

平成27年度原子力施設等防災対策等委託費  
(実用発電用原子炉施設の竜巻による影響  
評価手順の整備) 事業

委託業務成果報告書

平成28年3月

東京工芸大学



平成27年度原子力施設等防災対策等委託費（実用発電用原子炉施設の竜巻による影響評価手順の整備）事業 委託業務成果報告書

目次

第I編：竜巻による影響評価手順の整備

	頁
1. はじめに	1
2. 設計の基本フローと本報告書で対象とする項目の位置付け	3
3. 基準竜巻・設計竜巻・設計竜巻荷重の設定の概要	4
4. ステップ1 竜巻検討地域の設定	6
4.1 概要	6
4.2 評価項目	6
4.2.1 竜巻の発生確認状況データの整備	6
4.2.2 原子力発電所の位置に応じた検討地域の設定	6
4.3 気象庁データベースの特徴を理解した竜巻発生頻度の適切な評価	6
4.3.1 気象庁の竜巻等の突風データベースの特徴	6
4.4 原子力発電所の位置に応じた検討地域の設定	8
4.4.1 総覧スケールの気象条件に基づく竜巻検討地域 (T <sub>A1</sub> )	8
4.4.2 過去の竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域 (T <sub>A2</sub> )	10
4.4.3 その他の参考情報	10
4.5 竜巻検討地域の設定	10
4.6 審査資料における竜巻検討地域の設定事例	12
5. ステップ2 基準竜巻の最大風速 (V <sub>B</sub> ) の設定	13
5.1 概要	13
5.2 評価項目	13
5.2.1 過去に発生した竜巻による最大風速	13
5.2.2 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速	13
5.2.3 基準竜巻の最大風速の設定	13
5.3 過去に発生した竜巻による最大風速	14
5.3.1 最大風速評価の概要	14
5.3.2 最大風速評価の留意点	16
5.4 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速	17
5.4.1 竜巻最大風速の年最大超過確率の評価	17
5.4.2 竜巻風速、被害幅、被害長さ及び移動方向の評価	20
5.5 審査資料における対象範囲の面積および過去最大竜巻の設定事例	22

6. ステップ3 設計竜巻の最大風速 ( $V_D$ ) の設定	23
6.1 概要	23
6.2 評価項目	23
6.3 設計竜巻の最大風速の設定	23
7. ステップ4 設計竜巻の特性値の設定	25
7.1 概要	25
7.2 評価項目	25
7.2.1 設計竜巻のモデル	25
7.2.2 特性値の種類	25
7.3 設計竜巻の特性値の設定	25
8. ステップ5 設計竜巻荷重の設定	28
8.1 概要	28
8.2 評価項目	28
8.2.1 風圧力による荷重	28
8.2.2 気圧差による荷重	28
8.2.3 飛来物による衝撃荷重	28
8.2.4 設計竜巻荷重の組み合わせ	28
8.3 風圧力による荷重	29
8.4 気圧差による荷重	30
8.5 飛来物による衝撃荷重	31
8.5.1 設計飛来物の選定	31
8.5.2 設計飛来物の速度	31
8.5.3 設計飛来物の衝突方向, 衝突範囲, 衝突荷重の設定	32
8.6 設計竜巻荷重の組み合わせ	33
9. まとめ	35
参考文献	37
著者	39

## 第 II 編：竜巻による影響解析手順の整備

	頁
1. 竜巻による最大風速のハザード曲線の計算方法	1
1.1 評価フロー	1
1.2 竜巻風速，被害幅，被害長さの確率分布	5
1.3 竜巻の移動方向	6
2. 解析プログラムのフローチャート	7
3. 解析プログラムの動作に必要な環境	8
4. 解析プログラム実行手順	9
5. 解析プログラムソースコード	9
付録 1. 竜巻データベースフォーマット	11
付録 2. ArcGIS を用いた特定エリアを通過する竜巻の抽出とエリア面積の算出	13

# 第I編：竜巻による影響評価手順の整備

## 1. はじめに

本報告書では、設置許可段階における、基準竜巻・設計竜巻荷重の設定に関する方法について、その手順を示し、技術的な説明と注意点について解説するものである。また、特に、基準竜巻の設定については、その手続きを詳細に表し、計算手続について、既往の地理情報システムや解析プログラム、必要な部分は独自の計算コードを開発して、具体的な計算手順を示すものである。

現在まで、原子力発電所に対する竜巻の影響評価について、原子力規制委員会から「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」[1]が平成25年6月に発行され、原子力安全基盤機構から「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説」[2]が同年10月に発行されている。また、これらに則して日本国内の主要な原子力発電所に対する影響評価審査資料（以下、審査資料）が公開されている。本報告書では、これらの資料を参考に、内容を整理し特徴をまとめ解説を加えた。各項目では、評価の手順をフロー図で示した。

参考とした基準類を以下に示す。

- 1) 原子力規制委員会：「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」、平成25年6月
- 2) 独立行政法人原子力安全基盤機構：「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

参考とした審査資料は以下に示すとおりである。

- 1) 川内原子力発電所1号炉及び2号炉 竜巻影響評価について、平成25年11月26日、九州電力株式会社
- 2) 玄海原子力発電所3号炉及び4号炉 竜巻影響評価について、平成25年12月19日、九州電力株式会社
- 3) 伊方発電所3号炉 竜巻影響評価説明資料、平成25年11月14日、四国電力株式会社
- 4) 伊方発電所3号炉 竜巻影響評価説明資料、平成25年12月27日、四国電力株式会社
- 5) 大飯3号炉および4号炉 竜巻影響評価について、平成26年1月28日、関西電力株式会社
- 6) 大飯3号炉及び4号炉 竜巻影響評価について、平成26年2月18日、関西電力株式会社
- 7) 高浜3号炉および4号炉 竜巻影響評価について、平成26年2月27日、関西電力株式会社
- 8) 泊発電所3号機 竜巻影響評価結果、平成25年11月19日、北海道電力株式会社
- 9) 泊発電所3号機 竜巻影響評価結果（その2）、平成25年12月24日、北海道電力株式会社

- 10) 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2月，東京電力株式会社

また，以下の研究報告書[3]を参考とした。

- 1) 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

以上



## 2. 設計の基本フローと本報告書で対象とする項目の位置付け

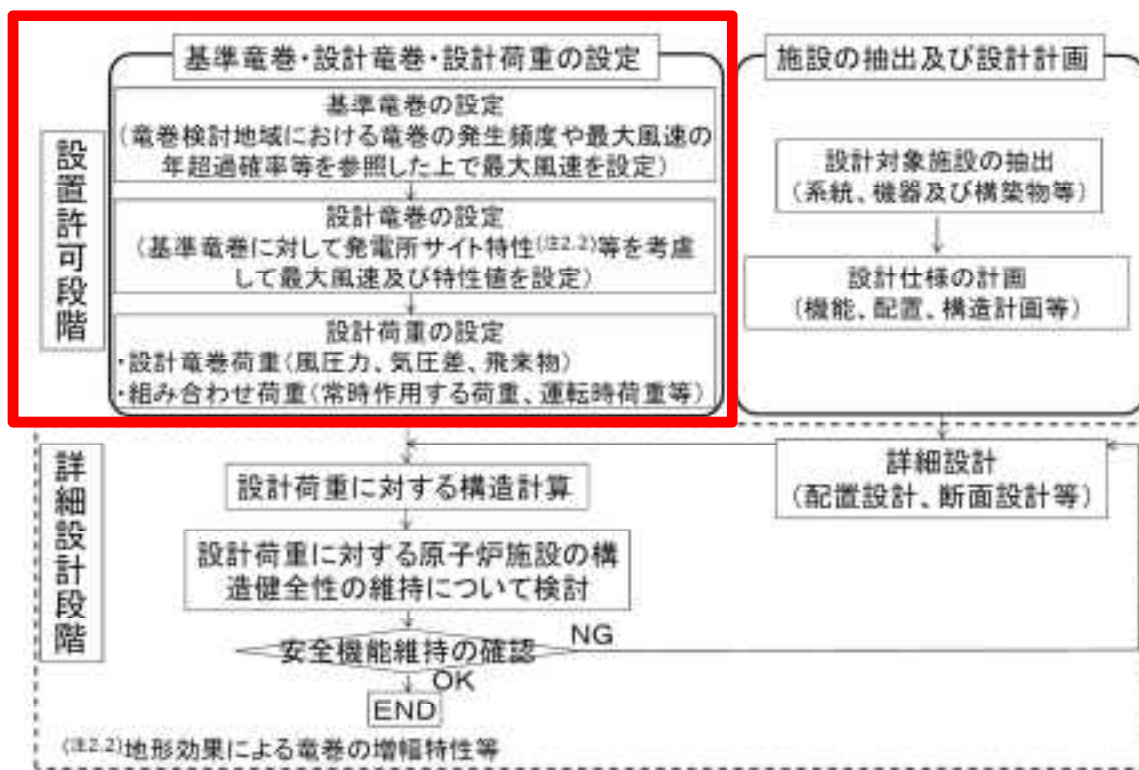


図 2.1 設計の基本手順 [1],[2]

図 2.1 に、原子力規制委員会が、平成 25 年 6 月に発行した「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」および原子力安全基盤機構が平成 25 年 10 月に発行した「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説」（両者はほぼ同内容であり、かつ後者が前者の内容を包含し、かつ解説、補足等が追加されているので、主として後者を「竜巻影響評価ガイド」と呼び、その内容を引用する）における、竜巻が原子力発電施設に及ぼす影響の評価と設計のフローを示す。前述の本報告書の対象は、同図の太枠で示される範囲である。この内容は、「基準竜巻・設計竜巻・設計竜巻荷重の設定」である。

### 3. 基準竜巻・設計竜巻・設計竜巻荷重の設定の概要

基準竜巻・設計竜巻・設計竜巻荷重の評価手順[1],[2]を図 3.1 に示す。手順は大きく、5つのステップで構成されている。

ステップ1では、原子力発電所の建設地点から、竜巻の性質を調査すべき地域を設定する。

ステップ2では、ステップ1で設定された地域における竜巻の性質を分析し、統計的性質を明らかにし、対象施設に対する竜巻風速の影響を確率的に評価する。このステップでは、最大竜巻風速と年超過確率の関係が得られる。想定する超過確率に対する最大竜巻風速を  $V_{B1}$  と称することにする。一方、設定地域内で過去に得られた最大の竜巻の風速を  $V_{B2}$  とする。基準竜巻の最大風速  $V_B$  は、 $V_{B1}$  と  $V_{B2}$  の大きな値を採用する。

ステップ3では、建設地点および周辺の条件から、竜巻の風速が増速する効果を検討する。地形の影響等により割り増す必要があれば、風速の倍率として評価する。竜巻影響評価ガイドでは、割り増し効果を見込むものとして、低減効果は認めていない。ステップ2で得られた基準竜巻の最大風速  $V_B$  に割り増し係数を乗じたものを設計竜巻の最大風速  $V_D$  と称する。

ステップ4では、設計竜巻の特性値を設定する。設計竜巻の特性値とは、最大竜巻風速が  $V_D$  となるような竜巻の具体的なイメージを、数学的あるいは物理的な渦モデルを用いて明確にする。比較的単純な渦モデルとしては、中心気圧あるいは最大接線風速と最大旋衡風速半径の2つのパラメータで表されるランキンの複合渦があり、これが一定の速度で移動するモデルを想定する。設計竜巻による流れ場の風速と気圧場が決定される。

ステップ5では、ステップ4で決定された竜巻の流れ場、気圧場における原子力発電施設への影響を評価する。具体的には、高風速の作用による空気力、短時間の気圧変化、竜巻によって発生する飛来物の衝撃力を明らかにする。ただし、これらの荷重が原子力発電施設に及ぼす影響は、施設の構造や構成の詳細に大きく依存するので、竜巻の外力としての影響を評価することに留め、その荷重効果としての影響は、詳細設計段階に委ねるものとする。

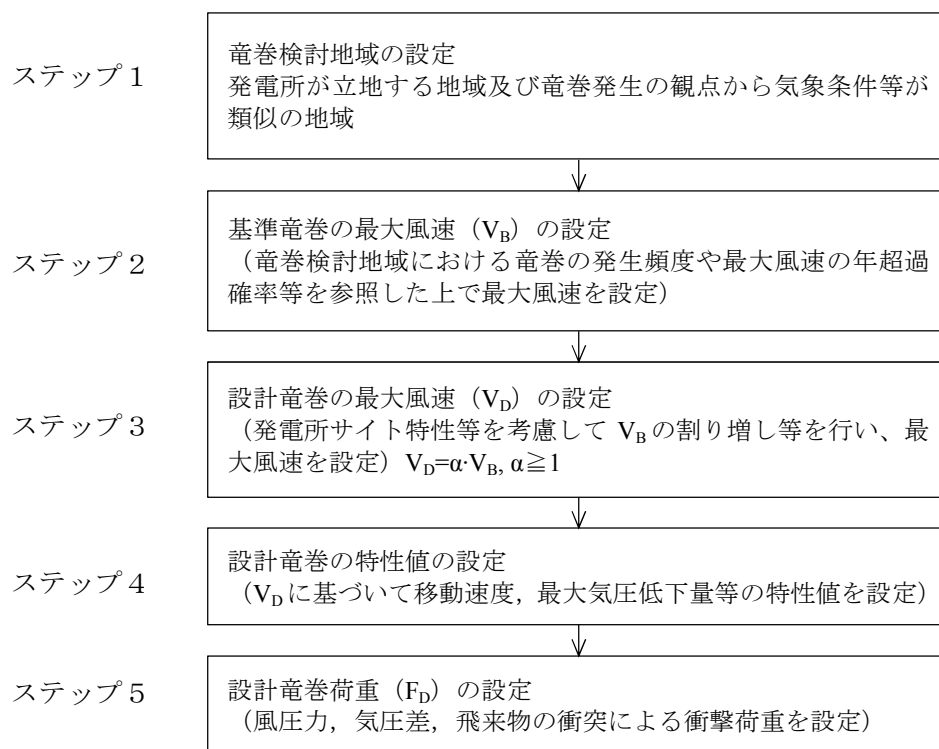


図 3.1 「竜巻影響評価ガイド」による基準竜巻・設計竜巻荷重の設定の基本フロー[1],[2]

## 4. ステップ1 竜巻検討地域の設定

### 4.1 概要

ステップ1 竜巻検討地域の設定では、設計対象とする原子力発電施設の位置に応じて、分析対象とする竜巻の範囲を設定する。範囲の設定に際しては、発電所が立地する地域及び竜巻発生観点から気象条件等が類似の地域を設定すること、および気象庁の竜巻発生確認数のデータベースの性質を考慮して、安全側に設定する等の配慮が必要である。

竜巻影響評価ガイドでは、IAEAの基準を参考に、竜巻の記録を調査する範囲として10万km<sup>2</sup>を目安にあげている。また、日本における気象条件を考慮して、必ずしも10万km<sup>2</sup>にこだわらずに気象条件類似の地域を設定することとしている。

また、竜巻影響評価ガイドでは、竜巻検討地域の設定に際し、「総覧スケールの気象条件に基づく竜巻検討地域(TA<sub>1</sub>)」と「過去の竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域(TA<sub>2</sub>)」を設定し、竜巻の年発生頻度の高い地域を竜巻検討地域(TA)として設定することとしている。このうち、「過去の竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域(TA<sub>2</sub>)」では、人口密度が低い等の理由で竜巻の実態が十分に捕捉されていない地域があることを考慮して、原子力発電所が人口密度の低い地域に立地する場合、その近傍の竜巻集中地域をTA<sub>22</sub>として設定することとしている。

### 4.2 評価項目

ステップ1での評価項目は、気象庁竜巻等の突風データベースの利用と気象条件等を考慮した竜巻検討地域の設定である。

#### 4.2.1 竜巻の発生確認状況データの整備

日本における竜巻の実態を把握するには、気象庁の竜巻等の突風データベースを用いることが必要である。必要に応じてデータベースのデータを吟味し、その特徴を把握して適切に用いることが必要である。

#### 4.2.2 原子力発電所の位置に応じた検討地域の設定

気象学的な見地から、竜巻の統計を得るべき地域を設定する。竜巻の発生に影響を与える気象要因を検討し、類似の地域をまとめる。

### 4.3 気象庁データベースの特徴を理解した竜巻発生頻度の適切な評価

#### 4.3.1 気象庁の竜巻等の突風データベースの特徴

竜巻の発生状況については、気象庁が公表している「竜巻等の突風データベース」[4]が参考となる。ただし、同資料の性質を正しく理解して利用することが必要である。

「竜巻等の突風データベース」には、竜巻等の突風の情報として、突風の種類、発生時刻、発生場所、藤田スケール、被害幅、被害長さ、主な被害状況、総覧場が示されており、詳細情報として、発生位置（緯度、経度）、消滅位置（緯度、経度）や安定度などの大気パラメータも付記されている。このデータベースは日本における最も充実した竜巻の情報ともいえるが、使用に際して注意が必要である。一つは、1991年および2007年に統計方法の変遷があり、現在と過去記録が統計上均質ではないこと（歴史的不均一性）、もう一つは、竜巻とされるのは被害の痕跡や漏斗雲等を人間が目視等により認識することに依存していることである（検出不完全性）。また、さらに掲載されているデータの精度等についての吟味も必要である。全ての項目について、一様に同程度の精度が確保されているわけではなく、データベースのアップデートやデータベースを修正すべき他の情報が得られる場合があることによる。

### (1) 歴史的不均一性の評価

歴史的な不均一性については、地震危険度解析等における地震カタログの取り扱いが参考になる。過去の地震記録には、時期により、現在のように観測網が整備されていなかったり、そもそも観測記録が存在せず、文書や日記などからその震源や地震規模を推定せざるをえない場合がある。さらに長い期間においては活断層等のデータを利用することになる。評価方法が異なると、地震規模に応じて捕捉率が変化したり、捕捉される対象が変化することなどを考慮して、歴史的資料や活断層記録が用いられている。

平成22年原子力安全基盤機構の報告書[3]でも、竜巻の年発生数の平均値および標準偏差を評価するに当たって、統計方針の変遷の影響を考慮するため、統計期間と対象とする竜巻の強さを以下のように設定している。

・海上竜巻：2007年1月～2009年12月

・海上から上陸した竜巻、および陸地で発生した竜巻

F2以上 : 1961年1月～2009年12月

F0～F1, F1, および F1～F2 : 1991年1月～2009年12月

F0, およびフジタスケール不明 : 2006年1月～2009年12月

### (2) 検出不完全性の評価

検出の不完全性について、現在、竜巻の発生については、そのすべてが捕捉されているわけではない。地震計が日本全国に配置され、かなり小さな規模の現象から網羅的にその発生が検知され、客観的にそのすべての発生実態が把握される地震とは大きく異なり、竜巻の発生確認は、目視あるいは被害の痕跡に頼っているのが現状である。つまり、人間が直接その状況や痕跡を認識しない限り、竜巻の発生はカウントされない。さらに、突風被害が生じていても、竜巻と確定されていない事例も多く、その中には実際には竜巻であったものも含まれる可能性がある。以上の状況を考慮すれば、対象地域付近に竜巻の発生事

例が少ないからという理由で、竜巻の発生頻度を低く評価することは誤りであることがわかる。この竜巻の実際の発生頻度の適切な評価のためには、一つは「集中して竜巻が発生しているように見える地域」の発生頻度を参考にすることが考えられる。

この検出の不完全性は、竜巻影響評価ガイドでは、TA<sub>22</sub>として考慮されているが、TA<sub>1</sub>においても考慮することが望ましい。

