

第 11 条 外部からの衝撃による損傷の防止（竜巻）

<目 次>

1. 設計方針
2. 竜巻に対する防護
3. 竜巻検討地域の設定
4. 基準竜巻・設計竜巻の設定
5. 竜巻影響評価

（別 添）

- 別添 1 気象モデルの概要
- 別添 2 分析対象事例の個別概要
- 別添 3 竜巻飛来物に関する現地調査について
- 別添 4 飛散評価手法について
- 別添 5 外部事象防護施設に対する竜巻飛来物の衝突による影響について

1. 設計方針

外部事象防護施設は、最大風速 100m/s の竜巻が発生した場合においても、基本的安全機能を損なわないために、竜巻飛来物の発生防止対策及び竜巻防護対策を行う。

・ 竜巻飛来物の発生防止対策

屋外において飛散するおそれのある資機材及び車両については、飛来時の運動エネルギー等を評価し、外部事象防護施設への影響の有無を確認する。外部事象防護施設へ影響を及ぼす大型の資機材及び車両については、飛散防止措置として、固縛、固定又は退避を実施する。

・ 竜巻防護対策

金属キャスクに対しては、竜巻飛来物が使用済燃料貯蔵建屋（以降「貯蔵建屋」という。）の開口部を通過して衝突する可能性は極めて低く、また、飛来物の衝突を仮定しても基本的安全機能への影響は小さいため、竜巻による直接的な影響を考慮する必要はない。

その上で、貯蔵建屋に対しては、金属キャスクを内包する外殻の施設として、基準竜巻、設計竜巻及び設計荷重を適切に設定し、設計荷重に対して、構造健全性を維持することにより基本的安全機能を損なわない設計とする。

また、設計飛来物が貯蔵建屋に衝突したとしても、貫通、裏面剝離の発生により、使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能を損なわない設計とする。

竜巻は積乱雲や積雲に伴って発生する現象であり、積乱雲の発達時に竜巻と同時に発生する可能性がある自然現象は、落雷、積雪、ひょう及び降水であるが、設計上考慮する竜巻の発生頻度が極めて低いこと及びこれらの自然現象の組合せにより発生する荷重は設計竜巻荷重に包含されることから、荷重の組み合わせは考慮しない。

2. 竜巻に対する防護

2.1 竜巻防護施設に関するガイドと関連法令との関係

使用済燃料貯蔵施設（以下「貯蔵施設」という。）における外部事象防護施設については、関連する規則とガイドの定義を考慮して決定する。

ガイドにおいては、設計対象施設として「竜巻防護施設」「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の耐震設計上の重要度分類における耐震Sクラスの設計を要求される設備（系統、機器）、建屋及び構築物等、及び「竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設」（当該施設の破損等により竜巻防護施設に波及的影響を及ぼして安全機能を喪失させる可能性が否定できない施設、又はその施設の特定の区画（竜巻防護施設を内包する区画））を規定している。また、ガイドにおける解説2.1において、「竜巻防護施設の外殻となる施設等（竜巻防護施設を内包する建屋・構築物等）による防護機能によって、設計竜巻による影響を受けないことが確認された施設については、設計対象から除外できる」との規定がある。

一方、基準規則では、第九条において地震に対して基本的安全機能が損なわれるおそれのないものであることが要求されており、同解釈第9条第2項及び第3項において基本的安全機能を確保する上で必要な施設及び耐震設計に関して規定されている。

ガイドの記載に対する基準規則の規定との関係について以下に示す。

ガイド (2.1 設計対象施設)	基本的安全機能を確保する上で必要な施設(基準規則の解釈第9条2)		耐震クラス (基準規則の解釈第9条の3 → 実用炉設置許可基準解釈第4条3)	ガイド(解説2.1 設計対象施設)
(1)竜巻防護施設 (耐震Sクラス)	金属キャスク	①使用済燃料貯蔵設備本体 (金属キャスク等)	Sクラス	竜巻防護施設の外殻となる施設(使用済燃料貯蔵建屋)に内包される施設
(2)竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設	貯蔵架台	②使用済燃料の受入れ施設(その機能喪失により、金属キャスクが有する基本的安全機能を損なうおそれがないことが明らかであるものを除く。)	Bクラス	
	受入れ区域 搬送台車			
	使用済燃料貯蔵建屋	(その機能喪失により基本的安全機能の遮蔽及び除熱機能の一部を損なうおそれがあるため)		—

2.2 外部事象防護施設

貯蔵施設においては、竜巻防護施設としては耐震Sクラスの設計を要求される設備である金属キャスクが該当し、波及的影響を及ぼし得る施設としては、貯蔵時に金属キャスクを固縛する貯蔵架台、受入れ区域天井クレーン、搬送台車、及び金属キャスクを含むこれらの設備を内包する貯蔵建屋が該当すると考えられる。ただし、貯蔵架台においては、金属キャスクと一体で貯蔵状態となるため、耐震設計上は金属キャスクと同等の耐震Sクラスとしている。

これらのうち、基本的安全機能を有する金属キャスク、また、金属キャスクを内包し遮へい機能及び除熱機能の一部を担う貯蔵建屋を外部事象防護施設（以下「防護施設」という。）とする。

なお、ガイドにおける解説2.1において、「竜巻防護施設の外殻となる施設等(竜巻防護施設を内包する建屋・構築物等)による防護機能によって、設計竜巻による影響を受けないことが確認された施設については、設計対象から除外できる」と規定されており、この考え方に基づくと、受入れ区域天井クレーン及び搬送台車については、これらの設備を内包する貯蔵建屋の防護機能を評価することにより設計竜巻による影響を受けないことを確認した上で、防護施設から除外するものとする。

したがって、防護施設を金属キャスク及び貯蔵建屋とし、基準竜巻、設計竜巻及び設計荷重を適切に設定することで、竜巻によってこれらがもつ基本的安全機能を損なわない設計とする。

2.3 関連規則（抜粋）

(1) 使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則

・ 第十一条（外部からの衝撃による損傷の防止） 第一項

使用済燃料貯蔵施設は、想定される自然現象(地震及び津波を除く。)が発生した場合においても基本的安全機能を損なわないものでなければならない。

・ 規則第十一条の解釈 第二項

2 第一項及び第二項に規定する「基本的安全機能を損なわないもの」とは、以下の設計をいう。

一 使用済燃料貯蔵施設を構成する金属キャスクが、必要に応じてその他の構築物、系統及び機器と相まって、使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能を維持できること。

二 貯蔵建屋を設置する場合には、外部からの衝撃によって貯蔵建屋が損傷したとしても、次の事項を満足すること。

①金属キャスクが有する基本的安全機能に影響が波及しないこと。

・ 第九条（地震による衝撃による損傷の防止） 第一項， 第二項， 第三項

使用済燃料貯蔵施設は、地震力に十分に耐えることができるものでなければならない。

2 前項の地震力は、地震の発生によって生ずるおそれがある使用済燃料貯蔵施設の安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度に応じて算定しなければならない。

3 使用済燃料貯蔵施設は、その供用中に当該使用済燃料貯蔵施設に大きな影響を及ぼすおそれがある地震による加速度によって作用する地震力に対して基本的安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。

・ 規則第九条の解釈 第二項， 第三項

2 第九条第二項に規定する「地震の発生によって生ずるおそれがある使用済燃料貯蔵施設の安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度」とは、地震により発生するおそれがある使用済燃料貯蔵施設の安全機能の喪失(地震に伴って発生するおそれがある

津波及び周辺斜面の崩壊等による安全機能の喪失を含む。)及びそれに続く放射線による公衆への影響を防止する観点から、各施設の安全機能が喪失した場合の影響の相対的な程度をいう。使用済燃料貯蔵施設は、その程度に応じて、以下のように分類するものとする。

一 基本的安全機能を確保する上で必要な施設

基本的安全機能を有する施設及びその機能喪失により基本的安全機能を損なうおそれがある施設をいい、少なくとも次の施設を含む。

- ①使用済燃料貯蔵設備本体（金属キャスク等）
- ②使用済燃料の受入れ施設（その機能喪失により、金属キャスクが有する基本的安全機能を損なうおそれがないことが明らかであるものを除く。）
- ③津波防護機能を有する設備（以下、「津波防護施設」という）及び浸水防止機能を有する設備（以下、「浸水防止設備」という。）
- ④敷地における津波監視機能を有する施設（以下、「津波監視設備」という。）

二 その他の安全機能を有する施設

安全機能を有する施設のうち、上記一に属する施設以外の施設をいう。

3 第九条第一項に規定する「地震力に十分に耐えること」を満たすために、使用済燃料貯蔵施設の耐震設計に当たっては、以下の方針によること。

一 基本的安全機能を確保する上で必要な施設（使用済燃料貯蔵設備本体に限る。）

- ①「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」（原規技発第 1306193 号（平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定））（以下、「実用炉設置許可基準解釈」という。）第四条三の一を準用すること。

貯蔵時に金属キャスクを床等に固定しない場合は、上記の規定にかかわらず、金属キャスクは、地震力による転倒等によって作用する衝撃力等に対して、おおむね弾性状態に留まる範囲で

耐えること。

- 二 基本的安全機能を確保する上で必要な施設（使用済燃料貯蔵設備本体、津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を除く。）及びその他の安全機能を有する施設

①実用炉設置許可基準解釈第四条三の二又は三を準用すること。

2.4 ガイド「2.1 設計対象施設」における記載

- ・ 竜巻防護施設：

「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の耐震設計上の重要度分類における耐震Sクラスの設計を要求される設備(系統・機器)及び建屋・構築物等とする。

(ガイド「解説 2.1 設計対象施設」における記載(抜粋))：

設計竜巻荷重は、基準地震動 S_s による地震荷重と同様に施設に作用するものと捉え、設計対象施設は、耐震設計上の重要度分類を引用して、耐震Sクラス施設及び耐震Sクラス施設に波及的影響を及ぼし得る施設とした。ただし、竜巻防護施設の外壳となる施設等(竜巻防護施設を内包する建屋・構築物等)による防護機能によって、設計竜巻による影響を受けないことが確認された施設については、設計対象から除外できる。

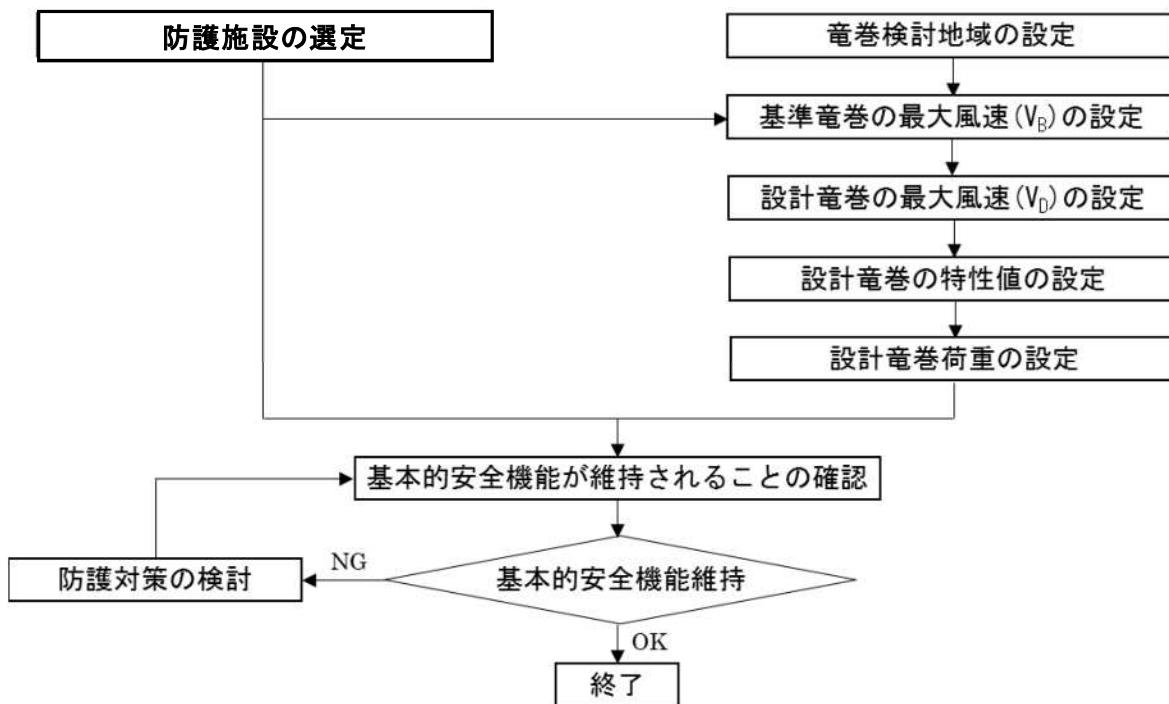
- ・ 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設：

当該施設の破損等により竜巻防護施設に波及的影響を及ぼして安全機能を喪失させる可能性が否定できない施設、又はその施設の特定の区画*。

*: 竜巻防護施設を内包する区画

2.5 評価の基本的な考え方

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



2.6 防護施設に作用する荷重

以下に示す設計竜巻荷重を適切に設定する。

(1) 風圧力による荷重

設計竜巻の最大風速による荷重

(2) 気圧差による荷重

設計竜巻における気圧低下によって生じる防護施設の内外の気圧差による圧力荷重

(3) 飛来物の衝突荷重

設計竜巻によって防護施設に衝突し得る飛来物（以下「設計飛来物」という。）が防護施設に衝突する際の衝突荷重

3. 竜巻検討地域の設定

3.1 竜巻検討地域の設定

3.1.1 貯蔵施設周辺における竜巻の発生状況

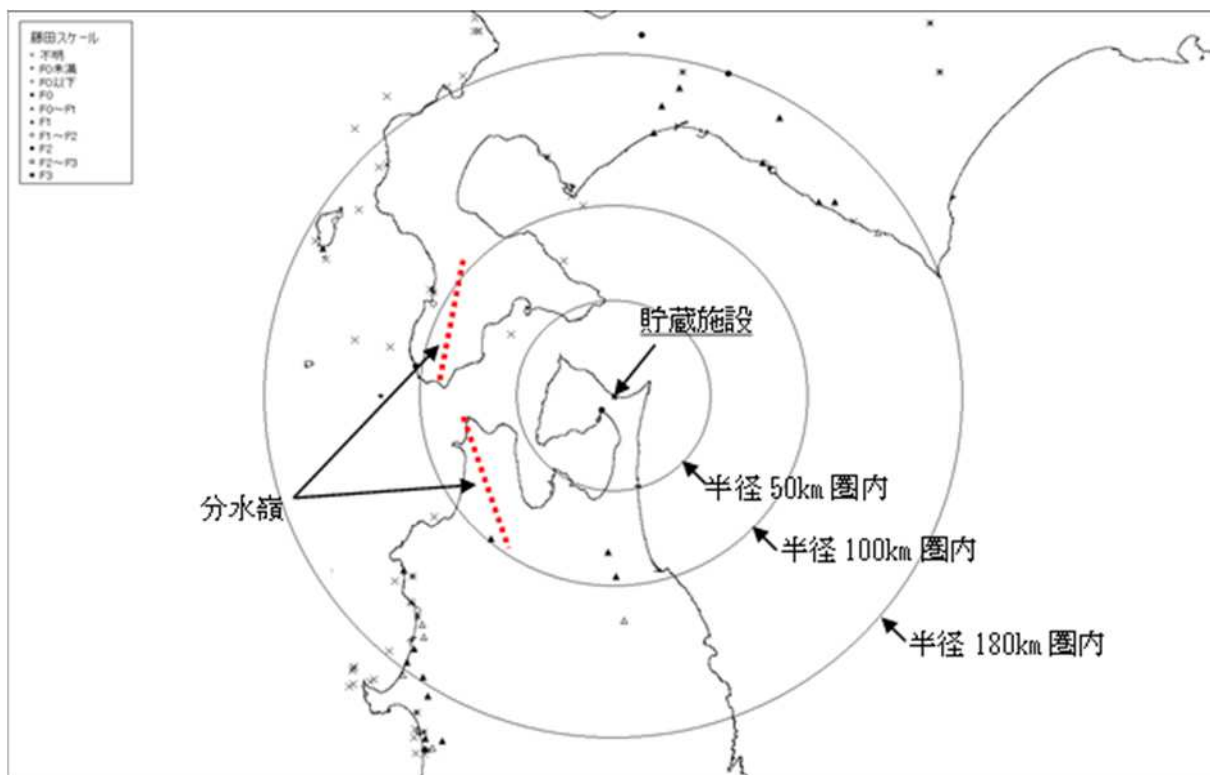
貯蔵施設が立地する地域は青森県北部の下北半島に位置し、施設は陸奥湾と津軽海峡の間の狭隘な地点の津軽海峡側に立地している。青森県は、八甲田山系を境にして西側の日本海側気候区と東側の太平洋側気候区に分けられるが、津軽海峡に面した下北半島や津軽半島北部は低温と強風（やませ）を特徴とした独立の気候区を形成している。貯蔵施設が立地する地域は太平洋側に近く、冬は降雪の特徴などから日本海側の気候の影響も若干ありうるが、ほぼ太平洋側の気候区分に該当する。

貯蔵施設の近辺における竜巻の発生状況について、気象庁が公開している「竜巻等の突風データベース（1961年～2012年6月）」（以下、「気象庁竜巻データベース」という。）をもとに、IAEA基準（METEOROLOGICAL AND HYDROLOGICAL HAZARDS IN SITE EVALUATION FOR NUCLEAR INSTALLATIONS No. SSG-18 2011）で示された一般的な対象評価範囲10万km²を目安として、貯蔵施設を中心とした半径約180km圏内の地域における1961年～2012年6月での竜巻発生状況について確認した。その結果を第1図に示す。半径180km圏内については、ガイドにおいてIAEAの基準で目安としている10万km²圏に相当するものである。

竜巻の発生状況については、気象庁においても採用している突風の強さを示す「藤田スケール」（以下、「Fスケール」という。第1表参照。）で区別した。調査した範囲においては、全般的に竜巻の発生数は少なく、特に貯蔵施設から半径50～100km内の近辺においては過去に発生した竜巻は少ない。

第1表 藤田スケール（気象庁HPより作成）

スケール	Fスケールによる風速 (m/s)	想定される被害
F0	17-32	軽微な被害
F1	33-49	中程度の被害
F2	50-69	大きな被害
F3	70-92	重大な被害
F4	93-116	ほぼ全壊に近い壊滅的な被害
F5	117-142	完全な破壊



第1図 貯蔵施設近辺における過去の竜巻発生状況(Fスケール別)

調査範囲において発生した竜巻のうち、最大のものはスケール F2 である以下の2つであった。

- ・2004年10月22日16時50分 北海道 日高支庁門別町 F2[※]
 - ・1965年09月05日11時40分 青森県 むつ市
- (F2)[※] (別添2 11項参照)

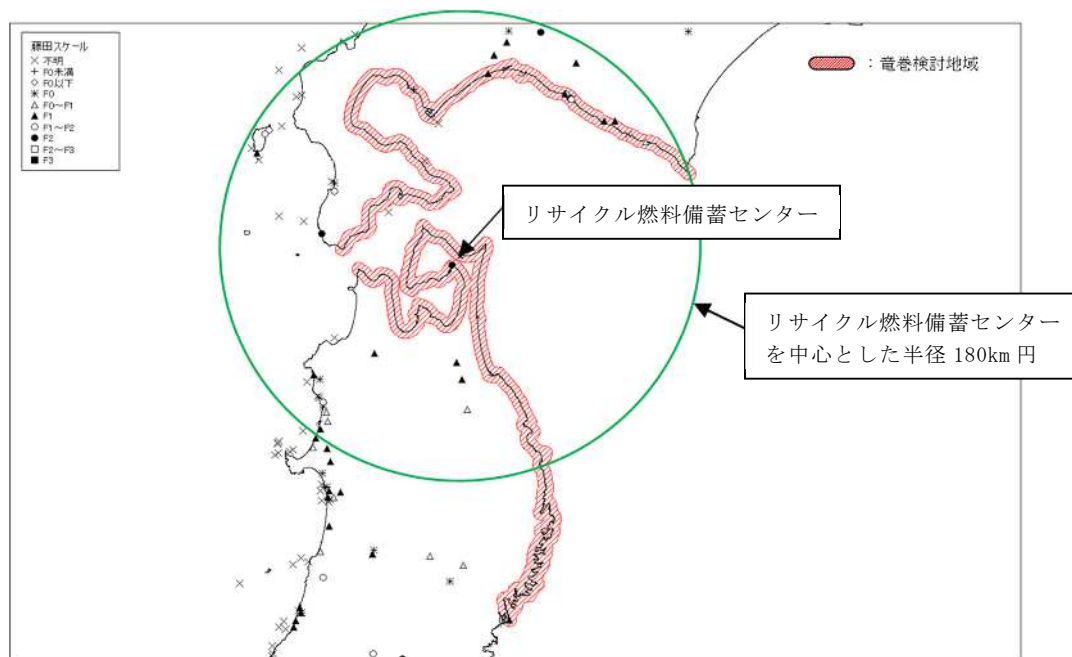
※ F スケールは、ア) 被害の詳細な情報等から推定できたもの、イ) 文献等からの引用または被害のおおまかな情報等から推定したものがあり、F2以上の事例ではア) とイ) を区別し、イ) の場合には値を括弧で囲んでいる。(気象庁HPより抜粋)

3.1.2 竜巻検討地域の設定

貯蔵施設に対する竜巻検討地域については、ガイド及びガイド解説を参考に、貯蔵施設が立地する地域と気象条件の類似性、また貯蔵施設近辺における竜巻の発生状況も鑑み以下の点を考慮して検討を行った。

- ・ IAEA の基準を参考とし、貯蔵施設を中心とした半径 180 km (約 10 万 km²) の範囲を目安とする。
- ・ 日本海側と太平洋側では気象条件が異なることを考慮して、北海道南部及び東北地方北部の太平洋側を候補とする。
- ・ 竜巻検討地域の端部境界については、分水嶺等を参考に設定する。
- ・ 貯蔵施設は海岸線から約 500m の地点に立地しているため、ガイドを参考に海岸線から陸側 5 km 及び海側 5 km の範囲を設定する。

その結果、北海道南部の太平洋側（白神岬～襟裳岬）及び東北地方の太平洋側（青森県竜飛岬～宮城県御崎岬）の海岸線に沿った海側 5 km 及び陸側 5 km の地域（面積約 13200 km²）を竜巻検討地域として設定することとした（第 2 図）。



3.2 竜巻検討地域設定の妥当性確認

設定した竜巻検討地域設定の妥当性について、以下の観点から確認を実施した。

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

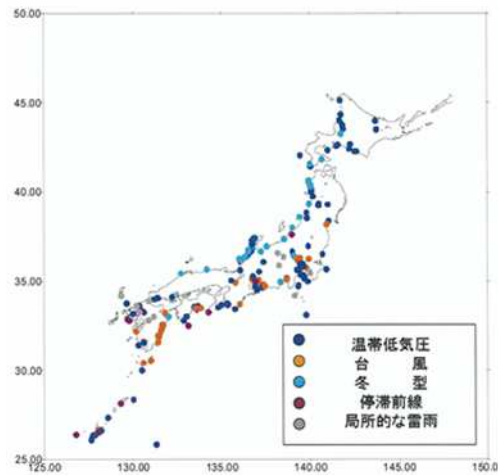
ガイド及びガイド解説を参考とし、竜巻発生要因となる気象条件（総観場）を確認する観点から、(1)及び(2)の分析により地域特性を確認し、竜巻検討地域を設定した。また、一般的に大気現象は時空間スケールの階層構造が見られ、ある大気現象はスケールの小さな現象を内包しているため、大きな竜巻の発生要因となる気象場（以下、「環境場」という。）の形成のし易さを把握する観点から、(3)の分析により竜巻の発生スケールに近いメソスケールの環境場が有する地域性と齟齬がないことについても確認した。

3.2.1 総観場の分析に基づく地域特性の検討

竜巻は、台風、前線、低気圧等様々なパターンで発生する。「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が東京工芸大学に委託した研究の成果、以下、「東京工芸大委託成果」という。）によると、第3図に示すように、停滞前線や温帯低気圧起因の竜巻は日本全国で起こっているが、台風起因の大きな竜巻は太平洋側で多く発生している。

竜巻の発生要因に基づく地形性としては、青森県太平洋側から岩手県における竜巻の発生状況は、日本海側や茨城県以南の太平洋側における発生状況と特徴が異なっている。東北地方の日本海側の地域においては、秋田県から山形県の海岸線沿いに竜巻の発生が集中している地域がある。また、宮城県以南の太平洋側の地域においては台風による竜巻の発生がみられるが、これらと比較し貯蔵施設の位置する東北地方北部の太平洋側沿岸付近及び海上においては竜巻の発生はほとんどなく、台風起因によるものはない。同様に本州の日本海側においても台風起因の竜巻は発生していない。一方、冬型起因の竜巻は、本州および北海道の日本海側や北海道の南側で多く発生している。また海を

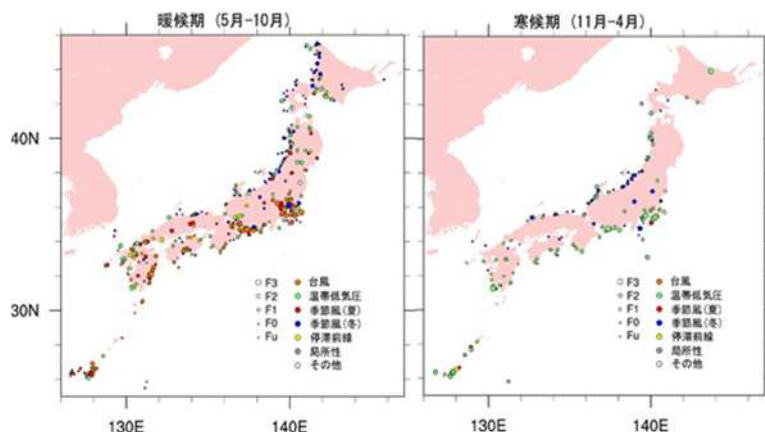
挟んだ対岸の北海道南部では、温帯低気圧や冬型気圧配置による竜巻が比較的多く発生している。



(東京工芸大委託成果より)

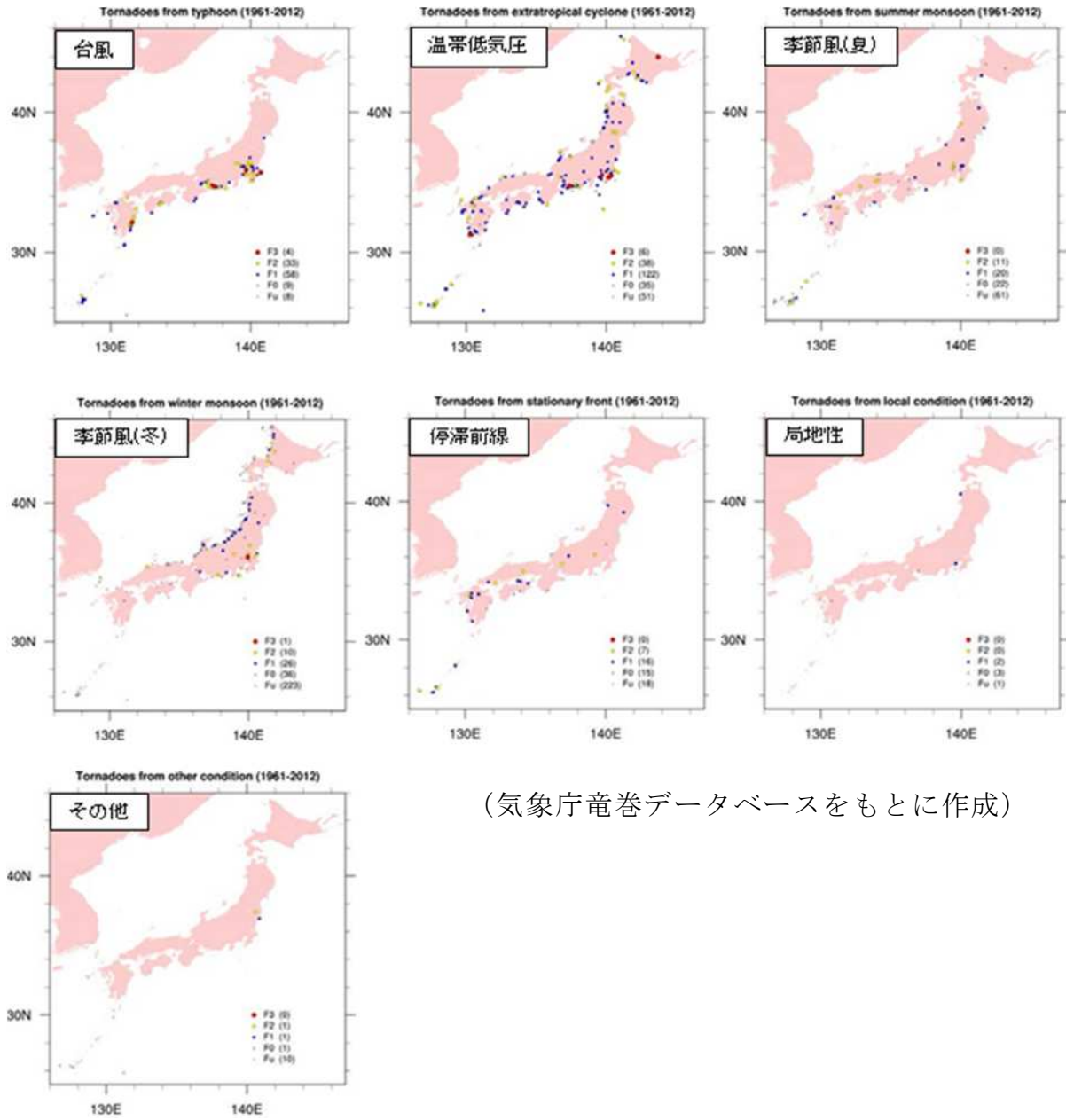
第3図 1997年～2006年までの10年間における原因別竜巻発生場所

気象庁竜巻データベースでは、竜巻を発生させた総観場（発生時の気象条件）について約40種に分類しているが、ガイド及びガイド解説を参考に、竜巻を発生させる親雲の発生要因を考慮して7種に再編し、発生分布の特徴を分析した。竜巻を発生させる総観場について竜巻の発生要因に基づく暖候期及び寒候期における発生分布、及び発生要因別の発生分布についてそれぞれ第4図、第5図に、また発生要因別の特徴について第2表にそれぞれ示す。



(気象庁竜巻データベースをもとに作成)

第4図 竜巻の発生要因別地域分布（暖候期・寒候期別）



(気象庁竜巻データベースをもとに作成)

第5図 竜巻の発生要因別地域分布 (要因別)

第2表 総観場の分類による竜巻の発生要因別の地域分布の特徴

総観場	気象庁竜巻データベースにおける	発生分布の特徴
台風	台風	台風を取り巻く雲により発生。関東以西の太平洋側(特に東～南方向に開けた地域)で発生頻度が高く、F3スケールの強い竜巻も多い。
温帯低気圧	南岸低気圧，日本海低気圧，二つ玉低気圧，東シナ海低気圧，オホーツク海低気圧，その他(低気圧)，寒冷前線，温暖前線，閉塞前線	寒気と暖気が接して傾圧不安定による組織的な雲が形成する環境場。全国的に発生頻度が高いが，特に南からの下層の暖気流が山岳等で遮られない関東以西の太平洋側で比較的多い。F3スケールの竜巻も見られる。
季節風(夏)	暖気の移流，熱帯低気圧，湿舌(暖湿流)，太平洋高気圧	主に暖気流により親雲が形成される環境場。関東以西の太平洋側や内陸を中心に，全国的に発生している。
季節風(冬)	寒気の流れ，気圧の谷，大陸高気圧，季節風	大気の上層部に北～西からの寒気が流入することにより大気の状態が不安定になり，竜巻の親雲が形成される環境場。日本海側や関東以北で発生頻度が高い。
停滞前線	停滞前線，梅雨前線，前線帯，不安定線，その他(前線)	南からの暖湿流により親雲が形成される環境場。関東以西の太平洋側や内陸で発生頻度が高い。
局地性	局地性擾乱，雷雨(熱雷)，雷雨(熱雷を除く)，地形効果，局地性降水	局地的な大気の循環により親雲が形成される環境場。主に内陸で発生頻度が高い。
その他	移動性高気圧，中緯度高気圧，オホーツク海高気圧，帯状高気圧，その他(高気圧)，大循環異常，その他	上記のいずれにもあてはまらない環境場。発生頻度は低い。

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

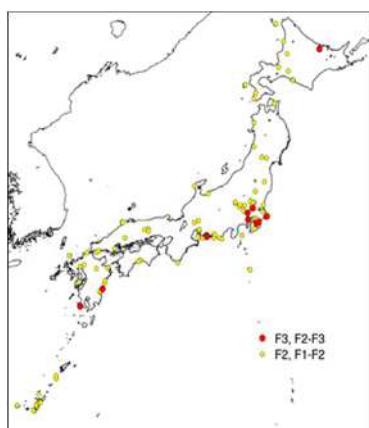
①竜巻の発生に関しては、年間を通じて暖候期(5月～10月)と寒候期(11月～4月)とに分けると、台風等の影響もあり暖候期の方が発生数が多い。(第4図)

②関東以西の太平洋側では台風起因の大きな竜巻が多く発生しているのに対し、九州を除く日本海側地域や関東以北の太平洋側及び北海道では発生していない。(第5図(台風))また、台風は北上するにつれて衰弱しやすい特性を有していることから、仮に台風起因の竜巻が発生した場合も、規模の大きな竜巻の発生可能性は低いと考えられる。

③温帯低気圧や夏の季節風に起因する竜巻は全国で発生しているが、F3規模の竜巻は主に関東以西の太平洋側での発生が多い。北海道北東部(佐呂間地区)で発生したF3規模竜巻については温帯低気圧に伴う寒冷前線の影響が強く、また局地的な影響もあるため特異な事例と考えられる。(第5図(温帯低気圧)、(季節風(夏)))

④冬の季節風に起因する竜巻は九州を除く日本海側地域に多く発生しているが、規模的にはF3竜巻の発生は未だ確認されておらず、F2竜巻が1件発生している。(第5図(季節風(冬)))

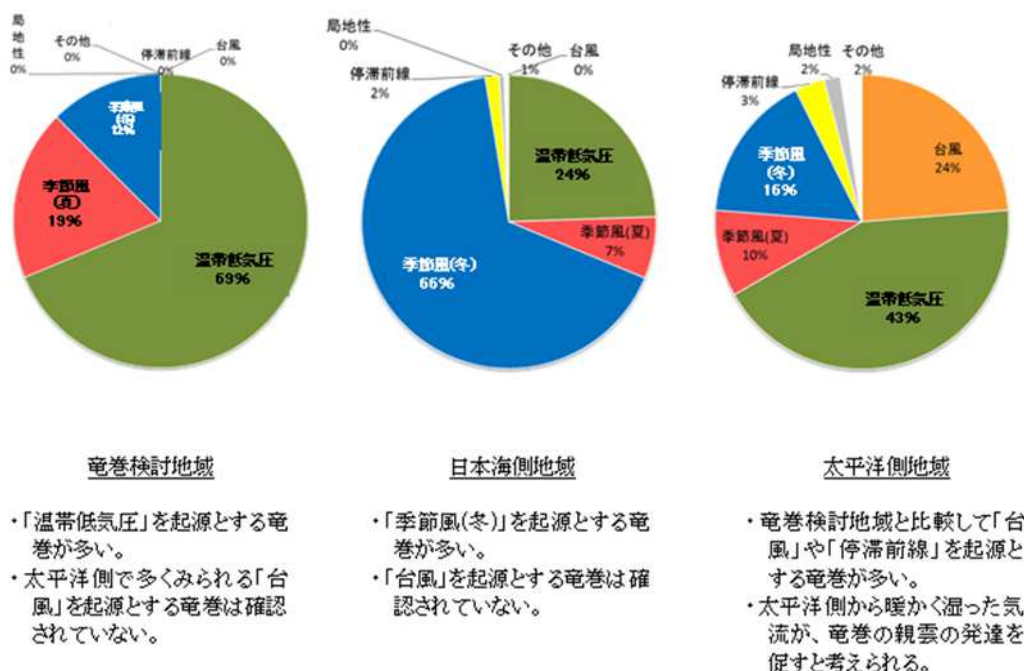
また、第6図にF2以上の竜巻発生箇所について示す。上記③で述べたとおり、F3レベルの大規模な竜巻は佐呂間地区を除き主に関東以西の太平洋側で発生していることが確認できた。



第6図 F2以上の竜巻発生箇所

第7図に、竜巻検討地域と太平洋側及び日本海側との竜巻の総観場の特徴の比較についてそれぞれ示す。竜巻検討地域における発生要因は、太平洋側と似て温帯低気圧による要因がもっとも多くなっているが、太平洋側での大きな要因である台風を起因とする竜巻は発生していない。また、日本海側の総観場とも違っている。

この図に示すとおり、日本海側と太平洋側では竜巻発生要因となる総観場が大きく異なっているが、竜巻検討地域についてはそのどちらにも当てはまらず、どちらかといえばやや太平洋側の総観場に似ているといえることから、竜巻検討地域の設定において日本海側地域を除いて設定したことに対する妥当性について確認することができたと考える。



