

柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉

竜巻影響評価について
(基準竜巻・設計竜巻の設定)

平成27年3月

東京電力株式会社

目次

1.	竜巻に対する防護.....	1
1.1.	概要	1
1.2.	竜巻影響評価の対象施設.....	1
1.3.	評価の基本的な考え方	8
1.3.1.	評価の基本フロー	8
1.3.2.	評価対象施設に作用する荷重.....	8
1.3.3.	施設の安全性の確認方針	9
2.	基準竜巻・設計竜巻の設定	10
2.1.	概要	10
2.2.	竜巻検討地域の設定	11
2.2.1.	竜巻検討地域の妥当性確認.....	11
2.2.2.	総観場の分析に基づく地域特性の検討	13
2.2.3.	過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の検討	17
2.2.4.	突風関連指数による地域特性の検討	21
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	21
2.2.4.2.	検討に用いる突風関連指数について	22
2.2.4.3.	突風関連指数の地域特性.....	25
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	25
2.2.4.5.	佐呂間町で発生した竜巻について	29
2.3.	基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定.....	32
2.3.1.	過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1})	32
2.3.2.	竜巻最大風速のハザード曲線の求め方	34
2.3.3.	海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域の評価	35
2.3.4.	竜巻の発生頻度の分析	35
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.....	37
2.3.6.	竜巻影響エリアの設定	39
2.3.7.	ハザードの算定	41
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})	43
2.3.9.	基準竜巻の最大風速 (V_B)	45
2.4.	設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定.....	46
2.4.1.	地形効果による竜巻風速への影響.....	46
2.4.2.	柏崎刈羽原子力発電所周辺の地形.....	46
2.4.3.	竜巻の移動方向の分析	48
2.4.4.	竜巻風速の増幅に関する検討	50
2.4.5.	設計竜巻の最大風速 V_D	50
2.5.	設計竜巻の特性値	50
3.	竜巻影響評価.....	50

3.1.	評価概要.....	50
3.2.	評価対象施設	50
3.3.	評価荷重の設定.....	50
3.3.1.	設計竜巻荷重の設定	50
3.3.2.	設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定	50
3.4.	施設の構造健全性の確認	50
3.4.1.	概要.....	50
3.4.2.	建屋，構築物の構造健全性の確認	50
3.4.3.	設備（系統・機器）の構造健全性の確認	50
3.5.	竜巻随伴事象に対する評価.....	50
4.	竜巻防護対策.....	50
4.1.	飛来物発生防止対策	50
4.2.	竜巻防護対策	50
4.2.1.	設備による竜巻防護対策.....	50
4.2.2.	防護ネットの設計評価.....	50
4.2.3.	竜巻防護に関する運用・手順等	50

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「[实用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（以下、「設置許可基準規則」という。）](#)」第6条において、外部からの衝撃による損傷の防止として、安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならずとしており、敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、竜巻の影響を挙げている。

原子炉施設の供用期間中に極めてまれに突風・強風を引き起こす自然現象としての竜巻及びその随件事象等によって原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であることを評価・確認するために原子力規制委員会の定める「[原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（平成25年6月19日原規技発13061911号 原子力規制委員会決定）](#)」（以下、「ガイド」という。）を参照し、竜巻影響評価として以下を実施し、発電用原子炉施設の安全機能が維持されることを確認する。

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

また、第43条の要求を踏まえ、設計竜巻によって、[重大事故等対処施設の安全機能が喪失した場合においても、位置的分散又は頑健性のある外殻となる建屋による防護](#)の観点から、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。【補足説明資料-1.1】

1.2. 竜巻影響評価の対象施設

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

(1) 竜巻防護施設のうち評価対象施設【補足説明資料-1.2】

設置許可基準規則第6条における安全施設とは、「[発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針](#)」で規定されているクラス1、2及び3に該当する構築物、系統及び機器（以下、「[安全重要度クラス1、2、3に属する構築物、系統及び機器](#)」という。）を指していることから、竜巻防護施設としては、安全重要度クラス1、2、3に属する構築物、系統及び機器とする。

竜巻防護施設のうち、本評価における対象としては、竜巻襲来時に必要な構築物、系統及び機器とし、その中から屋外設備、外気との接続がある設備及び外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備を抽出した。

竜巻襲来時に必要な構築物，系統及び機器は，以下の点を踏まえ，原子炉の高温・冷温停止，使用済燃料プール冷却・給水を維持するために必要な構築物，系統及び機器として，竜巻襲来による原子炉施設の異常発生防止，および異常発生時の拡大防止，並びに放射性物質が敷地外へ影響を及ぼすことを抑制・防止するために必要な設備を選定する。

- ・ 設計竜巻のように著しく大きな竜巻が襲来した場合，襲来前の対応が可能であれば，プラント停止の措置をとること
- ・ 襲来前の対応が困難な場合には，竜巻襲来後に設備等の損壊状況を踏まえ，必要に応じプラント停止の措置をとること
- ・ プラント停止後は，その状態を維持することが重要であること

また，上記以外の設備については，竜巻及びその随件事象による損傷を考慮して，代替設備により必要な機能を確保すること，安全上支障のない期間に修復すること等の対応が可能な設計とすることにより，安全機能を損なわないことから評価対象から除外する。

なお，外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備については，「3.4.2 建屋，構築物の構造健全性の確認」の結果に基づいて抽出する。

図 1.2.1 に竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出フローを，図 1.2.2 に評価対象施設を示す。

また，上記の抽出に加え，「基準地震動および耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震 S クラスの設計を要求される設備（系統，機器）及び建屋・構築物等のうち，竜巻の影響を受ける可能性がある設備を抽出し，追加で評価対象施設に反映する施設がないことを確認した。【補足説明資料－1.3】

（屋外設備）

- ・ 軽油タンク
- ・ 非常用ディーゼル発電機燃料移送系
- ・ 原子炉建屋
- ・ タービン建屋 熱交換器区域
- ・ コントロール建屋
- ・ 廃棄物処理建屋

（外気との接続がある設備）

- ・ 非常用ディーゼル発電機吸気系
- ・ 非常用ディーゼル発電機非常用送風機
- ・ 換気空調系（ディーゼル発電機電気区域換気空調系，中央制御室換気空調系，コントロール建屋計測制御・電源盤区域喚起空調系，海水熱交換器区域換気空調系）

(外殻となる施設等による防護機能が期待できない設備)

- ・原子炉建屋 1 階 非常用ディーゼル発電機室設置設備 (非常用ディーゼル発電機, 非常用ディーゼル発電機ディーゼル機関, 非常用ディーゼル発電機始動用空気系, 非常用ディーゼル発電機冷却水系)
- ・原子炉建屋 4 階 (使用済燃料プール (使用済燃料貯蔵ラックを含む))
- ・タービン建屋 熱交換器区域 1 階 非常用電気品室 (A) 設置設備 (パワーセンタ, モータコントロールセンタ)

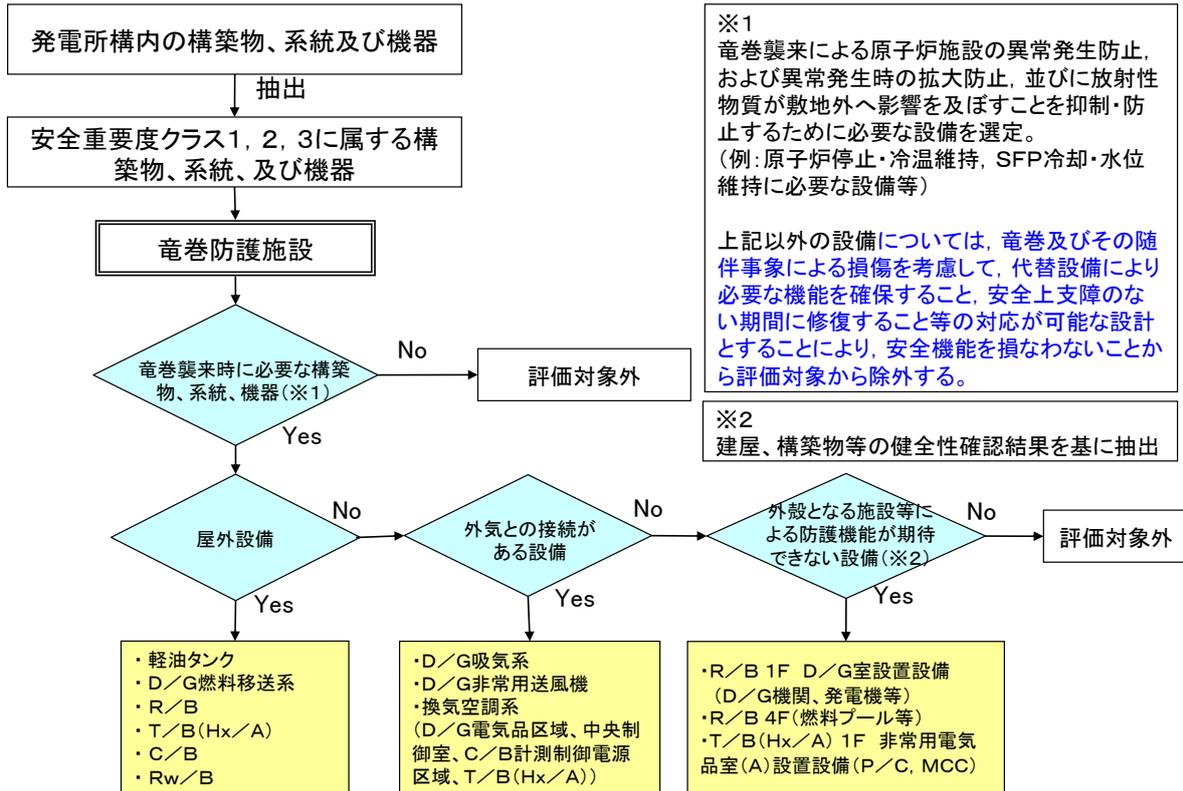


図 1.2.1 竜巻防護施設のうち評価対象施設の抽出フロー

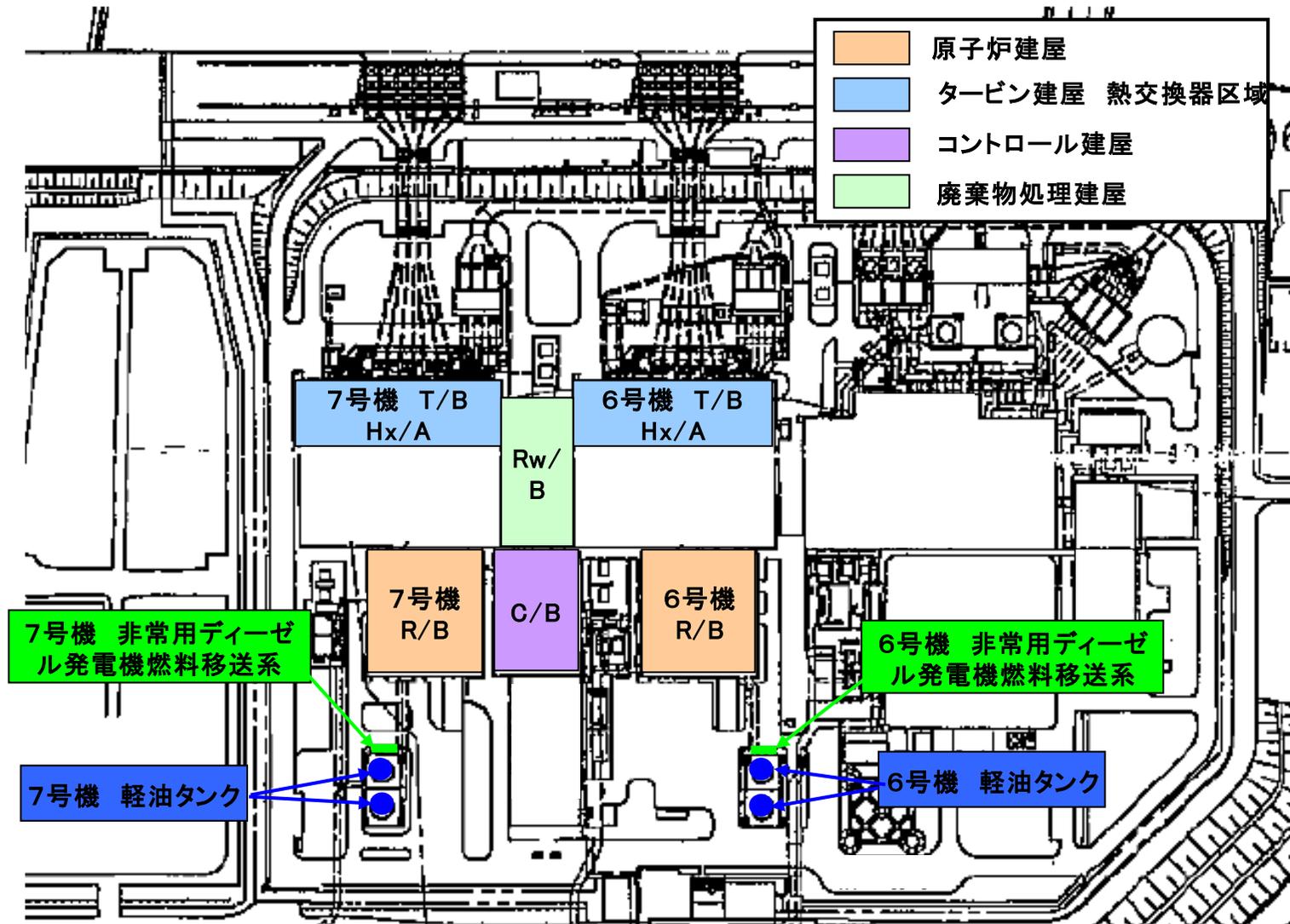


図 1.2.2 竜巻防護施設のうち評価対象施設

(2) 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設のうち評価対象施設【補足説明資料-1.4】

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

竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設としては、発電所構内の構築物、系統及び機器（安全重要度クラス1，2，3及びノンクラス）の中から、以下の①、②及び③に示す施設を抽出する。

図1.2.3に竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設のうち評価対象施設の抽出フローを、図1.2.4に評価対象施設を示す。

①機械的影響の観点での抽出

発電所構内の構築物、系統及び機器のうち、倒壊により竜巻防護施設を機能喪失させる可能性がある施設として、以下を抽出し、評価する。

(倒壊により竜巻防護施設を機能喪失させる可能性がある施設)

- ・6号機及び7号機主排気筒
- ・5号機主排気筒（6号機への影響）
- ・5号機タービン建屋
- ・サービス建屋（6・7号機共通施設）
- ・6号機及び7号機原子炉建屋天井クレーン（自号機への影響）
- ・燃料交換機（自号機への影響）

②機能的影響の観点での抽出

発電所構内の構築物、系統及び機器のうち、屋外にある竜巻防護施設の付属設備として、以下を抽出し、評価を実施する。

(屋外にある竜巻防護施設の付属設備)

- ・非常用ディーゼル発電機排気管
- ・非常用ディーゼル発電機排気消音器
- ・非常用ディーゼル発電機ディタンクミスト管

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、竜巻随伴事象の影響により竜巻防護施設を機能喪失させる可能性がある施設として、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竜巻防護施設の機能喪失させる可能性がある施設)

- ・溢水により竜巻防護施設を機能喪失させる可能性のある設備（純水タンク）

- ク、ろ過水タンク、NSD 収集タンク、苛性ソーダ貯槽、硫酸貯槽)
- ・火災発生により竜巻防護施設の機能を喪失させる可能性がある設備 (少量危険物倉庫、変圧器)