#### 4.4 原子力発電所の位置に応じた検討地域の設定

竜巻に関するデータベースについては、上記を考慮して整備する。その他に、竜巻の発生頻度や発生要因と関連する、気象学的情報、地理的情報を整備する。そして、対象とする原子力発電施設とその関連施設に関する位置情報を考慮して、検討対象とする竜巻地域を決定する。竜巻発生地域の決定に際しては、竜巻データベースの歴史的不均一性、検出不完全性を考慮することが重要である。

##### 4.4.1 総覧スケールの気象条件に基づく竜巻検討地域 (TA<sub>1</sub>)

総覧スケールの気象条件については、気象庁竜巻データベースに掲載されている総覧場の情報が参考となる。気象庁の統計では、1991年から2014年の竜巻発生時の気象条件は、表4.1に示すようになっており、これらの気象条件のうち成因が関連しているもの等をグループ化し、地域性を検討する。

グループ化の一例として、審査資料[5]に示される分類を表4.2示す。

表 4.1 発生時の気象条件等（1991～2014 年）（気象庁による[4]）

要素	件数	その他前線	1
台風	80	移動性高気圧	2
熱帯低気圧（台風以外）	1	中緯度高気圧	0
南岸低気圧	12	太平洋高気圧	5
日本海低気圧	33	大陸高気圧	0
二つ玉低気圧	4	オホーツク海高気圧	0
気圧の谷	58	帯状高気圧	0
局地性じょう乱	17	その他高気圧	1
東シナ海低気圧	11	季節風	1
オホーツク海低気圧	0	大循環異常	0
その他低気圧	18	雷雨（熱雷）	15
温暖前線	5	雷雨（熱雷を除く）	10
寒冷前線	77	地形効果	0
閉塞前線	2	寒気の移流	73
停滞前線	46	暖気の移流	107
前線帯	2	湿舌	0
不安定線	3	局地性降水	1
梅雨前線	17	その他	1

表 4.2 総覧場の分類例（審査資料[5]による）

総覧場	気象庁の分類
台風	台風
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，その他低気圧，オホーツク海低気圧，温暖前線，寒冷前線，閉塞前線
季節風（夏季）	熱帯低気圧（台風以外），太平洋高気圧，暖気の移流，湿舌
季節風（冬季）	気圧の谷，大陸高気圧，季節風，寒気の移流
停滞前線	停滞前線，前線帯，不安定線，梅雨前線，その他前線
局地性	局地性じょう乱，雷雨（熱雷），雷雨（熱雷を除く），地形効果，局地性降水
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

#### 4.4.2 過去の竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域 (TA<sub>2</sub>)

気象庁の竜巻等の突風データベースを分析すると、竜巻の発生確認数は、

- 海岸線に沿って集中していること、
- 海岸線に均一に分布しているのではなく、間欠的に集中して発生している地域が見られること、
- 人間による被害の痕跡や竜巻発生時の目撃情報が得られにくい地域では、竜巻の発生確認数も少ないこと

等が明らかとなっている。

これらの現象は、一部には竜巻の移動方向や、親雲の移動方向と関連する部分もあるが、データベースの検出不完全性にも影響されると考えられる。報告書[3]では、この検出不完全性を補うために、日本において竜巻が集中して発生しているように見える 19 の地域を指定して、その地域での竜巻の発生頻度等を代表的な竜巻の発生頻度とみなしている。

従って、原子力発電所がこれらの地域に該当した場合は、その地域を TA<sub>2</sub> とする。もし、原子力発電所の建設地点が人口密度の低い等の地域であった場合には、その位置から最も近い 19 の竜巻集中地域を TA<sub>2</sub> として設定する。

#### 4.4.3 その他の参考情報

総覧スケールの気象条件に基づく竜巻検討地域の設定に CAPE や SReH または、それらを統合した EHI 等の突風関連指数が審査資料で参照されている場合がある。審査資料[5]によれば、特に、F3 またはこれを超えるような極めて強い竜巻の発生については、CAPE, SReH に基づく分類で、大きく日本海側と太平洋側の地域に分類できることが示されている。また、北海道の一部は別の領域となることが示唆されている。

ただし、同資料によれば 2006 年の佐呂間竜巻 F3 は局所的な地形と発生当時の暖気と冷気の配置により発生したものとして、地形の類似性がないことから F3 の発生を排除することが述べられているが、F3 またはこれを超える竜巻の他の条件での発生を排除していることにはならず、注意が必要である。

#### 4.5 竜巻検討地域の設定

以上の様に、原子力発電施設の建設位置の地理的な条件、気象学的条件を考慮し、竜巻検討地域を設定する。評価手順を図 4.1 に示す。



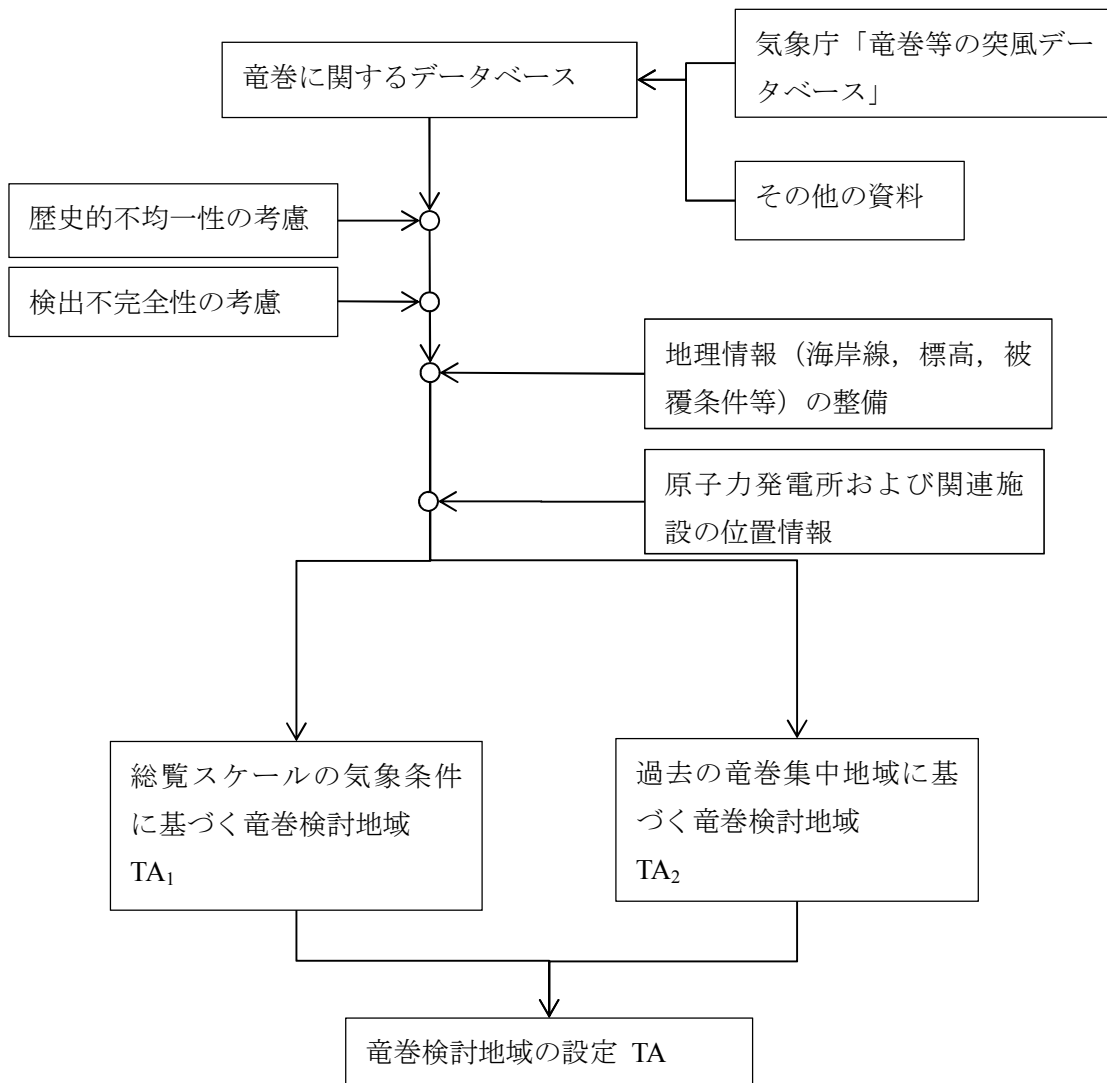


図 4.1 竜巻検討地域の設定手順

#### 4.6 審査資料における竜巻検討地域の設定事例

審査資料に基づき、原子力発電所における TA<sub>1</sub>、TA<sub>2</sub> の設定事例を表 4.3 にまとめた。TA<sub>2</sub> が明確に設定されていない事業所があるが、記録の不確定性の観点から、近接する集中地域を設定することが望ましい。

表 4.3 事業所ごとに審査資料で設定された TA<sub>1</sub> および TA<sub>2</sub>

事業所所	TA <sub>1</sub>	TA <sub>2</sub>
川内原子力発電所	低気圧起因、停滞前線起因、台風起因で分類して検討し、川内原子力発電所が低気圧起因には地域性が見られない、停滞前線起因には北海道を除く地域、台風起因は九州から太平洋側の地域で発生していることを指摘している。以上の観点から、最終的に、九州（沖縄を含む）、山口県、高知県、徳島県、和歌山県、三重県、愛知県、静岡県、神奈川県、東京都、千葉県、茨城県の太平洋側海岸線から 5km の範囲（海陸両方）を対象とした。	集中地域⑨に含まれている。
玄海原子力発電所	竜巻の発生要因を、低気圧起因、停滞前線起因、台風起因で分類して検討し、低気圧起因には地域性が見られない、停滞前線起因には北海道を除く地域、台風起因は九州から太平洋側の地域で発生していることを指摘している。以上の観点から、最終的に、九州（沖縄を含む）、山口県、高知県、徳島県、和歌山県、三重県、愛知県、静岡県、神奈川県、東京都、千葉県、茨城県の太平洋側海岸線から 5km の範囲（海陸両方）を対象とした。	集中地域⑧に接近している。
伊方原子力発電所	対象地点を中心とする面積 10 万 km <sup>2</sup> の円を設定し、その領域に含まれる海岸線から 5km 以内の範囲(海陸両側)を竜巻検討地域とした。	—
島根原子力発電所	台風起因、温帯低気圧起因、季節風（冬）での竜巻の発生状況を確認した。最終的に北海道から本州、の日本海側沿岸海岸線から海陸それぞれ 5km の範囲とした。	竜巻集中地域のうち、⑥と⑦に近接している。
大飯原子力発電所 高浜原子力発電所	立地する地域（地形条件）の類似性、気象条件の類似性から、北海道から本州の日本海側および北海道の襟裳岬以西の海岸に沿った海陸 5km の地域とした。	竜巻集中地域には該当しないとしている。
浜岡原子力発電所	台風、温帯低気圧、季節風（夏）、季節風（冬）、停滞前線、局地性、その他の 7 つに分類して、これらの総観場から、検討地域を沖縄県から茨城県の太平洋沿岸の海岸線から 5km の範囲とした。	竜巻集中地域④に含まれている。
柏崎刈羽原子力発電所	台風、温帯低気圧、季節風（夏）、季節風（冬）、停滞前線、局地性、その他の 7 つに分類して、これらの総観場から、検討地域を北海道から山陰地方にかけての海岸線から 5km の範囲とした。	竜巻集中地域④に含まれている。
女川原子力発電所	対象地点を中心とする 10 万 km <sup>2</sup> の円を設定し、その範囲に含まれる海岸線から陸側および海側 5km の範囲を竜巻検討地域として設定した。	—
泊原子力発電所	北海道から本州の日本海側と北海道襟裳岬以西の海陸 5km の範囲を竜巻検討地域として設定した。	竜巻集中地域②に含まれている。

## 5. ステップ2 基準竜巻の最大風速 ( $V_B$ ) の設定

### 5.1 概要

竜巻検討地域における竜巻の発生頻度や最大風速の年超過確率等を参照した上で基準竜巻の最大風速  $V_B$  を設定する。

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  $V_{B1}$  と竜巻最大風速のハザード曲線から設定した年超過確率に対応する竜巻最大風速  $V_{B2}$  のうち大きな値とする。

### 5.2 評価項目

ステップ2での評価項目は、過去に発生した竜巻による最大風速の設定と確率統計手法によるハザード曲線を基にした竜巻最大風速の設定、そして、それらの風速値を基に判断した基準竜巻の最大風速の設定である。

#### 5.2.1 過去に発生した竜巻による最大風速

日本における竜巻による最大風速を  $V_{B1}$  とする。ただし、十分に信頼のおけるデータ等に基づく場合は、日本を前章4.で設定した竜巻検討地域に読み替えて最大風速を設定することができる。

#### 5.2.2 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速

竜巻検討地域において竜巻最大風速と年超過確率の関係をハザード曲線として求め、設計で考慮する年超過確率  $P_{B2}$  に対応する竜巻最大風速を  $V_{B2}$  として求める。設計で考慮する年超過確率  $P_{B2}$  は、 $10^{-5}$  以下とする。

#### 5.2.3 基準竜巻の最大風速の設定

上記で設定された  $V_{B1}$  と  $V_{B2}$  を比較して、大きな値を基準竜巻の最大風速  $V_B$  とする。 $V_{B1}$  が  $V_B$  として採用された場合は、 $V_{B2}$  の決定に用いたハザード曲線に基づいて  $V_B$  の年超過確率  $P_B$  を算定する。手順を図5.1に示した。

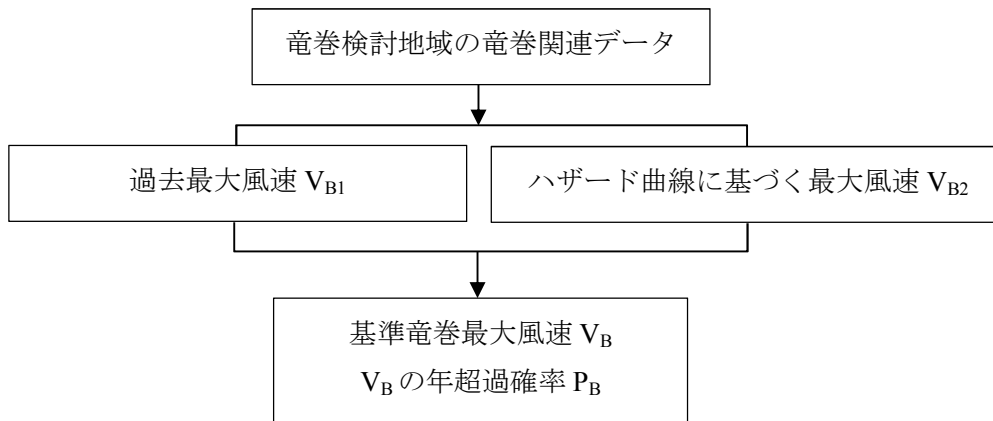


図 5.1 基準竜巻風速の設定手順

### 5.3 過去に発生した竜巻による最大風速

#### 5.3.1 最大風速評価の概要

前章 4.で示した留意事項を元に、竜巻に関するデータベース等に基づき、日本（信頼性のあるデータ等に基づくことが可能な場合は竜巻検討地域）における竜巻による過去最大風速を  $V_{B1}$  とする。ただし、一般的に竜巻の最大風速は被害程度から推定されることが多い。その場合は、表 5.1 に示される藤田スケールを用いて最大風速を設定する。日本における過去最大級の竜巻としては、表 5.2 に示すような竜巻が挙げられる。これらに基づかない場合には、その明確な根拠を示す必要がある。ただし、表 5.2 に示す竜巻の発生条件等を個別に評価し、設計対象地域における環境・条件の相違を議論しただけでは、その他の要因による竜巻を排除する根拠にならない点に留意する。

また、参考として、表 5.3 に平成 27 年 12 月に気象庁から発表された日本版改良藤田スケール(以下、JEF スケール)[6]の階級と風速の関係を示す。実際の運用は平成 28 年 4 月からの予定である。JEF スケールは被害の状況に基づき、それを再現する等価な通常の大気境界層の最大瞬間風速を求めているため、表 5.2 の評価と同様な評価となることが予想される。

表 5.1 藤田スケールの竜巻最大風速

階級	平均時間	風速
F0	約 15 秒	17～32 m/s
F1	約 10 秒	33～49 m/s
F2	約 7 秒	50～69 m/s
F3	約 5 秒	70～92 m/s
F4	約 4 秒	93～116 m/s
F5	約 3 秒	117～142 m/s

表 5.2 日本における過去最大級の竜巻

発生年月日	発生場所	Fスケール[6]	被害長[6]	被害幅[6]	気象条件[6]	推定最大瞬間風速
1990.12.11	茂原市	F3	65 km	500 - 1200m	暖気の移流 気圧の谷 寒冷前線	78m/s [7]
1999.9.24	豊橋市	F3	18 km	50 - 550m	台風	-
2006.11.7	佐呂間町	F3	1.4 km	100 - 300m	暖気の移流 寒冷前線	83 m/s [8]
2012.5.6	常総市から つくば市	F3	17 km	500m	気圧の谷 寒気の移流	85-94m/s *1) 114m/s *2) 109 - 121m/s *3)

\*1) 旋回流および急激な気圧降下が作用したと仮定したときの最大瞬間風速[9]

\*2) 旋回流のみが作用したと仮定したときの最大瞬間風速[9]

\*3) 定常風（最大瞬間風速）が作用したと仮定したときの最大瞬間風速[10]

表 5.3 日本版改良藤田スケールの竜巻最大風速[6]

階級	平均時間	風速
JEF0	3 秒	25～38 m/s
JEF1	3 秒	39～52 m/s
JEF2	3 秒	53～66 m/s
JEF3	3 秒	67～80 m/s
JEF4	3 秒	81～94 m/s
JEF5	3 秒	95 m/s ～

### 5.3.2 最大風速評価の留意点

過去の竜巻の最大風速は、藤田スケール等の被害状況からの推定値であることに留意しなければならない。最大風速の推定値は、様々な手法で推定されているが、被害から最大風速を推定する際の評価方法と、竜巻最大風速から竜巻による風圧力を算定する方法は整合していることが重要である。一般に、竜巻による非定常性や内圧の効果を考慮すると竜巻の風速は低めに評価されるが、そのようにして求められた風速を  $V_{BI}$  とする場合は、竜巻による風圧力を求める際の風力係数またはガスト影響係数を大きめに設定する必要がある。突風による非定常性の効果を考慮した風力の性質については、検討が始められたばかりであり、設計で用いるには資料が不足しているのが現状である。竜巻影響評価ガイド等に表示されている既存の耐風設計基規準等の風力係数を用いる場合は、ここでの  $V_{BI}$  は、平均風力係数  $C$  を用い、ガスト影響係数  $G$  を 1 とした推定最大風速を用いることが重要である。図 5.2 に過去最大竜巻風速  $V_{BI}$  の設定手順を示した。