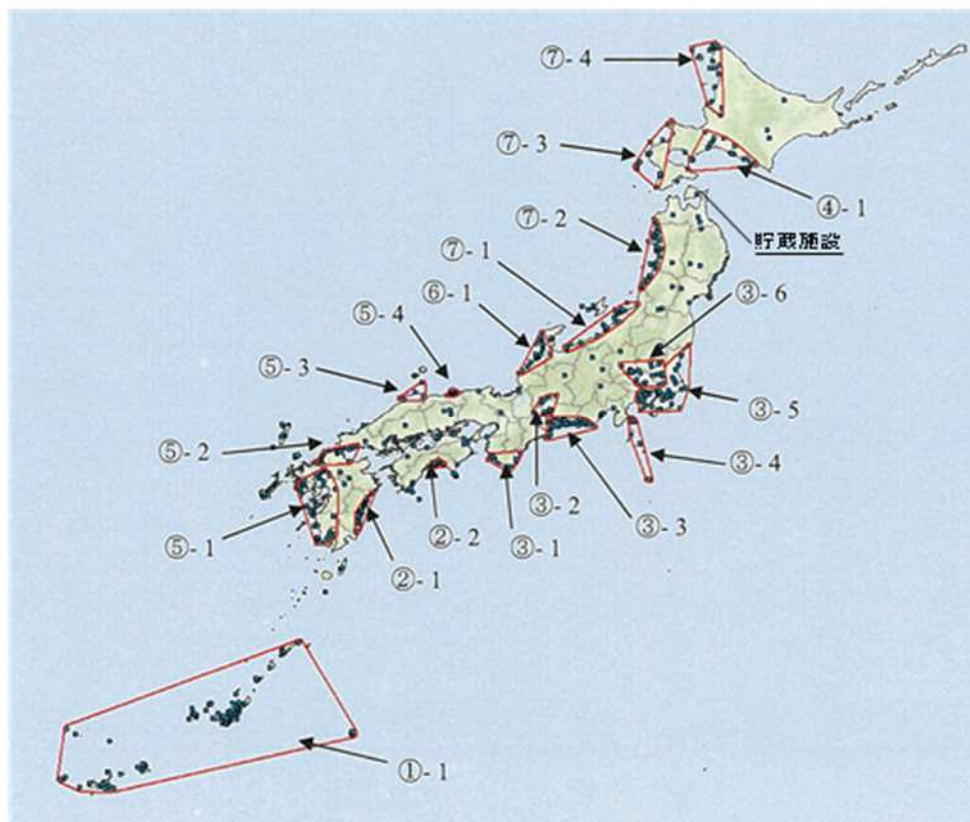
第7図 竜巻の総観場の特徴の比較

3.2.2 過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の検討

貯蔵施設が立地する地域は、津軽海峡側の海岸線の近く(海岸線から約500m)であり、ガイドにおける解説3.2に示された、「海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲を目安に竜巻検討地域を設定する」旨の記述は貯蔵施設の立地条件に当てはまっていると考えられる。

日本で竜巻が集中する地域については、ガイド解説において、全国19個の

竜巻集中地域が示されている（第8図）。貯蔵施設が立地する地域は日本全国規模で見ると竜巻の発生は比較的少ない地域であり，19個の竜巻集中地域からも離れている。



（東京工芸大委託成果より）

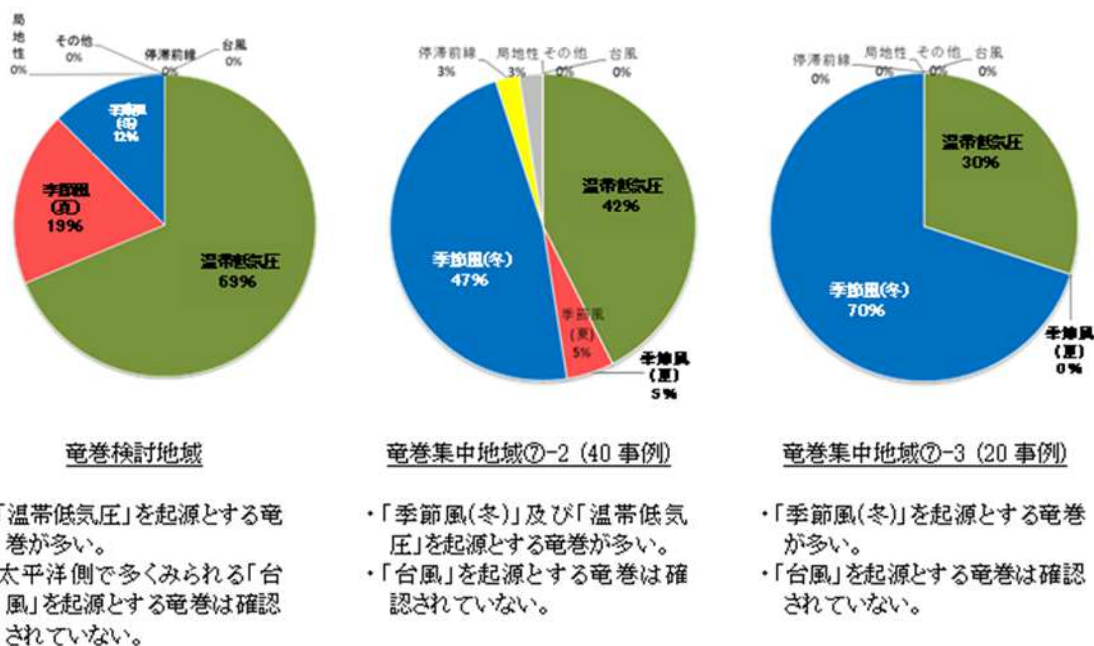
第8図 竜巻発生地点と竜巻が集中する19個の地域

貯蔵施設を中心とする半径180 km圏内において，竜巻検討地域に近い⑦-2及び⑦-3の地域における総観場の特徴について第9図に示す。気象庁竜巻データベースによると，1961年から2012年6月の51.5年間に発生が確認された竜巻の個数は竜巻集中地域⑦-2で40事例，竜巻集中地域⑦-3で20事例であり，この期間に観測されているもっとも規模の大きな竜巻はF2であった。

竜巻集中地域⑦-2で発生した竜巻の総観場は，“季節風(冬)”が47%，“温帯低気圧”が42%を占め，また竜巻集中地域⑦-3で発生した竜巻の総観場は，“季節風(冬)”が70%，“温帯低気圧”が30%の2つの要素のみとなっており，“季節風(冬)”と“温帯低気圧”の比率が高い。これらの地域では，寒気にとまって

発生した親雲に起因した竜巻が多いと推測できる。また、両地域とも日本海側にあたるため、太平洋側で多くみられる台風起源の竜巻は今のところ確認されておらず、第9図の日本海側地域と総観場が似ている一方、竜巻検討地域の総観場とは異なっている。

以上の分析結果からも、竜巻検討地域の設定において日本海側を除いたことに対する妥当性を確認できたと考える。



第9図 各地域の竜巻発生要因に関する総観場の特徴

3.2.3 突風関連指数による地域特性の検討

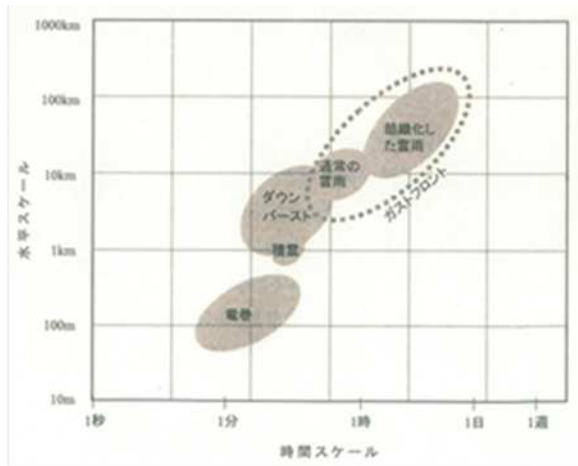
突風関連指数は、総観場での検討に加え、大きな被害をもたらす強い竜巻の発生要因となる環境場の形成のしやすさについての地域特性を検討するため、気象庁や米国国立気象局(NWS: National Weather Service)における現業においても竜巻探知・予測に活用されている。また、竜巻の発生しやすさを数値的に示すことができるため、この突風関連指数を用いて地域特性の検討を行った。

3.2.3.1 大気現象におけるスケールについて

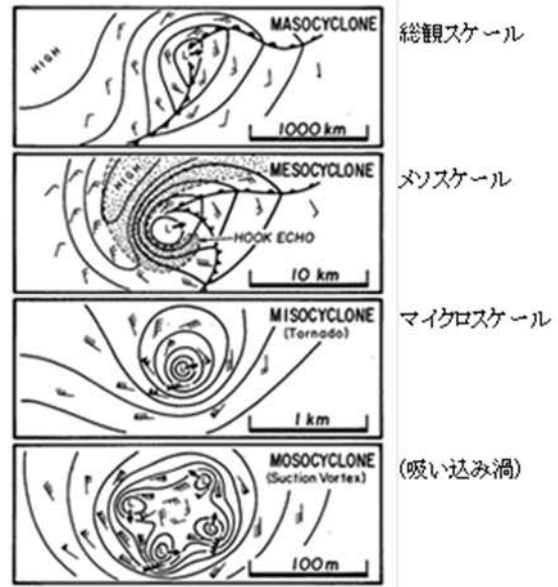
一般的に、大気現象の水平方向の広がりのことを「水平スケール」といい、寿命や周期は「時間スケール」という。第 10 図は雷雨とその関連事象の時空間スケールの関係を表したものである。個々の積雲の時空間スケールは 1 km・10 分程度であり、発達・組織化（マルチセル化・スーパーセル化）すると 10～100 km・数時間～半日程度にまで大きくなる。それに対し、竜巻の時空間スケールは数分・100 m 程度である。

竜巻の発生メカニズムを考える際、時空間スケールの階層構造が重要となる（第 11 図）。ある大気現象は、スケールのより小さな現象を内包しており、竜巻の場合、竜巻の漏斗雲内の気流は数十 m～数百 m 規模（マイクロスケールと呼ばれる(Orlanski 1975)；第 11 図では“MISOCYCLONE”と記載）の現象であるのに対し、竜巻を引き起こすもとの積乱雲である親雲のスケールは数 km～数十 km 規模（メソスケールと呼ばれる。第 11 図では“MESOCYCLONE”と記載）である。台風、低気圧、前線等のいわゆる総観場は、数百 km～数千 km 規模（総観スケールと呼ばれる。第 11 図では“MASOCYCLONE”と記載）として扱われる。また、竜巻内部には吸い込み渦（第 11 図では“Suction Vortex”と記載）と呼ばれるさらに強い渦が形成されることもある。

このように、竜巻の発生にはさまざまなスケールの現象が介在し、異なるスケールの現象が相互作用しているため、竜巻の発生頻度や強度の地域性は複数の時空間スケールで検討する必要がある。気象学における現状として、観測データの欠如や数値シミュレーション技術の不十分さから、マイクロスケールの現象の理解は難しく未知なメカニズムもあると認識されている。一方、総観場の観点ではさまざまなパターンで竜巻が発生していることがわかっており、「日本海側では台風性竜巻の発生が確認されていない」ことや、地域に応じて総観場の割合が異なる等の分析結果が得られている。しかし、例えば寒冷前線起因の F3 竜巻は実際に発生している（1990 年茂原竜巻や 2006 年佐呂間竜巻等）が、寒冷前線自体は国内どこでも通過しうるため、ある地域において F3 竜巻が発生し難いことを総観場の分析結果だけで示すのは難しいと考えられる。



第 10 図 雷雨とその関連現象の時空間スケール(大野 2001)



第 11 図 竜巻発生時の渦の多重構造(Fujita 1981)

そこで、マイクロスケールで発生する竜巻現象を包含する環境場として、親雲の水平スケールに対応するメソスケールの環境場を対象として、F3 規模以上の竜巻の発生に適した環境場の地域性について検討する。メソスケールに対しては、気象レーダーや数値気象モデルを用いて得られた知見は比較的豊富に得られている。例えば、F3 規模以上の竜巻は、大気不安定や上空風の強い鉛直シア（高度による風向・風速の差）によるスーパーセルと呼ばれる特有な気流・降水構造を有する巨大な積乱雲を伴うこと等が判明している。

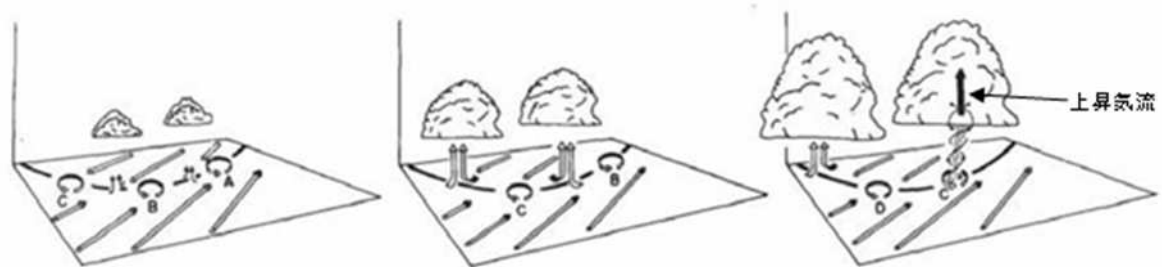
過去の既往文献や、国内外で発生した大きな竜巻を対象とした発生環境場に関する解析結果をもとに、不確かさも考慮して突風関連指数の閾値を設定し、長期間にわたる気象データにおいて、その閾値を超過する頻度を算出し、得られた頻度分布において定性的に十分に差があるかどうかを観点として地域性の有無を考察した。

3.2.3.2 竜巻の発生メカニズム

竜巻の主な発生メカニズムは、二つに大別されると考えられている。一つは気温・湿度や風向・風速が急変する局地的な前線（寒気団と暖気団との境界線）に伴って生じた渦が上昇流によって持ち上げられ、引き伸ばされて竜巻となるもので、比較的寿命が短く強い竜巻になりにくいとされている。もう一つは

前述した「スーパーセル」と呼ばれる、鉛直軸回りに回転する継続した上昇気流域（メソサイクロン）を伴った非常に巨大な積乱雲に伴って竜巻が発生するものである。スーパーセル内では、下降流域と上昇流域が分離されるため、巨大な積乱雲が長時間持続する傾向にある。近年、ドップラーレーダーによる解析を基にした竜巻の事例調査が進んだことにより、大きな被害をもたらす強い竜巻の多くはスーパーセルに伴って発生することが判明している。スーパーセルを伴う場合、大気下層の鉛直シアに伴って渦管が形成され、それが上昇流によって数 km 上空まで持ち上がるとメソサイクロンができ、その下部に竜巻が発生する。現状、竜巻を直接予測することは困難であるが、大規模竜巻の発生と関係が深いスーパーセルの発生環境を予測することにより竜巻発生を間接的に予測できる。

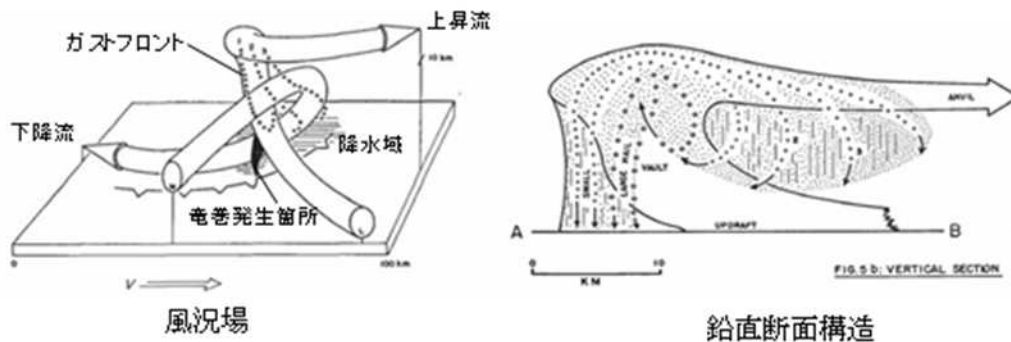
局地的な前線に伴う竜巻の発生、及びスーパーセルを伴った竜巻の発生概念図について、第 12 図、第 13 図にそれぞれ示す。



- ①局地前線上の地表付近で水平シアにより複数の渦が形成
- ②前線の上空で対流雲が発達
- ③対流雲が渦の上空に移動したとき上昇流により渦が引き伸ばされて竜巻が発生

第 12 図 局地前線に伴う竜巻の発生機構に関する概念図

(Wakimoto and Wilson 1989)



風況場図では、上昇流と下降流の関係に加え降水域(斜線の範囲)、ガスフロント(点線)、及び竜巻(黒塗り部)を表現している

第 13 図 スーパーセル型雷雨の構造 (Browning 1964)

3.2.3.3 気象庁での突風関連指数の適用状況

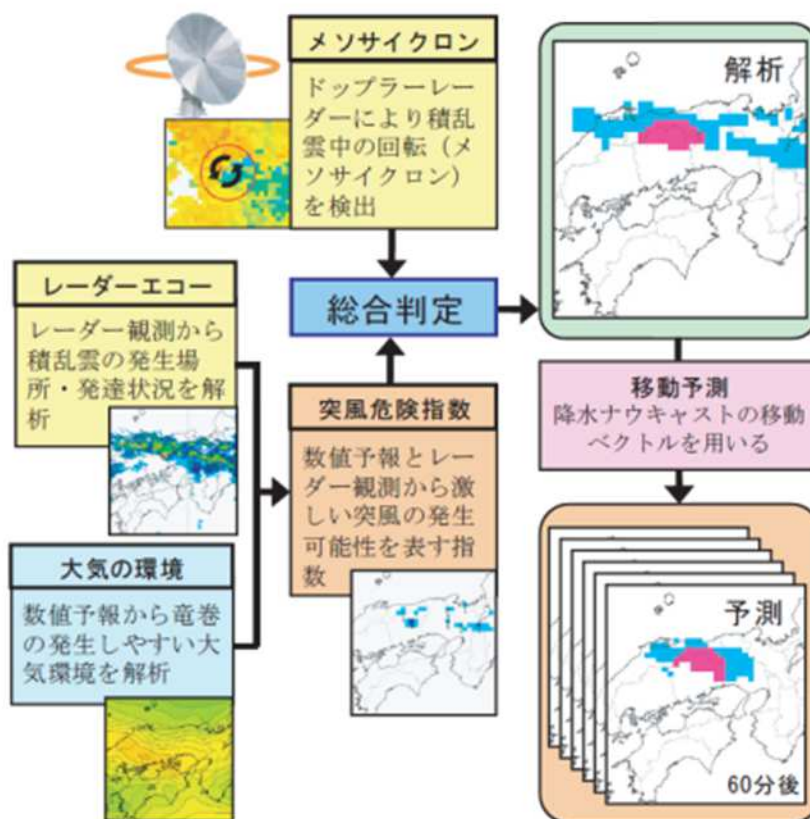
突風関連指数は、竜巻やダウンバーストなどの突風が発生しやすい大気の状態を数値予報資料を用いて表した指数であり、大気の熱的な不安定性や上空風の強い鉛直シア（高度による風向・風速の差）などから算出する。気象庁では平成 20 年 3 月から、低気圧の発達等に関して半日から 1 日程度前に発表する予告的な気象情報において、11 種類の突風関連指数を算出し、竜巻やダウンバースト等の激しい突風が発生する可能性があるると予測される場合には、当気象情報において注意喚起することとした。

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

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

竜巻発生確度ナウキャストにおけるデータ等の流れを第 14 図に示す。竜巻

発生確度ナウキャストは最新の観測・解析データをもって短いリードタイムの予測を迅速に行うことを主目的としており，レーダープロダクトに重みを置いている。また，小さな竜巻も見逃しなく予測できるような説明変数として突風関連指数を選択している。



(突風危険指数:突風関連指数と気象レーダー観測データをもとに算出)

第 14 図 竜巻発生確度ナウキャストの解析・予測技術の流れ

3.2.3.4 検討に用いる突風関連指数について

気象庁においては，低気圧の発達等に関して 11 種類の突風関連指数を算出し激しい突風等の予測に活用しているが，このうちスーパーセルの発生環境を把握する指標として CAPE (Convective Available Potential Energy: 対流有効位置エネルギー)，SReH (Storm Relative Helicity: ストームの動きに相対的なヘリシティ)，EHI (Energy Helicity Index) 等が活用されている。これらの突風関連指数を用いて竜巻の地域特性に関する検討を実施した。

竜巻の発生メカニズムについて第 15 図に示す。スーパーセルが発生しやすい環境場として、大気下層の鉛直シアと、強い上昇気流を起こすきっかけとしての不安定な大気場が必要である。本検討では、大気的不安定度を表す指標として、「CAPE」、鉛直シアに伴って発生する水平渦度が親雲に取り込まれる度合いを表す指標として「SReH」を採用し、両者の指標が同時に高くなる頻度について、地域的な特徴を確認する分析を行った。また、両者を掛け合わせた指標である「EHI」による分析も行い、SReH 及び CAPE の同時超過頻度分析との比較を行った。SReH, CAPE, EHI については、竜巻の発生実態を解明する研究において国内外で広く利用され、竜巻発生環境場との関連づけ等の知見が多く蓄積されており、気象庁での竜巻予測に用いる突風関連指数の中でも主な指標として紹介されているため、本検討を行う上でも妥当なものと考えられる。SReH, CAPE 及びその複合指数である EHI について以下に示す。



第 15 図 竜巻の発生メカニズム

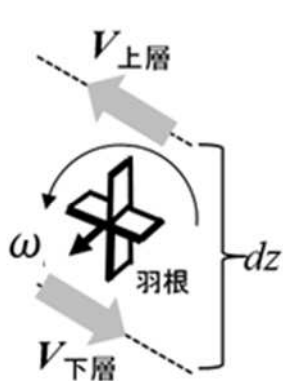
(1) SReH (Storm Relative Helicity : ストームの動きに相対的なヘリシティ)

風の鉛直シア（高度方向の風向・風速差）に伴って発生する大気水平渦度が親雲に取り込まれる度合いを示し、値が大きいほど積乱雲がスーパーセルに発達しやすい。（第 16 図）

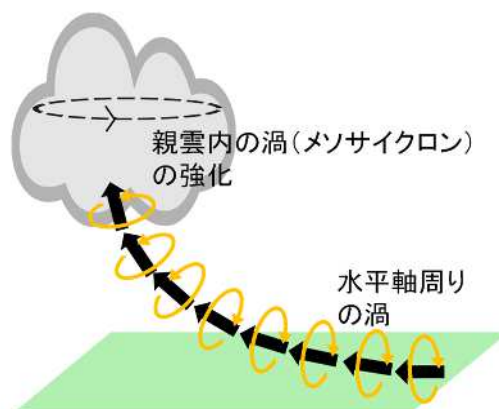
$$\text{SReH} = \int_{\text{地上}}^{\text{高度}3\text{km}} (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega} dz$$

V : 水平風速ベクトル C : ストームの移動速度

ω : 鉛直シアに伴う水平渦度



水平渦度生成に関する模式図



水平渦度の親雲への輸送に関する模式図

第 16 図 SReH の算出概念

SReH の値は、上端高度の違いによって値が変わる。上端を地上から 3 km とした場合、そのほとんどが地上から 1 km までの大気によるヘリシティであるという指摘 (Rasmussen 2003) があるが、1 km 高さは夏場では境界層高さ (雲底高度) 程度と低めであるため、本検討では多くの既往検討と同様に 3 km とする。

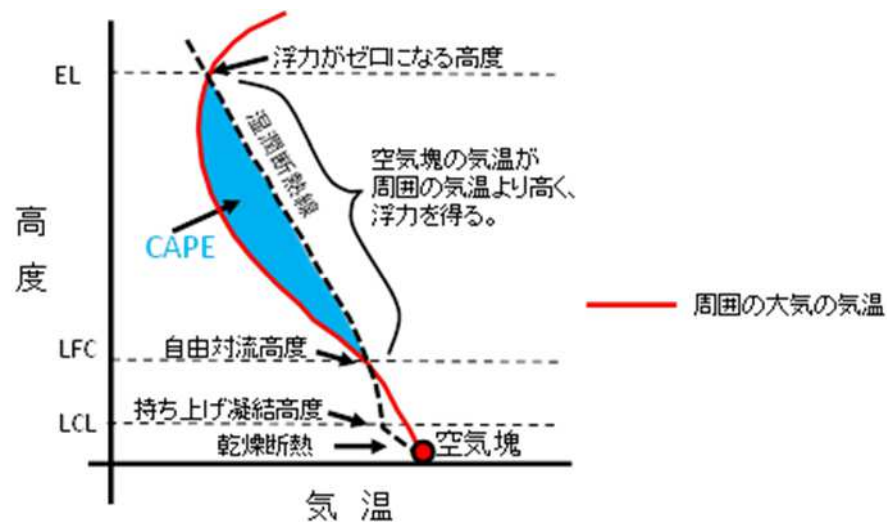
(2) CAPE (Convective Available Potential Energy: 対流有効位置エネルギー)

上昇気流の発達しやすさを表し、値が大きいほど背の高い積乱雲に発達しうるため、大気不安定度の指標となる。(第 17 図)

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

g : 重力加速度 θ_e' : 下層の空気塊を持ち上げた際の相当温位*

θ_e : ストーム周囲の相当温位* dz : 鉛直方向の層厚



第 17 図 CAPE の算出概念

CAPE の値は、持ち上げる空気塊の性質によって変わる。地表から 500 m 程度上空までの平均的な性質を持つ空気塊を持ち上げたときの MLCAPE (Mean Layer CAPE) がよく用いられる。本検討では、地表から 500 m 上空まで最も不安定な空気塊を持ち上げたときの MUCAPE (Most Unstable CAPE) を用いており、大気下層に冷気がありその上空で対流が発生する場合を考慮することができる。このような場合、MLCAPE では安定な大気とみなされることにより CAPE 値が非常に小さくなる傾向にある。

*:相当温位について

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

2つの空気塊を比較した場合、温位の高い空気塊は軽く上昇しやすく(不安定であり)、単位体積中に含みうる水蒸気量が多いため、大きな積乱雲の発生につながる。相当温位は、空気塊に含まれる水蒸気の持っている潜熱(水蒸気が凝結する際に空気塊の温度が上昇)の影響も考慮された温位である。

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

(3) EHI (Energy Helicity Index)

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

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

3.2.3.5 突風関連指数の地域特性

竜巻発生時の環境場（風向・風速，気温，気圧，水蒸気量等）を数値気象モデルにより解析し，その解析結果をもとに突風関連指数を算出する。解析には WRF モデル（Weather Research and Forecasting model，別添 1）と呼ばれる数値気象モデルを用い，（一財）電力中央研究所（以下，電中研という）による長期高解像度再解析データセット（橋本ら 2013）と同様の条件で，ネスティングと呼ばれる技法を用いて，水平解像度 15km で解析した結果をもとに水平解像度 5 km の解析結果を得た。なお，30 分間隔で計算結果を出力し，当時の天気図や気象レーダー画像等を参考にして竜巻発生時刻と解析結果における降雨域の通過時刻との違いや，対応する降雨域の有無を確認することにより，計算結果に大きな問題がないことを確認した。

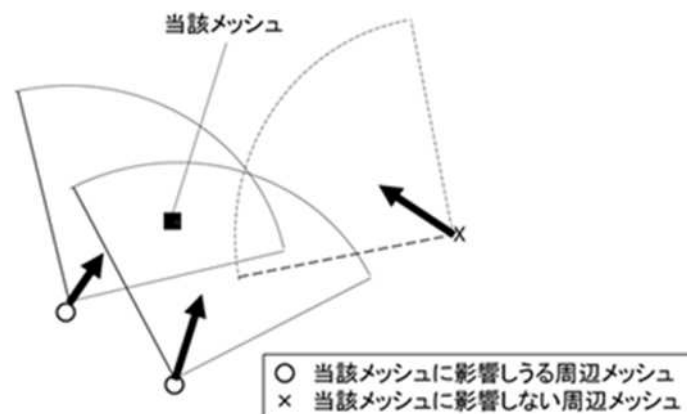
分析対象事例は第 3 表に示す過去に発生した F3 竜巻（1987 年以前の F2-F3 竜巻は除く），1988 年以降に日本海側で発生した F1-F2，及び F2 竜巻とした（F3 竜巻は 5 事例，F2-F3 竜巻は 1 事例，F2 竜巻は 3 事例，F1-F2 竜巻は 1 事例）。1987 年以前に発生した竜巻については，初期値・境界値データとして使用している ECMWF ERA40 の水平空間分解能が約 250 km と粗いために，竜巻通過時刻や発生箇所が実際に比べてずれる場合があるため本検討では対象としていない。ただし，F3 竜巻に対しては 1987 年以前の竜巻に対しても解析を行い，計算結果の適切性を確認している。なお，対象事例に対して適切性が低いことを理由に除外した事例はない。

第3表 分析対象事例概要

発生日時	季節	発生日点	F スケール	SReH (m^2/s^2)	最大 CAPE (J/kg)	EHI
2012/05/06 12:35	暖候期	茨城県常総市	F3	270	2115	3.57
2006/11/07 13:23	寒候期	北海道網走支庁佐呂間町	F3	714	813	3.63
1999/09/24 11:07	暖候期	愛知県豊橋市	F3	403	2459	6.20
1990/12/11 19:13	寒候期	千葉県茂原市	F3	649	1201	4.88
1971/07/07 07:50	暖候期	埼玉県浦和市	F3	337	1746	3.68
1990/02/09 15:15	寒候期	鹿児島県枕崎市	F2-F3	745	373	1.74
1991/06/12 13:30	暖候期	富山県魚津市	F2	227	1358	1.93
1990/04/06 02:55	寒候期	石川県羽咋郡富来町	F2	484	889	2.69
1989/03/16 19:20	寒候期	島根県簸川郡湖陵町	F2	329	430	0.89
1999/11/25 15:40	寒候期	秋田県山本郡八森町	F1-F2	363	1222	2.78

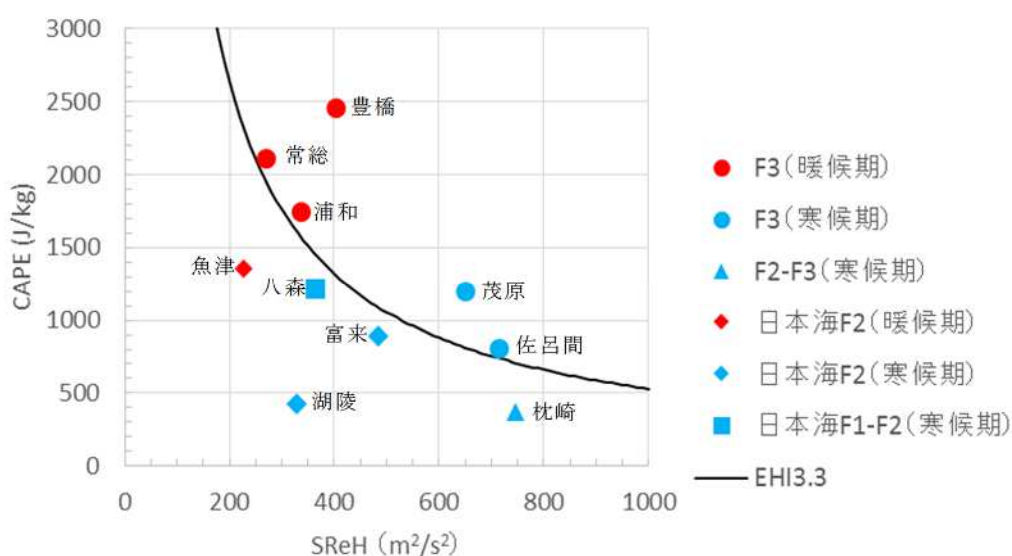
(暖候期：5月～10月 寒候期：11月～4月)

第3表中のSReHと最大CAPEの値は、発生日点を中心とした東西・南北100km四方内の最大値である。最大CAPEの算出にあたっては、雲物理過程により擾乱（竜巻を伴う積乱雲）が発生すると、発生前の大気不安定な状況が解消されCAPE値が小さくなるため、周辺のCAPE値の大きな空気塊が当該メッシュに向かって流入することを考慮した方法（Rasmussen and Blanchard (1998)）を参考に、メッシュ周辺の最大CAPE値を当該メッシュのCAPE値とした。このとき、各格子点に対して、地上～500 m 高度までの平均風向を算出し、その風向に対して当該地点から風下側に半径15km、風向を中心に±45度の扇形の範囲を影響範囲とした。（第18図）この最大値が最大CAPEにあたる。このように算定することにより、周辺のCAPE値の大きな空気塊が当該メッシュを含むスーパーセルに向かって流入することを考慮できる。



第18図 最大CAPE値の算出方法概念図

第3表における SReH と最大 CAPE の値について、竜巻のカテゴリ別にプロットしたものを第19図に示す。F3 竜巻においては、暖候期と寒候期で CAPE の大きさが大きく異なっており、寒候期では暖候期に比べて値が小さいが、SReH が非常に大きい傾向が見られる。また、日本海側の F2 規模竜巻の発生環境場では小さな指数値の下でも竜巻が発生しているという点において、F3 規模竜巻の発生環境場との違いが見られる。EHI に対しては、概ね 3.5 程度を超える場合に F3 竜巻が発生している。



第19図 SReH と最大 CAPE の関係

- 対象とした 10 事例を分析した結果から、以下の傾向が見られる。(別添 2)
- ① F3 竜巻事例では、共通して SReH と最大 CAPE の両方が大きく、太平洋側からの暖湿流の流入が見られた。寒候期（11 月～4 月）に発生した事例では CAPE が暖候期（5 月～10 月）に比べて小さいが、SReH が非常に大きく大気不安定度の小ささを補っているようである。
 - ② 今回分析した F2-F3 竜巻時の発生環境場は、CAPE（大気不安定度）が F3 竜巻発生時に比べてかなり低かった。F2 規模と F3 規模とで風速レベルで違いが大きいため、本検討において F2-F3 竜巻を F3 竜巻と混合して扱うべきではないと考えられる。
 - ③ F2 竜巻でも SReH は F3 竜巻事例と同レベルの大きさになりうる。冬季の西高東低型の気圧配置下での日本海上での気団変質時、寒冷前線通過時、

暖候期の場合は対馬海峡から日本海に向かって空気塊が流れ込む時に大気がやや不安定性な状況が見られたが、多くの事例で大気不安定度は F3 竜巻発生時よりも小さかった。不安定度が大きかった事例もあるが、その場合 SReH が小さくなく、両指数が共に大きくなる状況は見られなかった。

これらの結果から、SReH として $250\sim 300\text{ m}^2/\text{s}^2$ 程度以上、(最大) CAPE として暖候期において 1600 J/kg 、寒候期において 600 J/kg 程度以上の環境場において F3 竜巻が発生しているとみなすことができる。EHI に対しては、3.5 程度を超える場合に F3 竜巻が発生しているが、この場合季節に分けずに通年単位で分析できる可能性がある。

分析対象とした F3 竜巻はほとんどが太平洋側での発生であり、大きな竜巻を引き起こすスーパーセルの発生要因の指標である SReH と CAPE については、太平洋側で発生した F3 竜巻では SReH と CAPE の両方（あるいは複合指数である EHI）が大きな値をとる傾向があると考えられる。また、これまでに発生した国内における全ての F3 竜巻（5 事例）は、スーパーセルを伴っていたことが報告されている。このことから、上記 SReH と CAPE それぞれの値を参考に閾値を設け、その閾値を同時に超える頻度（以下、「同時超過頻度」という。）を分析することにより、スーパーセルに伴って発生するような大規模な竜巻の発生環境を観点とした地域性を見出すことができると考えられる。

3.2.3.6 突風関連指数の同時超過頻度による地域性の検討

過去に発生した竜巻に対する環境場を分析した結果では、国内で（太平洋側で）発生した F3 竜巻では、SReH と最大 CAPE の両方が大きな値をとる傾向が見られた。このため、SReH と CAPE それぞれに対してある閾値を設け、その閾値を同時に超える同時超過頻度を分析することにより国内最大規模 F3、あるいはそれ以上の規模の竜巻発生を観点とした地域性について検討した。

突風関連指数の地域性を見出すには、詳細なメッシュ間隔でかつ長期間のデータが必要であるため、ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) の再解析データ ERA-Interim (1989 年以降；水平分解能約 70 km) および ERA40 (1989 年まで；水平分解能約 250 km) をもとに、気象モデルを用いて数値的に環境場

を解析したデータセット（橋本ら 2011）を用いた。当データセットは、気象庁と電中研が共同で作成した JRA-25 再解析データ（Onogi et al. 2007）よりも 5 km・1 時間毎と時空間解像度が細かく、豪雨事例の再現性も高まっている（橋本ら 2013）。本検討では、1961 年から 2010 年までの 50 年間にわたって 1 時間毎に解析されたデータを用いた。ECMWF の再解析データは、地球温暖化予測を目的として世界的に広く活用されており、最も精度が高いものと認識されている。しかし、空間分解能が非常に粗いため、物理的ダウンスケーリング手法として WRF モデルを用いた長期再解析により 5 km メッシュの環境場を算出してデータセットを作成し、本データセットで解析されている上空風、気温、気圧等の気象データを用いて SReH と CAPE の値を 1 時間毎・5 km メッシュで算出した。50 年間にわたるデータサンプル数は各メッシュに対して約 4.4×10^5 個存在することとなる。

