の多くを包含できている。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 1000J/kg から 650 J/kg 程度まで落とすと対応性は高まり (第 5.5-2 図)、能登半島以北の日本海側・北日本における頻度は本州・中日本以南に比べて少し低い程度となって、全体的に地域間の差は薄れる。第 5.4-1 図 (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、第 5.5-2 図の方がベターと考えられる。

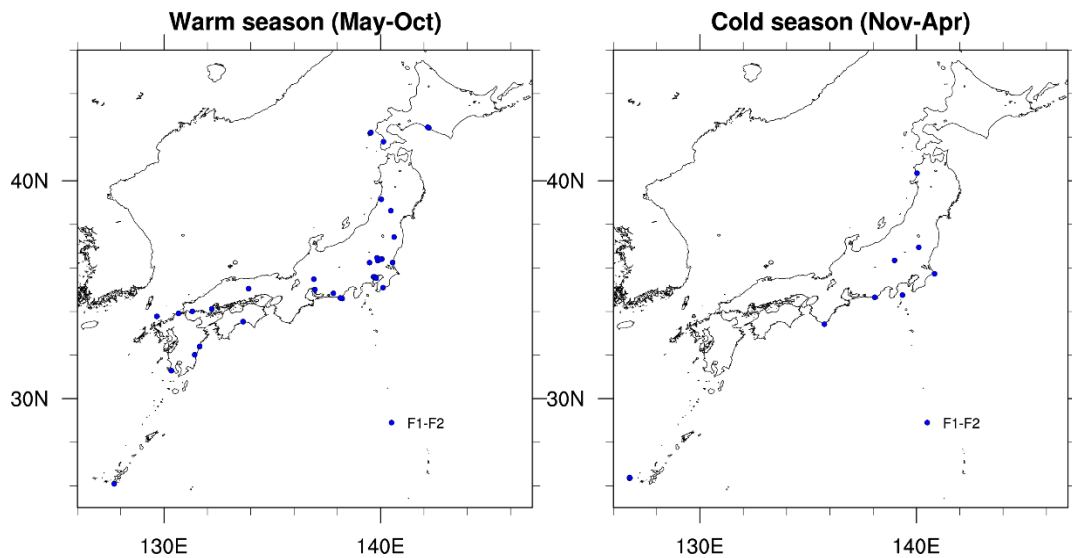
<sup>1</sup>太平洋側 F2・F1-F2 竜巻の場合は F3 規模に対する閾値を同時に超過する竜巻がいくつか存在する。その一部は F3 竜巻 (茂原竜巻、豊橋竜巻、つくば竜巻) とともに発生したものである。環境場としては F3 竜巻が発生している状況下でも、マイクロスケールの気象メカニズム等で小さな竜巻が発生することがあると解釈できる。つまり、閾値は、環境場 (親雲スケールの気象場) を観点とした、対象規模の竜巻が発生するための「必要条件」であるといえる。



第 5.5-2 図 同時超過頻度分布 (暖候期)  
 (SReH の閾値 :  $200\text{m}^2/\text{s}^2$ , 最大 CAPE の閾値 :  $650\text{J}/\text{kg}$ )

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

寒候期においても福島県から宮城県の太平洋側、襟裳岬から道南方面の沿岸部、及び本州・道南の日本海側沿岸で頻度が大きくなっている。道南より北側の日本海側沿岸で頻度が増えていないのは実態と整合している。中央アルプス以北の中央山地で頻度は低めである。この地域で竜巻は 2 箇所発生している (第 5.3-3 図) が、共に F1-F2 規模の小さな竜巻である (第 5.5-3 図)。

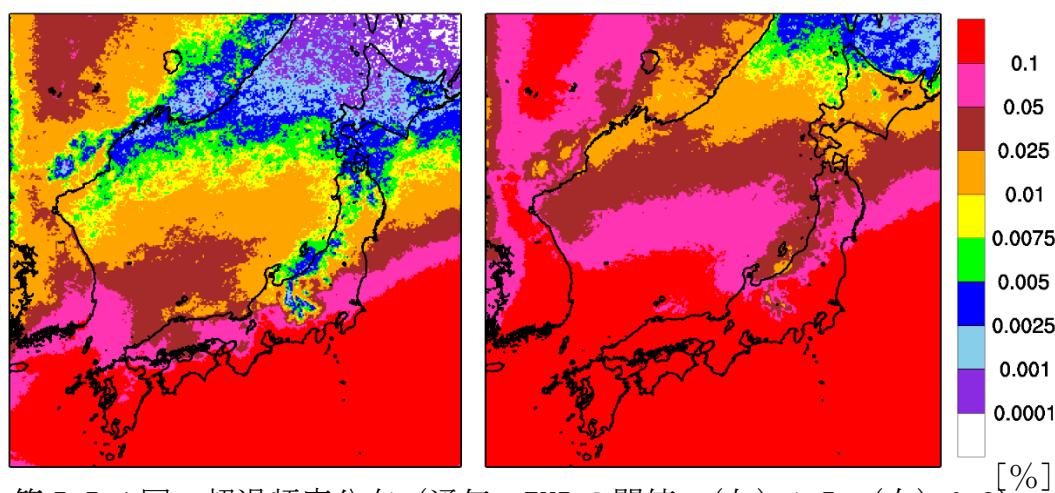


第 5.5-3 図 F1-F2 竜巻の発生箇所

第 4 節における個別竜巻の分析事例において、暖候期に対しては 1988 年以降に発生した F2 あるいは F1-F2 竜巻が 1 事例しかない。第 5.5-1 図に示した東北太平洋側沿岸から道南・道東にかけての頻度において、暖候期の方が低いというのは海水温

の高さの季節性との整合性にも欠けるため、最大 CAPE の閾値は 1000J/kg よりも小さくした方がよいと思われる。第 5.5-2 図で用いた閾値 650 J/kg の妥当性の判断は今後発生するであろう F2 規模の竜巻の発生を踏まえた分析結果をもとに再度検討する必要があるが、概ね発生状況の地域性は表現できている。

EHI を用いた場合、EHI1.5 では、第 5.5-1 図の暖候期、寒候期の状況を平均的に見た時の頻度分布に大凡あてはまる（第 5.5-4 図左図）。1989/03/16 F2 事例を参考に 0.8 まで閾値を下げると、地域性は殆ど見られなくなる（第 5.5-4 図右図）。上述のように、暖候期の分布は第 5.5-1 図よりも閾値を下げた第 5.5-2 図の分布の方がよい傾向が見られることから、EHI1.5 の結果は頻度を過少に評価している可能性がある。しかし、閾値を 0.8 まで落とした結果では、茨城県以西太平洋側+九州沿岸と、それ以外の地域との差がかなり小さく、落としすぎのようである。いずれにしても、F2 規模以上の竜巻を対象とする場合、F3 規模以上を対象とする場合とは異なって季節間での発生数の差があり（第 5.3-3 図）、EHI を用いた通年評価をすることについては議論の余地が大きい。



第 5.5-4 図 超過頻度分布（通年；EHI の閾値：（左）1.5，（右）0.8）

## 6. 佐呂間竜巻に対する考察

第 5.3-2 図の同時超過頻度分布において、北海道では超過頻度が非常に低いですが、網走支庁網走支庁佐呂間町では F3 竜巻が発生している。ここではこの竜巻に対する考察及び影響評価における取り扱いの方向性について述べる。

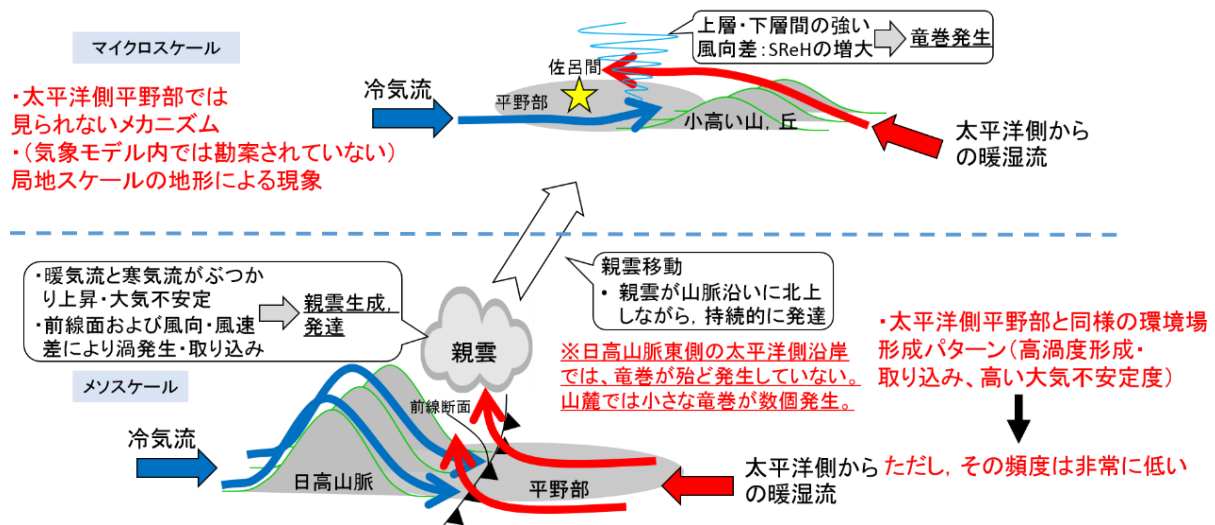
佐呂間竜巻の発生メカニズムについて過去の知見を踏まえ、第 6-1 図のように模式的に示した。第 4.2-1 図に示したように、当竜巻発生時においては、太平洋側からの暖気流が道東・オホーツク地方に流入している環境下で、高い SReH を伴う寒冷前線が通過しており、第 4.11-1 図に示すように、SReH、CAPE とともに一定の高さを保持していた。この意味で、太平洋側で過去に発生した F3 竜巻の環境場の特徴と同様の特徴を有する。ただし、CAPE については、第 4.2-1 図に示したように、SReH とは異なり、降水域が発達した日高山脈の東側に広く高い値をとっているわけではなかった。

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 600m 以上で幅 10km 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 では第 4. 11-1 図でプロットした結果よりも高まっている可能性が高い<sup>1</sup>。

前節でも議論したように、オホーツク地方は北海道の中でも F2 規模以上の竜巻であれば本州北日本と同等の頻度で環境場が形成されやすい地域であるが、F3 規模以上の竜巻に対しては環境場が形成され難い、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



第 6-1 図 佐呂間竜巻の発生メカニズムに関する模式図

間竜巻発生時においても F3 規模竜巻の発生には（特に最大 CAPE においては）微妙な環境場であった<sup>2</sup>が、近隣の周辺地形の影響を強く受けて F3 規模の竜巻発生に到ったと解釈するのが妥当と考えられる。

上述のように、竜巻発生環境場に関する同時超過頻度分布（第 5. 3-2 図）、及び発生率の分析結果（第 5. 4-1 図）をもととした超過確率の議論では、竜巻検討地域の設

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

<sup>2</sup>佐呂間竜巻は季節の変わり目に発生したが、暖候期の傾向が強かった（第 5. 5-1 図参照）といえる。

定及び基準竜巻風速  $V_{BI}$  の設定に佐呂間竜巻を特段考慮する必要はない。それはこの竜巻が基準竜巻設定で対象としている地域性・空間スケールよりも局地的・小さな空間スケールを有する地形影響を受けたものであるからである。むしろ、この影響については、竜巻影響評価ガイドにおける設計竜巻  $V_D$  の設定時に考慮するのがガイドの趣旨に沿っている。

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

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

この条件を満たせば、寒冷前線通過時に、暖かい空気塊が尾根を乗り越えて寒冷前線起因の冷気流の上側に流入できる。このような確認を行う必要があるのは、東北太平洋側や北海道オホーツク地方・道南地方等太平洋に面した地域に立地した発電所である。発電所は沿岸部に立地しているため、佐呂間竜巻で影響を及ぼしたような尾根形状の島が沖近くに存在するかがポイントとなる。日本海側沿岸部に立地した発電所においては、高標高山岳の影響が大きい（第 2.3-3 図）、不安定性の非常に大きい暖湿流が流れ込むような状況は生じがたい。

## 7. まとめと今後の課題

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

- ・ F3 規模の竜巻、F2-F3 規模の竜巻（1988 年以降）、日本海側 F2 規模の竜巻（1988 年以降）、及び日本海側 F1-F2 規模の竜巻（1988 年以降）を対象に、WRF モデルと ECMWF 再解析データを用いた気象解析を行い、5 km 解像度での気象場と突風関連指数（SReH・CAPE）の分布を分析した。
- ・ 上記竜巻事例に対して竜巻発生地点周辺における SReH と CAPE の両指数の値を分析し、F3 規模以上の場合と F2 規模以上の場合の両方に対して、地域性を考える際の妥当な閾値について検討した。
- ・ F3 規模以上の竜巻を対象とした閾値を同時に超過する頻度の分布を 50 年間の長期再解析データをもとに算定した。その結果、茨城県以西の太平洋側沿岸及び九州沿岸の平野部で頻度が高く、実際の竜巻発生箇所とも整合していた。一方、その他の地域では、上記太平洋側地域に比べて 1~2 オーダ以下の頻度であった。
- ・ 総観スケールでの気流場では、日本列島の高標高山脈によって太平洋側から流れ込む不安定性の高い暖湿流が遮断され（第 2.3-3 図）、この気流パターンが F3 規模の大きな竜巻が日本海側で発生せず、茨城県以西の太平洋側沿岸域において発

生するという実績と関係していると考えられる。大きな竜巻はさまざまな総観場区分に発生しているが、総観場区分で「局地性」と判定された竜巻は、スケールの小さな非スーパーセル型であり、上記太平洋側沿岸域と対応していない。一方、総観場として「台風性」と判定された大きな竜巻の発生箇所は対応している。そのため、台風性の大きな竜巻の発生箇所を検討地域の設定の参考にすることは一つの方法として考えられる。

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

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

## 参考文献

- Bluestein, H. B., 2013: Severe Convective Storms and Tornadoes. Springer, 456 pp.
- Brady, R. H., and E. J. Szoke, 1989: A case study of nonmesocyclone tornado development in northeast Colorado: similarities to waterspout formation. *Mon. Wea. Rev.*, 843-856.
- Browning, K. A., 1964: Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. *J. Atmos. Res.*, 21, 634-639.
- Bunkers, M. J., B. A. Klimowski, J. W. Zeitler, R. L. Thompson, and M. L. Weisman, 2000: Predicting supercell motion using a new hodograph technique. *Wea. Forecasting*, 15, 61-79.
- Burgess, D. W., M. A. Magsig, J. Wurman, D. C. Doswell, and Y. Richardson, 2002: Radar observations of the 3 May 1999 Oklahoma City tornado. *Wea. Forecasting*, 17, 456-471.
- Chuda, T., and H. Niino, 2005: Climatology of environmental parameters for mesoscale convections in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, 391-408.
- Davies, J. M., 1993: Hourly helicity, instability, and EHI in forecasting supercell tornadoes. 17th Conf. on Severe Local Storms, St. Louis, MO, Amer. Meteor. Soc., 107-111.
- Davis-Jones, R., D. Burgess, and M. Foster, 1990: Test of helicity as a tornado forecast parameter. 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB., Canada, Amer. Meteor. Soc., 588-592.
- Doswell III, C. A., and J. S. Evans, 2003: Proximity sounding analysis for derechos and supercells: an assessment of similarities and differences. *Atmos. Res.*, 67-68, 117-133.
- Dotzek, N., M. V. Kurgansky, J. Grieser, B. Feuerstein, and P. Nevir, 2005: Observational evidence for exponential tornado intensity distributions over specific kinetic energy. *Geophys. Res. Letters*, 32, L24813, doi:10.1029/2005GL024583.
- Fujita, T. T., 1981: Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scale. *J. Atmos. Sci.*, 38, 1511-1534.
- Klemp, J. B., and R. B. Wilhelmson, 1978: Simulations of right- and left-moving storms produced through storm splitting. *J. Atmos. Sci.*, 35, 1097-1110.
- Lee, B. D., and R. B. Wilhelmson, 1997: The numerical simulation of nonsupercell tornadogenesis. Part II: Evolution of a family of tornadoes along a weak outflow boundary. *J. Atmos. Sci.*, 54, 2387-2415.
- Mashiko, W., H. Niino, and T. Kato, 2009: Numerical simulation of

- tornadogenesis in an outer-rainband minisupercell of typhoon Shanshan on 17 September 2006. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 4238-4260.
- Moncrieff, M., and M. J. Miller, 1976: The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 373-394.
  - Noda, A. T., and H. Niino, 2010: A numerical investigation of a supercell tornado: Genesis and vorticity budget. *J. Meteor. Soc. Japan*, 88, 135-159.
  - Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 369-432.
  - Orlanski, I., 1975: A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 56, 527-530.
  - Ramsdell, J. V. Jr., and J. P. Rishel, 2007: Tornado climatology of the contiguous United States. NUREG/CR-4461, Revision 2.
  - Rasmussen, E. N.: 2003: Refined supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 18, 530-535.
  - Rasmussen, E. N., and D. Blanchard, 1998: A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 13, 1148-1164.
  - Roberts, R. D., and J. W. Wilson, 1995: The genesis of three nonsupercell tornadoes observed with dual-Doppler radar. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 3408-3436.
  - Rotunno, R., and J. B. Klemp, 1985: On the rotation and propagation of simulated supercell storms. *J. Atmos. Sci.*, 42, 271-292.
  - Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers : A description of the advanced research WRF version 2. NCAR Tech. Note, NCAR/TN-468+STR, 88 pp., 2005.
  - Suzuki, O, H. Niino, H. Ohno, and H. Nirasawa, 2000: Tornado-producing mini supercells associated with Typhoon 9019. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 1868-1882.
  - Trapp, R. J., 2013: *Mesoscale-Convective Processes in the Atmosphere*. Cambridge, 346 pp.
  - U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, 2007: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1.
  - Wakimoto, R. M., and J. W. Wilson, 1989: Non-supercell tornadoes. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1113-1140.
  - 飯塚義浩, 加治屋秋実, 2011: 数値予報資料から求めた竜巻に関連する大気環境指数の統計的検証. *天気*, 58, 19-30.
  - 大野久雄, 2001: *雷雨とメソ気象*. 東京堂出版, 309 pp.
  - 原子力規制委員会, 2013: *原子力発電所の竜巻評価ガイドの制定について*. 原管



研発第13061911号, 2013年6月19日制定

([http://www.nsr.go.jp/nra/kettei/data/20130628\\_jitsuyoutatsumaki.pdf](http://www.nsr.go.jp/nra/kettei/data/20130628_jitsuyoutatsumaki.pdf)).

- ・ 加藤輝之, 2008a: 竜巻発生環境に関する研究 (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: 竜巻発生環境に関する研究 (III) - スーパーセルを伴う竜巻の発生機構の研究 -, 平成19年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進, 39-44.
- ・ 杉本聡一郎, 野原大輔, 平口博丸, 2014a: 国内既往最大規模の竜巻を対象とした発生頻度の地域性について. 2014年度保全学会年次学術講演会, 395-402.
- ・ 杉本聡一郎, 野原大輔, 平口博丸, 2014b: 突風関連指数を用いた大きな竜巻の発生環境場の地域性に関する検討. 2014年度日本気象学会春季大会講演予稿集, B464.
- ・ 瀧下洋一, 2011: 竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報について - 突風に関する防災気象情報の改善 -. 測候時報, 78, 57-93.
- ・ 新野 宏, 2007: 竜巻. 天気, 54, 933-936.
- ・ 橋本篤, 平口博丸, 豊田康嗣, 中屋耕, 2011: 温暖化に伴う日本の気候変化予測 (その1) - 気象予測・解析システムNuWFASの長期気候予測への適用性評価 -. 電力中央研究所報告 N10044, 22pp.
- ・ 橋本篤, 平口博丸, 田村英寿, 服部康男, 松梨史郎, 2013: 領域気候モデルを用いた過去53年間の気象・気候再現. 電力中央研究所報告, N13004, 18 pp.

## 付録 A 温位について

気体の状態方程式によれば、同じ気圧下で密度が小さいほど気体の温度は高くなる。したがって、ある空気塊が周囲よりも高温であれば、その空気塊は浮力を得て上昇する。この時、下層での空気塊の気温が高いからといって、ある高い高度に断熱的に持ち上げた空気塊は、その高度の周囲の気温より高いとは限らない。同じ高度（気圧）で気温の高低を比較してはじめて、空気塊が浮力を受けるかどうかがわかる。温位を用いれば、本文の式(3)のように、1000hPa 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800hPa程度の気圧となっており、温位は310K程度とする。それに対し、飛行高度での気圧（100～200hPa）での気温が約-70℃とすると温位は360K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360Kに対する気温は約60℃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.

B-1 これまでの知見整理

Davies (1993)は、最も近い観測点で得られたラジオゾンデデータから SReH をはじめとした鉛直シア関係の指数に関する調査を行い、例えば 0-3km SReH については、平均値として F2・F3 竜巻の場合  $369\text{m}^2/\text{s}^2$  (21 事例)、F4・F5 竜巻の場合  $539\text{m}^2/\text{s}^2$  (10 事例) と報告した。ただし、スーパーセル竜巻のポテンシャルの見積もりには、大気不安定性と風のシアもしくは SReH の組み合わせを調べるべきであると指摘している。Johns et al. (1993)は、F2 規模以上の竜巻に対して 0-2km SReH と CAPE との間に図 B-1 の関係性を報告した。

殆どの F2 規模以上の竜巻が EHI (=CAPE×SReH/160000) 2 程度を超える場合に発生していることがみてとれる。また、F4・F5 規模の竜巻(図中の Violent ○) の場合、より大きな EHI で発生している傾向にある。関連した成果は、EHI>2 でスーパーセルが発達する可能性が非常に高く、EHI>4 で非常に大きな竜巻が発生する可能性が高いとする文献にも見られる (Davies 1993)。

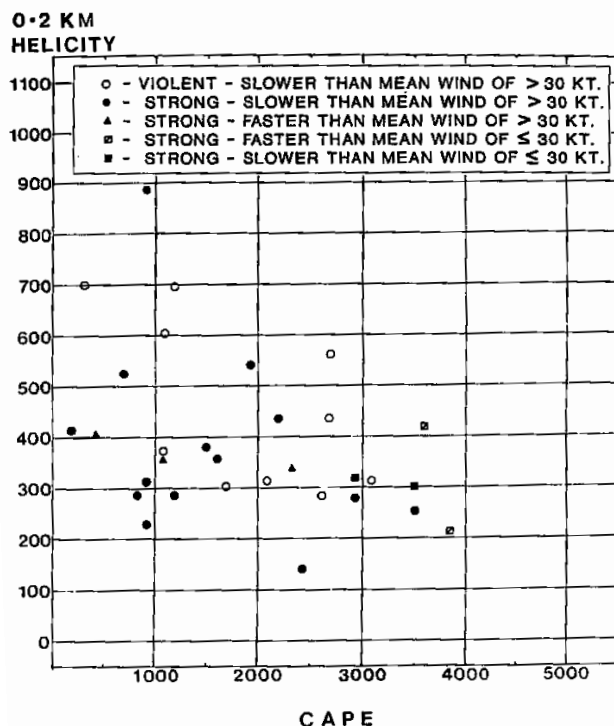


図 B-1 CAPE と 0-2km SReH の関係  
(プロットは F2 規模以上。○は F4・F5 規模)

Rasmussen and Blanchard (1998)は、1992 年に米国で実施されたラジオゾンデデータ (0 時 UTC (世界標準時) の約 3000 のデータ) を分析し、竜巻発生地点から 400km 以内の観測地点のデータから竜巻発生時の突風関連指数の

気候学的特性について調べた。F2 規模以上の竜巻とそれ以外の差（中央値の差）は、SReH, CAPE 単独で用いる場合よりも両方を複合させた EHI の方が区別できていることが見てとれる（図 B-2）。ただし、F2 規模以上の竜巻が発生した範囲のうち値の小さな EHI で F1 規模以下の竜巻が発生しているケースもある。

全ての竜巻・非竜巻を対象とすると、EHI のヒストグラムの結果では、竜巻発生指標としての EHI の有効性が低いと考えられるという報告もある（櫻井・川村 2008）。上記で取りあげた各文献を踏まえれば、突風関連指数の適用性は F0・F1 規模以上か非竜巻かという小さな竜巻の発生有無の区別には向かず、F2 規模以上か否かの区別では適用性が高まり、むしろ F3・F4 規模以上か否かといった大きな竜巻の発生有無を議論するのに適しているといえる。なお、Rasmussen and Blanchard (1988) では、F3 規模以上の高強度の竜巻とそれ以外を区別することについては検討していない。

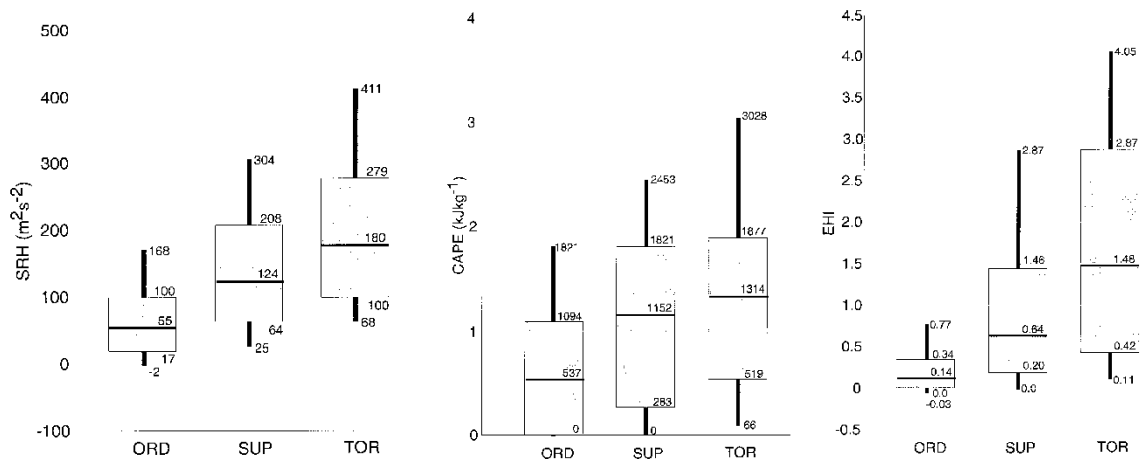


図 B-2 各突風指数(左：SReH, 中：CAPE, 右：EHI)に対する箱ひげ図(箱は値の小さい方から 25%から 75%の範囲を表し、箱中の太線は中央値を示す。TOR は F2 規模以上の竜巻, SUP は F1 規模以下の竜巻, ORD は非スーパーセル雷雨を表す。)

Rasmussen (2003) は、SReH を求める際の地上からの層厚について検討し、これまでガイドライン的に使われてきた 0-3km SReH (Davies-Jones et al. 1990) の殆どは、地上から 1km までの大気 (0-1km SReH) に起因するため、SReH 算出の層厚を 0-1km とすることを提案している。その他、SReH を求める際のストームの移動ベクトル算出方法についてもいくつか方法がある。指数の算出手法に関連して、CAPE についてはより複雑である。特に、数値モデルによる解析値・予測値を算出する場合、対流不安定が解消されることにより CAPE 値が小さく見積もられる場合がある (瀧下 2011)。そのため、Rasmussen and Blanchard (1998) では、その影響を軽減する算出方法を用いている。また、CAPE を算出する際の持ち上げ空気塊の性質によりさまざまな種類の CAPE がある。例えば、地上数キ

ロまでの大気の平均的な性質を持たせることもあれば (MLCAPE と呼ばれる), 最大の不安定度になる高さの空気塊を持ち上げることもできる (MUCAPE)。MLCAPE がよく用いられることが多いが, 一般的に MUCAPE の方が値は高く (Chuda and Niino 2008), 米国の SPC (Storm Prediction Center) のような実運用の場で MUCAPE が SCP ( $= \text{MUCAPE}/1000 \times 0\text{-}3\text{km SReH}/100 \times \text{BulkRichardson Number}/40$ ) の算出に用いられる場合がある (※今回の検討でも MUCAPE を用いている)。特に, 下層に寒気があり, その上に暖気がある安定した条件下のケース (佐呂間竜巻の佐呂間町付近では地形影響でその傾向が増大していると考えられる) では MLCAPE にもとづく不安定度は非常に小さくなる。このように, SReH や CAPE の算出方法についても議論すべき余地がある。

ゾンデデータを用いる解析は, 竜巻発生地点との距離差が大きいことが課題である。そこで, 数値気象モデルによる解析・予測による格子点データを用いた分析もなされている。米国の水平解像度 40km 予報データ (1 時間毎) を用いた分析では (Thompson et al. 2003), SReH, CAPE, EHI の全体的な傾向として Rasmussen and Blanchard (1988) と同様の結果が得られているが, F2 規模以上の竜巻に対する EHI の中央値が 2 程度と大きくなる等, Davies (1993) に近い結果となっている。SCP では F2 規模以上とそれ以外の差が顕著であり (図 B-3), CAPE や SReH に関連した複合関連指数として EHI 以外の指数の検討の余地がある

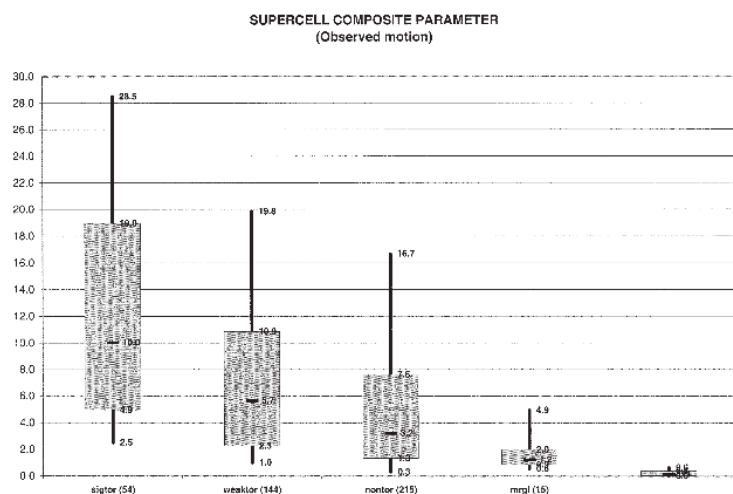


図 B-3 SCP に対する箱ひげ図 (sigtor は F2 規模以上, weaktor は F1 規模以下, nontor は非竜巻, mrgl はややスーパーセル化したストーム, nonsuper は非スーパーセルストームを表し, 括弧内の数字は事例数を表す。箱ひげ図の意味は図 B-2 と同じ。)