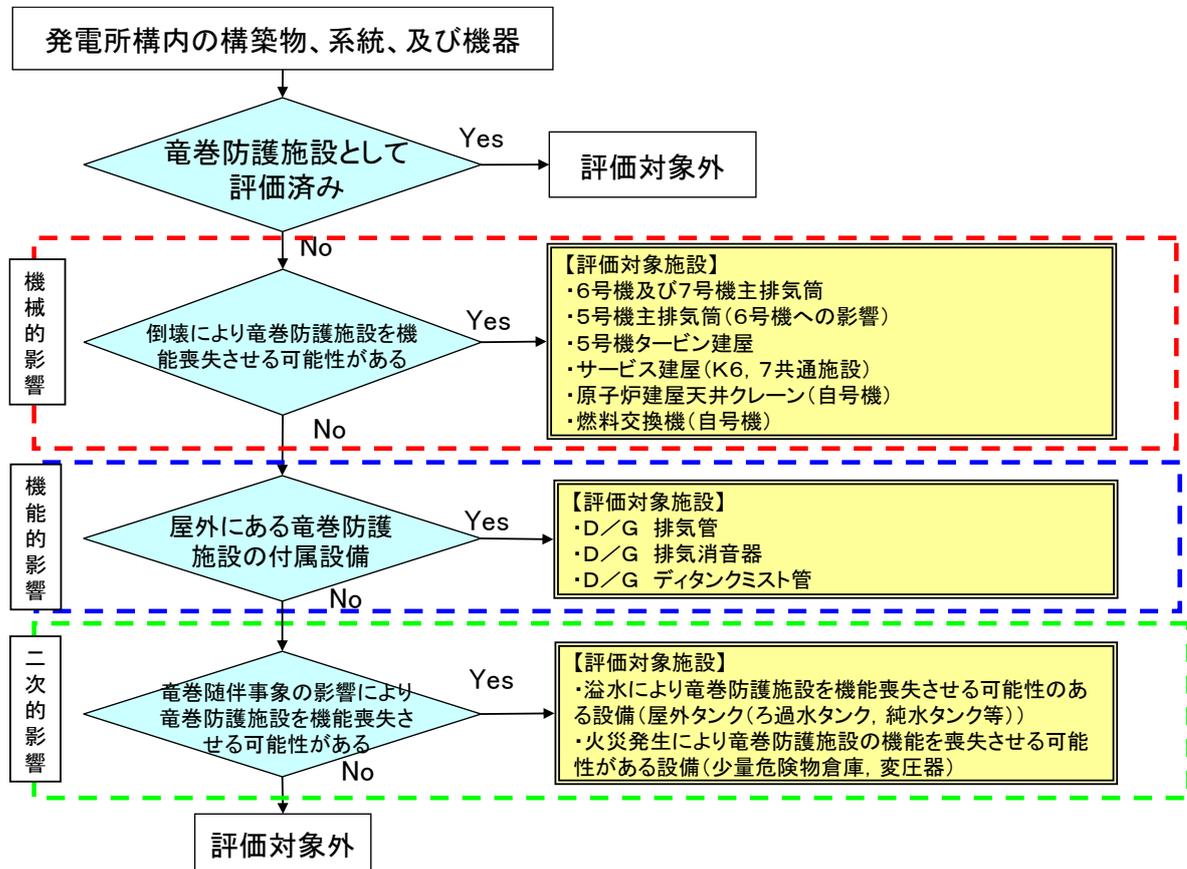


図 1.2.3 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設のうち
評価対象施設の抽出フロー

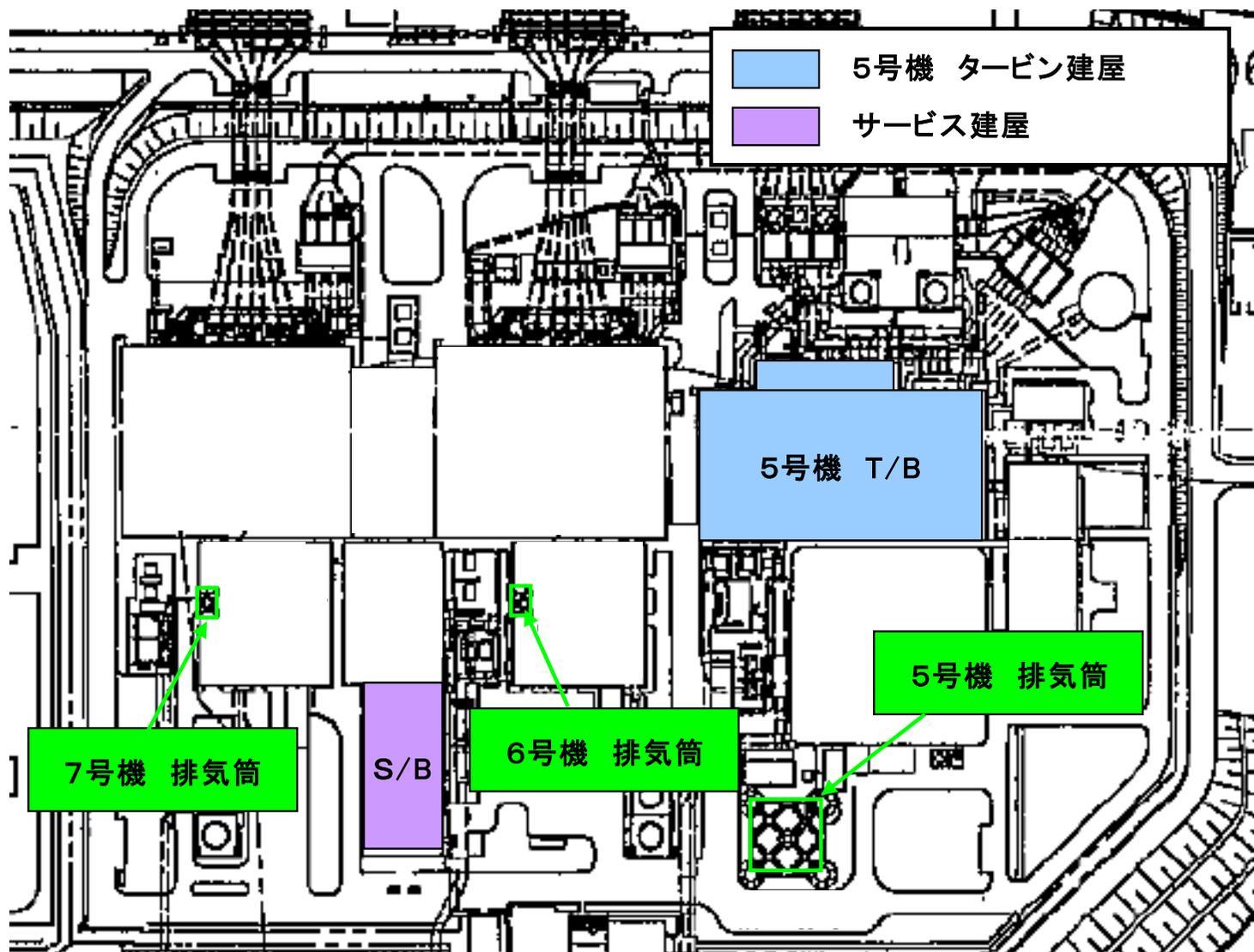


図 1.2.4 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設のうち評価対象施設

1.3. 評価の基本的な考え方

1.3.1. 評価の基本フロー

ガイドに基づき基準竜巻，設計竜巻及び設計荷重を適切に設定するとともに，考慮すべき設計荷重に対して，抽出した評価対象施設の構造健全性評価を行い，必要に応じて対策を行うことで安全機能が維持されていることの確認を行う。図1.3.1に竜巻影響評価の基本フローを示す。

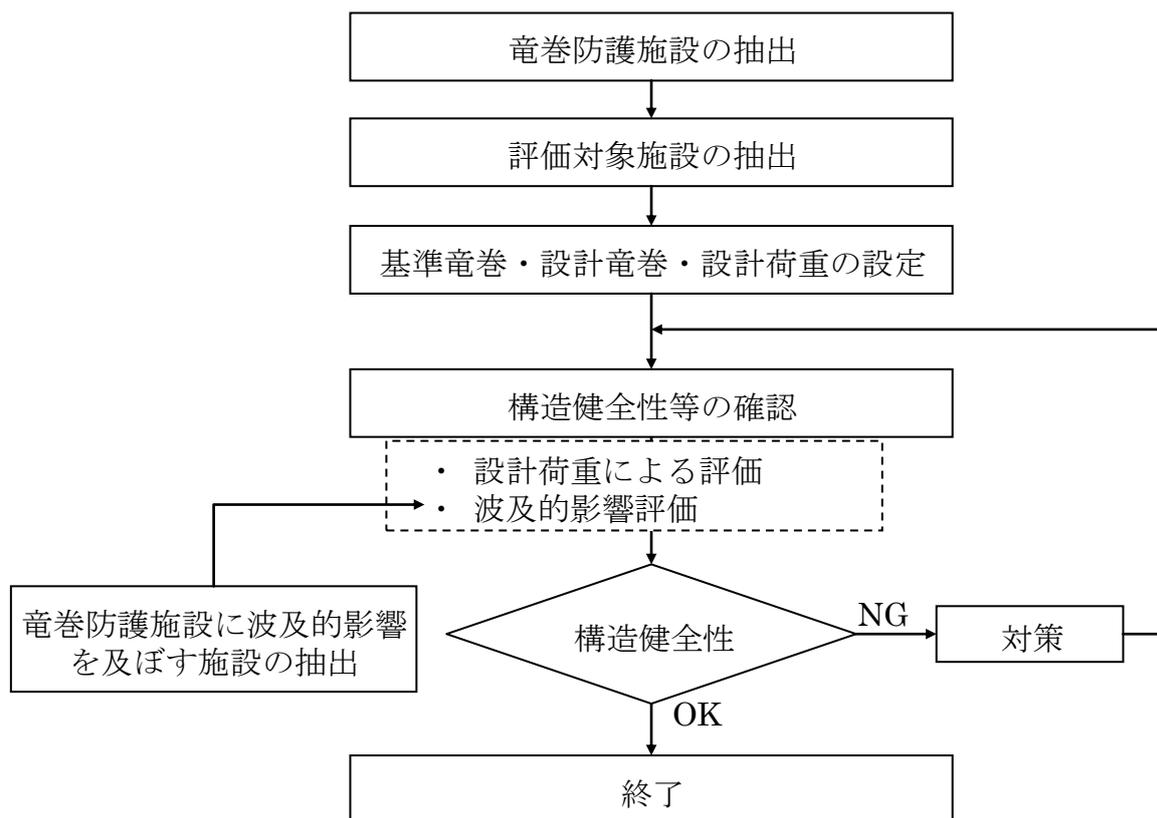


図 1.3.1 竜巻影響評価の基本フロー

1.3.2. 評価対象施設に作用する荷重

以下に示す設計荷重を適切に設定する。

(1) 設計竜巻荷重

設計竜巻荷重を以下に示す。

①風圧力

設計竜巻の最大風速による風圧力

②気圧差による圧力

設計竜巻における気圧低下によって生じる評価対象施設内外の気圧差による圧力

③飛来物の衝撃荷重

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

(2) 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重

設計竜巻荷重と組み合わせる荷重を以下に示す。

①設計対象施設に常時作用する荷重，運転時荷重等

②竜巻以外の自然現象による荷重，設計基準事故時荷重等

なお，上記（2）の②の荷重については，竜巻以外の自然現象及び事故の発生頻度等を参照して，上記（2）の①の荷重と組み合わせることの適切性や設定する荷重の大きさ等を判断する。

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

1.3.3. 施設の安全性の確認方針

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

2. 基準竜巻・設計竜巻の設定

2.1. 概要

基準竜巻及び設計竜巻の設定は、図2.1.1に示す通り竜巻検討地域の設定、基準竜巻の最大風速の設定及び設計竜巻の最大風速の設定の流れで実施する。

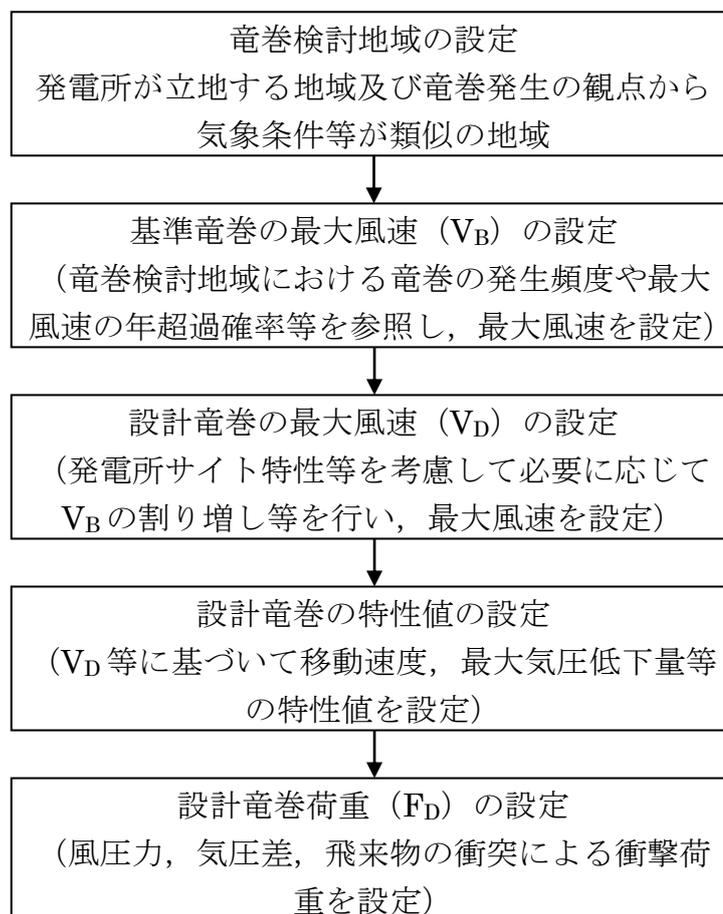


図2.1.1 基準竜巻・設計竜巻の設定に係る基本フロー

2.2. 竜巻検討地域の設定

柏崎刈羽原子力発電所に対する竜巻検討地域について、ガイドを参考に、発電所が立地する地域と気象条件の類似性の観点で検討を行い、図 2.2.1 に示すとおり北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸の海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲を竜巻検討地域に設定した（面積約 33,395km²）。以下にその妥当性確認の結果を示す。

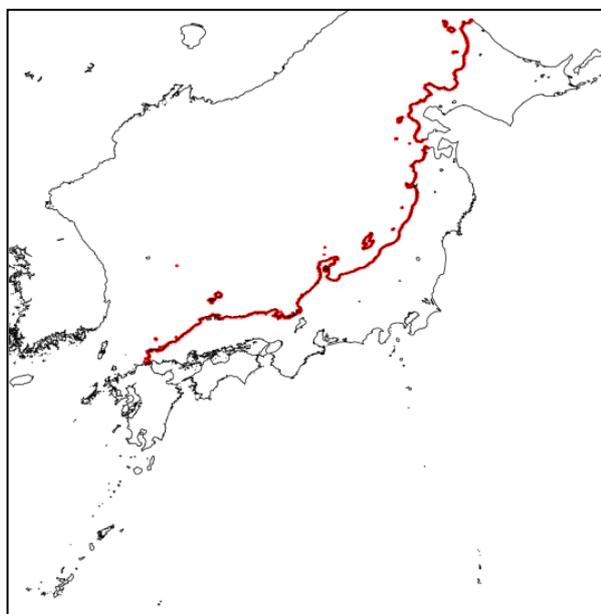


図2.2.1 竜巻検討地域（赤線部）

2.2.1. 竜巻検討地域の妥当性確認

竜巻検討地域の妥当性について、以下の観点から確認を実施した。

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

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」の考え方にに基づき、(1)、(2)の分析から竜巻検討地域を設定した。また一般的に、大気現象は時空間スケールの階層構造が見られ、ある大気現象はスケールの小さな現象を内包しているため、竜巻検討地域の設定の妥当性確認を目的として、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(3)の分析により確認した。竜巻とその関連気象の時空間スケールを図 2.2.1.1 に、検討の流れを示したフローを図 2.2.1.2 に示す。