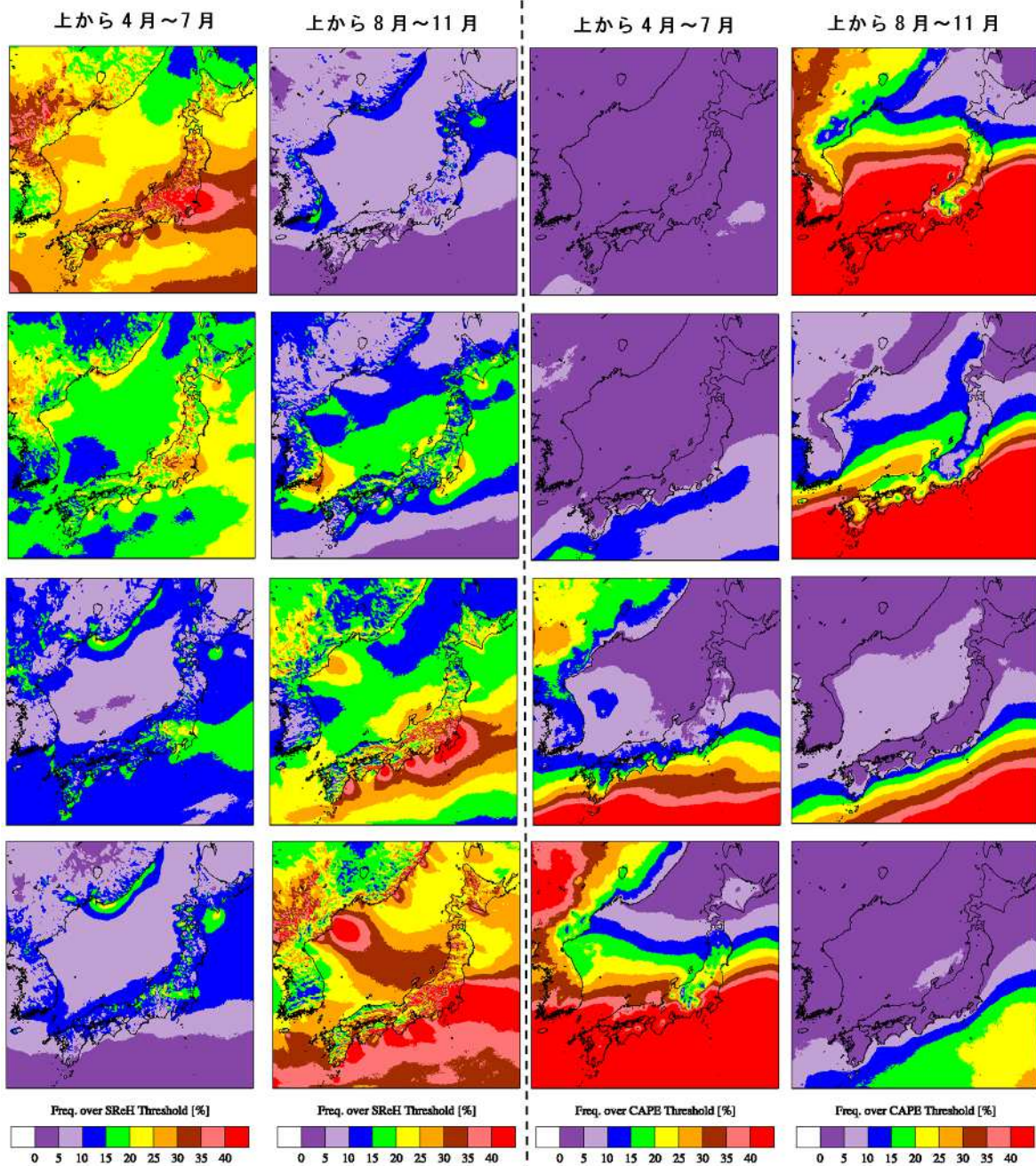
また、F3 竜巻の発生環境場の特徴として、寒候期（11 月～4 月）に発生した竜巻の CAPE が暖候期（5 月～10 月）に比べて小さく、SReH が高い傾向にあった。第 20 図に、4 月から 11 月までの期間において、SReH の閾値を $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、CAPE の閾値を 250 J/kg に設定し、各格子点について両指数が同時に閾値を超過する頻度（同時超過頻度；全体の母数に対する割合（%））について月別に算出した結果について示す。ここでは小さな閾値を設定しているため、スーパーセルだけではなく小さな雷雨発生の環境場も捕捉することとなる。

SReH に対しては、日本海および沿岸域では寒候期に頻度が大きく、大きな値をとる傾向が示されており、関東平野及び北海道日高山脈周辺では年間を通じて他地域に比べて高い頻度を有している。また 7 月については全体的に低い値となっている。

一方、CAPE に対しては寒候期で低い値をとり、暖候期で高い値をとる傾向が見られ、緯度依存性が見られる。この緯度依存性は、熱帯域ほど暖かく高い雲ができやすいことと関係している。CAPE については季節・緯度依存性が強く、南に行くほど暖かい季節になるほど絶対値が大きくなっており、超過頻度を検討する上では、この特徴を踏まえる必要がある。

閾値が変わると第 20 図で見られる頻度分布もそれに応じて変わると考えられるが、相対的な頻度の大小関係はある程度保持される。国内最大規模である

F3 の竜巻は太平洋側沿岸の平野部で発生しているが、CAPE の値は基本的に南に行くほど高い値をとるため、CAPE の地域性とは整合しない（例えば、沖縄では F3 竜巻は発生していない）。また、日本海側で F3 竜巻が発生していない点から SReH においても整合しない。このことから、少なくともどちらかの指数だけでは F3 竜巻発生地点の地域傾向を説明することはできないと考えられるため、SReH と最大 CAPE の関係性（第 19 図）から、両方の指数を考慮した場合に説明づけられるか否かがポイントとなる。



月別 SReH 超過頻度分布 (閾値: 150 m^2/s^2)

月別 CAPE 超過頻度分布 (閾値: 250 J/kg)

第 20 図 月別の SReH 及び CAPE の超過頻度分布

第 19 図で示した SReH と最大 CAPE との関係性を踏まえ、SReH の閾値を 250 m^2/s^2 、CAPE の閾値を 1600 J/kg (暖候期)、及び 600 J/kg (寒候期) として暖候期・寒候期別に同時超過頻度を算出した結果について第 21 図に示す。また、第 22 図に、気象庁竜巻データベースで確認された F2 規模以上の竜巻の発生

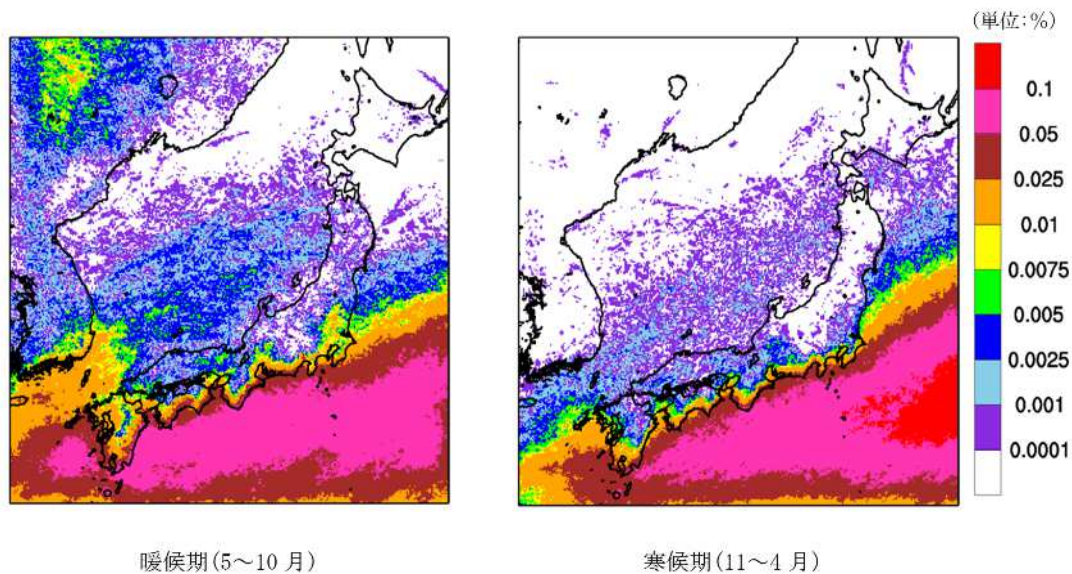
箇所について併せて示す。この発生箇所と頻度分布とを比較すると、頻度が0.01%前後の領域について発生箇所との対応性が高いことが確認できる。

暖候期においては、同時超過頻度 0.01%前後の地域が茨城県以西の太平洋側および九州の沿岸域の平野部に広がっており、超過頻度の高い地域はF3規模の竜巻の発生箇所を包含していることから、超過頻度の高い地域でF3規模以上の竜巻発生に適した環境場が整いやすいことが示されているが、対して日本海側や下北半島を含む東北地方太平洋側といった北日本地域における超過頻度の値は、1～2桁以上小さな値となっており、F3規模の竜巻の発生が未だに確認されていないことと対応している。

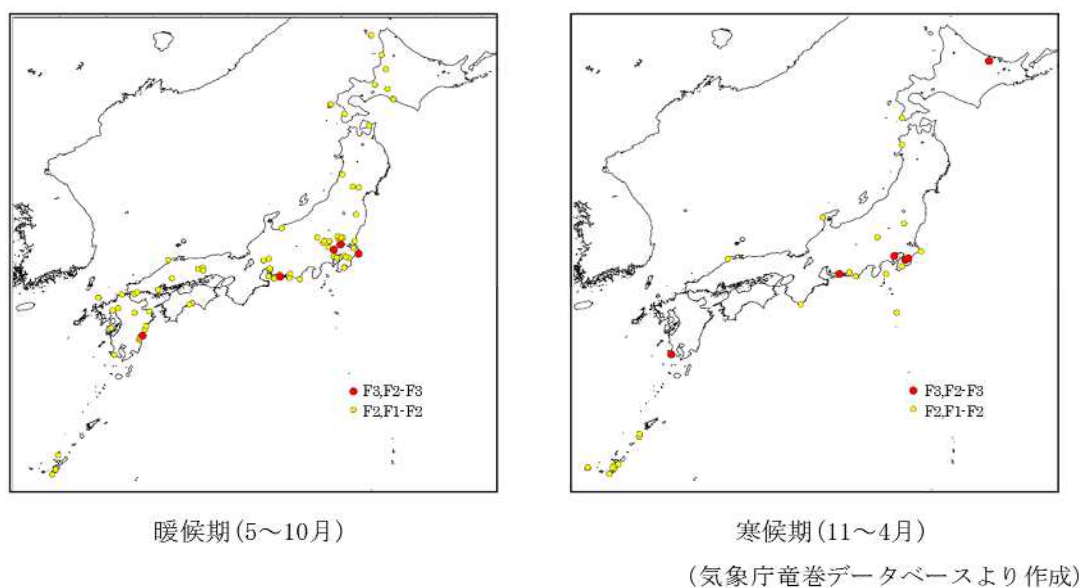
また、寒候期の超過頻度分布では、頻度の高い地域が暖候期より南側にシフトしているが、F3竜巻発生箇所がより沿岸に近い地点に限られていることと対応している。全体的に暖候期に見られる傾向と同様であり北日本での超過頻度の値は西日本より低い値となっている。またF3規模竜巻の発生数に季節間の差が見られないことも反映されている。

このように、過去のF3竜巻発生時の環境場の解析結果を踏まえて設定したSReHとCAPEの閾値を両方超過する頻度の分布は、実際のF3竜巻の発生箇所の傾向と整合していると考えられる。

同時超過頻度分布は、閾値を「超過する」という意味において、F3規模あるいはそれ以上の規模の竜巻が発生するのに適した環境場の生起しやすさを表現していると解釈できると考える。この分布では、日本列島の縦横中央部に位置する高標高山岳（九州山地、四国山地、中国山地、中央アルプス等）を境として頻度が大きく異なっており、これらの山岳によって太平洋側からの暖気流が遮断される効果が大きな竜巻の発生に影響していることも示唆されている。

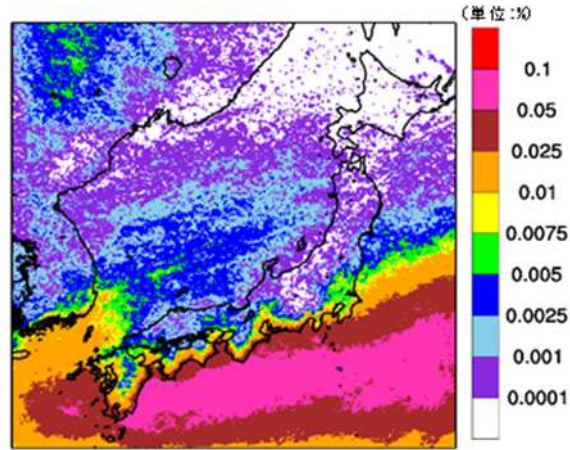


第21図 F3規模以上を対象としたSReH, CAPE同時超過頻度分布



第22図 F2規模以上(F1-F2を含む)の発生箇所

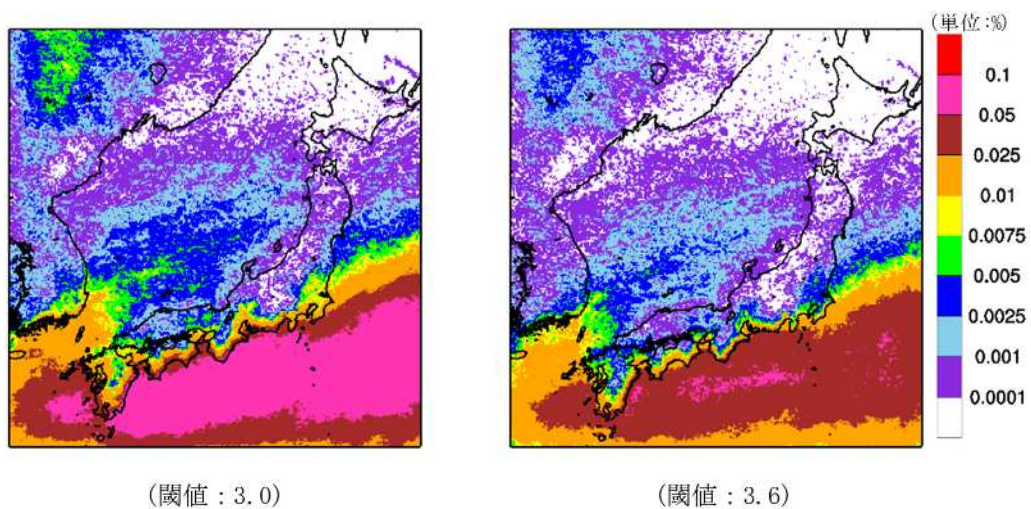
EHIについても、SReHとCAPEと同様に閾値を設け超過頻度について分析した。EHIの閾値については、過去のいずれのF3事例においてもEHIが概ね3.5程度を越えていることから(第3表)、それを包含する値としてEHI = 3.3と設定した。このときのEHIの超過頻度分布について第23図に示す。暖候期と寒候期を分けず通年単位で閾値を設定したため、分布は暖候期と寒候期の中間的な傾向を示している。



第23図 EHIの超過頻度分布(EHI閾値:3.3)

以上より、CAPE, SReH, EHI について F3 以上を想定した特定の閾値を設けた場合の分析を実施したが、突風関連指数については不確実性が存在するため、EHI=3.0 及び 3.6 と設定した場合の超過頻度分布についても作成し、同様の地域性が現れることを確認した。(第 24 図)

閾値を 3.6 にした場合、関東平野内での F3 竜巻の発生箇所を包含しておらず、値として大きすぎるのがわかる。一方、閾値を 3.0 にすると、対馬海峡からの暖気流入に対応して島根県沖付近まで高い値（超過頻度分布の 0.01%前後以上）が見られるようになる。いずれの閾値においても、日本海側沿岸域及び竜巻検討地域を含む北日本と、太平洋側沿岸域との差は維持されている。



(閾値 : 3.0)

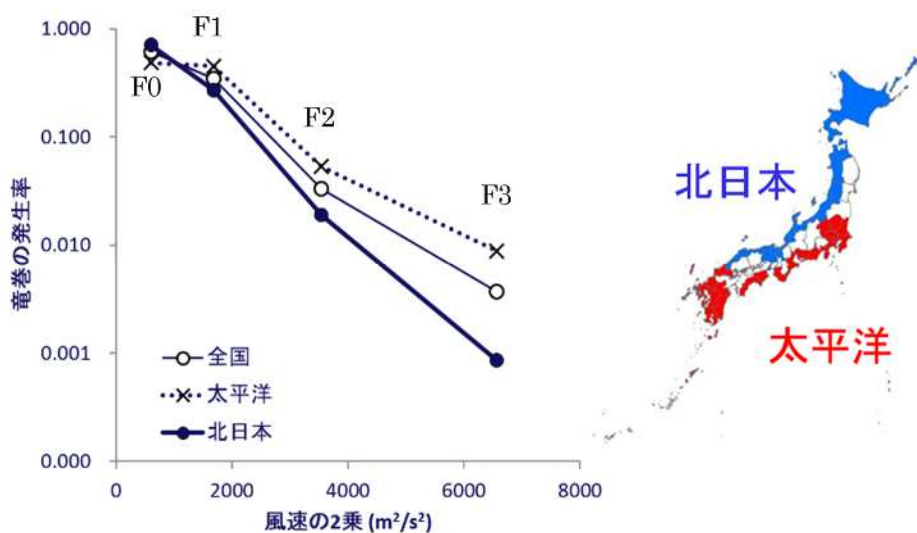
(閾値 : 3.6)

第 24 図 EHI の超過頻度分布(閾値 : 3.0, 3.6)

第 21 図より、国内最大規模の F3 竜巻が発生するのに適した環境場が形成

される頻度には地域差があることがわかった。この分布形態から実際に F3 規模の竜巻を考慮すべき地域を特定するには確率論的な議論が必要であり、ガイドで記載されている年超過確率 10^{-5} や、米国の評価ガイド等 (Ramsdell and Rishel 2007, U.S. NRC 2007) で記載されている年超過確率 10^{-7} を参考として必要となる風速レベルを考慮する必要があると考えられる。

第 25 図は、ハザード評価と同様に海上 F 不明竜巻を按分して各 F スケール竜巻の 51.5 年間 (1961 年～2012 年 6 月) の擬似発生数を分析し、F スケール毎に発生率 (対象 F スケールの発生数 / 擬似発生数) を地域別にプロットしたものである。太平洋側と北日本とでは竜巻の全発生数に大差はないことから、この発生率で対象 F スケール竜巻の発生しやすさを概ね把握することができる。F スケールが大きくなるほど指数的に頻度が低減しているが、F3 規模の発生率は、茨城県以西の太平洋側・九州沿岸では、その他の地域に比べ 1 桁程度発生率が高くなっており、突風関連指数の分析結果と整合していると考えられる。また、日本海側沿岸や東北太平洋側・下北半島では F3 竜巻が発生していないためさらに頻度が小さくなることが予想できる。



第 25 図 各 F スケールの発生率

突風関連指数による大規模な竜巻形成につながる環境場の発生頻度分析を行った結果、貯蔵施設の立地地域は、茨城県以西の太平洋沿岸よりも1～2桁以下の頻度となることが分かった。

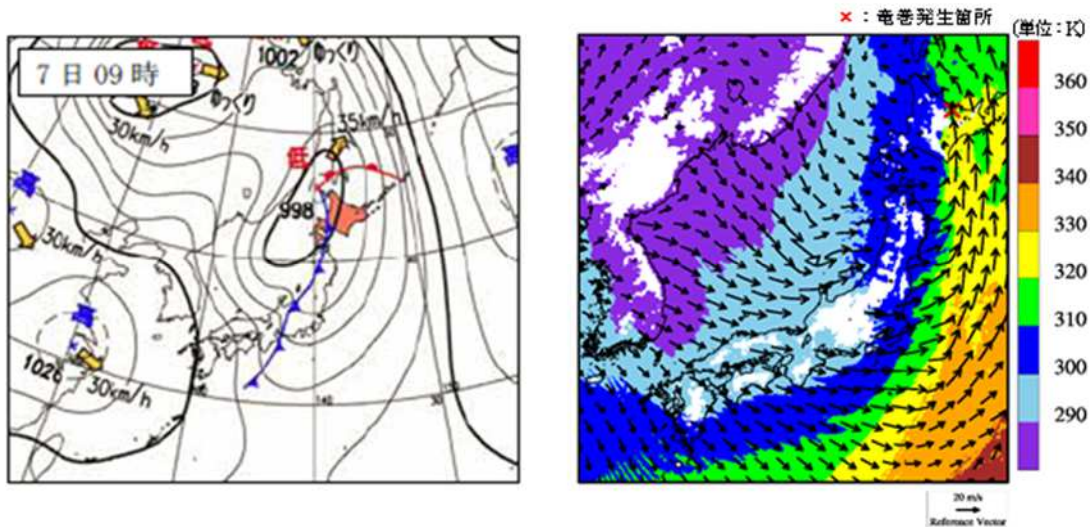
これより、スーパーセルに伴って発生するF3規模の大規模な竜巻の発生しやすい環境場の発生頻度分布の観点からも、設定した竜巻検討地域は茨城県以西の太平洋沿岸と比較して地域特性に大きな違いがあることが明らかになってきた。

3.2.4 佐呂間町で発生した竜巻について

突風関連指数を用いた解析結果から、F3規模以上の竜巻が発生しやすいとされる地域がほぼ判明したが、そのエリアに含まれていない北海道網走支庁佐呂間町において2006年11月7日にF3竜巻が発生している（以下、「佐呂間竜巻」という。）。佐呂間竜巻は、太平洋沿岸で発生した竜巻と比較すると、以下の点で異なっている。

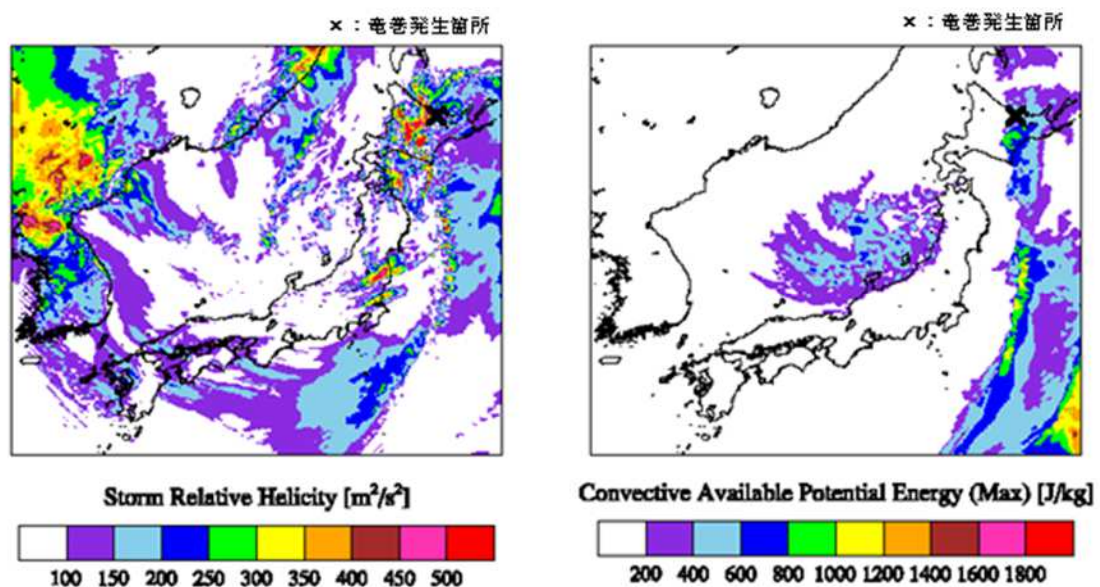
- ・国内で唯一内陸部（丘陵地の麓）において発生した竜巻である。
- ・F3竜巻としては継続時間（1分）と移動距離（約1.4km）が非常に短かった。

第26図に、佐呂間竜巻発生時の天気図及び500m高度における風向、風速及び相当温位の分布について示す。佐呂間竜巻の発生した地域は、太平洋側からの暖湿流が小高い丘を越えて流入するような地形になっており、平野部の冷気流とぶつかることにより大きな上層・下層間の風向差が生じる環境場となっていた。竜巻が発生した2006年11月7日には、第26図の天気図に示すように北海道の北の海上で猛烈に発達しつつある低気圧から南北にのびる寒冷前線が西から東に通過しており、寒冷前線の西側では北西～西よりの冷たい風（青、紫等の寒色系）が、東側では南よりの暖かい風（黄、緑等の暖色系）が吹いており、気温差と風の収束により積乱雲が発生・発達しやすい状況にあったと考えられる。



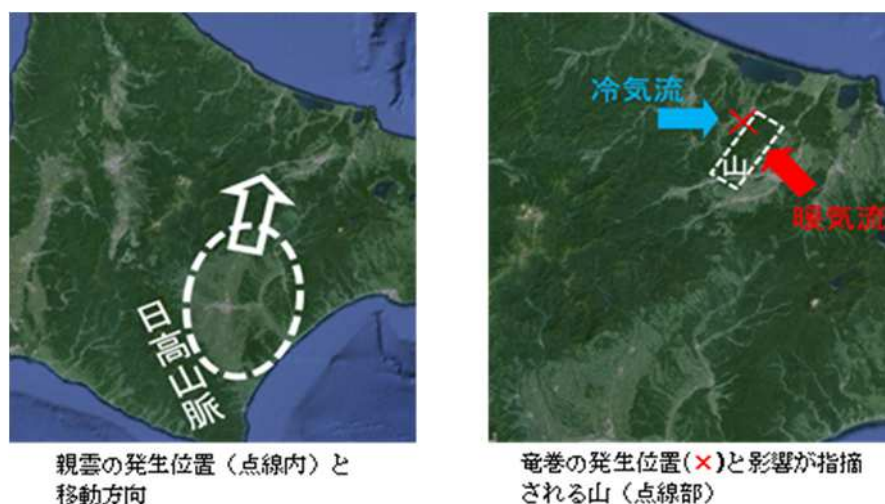
第 26 図 佐呂間竜巻発生時天気図及び風向，風速，相当温位の分布(海拔 500m 高度)

また，第 27 図に SReH 及び最大 CAPE について示す。道東やオホーツク海沿岸地方には太平洋側から暖かく，不安定な空気塊が流入している。第 27 図に示すように大気不安定度は道東の中でも南側で高くなっており，非常に高い風のシア（高い SReH）と相まって親雲が発達しやすい状況が解析されている。なお，同日に，周辺地域において 2 個の小さな竜巻も発生した。日本海側の中でも能登半島周辺より北側で季節風が吹き込み，大気がやや不安定になっている（CAPE が高めている）が，SReH が低いため道東やオホーツク海沿岸地方の状況とは異なると考えられる。



第 27 図 佐呂間竜巻発生時の SReH 及び最大 CAPE

このような状況下において、寒冷前線の東側の暖域内である日高山脈東側において、山を越えた冷気流と太平洋側の暖気流がぶつかる地点で雲頂の高い発達した積乱雲が発生し、ここで発生した親雲が日高山脈沿いに北上しながら持続的に発達していき、佐呂間地域でF3規模の竜巻を形成するに至ったものと考えられる。(第28図)



第28図 親雲の発生箇所と移動方向及び竜巻の発生箇所

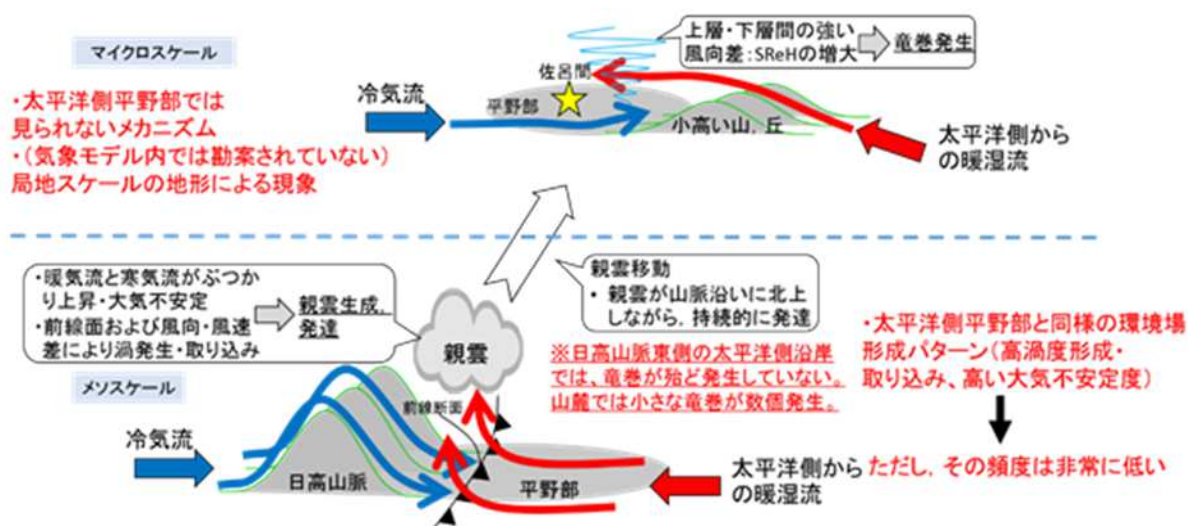
佐呂間竜巻の発生メカニズムについて、図2-27のように模式的に示す。第26図に示したように、当竜巻発生時においては太平洋側からの段気流が道東・オホーツク地方に流入している環境下で高いSReHを伴う寒冷前線が通過しており、先に検討したSReHとCAPEの関係(第19図)で示すように、SReH、CAPEともに一定の高さを保持していた。この点においては、太平洋側で過去に発生したF3竜巻の環境場の特徴と同様の特徴を有すると考えられる。ただし、CAPEについては、第27図に示したように、SReHとは異なり降水域が発達した日高山脈の東側に広く高い値をとっているわけではなかった。また、加藤(2008b)らの周辺地形によるマイクロスケールの環境場の解析結果から、以下のとおり発生位置の南東側、風上側に位置する尾根状地形による影響が竜巻発生に寄与していることが指摘されている。

「下層での鉛直シアの強化は、ガストフロントの前面下層の気圧低下による水平風加速に加えて、強い鉛直渦度生成領域の風上(南南東)側に南南西～北北東に伸びる最大標

高 600 m 以上で幅 10 km ほどの尾根による山岳波の影響を少なからず受けている。実際の竜巻発生位置の風上側にも同様な尾根が存在していることから、佐呂間竜巻は地形の影響を受けて発生したと考えられる。」

マイクロスケールの効果は環境場では考慮できない（解像できない）ため、この影響により両指数の値は特に SReH において第 19 図でプロットした結果よりも高まっている可能性が高いと考えられる。

オホーツク海沿岸地方は、北海道の中でも F2 規模以上の竜巻であれば本州北日本と同等の頻度で環境場が形成されやすい地域であるが、F3 規模以上の竜巻に対しては環境場が形成されがたい、つまり F3 規模に至る程度に大気不安定な空気塊の流入と高渦度を有した総観場の通過が同時に発生する頻度が極めて低い。佐呂間竜巻が地形影響を受けていることを踏まえると、竜巻発生を観点とした気候としては、この地域で F3 規模の竜巻発生に適した環境場は極めて生起しがたく、佐呂間竜巻発生時においても F3 規模竜巻の発生には（特に最大 CAPE においては）微妙な環境場であったが、近隣の周辺地形の影響を強く受けて F3 規模の竜巻発生に至ったと解釈するのが妥当であると考えられる。



第 29 図 佐呂間竜巻の発生メカニズムに関する模式図

このように、佐呂間竜巻の発生メカニズムは、太平洋側沿岸域にて発生している F3 竜巻のメカニズムとは大きく異なっており、竜巻の持続時間・被害域長さも大きく異なっていることから、この竜巻は、基準竜巻設定で対象としている地域性・空間スケールよりも局地的・小さな空間スケールを有する地形影響を受けたものであると考えられる。このことから、佐呂間竜巻のような竜巻が発生するかどうかについては、当時の環境場（総観場(寒冷前線)、気流場、大気不安定度)と周辺地形の類似性を確認すればよいと考えられる。確認のポイントとしては、第 29 図よりこれまでに検討した環境場の分析結果を踏まえ以下の 2 点が考えられる。

- ・太平洋側からの暖湿流が高標高山岳等に遮断されずに直接流入しうる地域である。
- ・近隣地形（数 km 程度四方の範囲）において、（太平洋側からの）暖気流の流入方向に尾根状の丘・山（凡そ標高 600m 以上、幅 10km 程度）が存在すること。

貯蔵施設周辺の地形を考慮すると、太平洋側からの暖気流が直接流入してくる方位（施設の南東方向）には該当するような尾根状の山等は存在せず、また沿岸は津軽海峡側に面しているため太平洋からの暖気流が直接流入することも考えにくい。このことから、貯蔵施設周辺の地形から佐呂間竜巻と同様な竜巻が発生するような状況は考えにくい。

以上の検討結果より、竜巻発生要因及び発生する竜巻の規模には地域性があることが確認され、その観点から貯蔵施設の竜巻検討地域として、北海道南部から東北地方の太平洋側沿岸を竜巻検討地域として設定することは妥当であることが確認できたと考えられる。

参考文献

- (1)Bluestein, H. B., 2013: Severe Convective Storms and Tornadoes. Springer, 456 pp.
- (2)Brady, R. H., and E. J. Szoke, 1989: A case study of nonmesocyclone tornado development in northeast Colorado: similarities to waterspout formation. Mon. Wea. Rev., 843-856.
- (3)Browning, K. A., 1964: Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. J. Atmos. Res., 21, 634-639.
- (4)Bunkers, M. J., B. A. Klimowski, J. W. Zeitler, R. L. Thompson, and M. L. Weisman, 2000: Predicting supercell motion using a new hodograph technique. Wea. Forecasting, 15, 61-79.
- (5)Burgess, D. W., M. A. Magsig, J. Wurman, D. C. Doswell, and Y. Richardson, 2002: Radar observations of the 3 May 1999 Oklahoma City tornado. Wea. Forecasting, 17, 456-471.
- (6)Chuda, T., and H. Niino, 2005: Climatology of environmental parameters for mesoscale convections in Japan. J. Meteor. Soc. Japan, 83, 391-408.
- (7)Davies, J. M., 1993: Hourly helicity, instability, and EHI in forecasting supercell tornadoes. 17th Conf. on Severe Local Storms, St. Louis, MO, Amer. Meteor. Soc., 107-111.
- (8)Davis-Jones, R., D. Burgess, and M. Foster, 1990: Test of helicity as a tornado forecast parameter. 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB., Canada, Amer. Meteor. Soc., 588-592.
- (9)Doswell III, C. A., and J. S. Evans, 2003: Proximity sounding analysis for derechos and supercells: an assessment of similarities and differences. Atmos. Res., 67-68, 117-133.
- (10)Dotzek, N., M. V. Kurgansky, J. Grieser, B. Feuerstein, and P. Nevir, 2005: Observational evidence for exponential tornado intensity distributions over specific kinetic energy. Geophys. Res. Letters,

- 32, L24813, doi:10.1029/2005GL024583.
- (11)Fujita, T. T., 1981: Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scale. *J. Atmos. Sci.*, 38, 1511-1534.
- (12)Klemp, J. B., and R. B. Wilhelmson, 1978: Simulations of right- and left-moving storms produced through storm splitting. *J. Atmos. Sci.*, 35, 1097-1110.
- (13)Lee, B. D., and R. B. Wilhelmson, 1997: The numerical simulation of nonsupercell tornadogenesis. Part II: Evolution of a family of tornadoes along a weak outflow boundary. *J. Atmos. Sci.*, 54, 2387-2415.
- (14)Mashiko, W., H. Niino, and T. Kato, 2009: Numerical simulation of tornadogenesis in an outer-rainband minisupercell of typhoon Shanshan on 17 September 2006. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 4238-4260.
- (15)Moncrieff, M., and M. J. Miller, 1976: The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 373-394.
- (16)Noda, A. T., and H. Niino, 2010: A numerical investigation of a supercell tornado: Genesis and vorticity budget. *J. Meteor. Soc. Japan*, 88, 135-159.
- (17)Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 369-432.
- (18)Orlanski, I., 1975: A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 56, 527-530.
- (19)Ramsdell, J. V. Jr., and J. P. Rishel, 2007: Tornado climatology of the contiguous United States. NUREG/CR-4461, Revision 2.
- (20)Rasmussen, E. N.: 2003: Refined supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 18, 530-535.