飯塚・加治屋 (2011) は, 気象庁のメソ客観解析データ (水平解像度 10km・鉛直総数 16 層・3 時間毎) のデータを用いて, 2006 年 2 月から 3 ヶ年の間に発生した 141 個の竜巻・非発生事例を分析した。その際, 発生地点から 40km 範囲内

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

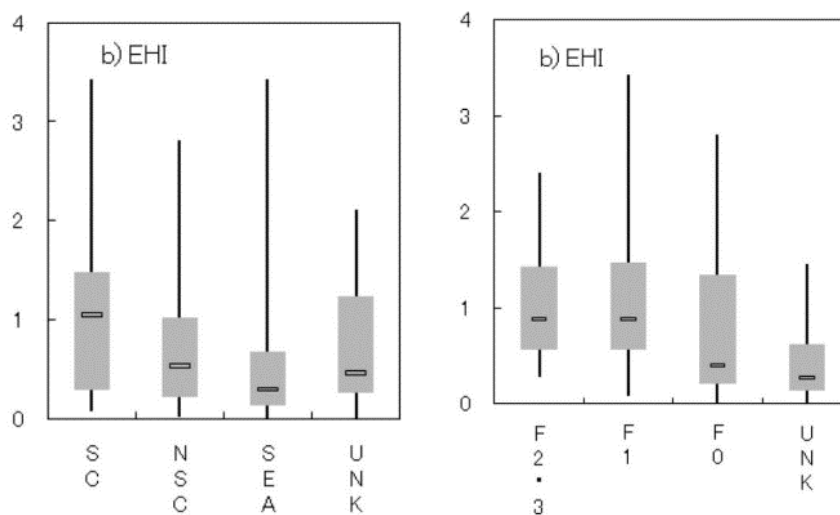


図 B-4 EHI に対する箱ひげ図（左：竜巻種別，右：F スケール別；SC はスーパーセル型竜巻，NSC はノンスーパーセル型竜巻，SEA は海上竜巻，UNK は陸上竜巻でスーパーセル判定ができなかった竜巻を表す。）

瀧下(2011)は，気象庁の数値予報資料（MSM）（気象庁メソ客観解析データと空間分解能等は同じ仕様だが解析データではなく，予報データである）を用いて，2004 年から 3 ヶ年に発生した竜巻やダウンバースト発生時の SReH，CAPE，EHI の関係を調べた（図 B-5）。発生地点を中心とした 50km 四方内の最大の値を採用している。この図から，最も大きく，唯一の F3 竜巻である佐呂間竜巻の環境場において（ML）CAPE が非常に小さく（それゆえ，EHI も非常に小さく），また，F1 竜巻と F2・F3 竜巻で特段の違いが見られないことから，指数で竜巻強度を判断するのは困難であると結論づけている。

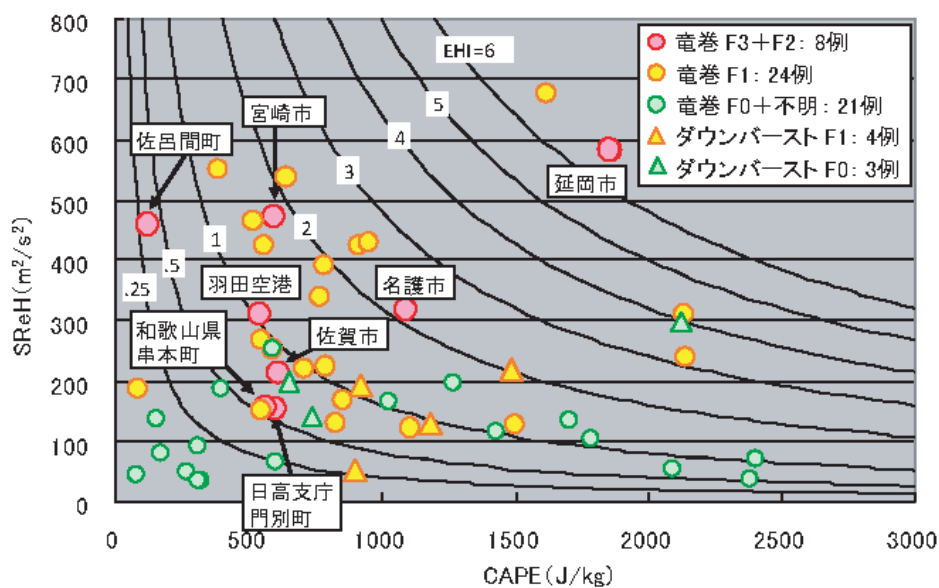


図 B-5 竜巻及びダウンバースト事例における分析例

F1 竜巻と F2・F3 竜巻の区別については、これまで挙げた文献同様、やはり困難なようである。しかし、佐呂間竜巻において CAPE 値が非常に小さい点についてはその解釈に注意しなければならない。同種のデータを用いた飯塚・加治屋 (2011) は、850hPa 以下の総数は 7 層しかなく、ゾンデ観測データよりも鉛直分解能が粗いため、結果の解釈には注意を要することを指摘している。つまり、CAPE 算出において、適切な空気塊を持ち上げていない可能性は否定できない。また、加藤 (2008a) が指摘するように、佐呂間竜巻発生時には、佐呂間町の南東側にある山を暖気流が乗り越え、佐呂間町付近では下層では冷たい西よりの気流と、その直上に東よりの暖気流が流れ込み、鉛直シアが増大していたと考えられる。このような場合、地表面付近がやや安定傾向となるため上述のように、MLCAPE の値は非常に小さくなる。MUCAPE の場合は地表面付近の大気が冷たい場合に、その上空で発生しうる elevated convection を考慮できるが、佐呂間竜巻に対して結果的に CAPE 値が大きくなる (本文参照)。つまり、算出方法に検討の余地が大きいため、佐呂間竜巻といった 1 つの F3 竜巻事例をもって、SReH, CAPE 系の突風関連指数の限界を断じることは難しい。

## B-2 今後の研究の方向性

以上のように、検討時点でのデータの品質等々が低かった等、各文献ともに検討の余地があり、今後は各文献の知見を全て踏まえた解析方法・データをもって分析・考察することが重要である。大局的には、スーパーセル化が顕著な (F3 規模程度以上の) 大きな竜巻とそれ以外の竜巻の発生環境場は、EHI 値の差が有意である傾向が見られることから、SReH 値と CAPE 値とから地域レベルで

の傾向を議論できる可能性がある。また、こうした突風関連指数の活用は、F2規模以上とそれ以外の比較が限度であり、F1規模以上とそれ以外というように、小さな竜巻の発生予測への指数の活用は向かないと考えられる。

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

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

#### 参考文献

- Chuda, T., and H. Niino, 2005: Climatology of environmental parameters for mesoscale convections in Japan. J. Meteor. Soc. Japan, 83, 391-408.
- Davies, J. M., 1993: Hourly helicity, instability, and EHI in forecasting supercell tornadoes. 17th Conf. on Severe Local Storms, St. Louis, MO., Amer. Meteor. Soc., 107-111.
- Davies, J. M., and R. H. Johns, 1993: Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes. 1. Wind shear and instability. The Tornado: Its structure dynamics, prediction, and hazards. C. Church, D. Burgess, C. Doswell and R. Davies-Jones, Eds., American Geophysical Union, 573-582.
- Johns, R. H., J. M. Davies, and P. W. Leftwich, 1993: Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes. 2. Variations in the combination of wind and instability parameters. The Tornado: Its structure dynamics, prediction, and hazards. C. Church, D. Burgess, C. Doswell and R. Davies-Jones, Eds., American Geophysical Union, 573-582.
- Rasmussen, E. N., and D. O. Blanchard, 1998: A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. Wea. Forecasting, 13, 1148-1164.



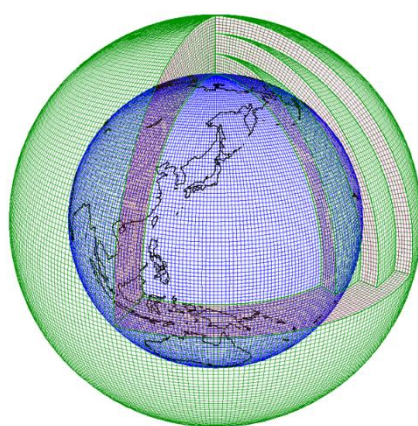
- ・ Rasmussen, E. N.: 2003: Refined supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 18, 530-535.
- ・ Thompson, R. L., R. Edwards, J. A. Hart, K. L. Elmore, and P. Markowski, 2003: Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle. *Wea. Forecasting*, 18, 1243-1261.
- ・ 飯塚義浩, 加治屋秋実, 2011: 数値予報資料から求めた竜巻に関連する大気環境指数の統計的検証. *天気*, 58, 19-30.
- ・ 加藤輝之, 2008a: 竜巻発生の環境場に関する研究 (Ⅲ) -スーパーセルを伴う竜巻の発生機構の研究-, 平成 19 年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進, 39-44.
- ・ 加藤輝之, 2008b: 竜巻発生の環境場に関する研究 (Ⅰ) -竜巻をもたらす発生環境に関する統計的研究-, 平成 19 年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進, 6-12.
- ・ 瀧下洋一, 2011: 竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報について -突風に関する防災気象情報の改善-. *測候時報*, 78, 57-93.

## 付録 C 気象モデルの概要

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

この種の気象モデルは、放射性汚染気塊の輸送量計算にも使用されており、WSPEEDI-II (Worldwide version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information ; 世界版緊急時環境線量情報予測システム第2版) では、本検討に用いたWRFモデルの前身に位置づけられるMM5

(PSU/NCAR Mesoscale Model version 5 ; Dudhia 1993) が気象場の入力情報の作成に用いられている (山澤ら 1997)。WRFモデルは、MM5の力学系・物理モデル共に大幅な改良が加えることにより開発されたものであり、現在米国においては気象の現業・研究の両面で活用されている。また、わが国を含めた諸外国においても広く活用されている。



図C-1 計算グリッド構造の例

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

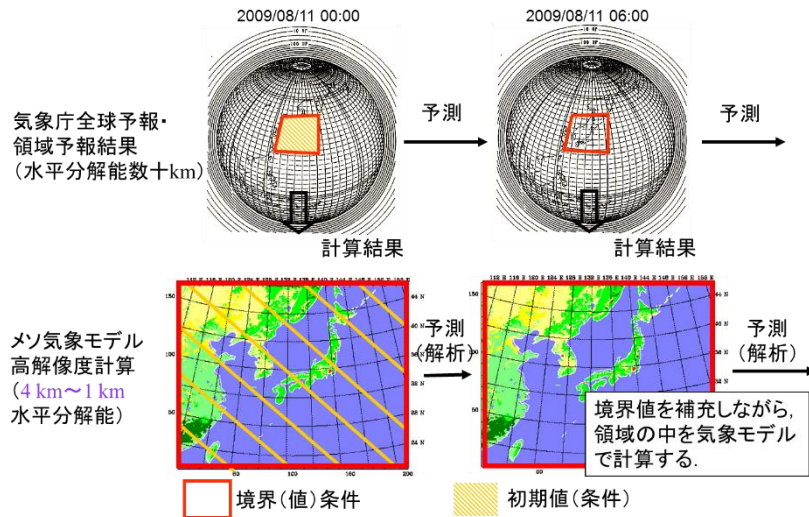


図 C-2 気象モデルを用いた解析・予測計算の流れの概念図  
(気象庁全球モデルを例に)

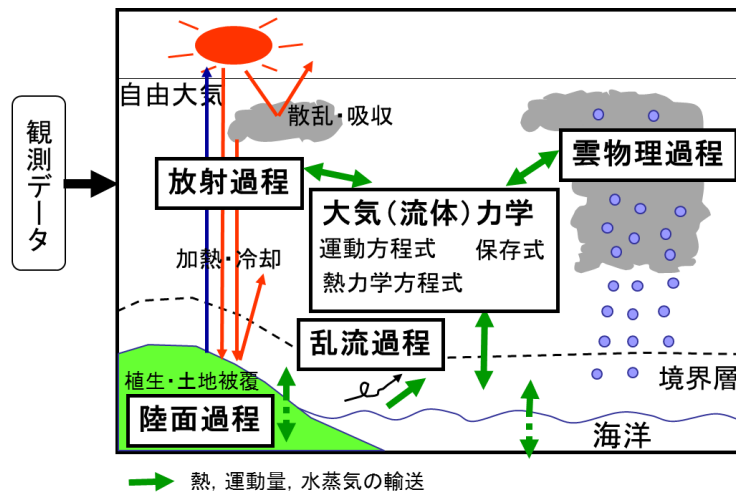


図 C-3 気象モデルを用いた計算の模式図

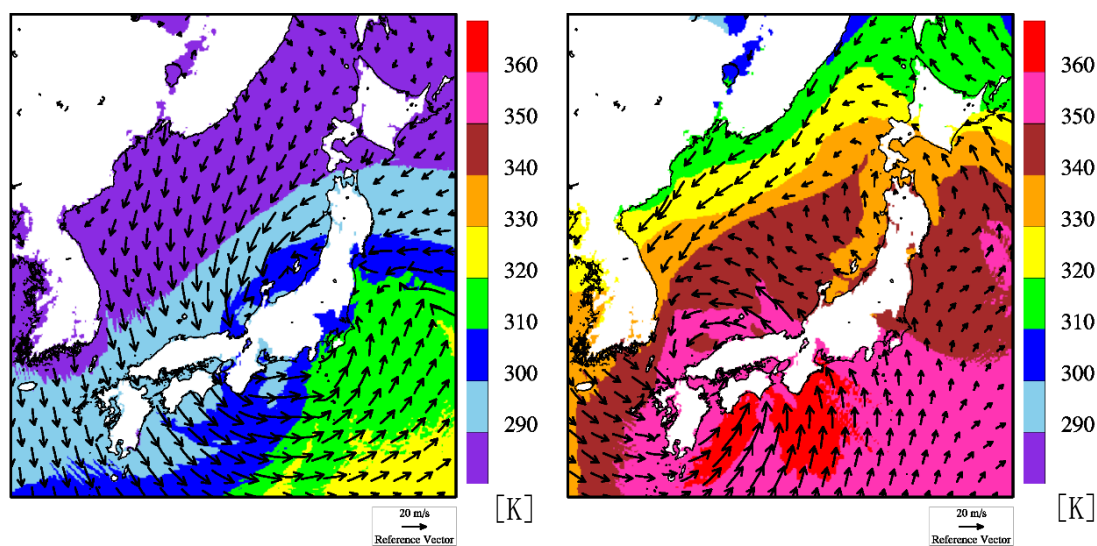
参考文献

- ・ Dudhia, J., 1993: A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. Mon. Wea. Rev., 121, 1493-1513.
- ・ 山澤弘実, 茅野政道, 永井晴康, 古野朗子, 1997: 緊急時環境線量情報予測システム (世界版) WSPEEDI の開発と検証. 日本原子力学会誌, 39, 881-892.

付録 D 高標高山岳が及ぼす影響

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

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



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

## 付録 E 閾値の感度

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

### (a) EHI

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

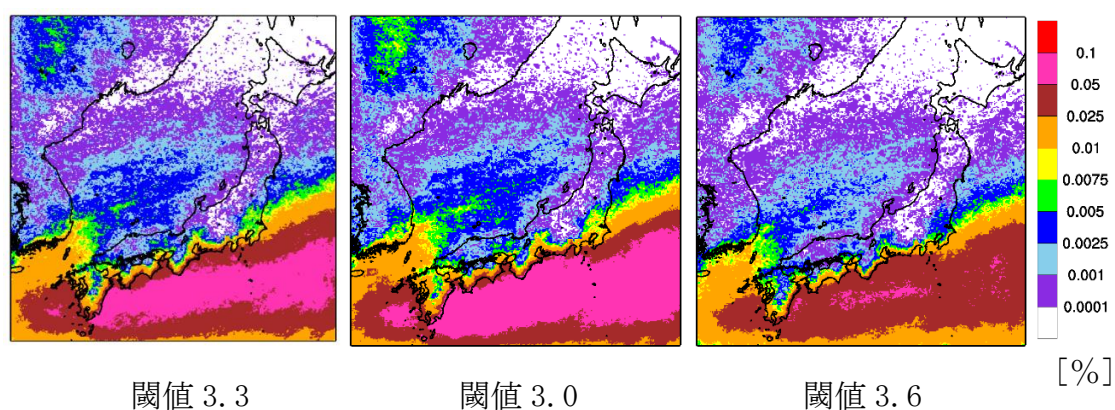


図 E-1 同時超過頻度分布（EHI の閾値は左から、3.3, 3.0, 3.6）

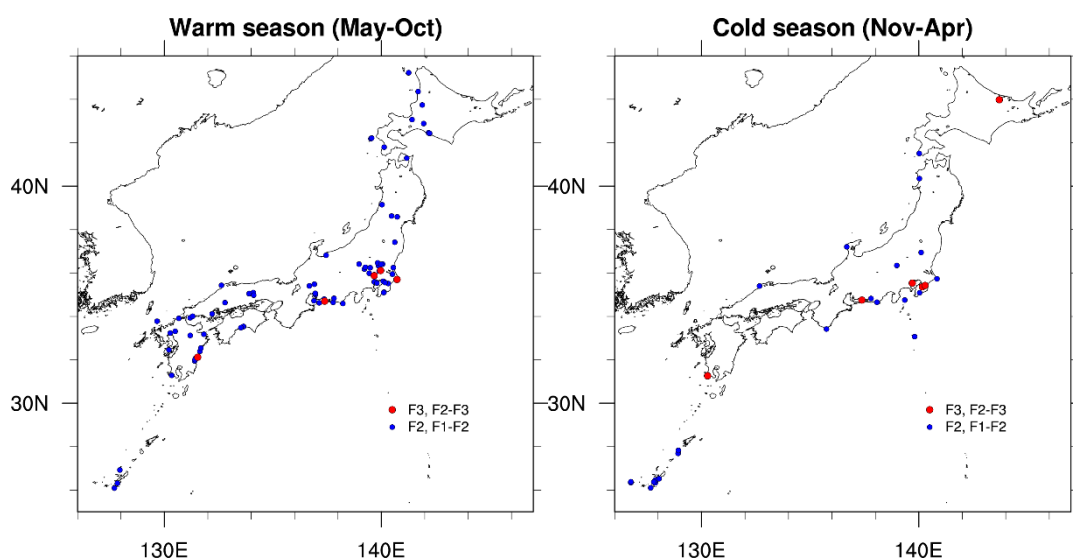


図 E-2 F3 竜巻（F2-F3 を含む）及び F2 竜巻（F1-F2 を含む）の発生箇所（左：暖候期，右：寒候期）

(b) SReH と CAPE (暖候期)

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

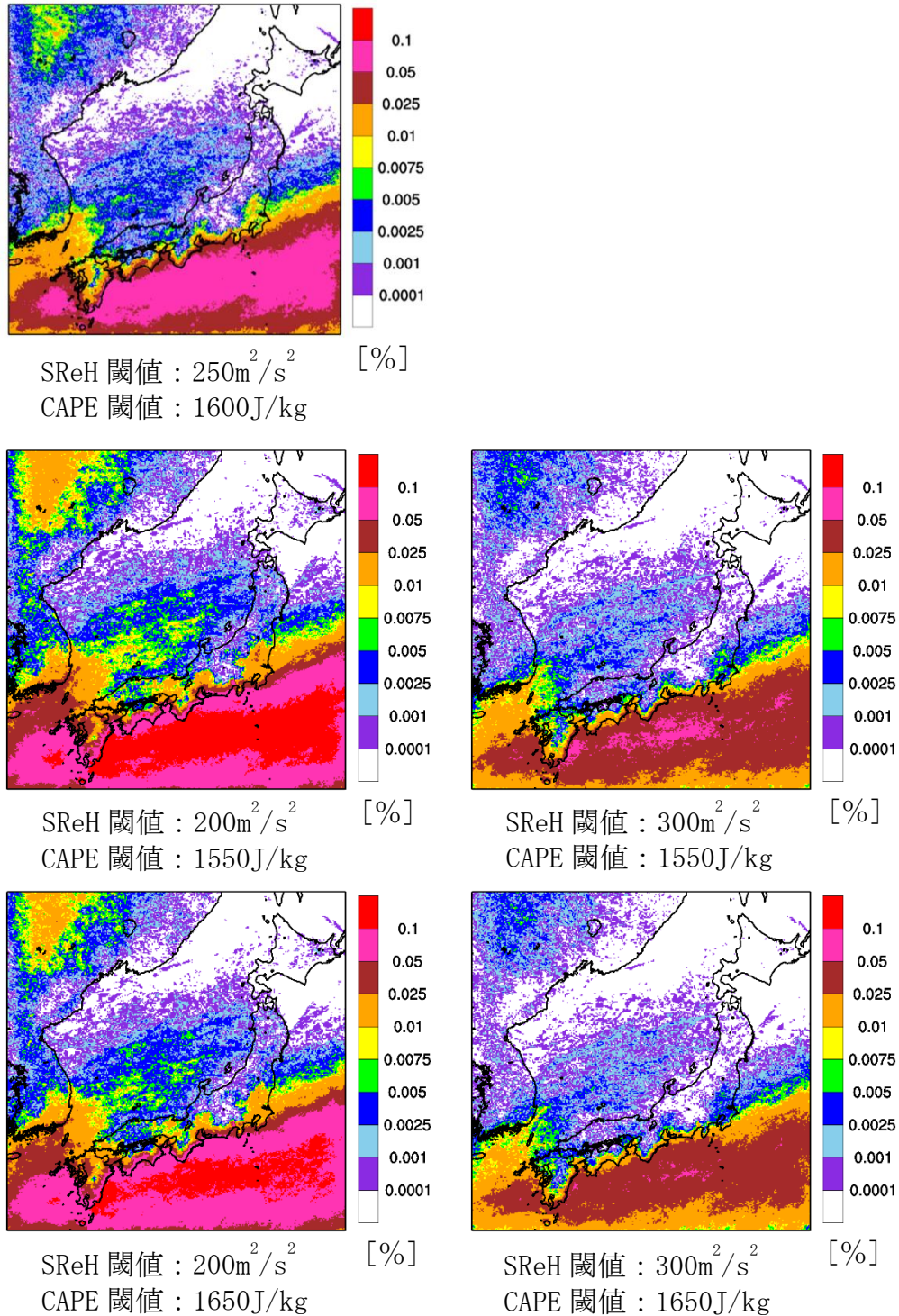
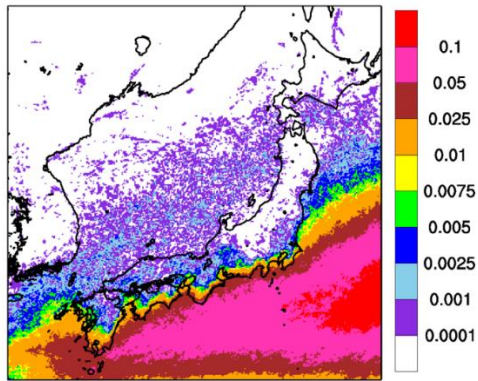


図 E-3 同時超過頻度分布 (暖候期)

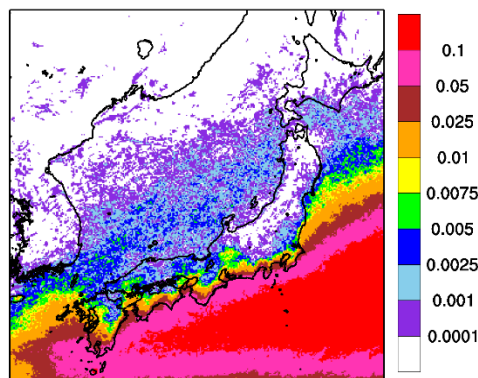
今回設定した閾値（SReHの閾値：250m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>，CAPEの閾値：1600J/kg）に対する頻度分布の0.01%前後よりも大きな地域が，発生箇所を含包していることがわかる。特に，いずれかの閾値を大きくすると，EHIの場合と同様に，関東平野内のF3竜巻の発生箇所を含包できない傾向にある。特にSReHの感度が高い。SReHとCAPEの両方の閾値を小さくした場合（SReH:200 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>，CAPEの閾値:1550J/kg）においては，全体的な頻度は高まり，内陸部深くまで頻度が高まっており，閾値を小さくしすぎ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

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

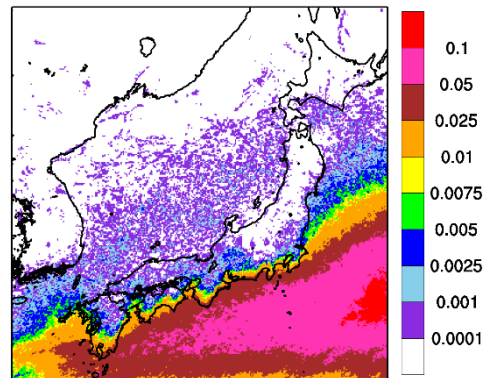
平成27年2月3日の審査会合において用いた閾値は，今回の検討のように感度解析的に閾値を変えて決めたわけではない。あくまで，数は少ないながらも過去のF3竜巻発生時の環境場を解析し，下限の指数値を決めたが，その結果はF3竜巻の発生の実態をよく表現できていると考えられる。閾値に幅を持たせた分析結果では，閾値を小さくするほど，小さな竜巻が発生する環境場をカウントするため，超過頻度が大きくなる。暖候期は寒候期に比べて閾値にやや敏感であるが，茨城県以西の太平洋側沿岸域と，日本海側及び北日本の沿岸域との差は維持されることを確認できた。これは，EHIを用いる場合でも，CAPEとSReHを用いる場合においても同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



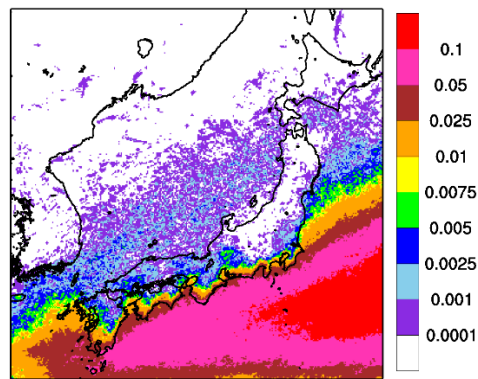
SReH 閾値 :  $250 \text{ m}^2/\text{s}^2$  [%]  
 CAPE 閾値 :  $600 \text{ J/kg}$



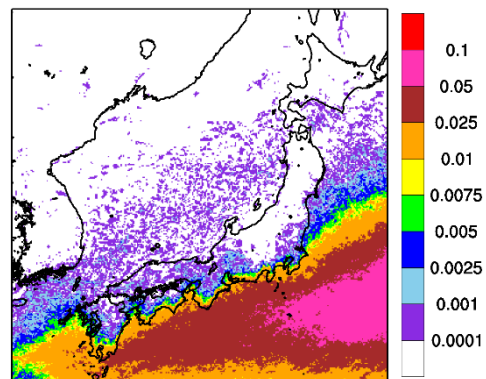
SReH 閾値 :  $200 \text{ m}^2/\text{s}^2$  [%]  
 CAPE 閾値 :  $550 \text{ J/kg}$



SReH 閾値 :  $300 \text{ m}^2/\text{s}^2$  [%]  
 CAPE 閾値 :  $550 \text{ J/kg}$



SReH 閾値 :  $200 \text{ m}^2/\text{s}^2$  [%]  
 CAPE 閾値 :  $650 \text{ J/kg}$



SReH 閾値 :  $300 \text{ m}^2/\text{s}^2$  [%]  
 CAPE 閾値 :  $650 \text{ J/kg}$

図 E-4 同時超過頻度分布 (寒候期)



## 竜巻検討地域及び全国で発生した竜巻

## 1. 竜巻検討地域において発生した竜巻

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、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の一覧を下表に示す。

	発生日	発生場所	Fスケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
1	1962/07/02	茨城県稲敷郡東村	(F2)	温暖前線	梅雨前線	局地性じょう乱
2	1965/09/05	青森県むつ市	(F2)	閉塞前線		
3	1967/03/23	千葉県銚子市	(F1～F2)	寒冷前線		
4	1967/10/28	千葉県飯岡町	(F2～F3)	台風		
5	1971/08/31	千葉県飯岡町	不明	台風		
6	1971/09/08	千葉県飯岡町	(不明)	台風		
7	1974/03/13	福島県いわき市	F1	移動性高気圧		
8	1975/11/15	千葉県大網白里町	F1	南岸低気圧		
9	1979/05/27	茨城県鹿島郡旭村	(F1～F2)	気圧の谷	寒気の移流	雷雨(熱雷を除く)
10	1980/10/31	北海道門別町	(F1～F2)	閉塞前線		
11	1990/12/12	茨城県海上～那珂湊市	F1	寒気の移流	局地性じょう乱	その他
12	1992/08/07	宮城県本吉郡唐桑町	F1	局地性じょう乱	雷雨(熱雷)	
13	1994/10/05	北海道門別町	F1	寒冷前線		
14	1994/10/05	北海道門別町	F1～F2	寒冷前線		
15	1997/10/07	北海道苫小牧市	F1	雷雨(熱雷を除く)	暖気の移流	寒気の移流
16	1998/09/16	宮城県名取市	F1	台風	暖気の移流	
17	1999/10/27	茨城県多賀郡十王町	F1	南岸低気圧		
18	2003/09/29	北海道(海上)	不明	気圧の谷		
19	2004/10/22	北海道門別町	F2	寒冷前線	暖気の移流	
20	2005/10/02	北海道伊達市	F0	寒冷前線		
21	2006/10/11	北海道新ひだか町	F1	寒冷前線		
22	2006/10/11	北海道新ひだか町	F1	寒冷前線		
23	2006/11/07	北海道日高町	不明	寒冷前線		
24	2006/11/07	北海道日高町	F1	寒冷前線	暖気の移流	
25	2007/10/04	北海道(海上)	不明	気圧の谷	暖気の移流	地形効果
26	2007/10/17	北海道(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	
27	2008/11/07	北海道様似郡様似町	F0～F1	寒冷前線		
28	2009/10/08	千葉県山武郡九十九里町	F1	台風	暖気の移流	
29	2010/11/01	千葉県山武郡九十九里町	F0	南岸低気圧		