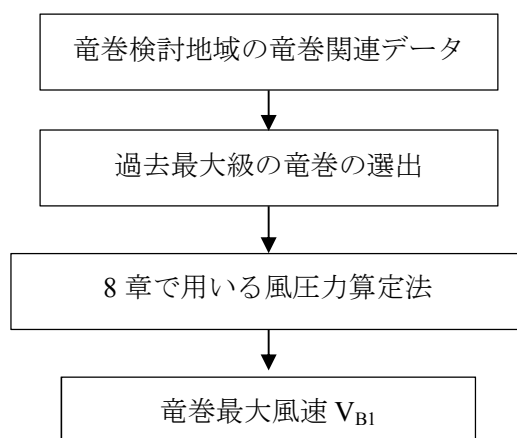


図 5.2 過去最大竜巻風速  $V_{BI}$  の設定手順

## 5.4 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速

竜巻による最大風速の年超過確率を求める際の計算フローを図 5.3 に示した。前章 4. で示した留意事項を考慮して竜巻に関するデータベース等に基づき、発生頻度や風速、被害幅、被害長さ、移動方向等の統計量から確率モデルを作成して計算を行う。

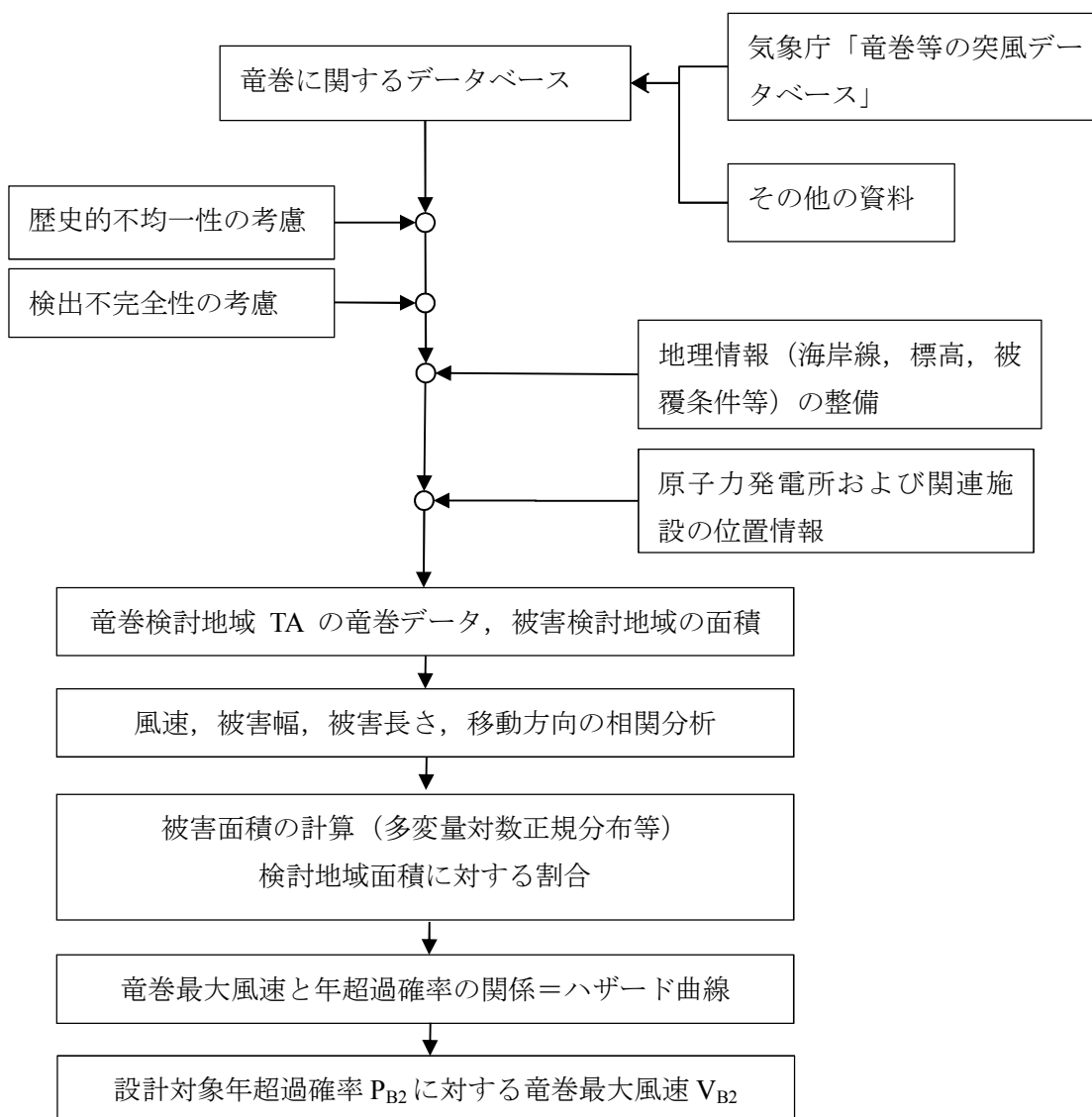


図 5.3 竜巻最大風速の年超過確率の評価と基準竜巻最大風速  $V_{B2}$  の設定手順

### 5.4.1 竜巻最大風速の年最大超過確率の評価

Wen & Chu [11]は、竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速がある値以上と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ポアソン分布 ((5.1)式) もしくはポリヤ分布 ((5.2)式) に適合する。

$$P_T(N) = \frac{(\nu T)^N}{N!} \exp(-\nu T) \quad (5.1)$$

$$P_T(N) = \frac{(\nu T)^N}{N!} (1 + \beta \nu T)^{-(N+1/\beta)} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (5.2)$$

ここで、ポリア分布の  $\beta$  は、(5.3)式によって推定が可能である。

$$\beta = (\sigma^2/\nu - 1)/\nu \quad (5.3)$$

ここで、

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

である。

Wen & Chu [11]は、ポアソン分布およびポリア分布に対応する  $T$  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  $P_{V_0,T}(D)$  の推定式が(5.4)式および(5.5)式で与えられることを導き出した。

$$P_{V_0,T}(D) = 1 - \exp[-\nu R(V_0)T] \quad (5.4)$$

$$P_{V_0,T}(D) = 1 - [1 + \beta \nu R(V_0)T]^{-1/\beta} \quad (5.5)$$

$D$  : 対象構造物が  $V_0$  以上の竜巻風速  $\nu$  に見舞われる事象

(5.4)式はポアソン分布、(5.5)式はポリア分布の式から導き出された。(5.4)式および(5.5)式に示された  $R(V_0)$  は、リスクの評価対象とする構造物が1つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が  $V_0$  以上となる確率である。Garson et. al [12][13]は、竜巻の被害域幅  $w$ 、被害域長さ  $l$ 、移動方向  $\alpha$ 、最大竜巻風速  $V_i$ 、照査竜巻風速  $V_0$  および対象構造物の平面寸法  $A$  および  $B$  が分かっている場合、1個の竜巻の風速が  $V_0$  以上となる面積  $DA(V_0)$  を(5.6)式および図 5.4 のように与えている。(5.6)式中の第1項から第4項は、図 5.4 に示された  $T$ 、 $P$ 、 $E$ 、および  $AB$  の面積に対応している。ここで、 $H$  および  $G$  は竜巻の被害域幅方向および被害域、長さ方向に沿った面への構造物の投影長さである。

$$\begin{aligned} DA(V_0) &= WL + HL + WG + AB ; & V_i &\geq V_0 \\ DA(V_0) &= 0 ; & V_i &< V_0 \end{aligned} \quad (5.6)$$

Garson et. al [2][3]は、(5.6)式をもとに(5.4)式および(5.5)式の中の  $R(V_0)$  が、(5.7)式を用いて(5.8)式によって与えられることを示している。



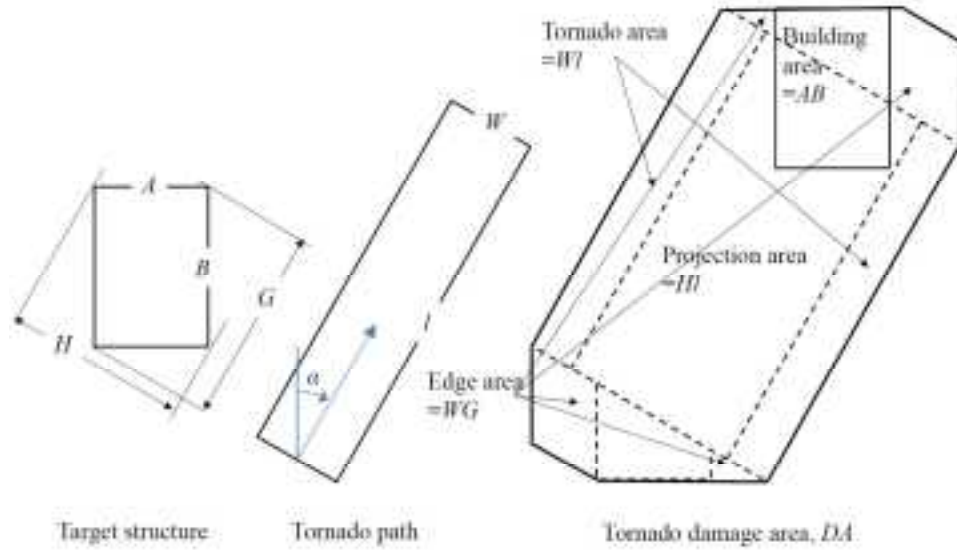


図 5.4 対象物の範囲を考慮した竜巻の影響範囲

$$\begin{aligned}
 E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) f(V, w, l) dV dw dl \\
 &\quad + \int_0^{360} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty H(\alpha) f(V, l, \alpha) dV dl d\alpha + \int_0^{360} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) G(\alpha) f(V, w, \alpha) dV dw d\alpha \\
 &\quad + AB \int_{V_0}^\infty f(V) dV \tag{5.7}
 \end{aligned}$$

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \tag{5.8}$$

ここで,

$V$ : 最大竜巻風速

$w$ : 被害域幅

$l$ : 被害域長さ

$\alpha$ : 竜巻の移動方向

$DA(V_0)$ : 1 個の竜巻の風速が  $V_0$  以上となる面積

$f(\cdot)$ : 確率密度

$A_0$ : リスクの評価対象とする地域の面積

$H(\alpha)$ : 被害域長さ方向に沿った面への構造物の投影長さ

$G(\alpha)$ : 竜巻の被害域幅方向に沿った面への構造物の投影長さ

である。

Garson et. al [12][13]は(5.7)式の中の  $W(V_0)$ に対し, (5.9)式を示している。

$$W(V_0) = \left( \frac{V_w}{V_0} \right)^{1/1.6} w \tag{5.9}$$

ここで,

$w$ : 竜巻の被害域幅の観測値

$V_w$ : 被害域幅  $w$  内の最小竜巻風速

$V_0$  : 照査竜巻風速

$W(V_0)$  : 竜巻風速が  $V_0$  以上となる幅

である。

#### 5.4.2 竜巻風速, 被害幅, 被害長さ及び移動方向の評価

対象構造物が1個の竜巻に遭遇し, 竜巻風速がある値以上となる確率は(5.7)式~(5.9)式で計算されるが, (5.7)式中の  $f(V, w, l)$ ,  $f(V, l, \alpha)$ ,  $f(V, w, \alpha)$ , および  $f(V)$  は, 竜巻によって生じる竜巻風速, 被害域幅, 被害域長さ, および移動方向の同時確率密度である。この確率密度を, どの確率分布モデルで適切に評価することができるかを検討する必要がある。

竜巻風速を直接計測することは難しい。しかし, 竜巻によって生じた被害から表 5.1, 表 5.2 に示すように竜巻風速を推定することは可能である。これらの表に示すように, フジタスケールから推定される竜巻風速には大きなばらつきがある。そのため, 既往の研究 (Twisdale et al. [14], Markee et al.[15]) と同じように安全側になることを考慮し, 各フジタスケールに対応する下限以上となる超過確率をもとに確率分布を評価する。米国の場合, 被害域幅と被害域長さを掛け合わせた被害面積, および竜巻風速の頻度分布は, ともに対数正規分布に適合する (Wen & Chu [11], Garson et. al [12][13])。また, 被害面積と竜巻風速の相関係数は 0.6 程度である。そのため, 被害面積と竜巻風速は 2 変量対数正規分布で評価できるとしている。既往の報告[3]では, 日本において, 気象庁の竜巻等の突風データベース[6]から得られた被害域幅, 被害域長さ, および竜巻風速の頻度分布は, 対数正規分布への適合性を確認している。被害域幅, 被害域長さ, および竜巻風速の相関係数は 0.2 から 0.36 であり, 正の相関性が認められた。そこで, 被害域幅, 被害域長さおよび竜巻風速は, (5.10)式のような 3 変量対数正規分布によって評価することとした。

$$f(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \left| \begin{array}{ccc} \zeta_x^2 & \zeta_x \zeta_y \rho_{xy} & \zeta_x \zeta_z \rho_{xz} \\ \zeta_x \zeta_y \rho_{xy} & \zeta_y^2 & \zeta_y \zeta_z \rho_{yz} \\ \zeta_x \zeta_z \rho_{xz} & \zeta_y \zeta_z \rho_{yz} & \zeta_z^2 \end{array} \right|^{1/2} xyz} \exp \left[ -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \ln(x) - \lambda_x & \ln(y) - \lambda_y & \ln(z) - \lambda_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \zeta_x^2 & \zeta_x \zeta_y \rho_{xy} & \zeta_x \zeta_z \rho_{xz} \\ \zeta_x \zeta_y \rho_{xy} & \zeta_y^2 & \zeta_y \zeta_z \rho_{yz} \\ \zeta_x \zeta_z \rho_{xz} & \zeta_y \zeta_z \rho_{yz} & \zeta_z^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \ln(x) - \lambda_x \\ \ln(y) - \lambda_y \\ \ln(z) - \lambda_z \end{pmatrix} \right]$$

$$0 < x \leq \infty \quad 0 < y \leq \infty \quad 0 < z \leq \infty \quad (5.10)$$

ここで,

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  : 変数  $\ln(x), \ln(y)$ , および  $\ln(z)$  の平均値

$\zeta_x, \zeta_y, \zeta_z$  : 変数  $\ln(x), \ln(y)$ , および  $\ln(z)$  の標準偏差

$\rho_{xy}$  :  $\ln(x)$  と  $\ln(y)$  の相関係数

$\rho_{xz}$  :  $\ln(x)$ と  $\ln(z)$ の相関係数

$\rho_{yz}$  :  $\ln(y)$ と  $\ln(z)$ の相関係数

である。

竜巻の移動方向の頻度分布がどのような確率分布で評価できるか、明らかではない。気象学的な要因や立地条件などによって特性が異なると考えられる。このような場合、比較的適用性の高いフーリエ級数を用いる方法があげられる[3]。移動方向の観測精度を考えると、移動方向の評価は4次から5次程度のフーリエ級数で近似するのが妥当[3]としている。

(5.7)式の第2項および第3項に含まれる投影幅 $H(\alpha)$ および $G(\alpha)$ は、図5.4に示された竜巻の移動方向、構造物の寸法 $A$ および $B$ を用いて、(5.11)式と(5.12)式のように与えられる。

$$H(\alpha) = B|\sin(\alpha)| + A|\cos(\alpha)| \quad (5.11)$$

$$G(\alpha) = A|\sin(\alpha)| + B|\cos(\alpha)| \quad (5.12)$$

移動方向をフーリエ級数近似した場合は、相関の考慮は、移動方向別に移動方向を除く変数の相関係数を求め、移動方向毎に積分を行い、移動方向の頻度を乗じて合計する等の方法が考えられる。しかしながら、現状では移動方向で元となるデータを分類すると頻度の低い移動方向では相関係数を十分な精度で近似できないなどの問題が生じる。このような場合は、相関係数は移動方向に依存しないものとして積分を実施する等の工夫が必要である。

## 5.5 審査資料における対象範囲の面積および過去最大竜巻の設定事例

審査資料に基づき、原子力発電所における TA<sub>1</sub> の面積および、設定した過去最大の F スケールを表 5.4 にまとめた。IAEA では、対象地域の面積を 10 万 km<sup>2</sup>(=100×10<sup>3</sup>km<sup>2</sup>)とすることとしている。一方、審査資料では事業所毎に 6～85×10<sup>3</sup>km<sup>2</sup> とさまざまである。また、設定された面積が小さい場合には、頻度の低い F スケールの大きな竜巻の発生個数が 0 になってしまう可能性があることに注意すべきである。

表 5.4 事業所ごとに審査資料で設定された TA<sub>1</sub> の面積および過去最大竜巻の F スケール<sub>2</sub>

事業所	TA <sub>1</sub> 面積	過去の竜巻 F スケール
川内原子力発電所	85.4×10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup>	対象地域の範囲で発生した竜巻は 336 個であった。F スケールの比較的大きな竜巻の個数は、F3 が 1 個、F2～F3 が 5 個、F2 が 26 個、F1～F2 が 20 個である。
玄海原子力発電所	85.4×10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup>	対象地域の範囲で発生した竜巻は 336 個であった。F スケールの比較的大きな竜巻の個数は、F3 が 1 個、F2～F3 が 5 個、F2 が 26 個、F1～F2 が 20 個である。
伊方原子力発電所	26.6×10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup>	対象地域の範囲で発生した竜巻は 53 個であり、F3 が 1 個、F2 が 12 個、F1 が 25 個、F0 が 15 個とした。
島根原子力発電所	33.4×10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup>	対象地域の範囲で発生した過去最大の竜巻は F2 であるとした。
大飯原子力発電所 高浜原子力発電所	38.9×10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup>	竜巻の記録の信頼性を考慮して、竜巻検討地域を日本全体に広げて F3 を設定した。
浜岡原子力発電所	81.1×10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup>	過去最大は F3 であるとした。
柏崎刈羽原子力発電所	33.4×10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup>	過去最大は F2 であるとした。
女川原子力発電所	5.86×10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup>	設定した竜巻検討地域で発生した過去最大の竜巻は F1 であるとした。
泊原子力発電所	38.9×10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup>	その範囲での過去最大の竜巻は F2 とした。ただし、総観場の類似性から寒冷前線で F3 の竜巻が発生しうるとした。

## 6. ステップ3 設計竜巻の最大風速 ( $V_D$ ) の設定

### 6.1 概要

発電所サイトの立地する地域特性等を考慮して  $V_B$  の割り増しを行い、最大風速  $V_D$  を設定する。

### 6.2 評価項目

発電所サイトの立地する地域特性等を考慮してステップ 3 では、基準竜巻の最大風速から、設計竜巻の最大風速を設定する。そのためには、発電所サイト周辺の地形、気候条件といった気象学的な検討と、発電所サイトの地表面の空気力学的な粗度、小地形の影響などの空気力学的な検討が必要とされる。ただし、気象学的な検討、空気力学的な検討共に、竜巻に対する影響は、非常に複雑である。また、過去の竜巻の風速の評価に含まれる誤差のオーダーを考慮して、必要な範囲で判断する必要がある。

### 6.3 設計竜巻の最大風速の設定

前章 5.において設定された竜巻最大風速  $V_B$  に対して、発電所サイトの立地などの地域特性に応じた割り増しの必要性を検討する。割り増し係数を  $\alpha$  とすれば、

$$V_D = \alpha \cdot V_B, \quad (6.1)$$

ただし  $\alpha \geq 1$

つまり低減は行わないものとする。地形の効果などは、基準竜巻の最大風速から設計風速を割り増す方向だけとは限らない。しかし、現在のガイドで低減を許容しないのは、地形による増減が明らかにできていないための安全側への配慮という意味を持っているものと判断できる。