- (21) Rasmussen, E. N., and D. Blanchard, 1998: A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 13, 1148-1164.
- (22) Roberts, R. D., and J. W. Wilson, 1995: The genesis of three nonsupercell tornadoes observed with dual-Doppler radar. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 3408-3436.
- (23) Rotunno, R., and J. B. Klemp, 1985: On the rotation and propagation of simulated supercell storms. *J. Atmos. Sci.*, 42, 271-292.
- (24) Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers: A description of the advanced research WRF version 2. NCAR Tech. Note, NCAR/TN-468+STR, 88 pp., 2005.
- (25) Suzuki, O., H. Niino, H. Ohno, and H. Nirasawa, 2000: Tornado-producing mini supercells associated with Typhoon 9019. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 1868-1882.
- (26) Trapp, R. J., 2013: *Mesoscale-Convective Processes in the Atmosphere*. Cambridge, 346 pp.
- (27) U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, 2007: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1.
- (28) Wakimoto, R. M., and J. W. Wilson, 1989: Non-supercell tornadoes. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1113-1140.
- (29) 飯塚義浩, 加治屋秋実, 2011: 数値予報資料から求めた竜巻に関連する大気環境指数の統計的検証. *天気*, 58, 19-30.
- (30) 大野久雄, 2001: *雷雨とメソ気象*. 東京堂出版, 309 pp.
- (31) 原子力規制委員会, 「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」(原規技発第13061911号, 2013年6月19日)
- (32) 加藤輝之, 2008a: 竜巻発生環境に関する研究(Ⅰ)ー竜巻をもたらす発生環境に関する統計的研究ー, 平成19年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進, 6-12.
- (33) 加藤輝之, 2008b: 竜巻発生環境に関する研究(Ⅲ)ースーパーセルを

- 伴う竜巻の発生機構の研究－，平成 19 年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進，39-44.
- (34) 杉本聡一郎，野原大輔，平口博丸，2014a：国内既往最大規模の竜巻を対象とした発生頻度の地域性について．2014 年度保全学会年次学術講演会，395-402.
- (35) 杉本聡一郎，野原大輔，平口博丸，2014b：突風関連指数を用いた大きな竜巻の発生環境場の地域性に関する検討．2014 年度日本気象学会春季大会講演予稿集，B464.
- (36) 瀧下洋一，2011：竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報について－突風に関する防災気象情報の改善－．測候時報，78，57-93.
- (37) 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」平成 23 年 2 月
- (38) 新野 宏，2007：竜巻．天気，54，933-936.
- (39) 橋本篤，平口博丸，豊田康嗣，中屋耕，2011：温暖化に伴う日本の気候変化予測（その 1）－気象予測・解析システム NuWFAS の長期気候予測への適用性評価－．電力中央研究所報告 N10044，22pp.
- (40) 橋本篤，平口博丸，田村英寿，服部康男，松梨史郎，2013：領域気候モデルを用いた過去 53 年間の気象・気候再現．電力中央研究所報告，N13004，18 pp.

4. 基準竜巻・設計竜巻の設定

基準竜巻の設定にあたっては、ガイド及びガイド解説に基づき、過去に発生した竜巻の規模、頻度、最大風速の年超過確率等を考慮して適切に設定することとし、日本において過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})、及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})とを比較し、風速の大きい値を基準竜巻の最大風速(V_B)として設定する。これに、貯蔵施設及び周辺の立地条件による地形効果を考慮して設計竜巻の最大風速(V_D)を設定する。

4.1 過去に発生した竜巻による最大風速について

4.1.1 竜巻データの整理

気象庁竜巻データベース(1961年～2012年6月)をもとに、過去の竜巻データについて調査した。これに以下の処理を実施することによりデータの整理を行った。

- ・気象庁竜巻データベースには、年代別、都道府県別等のコンテンツがあるが、都道府県別のデータには詳細情報(特に発生及び消滅地点の緯度経度情報等)の記載がないデータもあり、竜巻検討地域での発生を正確に把握するため、年代別の事例一覧より、詳細情報の記載があるデータのみを考慮する。
- ・気象庁竜巻データベースのデータには、現象区別において竜巻以外の突風データがあるため、現象区別が「竜巻」「竜巻または漏斗雲」「竜巻またはダウンバースト」であるものについて抽出する。
- ・竜巻風速のレンジについては、前述したFスケールを参照とする。

4.1.2 竜巻データによる最大風速の抽出

整理した過去の竜巻発生データより、日本において過去に発生した竜巻の最大風速はF3規模であった(第4表)。これより、日本において過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})はF3スケールの最大風速である92 m/sとなる。

第4表 日本で過去に発生した最大竜巻の一覧

発生日時	発生場所				藤田 スケール
	緯度	経度	都道府県	市町村	
2012年05月06日 12時35分	36度6分38秒	139度56分44秒	茨城県	常総市	F3
2006年11月07日 13時23分	43度58分39秒	143度42分12秒	北海道 網走支庁	常呂郡 佐呂間町	F3
1999年09月24日 11時07分	34度42分4秒	137度23分5秒	愛知県	豊橋市	F3
1990年12月11日 19時13分	35度25分27秒	140度17分19秒	千葉県	茂原市	F3
1971年07月07日 07時50分	35度52分45秒	139度40分13秒	埼玉県	浦和市	(F3)
1990年02月09日 15時15分	31度15分38秒	130度16分35秒	鹿児島県	枕崎市	(F2-F3)

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

4.1.3 最大風速の設定

3.1.2における発生竜巻の抽出の結果、設定した竜巻検討地域内で1961年～2012年6月に発生事例として把握された竜巻の総数は16個であった。(第5表)

このうち、最も大きな規模のものはFスケールにおけるF2(50 m/s～69 m/s)である。

一方、竜巻影響評価ガイドの原則に従い、日本で過去(1961年～2012年6月)に発生した最大規模のものは、4.1.2の第4表よりF3(70m/s～92m/s)である。

前者は、基準竜巻の設定に用いたデータが過去の記録に基づくものであること及び突風関連指数による解析は相対的な傾向を把握するためのものであることを踏まえ、保守性を考慮し後者の最大風速92 m/sを採用し、 $V_{BI}=92$ m/sとする。

第5表 竜巻検討地域内で1961年～2012年6月に観測された竜巻

No.	現象 区別	発生日時	発生場所			Fスケール	被害幅 (m)	被害長さ (km)	総観場
			緯度(北緯)	経度(東経)	都道府県				
(F2相当)									
1	竜巻	1965年09月05日11時40分	41度17分30秒	141度10分0秒	青森県	むつ市	20～35	1.5～2.0	閉塞前線
2	竜巻	1980年10月31日09時30分	42度25分30秒	142度13分24秒	北海道日高支庁	沙流郡門別町	不明	不明	閉塞前線
3	竜巻	1994年10月05日06時35分	42度27分29秒	142度10分23秒	北海道日高支庁	沙流郡門別町	20～30	2.5～3.0	寒冷前線
4	竜巻	2004年10月22日16時50分	42度25分53秒	142度12分42秒	北海道日高支庁	沙流郡門別町	不明	0.4～0.5	寒冷前線, 暖気の移流
(F1相当)									
5	竜巻	1992年08月07日16時04分	38度51分30秒	141度40分15秒	宮城県	本吉郡唐桑町	300～400	0.6～0.7	局地性じょう乱, 雷雨(熱雷)
6	竜巻	1994年10月05日06時15分	42度27分43秒	142度9分39秒	北海道日高支庁	沙流郡門別町	50～60	1	寒冷前線
7	竜巻	1997年10月07日12時50分	42度36分13秒	141度29分9秒	北海道胆振支庁	苫小牧市	200～300	2.5	雷雨(熱雷を除く) 暖気の移流, 寒気の移流
8	竜巻	2006年10月11日22時30分	42度16分34秒	142度30分32秒	北海道日高支庁	新ひだか町	30	0.5	寒冷前線
9	竜巻	2006年10月11日22時15分	42度16分40秒	142度36分21秒	北海道日高支庁	新ひだか町	30	0.4	寒冷前線
10	竜巻	2006年11月07日11時40分	42度25分37秒	142度13分22秒	北海道日高支庁	沙流郡日高町	20～100	2.5	寒冷前線, 暖気の移流
11	竜巻	2008年11月07日08時50分	42度8分1秒	142度52分21秒	北海道日高支庁	様似郡様似町	10～20	0.7	寒冷前線
(F0相当)									
12	竜巻	2005年10月02日19時30分	42度29分25秒	140度49分52秒	北海道胆振支庁	伊達市	不明	0.4～0.5	寒冷前線
(陸上不明)									
13	竜巻	2006年11月07日11時20分	42度25分43秒	142度13分38秒	北海道日高支庁	沙流郡日高町	不明	不明	寒冷前線
(海上不明)									
14	竜巻	2003年09月29日14時40分	42度11分0秒	142度43分21秒	北海道日高支庁	(海上)	不明	不明	気圧の谷
15	竜巻	2007年10月04日07時50分	42度18分10秒	140度58分40秒	北海道胆振支庁	(海上)	不明	不明	気圧の谷, 暖気の移流 地形効果
16	竜巻	2007年10月17日07時45分	42度0分0秒	140度56分0秒	北海道渡島支庁	(海上)	不明	不明	気圧の谷, 寒気の移流

藤田スケールは, ア) 被害の詳細な情報等から推定できたもの, イ) 文献等からの引用または被害のおおまかな情報等から推定したもの, があり, F2以上の事例ではア)とイ)を区別し, イ)の場合には値を括弧で囲んでいる。F0～F1の事例では, ア)とイ)の区別は行っていない。

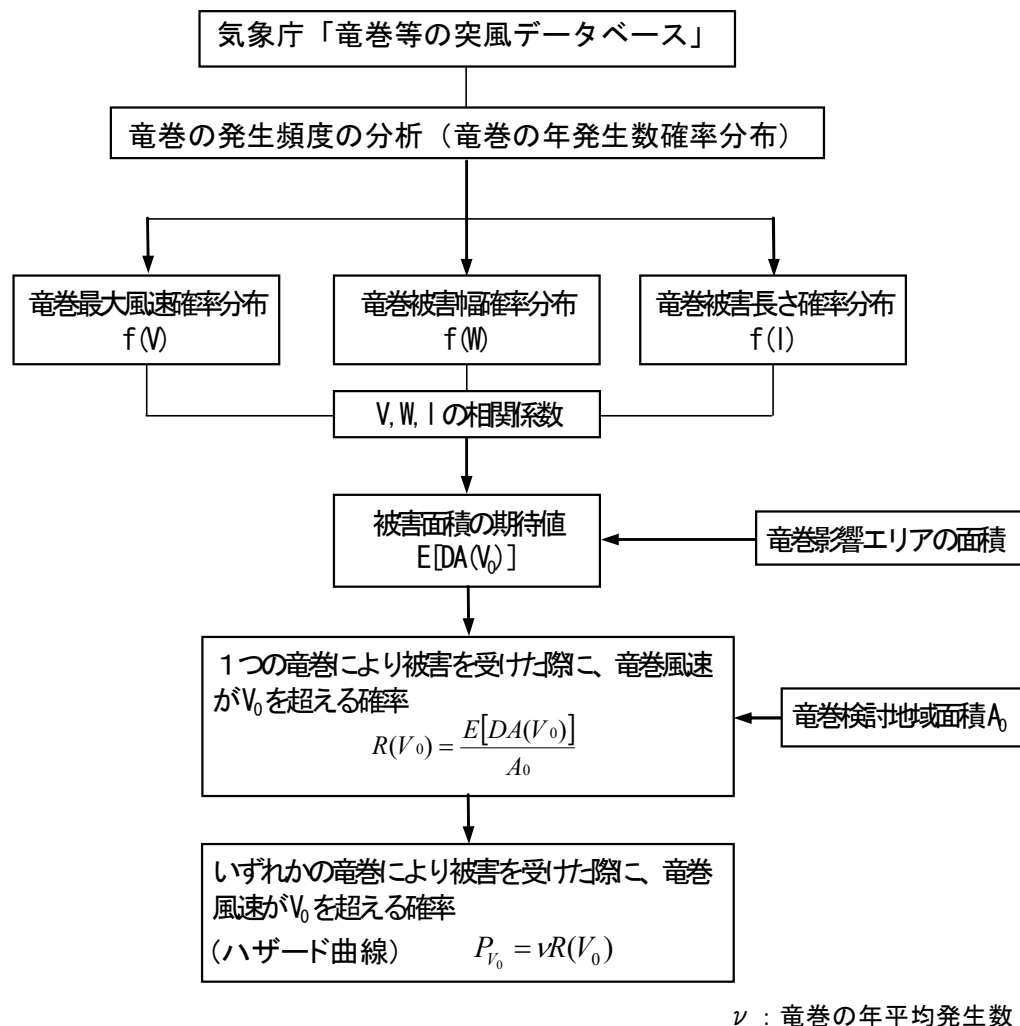
4.2 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速について

竜巻最大風速のハザード曲線については、ガイドに基づき、竜巻に遭遇しかつ竜巻がある風速以上になる確率モデルの推定法 (Wen & Chu 及び Garson et. al) に基づいて算定した。

また、算定にあたっては東京工芸大委託成果についても併せて参考とした。

4.2.1 ハザード曲線の評価フロー

第 30 図に評価のフローについて示す。本評価は、竜巻の発生頻度の分析、竜巻風速・被害幅・被害長さの確率分布及び相関係数の算定、ならびにハザード曲線の算定によって構成されている。



第 30 図 竜巻ハザード曲線の評価フロー

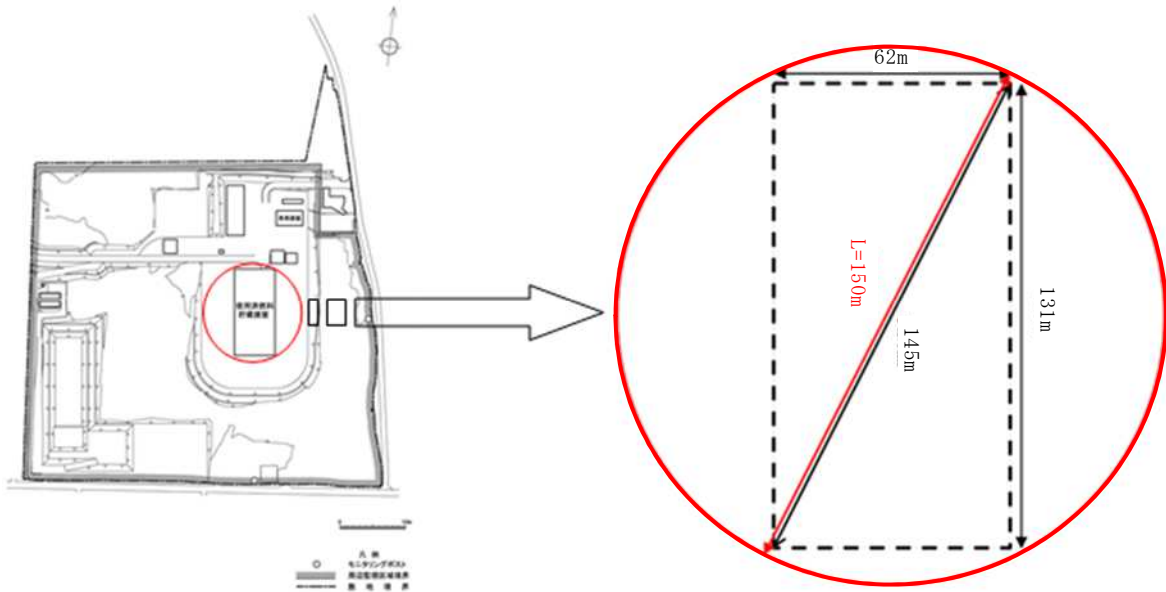
4.2.2 Wen & Chu 及び Garson et. Al の確率モデル推定法

ガイドに基づく Wen & Chu 及び Garson et. Al の確率モデル推定法の概要は以下のとおり。

- ・竜巻影響エリアは、代表幅を直径とする円形状とする。
- ・竜巻年発生数、竜巻風速評価等それぞれに対するデータについては、気象庁竜巻データベースをもとに整理した過去の竜巻発生データによるものとする。
- ・年発生数確率は、以下の2通りについて評価する。
 - ① 1 km に細分化された領域ごとに評価された年発生確率のうち最大値とする場合
 - ② 10km の幅で確率を評価した場合
- ・竜巻の風速特性は、いずれの場合も 10km 幅で抽出した観測データをもとにする。抽出した観測データから最大風速、長さ、幅の対数値の平均、分散共分散行列を算定する。竜巻の大きさを表す特性の確率分布は、これら平均、分散共分散行列に基づいた多変量正規分布に従うものとする。
- ・最大風速、長さ、幅の対数値の平均及び分散共分散行列、竜巻影響エリアの大きさをもとに、風速に依存する期待値を評価する。
- ・得られた年発生確率に期待値を乗じ、ハザード曲線を得る。
- ・得られたハザード曲線において、 10^{-5} での風速を読み取り、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})とする。

4.2.3 竜巻影響エリアの大きさ

竜巻影響エリアは、施設の代表幅を直径とする方向性を持たない円形状（第31 図中の赤線枠内）とする。その代表幅 L は、外部事象防護施設である貯蔵建屋の第 31 図に示す領域約 131m × 約 62m の対角線長さ約 145 m を保守的に考慮して、 $L = 150 \text{ m}$ と設定する。



第 31 図 竜巻影響エリア(代表幅 150m)の設定根拠

4.2.4 竜巻の年発生数の確率分布の設定

竜巻の年発生数の確率分布の設定においては、過去の観測データが少ないこと、また、観測年代によって精度が異なることから、下記のとおりを設定する。

(1) 適用データ

気象庁竜巻データベースより、竜巻検討地域における 1961 年～2012 年 6 月までの竜巻発生データ（16 個）を用いる。

(2) 竜巻の発生頻度の補正

気象庁竜巻データベースは、1961 年以降の発生竜巻がデータベース化されているが、観測体制が段階的に強化され、特に 2007 年以降で発生数が非常に多く、海上竜巻の増加も顕著である。

これより、ハザード曲線評価に用いるデータの観測期間を以下の①～③の 3 期間に分け、各年代において F スケールごとに統計量（竜巻発生数，年間平均発生数，標準偏差）を算定する。

- ① 2007 年～2012 年 6 月（5.5 年間）
- ② 1991 年～2012 年 6 月（21.5 年間）
- ③ 1961 年～2012 年 6 月（51.5 年間）

算定結果について第6表に示す。竜巻検討地域内では、1961年以降の51.5年間で16個の竜巻が観測されている。そのうち、F2が4個、F1が7個、F0が1個、大きさ不明が4個である。

第6表 竜巻検討地域において過去に観測された竜巻に関する統計量

			F3	F2	F1	F0	小計	陸上不明	海上不明	合計
過去に観測された竜巻	1961-2012.6 51.5年間	期間内個数	0	4	7	1	12	1	3	16
		年平均	0.00	0.08	0.14	0.02	0.23	0.02	0.06	0.31
		標準偏差	0.00	0.27	0.49	0.14	0.58	0.14	0.31	0.73
	1991-2012.6 21.5年間	期間内個数	0	2	7	1	10	1	3	14
		年平均	0.00	0.09	0.33	0.05	0.47	0.05	0.14	0.65
		標準偏差	0.00	0.30	0.72	0.22	0.81	0.22	0.47	1.01
	2007-2012.6 5.5年間	期間内個数	0	0	1	0	1	0	2	3
		年平均	0.00	0.00	0.18	0.00	0.18	0.00	0.36	0.55
		標準偏差	0.00	0.00	0.43	0.00	0.43	0.00	0.85	0.86

気象庁の観測データは1961年から記録が始まり、その後観測精度が1991年、2007年に段階的に変わっている。その結果、F0やFスケール不明の多くは2007年以降の5.5年間に観測されている。また、F1は半数以上が1991年以降に観測されている。F2以上については、規模が大きいため観測体制が変わったことによる観測数への影響はないと考えられる。

これらを勘案して、以下に示す観測体制が変えられたことによる以下の補正を行い、推定51.5年間の統計量を評価する。

- (a) F2以上の竜巻については、被害規模が大きく見逃されることが少なかったとして、1961年以降の全期間の統計量をもとにする。

→F3：0個， F2：4個 （観測期間：51.5年）

- (b) F1の竜巻については、観測体制が整備された1991年以降の年間発生数がそれ以前の30年間の発生数を上回ることから、1991年以降の統計量をもとにする。

→F1：7個 （観測期間：21.5年）

(c) F0 及び大きさ不明の竜巻については、観測体制が強化される以前は被害が小さく見逃された可能性が大きいことから、観測体制が強化された2007年以降の統計量をもとにする。

→F0：0個， 陸上不明：0個， 海上不明：2個 （観測期間：5.5年）

(d) 51.5年間の発生数について、各統計量の観測期間との比率からFスケール毎に推計する。個数であるため、小数点以下については切り上げて整数値とする。

→F3：0個（ $0 \times 51.5 / 51.5 = 0$ ）

F2：4個（ $4 \times 51.5 / 51.5 = 4$ ）

F1：17個（ $7 \times 51.5 / 21.5 = 16.77$ ）

F0：0個（ $0 \times 51.5 / 5.5 = 0$ ）

陸上不明：0個（ $0 \times 51.5 / 5.5 = 0$ ）

海上不明：19個（ $2 \times 51.5 / 5.5 = 18.73$ ）

(e) 海上竜巻でFスケール不明の場合、被害痕跡等が残っていないため、そのFスケールを推定することは難しい。そこで、沿岸部近傍では竜巻の発生状況については陸上と海上で変わらないと仮定し、Fスケール不明の海上竜巻については、陸上のFスケール別発生比率で按分する。個数であるため、小数点以下については切り上げて整数値とする。

→(d)で推定した51.5年間の海上竜巻発生数19個について、陸上竜巻の51.5年間のFスケール別発生数の比で按分する。（F3：0個，

F2：4個， F1：17個， F0：0個）

F2：4個（ $19 \times 4 / (4 + 17) = 3.62$ ）

F1：16個（ $19 \times 17 / (4 + 17) = 15.38$ ）

(f) (e)の算出結果を、各Fスケールで発生した竜巻発生数に加算する。

→F3：0個， F2：8個（ $4 + 4$ ）， F1：33個（ $17 + 16$ ）， F0：0個

以上の補正を行った推定 51.5 年間の統計量について第 6 表に追記のうえ、第 7 表として示す。

第 7 表 推定 51.5 年間の竜巻についての発生数に関する統計量

			F3	F2	F1	F0	小計	陸上不明	海上不明	合計
過去に観測された竜巻	1961-2012.6 51.5 年間	期間内個数	0	4	7	1	12	1	3	16
		年平均	0.00	0.08	0.14	0.02	0.23	0.02	0.06	0.31
		標準偏差	0.00	0.27	0.49	0.14	0.58	0.14	0.31	0.73
	1991-2012.6 21.5 年間	期間内個数	0	2	7	1	10	1	3	14
		年平均	0.00	0.09	0.33	0.05	0.47	0.05	0.14	0.65
		標準偏差	0.00	0.30	0.72	0.22	0.81	0.22	0.47	1.01
	2007-2012.6 5.5 年間	期間内個数	0	0	1	0	1	0	2	3
		年平均	0.00	0.00	0.18	0.00	0.18	0.00	0.36	0.55
		標準偏差	0.00	0.00	0.43	0.00	0.43	0.00	0.85	0.86
51.5 年間での換算値		期間内個数	-	-	17	0		0	19	-
推定 51.5 年間の竜巻	推定 51.5 年間 (陸上竜巻)	期間内個数	0	4	17	0	21			
		年平均	0.00	0.08	0.33	0.00	0.41			
		標準偏差	0.00	0.27	0.72	0.00	0.77			
	海上不明分の振り分け	比率	0.00	0.19	0.81	0.00	1.00			
		期間内個数	0	4	16	0	20			
	推定 51.5 年間 (全竜巻)	期間内個数	0	8	33	0	<u>41</u>			
		年平均	0.00	0.16	0.64	0.00	<u>0.80</u>			
標準偏差		0.00	0.38	1.01	0.00	<u>1.08</u>				

※表中の網掛け部は、気象庁による観測体制が変えられたことによる補正を施す元となるデータ

竜巻検討地域において、51.5 年間で 16 個の竜巻が観測されたことに対し 41 個の竜巻が発生したと推定した。また、F1, F2 の観測数はそれぞれ 17 個及び 4 個であったが、F スケール不明の竜巻を振り分けたため 33 個及び 8 個と推定した。

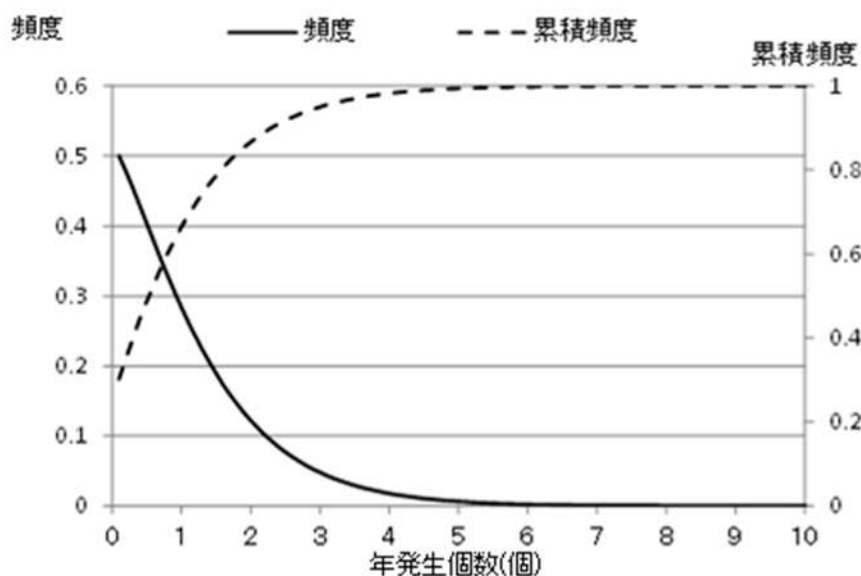
(3) 年発生数の確率密度分布の設定

竜巻は、その発生が多い年がある一方で全く発生していない年が続く場合があり、発生数の変動が大きい。このような特徴を考慮し、東京工芸大委託成果を参考としてポリヤ分布による推定 51.5 年間の発生数 41 個の年平均値(0.80)及び標準偏差(1.08)に対する分布状況について確認した。その

結果を第 32 図に示す。

ガイド解説においては、少なくとも 1 km 範囲毎に竜巻の年発生数の確率分布を算定するとしている。しかし、1 km 範囲に分けると各範囲における竜巻発生数のデータが少なくなり、統計的な傾向分析を実施するための十分なデータ数が得られず、1 km 範囲ごとにハザード曲線を算定した場合その精度の低下が懸念される。本検討においては、今回採用した F スケール不明の海上竜巻に対する取扱いにより、F2 竜巻は 4 個観測されたことに対して 8 個発生したものと推定しており、保守性を確保しているものとする。

以上から、基本的には竜巻検討地域における陸側 5 km 及び海側 5 km の計 10 km 幅でのデータをもとにポリヤ分布により年発生数の確率密度分布を求めることとする。竜巻風速の確率密度分布についても同様とする。



第 32 図 竜巻の年発生数をポリヤ分布で適合させた結果

4.2.5 竜巻最大風速，被害幅，被害長さの確率分布の設定

(1) 被害幅，被害長さに関する統計量

竜巻発生数と同様に推定 51.5 年間のデータをもとにした，被害幅，被害長さに関する統計量を第 8 表及び第 9 表に示す。被害幅，被害長さの分析に利用可能なデータ数は，風速 (F スケール) がわかるデータに比べて少ないため，先に作成した推定 51.5 年間の竜巻発生数と対応した被害幅，被害長さの統計量の分析は，以下の手順で行った。

(a) 観測データ数を確保するために，1961 年以降の被害幅，被害長さデータをもととし，そのデータを F スケールごとに仕分ける。

(b) 各 F スケールに対し，上記で抽出された被害幅や被害長さのデータを大きい順に並び替え，51.5 年間の発生数分だけ繰り返しサンプリングを行い，推定 51.5 年間のデータとする。観測データ数の整数倍とならない個数分については大きな値から順にサンプルする。

(例) 被害幅データのサンプリング (被害長さデータについても同様)

F2：期間内 2 個のデータを推定期間内 8 個となるまで計 4 回サンプリング

F1：期間内 7 個のデータを推定期間内 33 個となるまで計 4 回サンプリングし，残りの 5 個 (33-7×4) は値の大きい方から 5 個サンプリングして計 33 個のデータとする。

(c) 推定 51.5 年間のデータについて，統計量 (平均値と標準偏差) を求める。

第 8 表 竜巻の被害幅の統計量

		F3	F2	F1	F0	合計
1961-2012.6 51.5 年間	期間内個数	0	2	7	0	9
	年平均 (m)	0	33	134	0	112
	標準偏差 (m)	0	4	153	0	140
推定 51.5 年間 (全竜巻)	期間内個数	0	8	33	0	41
	年平均 (m)	0	33	141	0	120
	標準偏差 (m)	0	3	145	0	137

第9表 竜巻の被害長さの統計量

		F3	F2	F1	F0	合計
1961-2012.6 51.5年間	期間内個数	0	3	7	1	11
	年平均(km)	0.00	1.83	1.19	0.50	1.30
	標準偏差(km)	0.00	1.26	0.92	0.00	0.99
推定 51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	0	8	33	0	41
	年平均(km)	0.00	2.00	1.23	0.00	1.38
	標準偏差(km)	0.00	1.04	0.87	0.00	0.94

(2) 最大風速，被害幅，被害長さの相関係数

相関係数は，過去に発生した竜巻での，最大風速，被害幅，被害長さの関係を評価することから，繰り返しサンプリングを行った推定 51.5 年間のデータではなく，過去の観測データをもとにその対数値の相関係数を評価する。評価結果を第 10 表に示す。

第 10 表(1) 最大風速・被害幅・被害長さの対数値の相関係数

相関係数の値*	最大風速	被害幅	被害長さ
最大風速	1.000	0.000**	0.394
幅	—	1.000	0.239
長さ	—	—	1.000

* 相関係数マトリクスは対称であるため右上半分のみ値を示し，対角項はその定義から 1.000 とした。

** 負の値-0.340（無相関）であったため保守側に 0.000 とした。

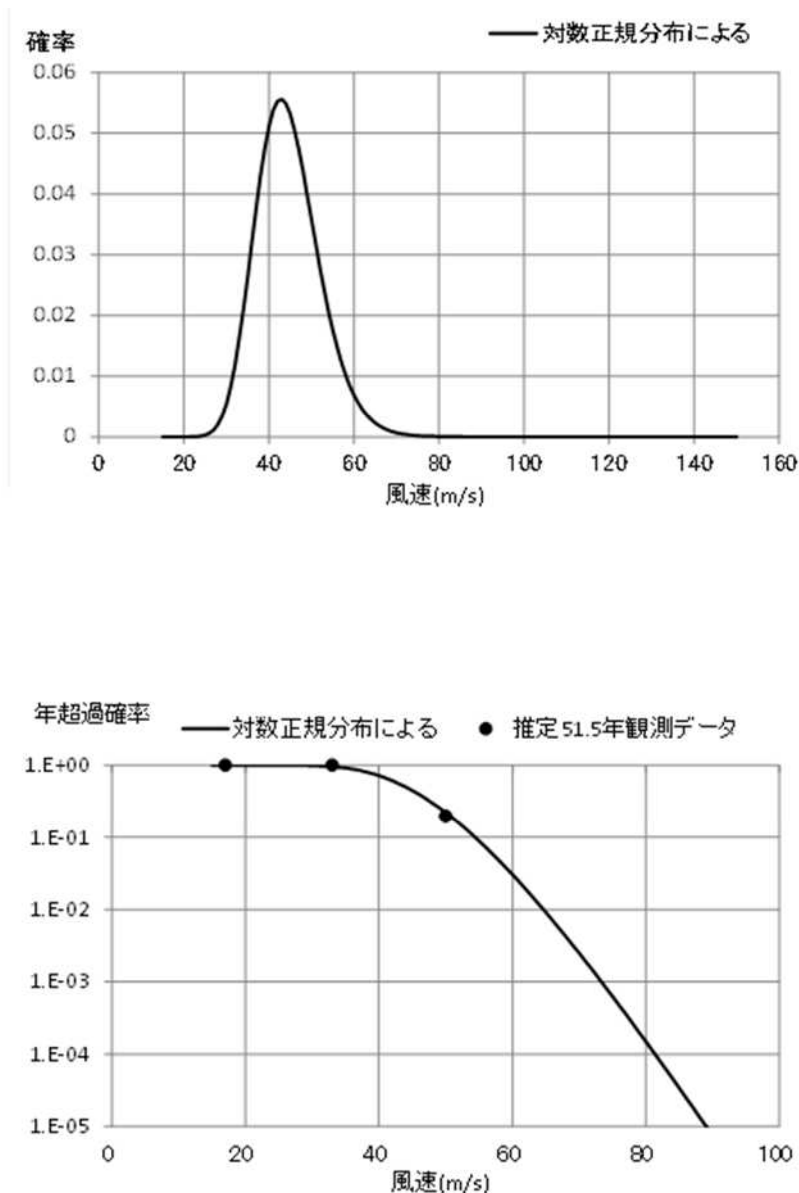
第 10 表(2) 相関係数算定に用いた組合せデータ数

データ数	最大風速	被害幅	被害長さ
最大風速	—	9	11
幅	—	—	9
長さ	—	—	—

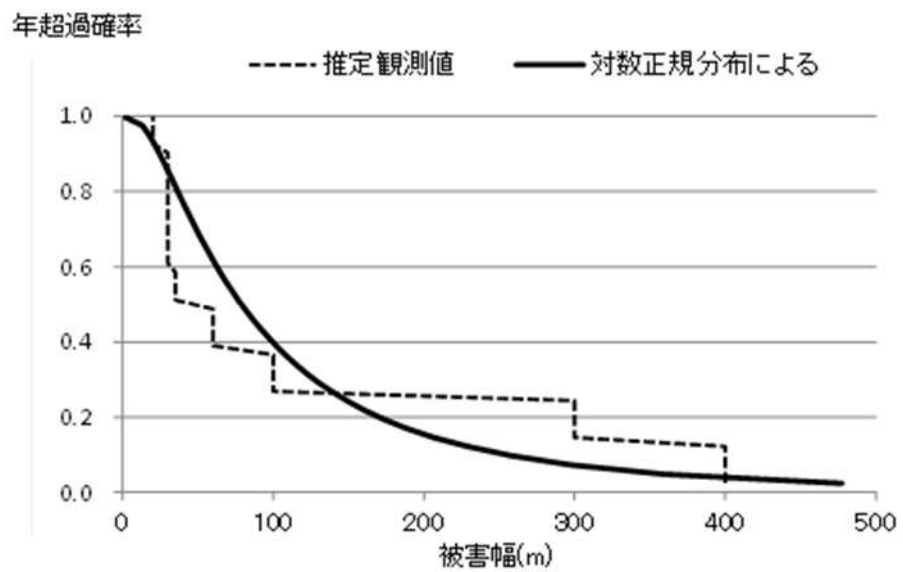
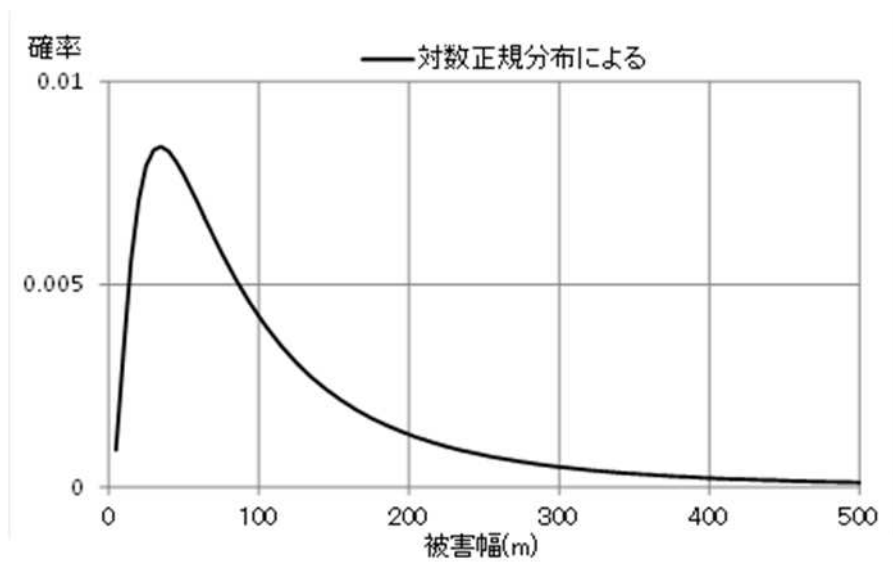
竜巻検討地域においては，最大風速と被害長さの間で 0.39 程度，被害幅と被害長さの間で 0.24 程度の相関が認められた。また，最大風速と被害幅の間は負の値となり逆相関となっている。これは，F1 の被害幅の平均値が約 140 m であるのに対し，F2 の被害幅が約 30 m と小さいことが原因と考えられる。負の値となった相関係数については，保守的に無相関として，値は 0 とした。

