

第II編 竜巻荷重に係る評価手順の整備

	頁
はじめに	1
1. 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
2. 基準竜巻・設計竜巻・設計竜巻荷重の設定の概要	5
3. ステップ1 竜巻検討地域の設定	7
3.1 概要	7
3.2 評価項目	7
3.3 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	7
3.4 原子力発電所の位置に応じた検討地域の設定	9
3.5 竜巻検討地域の設定	11
3.6 審査資料における竜巻検討地域の設定事例	13
4. ステップ2 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定	15
4.1 概要	15
4.2 評価項目	15
4.3 過去に発生した竜巻による最大風速	16
4.4 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速	19
5. ステップ3 設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定	24
5.1 概要	24
5.2 評価項目	24
5.3 設計竜巻の最大風速の設定	24
6. ステップ4 設計竜巻の特性値の設定	26
6.1 概要	26
6.2 評価項目	26
6.3 設計竜巻の特性値の設定	26
7. ステップ5 設計竜巻荷重の設定	29
7.1 概要	29
7.2 評価項目	29
7.3 風圧力による荷重	30
7.4 気圧差による荷重	31
7.5 飛来物による衝撃荷重	32
7.6 設計竜巻荷重の組み合わせ	36

8. まとめ	38
参考文献	40
著者	42

はじめに

本報告書第Ⅱ編では、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、各項目では、評価の手順をフロー図で示した。

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とした。

なお、本報告書第Ⅱ編は、「平成28年度 実用発電用原子炉施設の竜巻による影響評価の手順の整備」の報告書に本年度の実施内容を追記等してアップデートを図った。

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

1. 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 1.1 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。

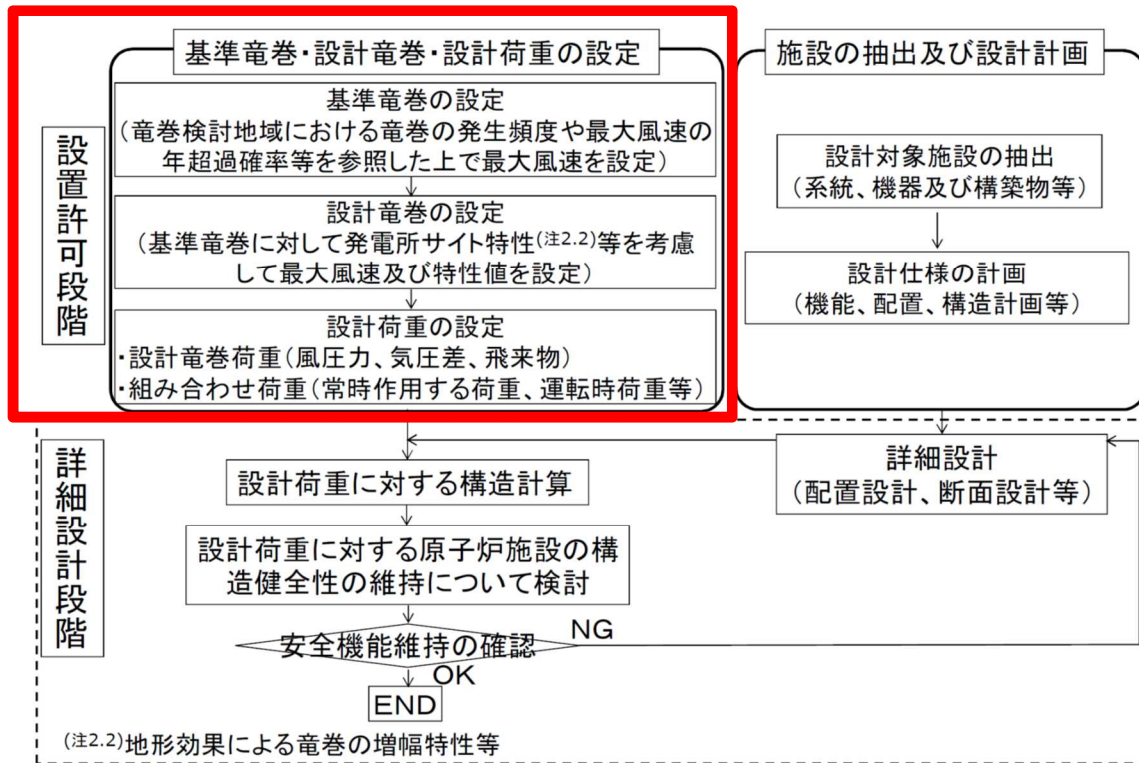


図 1.1 設計の基本手順 [1],[2]

2. 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 2.1 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。

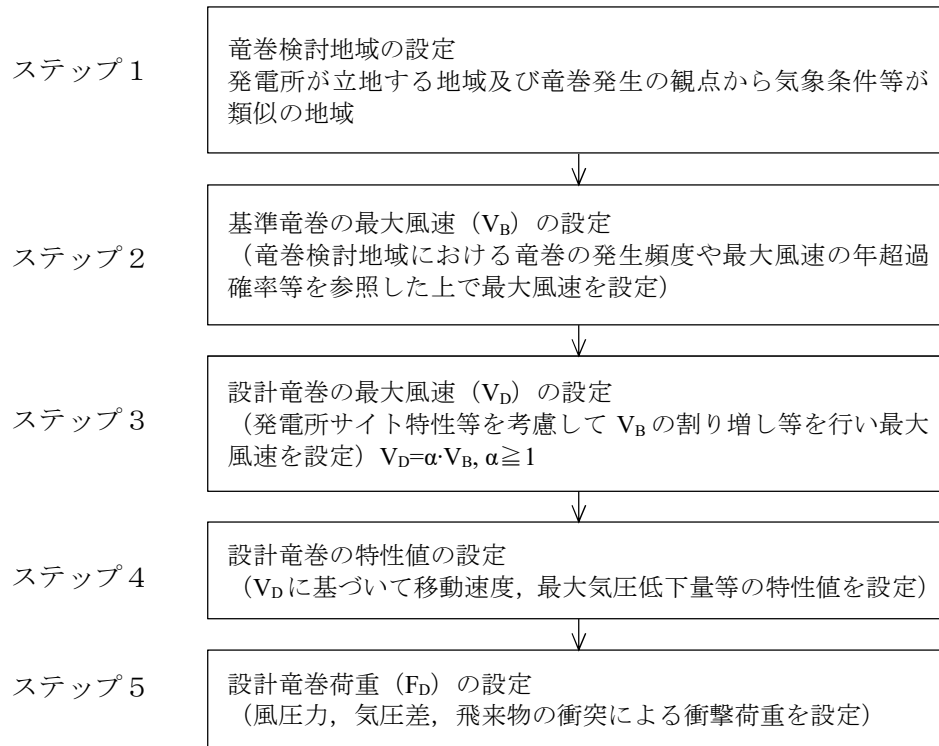


図 2.1 「竜巻影響評価ガイド」による基準竜巻・設計竜巻荷重の設定の基本フロー
[1],[2]

3. ステップ1 竜巻検討地域の設定

3.1 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km²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km²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 (TA₁)」と「過去の竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域 (TA₂)」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 (TA₂)」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 TA₂₂ として設定することとしている。

3.2 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。

3.2.1 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。

3.2.2 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。

3.3 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

3.3.1 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年に統計方法の変化があり、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。

(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、TA₂₂として考慮されているが、TA₁においても考慮することが望ましい。

3.4 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。

3.4.1 総覧スケールの気象条件に基づく竜巻検討地域 (TA₁)

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3.1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 3.1 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 3.2 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

3.4.2 過去の竜巻集中地域に基づく竜巻検討地域 (TA₂)

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 TA₂ 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 TA₂ として設定する。

3.4.3 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。

3.5 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 3.1 に示す。

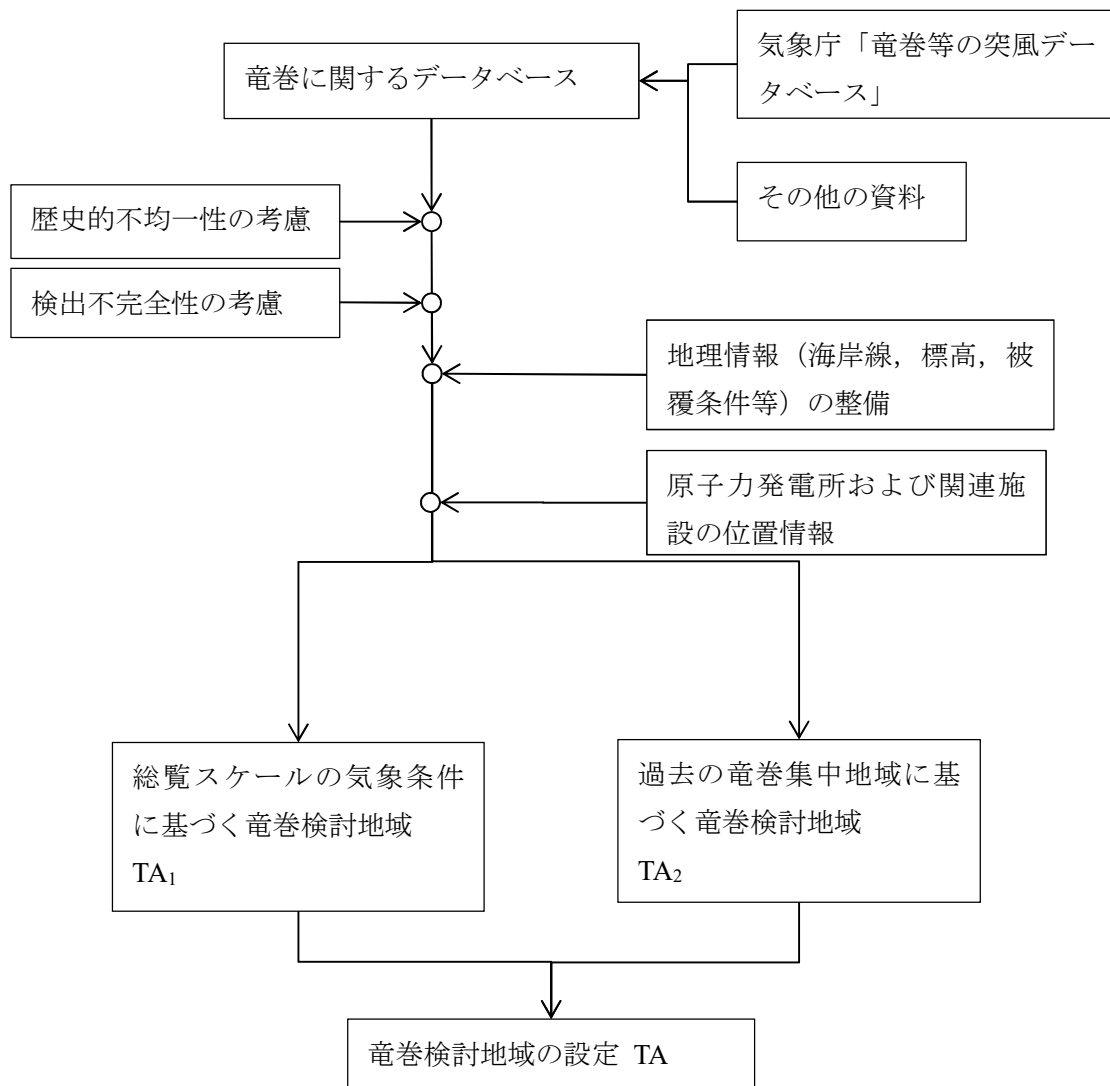


図 3.1 竜巻検討地域の設定手順

3.6 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_1 、 TA_2 の設定事例を表 4.3 にまとめた。 TA_2 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 3.3 事業所ごとに審査資料で設定された TA₁ および TA₂

事業所	TA ₁	TA ₂
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 ² 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 ² 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。

4. ステップ2 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定

4.1 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。

4.2 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。

4.2.1 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3.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。

4.2.2 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。

4.2.3 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4.1に示した。

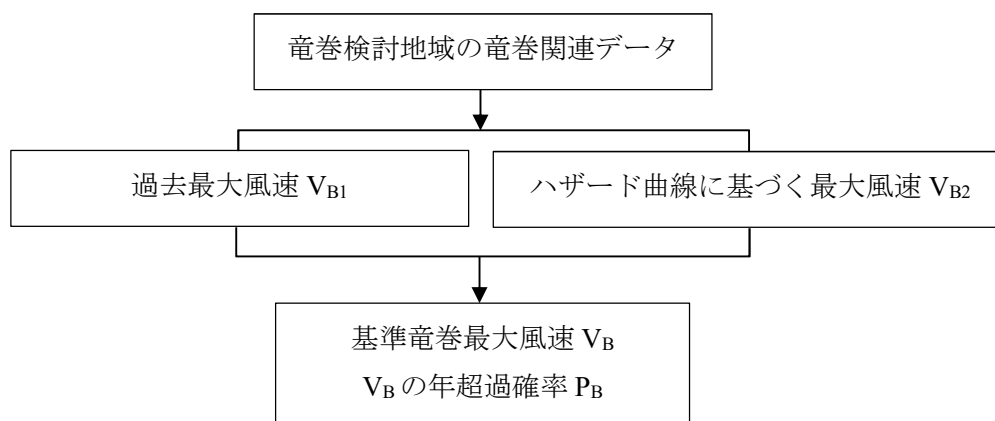


図 4.1 基準竜巻風速の設定手順

4.3 過去に発生した竜巻による最大風速

4.3.1 最大風速評価の概要

前章 3. 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 4.1 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 4.2 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 4.2 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 4.3 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 月から開始された。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、今後生じる最大級の竜巻に対する評価は表 4.2 と同程度の評価になることが予想される。

表 4.1 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 4.2 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 4.3 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 ～

4.3.2 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_{B1} 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_{B1} 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 4.2 に過去最大竜巻風速 V_{B1} の設定手順を示した。

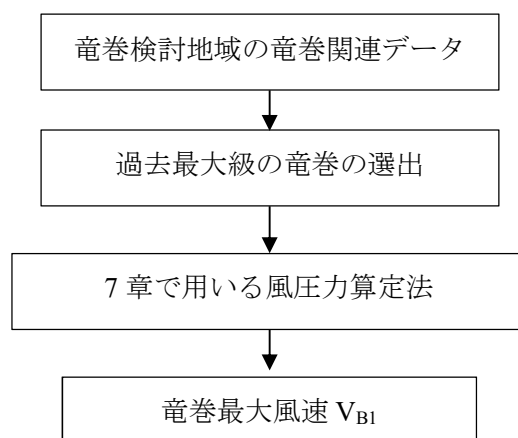


図 4.2 過去最大竜巻風速 V_{B1} の設定手順

4.4 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 4.3 に示した。前章 3. 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。

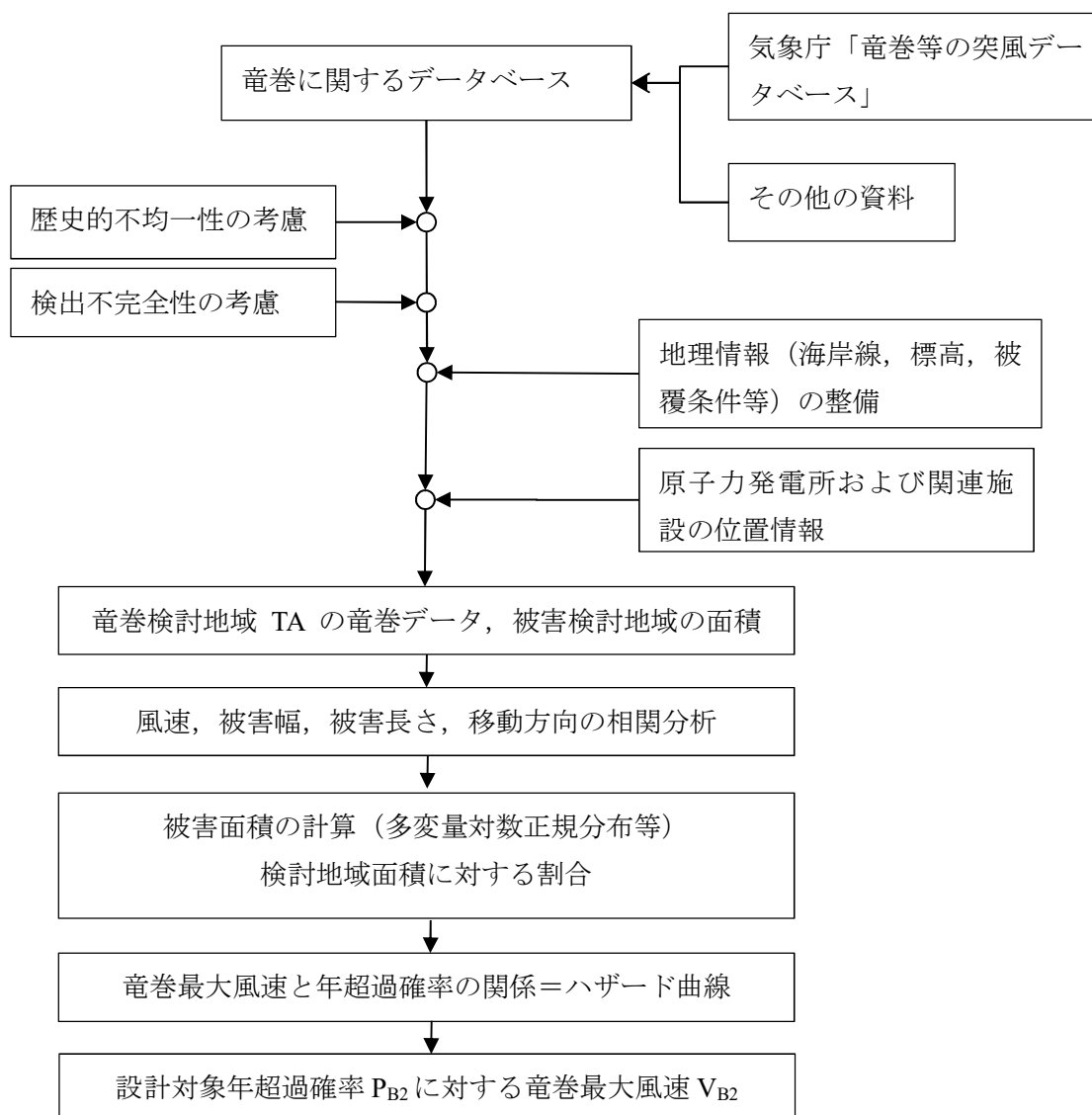


図 4.3 竜巻最大風速の年超過確率の評価と基準竜巻最大風速 V_{B2} の設定手順

4.4.1 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 ((4.1)式) もしくはポリヤ分布 ((4.2)式) に適合する。

$$P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} \exp(-vT) \quad (4.1)$$

$$P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} (1 + \beta vT)^{-(N+1/\beta)} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (4.2)$$

ここで、ポリヤ分布の β は、(4.3)式によって推定が可能である。

$$\beta = (\sigma^2/v - 1)/v \quad (4.3)$$

ここで、

- v : 竜巻の年平均発生数
- σ : 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 $P_{V_0,T}(D)$ の推定式が(4.4)式および(4.5)式で与えられることを導き出した。

$$P_{V_0,T}(D) = 1 - \exp[-vR(V_0)T] \quad (4.4)$$

$$P_{V_0,T}(D) = 1 - [1 + \beta vR(V_0)T]^{-1/\beta} \quad (4.5)$$

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

(4.4)式はポアソン分布、(4.5)式はポリヤ分布の式から導き出された。(4.4)式および(4.5)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 α 、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つの竜巻の風速が V_0 以上となる面積 $DA(V_0)$ を(4.6)式および図 4.4 のように与えている。(4.6)式中の第1項から第4項は、図 4.4 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。

$$\begin{aligned} DA(V_0) &= WL + HL + WG + AB ; & V_i &\geq V_0 \\ DA(V_0) &= 0 ; & V_i &< V_0 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Garson et. al [2][3]は、(4.6)式をもとに(4.4)式および(4.5)式の中の $R(V_0)$ が、(4.7)式を用いて(4.8)式によって与えられることを示している。

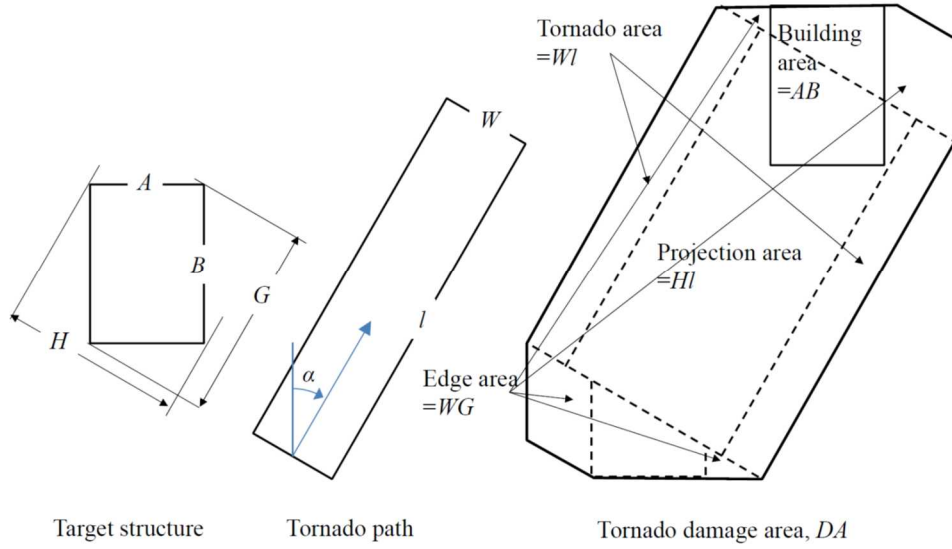


図 4.4 対象物の範囲を考慮した竜巻の影響範囲

$$\begin{aligned}
 E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) f(V, w, l) dV dw dl \\
 &\quad + \int_0^{360} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty H(\alpha) f(V, l, \alpha) dV dl d\alpha + \int_0^{360} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) G(\alpha) f(V, w, \alpha) dV dw d\alpha \\
 &\quad + AB \int_{V_0}^\infty f(V) dV \tag{4.7}
 \end{aligned}$$

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \tag{4.8}$$

ここで、

V : 最大竜巻風速

w : 被害域幅

l : 被害域長さ

α : 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(4.7)式の中の $W(V_0)$ に対し、(4.9)式を示している。

$$W(V_0) = \left(\frac{V_w}{V_0} \right)^{1/1.6} w \tag{4.9}$$

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。

4.4.2 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(4.7)式～(4.9)式で計算されるが、(4.7)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 4.1, 表 4.2 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。そのような場合は、被害域幅, 被害域長さおよび竜巻風速は、(4.10)式のような3変量対数正規分布によって計算することができる。

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

$$0 < x \leq \infty \quad 0 < y \leq \infty \quad 0 < z \leq \infty \quad (4.10)$$

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

ρ_{xy} : $\ln(x)$ と $\ln(y)$ の相関係数

ρ_{xz} : $\ln(x)$ と $\ln(z)$ の相関係数

ρ_{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は明らかではない。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。

(4.7)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4.4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、(4.11)式と(4.12)式のように与えられる。

$$H(\alpha) = B|\sin(\alpha)| + A|\cos(\alpha)| \quad (4.11)$$

$$G(\alpha) = A|\sin(\alpha)| + B|\cos(\alpha)| \quad (4.12)$$

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. ステップ3 設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定

5.1 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。

5.2 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。

5.3 設計竜巻の最大風速の設定

前章 4.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 α とすれば、

$$V_D = \alpha \cdot V_B, \quad (5.1)$$

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くものではなかった。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を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5.1のようにまとめられる。

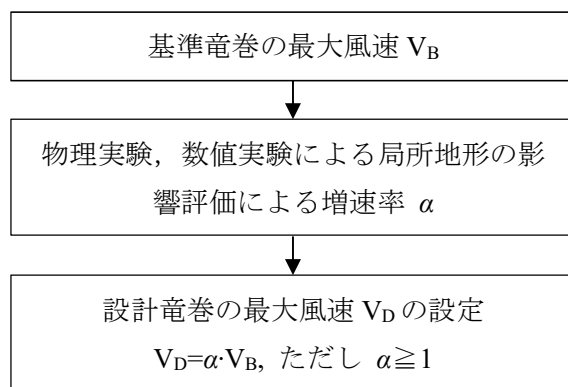


図 5.1 設計竜巻の最大風速 V_D の設定手順

6. ステップ4 設計竜巻の特性値の設定

6.1 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。

6.2 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。

6.2.1 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。

6.2.2 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できると仮定して設定する。

6.2.3 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。

6.3 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。

$$V(r) = \begin{cases} (r/R_M)V_M & (r \leq R_M) \\ (r/R_M)^{-1}V_M & (r > R_M) \end{cases} \quad (6.1)$$

$$P(r) = \begin{cases} P_S - (1 - \frac{1}{2}(r/R_M)^2) \rho V_M^2 & (r \leq R_M) \\ P_S - \frac{1}{2}(r/R_M)^{-2} \rho V_M^2 & (r > R_M) \end{cases} \quad (6.2)$$

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、 ρ 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、

$$V_M = V_D - V_T \quad (6.3)$$

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、

$$R_M = 30 \text{ (m)} \quad (6.4)$$

とすることができる。

これらの値を用いると、空気密度を ρ として、中心気圧低下量 D_P は、

$$D_P = \rho V_M^2 \quad (6.5)$$

最大気圧低下率 $(dP/dt)_{\max}$ は、

$$dP/dt|_{(r=R_M)} = (V_T/R_M) D_P \quad (6.6)$$

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 6.1 に評価フローを示す。

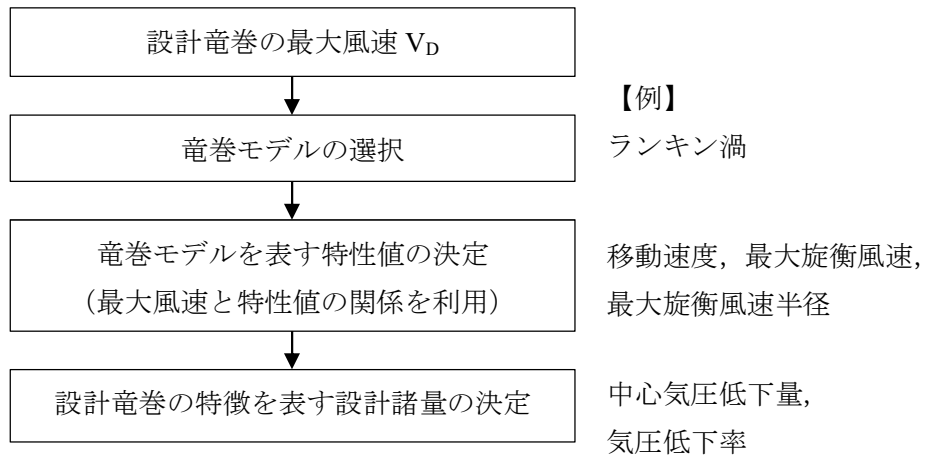


図 6.1 設計竜巻を表す特性値の設定手順

7. ステップ5 設計竜巻荷重 (F_D) の設定

7.1 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。

7.2 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。

7.2.1 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 、受風面積 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。

7.2.2 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。

7.2.3 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。

7.2.4 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。

7.3 風圧力による荷重

風圧力については設計竜巻の最大風速による風圧力とダウンバーストの鉛直下向きの最大風速による風圧力の 2 つを設定する。設計竜巻の最大風速による風圧力は藤田スケールに基づいた風速が水平に作用すると仮定して、通常の強風等を対象とした風力係数を乗じることによって設定される。通常の強風とは台風や季節風を指し、竜巻に比べて長い時間にわたって持続する強風をいう。したがって、それらの風力係数の利用は、通常の耐風設計と同様に定常状態を仮定することになるが、竜巻のように短時間での風荷重の発生メカニズムがよくわかっていないため、これは便宜的に採られた方法である。今後の研究によって竜巻状強風下における風荷重が解明されると、より現実的な設計風圧力が設定できる可能性がある。

設計竜巻最大風速を V_D とすれば、速度圧 q は、

$$q = (1/2) \rho V_D^2 \quad (7.1)$$

で与えられる。さらに、竜巻による風圧力 P_D は、

$$P_D = q G C A \quad (7.2)$$

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 C は「建築基準法施行令」または「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説」に準拠して算定する。これら風力係数は境界層風洞で発生させた境界層乱流内に置かれた建築物模型に作用する圧力の測定から得られている。境界層乱流は高さ方向に勾配をもつ安定大気を想定しており、竜巻のように鉛直風速成分を有し、比較的規模の小さい気流とは条件が異なる。しかしながら、上述したように、竜巻襲来時の建築物に作用する風荷重は十分に解明されていないので、これらを便宜的に利用する。竜巻の大きさは、最大風速半径が数十メートルから 100 メートル程度であるので、これらの風力係数を用いた場合には、規模の大きい建築物に作用する風荷重は過大評価される可能性がある。なお、引用する風上側壁面の外圧係数は、鉛直方向分布係数（引用基準規では kz の記号で表される）を用いて境界層の速度勾配を考慮しているが、竜巻風速は鉛直方向に一様であると考えているので、ここでは $kz=1$ として安全側に設計することが望ましい。

ダウンバーストは鉛直方向下向きの風速成分をもち、過去に航空機離発着時の墜落事故を引き起こした気象現象として知られている。したがって、ダウンバーストは建築物にも鉛直方向下向きの荷重を作用させることから、特に屋根風荷重に対して影響が大きい。しかしながら、屋根の強風被害は鉛直上向きに作用する風荷重に対して発生することが多く、ダウンバーストを水平風とみなして設計することは安全側にあると考えられる。

ガスト影響係数 G は、荷重効果における瞬間最大値と平均値の比で定義される。原子力発電施設は剛な構造をもち共振効果は小さいと考えられること、および竜巻設計風速は最大瞬間値で与えられることから、 $G=1.0$ と仮定できる。

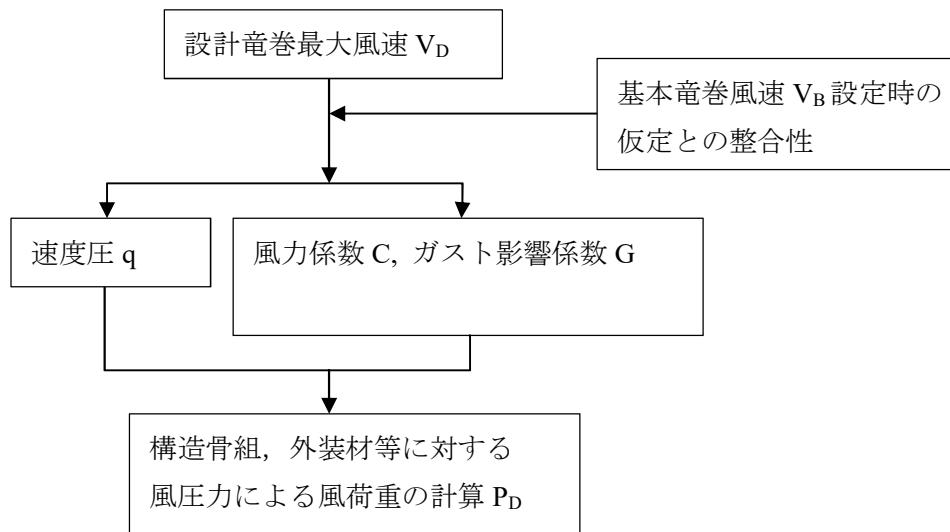


図 7.1 風圧力による風荷重の設定手順

7.4 気圧差による荷重

気圧差による圧力は、竜巻の急激な気圧降下に伴う建築物内外の気圧差によって生じる。米国における竜巻観測では数十秒間で約 100hPa の気圧降下が見られた。100hPa の気圧降下がそのまま建築物に作用すると、10,000 N/m² の荷重が生じ、それは通常の耐風設計に用いられる風荷重を大きく上回る。一般に、建築物には多くの隙間が存在し、建築物室内の圧力は隙間を通して室外の大気圧に追随するので、建築物内外の圧力差は大きくはならない。しかし、建築物の気密性を高くして閉鎖された空間に近い場合、建築物内外の圧力が等しくなるには時間がかかり、短い時間で圧力差が発生することがある。泉ら[18]は急激な気圧降下における圧力差について実験的に研究し、建築物の気密度が高いほど瞬間的な圧力差が大きくなることを確認した。圧力差は、設計竜巻で設定された竜巻中心気圧の低下量 D_p とそのときの建築物の室内圧との差である。