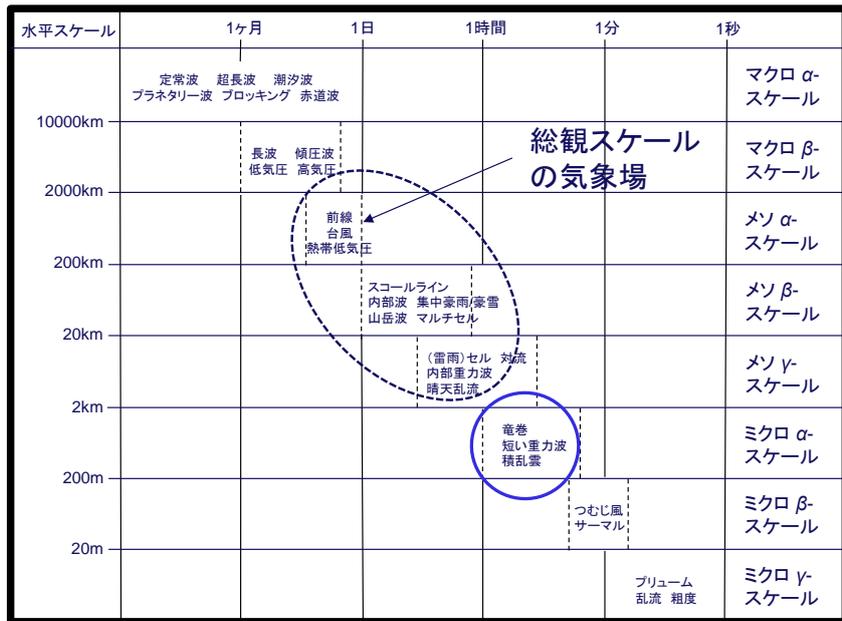


図 2. 2. 1. 1 竜巻とその関連気象の時空間スケール

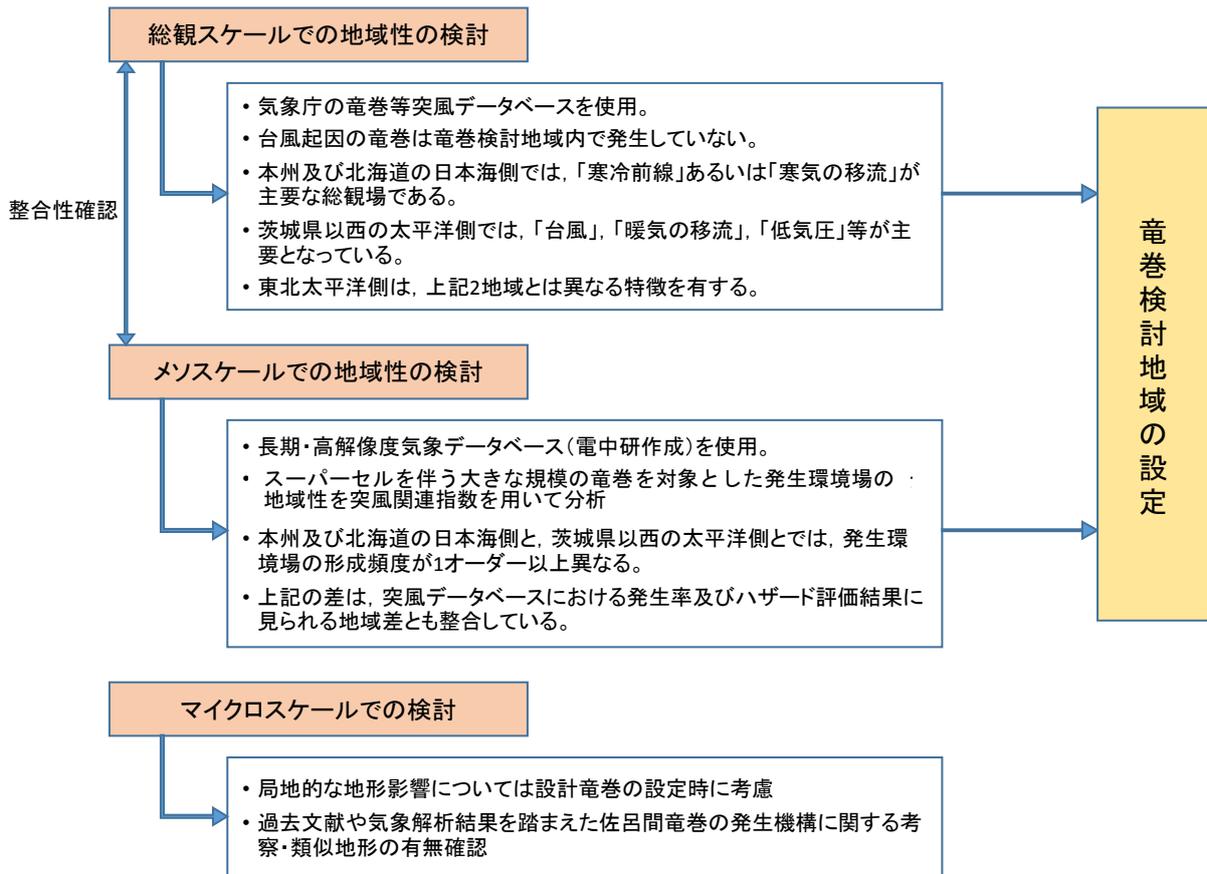


図 2. 2. 1. 2 竜巻検討地域の検討フロー

2.2.2. 総観場の分析に基づく地域特性の検討

気象庁竜巻データベースでは、竜巻を発生させた総観場を約 40 種に分類しているが、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」を参考に、竜巻を発生させる親雲の発生要因を考慮して 7 種に再編し、発生分布の特徴を分析した。表 2.2.2.1 に総観場の分類法と発生分布の特徴を示す。また、図 2.2.2.1 に総観場ごとの竜巻発生地点の分布、図 2.2.2.2 に F2 以上の竜巻発生箇所を示す。

分析の結果、竜巻発生要因となる気象条件の観点で、以下のような地域特性があることを確認した。

- ① 太平洋側では台風起因の大きな竜巻が多く発生しているのに対し、九州を除く日本海側地域や北海道では発生していない。（図 2.2.2.1 (a)）
また、台風は北上するにつれて衰弱しやすい特性を有していることから、仮に台風起因の竜巻の発生した場合も、規模の大きな竜巻の発生可能性は低いと考えられる。
- ② 温帯低気圧や季節風（夏）起因の竜巻は全国で発生しているが、規模的には太平洋側で F3 が発生しているのに対し、日本海側では F2 が最大となっている。（図 2.2.2.1 (b), (c)）
- ③ 季節風（冬）起因の竜巻は、九州を除く日本海側地域に多く発生している。規模的には、東北地方の日本海側及び北陸地方では F2 竜巻が 1 件発生しているのみで、F3 竜巻は発生していない。（図 2.2.2.1 (d)）

図 2.2.2.3 にも示すとおり、日本海側と太平洋側では竜巻発生要因となる気象条件（総観場）が大きく異なっており、竜巻検討地域を日本海側とすることの妥当性が確認できた。

表 2.2.2.1 総観場の分類法

総観場	気象庁 DB の分類	特徴
台風	台風	台風を取り巻く雲が竜巻を発生させる。 関東以西の太平洋側で発生頻度が高く、F3 竜巻も多くみられる。
温帯低気圧	南岸低気圧，日本海低気圧，二つ玉低 気圧，東シナ海低気圧，オホーツク海 低気圧，その他(低気圧)，寒冷前線， 温暖前線，閉塞前線	寒気と暖気が接し傾圧不安定による組織 的な雲が形成する環境場。主に南からの下 層の暖湿流が親雲の発達に重要な働きを するため，暖湿流が山岳等で遮られない関 東以西の太平洋側で発生頻度が高く，F3 竜巻も見られる。 日本海側での頻度は比較的low。
季節風(夏)	暖気の移流，熱帯低気圧，湿舌，太平 洋高気圧	暖湿流が主要因で親雲を形成する環境場。 関東以西の太平洋側や内陸で多く確認さ れている。
季節風(冬)	寒気の移流，気圧の谷，大陸高気圧， 季節風	大気上層に寒気が流入することで大気が 不安定になり，竜巻の親雲が形成する環境 場。寒気は北～西から移流することが多い ため，日本海側や関東以北で発生頻度が高 い。
停滞前線	停滞前線，梅雨前線，前線帯，不安定 線，その他(前線)	南からの暖湿流により親雲が形成されや すく，関東以西の太平洋側や内陸で発生頻 度が高い。
局地性	局地性擾乱，雷雨(熱雷)，雷雨(熱雷 を除く)，地形効果，局地性降水	局地的な循環により親雲が形成する環境 場。内陸で発生頻度が高い。
その他	移動性高気圧，中緯度高気圧，オホー ツク海高気圧，帯状高気圧，その他(高 気圧)，大循環異常，その他	上記に当てはまらない環境場。全体的に個 数は少ない。

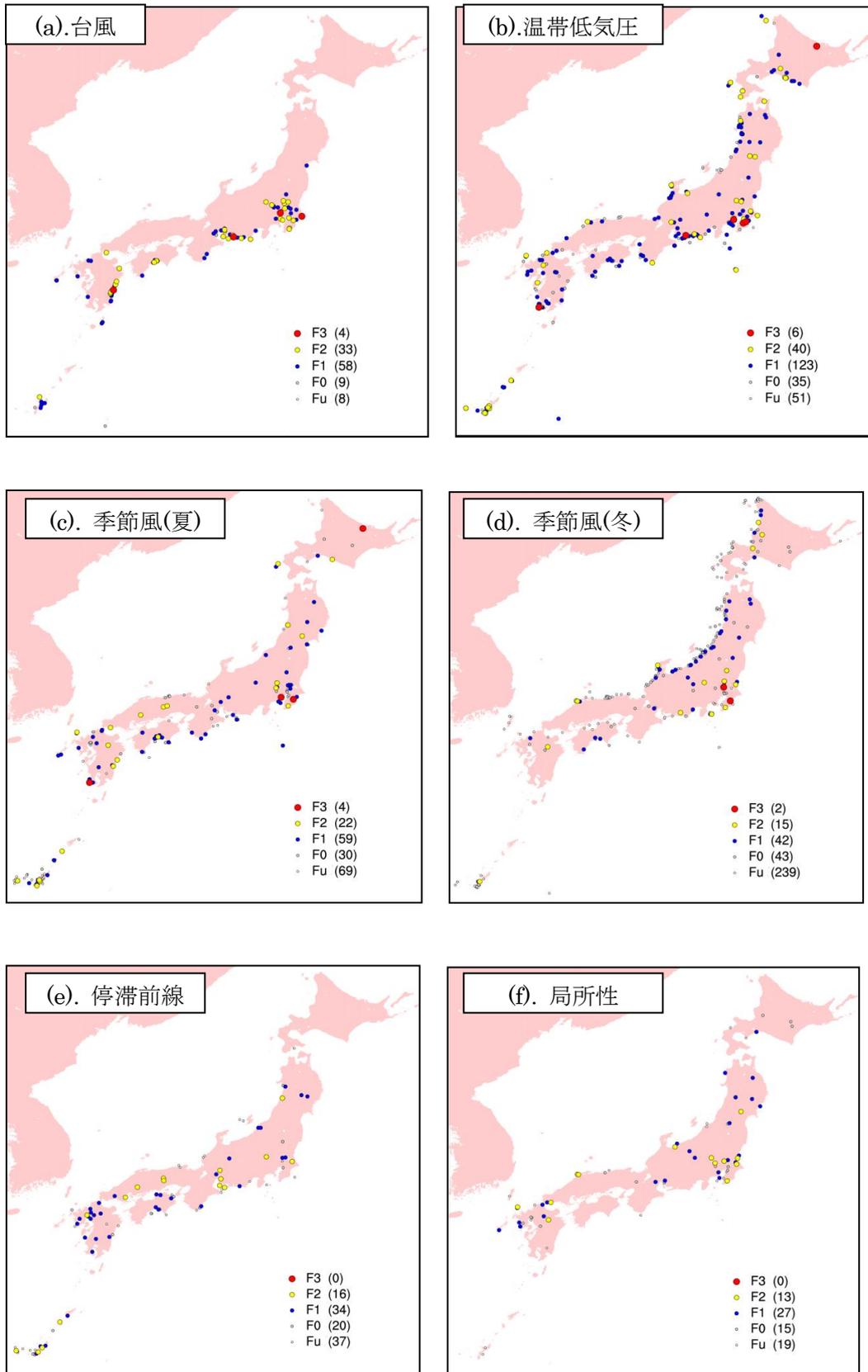


図 2.2.2.1 総観場ごとの竜巻発生地点の分布(1961年～2012年)
 (気象庁データベースのデータをもとに作成)

2.2.3. 過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の検討

日本で竜巻が集中する地域については、独立行政法人原子力安全基盤機構の「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」に、全国 19 個の竜巻集中地域が示されている。

図 2.2.3.1 に示す通り、柏崎刈羽原子力発電所は、竜巻集中地域④（新潟県・富山県）に立地している。従って、基本的な考え方としては柏崎刈羽原子力発電所における竜巻検討地域は、この竜巻集中地域④とすることが考えられる。

ただし、気象庁竜巻データベースによると、1961 年 1 月から 2012 年 6 月の 51.5 年間に発生が確認された竜巻の個数は竜巻集中地域④で 45 事例であり、この期間に④で観測されているもっとも強い竜巻は F1 となる。（表 2.2.3.1）

竜巻発生の影響評価の観点からすると、データ数は多い方がよく、また竜巻集中地域④以外の日本海沿岸では F2 規模の竜巻も発生しているため、竜巻検討地域として北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸を設定し、その妥当性を検討する。

なお、設定した竜巻検討地域の竜巻個数は 192 個、観測されたもっとも強い竜巻は F2 となる。表 2.2.3.2 に竜巻検討地域内での F1 を超える竜巻の観測記録を示す。

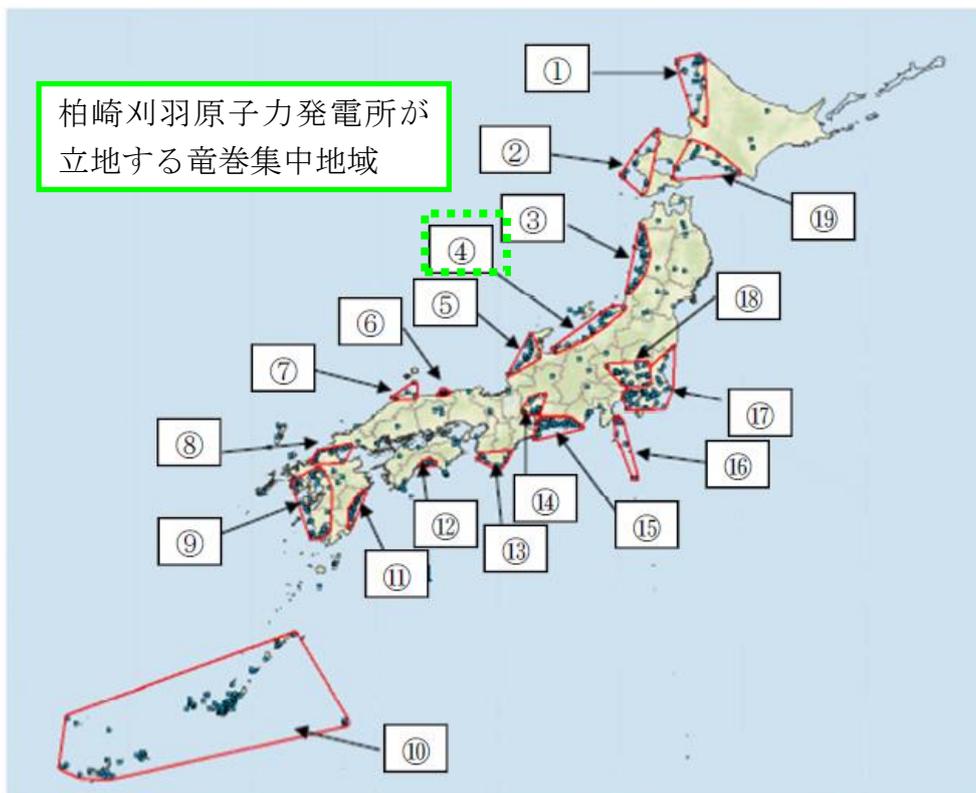


図 2.2.3.1 竜巻の発生する地点と竜巻が集中する 19 個の地域
(JNES「竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」より引用)

竜巻の地域特性を検討するため、竜巻集中地域④と竜巻検討地域、及び竜巻集中地域④に隣接する竜巻集中地域③（青森県日本海側から山形県）と⑤（石川県と福井県）における総観場の比較を行った。