局所的な地形の影響については、いくつかの数値実験や現地調査結果が参考となるが、これらの結果は、単純な説明が困難であることを示している。Lewellen [16]は、竜巻のサイズに比して比較的小さな、尾根状、丘陵状、谷状等の地形の効果に関する数値実験を行ったが、この結果は、角運動量の保存則やケルビンの循環保存定理等で単純に説明がつかうものではなかった。むしろ、通常の大気境界層が尾根上地形の頂部で増速する経験的な状況に近い結果であった。ただし、竜巻時の接地境界層内の風速の鉛直分布は、竜巻に特徴的な強い渦度の影響を受け最大風速は地表面に近い部分で生じており、通常の大気境界層の鉛直分布とは大きく異なっている。これらの状況を考えると、実地形において竜巻に局所地形が及ぼす影響については、できるだけ、実地形や竜巻の流れ場の性質を考慮した物理実験や数値実験で判断することが必要である。

竜巻の強さの評価に際して、現在の気象庁のデータベース等は全て現地被害の状況から判断されたものである。この状況を考慮すると、個々の竜巻の風速は、それぞれの地域特

性のある程度含んだものと解釈できる。従って、原子力発電施設サイト近傍と過去の発生場所との間で地形や粗度に大きな違いがないことを確認し、原子力発電施設を建設するサイト近傍において、過去に十分な数の竜巻の被害調査事例が存在する場合は、それらの情報から設定した基準竜巻最大風速  $V_B$  にさらに地域特性を考慮する必要はないと考えられる（ただし、前述のきわめて局所的な地形の影響は除く）。

一方で、竜巻の最大風速の評価が、現状では、現地被害調査に基づく推定値であり、気象庁が 2015 年 12 月に発表した「日本版改良フジタスケール」[6]の風速の評価方法を見ても、風速の推定値には 5m/s 程度の誤差が含まれていることは想像に難くない。その場合、風速の数%程度の増加率の議論は意味を失う。

以上、まとめて、基準竜巻の最大風速  $V_B$  に基づき、建設地点の立地状況などを考慮して設計竜巻の最大風速  $V_D$  を設定する手順は、図 5.5 のようにまとめられる。

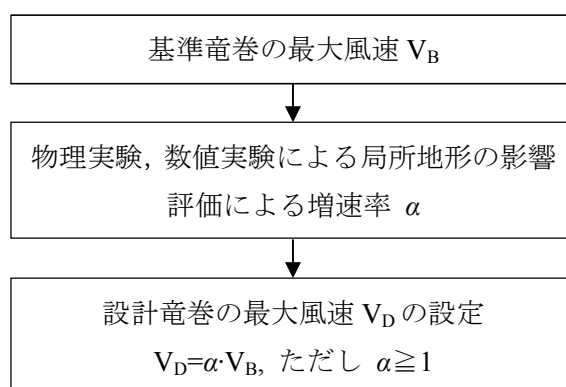


図 5.5 設計竜巻の最大風速  $V_D$  の設定手順

## 7. ステップ4 設計竜巻の特性値の設定

### 7.1 概要

設計竜巻最大風速  $V_D$  に基づいて移動速度，最大気圧低下量等の特性値を設定する。

### 7.2 評価項目

ステップ4では，設計竜巻のイメージを明確にする。このためには，前章で決定された設計竜巻最大風速以外の諸量を決定する必要がある。ここでの特性値は，竜巻の特性を表す諸量であり，気圧低下量，最大旋衡風速半径などであるが，竜巻が原子力発電施設へ与える影響を考慮して適切に設定することが必要である。決定すべき特性値は，竜巻のモデルの選択に大きく影響を受ける。また，特性値は，最大風速との関係に関する分析結果から決定する必要がある。さらに，決定された特性値を有する竜巻モデルから，気圧変化率等の設計に必要な諸量を設定する。

#### 7.2.1 設計竜巻のモデル

設計竜巻のモデルは比較的単純な数学モデルの一つであるランキン渦モデルを用いる。竜巻状の流れ場を表すモデルは他にも多数提案されているが，それぞれのモデルの特徴を理解したうえで，モデル選択の不確定性等にも留意する。

#### 7.2.2 特性値の種類

一般に渦モデルを規定するのは，渦の大きさと強さである。（複雑な渦モデルは他に渦の分布を表すパラメータ等の変数が必要となる。）また，竜巻の移動を表すために，渦と移動速度を重ね合わせるができることと仮定して設定する。

#### 7.2.3 設計諸量の評価

渦モデルから導かれる風速や気圧に関する諸量のうち，設計で考慮すべき値を計算する。

### 7.3 設計竜巻の特性値の設定

設計竜巻の特性値は，竜巻渦モデルを用いて竜巻を表すために必要なパラメータと，竜巻渦モデルから計算される値の2種類がある。比較的単純な渦モデルとして，ランキン渦モデルがある。ランキン渦モデルは，2次元の渦モデルであり，その速度場  $V(r)$  と圧力場  $P(r)$  は竜巻中心からの距離  $r$  の関数として次式で表される。

$$V(r) = \begin{cases} (r/R_M)V_M & (r \leq R_M) \\ (r/R_M)^{-1}V_M & (r > R_M) \end{cases} \quad (7.1)$$

$$P(r) = \begin{cases} P_S - (1 - \frac{1}{2}(r/R_M)^2)\rho V_M^2 & (r \leq R_M) \\ P_S - \frac{1}{2}(r/R_M)^{-2}\rho V_M^2 & (r > R_M) \end{cases} \quad (7.2)$$

ここで、 $R_M$  は最大旋衡風速半径、 $V_M$  は最大旋衡風速、 $P_S$  は各高さでの大気静圧、 $\rho$  は空気密度である。また、移動速度  $V_T$  は、上記の  $V(r)$  と重ね合わせることができるものと仮定する。以上の仮定の下で渦を特徴づける特性値は、

- (1) 移動速度  $V_T$
- (2) 最大旋衡風速  $V_M$
- (3) 最大旋衡風速半径  $R_M$

となる。

また、これらの値を気圧場を表す式に代入すると

- (4) 中心気圧低下量  $D_p$
- (5) 気圧低下率  $(dP/dt)_{\max}$

等の値を計算することができる。

移動速度  $V_T$ 、最大旋衡風速半径  $R_M$  は、過去の最大風速との関係についての研究結果等から、決定することができる。文献[3]によれば、移動速度は平均的には、最大風速の 15% 程度であり、

$$V_T = 0.15 V_D$$

とすることができる。

竜巻が同心円状の渦と移動速度の重ね合わせで表現できるものと仮定すると、最大旋衡風速  $V_M$  は、

$$V_M = V_D - V_T \quad (7.3)$$

で与えられる。また、最大旋衡風速半径は、日本における竜巻に対する考察[3]から、

$$R_M = 30 \text{ (m)} \quad (7.4)$$

とすることができる。

これらの値を用いると、空気密度を  $\rho$  として、中心気圧低下量  $D_p$  は、

$$D_p = \rho V_M^2 \quad (7.5)$$

最大気圧低下率  $(dP/dt)_{\max}$  は、

$$dP/dt|_{(r=R_M)} = (V_T/R_M) D_p \quad (7.6)$$

のように計算することができる。

ここで、ランキン渦から計算できる特徴的中心気圧低下量と気圧低下率の 2 種類の気圧



に関する値を導いたが，設計対象とする部位や設備の性質を考慮し，適した特徴量を評価すべきである。

図 7.1 に評価フローを示す。

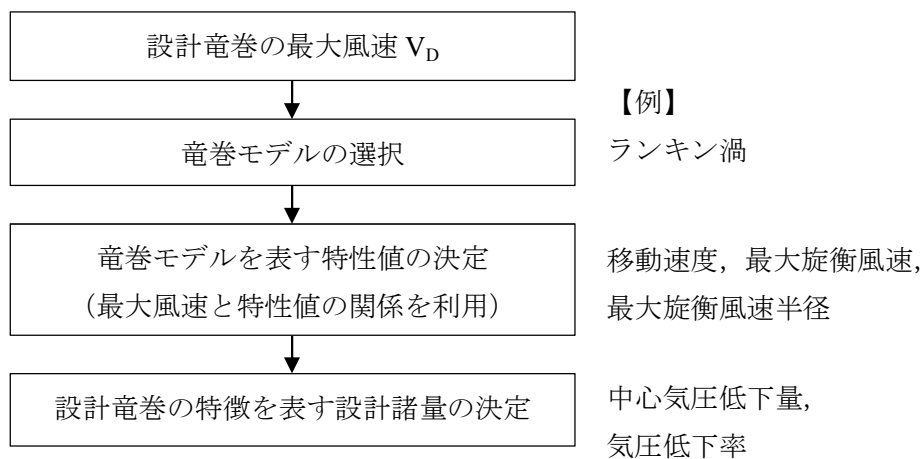


図 7.1 設計竜巻を表す特性値の設定手順

## 8. ステップ5 設計竜巻荷重 ( $F_D$ ) の設定

### 8.1 概要

設計竜巻荷重を設定する。荷重の種類としては、設計対象に応じて適切なものを選択する必要がある。竜巻影響評価ガイドでは、風圧力、気圧差、飛来物の衝突による衝撃荷重を設定することとしている。また荷重の組み合わせを設定する。

### 8.2 評価項目

ステップ5での評価項目は、設計竜巻荷重の設定である。荷重の種類としては、設計対象に応じて適切なものを選択する必要がある。竜巻影響評価ガイドでは、風圧力による荷重、気圧差による荷重、飛来物による荷重の3種類を対象とすることとしている。さらに、荷重の組み合わせを検討する。

#### 8.2.1 風圧力による荷重

設計竜巻最大風速  $V_D$  による速度圧  $q$  に風力係数  $C$  とガスト影響係数  $G$ 、対象となる面積  $A$  を乗じて、構造物各部に作用する風圧力を評価する。風力係数、ガスト影響係数は、基準となる速度圧の定義によって適切に設定する必要がある。また、竜巻データベースでの風速評価に整合させる必要がある。

#### 8.2.2 気圧差による荷重

気圧差による影響は、設計竜巻最大風速が作用している構造物には、構造物の内外圧差として、風圧力と同様な作用を及ぼす。また、施設や設備が気圧差に影響を受けると考えられる場合は、その影響を適切に評価する。

#### 8.2.3 飛来物による衝撃荷重

飛来物に対する衝撃荷重を設定するには、飛来物の種類、衝突速度、衝突条件等の検討が必要になる。飛来物の種類については、原子力発電施設における飛来物候補を適切に選定することが必要である。構造物や施設の一部が破損して飛来物になる可能性や、砂利や樹木など自然物の一部が飛来物になる可能性があるため、人工物がすべて固縛されているからと言って評価を避けることがあってはならない。また、規模が大きな竜巻では、被害を受けた住家や設備の一部が数十 km も飛散した例が報告されており、原子力発電所の敷地外からの飛来の可能性についても考慮が必要である。

#### 8.2.4 設計竜巻荷重の組み合わせ

荷重の組み合わせに際しては、竜巻の性質をよく考慮し、適切に組み合わせることが必

要である。

### 8.3 風圧力による荷重

設計竜巻最大風速を  $V_D$  とすれば、速度圧  $q$  は、

$$q = (1/2) \rho V_D^2 \quad (8.1)$$

で与えられる。さらに、竜巻による風圧力  $P_D$  は、

$$P_D = q G C A \quad (8.2)$$

で与えられる。ここで、 $C$  は風力係数、 $G$  はガスト影響係数、 $A$  は対象となる面積である。

風力係数、ガスト影響係数は、基準となる速度圧の定義によって適切に設定する必要がある。また、竜巻データベースでの風速評価に整合させる必要がある。設計竜巻最大風速  $V_D$  は、竜巻の被害状況から判断された最大瞬間風速値である。被害状況から風速を推定する場合は、風速から物体へ作用する風力への変換関数（空気力学的アドミッタンス）は通常の大気境界層における最大瞬間風速と風力の関係を用いていることが一般的であるので、ここでも、同様な空力アドミッタンスを用いて整合させる必要がある。以上の観点から、風力係数  $C$  は平均風力係数を、ガスト影響係数  $G$  は、1 とする。定常流れ場での平均風力係数は、「建築基準法」や日本建築学会「建築物荷重指針・同解説」等に掲載されているものを準用する。

その他、風圧力による風荷重を設定する際の代表的な注意点を以下に挙げる。

- (1) 竜巻時の非定常な流れ場での空力アドミッタンスは非常に複雑で評価方法が確立されていない。今後の検討課題である。
- (2) 基規準における構造骨組と外装材等に対する風荷重の評価方法は若干異なる。構造骨組に対する風荷重は平均風力係数とガスト影響係数の積で空気力学的な作用が考慮されるのに対し、外装材等については、ピーク風圧係数と部材両面に同時に作用する圧力差を考慮しなければならない。基規準の風力係数、風圧係数、ガスト影響係数などの諸係数を準用する際には、通常の大気境界層との違いを考慮する必要がある。
- (3) 構造物の一部等が破損すると破片の一部が飛散し、飛来物となって周囲の構造物に衝撃的な作用を及ぼすことになる。飛来物の発生要因の検討のために、構造骨組だけでなく、外気にさらされているあらゆる部材に作用する風圧力を評価し、損傷を受けないことを確認することが必要である。
- (4) 竜巻の際の地上付近の風速分布は、通常の高気圧や季節風時の風速分布と異なり、風速の最大値を呈する高さが地上に近いことが実験的にも理論的にも知られており、耐風設計で

一般的に用いられる風速の鉛直分布は考慮せずに、地上付近はどの高さでも最大瞬間風速が発生しうるものとして取り扱う。

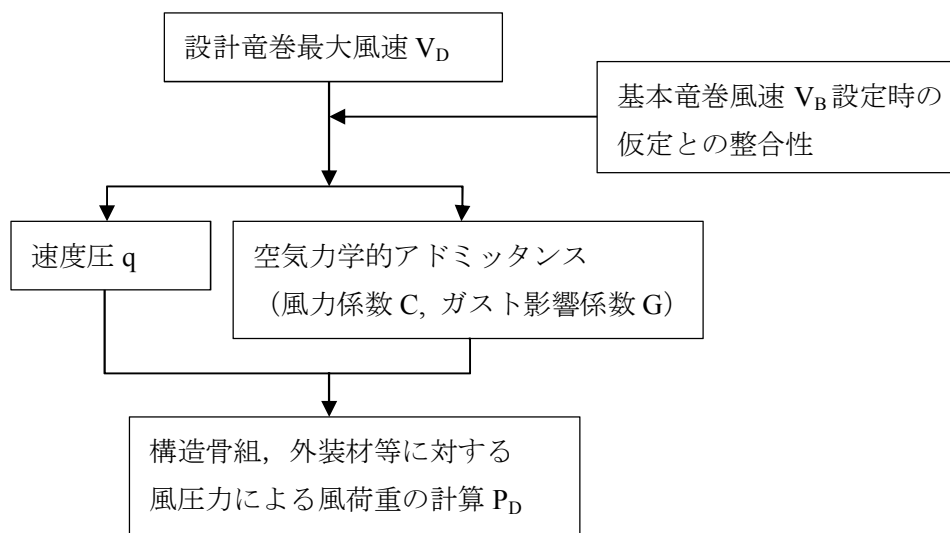


図 8.1 風圧力による風荷重の設定手順

#### 8.4 気圧差による荷重

気圧差による影響は、設計竜巻最大風速が作用している構造物には、構造物の内外圧差として、風圧力と同様な作用を及ぼす。また、構造骨組だけでなく、屋根ふき材、外壁材、建具等の外装材等についても影響を考慮することが必要である。急激な大気静圧の変化が生じた場合、構造物の大気静圧による内外圧差は、開放型や部分開放型の構造物の場合は急速に解消される。また、閉鎖型の構造物も徐々に解消される。

また、原子力発電施設に特有な機器、設備等についても、急激な気圧差に影響を受けると考えられる場合は、その影響を適切に評価することが望ましい。

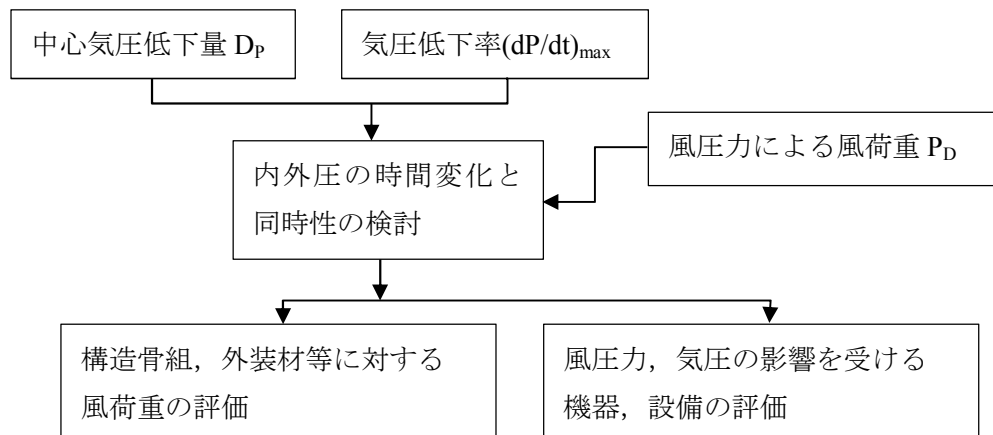


図 8.2 気圧差による風荷重の設定手順

## 8.5 飛来物による衝撃荷重

### 8.5.1 設計飛来物の選定

原子力施設構内の設計対象施設に到達する可能性のある飛来物を全て列記する。このうち固縛対策等によって飛来物の発生が防止できるものは設計飛来物と考えなくともよい。ただし、竜巻の発生は急速であるため、短時間で固縛対策等の処置は困難であることから、固縛対策等は原則として常時行う必要がある。作業中の車両等で固縛されない物体は、固縛対策等の手順を決定しておき、竜巻注意情報の発表後、速やかに固縛対策がなされることを確実にする必要がある。さらに構造物や施設の一部が破損して飛来物になる可能性や、砂利や樹木など自然物の一部が飛来物になる可能性を考慮する。また、事業所敷地外からの飛来物についても検討が必要である。

列記された飛来物を質量や特性からいくつかの種類に分類し、ガイドで要求する設計飛来物と比較する。ガイドでは、次の代表飛来物を設計飛来物の最低条件として要求している。

- i) 大きな運動エネルギーをもつ飛来物（自動車）
- ii) 施設の貫入抵抗を確認するための固い飛来物（鉄骨部材等）
- iii) 開口部を通過することができる程度に小さくて固い飛来物（砂利等）

多くの飛来物はこれらの 3 種類に分類されるであろうが、形状や質量および発生位置が異なると飛来物の軌跡は変化し、衝突位置や衝撃荷重が変化するので、可能性のある飛来物をできるだけ多く抽出し、その中から数種類の設計飛来物を設定することが望ましい。

### 8.5.2 設計飛来物の速度

最大水平速度  $MV_{Hmax}$  は、非定常な乱流場を数値的に解析できる計算手法による解析結果

による。竜巻渦モデルのいずれかを選択し、その風速場の中で、設計飛来物が相対速度の2乗に比例した抗力を受けるものとして、(8.3)式の3自由度の運動方程式を逐次計算することによって求めることができる[17]。

$$\frac{d\mathbf{V}_M}{dt} = \frac{1}{2}\rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) - g\mathbf{K} \quad (8.3)$$