室内圧の時間変化は、気圧の低下量 D_p 、気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$ 、建築物の気密度や容積などによって表されるが、隙間を通して流出入する空気塊の加速度による共振効果も現れることがあるとされ、未だうまく定式化されていない。したがって現時点では、設計竜巻の特性によって決定された気圧低下量 (D_p) がそのまま建築物に作用するとして建築物の設計を行うこととしている。

気圧差による影響は、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必要がある。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。

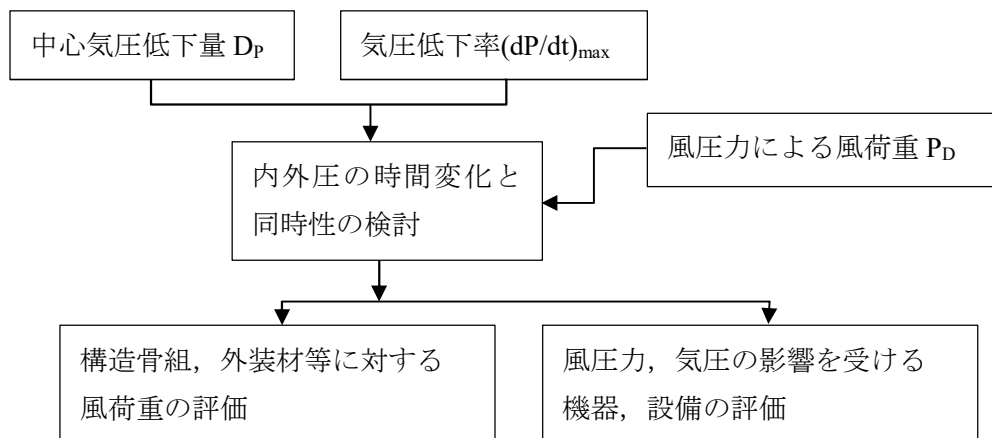


図 7.2 気圧差による風荷重の設定手順

7.5 飛来物による衝撃荷重

7.5.1 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。

7.5.2 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、(7.3)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]。

$$\frac{d\mathbf{V}_M}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) - g\mathbf{K} \quad (7.3)$$

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

ρ : 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(7.4)式で表すことができる。

$$C_D A = c(C_{D1}A_1 + C_{D2}A_2 + C_{D3}A_3) \quad (7.4)$$

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。

(7.3)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 $MV_{V_{max}}$ は最大水平速度の2/3としてよいとしている。

以下に、飛来物の飛散運動を解析する際の計算条件等に関する留意点をまとめる。

(1) 流れ場について

解析に用いる流れ場は、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ものか、竜巻渦モデルのいずれかを選択するとあるが、選択した流れ場によって求められる飛散速度は変化する。報告書第I編3.2節に示されるように、ランキン渦モデル、フジタ渦モデル、および、LES計算より求めた3種類の渦状の流れ場(1セル型、2セル型および多重渦)を用いた飛散計算の結果を見ると、最大対地相対水平速度に関しては、LES計算で求めた1セル型、および多重渦による計算結果が最も大きな値を示し、フジタ渦モデルが最も小さな値を示す。

ランキン渦モデル、フジタ渦モデルでは、風速は位置によって変化するが、時間的には一定な風速をとる定常流れ場になっているので、飛散物の速度はその飛散開始位置によって

一意的に決まった値となる。一方、LES計算より求めた非定常流れ場では、同じ位置でも時間方向に風速は変化するため、同じ位置から飛散を開始したとしても、飛散開始時刻によって飛散速度は変化することになる。さらに、報告書第I編3.2.5節に示すように、飛来物の最大速度は、飛散中に受けた最大空気力が大きいほど、大きくなる傾向があるので、飛散物周りの風速（相対風速）が大きい領域を飛散した飛来物の速度が高くなると考えられる。このとき、報告書第1編2.4.2節に示されるとおり、風速の最大瞬間値は最大平均接線風速の約2倍の値をとるので、飛散中にそのような高速の風速域を通過した飛来物の速度は、定常流れ場のランキン渦モデル、フジタ渦モデルによる解析結果よりも大きくなることは、前述の通りである。

（2）飛散開始位置について

飛来物の飛散開始高さについては、種々議論のあるところであるが、飛散可能性のある物体が存在する高度として周囲の建物や構造物の高さの最大値とすることができる。また、地形による起伏によっても相対的に高い位置から飛散開始することが考えられる。さらに、飛散することにより達する高度とすることも考えられるが、これは、空力パラメータで与えられる物体の飛びやすさによって変化する値である。文献3.2.5では、被害を及ぼす程度に大きな飛来物の最高到達高度について、過去の観察記録等を勘案して40mと決めていると推測することができる。ただし、報告書第I編3.2.3節の解析結果を参照すると、おおむね飛散開始高度が高くなるほど、最大対地相対速度は大きくなっているが、LESの2セル型の結果のように、低高度からの飛散の方が、最大速度が大きくなる場合もある。したがって、付近の建物や構造物、地形などによって、飛来物が存在可能な高さ、あるいは、40mのいずれか高い方の高度以下の幾つかの高度から飛散した場合の計算を行って、最大速度の変化を確認しておくのが良いと考えられる。

飛散開始の水平位置については報告書第I編3.2.5節の解析結果から、渦の進行方向の放出位置では渦中心に近いほど最大対地相対速度は大きくなり、渦の進行方向直角方向に関しては、渦の回転方向と、移動速度による対地相対風速が大きい側の、最大接線風速半径付近で放出された場合に最大対地相対速度が大きくなることが示されているので、渦中心から最大接線風速半径の3倍程度の範囲で飛来物を放出して解析を行うのが良いと考えられる。

（3）飛散開始速度について

飛来物が地面に固定されているなど、飛来物の飛散開始時の対地速度が0とみなせる場合、飛散物の対気流相対速度は渦の回転成分に移動速度を足した値となる。これは、渦と共に移動する座標系から飛来物の運動を見た場合に、飛来物は水平方向に渦の移動速度だけの初速度をもって放出されたことに相当している。

飛来物の飛散開始時の対地速度が0 m/s とみなせない場合は、例えば、以下のようなこと

が考えられる。飛来物の衝突により初速度をもって飛散開始した場合、風によって振動するなど、飛来物が対地的に速度をもっている状態から飛散を開始した場合、飛散物が途中で複数の飛散鬱に分解した場合等が考えられる。種々の場合が想定できるが、どのくらいの初速度をもつかについては、少なくとも、飛来物が存在可能な高さにおける飛来物の最大速度、および、飛散開始位置付近の風速以下とみなしてよいと考えられる。

(4) 渦の形態について

3.2.3 節の解析で用いたランキン渦モデル、フジタ渦モデル、および、LES計算より求めた3種類の渦状の流れ場は、それぞれ形態の異なる渦の流れ場に相当すると考えられる。ここでは、いずれの渦も、その中心が地面に対してほぼ垂直な軸をもつものだけを扱っているが、自然の竜巻の渦の軸は、地面に対して傾いている場合も存在するので、そのような場合の飛散性状に関しては今後の検討課題である。試験的な計算結果による軸の傾いた渦の地面付近の気流性状に関して述べると、傾いた軸周りの回転運動により、垂直な軸をもつ渦よりも、傾いた軸をもつ渦の方が、大きな鉛直方向の風速成分が観察される。このことは、飛来物が場合によってはより大きな鉛直方向の風力を受けることになり、より上空に飛散する可能性があることが推測できる。

(5) 周囲の建物や地形の影響

地面付近に粗度を置いた解析結果を見ると、粗度高さ以下では風速が低減されるため、飛散速度が増速されることは少ないことが多いと考えられる。ただし、建物や地形の形状によっては、局所的な風速増加領域が生じる可能性があるなど、その影響は複雑なため、基本的には、周囲の建物や地形の影響を考慮したい場合には、実際の状況を再現した解析を行うべきであると考えられる。

7.5.3 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、(7.3)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。

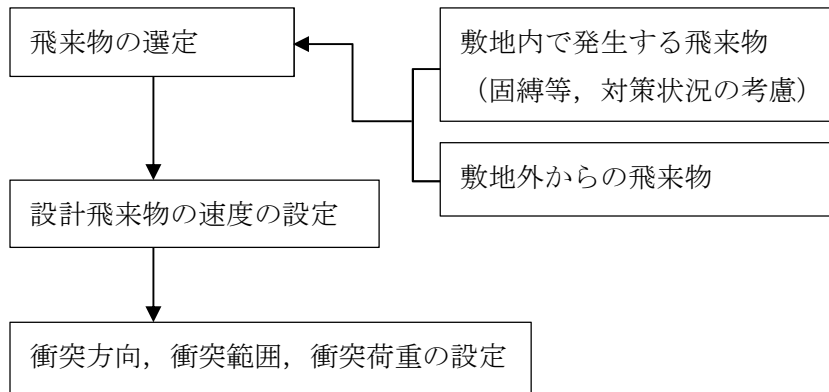


図 7.3 飛来物による衝撃荷重の設定手順

7.6 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[19]を参照して、以下の 2 つの荷重の組み合わせを設定している。

$$W_{T1} = W_p \quad (7.5)$$

$$W_{T2} = W_w + 0.5W_p + W_M \quad (7.6)$$

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。

W_{T1} は、気圧差による荷重だけが作用するケースで、隙間のない閉鎖型建築物の場合が想定されている。このような施設の多くは、室外空間と接しておらず、風を直接受けない。したがって、風圧力による荷重や飛来物による衝撃荷重は考慮しない代わりに、気圧差による荷重がそのまま掛かると想定されている。 W_{T2} の組み合わせでは、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。しかし、これは構造物の規模と竜巻の大きさとの相対関係も考慮すべきで、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その構造物に同時に作用する可能性が否定できない状況も起こりうる。ただし、気圧差の影響が構造物の全体、あるいは内部、外部に瞬時に伝わる状況では、外圧と内圧の差で生じる荷重としての効果は相殺される可能性もあるので、実況に応じて検討すべきである。

なお、設計荷重は設計竜巻荷重の他に常時作用する荷重や竜巻以外の自然現象による荷重などを組み合わせなければならない。

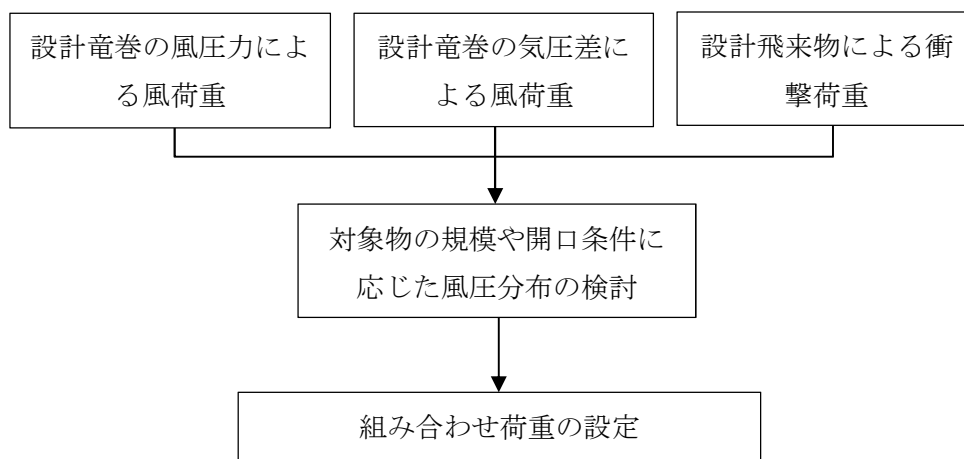


図 7.4 竜巻による組み合わせ荷重の設定手順

8. 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 8.1 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，本報告書は，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 8.1 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

評価手順		評価手順書の構成						
ステップ	評価項目 (例)	評価項目に対する要素技術 (解析的要素を含む)	竜巻ガイドの記載内容 で (基本的な要素技術として 選定して評価手順書に 記載)	標準的な手段・手法を提示して整備する 必要が要素技術			備考 (今後の課題・問題点、 対応不可なもの)	
				定性的な評価	手計算	市販等 の解析 コード		解析 コードの 作成
1	竜巻の発生状況	①日本全国竜巻発生時の総観場調査 ・竜巻の気象観測データ等の収集 (海上竜巻も含む)	気象庁の竜巻等の突風データベースの使用が明記されている	データの吟味の必要性の指摘、不完全性の考慮	—	—	—	各竜巻の発生状況を個別に総合的に検討する必要がある
	竜巻検討地域	①発電所類似地域の総観場調査 ・発電所設置地域の総観場の特定 ・発電所設置地域の竜巻発生状況の把握 ②竜巻検討地域の地域区分 ・総観場による相関性の分析と評価等 ・突風関連指数による解析と評価等	検討地域を日本とする場合は、過去最大の選出が可能	総観場と竜巻発生状況の相関性分析の必要性の指摘 突風関連指数による地域区分手法開発の必要性の指摘	—	—	—	類似地域の設定方法を開発する必要がある 突風関連指数の適用方法を開発する必要がある
2	過去に発生した竜巻による最大風速VB1	①竜巻最大速度の選定 ・既往最大竜巻発生時と「竜巻検討地域」の総観場の比較	検討地域を日本とする場合は、過去最大の選出が可能	フジタスケール、または日本版改良フジタスケール	—	—	—	竜巻の被害と風速の関係の解明が必要、過去の被害の再評価が必要
		②竜巻検討地域と竜巻影響エリアの面積の算定 ・竜巻検討地域 (海岸線内外5kmの範囲等) ・竜巻影響エリア (発電所内の評価対象施設の面積の設定)	海岸線からの距離にともなう発生頻度の変化を考慮すべきことが明記されている	集中エリアの選択根拠	—	GISソフトウェアの利用	—	データベースの総合的な吟味が必要
	竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速VB2	②収集した竜巻のデータを解析用に補正 ・竜巻発生頻度、竜巻風速、被害幅、被害長さ	評価項目の種類が明確にされている	①のGISソフトウェアの出力を利用	○	—	—	データベースの総合的な吟味が必要
		③各種データから確率密度分布の算定 ・竜巻発生頻度、竜巻風速、被害幅、被害長さ ・相関係数等の算定と確認 ④ハザード解析 ・竜巻発生頻度の算出 ・竜巻影響エリアがある風速以上の大きさをもった竜巻に遭遇する確率 ・ハザード曲線の算出	評価項目の種類が明確にされている	—	—	—	○	確率分布の種類、分析方法の高度化が必要 計算方法の高度化が必要
基準竜巻の最大風速VB	①VB1とVB2の比較	両者の最大値を選択する	—	○	—	—	評価概念の高度化が必要	
3	設計竜巻の評価	増幅特性を考慮した設計竜巻	①増幅特性の考慮 ・地形特性等 (地表面粗度、小地形等) を考慮して割り増した風速の設定	実験や数値計算で評価することを原則としている	●	—	—	現象のより深い理解と分析手法の構築が必要
4	設計竜巻の特性値の評価	設計竜巻の竜巻渦のモデル化と特性値	①渦モデルの諸元比較 ・ランキン、Fujita、Burgers、Sullivan等	ランキン渦モデルとLESによる数値計算結果例が示されている	●	—	—	渦モデルの特徴と最終結果への影響評価が必要
			②各渦モデルに見合った特性値の設定 ・移動速度、最大接線風速、最大接線風速半径、最大気圧低下量、最大気圧低下率等 ③竜巻渦の特性による影響評価 ・渦のモデル化と気圧の急激な変化の影響 ・流れ場、気圧場の非定常性	一般的な概念は明確になっている	●	—	—	過去の事例に対する分析が必要 渦モデルの特徴と最終結果への影響評価が必要
5	設計竜巻による風圧力による荷重	風圧力による荷重	①風圧力による荷重の算定 ・設計速度圧、ガスト影響係数、風力係数、空気密度、対象施設の受圧面積、設計竜巻の最大風速に基づいた算定	定常乱流境界層における空力評価が示されている	●	—	—	現象のより深い理解と分析手法の構築が必要
			②風圧差による荷重の算定 ・設計竜巻の特性値の評価に基づく設定	大気静圧の変化を取り扱うことが明記されている	●	—	—	現象のより深い理解と分析手法の構築が必要
	設計竜巻荷重の評価	飛来物挙動の検討及び設計飛来物による衝撃荷重	①飛来物候補の分析 ・自然物や施設外近隣構造物の飛来物候補 ・事業所内の飛来物候補の評価	飛来物の候補が示されている	●	—	—	自然を起源とするものと、通常設置物、被害発生時に生成されるもの等の分類が必要
			③飛行挙動の分析 ・初期条件、境界条件の影響 ・風速場、圧力場の設定 ・対象飛来物の形状諸元に基づく定式化空力パラメータ等	状況に応じて適切に設定する	●	—	—	初期条件を確定的に扱うことが困難なので、何らかの統計的手法が必要、飛行挙動解析結果からの分類が必要
設計竜巻荷重と組み合わせ荷重	設計竜巻荷重と組み合わせ荷重	④飛来物の衝突時の特性と荷重の算定 ・衝突条件と衝突荷重の算定	不利な条件 (安全側) で取り扱うことが示されている	●	—	—	設計上の取り扱い方法の方針設定が必要	
		①設計竜巻荷重の算定 ・設計竜巻による風圧力による荷重、気圧差による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重を組み合わせ合わせた複合荷重の算定 ②設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の算定 ・組み合わせる荷重の考慮	NUREG-0800の例が引用されている	●	—	—	空気力の総合的な現象理解と設計上の取り扱い方法の検討が必要	
				NUREG-0800の例が引用されている	●	—	—	対象物のスケールに応じた荷重係数の設定方法等の検討が必要

—: 取り扱い、コメントなし、○: 本研究で実施、●: 今後の検討が必要

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] 泉 知宏, 高橋 駿介, 友清 衣利子, 前田 潤滋 : 急激な気圧降下による建物内外の気圧差力に及ぼす建物密閉度の影響, 第 24 回風工学シンポジウム, 2016, pp.205-210.

[19] 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 III 編 竜巻荷重に係る解析手法の整備

目次

	頁
はじめに	1
1. 竜巻風速ハザード解析コードの整備 (改良)	2
1.1 竜巻による最大風速のハザード曲線の計算方法	2
1.2 竜巻風速ハザード解析コードのフローチャート	8
1.3 竜巻風速ハザード解析コードの動作に必要な環境	10
1.4 竜巻風速ハザード解析コードの構成	10
1.5 竜巻風速ハザード解析コードの実行手順	13
1.6 竜巻風速ハザード解析コードの計算結果の検証	27
1.7 積分回数について	31
付録 1.1 竜巻データベース使用上の留意点	32
付録 1.2 F スケールと風速の関係について	37
付録 1.3 ArcGIS による特定エリア通過竜巻の抽出とエリア面積の算出	39
参考文献	51
2. 竜巻飛来物解析コードの整備	52
2.1 飛散運動の計算方法	52
2.2 ソフトウェアのインストール方法	60
2.3 飛来物の運動解析手順	64
2.4 計算結果の描画方法	72
2.5 各種ファイルの書式と内容	76
参考文献	87

はじめに

本報告書第 III 編では、基準竜巻・設計竜巻荷重の設定に関する方法のうち、竜巻ハザード解析および竜巻飛来物解析について、特に計算機プログラムコードを開発し、竜巻風速ハザード解析コードの整備（改良）および竜巻飛来物解析コードの整備として、その手順、技術的な説明と操作方法について解説するものである。

なお、本報告書第 III 編は、「平成 28 年度 実用発電用原子炉施設の竜巻による影響評価の手順の整備」の報告書に本年度の竜巻飛来物解析コードの改良に関する追記等を行って作成した。

1. 竜巻風速ハザード解析コードの整備（改良）

1.1 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

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。

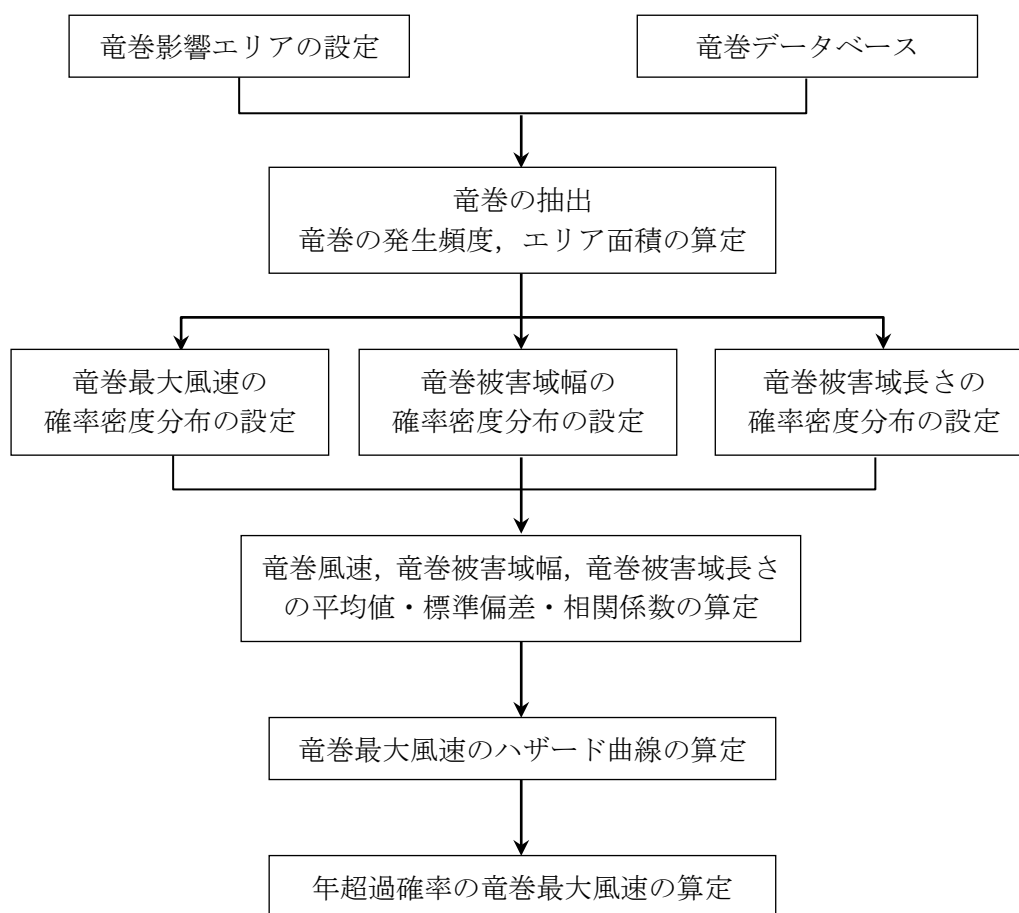


図 1.1.1 竜巻による最大風速のハザード曲線算出のフロー

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[1.1]に記載の Wen & Chu[1.2]および Garson et. al[1.3, 1.4]の方法を用いている。

竜巻の年発生数の確率分布は、Wen & Chu[1.2]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。

$$\text{ポアソン分布} \quad P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} \exp(-vT) \quad (1.1)$$

$$\text{ポリヤ分布} \quad P_T(N) = \frac{(vT)^N}{N!} (1 + \beta vT)^{-(N+1/\beta)} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (1.2)$$

ここで、T：年数

N：竜巻の年発生数

ポリヤ分布の β は、下式で推定可能である。

$$\beta = (\sigma^2/v - 1) \times \frac{1}{v} \quad (1.3)$$

v ：竜巻の年平均発生数

σ ：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[1.2]の結果を用いて、以下の式を用いる。

$$\text{ポアソン分布} \quad P_{V_0,T}(D) = 1 - \exp[-vR(V_0)T] \quad (1.4)$$

$$\text{ポリヤ分布} \quad P_{V_0,T}(D) = 1 - [1 + \beta vR(V_0)T]^{-1/\beta} \quad (1.5)$$

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[1.3, 1.4]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 α 、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。

$$\begin{aligned}
DA(V_0) &= WL + HL + WG + AB & V_i \geq V_0 \\
DA(V_0) &= 0 & V_i < V_0
\end{aligned}
\tag{1.6}$$

$R(V_0)$ は、Garson et. al.[1.3, 1.4]の結果を用いて、以下の $E[DA(V_0)]$ 式を用いて与えている。

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \tag{1.7}$$

$$\begin{aligned}
E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
&+ \int_0^{360} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty H(\alpha) l f(V, l, \alpha) dV dl d\alpha + \int_0^{360} \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0) G(\alpha) f(V, w, \alpha) dV dw d\alpha \\
&+ AB \int_{V_0}^\infty f(V) dV
\end{aligned}
\tag{1.8}$$

ここで、
 V : 最大竜巻風速
 w : 被害域幅
 l : 被害域長さ
 α : 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.[1.3, 1.4]の結果を用いて、以下の式を与えている。

$$W(V_0) = \left(\frac{V_w}{V_0}\right)^{1/1.6} w \tag{1.9}$$

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

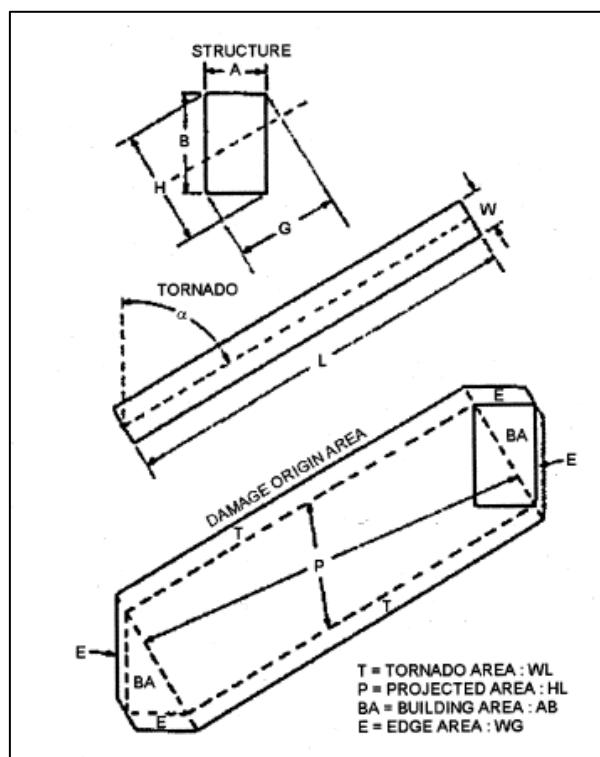


図 1.1.2 竜巻被害エリアのパラメータ

1.1.2 竜巻風速，被害域幅，被害域長さの確率分布

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，被害域幅，被害域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[1.1]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，被害域幅，被害域長さの相関係数を求めている。また，竜巻風速，被害域幅，被害域長さは3変量の確率分布で評価する。

$$f(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \frac{1}{\left| \begin{array}{ccc} \zeta_x^2 & \zeta_x \zeta_y \rho_{xy} & \zeta_x \zeta_z \rho_{xz} \\ \zeta_x \zeta_y \rho_{xy} & \zeta_y^2 & \zeta_y \zeta_z \rho_{yz} \\ \zeta_x \zeta_z \rho_{xz} & \zeta_y \zeta_z \rho_{yz} & \zeta_z^2 \end{array} \right|} xyz \exp \left[-\frac{1}{2} (\ln(x) - \lambda_x \quad \ln(y) - \lambda_y \quad \ln(z) - \lambda_z) \begin{pmatrix} \zeta_x^2 & \zeta_x \zeta_y \rho_{xy} & \zeta_x \zeta_z \rho_{xz} \\ \zeta_x \zeta_y \rho_{xy} & \zeta_y^2 & \zeta_y \zeta_z \rho_{yz} \\ \zeta_x \zeta_z \rho_{xz} & \zeta_y \zeta_z \rho_{yz} & \zeta_z^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \ln(x) - \lambda_x \\ \ln(y) - \lambda_y \\ \ln(z) - \lambda_z \end{pmatrix} \right] \quad (1.10)$$

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

λ_x ， λ_y ， λ_z ：変数 $\ln(x)$ ， $\ln(y)$ ， および $\ln(z)$ の平均値

ζ_x ， ζ_y ， ζ_z ：変数 $\ln(x)$ ， $\ln(y)$ ， および $\ln(z)$ の標準偏差

ρ_{xy} ： $\ln(x)$ と $\ln(y)$ の相関係数

ρ_{xz} ： $\ln(x)$ と $\ln(z)$ の相関係数

ρ_{yz} ： $\ln(y)$ と $\ln(z)$ の相関係数

1.1.3 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[1.1]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。

$$H(\alpha) = B|\sin(\alpha)| + A|\cos(\alpha)| \quad (1.11)$$

$$G(\alpha) = A|\sin(\alpha)| + B|\cos(\alpha)| \quad (1.12)$$

1.2 竜巻風速ハザード解析コードのフローチャート

竜巻風速ハザード解析コード（以下、解析コード）は、統計分析モジュールと竜巻ハザードモジュールの 2 つのモジュールに分かれている。統計分析モジュールは、竜巻データを読み込み、竜巻データに関する各種統計量を算出するモジュールである。一方、竜巻ハザードモジュールは、竜巻データに関する各種統計量を読み込み、竜巻最大風速のハザード曲線および超過確率 10^{-5} の竜巻最大風速 VB2 を算出するモジュールである。