図 2.2.3.2 に各地域の竜巻発生要因に関する総観場の特徴を示す。また、表 2.2.3.1 に総観場の特徴を示す。

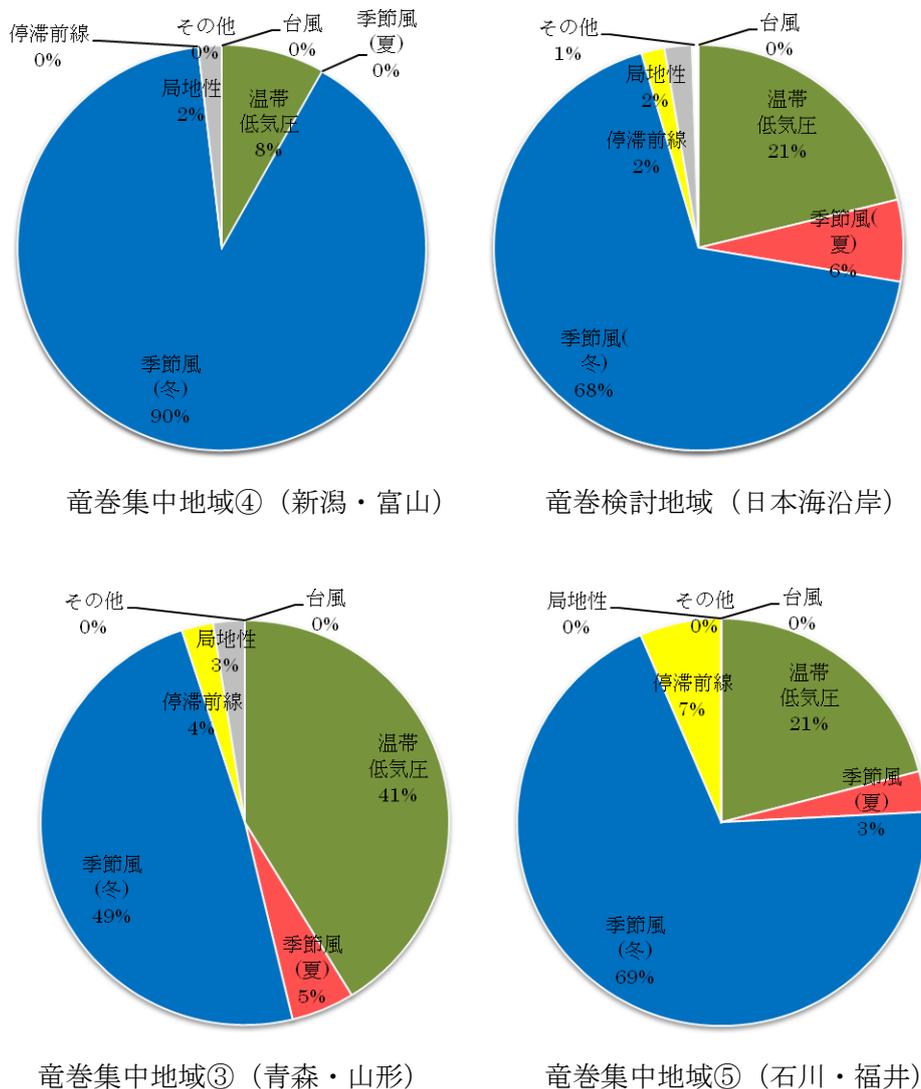


図 2.2.3.2 各地域の竜巻発生要因に関する総観場の特徴

竜巻集中地域④で発生した竜巻の総観場は，“季節風(冬)”が 90%，“温帯低気圧”が 8%を占める。竜巻検討地域では，竜巻集中地域と同様に“季節風(冬)”と“温帯低気圧”の比率が高い。これらの地域では，寒気にともなって発生した親雲に起因した竜巻が多いと推測できる。また，両地域とも，太平洋側で多くみられる台風起源の竜巻は今のところ確認されていない。

また，竜巻集中地域④に隣接する竜巻集中地域③と⑤については，温帯低気圧の割合は竜巻検討地域④よりもやや高いものの，やはりどちらの地域も“季節風(冬)”と“温帯低気圧”が竜巻発生の主要因となっている。

以上の分析結果より，北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸を竜巻検討地域に設定することは竜巻集中地域における地域特性の観点からも妥当であると考えられる。

表 2.2.3.1 F スケールごとの総観場のまとめ.

	個 数	総観場 1 位 (比率%)	総観場 2 位 (比率%)	総観場 3 位 (比率%)	主移動方 向 (比率%)	
集 中 地 域 ④	全体	45	季節風(冬) 90%	温帯低気圧 8%	局地性 2%	東 32%
	F1	7	季節風(冬) 88%	局地性 7%	温帯低気圧 5%	東北東 43%
	F0	7	季節風(冬) 86%	温帯低気圧 14%		東, 東北東 33%
	F 不明	31	季節風(冬) 91%	温帯低気圧 8%	局地性 1%	北東 43%
	F0 以 上	14	季節風(冬) 87%	温帯低気圧 9%	局地性 4%	東北東 38%
検 討 地 域	全体	192	季節風(冬) 68%	温帯低気圧 21%	季節風(夏) 6%	東 39%
	F2	10	温帯低気圧 63%	季節風(冬) 23%	局地性 9%	北東 40%
	F1	40	温帯低気圧 51%	季節風(冬) 42%	局地性 6%	東 35%
	F0	24	季節風(冬) 65%	温帯低気圧 27%	停滞前線 4%	東 33%
	F 不明	118	季節風(冬) 81%	季節風(夏) 9%	温帯低気圧 6%	東 46%
	F1 以 上	50	温帯低気圧 54%	季節風(冬) 38%	局地性 6%	東 30%
F0 以 上	74	季節風(冬) 47%	温帯低気圧 45%	局地性 5%	東 31%	
集 中 ③	全体	40	季節風(冬) 49%	温帯低気圧 41%	季節風(夏) 5%	東 36%
集 中 ⑤	全体	31	季節風(冬) 69%	温帯低気圧 21%	停滞前線 7%	東 55%
太 平 洋	全体	337	温帯低気圧 29%	台風 21%	季節風(冬) 17%	北東 23%

表2.2.3.2 竜巻検討地域における竜巻の観測記録 (F1より大きい竜巻)
(気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成)

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

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

2.2.4. 突風関連指数による地域特性の検討

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

2.2.4.1. 突風関連指数を用いた竜巻予測の技術について

竜巻の主な発生メカニズムは、二つに大別されると考えられている。一つは局地的な前線（寒気団と暖気団との境界線）に伴って生じた渦が上昇流によって引き伸ばされて竜巻となるもので、比較的寿命が短く強い竜巻になりにくいとされている。もう一つは「スーパーセル」と呼ばれる、回転する継続した上昇気流域（メソサイクロン）を伴った非常に巨大な積乱雲に伴って竜巻が発生するものである。スーパーセル内では、下降流域と上昇流域が分離されるため、巨大な積乱雲が長時間持続する傾向にある。近年、ドップラーレーダーによる解析を基にした竜巻の事例調査が進んだことにより、大きな被害をもたらす強い竜巻の多くはスーパーセルに伴って発生することが判明している。現状、竜巻を直接予測することは困難であるが、大規模竜巻の発生と関係が深いスーパーセルの発生環境を予測することにより竜巻発生を間接的に予測できる。以下に、竜巻発生予測について、突風関連指数を適用している例を示す。

気象庁での突風関連指数の適用状況

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

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

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

竜巻発生確度ナウキャストにおけるデータ等の流れを図 2.2.4.1 に示す。竜巻発生確度ナウキャストは最新の観測・解析データをもって短いリードタイムの予測を迅速に行うことが主目的のため、レーダプロダクトに重みを置いている。また、小さな竜巻も見逃しなく予測できるような説明変数として突風関連指数を選択している。

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

海外での突風関連指数の適用状況

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

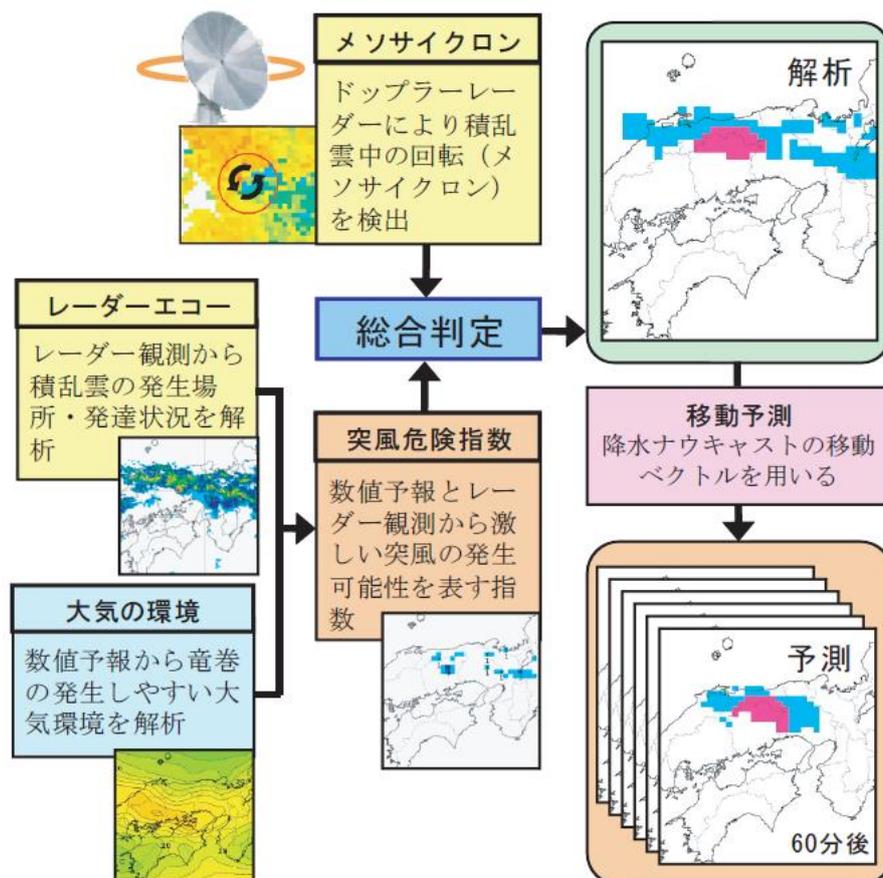


図 2. 2. 4. 1 竜巻発生確度ナウキャストの解析・予測技術

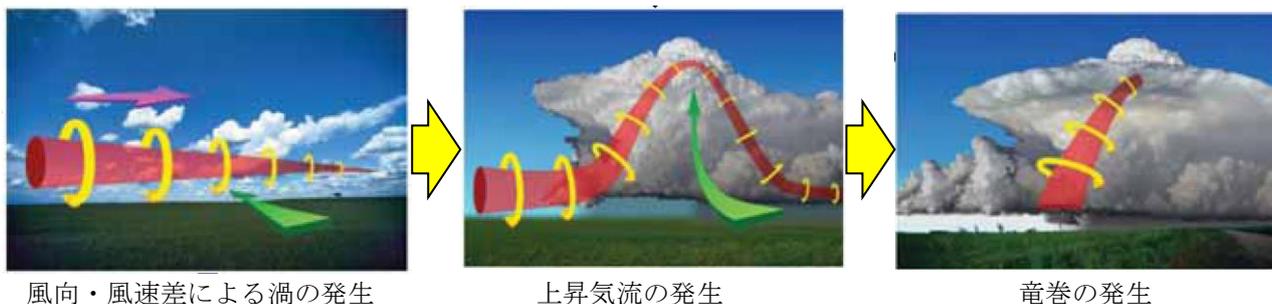
2. 2. 4. 2. 検討に用いる突風関連指数について

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つて気象庁等でも活用されていることを述べてきた。ここでは、本検討に用いる突風関連指数について説明する。

図 2. 2. 4. 2 に竜巻の発生メカニズムを示す。スーパーセルが発生しやすい環境場として、大気下層の鉛直シア（異なる高度間での風向・風速差）と、強い上昇気流を起こすきっかけとしての不安定な大気場が必要である。本検討では、大気不安定度を表す指標として、「CAPE」、鉛直シアに伴って発生する水平渦度が親雲に取り込まれる度合いを表す指標として「SReH」を採用し、両者の指標が同時に高くなる頻度につい

て、地域的な特徴を確認する分析を行った。また、両者を掛け合わせた指標である EHI による分析も行い、SReH・CAPE の同時超過頻度分析との比較を行った。SReH, CAPE, EHI については、竜巻の発生実態を解明する研究において国内外で広く利用され、竜巻発生環境場との関連づけ等の知見が多く蓄積されており、気象庁での竜巻予測に用いる突風関連指数の中でも主な指標として紹介されているため、本検討を行う上でも妥当なものと考えられる。

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



風向・風速差による渦の発生

上昇気流の発生

竜巻の発生

図 2.2.4.2 竜巻の発生メカニズム

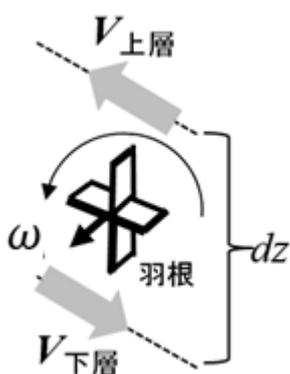
(1) SReH (Storm Relative Helicity : ストームの動きに相対的なヘリシティ)

風向・風速差により発生した渦度が親雲に取り込まれる度合いを示し、値が大きいほど、積乱雲がスーパーセルに発達しやすい。(図 2.2.4.3)

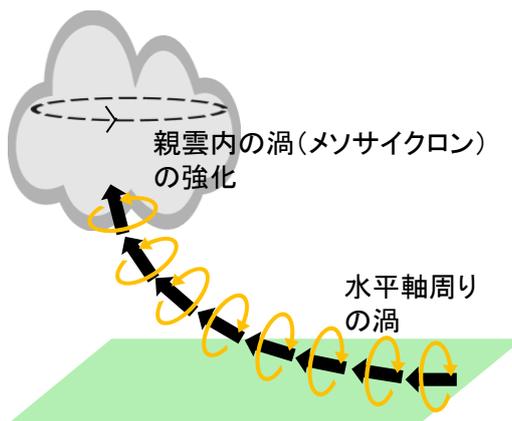
$$\text{SReH} = \int_{\text{地上}}^{\text{高度}3\text{km}} (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega} dz$$

V : 水平風速ベクトル C : ストームの移動速度

ω : 鉛直シアに伴う水平渦度



水平渦度生成に関する模式図



水平渦度の親雲への輸送に関する模式図

図 2.2.4.3 SReH の算出概念

(2) CAPE (Convective Available Potential Energy : 対流有効位置エネルギー)
 上昇気流の発達しやすさを表し、値が大きいほど背の高い積乱雲に発達し
 うるため、大気的不安定度の指標となる。(図 2.2.4.4)

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

g : 重力加速度 θ_e' : 下層の空気塊を持ち上げた際の相当温位
 θ_e : ストーム周囲の相当温位 dz : 鉛直方向の層厚

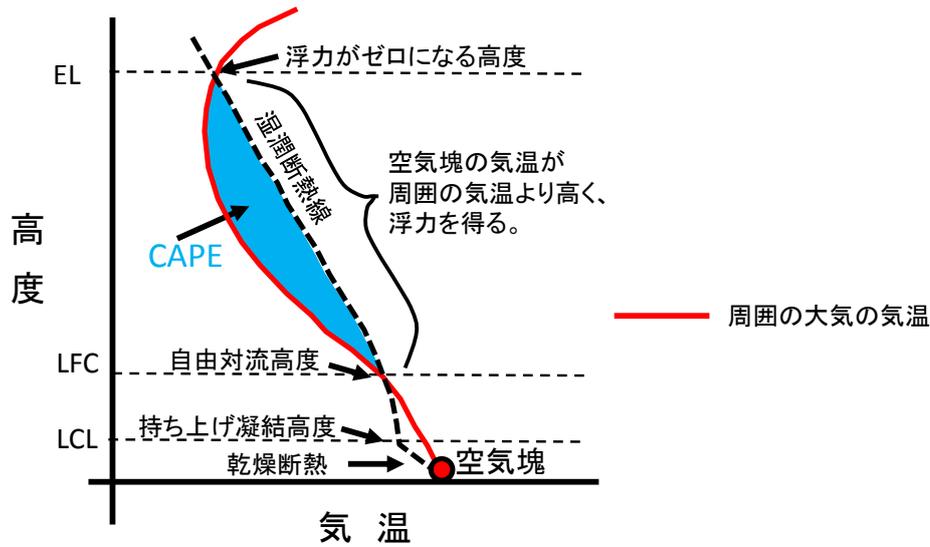


図 2.2.4.4 CAPE の算出概念

(3) EHI (Energy Helicity Index)

SReH と CAPE の複合的な突風関連指数。スーパーセルや竜巻の発生し易さを経験的に指標化したもので、米国では CAPE 単独や SReH 単独に比べると竜巻発生との相関関係が高いとされている。

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

(参考) 相当温位

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

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

相当温位は、空気塊に含まれる水蒸気の持っている潜熱（水蒸気が凝結する際に空気塊の温度が上昇）の影響も考慮された温位である。

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

2. 2. 4. 3. 突風関連指数の地域特性

これまでに発生した F3 竜巻に対する突風関連指数の分析結果を図 2. 2. 4. 5 に示す。WRF モデル (Weather Research and Forecasting model) と呼ばれる数値気象モデルを用いて当時の気象場を解析 (再現) し, それをもとに突風関連指数を算出している。図 2. 2. 4. 5 をみると, 季節によって CAPE の値が大きくことなるものの, F3 竜巻事例では共通して SReH と CAPE の両方が大きくなる傾向が見られた。