ここで、

$m$  : 飛来物の質量

$A$  : 代表面積

$C_D$  : 抗力係数

$\mathbf{V}_w$  : 風速ベクトル

$\mathbf{V}_M$  : 飛来物の速度ベクトル

$\rho$  : 空気密度

$g$  : 重力加速度

$\mathbf{K}$  : 重力方向成分のみ1のベクトルで、他の方向では0である。

$C_D A$  は現在十分なデータはないが、物体静止時の3軸の抗力係数とそれぞれの軸方向の投影面積の積として(8.4)式で表すことができる。

$$C_D A = c(C_{D1}A_1 + C_{D2}A_2 + C_{D3}A_3) \quad (8.4)$$

$c$  は係数で、棒状飛来物では0.5、自動車では0.33、円柱物体では安全側に0.5と仮定することができる。

(8.3)式の解析から、設計乱流場の中の設計飛来物の逐次の速度が得られ、設計飛来物の位置と高さおよび設計対象施設までの距離を想定することにより、衝突速度が得られる。最大水平速度と最大鉛直速度はその衝突速度とすることができるが、ガイドでは最大鉛直速度  $M V_{V_{\max}}$  は最大水平速度の2/3としてよいとしている。

### 8.5.3 設計飛来物の衝突方向、衝突範囲、衝突荷重の設定

設計飛来物の発生位置と設計対象施設との位置を仮定し、選択した竜巻渦モデルの気流中で、(8.3)式の運動方程式を用いて設計飛来物の軌跡を計算し、その結果から設計飛来物の衝突方向（衝突角度）を求めることができる。衝突範囲は設計竜巻の進路を種々に変化させて、設計飛来物と設計対象施設の関係から広範囲に検討する必要がある。これにはモンテカルロ・シミュレーションの手法を利用することができる。

衝突荷重  $W_M$  は、設計飛来物の質量と衝突時の加速度の積とすることができる。

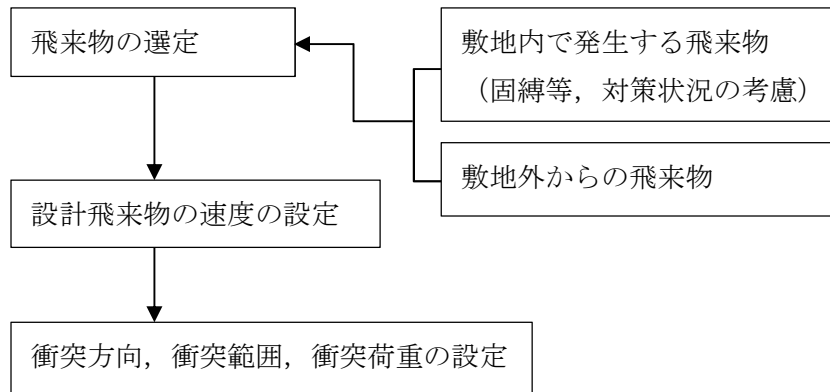


図 8.3 飛来物による衝撃荷重の設定手順

## 8.6 設計竜巻荷重の組み合わせ

荷重の組み合わせに際しては、竜巻の性質をよく考慮し、適切に組み合わせることが必要である。

「竜巻影響評価ガイド」では、米国 NRC の基準類[18]を参照して、

$$W_{T1} = W_p \quad (8.5)$$

$$W_{T2} = W_w + 0.5W_p + W_M \quad (8.6)$$

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

$W_p$  : 設計竜巻による気圧差による荷重

$W_M$  : 設計飛来物による衝撃荷重

とした上で、設計対象施設には、 $W_{T1}$  及び  $W_{T2}$  の両荷重を作用させるものとしている。

特に、 $W_{T2}$  の組み合わせにおいて、気圧差の影響を 0.5 倍している。ランキン渦において、最大風速発生位置における静圧の低下量は、中心気圧低下量の 0.5 倍であるので、最大風圧力と組み合わせる場合の静圧の低下量に 0.5 を乗じるのは一定の合理性があるが、これは構造物と竜巻の規模、大きさとの相対関係を考慮すべき状況も生じる可能性がある。比較的大規模な構造物の場合、竜巻中心気圧の影響と最大風速の影響が同一の構造物に同時に作用する可能性が否定できないからである。ただし、気圧差の影響は瞬時に構造物の全体、あるいは内部、外部に伝わる状況では、荷重としての効果は相殺される可能性もある。実況に応じて検討すべきであると考えられる。

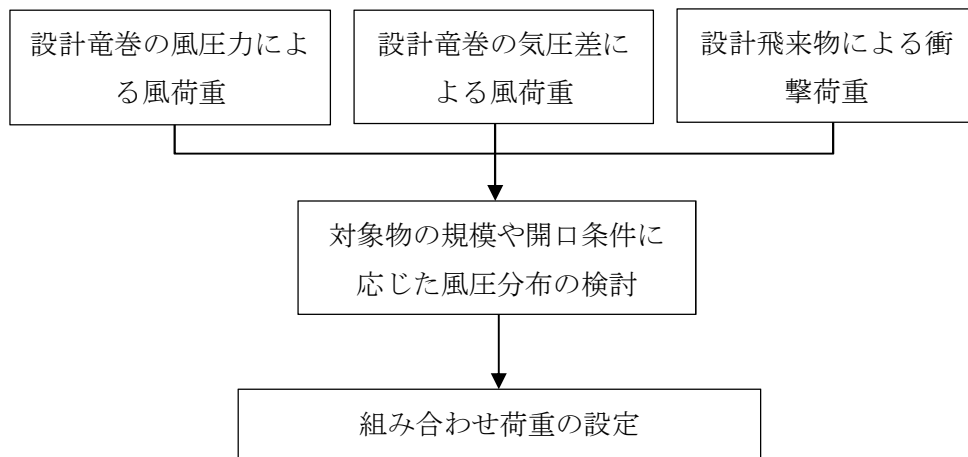


図 8.4 竜巻による組み合わせ荷重の設定手順



## 9. まとめ

原子力規制委員会「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（平成 25 年 6 月）および独立行政法人原子力安全基盤機構「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）に則して、原子力発電所に竜巻が与える影響の評価手順について、検討項目を明記し、評価上必要な解説を付して、その流れをフロー図で表示した。また、以上をまとめたものを表 9.1 として示す。

竜巻による影響そのものは、自然現象であり、何らかの不確定性を含むものであるが、本報告書発行時点において、工学的に対応可能な方法の組み合わせで構成されている。今後も、より安全性を高めるために、現象の解明や解析方法に関する研究開発が必要とされる内容が含まれることを記しておく。

表9.1 標準的な評価項目と技術要素の抽出・選定するための整理

ステップ	評価項目(内)	評価項目に対する調査技術 (参照表を参照)	評価項目の抽出				備考 (今後の課題等)
			調査方法の記載内容 ・調査方法 ・調査対象 ・調査期間	調査方法の抽出 ・調査方法 ・調査対象 ・調査期間	調査方法の抽出 ・調査方法 ・調査対象 ・調査期間		
					定性的な抽出	半定量 抽出	
1	電気の発生状況	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電気の発生状況</li> <li>・電気の発生場所</li> <li>・電気の発生量</li> </ul>	電気の発生状況	電気の発生状況	電気の発生状況	電気の発生状況	電気の発生状況
	電気の発生場所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電気の発生場所</li> <li>・電気の発生場所</li> <li>・電気の発生場所</li> </ul>	電気の発生場所	電気の発生場所	電気の発生場所	電気の発生場所	電気の発生場所
2	電気の発生量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電気の発生量</li> <li>・電気の発生量</li> <li>・電気の発生量</li> </ul>	電気の発生量	電気の発生量	電気の発生量	電気の発生量	電気の発生量
	電気の発生場所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電気の発生場所</li> <li>・電気の発生場所</li> <li>・電気の発生場所</li> </ul>	電気の発生場所	電気の発生場所	電気の発生場所	電気の発生場所	電気の発生場所
3	電気の発生場所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電気の発生場所</li> <li>・電気の発生場所</li> <li>・電気の発生場所</li> </ul>	電気の発生場所	電気の発生場所	電気の発生場所	電気の発生場所	電気の発生場所
	電気の発生量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電気の発生量</li> <li>・電気の発生量</li> <li>・電気の発生量</li> </ul>	電気の発生量	電気の発生量	電気の発生量	電気の発生量	電気の発生量
4	電気の発生場所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電気の発生場所</li> <li>・電気の発生場所</li> <li>・電気の発生場所</li> </ul>	電気の発生場所	電気の発生場所	電気の発生場所	電気の発生場所	電気の発生場所
	電気の発生量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電気の発生量</li> <li>・電気の発生量</li> <li>・電気の発生量</li> </ul>	電気の発生量	電気の発生量	電気の発生量	電気の発生量	電気の発生量

○：抽出済、●：抽出済、○：抽出済、●：抽出済

## 参考文献

- [1] 原子力規制委員会：「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」，平成 25 年 6 月
- [2] 独立行政法人原子力安全基盤機構：「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
- [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
- [4] 気象庁，竜巻等の突風データベース，  
URL <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/>, 2016
- [5] 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 2 月，東京電力株式会社
- [6] 気象庁，日本版改良フジタスケールに関するガイドライン，平成 25 年 12 月
- [7] 山口修由他，1990 年の千葉県茂原市の竜巻による建築物の被害調査報告，建築研究資料，No.78，建設省建築研究所，1992.3
- [8] 土木学会竜巻緊急災害調査団，2006 年 11 月 7 日に発生した北海道佐呂間町竜巻被害調査緊急報告，土木学会誌，Vol.92，No.2，36-39，2007
- [9] 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人建築研究所，平成 24 年(2012 年)5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した建築物等の竜巻被害調査報告，2013
- [10] 日本風工学会 風災害研究会，【速報】2012 年 5 月 6 日に北関東地方で発生した広域突風災害について，日本風工学会誌，Vol.37，No.3 pp.210-222，2012
- [11] Wen.Y.K and Chu. S.L. (1973) : Tornado risks and design wind speed, Proceedings of American Society of Civil Engineering, Journal of Structural Division 99, 2409 - 2421.
- [12] Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C.A. (1975) : Tornado risk evaluation using wind speed profiles, Journal of Structural. Division, Proceedings of American Society of Civil Engineering, pp.1167 – 1171.
- [13] Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C.A. (1975) : “Tornado Design Winds Based on Risk,” Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 101, No. 9, pp.1883-1897
- [14] Twisdale L.A., and Dunn, W.L. (1983) : Probabilistic analysis of tornado wind risks, Journal of Structural Engineering, Vol.109, No.2, ASCE, pp.468-488
- [15] Markee, E.H. Jr., et al. (1974) : Technical basis for interim regional tornado criteria, U.S. Atomic energy commission. WASH -1300. Office of Regulation, Washington, D.C.
- [16] Lewellen, D. C., Effects of topography on tornado dynamics: A simulation study, 26th Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, Nashville, TN, 4B.1, 2012

- [17] E. Simiu and R.H. Scanlan, Wind Effects on Structures, 3rd ed., John Willey & Sons, Inc. 1996.
- [18] Standard Review Plan 3.3.2, Tornado loads, NUREG-0800, Revision 3, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2007

## 著者

田村幸雄, 松井正宏, 吉田昭仁, 金容徹 (東京工芸大学)

前田順滋 (九州大学大学院)

植松 康 (東北大学大学院)

小林文明 (防衛大学校)

白土博通 (京都大学大学院)

丸山 敬 (京都大学防災研究所)

西嶋一欽 (京都大学防災研究所)

西村宏昭 (京都大学防災研究所)

野田 稔 (徳島大学大学院)

## 第II編：竜巻による影響解析手順の整備

# 1. 竜巻による最大風速のハザード曲線の計算方法

## 1.1 評価フロー

竜巻による最大風速のハザード曲線算出のフローを以下に示す。

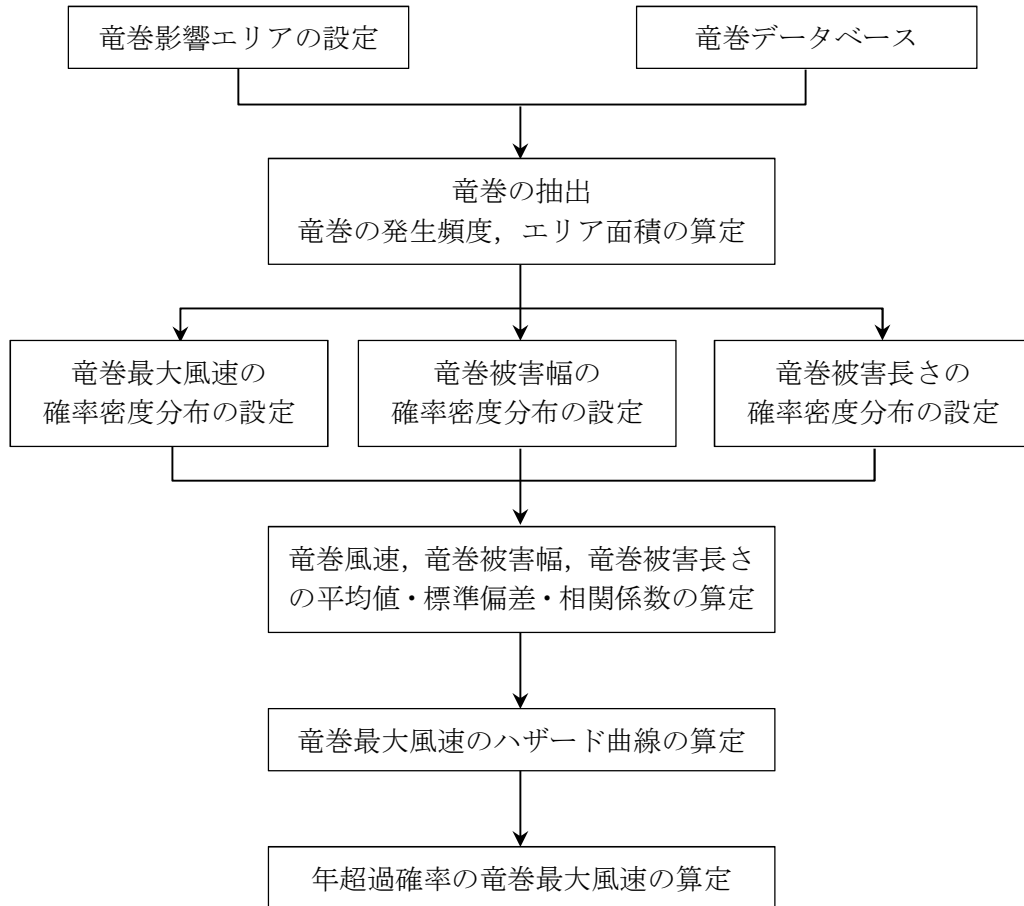


図 1.1 竜巻による最大風速のハザード曲線算出のフロー

竜巻による最大風速のハザード曲線算出については、東京工芸大学調査研究<sup>1)</sup>に記載の Wen & Chu<sup>2)</sup>および Garson et. al<sup>3)4)</sup>の方法を用いている。

竜巻の年発生数の確率分布は、Wen & Chu<sup>2)</sup>の結果を用い、竜巻の発生がポアソン過程に従うと仮定して、下記のポアソン分布またはポリヤ分布を用いている。

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

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

ここで、T：年数

N：竜巻の年発生数

ポリヤ分布の $\beta$ は、下式で推定可能である。

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

$v$ ：竜巻の年平均発生数

$\sigma$ ：竜巻の年発生数の標準偏差

ポアソン分布およびポリヤ分布に対応する 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 $P_{V_0,T}(D)$ の推定式は、Wen & Chu<sup>2)</sup>の結果を用いて、以下の式を用いる。

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

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

ここで、D：対象構造物が $V_0$ 以上の竜巻風速 $v$ に見舞われる事象

上式で示された $R(V_0)$ は、リスクの評価対象とする構造物が1つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が $V_0$ 以上となる確率である。

1個の竜巻の風速が $V_0$ 以上となる面積 $DA(V_0)$ は、Garson et. al<sup>3)4)</sup>の結果を用いて、竜巻の被害域幅 $w$ 、被害域長さ $l$ 、移動方向 $\alpha$ 、最大竜巻風速 $V_i$ 、照査竜巻風速 $V_0$ および対象構造物の平面寸法 $A$ および $B$ から、下式のように与えている。この式の第1項から第4項は、図1.2の $T$ 、 $P$ 、 $E$ 、および $AB$ の面積に対応している。ここで、 $H$ および $G$ は竜巻の被害域幅方向および被害域、長さ方向に沿った面への構造物の投影長さである。



$$DA(V_0) = WL + HL + WG + AB \quad V_i \geq V_0$$

$$DA(V_0) = 0 \quad V_i < V_0$$

$R(V_0)$ は, Garson et al.<sup>34)</sup>の結果を用いて, 以下の  $E[DA(V_0)]$ 式を用いて与えている。

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

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

$$+ \int_0^{360} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty H(\alpha) l f(V, l, \alpha) dV dl d\alpha + \int_0^{360} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) G(\alpha) f(V, w, \alpha) dV dw d\alpha$$

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

ここで,  $V$ : 最大竜巻風速  
 $w$ : 被害域幅  
 $l$ : 被害域長さ  
 $\alpha$ : 竜巻の移動方向  
 $DA(V_0)$ : 1個の竜巻の風速が  $V_0$ 以上となる面積  
 $f(\cdot)$ : 確率密度  
 $A_0$ : リスクの評価対象とする地域の面積  
 $H(\alpha)$ : 被害域長さ方向に沿った面への構造物の投影長さ  
 $G(\alpha)$ : 竜巻の被害域幅方向に沿った面への構造物の投影長さ

なお  $W(V_0)$ は, Garson et al.<sup>34)</sup>の結果を用いて, 以下の式を与えている。

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

ここで,  $w$ : 竜巻の被害域幅の観測値  
 $V_w$ : 被害域幅  $w$ 内の最小竜巻風速  
 $V_0$ : 照査竜巻風速  
 $W(V_0)$ : 竜巻風速が  $V_0$ 以上となる幅

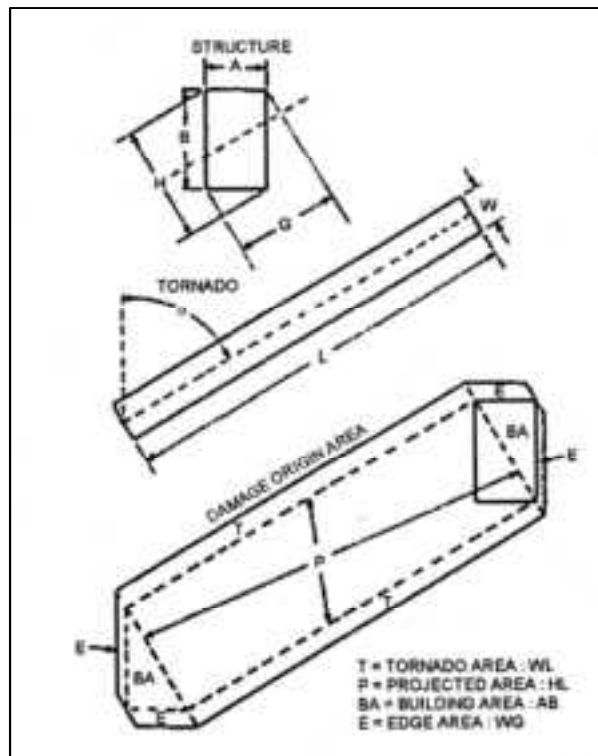


図 1.2 竜巻被害エリアのパラメータ

## 1.2 竜巻風速, 被害幅, 被害長さの確率分布

竜巻ハザードを評価するには, 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。本解析では, 東京工芸大学調査研究<sup>1)</sup>を参照して, 確率密度分布を対数正規分布で設定している。