各モジュールのフローチャートを図 1.2.1, 1.2.2 に示す。

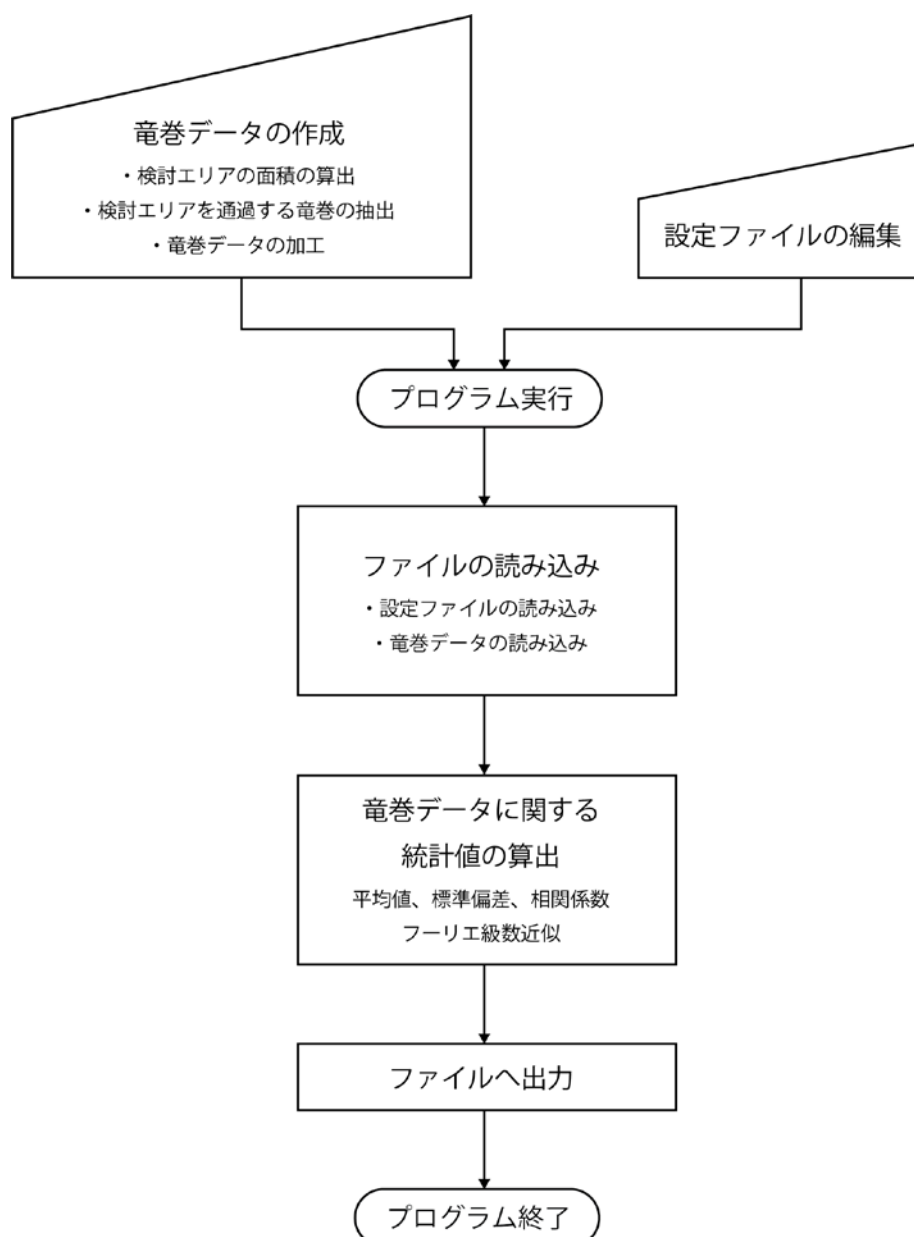


図 1.2.1 統計分析モジュールのフローチャート

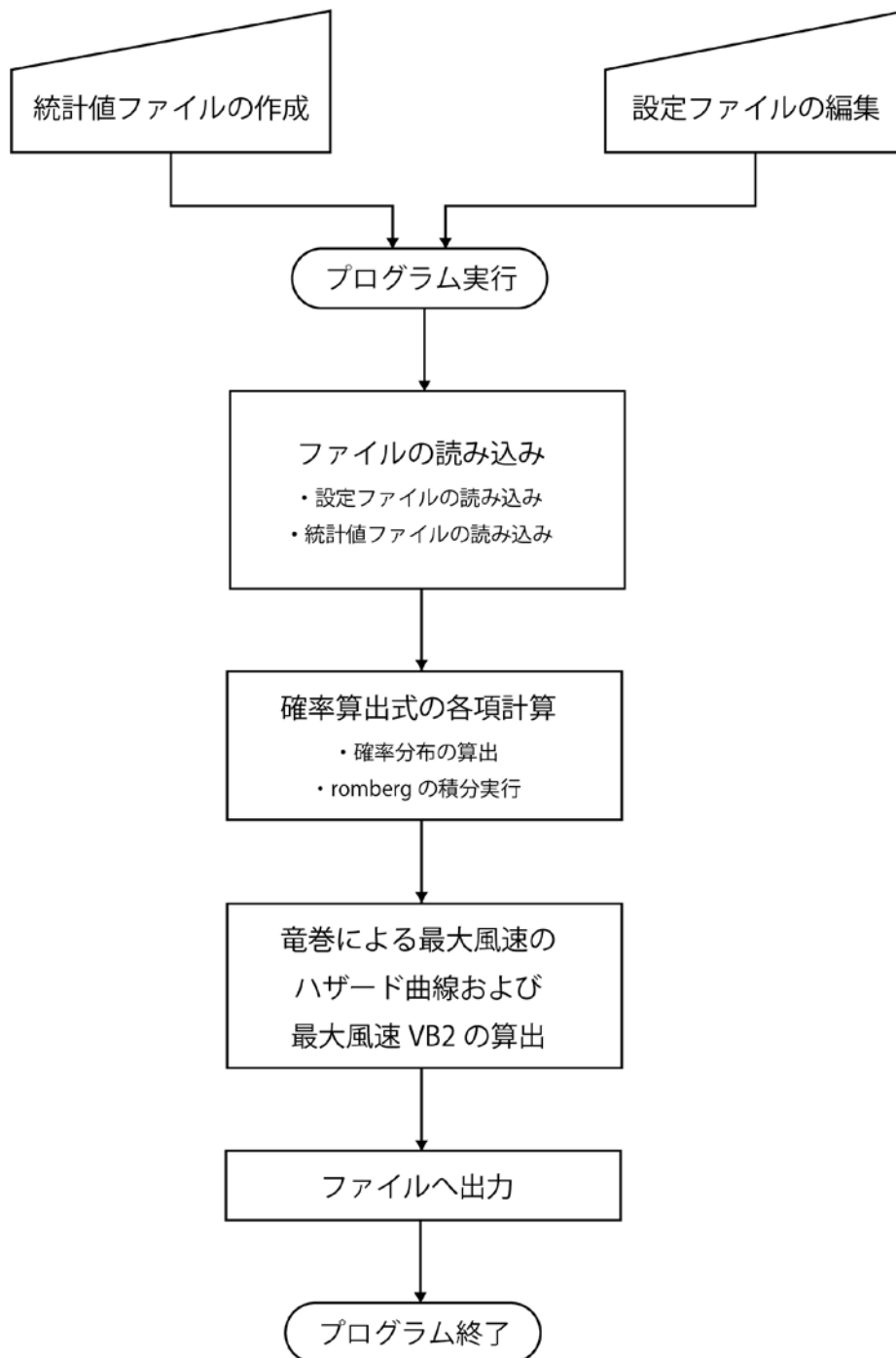


図 1.2.2 竜巻ハザードモジュールのフローチャート

1.3 竜巻風速ハザード解析コードの動作に必要な環境

OS : windows7~10

※上記以外の環境で動作しないことを示すものではないが、上記以外の動作確認は行っていない。

1.4 竜巻風速ハザード解析コードの構成

1.4.1 解析コードのファイル構成

解析コードは、以下のファイルで構成されている。

表 1.4.1 解析コードのファイル構成

ファイル名	機能	機能の説明
NTOR-stat.exe	統計分析モジュール	設定ファイル conf-stat.txt と竜巻データを読み込み、竜巻データに関する統計量を算出する。
NTOR-hazd.exe	竜巻ハザードモジュール	設定ファイル conf-hazd.txt と竜巻データに関する統計値ファイルを読み込み、竜巻最大風速の年超過確率と、年超過確率 10^{-5} の竜巻最大風速を算出する。
conf-stat.txt	統計分析モジュール用設定ファイル	統計分析モジュールを実行する際の、入力ファイル名や出力ファイル名、解析年数等を設定するためのファイルである。
conf-hazd.txt	竜巻ハザードモジュール用設定ファイル	竜巻ハザードモジュールを実行する際の、入力ファイルや出力ファイル、対象構造物の寸法や確率モデル等を設定するためファイルである。
read_module.o	読み込み用サブルーチンモジュール	読込処理を行うサブルーチンモジュールである。 ※直接実行することはない。
stat_module.o	統計分析用サブルーチンモジュール	統計分析を行うサブルーチンモジュールです。 ※直接実行することはない。
subntor_module.o	竜巻ハザード用サブルーチンモジュール	竜巻ハザードを計算するサブルーチンモジュールである。 ※直接実行することはない。

1.4.2 解析コードのフォルダ構成

解析コードのフォルダ構成を図 1.4.1 に示す。解析コードは NTOR-stat-hazd フォルダの中に配置されており、conf、data、fort、result の4つのサブフォルダで構成されています。conf フォルダには設定ファイルである conf-stat.txt と conf-hazd.txt が、fort フォルダには実行モジュールである NTOR-stat.exe、NTOR-hazd.exe およびサブルーチンモジュールが入っている。data フォルダは、統計分析モジュールに入力する竜巻データを入れるためのフォルダ、result フォルダは、統計分析モジュールと竜巻ハザードモジュールの実行結果を出力するためのフォルダである。

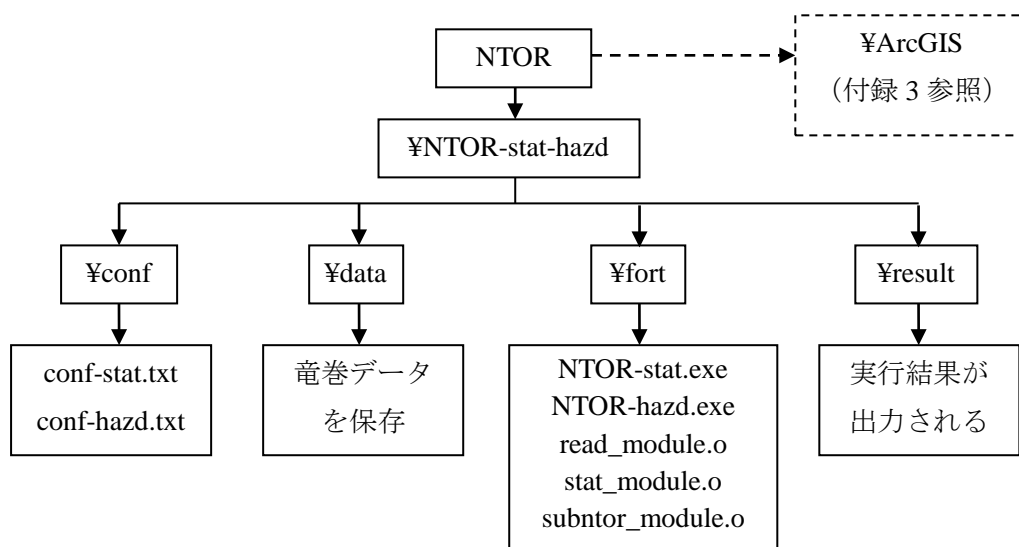


図 1.4.1 フォルダの構成

1.4.3 モジュールの入出力

統計分析モジュール (NTOR-stat.exe) および竜巻ハザードモジュール (NTOR-hazd.exe) の入出力について、図 1.4.2 に示す。

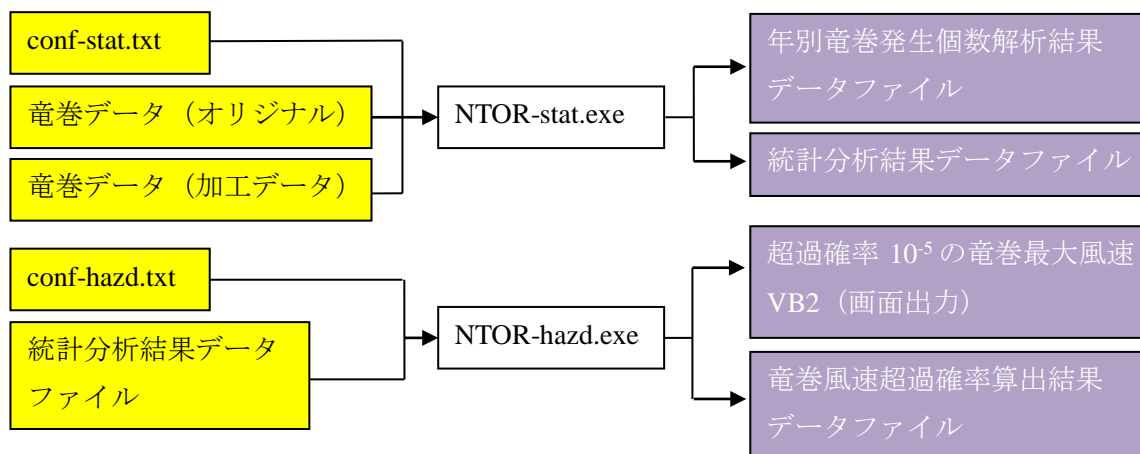


図 1.4.2 モジュールの入出力 (黄 : 入力, 紫 : 出力)

1.5 竜巻風速ハザード解析コードの実行手順

1.5.1 統計分析モジュールの実行手順

実行手順の主な流れを以下に示す。

- 1) 竜巻データの準備と配置
- 2) 設定ファイルの編集
- 3) フォルダの準備 (必要な場合)
- 4) モジュールの実行
- 5) 実行結果の確認

1.5.1.1 竜巻データの準備と配置

統計分析モジュールに入力する、竜巻データの準備を行う。竜巻データは、オリジナルデータと加工データの二つが必要である。オリジナルデータとは、気象庁の竜巻データベース（竜巻 DB）を用いて、付録 1.3 に示すような方法等により、検討エリアを通過する竜巻を抽出して作成したデータのことを指す。また、加工データとは、オリジナルデータが持つ不完全性（付録 1.1 参照）を補正したもののことを指す。オリジナルデータだけでは正しい最終結果が得られない可能性があることから、加工データの入力も必須としている。

どちらのデータも、表 1.5.1 に示すフォーマットで、カンマ区切りの CSV データとする。また、ヘッダの記述内容は任意で構わないが、1 行目に必ずヘッダを入れることが必要である。なお、5 列目の移動方向については、対象構造物を円形とする場合（(2)設定ファイルの編集参照）には、存在しなくても問題ない。

表 1.5.1 竜巻データのデータフォーマット（カンマ区切りの CSV データとする）

	1 列目	2 列目	3 列目	4 列目	5 列目
1 行目 (ヘッダ)	発生 年月日 (8 桁の整数)	F スケール (0~5 の 整数)	被害域長さ (km) (実数)	被害域幅 (m) (実数)	移動方向 (0~15 の 整数)
2 行目 以降 (データ)	19610101	0	4.2	30	1

竜巻データの準備ができれば、`data` フォルダの中に配置する。任意のサブフォルダ（フォルダ名は英数字のみ）を作成し、その中に配置しても構わない。

1.5.1.2 設定ファイルの編集

統計分析モジュール用設定ファイル (conf-stat.txt) を編集する。設定ファイルは conf フォルダの中にある。設定値の説明を表 1.5.2 に示す。また、設定ファイルの設定例を図 1.5.1 に示す。なお、#がついている行はコメント行であり、編集してはいけない。

表 1.5.2 統計分析モジュール用設定ファイル (conf-stat.txt) の設定値

設定パラメータ名	パラメータの説明	設定形式	備考
syear	解析開始年	4桁の整数	準備した竜巻データの発生年の、一番古い年を指定する。
eyear	解析終了年	4桁の整数	準備した竜巻データの発生年の、一番新しい年を指定する。
term	解析期間	実数	syear と eyear の差を指定する。ただし実数での指定が可能なので、例えば 10 年半であれば 10.5 とする。
fyear	各 F スケールのデータ採用年数の設定	3要素の配列, 4桁の整数	竜巻データの歴史的不均一性 (付録 1.1 参照) に対応するために、各 F スケールについて、何年からのデータを採用するのかを指定する。3要素の配列で、F0, F1, F2 以上の順に設定する。 例) F0 は 2007 年～, F1 は 1991 年～, F2 以上は 1961 年～のデータを採用する場合、fyear=(2007,1991,1961) とする。
torfname	竜巻データ (加工データ) のファイル名および配置場所	日本語を含まない文字列	加工済みの竜巻データのファイル名と、ファイルを配置している場所の <u>data フォルダ以下</u> を文字列で指定する。 例) data フォルダの中に <u>tornado</u> というサブフォルダを作成し、ファイル名を <u>tornado.csv</u> とした場合は、torfname=tornado/tornado.csv とする。

表 1.5.2 (続) 統計分析モジュール用設定ファイル (conf-stat.txt) の設定値

設定 パラメータ名	パラメータの 説明	設定形式	備考
otorfname	竜巻データ (オリジナルデータ) のファイル名および配置場所	日本語を含まない文字列	オリジナルの竜巻データのファイル名とファイルを配置している場所の <u>data フォルダ</u> 以下を指定する。 例) data フォルダの中に tornado というサブフォルダを作成し、ファイル名を orgtornado.csv とした場合は、 otorfname=tornado/orgtornado.csv とする。
tnumfname	年別竜巻発生個数解析結果データファイル名および出力場所	日本語を含まない文字列	年別の竜巻発生個数解析結果データファイル名と、出力したい場所の <u>result フォルダ</u> 以下を指定する。なお、サブフォルダを指定する場合には、あらかじめ手動でサブフォルダを作成する必要がある。(自動では作成されない) 例) result フォルダの中に tornado-num というサブフォルダをあらかじめ作成しておき、ファイル名を tornadenum.csv として出力したい場合は、 tnumfname=tornado-num/tornadenum.csv とする。
statfname	統計分析結果データファイル名および出力場所	日本語を含まない文字列	統計分析結果データファイル名と、出力したい場所の <u>result フォルダ</u> 以下を指定する。なお、サブフォルダを指定する場合には、あらかじめ手動でサブフォルダを作成する必要がある。(自動では作成されない) 例) result フォルダの中に tornado-stat というサブフォルダをあらかじめ作成しておき、ファイル名を tornadestat.csv として出力したい場合は、 statfname=tornado-stat/tornadestat.csv とする。

表 1.5.2 (続) 統計分析モジュール用設定ファイル (conf-stat.txt) の設定値

設定 パラメータ名	パラメータの 説明	設定形式	備考
f_vel	各 F スケールに 対応する風速値	6 要素の配 列, 実数	各 F スケールに対応する風速値を指定する。6 要素の配列で, F0 から順に指定する。例えば, 各 F スケールの風速範囲の中央値を指定したい場合には, fvel= (25.0,41.5,60.0,81.5,105.0,130.0) とする。
str_cir	対象構造物の形 状	0 または 1 (整数)	対象構造物の形状を指定する。 円形構造物の場合⇒1 を指定 方形構造物の場合⇒0 を指定 円形構造物の場合, 竜巻の移動方向は意味を持ちません。str_cir=1 にした場合は, 竜巻データの 5 列目のデータは不要。 (str_cir=0 の場合は, 5 列目が必須。) また, 方形構造物を設定した場合のみ, 統計分析結果データファイルに, 移動方向の発生頻度をフーリエ級数近似した際の 4 次までの係数が出力される。

```
#-----#
# conf-stat.txt 統計分析モジュール用設定ファイル#
#-----#
# syear      : 解析開始年 (ex.1961) (整数) #
# eyear      : 解析終了年 (ex.2015) (整数) #
# term       : 解析期間 (実数) #
# fyear      : 各Fスケールのデータ使用開始年の設定 (F0とF不明,F1,F2以上) #
# torfname   : 竜巻データファイル名 (加工データ) (dataフォルダ以下を指定) #
# otorfname  : 竜巻データファイル名 (オリジナルデータ) (/) #
# tnumfname  : 年別竜巻発生個数解析結果データファイル名 (resultフォルダ以下を指定) #
# statfname  : 統計分析結果データファイル名 (resultフォルダ以下を指定) #
# f_vel      : Fスケールに対応する風速 (m/s) (F0,F1,F2,F3,F4,F5) (実数) #
# str_cir    : 対象構造物の形状 (0->角, 1->円) (整数) #
#-----#
#
syear=1961#
eyear=2012#
term=51.5#
fyear=(2007,1991,1961)#
torfname=20170119/tornado/Pac_p5km.Vr12.quas52.csv#
otorfname=20170119/tornado/Pac_p5km.Vr12.csv#
tnumfname=20170119/stat/20170119-tnum.csv#
statfname=20170119/stat/20170119-stat.csv#
f_vel=(25.0,41.5,60.0,81.5,105.0,130.0)#
str_cir=1#
[EOF]
```

図 1.5.1 統計分析モジュール用設定ファイル (conf-stat.txt) の設定例

1.5.1.3 フォルダの準備

2)の設定ファイルで、ファイルの配置にサブフォルダを指定した場合は、必ず事前にサブフォルダを作成しておく必要がある。サブフォルダが存在しない場合、4)のモジュール実行時にエラーが出力され、モジュールが途中停止する。

1.5.1.4 モジュールの実行

NTOR-stat.exe をダブルクリックすると、モジュールが実行されてコマンドプロンプトが開く。正常に終了すると、図 1.5.2 に示すような結果が出力され、指定した場所に年別竜巻発生個数解析結果ファイルおよび統計分析結果ファイルが出力される。最後に、0+ENTER を入力するとモジュールが終了し、1+ENTER を入力するとモジュールが再度実行される。

```
>>Reading configuration data...
syear= 1961
eyear= 2012
term= 51.5
fyear=,2007,1991,1961.
torfname=../data/20170119/tornado/Pac_p5km.Vr12.quas52.csv
otorfname=../data/20170119/tornado/Pac_p5km.Vr12.csv
tnumfname=../result/20170119/stat/20170119-tnum.csv
statfname=../result/20170119/stat/20170119-stat.csv
fvel=, 25.0, 41.5, 60.0, 81.5,105.0,130.0
str_cir= 1
->Done
>>Reading tornado data...../data/20170119/tornado/Pac_p5km.Vr12.csv
->Done
>>Reading tornado data...../data/20170119/tornado/Pac_p5km.Vr12.quas52.csv
->Done
>>Statistics for number of tornadoe...
->Done
>>Statistics for parameters of tornadoe...
->Done
---end---
End -> 0
Run again -> 1
>
```

設定ファイルの読み込み結果

処理の結果
正常終了すると
Doneが表示される

最後まで終了すると end が出力され、
終了か再実行かの入力待ちとなる。

図 1.5.2 統計分析モジュール (NTOR-stat.exe) の実行結果

設定ファイル等に不備があると、図 1.5.3 に示すようなエラーが出力され、モジュールは途中停止する。途中停止した場合には、0+ENTER で終了させる。

エラーの原因としては、設定ファイルの記述ミスおよび漏れ、サブフォルダの作成忘れ等や、設定ファイルや竜巻データファイルを他のアプリケーションで開いていてアクセスできない場合などが考えられる。

また、予期せぬエラーが生じた場合には、コマンドプロンプト自体が停止して画面から消える。この場合は、設定内容等を確認し、エラーを除去してから再度実行を試みる。

```
>>Reading configuration data...
syear= 1961
eyear= 2012
term= 51.5
Fyear diffinition err!
torfname=./data/20170119/tornado/Pac_p5km.Vr12.quas52.csv
otorfname=./data/20170119/tornado/Pac_p5km.Vr12.csv
tnumfname=./result/20170119/stat/20170119-tnum.csv
statfname=./result/20170119/stat/20170119-stat.csv
fvel=, 25.0, 41.5, 60.0, 81.5,105.0,130.0
str_cir= 1
***ERROR!!***
Short of the setvalue : fyear
...stop
Press "0" to finish...
```

図 1.5.3 統計分析モジュール (NTOR-stat.exe) のエラー出力例
(fyear の設定に不備がある場合の例)

1.5.1.5 実行結果の確認

実行結果は、result フォルダ内の、conf-stat.txt で設定した場所に、年別竜巻発生個数解析結果ファイルおよび統計分析結果データファイルとして出力される。年別竜巻発生個数解析結果ファイルおよび統計分析結果データファイルの内容の一例を図 5.4、図 5.5 に示す。

年別竜巻発生個数解析結果ファイルには、設定ファイルで設定した各 F スケールの採用年に応じた竜巻の発生個数、年平均値、標準偏差が F スケール別に出力される。統計分析結果ファイルの竜巻発生個数の平均値、標準偏差は、年別竜巻発生個数解析結果ファイルの EXT2 の結果を用いている。

統計分析結果ファイルには、竜巻発生個数、風速、被害域幅、被害域長さの平均値および標準偏差と、風速、被害域幅、被害域長さのそれぞれの相関係数が出力される。なお、設定ファイルで対象構造物の形状を方形とした場合 (str_cir=0) にのみ、フーリエ級数近似曲線の 4 次までの係数も合わせて出力される。

	F0	F1	F2	F3	F4	F5	OBSCU	ALL
2007>	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
num	31	13	1	0	0	0	11	56
mean	5.64	2.36	0.18	0	0	0	2	10.18
stdev	4.11	2.06	0.43	0	0	0	3.3	6.28
1991>	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
num	48	78	21	1	0	0	16	164
mean	2.23	3.63	0.98	0.05	0	0	0.74	7.65
stdev	2.79	2.33	1.1	0.22	0	0	1.77	4.26
1961>	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
num	48	117	49	6	0	0	21	241
mean	0.93	2.27	0.95	0.12	0	0	0.41	4.68
stdev	2.09	2.14	1.08	0.32	0	0	1.25	3.99
EXT1>	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
num	291	187	49	6	0	0	103	636
mean	5.64	3.63	0.95	0.12	0	0	2	12.33
stdev	4.11	2.33	1.08	0.32	0	0	3.3	5.88
EXT2>	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
num	394	187	49	6	0	0	0	636
mean	7.65	3.63	0.95	0.12	0	0	0	12.33
stdev	4.11	2.33	1.08	0.32	0	0	0	5.88

図 1.5.4 年別竜巻発生個数解析結果ファイルの内容の例

(num : 合計発生個数 (個), mean : 年平均値 (個), stdev : 標準偏差 (個))

(OBSCU : F スケール不明, ALL : 全 F スケール)

(EXT1 : 設定した F スケール採用年を元に計算した全期間の結果)

(EXT2 : EXT1 について, F スケール不明 (OBSCU) を F0 に含めた結果)

	num	vel	wid	len
mean	12.35	33.08	88.3	2192
stdev	5.88	11.81	131.7	3356
	v-w	v-l	w-l	
corre	0.415	0.473	0.29	
	fou_A	fou_B		
0	0.3183	0		
1	-0.001	0.0015		
2	0.0005	0.0012		
3	0.0006	0.0001		
4	0	0		

図 1.5.5 統計分析結果データファイルの内容の例

(num : 竜巻発生個数 (個), vel : 風速 (m/s), wid : 被害域幅 (m), len : 被害域長さ (m))

(v-w : 風速-被害域幅, v-l : 風速-被害域長さ, w-l : 被害域幅-被害域長さ)

(mean : 平均値, stdev : 標準偏差, corre : 相関係数)

(fou_A, fou_B : フーリエ級数近似曲線の係数)

1.5.2 竜巻ハザードモジュールの実行手順

実行手順の主な流れを以下に示す。

- 1)統計分析結果データファイルの準備と配置
- 2)設定ファイルの編集
- 3)フォルダの準備（必要な場合）
- 4)モジュールの実行
- 5)実行結果の確認

1.5.2.1 統計分析結果データファイルの準備と配置

竜巻ハザードモジュールに入力するための統計分析結果データファイルを準備する。統計分析モジュール実行後に得られるファイルを使用する場合は、この準備は不要である。統計分析モジュール実行後に得られるファイル以外の統計値を使用する場合は、サンプルファイルとして `sample-stat.csv` および `sample-stat-cir.csv` が `result` フォルダ直下にあるので、[図 1.5.5](#) を参考に編集し、`result` フォルダに配置する。任意のサブフォルダ（フォルダ名は英数字のみ）を作成し、その中に配置しても構わない。

1.5.2.2 設定ファイルの編集

竜巻ハザードモジュール用設定ファイル (`conf-hazd.txt`) を編集する。設定ファイルは `conf` フォルダの中にある。設定値の説明を [表 1.5.3](#) に示す。また、設定ファイルの設定例を [図 1.5.6](#) に示す。なお、#がついている行はコメント行であり、編集してはいけない。

表 1.5.3 竜巻ハザードモジュール用設定ファイル (conf-hazd.txt) の設定値

設定 パラメータ名	パラメータの 説明	設定形式	備考
statfname	統計分析結果データファイル名および配置場所	日本語を含まない文字列	統計分析結果データのファイル名と、ファイルを配置している場所の <u>result フォルダ</u> 以下を文字列で指定する。 例) result フォルダの中に <code>tornado-stat</code> というサブフォルダをあらかじめ作成しておき、ファイル名を <code>tornadestat.csv</code> として配置したい場合は、 <code>statfname=tornado-stat/tornadestat.csv</code> とする。
hazdfname	竜巻風速超過確率算出結果データファイル名および出力場所	日本語を含まない文字列	竜巻風速超過確率算出結果データのファイル名と、ファイルを出力させたい場所の <u>result フォルダ</u> 以下を文字列で指定する。 なお、サブフォルダを指定する場合には、 <u>あらかじめ手動でサブフォルダを作成する必要がある</u> (自動では作成されない)。 例) result フォルダの中に <code>tornado-hazd</code> というサブフォルダをあらかじめ作成しておき、ファイル名を <code>tornadehazd.csv</code> として出力したい場合は、 <code>hazdfname=tornado-hazd/tornadehazd.csv</code> とする。
darea	竜巻検討エリアの面積 (m ²)	整数	竜巻検討エリアの面積を整数で指定する。単位は m ² である。
str_a	対象構造物の寸法 A (m)	実数	対象構造物の寸法 (A, B) のうち、A の寸法 (図 1.1.2 参照) を実数で指定する。円形構造物の場合は直径を指定する。
str_b	対象構造物の寸法 B (m)	実数	対象構造物の寸法 (A, B) のうち、B の寸法 (図 1.1.2 参照) を実数で指定する。円形構造物の場合は直径を指定する。

表 1.5.3 (続) 竜巻ハザードモジュール用設定ファイル (conf-hazd.txt) の設定値

設定 パラメータ名	パラメータの 説明	設定形式	備考
str_ab	対象構造物の面積 (m ²)	実数	対象構造物寸法 A, B に応じた, 対象構造物の面積を実数で指定する。 例) 円形構造物で str_a=str_b=300 であれば, str_ab= $\pi \times 150^2 \doteq 70685.8$ とする。
str_cir	対象構造物の形状	0 または 1 (整数)	対象構造物の形状を指定する。 円形構造物の場合⇒1 を指定する。 方形構造物の場合⇒0 を指定する。
ftype	竜巻発生個数の確率モデル	1 または 2 (整数)	竜巻発生個数の確率モデルを, 以下の二つから選択して指定しする。 1⇒ポワソン分布 2⇒ポリヤ分布
intmax_torvel	風速の積分の上限値	整数	風速の積分の上限値を整数で指定する。
intmax_dlength	被害域長さの積分の上限値	整数	被害域長さの積分の上限値を整数で指定する。
intmax_dwidth	被害域幅の積分の上限値	整数	被害域幅の積分の上限値を整数で指定する。
intstep	積分回数	整数	積分回数を整数で指定する。 回数が多いほど計算精度が上がりますが、計算時間を要します。 積分回数の目安については, 1.7 節を参照。
model_exp	式 1.9 のべき乗	実数	式 1.9 のべき乗を実数で指定する。 例) 1/1.6 であれば, 0.625 を指定する。
minvw	式 9 の V_w	実数	式 9 の V_w の値を実数で指定する。

```

#-----#
# statfname      : 統計解析結果データファイル名 (resultフォルダ以下を指定)
# hazdfname     : 竜巻風速算出結果データファイル名 (resultフォルダ以下を指定)
# darea         : 竜巻検討エリアの面積 (m2) (整数)
# str_a         : 対象構造物の寸法 (m) (実数)
# str_b         : 対象構造物の寸法 (m) (実数)
# str_ab        : 対象構造物の面積 (m2) (実数)
# str_cir       : 対象構造物の形状 (0->角、1->円) (整数)
# ftype         : 竜巻発生個数の確率モデル (1->ポワソン分布、2->ポリヤ分布) (整数)
# intmax_torvel : 風速の積分上限値 (m/s) (整数)
# intmax_dlength : 被害長さの積分上限値 (m) (整数)
# intmax_dwidth  : 被害幅の積分上限値 (m) (整数)
# intstep       : 積分回数 (回) . . . 多い方が精度高いが計算時間要する (整数)
# model_exp     :  $\Psi(V)$ を求める際のべき指数 (実数)
# minvw        :  $\Psi(V)$ を求める際の被害域幅内の最小竜巻風速 (m/s) (実数)
#-----#

statfname=20170119/stat/20170119-stat.csv
hazdfname=20170119/hazd/20170119-hazd.dat
darea=4056000000
str_a=300.0
str_b=300.0
str_ab=70685.8
str_cir=1
ftype=2
intmax_torvel=140
intmax_dlength=100000
intmax_dwidth=4000
intstep=50
model_exp=0.625
minvw=25.0
[ESC]