(3) 最大風速, 被害幅, 被害長さの確率分布

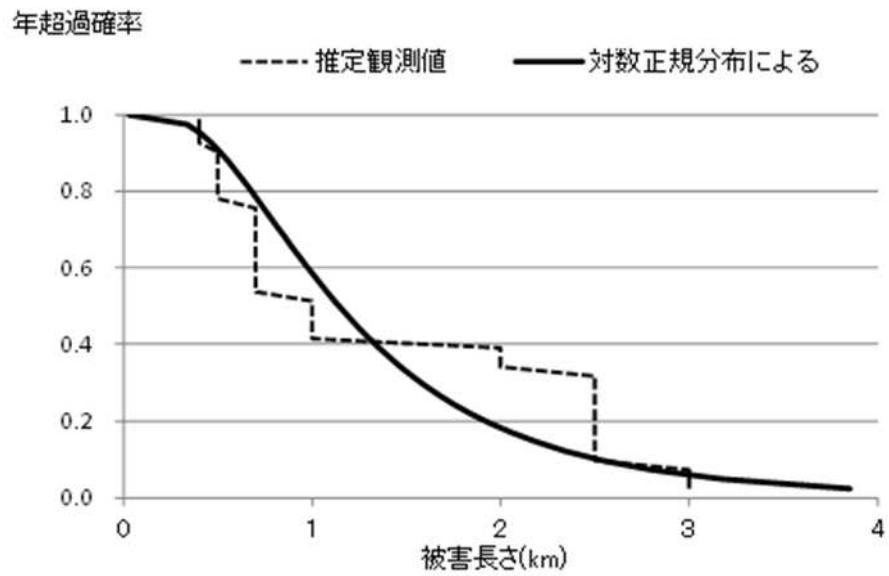
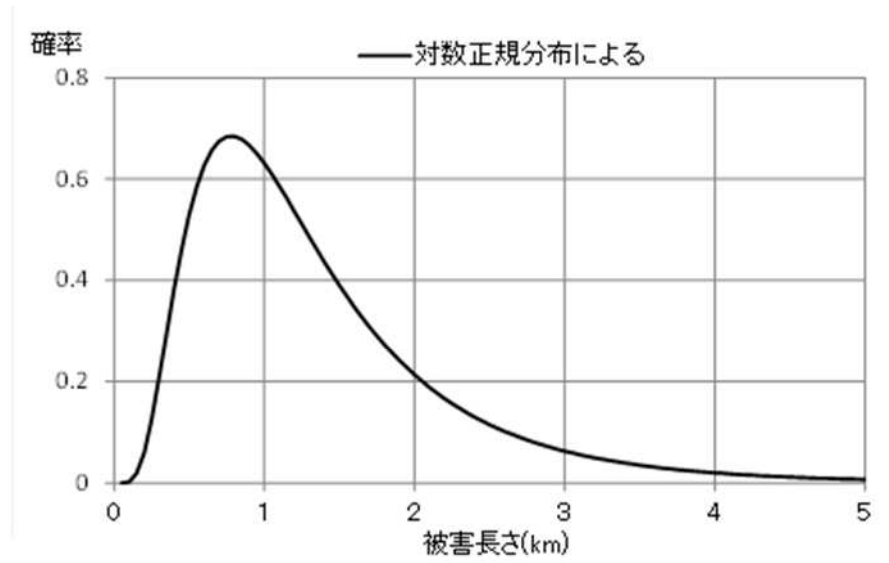
最大風速, 被害幅, 被害長さは, 前記で評価した統計量を有する対数正規分布に従うものとする。それぞれが独立であるとした場合の確率分布と年超過確率について, 第 33 図～第 35 図に示す。最大風速の年超過確率は観測結果がトレースでき, 風速の大きいエリアにおいても不自然な形となっていないことが確認できる。また, 竜巻の被害幅及び長さの年超過確率についても観測結果を概ねトレースしていることが確認でき, 確率密度分布からは中央値近くの値が生じる可能性が高いこと, 非常に大きな値における発生確率が低いことが確認できる。



第 33 図 竜巻風速の確率密度分布 (上) と年超過確率 (下)



第 34 図 竜巻の被害幅の確率密度分布（上）と年超過確率（下）



第 35 図 竜巻の被害長さの確率密度分布（上）と年超過確率（下）

4.2.6 竜巻最大風速のハザード曲線の算定

前記で設定した竜巻の年発生数の確率分布及び最大風速の確率分布をもとに、東京工芸大委託成果を参考とし、以下に示すとおり Garson et al. の方法に沿ってハザード曲線の評価を実施した。

(1) 評価方法

D を検討対象構造物が風速 V_0 以上の竜巻に遭遇する事象とし、ある竜巻が対象構造物を襲い、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率を $R(V_0)$ とする。また、ある竜巻の風速が V_0 以上となる面積を $DA(V_0)$ とする。また、その期待値を $E[DA(V_0)]$ にて表す。

- ・前記に基づき、竜巻の最大風速 V 、被害幅 w 、被害長さ l の統計値から、次式の対数正規分布型の確率分布を与える。

$$f(V, w, l) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 |\Sigma|^{1/2}} \frac{1}{Vwl} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \Sigma^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})\right)$$

$$\text{ここで、 } \mathbf{x} = \begin{Bmatrix} \ln(V) \\ \ln(w) \\ \ln(l) \end{Bmatrix}, \quad \boldsymbol{\mu} = \begin{Bmatrix} \mu_V \\ \mu_w \\ \mu_l \end{Bmatrix}, \quad \Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_V^2 & \sigma_V \sigma_w \rho_{Vw} & \sigma_V \sigma_l \rho_{Vl} \\ \sigma_V \sigma_w \rho_{Vw} & \sigma_w^2 & \sigma_w \sigma_l \rho_{wl} \\ \sigma_V \sigma_l \rho_{Vl} & \sigma_w \sigma_l \rho_{wl} & \sigma_l^2 \end{bmatrix}$$

T : 転置行列

\mathbf{x} : 最大風速、被害幅、被害長さの対数値 $\ln(V)$ 、 $\ln(w)$ 、 $\ln(l)$ によるベクトル

$\boldsymbol{\mu}$: 各統計値から評価した最大風速、被害幅、被害長さの対数値の平均からなるベクトル

Σ : $\ln(V)$ 、 $\ln(w)$ 、 $\ln(l)$ から評価した、標準偏差 σ_V 、 σ_w 、 σ_l と相関係数 ρ_{Vw} 、 ρ_{wl} 、 ρ_{Vl} からなる分散共分散行列

- ・得られた平均と分散共分散行列をもとに、竜巻影響エリアの代表幅を考慮し、次式にて、期待値 $E[DA(V_0)]$ を評価する。

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

ここで、

L : 竜巻影響エリアの代表幅(約 150 m)

S : 竜巻影響エリアの面積(約 17672 m²)

$f(V, l)$, $f(V, w)$, $f(V)$: $f(V, w, l)$ をもとに各成分を抽出した関数

- 上記の式の右辺第 1 項は、竜巻の被害幅と被害長さの積(被害面積)を示しており、点構造物に対する被害に対応する。第 2 項は被害長さ と構造物寸法の積、第 3 項は被害幅と構造物寸法の積であり、面構造物あるいは線状構造物の被害面積を示す。第 4 項は建物面積に依存する項である。また、無限大までの積分の上限については、幅、長さは対数値の平均 + 4 σ (標準偏差) までとし、風速は 120 m/s までとする。
- 被災領域内には、竜巻の被害幅 w のうち風速が V_0 を超える部分の幅を与える次式を考慮する。

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

ここで、 V_{\min} は被害が発生し始める風速であり “gale intensity velocity” と呼ばれている。米国国立気象局 NWS においては 34~47 ノット (17.5~24.2m/s) と定義されており、日本の気象庁が使用している風力階級では、風力 8 が疾強風 (gale : 17.2~20.7m/s, 小枝が折れ風に向かって歩けない)、風力 9 が大強風 (strong gale : 20.8~24.4m/s, 瓦が飛び煙突が折れる) と分類されている。以上を参考にし、 $V_{\min} = 25$ m/s と設定する。

- 竜巻検討地域の面積 A_0 及び上記の期待値 $E[DA(V_0)]$ から、対象構造物が竜巻による被害を受け、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率 $R(V_0)$ を次式にて評価する。

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

- ・発生数がポリヤ分布に従うものとし、年超過確率 P_{V_0} を次式にて評価する。

$$P_{V_0} = 1 - [1 + \beta v R(V_0)]^{-1/\beta} = 1 - [1 - \frac{1}{\beta} (\beta v R(V_0)) + \dots]$$

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

ここで、

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

v : 年平均発生数

σ : 年発生数の標準偏差

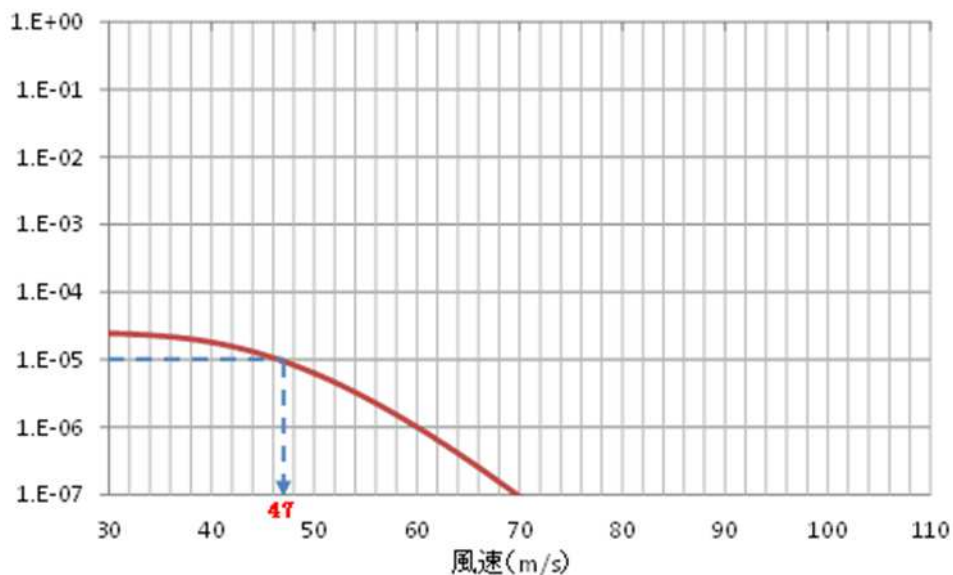
p ($=v/A_0$) : 単位面積当たりの年被災確率

(2) 評価結果

評価したハザード曲線について第 36 図に示す。

このハザード曲線において、年超過確率が 10^{-5} となるときの竜巻風速を読み取る。

年超過確率



第 36 図 竜巻検討地域 10km 幅でのハザード曲線

4.2.7 年超過確率に対応する竜巻最大風速の設定

4.2.6にて得られたハザード曲線より、年超過確率 10^{-5} での風速を読み取り、ハザード曲線による最大風速とする。

これより、竜巻検討地域（10 km幅）でのハザード曲線による最大風速は、47 m/sとなる。

4.2.8 竜巻検討地域内1 km幅での発生状況を考慮した場合

前項までは、竜巻検討地域10 km幅にかかる竜巻をもとに最大風速を評価した。ここでは、ハザード曲線の保守性を持たせるために、竜巻検討地域を1 km幅に区切った場合について算定する。算定は、陸側0 km～1 km及び陸側1 km～2 kmの場合とする。（それ以外の領域ではサンプル数が少なく算定できないため）また、被害長さの統計量は、竜巻の発生地点から消滅地点までの直線が当該1 km幅にかかる長さをもとに算定する。発生地点と消滅地点が同一の場合は、被害長さは0とする。

算定に用いた諸元について第11表及び第12表に示す。なお、いずれのケースにおいても、相関係数については、10 km幅にかかる竜巻で算定した値（第9表）を用いる。

算定したハザード曲線について、10 km幅でのハザード曲線と重ね合わせた図を第37図に示す。得られたハザード曲線において 10^{-5} での風速値を読み取ると、陸側0 km～1 kmで55 m/s、陸側1 km～2 kmで50 m/sとなり、陸側0～1 kmでの風速値55 m/sの方が大きい値であることから、竜巻検討地域内1 km幅におけるハザード曲線による最大風速は、55 m/sとなる。

第 11 表 陸側 0 km～1 km での統計量

(a) 発生数

			F3	F2	F1	F0	小計	陸上不明	海上不明	合計
過去 に観測された 竜巻	1961-2012.6 51.5 年間	期間内個数	0	4	5	1	10	1	0	11
		年平均	0.00	0.08	0.10	0.02	0.19	0.02	0.00	0.21
		標準偏差	0.00	0.27	0.30	0.14	0.45	0.14	0.00	0.50
	1991-2012.6 21.5 年間	期間内個数	0	2	5	1	8	1	0	9
		年平均	0.00	0.09	0.23	0.05	0.37	0.05	0.00	0.42
		標準偏差	0.00	0.30	0.43	0.22	0.59	0.22	0.00	0.67
	2007-2012.6 5.5 年間	期間内個数	0	0	1	0	1	0	0	1
		年平均	0.00	0.00	0.18	0.00	0.18	0.00	0.00	0.18
		標準偏差	0.00	0.00	0.43	0.00	0.43	0.00	0.00	0.43
推定 51.5 年間 の竜巻	推定 51.5 年間 (陸上竜巻)	期間内個数	0	4	12	0	16			
		年平均	0.00	0.08	0.23	0.00	0.31			
		標準偏差	0.00	0.27	0.43	0.00	0.51			
	推定 51.5 年間 (全竜巻)	期間内個数	0	4	12	0	16			
		年平均	0.00	0.08	0.23	0.00	0.31			
		標準偏差	0.00	0.27	0.43	0.00	0.51			

※表中の網掛け部は、気象庁による観測体制が変えられたことによる補正を施す元となるデータ

(b) 被害幅

		F3	F2	F1	F0	合計
1961-2012.6 51.5 年間	期間内個数	0	2	5	0	7
	年平均	0	33	176	0	135
	標準偏差	0	4	165	0	152
推定 51.5 年間 (全竜巻)	期間内個数	0	4	12	0	16
	年平均(m)	0	33	205	0	162
	標準偏差(m)	0	3	158	0	156

(c) 被害長さ

		F3	F2	F1	F0	合計
1961-2012.6 51.5 年間	期間内個数	0	3	5	1	9
	年平均(km)	0.00	0.82	0.87	0.26	0.79
	標準偏差(km)	0.00	0.29	0.29	0.00	0.32
推定 51.5 年間 (全竜巻)	期間内個数	0	4	12	0	16
	年平均(km)	0.00	0.87	0.91	0.00	0.90
	標準偏差(km)	0.00	0.26	0.28	0.00	0.27

第 12 表 陸側 1 km～2 km での統計量

(a) 発生数

			F3	F2	F1	F0	小計	陸上 不明	海上 不明	合計
過去 に観測 された 竜巻	1961-2012.6 51.5 年間	期間内個数	0	2	3	1	6	0	0	6
		年平均	0.00	0.04	0.06	0.02	0.12	0.00	0.00	0.12
		標準偏差	0.00	0.20	0.31	0.14	0.38	0.00	0.00	0.38
	1991-2012.6 21.5 年間	期間内個数	0	1	3	1	5	0	0	5
		年平均	0.00	0.05	0.14	0.05	0.23	0.00	0.00	0.23
		標準偏差	0.00	0.22	0.47	0.22	0.53	0.00	0.00	0.53
	2007-2012.6 5.5 年間	期間内個数	0	0	0	0	0	0	0	0
		年平均	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		標準偏差	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
推定 51.5 年間の 竜巻	推定 51.5 年間 (陸上竜巻)	期間内個数	0	2	8	0	10			
		年平均	0.00	0.04	0.16	0.00	0.19			
		標準偏差	0.00	0.20	0.47	0.00	0.51			
	推定 51.5 年間 (全竜巻)	期間内個数	0	2	8	0	10			
		年平均	0.00	0.04	0.16	0.00	0.19			
		標準偏差	0.00	0.20	0.47	0.00	0.51			

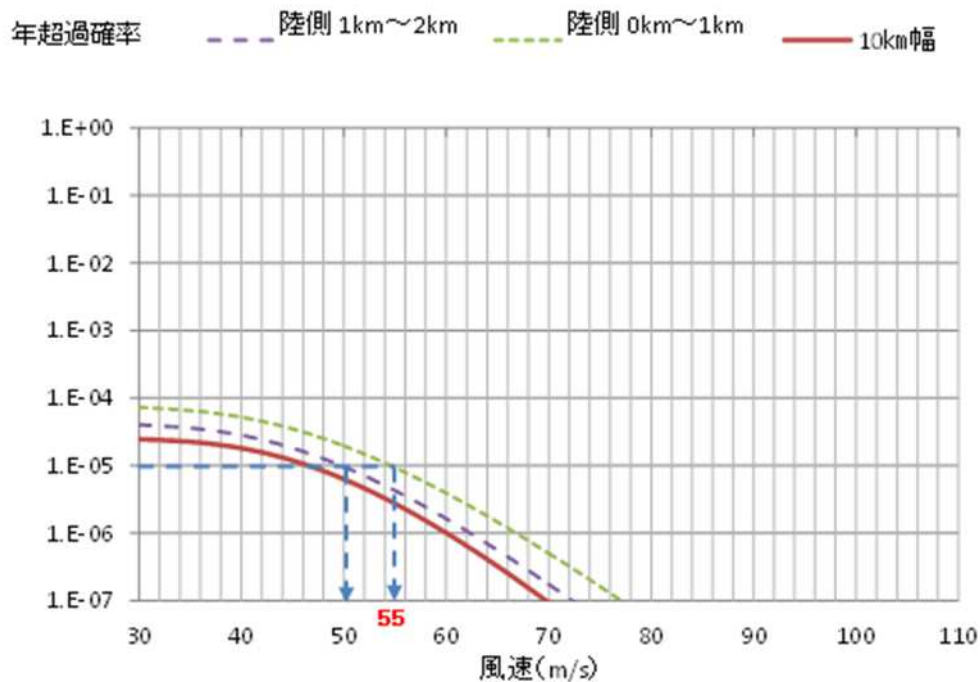
※表中の網掛け部は、気象庁による観測体制が変えられたことによる補正を施す元となるデータ

(b) 被害幅

		F3	F2	F1	F0	合計
1961-2012.6 51.5 年間	期間内個数	0	2	3	0	5
	年平均	0	33	143	0	99
	標準偏差	0	4	140	0	116
推定 51.5 年間 (全竜巻)	期間内個数	0	2	8	0	10
	年平均(m)	0	33	158	0	133
	標準偏差(m)	0	4	122	0	119

(c) 被害長さ

		F3	F2	F1	F0	合計
1961-2012.6 51.5 年間	期間内個数	0	2	3	1	6
	年平均(km)	0.00	0.71	0.86	0.16	0.69
	標準偏差(km)	0.00	0.53	0.34	0.00	0.42
推定 51.5 年間 (全竜巻)	期間内個数	0	2	8	0	10
	年平均(km)	0.00	0.71	0.91	0.00	0.87
	標準偏差(km)	0.00	0.53	0.28	0.00	0.31



第 37 図 竜巻検討地域 1 km 幅でのハザード曲線

第 37 図のハザード曲線より，竜巻検討地域 1 km 幅において年超過確率が 10^{-5} となるときの竜巻風速を読取った結果，55 m/s となった。

これより，年超過確率が 10^{-5} となるときの最大風速は以下のとおりとなる。

年超過確率 10^{-5}	竜巻検討地域内 10 km 幅における最大風速 (m/s)	47
	竜巻検討地域内 1 km 幅における最大風速 (m/s)	55

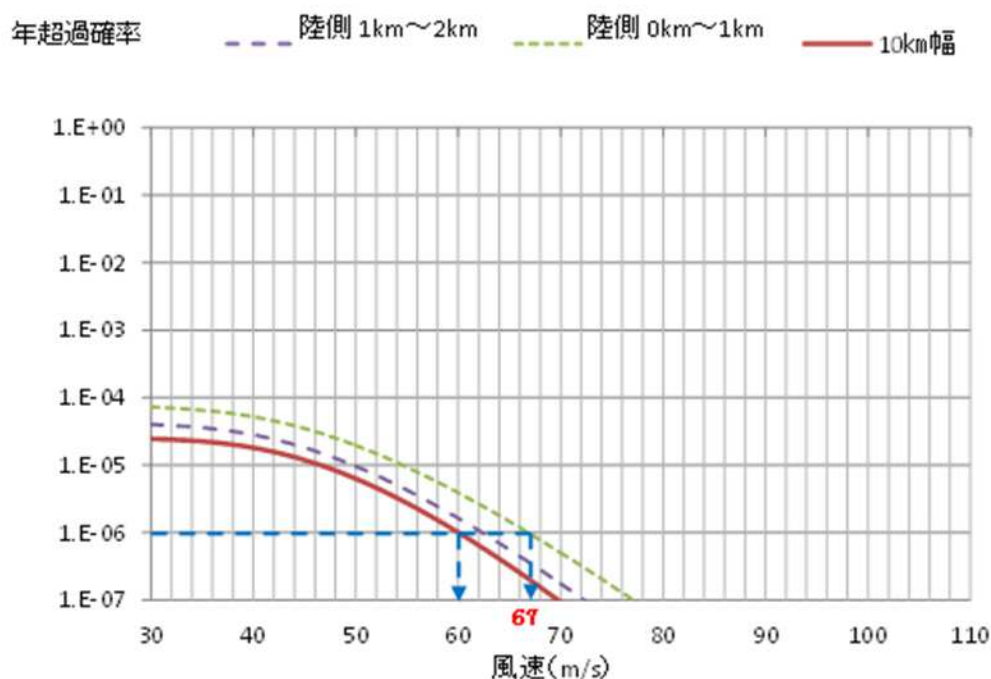
これより，竜巻検討地域内 1 km 幅を考慮すると，年超過確率が 10^{-5} となるときの最大風速は，55m/s となる。

4.3 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定

日本において過去に発生した竜巻による最大風速 $V_{B1} = 92\text{m/s}$ 及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 $V_{B2} = 55\text{ m/s}$ を比較すると，大きい風速は 92 m/s となる。

ハザード曲線の算出にあたって使用した竜巻の統計データの不確実性につ

いては、前項までの検討により、F スケール不明の海上竜巻の発生数は、陸上竜巻の F スケール別発生比率で按分して取り扱っているが、竜巻検討地域の設定に伴う竜巻ハザード曲線算出のためのデータの不確実性（竜巻検討地域内で発生した竜巻 16 個のうち 4 個が規模不明であること）等の観点から、参照する年超過確率について 10^{-5} から一桁下げた年超過確率 10^{-6} に相当する風速を考慮する。



第 38 図 竜巻検討地域 10km 幅及び 1 km 幅でのハザード曲線
(年超過確率 10^{-6} における風速の読取り)

第 38 図より、年超過確率 10^{-6} における最大風速は以下のとおりとなる。

年超過確率 10^{-6}	竜巻検討地域内 10 km 幅における最大風速 (m/s)	60
	竜巻検討地域内 1 km 幅における最大風速 (m/s)	67

これより、年超過確率を 10^{-6} としたときの最大風速は、竜巻検討地域内 1 km 幅における最大風速 67m/s が最大となるが、先に設定した日本において過去に発生した竜巻による最大風速 $V_{B1} = 92\text{m/s}$ より小さい値となった。このため、

年超過確率 10^{-6} を考慮した場合においても基準竜巻の最大風速 V_B は算出した V_{B1} と V_{B2} のうち大きい方の値とすることから $V_B = 92 \text{ m/s}$ となる。

気候変動を完全に予測することは難しいため、今後も最新のデータ・知見をもって気候変動の影響に注視し、必要に応じて見直しを実施していくものとする。

竜巻の最大風速の算定結果

項目	最大風速[m/s]
日本において過去に発生した竜巻による最大風速 V_{B1}	92
竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 V_{B2}	67
基準竜巻の最大風速 V_B	92

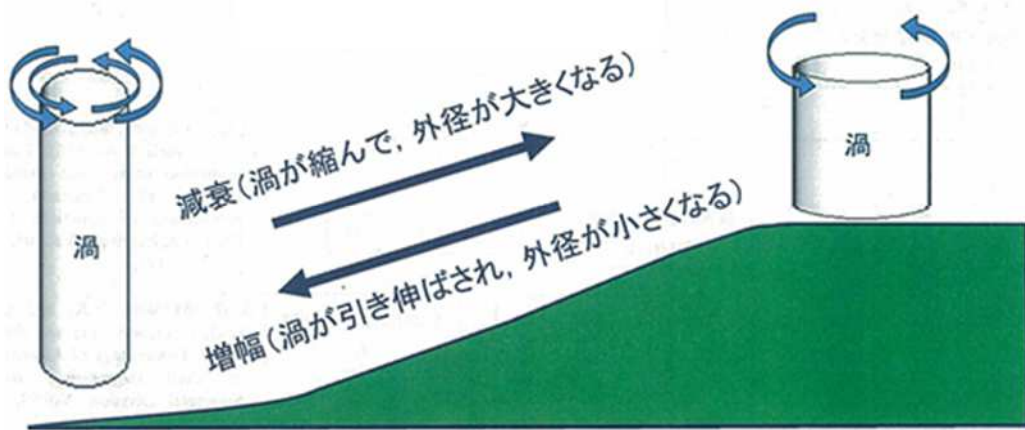
4.4 設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定

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

4.4.1 地形効果による竜巻風速への影響

地形効果が竜巻強度に及ぼす影響に関する知見として、地形起伏による影響について既往の研究において示されており、その知見を踏まえて貯蔵施設周辺の地形効果による竜巻の増幅可能性について検討する。

竜巻のような回転する流れでは、角運動量保存則により「回転の中心からの距離」及び「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質がある。そのため、第 39 図に示す通り竜巻の渦が上り斜面を移動する時、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動する時には強まる。



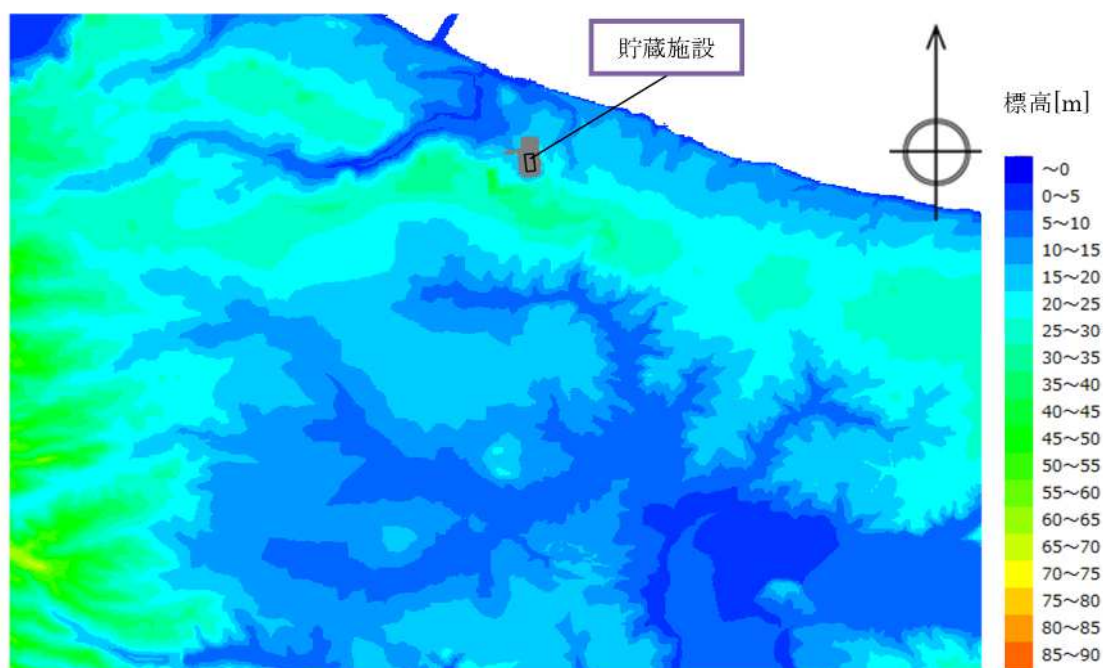
第 39 図 竜巻旋回流の地形影響に関する模式図

4.4.2 貯蔵施設周辺の地形

貯蔵施設周辺の地形（標高図）について第 40 図に示す。貯蔵施設が立地する敷地は、北側が津軽海峡に面し、海側を除く三方を一部の森林を含むなだらかな台地に囲まれた標高 20m 前後の丘陵地である。

貯蔵施設周辺で発生する竜巻については、地形が平坦な海側から敷地に入場する場合、貯蔵施設敷地自体も平坦であるため竜巻が増幅することはないと考えられる。また、敷地南側の平地で竜巻が発生し、その竜巻が海側に向かって移動し敷地内に入場する場合、竜巻はなだらかな丘陵を越える必要があるが、この場合の地形効果による増幅は、丘陵がなだらかであるため竜巻の増幅・減衰はないか、もしくは丘陵の上り勾配と下り勾配で相殺されると考えられる。

このことから、貯蔵施設においては地形効果による竜巻の増幅を考慮する必要はないと考えられる。



第40図 貯蔵施設周辺の標高データ

4.4.3 設計竜巻の最大風速の設定

以上の検討により、貯蔵施設においては地形効果による竜巻の増幅を考慮する必要はないと考えられることから、設計竜巻の最大風速 V_D については基準竜巻の最大風速 $V_B = 92 \text{ m/s}$ と同等とし、 $V_B = V_D = 92 \text{ m/s}$ と設定する。

4.5 設計竜巻荷重を設定するための特性値の設定

設計竜巻荷重を設定するための竜巻の特性値については、設定した設計竜巻の最大風速に基づいて算出する。前項までの評価で、設計竜巻の最大風速 V_D については 92 m/s と設定したが、将来的な気候変動を完全に予測することは難しく、例えば、地球温暖化の影響により台風の強度が強まる傾向が考えられ、竜巻の規模や発生数が増加することが予想される。また、設計及び運用に保守性を持たせることを考慮して 100 m/s と設定した。

設定した最大風速 (100 m/s) における特性値について、ガイドの手法をもとに下記の式に基づいて算出した。それぞれの算出結果について第13表に示す。

① 竜巻の移動速度 V_T (m/s)

$$V_T = 0.15 \cdot V_D$$

V_D (m/s) : 竜巻の最大風速

② 竜巻の最大接線風速 V_{Rm} (m/s)

$$V_{Rm} = V_D - V_T$$

③ 竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径 R_m

$$R_m = 30 \text{ (m)}$$

④ 竜巻の最大気圧低下量 ΔP_{max}

$$\Delta P_{max} = \rho \cdot V_{Rm}^2$$

ρ : 空気密度 (1.22 kg/m³)

⑤ 竜巻の最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$

$$(dp/dt)_{max} = (V_T/R_m) \cdot \Delta P_{max}$$

第13表 荷重設定竜巻の特性値

荷重設定最大風速 V_D (m/s)	移動速度 V_T (m/s)	最大接線風速 V_{Rm} (m/s)	最大接線風速半径 R_m (m)	最大気圧低下量 ΔP_{max} (hPa)	最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$ (hPa/s)
100	15	85	30	89	45

参考文献

- (1)Garson R.C., Morla-Catalan J. and Cornell C.A.: “Tornado Desing Winds Based on Risk,” J. Structural Div., ASCE, Vol. 101, No.9 1883-1897, (1975).
- (2)Y.K.Wen and S.L.Chu: “Tornado Risks and Desgin Wind Speed,” J. Structural Div., ASCE, Vol. 99, 2409-2421, (1973).
- (3)気象庁ホームページ:「竜巻等の突風データベース:年代別事例一覧:2012年6月以前の事例を掲載」2013.5.22更新
(<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>)
- (4)原子力規制委員会:「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」(原規技発第13061911号,2013年6月19日)
- (5)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
- (6)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

5. 竜巻影響評価

5.1 概要

本章では、以下のとおり設計荷重を設定し、竜巻による影響評価を実施する。

(1) 金属キャスクへの竜巻影響の考え方

a. 竜巻飛来物の衝突による荷重

竜巻飛来物が金属キャスクに影響を及ぼす可能性は極めて小さいと考えられるが、念のため、竜巻飛来物の金属キャスクへの衝突を仮定し、影響を考察する。

(2) 貯蔵建屋の設計竜巻荷重

設計竜巻荷重として、竜巻影響評価ガイドに基づき以下の荷重を設定する。

a. 竜巻飛来物の衝突による荷重

b. 竜巻の風圧力による荷重

c. 気圧低下に伴う建屋内外の気圧差による荷重

d. 複合荷重（設計竜巻荷重の組み合わせ）

e. 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重（常時作用する荷重，自然現象）

(3) 竜巻随件事象に対する評価

5.2 設計荷重の設定

5.2.1 金属キャスクへの竜巻影響の考え方

竜巻影響評価ガイドでは、設計飛来物として①大きな運動エネルギーをもつ飛来物，②施設の貫入抵抗を確認するための固い飛来物，及び③開口部等を通過することができる程度に小さくて固い飛来物を設定することとしている。

設計飛来物を設定する上では、リサイクル燃料貯蔵センターの特性を考慮する必要があることから、リサイクル燃料備蓄センターにおける基本的安全機能との関連を踏まえた、設計飛来物を設定する上での考え方を以下に整理する。

5.2.1.1 竜巻飛来物の衝突による荷重

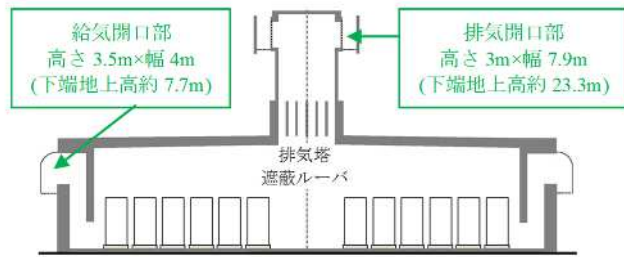
竜巻飛来物が金属キャスクの基本的安全機能に影響を与える可能性としては、貯蔵建屋の開口部を通過した飛来物が貯蔵建屋内に置かれた金属キャスクに衝突し、金属キャスクの閉じ込め機能または遮蔽機能に影響を与える場合が考えられる。

このため、上記の③にあたる、開口部等を通過する飛来物について検討を行う。

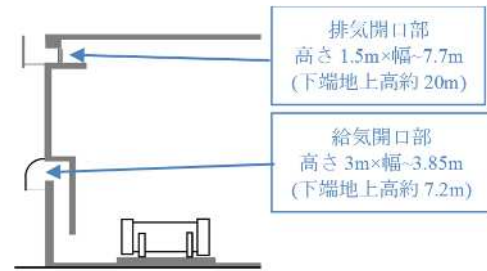
貯蔵建屋内で金属キャスクが存在する場所としては貯蔵区域及び受入れ区域があり、各々の区域に除熱のための空気を循環させる給気口及び排気口を有している。貯蔵区域及び受入れ区域の断面図を第 41 図及び第 42 図(貯蔵区域給気口、受入れ区域給気口及び貯蔵区域排気口)については、以下の通り侵入した飛来物が金属キャスクに影響を及ぼす可能性は考え難い。

- ・貯蔵区域給気口及び受入れ区域給気口：給気口フード及び垂れ壁を持つ迷路構造となっており、仮に飛来物が開口部から侵入しても、迷路構造により運動エネルギーが大幅に減衰される。
- ・貯蔵区域排気口：排気塔の鉛直方向に遮蔽ルーバが設置されており、飛来物が排気塔内に侵入しても、排気塔の外壁や遮蔽ルーバへの衝突で運動エネルギーが大幅に減衰され、また排気塔直下には金属キャスクを貯蔵しない。

また、受入れ区域排気口についても、金属キャスクに影響を及ぼすような飛来物が侵入する可能性は以下の理由から極めて小さく（下記の事象が重畳する確率は 10^{-6} を下回ると考えられる）、設計竜巻レベルの大規模な竜巻が発生する可能性がそもそも極めて小さい(10^{-6} /年以下)ことと併せると、竜巻による飛来物が開口部を通過し金属キャスクに影響を及ぼす可能性は極めて小さく、その確率は設計基準事象として考慮する必要のあるレベルを大幅に下回るものと考えられる。



第 41 図 貯蔵区域断面図
(東西方向)



第 42 図 受入れ区域断面図
(南北方向)

- ・敷地周辺の交通量は極めて少ないことから*1、敷地外を走行中の車両が竜巻に巻き込まれて飛散物となる可能性は極めて小さい。

*1 敷地周辺の車両通行頻度は小型車で 10 分/台、大型車で 1 時間/台程度となる。敷地近辺の区間(300m とする)に自動車が増在する時間の割合は約 1/23 となる。

・自動車の交通量：小型車 139 台/日、大型車 24 台/日

(H22 年度全国道路・街路交通情勢調査：県道 266 号関根蒲野沢線の 24h 自動車類交通量データ)

・自動車の速度：46km/h (同調査：同区間の平均旅行速度データ)

→近辺の区間(300m とする)に自動車が増在する時間の割合：

$(139+24) \text{ 台/日} \times (300\text{m} \div 46\text{km/h}) / 24\text{h} \approx 4.4 \times 10^{-2}$ (約 1/23)

- ・受入れ区域排気口は地上高さ約20mに設置されており、大型の飛来物が当該高さに達する可能性は小さい。
- ・敷地周辺道路からの飛来物を考えた場合でも、敷地周辺道路から見た受入れ区域排気口の立体角は極めて小さい*2ことから、敷地周辺からの飛散物が受入れ区域排気口の方向に飛散する可能性は極めて小さい。

*2 敷地周辺道路から受入れ区域排気口を望む立体角の割合は、受入れ区域排気口のみかけの面積と、距離を半径とする半球の表面積との比として表される。受入れ区域排気口は貯蔵建屋北側に開いており、また敷地東側道路は南北方向に走っていることから、立体角が大きくなる場合として貯蔵建屋北東方向からの飛来を考えると (第 47 図の (NE) 参照)、立体角の割合は以下のように表される。

・受入れ区域排気口を敷地周辺道路から見た角度：45°

(第 47 図の (NE) 参照)