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

2. 全国の沿岸±5km 範囲で発生した竜巻

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、全国の沿岸±5km 範囲で過去に発生した竜巻の一覧を下表に示す。

	発生日	発生場所	Fスケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
1	1961/1/24	鹿児島県川辺郡知覧町	F1	寒冷前線	—	—
2	1961/1/24	福岡県北九州市	F1	寒冷前線	—	—
3	1961/10/7	静岡県清水市	F1	寒冷前線	—	—
4	1962/7/2	茨城県稲敷郡東村	(F2)	温暖前線	梅雨前線	局地性じょう乱
5	1962/8/26	静岡県浜松市	(F2)	台風	—	—
6	1962/8/26	静岡県榛原郡御前崎町	(F1～F2)	台風	—	—
7	1962/9/28	北海道東利尻町	(F2)	寒冷前線	—	—
8	1962/12/30	静岡県千浜村	(F1～F2)	二つ玉低気圧	温暖前線	—
9	1964/1/17	東京都八丈町	F2	南岸低気圧	—	—
10	1965/9/5	青森県むつ市	(F2)	閉塞前線	—	—
11	1965/9/30	秋田県秋田市	F1	日本海低気圧	温暖前線	—
12	1965/9/30	秋田県西目村	F0～F1	日本海低気圧	温暖前線	—
13	1965/10/14	東京都大田区	(F1～F2)	温暖前線	—	—
14	1967/3/23	千葉県銚子市	(F1～F2)	寒冷前線	—	—
15	1967/10/28	千葉県鴨川町	(F2)	台風	—	—
16	1967/10/28	千葉県飯岡町	(F2～F3)	台風	—	—
17	1968/1/8	新潟県中頸城郡大潟町	F1	季節風	—	—
18	1968/8/28	高知県南国市	(F1～F2)	台風	—	—
19	1968/9/24	宮崎県宮崎市	F1	台風	—	—
20	1968/9/24	宮崎県高鍋町	(F2)	台風	—	—
21	1968/9/24	宮崎県高鍋町	(F2～F3)	台風	—	—
22	1968/9/24	宮崎県高鍋町	(F2)	台風	—	—
23	1969/6/22	山口県阿武郡須佐町	F1	寒冷前線	—	—
24	1969/8/23	千葉県鴨川町	(F1～F2)	台風	—	—
25	1969/10/11	北海道(海上)	不明	気圧の谷	—	—
26	1969/11/18	山形県酒田市	F1	気圧の谷	—	—
27	1969/12/7	愛知県豊橋市	(F2～F3)	二つ玉低気圧	—	—
28	1970/7/7	長崎県福江市	F1	熱帯低気圧 (台風以外)	—	—
29	1971/2/1	石川県河北郡内灘町	F1	日本海低気圧	寒冷前線	—
30	1971/8/31	静岡県清水市	F0～F1	台風	—	—
31	1971/8/31	千葉県鴨川市	不明	台風	—	—
32	1971/8/31	千葉県千葉市	(F2)	台風	—	—
33	1971/8/31	千葉県飯岡町	不明	台風	—	—
34	1971/9/8	千葉県飯岡町	(不明)	台風	—	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
35	1971/10/17	北海道羽幌町	(F2)	寒気の移流	—	—
36	1971/10/17	北海道羽幌町	F0～F1	寒気の移流	—	—
37	1972/6/6	沖縄県糸満市	不明	東シナ海低気圧	暖気の移流	—
38	1972/6/6	沖縄県糸満市	(F1～F2)	東シナ海低気圧	暖気の移流	—
39	1972/6/6	鹿児島県大島郡知名町	F1	寒冷前線	—	—
40	1972/11/21	富山県黒部市	F1	寒冷前線	寒気の移流	季節風
41	1973/5/21	石川県羽咋郡押水町	F0～F1	寒冷前線	日本海低気圧	—
42	1973/9/27	北海道礼文町	F1	閉塞前線	—	—
43	1973/10/22	秋田県秋田市	F1	日本海低気圧	寒冷前線	—
44	1974/3/13	福島県いわき市	F1	移動性高気圧	—	—
45	1974/4/21	長崎県西彼杵郡外海町	F1	寒冷前線	—	—
46	1974/6/6	静岡県静岡市	F0～F1	気圧の谷	—	—
47	1974/7/6	高知県南国市	(F1～F2)	台風	暖気の移流	—
48	1974/7/8	静岡県磐田郡福田町	F1	台風	停滞前線	—
49	1974/7/8	静岡県小笠郡浜岡町	(F1～F2)	台風	梅雨前線	—
50	1974/8/8	秋田県山本郡峰浜村	F0～F1	寒冷前線	—	—
51	1974/10/3	北海道奥尻郡奥尻町	(F1～F2)	温暖前線	—	—
52	1974/10/20	北海道檜山郡上ノ国町	(F1～F2)	寒冷前線	—	—
53	1975/2/6	鹿児島県大島郡伊仙町	(F2)	南岸低気圧	—	—
54	1975/2/15	東京都大島町	(F1～F2)	季節風	寒気の移流	—
55	1975/5/31	島根県簸川郡大社町	(F2)	日本海低気圧	局地性じょう乱	寒気の移流
56	1975/5/31	島根県簸川郡大社町	F0～F1	日本海低気圧	局地性じょう乱	寒気の移流
57	1975/5/31	島根県簸川郡大社町	F0～F1	日本海低気圧	局地性じょう乱	寒気の移流
58	1975/8/22	三重県熊野市	F1	台風	—	—
59	1975/9/8	北海道奥尻郡奥尻町	(F1～F2)	日本海低気圧	暖気の移流	—
60	1975/10/12	長崎県東彼杵郡東彼杵町	F1	寒冷前線	不安定線	その他(低気圧)
61	1975/10/12	熊本県本渡市	F2	寒冷前線	—	—
62	1975/11/14	高知県安芸郡東洋町	F1	南岸低気圧	温暖前線	—
63	1975/11/15	東京都三宅島三宅村	F1	南岸低気圧	温暖前線	—
64	1975/11/15	千葉県大網白里町	F1	南岸低気圧	—	—
65	1976/2/28	鹿児島県阿久根市	F1	不安定線	—	—
66	1976/8/16	福岡県遠賀郡芦屋町	(F1～F2)	寒冷前線	—	—
67	1976/10/23	沖縄県南風原村	F1	東シナ海低気圧	暖気の移流	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
68	1977/1/13	石川県金沢市	F0～F1	日本海低気圧	寒気の移流	—
69	1977/9/8	福岡県福岡市	F1	寒冷前線	台風	寒気の移流
70	1978/2/10	鹿児島県加世田市	F1	寒冷前線	暖気の移流	—
71	1978/2/28	神奈川県川崎市	F2～F3	寒冷前線	暖気の移流	—
72	1978/8/14	北海道豊富町	不明	日本海低気圧	—	—
73	1978/10/27	長崎県西彼杵郡西彼町	F1	局地性じょう乱	寒冷前線	暖気の移流
74	1979/5/27	茨城県鹿島郡旭村	(F1～F2)	気圧の谷	寒気の移流	雷雨(熱雷を除く)
75	1979/9/3	宮崎県宮崎市	F1	台風	—	—
76	1979/10/31	石川県羽咋郡富来町	F0～F1	寒気の移流	日本海低気圧	—
77	1979/11/2	北海道松前郡松前町	(F2)	日本海低気圧	温暖前線	—
78	1980/8/28	長崎県富江町	F1	局地性じょう乱	暖気の移流	—
79	1980/10/13	鹿児島県中種子町	F1	台風	—	—
80	1980/10/14	宮崎県宮崎市	F1	台風	—	—
81	1980/10/14	宮崎県宮崎市	F1	台風	—	—
82	1980/10/31	北海道門別町	(F1～F2)	閉塞前線	—	—
83	1981/6/29	佐賀県佐賀郡川副町	F1	梅雨前線	—	—
84	1983/3/12	沖縄県糸満市	F1	東シナ海低気圧	その他	—
85	1983/4/4	熊本県玉名郡長洲町	F1	寒冷前線	—	—
86	1983/9/25	沖縄県伊是名村	(F2)	台風	—	—
87	1983/9/25	沖縄県東村	F1	台風	—	—
88	1983/9/27	長崎県南松浦郡富江町	F1	台風	—	—
89	1984/11/19	鳥取県米子市	F1	寒冷前線	—	—
90	1985/6/23	福岡県北九州市	F1	梅雨前線	暖気の移流	—
91	1985/8/31	宮崎県日向市	(F1～F2)	台風	暖気の移流	—
92	1985/9/28	鹿児島県枕崎市	(F1～F2)	東シナ海低気圧	—	—
93	1985/10/5	高知県土佐市	F1	台風	太平洋高気圧	暖気の移流
94	1985/10/5	高知県高知市	F1	台風	大陸高気圧	暖気の移流
95	1986/12/19	愛知県渥美郡赤羽根町	F1	閉塞前線	—	—
96	1987/1/5	沖縄県勝連町	(F2)	寒冷前線	—	—
97	1987/1/11	秋田県南秋田郡若美町	F0～F1	その他(低気圧)	—	—
98	1987/1/11	秋田県八竜町	F1	その他(低気圧)	—	—
99	1987/8/30	長崎県富江町	F1	台風	—	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
100	1988/9/25	和歌山県串本町	F1	寒冷前線	暖気の移流	—
101	1989/3/16	島根県簸川郡大社町	(F2)	局地性じょう乱	寒気の移流	—
102	1989/7/4	沖縄県沖縄市	F2	停滞前線	暖気の移流	—
103	1989/9/22	大阪府泉南郡岬町	F1	寒冷前線	—	—
104	1990/2/19	鹿児島県枕崎市	(F2～F3)	寒冷前線	暖気の移流	その他(低気圧)
105	1990/3/12	三重県志摩郡志摩町	F1	日本海低気圧	寒冷前線	—
106	1990/4/3	沖縄県国頭郡金武町	F2	寒冷前線	—	—
107	1990/4/6	石川県羽咋郡富来町	F2	オホーツク海低気圧	気圧の谷	—
108	1990/9/19	静岡県浜松市、舞阪町、雄踏町	不明	台風	—	—
109	1990/12/11	千葉県鴨川市	F2	暖気の移流	気圧の谷	雷雨(熱雷を除く)
110	1990/12/12	茨城県海上～那珂湊市	F1	寒気の移流	局地性じょう乱	その他
111	1991/1/13	新潟県(海上)	不明	日本海低気圧	—	—
112	1991/2/13	沖縄県国頭郡恩納村	不明	東シナ海低気圧	暖気の移流	—
113	1991/2/13	沖縄県那覇市	F1	東シナ海低気圧	暖気の移流	—
114	1991/2/15	福井県(湖上)	F1	二つ玉低気圧	—	—
115	1991/4/7	沖縄県島尻郡具志川村	F2	暖気の移流	寒冷前線	—
116	1991/4/7	沖縄県島尻郡具志川村	F1～F2	暖気の移流	寒冷前線	—
117	1991/9/17	北海道(海上)	不明	寒気の移流	気圧の谷	局地性じょう乱
118	1991/11/28	宮崎県日南市	F1	南岸低気圧	—	—
119	1991/11/28	和歌山県日置川町	F0～F1	南岸低気圧	—	—
120	1991/11/28	東京都新島若郷	F0	南岸低気圧	—	—
121	1991/12/11	石川県金沢市	F1	寒冷前線	—	—
122	1992/1/6	鹿児島県大島郡知名町	F1	東シナ海低気圧	寒冷前線	暖気の移流
123	1992/2/15	沖縄県島尻郡具志川村	F1	寒冷前線	—	—
124	1992/3/31	沖縄県(海上)	不明	東シナ海低気圧	暖気の移流	—
125	1992/4/15	和歌山県日置川町	不明	寒冷前線	—	—
126	1992/5/17	沖縄県(海上)	不明	東シナ海低気圧	暖気の移流	—
127	1992/8/7	宮城県本吉郡唐桑町	F1	局地性じょう乱	雷雨(熱雷)	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
128	1992/9/13	北海道(海上)	不明	移動性高気圧	—	—
129	1992/9/17	北海道増毛町	F1	寒気の移流	—	—
130	1992/9/17	北海道(海上)	不明	寒気の移流	—	—
131	1992/9/22	沖縄県名護市	F1	台風	—	—
132	1992/11/19	宮崎県北浦町	不明	不安定線	移動性高気圧	—
133	1993/1/7	和歌山県印南町	不明	南岸低気圧	—	—
134	1993/1/23	沖縄県竹富町	F0	停滞前線	—	—
135	1993/5/27	沖縄県西原町	F1	梅雨前線	—	—
136	1993/6/18	福岡県大牟田市	F1	停滞前線	—	—
137	1993/9/3	高知県土佐清水市	F1	台風	—	—
138	1993/9/3	宮崎県延岡市	F0～F1	台風	—	—
139	1993/9/3	高知県吾川郡春野町	F2	台風	—	—
140	1993/9/26	北海道留萌市	不明	寒気の移流	—	—
141	1993/10/17	石川県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
142	1993/10/23	新潟県(海上)	不明	寒冷前線	—	—
143	1993/11/24	新潟県(海上)	不明	季節風	—	—
144	1993/12/1	鹿児島県指宿郡頰娃町	F1	寒冷前線	暖気の移流	—
145	1993/12/1	鹿児島県垂水市	F1	寒冷前線	—	—
146	1994/2/9	山口県(海上)	不明	寒冷前線	季節風	寒気の移流
147	1994/3/23	鹿児島県大島郡伊仙町	F0～F1	その他(低気圧)	—	—
148	1994/3/26	山形県酒田市	F1	寒気の移流	気圧の谷	—
149	1994/8/20	沖縄県伊良部町	F2	台風	—	—
150	1994/9/1	新潟県(海上)	不明	寒冷前線	気圧の谷	雷雨(熱雷を除く)
151	1994/9/29	愛知県豊橋市	F1	台風	—	—
152	1994/9/29	愛知県蒲郡市	F1	台風	—	—
153	1994/9/29	静岡県新居町	F0～F1	台風	—	—
154	1994/10/4	高知県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
155	1994/10/4	高知県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
156	1994/10/4	高知県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
157	1994/10/4	高知県香美郡赤岡町	F0	暖気の移流	—	—
158	1994/10/4	高知県南国市	F0	暖気の移流	—	—
159	1994/10/5	北海道門別町	F1	寒冷前線	—	—
160	1994/10/5	北海道門別町	F1～F2	寒冷前線	—	—
161	1994/10/12	高知県芸西村	F0～F1	日本海低気圧	暖気の移流	—
162	1995/9/23	沖縄県読谷村	F0	台風	—	—
163	1995/9/23	沖縄県与那城町	F1	台風	—	—
164	1995/12/1	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
165	1996/3/30	鹿児島県枕崎市	F1	寒冷前線	日本海低気圧	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
166	1996/7/1	鹿児島県喜入町	F1	停滞前線	—	—
167	1996/7/5	千葉県千葉市	F2	日本海低気圧	温暖前線	—
168	1996/8/4	長崎県大村市	F0	局地性じょう乱	—	—
169	1996/9/5	秋田県由利郡金浦町	不明	日本海低気圧	寒冷前線	—
170	1996/10/4	愛媛県(海上)	不明	日本海低気圧	寒気の移流	—
171	1996/10/8	北海道遠別町	F1	気圧の谷	寒気の移流	—
172	1996/11/30	新潟県柏崎市	F1	寒気の移流	—	—
173	1997/1/22	新潟県新潟市	F0	寒気の移流	—	—
174	1997/3/29	沖縄県糸満市	F2	寒冷前線	—	—
175	1997/9/6	高知県(海上)	不明	停滞前線	暖気の移流	—
176	1997/9/14	鹿児島県熊毛郡中種子町	F1	台風	—	—
177	1997/9/16	高知県南国市	F1	台風	暖気の移流	—
178	1997/9/28	愛媛県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
179	1997/10/5	福岡県(海上)	不明	寒冷前線	—	—
180	1997/10/7	北海道苫小牧市	F1	雷雨(熱雷を除く)	暖気の移流	寒気の移流
181	1997/10/14	長崎県壱岐郡郷ノ浦町	F1~F2	寒冷前線	局地性じょう乱	暖気の移流
182	1997/10/14	長崎県壱岐郡郷ノ浦町	F1	局地性じょう乱	寒冷前線	暖気の移流
183	1997/11/17	東京都八丈町	F1	温暖前線	暖気の移流	—
184	1997/11/28	鹿児島県知名町	F0	東シナ海低気圧	暖気の移流	—
185	1998/1/14	沖縄県豊見城村	F0	寒冷前線	暖気の移流	—
186	1998/2/14	沖縄県竹富町	F0	寒冷前線	—	—
187	1998/2/17	沖縄県久米島具志川村	F1~F2	停滞前線	—	—
188	1998/2/19	沖縄県南大東村	F1	その他(低気圧)	—	—
189	1998/4/18	高知県(海上)	不明	南岸低気圧	—	—
190	1998/9/2	長崎県(海上)	不明	気圧の谷	局地性じょう乱	—
191	1998/9/16	宮城県名取市	F1	台風	暖気の移流	—
192	1998/9/18	宮崎県宮崎市	F1	台風	—	—
193	1998/9/24	京都久美浜町	不明	停滞前線	暖気の移流	—
194	1998/9/24	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
195	1998/10/17	宮崎県児湯郡川南町	F0~F1	台風	—	—
196	1998/10/17	宮崎県日向市	F0	台風	—	—
197	1998/10/31	石川県(海上)	不明	日本海低気圧	—	—
198	1998/11/15	山形県酒田市	F1	寒冷前線	—	—

	発生日	発生場所	Fスケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
199	1999/4/10	高知県芸西村	F1	その他(低気圧)	気圧の谷	—
200	1999/5/4	愛知県渥美郡赤羽根町	F1	日本海低気圧	—	—
201	1999/6/30	静岡県富士市	F0	日本海低気圧	寒冷前線	—
202	1999/7/3	沖縄県(海上)	不明	停滞前線	暖気の移流	—
203	1999/7/21	沖縄県(海上)	不明	熱帯低気圧(台風以外)	—	—
204	1999/8/12	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
205	1999/8/21	山口県阿知須町	(F1~F2)	暖気の移流	雷雨(熱雷)	—
206	1999/9/23	長崎県式見町	F0~F1	停滞前線	局地性じょう乱	台風
207	1999/9/24	高知県南国市	F1	台風	暖気の移流	—
208	1999/9/24	山口県小野田市	F2	台風	—	—
209	1999/9/24	愛知県豊橋市	F3	台風	—	—
210	1999/9/24	愛知県蒲郡市	F1	台風	—	—
211	1999/9/24	愛知県小坂井町	F2	台風	—	—
212	1999/9/24	愛知県海部郡弥富町	F1	台風	—	—
213	1999/10/8	石川県(海上)	不明	寒冷前線	—	—
214	1999/10/20	香川県(海上)	不明	大陸高気圧	寒気の移流	暖気の移流
215	1999/10/27	茨城県多賀郡十王町	F1	南岸低気圧	—	—
216	1999/10/29	秋田県能代市	F0~F1	寒冷前線	—	—
217	1999/11/1	愛知県西尾市	F1	日本海低気圧	—	—
218	1999/11/2	静岡県静岡市	不明	その他(前線)	寒気の移流	—
219	1999/11/15	高知県大方町	F0~F1	日本海低気圧	寒気の移流	—
220	1999/11/25	秋田県八森町	(F1~F2)	日本海低気圧	寒冷前線	—
221	2000/7/25	福井県福井市	不明	停滞前線	—	—
222	2000/7/25	福井県坂井郡三国町	不明	停滞前線	—	—
223	2000/8/7	千葉県(海上)	不明	雷雨(熱雷)	—	—
224	2000/9/11	和歌山県新宮市	F0~F1	台風	停滞前線	暖気の移流
225	2000/9/11	愛知県南知多町	F2	台風	停滞前線	—
226	2000/12/25	東京都大島町	F1	寒気の移流	—	—
227	2001/1/13	沖縄県糸満市	F0	寒冷前線	—	—
228	2001/5/29	愛知県東海市	F0	局地性降水	—	—
229	2001/6/1	青森県西津軽郡岩崎村	F1	局地性じょう乱	—	—
230	2001/6/19	福井県敦賀市	F1	日本海低気圧	—	—
231	2001/7/8	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—



	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
232	2001/7/9	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
233	2001/8/4	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
234	2001/8/4	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
235	2001/10/1	和歌山県南部町	F0～F1	日本海低気圧	暖気の移流	—
236	2002/1/21	愛知県田原町	F1	二つ玉低気圧	温暖前線	暖気の移流
237	2002/4/3	沖縄県沖縄市	F2	東シナ海低気圧	気圧の谷	暖気の移流
238	2002/9/23	富山県下新川郡朝日町	F0～F1	寒気の移流	局地性じょう乱	—
239	2002/9/24	秋田県由利本荘市	F1	寒気の移流	—	—
240	2002/10/6	鹿児島県加世田市	F1	寒冷前線	—	—
241	2002/10/6	鹿児島県鹿児島市	F1	寒冷前線	—	—
242	2002/10/6	愛知県南知多町	F1	二つ玉低気圧	—	—
243	2002/10/7	東京都大島町	F1	日本海低気圧	—	—
244	2002/10/7	神奈川県横須賀市	F1	日本海低気圧	雷雨(熱雷を除く)	暖気の移流
245	2002/10/15	静岡県磐田郡浅羽町、小笠郡大須賀町、小笠郡大東町	F0	日本海低気圧	寒冷前線	—
246	2002/11/3	香川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
247	2002/11/4	石川県加賀市	F0	寒気の移流	—	—
248	2002/11/5	福井県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
249	2002/12/16	高知県室戸市	F0～F1	日本海低気圧	暖気の移流	—
250	2003/1/11	東京都(海上)	不明	気圧の谷	—	—
251	2003/6/19	宮崎県東臼杵郡門川町	F1	台風	—	—
252	2003/7/19	山口県岩国市	F1～F2	梅雨前線	—	—
253	2003/8/8	宮崎県日南市	F0～F1	台風	—	—
254	2003/8/8	宮崎県日向市	F0～F1	台風	—	—
255	2003/8/28	山口県山陽町	F1	寒冷前線	局地性じょう乱	—
256	2003/9/12	高知県高知市	F1	台風	暖気の移流	—
257	2003/9/29	北海道(海上)	不明	気圧の谷	—	—
258	2003/10/12	宮崎県延岡市	F0	その他(低気圧)	—	—
259	2003/10/12	高知県安芸市	F0～F1	停滞前線	暖気の移流	—
260	2003/10/18	福井県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
261	2004/6/1	沖縄県北中城村	不明	梅雨前線	暖気の移流	—
262	2004/6/27	佐賀県佐賀市	F2	梅雨前線	—	—
263	2004/8/15	北海道礼文郡礼文町	F0 未満	気圧の谷	—	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
264	2004/9/16	福岡県北九州市	F1	暖気の移流	雷雨(熱雷)	—
265	2004/9/27	沖縄県名護市	F1	台風	—	—
266	2004/9/27	沖縄県今帰仁村	F1	台風	—	—
267	2004/9/29	愛知県豊橋市	F0~F1	台風	—	—
268	2004/9/30	東京都大田区	F1~F2	台風	—	—
269	2004/10/22	北海道門別町	F2	寒冷前線	暖気の移流	—
270	2005/1/12	鳥取県(海上)	不明	季節風	寒気の移流	—
271	2005/1/27	沖縄県読谷村	F1	寒冷前線	暖気の移流	—
272	2005/5/1	高知県高知市	F0~F1	その他(低気圧)	暖気の移流	—
273	2005/9/5	宮崎県宮崎市	F1	台風	—	—
274	2005/10/2	北海道伊達市	F0	寒冷前線	—	—
275	2005/12/5	島根県出雲市	F1	寒気の移流	—	—
276	2005/12/25	山形県酒田市	F1	寒冷前線	—	—
277	2006/1/19	鹿児島県瀬戸内町	F1	停滞前線	—	—
278	2006/3/28	和歌山県串本町	F1~F2	日本海低気圧	寒冷前線	—
279	2006/4/20	神奈川県藤沢市	F1	寒冷前線	—	—
280	2006/8/13	佐賀県(海上)	不明	雷雨(熱雷)	—	—
281	2006/8/29	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
282	2006/9/17	宮崎県日南市	F1	台風	—	—
283	2006/9/17	宮崎県日向市	F1	台風	—	—
284	2006/9/17	宮崎県延岡市	F2	台風	—	—
285	2006/9/17	大分県臼杵市	F2	台風	—	—
286	2006/9/19	高知県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
287	2006/9/25	沖縄県南大東村	F0	その他	—	—
288	2006/10/11	北海道新ひだか町	F1	寒冷前線	—	—
289	2006/10/11	北海道新ひだか町	F1	寒冷前線	—	—
290	2006/11/6	和歌山県(海上)	不明	日本海低気圧	—	—
291	2006/11/7	北海道日高町	不明	寒冷前線	—	—
292	2006/11/7	北海道日高町	F1	寒冷前線	暖気の移流	—
293	2006/11/9	北海道奥尻郡奥尻町	F1	寒冷前線	暖気の移流	—
294	2006/11/11	山口県山口市	F0	寒冷前線	—	—
295	2006/11/18	沖縄県名護市	F2	停滞前線	—	—
296	2006/11/22	沖縄県東村	F1	停滞前線	暖気の移流	—
297	2006/11/26	高知県土佐清水市	F1	南岸低気圧	暖気の移流	—
298	2007/2/14	沖縄県島尻郡座間味村	F0~F1	寒冷前線	暖気の移流	—
299	2007/2/14	和歌山県日高郡印南町	F1	日本海低気圧	寒冷前線	—
300	2007/3/15	沖縄県中頭郡読谷村	F1	気圧の谷	暖気の移流	—
301	2007/4/18	沖縄県宮古島市	F1	寒冷前線	—	—
302	2007/5/31	千葉県(海上)	不明	雷雨(熱雷を除く)	寒気の移流	—

	発生日	発生場所	Fスケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
303	2007/8/24	山形県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
304	2007/8/24	山形県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
305	2007/8/28	沖縄県(海上)	不明	雷雨(熱雷)	—	—
306	2007/8/28	沖縄県(海上)	不明	雷雨(熱雷)	—	—
307	2007/8/29	沖縄県(海上)	不明	その他(高気圧)	気圧の谷	—
308	2007/8/29	沖縄県(海上)	不明	その他(高気圧)	気圧の谷	—
309	2007/9/2	沖縄県(海上)	不明	太平洋高気圧	雷雨(熱雷)	—
310	2007/9/9	福岡県(海上)	不明	気圧の谷	局地性じょう乱	—
311	2007/9/14	宮崎県延岡市	不明	台風	—	—
312	2007/10/1	北海道(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
313	2007/10/1	北海道(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
314	2007/10/1	北海道(海上)	不明	気圧の谷	—	—
315	2007/10/4	北海道(海上)	不明	気圧の谷	暖気の移流	地形効果
316	2007/10/4	北海道(海上)	不明	気圧の谷	暖気の移流	—
317	2007/10/4	佐賀県佐賀市	F0	太平洋高気圧	気圧の谷	—
318	2007/10/4	北海道(海上)	不明	気圧の谷	—	—
319	2007/10/9	鹿児島県長島町	不明	東シナ海低気圧	—	—
320	2007/10/9	鹿児島県(海上)	不明	東シナ海低気圧	—	—
321	2007/10/9	鹿児島県(海上)	不明	東シナ海低気圧	—	—
322	2007/10/11	青森県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
323	2007/10/11	青森県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
324	2007/10/14	三重県(海上)	不明	停滞前線	気圧の谷	—
325	2007/10/14	長崎県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
326	2007/10/14	長崎県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
327	2007/10/16	島根県(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
328	2007/10/17	北海道(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
329	2007/11/22	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
330	2007/12/2	山形県酒田市	F0	気圧の谷	—	—
331	2008/3/25	神奈川県(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
332	2008/3/25	神奈川県(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
333	2008/3/25	神奈川県(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
334	2008/3/27	鹿児島県いちき串木野市	F1	東シナ海低気圧	—	—
335	2008/3/27	鹿児島県垂水市	F1	東シナ海低気圧	—	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
336	2008/4/7	高知県土佐清水市	F0	その他(低気圧)	—	—
337	2008/4/9	鹿児島県枕崎市	F0	東シナ海低気圧	—	—
338	2008/4/23	愛知県豊橋市	不明	気圧の谷	—	—
339	2008/5/1	鹿児島県熊毛郡中種子町	F0	その他(低気圧)	—	—
340	2008/5/19	愛知県(海上)	不明	気圧の谷	南岸低気圧	—
341	2008/5/27	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
342	2008/5/27	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
343	2008/5/27	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
344	2008/6/1	秋田県(海上)	不明	日本海低気圧	—	—
345	2008/6/29	高知県安芸市	F0	梅雨前線	—	—
346	2008/7/3	沖縄県(海上)	不明	太平洋高気圧	気圧の谷	—
347	2008/7/22	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
348	2008/7/22	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
349	2008/7/22	沖縄県島尻郡与那原町	F0 未満	気圧の谷	—	—
350	2008/7/22	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
351	2008/7/22	沖縄県島尻郡与那原町付近	不明	気圧の谷	—	—
352	2008/7/22	沖縄県島尻郡与那原町付近	不明	気圧の谷	—	—
353	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
354	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
355	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
356	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
357	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
358	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
359	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
360	2008/8/8	沖縄県(海上)	不明	その他(低気圧)	—	—
361	2008/8/8	沖縄県石垣市	不明	その他(低気圧)	—	—
362	2008/8/12	福岡県(海上)	不明	その他(低気圧)	暖気の移流	—
363	2008/8/12	福岡県福津市	F0	その他(低気圧)	暖気の移流	—
364	2008/8/14	山形県(海上)	不明	熱帯低気圧(台風以外)	暖気の移流	—
365	2008/8/15	鳥取県鳥取市	F0 以下	熱帯低気圧(台風以外)	雷雨(熱雷を除く)	—
366	2008/8/16	千葉県千葉市	F0 以下	台風	停滞前線	雷雨(熱雷)