```

図 1.5.6 竜巻ハザードモジュール用設定ファイル (conf-hazd.txt) の設定例

1.5.2.3 フォルダの準備

2)の設定ファイルで、ファイルの配置にサブフォルダを指定した場合は、必ず事前にサブフォルダを作成しておくこと。サブフォルダが存在しない場合、4)のモジュール実行時にエラーが出力され、モジュールが途中停止する。

1.5.2.4 モジュールの実行

NTOR-hazd.exe をダブルクリックすると、モジュールが実行されてコマンドプロンプトが開く。図 1.5.7 に示すような結果が出力され、計算の進捗に応じて「*」が出力される（積分回数が多い場合には、計算に時間を要する）。計算が正常に終了すると図 1.5.8 に示す表示になり、超過確率 10^{-5} の竜巻最大風速 VB2 が画面に出力されるとともに、指定した場所に竜巻風速超過確率算出結果ファイルが出力される。0+ENTER を入力するとモジュールが終了し、1+ENTER を入力するとモジュールが再度実行される。

エラーがある場合の挙動は統計分析モジュールと同じである。対処方法についても同様に、統計分析モジュールの項目を参照のこと。

```

>>Reading configuration data...
statfname=../result/20170119/stat/20170119-stat.csv
hazdfname=../result/20170119/hazd/20170119-hazd.dat
darea= 40560000000
str_a= 300.
str_b= 300.
str_ab= 70685.8
str_cir= 1
ftype= 2
intmax_torvel= 140
intmax_dlength= 100000
intmax_dwidth= 4000
intstep= 50
model_exp 0.625
minvw= 25.
->Done
>>Reading statistics data...../result/20170119/stat/20170119-stat.csv
>>Calculating for first item...
*****

```

設定ファイルの読み込み結果

計算の進捗状況

図 1.5.7 竜巻ハザードモジュール (NTOR-hazd.exe) の実行結果 (計算途中)

```

>>Reading configuration data...
statfname=../result/20170119/stat/20170119-stat.csv
hazdfname=../result/20170119/hazd/20170119-hazd.dat
darea= 40560000000
str_a= 300.
str_b= 300.
str_ab= 70685.8
str_cir= 1
ftype= 2
intmax_torvel= 140
intmax_dlength= 100000
intmax_dwidth= 4000
intstep= 50
model_exp 0.625
minvw= 25.
->Done
->Done
>>Reading statistics data...../result/20170119/stat/20170119-stat.csv
>>Calculating for first item...
***** ->Done
>>Calculating for second item...
***** ->Done
>>Calculating for third item...
***** ->Done
>>Calculating for fourth item...
***** ->Done
//////////
VB2= 71 m/s
//////////
---end---
End -> 0
Run again -> 1

```

超過確率 10^{-5} の竜巻最大風速 VB2

最後まで終了すると end が出力され、終了か再実行かの入力待ちとなる。

図 1.5.8 竜巻ハザードモジュール (NTOR-hazd.exe) の実行結果 (計算終了)

1.5.2.5 実行結果の確認

実行結果は、result フォルダ内の、conf-hazd.txt で設定した場所に、竜巻風速超過確率算出結果ファイルとして出力される。竜巻風速超過確率算出結果ファイルの内容の一例を図 1.5.9 に示す。1 列目に風速が、2 列目に超過確率がカンマ区切りで出力される。図 1.5.8 のように画面に出力される超過確率 10^{-5} の風速 VB2 は、2 列目の超過確率が 10^{-5} を初めて下回ったときの風速で定めている。

1	6.56E-04
2	4.86E-04
3	4.16E-04
4	3.76E-04
5	3.49E-04
6	3.30E-04
7	3.16E-04
8	3.04E-04
9	2.95E-04
10	2.87E-04
11	2.80E-04
12	2.75E-04
13	2.69E-04
14	2.65E-04
15	2.61E-04
16	2.57E-04
17	2.53E-04
18	2.49E-04
19	2.45E-04
20	2.41E-04
21	2.37E-04
22	2.32E-04
23	2.27E-04
24	2.22E-04
25	2.17E-04
26	2.11E-04
27	2.05E-04
28	1.98E-04
29	1.91E-04
30	1.84E-04
31	1.77E-04
32	1.70E-04

図 1.5.9 竜巻風速超過確率算出結果データファイルの内容の一例
(1 列目：風速 (m/s)，2 列目：超過確率)

1.6 竜巻風速ハザード解析コードの計算結果の検証

1.6.1 対象構造物が円形である場合の検証

解析コードの計算結果の検証のために、文献[1.5]（以下、検証用文献）に記されている解析（CASE1）を、解析コードを用いて同様に行い、同じ結果が得られるかを確認した。

検証用文献の CASE1 の解析条件および解析結果を表 1.6.1 に示す。

表 1.6.1 検証用文献の CASE1 の解析条件および解析結果

解析期間	1961 年～2012 年 6 月（51.5 年間）	
竜巻検討エリア	茨城県から沖縄県にかけての太平洋沿岸， 海岸線から陸側 5km 以内	
竜巻検討エリアの面積	約 40560km ²	
F スケールと風速の関係	各 F スケールの風速範囲の中央値	
竜巻データの加工方法	検証用文献を参照のこと	
対象構造物の形状	円形	
対象構造物の寸法	直径 300m	
竜巻発生数の確率分布	ポリヤ分布	
積分の上限值	風速：140m/s 被害域幅：対数化した被害域幅の標準偏差の 4 倍 被害域長さ：対数化した被害域長さの標準偏差の 4 倍	
W(V ₀)の式	$W(V_0) = \left(\frac{25}{V_0}\right)^{1/1.6} w$	
竜巻年発生個数	平均値（個）	12.35
	標準偏差（個）	5.88
最大風速	平均値(m/s)	33.08
	標準偏差(m/s)	11.81
被害域幅	平均値(m)	88.3
	標準偏差(m)	131.7
被害域長さ	平均値(m)	2192
	標準偏差(m)	3356
相関係数	風速-被害域幅	0.415
	風速-被害域長さ	0.473
	被害域幅-被害域長さ	0.290
年超過確率 10 ⁻⁵ の竜巻最大風速(m/s)	70.7	

統計分析モジュールの計算結果を図 1.6.1 に示す。表 1.6.1 に示す平均値，標準偏差，相関係数と同じ値が得られていることが確認できる。また，図 1.6.2 に，竜巻ハザードモジュールの計算結果を示す。年超過確率 10^{-5} の竜巻最大風速は 71m/s（整数で出力される）となり，表 1.6.1 に示す竜巻最大風速と対応した。

	num	vel	wid	len
mean	12.35	33.08	88.3	2192
stdev	5.88	11.81	131.7	3356
	v-w	v-l	w-l	
corre	0.415	0.473	0.29	

図 1.6.1 統計分析モジュールの計算結果

(num : 竜巻発生個数 (個), vel : 風速 (m/s), wid : 被害域幅 (m), len : 被害域長さ (m))

(v-w : 風速-被害域幅, v-l : 風速-被害域長さ, w-l : 被害域幅-被害域長さ)

(mean : 平均値, stdev : 標準偏差, corre : 相関係数)

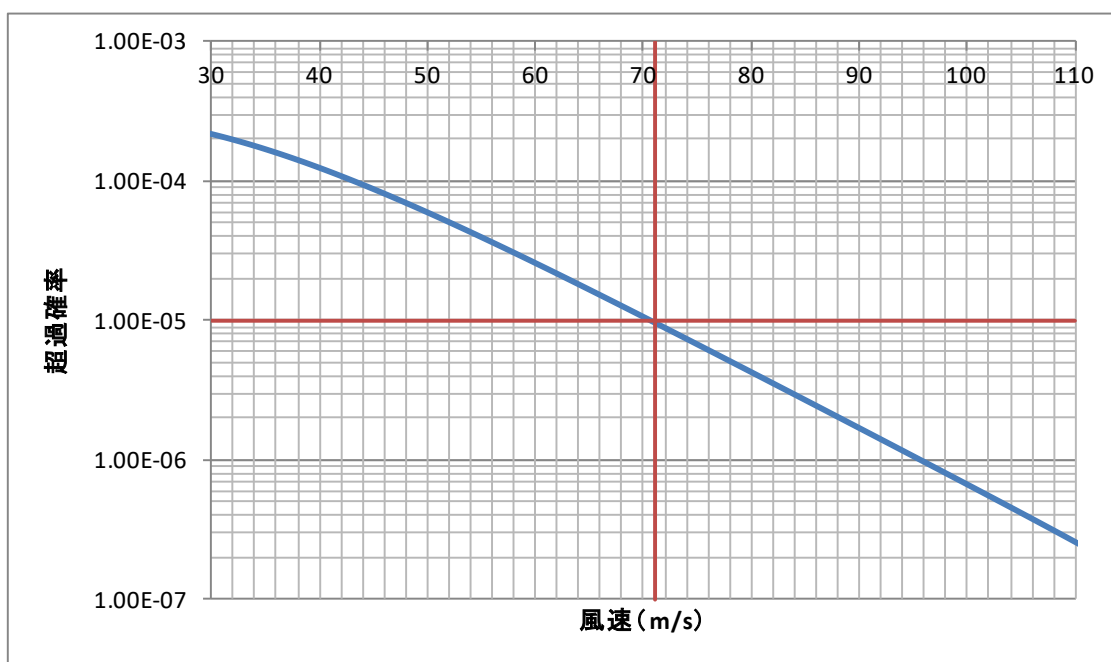


図 1.6.2 竜巻ハザードモジュールの計算結果

(赤線 : 風速 71m/s と確率 10^{-5} の線)

1.6.2 対象構造物が方形である場合の検証

検証用文献においては、対象構造物を円として解析を行っている。そこで、対象構造物の形状が方形の場合についての検証結果について示す。対象構造物が方形の場合、竜巻移動方向を考慮する必要がある。ここでは、以下のような方法で検証を行った。

6.1 項で用いたデータに対し、竜巻の移動方向を①すべて0（北）とした場合と、②一様分布とした場合の2ケースについて、表 6.1 に示す竜巻最大風速と同じ値が算出されるよう、対象構造物の寸法を調整し、検証を行った。

①竜巻の移動方向をすべて0（北）とした場合

対象構造物の寸法は、縦横 300m の正方形とする。ただし面積については、 $300 \times 300 = 90000\text{m}^2$ ではなく、直径 300m の円と同じ約 70686m^2 とした。統計分析モジュールを用いて竜巻移動方向の確率分布をフーリエ級数近似した結果を図 6.3 に示す。これをみると、近似曲線の近似精度が低いことが確認でき、このことが影響してか、竜巻ハザードモジュールの計算結果は 72m/s であり、表 6.1 と近い値が得られたものの、 1m/s 程度の差が生じた。

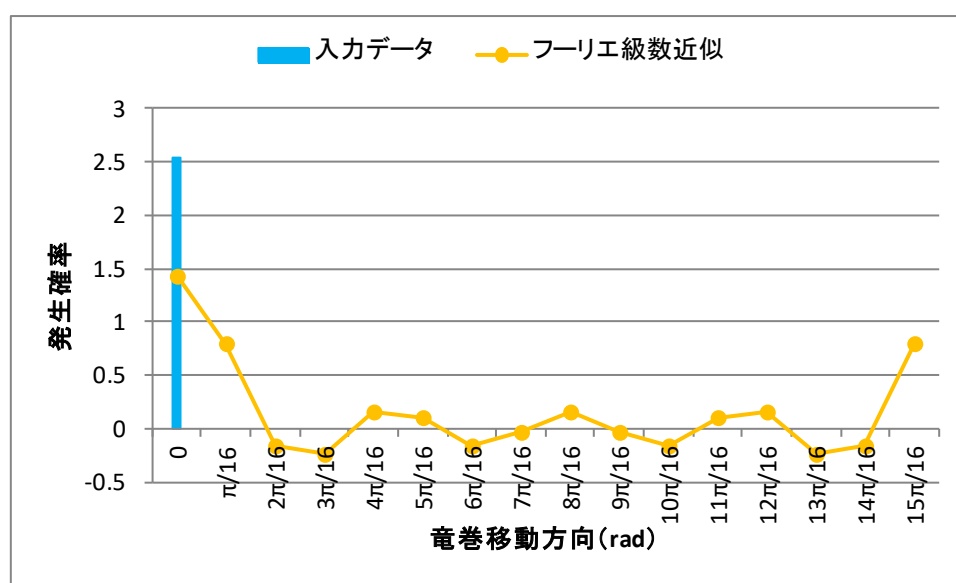


図 1.6.3 竜巻移動方向の発生確率のフーリエ級数近似（移動方向：すべて0）

②竜巻の移動方向を一様分布とした場合

竜巻の移動方向を一様分布とした場合、移動方向の発生確率は全移動方向において $1/2\pi$ となる。このときの、一辺の長さが $A(\text{m})$ の正方形構造物の被害面積の期待値は、 $4A/\pi$ となるが、この値を直径 $D(\text{m})$ の円形構造物のときの被害面積の期待値 D と同じ値（すなわち、 $A = \pi D/4$ ）にし、対象構造物の面積も同じ値（約 70686m^2 ）にすれば、理論上、竜巻ハザードモジュールの計算結果が表 1.6.1 で示す竜巻最大風速と同じ値になる。表 1.6.1 より、

D=300m であるから、 $A=B=\pi D/4 \approx 236\text{m}$ とした。

図 1.6.4 は、図 1.6.3 と同様に、移動方向の発生確率のフーリエ級数近似を行った結果であるが、近似精度が高いことが確認できる。そして、この結果を用いて竜巻ハザードモデルで竜巻最大風速を算出した結果、表 1.6.1 の値に対応する 71m/s という計算結果を得た。

以上より、方形構造物に対する計算についても、正常に計算が行われていることが確認できた。

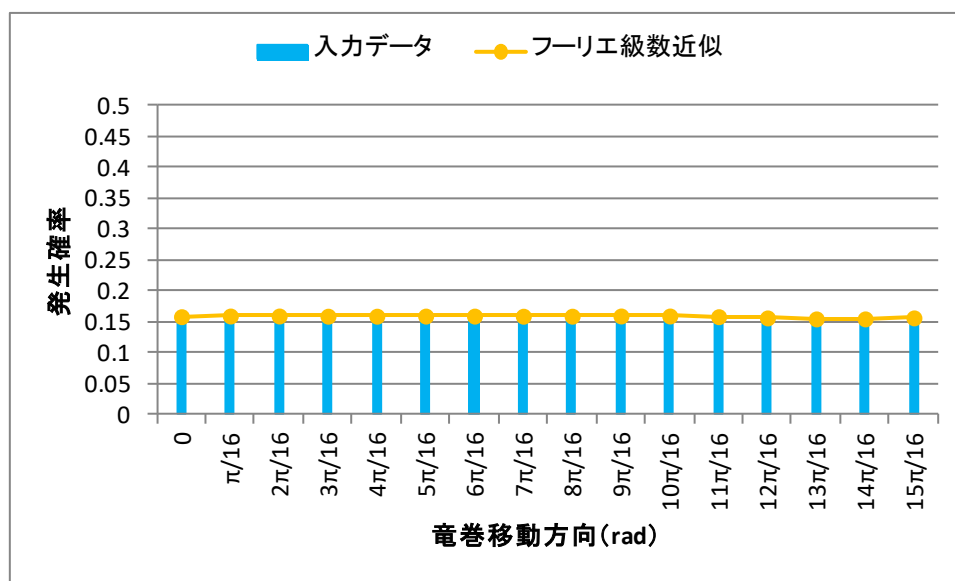


図 1.6.4 竜巻移動方向の発生確率のフーリエ級数近似（移動方向：一様分布）

1.7 積分回数について

竜巻ハザードモジュールの計算において、設定ファイルで指定する積分回数が少なすぎると、計算結果の精度が落ちてしまうため、積分回数は桁落ち誤差が発生しない程度に十分に大きく設定する必要がある。計算機環境にもよるが、大きくしすぎると非現実的に計算時間が長くなる。

図 1.7.1 に、表 1.6.1 に示す計算条件における、積分回数と竜巻最大風速の算出結果の関係を示す。正しい算出結果である 71m/s に達するには、50 回以上の積分回数を設定する必要があることが示されている。

以上の計算結果の漸近的傾向を目安に積分回数を設定する必要がある。

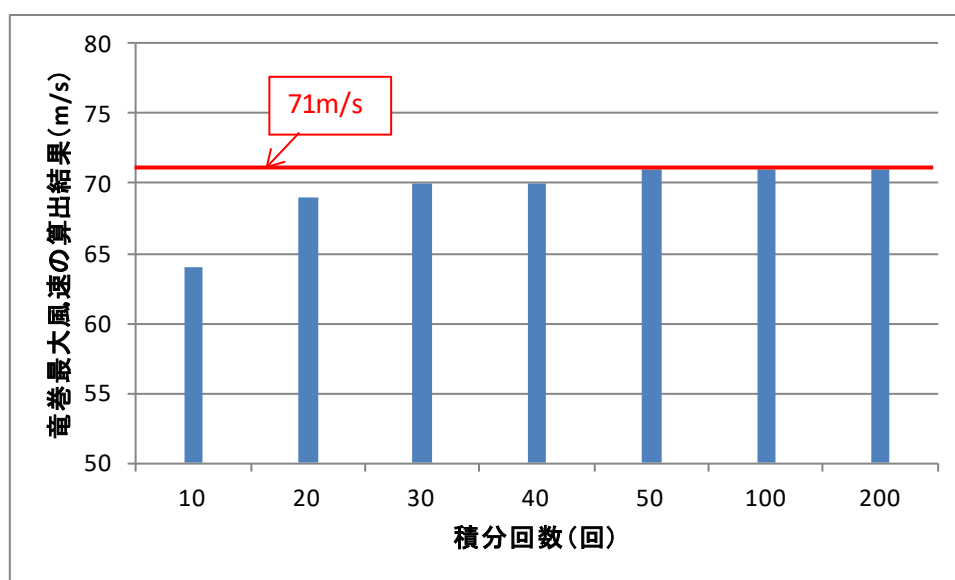


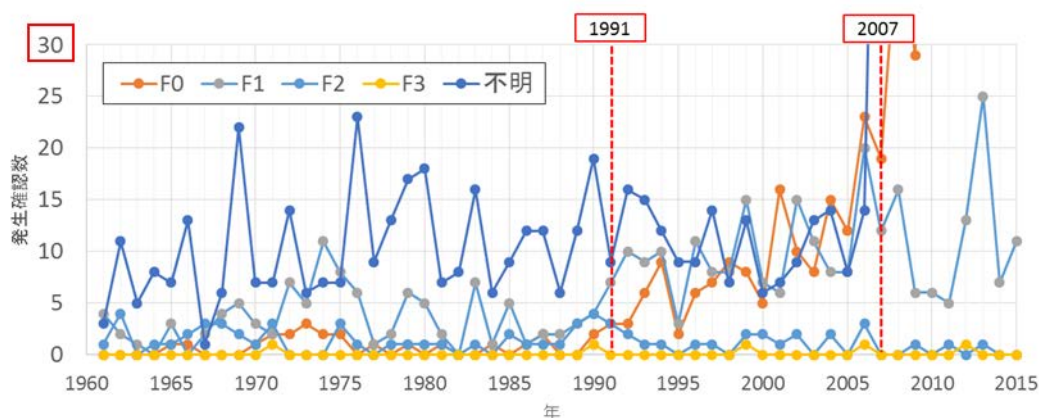
図 1.7.1 積分回数と竜巻最大風速の算出結果の関係

付録 1.1 竜巻データベース使用上の留意点

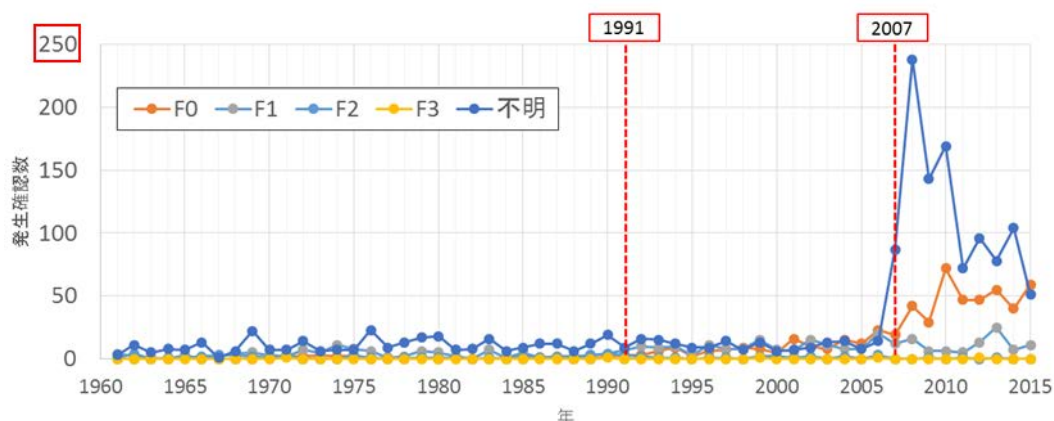
竜巻による影響評価にて竜巻の発生状況の参考となる気象庁の竜巻データベース（以下、竜巻 DB）だが、参考とする上でいくつか注意しなければならない点がある。付録 1.1 では「竜巻データベースの歴史的不均一性」、「F スケール別の不明および不整合なデータの割合」、「水上竜巻に着目した発生地点区分別の分析」について竜巻 DB の状況整理を行い、使用上の留意点を述べる。

1. 竜巻データベースの歴史的不均一性

整理対象は 1961 年から 2015 年の 55 年間分の竜巻 DB（データ総数 2531 個）である。付図 1.1.1 に年別の各 F スケールの竜巻の発生確認数のグラフを示す。付図 1.1.1 (a) と付図 1.1.1 (b) は同じデータをもとにしたグラフだが、縦軸の発生確認数の範囲を変えて作図した。竜



(a) 発生確認数 0~30



(b) 発生確認数 0~250

付図 1.1.1 年別の各 F スケールの竜巻の発生確認数

巻 DB には F2～3 など F スケールに幅をもたせ表記されているデータもあり、その場合は F スケールの下限値でデータの整理を行っている。付図 1.1.1 (a) および付図 1.1.1 (b) を見るとそれぞれ、1991 年と 2007 年を境に発生確認数の変化がみられる。付図 1.1.1 (a) では 1991 年を境に F1 の発生確認数が増加し、付図 1.1.1 (b) では 2007 年を境に F0 および F スケール不明のデータが増加している。気象庁では 1991 年と 2007 年に竜巻等突風の調査体制を強化^(補 1.1) しており、これに伴って統計方法も各期間で異なっているためである。この統計方法が変化した 1991 年と 2007 年を境にした観測期間別の各 F スケールの竜巻の年平均発生確認数を付表 1.1.1 に示す。この年平均発生確認数は、それぞれの観測期間の竜巻の発生確認数を観測期間の年数で割ったものである。付表 1.1.1 を見ると F2, F3 の竜巻の年平均発生確認数は観測期間によって大きな差は見られないが、F スケール不明と F0 の竜巻は 2007 年以降に急激に増え、F1 の竜巻は 1991 年以降に増加している。そのため特に F スケール不明と F0, F1 の竜巻を統計分析する場合は、この歴史的不均一性について留意する必要がある。

付表 1.1.1 観測期間別の各 F スケールの竜巻の年平均発生確認数

年平均発生確認数 (個/年)	Fスケール				
	F0	F1	F2	F3	不明
1961-1990	0.77	3.47	1.40	0.07	3.46
1991-2006	8.88	9.75	1.31	0.13	3.65
2007-2015	45.56	11.22	0.33	0.11	38.44
全期間	10.45	6.56	1.20	0.09	6.93

2. F スケール別の不明および不整合なデータの割合

竜巻 DB に含まれる竜巻にはパラメータが不明と記載されているものも多く、また一部パラメータには論理的に不整合なもの（発生と消滅の年月日時分が同じなどパラメータ間で矛盾があるデータ）もある。それらの割合を明らかにするため、F スケール別に以下のパラメータの不明割合および不整合なデータの整理を行った。

- (ア) 発生、消滅の年月日時分
- (イ) 発生、消滅の緯度経度
- (ウ) 被害域長さ、被害域幅
- (エ) 移動方向

付表 1.2.1 にパラメータ別の不明および不整合データの割合を整理したものを示す。発生、消滅の年月日時分や発生、消滅の緯度経度のパラメータでは、「時」までの情報はあるが「分」が不明といったものがあるが、それらのデータも不明のデータとして扱った。

付表 1.2.1 の右端の全体における不明割合を見ていくと、発生の年月日時分が不明なデータは少なく全体の 1%であったが、消滅の年月日時分や発生もしくは消滅地点が不明なものは全体の 30%前後を占めた。被害域幅や被害域長さ、移動方向のパラメータについては半数以上が不明と、不明割合が大きかった。F スケール別にみると、F スケールが小さい、または F スケール不明なものほど不明なデータの割合が増加する傾向が多くのパラメータにおいてもみられた。特に被害域幅、被害域長さのパラメータで、F スケール不明のデータの 90%は不明となっており大きな割合を占める。

また不明ではないデータにおいても注意が必要であり、例えば発生と消滅の年月日時分が記載されているデータにおいても両者が同一と不整合なものもあり、これらは全体の 33%

付表 1.2.1 パラメータ別の不明および不整合データの割合

パラメータ		Fスケール	F0	F1	F2	F3	不明	全体
		総発生確認数	575	361	66	5	1524	2531
発生 、 消滅 年月 日時 分	発生の年月日時分が不明	個数	9	3	0	0	11	23
		割合	2%	1%	0%	0%	1%	1%
	消滅の年月日時分が不明	個数	158	83	6	0	531	778
		割合	27%	23%	9%	0%	35%	31%
	発生と消滅の年月日時分 が同一	個数	312	149	11	0	373	845
		割合	54%	41%	17%	0%	24%	33%
発生 、 消滅 地点	発生地点もしくは消滅地点が 不明	個数	129	56	1	0	607	793
		割合	22%	16%	2%	0%	40%	31%
	発生地点と消滅地点が 同一	個数	214	74	9	0	724	1021
		割合	37%	20%	14%	0%	48%	40%
被害 域 幅 、 長	被害域幅が不明	個数	115	76	14	0	1378	1583
		割合	20%	21%	21%	0%	90%	63%
	被害域長さが不明	個数	105	50	8	0	1378	1541
		割合	18%	14%	12%	0%	90%	61%
移動方向が不明		個数	370	121	10	0	1385	1886
		割合	64%	34%	15%	0%	91%	75%
いずれかに不明な パラメータを含むのもの		個数	459	313	59	0	1473	2304
		割合	80%	87%	89%	0%	97%	91%

を占めていた。発生、消滅の緯度経度のパラメータでは両者が同一のものは全体の 40%と、不明なデータとあわせると全体の 71%が発生、消滅の緯度経度の情報が不明もしくは不整合であった。

このように竜巻 DB では、データの大半が不明になっているパラメータもあり、特に F スケールが小さいもしくは F スケール不明のものは不明割合が大きく、十分なデータ数が確保できない場合がある。また不明ではないデータにおいてもパラメータ間で矛盾するものもあり、データの内容にも注意すべきである。

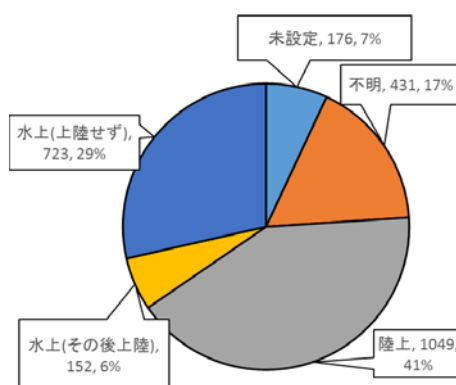
3. 水上竜巻に着目した発生地点区別の分析

竜巻 DB について発生地点区分、特に水上竜巻に着目しデータの整理を行った。発生地点区分は、未設定、不明、陸上、水上（その後上陸）と水上（上陸せず）の 5 種類である。付表 1.3.1 に F スケール別の各発生地点区分の発生確認数を示し、付図 1.3.1 は各発生地点区分の割合を示す。

付図 1.3.1 をみると、全データの内もっとも大きな割合を占めるのは陸上であり、その次に水上（上陸せず）が大きかった。この水上（上陸せず）は付表 1.3.1 の F スケール別の内訳をみるとほとんどが F スケール不明に分類された。付図 1.3.1 では水上（その後上陸）は全体の 6%と 5 種の発生地点区分でもっとも割合は小さかった。付表 1.3.1 の F スケール別

付表 1.3.1 F スケール別の各発生地点区分の発生確認数

発生地点区別	F0	F1	F2	F3	不明	合計
未設定	60	40	5	0	71	176
不明	12	7	1	0	411	431
陸上	454	261	41	5	288	1049
水上(その後上陸)	48	53	19	0	32	152
水上(上陸せず)	1	0	0	0	722	723



(発生地点区分、個数、全体での割合)

付図 1.3.1 各発生地点区分の割合

の内訳で見ると水上（その後上陸）はF0～F2、Fスケール不明に幅広く分類されていた。

先ほど不明割合を検討したパラメータ（発発生消滅の緯度経度および年月日時分、被害域幅および被害域長さ、移動方向）に対して不明や不整合なものをまとめて“不明”のデータとし、“不明”と“正常”の2つにデータを分け、発生地点区分別の整理を行った。付表 1.3.2 にパラメータ別の各発生地点区分の不明データ数を示す。右端の全項目では、発生消滅の緯度経度および年月日時分、被害域幅および被害域長さ、移動方向のすべてに不明データを含まないものを正常とした。発生地点区分が水上（上陸せず）のデータに着目すると、水上（上陸せず）のデータは他の発生地点区分のものとは比べても不明と分類されるものが占める割合が大きく、特に被害域幅長さで正常 19 個に対し不明 704 個とデータのほとんどが不明となっていた。発生地点区分が水上（その後上陸）のデータは水上（上陸せず）のものとは比べ正常に分類される割合が大きい。

このように発生地点区分が水上（上陸せず）の竜巻は全データの中でも二番目に大きな割合を占めるため竜巻最大風速のハザード曲線の作成する場合には考慮する必要があるが、ほとんどのデータが被害域幅および被害域長さは不明であり、統計分析する際に水上竜巻をどのように取り扱うかが問題である。