・敷地周辺道路間－受入れ区域排気口間の距離：200m

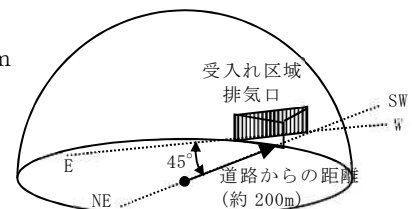
(第 47 図の (NE) 参照)

・受入れ区域排気口の寸法：合計幅 29m×高さ 1.5m

以上より、立体角の割合は

$$\Omega / 2\pi r^2 = (29\text{m} \times 1.5\text{m} \times \sin 45^\circ) / (2\pi \times (200\text{m})^2)$$

$$\approx 1.2 \times 10^{-4} \text{ (約 } 1/8200 \text{)}$$



- ・受入れ区域排気口の高さ(約1.5m)は乗用車の高さとほぼ同程度であり、金属キャスクに影響を与えるようなサイズの大きな塊状の飛来物が支障なしに受入れ区域排気口を通過するのは、寸法の観点から困難である。

- ・金属キャスクが受入れ区域排気口近傍にある期間は、基本的に搬入作業中または搬出作業中に限定されており、竜巻による飛来物が開口部から侵入するタイミングで金属キャスクが受入れ区域に置かれている可能性は小さい*3。

*3 例えば、金属キャスク 1 基が受入れ区域に滞在する期間を受入れ時 1 日/基、払出し時 1.5 日/基とすると、貯蔵期間のうち金属キャスクが受入れ区域に滞在する期間の割合は、 $(1+1.5) \text{日/基} \times 288 \text{基} / 50 \text{年} \approx 3.9 \times 10^{-2}$ (約 1/25) となる。

- ・受入れ区域排気口近傍における金属キャスクの設置状態は、基本的には輸送状態と同様に三次蓋及び緩衝体に取り付けられた状態（搬入の場合、緩衝体が外されるのは金属キャスクのたて起こし実施前、三次蓋が外されるのは検査架台への移動後であり、タイミングは限定されている）であり、受入れ区域排気口から侵入した飛来物の衝突に対しても、蓋部の閉じ込め機能は保護されている。

これらの条件が重畳する確率は極めて小さく、設計竜巻（最大風速 100m/s）を超える竜巻の年発生確率が 10^{-6} 以下であり大規模な竜巻発生の可能性が極めて小さいこととあわせると、竜巻飛来物が受入れ区域の排気口を通過し金属キャスクに衝突して基本的安全機能に影響を及ぼす可能性はない。

以上より、基本的安全機能の観点から、貯蔵建屋に内包される金属キャスクへの竜巻による直接的な影響として、飛来物の衝突を考慮する必要はない。

なお、念のために可能性の前提を無視し、飛来物が受入れ区域排気口を通過して金属キャスクの胴部に落下した場合を仮定し、その影響を別添 5 にて考察する。

5.2.2 貯蔵建屋の設計竜巻荷重

貯蔵建屋は竜巻防護施設である金属キャスクを内包する施設であり、設計竜巻荷重の影響が内包する金属キャスクの基本的安全機能へ波及しないことを確認するため、荷重を保守的に見積もる観点で設計飛来物を設定する。

竜巻飛来物による金属キャスクへの直接的な影響については 5.2.1.1 にて検討していることから、貯蔵建屋への影響を確認するための設計飛来物としては、竜巻影響評価ガイドに示す設計飛来物のうち、大きな運動エネルギーをも

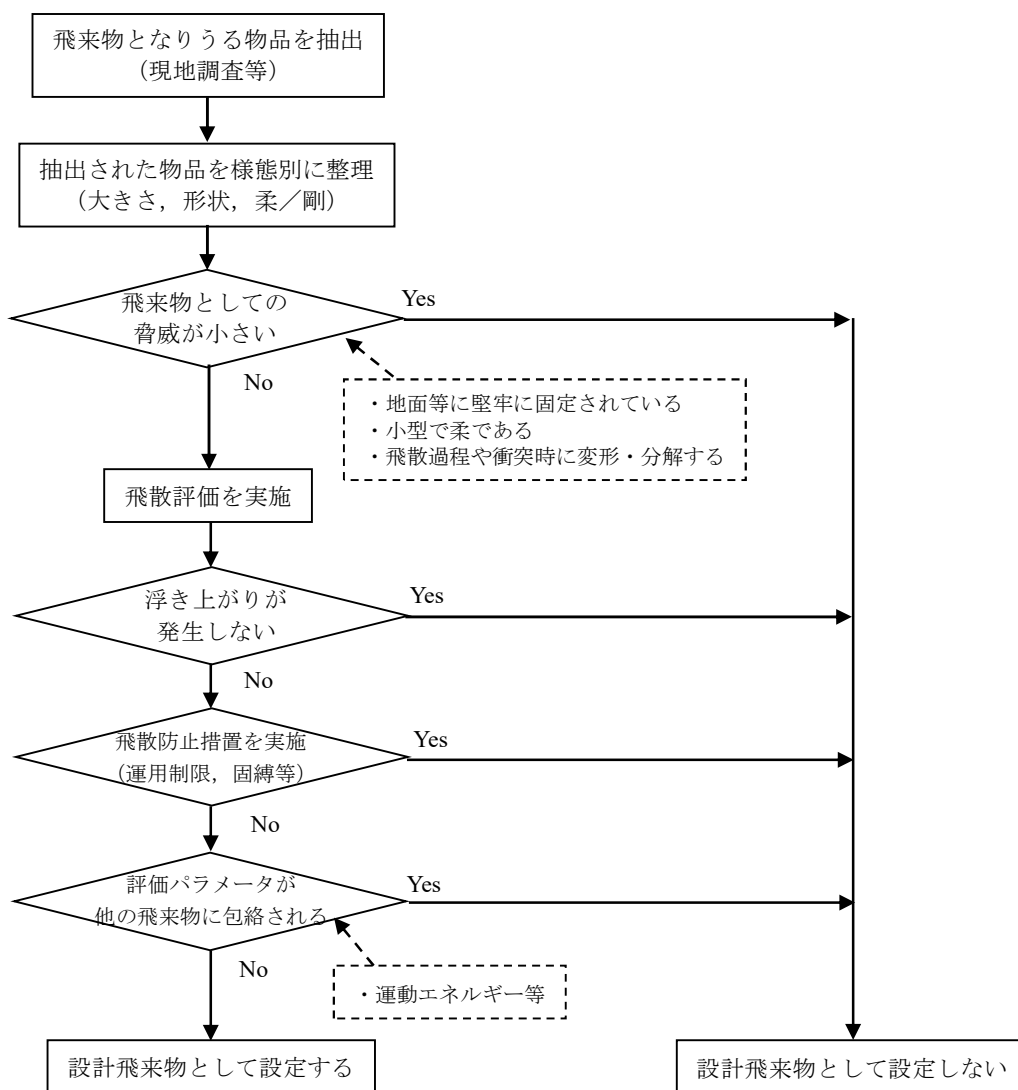
つ飛来物，及び施設の貫入抵抗を確認するための固い飛来物を選定することとする。なお，設計飛来物を設定する上では，内包する金属キャスクが有する基本的安全機能への影響を踏まえて設定するものであることに留意する。

5.2.2.1 竜巻飛来物の衝突による荷重

竜巻防護の観点から飛散防止措置（固縛，固定及び退避）実施に加え，貯蔵施設の特性を考慮して設計飛来物を設定する。

(1) 設計飛来物の設定フロー

敷地内外における竜巻飛来物となりうる物品を網羅的に調査し，それらの中から代表性を持たせた設計飛来物を第 43 図に基づき設定する。



第 43 図 設計飛来物の設定フロー

(2) 設計飛来物の候補の選定

a. 飛来物調査の実施及び物品の分類

使用済燃料貯蔵施設における飛来物に関する現地調査を、平成 25 年 10 月及び平成 27 年 10 月に実施した。調査は、敷地内及び貯蔵建屋を中心とした敷地外を対象に、常設物、仮設物のうち飛来物となり得る物品、及び二次飛来物を抽出した（調査状況の詳細については別添 3 に示す）。

さらに、飛来物に関する現地調査の結果を踏まえ、地面等に堅牢に固定されておらず飛来物となる可能性があるものとして確認された物品に関して、物品のサイズ（大、中、小）、剛／柔及び形状（棒状、板状、塊状）の特徴を踏まえて分類した。

確認された物品、及びそれらの物品を分類した結果を第 14 表に示す。

第 14 表 物品の種類別の整理及び抽出の結果

			棒状	板状	塊状		
①	小	柔	八木アンテナ	パラボラアンテナ 照明灯	標識 看板	カラーコーン 社名看板 スピーカー	ゴミ袋(雑草) テレビカメラ 消火器
②	小	剛	鋼製パイプ 境界標	側溝グレーチング 集水樹グレーチング	コンクリート板(小) マンホール蓋	砂利 U字溝	石 閃光灯
③	中	柔	—	プラスチック板 アルミ梯子 折板(屋根, 庇) 遮風板(穴開スチール) シャッター	ガラス窓 押出成形板 換気/防雪フード アルミガラリ/ルーバ	—	—
④	中	剛	鋼製材	コンクリート板(大) コンクリート板(ガイド)	敷鉄板	—	—
⑤	大	柔	ドラム缶	—	—	コンテナ 軽自動車 トラック	物置 乗用車 バス 電源車 ワゴン 電源車 キャスク輸送車両

(*)下線は、竜巻影響評価ガイドに示されている飛来物

b. 分類結果に基づく飛散評価対象のスクリーニング

5.2.2.1 (2). a にて分類した結果に基づき、飛散評価の対象とする物品のスクリーニングを実施する。

スクリーニングについては5.2.2.1 (2).aにて実施した①～⑤の分類毎に実施することとし、各々の分類に対して、以下の考え方により飛散評価の対象とするか否かを選定する。

①サイズが小さく柔な物品

飛散時の運動エネルギーが小さく、かつ衝突しても飛散物自体が柔であるため、衝突する対象に対して大きな影響を及ぼさないと判断されることから、飛散評価の対象としない。

②サイズが小さいが剛な物品

飛来物となった場合の速度が大きい場合、衝突時に飛散物が持つ運動エネルギーのほとんどは衝突対象に与えられ、衝突する対象の局所的な損傷をもたらす可能性があると考えられることから、飛散評価の対象とする。

③サイズが中程度で柔な物品

飛散の過程や対象物への衝突の際に飛散物自体が変形・分解することにより、飛散過程や衝突の際に飛散物が持つ運動エネルギーの多くは飛散物自体の変形や分解により失われ、衝突する対象に対して大きな影響を及ぼさないと判断されることから、飛散評価の対象としない。

④中サイズで剛な物品

鋭利な先端をもつ場合は壁に貫入する可能性があり、また衝突破損による二次的な影響も懸念されることから、飛散評価の対象とする。

⑤比較的柔だが大きい飛来物

飛散の過程や対象物への衝突の際に飛散物自体が変形・分解することにより、飛散過程や衝突の際に飛来物が持つ運動エネルギーの多くは飛来物自体の変形や分解により失われるものの、飛散物自体の持つ運動エネルギーが大きいため、衝突する対象に対して与える運動エネルギーが大きく、影響を及ぼす可能性があると考えられることから、飛散評価の対象とする。

以上より、②、④及び⑤に含まれる物品を飛散評価の対象とする。

(3) 物品の飛散評価及び設計飛来物の選定

a. 飛散評価の対象とする物品

飛散評価の対象とする物品は、5.2.2.1 (2).bにて候補として選定しスクリーニングを行った結果から抽出した物品とする。対象とする具体的な物品及び評価に用いる諸元（寸法，質量及び空力パラメータ）を第17表に示す。

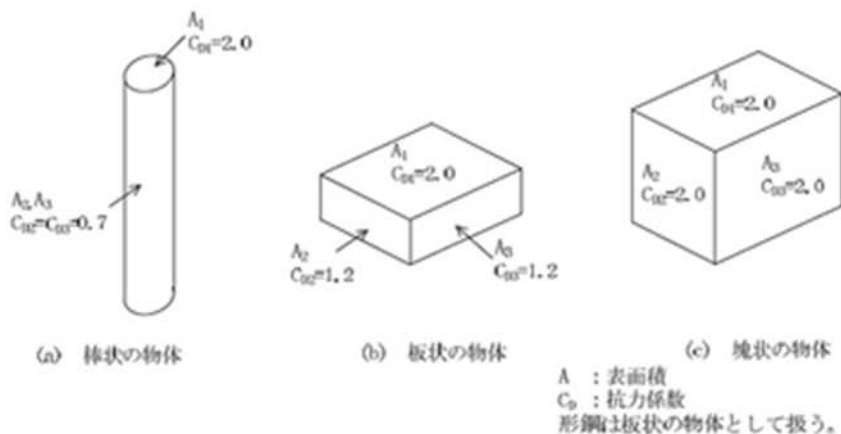
なお，飛来物の空力パラメータ $C_D A/m$ (m^2/kg) については，現地調査の結果から抽出された物品については既往文献*に基づき次式によって算定し，また竜巻影響評価ガイドに示されている物品については既往文献*に記載されている値を用いる。

$$C_D A/m = \frac{1}{3} (C_{D1}A_1 + C_{D2}A_2 + C_{D3}A_3) / m$$

ここで， C_D ：抗力係数（既往文献*に基づき第44図の値を用いる）

A ：表面積(m^2)， m ：質量(kg)

(*）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（平成 23 年 2 月，東京工芸大学）



第 44 図 抗力係数

第 15 表 飛散評価の対象とする物品と評価に用いる諸元

品目		寸法(m)	質量 m(kg)	空力 パラメータ $C_D A / m (m^2/kg)$	
剛	棒状	鋼製パイプ(ガイド)	長さ×直径×直径 (2×0.05×0.05)	8.4	0.0057
		鋼製材(ガイド)	長さ×幅×奥行 (4.2×0.3×0.2)	135	0.0065
		境界標	長さ×幅×奥行 (0.8×0.1×0.1)	19.2	0.0023
剛	塊状	砂利	長さ×幅×高さ (0.03×0.03×0.03)	0.062	0.0288
		石	長さ×幅×高さ (0.15×0.15×0.15)	7.8	0.0058
		闪光灯	長さ×幅×高さ (0.52×0.26×0.4)	37	0.0080
		U字溝	長さ×幅×高さ (1×0.2×0.4)	98	0.0046
剛	板状	側溝グレーチング	長さ×幅×厚さ (1×0.3×0.02)	8	0.0261
		集水枡グレーチング	長さ×幅×厚さ (0.7×0.7×0.06)	37	0.0097
		コンクリート板(大)	長さ×幅×厚さ (1.4×0.7×0.15)	353	0.0022
		コンクリート板(ガイド)	長さ×幅×厚さ (1.5×1×0.15)	540	0.0022
		コンクリート板(小)	長さ×幅×厚さ (0.6×0.6×0.05)	43.2	0.0061
		敷鉄板(大)	長さ×幅×厚さ (6×1.5×0.03)	2133	0.0029
		敷鉄板(小)	長さ×幅×厚さ (1.8×0.9×0.02)	256	0.0043
		マンホール蓋	直径×直径×厚さ (0.65×0.65×0.02)	52.4	0.0044
柔	棒状	ドラム缶	直径×直径×高さ (0.6×0.6×0.9)	21	0.0213
	塊状	コンテナ(ガイド)	長さ×幅×奥行 (2.4×2.6×6)	2300	0.0105
		物置	長さ×幅×高さ (3.6×2.6×2.4)	507	0.0316
		軽自動車	長さ×幅×高さ (3.4×1.5×1.8)	1000	0.0092
		乗用車	長さ×幅×高さ (4.8×1.8×1.5)	1510	0.0082
		ワゴン車	長さ×幅×高さ (5.4×1.9×2.3)	1970	0.0091
		トラック(ガイド)	長さ×幅×高さ (5×1.9×1.3)	4750	0.0026
		バス	長さ×幅×高さ (11.9×2.5×3.6)	13000	0.0042
		電源車	長さ×幅×高さ (6.6×2.2×2.8)	8000	0.0033
		キャスク輸送車両	長さ×幅×高さ (12.5×3.2×1.6)	36000	0.0012

b. 飛散評価に用いる竜巻の特性

飛散評価に用いる竜巻の特性は、設計荷重を評価するための竜巻として「風圧力の設定」及び「気圧低下によって生じる評価対象施設内外の気圧差による圧力の設定」と同様に、荷重設定最大風速を 100m/s とし、竜巻影響評価ガイドに基づき設定した特性を用いる。評価に用いる竜巻の特性を第 16 表に示す。

第16表 評価に用いる竜巻の特性

荷重設定 最大風速	移動速度	最大接線 風速	最大接線 風速半径
100m/s	15m/s	85m/s	30m

飛散評価にあたっては、第 16 表に示した竜巻の特性に基づいて風速場を設定し、設定した風速場の中での物品の飛散挙動（飛散距離及び浮き上がり高さ）を評価する。具体的には、風速場（風速の空間分布及び時間変化）、物品の諸元（寸法、質量、空力パラメータ）及び初期位置を入力条件として、竜巻による風を受ける物体の挙動を運動方程式により解き、出力として得られた物体の位置及び速度に基づき、評価に用いるパラメータ（浮き上がりが発生する場合の飛散距離、浮き上がり高さ、飛散速度、運動エネルギー）を算出する。飛散評価手法の詳細については別添 4 に示す。

なお、飛散評価に用いる風速場としては、飛散物による衝撃荷重（飛散速度、運動エネルギー等）を保守的に見積もる観点から、基本的にランキン渦モデルに基づく風速場に基づくこととするが、設計飛来物の設定にあたっては、他の風速場モデルや実際の竜巻による災害事例も考慮に入れた上で設定を実施することとする。

またここでは、衝撃荷重の大きさを示す指標として、評価対象が貯蔵建屋であることから、コンクリートが裏面剥離を起こす限界厚さを用いることとする。コンクリートの裏面剥離限界厚さは、NEI 07-13 “Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs” (Rev. 7, 2009) に示す Chang 式（下記）により求める。

$$s = 1.84 \times \alpha_s \times \left\{ \frac{V_0}{V} \right\}^{0.13} \times \frac{(WV^2/980)^{0.4}}{d^{0.2} f_c^{0.4}}$$

ここで、

s : 裏面剥離限界厚さ (cm)

V_0 : 基準速度 (6096cm/s)

V : 飛来物の衝突速度 (cm/s)

W : 飛来物の重量 (kgf)

d : 飛来物の直径 (cm)

f_c : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)（設計基準強度を用いる）

α_s : 低減係数（柔飛来物 0.6, 剛飛来物 1.0）

c. 飛散評価結果

5.2.2.1.(3).aで飛散評価の対象とした物品について、5.2.2.1.(3).bに示す方法にて評価した飛散挙動（飛散距離及び浮き上がり高さ）及び衝撃荷重（飛散速度、運動エネルギー及びコンクリート裏面剥離限界厚さ）を第17表に示す。

ここで飛散挙動評価（飛散距離及び浮き上がり高さ）については、初期高さを0 mとして評価し、敷地内及び敷地外の貯蔵建屋周辺との標高差に伴う影響については、後段の「5.2.2.1(3).d 飛散評価に基づいた設計飛来物の設定」の設定の段階において、必要に応じ検討を加える。また衝撃荷重（飛散速度、運動エネルギー及びコンクリート裏面剥離限界厚さ）については初期高さを40 mとして評価を行っているが、水平最大速度や運動エネルギー、コンクリート裏面剥離限界厚さについては初期高さを0 mとして評価した場合でも変わらない。

なお、表記の便宜上、後段の「5.2.2.1(3).d 飛散評価に基づいた設計飛来物の設定」にて実施する設計飛来物としての設定の有無も併せて同表に示す。

第 17 表 物品の飛散評価結果及び設計飛来物としての設定 (1/2: 剛である物品)

品目	寸法 (m)	質量 m (kg)	空カパラ メータ $C_D A/m$ (m^2/kg)	飛散 距離 (m)	浮き 上がり 高さ (m)	水平最 大速度 $M V_{Hmax}$ (m/s)		鉛直最 大速度 $M V_{Vmax}$ (m/s)	運動エネルギー $m M V_{Hmax}^2 / 2$ (kJ/m)	コンクリート 断面割離 限界厚さ (cm)	設計飛来物として設定の有無 除外する場合、その理由 (1)浮き上がらない(2)飛散防止措置をとる (3)他の飛来物に包絡される
						ランキン渦モデルに基づく評価 ⁽¹⁾	ランキン渦モデルに基づく評価 ⁽¹⁾				
棒状	鋼製パイプ (ガイド) ⁽²⁾	長さ×直径×直径 2×0.05×0.05	8.4	0.0057	0	0	—	—	—	—	浮き上がらないため除外 (1)
	鋼製材 (ガイド) ⁽²⁾	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2	135	0.0065	10	1	51	34	180	40	設計飛来物として設定 ○
塊状	塊界標	長さ×幅×奥行 0.8×0.1×0.1	19.2	0.0023	0	0	—	—	—	—	浮き上がらないため除外 (1)
	砂利	長さ×幅×高さ 0.03×0.03×0.03	0.062	0.0288	30	1	68	15	0.15	4	浮き上がりが発生するが、運動エネルギー 一が鋼製材に包絡されるため除外 (3)
	石	長さ×幅×高さ 0.15×0.15×0.15	7.8	0.0058	10	1	48	27	9	14	浮き上がりが発生するが、運動エネルギー 一が鋼製材に包絡されるため除外 (3)
	閃光灯	長さ×幅×高さ 0.52×0.26×0.4	37	0.0080	20	1	52	27	51	23	浮き上がりが発生するが、運動エネルギー 一が鋼製材に包絡されるため除外 (3)
	U字溝	長さ×幅×高さ 1×0.2×0.4	98	0.0046	10	1	46	25	110	32	浮き上がりが発生するが、運動エネルギー 一が鋼製材に包絡されるため除外 (3)
	側溝	長さ×幅×厚さ 1×0.3×0.02	8	0.0261	20	1	67	17	18	20	浮き上がりが発生するが、運動エネルギー 一が鋼製材に包絡されるため除外 (3)
	集水溝	長さ×幅×厚さ 0.7×0.7×0.06	37	0.0097	10	1	54	26	54	26	浮き上がりが発生するが、運動エネルギー 一が鋼製材に包絡されるため除外 (3)
	コンクリート 板(大)	長さ×幅×厚さ 1.4×0.7×0.15	353	0.0022	0	0	—	—	—	—	浮き上がらないため除外 (1)
	コンクリート 板(ガイド) ⁽²⁾	長さ×幅×厚さ 1.5×1×0.15	540	0.0022	0	0	—	—	—	—	浮き上がらないため除外 (1)
	コンクリート 板(小)	長さ×幅×厚さ 0.6×0.6×0.05	43.2	0.0061	10	0	49	27	52	27	浮き上がりが発生するが、運動エネルギー 一が鋼製材に包絡されるため除外 (3)
板状	敷鉄板(大)	長さ×幅×厚さ 6×1.5×0.03	2133	0.0029	0	0	—	—	—	—	浮き上がらないため除外 (1)
	敷鉄板(小)	長さ×幅×厚さ 1.8×0.9×0.02	256	0.0043	0	0	—	—	—	—	浮き上がらないため除外 (1)
	マンホール蓋	直径×直径×厚さ 0.65×0.65×0.02	52.4	0.0044	0	0	—	—	—	—	浮き上がらないため除外 (1)

(1)アジタモデルに基づく飛散評価の結果、浮き上がると評価された物品について記載している。

(2)竜巻影響評価ガイドに示す物品の水平最大速度及び鉛直最大速度に関しては、竜巻影響評価ガイドに示す値と評価値のうち大きい方を示す。

第 17 表 物品の飛散評価結果及び設計飛来物としての設定 (2/2: 柔である物品)

品目	寸法 (m)	質量 m (kg)	空力パラメータ $C_D A / m$ (m^2/kg)	飛散距離 (m)	浮き上がり高さ (m)	水平最大速度 $M^V V_{Hmax}$ (m/s)	始直最大速度 $M^V V_{max}$ (m/s)	運動エネルギー $m_M V_{Hmax}^2 / 2$ (kJ/m)	コンクリート表面剝離限界厚さ (cm)	設計飛来物として設定の有無 除外する場合は、その理由 (1)浮き上がらない(2)飛散防止措置をとる (3)他の飛来物に包絡される
ドラム缶	直径×直径×高さ 0.6×0.6×0.9	21	0.0213	160	11	64	19	42	12	浮き上がりが発生するが、飛散防止措置を行うため除外 × (2)
コンテナ (ガイド)*2	長さ×幅×奥行 2.4×2.6×6	2300	0.0105	190	18	60	40	4200	52	浮き上がりが発生するが、飛散防止措置を行うため除外 × (2)
物置	長さ×幅×高さ 3.6×2.6×2.4	507	0.0316	230	36	69	16	1300	32	浮き上がりが発生するが、飛散防止措置を行うため除外 × (2)
軽自動車	長さ×幅×高さ 3.4×1.5×1.8	1000	0.0092	150	8	53	27	1500	38	浮き上がりが発生するが、運動エネルギーがワゴン車に包絡されるため除外 × (3)
乗用車	長さ×幅×高さ 4.8×1.8×1.5	1510	0.0082	100	5	52	27	2100	44	浮き上がりが発生するが、運動エネルギーがワゴン車に包絡されるため除外 × (3)
ワゴン車	長さ×幅×高さ 5.4×1.9×2.3	1970	0.0091	160	12	53	27	2800	47	設計飛来物として設定 (貯蔵建屋低置部を対象) ○
トラック (ガイド)*2	長さ×幅×高さ 5×1.9×1.3	4750	0.0026	0	0	—	—	—	—	浮き上がらないため除外 × (1)
バス	長さ×幅×高さ 11.9×2.5×3.6	13000	0.0042	100	6	45	25	14000	83	浮き上がりが発生するが、飛散防止措置を行うため除外 × (2)
電源車	長さ×幅×高さ 6.6×2.2×2.8	8000	0.0033	40	2	43	25	7400	69	浮き上がりが発生するが、飛散防止措置を行うため除外 × (2)
キヤスク 輸送車両	長さ×幅×高さ 12.5×3.2×1.6	36000	0.0012	0	0	—	—	—	—	浮き上がらないため除外 × (1)

(*1)フジタモデルに基づく飛散評価の結果、浮き上がると評価された物品について記載している。

(*2)竜巻影響評価ガイドに示す物品の水平最大速度及び始直最大速度に関しては、竜巻影響評価ガイドに示す値と評価値のうち大きい方を示す。

d. 飛散評価に基づいた設計飛来物の設定

(a) 設計飛来物の設定の考え方

5.2.2.1(3).cにて実施した飛散評価の結果に基づき、竜巻影響評価ガイドに示す①大きな運動エネルギーをもつ飛来物及び②施設の貫入抵抗を確認するための固い飛来物につき、第43図の設定フローにおける以下の3つの観点から設定を実施する。

i 浮き上がらない物品については、設計飛来物から除外する。

飛散評価の結果浮き上がらないと評価された物品については、設計飛来物から除外する。

浮き上がらない物品としては、鋼製パイプ、コンクリート板（ガイド）、敷鉄板、トラック、キャスク輸送車両等が該当する。

ii 浮き上がりが発生する物品のうち飛散防止措置を行うものについては、設計飛来物から除外する。

竜巻に対する飛散防止の方法としては、物品の持ち込み制限や建屋内への保管、固縛、固定及び必要に応じた車両の避難が考えられる。

現状においても、防護管理及び災害発生防止の観点から物品管理が行われており、少なくとも飛散物として貯蔵建屋への脅威となるような一定以上の大きさを持った機材や車両が敷地内、特に貯蔵建屋近傍の屋外に非管理状態のまま放置されることはなく、また必要に伴い機材を仮置する機会が限定されていることと併せ、潜在的な飛散物の発生は一定程度抑制されていると考えられる。

しかしながら、飛散評価結果やiiiにおける包絡性の検討結果を踏まえ、竜巻に対する防護の観点から飛散防止を図ることが望ましいと考えられる物品については、飛散防止措置を行うことにより設計飛来物から除外する。

iii 評価パラメータが他の飛来物に包絡される物品については、設計飛来物から除外する。

設計評価の観点からは、保守性を維持しつつ設計飛来物の設定を

合理的に行うことが望ましいことから、ある物品の評価パラメータがより厳しい他の物品の評価パラメータに包絡される場合は、当該物品を設計飛来物からは除外する。

評価パラメータとして基本的には運動エネルギー及びコンクリート裏面剥離限界厚さを用いるが、ある物品を他の物品で包絡できるか否かは、飛散挙動（飛散距離及び浮き上がり高さ）や形状（剛／柔，棒状／板状／塊状）等の要因も含めて考慮し、必要に応じ設計飛来物として包絡する側の物品の条件に反映する。

(b) 設計飛来物の設定

ここでは、5.2.2.1(3).dに示す考え方に基づく設計飛来物の具体的な設定過程を示す。

i 施設の貫入抵抗を確認するための固い飛来物

ここでは竜巻影響評価ガイドにおける「施設の貫入抵抗を確認するための固い飛来物」を設定するため、剛である物品を対象として設計飛来物の設定を行う。

剛である物品のうち浮き上がりが発生するものとして、鋼製材，砂利，石，グレーチング，コンクリート板(小)等があるが，これらの物品の中で鋼製材の運動エネルギーが最も大きく他の物品の運動エネルギーを包絡できること，及び鋼製材の形状が棒状であり塊状や板状の物品と比べ衝突時により大きな貫入力を持つと考えられることから，剛である物品を包絡する設計飛来物として，鋼製材を設定する。

棒状や塊状の物品は形状の面から風による抗力を受けにくく，また板状の物品でも剛で重量のある物品が地面に置かれている場合，浮き上がりに十分な揚力を得るための周囲の空気流の変動は生じ難いと考えられること，及び飛散しやすい物体の姿勢が維持され難いと考えられることから，竜巻の風により持ち上げられ高く飛ばされる状況は考え難い。

鋼製材以外の物品（石，閃光灯，グレーチング等）も含め，剛で

ある物品の飛散距離は高々30 m程度、浮き上がり高さは高々1m程度の評価結果であり、初期高さの影響（貯蔵建屋周辺の法面上からの飛散等）を考慮しても、貯蔵建屋上層部に衝突する可能性は極めて小さいことから、設計飛来物の衝突を考慮する範囲は、貯蔵建屋低層部（具体的には、貯蔵区域排気塔下部の遮蔽ルーバ上端に相当する地上約17.2 mを下回る部位：第45図、第46図参照）とする。

貯蔵建屋のうち衝突に対する強度上の裕度が小さい部位としては、前述した設計飛来物の衝突を考慮する範囲からは外れるが、貯蔵区域排気塔上部の外壁（厚さ約40 cm）がある（第45図、第46図参照）。鋼製材の衝突に対するコンクリート裏面剥離限界厚さは保守的に評価しても約40 cmであり当該部分のコンクリートに裏面剥離は生じない結果である。

ii 大きな運動エネルギーをもつ飛来物

ここでは竜巻影響評価ガイドにおける「大きな運動エネルギーをもつ飛来物」を設定する上で、①の対象とした剛である物品に対し、柔である物品を対象として設計飛来物の設定を行う。

柔である物品として、車両（乗用車、バス等）、コンテナ、物置等がある。これらのいずれも柔一塊状（または棒状）の物品であり、また①にて施設の貫入抵抗を確認するための固い飛来物を設定していることから、ここでは主として運動エネルギーの観点から設計飛来物を設定することとする。

(i) 軽自動車，乗用車，ワゴン車

これらの比較的小型の車両は貯蔵建屋からの飛散距離範囲内の台数が比較的多いと考えられ、竜巻襲来時の退避を十分に行うことができない可能性があることから、設計飛来物として考慮する。ワゴン車の運動エネルギーがこれらの車両の中では最も大きく、軽自動車や乗用車の運動エネルギーはワゴン車に包絡されることから、ワゴン車を設計飛来物として設定する。

これらの車両については貯蔵建屋上層部に衝突する可能性は極め

て小さいと考えられることから、設計飛来物の衝突を考慮する範囲は、貯蔵建屋低層部（具体的には、貯蔵区域排気塔下部の遮蔽ルーバ上端に相当する地上約 17.2 m を下回る部位：第 45 図, 第 46 図参照）とする。設計飛来物の衝突を考慮する範囲を貯蔵建屋低層部に限定していることについては、以下の点からも妥当と考えられる。

- ・飛散評価に用いる竜巻の最大風速は 100 m/s としているが、規模の面からは F3 竜巻(風速 70~92 m/s)を若干上回る程度である。一方、F-スケールにおける F3 竜巻の状況として” cars lifted off the ground”（「自動車は地面から浮上する」）とあること、及び国内における F3 竜巻である佐呂間竜巻(2006. 11. 7)等の被害状況においても自動車はほぼ元の原型を留めていることから、自動車が十数 m 以上の高さまで浮き上がった状況は考え難い。
- ・米国 NRC の Regulatory Guide 1.76 においては、設計飛来物としての自動車が 9.1m(30ft)以下に影響を及ぼすこととしている。
- ・これらの車両については、評価でも浮き上がり高さが小さい(~12 m)結果となっている。

貯蔵建屋のうち衝突に対する強度上の裕度が小さい部位としては、前述した設計飛来物の衝突を考慮する範囲からは外れるが、貯蔵区域排気塔上部の外壁(厚さ約 40 cm)がある(第 45 図, 第 46 図参照)。ワゴン車の衝突に対するコンクリート裏面剥離限界厚さは保守的に評価して約 47 cm であり裏面剥離限界の評価値を超えているが、コンクリート貫通限界厚さ*(約 22 cm)に対しては十分な余裕があるため貫通が生じることはない。

なお、周辺道路を走行中の車両が竜巻により飛散する場合として、貯蔵建屋周辺と敷地周辺道路の高低差を考慮して飛散距離を評価した結果を第 18 表に示す。軽自動車及びワゴン車で飛散距離が貯蔵建屋—敷地周辺道路間の距離と同程度、もしくは若干上回るケースがあるが、飛散物の浮き上がり高さが最大となるのは貯蔵建屋の手前であり、飛来物の軌道を考慮すると、前述した設計飛来物の衝突

を考慮する範囲である貯蔵建屋低層部を超えた個所に飛来物が衝突する可能性は小さい（第 48 図参照）。

* 鉄筋コンクリート貫通限界厚さについても、裏面剥離限界厚さと同様に NEI 07-13（4.2 参照）に示されている方法により求める。貫通限界厚さは Degen 式（下記）により求める。

$$1.52 < \frac{x}{d} \leq 13.42 \text{ の場合, } e = \alpha_e \left(0.69 + 1.29 \left(\frac{x}{d} \right) \right) d, \quad \frac{x}{d} \leq 1.52 \text{ の場合, } e = \alpha_e \left\{ 2.2 \left(\frac{x}{d} \right) - 0.3 \left(\frac{x}{d} \right)^2 \right\} d$$

貫入深さは、修正 NDRC 式（下記）により求める。

$$\frac{x}{d} \geq 2 \text{ の場合, } \frac{x}{d} = 2 \left\{ \frac{12145}{\sqrt{f_c}} N \cdot d^{0.2} \cdot D \left(\frac{V}{1000} \right)^{1.8} \right\}^{0.5}, \quad \frac{x}{d} < 2 \text{ の場合, } \frac{x}{d} = \frac{12145}{\sqrt{f_c}} N \cdot d^{0.2} \cdot D \left(\frac{V}{1000} \right)^{1.8} + 1$$

ここで、

e : 貫通限界厚さ (cm)

x : 貫入深さ (cm)

d : 飛来物の直径 (cm)

V : 飛来物の衝突速度 (cm/s)

D : 飛来物の密度 W/d^3 (kgf/cm³)

W : 飛来物の重量 (kgf)

f_c : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²) (設計基準強度を用いる)

N : 飛来物の先端形状係数 (平坦 0.72, 鈍い 0.84, 球状 1.00, 非常に鋭い 1.14)

α_e : 低減係数 (柔飛来物 0.65, 剛飛来物 1.0)

(ii) バス，電源車

バス及び電源車は飛来物としての運動エネルギーが大きく，設計飛来物として設定したワゴン車を上回っていることから，飛散防止措置を行うことが適切と考えられる。

敷地内を運行するバス（大型のトラックを含む）及び電源車については，台数が限定されており，飛散防止措置（退避に備えた運転手の待機，固縛）を必要に応じてとることとする。

なお，敷地周辺道路を走行中のバスが竜巻により飛散する場合については，貯蔵建屋周辺と敷地周辺道路との高度差を考慮しても飛散距離は貯蔵建屋－敷地周辺道路間の距離を下回っており（第 47 図及び第 18 表参照），バスが周辺道路から飛来して貯蔵建屋に到達する可能性は小さい。バスの貯蔵建屋への衝突を仮定した場合，コンクリート壁の裏面剥離限界厚さ（約 83 cm）は貯蔵建屋低層部の一部の壁厚を上回る（第 45 図，第 46 図参照）が，コンクリート壁に裏面剥離が発生してもコンクリート片が金属キャスクに影響を与える可能性は極めて小さい。またバスの衝突に対するコンクリート壁の貫通限界厚さ（約 43 cm）は貯蔵建屋排気塔上部の壁厚を上回るが，国内における F3 竜巻である佐呂間竜巻（2006. 11. 7）等の被害状況からも，バスが長距離を高く飛んで貯蔵建屋排気塔上部に衝突する可能性は現実的に考え難い。