竜巻ハザードの計算においては, 竜巻風速, 被害幅, 被害長さの相関係数を求めている。また, 竜巻風速, 被害幅, 被害長さは3変量の確率分布で評価する。

$$f(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \begin{vmatrix} \zeta_x^2 & \zeta_x \zeta_y \rho_{xy} & \zeta_x \zeta_z \rho_{xz} \\ \zeta_x \zeta_y \rho_{xy} & \zeta_y^2 & \zeta_y \zeta_z \rho_{yz} \\ \zeta_x \zeta_z \rho_{xz} & \zeta_y \zeta_z \rho_{yz} & \zeta_z^2 \end{vmatrix}} \exp \left[ -\frac{1}{2} (\ln(x) - \lambda_x \quad \ln(y) - \lambda_y \quad \ln(z) - \lambda_z) \begin{pmatrix} \zeta_x^2 & \zeta_x \zeta_y \rho_{xy} & \zeta_x \zeta_z \rho_{xz} \\ \zeta_x \zeta_y \rho_{xy} & \zeta_y^2 & \zeta_y \zeta_z \rho_{yz} \\ \zeta_x \zeta_z \rho_{xz} & \zeta_y \zeta_z \rho_{yz} & \zeta_z^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \ln(x) - \lambda_x \\ \ln(y) - \lambda_y \\ \ln(z) - \lambda_z \end{pmatrix} \right]$$

ここで,  $0 < x \leq \infty, 0 < y \leq \infty, 0 < z \leq \infty$

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ : 変数 $\ln(x), \ln(y)$ , および $\ln(z)$ の平均値

$\zeta_x, \zeta_y, \zeta_z$ : 変数 $\ln(x), \ln(y)$ , および $\ln(z)$ の標準偏差

$\rho_{xy}$ :  $\ln(x)$ と $\ln(y)$ の相関係数

$\rho_{xz}$ :  $\ln(x)$ と $\ln(z)$ の相関係数

$\rho_{yz}$ :  $\ln(y)$ と $\ln(z)$ の相関係数

### 1.3 竜巻の移動方向

竜巻の移動方向は、東京工芸大学調査研究<sup>1)</sup>を参照して、フーリエ級数を用いて推定した移動方向の確率密度分布を用いている。

$E[DA(V_0)]$ を求める式における第2項および第3項に含まれる投影幅 $H(\alpha)$ および $G(\alpha)$ は、竜巻の移動方向、構造物の寸法AおよびBを用いて、以下の式で与えている。

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

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

### 参考文献

- 1) 東京工芸大学，竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究，平成21～22年度原子力安全基盤調査研究（平成22年度），平成23年2月
- 2) Wen. Y. K and Chu. S. L. (1973): Tornado risks and design wind speed, Proceedings of American Society of Civil Engineering, Journal of Structural Division 99, 2409-2421
- 3) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C. A. (1975): Tornado risk evaluation using wind speed profiles, Journal of Structural Division, Proceedings of American Society of Civil Engineering, pp.1167-1171
- 4) Garson. R. C., Morla-Catalan J. and Cornell C. A. (1975): “Tornado Design Winds Based on Risk”, Journal of Structural Division, Proceedings of American Society of Civil Engineers, Vol. 101, No. 9, pp.1883-1897

## 2. 解析プログラムのフローチャート

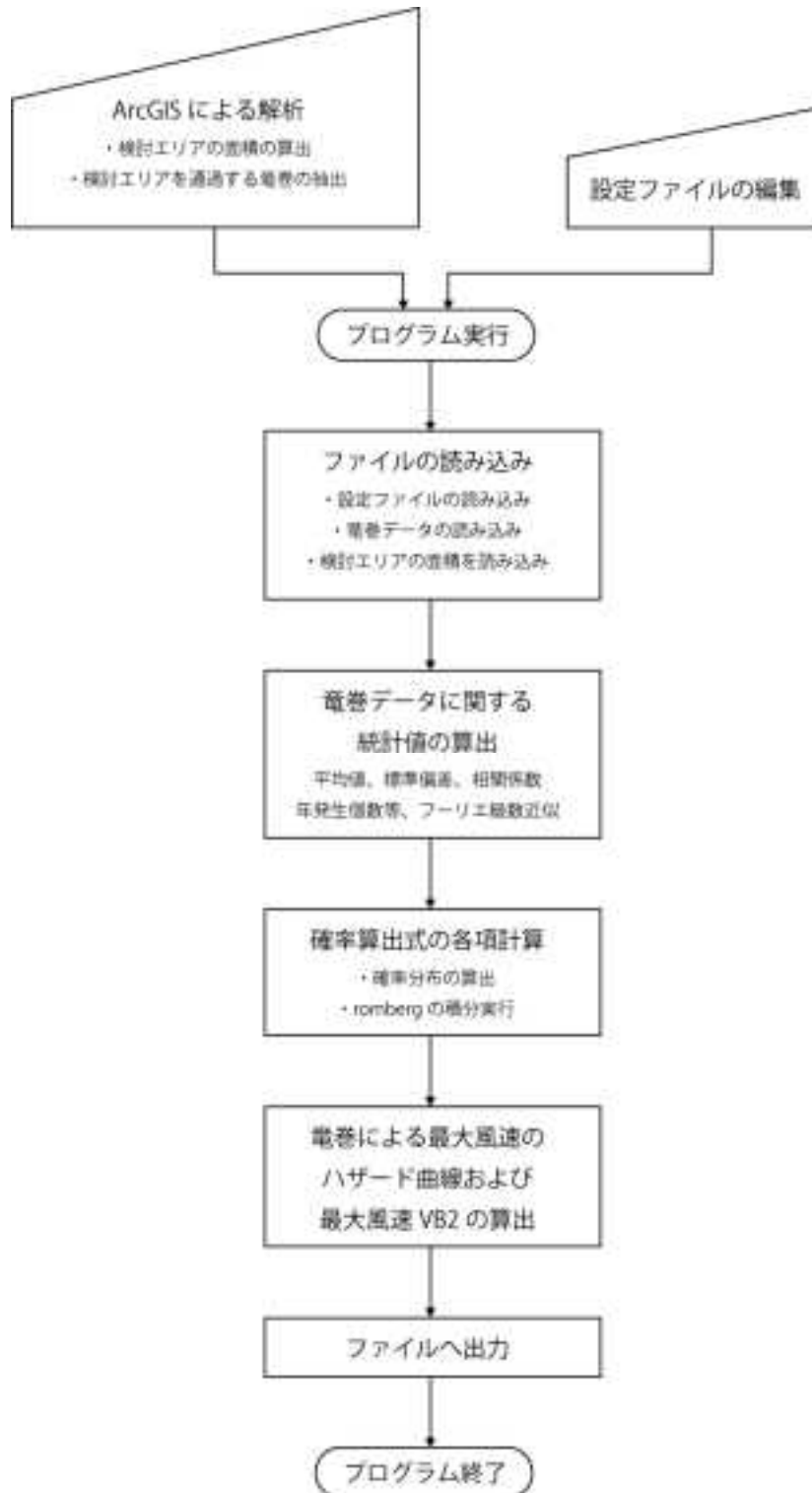


図 2.1 解析プログラムのフローチャート

### 3. 解析プログラムの動作に必要な環境

OS : windows7

検討エリアの面積と、検討エリアを通過する竜巻データの抽出を行う場合には、ArcGIS for Desktop Basic 10.3.1 およびジオメトリ変換ツール (Esri のサポートを受けていれば無償で追加インストールが可能) がインストールされていること。

※windows および ArcGIS のバージョンについては、上記でないと動作しないことを示すものではありませんが、上記以外の動作確認は行っておりません。

#### 4. 解析プログラム実行手順

①検討エリアの面積ファイルと、竜巻データファイルを所定の場所 (NTOR¥step2¥data¥) にコピーします。任意のフォルダを作成しても構いません。  
ファイルのフォーマットは以下のようにしてください。

[面積ファイル]

2行2列の csv ファイル

1行目：ヘッダ

(FID, Shape\_Area)

2行目：

ID, 面積 (m<sup>2</sup>)

例)

FID,Shape\_Area

0,1943523915.19

[竜巻データファイル]

10列の csv ファイル

1行目：

ヘッダ (ID, 発生年, 被害幅最小 (m), 被害幅最大 (m), 被害長さ最小 (km),  
被害長さ最大 (km), 移動方向 (16 方位), F スケール最小, F スケール最大,  
shape\_length (m))

2行目以降：

ヘッダに対応する竜巻のデータ

例)

ID,発生年,被害幅最小,被害幅最大,被害長さ最小,被害長さ最大,移動方向,F スケール最小,F スケール最大,Shape\_Length

1, 2001, 100.0, 150.0, 2.0, 8.0,1, 1,1,88.89

・  
・  
・

②NOTR¥step2¥conf¥conf.txt を編集します。以下の 13 パラメータを設定します。以下の値はデフォルト値です。設定漏れがあるとプログラムはエラーを出力し停止します。

また、設定パラメータは将来のコード設計変更を考慮しているため、暫定的なものです。

解析開始年 : syear=1961

解析終了年 : eyear=2015

竜巻データの場所 (data¥以下を指定) : torfname= 20160318/tornado/20160318genkai-mp1.csv

面積データの場所 (data¥以下を指定) : areafname= 20160318/area/20160318genkai-mp1-area.csv

対象構造物のサイズ A (m) : str\_a=360

対象構造物のサイズ B (m) : str\_b=360

対象構造物の面積 AB (m<sup>2</sup>) : str\_ab= 101736

対象構造物の形状 (0⇒角, 1⇒円) : str\_cir=1

竜巻発生個数の頻度分布 (1⇒ポアソン分布, 2⇒ポリヤ分布) : ftype=2

竜巻風速算出のための, 超過確率の次数 (正値で指定) : p\_n=5

風速の積分上限値(m/s) : intmax\_torvel=116

被害長さの積分上限値(m) : intmax\_dlength=500000

被害幅の成分上限値(m) : intmax\_dwidth=50000

積分のステップ数 : intstep=128 (※ステップ数を大きくすると計算に時間がかかります)

③NTOR¥step2¥fort¥NTOR.exe をダブルクリックして実行します。計算が終了すると、

NTOR¥step2¥result¥の, prob.dat に竜巻風速 (m/s) とその超過頻度, vel.dat に指定した超過頻度の竜巻風速 (m/s) が出力されます。

## 5. 解析プログラムソースコード

ソースコードは以下の 4 つに分かれています。なお、プログラム言語は fortran95 (コンパイラ G95) です。

- ・メインプログラム (NTOR)
- ・ファイル読み込みモジュール (read\_module)
- ・統計処理モジュール (stat\_module)
- ・竜巻風速算出プログラム (subntor\_module)



## 付録 1. 竜巻データベースフォーマット

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/> を加工

列番号	項目名	備考	
1	事例番号		
2	竜巻ダウンバースト区別	1 : 竜巻 2 : ダウンバースト(マイクロバーストを含む) 3 : 竜巻またはダウンバースト(マイクロバーストを含む) 4 : ガストフロント 5 : 塵旋風(つむじ風を含む) 6 : その他(不明を含む) 7 : その他(不明を含む) 8 : その他(不明を含む) 9 : その他(不明を含む)	
3	発生年	突風発生の年月日時分を日本標準時で示す。	
4	発生月		
5	発生日		
6	発生時		
7	発生分		
8	発生時刻確度(-分)		突風発生時刻の想定する誤差を, 前後別に分単位で示す。
9	発生時刻確度(+分)		
10	発生緯度(度)	突風発生位置の緯度・経度と想定する誤差(秒単位)を示す。	
11	発生緯度(分)		
12	発生緯度(秒)		
13	発生緯度確度(±秒)		
14	発生経度(度)		
15	発生経度(分)		
16	発生経度(秒)		
17	発生経度確度(±秒)		
18	発生県	突風発生の都府県支庁, 市町村, 字・番地等を示す。	
19	発生県名		
20	発生市町村		
21	発生番地		

22	消滅年	突風の消滅時刻を示す
23	消滅月	
24	消滅日	
25	消滅時	
26	消滅分	
27	消滅時刻確度(-分)	
28	消滅時刻確度(+分)	
29	消滅緯度(度)	
30	消滅緯度(分)	
31	消滅緯度(秒)	
32	消滅緯度確度(±秒)	
33	消滅経度(度)	
34	消滅経度(分)	
35	消滅経度(秒)	
36	消滅経度確度(±秒)	
37	消滅県	突風消滅の都府県支庁，市町村，字・番地等 を示す
38	消滅県名	
39	消滅市町村	
40	消滅番地	
41	被害域幅(m)最小	突風現象による被害域の幅と長さを示す。幅 の単位は m，長さの単位は 0.1km である。
42	被害域幅(m)最大	
43	被害域長さ(0.1km)最小	
44	被害域長さ(0.1km)最大	
45	移動方向 1	突風現象の移動した方向を示す
46	移動方向 2	突風現象の移動方向が途中で変わった場合， その方向を示す
47	移動速度(km/h)	突風現象の移動速度を km/h で示す。
48	継続時間(分)	突風現象の発生から消滅までの継続時間を分 で示す。
49	F スケール最小値	突風現象の藤田スケールを示す
50	F スケール最大値	

## 付録 2. ArcGIS を用いた特定エリアを通過する竜巻の抽出とエリア面積の算出

①ArcMap を起動します。

②ツールバーのファイル⇒新規作成⇒空マップを選択して，新しいマップを作成します。

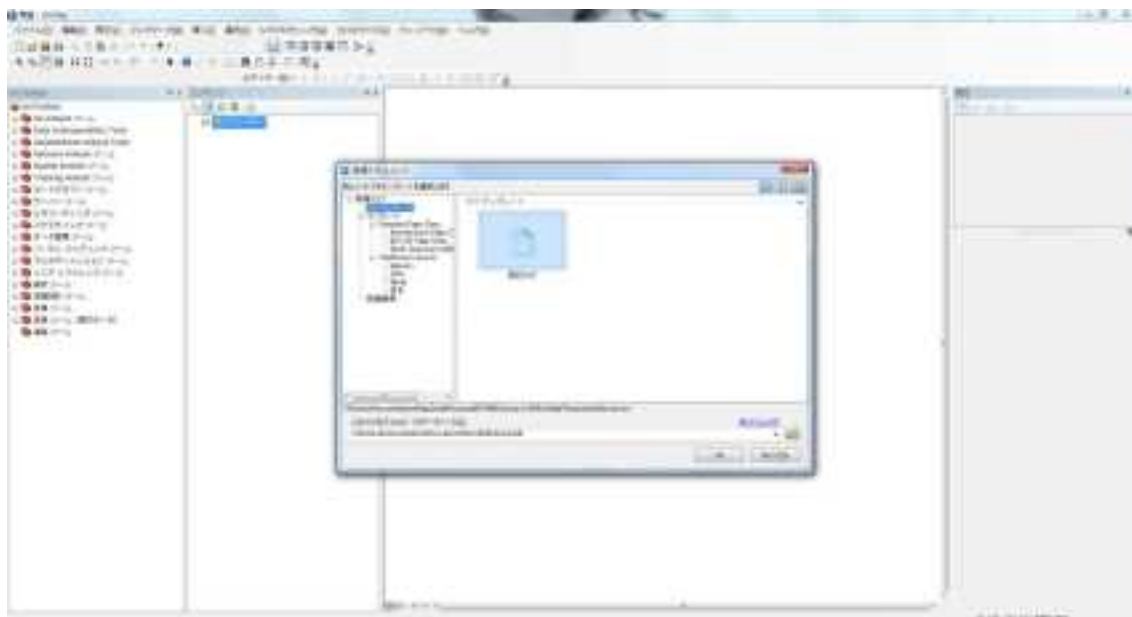


図 a.1 空マップの作成

③ツールバーのファイル⇒データの追加⇒データの追加で，海岸線データ追加します（日本地図¥海岸線データ¥20160212shoreline\_esri\_polygon.shp）。