付表 1.3.2 パラメータ別の各発生地点区分の不明データ数

発生地点区分	発生および消滅 緯度経度		発生および消滅 年月日時分		被害域幅 および被害域長		移動方向		全項目	
	正常	不明	正常	不明	正常	不明	正常	不明	正常	不明
未設定	59	117	37	139	84	92	51	125	13	163
不明	0	431	12	419	12	419	1	430	0	431
陸上	402	647	258	791	711	338	394	655	156	893
水上(その後上陸)	115	37	77	75	103	49	135	17	52	100
水上(上陸せず)	141	582	524	199	19	704	274	449	6	717

(補 1.1) 気象庁：年別の発生確認数

<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/stats/annually.html> (2017年3月時点)

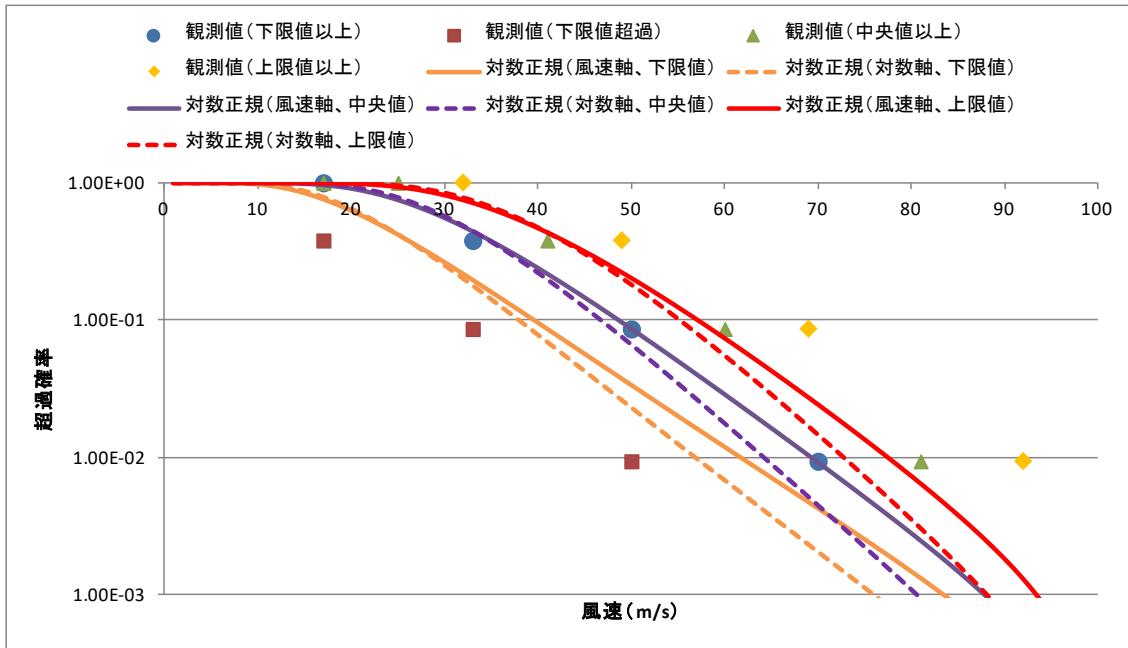
付録 1.2 F スケールと風速の関係について

竜巻 DB においては、各竜巻の F スケールが整理されているが、風速は示されていない。各 F スケールに対応する風速は付表 1.2.1 に示すとおり幅があるため、各 F スケールに対応する風速を定める方法には任意性がある。

付図 1.2.1 は、竜巻の風速と超過確率の関係を示したものである。プロットは観測値を、曲線は風速の超過確率を対数正規分布と仮定した場合の関係を示している。観測値については、各 F スケールに対応する風速を、付表 1.2.1 に示す各 F スケールに対応する風速幅の下限値以上、下限値超過、中央値以上、上限値以上の 4 つのケースについて示している。この 4 つのケースのうち、各 F スケール以上となる確率に相当するのは、下限値以上（青い丸プロット）としたケースである。対数正規分布を仮定した場合については、付表 1.2.1 に示す各 F スケールに対応する風速幅の下限値以上、中央値以上、上限値以上の 3 つのケースを、さらに、風速をそのまま用いる場合（風速軸）と、風速の対数を取った場合（対数軸）の 2 ケースを考え、合計で 6 ケースの関係を示している。下限値以上とした観測値の青い丸プロットに対応する対数正規分布は、風速軸の中央値であることがわかる。

付表 1.2.1 F スケールと風速範囲の関係

F スケール	風速範囲 (m/s)
F0	17～32
F1	33～49
F2	50～69
F3	70～92
F4	93～116
F5	117～142



付図 1. 2. 1 竜巻風速と超過確率の関係

付録 1.3 ArcGIS による特定エリア通過竜巻の抽出とエリア面積の算出

ESRI ジャパン株式会社の GIS ソフト「ArcGIS」を用いて、特定エリアを通過する竜巻の抽出および検討エリアの面積の算出を行う方法について、以下に示す。

(必要な環境)

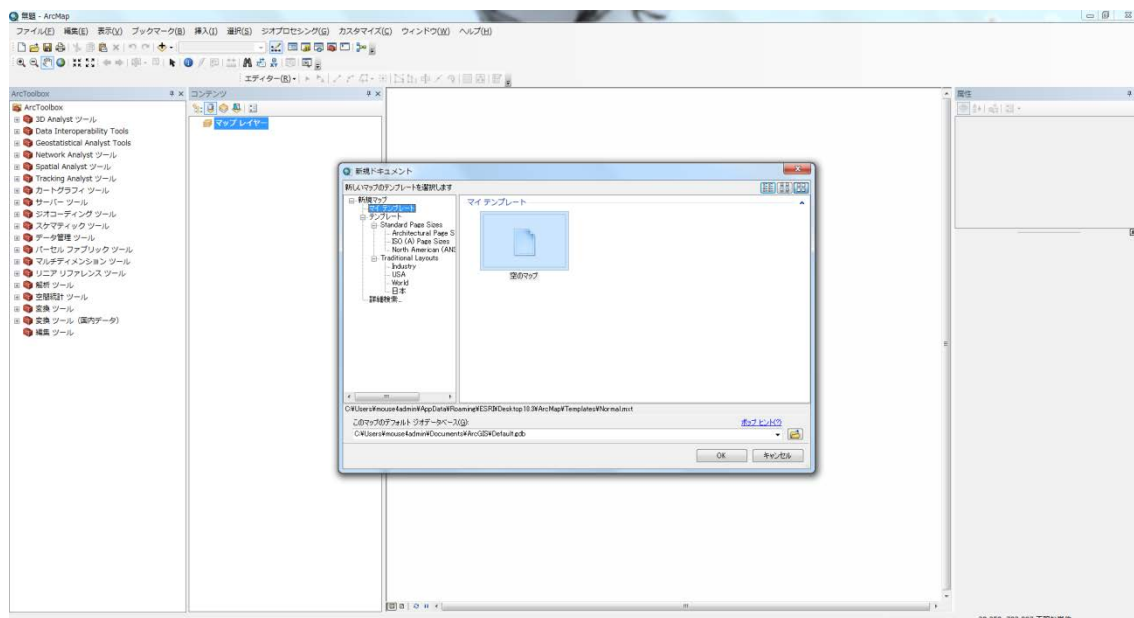
ArcGIS for Desktop Basic , バージョン 10.3.1 以上で、ジオメトリ変換ツール (Esri のサポートを受けていれば無償で追加インストールが可能) がインストールされていること

(注意)

NTOR¥ArcGIS フォルダの中に、本手順で示している各種サンプルデータを用意しているが、竜巻データについては、データの不完全性 (付録 1.1 参照) に対応したものではないので、使用する際はご注意ください。

①ArcMap を起動する。

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する。



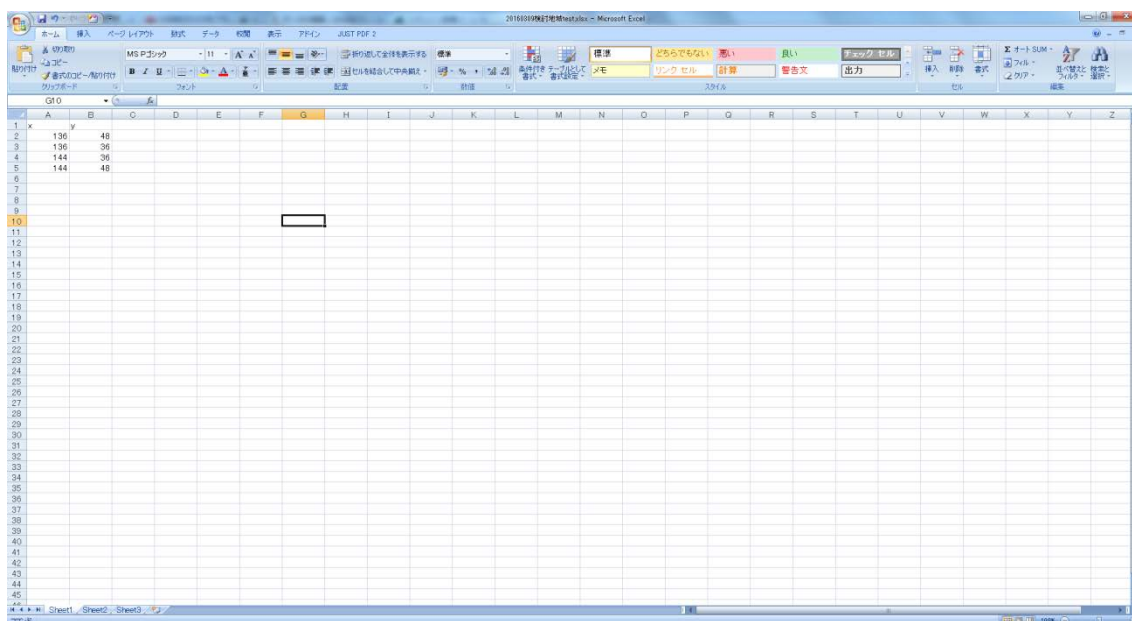
付図 1.3.1 空マップの作成

③ツールバーのファイル⇒データの追加⇒データの追加で、海岸線データ追加する (サンプルデータ : NTOR¥ArcGIS¥海岸線データ¥20160212shoreline_esri_polygon.shp)。

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する。

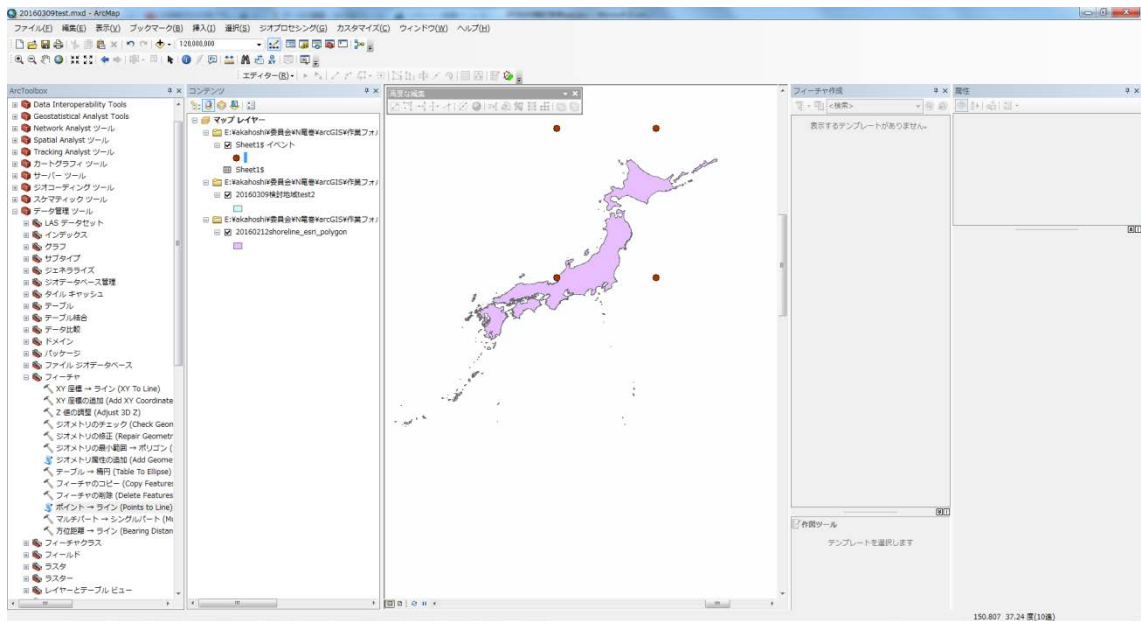
a) 緯度経度から追加作成する方法

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く。x,y などのヘッダを付けておく。



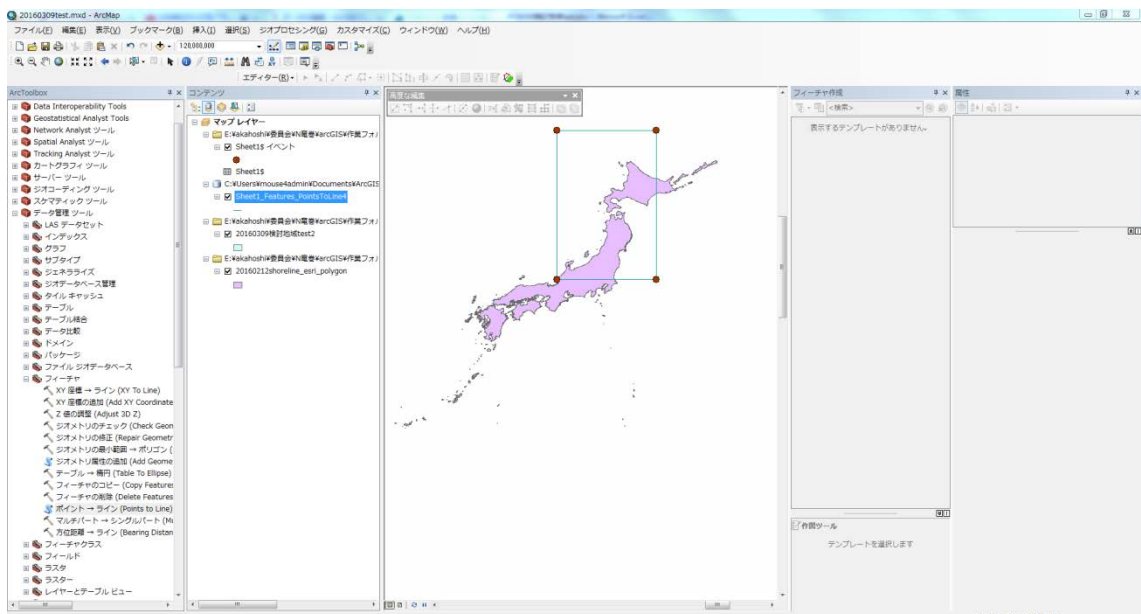
付図 1.3.3 エクセルを用いて緯度経度データの作成

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る。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る。



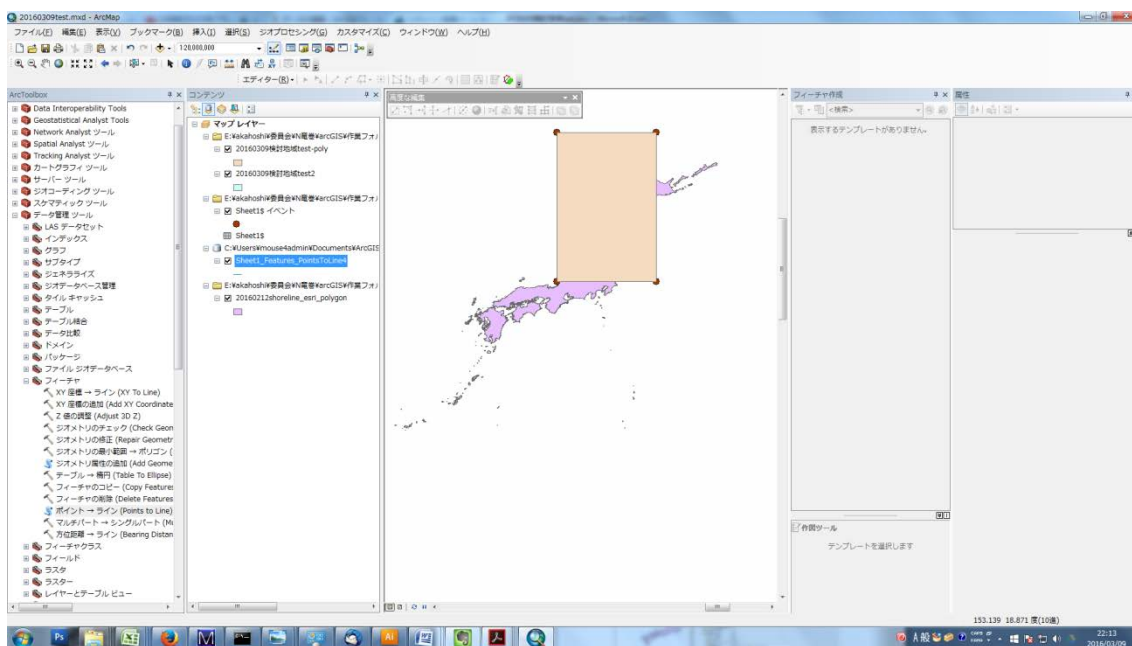
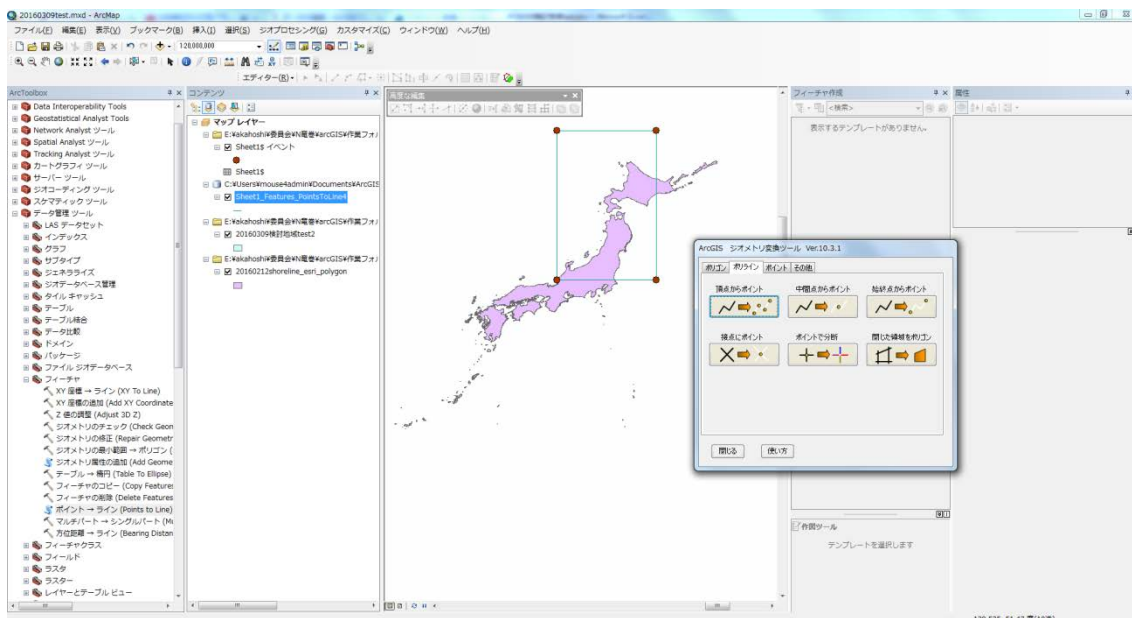
付図 1.3.4 緯度経度からポイントを作成

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る。「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进行指定、「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る。



付図 1.3.5 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る。

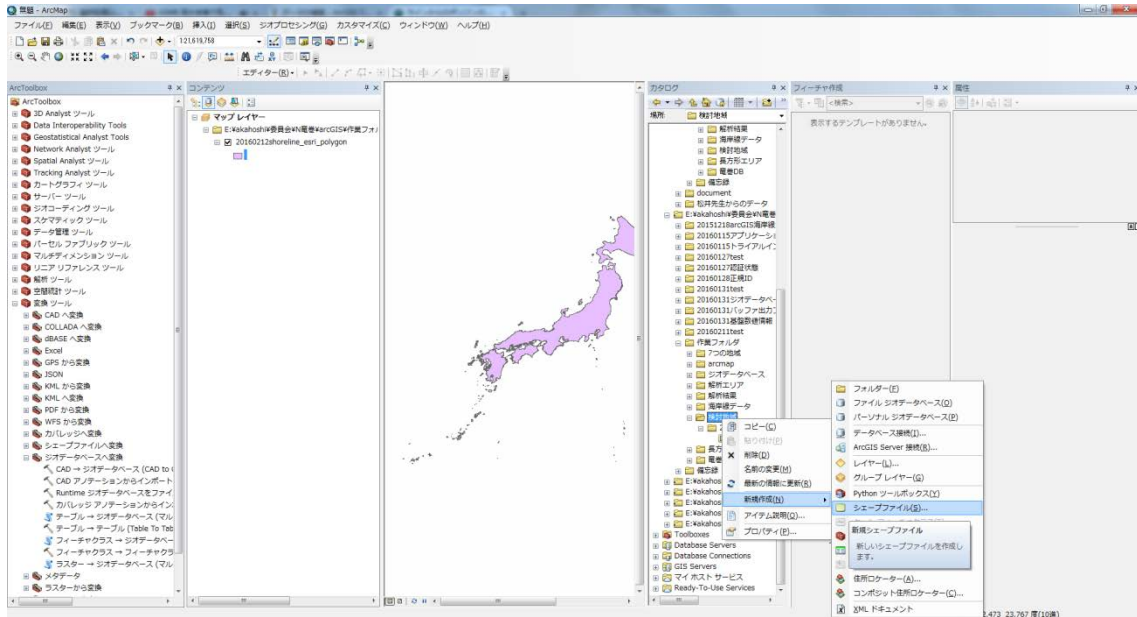


付図 1.3.6 ポリゴンの追加

v) 座標変換する。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 を選択する。

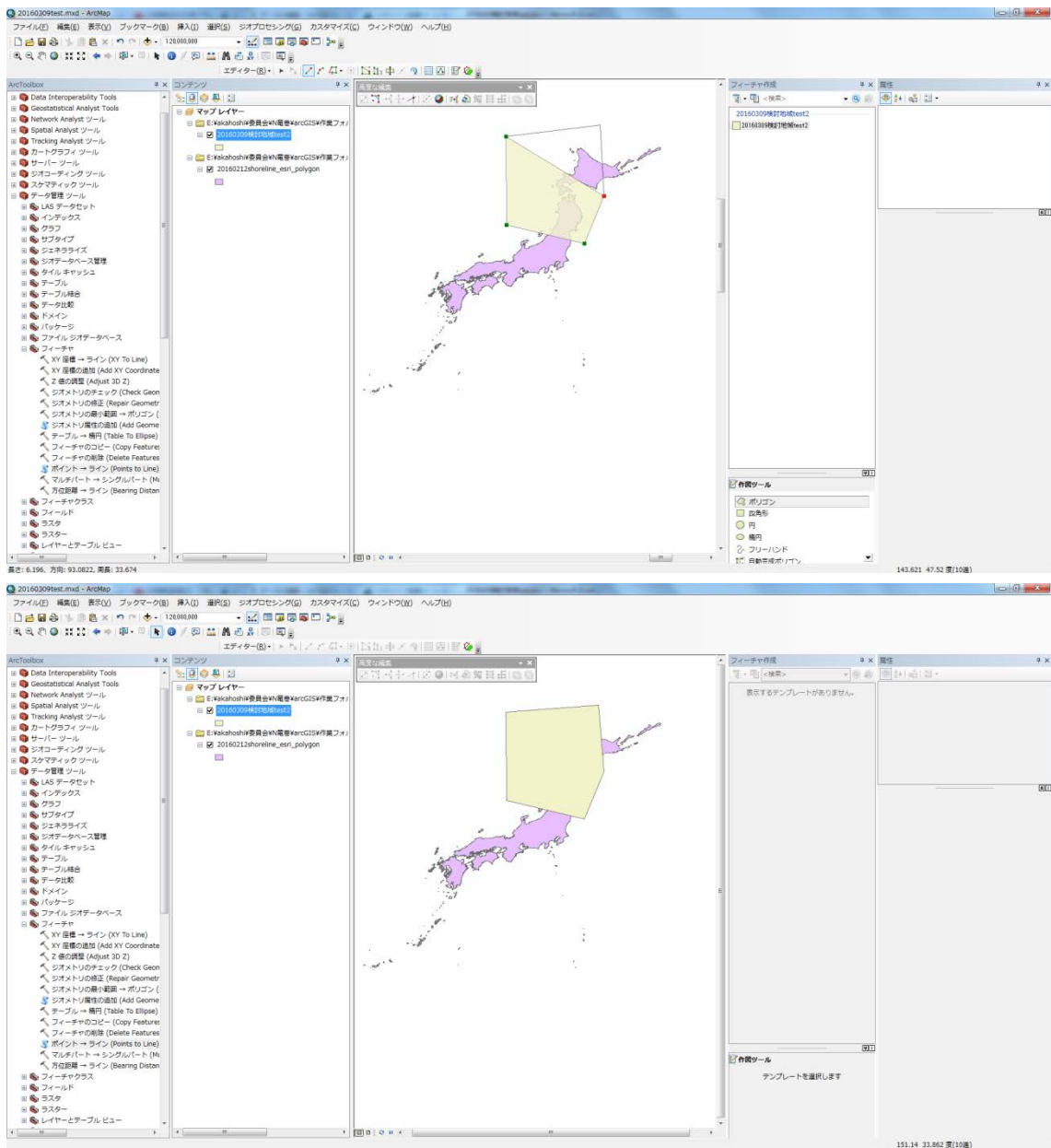
b) 手描きで追加作成する方法

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る。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」を選択する。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を選択する。



付図 1.3.7 シェープファイル（ポリゴン）の追加

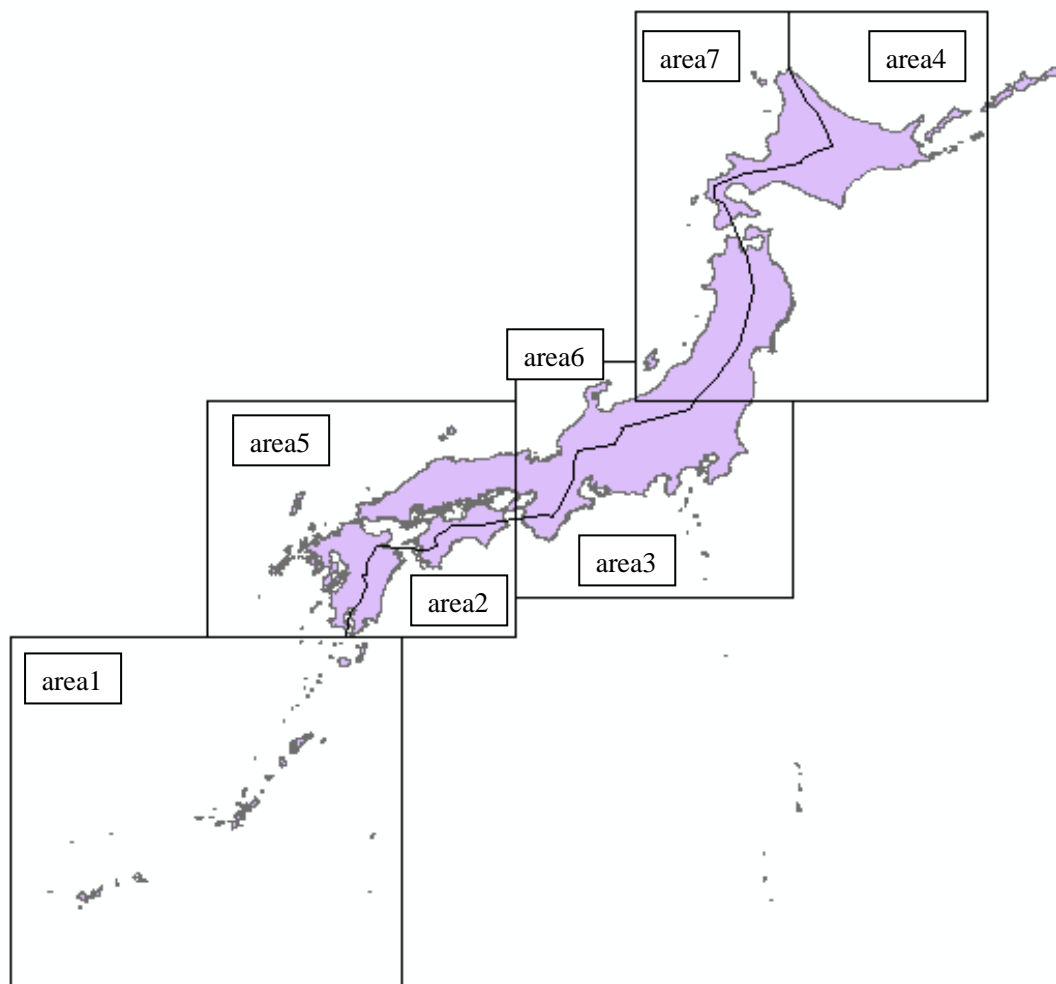
ii) ツールバーの「エディター」から「編集の開始」, i)で追加したフィーチャを選択して、フィーチャ作成ウィンドウから対象フィーチャを選択する。作図ツールでポリゴンを選択すると、手描きでポリゴンが追加できる状態になる。希望のポリゴンが描いたら、ダブルクリックしてポリゴンを確定する。「エディター」から「編集の終了」を選択して、編集内容を保存する。



付図 1.3.8 手書きでポリゴンを追加する

iii) a)-v)同様、座標変換する。

なお、「NTOR¥ArcGIS¥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がサンプルデータとして保存されている。

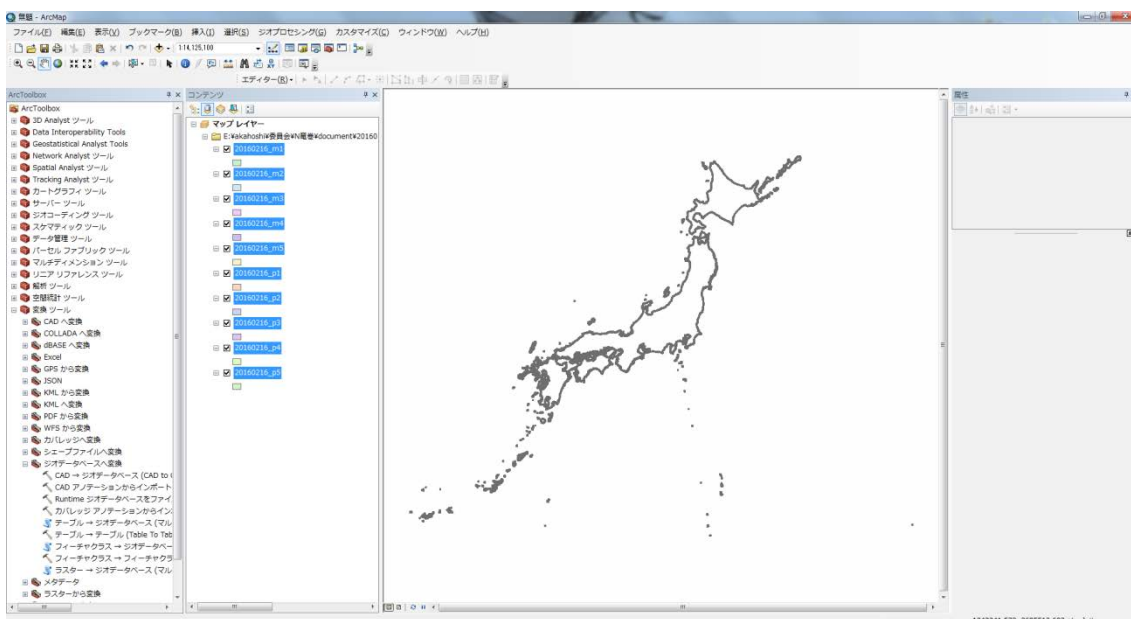


付図 1.3.9 「NTOR¥ArcGIS¥竜巻検討地域」に作成されている7つの地域

④海岸線のオフセットエリアを新たなマップに読み込む。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する。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む。サンプルデータは，「NTOR¥ArcGIS¥海岸線オフセットエリアデータ¥」にある。複数ファイルを選択しても問題ない。