以上より，バス及び電源車は設計飛来物から除外する。

(iii) コンテナ，物置，ドラム缶

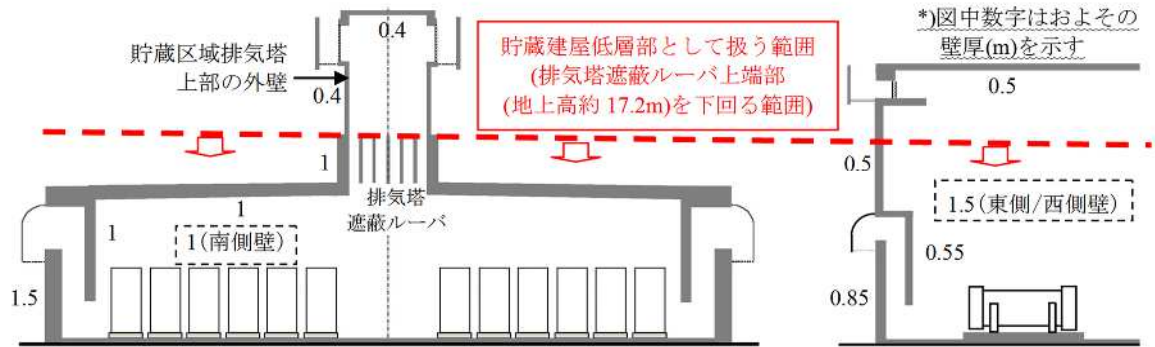
これらの物品は比較的大きな飛散距離及び浮き上がり高さを持っており，またコンテナは運動エネルギーが設計飛来物として設定したワゴン車を上回っていることから，飛散防止措置を行うことが適切と考えられる。

これらの物品はいずれも固定ないし半固定状態で維持されるものであり，飛散防止措置（固縛・固定）を原則としてとることとする。

なお，これらの物品が敷地周辺道路付近に設置される可能性は小

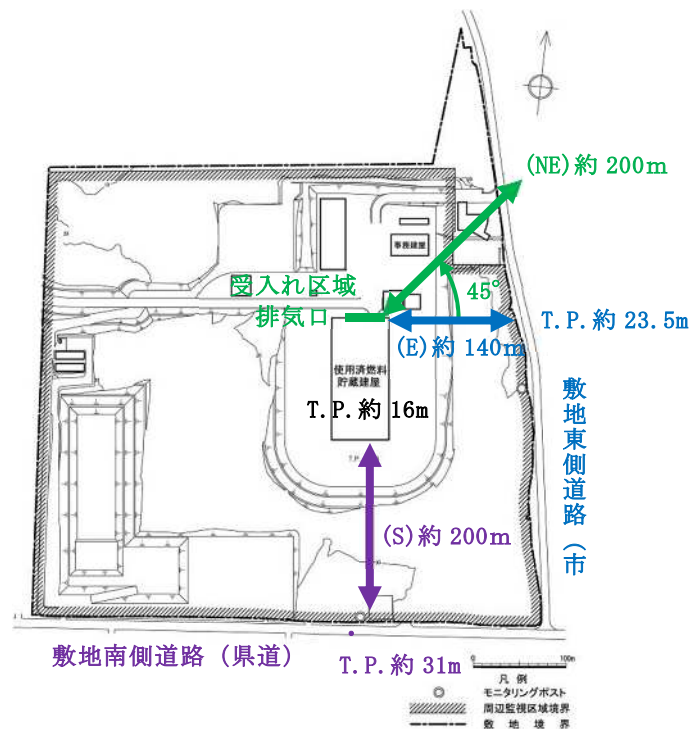
さいことから、竜巻の襲来により敷地周辺道路から飛来して貯蔵建屋に到達する可能性は小さい。

以上より、コンテナ、物置及びドラム缶は設計飛来物から除外する。



第 45 図 貯蔵区域断面図
(東西方向)

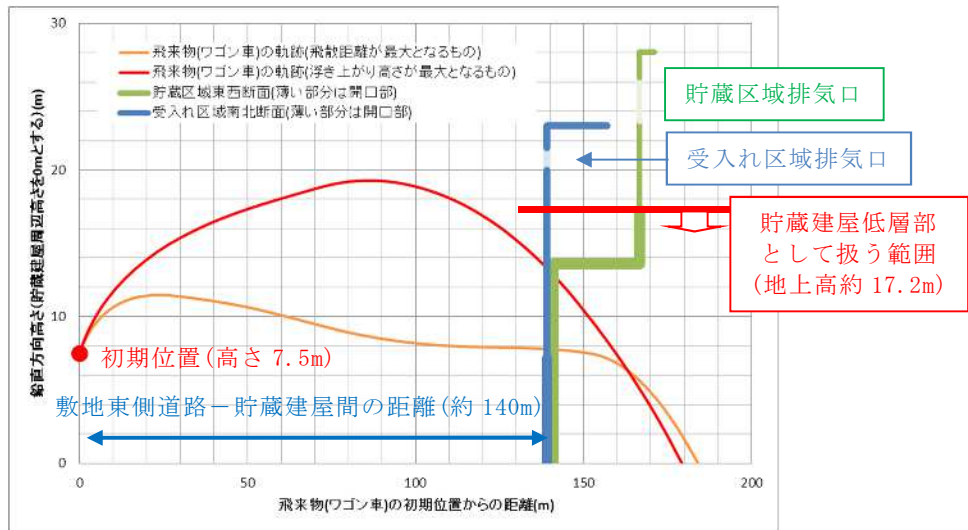
第 46 図 受入れ区域断面
(南北方向)



第 47 図 貯蔵建屋と周辺道路の位置関係

第 18 表 初期高さによる飛散距離への影響

	飛散距離の評価値(m)		
	初期高さ 0m	初期高さ 7.5m 貯蔵建屋周囲—敷地東側 道路の標高差相当	初期高さ 15m 貯蔵建屋周囲—敷地南 側道路の標高差相当
軽自動車	150	180	200
乗用車	100	130	150
ワゴン車	160	190	200
バス	100	130	150
参考		第 47 図の (E) : 敷地東側 道路までの距離約 140m	第 47 図の (S) : 敷地南 側 道路までの距離約 200m



第 48 図 ワゴン車の飛散挙動

- ・敷地東側道路(貯蔵建屋周辺との高低差約 7.5m)を初期高さとした飛散評価結果における飛散距離と高さの関係を示す
- ・貯蔵建屋及び貯蔵区域/受入れ区域排気口の位置を、高さを揃えて図上に示した

(4) 設定した設計飛来物のまとめ

(1)～(3)における検討の結果，設定した設計飛来物を第19表に示す。

第19表 設定した設計飛来物

品目	鋼製材 (ガイド)	ワゴン車
寸法(m)	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2	長さ×幅×高さ 5.4×1.9×2.3
質量(kg)	135	1970
水平最大速度(m/s)	51	53
鉛直最大速度(m/s)	34	27
(参考)運動エネルギー (kJ)	180	2800
備考	設計飛来物の衝突を考慮する 範囲は貯蔵建屋低層部とする	設計飛来物の衝突を考慮する 範囲は貯蔵建屋低層部とする

5.2.2.2 竜巻の風圧力による荷重

竜巻により貯蔵建屋に作用する荷重として「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」を下式により算出する。

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

ここで,

W_w : 風圧力による荷重

q : 設計用速度圧

G : ガスト影響係数 (=1.0)

C : 風力係数 (施設の形状や風圧力が作用する部位 (屋根, 壁の形状, 勾配) に応じて設定する。)

A : 貯蔵建屋の受圧面積

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

ここで,

ρ : 空気密度

V : 最大風速

ただし, 竜巻による最大風速は, 一般的には水平方向の風速として算定されるが, 鉛直方向の風圧力に対してぜい弱と考えられる部位が存在する場合には, 鉛直方向の最大風速等に基づいて算出した鉛直方向の風圧力についても考慮した設計とする。

5.2.2.3 気圧低下に伴う貯蔵建屋内外の気圧差による荷重

竜巻における気圧低下によって生じる外部事象防護施設内外の気圧差による圧力 (W_p) は, 気圧低下量 (ΔP) の最大値に基づき設定する。

貯蔵建屋は給気口及び排気口が外気に開放された構造であり, 建屋内外の気圧差は生じにくいと考えられるが, 保守的に気圧差による圧力荷重が最も大きくなる「閉じた施設」を仮定し, 内外気圧差による圧力荷重 (W_p) を下式により算出する。

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

ΔP_{\max} : 最大気圧低下量 (89hPa)

A : 施設の受圧面積

5.2.2.4 設計飛来物による衝撃荷重

飛来物の衝突方向及び衝突面積を考慮して設計飛来物が貯蔵建屋に衝突した場合の影響が大きくなるように衝撃荷重を算出する。

5.2.2.5 複合荷重（設計竜巻荷重の組み合わせ）

外部事象防護施設の評価に用いる設計竜巻荷重は、竜巻の風圧力による荷重（ W_w ）、竜巻による気圧差による荷重（ W_p ）、及び設計飛来物による衝撃荷重（ W_M ）を組み合わせた複合荷重とし、下式により算出する。

なお、竜巻防護施設（金属キャスク）を内包する貯蔵建屋に対し、設計竜巻荷重の影響が内包する金属キャスクの基本的安全機能へ波及しない設計とするため、 W_{T1} 及び W_{T2} の両荷重をそれぞれ作用させる。

$$W_{T1} = W_p$$

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

W_{T1} , W_{T2} : 竜巻による複合荷重

W_w : 竜巻の風圧力による荷重

W_p : 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

5.2.2.6 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重（常時作用する荷重，自然現象）

(1) 外部事象防護施設に常時作用する荷重

外部事象防護施設に常時作用する荷重を適切に組み合わせる。

(2) 竜巻以外の自然現象による荷重

積乱雲の発達時に竜巻と同時発生する可能性がある自然現象は、落雷、積雪、ひょう及び降水であるが、これらの現象との組み合わせにより発生する荷重は、設計竜巻荷重に包絡されることから、設計竜巻荷重と組み合わせる荷重として考慮しない。

- ・落雷：竜巻と落雷が同時に発生する場合においても、落雷による影響は雷撃であり、竜巻による荷重とは影響が異なる。
- ・積雪：竜巻の作用時間は極めて短時間であること、積雪の荷重は冬季

に発生し、積雪荷重の大きさや継続時間は除雪を行うことで低減できることから、発生頻度が極めて小さい設計竜巻の風荷重と積雪荷重による荷重が同時に発生し、貯蔵建屋に影響を与えることは考えにくいため、組み合わせを考慮しない。リサイクル燃料備蓄センターの立地地域においては、竜巻が冬季に襲来する場合は竜巻通過前後に降雪を伴う可能性はあるが、上昇流の竜巻本体周辺では、竜巻通過時に雪は降らない。また、下降流の竜巻通過時や竜巻通過前に積もった雪の大部分は竜巻の風により吹き飛ばされ、雪による荷重は十分小さく設計竜巻荷重に包絡される。

- ・ひょう：ひょうは積乱雲から降る直径5mm以上の氷の粒であり、仮に直径10cm程度の大型のひょうを想定した場合でも、その質量は約0.5kgである。竜巻とひょうが同時に発生する場合においても、直径10cm程度のひょうの終端速度は59m/s、運動エネルギーは約0.9kJであり、設計飛来物の運動エネルギーと比べ十分小さく、ひょうの衝突による荷重は設計竜巻荷重に包絡される。また、貯蔵建屋は鉛直方向に開口部を持たないため、ひょうが貯蔵建屋内に侵入することはない。
- ・降水：竜巻と降水が同時に発生する場合においても、降水により屋外施設に荷重の影響を与えることはなく、また、降水による荷重は十分小さいため、設計竜巻荷重に包絡される。

5.2.3 竜巻随件事象に対する評価

竜巻随件事象は、過去の竜巻被害状況及びリサイクル燃料備蓄センターの施設配置から、想定される事象として、火災、溢水及び外部電源喪失を抽出し、事象が発生した場合の影響評価を行ない、基本的安全機能が損なわれないことを確認した。

5.2.3.1 火災

竜巻随件事象として、リサイクル燃料備蓄センターの敷地内の危険物貯蔵設備が竜巻飛来物の衝突により破損し危険物が漏えいして発生する火災及び

竜巻飛来物となった車両の積載燃料が漏えいして発生する火災が考えられる。

敷地内に設置する危険物貯蔵設備については、使用済燃料貯蔵施設がこれらの火災を想定しても基本的安全機能を損なわない設計とすることを確認している。

また、竜巻飛来物となった車両の火災については、燃料の量が限定されていることから敷地内に設置する危険物貯蔵設備に比べても影響は小さく、自衛消防隊が消火器や動力消防ポンプによる消火活動を行うことから、使用済燃料貯蔵施設が基本的安全機能を損なうことはない。

5.2.3.2 溢水

使用済燃料貯蔵施設は自然換気により使用済燃料集合体の崩壊熱を除去する設計であり、崩壊熱除去に水を使用しないこと及び貯蔵建屋近辺に大規模な溢水源がないことから、竜巻により、使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能に影響を及ぼすような溢水は発生しない。

5.2.3.3 外部電源喪失

使用済燃料貯蔵施設は、使用済燃料集合体を金属キャスクに収納した状態で静的に貯蔵する施設であることから、竜巻により外部電源系統からの電気の供給が停止しても、使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能に直接影響を及ぼすおそれはない。なお、計測設備、放射線監視設備、通信連絡設備及び入退域管理装置に対しては、外部電源喪失時には貯蔵建屋内に設置する無停電電源装置から給電し、給電時間を超える場合は電源車からの給電又は代替計測により監視を継続する。

5.2.4 評価手順及び飛散防止措置

屋外において飛散するおそれのある資機材及び車両については、飛来時の運動エネルギー等を評価し、外部事象防護施設への影響の有無を確認する。外部事象防護施設へ影響を及ぼす大型の資機材及び車両については、飛散防止措置として、固縛、固定又は退避を実施することとし、これらについて、あらかじめ定める手順に従って対応する。

気象モデルの概要

解析には WRF モデル (Weather Research and Forecasting model) と呼ばれる数値気象モデルを用いている。WRF モデルは、気象力学・物理現象を数値モデル化したメソスケール (竜巻の親雲の水平スケールに対応する水平方向 2km～20km 程度) の気象要素を解析できるコミュニティモデルとして世界的に利用されているモデルである。

主な計算条件は別添 1 - 1 表に示すとおりであり、電中研による長期高解像度再解析データセット (橋本ら 2013) と同様の条件を採用しており、ネスティングと呼ばれる技法を用いて、水平解像度 15 km で解析した結果をもとに水平解像度 5 km の解析結果を得る。これにより、粗い水平空間分解能 (ECMWF ERA-Interim: 約 70 km, ECMWF ERA-40: 約 250 km) の初期・境界値データから詳細メッシュの環境場を解析することができる。

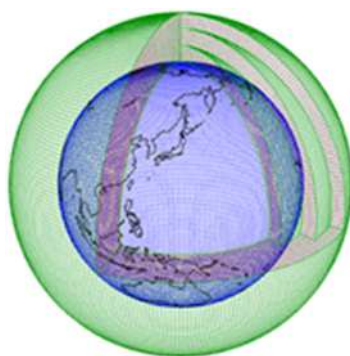
このモデルにより当時の環境場を解析 (再現) し、それをもとに突風関連指数を算出している。

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

別添 1 - 1 表 WRF モデルセットアップの概要

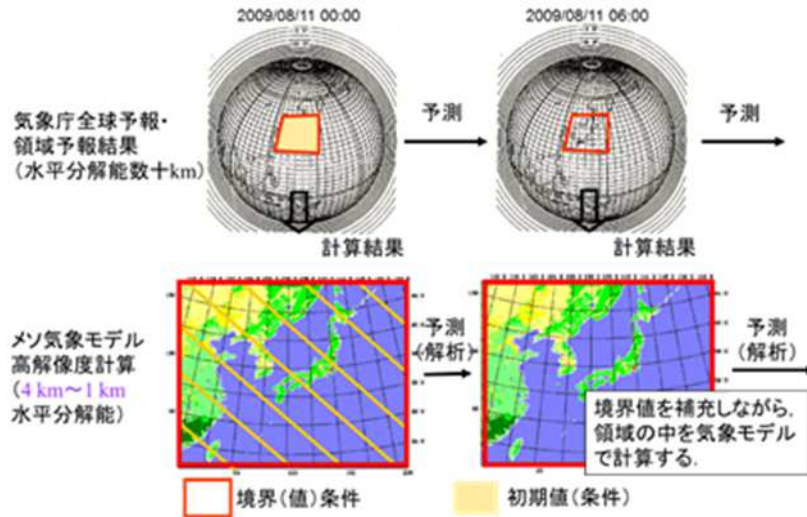
気象モデルとは、物理・力学的法則に基づいて、物理量の時間変化を計算機により数値的に解くために各諸過程を概念化したもので、気象庁による日々の気象予報もこの気象モデルを用いて実施されている。別添 1 - 1 図のように計算対象領域を 3 次元格子で覆い、各格子点上で気圧、風などの物理量を定義する。観測データや気象庁等の解析・予報結果をもとに計算開始時刻の物理量を決めて、計算領域境界部の値を時々刻々変化させながら（別添 1 - 2 図）、運動方程式、熱力学方程式、連続式、および水分量の保存式等を数値積分すると、将来時刻における気象要素の値が計算される。各方程式中の運動量や熱・水のソース・シンク項は各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

この種の気象モデルは、放射性汚染気塊の輸送量計算にも使用されており、WSPEEDI-II (Worldwide version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information ; 世界版緊急時環境線量情報予測システム第 2 版) では、本検討に用いた WRF モデルの前身に位置づけられる MM5 (PSU/NCAR Mesoscale Model version 5 ; Dudhia 1993) が環境場の入力情報の作成に用いられている（山澤ら 1997）。WRF モデルは、MM5 の力学系・物理モデル共に大幅な改良が加えることにより開発されたものであり、現在米国においては気象の現業・研究の両面で活用されている。また、わが国を含めた諸外国においても広く活用されている。

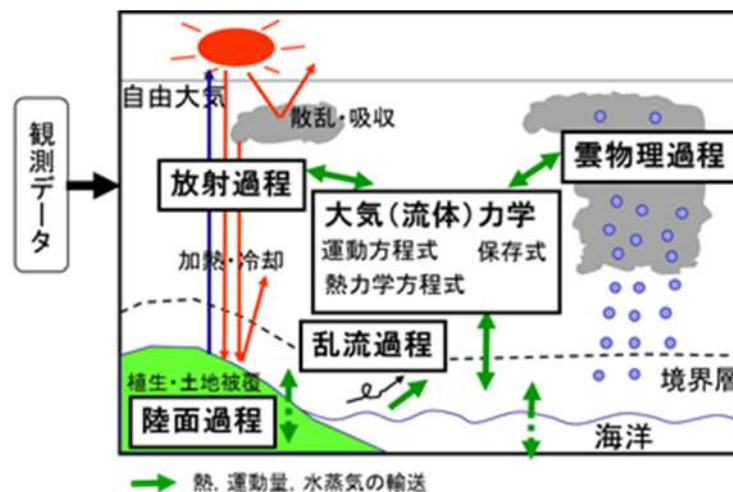


別添 1 - 1 図 計算グリッド構造の例

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



別添 1 - 2 図 気象モデルを用いた解析・予測計算の流れの概念図
(気象庁全球モデルを例に)



別添 1 - 3 図 気象モデルを用いた計算の模式図

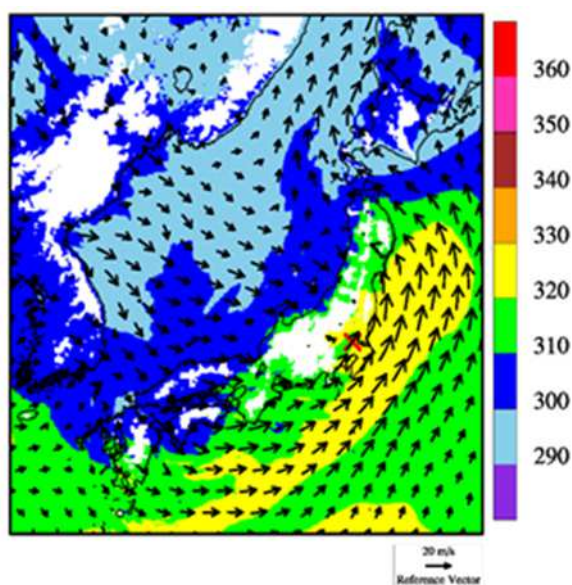
参考文献

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

分析対象事例の個別概要

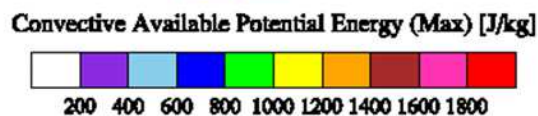
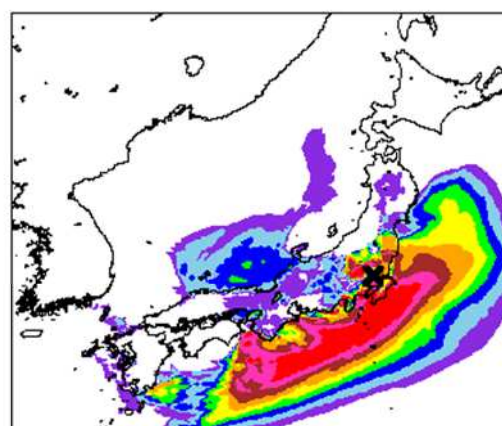
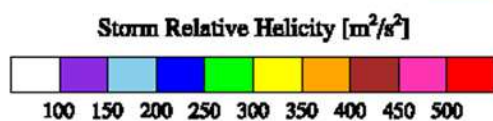
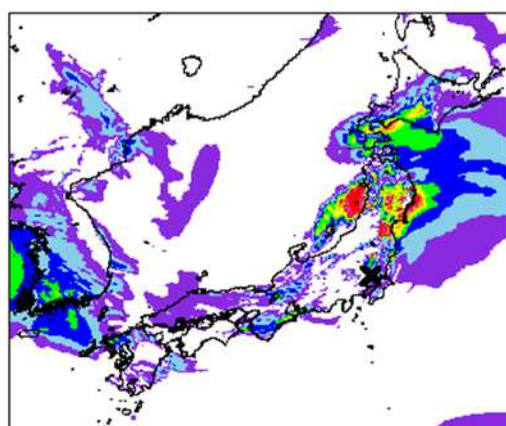
1. 2012/05/06 (茨城県常総市) F3 事例 (気圧の谷・寒気移流)

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



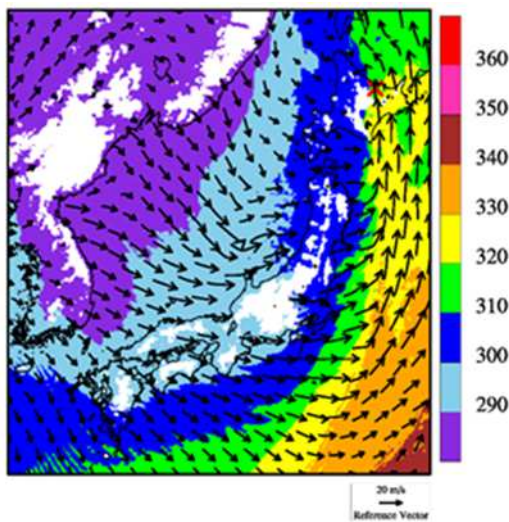
別添 2-1 図 2012/05/06 F3 事例における環境場と突風関連指数 (左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)

(左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



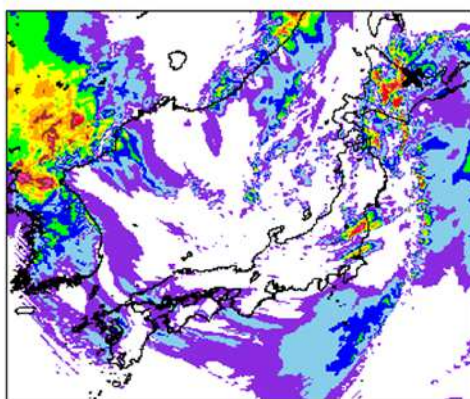
2. 2006/11/07(北海道網走支庁佐呂間町) F3 事例 (寒冷前線・暖気の移流) (佐呂間竜巻)

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

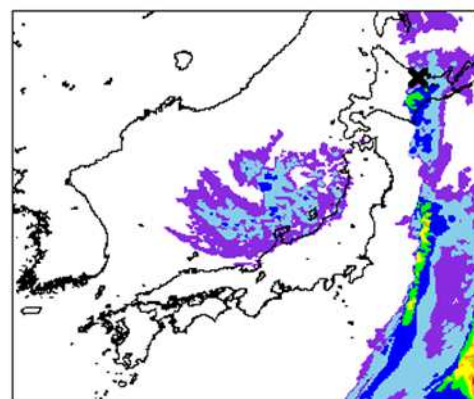
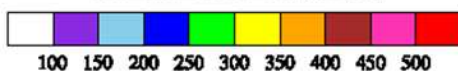


別添 2-2 図 2006/11/07 F3 事例における環境場と突風関連指数 (左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)

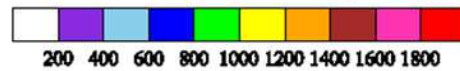
(左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



Storm Relative Helicity [m^2/s^2]

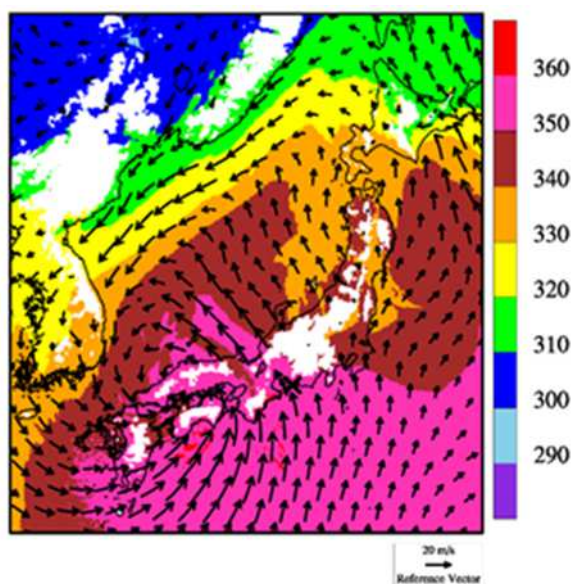


Convective Available Potential Energy (Max) [J/kg]

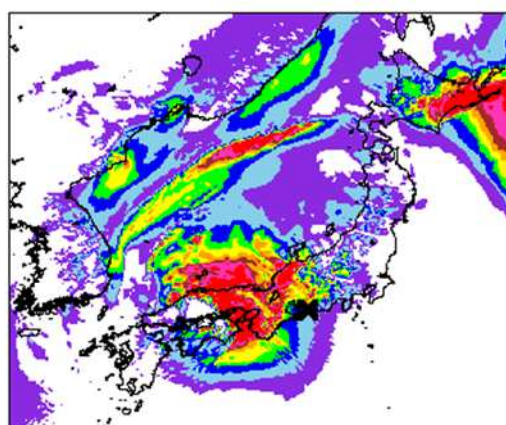


3. 1999/09/24(愛知県豊橋市) F3 事例 (台風)

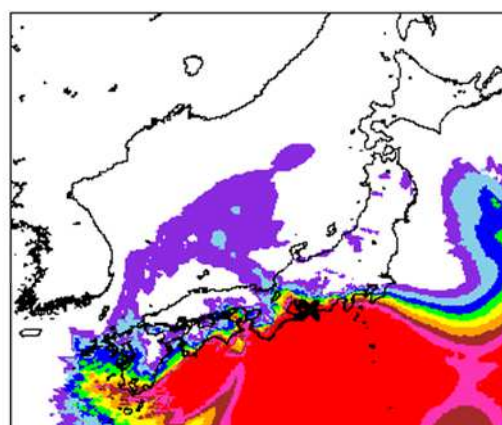
台風中心は隠岐の南西沖にあり、四国東部・紀伊半島の沿岸部および濃尾平野では、台風中心から遠く離れているが、太平洋側からの非常に不安定な暖湿流が流れ込み (CAPE が非常に大きく)、SReH も高くなっている。濃尾平野では4個の竜巻 (F1: 2個, F2: 1個, F3: 1個) が発生した。台風中心が日本海側にあり、日本海側の SReH は太平洋側に比べて決して小さくはないが、不安定度は格段に小さいのが見てとれる。



別添 2-3 図 1999/09/24 F3 事例における環境場と突風関連指数 (左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)
(左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



Storm Relative Helicity [m^2/s^2]
100 150 200 250 300 350 400 450 500

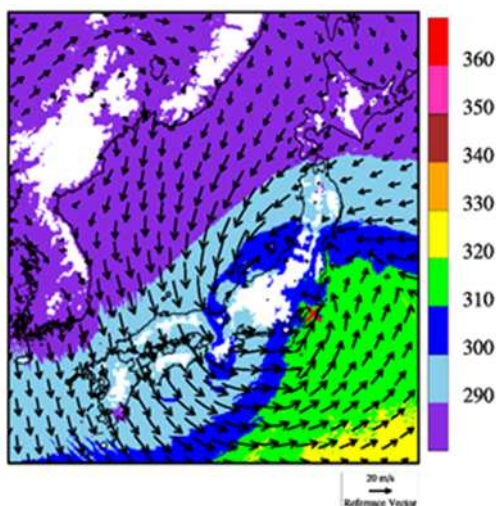


Convective Available Potential Energy (Max) [J/kg]
200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800

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

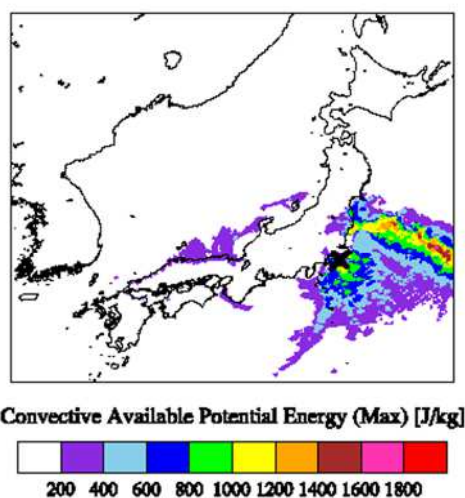
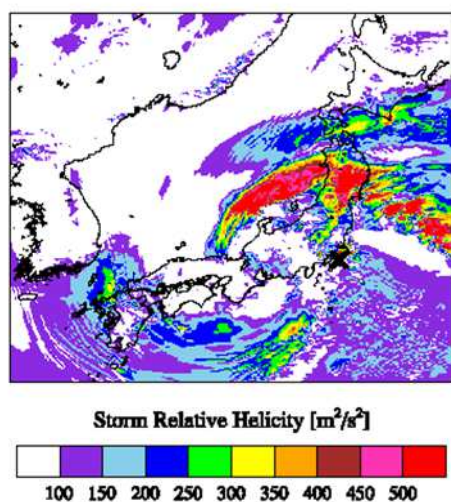
房総半島と日本海に低気圧があり, 房総半島の低気圧からは南西方向に寒冷前線が伸びている。そのため, 寒冷前線および房総半島にある低気圧を境に温位差が大きくなっている (寒色系と暖色系 (緑色) の境が明瞭である)。房総半島には低気圧中心に向かって暖かく, 不安定な空気塊が流入しており, 房総半島では局所的に SReH の値も高い (×でやや見づらい)。房総半島周辺では大小7個の竜巻が発生した。

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



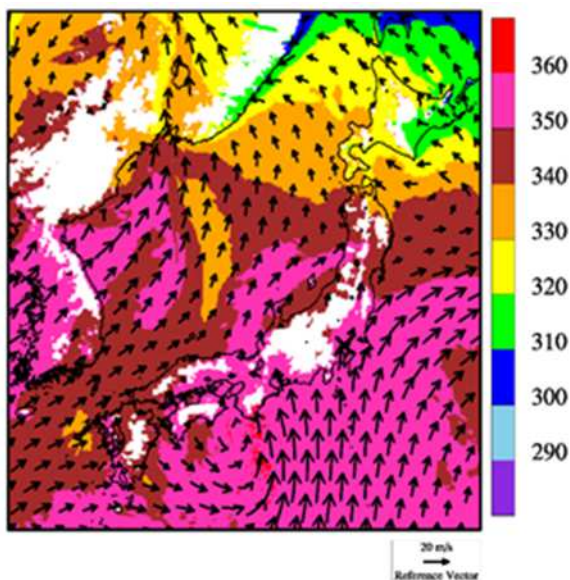
別添 2-4 図 1990/12/11 F3 事例における環境場と突風関連指数 (左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)

(左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



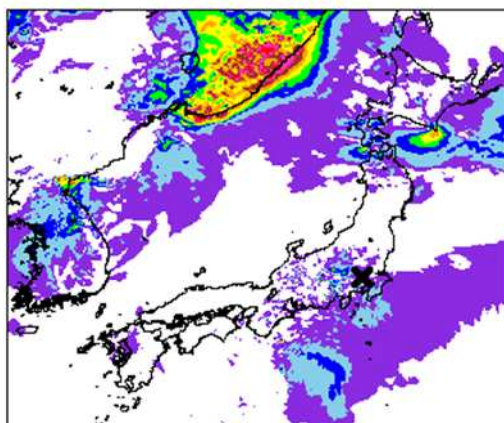
5. 1971/07/07(埼玉県浦和市) F3 事例 (台風)

台風を中心は紀伊半島の南西沖にあり、中部から東日本にかけては、太平洋側から非常に CAPE が高く、不安定な空気塊が流入している。SReH は、3. で示した豊橋竜巻ほど大きくはないが、発生地点周辺では SReH が比較的高くなっており(×でやや見づらい)、SReH と CAPE の両方が共に大きい環境場となっていた。

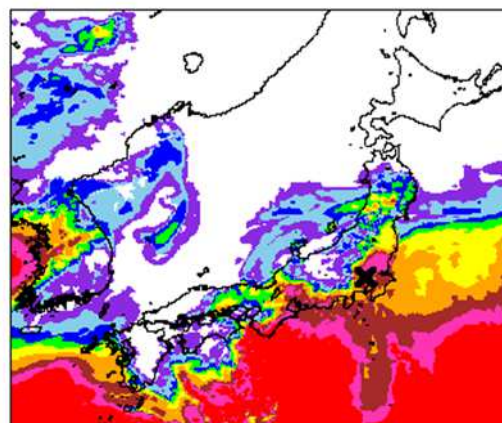
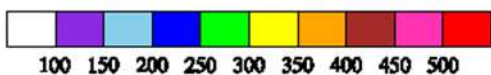


別添 2-5 図 1971/07/07 F3 事例における環境場と突風関連指数 (左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)

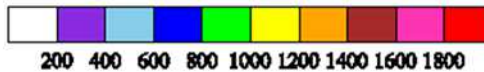
(左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



Storm Relative Helicity [m^2/s^2]

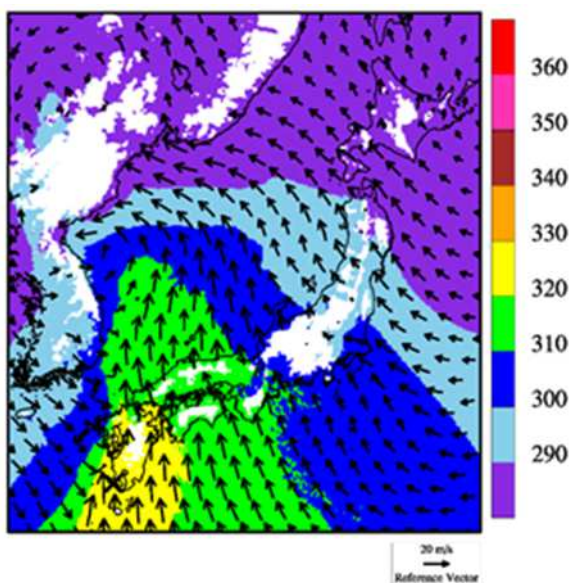


Convective Available Potential Energy (Max) [J/kg]

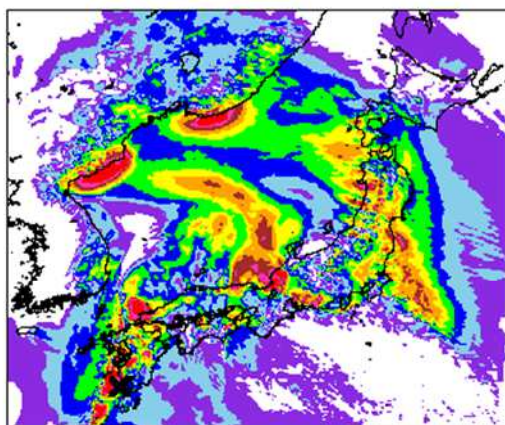


6. 1990/02/19(鹿児島県枕崎市) F2-F3 事例(寒冷前線・暖気の移流・その他(低気圧))