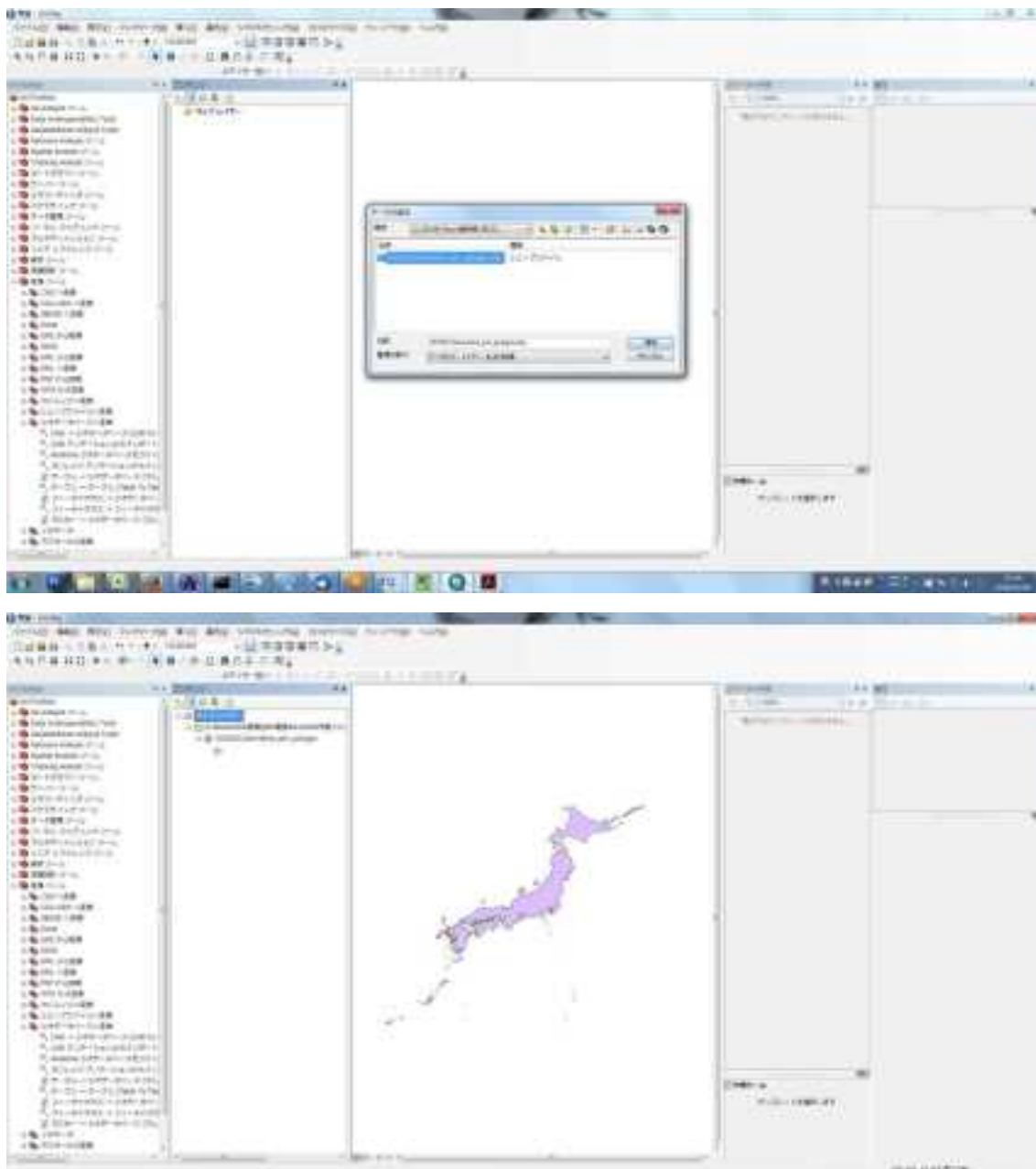


図 a.2 海岸線データの追加

④竜巻検討地域を作成するために、ポリゴンデータを追加作成します。

a)緯度経度から追加作成する方法

i)検討地域を形成するポイントの緯度経度データをエクセルでまとめておきます。x,y などのヘッダを付けておいてください。

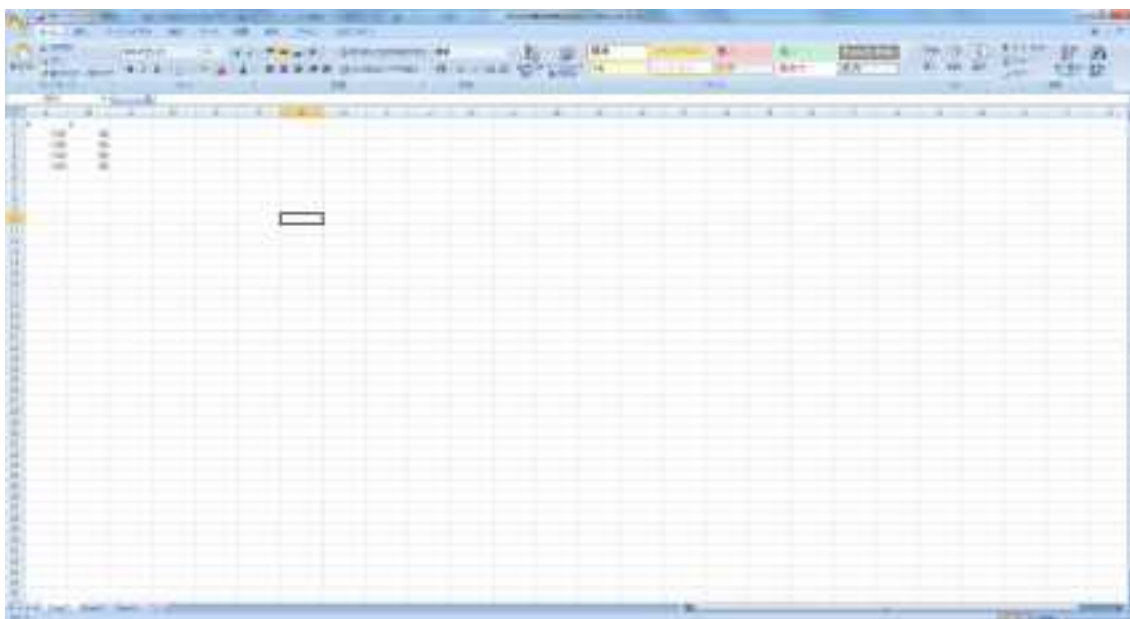


図 a.3 エクセルを用いて緯度経度データの作成

ii)ArcMap のツールバーのファイル⇒データの追加⇒データの追加で、i)で作成したエクセルデータをダブルクリックし、さらにシートを選択すると、ArcMap にテーブルが追加されます。追加されたテーブルを右クリックし、「XY データの表示」を選択、X フィールド、Y フィールドにそれぞれ経度 (x)、緯度 (y) を指定し、OK を押すと、ポイントがマップに追加されます。

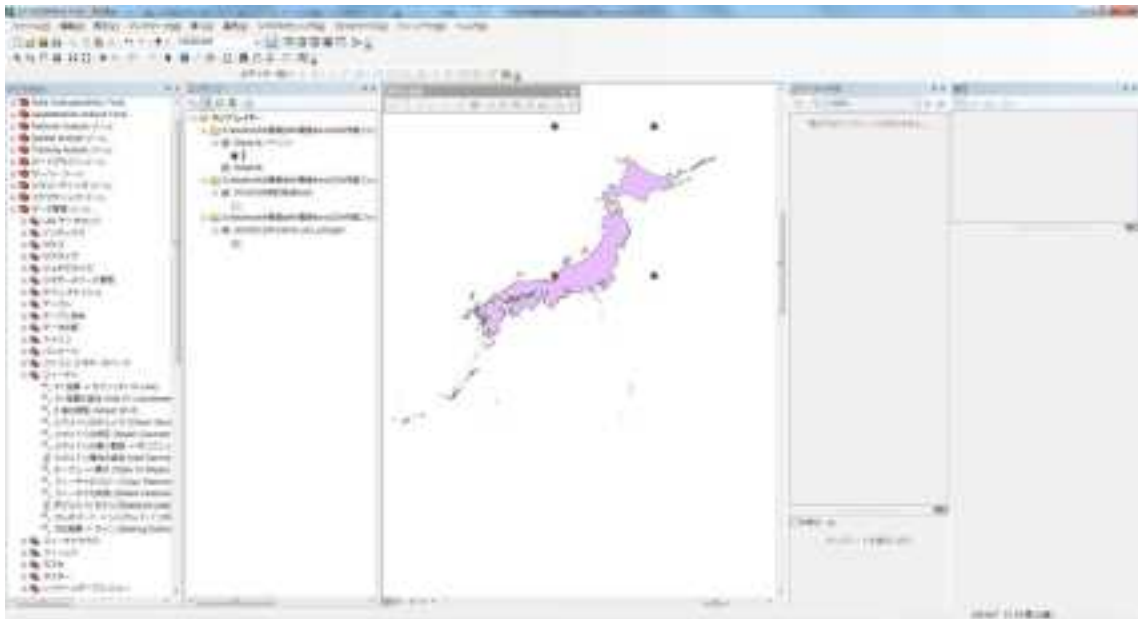


図 a.4 緯度経度からポイントを作成

iii) ツールバーのジオプロセッシング⇒ArcToolbox を選択し、ArcToolbox ウィンドウを表示させます。「データ管理ツール」⇒「フィーチャ」⇒「ポイント→ライン」を選択し、入力フィーチャに ii) で追加したポイントを指定、「ラインを閉じる」にチェックして OK をすると、ポイントがラインで結ばれて、閉じたポリラインが作成されます。

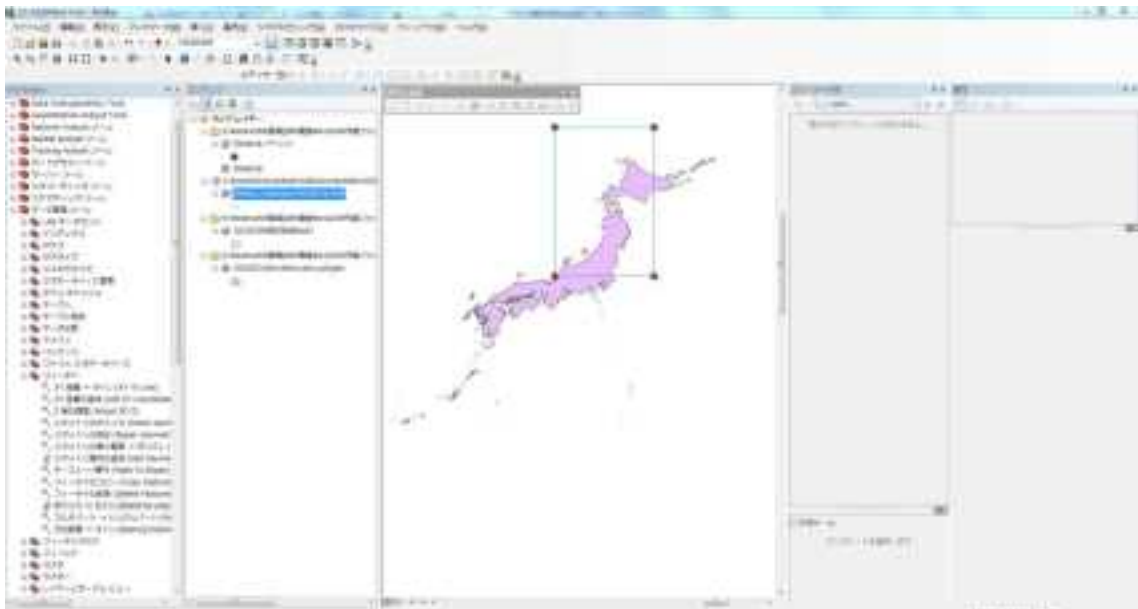


図 a.5 ポリラインの追加

iv)ジオメトリ変換ツールを用いて、「ポリライン」タブから「閉じた領域をポリゴン」を選択し、iii)で作成したポリラインを入力レイヤに、出力ファイルに任意の場所と名前を指定して実行すると、ポリゴンが作成され、シェープファイルが出力されます。

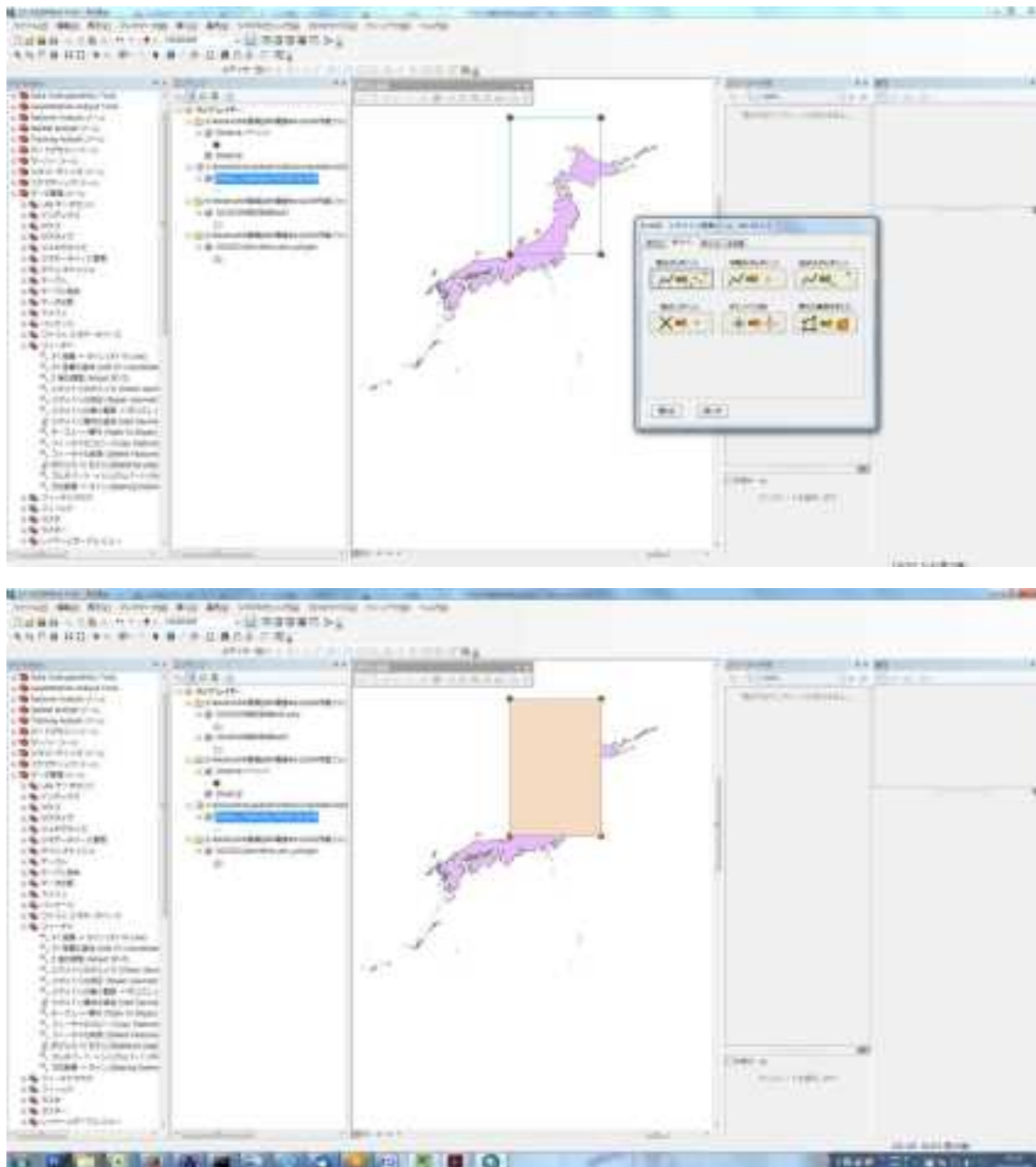


図 a.6 ポリゴンの追加

v)座標変換します。ArcToolbox⇒「データ管理ツール」⇒「投影変換と座標変換」⇒「投影変換(Project)」を選択し、入力データセットに作成したポリゴンフィーチャを、出力データセットは任意に指定し、出力データの座標系に「投影座標系」⇒「UTM 座標系」⇒「アジア」⇒「UTM 座標系第 54 帯 N(JGD2011)」を指定して OK。

b)手描きで追加作成する方法

i)ツールバーのウィンドウ⇒カタログを選択して、カタログウィンドウを表示させます。任意のフォルダを右クリックして「新規作成」⇒「シェープファイル」を選択します。任意の名前を指定し、フィーチャタイプは「ポリゴン」、「編集」をクリックして座標系に「GCS\_JGD\_2000」を指定してOK。

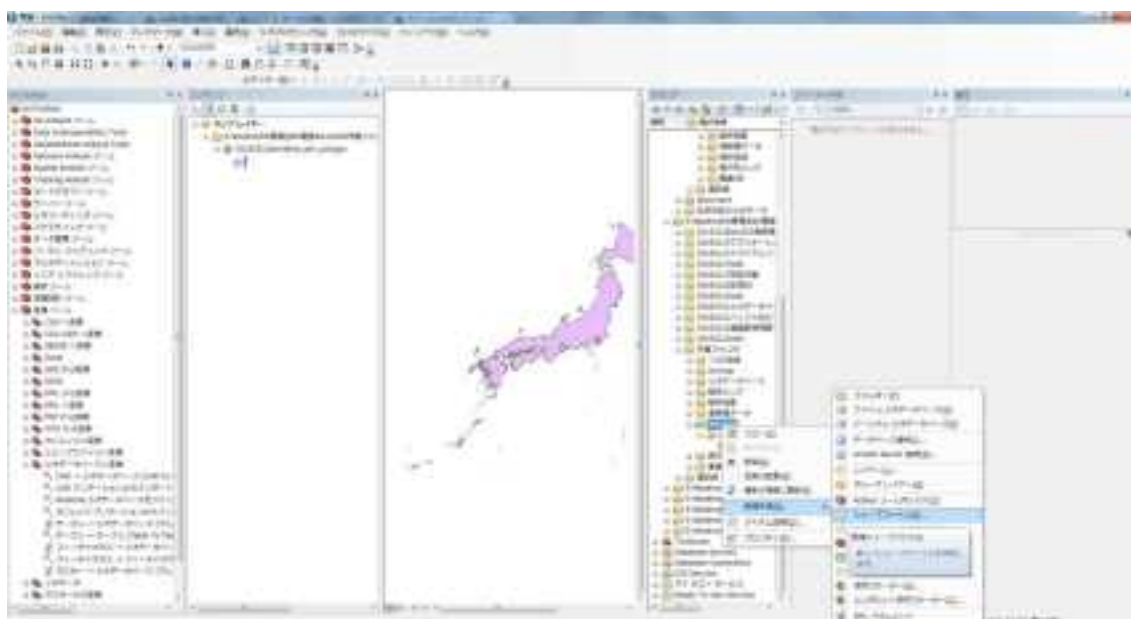


図 a.7 シェープファイル（ポリゴン）の追加

ii)ツールバーの「エディター」から「編集の開始」、i)で追加したフィーチャを選択して、フィーチャ作成ウィンドウから対象フィーチャを選択します。作図ツールでポリゴンを選択すると、手描きでポリゴンが追加できる状態になります。希望のポリゴンが描いたら、ダブルクリックしてポリゴンを確定します。「エディター」から「編集の終了」を選択して、編集内容を保存します。