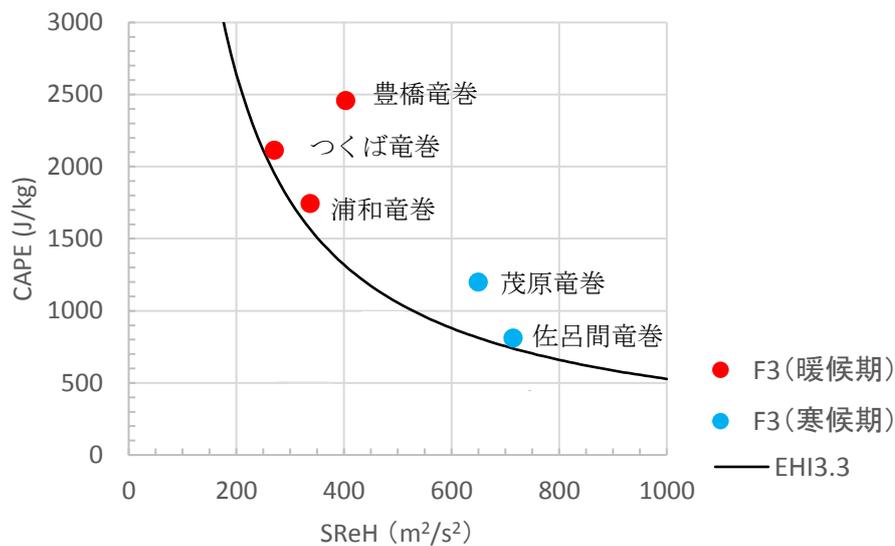


図 2. 2. 4. 5 F3 竜巻における SReH と CAPE の関係

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 F3 規模の竜巻は, 観測データの乏しい 1971 年の 1 事例を除きスーパーセルを伴っていたことが報告されている。

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

2. 2. 4. 4. 突風関連指数の同時超過頻度による地域性の検討

SReH と CAPE の閾値については, 図 2. 2. 4. 5 の F3 竜巻のデータをもとに, 実際の竜

巻発生地点と対応するよう，下記のように設定した。また，CAPE の閾値については，緯度・季節で絶対値が大きく変わるため，5月～10月（暖候期）及び11月～4月（寒候期）に分けて閾値を設定した。

[5月～10月（暖候期）] SReH : 250 m²/s², CAPE : 1600 J/kg

[11月～4月（寒候期）] SReH : 250 m²/s², CAPE : 600 J/kg

図 2.2.4.6 は，1961 年～2010 年までの 50 年間にわたって 1 時間毎に解析されたデータをもとに，SReH と CAPE の同時超過頻度分布をマップ化したものである。また，気象庁竜巻データベースで確認された F2-F3 竜巻および F3 竜巻の発生箇所を図 2.2.4.7 に示す。

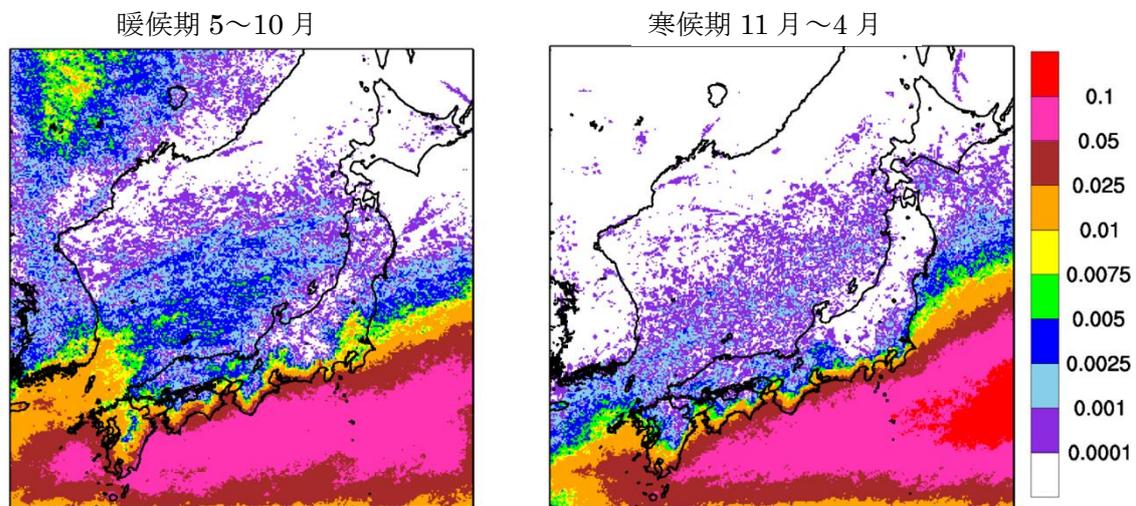


図2.2.4.6 F3規模以上を対象としたSReH, CAPE同時超過頻度分布（単位：％）

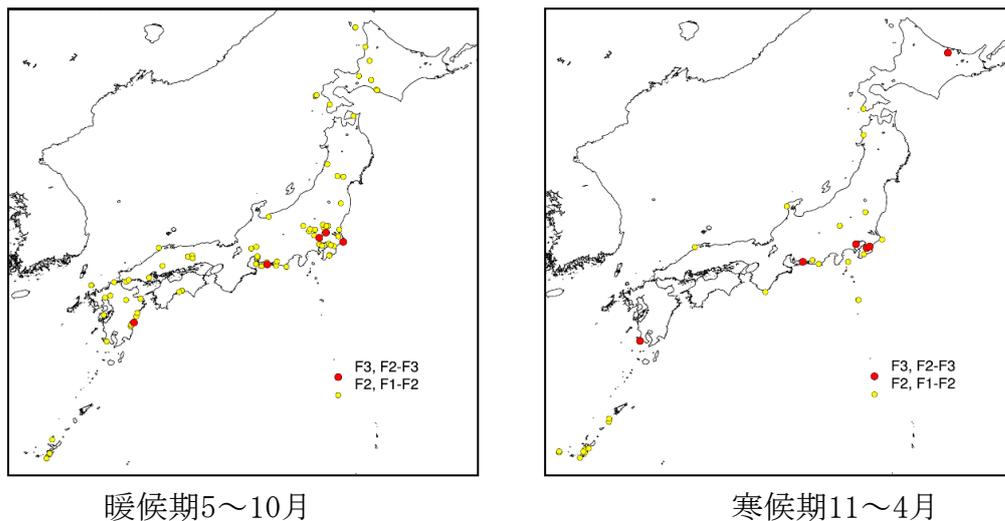


図2.2.4.7 F2規模以上の発生箇所
（気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成）

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図 2.2.4.8 に示す。SReH, CAPE の同時超過頻度分布（図 2.2.4.6）に対応した結果となっており、EHI を用いて通年レベルの評価を行った場合でも地域特性がはっきり表れている。

以上により、CAPE, SReH, EHI について F3 以上を想定した特定の閾値を設けた場合の分析を実施したが、突風関連指数については不確実性が存在するため、EHI:3.0 及び 3.6 を設定した場合についても同様の地域性が現れることを確認した。（図 2.2.4.9）

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。【補足説明資料 2.1 付録 E 補足 2-1-44～47】

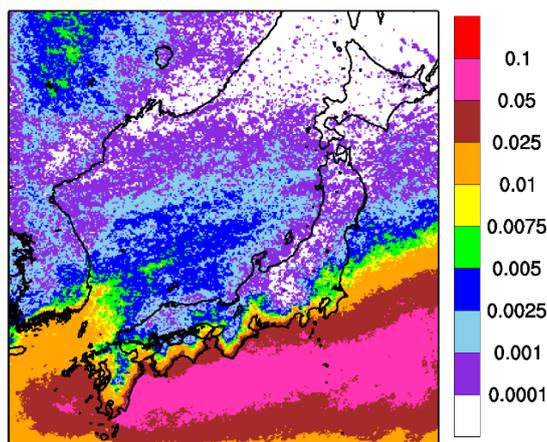


図2.2.4.8 EHIの超過頻度分布（単位：%。EHI閾値:3.3）

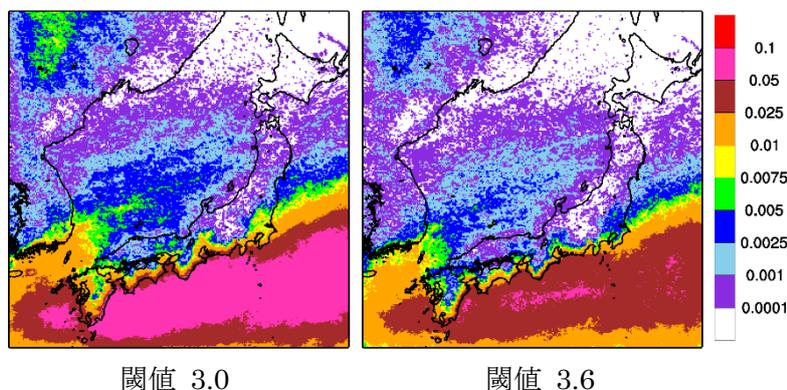


図 2.2.4.9 EHI の超過頻度分布（単位:%。EHI 閾値は左から、3.0, 3.6）

突風関連指数による、大規模な竜巻形成につながる環境場の発生頻度分析を行った結果、柏崎刈羽原子力発電所の立地地域は、茨城県以西の太平洋沿岸よりも1～2オーダー以下の頻度となることが分かった。

スーパーセルに伴って発生する大規模な竜巻形成につながる環境場の発生頻度分布の観点からも、太平洋側と竜巻検討地域で大きな地域特性の違いがあることを確認した。

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

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

[11月～4月 (寒候期)] SReH : 200 m²/s², CAPE : 350 J/kg

EHI を用いる場合の閾値 EHI : 1.5

SReH, CAPE の同時超過頻度分析の結果を図 2.2.4.10 に、EHI の超過頻度分布を図 2.2.4.11 に示す。

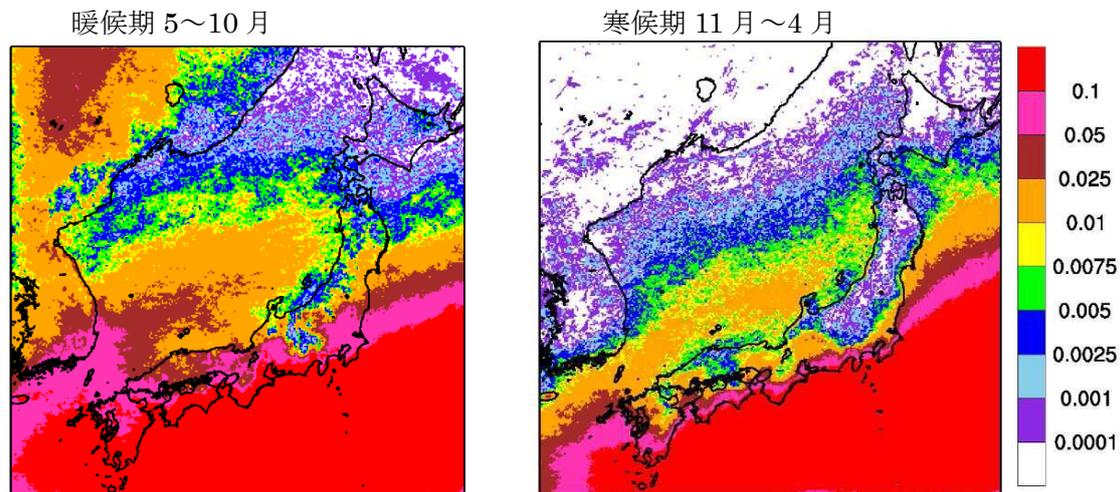


図2.2.4.10 F2規模のSReH, CAPE同時超過頻度分布 (単位: %)

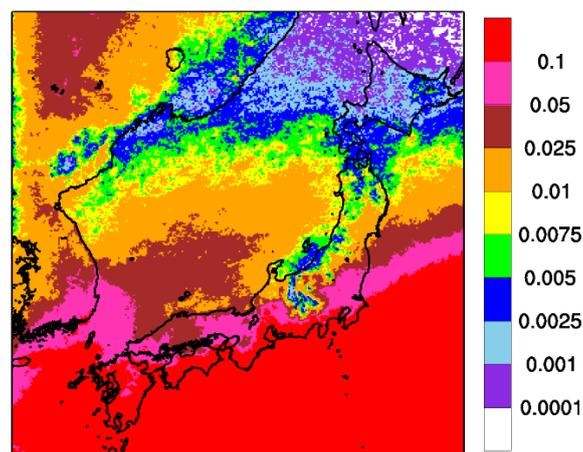


図2.2.4.11 EHIの超過頻度分布 (単位: %)

F2 規模相当の閾値での同時超過頻度を解析した結果をみても、柏崎刈羽原子力発電所が立地する地域は、太平洋側と比較して頻度が低くなっていることが確認できる。

日本海側で大きな竜巻が発生しにくい原因の一つとしては、太平洋側から暖かく湿った空気が、日本列島の中央部に存在する高く複雑な山岳域を湿潤不安定な状態のまま乗り越えてくる事が出来ないため、日本海側では大きな竜巻を引き起こす環境場が形成しにくくなっていることが考えられる。

2.2.4.5. 佐呂間町で発生した竜巻について

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

佐呂間竜巻は、太平洋沿岸で発生した竜巻と比較すると、

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

佐呂間竜巻の発生した地域では、太平洋側からの暖湿流が小高い丘を越えて流入するような地形になっており、平野部の冷気流とぶつかることにより大きな上層・下層間の風向差が生じる環境場となっていた。（図 2.2.4.12，図 2.2.4.13）

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

これらの発生メカニズムについて、図 2.2.4.14 に模式的に示す。

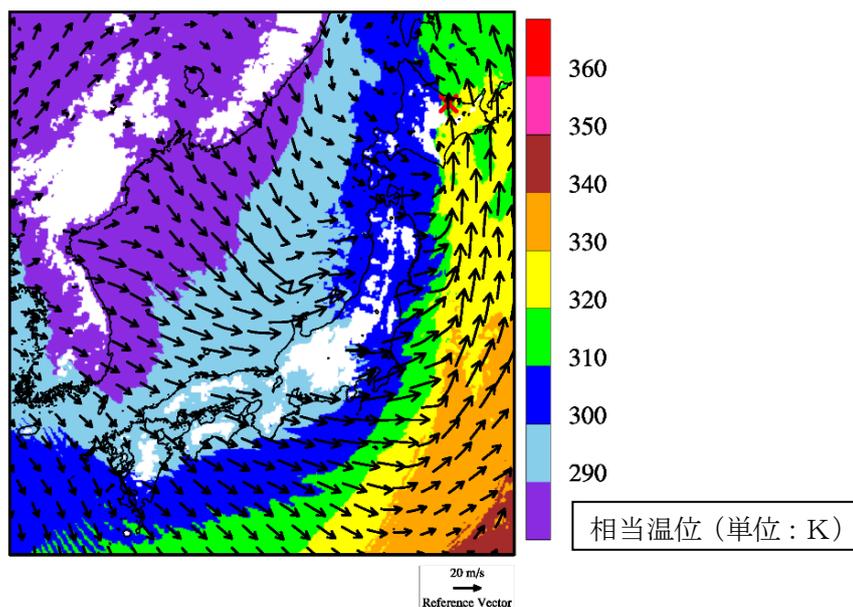
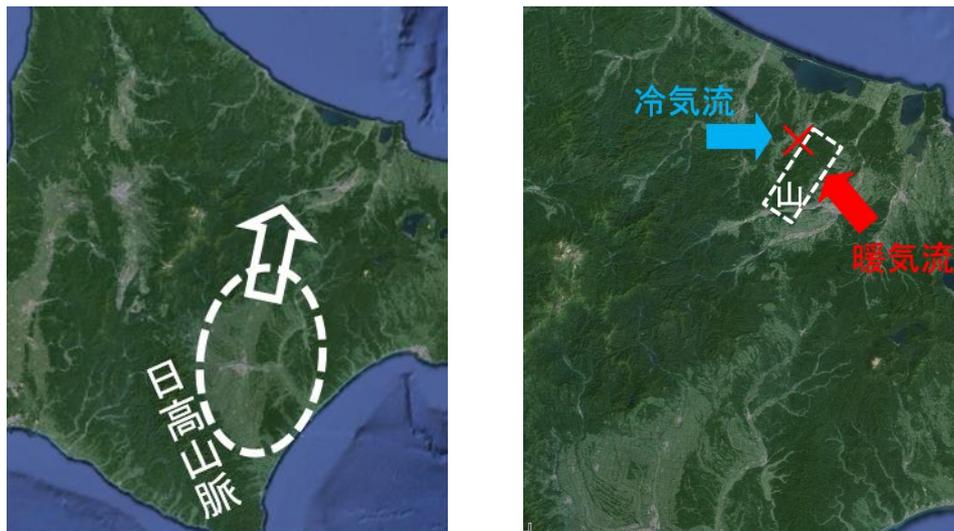