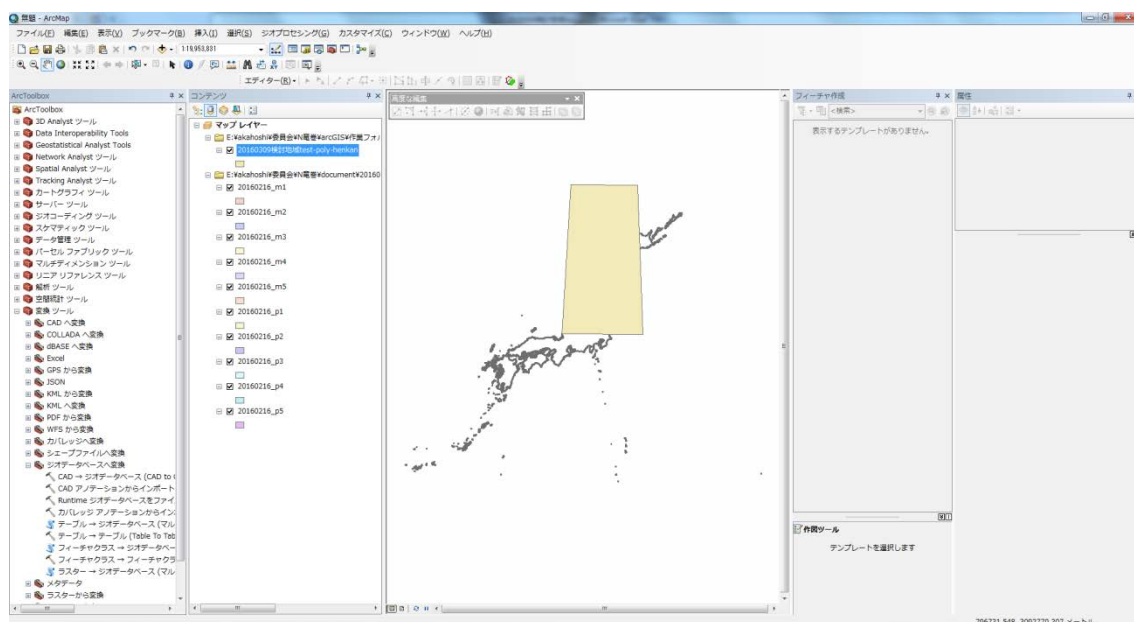
オフセットエリアは，以下の13種類が用意されている。

- ・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)



付図 1.3.10 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む。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する。※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る。



付図 1.3.11 竜巻検討地域の読み込み

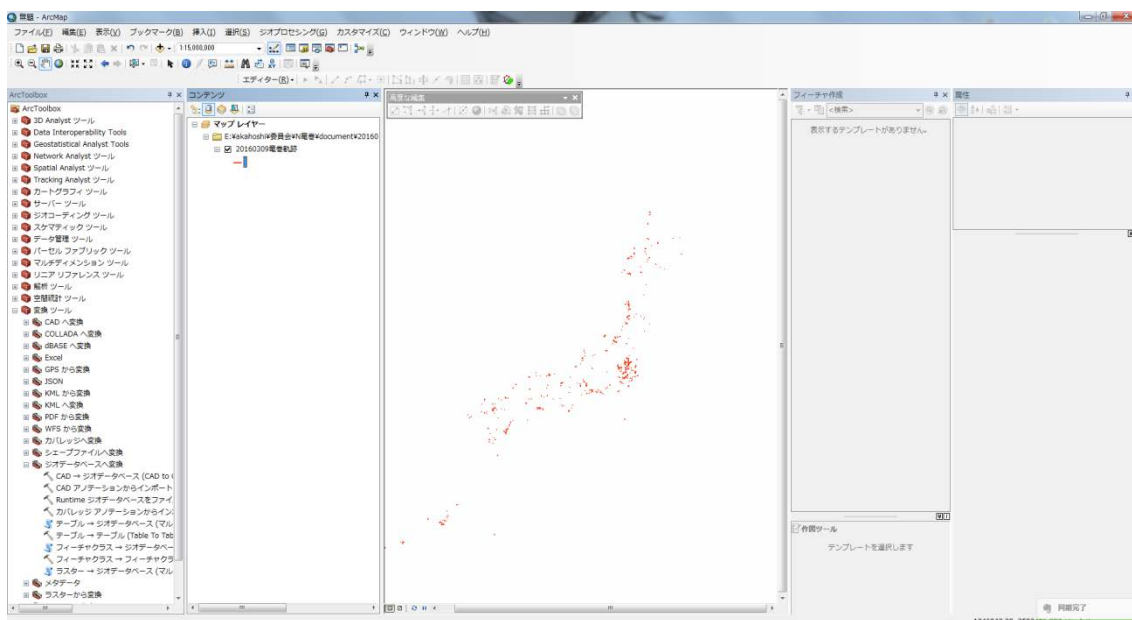
⑥ 竜巻検討地域に含まれるオフセットエリアを抽出する。ツールバーのジオプロセシング⇒インターセクトを選択する。入力フィーチャに、竜巻検討地域フィーチャと、オフセットエリアフィーチャを一つ指定して、出力フィーチャを任意に指定してOKをすると、竜巻検討地域に含まれるオフセットエリアが抽出される。

抽出されたフィーチャをシェープファイルとして保存する。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を選択する。

⑦竜巻の軌跡データを読み込む。

ファイル⇒新規作成から空マップを作成する。次にデータの追加から、竜巻の軌跡データを map に追加する。

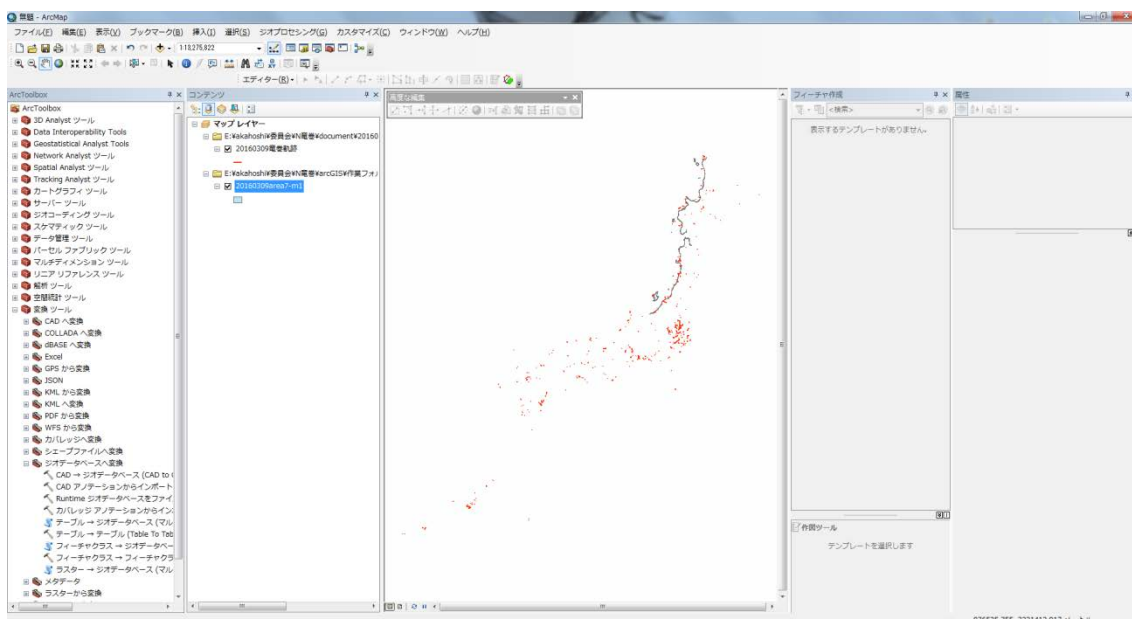
(サンプルデータ：NTOR¥ArcGIS¥竜巻データ¥20160315 竜巻軌跡.shp)



付図 1.3.12 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む。

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 に追加する。



付図 1.3.13 竜巻検討地域に含まれるオフセットエリアの追加

参考文献

- 1.1 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
- 1.2 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
- 1.3 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
- 1.4 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
- 1.5 平口博丸ら, 沿岸立地原子力発電所の竜巻風速ハザードモデル TOWLA の開発, 電力中央研究所報告, 平成 28 年 6 月

2. 竜巻飛来物解析コードの整備

2.1 飛散運動の計算方法

2.1.1 運動方程式

飛来物の運動は、竜巻状の渦の中にある物体の運動を数値的に計算することにより求められる[2.1]。計算に用いる気流性状は、LES計算より求めた風速3成分の各時間ステップの瞬間値、ランキン渦モデル、および、フジタ渦モデルで与えられる渦状の風速場を用いる。LES計算より作成された竜巻状の渦には種々の形態があるが、ここでは2セルタイプの渦を用いている。

渦中に放出された物体の運動の計算には、空気密度 ρ 、代表風速 U_0 、物体の代表面積 A 、重力加速度 g を用いて、立川ら[2.1]と同様に無次元化された時間、距離、速度および加速度

$$\text{時間：} \quad t = \tilde{t} g / U_0 \quad (2.1)$$

$$\text{距離：} \quad x = \tilde{x} g / U_0^2, y = \tilde{y} g / U_0^2, z = \tilde{z} g / U_0^2 \quad (2.2)$$

$$\text{速度 (物体)：} \quad u = \tilde{u} / U_0 = \dot{\tilde{x}}_1 / U_0, v = \tilde{v} / U_0 = \dot{\tilde{x}}_2 / U_0, w = \tilde{w} / U_0 = \dot{\tilde{x}}_3 / U_0 \quad (2.3)$$

$$\text{速度 (流体)：} \quad U = \tilde{U} / U_0, V = \tilde{V} / U_0, W = \tilde{W} / U_0 \quad (2.4)$$

$$\text{加速度 (物体)：} \quad \ddot{x} = \ddot{\tilde{x}}_1 / g, \ddot{y} = \ddot{\tilde{x}}_2 / g, \ddot{z} = \ddot{\tilde{x}}_3 / g \quad (2.5)$$

により記述された式(2.6)～(2.7)を用いる。ここで、上付きの \sim は図2.1.1に示すように実際(有次元)の値を表す。これにより、物体の飛散を記述する運動方程式は以下のように記述できる。

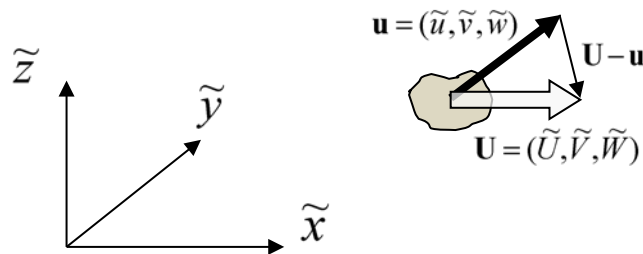


図 2.1.1 座標系および物体の速度と風速

$$x \text{ 軸方向：} \quad \ddot{x} = T_a C_{DX} (U - u) |\mathbf{U} - \mathbf{u}| \quad (2.6)$$

$$y \text{ 軸方向：} \quad \ddot{y} = T_a C_{DY} (V - v) |\mathbf{U} - \mathbf{u}| \quad (2.7)$$

$$z \text{ (鉛直) 軸方向：} \quad \ddot{z} = T_a C_{DZ} (W - w) |\mathbf{U} - \mathbf{u}| - 1 \quad (2.8)$$

ここで、 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3) = (x, y, z)$ は飛散物の位置、 \mathbf{u} は飛散物の速度、 $\ddot{\mathbf{x}}$ は飛散物の加速度を表します。 T_a は次式で表される Tachikawa 数[2.2]で、

$$T_a = \frac{\rho A U_0^2}{2mg} = \frac{\rho U_0^2}{2C_D g} \frac{C_D A}{m} \quad (2.9)$$

m は物体の質量。 C_{DX}, C_{DY}, C_{DZ} はそれぞれ A を代表面積としたときの x, y, z 方向の抗力係数。 \mathbf{U} は風速、 $|\mathbf{U} - \mathbf{u}|$ は飛散物の速度と風速との差

$$|\mathbf{U} - \mathbf{u}| = \sqrt{(U - u)^2 - (V - v)^2 - (W - w)^2} \quad (2.10)$$

である。

数値計算に際しては式(2.1)～(2.8)を線形加速度法に準じた陽解法で時間方向に離散化し、最大接線風速 $V_{t,max}$ を基準風速 U_0 として無次元化した時間で 1 ステップあたり 0.001 ごとに積分して物体の位置、速度、加速度を求めている。なお、飛散物の計算は流れ場の解析とは別に行い、物体に加わる風力の反力を流れ場には反映させていない。

物体に加わる風力は風向角により変化しない (C_{DX}, C_{DY}, C_{DZ} は同一の平均的な値 C_D をもつ) と仮定し、式(2.9)中のパラメータ $\frac{C_D A}{m}$ で飛来物の空力特性を与えている。

2.1.2 計算精度の検証

上記で用いた離散化による計算方法が、物体の運動をどの程度の精度で再現するか、水平方向の風速が一定で、重力の影響がない場合の移動距離・速度を理論値と比較した。文献[2.3]によると、風速が一定 U_0 な x 軸方向の物体の加速度 \ddot{x} と速度 u_m は

$$\ddot{x} = T_a C_D (U_0 - u_m) |U_0 - u_m| \quad (2.11)$$

と記述でき、 $t = 0$ のとき $x = 0$ とすると、上式は解析的に解けて、

$$u_m(t) = \frac{kU_0^2 t}{1 + kU_0 t} \quad (2.12)$$

$$x(t) = U_0 \left[t - \left(\frac{1}{kU_0} \right) \ln(1 + kU_0 t) \right] \quad (2.13)$$

となる。ここで k は物体の密度

$$\rho_m = \frac{m}{V} \quad (2.14)$$

と代表長さ l を用いて

$$k = \frac{\rho C_D}{2\rho_m l} \quad (2.15)$$

と表される。 $U_0 = 50$ [m/s], $r = 1$ [m]として立川数 T_a を 0.1 から 1000, 積分時間ステップを無次元化時間 dt で 0.0001 から 0.05 まで変化させて計算し, 計算結果と式(2.12), (2.13)による解析値と比較したところ, 最大で $T_a = 100$, $dt = 0.05$ のときに 1000m 進んだときに距離で最大 16.4[m]の差が生じ, 1.6%以下の誤差となった。速度では 0.2[m/s]の差が生じ, 0.4%以下の誤差となった。さらに, Simiu and Cordes ら [2.4]の計算と同じ条件で計算した飛来物の速度は表 2.1 のようになり, ほぼ同じ程度の精度を持っていることを確認した。

表 2.1 Simiu and Cordes ら (1976) の計算との比較

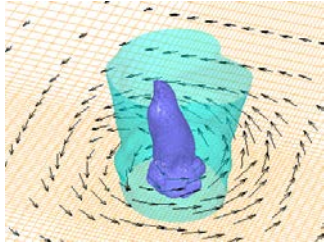
飛散物の投入位置 (m)		対地最大水平速度 (m/s)	
x	y	Simiu and Cordes らの結果	本製品の計算結果
46	0	10	9.4
23	0	18	18.1
69	0	9	9.2
-46	0	18	18.2
0	46	16	16.4
0	23	20	20.0
0	-23	35	34.6
0	-46	54	54.7

ここで, x 軸は渦の進行方向を正に, y 軸は x 軸に水平直角左方向を正に取り, 渦の中心を原点とする。物体は高さ 40m から対地相対速度 0m/s で投入され, 最大接線風速 146m/s, 最大接線風速半径 46m, 渦の移動速度 31m/s, 空気密度を 1kg/m^3 とした計算結果の比較。

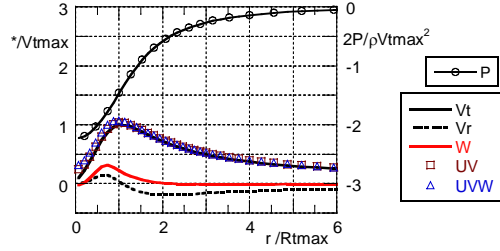
2.1.3 気流の設定

2.1.3.1 LES 計算により作成した風速場

自然界中における渦の形態は種々のものが観察されるが、2セルタイプの竜巻は高レイノルズ数時に比較的多く発生し、他の1セルタイプや多重コアタイプに比べても発現頻度が多いと考えられる。そこで、LESによる数値流体計算で生成した図2.1.2, 2.1.3に示すような気流性状を持った2セルタイプの竜巻状の非定常風速場[2.5]を用いた。風速場の3次元時系列データは、バイナリーデータで保存されたファイルで提供され、飛来物の運動解析時の時間ステップに応じて読み込まれる。物体の周辺の風速は、最も近い計算格子6点(LES計算のデータは直交格子系で与えられる)における風速から直線補完して求める。



渦中心付近の圧力等値面と
地面付近の風速ベクトル（瞬間値）



風速および圧力の径方向の分布（平均値）

図 2.1.2 渦中心に平均的な下降流がある渦（2セルタイプ）

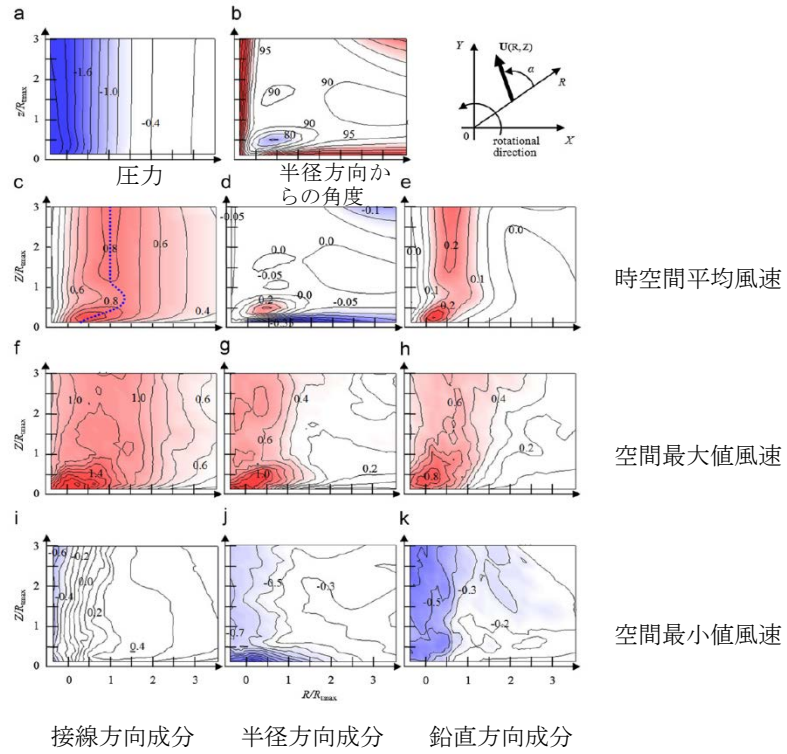


図 2.1.3 本製品で用いている竜巻状渦の風速場の特性

円周方向の平均値と最大・最小値，図中の値は最大接線風速と最大接線風速半径で無次元化してある

2.1.3.2 修正ランキン渦モデルによる風速場

計算で用いた修正ランキン渦モデルは式(2.16)～(2.18)によって与えられる。渦内の流れは剛体回転するコアとその外周部で表されるとし、式(2.16)に示すように、コア内部における接線方向水平風速は回転方向を正として渦中心からの距離に比例し、外周部では渦中心からの距離の α 乗に反比例するとする。中心から外に向かう方向を正とする半径方向風速と上向きを正とする鉛直方向風速は、接線方向水平風速に比例するように図 2.1.4 式(2.17)、(2.18)で与えられる。

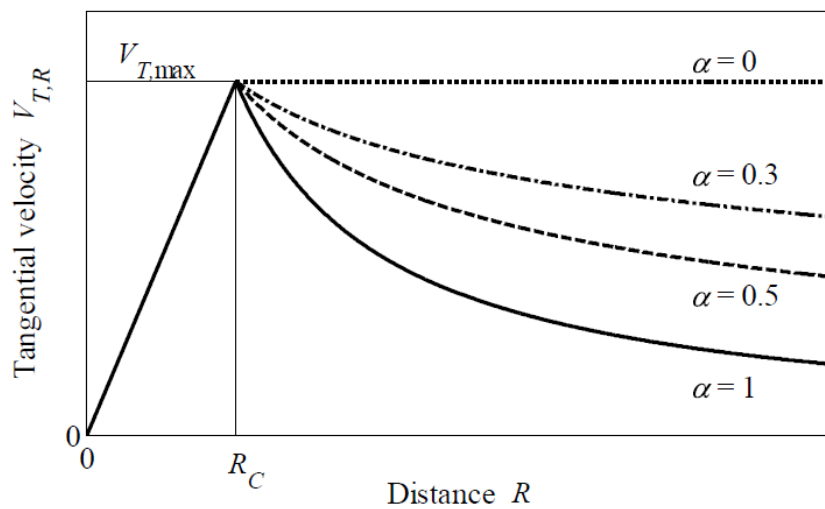


図 2.1.4 修正ランキン渦モデルによる接線方向水平風速

接線方向水平風速：
$$V_t(R) = C_T \frac{R}{R_m} V_m \quad (0 \leq R \leq R_m)$$

$$V_t(R) = C_T \left(\frac{R_m}{R} \right)^\alpha V_m \quad (R_m < R) \quad (2.16)$$

半径方向風速：
$$V_R(R) = C_R V_t(R) \quad (2.17)$$

鉛直方向風速：
$$W(R) = C_W V_t(R) \quad (2.18)$$

ここで、 R は渦中心からの距離、 V_m は最大接線風速、 R_m は最大接線風速半径である。修正ランキン渦はもともと接線風速の値のみを与えるモデルである。本計算では飛来物の計算には風速 3 成分の値が必要となるので、半径方向風速と鉛直方向風速を加えている。その大きさは観測値や実験値を参考に式(2.18)に示すように接線方向水平風速 V_t に比例すると仮定する。ここで、

べき指数 α の値は 0 から 1 の間の値、比例定数 C_T , C_R , C_W は Simiu ら[2.3]に準じてそれぞれ $C_T=0.894$, $C_R=0.5$, $C_W=0.667$, $\alpha=1.0$ と与え、風速分布は高さに依存しないとする。べき指数 α , C_T , C_R , C_W の値は、初期メニューで渦の種類を 2 (修正ランキン渦) と指定した場合に、パラメータ V_{rot-Vt} , $Vt-Vr$, $Vt-Vz$, Alpha として表示される。デフォルト値としてそれぞれ上記の値が設定されているが、変更することが可能である。

2.1.3.3 フジタ渦モデルによる風速場

フジタモデルは Fujita 博士によって提案された工学モデルで、風速場は代数式によって与えられる。風速場は半径方向に 3 つの領域 (内部コア, 外部コア, 最外領域) に分けてモデル化される。上昇流は外部コアのみに存在する。地面付近で渦中心に向かう流れを与える。接線方向水平風速はランキンモデルと同様であるが、高さに依存して与えられることなどが特徴である。定義を式 (2.19) ~ (2.21) に示す。

・接線方向水平風速：

$$V_t(R, Z) = F_R(R)F_H(Z)V_m$$

ただし, $F_R(R) = R/R_t$ ($0 \leq R \leq R_t$), $= R_t/R$ ($R_t < R$)

$$F_H(Z) = (Z/H_i)^{k_0} \quad (Z < H_i), \quad = \exp(-k(Z/H_i - 1)) \quad (H_i \leq Z) \quad (2.19)$$

・半径方向風速： $V_R(R)$

$$V_R(R) = 0 \quad (R \leq vR_t), \quad = \frac{V_t \tan \beta}{1-v^2} \left(1 - \frac{v^2}{(R/R_t)^2} \right) \quad (vR_t < R < R_t), \quad = V_t \tan \beta \quad (R_t \leq R)$$

ただし, $\tan \beta = -A(1 - (Z/H_i)^{1.5})$ ($Z < H_i$), $= B\{1 - \exp(-k(Z/H_i - 1))\}$ ($H_i \leq Z$)

(2.20)

・鉛直方向風速： $W(Z)$, $vR_t < R < R_t$ の範囲のみ

$$W(Z) = \frac{3}{28} \frac{0.55(1-v^2)V_m}{1-v^2} A(16(Z/H_i)^{7/6} - 7(Z/H_i)^{8/3}) \quad (Z < H_i),$$

$$= \frac{0.55(1-v^2)V_m B \exp(-k(Z/H_i - 1))}{k(1-v^2)} \{2 - \exp(-k(Z/H_i - 1))\} \quad (H_i \leq Z) \quad (2.21)$$

ここで、 R_t は外部コアの半径で最大接線風速半径とする。 νR_t は内部コアの半径、 H_i は最外領域の流入高さで竜巻の性状に応じた値を設定するが、ここでは $H_i = 0.55(1 - \nu^2)R_t$ 、 $\nu = 0.9 - 0.7 \exp(-0.005R_t)$ とする。 k_0 、 k 、 A 、 B は定数で $k_0 = 1/6 = 0.167$ 、 $k = 0.03$ 、 $A = 0.75$ とする。また、 B の値は k_0 、 k 、 A を用いて

$$B = \frac{3kA}{(k_0 + 1)(k_0 + 2.5)} \quad (2.22)$$

と与える。

2.2 ソフトウェアのインストール方法

2.2.1 動作環境

竜巻飛来物解析プログラムの動作環境は以下の通りである。

パソコン 日本語 Windows10 が動作可能なマシン

OS 日本語 Windows10

CPU Intel® Core™ i7 2GHz 以上を推奨

メモリ 8GB 以上を推奨

2.2.2 ソフトウェアのインストールおよび起動方法

竜巻飛来物解析プログラムを記録したメディア内のフォルダーFD-calc2 には竜巻飛来物解析プログラムのソフトウェア本体である FD-calc2.exe の他に実行に必要なフォルダーやファイルが保存されているので、パソコン上にフォルダーFD-calc2 をコピーする。ソフトウェアのインストールは以上で完了である。

ソフトウェアの起動は、デスクトップ上に FD-calc2.exe のショートカットを設定するか、インストールしたフォルダーFD-calc2 を開いて、FD-calc2.exe のアイコンをダブルクリックする。下の図 2.2.1（以下、この画面をメイン画面と呼ぶ）が現れれば起動が完了している。

注：コントロールファイル選択リストボックス、飛来物投入条件ファイル選択リストボックス、既存の計算結果選択リストボックス内のファイルは初期設定によって以下に示される図のものとは異なる場合がある。

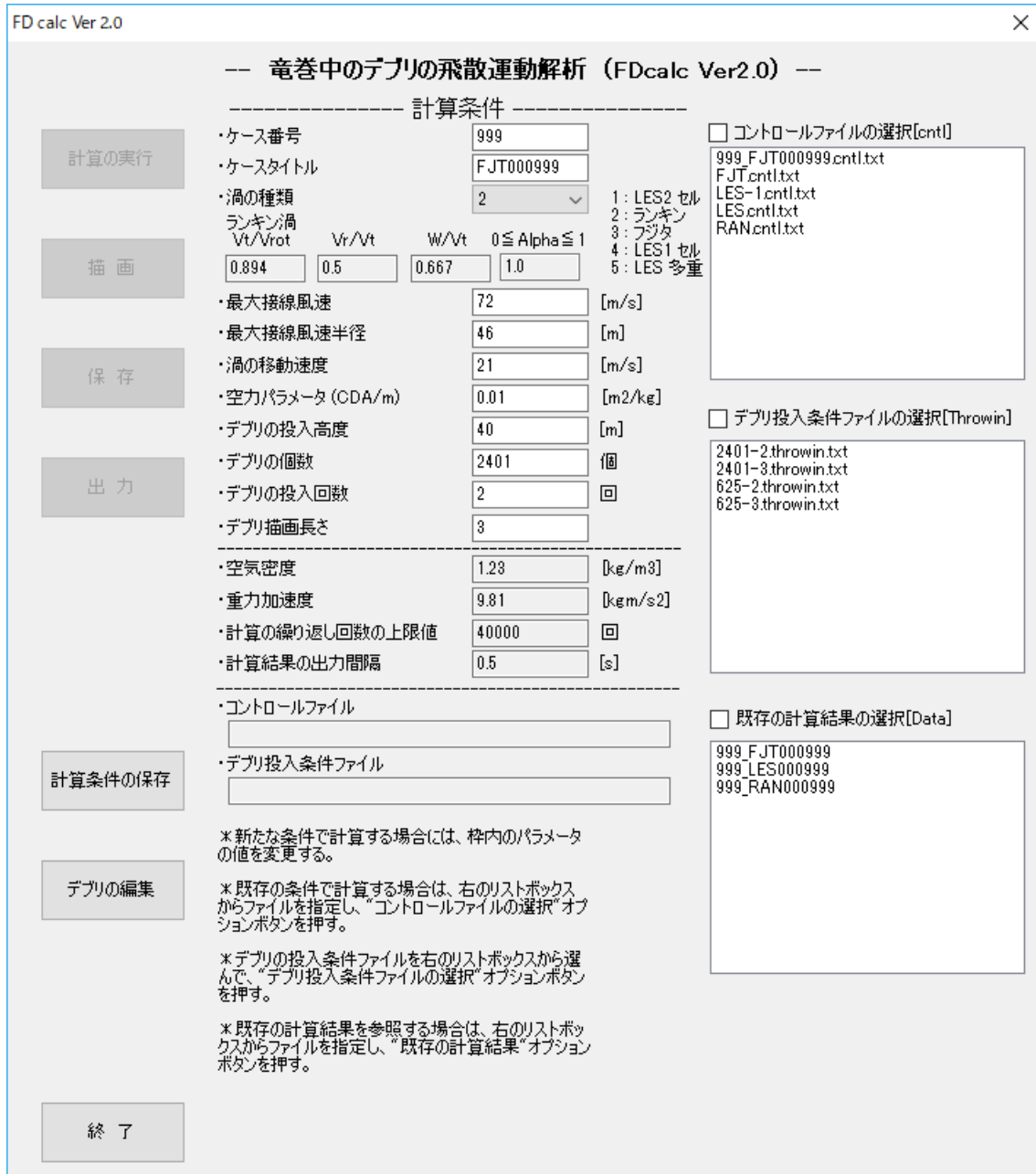


図 2.2.1 起動時のメイン画面

2.2.3 メイン画面上の名称

メイン画面上の各部分の名称を図 2.2.2 に示す。

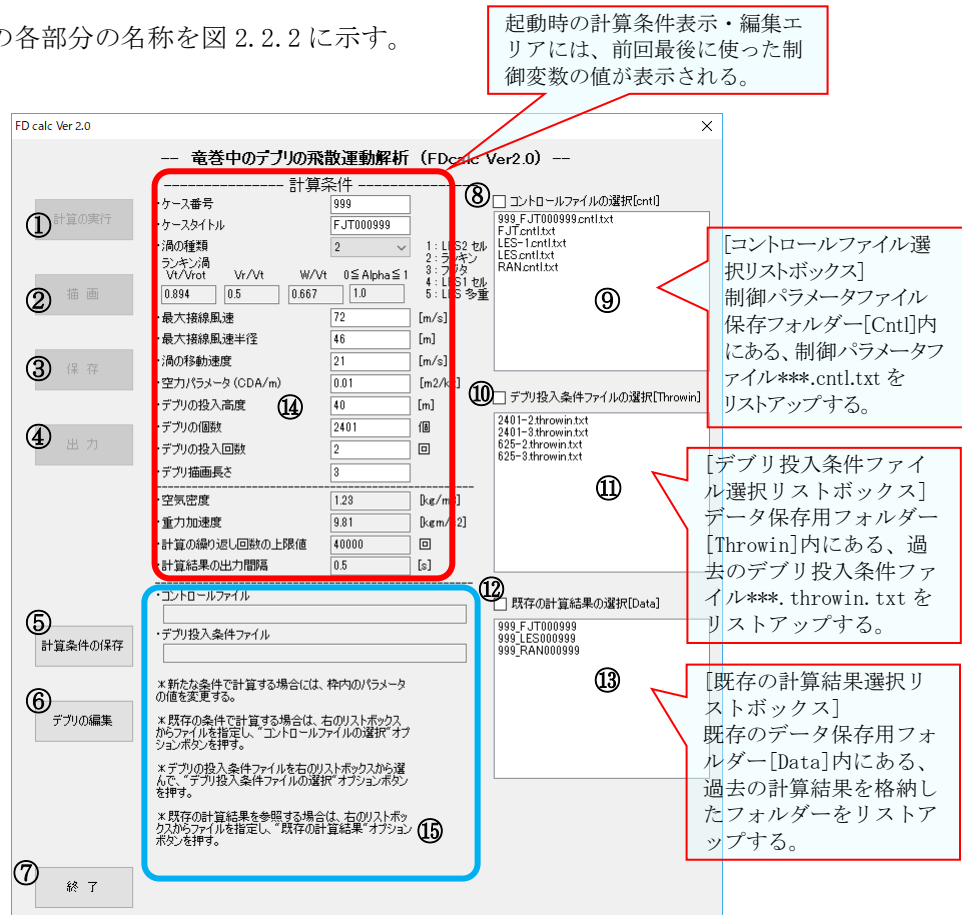


図 2.2.2 メイン画面上の各部分の名称

図中の番号に対応した各部分の名称を以下に挙げる。

- | | |
|--------------------------|----------------------|
| ① 計算実行ボタン | ⑫ 既存の計算結果選択オプションボックス |
| ② 描画ボタン | ⑬ 既存の計算結果選択リストボックス |
| ③ 保存ボタン | ⑭ 計算条件表示・編集エリア |
| ④ 出力ボタン | ⑮ メッセージ表示エリア |
| ⑤ 計算条件保存ボタン | |
| ⑥ 飛来物投入位置編集ボタン | |
| ⑦ 終了ボタン | |
| ⑧ コントロールファイル選択オプションボックス | |
| ⑨ コントロールファイル選択リストボックス | |
| ⑩ デブリ投入条件ファイル選択オプションボックス | |
| ⑪ デブリ投入条件ファイル選択リストボックス | |