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
367	2008/8/16	千葉県(海上)	不明	台風	停滞前線	雷雨(熱雷)
368	2008/8/26	鹿児島県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
369	2008/9/6	愛媛県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
370	2008/9/14	北海道(海上)	不明	寒気の移流	—	—
371	2008/9/14	北海道(海上)	不明	寒気の移流	—	—
372	2008/9/21	香川県仲多度郡多度津町	F1	停滞前線	—	—
373	2008/9/21	新潟県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
374	2008/9/21	徳島県鳴門市	F0 未満	停滞前線	—	—
375	2008/10/1	秋田県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
376	2008/10/1	秋田県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
377	2008/10/7	沖縄県(海上)	不明	停滞前線	—	—
378	2008/10/7	沖縄県(海上)	不明	停滞前線	—	—
379	2008/10/7	沖縄県島尻郡久米島町	F0 未満	停滞前線	—	—
380	2008/10/7	沖縄県(海上)	不明	停滞前線	—	—
381	2008/10/7	沖縄県名護市	F0～F1	停滞前線	—	—
382	2008/10/10	秋田県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
383	2008/10/10	秋田県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
384	2008/10/10	秋田県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
385	2008/10/10	沖縄県糸満市	不明	気圧の谷	—	—
386	2008/10/11	北海道檜山郡江差町	F0	寒冷前線	—	—
387	2008/10/15	新潟県新潟市	F0	気圧の谷	—	—
388	2008/10/15	山形県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
389	2008/10/15	新潟県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
390	2008/10/24	三重県志摩市	F1	南岸低気圧	—	—
391	2008/10/26	新潟県新潟市	F0	寒冷前線	—	—
392	2008/10/27	福井県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
393	2008/10/27	千葉県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
394	2008/10/27	千葉県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
395	2008/10/27	千葉県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
396	2008/10/27	千葉県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
397	2008/10/27	千葉県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
398	2008/10/30	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
399	2008/10/30	鳥取県岩美郡岩美町	F0	寒気の移流	—	—
400	2008/10/30	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
401	2008/10/31	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
402	2008/11/2	新潟県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
403	2008/11/3	徳島県(海上)	不明	その他(前線)	寒気の移流	—
404	2008/11/7	北海道様似郡様似町	F0～F1	寒冷前線	—	—
405	2008/11/8	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
406	2008/11/19	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
407	2008/11/19	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
408	2008/11/20	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
409	2008/11/20	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
410	2008/11/20	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
411	2008/11/20	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
412	2008/11/20	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
413	2008/11/20	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
414	2008/11/23	石川県羽咋郡志賀町	F0~F1	気圧の谷	寒気の移流	—
415	2008/12/5	東京都品川区	F1	寒冷前線	—	—
416	2008/12/6	大分県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
417	2009/1/24	北海道(海上)	不明	寒気の移流	—	—
418	2009/1/24	北海道(海上)	不明	寒気の移流	—	—
419	2009/2/7	秋田県秋田市	F0	寒冷前線	—	—
420	2009/2/26	沖縄県(海上)	不明	その他(高気圧)	—	—
421	2009/3/9	沖縄県糸満市	F0	寒冷前線	—	—
422	2009/3/14	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
423	2009/6/26	沖縄県(海上)	不明	梅雨前線	—	—
424	2009/7/6	沖縄県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
425	2009/7/6	沖縄県石垣市	不明	暖気の移流	—	—
426	2009/7/25	高知県安芸市	F0	梅雨前線	—	—
427	2009/7/30	沖縄県(海上)	不明	その他(高気圧)	—	—
428	2009/8/8	沖縄県宮古島市	不明	台風	—	—
429	2009/8/8	沖縄県宮古島市	F0	台風	—	—
430	2009/8/8	沖縄県(海上)	不明	台風	—	—
431	2009/8/23	山形県鶴岡市	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
432	2009/8/23	山形県鶴岡市	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
433	2009/9/10	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
434	2009/9/10	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
435	2009/9/13	山形県鶴岡市	F0	日本海低気圧	—	—
436	2009/9/15	沖縄県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
437	2009/10/4	秋田県秋田市	不明	気圧の谷	—	—
438	2009/10/8	千葉県山武郡九十九里町	F1	台風	暖気の移流	—
439	2009/10/27	新潟県糸魚川市	不明	寒気の移流	—	—
440	2009/10/30	青森県西津軽郡深浦町	F0	寒冷前線	寒気の移流	—
441	2009/10/30	秋田県能代市	F1	寒冷前線	—	—
442	2009/11/3	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
443	2009/11/3	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
444	2009/11/3	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
445	2009/11/3	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
446	2009/11/3	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
447	2009/11/6	熊本県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
448	2009/11/11	静岡県掛川市	F0	寒気の移流	—	—
449	2009/11/13	宮崎県児湯郡川南町	F0	その他(低気圧)	—	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
450	2009/12/18	石川県金沢市	F0	寒気の移流	—	—
451	2009/12/18	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
452	2010/2/1	鹿児島県南さつま市	F0	東シナ海低気圧	寒冷前線	—
453	2010/2/1	鹿児島県南九州市	F0	東シナ海低気圧	寒冷前線	—
454	2010/4/24	長崎県(海上)	不明	移動性高気圧	—	—
455	2010/4/29	高知県安芸市	F0	寒冷前線	—	—
456	2010/6/25	宮崎県児湯郡都農町	F0	梅雨前線	—	—
457	2010/7/9	和歌山県東牟婁郡那智勝浦町	F0	梅雨前線	—	—
458	2010/7/25	沖縄県(海上)	不明	太平洋高気圧	—	—
459	2010/7/28	沖縄県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
460	2010/8/4	愛知県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
461	2010/8/11	高知県香南市	F0	台風	暖気の移流	—
462	2010/8/14	沖縄県(海上)	不明	太平洋高気圧	—	—
463	2010/8/18	沖縄県(海上)	不明	太平洋高気圧	—	—
464	2010/8/25	北海道(海上)	不明	気圧の谷	—	—
465	2010/8/25	北海道留萌市	F0 未満	気圧の谷	—	—
466	2010/9/7	秋田県秋田市	F0	停滞前線	—	—
467	2010/9/13	沖縄県島尻郡伊是名村	F0	太平洋高気圧	—	—
468	2010/9/16	兵庫県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
469	2010/9/17	新潟県(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
470	2010/9/17	新潟県長岡市	F0 以下	気圧の谷	寒気の移流	—
471	2010/9/23	和歌山県(海上)	不明	停滞前線	—	—
472	2010/9/28	静岡県焼津市	F0	二つ玉低気圧	—	—
473	2010/10/2	沖縄県(海上)	不明	その他(高気圧)	—	—
474	2010/10/2	沖縄県(海上)	不明	その他(高気圧)	—	—
475	2010/10/7	高知県(海上)	不明	その他(高気圧)	—	—
476	2010/10/9	千葉県南房総市	F0	その他(低気圧)	—	—
477	2010/10/15	石川県羽咋郡志賀町	F0	気圧の谷	寒気の移流	—
478	2010/10/15	新潟県胎内市	F0	気圧の谷	寒気の移流	—
479	2010/10/15	新潟県胎内市	F1	気圧の谷	寒気の移流	—
480	2010/10/17	秋田県山本郡八峰町	F0	気圧の谷	—	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
481	2010/10/17	秋田県潟上市	F0	気圧の谷	—	—
482	2010/10/22	沖縄県島尻郡久米島町	F0 以下	停滞前線	暖気の移流	—
483	2010/10/26	北海道(海上)	不明	寒気の移流	—	—
484	2010/10/26	北海道(海上)	不明	寒気の移流	—	—
485	2010/10/26	北海道(海上)	不明	寒気の移流	—	—
486	2010/10/26	北海道石狩市	F0 未満	寒気の移流	—	—
487	2010/10/26	北海道(海上)	不明	寒気の移流	—	—
488	2010/10/26	北海道(海上)	不明	寒気の移流	—	—
489	2010/10/26	北海道(海上)	不明	寒気の移流	—	—
490	2010/10/26	北海道(海上)	不明	寒気の移流	—	—
491	2010/11/1	千葉県山武郡九十九里町	F0	南岸低気圧	—	—
492	2010/11/12	秋田県山本郡八峰町	F0	寒冷前線	—	—
493	2010/11/22	鹿児島県大島郡和泊町	F0	停滞前線	暖気の移流	—
494	2010/11/29	石川県羽咋郡志賀町	F0	寒気の移流	—	—
495	2010/11/29	福井県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
496	2010/11/29	福井県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
497	2010/11/29	福井県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
498	2010/12/3	神奈川県鎌倉市	F0～F1	日本海低気圧	暖気の移流	—
499	2010/12/3	新潟県新潟市	F0	気圧の谷	寒気の移流	—
500	2010/12/3	新潟県新潟市	F0 未満	気圧の谷	寒気の移流	—
501	2010/12/3	新潟県新潟市	F1	気圧の谷	寒気の移流	—
502	2010/12/9	新潟県上越市	F0～F1	気圧の谷	寒気の移流	—
503	2010/12/15	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
504	2010/12/16	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
505	2010/12/17	北海道(海上)	不明	気圧の谷	—	—
506	2010/12/18	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
507	2010/12/24	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
508	2010/12/27	石川県羽咋郡志賀町	F0	寒気の移流	—	—
509	2010/12/29	京都(海上)	不明	寒気の移流	—	—
510	2010/12/29	京都(海上)	不明	寒気の移流	—	—
511	2011/1/2	長崎県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
512	2011/1/2	長崎県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
513	2011/1/3	新潟県(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
514	2011/2/3	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
515	2011/2/11	沖縄県豊見城市	F0	停滞前線	—	—
516	2011/2/25	沖縄県(海上)	不明	その他(高気圧)	—	—
517	2011/3/9	福井県あわら市	F0 未満	寒気の移流	—	—
518	2011/3/9	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
519	2011/3/31	新潟県(海上)	F0 未満	気圧の谷	寒気の移流	—
520	2011/5/28	沖縄県石垣市	F1	台風	—	—
521	2011/7/18	三重県津市	F0	台風	暖気の移流	—
522	2011/8/13	青森県(海上)	不明	暖気の移流	—	—



	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
523	2011/8/20	北海道(海上)	不明	気圧の谷	—	—
524	2011/8/20	北海道(海上)	不明	気圧の谷	—	—
525	2011/8/20	北海道(海上)	不明	気圧の谷	—	—
526	2011/8/21	長崎県平戸市	F0	停滞前線	その他(低気圧)	—
527	2011/8/21	福岡県福岡市	F1	その他(低気圧)	—	—
528	2011/8/22	北海道(海上)	不明	気圧の谷	—	—
529	2011/8/22	沖縄県(海上)	不明	太平洋高気圧	—	—
530	2011/8/22	沖縄県(海上)	不明	太平洋高気圧	—	—
531	2011/8/23	長崎県(海上)	不明	停滞前線	—	—
532	2011/9/20	北海道(海上)	不明	気圧の谷	—	—
533	2011/10/14	宮崎県延岡市	F0	暖気の移流	—	—
534	2011/10/21	高知県土佐清水市	F0	暖気の移流	—	—
535	2011/11/15	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
536	2011/11/15	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
537	2011/11/15	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
538	2011/11/15	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
539	2011/11/15	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
540	2011/11/18	鹿児島県大島郡徳之島町	F2	停滞前線	暖気の移流	—
541	2011/11/24	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
542	2011/11/25	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
543	2011/11/30	沖縄県(海上)	不明	停滞前線	気圧の谷	—
544	2011/12/4	東京都(海上)	不明	寒気の移流	—	—
545	2011/12/4	東京都(海上)	不明	寒気の移流	—	—
546	2011/12/4	東京都(海上)	不明	寒気の移流	—	—
547	2011/12/4	東京都(海上)	不明	寒気の移流	—	—
548	2011/12/24	石川県(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
549	2012/2/1	島根県出雲市	F0	寒冷前線	—	—
550	2012/2/28	沖縄県うるま市	F0	停滞前線	—	—
551	2012/5/9	愛知県(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
552	2012/5/13	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
553	2012/5/13	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
554	2012/6/5	沖縄県島尻郡南大東村	F0	台風	—	—

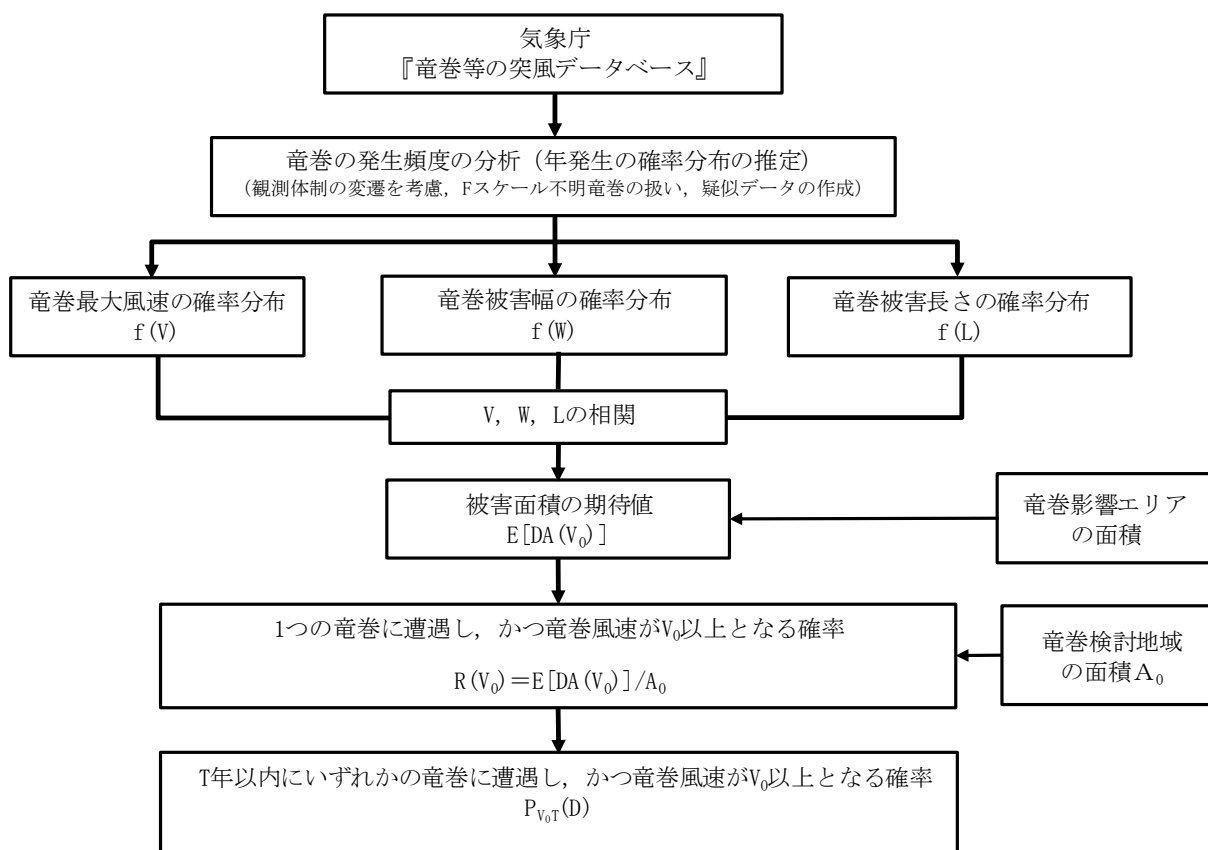
※ F スケールは、ア) 被害の詳細な情報等から推定できたもの、イ) 文献等からの引用又は被害のおおまかな情報等から推定したものがあり、F2 以上の事例ではア) とイ) を区別し、イ) の場合には値を括弧で囲んでいる。

竜巻最大風速のハザード曲線の求め方

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

1. 評価フロー

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



第 1.1 図 竜巻最大風速ハザード曲線の算定フロー

## 2. 竜巻の発生頻度の分析

### 2.1 適用データ

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

### 2.2 竜巻の発生頻度

気象庁「竜巻等の突風データベース」は1961年以降のデータがデータベース化されているが、観測体制は近年になるほど強化されており、年代により観測値の質にばらつきがある。観測体制が強化された2007年以降は、発生数が非常に多くなっており、海上竜巻の増加が特に顕著である。ただし、これら海上竜巻の多くは、その詳細が“不明”となっているのも特徴である。

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

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

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

1961年以降の51.5年間で、29個の竜巻が観測されているが、そのうちの13個（45%）はF1竜巻である。詳細が不明な竜巻は6個観測されているが、そのうちの2個は2007年以降の5.5年間に観測された海上竜巻である。F0竜巻については、2個観測されており、そのうち1個は2007年以降の観測である（残りの1個は2005年に観測）。

一方、F2竜巻については、51.5年間で7個観測されているが、2007年以降の発生例は無く、観測体制の強化に伴う影響をそれほど受けていないことが示唆される。また、F3竜巻は、1967年に千葉県飯岡町で観測されたF2.5竜巻（被害域長さ11km）の1例である。

以上の結果を踏まえ、擬似的な51.5年間のデータや統計量をFスケール毎に作成した。その基本的な考え方は以下のとおりある。

- 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1月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及びF不明竜巻は、観測体制が強化された2007年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。

- 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。

このようにして得られた結果（以下「疑似データ」という。）を第2.1表の4段目に示す。ここでの小計には、陸上での不明竜巻を含めた。その結果、51.5年間に発生した竜巻61個のうち、不明も含む陸上竜巻が42個、海上竜巻は19個と推定された。

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である。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。【参考資料1】そこで、以下のような仮定の下に、検討地域の竜巻発生数を推計した。

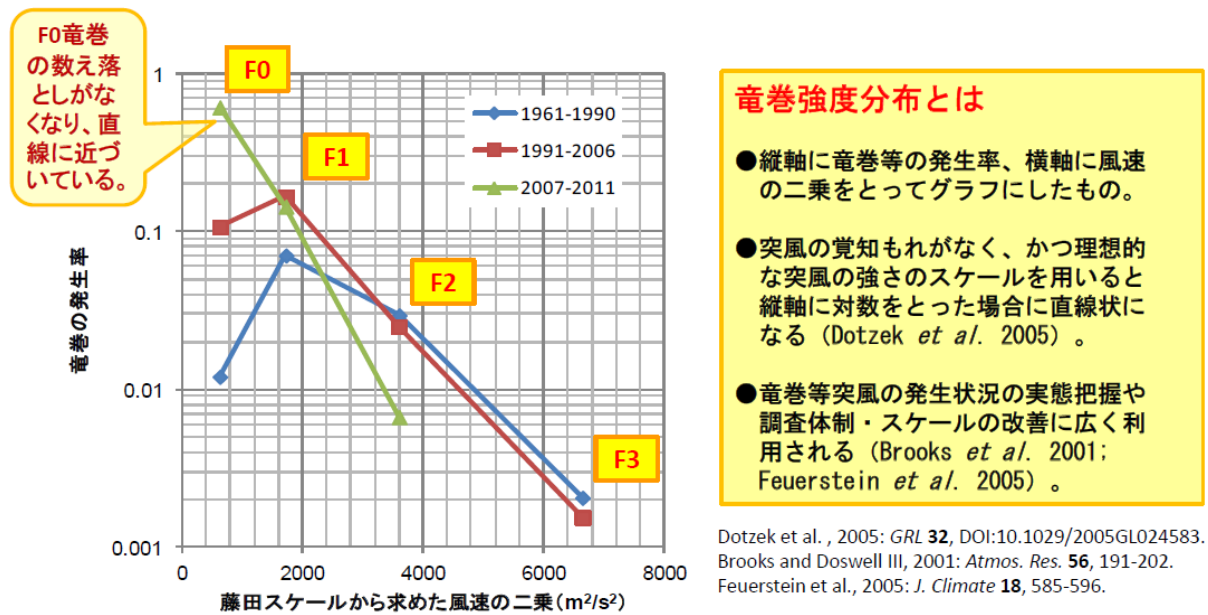
- ⑤ 陸上で発生したFスケールが不明な竜巻、及び海上で発生しその後上陸したF不明竜巻はF0に含める。これにより、全ての陸上竜巻をF0～F3に分類する。
- ⑥ 沿岸部近傍での海上竜巻の発生特性は、陸上竜巻の発生特性と類似しているとの仮定の下、不明な海上竜巻の発生数を陸上竜巻のFスケール別発生比率で按分する。

このようにして得られた結果を第2.1表の5段目に示す。検討地域における51.5年間の竜巻の発生総数は63個、その5割以上がF1、2割以上がF0と推定された。また、F2竜巻は、実際の観測数は51.5年間で7個であったが、海上竜巻を考慮したため、疑似データでは11個に増加している。

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

第 2.1 表 竜巻発生数の分析結果

竜巻検討地域 (沿岸 ±5 km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	23	2	13	7	1	3	3	29
	平均値(年)	0.45	0.04	0.25	0.14	0.02	0.06	0.06	0.56
	標準偏差(年)	0.67	0.20	0.56	0.35	0.14	0.31	0.31	0.81
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	14	2	10	2	0	1	3	18
	平均値(年)	0.65	0.09	0.47	0.09	0.00	0.05	0.14	0.84
	標準偏差(年)	0.80	0.30	0.75	0.30	0.00	0.22	0.47	0.97
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	3	1	2	0	0	0	2	5
	平均値(年)	0.55	0.18	0.36	0.00	0.00	0.00	0.36	0.91
	標準偏差(年)	0.58	0.43	0.55	0.00	0.00	0.00	0.86	0.80
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	42	10	24	7	1	0	19	61
	平均値(年)	0.80	0.18	0.47	0.14	0.02	0.00	0.36	1.17
	標準偏差(年)	0.93	0.43	0.75	0.35	0.14	0.00	0.86	1.27
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	63	15	35	11	2	0	0	0
	平均値(年)	1.17	0.26	0.68	0.20	0.03	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	1.13	0.52	0.90	0.42	0.17	0.00	0.00	0.00



第 2.1 図 日本における竜巻強度分布の変遷

(出典：気象庁「竜巻等突風の強さの評定に関する検討会」第一回資料 3)

### 2.3 年発生数の確率密度分布の設定

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

なお、ポリヤ分布は、竜巻影響評価ガイドにおいて推奨されているポアソン分布を一般化したものであり、年発生数の年々変動の実態をポアソン分布よりも適合性が高い形で表現できることを確認している。【参考資料2】

### 3. 竜巻の被害幅、被害長さの分析

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

本竜巻検討地域では、51.5年間に29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23個（第2.1表の1段目の小計）、Fスケールと幅の両方が分かっているものが19個（第3.1表の1段目の小計）である。被害幅の解析に利用可能なデータ数は、発生数のデータ数に比べて少ないことが分かる。先に推定したFスケール毎の発生数（第2.1表）との整合性も確保する必要がある。そこで、以下のようにして51.5年間の被害幅の統計量を推定した。

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

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

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

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。結果を第3.2表に示す。

第 3.1 表 竜巻被害域幅の解析結果

竜巻検討地域 (沿岸 ±5 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	19	1	12	5	1	7	3	29
	平均値 (m)	112	150	121	75	150			
	標準偏差 (m)	110	—	133	71	—			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	12	1	10	1	0	3	3	18
	平均値 (m)	108	150	112	30	—			
	標準偏差 (m)	117	—	131	—	0			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	3	1	2	0	0	0	2	5
	平均値 (m)	67	150	25	—	—			
	標準偏差 (m)	62	—	7	0	0			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	63	15	35	11	2	0	0	63
	平均値 (m)	124	150	124	86	150			
	標準偏差 (m)	103	0	130	74	0			

第 3.2 表 竜巻被害域長さの解析結果

竜巻検討地域 (沿岸 ±5 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	21	2	12	6	1	5	3	29
	平均値 (km)	3.119	0.500	1.875	5.167	11.000			
	標準偏差 (km)	3.851	0.000	1.562	5.680	—			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	14	2	10	2	0	1	3	18
	平均値 (km)	1.393	0.500	1.500	1.750	—			
	標準偏差 (km)	1.124	0.000	1.168	1.768	0.000			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	3	1	2	0	0	0	2	5
	平均値 (km)	0.967	0.500	1.200	—	—			
	標準偏差 (km)	0.548	—	0.707	0.000	0.000			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	63	15	35	11	2	0	0	63
	平均値 (km)	2.510	0.500	1.917	5.591	11.000			
	標準偏差 (km)	3.357	0.000	1.517	5.467	0.000			

#### 4. 竜巻風速，被害幅，被害長さの確率分布，相関係数

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

##### ①竜巻風速の確率密度分布

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

第4.1図に竜巻風速が中央値に集中した場合（黒い実線）及び一様に分布とした場合（赤い実線）について，風速の分布形（超過確率）を推定した結果を示す。

●印は，各Fスケール下限値における観測値（疑似51.5年間データ）の超過確率を表しており，例えば，F0の下限値(17m/s)以上となる確率は1.0，F2の下限値(50m/s)以上となる確率は約0.2である。また，○印は，F3が1個観測された場合を仮定してプロットをした。

ハザード解析においては，特定の風速以上となる確率が重要であることから，●印で表された観測値ベースの超過確率と適合度が高い分布形が望ましい。第4.1図(a)の○印も含めて評価すると，中央値の方が一様分布の場合よりも適合度が良いと言える。

以上より，風速分布としては中央値を採用した。風速分布を中央値とした場合の竜巻風速の確率密度分布，年超過確率分布の算定結果を第4.2図に示す。

##### ②竜巻の被害幅の確率密度分布

竜巻の被害幅は，竜巻風速とは異なり具体的な値が直接観測されていることから，任意性はなく，観測値から作成した疑似データに基づき，確率密度分布を推定する。

竜巻の被害幅の確率密度分布，年超過確率分布の算定結果を第4.3図に示す。算定結果は，年超過確率の図より観測結果を適切に推定できていることがわかる。

##### ③竜巻の被害長さの確率密度分布

竜巻の被害長さは，竜巻風速とは異なり具体的な値が直接観測されていることから，任意性はなく，観測値から作成した疑似データに基づき，確率密度分布を推定する。

竜巻の被害長さの確率密度分布，年超過確率分布の算定結果を第4.4図に示す。算定結果は，年超過確率の図より観測結果を適切に推定できていることがわかる。

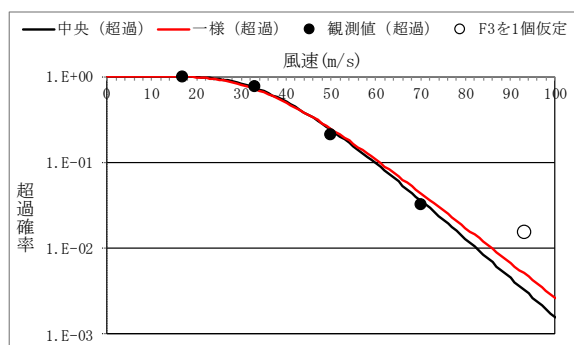
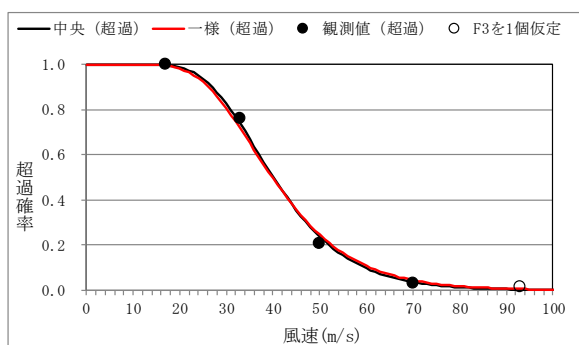


ハザード曲線を算定する際、2変量又は3変量の確率分布関数を対象とするため、竜巻風速、被害幅、被害長さの相関係数の検討を実施した。相関係数は、1961年以降の観測データで、3変量が同時に観測されているデータを用いるのが理想的であるが、十分なデータ数を確保するため、風速と幅のみが観測されているデータ等、2変量の比較が行える観測データも併せて用いて相関係数を算定した。

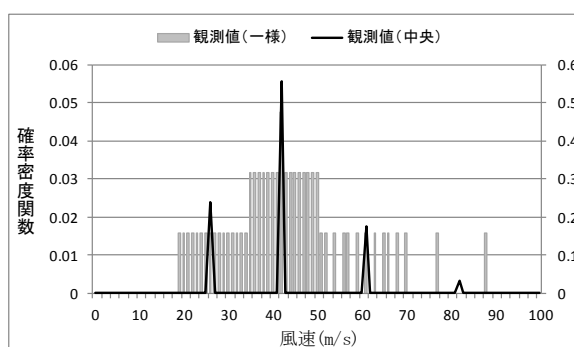
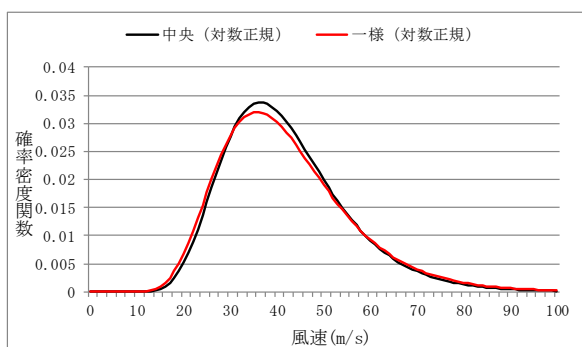
なお、竜巻風速、被害幅、被害長さの確率密度分布の推定では、発生頻度が重要であるために繰り返しサンプリングを行ったデータを用いたが、以下の理由により、相関係数の推定ではそのような措置を行わず、観測の元データをもとに推定した。

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

第4.2表に示す算定結果によれば、本竜巻検討地域では、竜巻風速と被害長さには相関係数0.59程度、被害幅と被害長さには、0.17程度の相関が認められた。相関を求めた際のデータ数、平均値、標準偏差及び相関係数を第4.2表に示す。