図 2.2.4.12 佐呂間竜巻発生時の風向・風速および相当温位の分布（海拔 500 m 高度）



親雲の発生位置（点線内）と移動方向 竜巻の発生位置（×）と影響が指摘される山（点線部）

図 2. 2. 4. 13 親雲の発生箇所と移動方向（左）および竜巻の発生箇所（右）

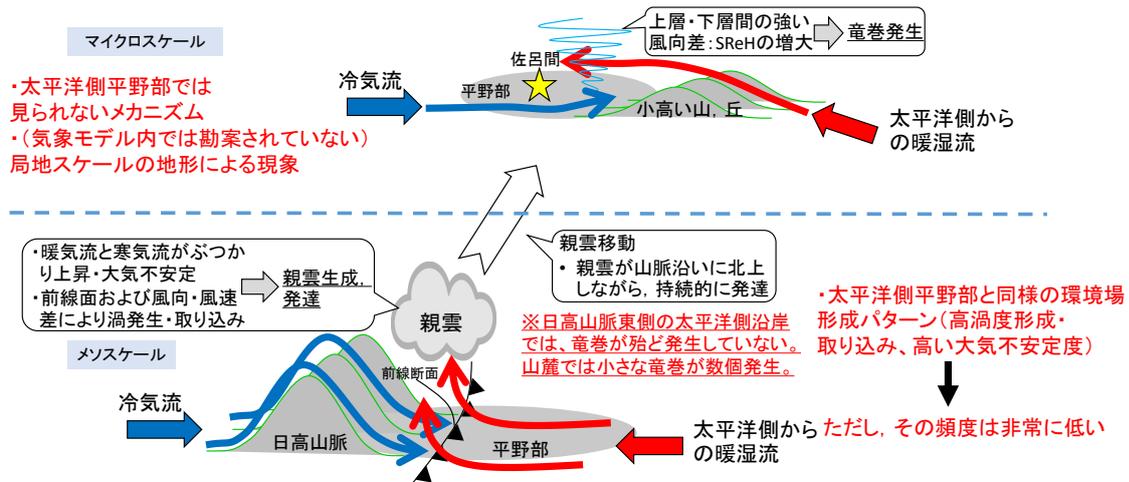


図 2. 2. 4. 14 佐呂間竜巻の発生メカニズムに関する模式図

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

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

考慮する際のポイントは、以下の 2 点である。

- ・ 太平洋側からの暖湿流が高標高山岳等に遮断されずに直接流入しうる地域で

ある。

- ・ 近隣地形（数キロ程度四方の範囲）において、（太平洋側からの）暖気流の流入する風上側に尾根状の丘・山が存在すること。

その観点で柏崎刈羽原子力発電所の地形を確認すると、以下の様に整理できる。

- ・ 本州中央部に高標高山岳が存在するため、太平洋側から暖湿流が直接流入しない。（図 2. 2. 4. 15）
- ・ 日本海側で発達する気流は、主に西から東へ移動する傾向が強く、気流の流入する風上側（海側）に尾根状の丘，山が存在しない。

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

以上の検討結果より、竜巻発生要因及び発生する竜巻の規模には地域性があることが示され、その観点から柏崎刈羽原子力発電所の竜巻検討地域として、北海道から山陰地方にかけての日本海沿岸を竜巻検討地域として設定することが妥当であることが確認できた。

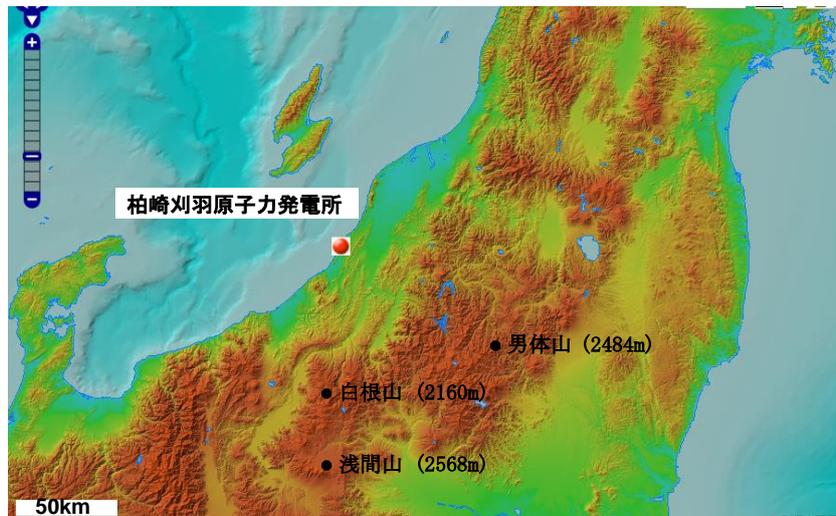


図2. 2. 4. 15 柏崎刈羽原子力発電所周辺地形図

2.3. 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定

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

2.3.1. 過去に発生した竜巻による最大風速 (V_{B1})

表2.3.1に竜巻検討地域で過去に発生したF1より大きい竜巻の観測記録を示す。

表2.3.1より竜巻検討地域における過去最大竜巻はF2であり、Fスケールと風速の関係より風速は50～69m/sである。また、2.3節に基づく検討結果から、日本海側に設定した竜巻検討地域は、太平洋側と比較して総観場及びF3規模の竜巻発生のは易さの観点から地域性が異なることが説明できる。したがって、竜巻検討地域で過去に発生した最大竜巻F2の風速範囲の上限値69m/sを V_{B1} とする。

表2.3.1 竜巻検討地域における竜巻の観測記録 (F1より大きい竜巻)
(気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成)

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

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

2.3.2. 竜巻最大風速のハザード曲線の求め方【補足説明資料 2.3(1)】

竜巻最大風速のハザード曲線は、気象庁「竜巻等の突風データベース」より竜巻検討地域における竜巻の観測記録を抽出・評価し、既往の算定法(Wen&Chu及びGarson et. al)に基づき算定した。具体的な算定方法は、JNES委託研究成果報告書[※]を参考とし、図2.3.2.1に示すフローに従いハザード曲線を算定した。なお、ハザード曲線は、竜巻検討地域の竜巻特性を適切に考慮できる海岸線から海側、陸側それぞれ5kmの範囲内で算定した。加えて、竜巻検討地域において過去に発生した竜巻は、海上発生のみでFスケール不明の竜巻が半数以上を占める偏った発生となっていることや竜巻発生確認数にばらつきがあることを踏まえ、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。【補足説明資料2.3参考資料3】

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

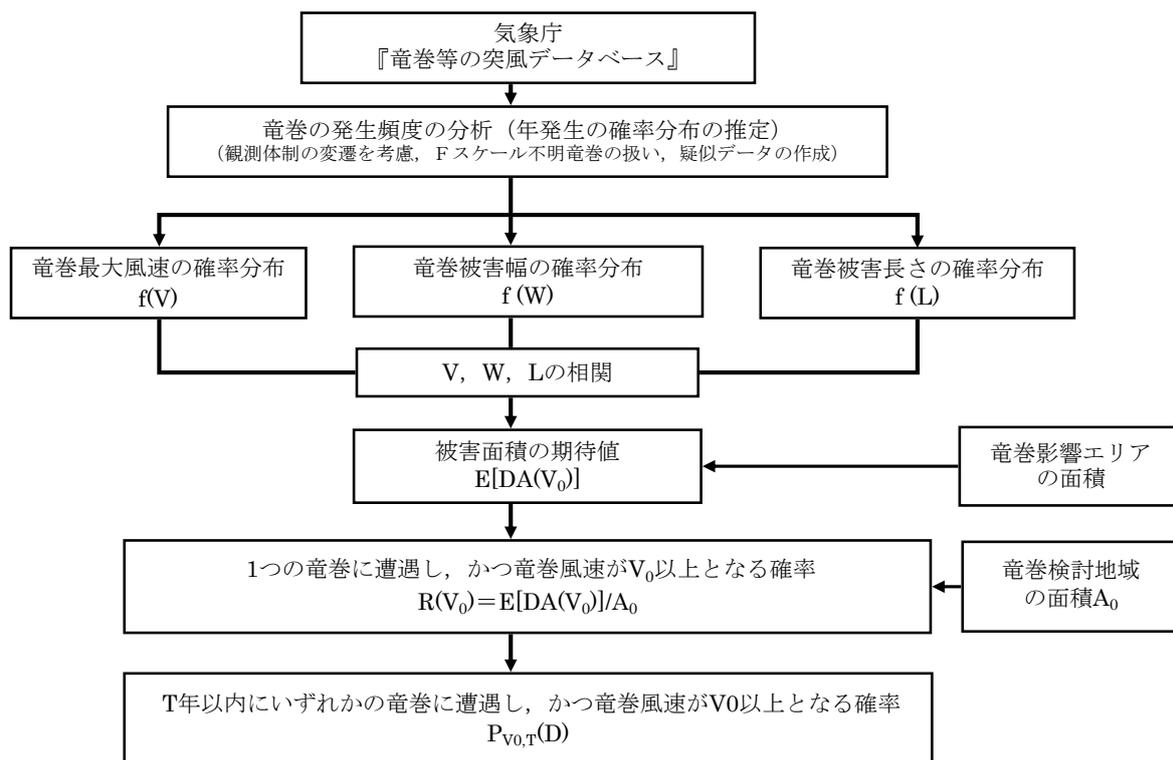


図 2.3.2.1 竜巻最大風速ハザード曲線の算定フロー

2.3.3. 海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km 全域の評価

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

2.3.4. 竜巻の発生頻度の分析【補足説明資料 2.3(2)】

気象庁「竜巻等の突風データベース」を基に、1961年～2012年6月までの51.5年間の統計量をFスケール別に算出する。なお、観測体制の変遷による観測データ品質のばらつき（図2.3.4.1参照）を踏まえ、以下の（1）～（3）の基本的な考え方に基づいて整理を行う。

- （1）被害が小さくて見過ごされやすい F0 及び F スケール不明竜巻に対しては、観測体制が強化された 2007 年以降の年間発生数や標準偏差を用いる。
- （2）被害が比較的軽微な F1 竜巻に対しては、観測体制が整備された 1991 年以降の年間発生数や標準偏差を用いる。
- （3）被害が比較的大きく見逃されることがないと考えられる F2 及び F3 竜巻に対しては、観測記録が整備された 1961 年以降の全期間の年間発生数や標準偏差を用いる。

また、F スケール不明の竜巻については、以下の取扱いを行う。

陸上で発生した竜巻（以下、「陸上竜巻」という。）及び海上で発生して陸上へ移動した竜巻については、被害があつて初めてその F スケールが推定されるため、陸上での F スケール不明の竜巻は、被害が少ない F0 竜巻に分類した。海上で発生しその後上陸しなかった竜巻（以下、「海上竜巻」という。）については、その竜巻のスケールを推定することは困難であることから、「海岸線から海上 5km の範囲における海上竜巻の発生特性が、海岸線から内陸 5km の範囲における陸上竜巻の発生特性と同様である。」という仮定に基づいて各 F スケールに分類する。

上記の基本的な考え方に基づいて観測記録を整理・推定した結果を表 2.3.4.1 に示す。

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

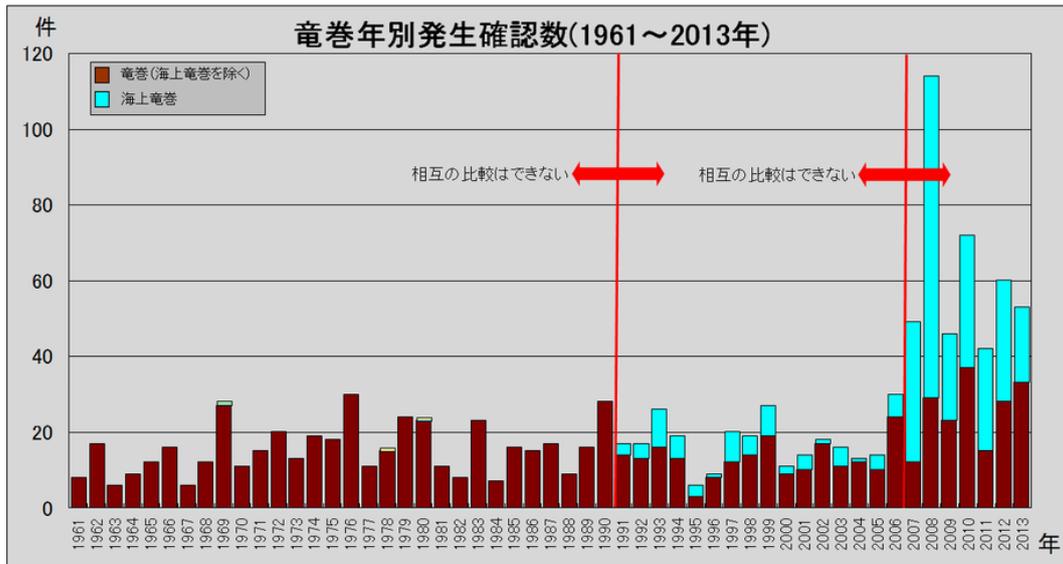


図 2.3.4.1 竜巻の年別発生確認数（気象庁 HP より）

表 2.3.4.1 竜巻発生数の解析結果

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

2.3.5. 竜巻風速，被害幅，被害長さの確率分布及び相関係数【補足説明資料 2.3(3), (4)】

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

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

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

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

また，竜巻のハザードの計算においては，2 変量あるいは 3 変量の確率分布関数を対象とするため，竜巻風速，被害幅及び被害長さについての相関係数を求めた。表 2.3.5.1 に 1961 年以降の観測データのみを用いて，竜巻風速，被害幅及び被害長さについて相関係数を求めた結果を示す。

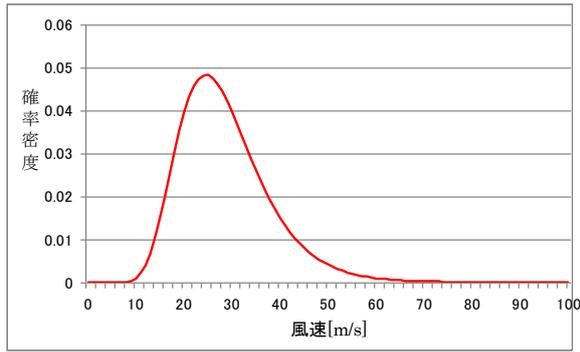


図2.3.5.1 竜巻風速の確率密度分布

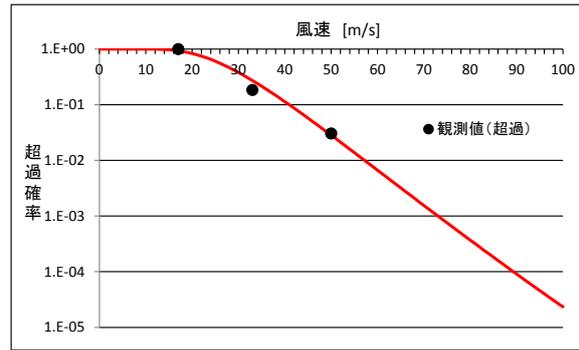


図2.3.5.2 竜巻風速の超過確率分布

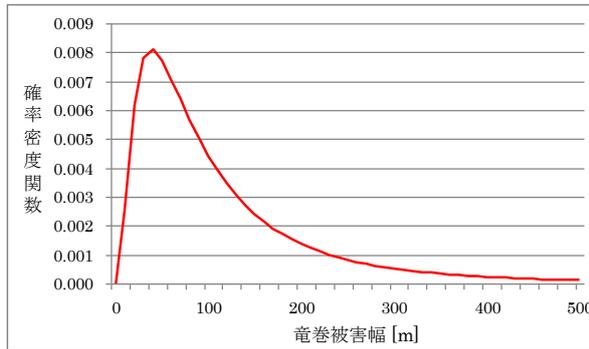


図2.3.5.3 被害幅の確率密度分布

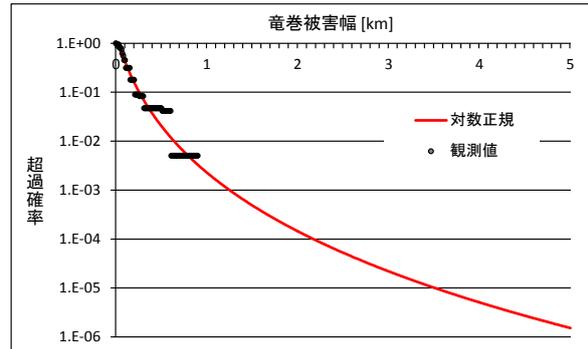


図2.3.5.4 被害幅の超過確率分布

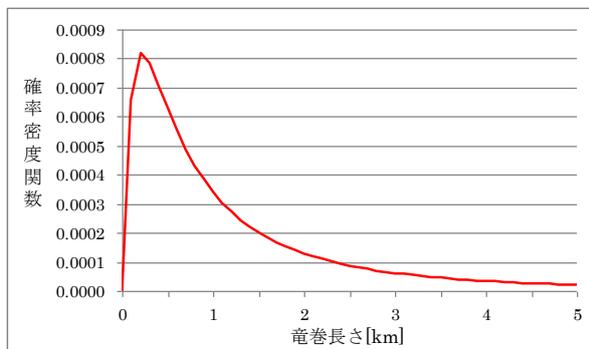


図2.3.5.5 被害長さの確率密度分布

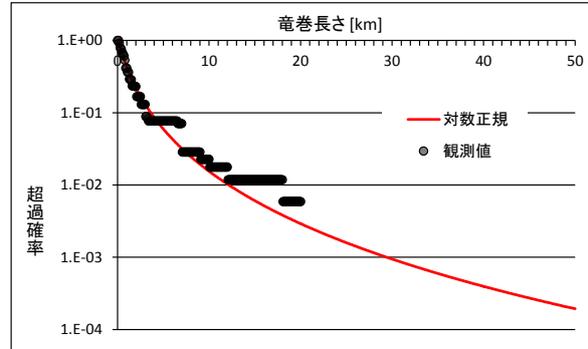


図2.3.5.6 被害長さの超過確率分布

表 2.3.5.1 竜巻風速, 被害幅, 被害長さの相関係数 (単位無し)