2.2.4 ソフトウェアの終了方法

図 2.2.3 のメイン画面上の終了ボタンを押すと終了する。

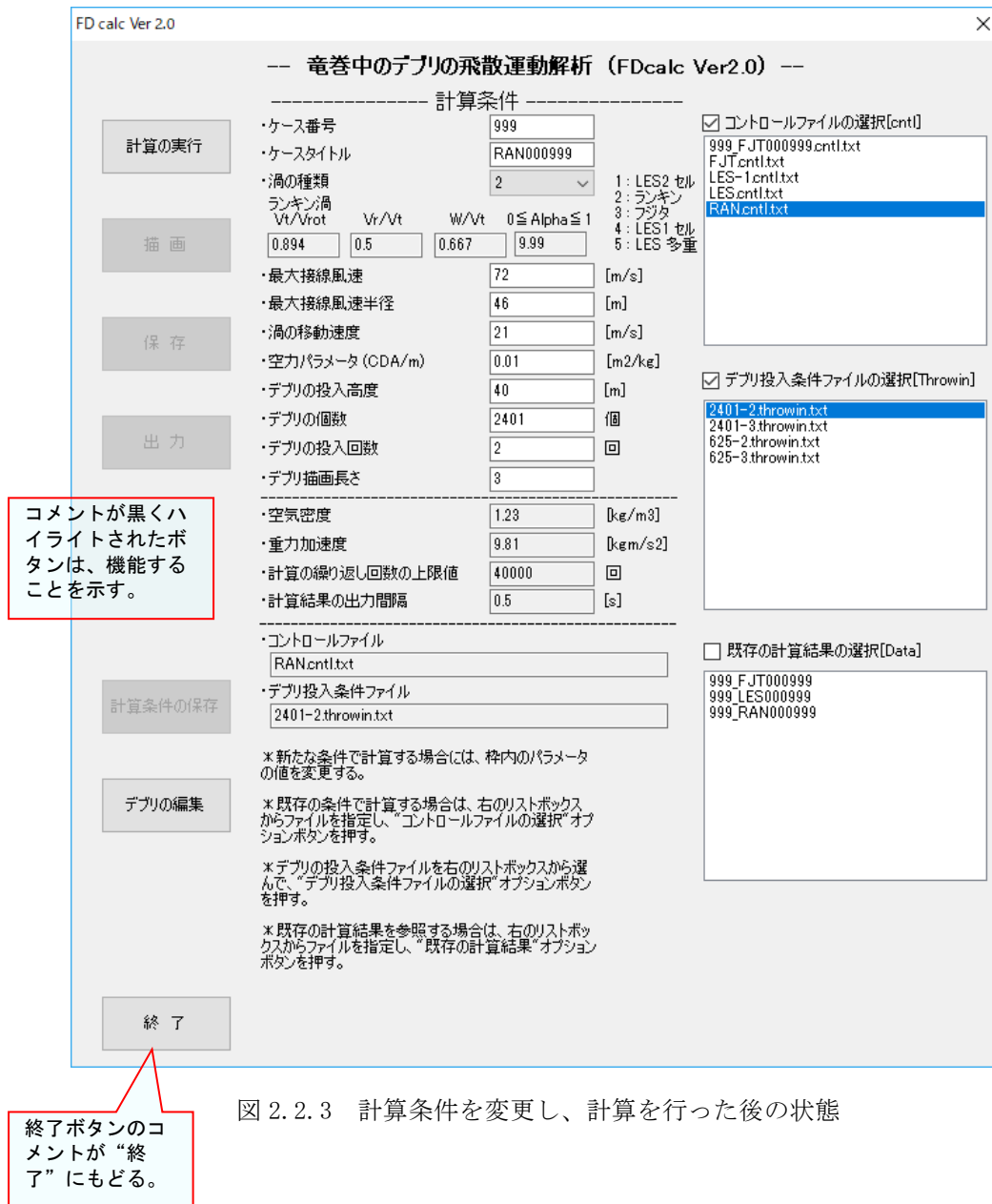


図 2.2.3 計算条件を変更し、計算を行った後の状態

2.3 飛来物の運動解析手順

2.3.1 制御変数の設定

飛来物の運動解析を行う前に、計算条件および飛来物の投入条件を設定する。

計算条件が記録されたコントロールファイルを、コントロールファイル選択リストボックスで選択し（選択されたファイル名の色が反転する）、コントロールファイル選択オプションボックスにチェックを入れると、対応する制御変数の値が計算条件表示・編集エリアに表示される。また、飛来物の投入条件が記録されたデブリ投入条件ファイルを、デブリ投入条件ファイル選択リストボックスで選択し（選択されたファイル名の色が反転する）、飛来物投入条件ファイル選択オプションボックスにチェックを入れると、計算条件が設定され、対応する制御変数の値が計算条件表示・編集エリアに表示されて計算実行ボタンが実行可能となる。

各ボタンは使用可能な場合に、コメントが黒くハイライトされ、使用できない場合にはグレーで表示される。表示された制御変数の値を変更したい場合には、計算条件表示・編集エリアで編集を行う。

起動時の計算条件表示・編集エリアの制御変数の値は、前回最後に使った値が設定される。計算条件表示・編集エリア内の枠内の数値は、入力・変更することができる。ただし、枠内の色がグレーの部分には、推奨値を使うため、一時的に変更が可能であるが、終了時にはデフォルト値にもどされ、次回起動時には一時的に変更された値はデフォルト値に変わる。

計算実行ボタンが押されると、計算条件表示・編集エリアの制御変数の値はフォルダーFD-calc2 内に制御変数格納用ファイル cnt1.txt として書き出された後に竜巻飛来物解析プログラム FD-calc2.exe が実行される。

以下に各制御変数の意味と与え方を述べる。

1. ケース番号 : 半角 3 桁の “000” 以外の任意の数字
2. ケースタイトル : 任意の半角 9 文字
3. 渦の種類 : 計算に用いる渦の種類（LES、フジタ渦、修正ランキン渦）を選ぶ
“渦の種類” を選ぶと四角い枠内が現れて、対応する流れ場の計算に必要なパラメータが表示される。ただし、1 : LES を選択した場合にはパラメータは表示されない。
4. 最大接線風速 : 最大接線風速を [m/s] で与える
5. 最大接線風速半径 : 最大接線風速半径を [m] で与える
6. 渦の移動速度 : 渦の移動速度を [m/s] で与える
7. 空力パラメータ : 空力パラメータ $C_D A/m$ を [m²/kg] で与える
8. デブリの投入高度 : デブリの投入高度を [m] で与える

飛来物投入条件格納ファイル throwin.txt の中で “読み込むパラメータの数” を 2 と指定した場合には、ここに指定した値をデブリの投入高度として与える。throwin.txt の中で、

“読み込むパラメータの数”を3と指定した場合は、ここに指定した値は無視されて throwin.txt の中に指定されたデブリの投入位置の z 座標を投入高度として与える。

9. デブリの個数 : デブリの個数を自然数で与える

“デブリの個数”と下記“デブリの投入回数”の積の数だけ飛散物が地面に達した場合に計算を終了する。したがって、大きな最大接線風速や空力パラメータを与えると、デブリが解析領域内で地面に落下しなくなり計算が止まらなくなる場合がある。その場合には、強制終了ボタンで計算を一旦終了させるか、“計算の繰り返し回数の上限值”に小さな値を与えることによって、地面に落下するデブリの数が“デブリの個数”×“デブリの投入回数”に達する前に計算を止めることができる。

10. デブリの投入回数 : デブリの投入回数を自然数で与える

ここで指定した“デブリの投入回数”×“デブリの個数”の数だけ飛散物が地面に達した時点で計算を終了する。飛来物投入条件格納ファイル throwin.txt の中のデブリの投入位置の数が、“デブリの投入回数”×“デブリの個数”の数よりも少ない場合には、throwin.txt の中のデブリの投入位置の初めに戻って、繰り返し投入位置の値が読み込まれる。なお、計算に用いる渦の種類としてフジタ渦、および、修正ランキン渦を選んだ場合、風速場は時間方向に変化しないので、投入時間が異なっても同じ位置から投入された飛来物の飛散運動は変化しない。したがって、通常フジタ渦、および、修正ランキン渦を選んだ場合には“デブリの投入回数”は2程度で十分である。一方、LES 渦を用いた計算では、同じ位置から投入されたとしても、投入時間が異なると風速場も変化するので、飛来物の飛散運動も変化する。したがって、LES 渦を用いた計算では“デブリの投入回数”は十分大きくする。報告書ではこの値を 500 としている。

11. デブリ描画長さ : デブリ描画長さを自然数で与える

“描画” + “デブリの飛散状況をアニメで表示” ボタンを選択した際のアニメ表示において、“計算結果の出力間隔”に飛行する距離を 1 として、ここで指定した長さを描画する。

12. 空気密度 : 空気密度を $[\text{kg}/\text{m}^3]$ で与える

空気密度の値を変えたい場合はここで指定する。

13. 重力加速度 : 重力加速度を $[\text{m}/\text{s}^2]$ で与える

重力加速度の値を変えたい場合はここで指定する。

14. 計算の繰り返し回数の上限值 : 計算の繰り返し回数の上限値を自然数で与える

飛来物の飛散は離散化された運動方程式を積分して求められ、その際の積分は 1 ステップ当たりの時間“ $0.001 \times \text{最大接線風速} / \text{重力加速度} [\text{s}]$ ”で行われる。この積分ステップの回数が“計算の繰り返し回数の上限值”を超えると計算を停止する。

15. 計算結果の出力時間間隔 : 計算結果の出力間隔を $[\text{s}]$ で与える

番号 1 の飛来物の飛行記録 (Trjct_No01.txt ファイル) の出力間隔を実数で与える。ファイル Trjct_No01.txt への実際の出力は、“計算結果の出力間隔”に近い積分 1 ステップ当たりの時間の倍数の値で行われる。

2.3.2 計算の実行

計算実行ボタンが実行可能となっている状態で、計算実行ボタンを押すと計算を開始する。計算が開始されると、図 2.3.1 に赤枠で示すようにメッセージ表示エリアに計算状況を示すウインドウが開き、現在の状況とメッセージが示される。

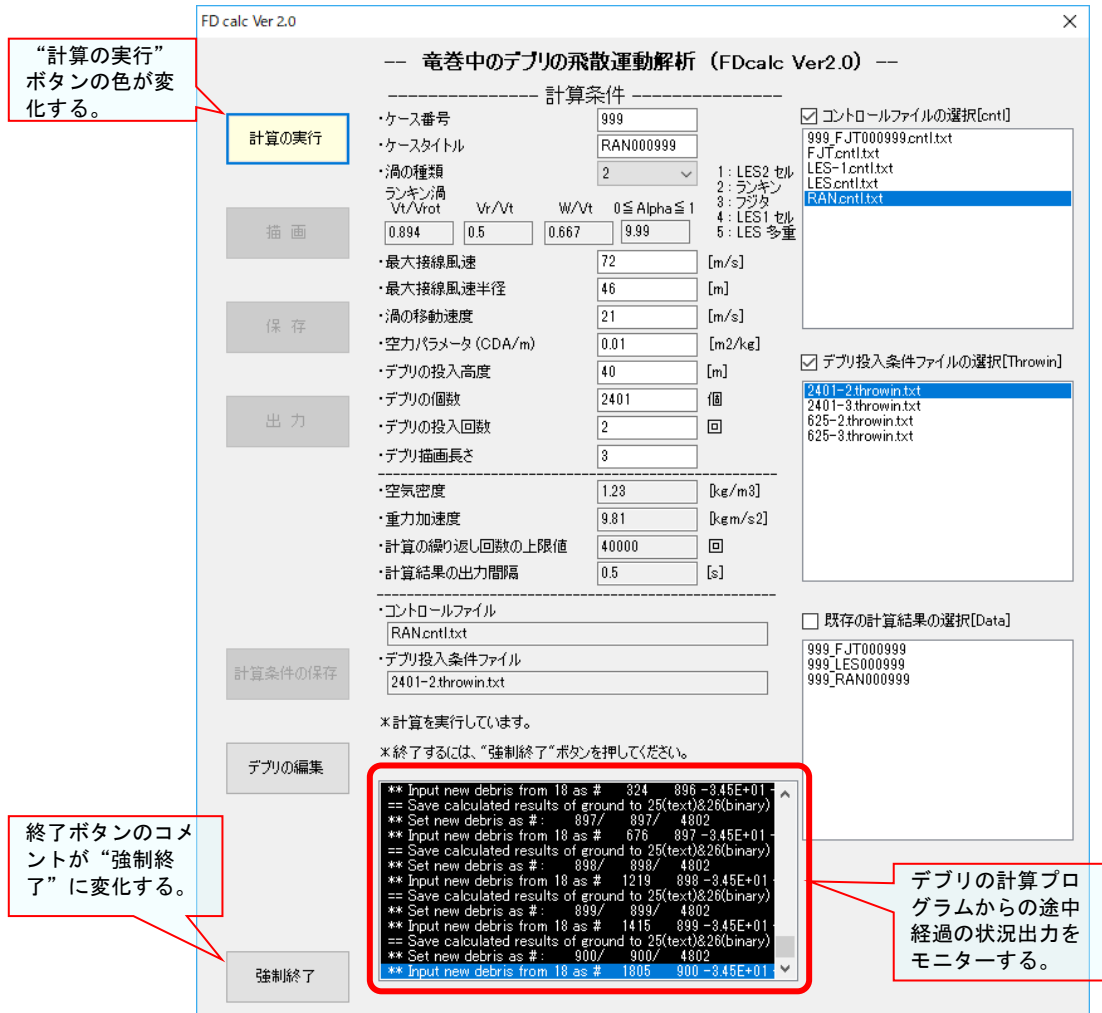


図 2.3.1 計算実行時中のメイン画面

計算が正常に終了すると、描画ボタン、保存ボタン、出力ボタンが使用可能になり、コメントが黒くハイライトされる。

2.3.3 計算結果の保存

計算結果は、保存ボタンを押すことにより、フォルダーFD-calc2内のフォルダーData内に保存される。保存された計算結果は、既存の計算結果選択リストボックスで選択し（選択されたファイル名の色が反転する）、既存の計算結果選択オプションボックスにチェックを入れることにより、再度呼び出すことができる。

2.3.4 計算結果の出力

計算結果は、出力ボタンを押すことにより、フォルダーFD-calc2内のフォルダーOutputフォルダー内に保存される。出力は、ケース名がつけられたテキストファイルで出力されるので、Outputフォルダーから取り出して参照することができる。

2.3.5 各種ファイルの命名法

計算に必要となる制御変数および飛来物の投入位置を格納したファイル、計算結果を格納したファイルの名前は、ケース番号とケースタイトルにより作られるケース名が頭に付けられたファイル名をもち、ケース名により識別することができる。ケース番号は3桁の半角数字、ケースタイトルは9桁の半角英数字で与え、ケース名はケース番号とケースタイトルを半角のアンダーバーでつないだものとなる。例えば、ケース番号“123”，ケースタイトル“LES123456”の場合のケース名は“123_LES123456”である。

FD-calc2内で用いられる入出力ファイルの名前と内容を以下に挙げる。各ファイルの書式は2.5節にまとめる。

・制御変数格納用ファイル名

1. defpa.txt : 制御変数のうちデフォルト値が格納される。この値を変更することは推奨されない。
2. cnt1.txt : 計算実行時に必要となる制御変数の値が格納される。
3. throwin.txt : 飛来物の投入条件が格納される。
4. LESc1xyz.dat : 解析領域を与える座標が格納される。(1セル用)
LESc2xyz.dat : 解析領域を与える座標が格納される。(2セル用)
LESmlxyz.dat : 解析領域を与える座標が格納される。(多重渦用)
5. LESc1.dat : 渦をLESと選択した場合に用いる風速場のデータが格納される。(1セル用)
LESc2.dat : 渦をLESと選択した場合に用いる風速場のデータが格納される。(2セル用)
LESml.dat : 渦をLESと選択した場合に用いる風速場のデータが格納される。(多重渦用)
6. scope-an.prm : 計算結果の飛散状況をアニメで表示する場合の描画方法が格納される。

- 7. scope-2d.prm : 飛来物の最大速度の分布を 2 次元表示する場合の描画方法が格納される。
- 8. scope-3d.prm : 飛来物の最大速度の分布を 3 次元表示する場合の描画方法が格納される。

・結果出力格納用ファイル名

- 9. Log.txt : 計算の状況のログが格納される。
- 10. Rec.dat : 計算結果がバイナリ形式で格納される。
- 11. Rec.txt : 計算結果がテキスト形式で格納される。
- 12. Stt.txt : 飛来物の最大速度が格納される。
- 13. Xyz-an.dat : 飛散状況を動画で表示するために必要な座標データが格納される。
- 14. Fld-an.dat : 飛散状況を動画で表示するために必要な風速および圧力場のデータが格納される。
- 15. Srf-an.dat : 飛散状況を動画で表示するために必要な地面の様子が格納される。
- 16. Lin-an.dat : 飛散状況を動画で表示するために必要な飛散物の軌跡が格納される。
- 17. Xyz-2d.dat : 飛来物の最大速度の分布を 2 次元表示するために必要な座標データが格納される。
- 18. Fld-2d.dat : 飛来物の最大速度の分布を 2 次元表示するために必要なデータが格納される。
- 19. Xyz-3d.dat : 飛来物の最大速度の分布を 3 次元表示するために必要な座標データが格納される。
- 18. Fld-3d.dat : 飛来物の最大速度の分布を 3 次元表示するために必要なデータが格納される。
- 19. Trjct_No01.txt : 番号 1 の飛来物の飛行記録 (対地速度、対地座標、相対風速を算結果の出力間隔で記録) したデータが格納される。

以上のファイルは、先頭に“ケース名.”がつけられて識別される。例えば，“ケース名”が“123_LES123456”である Stt.txt ファイルは“123_LES123456.Stt.txt”となる。

2.3.6 各種ファイルの格納先

計算に必要となる制御変数が格納された defpa.txt ファイルと cntl.txt ファイルは制御変数保存用フォルダーCntl内に格納される。その際、defpa.txt ファイルは org.defpa.txt という名前で、cntl.txt ファイルは頭に識別用の“ケース名.”を付けて保存される。別途自分で用意した cntl.txt ファイルを保存する場合は、ケース名以外の名前 (ただし半角 13 文字以内の文字列 + “.”) を付けることも可能である。

飛来物の投入条件が格納された throwin.txt ファイルは、頭に識別用の“ケース名.”を付けて、飛来物投入設定保存用フォルダーThrowinに保存される。別途自分で用意した throwin.txt ファイルを保存する場合は、“ケース名.”以外の名前 (ただし半角 13 文字以内の文字列 + “.”) を付けることも可能である。

を付けることも可能である。

計算結果出力格納用ファイル (2.3.5 参照) および `cnt1.txt`, `throwin.txt` は、計算終了時に一時保存フォルダ `Temp` 内に格納され、保存ボタンが押されると、データ保存用フォルダ `Data` 内にケース名を名前とするフォルダが作成され、その中に格納される。また、出力ボタンが押されると、作成されたフォルダの中でテキストファイル (ファイル名の最後の識別子が `.txt` のもの) が、結果出力用フォルダ `Output` 内に出力される。フォルダ構造と格納されているファイルを図 2.3.2 に示す。

[FD-calc 起動フォルダー]

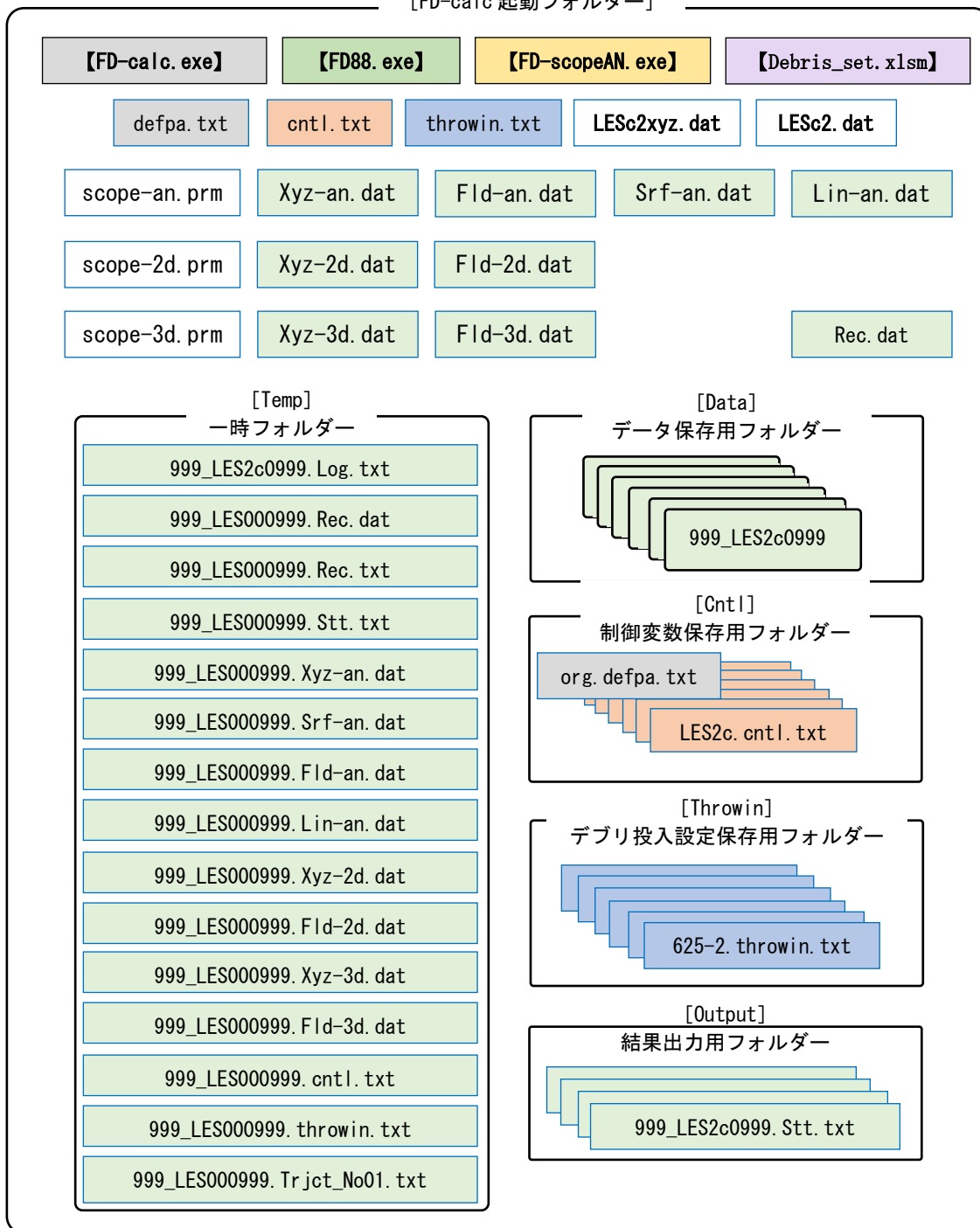


図 2.3.2 フォルダ構造と格納されているファイル

□ はファイルを、[] はフォルダー、【 】 はプログラムを表す。

2.3.7 計算条件の保存

計算条件表示・編集エリアに表示されている制御変数は、計算条件の保存ボタンを押すことにより、制御変数保存用フォルダ-Cnt1 内に保存される。その際、計算条件表示・編集エリアに示されているケース番号とケースタイトルから“ケース名.”が生成され、ファイル名の先頭に付けられる。例えば、ケース番号“123”，ケースタイトル“LES2c3456”の場合の制御変数保存用ファイルの名前は“123_LES2c3456.cnt1.txt”となる。この制御変数保存用テキストファイルは、中身を別途編集・作成したものを制御変数保存用フォルダ-Cnt1 の中に保存すれば、FD-calc2 で制御変数を設定するために使うことができる。

2.3.8 飛来物の投入条件の設定

デブリの編集ボタンを押すと、飛来物の投入条件の設定のための Excel ファイル“Debris_set.xlsx”が立ち上がるので、投入したい位置の座標を設定してファイルを出力する。これにより、飛来物投入条件ファイル throwin.txt が飛来物投入条件ファイル保存用フォルダ-Throwin 内に保存される。この飛来物投入条件ファイルは、中身を別途編集・作成したものをフォルダ-Throwin 内に保存すれば、FD-calc2 で飛来物の投入条件を設定するために使うことができる。図 2.3.3 に“Debris_set.xlsx”実行時の画面を示す。

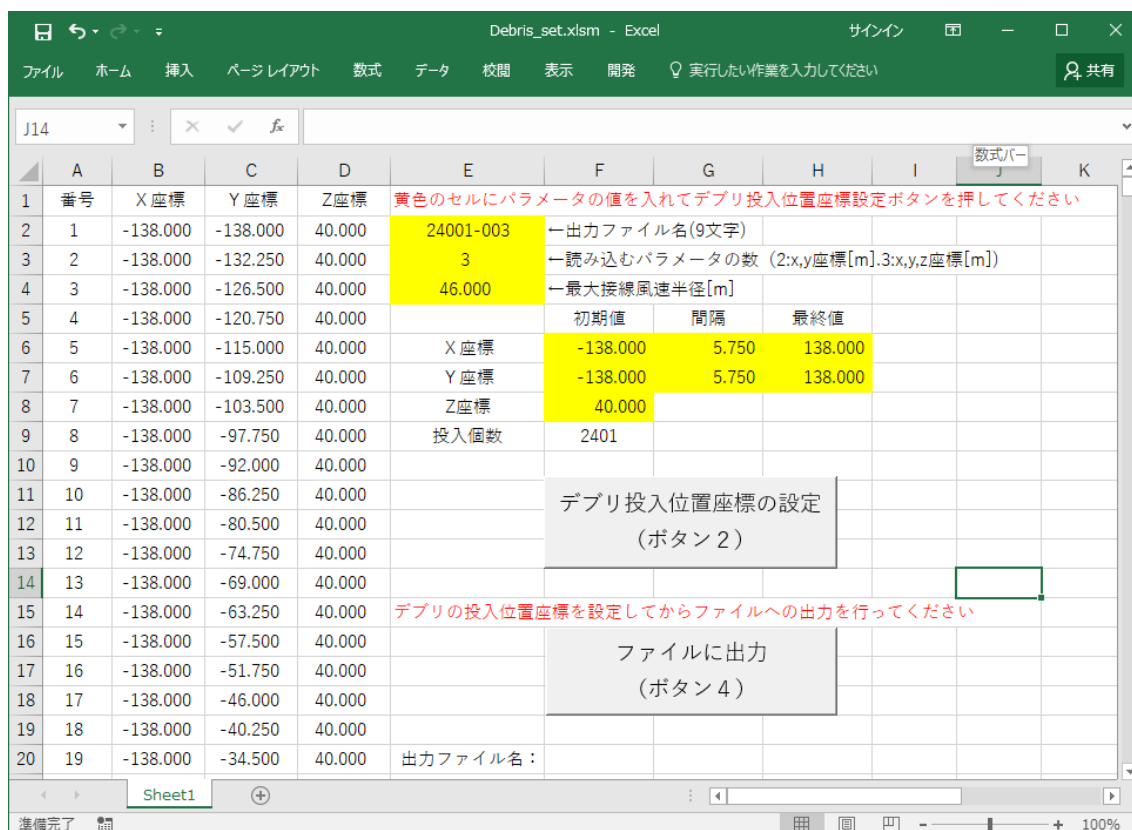


図 2.3.3 フォルダ構造と格納されているファイル

2.4 計算結果の描画方法

2.4.1 飛散運動の描画機能

本ソフトウェアは計算結果を表示する機能を備えている。描画ボタンを押すと図 2.4.1 の画面に切り替わり、飛来物の飛散の様子を 3 次元表示すること、飛来物の最大速度の空間分布を 2 次元平面内に投影した図を描くこと、飛来物の最大速度の空間分布を 3 次元表示することができる。