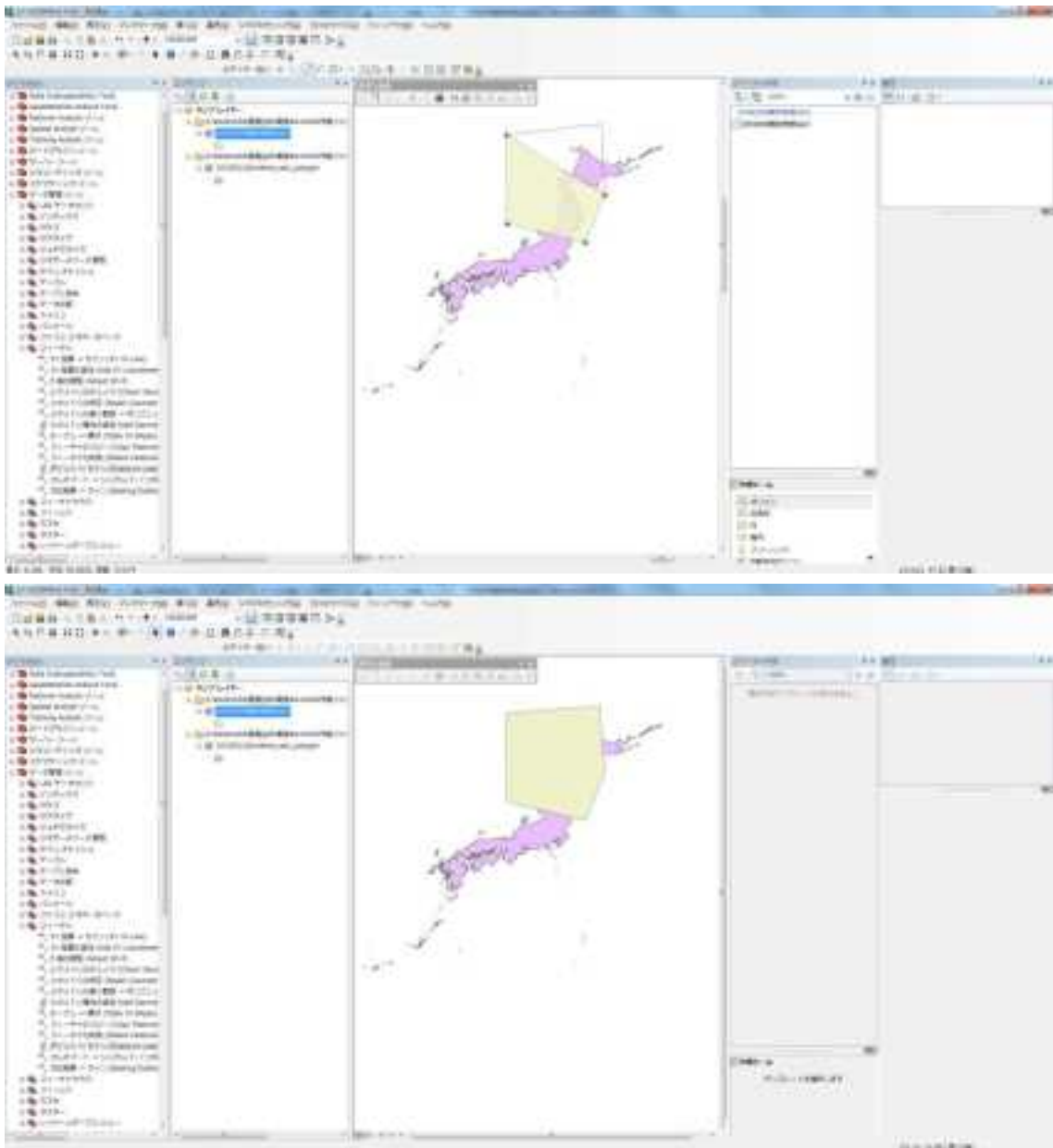


図 a.8 手書きでポリゴンを追加する

iii) a)-v)同様、座標変換します。

なお、「NTOR\step1\竜巻検討地域」フォルダには、図9に示す7つのエリアのシェープファイルを作成してあります。

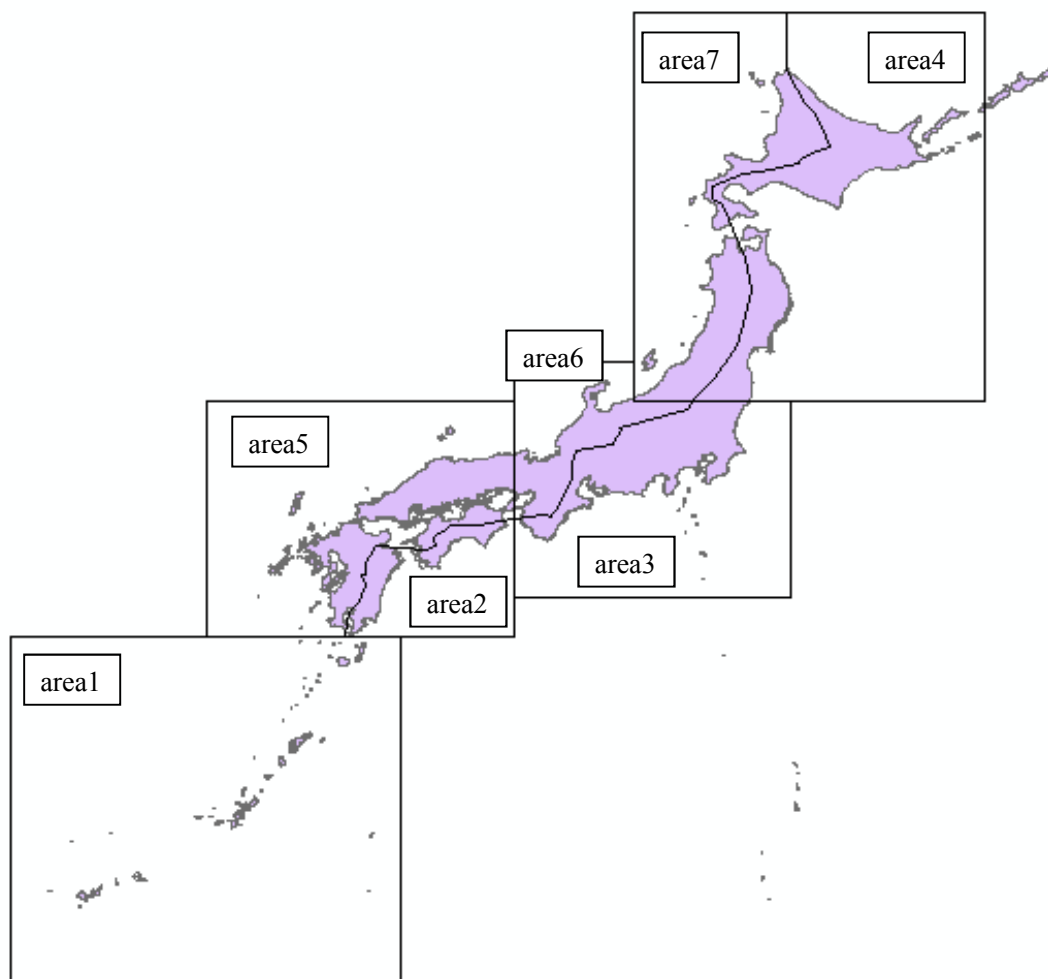


図 a.9 「NTOR\step1\竜巻検討地域」に作成してある7つの地域

④海岸線のオフセットエリアを新たなマップに読み込みます。ツールバーのファイル⇒新規作成で空マップを選択し、新たなマップを作成します。次に、ファイル⇒データの追加⇒データの追加で、海岸線からのオフセットエリアのデータを選択してマップに読み込みます。データは、「NTOR¥step1¥海岸線オフセットエリアデータ¥」にあります。複数ファイルを選択しても問題ありません。

オフセットエリアは、以下の 13 種類を用意しています。

- ・海岸線から陸側 5km のエリア (ファイル名 : 20160310\_mm1.shp)
- ・海岸線から海側 5km のエリア (ファイル名 : 20160310\_pp1.shp)
- ・海岸線から海側 5km, 陸側 5km のエリア (ファイル名 : 20160316\_mp1.shp)
- ・海岸線から陸側 0~1km のエリア (ファイル名 : 20160216\_m1.shp)
- ・海岸線から陸側 1~2km のエリア (ファイル名 : 20160216\_m2.shp)
- ・海岸線から陸側 2~3km のエリア (ファイル名 : 20160216\_m3.shp)
- ・海岸線から陸側 3~4km のエリア (ファイル名 : 20160216\_m4.shp)
- ・海岸線から陸側 4~5km のエリア (ファイル名 : 20160216\_m5.shp)
- ・海岸線から海側 0~1km のエリア (ファイル名 : 20160216\_p1.shp)
- ・海岸線から海側 1~2km のエリア (ファイル名 : 20160216\_p2.shp)
- ・海岸線から海側 2~3km のエリア (ファイル名 : 20160216\_p3.shp)
- ・海岸線から海側 3~4km のエリア (ファイル名 : 20160216\_p4.shp)
- ・海岸線から海側 4~5km のエリア (ファイル名 : 20160216\_p5.shp)

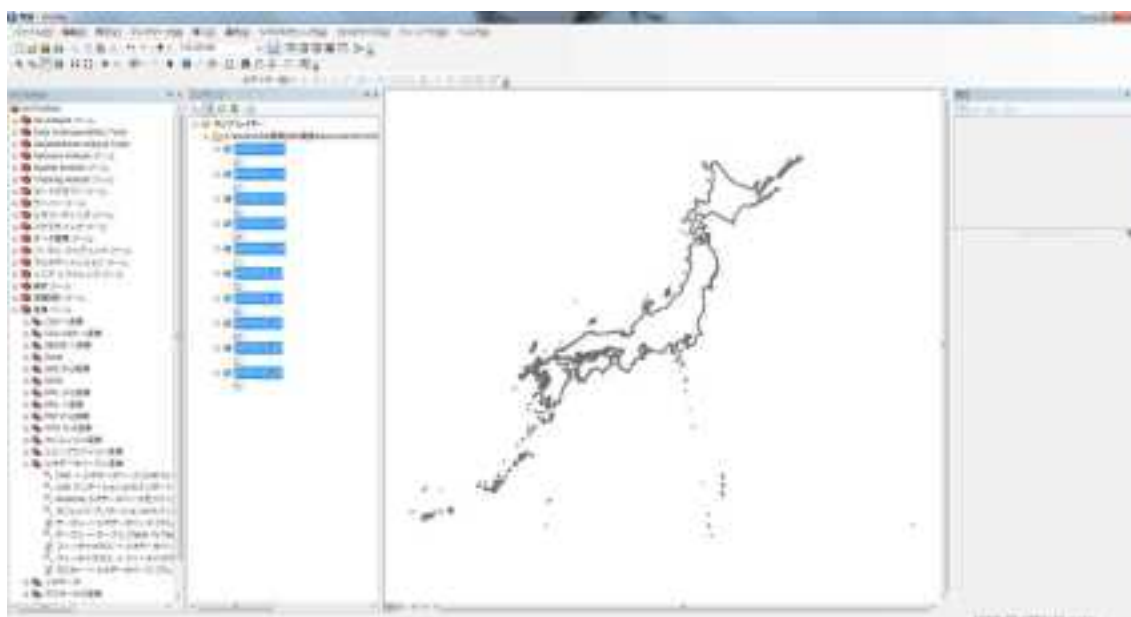


図 a.10 オフセットエリアの読み込み

⑤竜巻検討地域のデータを読み込みます。ツールバーのファイル⇒データの追加⇒データの追加で、竜巻検討地域のデータを追加します。※座標変換されているため、③で作成した形状とは見た目が異なります。

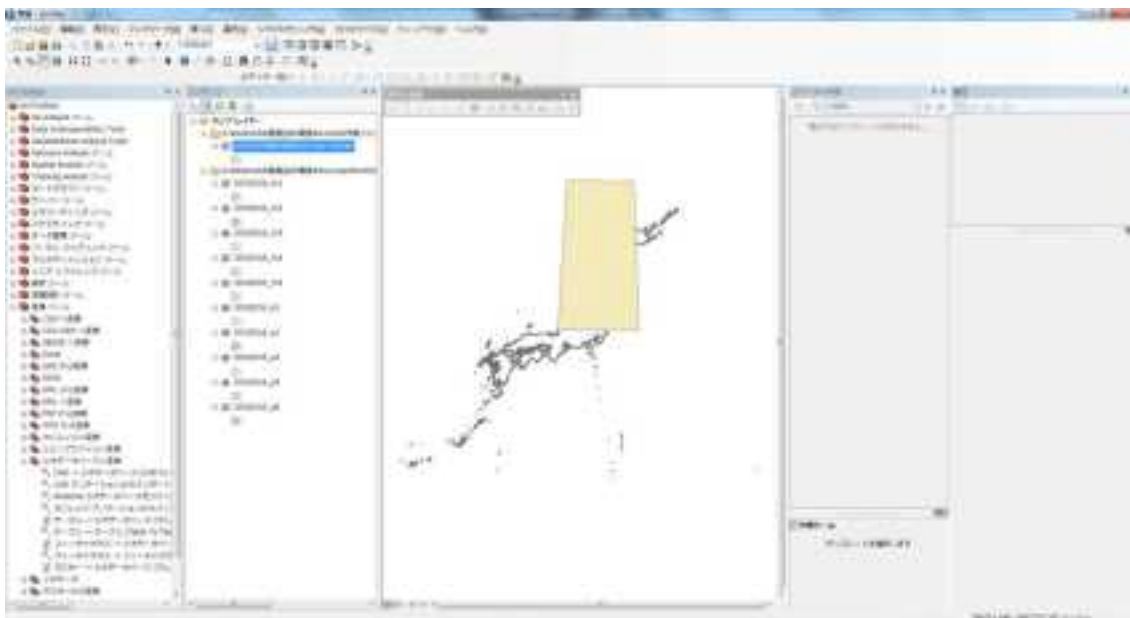


図 a.11 竜巻検討地域の読み込み

⑥竜巻検討地域に含まれるオフセットエリアを抽出します。ツールバーのジオプロセシング⇒インターセクトを選択します。入力フィーチャに、竜巻検討地域フィーチャと、オフセットエリアフィーチャを一つ指定して、出力フィーチャを任意に指定してOKをすると、竜巻検討地域に含まれるオフセットエリアが抽出されます。

抽出されたフィーチャをシェープファイルとして保存します。抽出されたフィーチャを右クリックし、データ⇒データのエキスポートで任意の出力場所を指定してOK。

⑦竜巻の軌跡データを読み込みます。

ファイル⇒新規作成から空マップを作成します。次にデータの追加から、「NTOR¥step1¥竜巻データ¥20160315 竜巻軌跡.shp」を選択して竜巻の軌跡データを map に追加します。

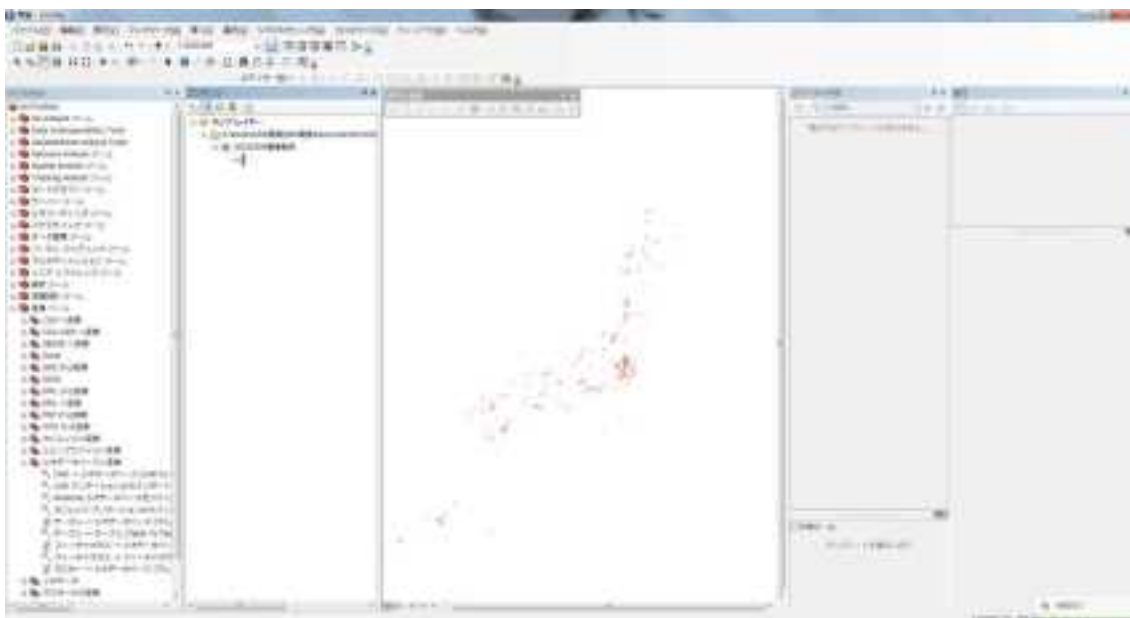


図 a.12 竜巻軌跡データの追加

⑧竜巻検討地域に含まれるオフセットエリアを読み込みます。

データの追加から、読み込みたいオフセットエリアを選択して map に追加します。

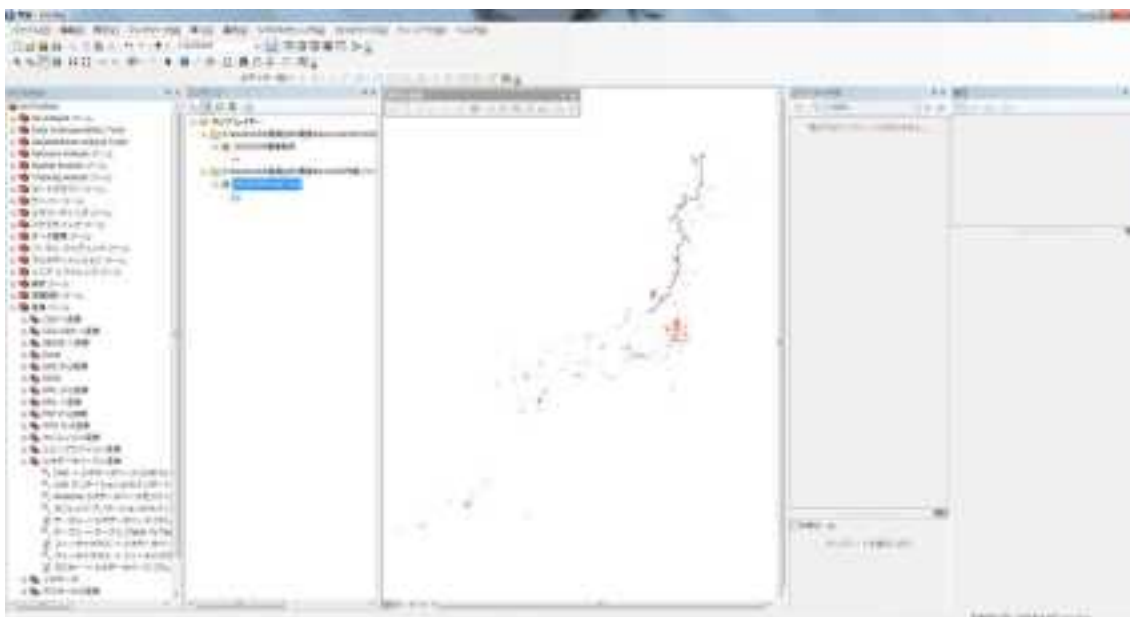


図 a.13 竜巻検討地域に含まれるオフセットエリアの追加

⑨竜巻検討地域に含まれるオフセットエリアを通過する竜巻を抽出します。

ツールバーのジオプロセッシング⇒インターセクトで、オフセットエリアと竜巻データを入力フィーチャに指定して、OK。

⑩必要なフィールド以外を削除します。

ArcToolbox⇒「データ管理ツール」⇒「フィールド」⇒「フィールドの削除」を選択し、入力フィーチャにオフセットエリアフィーチャを選択、「shape\_area」以外をすべて選択しOK。同様に、入力フィーチャに抽出した竜巻データを選択、以下を残してすべて削除します。

- ・発生年
- ・被害域幅最小
- ・被害域幅最大
- ・被害域長さ最小
- ・被害域長さ最大
- ・移動方向1
- ・F スケール最小
- ・F スケール最大

⑪抽出した竜巻とエリアの面積を csv で出力します。

抽出した竜巻データをコンテンツウィンドウで右クリックし、属性テーブルを開きます。左上のアイコンをクリックして「エクスポート」を選択、ファイルの種類を「テキストデータ」にして任意の場所を指定して出力します。同様にオフセットエリアについても出力します。

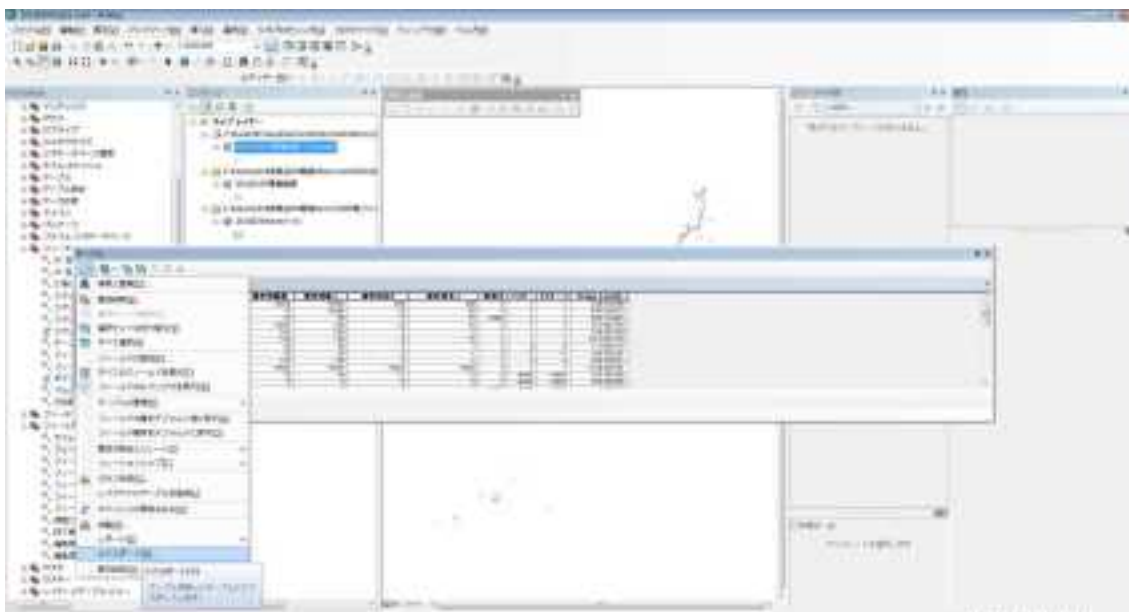


図 a.14 属性フィールドのエクスポート

⑫被害域長さを 1/10 にします。

被害域長さの単位が[0.1km]となっていますので、[km]に直すため、1/10 しておきます。

以上