相関係数	風速	被害幅	被害長さ
風速	1.000	-0.050*	0.312
被害幅	-0.050*	1.000	0.462
被害長さ	0.312	0.462	1.000

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

2.3.6. 竜巻影響エリアの設定

竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の算定にあたり、 V_{B2} の発生エリアである竜巻影響エリアを設定する。竜巻影響エリアは、柏崎刈羽原子力発電所の号機ごとに設定する。号機ごとのすべての評価対象施設の設置面積の合計値及び推定される竜巻被害域(被害幅, 被害長さから設定)に基づいて、竜巻影響エリアを設定する。

図2.3.6.1に柏崎刈羽原子力発電所6号機の竜巻影響エリア、図2.3.6.2に7号機の竜巻影響エリアを示す。竜巻影響エリアは、柏崎刈羽原子力発電所6号機または7号機の評価対象施設を含む長方形エリアの対角線長さが約260mであることを考慮して、各号機の評価対象施設を包絡する円形のエリア(直径300m, 面積約 $7.1 \times 10^4 \text{m}^2$)として設定する。なお、竜巻影響エリアを円形とするため、竜巻の移動方向には依存性は生じない。

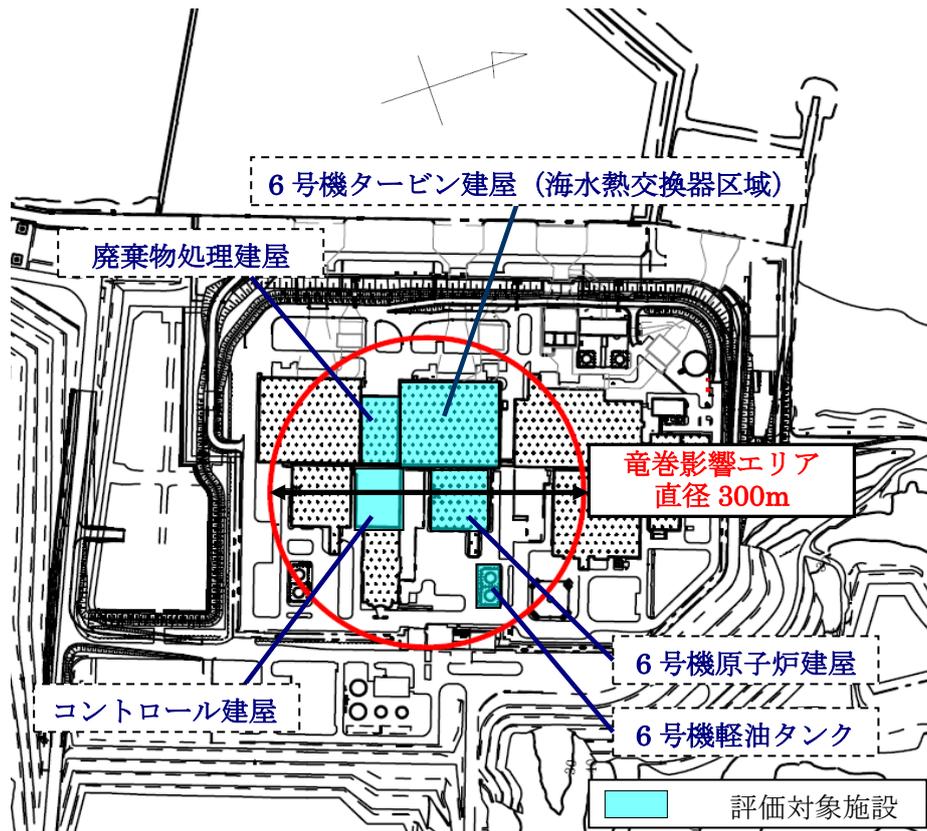


図2.3.6.1 6号機 竜巻影響エリア

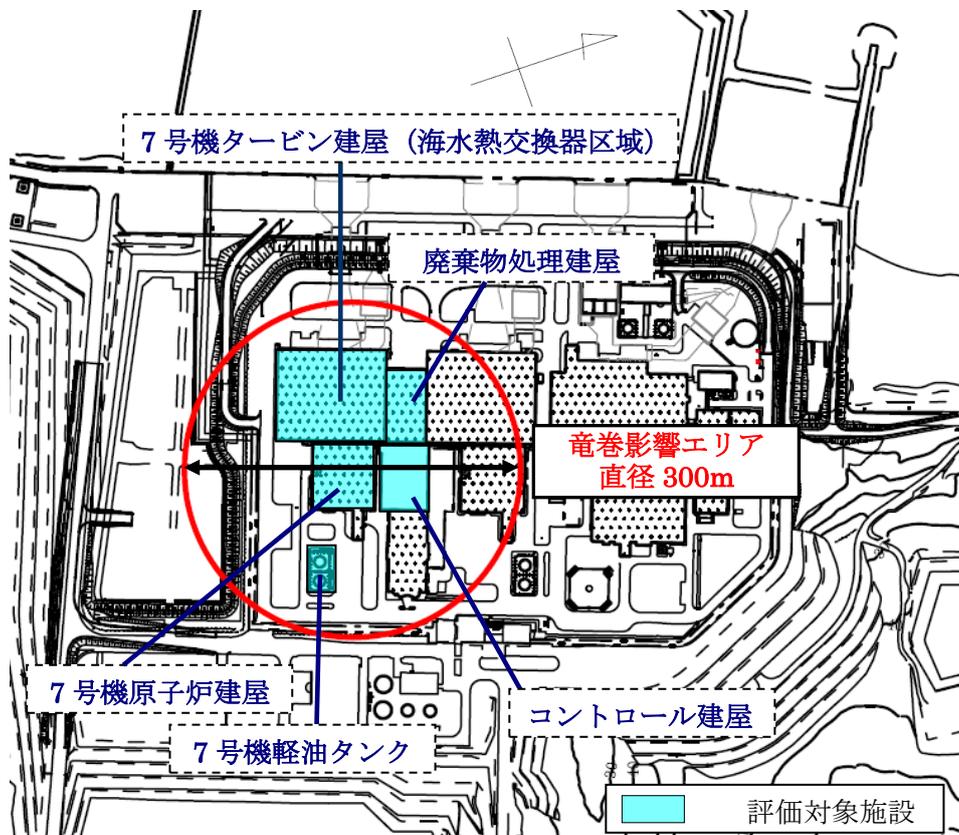


図2.3.6.2 7号機 竜巻影響エリア

2.3.7. ハザードの算定【補足説明資料 2.3(6)】

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

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

ここで、

N : 竜巻の年発生数
 v : 竜巻の年平均発生数
 T : 年数

β は分布パラメータであり式(2)で示される。

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

ここで、

σ : 竜巻の年発生数の標準偏差

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

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

この $R(V_0)$ は、竜巻影響評価の対象地域の面積を A_0 (つまり竜巻検討地域の面積約33,395km²)、1つの竜巻の風速が V_0 以上となる面積を $DA(V_0)$ とすると式(4)で示される。

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

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

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

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

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

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

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

ここで、

V_{\min} : 被害幅 w 内の最小竜巻風速

V_0 : 被害が発生する最小風速

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

本評価ではリスク評価対象構造物を円形構造物（竜巻影響エリア）で設定しているため、 $H(\alpha)$ 、 $G(\alpha)$ ともに竜巻影響エリアの直径300 mで一定（竜巻の移動方向に依存しない）となる。円の直径を D_0 とした場合の計算式は式(8)で示される。

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

2.3.8. 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

海岸線から陸側及び海側それぞれ5km全域（竜巻検討地域）を対象に算定したハザード曲線より，年超過確率 10^{-5} における風速を求めると図2.3.8.1に示すとおり58.3m/sとなった。

- ※ 設計基準事故の発生頻度が 10^{-3} /年～ 10^{-4} /年（発電用軽水型原子炉施設に係る新安全基準骨子案に対する意見募集の結果について：平成25年4月3日 原子力規制庁技術基盤課）であることから，設計基準として考慮する竜巻の最大風速は年超過確率 10^{-4} に設定することが妥当であると考えられる。ただし，ガイドで竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の年超過確率は， 10^{-5} を上回らないことが要求されていること，ハザードの不確実性があることを踏まえて保守的に 10^{-4} より1桁下げて，竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速の年超過確率は 10^{-5} とする。

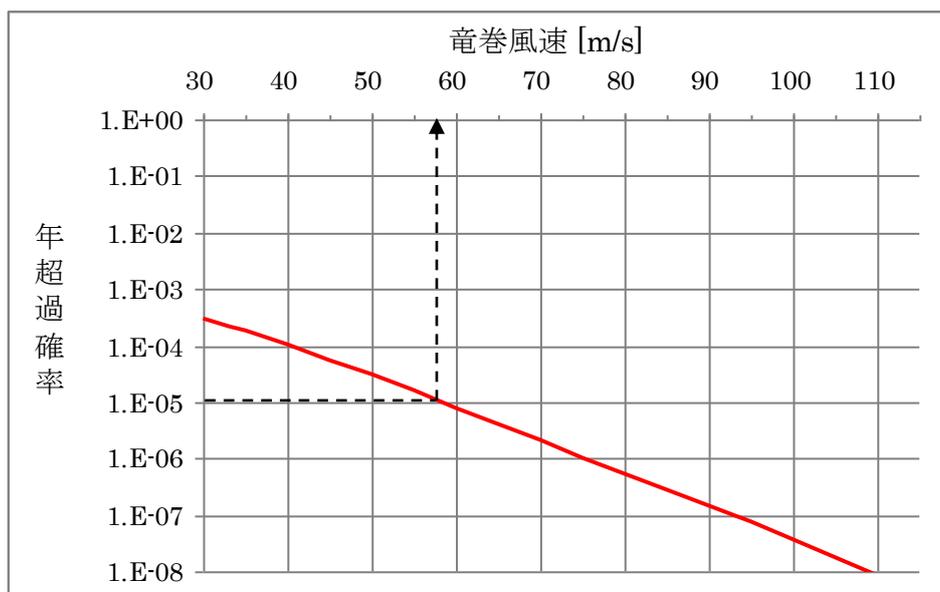
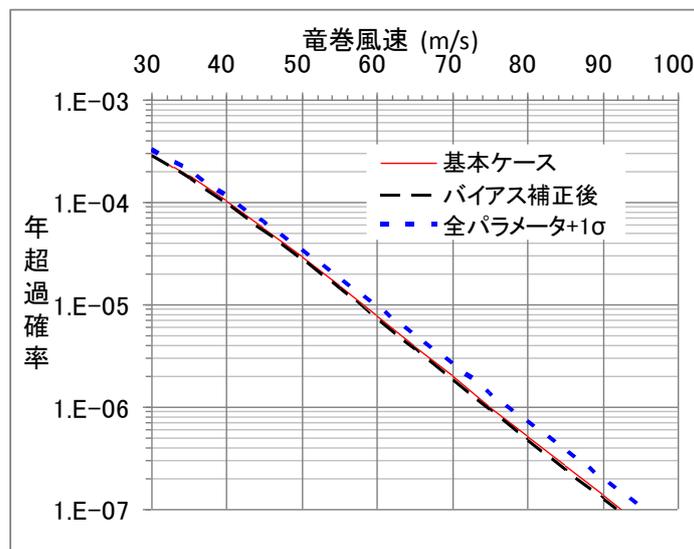


図2.3.8.1 竜巻最大風速のハザード曲線（海側，陸側5km範囲）

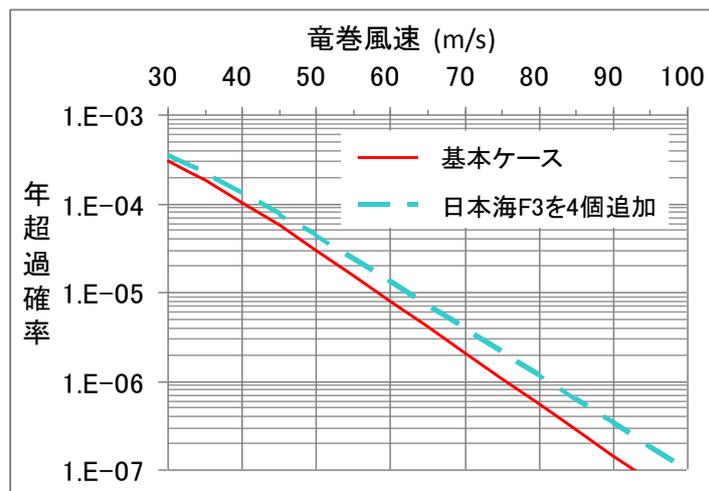
また、不確かさ要素のハザード算定結果への影響を検討した【補足説明資料2.3参考資料5】

図2.3.8.2(a)に示した、データ、確率分布形選択及びデータ量が少ないことによる不確かさを表したハザード曲線により、これらの不確かさが十分小さいことを確認した。

更に、疑似データにF3竜巻を4個追加した感度解析結果を図2.3.8.2(b)に示す。この場合の年超過確率 10^{-5} に相当する竜巻風速は62.2m/sとなり、かなり保守的な仮定をおいてもハザードへの影響は限定的であることから、データの高い安定性を確認した。



(a) バイアス補正後及び全パラメータ+1σのハザード



(b) 竜巻風速の年超過確率分布

図2.3.8.2 ハザード不確かさ検討結果

2.3.9. 基準竜巻の最大風速 (V_B)

過去に発生した竜巻による最大風速 $V_{B1}=69$ m/s及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 $V_{B2}=58.3$ m/sより、柏崎刈羽原子力発電所における基準竜巻の最大風速 V_B は69m/sとする。(表2.3.9.1)

また2.3.8における不確かさの検討により, $V_B=69$ 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。

使用した竜巻の統計データの不確かさについては2.3.8において検討を実施しているが、将来的な気候変動により規模や発生数の増加傾向となることは否定できない。

将来的な気候変動として現時点でも予想されるものとしては地球温暖化が挙げられる。地球温暖化が進行した際には台風の強度が強まる傾向が考えられ、現時点の経験データでは台風起因の竜巻は日本海側では観測されていないものの将来的には日本海側においても発生する可能性がある。ただし台風は北上するにつれて、山岳での暖湿流遮断による安定化や海水温度低下による水蒸気供給量低下により衰弱しやすい特性を有していることから、仮に発生するとしても規模の大きな竜巻の発生は考えにくい。

将来的な気候変動についての現時点での予想は上記の通りとなるが、気候変動を完全に予測することは難しいため、最新のデータ・知見をもって気候変動の影響に注視し、必要に応じて見直しを実施していくものとする。

表2.3.9.1 竜巻の最大風速の算定結果

項目	最大風速[m/s]
過去に発生した竜巻による 最大風速 V_{B1}	69
竜巻最大風速のハザード曲線による 最大風速 V_{B2}	58.3

2.4. 設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定

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

2.4.1. 地形効果による竜巻風速への影響

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

(1) 地形起伏による影響

竜巻のような回転する流れでは、角運動量保存則により「回転の中心からの距離」及び「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質がある。そのため、図 2.4.1.1 に示す通り竜巻の渦が上り斜面を移動する時（渦 1 から渦 2 へ移動する場合）、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動する時には強まる。