(a) 超過確率



(b) 確率密度関数 (左：推定値，右：観測値)

第4.1図 竜巻風速の確率分布の推定結果と観測値の比較

第 4.1 表 竜巻検討地域における竜巻パラメータ (51.5 年間の推定結果)

	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
疑似 51.5年間 (全竜巻)	発生数	期間内総数	63	15	35	11	2
		平均値(年)	1.22	0.29	0.68	0.21	0.04
		標準偏差(年)	1.13	0.52	0.90	0.42	0.17
	被害幅	期間内総数	63	15	35	11	2
		平均値(m)	124	150	124	86	150
		標準偏差(m)	103	0	130	74	0
	被害長さ	期間内総数	63	15	35	11	2
		平均値(km)	2.510	0.500	1.917	5.591	11.000
		標準偏差(km)	3.357	0.000	1.517	5.467	0.000

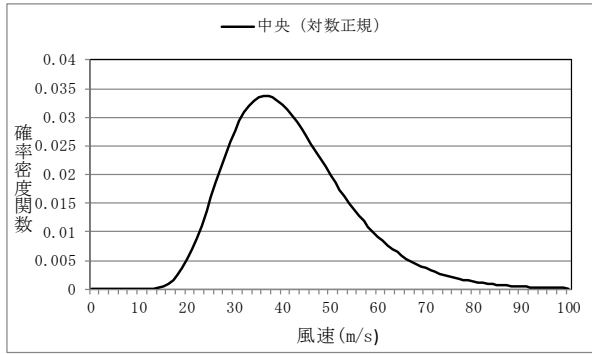
第 4.2 表(1) 相関係数算定に用いた竜巻風速, 被害幅, 被害長さのデータ数 (単位: 個)

データ数	風速	被害幅	被害長さ
風速	23	19	21
被害幅	19	20	20
被害長さ	21	20	22

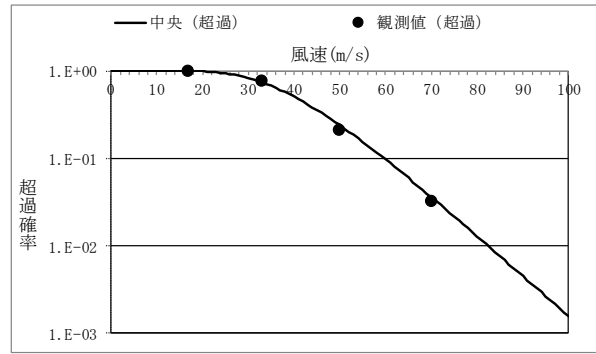
第 4.2 表(2) 竜巻風速, 被害幅, 被害長さの相関係数 (単位無し)

データ数	風速	被害幅	被害長さ
風速	1.000	-0.073*	0.590
被害幅	-0.073*	1.000	0.173
被害長さ	0.590	0.173	1.000

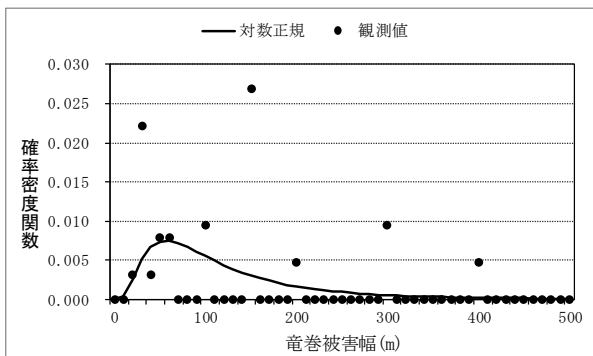
\*風速と被害幅は無相関との知見が得られたため, ハザード算定の際には, 相関係数 0 とし  
て計算



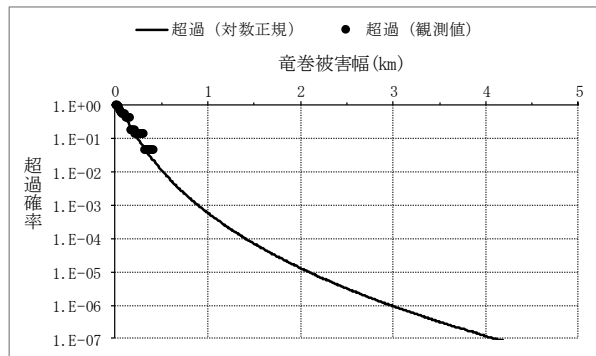
第4.2図(1) 竜巻風速の確率密度分布図



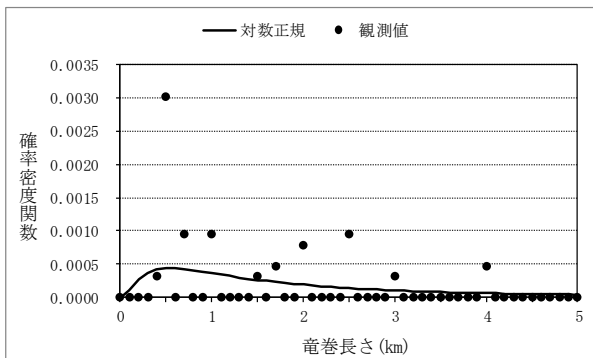
第4.2図(2) 竜巻風速の年超過確率分布



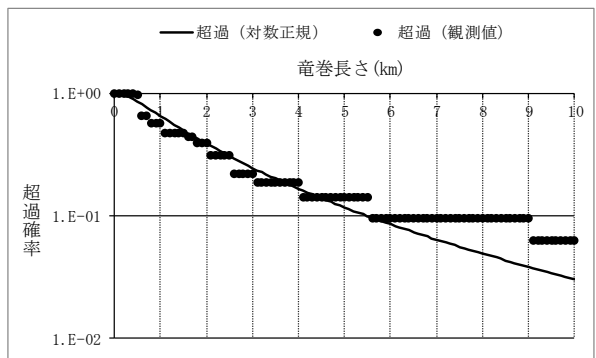
第4.3図(1) 被害幅の確率密度分布



第4.3図(2) 被害幅の年超過確率分布



第4.4図(1) 被害長さの確率密度分布



第4.4図(2) 被害長さの年超過確率分布

## 5. 竜巻影響エリア

竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 ( $V_{B2}$ ) の算定にあたり、 $V_{B2}$  の発生エリアである竜巻影響エリアを設定する。竜巻影響エリアは、女川原子力発電所2号炉の評価対象施設の設置面積の合計値及び推定される竜巻被害域(被害幅, 被害長さから設定)に基づいて設定する。

女川原子力発電所2号炉における評価対象施設の位置を第5.1図に示す。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413,000 $m^2$ (直径725mの円))として設定した。

なお、竜巻影響エリアを円形とするため、竜巻移動方向の依存性はない。(式(6.7)及び式(6.5')参照)。



第5.1図 評価対象施設の位置

枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません

## 6. ハザード曲線の算定

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

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

ここで、

$N$  : 竜巻の年発生数

$\nu$  : 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

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

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

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

ここで、

$D$  : 対象とする構造物が風速  $V_0$  以上の竜巻に遭遇する事象

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

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

$DA(V_0)$  : 竜巻による構造物の被害面積

$E[DA(V_0)]$  :  $DA(V_0)$  の期待値

$A_0$  : リスクの評価対象とする地域の面積

次に、 $E[DA(V_0)]$  の求め方を説明する。

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

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

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

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

ここで、

$V$  : 竜巻最大風速

$W$  : 竜巻の被害幅

$l$  : 竜巻の被害長さ

$\alpha$  : 竜巻の移動方向

$f(\cdot)$  : 確率密度分布

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

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

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

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

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

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

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

従って、式(6.5)は式(6.5')と表すことができる。

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

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

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

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

ここに  $\mu_x$ ,  $\mu_y$ ,  $\mu_z$  は変量  $\ln(x)$ ,  $\ln(y)$ , 及び  $\ln(z)$  の平均値であり,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  は変量  $\ln(x)$ ,  $\ln(y)$ , 及び  $\ln(z)$  の標準偏差を表す。また,  $\rho_{xy}$  は  $\ln(x)$  と  $\ln(y)$  の相関係数を表し,  $\rho_{yz}$  等についても同様である。

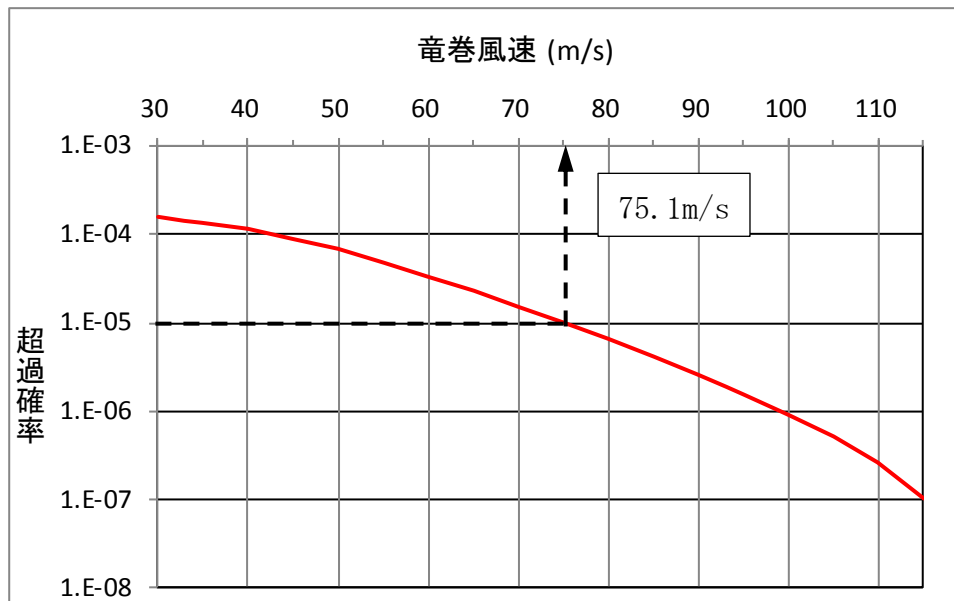
なお, 変量  $x$  と  $\ln(x)$  の平均値をそれぞれ  $\mu$ ,  $\mu_{\ln}$ , 標準偏差をそれぞれ  $\sigma$ ,  $\sigma_{\ln}$  と表せば, これらの間には以下の関係がある。

$$\sigma_{\ln}^2 = \ln(CV^2 + 1) \tag{6.10}$$

$$\mu_{\ln} = \ln(\mu) - \frac{\sigma_{\ln}^2}{2} \tag{6.11}$$

ここに,  $CV$  は変動係数 ( $\sigma/\mu$ ) である。本評価では上記の関係式を用いて, 4節にて求めた竜巻風速, 被害幅, 被害長さの平均値及び標準偏差から  $\mu_x$ ,  $\sigma_x$  などを定めた。

竜巻最大風速のハザード曲線の算定結果を第6.1図に示す。第6.1図より, 竜巻影響評価ガイドを参考に年超過確率  $10^{-5}$  に相当する風速は 75.1m/s となった。



第 6.1 図 竜巻最大風速のハザード曲線（海側，陸側 5km 範囲）

7. 1km 毎の領域での竜巻ハザード曲線について

ガイドに従い，竜巻検討地域を1km範囲ごとに細分化した場合のハザード曲線の算定を行った。算定においては，以下の条件で算定を行った。計算に使用するパラメータは第7.1表に示す。

- ・ 竜巻発生数は，竜巻検討地域外で発生して竜巻検討地域内に移動した竜巻である通過竜巻もカウントする
- ・ 被害幅及び被害長さは，それぞれ1km範囲内の被害幅及び被害長さを用いる
- ・ 海側の竜巻発生位置は不明な場合が多く，竜巻移動経路が短冊を横切る長さを精度良く求められないため，海側0-1kmのセグメント長さの評価に陸側0-1km短冊の値を代用する方法を用いる
- ・ 1km毎の領域のデータ数は少ないため，相関係数は±5kmでの値を代用する

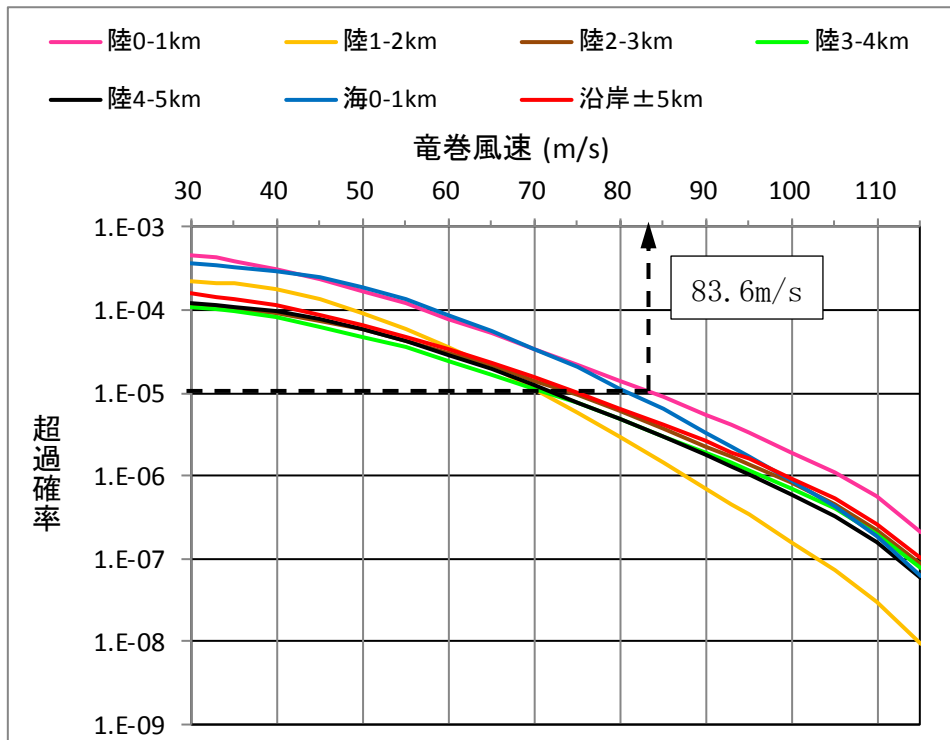
第7.1表 保守的なハザード曲線算定に用いるパラメータ

竜巻検討地域 (1km毎エリア)	統計量	発生数 (個)	風速 m/s	幅 m	長さ m	相関係数		
						U ~ W	U ~ L	W ~ L
±5km	平均値	1.22	42.0714	124.2857	2509.524	(検討地域±5kmの値を代用)		
	標準偏差	1.13	13.3368	102.8382	3356.924			
陸 0-1km	平均値	0.74	41.6184	133.2895	1020.868			
	標準偏差	0.74	13.4744	104.0808	929.186			
陸 1-2km	平均値	0.39	47.2000	95.2500	773.900			
	標準偏差	0.62	11.0482	94.4997	419.966			
陸 2-3km	平均値	0.16	51.1250	166.2500	1041.625			
	標準偏差	0.36	14.8486	116.3661	339.265			
陸 3-4km	平均値	0.14	49.8571	185.7143	1174.143			
	標準偏差	0.30	15.5636	110.7335	93.756			
陸 4-5km	平均値	0.19	47.3500	146.0000	842.100			
	標準偏差	0.36	13.3334	112.3684	746.783			
海 0-1km	平均値	0.58	47.2500	124.6667	842.833			
	標準偏差	0.66	11.6254	122.1569	1605.728			



以上の条件で算定したハザード曲線を海側、陸側5km範囲内のハザード曲線と併せて第7.1図に示す。

第7.1図より、年超過確率 $10^{-5}$ に相当する風速が最も大きく評価されたのは、陸側0～1km範囲での83.6m/sであった。



第 7.1 図 1km 範囲毎のハザード曲線と ±5km 範囲のハザード曲線

第 7.2 表 年超過確率  $10^{-5}$  に対応した竜巻風速

短冊ケース	竜巻風速[m/s]
陸 0-1km	83.6
陸 1-2km	70.8
陸 2-3km	74.1
陸 3-4km	71.4
陸 4-5km	72.3
海 0-1km	81.2
(参考) 海側及び陸側各 ±5km	75.1

参考に陸側0～1km, 1～2km, 2～3km, 3～4km, 4～5km, 海側0～1kmの竜巻発生・通過数を第7.3～7.8表に示す。

第7.3表 陸側0-1km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸0-1km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	20	1	11	7	1	3	0	23
	平均値(年)	0.39	0.02	0.21	0.14	0.02	0.06	0.00	0.45
	標準偏差(年)	0.57	0.14	0.41	0.35	0.14	0.31	0.00	0.64
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	11	1	8	2	0	1	0	12
	平均値(年)	0.51	0.05	0.37	0.09	0.00	0.05	0.00	0.56
	標準偏差(年)	0.60	0.22	0.50	0.30	0.00	0.22	0.00	0.68
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	3	1	2	0	0	0	0	3
	平均値(年)	0.55	0.18	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55
	標準偏差(年)	0.58	0.43	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.58
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	38	10	20	7	1	0	0	38
	平均値(年)	0.71	0.18	0.37	0.14	0.02	0.00	0.00	0.71
	標準偏差(年)	0.74	0.43	0.50	0.35	0.14	0.00	0.00	0.74
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	38	10	20	7	1	0	0	0
	平均値(年)	0.71	0.18	0.37	0.14	0.02	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.74	0.43	0.50	0.35	0.14	0.00	0.00	0.00

第7.4表 陸側1-2km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸1-2km)	発生数の統計	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	13	1	7	4	1	1	0	14
	平均値(年)	0.25	0.02	0.14	0.08	0.02	0.02	0.00	0.27
	標準偏差(年)	0.52	0.14	0.40	0.27	0.14	0.14	0.00	0.53
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	8	1	6	1	0	0	0	8
	平均値(年)	0.37	0.05	0.28	0.05	0.00	0.00	0.00	0.37
	標準偏差(年)	0.59	0.22	0.56	0.22	0.00	0.00	0.00	0.59
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	20	0	15	4	1	0	0	20
	平均値(年)	0.38	0.00	0.28	0.08	0.02	0.00	0.00	0.38
	標準偏差(年)	0.62	0.00	0.56	0.27	0.14	0.00	0.00	0.62
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	20	0	15	4	1	0	0	0
	平均値(年)	0.38	0.00	0.28	0.08	0.02	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.62	0.00	0.56	0.27	0.14	0.00	0.00	0.00

第7.5表 陸側2-3km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸2-3km)	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	5	0	2	2	1	1	0	6
	平均値(年)	0.10	0.00	0.04	0.04	0.02	0.02	0.00	0.12
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.20	0.20	0.14	0.14	0.00	0.32
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	3	0	2	1	0	0	0	3
	平均値(年)	0.14	0.00	0.09	0.05	0.00	0.00	0.00	0.14
	標準偏差(年)	0.36	0.00	0.30	0.22	0.00	0.00	0.00	0.36
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	8	0	5	2	1	0	0	8
	平均値(年)	0.15	0.00	0.09	0.04	0.02	0.00	0.00	0.15
	標準偏差(年)	0.36	0.00	0.30	0.20	0.14	0.00	0.00	0.36
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	8	0	5	2	1	0	0	0
	平均値(年)	0.15	0.00	0.09	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.36	0.00	0.30	0.20	0.14	0.00	0.00	0.00

第7.6表 陸側3-4km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸3-4km)	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	2	1	1	0	0	4
	平均値(年)	0.08	0.00	0.04	0.02	0.02	0.00	0.00	0.08
	標準偏差(年)	0.27	0.00	0.20	0.14	0.14	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	7	0	5	1	1	0	0	7
	平均値(年)	0.13	0.00	0.09	0.02	0.02	0.00	0.00	0.13
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.14	0.14	0.00	0.00	0.30
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	7	0	5	1	1	0	0	0
	平均値(年)	0.13	0.00	0.09	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.30	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00

第7.7表 陸側4-5km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸4-5km)	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	5	0	3	1	1	0	0	5
	平均値(年)	0.10	0.00	0.06	0.02	0.02	0.00	0.00	0.10
	標準偏差(年)	0.30	0.00	0.24	0.14	0.14	0.00	0.00	0.30
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	3	0	3	0	0	0	0	3
	平均値(年)	0.14	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14
	標準偏差(年)	0.36	0.00	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36
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	10	0	8	1	1	0	0	10
	平均値(年)	0.18	0.00	0.14	0.02	0.02	0.00	0.00	0.18
	標準偏差(年)	0.36	0.00	0.36	0.14	0.14	0.00	0.00	0.36
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	10	0	8	1	1	0	0	0
	平均値(年)	0.18	0.00	0.14	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.36	0.00	0.36	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00

第7.8表 海側0-1km範囲の竜巻発生・通過数

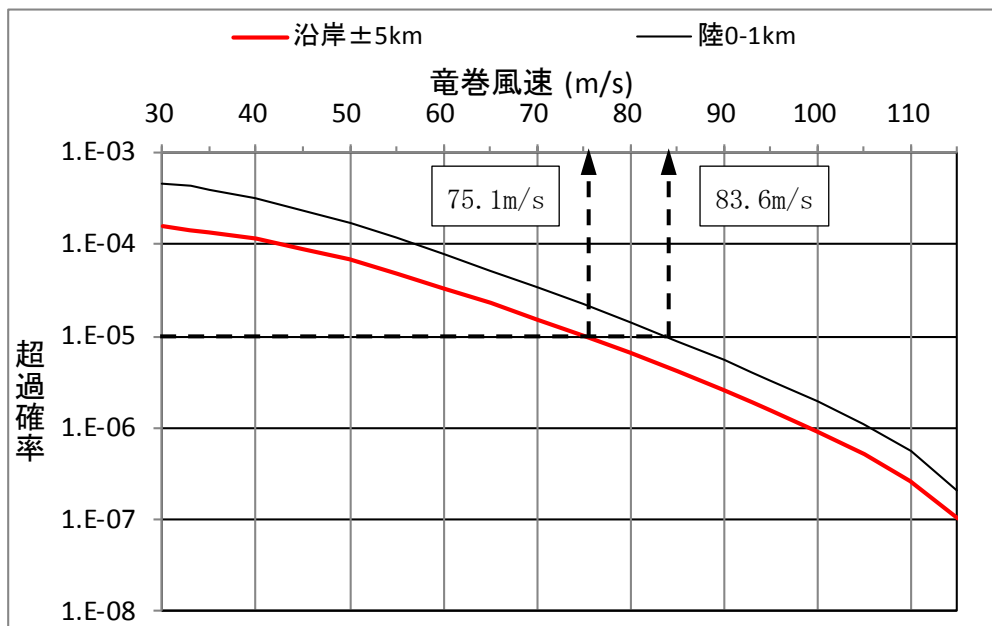
竜巻検討地域 (海0-1km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	11	0	7	3	1	2	2	15
	平均値(年)	0.21	0.00	0.14	0.06	0.02	0.04	0.04	0.29
	標準偏差(年)	0.46	0.00	0.35	0.24	0.14	0.20	0.20	0.54
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	8	0	6	2	0	1	2	11
	平均値(年)	0.37	0.00	0.28	0.09	0.00	0.05	0.09	0.51
	標準偏差(年)	0.59	0.00	0.46	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	19	0	15	3	1	0	10	29
	平均値(年)	0.36	0.00	0.28	0.06	0.02	0.00	0.18	0.54
	標準偏差(年)	0.52	0.00	0.46	0.24	0.14	0.00	0.43	0.67
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	30	0	23	5	2	0	0	0
	平均値(年)	0.54	0.00	0.43	0.09	0.03	0.00	0.00	0.00
	標準偏差(年)	0.66	0.00	0.57	0.29	0.17	0.00	0.00	0.00

8. 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 ( $V_{B2}$ )

第 8.1 図に、海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域（竜巻検討地域）及び竜巻検討地域を 1km 範囲ごとに細分化した場合のハザード曲線を示す。

第 8.1 図より、5km 全域を対象とした場合の年超過確率  $10^{-5}$  における風速は 75.1m/s, 竜巻検討地域を 1km 範囲ごとに細分化した場合の年超過確率  $10^{-5}$  における風速は 83.6m/s（陸側 0~1km）となった。

よって、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 ( $V_{B2}$ ) は、5km 全域及び 1km 範囲のハザード評価結果のうち大きい方を採用し、 $V_{B2}=83.6\text{m/s}$  とする。



第 8.1 図 ±5km 範囲のハザード曲線と 1km 範囲毎のハザード曲線

## 【参考資料 1】

### 海上の F スケール不明竜巻の按分方法の妥当性について

51. 5年間の疑似データを推定する際に、海上で発生したFスケール不明竜巻（非上陸竜巻）を、Fスケールが判明している陸上竜巻（含む上陸竜巻）のFスケール毎の発生比率で按分している。そこでは、沿岸部近傍での竜巻の発生特性は陸上と海上とでは類似している、と仮定している。他の合理的な按分方法も無いのが実情ではあるが、観測結果を基に、この仮定の妥当性について考察する。

ここでは、陸上で発生した竜巻（以下「陸上竜巻」という。）と、水上で発生しその後上陸した竜巻（以下「上陸竜巻」という。）を区別して考える。

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

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

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

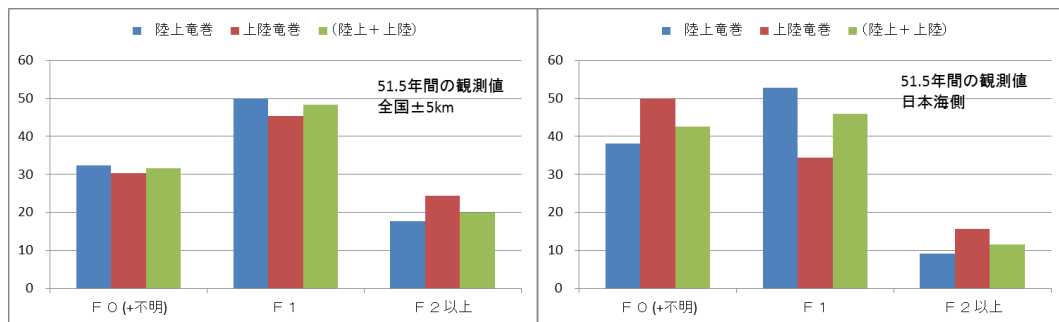
表1 Fスケール毎の竜巻発生数の割合

(a) 全国沿岸±5km

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

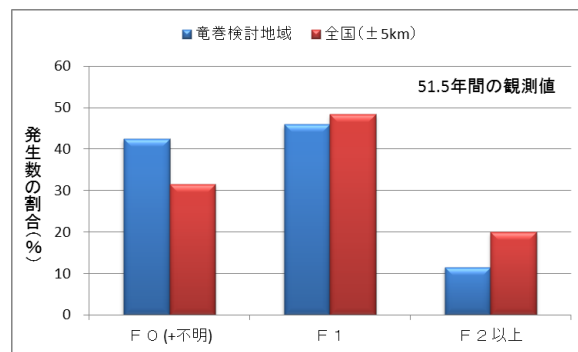
(b) 日本海側

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



(a) 全国±5km

(b) 日本海側



(c) (陸上+上陸) 竜巻

図1 Fスケール毎の発生数の割合

## 【参考資料 2】

竜巻発生数の確率分布（ポアソン，ポリヤ分布）がハザード結果に及ぼす影響

### 1. 竜巻発生確率とハザード曲線

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

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

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

ここで、 $N$  は竜巻の年発生数、 $\nu$  は竜巻の年平均発生数、 $T$  は年数である。

また、 $T$  年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、 $V_0$  以上の竜巻風速に見舞われる確率  $P_{V_0,T}(D)$  は次式で表される。

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

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

ここで、 $R(V_0)$  は、検討対象とする構造物が、ある一つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が  $V_0$  以上となる確率である。

### 2. ポアソン分布とポリヤ分布

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

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

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

ポリヤ分布は、分散と平均値が異なるような現象への適合度が高く、 $\beta$  が大きい場合は分散の大きな分布形を表し、 $\beta \rightarrow 0$  の時にはポアソン分布に近づく。Thom(1963) は、米国中部を対象とした竜巻発生数の分析を行い、ポアソン過程が実態と乖離する場合があることを指摘するとともに、ポリヤ分布による適合性が高いことを示した。



また、東京工芸大学委託成果では、陸上竜巻（含む上陸竜巻）及び水上竜巻のいずれに対しても、ポリヤ分布の適合度が高いことを示した。

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

### 3. 確率論から見た近似式

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

ある一つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が  $V_0$  以上となるような被害を受ける確率を  $R(V_0)$  とすると、このような竜巻被害を受けない確率は次式で表される。

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

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

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

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

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

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

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

となる。 $R(V_0)$  が十分小さければ、上式は次のように近似できる。

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

ここで、次の近似を用いている。

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

竜巻被害の場合、 $R(V_0)$  は通常  $10^{-3}$  以下であるから、式(10)の近似は非常に良い精度で成り立つ。

以上のことから、式(9)より、1 年間にいずれかの竜巻により被害を受ける確率は次式で近似できる。

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

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

#### 4. ポアソン分布とポリヤ分布のハザードの近似式

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

式(8)の  $P(N)$  としてポアソン分布を仮定し、

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

となることを考慮すると、式(11)の厳密な式は以下のとおりである。

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

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

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

従って、式(3) (あるいは式(13)) は、式(14)を用いると、

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

と表され、 $R(V_0)$  が小さい場合は、次式で近似できる。

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

ポリヤ分布の場合も同様に、一般の2項定理を用いると、次式で近似できる。

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

以上のことから、竜巻のように一つの竜巻に対する被害確率が非常に小さな現象に対しては、年被害確率は竜巻発生数の平均値にのみ依存し、発生数の確率分布形状にはほとんど無関係であることが分かる。