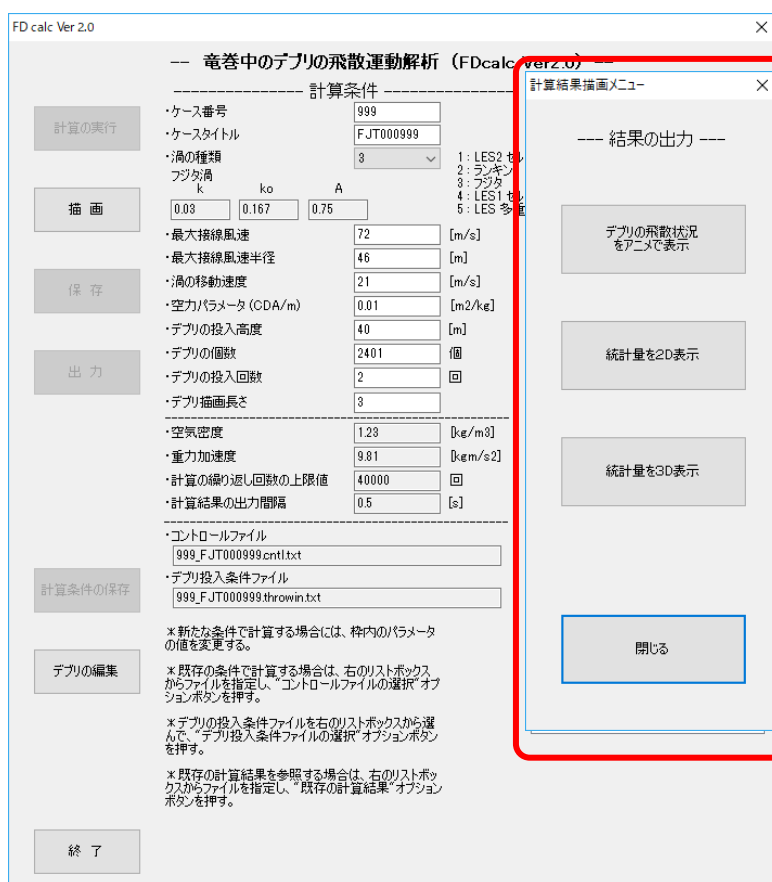


図 2.4.1 描画メニュー

2.4.2 飛散運動の動画表示

飛来物の飛散の様子を3次元表示するために、図2.4.1に示す計算結果描画メニューの“デブリーの飛散状況をアニメで表示”ボタンを押すと、図2.4.2のような動画表示画面が現れるので、左上の動画再生ボタンを押すと動画再生が開始される。なお、次節以降で説明する、2次元描画面、3次元描画面の使い方は共通で、付録の“動画再生アプリ操作説明書”に使い方が解説されているので、詳細はそちらを参照のこと。



図 2.4.2 動画表示画面

Data フォルダ内にある 999_LES2c0999 ファイルを指定した場合の図

動画表示画面では、飛散物の運動をアニメーションで再現し、飛散状況を確認することができる。表示できる内容は、・飛散物の軌跡、・解析領域内の流れ場の状況（風速および圧力の3次元分布）である。デフォルトでは、飛散物および圧力の等値面が描かれ、渦の周りで飛来物が飛散する様子が再生できる。動画表示画面から計算結果描画メニューに戻るには、右上の終了ボタンを押す。図中、地面の市松模様の1格子の大きさは最大接線風速半径に設定されている。渦中心の低圧部分を水色の等値面で表している。（描画時の表示フィールド番号は3を指定）

2.4.3 飛来物の最大速度の2次元表示

飛来物の最大速度の2次元空間分布を描くことができる。図 2.4.1 に示す計算結果描画メニューの“統計量を2D表示”ボタンを押すと、図 2.4.3 のような2次元描画画面が現れる。なお、この画面の使い方は動画表示画面と共通なので、詳しい使い方は付録の動画再生アプリ操作説明書を参照のこと。

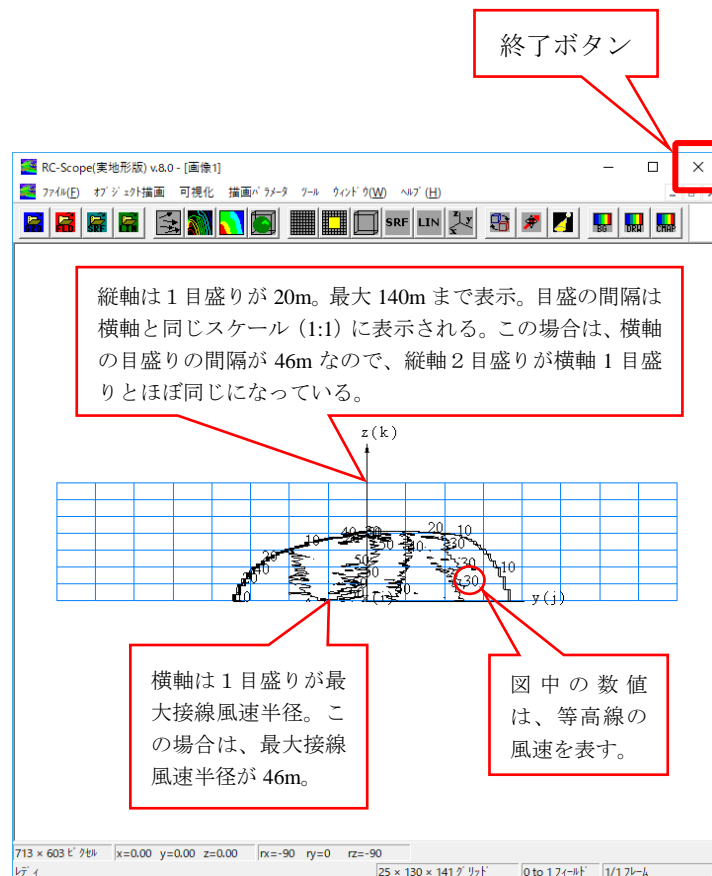


図 2.4.3 2次元描画画面

Data フォルダー内にある 999_RAN000999 ファイルを指定した場合の図

2次元描画画面ではデフォルトで、飛来物の最大対地実効速度の空間分布を竜巻の移動方向（x 軸方向）前面から眺め、鉛直面に投影した図が等値線で描かれる。図中の等値線の速度値表示は 10m/s 間隔で描かれる。横軸は 1 目盛りが最大接線風速半径、縦軸は 1 目盛りが 20m を表している。動画表示画面からメイン計算結果描画メニューに戻るには、右上の終了ボタンを押す。なお、等値線描画メニュー（動画再生アプリ操作説明書を参照）でフィールド番号を 1 と設定すると、最大対地水平速度の空間分布を表示する。

2.4.4 飛散物の飛散範囲の3次元表示

飛来物の最大速度の3次元空間分布を描くことができる。図2.4.1に示す計算結果描画メニューの“統計量を3D表示”ボタンを押すと、図2.4.4のような3次元描画画面が現れる。なお、この画面の使い方は動画表示画面と共通なので、詳しい使い方は付録の動画再生アプリ操作説明書を参照のこと。

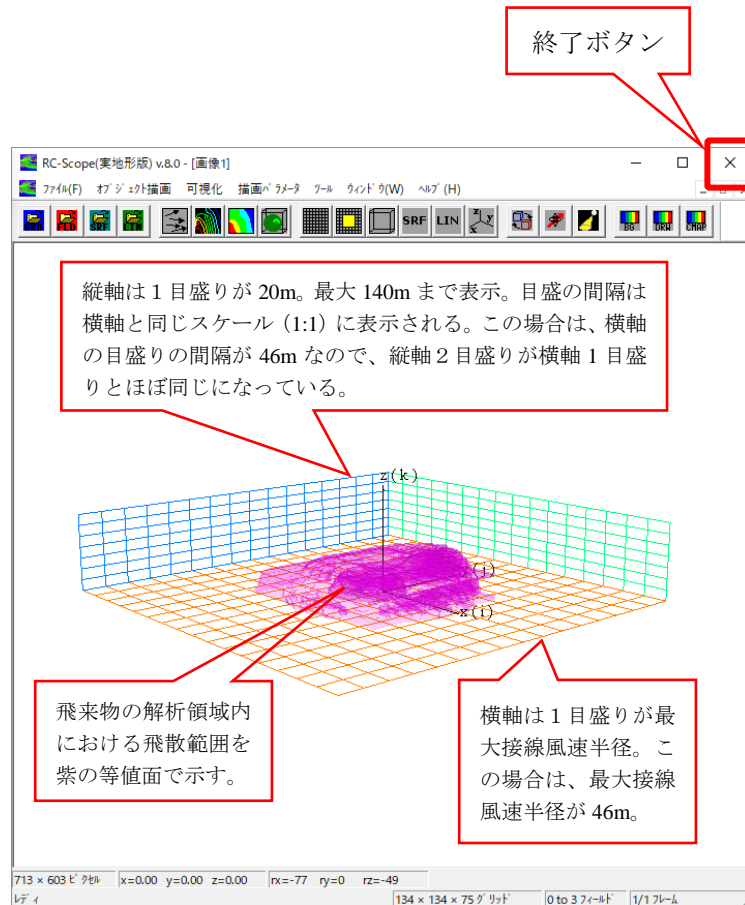


図 2.4.4 3次元描画画面

Data フォルダ内にある 999_RAN000999 ファイルを指定した場合の図

3次元描画画面ではデフォルトで、飛来物の最大対地実効速度の空間分布を俯瞰的に眺め、3次元的な等値面で描かれる。最大対地実効速度 0.1m/s の等値面が描かれており、飛来物の解析領域内における飛散範囲にほぼ対応した範囲を示す。図中の地面における格子間隔は最大接線風速半径、高さ方向の格子間隔は 20m となっている。動画表示画面から計算結果描画メニューに戻るには、右上の終了ボタンを押す。なお、等値線描画メニュー（動画再生アプリ操作説明書を参照）でフィールド番号を 1 と設定すると、最大対地水平速度の空間分布を表示する。

2.5 各種ファイルの書式と内容

計算に必要な制御変数および飛来物の投入位置を格納したファイルはテキストファイルに格納されており、ファイ名の末尾が.txt となっている。その他、竜巻飛来物解析プログラムのソフトウェア本体である FD-calc2.exe と、描画ソフトの FD-scopeAN.exe の入出力に必要なファイルはバイナリーファイルに格納されており、ファイ名の末尾が.dat, .prm となっている。ファイ名の末尾が.dat であるバイナリーファイルの出力書式に関しては、Rec.dat を除き、別添の描画ソフトの解説書に記載されている。

2.5.1 デフォルト制御変数格納用ファイル defpa.txt の内容と書式

計算に必要な制御変数のうち、その値を変更することが推奨されないデフォルト値が格納されるファイルで、起動時にフォルダーFD-calc2 内になければフォルダーCnt1 内に格納されているオリジナルファイル org.defpa.txt からコピーされる。したがって、org.defpa.txt は defpa.txt のバックアップとしてフォルダーCnt1 内に格納されていることが必須である。

デフォルト制御変数値格納用ファイル defpa.txt の書式と、格納される変数を以下に説明する。

ファイル内の中身	変数の意味	書式
<pre>001. 23E+00</pre>	1 行目：空気密度 [kg/m ³]	(10 桁の実数)
<pre>009. 81E+00</pre>	2 行目：重力加速度 [kgm/s ²]	(10 桁の実数)
<pre>0000040000</pre>	3 行目：計算の繰り返し上限回数	(10 桁の自然数)
<pre>005. 00E-01</pre>	4 行目：計算結果出力間隔 [s]	(10 桁の実数)

ここで [] は小文字のスペース 1 文字を表す。

竜巻飛来物解析プログラム FD-calc2.exe からは、これらの変数は自由形式で読み込まれるので、改行さえしてあれば読み込まれる。

【参考】 Fortranプログラムでの読み込みの書式は以下の通り

```
open(10, file=' defpa. txt', FORM=' FORMATTED', status=' old', err=901)
  read(10, *) Rou_air
  read(10, *) Rgrv
  read(10, *) Nstp_last_FD
  read(10, *) out_dt_FS
close(10)
```

2.5.2 制御変数格納用ファイル cntl.txt の内容と書式

計算実行時に必要となる制御変数が格納されるファイルで、起動時にフォルダーFD-calc2 内になければ、コントロールファイル選択リストボックスでコントロールファイルを選択した時点でフォルダーCntl 内からコピーされる。なお、計算条件表示・編集エリアの制御変数が全て設定されていれば（通常は、前回最後に使った値が設定される）、デブリ投入条件ファイルを、デブリ投入条件ファイル選択リストボックスで選択すれば、計算が実行できる状態になる。

制御変数格納用ファイル cntl.txt の書式と、格納される変数を以下に説明する。

*ファイルの中身

*コントロールパラメータを記述する subroutine Set_F88_cntl で読み込みます

```
No. Case_name Umax_FS Rctmax_FS Zstart_FS Tv FS CDA_m FS Mass_FD Eddy_type mP i_remain i_ground parm1 parm2 parm3 parm4  
990 RAN000990 7.20E+01 4.60E+01 2.10E+01 1.00E-03 1.00E+00 02 2401 3 2 8.94E-01 5.00E-01 6.67E-01 0.00E-00
```

ここで [] は小文字のスペース 1 文字を表す。

*変数の意味と書式

- ・ 1, 2 行目はコメント文
- ・ 3 行目に制御変数を記述
- ・ 数字の並びの書式が決まっているので、書式'(i3 (3 桁の整数×1), a (1 文字空白), a (9 文字), 6ES10.2 (10 桁の実数×6), 4i10 (10 桁の整数×4), 3ES10.2 (10 桁の実数×3))' に合わせて記述すること。
- ・ 制御変数の順番は以下の通り、
 1. ケース番号 (3 桁の整数)
 2. (1 文字空白)
 3. ケースタイトル (半角 9 文字)
 4. 最大接線風速 [m/s] (10 桁の実数)
 5. 最大接線風速半径 [m] (10 桁の実数) : Rctmax_FS (後述の throwin.txt ファイルで参照)
 6. 飛散物の投入高さ [m] (10 桁の実数)
 7. 竜巻の移動速度 [m/s] (10 桁の実数)
 8. 空力パラメータ $C_D A/m$ [m^2/kg] (10 桁の実数)
 9. ダミー : 1 に固定 (10 桁の実数)
 10. 渦のタイプ (10 桁の整数) 1:LES2c, 2:Rankin, 3:Fujita, 4:LES1c, 5:LESml
 11. デブリの個数 (10 桁の整数)
 12. 描画長さ (10 桁の整数) 計算結果の出力間隔[s]に飛行する距離を 1 として、ここで指定した長さを描画する
 13. 計算の繰り返し回数の上限值 (10 桁の整数)

飛来物の飛散は離散化された運動方程式を積分して求められ、その際の積分は 1 ステップ当たりの時間 “ $0.001 \times \text{最大接線風速} / \text{重力加速度} [\text{s}]$ ” で行われる。この積分ステップの回数の上限值。

14. モデル係数 1 (10 桁の実数)

修正ランキン渦の場合、接線方向水平風速と最大接線風速の比 (式 2.16 中の C_T の値) で 0.894

フジタ渦の場合、フジタモデル (式 2.19, 2.20, 2.21, 2.22 中) の k の値で 0.03

15. モデル係数 2 (10 桁の実数) 修正ランキン渦、フジタ渦のモデル係数

修正ランキン渦の場合、半径方向風速と接線方向水平風速の比 (式 2.17 中の C_R の値) で 0.5

フジタ渦の場合、フジタモデル (式 2.19, 2.20, 2.21, 2.22 中) の k_0 の値で 0.167

16. モデル係数 3 (10 桁の実数) 修正ランキン渦、フジタ渦のモデル係数

修正ランキン渦の場合、鉛直方向風速と接線方向水平風速の比 (式 2.18 中の C_W の値) で 0.667

フジタ渦の場合、フジタモデル (式 2.19, 2.20, 2.21, 2.22 中) の A の値で 0.75

17. モデル係数 4 (10 桁の実数) 修正ランキン渦のモデル係数

修正ランキン渦の場合、鉛直方向風速と接線方向水平風速の比 (式 2.16 中の α の値) で 0 以上 1.0 以下の値

フジタ渦の場合、フジタモデル (式 2.19, 2.20, 2.21, 2.22 中) の A の値で 0.75

【参考】 Fortran プログラムでの読み込みの書式は以下の通り

```
open(29, file='cntl.txt', FORM='FORMATTED')
  read(29, '(a)') ch_dmy !キャプションの読み飛ばし
  read(29, '(a)') ch_dmy !キャプションの読み飛ばし
  read(29, '(i3, a, a, 6ES10.2, 4i10, 7ES10.2)') i_dmy, Fq_name0, F_name_in_9 &
    , Utmax_FS, Rctmax_FS, Zstart_FS, Tv_FS, CDA_m_FS, Mass_FD &
    , ieddy_type, mP, i_remain_FD, icnt_grnd_limit_FD &
    , parm1_dmy, parm2_dmy, parm3_dmy, parm4_dmy
  if(ieddy_type==2) then
    Vrot_Vt_Ra=parm1_dmy; Vt_Vr_Ra=parm2_dmy; Vt_Vz_Ra=parm3_dmy
  endif
  if(ieddy_type==3) then
    Rk_Fu=parm1_dmy; Rko_Fu=parm2_dmy; RAm_Fu=parm3_dmy
  endif
```

! Eddy_typeの値により、parm1、parm2、parm3、parm4の読み込まれる変数が変わります。

! Eddy_type= 1 LES計算の場合、parm1、parm2、parm3は読み込まれません。

close (29)

2.5.3 飛来物の投入条件格納用ファイル throwin.txt の内容と書式

計算実行時に必要となる制御変数のうち、飛来物の投入条件が格納されるファイルで、起動時にフォルダーFD-calc2 内になければ、デブリ投入条件ファイル選択リストボックスでデブリ投入条件ファイルを選択した時点で、フォルダーCnt1 内からコピーされる。なお、デブリ投入条件ファイルが選択されないと計算は実行できない。また、デブリ投入条件ファイルの中身はデブリの編集ボタンを押すことにより、Debris_set.xlsx を起動させて編集・保存できる。

飛来物投入条件格納ファイル throwin.txt の書式と、格納される変数を以下に説明する。

*ファイルの中身

```
**デブリの投入位置を設定**
**データ並びは、投入粒子番号、x座標(m)、y座標(m)、z座標(m)
03   ←読み込むパラメータの数(2:x,y座標[m].3:x,y,z座標[m])
046 ←最大接線風速半径[m]
01   -138   -138   40
02   -138   -126.5  40
03   -138   -115   40
04   -138   -103.5  40
. . . . .
0623 138   115
0624 138   126.5
0625 138   138
```

ここで [] は小文字のスペース 1 文字を表す。

*変数の意味と書式

- 1, 2行目はコメント文
- 3行目に読み込むパラメータの数(自然数)を記述
 - x, y座標[m]のみを読み込む場合は2、x, y, z座標[m]を読み込む場合は3と記述。
- * ここに2と記述した場合は、5行目以降のz座標は読み飛ばされる、制御変数格納用ファイル(cnt1.txt)に記述された飛散物の投入高度が適応される。
- * ここに3と記述した場合は、制御変数格納用ファイル(cnt1.txt)に記述された飛散物の投入高度は適応されず、5行目以降のz座標が読み込まれるので、z座標が記述されていないとエラーとなる。z座標は飛散物ごとに、異なる値を指定することができる。
- * 5行目以降に記述されるx座標、y座標は、4行目に記述された最大接線風速半径 Rctmax_FS_dmy と、制御変数格納用ファイル(cnt1.txt)に記述された最大接線風速半径 Rctmax_FS を用いて、Rctmax_FS/Rctmax_FS_dmy 倍される。したがって、例えば、4行目に最大接線風速半径を1と記述し、5行目以降のx座標、y座標を1に対する相対的な大きさを記述することが可能である。
- * z座標に対しては、上述の変換は行われないので、実際の大きさ[m]で記入すること。
- * 以下、竜巻飛来物解析プログラム FD-calc2.exe から変数は自由形式で読み込まれるので、

半角スペース 1 以上で区切ってあれば、区別される。

- 4 行目に最大接線風速半径 ([m]、実数) を記述: Rctmax_FS_dmy
- 5 行目以降は、デブリ番号 (自然数)、デブリの投入位置 x 、 y 、 z 座標 ([m]、実数)
- x 、 y 、 z 座標は渦中心の地面を原点 $o(0[m], 0[m], 0[m])$ とし、移動方向を x 軸、鉛直方向を軸とし、渦共に移動する右手系の直角座標系で与える。
- “デブリ番号” の指定の順序は任意である。

参考として来物投入条件格納フォルダー Throwin に格納されている飛来物投入条件格納ファイル 625-2.throwin.txt 等は Debris_set.xlsx で作成されており、ファイル内の “デブリ番号” は昇順であるが、手入力で作成する場合には “デブリ番号” の指定の順序を任意に設定できる。

- 同一の “デブリ番号” の指定は複数可能である。
- “デブリ番号” が 1 と指定された飛散物の計算結果は、その飛行運動の記録がファイル “Trjct_No01.txt” に記録される。

運動の記録を残したい飛来物は “デブリ番号” を 1 と指定すればよい。同一の “デブリ番号” の指定は複数可能なので、複数の飛来物に “デブリ番号” 1 を指定すると、同じ番号の飛来物が同時に飛散する場合がある。この場合、ファイル “Trjct_No01.txt” に複数の飛来物の計算結果が混在して記録されることになり、飛来物の違いによるデータの区別がつかなくなる可能性がある。

【参考】 Fortran プログラムでの読み込みの書式は以下の通り

```
open(18, file=fninn_thrown_in, FORM=' FORMATTED', status=' old', err=999)]
  read(18, '(a)') qsCH_dmy !1行目ダミーで読み込み
  read(18, '(a)') qsCH_dmy !2行目ダミーで読み込み
  read(18, *) ichk_thrown_in !始めの整数を1つだけ読み込む
  read(18, *) Rctmax_FS_dmy !始めの実数を1つだけ最大接線風速半径として読み込む
! **** 以下、ループで読み込み
if(ichk_thrown_in==2) then      x, y座標のみ読み込み
  read (18, *, end=901) iqs_count, qsx, qsy
  qsx=qsx/Rctmax_FS_dmy*Rctmax_FS
  qsy=qsy/Rctmax_FS_dmy*Rctmax_FS
endif
if(ichk_thrown_in==3) then      x, y, z座標の読み込み
  read (18, *, end=901) iqs_count, qsx, qsy, qsz
  qsx=qsx/Rctmax_FS_dmy*Rctmax_FS
  qsy=qsy/Rctmax_FS_dmy*Rctmax_FS
endif
! **** ループここまで
! ファイルの最後に到達した場合は、初めに戻ってくり返し読み込む。
```

2.5.4 計算状況のログ格納用ファイル Log.txt, Rec.dat の内容

計算実行中の状況が記録される。記録される内容は、cnt1.txt ファイルの内容、気流条件、渦の種類、デブリの計算条件、その他の計算条件、解析領域の風速設定格子形状、デブリの投入条件、地面に落下するまでの飛散性状を表す代表的な値（最大速度、最大加速度、最遠位置の座標）などが記録される。Log.txt ファイルおよび Rec.dat ファイルはメンテナンス用の記録ファイルなので、計算が正常に終了した場合は消去してもよい。

2.5.5 飛散運動の計算結果格納用ファイル Rec.txt の内容と書式

飛来物の飛散中の諸特性が記録される。ファイルの中身とその書式を以下に示す。

*ファイルの中身

```

Steps UV-Rmax UW-Rmax 粒子No 内部No 到達数 除外数 in-X[m] in-Y[m] in-Z[m] UV-Rmax UW-Rmax UV-max UW-max W-max W-min Acc-max H-Rmax D-Rmax
360 52.81 56.46 1323 1323 1 1 11.50 138.00 40.00 47.24 82.21 38.32 69.00 0.00 -24.81 9.81 40.00 63
360 52.81 56.46 1372 1372 2 2 17.25 138.00 40.00 44.24 81.21 41.32 70.00 0.00 -24.81 9.81 40.00 58
360 52.81 56.46 1421 1421 3 3 23.00 138.00 40.00 60.24 81.43 32.71 0.00 -24.80 9.81 40.00 62
.....

```

ここで [] は小文字のスペース 1 文字を表す。

- ・ 1 行目はコメント文
- ・ 2 行目以降には、地面に落下した飛来物の以下の 1 から 17 までの諸特性を、地面に落下した順に 1 行に記述。
 1. 飛来物が地面に落下した時点の飛散計算の繰り返し回数（半角文字 7 桁の自然数）
 2. 飛来物が地面に落下した時点までに計算を行った全ての飛来物の対地実効速度の最大値（[m/s]、半角文字 8 桁の実数）
 3. 飛来物が地面に落下した時点までに計算を行った全ての飛来物の対地水平速度の最大値（[m/s]、半角文字 8 桁の実数）
 4. 飛来物の投入番号（半角文字 7 桁の自然数）
 5. 飛来物の内部計算の総数（半角文字 7 桁の自然数）
 6. 地面に到達した飛来物の総数（[個]、半角文字 7 桁の自然数）
 7. 地面に到達した、および、領域外に出て除外した飛来物の総数（[個]、半角文字 7 桁の自然数）
 8. 投入位置（x、y、z 座標）（[m]、半角文字 8 桁の実数、注：渦中心と共に移動する座標系）
 9. 最大対地水平速度（[m/s]、半角文字 8 桁の実数）
 10. 最大対地実効速度（[m/s]、半角文字 8 桁の実数）
 11. 最大水平速度（[m/s]、半角文字 8 桁の実数、注：渦中心と共に移動する座標系）
 12. 最大実効速度（[m/s]、半角文字 8 桁の実数、注：渦中心と共に移動する座標系）
 13. 最大鉛直速度（[m/s]、半角文字 8 桁の実数）

14. 最小鉛直速度 ([m/s]、半角文字 8 桁の実数)
15. 最大加速度 ([m/s²]、半角文字 8 桁の実数)
16. 最高高度 ([m]、半角文字 8 桁の実数)
17. 放出点からの最大水平距離 ([m]、半角文字 8 桁の実数)

ここで、8. 投入位置、11. 最大水平速度、および、12. 最大実効速度だけは、地上の渦中心を原点 O ($0[m], 0[m], 0[m]$) とし、渦の進行方向を x 軸、鉛直上方を z 軸にとり、渦中心と共に一定速度 (渦の移動速度) で移動する右手系の直角座標系から見た値。その他は、計算を開始した時点の地上の渦中心を原点 o ($0[m], 0[m], 0[m]$) とし、渦の進行方向を x 軸、鉛直上方を z 軸にとった、空間に固定された右手系の直角座標系で表される。 x 、 y 、 z 軸方向風速成分をそれぞれ u 、 v 、 w とすると、最大対地実効速度は $\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ で、最大対地水平速度は $\sqrt{u^2 + v^2}$ で与えられる。

2.5.6 飛来物の最大速度の納用ファイル Stt.txt の内容と書式

計算結果から最も早い速度を持った飛来物の情報が出力される。

最大速度の納用ファイル Stt.txt の書式と、格納される変数を以下に説明する。

*ファイルの中身

```

** 最大対地水平速度 [m/s] 対地座標 [m] 高度 [m] 対地速度成分 [m/s] 加速度成分 [m/s2]
   Max_relative_UVmax X Y Z U V W Au Av Aw
   53.84 161.10 -50.93 24.93 53.84 0.83 -12.88 -0.11 6.62 -7.11
*****
** 最大対地実効速度 [m/s] 対地座標 [m] 高度 [m] 対地速度成分 [m/s] 加速度成分 [m/s2]
   Max_relative_UVWmax X Y Z U V W Au Av Aw
   57.83 126.97 -43.85 0.10 53.02 4.51 -22.66 -1.55 0.23 -6.35

```

ここで [] は小文字のスペース 1 文字を表す。

*出力の意味と書式

- 1, 2, 4, 5, 6 行目はコメント文
- 3 行目に最大対地水平速度と、その値が生じた際の、位置、速度成分、加速度成分を出力する。
 全ての値は、計算を開始した際の地上の渦中心を $o(0[m], 0[m], 0[m])$ とし、渦の進行方向を x 軸、鉛直上方を z 軸に取った、空間に固定された右手系の直角座標系で表される。
 ここで、 x, y, z 軸方向風速成分をそれぞれ u, v, w とすると、最大対地水平速度は $\sqrt{u^2 + v^2}$ で与えられる。
- 7 行目に最大対地実効速度と、その値が生じた際の、位置、速度成分、加速度成分を出力する。
 ここで、最大対地実効速度は $\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ で与えられる。

【参考】 Fortran プログラムでの出力書式は以下の通り

```

open(10, file=' ***_*****.Stt.txt', FORM=' FORMATTED')
write(10, '(a)') '** 最大対地水平速度 [m/s] 対地座標 [m] 高度 [m] 対地速度成分 [m/s] 加速度成分 [m/s2]'
write(10, '(a)') ' Max_relative_UVmax X Y Z U V W Au Av Aw'
write(10, '(a, f8.2, a, 9f8.2)') ' ', Rec_vel_max(0, 0), ' ', Rec_vel_max(0, 1:9)
write(10, '(a)') '*****'
write(10, '(a)') '** 最大対地実効速度 [m/s] 対地座標 [m] 高度 [m] 対地速度成分 [m/s] 加速度成分 [m/s2]'
write(10, '(a)') ' Max_relative_UVWmax X Y Z U V W Au Av Aw'
write(10, '(a, f8.2, a, 9f8.2)') ' ', Rec_vel_max(1, 0), ' ', Rec_vel_max(1, 1:9)
close(10)

```


o (0[m], 0[m], 0[m]) とし、渦の進行方向を x 軸、鉛直上方を z 軸にとった、空間に固定された右手系の直角座標系で表される。 x 、 y 、 z 軸方向風速成分をそれぞれ u 、 v 、 w とすると、最大対地実効速度は $\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ で、最大対地水平速度は $\sqrt{u^2 + v^2}$ で与えられる。

【参考】 Fortran プログラムでの出力書式は以下の通り

```
write(27, '(i6, f8.3, 30f8.2)') Nstp_ND &  
  , (Time_now_ND-dt_FD_ND)*PjcT_FD_FS &  
  , UVV_Rma_FD(m)*PjcU_FD_FS &  
  , chk_UVV*PjcU_FD_FS &  
  , UVW_Rma_FD(m)*PjcU_FD_FS &  
  , chk_UVW*PjcU_FD_FS &  
  , Vlc_FD(1, m)*PjcU_FD_FS+Tv_FS &  
  , Vlc_FD(2:3, m)*PjcU_FD_FS &  
  , Xyz_FD(1, m)*PjcX_FD_FS+Tv_FS*(Time_now_ND-dt_FD_ND)*PjcT_FD_FS &  
  , Xyz_FD(2:3, m)*PjcX_FD_FS &  
  , (UVW_ND(1:3)-Vlc_FD(1:3, m))*PjcU_FD_FS
```

参考文献

- 2.1 立川正夫・福山雅弘（1980）：平板の空力特性と飛散の性状について，第6回風工学シンポジウム論文集，pp.231-238.
- 2.2 J. D. Holmes, C. J. Baker, Y. Tamura : Short note Tachikawa number: A proposal, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.94, pp.41-47, 2006.
- 2.3 Simiu, Emil, and Robert H. Scanlan, Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, August 1996.
- 2.4 E. Simiu and M. Cordes : Tornado-Borne Missile Speeds, NBSIR 76-1050, Inited States Nuclear Regulatory Commission, 1976.4.
- 2.5 Maruyama T.: Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. vol.99(4), pp.249-256, 2011.4.