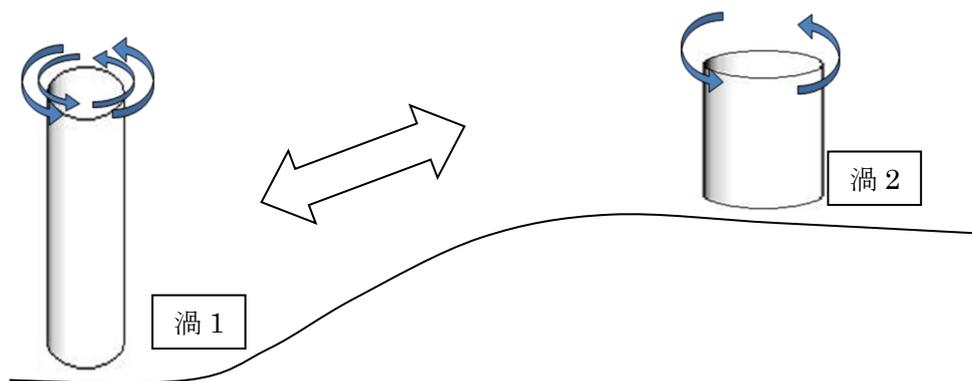


図 2.4.1.1 竜巻旋回流の地形影響に関する模式図

(2) 地表面粗度による影響

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

2.4.2. 柏崎刈羽原子力発電所周辺の地形

柏崎刈羽原子力発電所敷地周辺の地形を図 2.4.2.1、柏崎刈羽原子力発電所東西方向の鉛直断面での地形起伏を図 2.4.2.2、柏崎刈羽原子力発電所敷地周辺の地表面粗度を図 2.4.2.3 に示す。発電所が立地する敷地は、北西が日本海に面し、三方を森林に囲まれた標高 60m 前後のなだらかな丘陵地である。

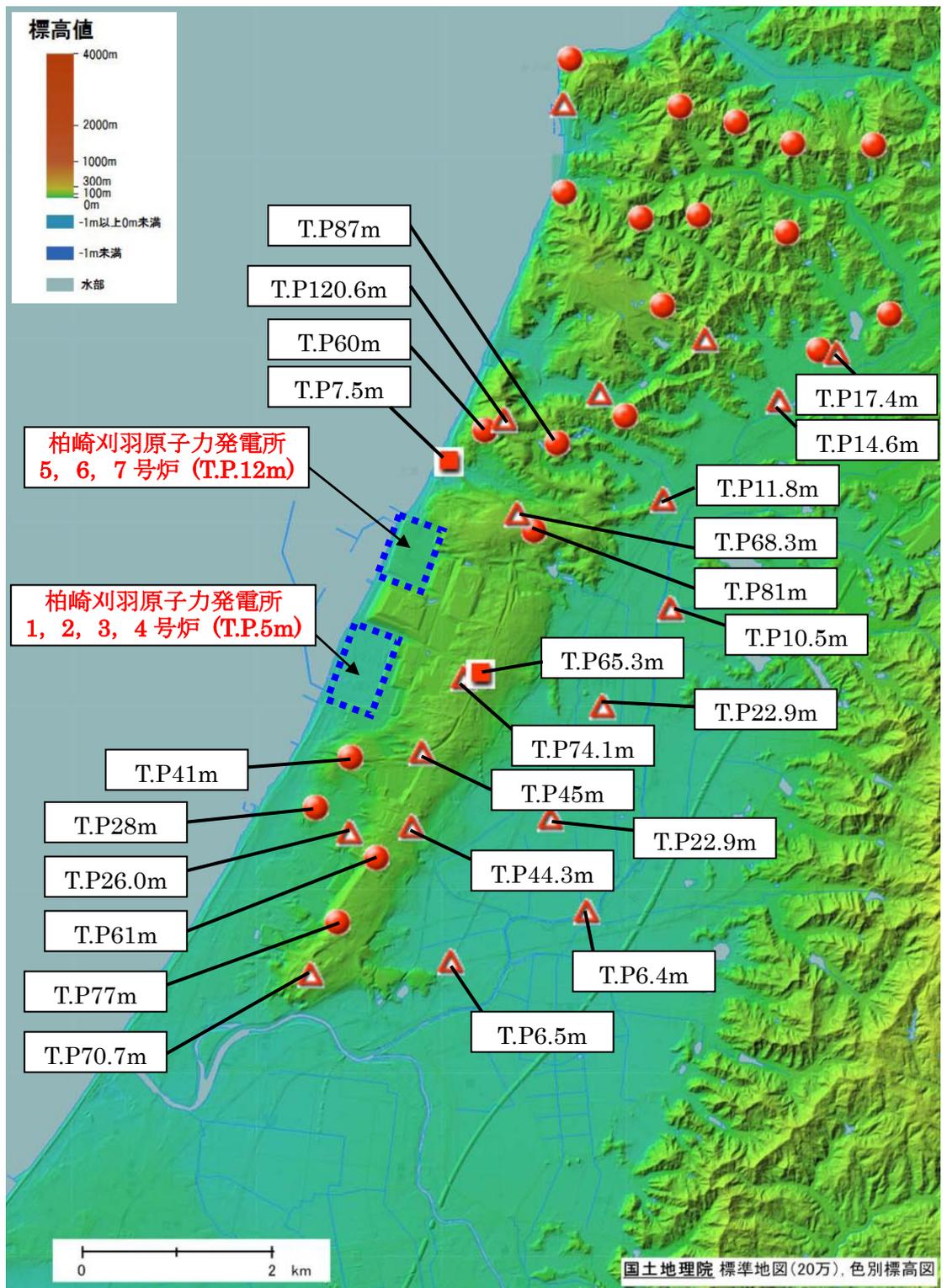


図 2. 4. 2. 1 柏崎刈羽原子力発電所周辺の地形
(国土地理院「電子国土 Web」より作成)

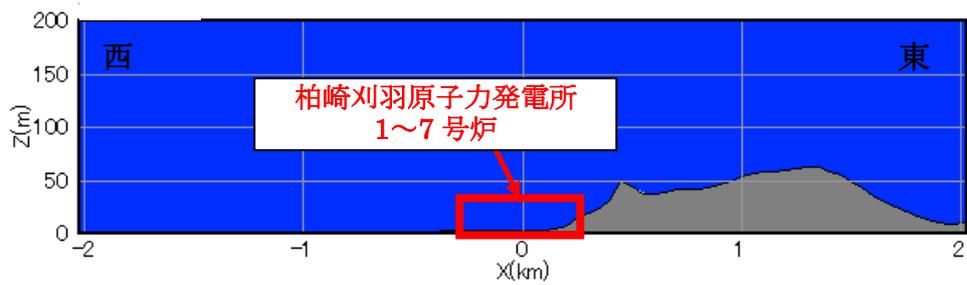


図 2. 4. 2. 2 柏崎刈羽原子力発電所東西方向の鉛直断面での地形起伏

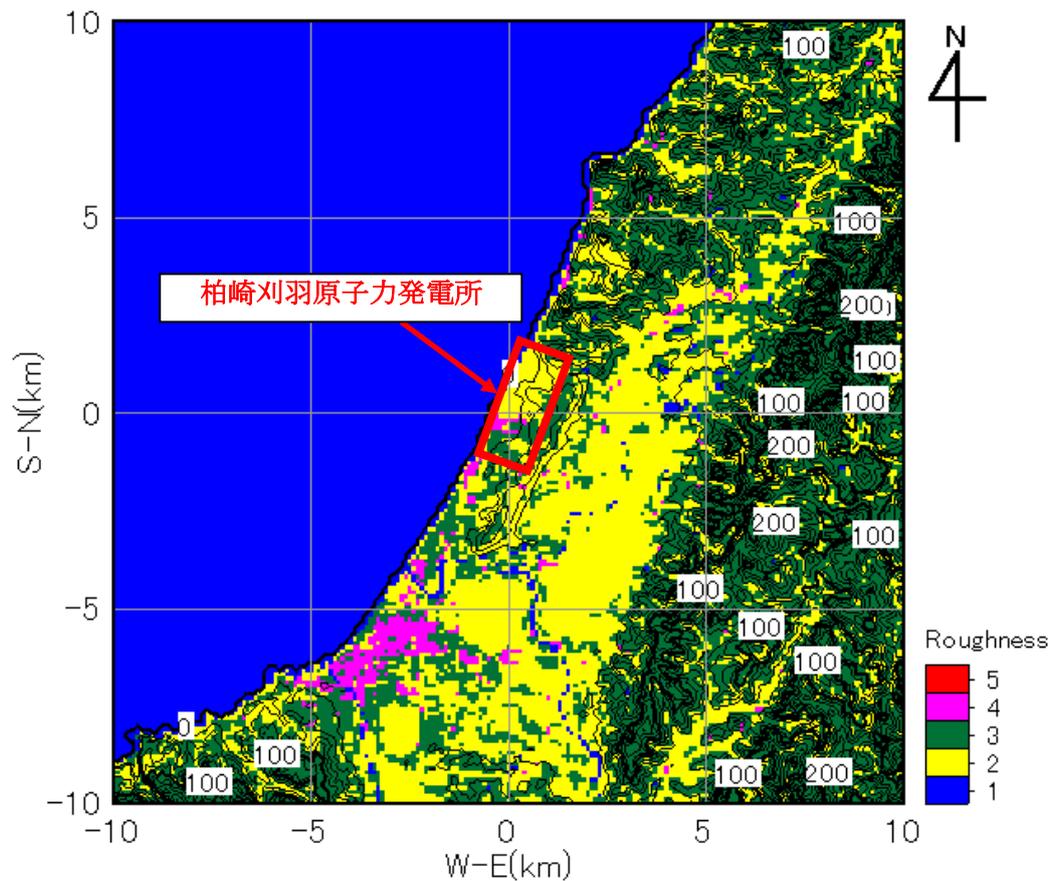


図 2. 4. 2. 3 柏崎刈羽原子力発電所周辺の地表面粗度

2. 4. 3. 竜巻の移動方向の分析

柏崎刈羽原子力発電所の周辺地域を対象に竜巻の移動方向に関する分析を行う。なお、分析の対象とする地域は、JNES「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」に示されている竜巻集中地域を参考に、集中地域③（石川県）、④（新潟県・富山県）及び⑤（東北地方の日本海側）とした。

図 2. 4. 3. 1 に竜巻集中地域④周辺で発生した竜巻の移動方向、図 2. 4. 3. 2 に竜巻集中地域③、④及び⑤において過去に発生した竜巻の移動方向の頻度を分析した結果を示す。竜巻の移動方向の分析の結果、柏崎刈羽原子力発電所周辺で発生する竜巻は、

陸側から海側（東から西）に向かう竜巻は極めて少なく、発電所西方の海上から東方向（陸側）へ向かう方向が多い。

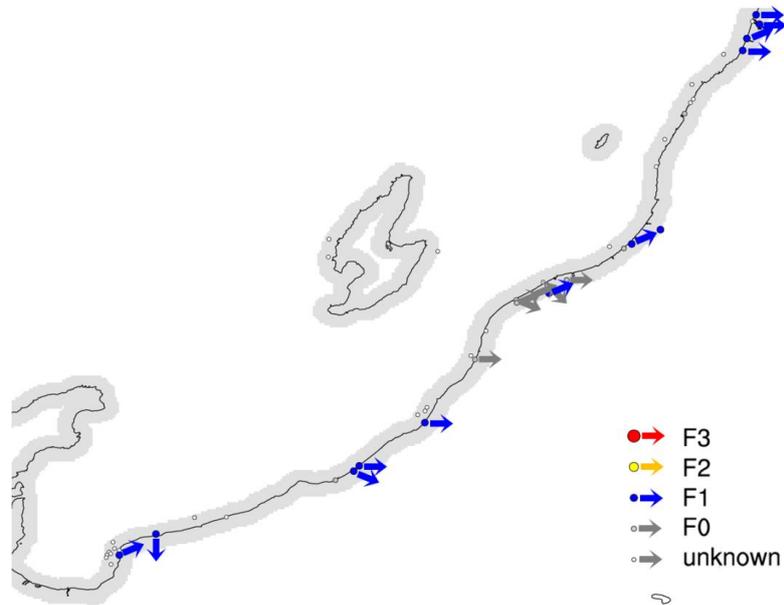


図2.4.3.1 竜巻集中地域④における竜巻移動方向（F0以上のみ）

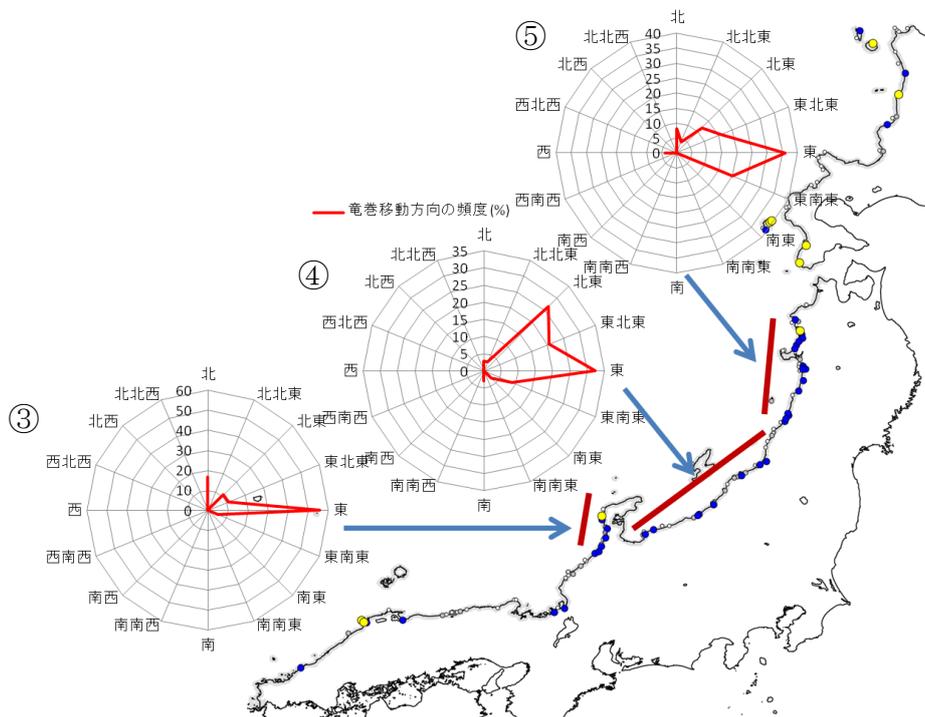


図 2.4.3.2 竜巻集中地域③，④及び⑤における竜巻移動方向の頻度

2.4.4. 竜巻風速の増幅に関する検討

(1) 地形起伏による竜巻増幅

柏崎刈羽原子力発電所周辺で発生する竜巻は、地形が平坦な海側から発電所敷地に進入する可能性が高く発電所敷地自体も平坦であるため竜巻が増幅することはないと考えられる。万が一発電所敷地外の東側（例えば刈羽村の平地）で竜巻が発生し、その竜巻が海側に向かって移動し、発電所敷地内に進入した場合、竜巻はなだらかな丘陵を越える必要がある。この場合の地形効果による増幅は、丘陵がなだらかであるため竜巻の増幅・減衰はない、もしくは丘陵の上り勾配と下り勾配で相殺される。

(2) 地表面粗度による竜巻増幅

柏崎刈羽原子力発電所周辺では、発電所西方の海上から東方向（陸側）へ向かう竜巻の発生が極めて多く、竜巻が海上から陸側に移動する際には、地表面粗度の小さい海上から粗度の大きな陸上に上陸するため、粗度による減衰効果が期待できる。

2.4.5. 設計竜巻の最大風速 V_D

検討の結果、柏崎刈羽原子力発電所では、地形効果による竜巻の増幅を考慮する必要はないと考えられるため、基準竜巻の最大風速に対する割り増しは行わず、設計竜巻の最大風速 V_D は 69m/s とする。

2.5. 設計竜巻の特性値

竜巻風速場としてフジタモデルを選定した場合の設計竜巻の特性値については、表 2.5.1 の通り設定する。なお、最大気圧低下量と最大気圧低下率は、数値解析によって計算する。【補足説明資料 2.5】

表 2.5.1 設計竜巻の特性値

最大瞬間風速(V_D) [m/s]	移動速度(V_T) [m/s]	最大接線風速(V_{Rm}) [m/s]	最大接線風速半径(R_m) [m/s]	最大気圧低下量(ΔP_{max}) [hPa]	最大気圧低下率 ((dp/dt) $_{max}$) [hPa / s]
69	10	59	30	37	17