### 【参考資料3】

#### 竜巻ハザードの推定幅（推定誤差）に関する考察

##### 1. はじめに

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

① 確率分布形選択に伴う不確実さ（認識論的不確実さ）

確率分布形選択に伴うパラメータ不確実さ

② データ量が少ないことに伴う不確実さ（認識論的不確実さ）

データ収集期間が51.5年間分であることから、地震等と比較するとデータ量が少ないことに伴うパラメータ不確実さ

③ データの不確実さ（偶然的な不確実さ）

今後データ収集が進み、疑似データ同様のデータが収集されたとした場合でも残る、データそのものの不確実さ

これらの不確実さ要素がハザード評価に及ぼす影響について検討する。

##### 2. Jackknife法を用いたハザードの推定誤差

###### 2.1 竜巻パラメータとハザードの推定誤差

疑似データ63個の竜巻データに対して、Jackknife法を適用した。Jackknife法は水文統計分野で広く使用される手法で、国土交通省が定める河川行政の技術分野に関する基準である「河川砂防技術基準」においても、確率分布モデルのバイアスを補正すると共に、その安定性を評価する手法として挙げられている。母集団分布を仮定しないノンパラメトリックな方法であり、高い適用性をもつ。

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

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

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

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

- $P_0$  : N 個の全データを使って求められた再現期待値 (例えば風速平均値の場合 N セットの風速平均の平均)
- $P^*$  : バイアス補正した推定値 (以下「Jackknife 推定値」という。)
- $\Delta P^*$  :  $P^*$ の標準偏差の推定値 (以下「Jackknife 推定幅」という。)
- $\bar{P}$  : 分布を仮定した場合の推定値 (以下「推定値」という。)
- $\Delta P$  : nセットの風速平均データの標準偏差
- (1)式の下線部 : バイアス (母数の真の値と推定値の差)

本検討で得られた結果を表1に示す。

例えば風速の平均値の場合、Jackknife推定値は42.071m/sであり、対数正規分布を仮定した場合と同じである。また、Jackknife推定幅は1.680m/sと推定される。

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

図1よりデータの変動に伴うバイアス誤差は小さいことが確認できる (①, ②の不確実さ推定)。ハザードについては表3より、サンプリング誤差に伴う不確実さについて信頼度84%をカバーする値として、年超過確率 $10^{-5}$ において83.98m/sであると言える (③の不確実さを考慮)。

表1 Jackknife 法により得られた竜巻パラメータの特性

竜巻検討地域 (疑似データ 63 個)	風速 (U)		幅 (W)		長さ (L)		相関係数		
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	U~W	U~L	W~L
平均	42.071	13.335	122.1	102.7	2509.5	3356.0	-0.0735	0.5904	0.1728
標準偏差	0.213	0.186	1.6	1.4	53.7	77.3	0.0112	0.0081	0.0147
全データ	42.071	13.337	122.1	102.7	2509.5	3356.9	-0.0735	0.5904	0.1728
バイアス	0.000	-0.080	0.0	-0.6	0.0	-55.2	-0.0036	-0.0033	-0.0012
Jackknife 推定値	42.071	13.417	122.1	103.3	2509.5	3412.1	-0.0699	0.5937	0.1740
Jackknife 推定幅	1.680	1.463	12.9	11.3	422.9	608.7	0.0880	0.0641	0.1157

表2 ハザードの計算条件

ケース名	統計量	発生数	風速	幅	長さ	U~W	U~L	W~L
基本 (全データ)	平均	1.223	42.0714	122.143	2509.524	-0.0735	0.5904	0.1728
	標準偏差	1.133	13.3368	102.712	3356.924			
バイアス補正後	平均	1.223	42.0714	122.143	2509.524	-0.0735	0.5904	0.1728
	標準偏差	1.133	13.4166	103.328	3412.111			
風速・幅・長さ・相関 ( $+1\sigma$ )	平均	1.223	43.7517	135.084	2932.457	0.0145	0.6545	0.2885
	標準偏差	1.133	14.8794	114.578	4020.773			

注) 発生数の平均と標準偏差は、疑似データの値を使用。

注) 負の相関係数は0と置く。

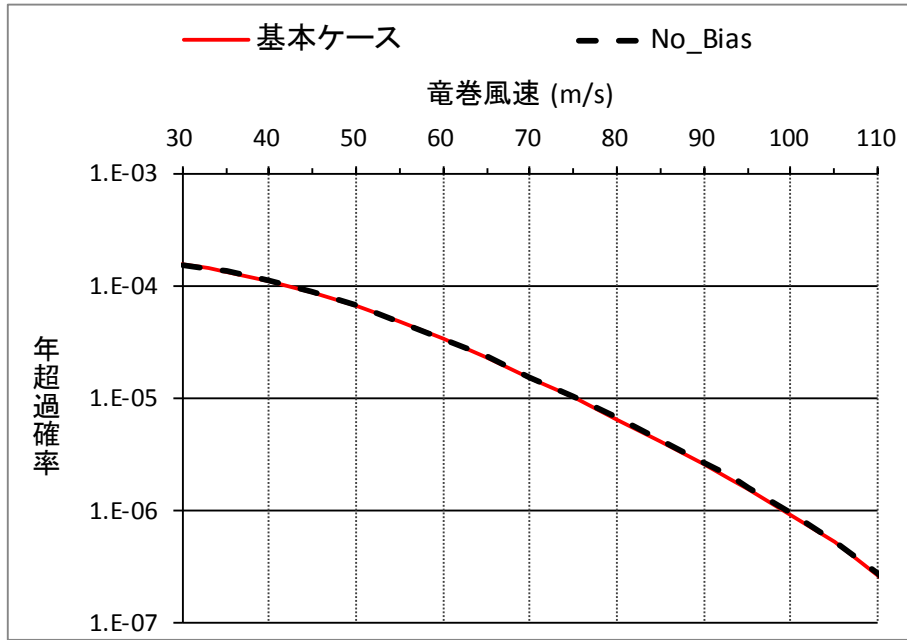


図1 基本ケースとバイアス補正後ケースのハザード算定結果比較

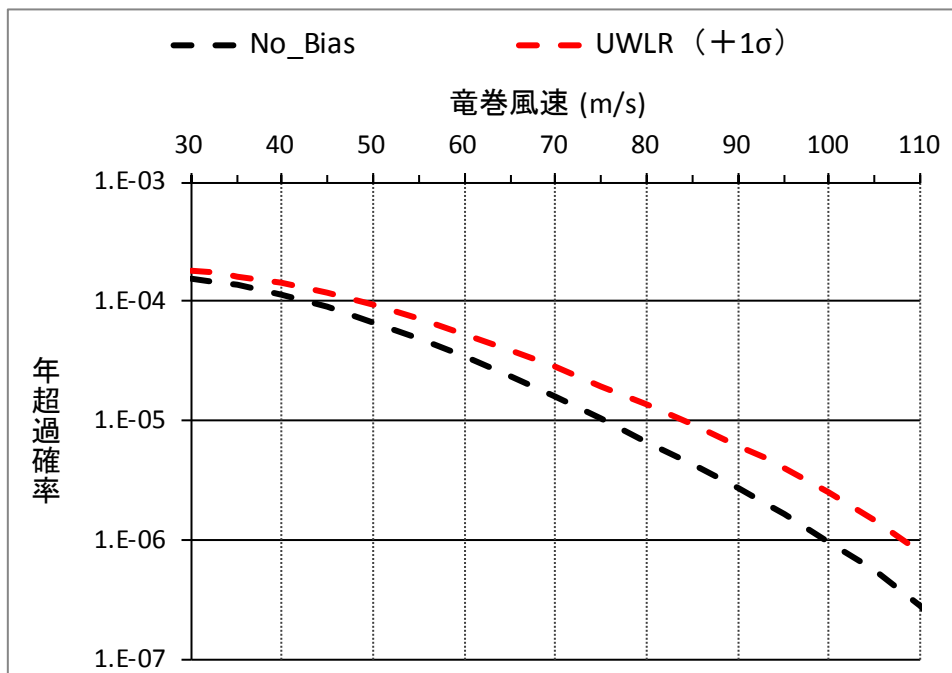


図2 バイアス補正後ケースと全パラメータ+1σケースのハザード算定結果比較

表3 ハザード推定結果

ケース名	超過確率に対応する竜巻風速				バイアス補正後の竜巻風速との差			
	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>
基本ケース	—	75.12	99.33	—	—	-0.29	-0.45	—
バイアス補正後	42.66	75.41	99.78	—	—	0.00	0.00	—
風速・幅・長さ・相関 (+1σ)	48.44	83.98	108.13	—	—	8.57	8.35	—

### 3. まとめ

不確実さ要素のハザード算定への影響について以下のような結果が得られた。

① 確率分布形選択に伴う不確実さ（認識論的不確実さ）

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

② データ量が少ないことに伴う不確実さ（認識論的不確実さ）

⇒①同様、バイアス補正を実施してもハザードは年超過確率  $10^{-5}$  において  $1\text{m/s}$  以下の変化であったことから、安定した標本となっており、母集団の確率特性をよく表現できていると考えられる

③ データ（疑似データ）の不確実さ（偶然的な不確実さ）

⇒データの不確実さを考慮したハザード評価により、サンプリング誤差の不確実さについて信頼度 84%をカバーする値として、年超過確率  $10^{-5}$  において  $83.98\text{m/s}$  であると言える。

以上より、 $V_{B2}=83.6\text{m/s}$  は高い信頼度を持った数値と推測されることから、合理的に望ましい対策を検討するために使用可能な数値と判断できる。

#### Jackknife 法の具体的な手順

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

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

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

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

とする。 $\hat{\psi}_{(i)}$  の平均値を

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

により求める。バイアス値は次式で与えられる。

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

これを用いて統計量のバイアスを補正した Jackknife 推定値は次式で与えられる。

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

また、Jackknife 法による推定幅は、

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

で求められる。

## 地形効果による竜巻風速への影響について

## 1. はじめに

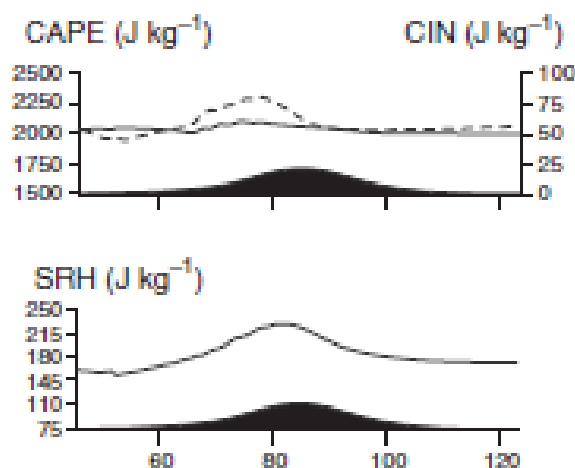
「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」において、丘陵等による地形効果によって竜巻が増幅する可能性があると考えられることから、原子力発電所が立地する地域において、設計対象施設の周辺地形等によって竜巻が増幅される可能性について検討を行い、その検討結果に基づいて設計竜巻の最大風速( $V_D$ )を設定することが求められている。

ここでは、既往の研究に基づく地形起伏の竜巻の風速への影響に関する知見を取りまとめる。

## 2. 対象とする地形起伏スケールの整理

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

前者への言及として、例えば、Markowsk and Dotezk(2011)による数値気象モデル(CM1)を用いた検討などがある。ここでは、メソスケールの地形(尾根幅数十km程度)が、CAPEやSRHといった、竜巻の発生要因を支配するパラメータに与える影響が論点となる。加藤らによる佐呂間竜巻への分析もこれに相当すると考えられる。



第 2-1 図 メソスケール尾根地形に起因する CAPE, SRH などのパラメータの変化を調べた例

一方、竜巻風速  $V_D$  に対する地形影響には、後者が相当する。ここでは、タッチダウンした漏斗雲により発生する旋回流及びそれに随伴して生じる強風への地形影響が論点となる。ここで考慮すべき地形の規模としては、前述のメソスケールのものと比べて小さく数百 m 規模と考えられる (Karstens 2012, Lewellen 2012)。

### 3. マイクロスケールの地形の起伏が竜巻の旋回流強度及び強風に与える影響

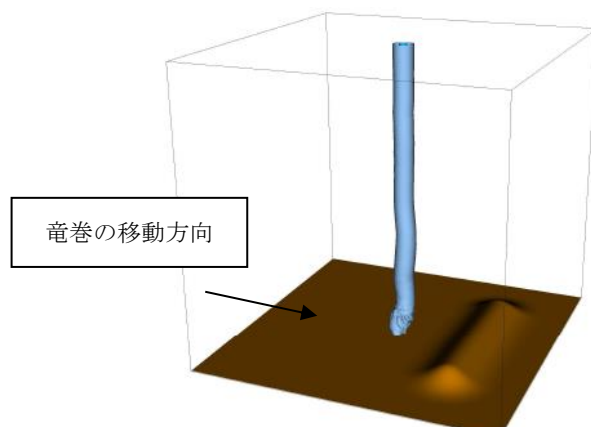
マイクロスケールの地形の起伏が竜巻の旋回流及び強風に与える影響の定量的評価は、未だ、研究課題である (Karstens 2012)。しかしながら、定性的な知見を与える関連研究は存在する。そこで用いられている主な手法は、①被害状況調査、②風洞実験、③数値シミュレーションとなる。

- ① 被害状況調査 (Forbes 1998, Karstens 2012) では、実際の竜巻の被害を精査し、被害状況と地形特性との関係を調べる。これにより、被害が発生しやすい地形特性を分析し、そこから旋回流強度及び風速の強弱を類推することになる。
- ② 風洞実験 (Karstens 2012) では、風洞実験の測定部に尾根や斜面といった地形模型を入れ、その上部に竜巻発生装置を設置し、それを移動させたときの、地表面近傍の圧力・風速分布を調べる。



第 3-1 図 風洞実験の様子 (Karstens 2012)

- ③ 数値シミュレーション (Lewellen 2012) では、竜巻の旋回流や移動及び地形の起伏を模擬した流体解析コードによる、数値実験を行い、旋回流の強度や風速及び竜巻の構造に関連する圧力分布を調べる。

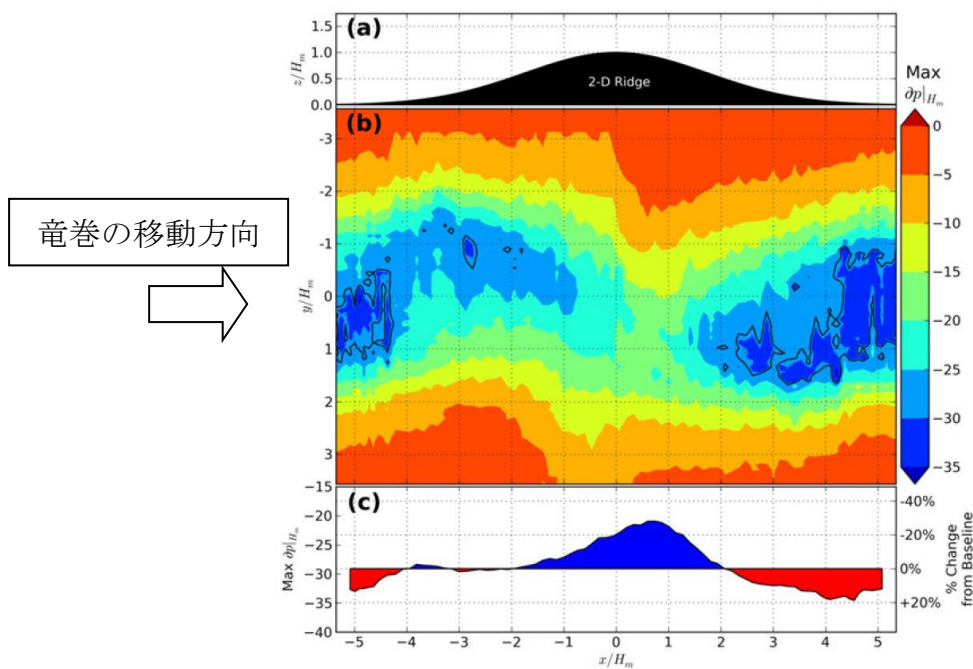


第 3-2 図 数値シミュレーションのセットアップ



これらを通じて、マイクロスケールの地形の起伏に起因する竜巻の旋回流や風速の強化に対する知見が得られている。被害状況調査により、竜巻の強化が下り斜面や尾根の裾で生じる可能性が示唆されている (Forbes 1998, Karstens 2012)。また、実被害調査の知見を支持する結果が風洞実験・数値シミュレーションにおいても確認されている。二次元尾根地形を対象とした場合の風洞実験 (Karstens 2012) 及び数値シミュレーション (Lewellen 2012) の結果をそれぞれ、第3-3図、第3-4図に示す。風洞実験の結果である第3-3図において、(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へ流れる風の駆動力になり、風速に相当する) を(c)に示している。(c)の結果から、

- ① 圧力勾配 (図(c)) が斜面において、正・負の値を持つこと (=旋回流が強弱する)
  - ② 斜面に比べ尾根の上・下流の平たん部ではほぼフラットとなること (=旋回流の強度が変化しない)
- を理解できる。



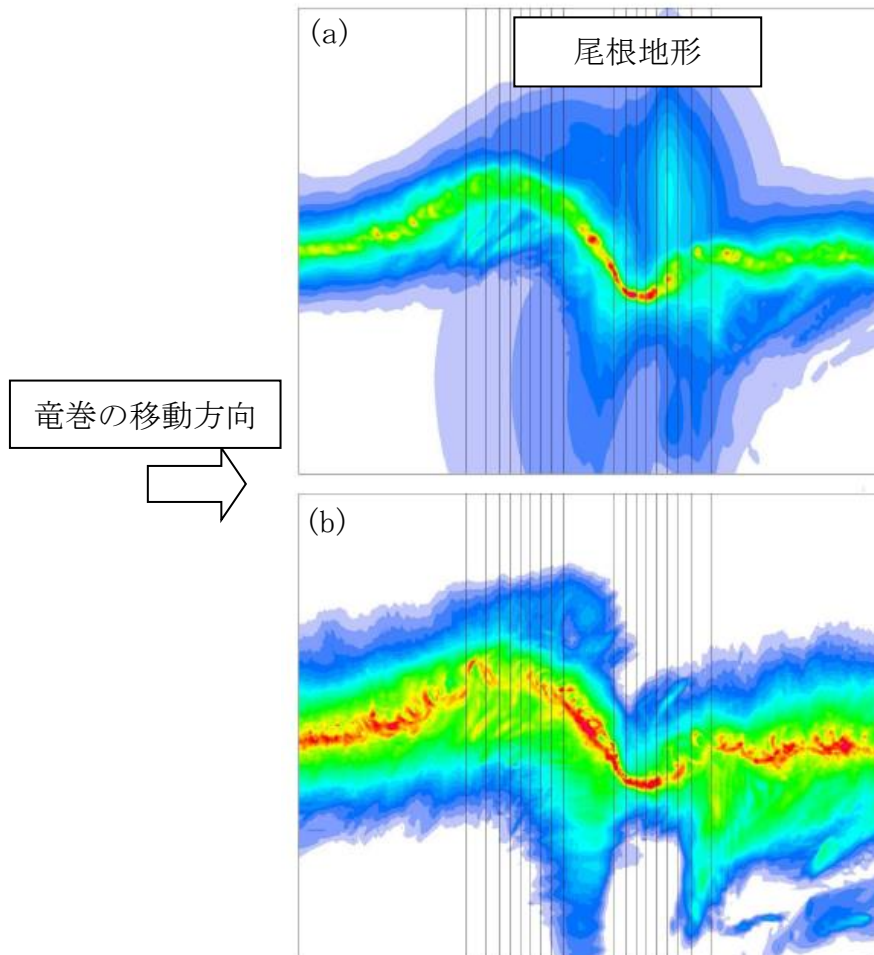
第3-3図 尾根地形を竜巻が通過するときの地表面圧力及び圧力勾配 (風速に相当)

数値シミュレーション結果である第3-4図において、ピーク圧力が(a)、風速が(b)になる。シミュレーションは風速の取り扱いを可能としており、第3-4図の(b)のような結果の議論を可能としている。図中の黒色実線が等高線を意味し、竜巻は、第3-3図と同じく図中左側から右側へと移動している。この結果も、下記のとおり第3-3図の知見と整合している。

- ・ 上り斜面では圧力が増加し (緑色→赤色) , 下り斜面では圧力が減少 (赤色→緑

色) する (実験で得られた知見①を支持)

- ・ ピーク圧力の高い領域は尾根頂部に限定され、平たん部の圧力は上流側と下流側とで同レベルとなる。(実験で得られた知見②を支持)



第 3-4 図 尾根地形を竜巻が通過するときの地表面ピーク圧力及び風速

ここで地形の規模として尾根高さ $H_m$ に対して $\pm 5H_m$ を考慮していることにも留意を願いたい。これは、尾根高さが100mの場合、 $\pm 500m$ にわたる地形を対象としていることを意味する。

また、これらの研究が、地形の起伏の影響範囲が、斜面及び尾根・山の頂・裾部に限定されることを示唆していることを強調したい。第3-3図、第3-4図にみられるとおり、地形の下流側の平たん部における風速や圧力の値は、地形を乗り越える前の上流部の値に相当する。

#### 4. 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

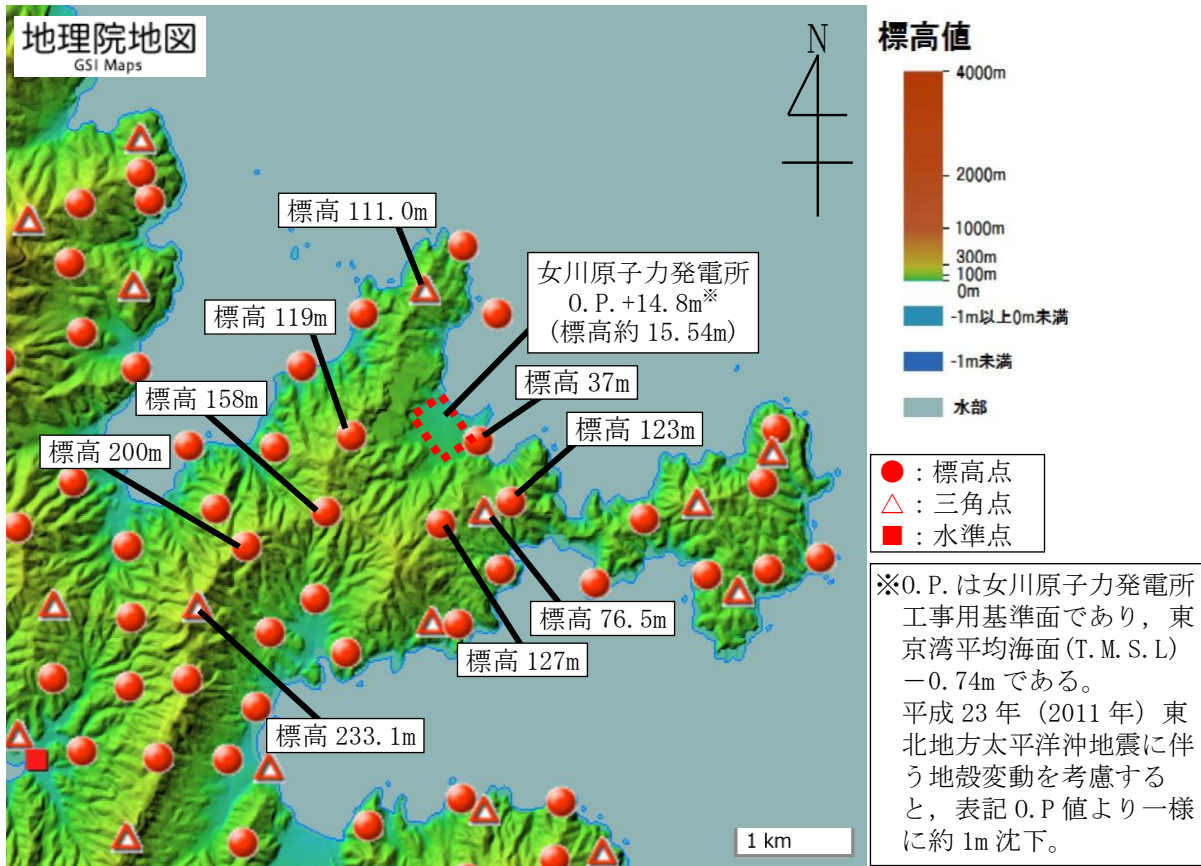
第 4-1 図に女川原子力発電所周辺の地形図，第 4-2 図に女川原子力発電所周辺の地表面粗度カラーコンタ（地表面粗度については参考資料 3 に示す），第 4-3 図に女川原子力発電所周辺の標高及び防潮堤高さ，第 4-4 図に竜巻検討地域で発生した竜巻の移動方向を示す。

第 4-1 図～第 4-3 図に示すとおり，発電所が立地する敷地は，北東が太平洋に面し，三方を山及び森林に囲まれた狭隘な地形である。

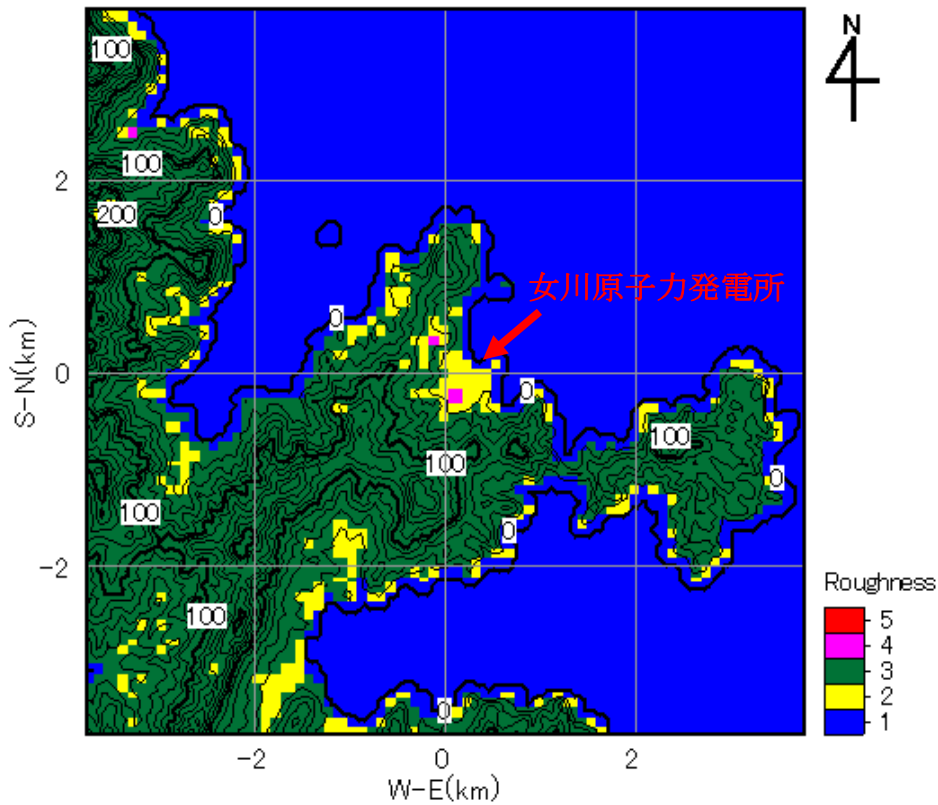
また，第 4-4 図より，竜巻検討地域で発生した竜巻は，海側から陸側に移動する方向が多く，竜巻風速は減衰する方向であった。

仮に竜巻が海上から発電所に進入してきた場合は，地表面粗度の影響を受けて竜巻は減衰した後，さらに防潮堤 (O. P. 29. 0m) で大幅に減衰するため，竜巻による施設への影響は限定的となると考えられる。また，山側から発電所の敷地に移動してきた場合についても，発電所周辺は広く森林が存在しており，竜巻は森林による粗度の影響を大きく受けるため減衰する。

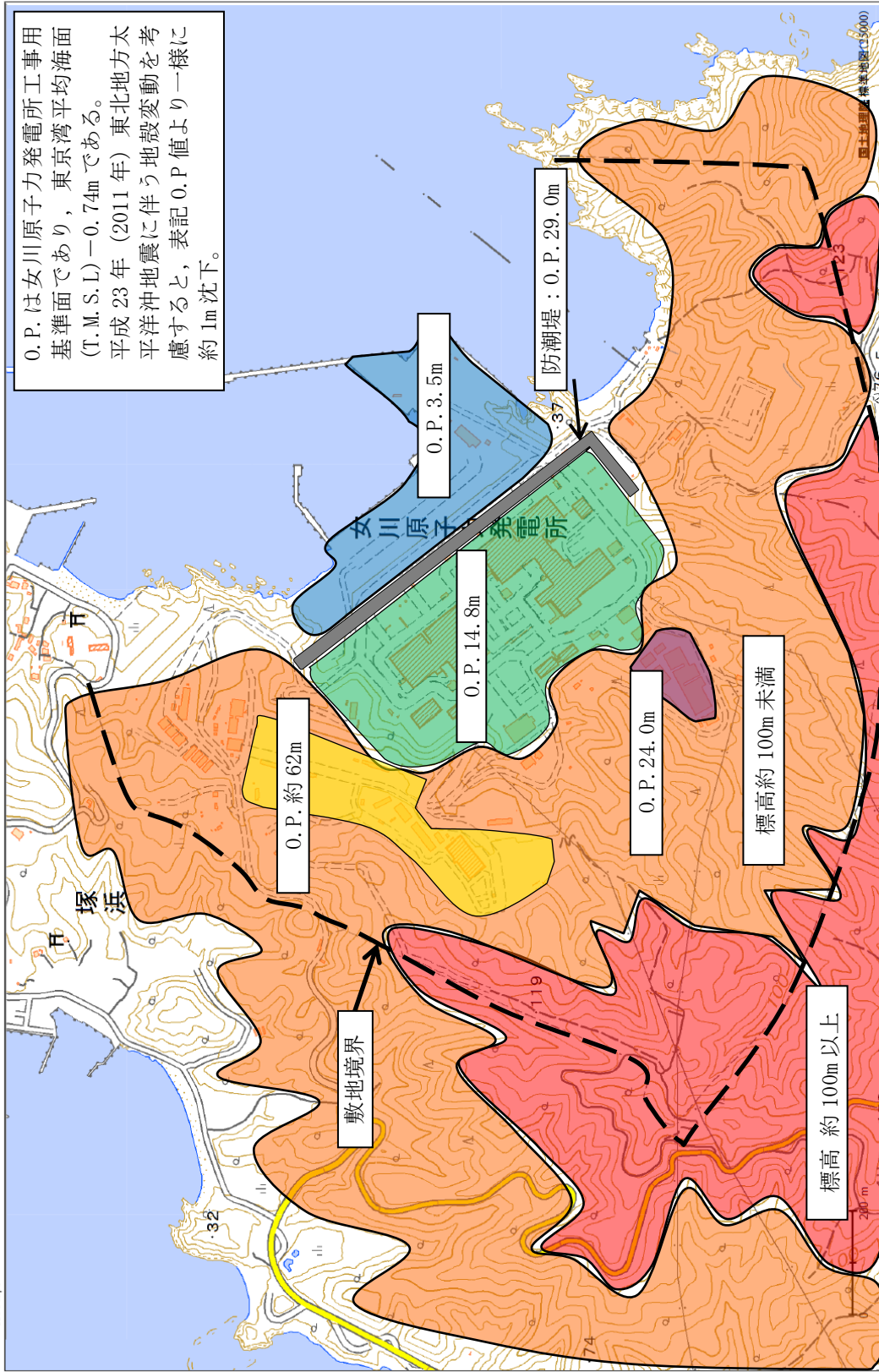
従って，女川原子力発電所において地形効果による竜巻の増幅を考慮する必要はないと考えられる。

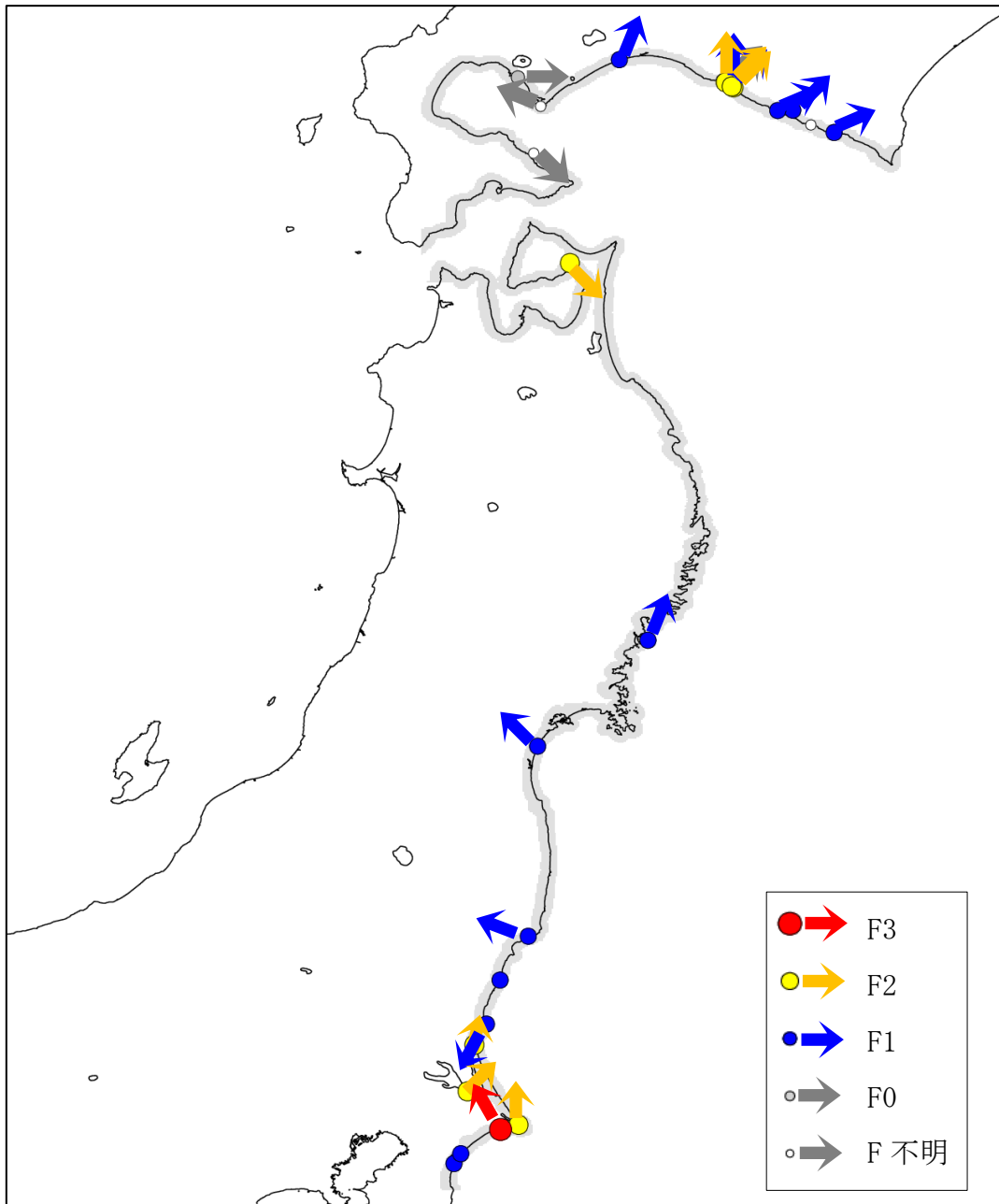


第 4-1 図 女川原子力発電所周辺の地形 (国土地理院「電子国土Web」より作成)



第 4-2 図 女川原子力発電所周辺の地表面粗度





第 4-4 図 竜巻移動方向

## 参考文献

- Forbes GS (1998) Topographic influences on tornadoes in Pennsylvania. Proc 19th Conf Severe local storms Amer Meteorol Soc, Minneapolis, MN, pp. 269-272.
- Karstens CD (2012) Observations and laboratory simulations of tornadoes in complex topographical regions. Graduate theses and dissertations of Iowa state univ, paper12778.
- Lewellen DC (2012) Effects of topography on tornado dynamics: A simulation study. 26th Conference on Severe Local Storms Amer Meteorol Soc, Nashville, TN, 4B. 1.

参考資料 1：地形の起伏に起因する竜巻の旋回流の強弱に対する物理的解釈

ここでは、本資料で示した地形の起伏による竜巻の旋回流の強弱に対する物理的解釈を示す。なおここで示す、角運動量保存則に基づく解釈の妥当性を、被害状況調査 (Forbes 1998, Karstens 2012) や風洞実験 (Karstens 2012) も支持している。

一般的に、回転する流れでは、「回転の中心からの距離」と「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質がある。これは角運動量保存則と呼ばれるが、角運動量保存則と Holton (1992) を参考に、竜巻旋回流が形成された後における渦の伸長・収縮に伴う旋回流風速の増速・減速機構を以下に導く。竜巻のコア部分を一つの鉛直軸を有する剛体運動の気柱と仮定すると、上り坂を越える場合 (渦 1 から渦 2 へ移動する場合) には渦の長さが短くなる。その際、角運動量の保存則は次式のように表される。

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

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

ここで、 $\omega$  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。

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

この関係を式②に代入すると、式④が得られる。

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

④の関係式は「渦位 (ポテンシャル渦度) の保存式」に相当するものであり、角速度  $\omega$  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。

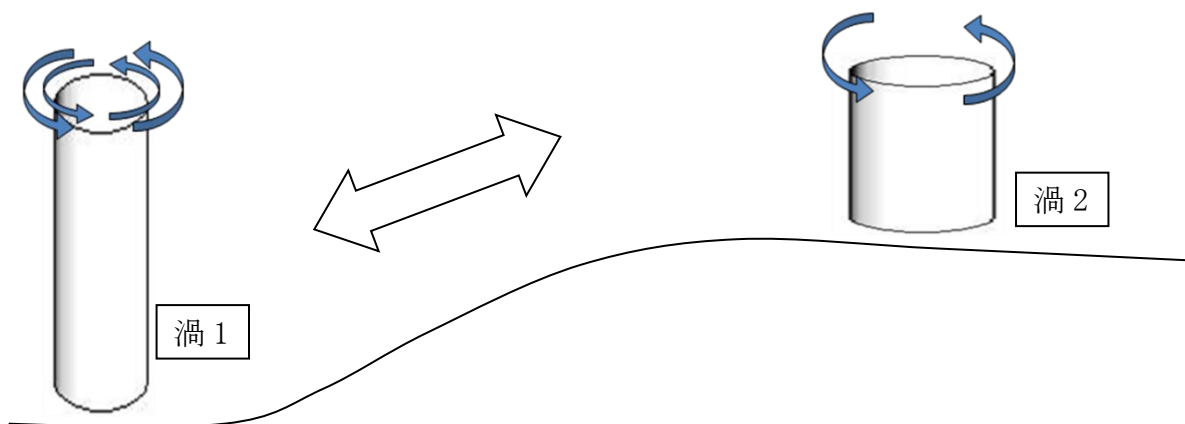


図 竜巻旋回流の地形影響に関する模式図



参考資料 2：竜巻による旋回流を対象とした数値シミュレーションへのレビュー

竜巻影響評価ガイド及びその解説に記載されている参考文献において、地形影響による旋回流の強化の評価技術として、数値シミュレーションの援用が例示されている。ここでは、ラージエディシミュレーション (LES) という技法が用いられている。LES では、風の運動を支配する方程式系を数値的に解くことにより、風の三次元分布の非定常な変化を求める。計算自体には仮定が少ないのが長所であるが、膨大な計算資源が必要であること、計算の初期・境界条件の設定が難しいこと、が欠点である。竜巻の実際の流れ場を対象とした場合、より難しいものとなる。

具体的には、LES では、風の変動を大規模なもの和小規模なものに分離し、前者を数値シミュレーションの中で直接的に再現し、後者を物理法則から妥当性を類推できる仮定にもとづくモデル (サブグリッドモデル) で表現する。そのため、計算精度が格子解像度、計算手法やサブグリッドモデルの現象再現性に強く依存する。一方、表 1 に示すとおり、近年の竜巻数値流体計算に用いられている格子解像度や計算手法には、様々なものが用いられており、適切な手法として統一的な知見が得られていないのが現状といえる。

このことを勘案して、本資料では、数値シミュレーションの結果を援用して、旋回流の増減への定性的評価及びその挙動への物理的解釈を与えることとし、定量的な数値の取り扱いは行わないこととした。

表 1 近年の竜巻数値流体計算の主要仕様

文献	解析体系	地表面境界条件	乱流モデル	解析手法	格子解像度	解析領域
Lewellen (2013)	複雑地形上実スケール竜巻	空力的粗度	LES (TKE 型)	Lewellen(2007)と同じ (IB 法を付加)	5m 以下	2x2x2km
Natarajan and Hangan (2012)	実験スケール竜巻	不明 (ノンスリップ?)	LES (動的スマゴリンスキ型)	商用コード Fluent ベース (2 次精度中心差分 hexahedral grid)	不明 (セル数は 2.5e6)	実験サイズ (半径=0.4m)
Maruyama(2011)	実験スケール竜巻	ノンスリップ	LES (標準スマゴリンスキ型)	RIAM-COMPACT (Kajishima Scheme)	最大風速半径の 1/8	実験サイズ
Lewellen et al. (2008)	飛散物を含む実スケール竜巻	空力的粗度	LES (TKE 型)	Lewellen(2007)と同様 (2 流体モデルを付加)	不明	不明
Lewellen and Lewellen (2007)	実スケール竜巻	空力的粗度	LES (TKE 型)	2 次精度中心差分	不明	不明

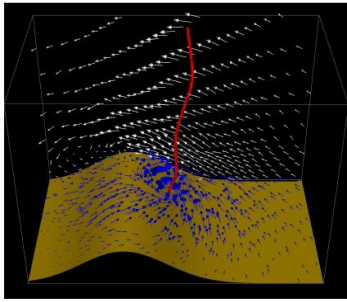
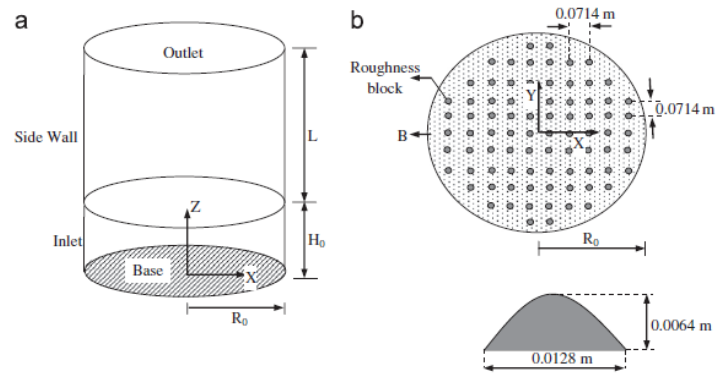


Figure 7: Sample velocity vectors 10 m above the surface (blue) and on a selected vertical plane (white) for a tornado heading upslope (moving right to left); vectors are given in a reference frame with the ground at rest. The red line represents the mean vortex core position at the time. The simulation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

(a) Lewellen (2012)



(b) Natarajan and Hangan (2012)

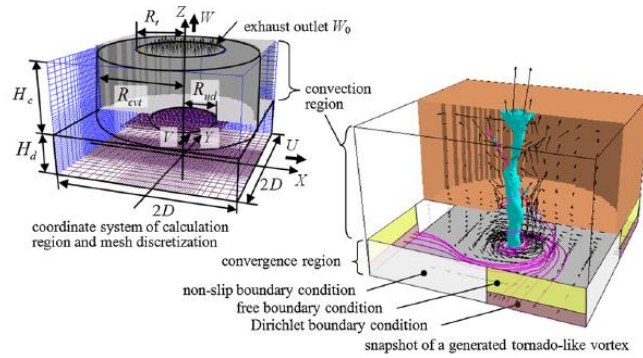


Fig. 1. Numerical tornado simulator.

(c) Maruyama (2011)

図1 近年の竜巻数値流体計算の解析モデル

### 参考資料3：地表面粗度について

#### 1. 概要

本資料において、既往の研究に基づく地表面粗度の物理的意味及び竜巻などの暴風時の風速への影響に関する知見を取りまとめる。

#### 2. 地表面粗度の定義

大気の運動（風）は、地表面の影響を受けるが、地表面に近いほどその影響は強い。影響を受ける範囲は1-2kmに及ぶことが一般的で、その範囲を大気境界層と呼ぶ。その中でも表面から数十メートルまでの領域は特にその影響が著しく、「接地層」といわれる（竹内・近藤 1981）。

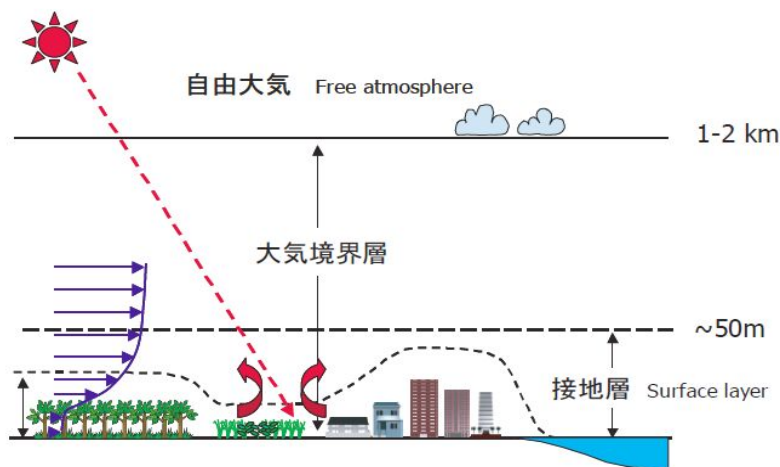


図1 大気の鉛直構造の模式図

風速は、地表面において0となり上空に向かうにつれて増加する。強風状態において、この風速の鉛直分布は対数分布と合致する。この対数分布の性状は、地表面の細かな凸凹が与える摩擦抵抗により定まる。この摩擦抵抗による風速分布への効果を示す指標を「粗度長」（地表面粗度）と定義する（塩谷 1992；近藤 2000）。

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

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

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以下に示す。

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

竹内・近藤 1981 より

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

近藤 2000 より

粗度長が地表面の細かな凹凸の度合いに呼応し増減することを確認できる。

#### 4. 粗度長を加味した風速の算定

この粗度長を考慮した建築物の耐風設計（強風を対象とした建築物の風荷重設定）手順を日本建築学会が取りまとめている（日本建築学会 2004）。ここでは、地表面の状況に応じた粗度長の変化を5つの区分に分類して取り扱うことにしている。

粗度区分	評価地点及び風上側地域の地表面の状況
I	海面又は湖面のような、ほとんど障害物のない地域
II	田園地帯や草原のような農作物程度の障害物がある地域、樹木、低層建築物などが散在している地域
III	樹木・低層建築物が多数存在する地域、あるいは中層建築物（4 - 9階）が散在している地域
IV	中層建築物（4 - 9階）が主となる市街地
V	高層建築物（10階以上）が密集する市街地

そして、式(1)の対数分布を近似するものとして、次式で示される分布とともに、各粗度区分に対して式中のパラメータとして下表の値を提示している。

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

粗度区分	I	II	III	IV	V
$z_b$ (m)	5	5	10	20	30
$z_G$ (m)	250	350	450	550	650
$\alpha$	0.1	0.15	0.2	0.27	0.35

地表面の凹凸が大きくなるほど、 $z_b$ ,  $z_G$ ,  $\alpha$  (べき指数) の値も大きくなる。粗度区分 I-V に対して、式(2)から得られる風速の鉛直分布を図2に示す。

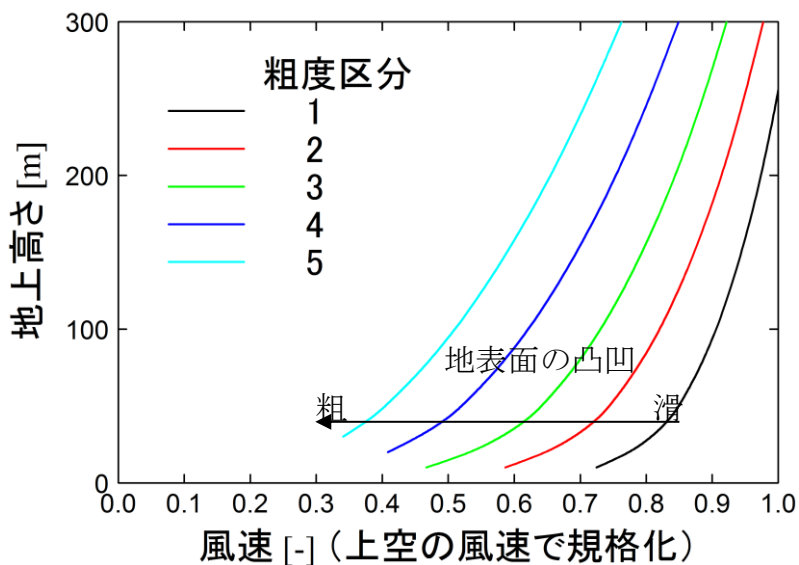


図2 粗度区分と風速の鉛直分布との関係

ここで、地表面の凹凸による地表面近傍における風速の減速を議論するため、同一の上空風速 ( $z = z_G$  の風速) に対する分布を提示している。すなわち、横軸の数字は地表面粗度の影響に起因する減速の度合いを意味する。地上に近づくにつれて・粗度区分が大きくなるにつれて、地表面近傍の風速が小さくなることを確認できる。例えば、地上高さ 10m の風速は、粗度区分が I から II に変化することで 20% 程度低下し、III に変化することで 35% 程度低下する。

#### 5. 竜巻の風速に対する粗度長の効果

4章に示した風速の算定手順は、強風を対象としたものであり、地表面状態が森林など柔なものからビルなどの剛なものまでを包括して、地表面の凹凸が、強風の減衰をもたらすことを示唆するものである。

なお、竜巻は通常の強風と異なり、強い渦 (旋回流) 構造を有する。地表面粗度は、この竜巻の旋回流を減衰させる効果を有する (例えば、Dessens 1972, Leslie 1977,

Lewellen and Sheng 1979, Rostek and Snow 1985, Church 1993, Natarajan and Hangan 2012)。また、地表面粗度の構成物が飛来物として運動することも竜巻の風速を大きく減少させることも示唆されている (Lewellen et al. 2008)。

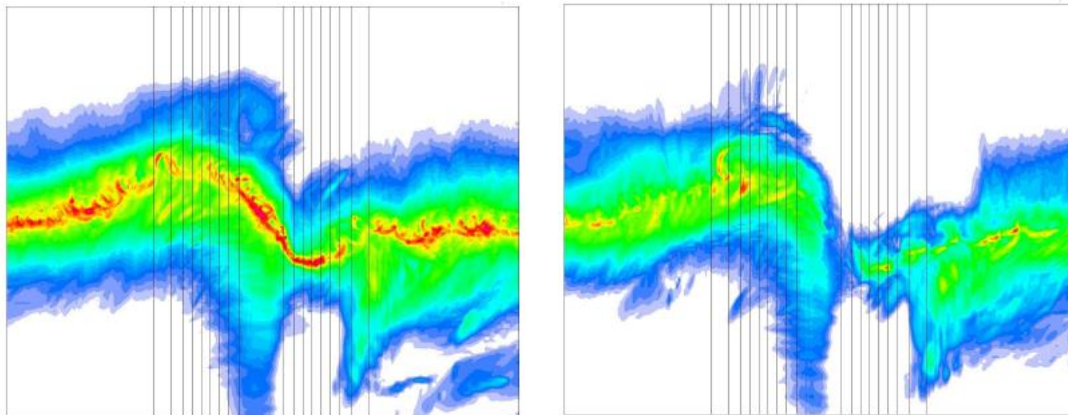
これらの知見から、表面の凹凸、すなわち地表面粗度の増加とともに竜巻に起因する強風の風速が低下するといえる。

#### 参考文献

- ・ 近藤 (2000) 地表面に近い大気の科学 324pp
- ・ 塩谷 (1992) 強風の性質 開発社 201pp
- ・ 竹内・近藤 (1981) 大気科学講座 1 地表に近い大気 東大出版 226pp
- ・ 日本建築学会 (2004) 建築物荷重指針・同解説 丸善 651pp
- ・ Church CR (1993) The tornado: its structure, dynamics, prediction and hazards. American Geophysics Union.
- ・ Hattori Y et al. (2010) Wind-tunnel experiment on logarithmic-layer turbulence under the influence of overlying detached eddies. Boundary-Layer Meteorol 134, pp269-283.
- ・ Leslie F W (1997) Surface roughness effects on suction vortex formation. J Atmos Sci 34, pp.1022-1027.
- ・ Lewellen WS, Sheng YP (1979) Influence of surface conditions on tornado wind distribution. Proc 11th Conf Severe local storms, pp.375-378.
- ・ Lewellen DC, Gong B, Lewellen WS (2008) Effects of finescale debris on near-surface tornado dynamics. J Atmos Scipp.3247-3262.
- ・ Natarajan D, Hangan H (2012) Large eddy simulations of translation and surface roughness effects on tornado-like vortices. J Wind Eng Ind Aerodyn 104-106, pp.577-584.
- ・ Rostek WF, Snow JT (1985) Surface roughness effects on tornado like vortices. Proc. 15th Conf Severe local storms, pp.252-255.

#### 参考資料4：地形と粗度との重畳について

ここでは、本資料で示した粗度による竜巻の減衰について、別資料で示した地形効果との重畳について言及する。地表面粗度と地形効果との重畳について、Lewellen (2012) により実施されたLESが一つの知見を与えている。このLESでは、高さ100mの尾根を越える竜巻の減衰を2種類の地表面粗度 ( $z_0=2\text{cm}$  と  $20\text{cm}$ ) 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以下に示す。



地表面粗度  $z_0=2\text{cm}$  の場合

地表面粗度  $z_0=20\text{cm}$  の場合

図 最大風速のカラーコンタ

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

この結果は、本資料が説明した地表面粗度による竜巻風速の減衰について、地形の起伏が重畳する場合も同様の結論となることを示唆する。

#### 参考文献

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

## 設計竜巻の特性値の設定

当社の竜巻影響評価においては、フジタの竜巻工学モデル DBT-77 (DBT: Design Basis Tornado) を適用していることから、設計竜巻の特性値を以下のとおり設定する。

## 1. フジタモデル DBT-77 について

フジタモデルには、Fujita Workbook<sup>(1)</sup>の6章に記載されているフジタモデル DBT-77 と7章に記載されているフジタモデル DBT-78 があり、フジタモデル DBT-77 は単一渦型のモデル、フジタモデル DBT-78 はフジタモデル DBT-77 で模擬した大きな竜巻の中に小さな吸込渦 (suction vortices) を加えた多重渦型のモデルである。(第1図)

米国 NRC ガイド<sup>(2)</sup>に記載されているフジタモデルは、「内側のコアと外側のコアの間にある環には、強い竜巻の吸引渦が形成され、親竜巻の中心の回りで回転する (In the annulus between the inner core radius and the outer core radius, suction vortices form in strong tornadoes and rotate around the center of the parent tornado)」とあるように、多重渦型のフジタモデル DBT-78 のことを述べている。

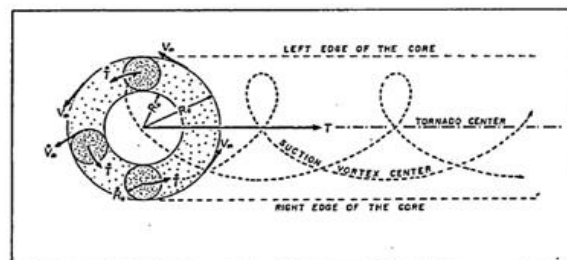


Figure 8.2 Fujita's latest model of multiple-vortex tornadoes for engineering applications. The design-basis tornado model in Chapter 6 developed in 1977 was identified as "DBT-77". Design-basis suction-vortex parameters in Chapter 7 were added to the DBT-77 in constructing this latest analytical model, to be identified as "DBT-78".

第1図 DBT-78 モデルの模式図<sup>(1)</sup>

米国 NRC ガイドでは、フジタモデル DBT-78 の中の小さな吸込渦は半径が小さく、圧力の時間変化率が半径に反比例して大きくなることを考慮して、同ガイドで採用したランキン渦モデルでも保守的に圧力の時間変化率が大きくなるように、改訂前 (2007 年以前) の同ガイドで採用されていた最大接線風速半径 45.7m を選択している。

また、米国ローレンス・リバモア国立研究所報告書<sup>(3)</sup>では、「多重渦型のフジタモデル DBT-78 で考慮されている吸込渦はすぐに減衰することから、大多数の専門家は竜巻被災の重要因子ではないと考えている」と述べており、単一渦型のフジタモデル DBT-77 を飛来物評価の竜巻風速場として選定している。



フジタモデル DBT-78 モデルは、Fujita Workbook<sup>(1)</sup>において、最大風速や発生率がモデル化されているのみであり、飛散解析に必要となる風速場に関する数式が完全には定義されていない。また、仮に DBT-78 モデルを適用した場合、竜巻半径が東京工芸大報告書<sup>(4)</sup>に示されている日本で観測された被害幅に基づく竜巻半径と整合が取れなくなるといった点が挙げられる。

以上を踏まえ、当社の竜巻影響評価ではフジタモデル DBT-77 を適用している。DBT-77 モデルの入力パラメータは移動速度、最大接線風速及び最大接線風速半径であり、これらについて制限は Fujita Workbook<sup>(1)</sup>では記載されておらず、特に制限はないものと考えられることを踏まえ、以下のとおり設計竜巻の特性値を設定する。

### (1) 設計竜巻の移動速度 ( $V_T$ )

ランキン渦モデルを仮定したガイドにおいて移動速度 ( $V_T$ ) は、下記の式にて設定される。

$$V_T = 0.15 \cdot V_D \text{ (評価ガイドの 3.1 式)} \quad (1)$$

一方、この式は日本の竜巻観測記録（気象庁データベース）に基づいた竜巻移動速度（平均値）と最大風速との関係<sup>(4)</sup>を参照して設定されており、風速場モデルに関わらず用いることができることから、フジタモデルでも適用できる。

また、参考に、 $V_D = 100\text{m/s}$  の際のランキン渦モデルとフジタモデル DBT-77 での移動速度を以下に示す。

第 1 表 設計竜巻の移動速度 ( $V_T$ ) の比較

	ランキン渦モデル	フジタモデル DBT-77
移動速度 ( $V_T$ )	15m/s	15m/s

### (2) 設計竜巻の最大接線風速 ( $V_{Rm}$ )

ランキン渦モデルを仮定したガイドにおいて最大接線風速 ( $V_{Rm}$ ) は、竜巻の最大風速から移動速度 ( $V_T$ ) を引いた値として、下記の式にて設定される。

$$V_{Rm} = V_D - V_T \text{ (評価ガイドの 3.2 式)} \quad (2)$$

一方、上記式は、風速場によらないのでフジタモデルでも適用できる。

また、参考に、 $V_D = 92\text{m/s}$  の際のランキン渦モデルとフジタモデル DBT-77 での最大接線風速を以下に示す。

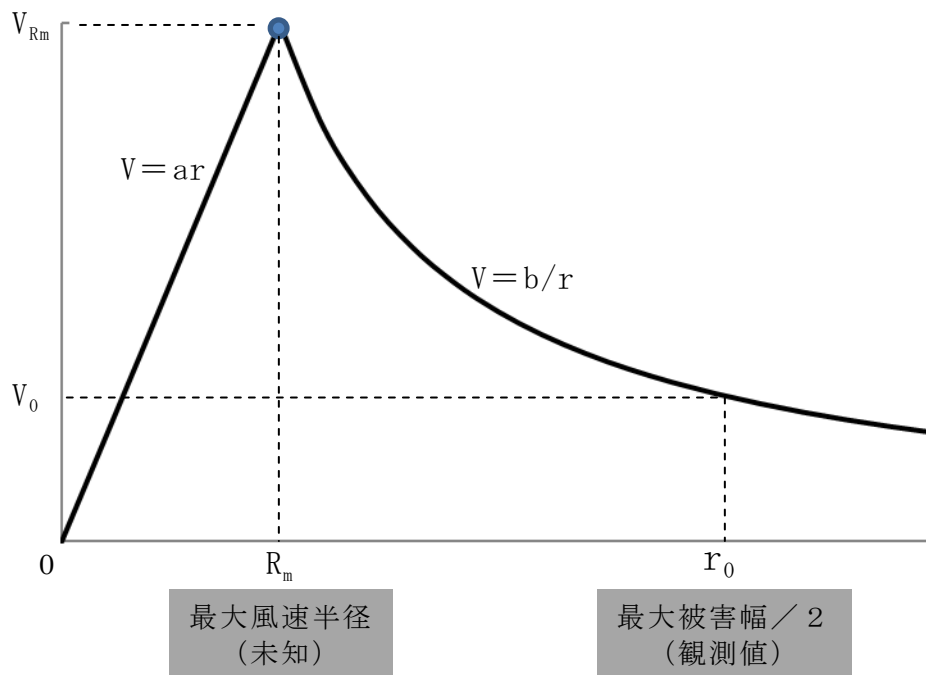
第 2 表 設計竜巻の最大接線風速 ( $V_{Rm}$ ) の比較

	ランキン渦モデル	フジタモデル DBT-77
最大接線風速 ( $V_{Rm}$ )	78m/s	78m/s

(3) 設計竜巻の最大接線風速半径 ( $R_m$ )

ランキン渦モデルを仮定したガイドにおいて最大接線風速半径 ( $R_m$ ) については、観測された被害幅を用いて推定している。

竜巻によって被害が生じる風速を  $V_0$  とした場合、 $R_m$  を超えた範囲では、風速  $V = V_{Rm} \cdot (R_m/r)$  と表せるため、被害が生じる風速  $V_0$  と、被害幅  $r_0$ 、及び最大接線風速  $V_{Rm}$  が分かれば最大接線風速半径  $R_m$  を得ることができる (第2図)。



第2図 竜巻半径と風速との関係

例えば、東京工芸大報告書<sup>(4)</sup>p. 163 の仮定2より、最大風速  $V_{Rm} = 70\text{m/s}$  (F3 あるいは F3 に近い F2 竜巻)、被害幅 250m の 1/2 である  $r_0 = 125\text{m}$ 、被害が生じる風速  $V_0 = 17\text{m/s}$ 、とするとこれを基に設定する最大接線風速半径 ( $R_m$ ) は、下記のとおり。

$$\begin{aligned}
 R_m &= r_0 \cdot V_0 / V_{Rm} \\
 R_m &= 125 \cdot 17 / 70 \\
 R_m &\doteq 30.36 (\text{m})
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

一方、フジタモデルの水平風速  $V$  は接線風速と径方向風速を合成したものであるので、外部コア半径の外側では水平風速  $V$  は以下で与えられる。

$$\begin{aligned}
 V &= \sqrt{V_\theta^2 + V_r^2} \\
 &= F_r(r) \cdot F_h(z) \cdot V_m \sqrt{1 + \tan^2 \alpha_0} \quad V_m = V_{Rm}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

$$\text{ここで, } F_r(r) = \frac{R_m}{r}, \quad F_h(z) = \begin{cases} z^{k_0} & (z < 1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases} \quad (5)$$

$$\tan \alpha_0 = \begin{cases} -A(1-z^{1.5}) & (z < 1) \\ B\{1-\exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 $z$  は流入層の上端で  $z=1$  となる無次元高さである。フジタモデルでは、ランキン渦モデルと異なり高さによって風速が変化するが、外部コア半径の内側では  $r$  に比例して風速が大きくなり、外部コア半径の外側では  $r$  に反比例して小さくなる点ではランキン渦モデルと同様である。(ランキン渦モデルと同様に、竜巻半径と風速の関係は第2図のとおりとなる)

また、接線風速  $V$  が最大となるのは、流入層の上端 ( $z=1$ ) であるが、このとき、 $F_h(z)=1, \tan \alpha_0=0$  となるので、外部コア半径の外側ではランキン渦モデルと同様に  $V=V_{Rm} \cdot R_m/r$  が成立する。

従って、被害幅から最大接線風速半径を推定する際に、ランキン渦モデルと同様に求めることができると考えられるため、本検討においてはガイドを参照して最大接線風速半径  $R_m=30\text{m}$  を設定する。

また、参考に、 $V_0=100\text{m/s}$  の際のランキン渦モデルとフジタモデル DBT-77 での最大接線風速半径を以下に示す。

第3表 設計竜巻の最大接線風速半径 ( $R_m$ ) の比較

	ランキン渦モデル	フジタモデル DBT-77
最大接線風速半径 ( $R_m$ )	30m	30m

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

ランキン渦モデルを仮定したガイドにおいて最大気圧低下量 ( $\Delta P_{\max}$ )・最大気圧低下率 ( $(dp/dt)_{\max}$ ) は、それぞれ  $\rho V_{Rm}^2, (V_T/R_m) \cdot \Delta P_{\max}$  と設定される。

一方、フジタモデルにおける設計竜巻の最大気圧低下量・最大気圧低下率については、速度分布が既知である場合、流れの連続式と運動量保存式から導出される以下の圧力ポアソン方程式を解くことにより、圧力を求めることができる。

$$\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x_3^2} \right) = - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left( U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) \quad (7)$$

ここで、 $x_i$  は座標 ( $x, y, z$ ) を、 $U_i$  及び  $p$  は風速ベクトル及び圧力を表す。また、 $\nu$  は動粘性係数を、 $\rho$  は空気密度を表す。なお、添え字  $i, j$  は1から3までの整数とする。

式(7)を解くために有限要素法（計算方法の詳細は参考文献(5)，(6)を参照）を用い，一辺 300m(10R<sub>m</sub>)の立方体を解析領域として，この領域を1辺100個の有限要素に分割した。竜巻（最大接線風速 V<sub>Rm</sub>=78m/s，半径 R<sub>m</sub>=30m）の中心が解析領域の角部に位置するものとして，各節点に Fujita モデルの風速値を与えた。移動速度 V<sub>T</sub> は圧力分布には影響しないため，ここでの計算では V<sub>T</sub>=0 とした。

図3に Fujita モデルの圧力分布（空気密度で除したもの）を示す。空気密度で除した最大圧力差は 5149.8m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> であるので，これに空気密度 1.226kg/m<sup>3</sup> を乗じて最大圧力差を求めた。ただし，この結果は一辺300m(10R<sub>m</sub>)の立方体を解析領域とした有限領域での数値解析結果であるので，これを無限領域における最大気圧低下量とするために，更に補正係数 1.0066 を乗じた（第4表）。なお，この補正係数 1.0066 は，ランキン渦に対する最大圧力差の有限領域での数値解析結果と無限領域での理論値の比から求めた。

第4図に Fujita モデルの圧力（空気密度で除したもの）の x-方向空間微分値を示す。x-方向空間微分値（絶対値）の最大値は 240.2m/s<sup>2</sup> であり，最大気圧変化率はこの値に移動速度を乗じることにより，式(8)のように求められる。ただし，数値解析誤差を考慮するため，更に補正係数 1.0096 を乗じて最大気圧低下率とした（第5表）。なお，この補正係数 1.0096 は，ランキン渦に対する最大気圧変化率の有限領域での数値解析結果と無限領域での理論値の比から求めた。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = V_{tr} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (8)$$

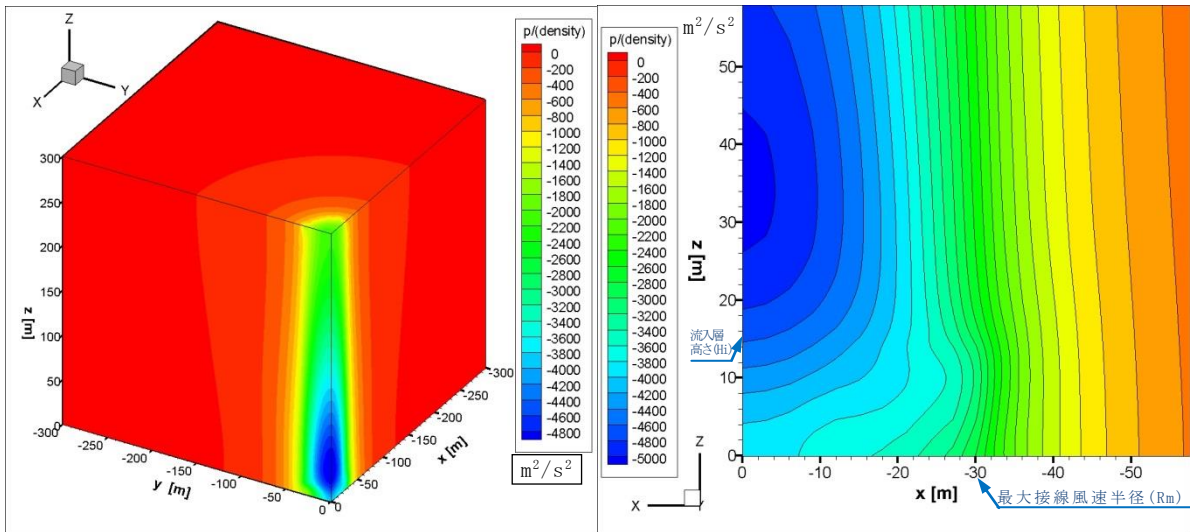
また，参考として，第5図に有限領域での数値解析より求めたランキン渦モデルの圧力分布と圧力の x-方向空間微分値を示す（圧力は空気密度で除したもの）。

第4表 最大気圧低下量

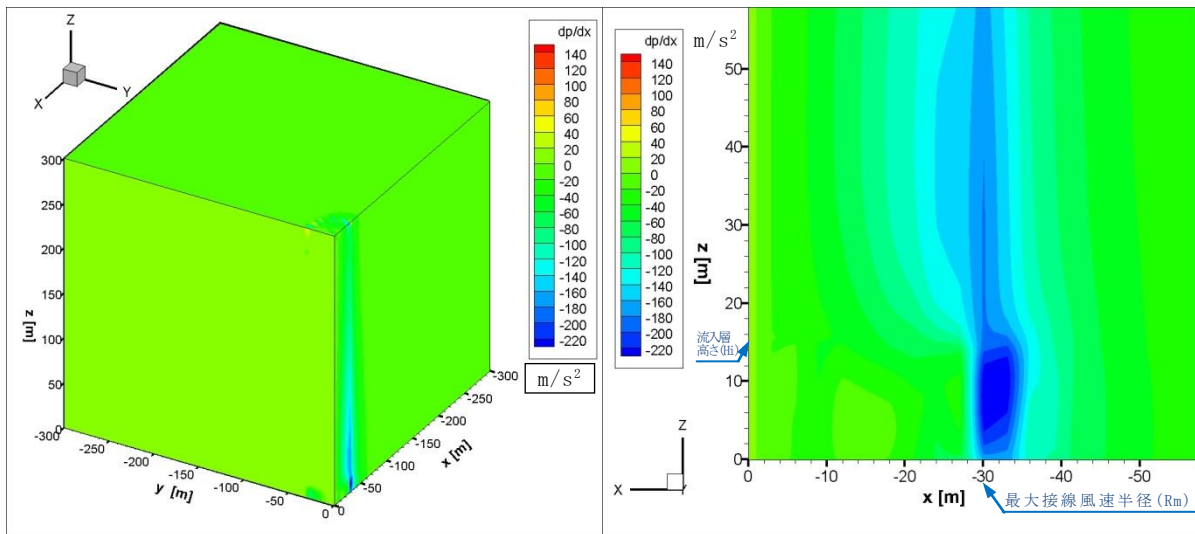
最大風速	最大接線風速	空気密度で除した 最大圧力差	最大気圧低下量
92m/s	78m/s	5149.8m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	6355Pa

第5表 最大気圧低下率

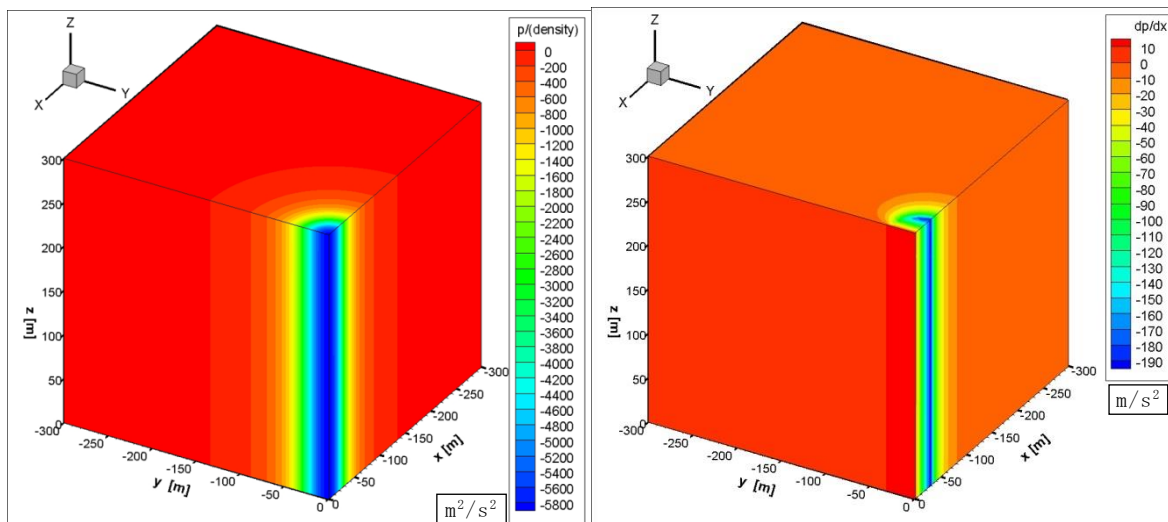
最大風速	最大接線風速	移動速度	空気密度で除した 最大圧力勾配	最大気圧低下率
92m/s	78m/s	14m/s	240.2m/s <sup>2</sup>	4163Pa/s



第3図 最大接線風速  $V_{Rm}=78\text{m/s}$  における Fujita モデルの圧力分布  
 (左：全体図，右：y 方向からの拡大図，圧力は空気密度で除したもの，  
 最大値  $92.83\text{m}^2/\text{s}^2$ ，最小値  $-5056.99\text{m}^2/\text{s}^2$ )



第4図 最大接線風速  $V_{Rm}=78\text{m/s}$  における Fujita モデルの圧力  
 (空気密度で除したもの) の x-方向空間微分値  
 (左：全体図，右：y 方向からの拡大図，最大値  $163.3\text{m}/\text{s}^2$ ，最小値  $-240.2\text{m}/\text{s}^2$ )



第5図 最大接線風速  $V_{Rm} = 78\text{m/s}$  におけるランキン渦モデルの圧力分布(左)と圧力の  $x$ -方向空間微分値(右)  
(本図は、図3, 図4同様、有限領域の数値解析により算出)

また、 $V_D = 100\text{m/s}$  の際において、ガイドに基づき計算したランキン渦モデルの最大気圧低下量・最大気圧低下率と上記の数値解析により計算したフジタモデル DBT-77 の最大気圧低下量・最大気圧低下率を以下に示す。

第6表 設計竜巻の最大気圧低下量 ( $\Delta P_{max}$ )・最大気圧低下率 ( $(dp/dt)_{max}$ ) の比較

	ランキン渦モデル	フジタモデル DBT-77
最大気圧低下量 ( $\Delta P_{max}$ )	8858Pa	7548Pa
最大気圧低下率 ( $(dp/dt)_{max}$ )	4429Pa/s	5298Pa/s

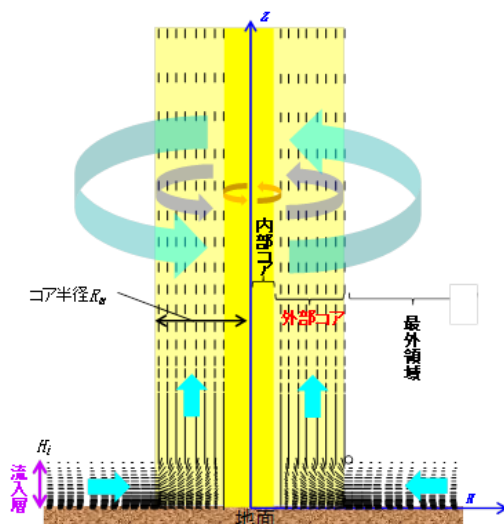
フジタモデルは、地面との摩擦の影響を受けず回転するランキン渦に比べ、地面との摩擦の影響で回転が弱まり竜巻の中心付近が低圧になりにくい(第3図及び第5図)。また、フジタモデルの流入層は、流体が竜巻中心方向に引き込まれることにより形成されることから、フジタモデルの最も低圧な領域は、竜巻中心において流入層高さの少し上の部分に存在し(第3図右図)、同部分の圧力より求まる最大気圧低下量は、ランキン渦モデルの最大気圧低下量よりも小さくなる。

フジタモデルの圧力分布は複雑であり、上記の数値解析により求めている。そのため、フジタモデルにおける圧力の空間微分値は、局所的に大きな場所(外部コアと外周部の境界)が発生することから、最大気圧低下率がガイドの簡易な式で求めたランキン渦モデルの値より大きくなっている。

### (5) 流入層高さ ( $H_i$ )

フジタモデルでは物体を竜巻中心方向に引き込む流れとして、図6に示すようなモデル化をしている。

$H_i$ は飛散評価に影響を与えることから、適切な流入層高さにて評価する必要がある。そのため、設定にあたってはFujitaのWorkbook<sup>(1)</sup>の提案式だけではなく、最新の研究成果や文献等について幅広く確認し、飛散評価結果が厳しくなるように、感度解析における流入層高さの上限を考慮し、 $H_i=17.5\text{m}$ と設定した。(添付資料3.1別紙及び別添2-2参照)



第6図 フジタモデルの風速場

### 参考文献

- (1)Fujita, T. T., “Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications” (1978), U. Chicago.
- (2)U. S. Nuclear Regulatory Commission, Design-basis tornado and tornado missiles for nuclear power plants, Regulatory Guide 1.76, Revision 1 (2007).
- (3)Rationale for Wind-Borne Missile Criteria for DOE facilities, UCRL-CR-135687, Lawrence Livermore National Laboratory, 1999
- (4)東京工芸大学, 平成21~22年度原子力安全基盤調査研究(平成22年度)竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書, 2011.
- (5)Y. Eguchi, S. Sugimoto, H. Hattori and H. Hirakuchi, “Tornado Pressure Retrieval from Fujita’s Engineering Model, DBT-77”, Proceedings of the 6th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models (ICVFM Nagoya2014), November 17-20, 2014, Nagoya, Japan.
- (6)江口 譲, 服部康男, 流速場情報に基づく圧力場計算法の提案, 第72回ターボ機械協会 大分講演会 (2014. 10. 3)

## 米国及び関東平野の竜巻の類似性

米国における主要な竜巻発生メカニズムを示すと共に、関東平野における竜巻の特徴を以下に示す。

## 1. 米国における主要な竜巻発生メカニズム

ロッキー山脈とアパラチア山脈との間の領域が、通常、竜巻街道（トルネード・アレー）と呼ばれている領域であり、米国における竜巻の多くはこの地域で確認されている。この地域では、ごく一般的に竜巻が発生しているが、これはメキシコ湾から流入する暖かく湿った空気及びソノラ砂漠からの暑く乾いた空気とカナダ及びロッキー山脈からの流入する冷たく乾燥した空気がぶつかるためであり、このメカニズムがスーパーセルとして知られる激しい竜巻を伴った雷雨を作り出す(第1図、第2図、第3図参照)。

1950年1月1日から2009年7月31日までに国立気候データセンターによって報告されている竜巻影響の報告件数は表1に示すとおりとなっており、竜巻街道といわれる地域が主な竜巻発生地帯であることが確認できる。

第1表 米国における竜巻報告件数

順位	州名	竜巻数	順位	州名	竜巻数
1	テキサス州	8,049	6	アイオワ州	2,368
2	カンザス州	3,809	7	イリノイ州	2,207
3	オクラホマ州	3,443	8	ミズーリ州	2,119
4	フロリダ州	3,032	9	ミシシッピ州	1,972
5	ネブラスカ州	2,595	10	アラバマ州	1,844

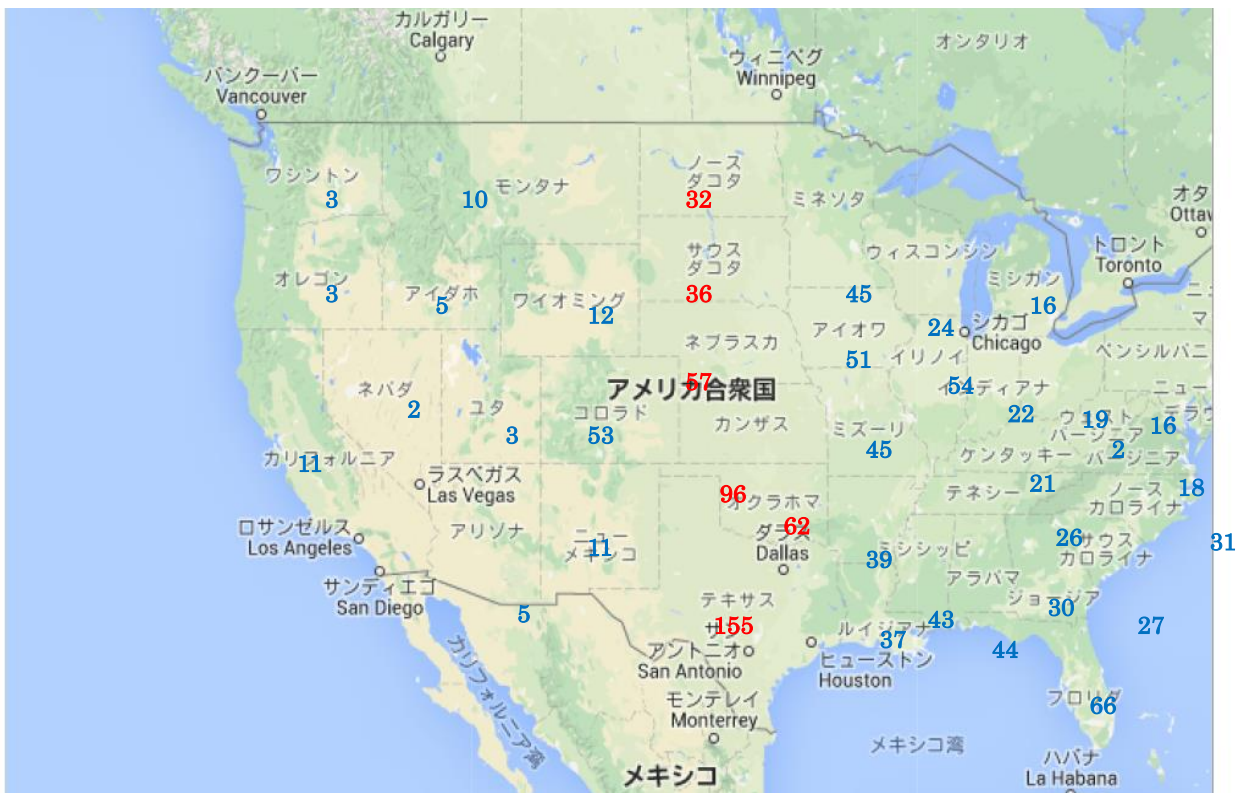


第1図 米国竜巻街道における竜巻発生メカニズム





第2図 米国竜巻街道を囲う山脈



第3図 竜巻街道における年間竜巻発生数（1991～2010年の平均）

## 2. 関東平野における竜巻発生メカニズム

1961年からの50年間に全国で発生した竜巻のFスケール別の分布を第4図に示すが、全国で発生した竜巻は年平均約15.4個、関東平野では約1.9個で、関東平野の発生比率が約12%である。竜巻の約3/4は海岸付近で起こっているため内陸だけに限ると、全国の内陸域竜巻の約30%が関東平野において発生している。

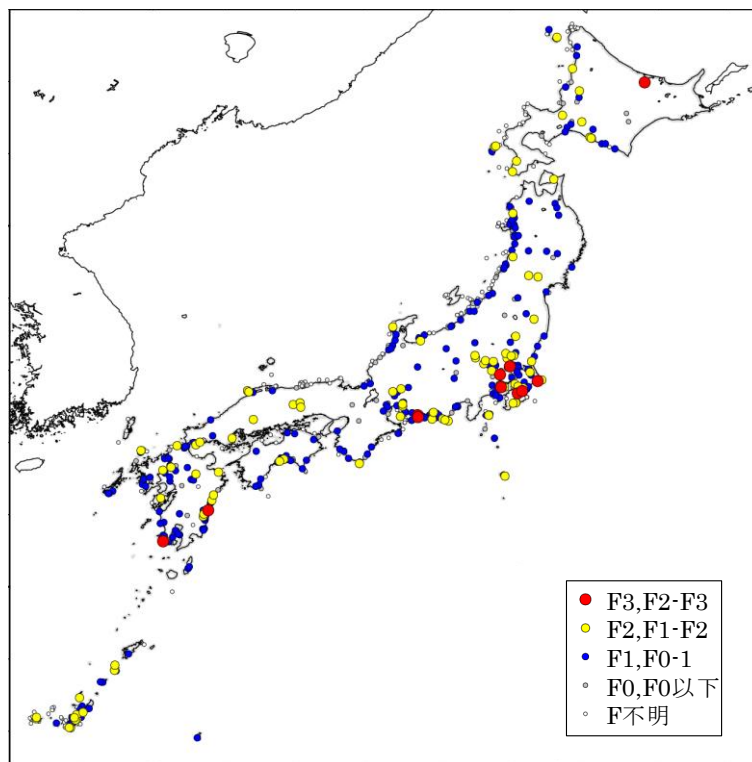
関東平野の中でも、利根川及び鬼怒川沿いの地域に竜巻の集中がみられる。これは、広い平野では地表の起伏による抵抗がないため竜巻が発生しやすく、また邪魔されずに進行できるためである。スケールは違うが、強いトルネードが頻発する北米の中央平原に似たような条件にあると言える。

竜巻の発生条件は、上下の対流が生じやすい不安定成層の大気があり、それを水平方向に回転させる力が作用することによる。対流の不安定状態をつくる主な要因は、上空への寒気流入であり、南からの暖かく湿った気流の流入が加わると不安定な状態がより強くなる。

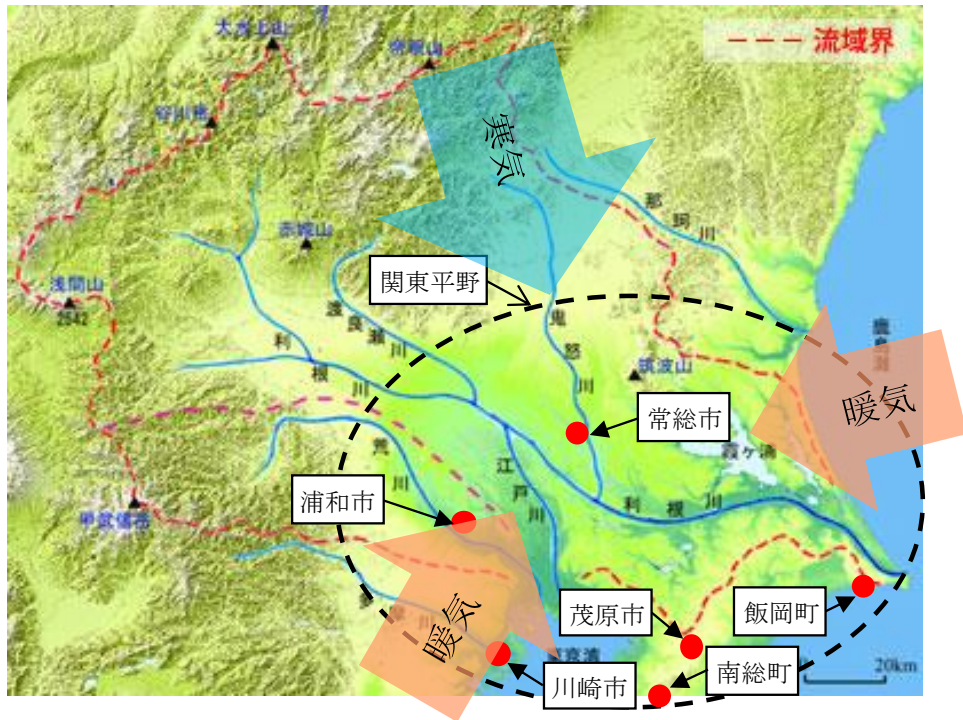
第5図に示すように、南に開けた関東平野では相模湾からの暖湿流と鹿島灘からの暖湿流が内陸深くまで進入しやすいという条件があるため、特に台風の接近時は多くの暖湿流が流入する。太平洋側から流入した暖湿流と、季節風に伴う北側から流入する寒気又は寒冷前線の通過時に北西側から流入する寒気がぶつかり、大気の不安定性が増して、大きな竜巻に発達する傾向があると考えられる。関東平野で発生したF3規模の竜巻を第2表に示す。

よって、関東平野において発生する主な竜巻は、平野部の奥深くまで流入した暖湿流によって発生しており、米国で発生する主な竜巻発生メカニズムと類似している。

なお、台風は北上（低緯度から中高緯度へ移動）するに従い減衰するため、東北地方や北海道など、北部での発生数は少なく、規模も小さくなると考えられる。本州に接近・上陸する台風の減衰は、地表面摩擦の増大による風速の減衰に加え、海水温が低下するため、台風の維持、発達に必要な、海から供給される水蒸気量が減少し減衰する。



第4図 国内の竜巻発生実績



第 5 図 関東平野を囲む河川，気流の流入及び F3 規模の竜巻発生箇所

第 2 表 関東平野で発生した F3 規模の竜巻

発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
1966 年 1 月 4 日	千葉県 南総町	(F2~F3)	南岸低気圧	寒冷前線	—
1967 年 10 月 28 日	千葉県 飯岡町	(F2~F3)	台風	—	—
1971 年 7 月 7 日	埼玉県 浦和市	(F3)	台風	—	—
1978 年 2 月 28 日	神奈川県 川崎市	F2~F3	寒冷前線	暖気の移流	—
1990 年 12 月 11 日	千葉県 茂原市	F3	暖気の移流	気圧の谷	寒冷前線
2012 年 5 月 6 日	茨城県 常総市	F3	気圧の谷	寒気の移流	—

※ ( ) は文献等からの引用又は被害のおおまかな情報等から推定したもの