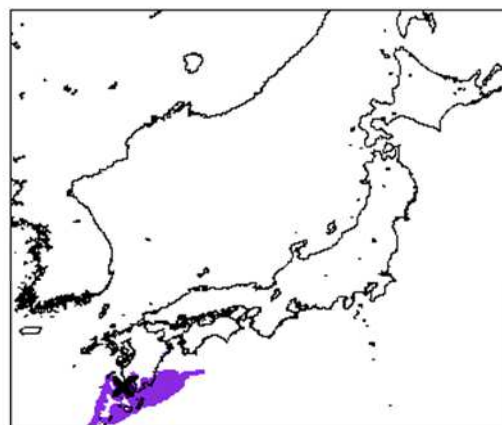
朝鮮半島東部の沖合にある低気圧から寒冷前線と温暖前線が伸び、九州から近畿にかけては比較的暖かい気流が太平洋側から流入している。その中でも発生地点周辺には最も暖かい空気塊が流入しており、鹿児島県南部では局所的に CAPE の値がやや高くなっている。しかし、CAPE 値は F3 竜巻事例に見られるほど高くない。一方、寒冷前線に沿って SReH が非常に高かった。不安定性にやや欠けていたのが、F3 規模には至らなかった理由の一つであると考えられる。



別添 2-6 図 1990/02/19 F2-F3 事例における環境場と突風関連指数(左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位(単位: K)(左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



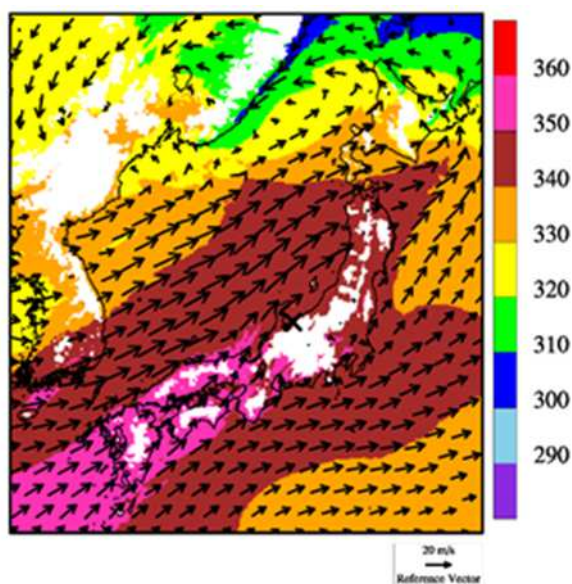
Storm Relative Helicity [m^2/s^2]
100 150 200 250 300 350 400 450 500



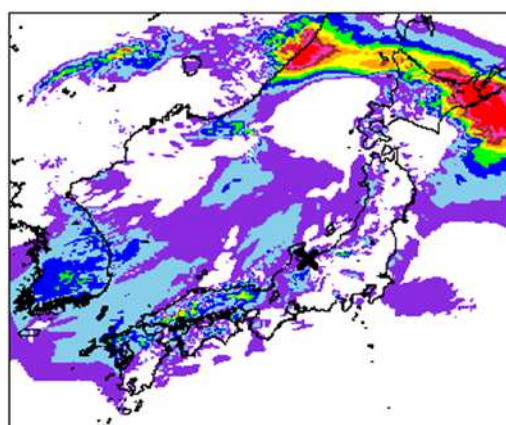
Convective Available Potential Energy (Max) [J/kg]
200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800

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

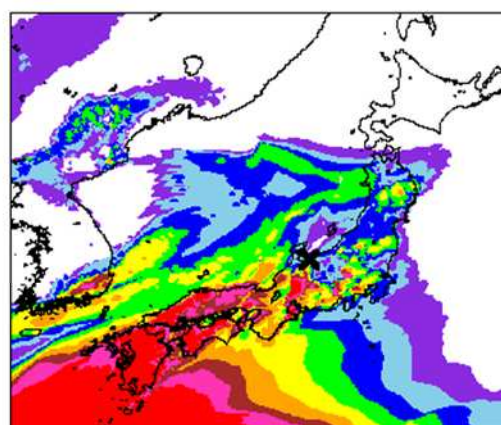
日本海側沿岸に沿って寒冷前線があり、その北側では西南西の風が吹いている。空気塊の暖かさとしては太平洋側と同等のもの(茶色)が、対馬海峡から日本海に入り込んでおり、青森県沖まで到達している。ただし、大気不安定度は暖候期にしては大きくなく、寒冷前線南側の九州から近畿にかけての不安定度(CAPE 分布の赤い領域)と比べるとかなり小さい。SReH の値も特段高い傾向は見られず、F3 発生時の環境場とは様相が異なる。



別添 2-7 図 1991/06/12 F2 事例における環境場と突風関連指数(左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位(単位: K)
(左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



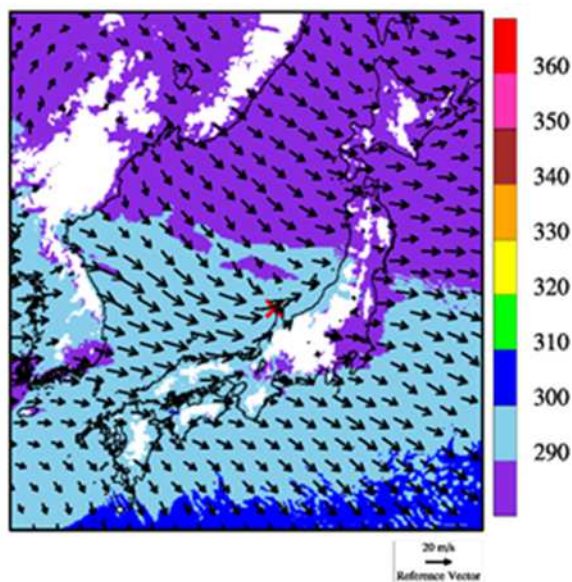
Storm Relative Helicity [m^2/s^2]
100 150 200 250 300 350 400 450 500



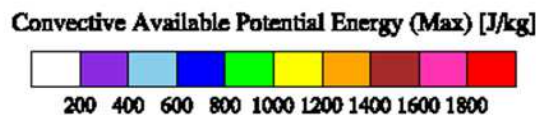
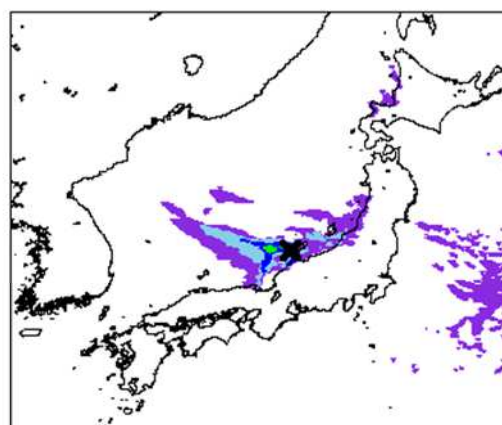
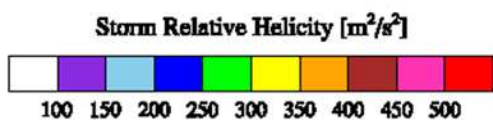
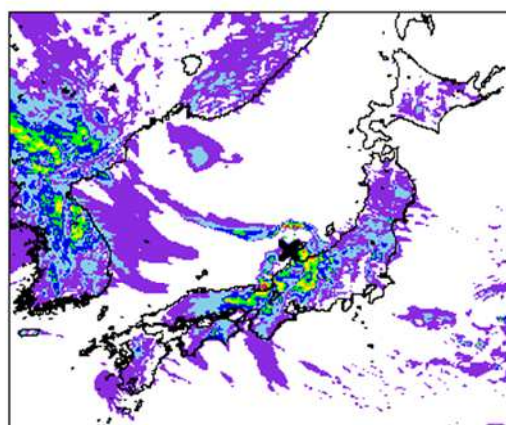
Convective Available Potential Energy (Max) [J/kg]
200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800

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

オホーツク海にある低気圧と九州の南西海上にある高気圧との間で、西高東低の気圧配置となっており、朝鮮半島東部から季節風が能登半島から敦賀湾に向かって流れ込んでいる。冬季によく見られる状況といえる。能登半島周辺での不安定度の高さは、海上で寒気が暖められて大気が不安定になったことが原因であり、SReH も高めである。特に能登半島周辺では高い。不安定化のメカニズムは異なるが、2. で示した佐呂間竜巻と似た環境場になっている。ただし、SReH が佐呂間竜巻に比べて4割程度低く、これがF3規模に達しなかった理由の一つであると考えられる。

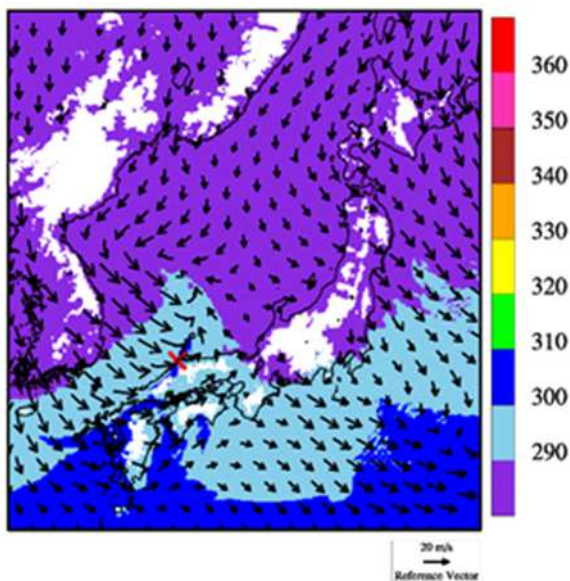


別添 2-8 図 1990/04/06 F2 事例における環境場と突風関連指数 (左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K) (左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



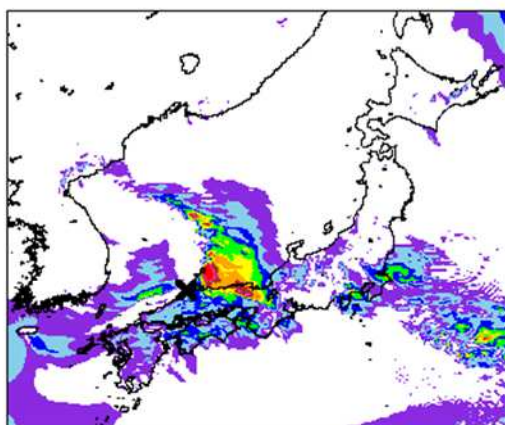
9. 1989/03/16(島根県簸川郡湖陵町) 日本海側 F2 事例 (局地性擾乱・寒気の移流)

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

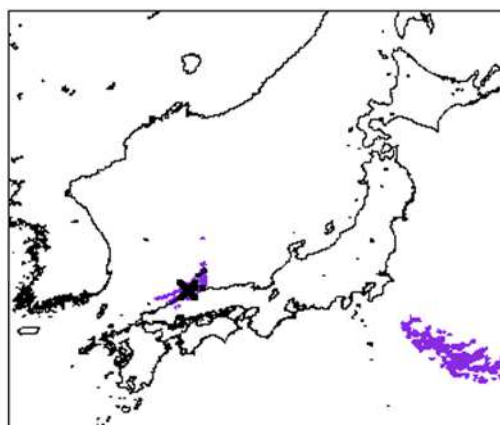
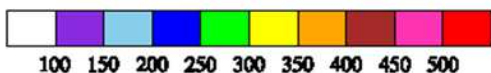


別添 2-9 図 1989/03/16 F2 事例における環境場と突風関連指数 (左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)

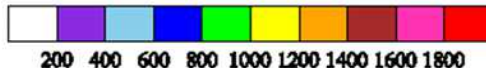
(左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



Storm Relative Helicity [m^2/s^2]

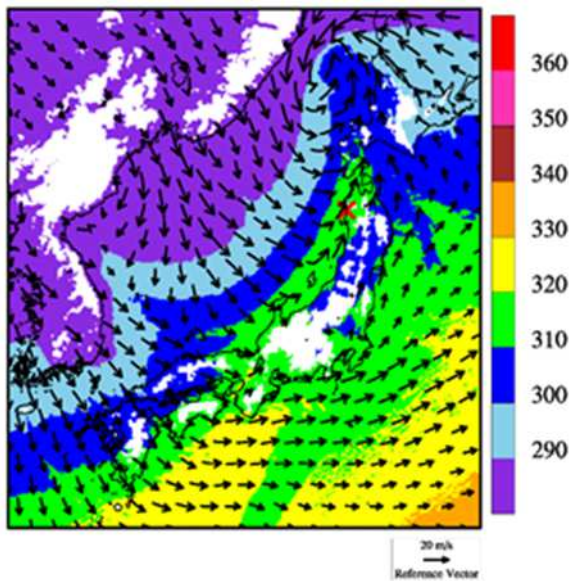


Convective Available Potential Energy (Max) [J/kg]

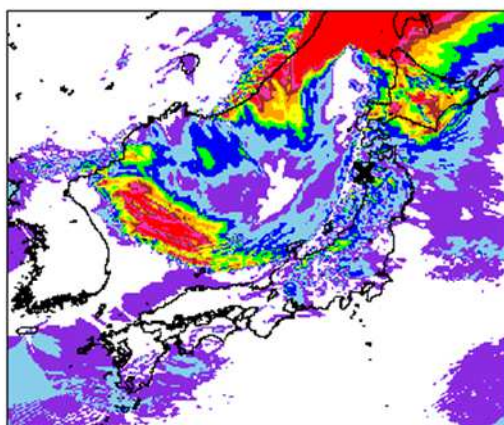


10. 1999/11/25(秋田県山本郡八森町) 日本海側 F1-F2 事例(日本海低気圧・寒冷前線)

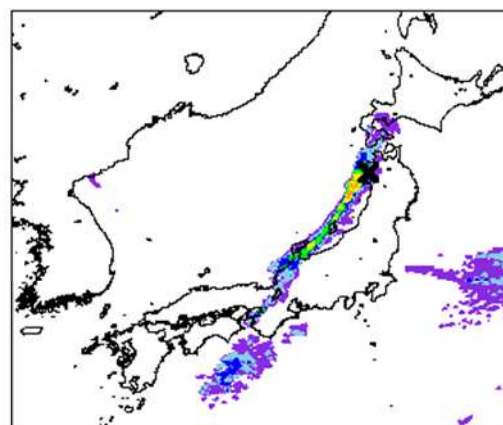
北海道の西海上にある低気圧から延びた寒冷前線が日本海沿岸を通過した際に発生した。寒冷前線上では温位のコントラスト(青色と緑色)が明瞭であり、寒冷前線に沿った地域の中でも発生地点周辺は SReH が比較的高く、CAPE の高い範囲の北端部に位置している。CAPE の大きさは、寒候期に発生した F3 竜巻事例を上回ったが、SReH は低かった。



別添 2-10 図 1999/11/25 F1-F2 事例における環境場と突風関連指数(左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位(単位: K)
(左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



Storm Relative Helicity [m^2/s^2]
100 150 200 250 300 350 400 450 500

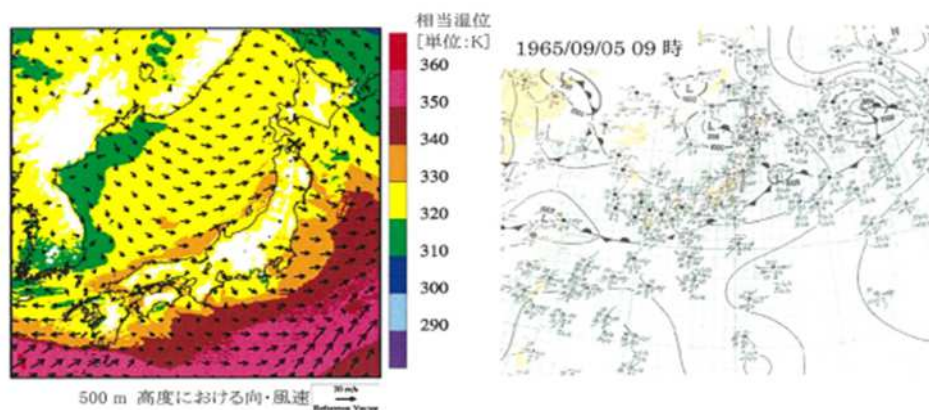


Convective Available Potential Energy (Max) [J/kg]
200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800

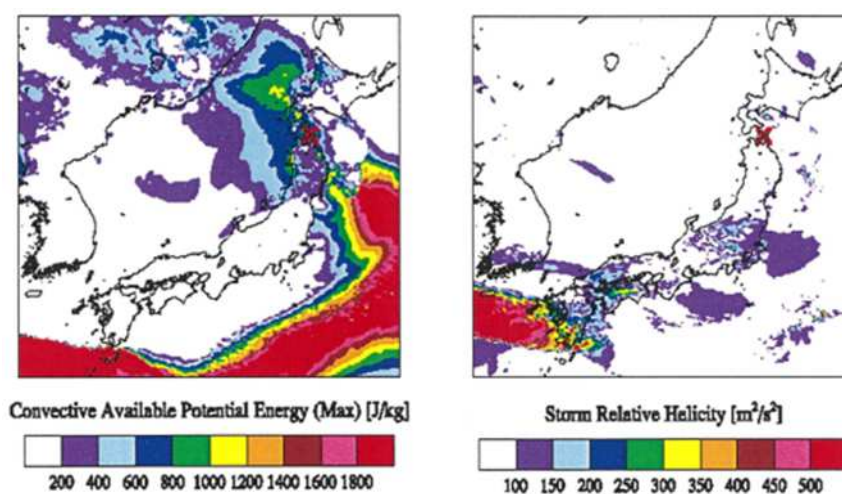
11. むつ市で発生した F2 竜巻について

東北太平洋側の東方沖の低気圧から伸びる前線で風向きが変わっていると同時に、前線の南側に不安定な暖かい空気塊が存在し CAPE 値が大きい。一方、北海道南西沖の低気圧の西側においても CAPE 値からやや不安定であることが見てとれる。しかし、二つの低気圧の間に位置する下北半島では、CAPE 値がそれほど大きくない。また、低気圧の中心を結ぶ閉塞前線上で風向の変化が見られ、この前線の通過時に竜巻が発生したものと推測されるが、SReH の分布からは顕著な渦度の高さは見られない。

発生日時	発生場所	F スケール	総観場
1965/09/05 11:40	青森県むつ市大平地区	(F2)	閉塞前線



別添 2-11 図(1) 風向・風速及び相当温位(左図)と天気図(右図, 気象庁 HP より)



別添 2-11 図(2) CAPE(左図)と SReH(右図)

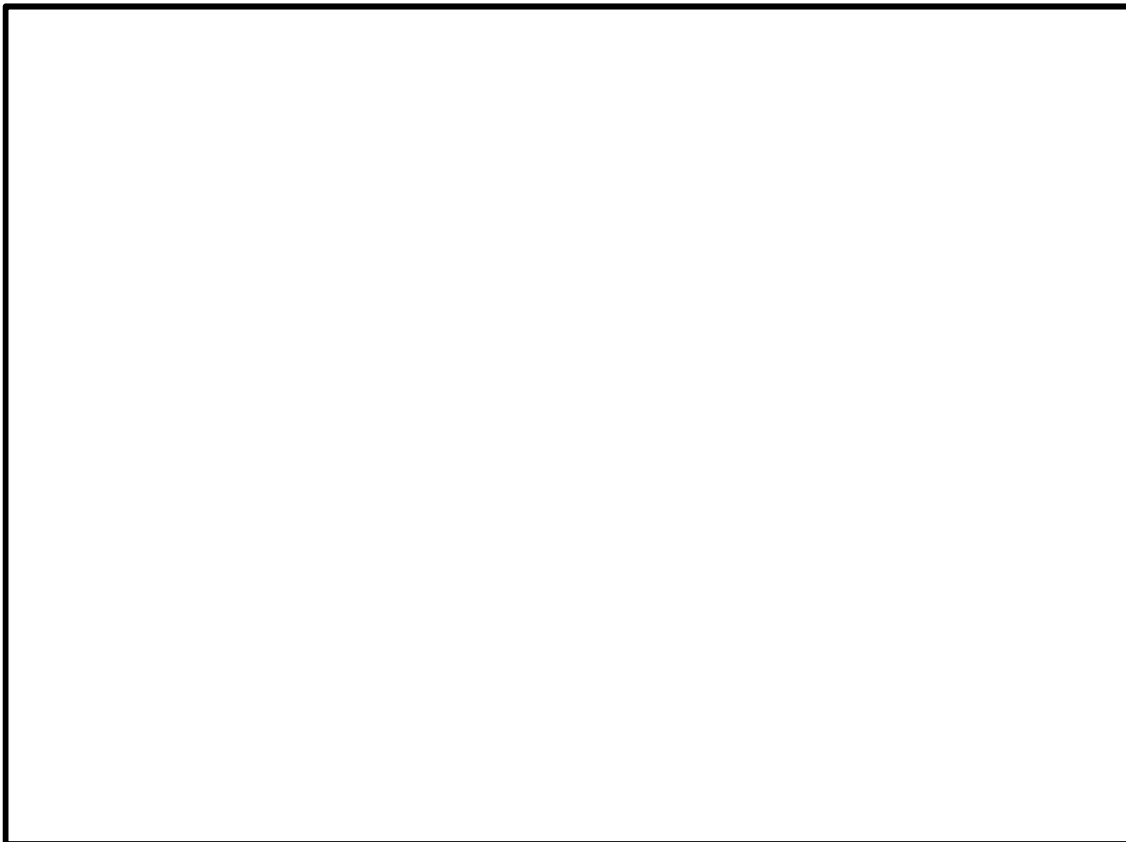
別添 3

竜巻飛来物に関する現地調査について

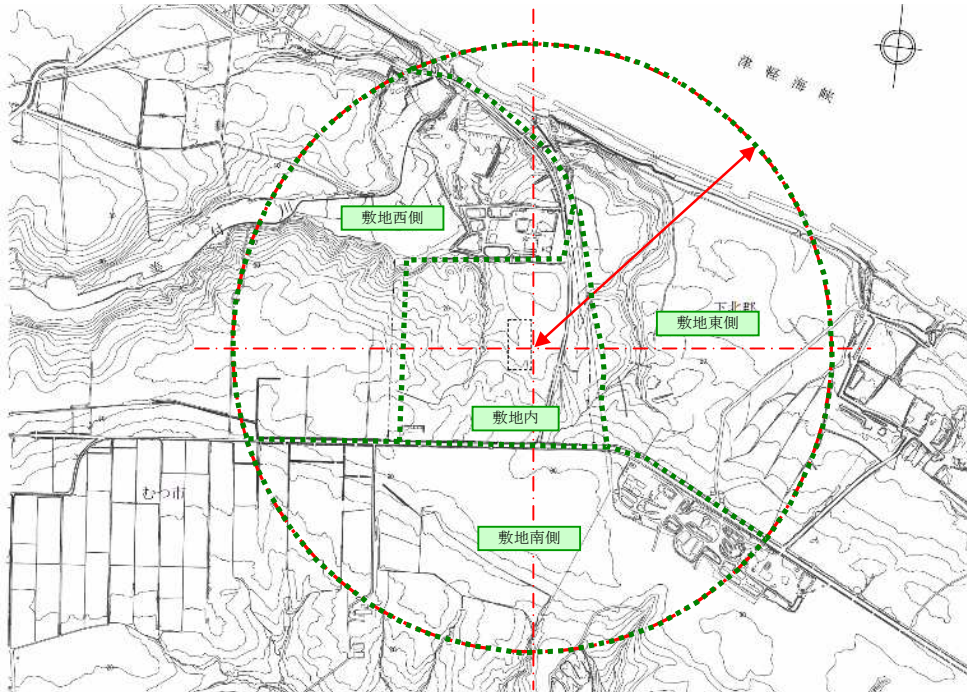
使用済燃料貯蔵施設において想定される竜巻による飛来物を調査し特定することを目的とし、竜巻飛来物に関する現地調査を平成 25 年 10 月 10 日～11 日、及び平成 27 年 10 月 29 日に実施した。

調査は、敷地内及び敷地外（貯蔵建屋を中心として半径 800m 程度の範囲）を対象としたが、敷地内については、貯蔵建屋に近接しており貯蔵建屋への影響が大きいと考えられる敷地内の物品をより詳細に調査する観点から、敷地内を対象に、調査対象範囲を事務建屋、車庫等 15 エリアに分割して、また敷地外については調査対象範囲を 3 エリアに分割し、各エリアにて目視により、常設物、仮設物のうち飛来物となりうる物品、及び二次飛来物（設置状況等から風圧や飛散による被害を受けて飛来物となりうる物）を抽出した。

敷地内の調査エリアを別添 3－1 図に、また敷地外の調査エリアを別添 3－2 図にそれぞれ示す。



別添 3－1 図 飛来物を特定するための調査エリアの位置（敷地内）



別添3-2図 飛来物を特定するための調査エリアの位置 (敷地外)

現地調査を行った結果を調査エリア毎に示す。なお、調査により確認された物品を各々の写真に付記している。

(1) 調査エリア A：事務建屋

		
<p>ガラス窓, 社名看板, 乗用車 フラッグポール[固定]</p>		<p>(屋上) 押出成形板, アルミルーバ, 室外機[固定]</p>
		
<p>(屋上) アルミ梯子, アルミルーバ</p>	<p>(屋上) 八木アンテナ, パラボラアンテナ</p>	<p>(屋上) 閃光灯</p>
		
<p>(屋上) 社名看板</p>	<p>(屋上) 扉[固定], U字溝</p>	<p>室外機[固定], 扉[固定], ガラス窓</p>
		
<p>ボックス型スピーカー</p>	<p>丸型スピーカー</p>	<p>(事務建屋北側) 物置</p>
		
<p>(事務建屋北側) 境界標</p>		



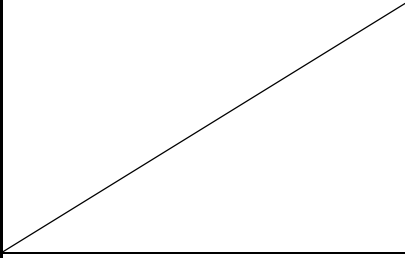
(2) 調査エリア B : 車庫

		
シャッター, 折板 (屋根), 消火器	物置	受変電設備[固定], 消火器

(3) 調査エリア C : 受変電設備

		
発電機[固定], 看板, 消火器, 扉[固定], 室外機[固定]	換気フード	扉[固定]

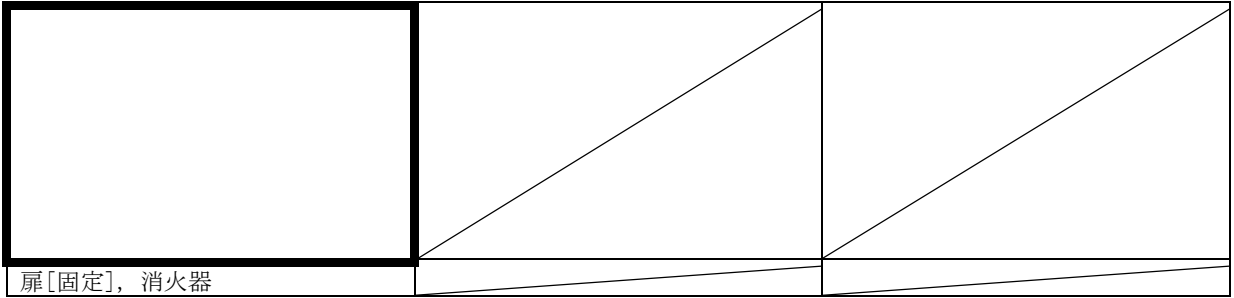
(4) 調査エリア D : 給水施設

		
(北側) 扉[固定], ガラス窓	(南側) 扉[固定], 換気フード	

(5) 調査エリア E : 特殊車両車庫

		
シャッター	折板 (屋根), 外壁 (押出成形板)	キャスク輸送車両

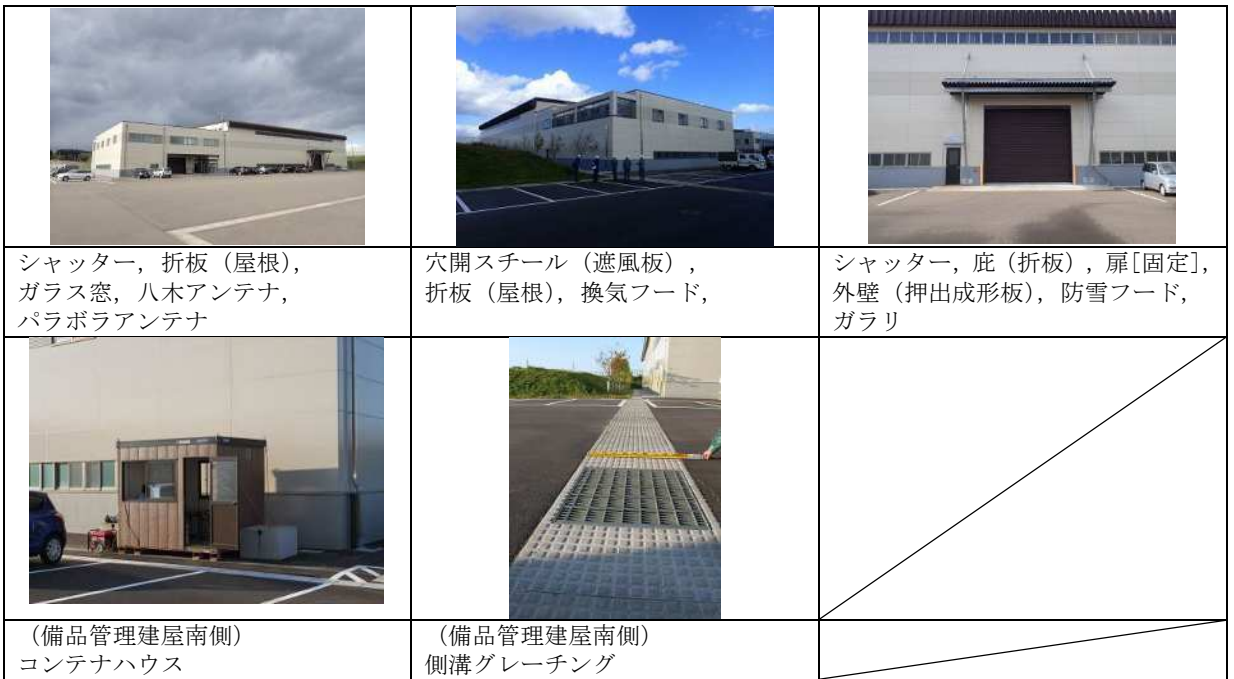
(6) 調査エリア F：地震観測小屋



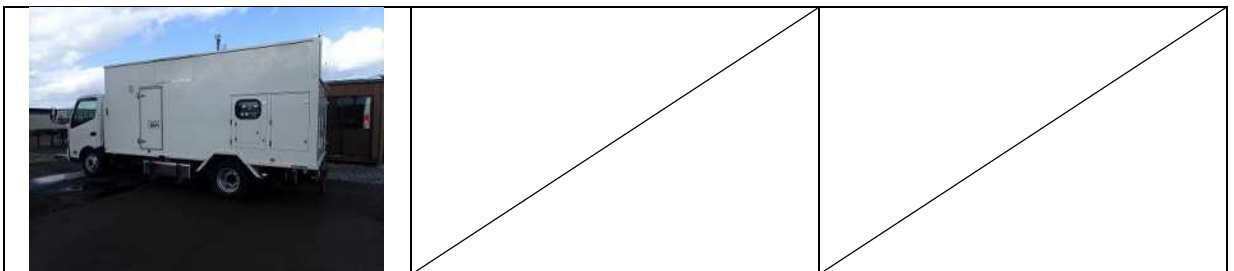
(7) 調査エリア G：コア倉庫



(8) 調査エリア H：備品管理建屋



(9) 調査エリア I：電源車




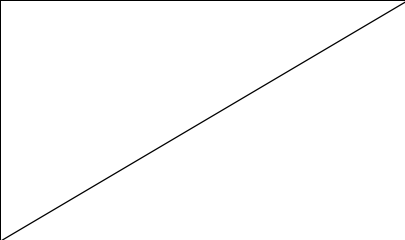
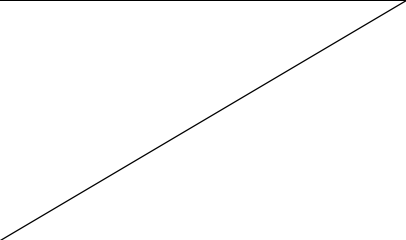
(10) 調査エリア J : 展望台

		
展望台[固定]	展望台基礎[固定]	


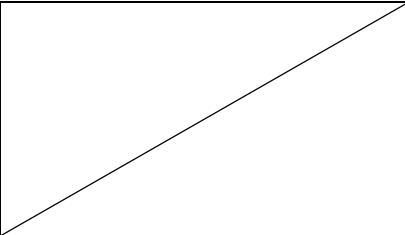
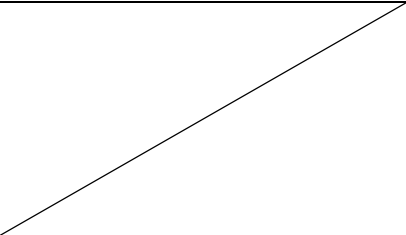
(11) 調査エリア K : 出入管理建屋

		
ガラス窓, 扉[固定], パラボラアンテナ	(屋上) 八木アンテナ, 扉[固定], アルミルーバ	(屋上) ボックス型スピーカー, 照明灯

(12) 調査エリア L : (東側) モニタリングポスト

		
扉[固定], 換気フード		

(13) 調査エリア M : ビジターハウス

		
ガラス窓, 八木アンテナ, パラボラアンテナ		





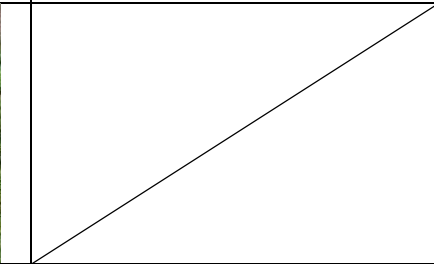
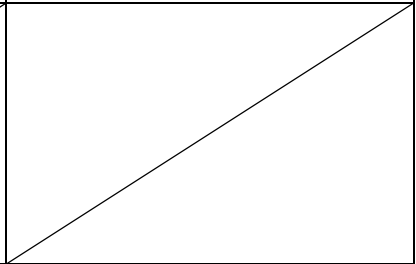


(14) 調査エリア N：貯蔵建屋

<p>遮風板 (押出形成版), 換気フード, 社名看板, アルミガラリ</p>	<p>(貯蔵建屋東側) 集水枡グレーチング</p>	<p>(貯蔵建屋南側) コンクリート板 (集水枡蓋)</p>
<p>(貯蔵建屋西側) プラスチック板 (敷板)</p>	<p>(貯蔵建屋西側) 鋼製パイプ</p>	<p>(貯蔵建屋西側) ゴミ袋 (雑草)</p>
<p>(貯蔵建屋西側) コンクリート板 (集水枡蓋)</p>	<p>(貯蔵建屋西側) カラーコーン</p>	<p>(貯蔵建屋南側) 砂利</p>

(15) 調査エリア 0：一般部

<p>閃光灯</p>	<p>標識</p>	<p>照明灯</p>

(16) その他 (敷地外)

		
<p>(敷地外西側) 集水枡グレーチング</p>	<p>(キャスク搬出入道路) マンホール蓋</p>	<p>(キャスク搬出入道路) 側溝グレーチング</p>
		
<p>(敷地外南側) 集水枡グレーチング</p>		

飛散評価手法について

1. 風速場モデル（ランキン渦モデル）

- ・非常に簡易な式で上空の水平方向の風速場を表現できる
 - －半径方向風速及び上昇風速は，飛来物評価のため接線風速に係数を掛ける形で付加
- ・風速は半径にのみ依存（高さに依存しない）
- ・上昇流は全領域で存在する（地面からも風の吹き出しが存在する）
 - －保守的ではあるが，特に地上の物体の挙動を評価する上で，実現象からの乖離が著しくなる

無次元座標 $r = R / R_m$

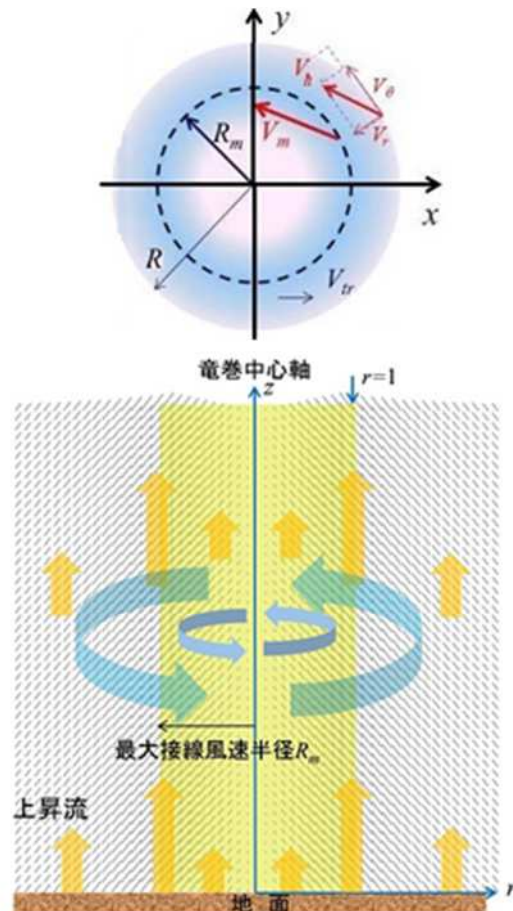
接線風速 $V_\theta = \frac{2V_m}{\sqrt{5}} F_r(r)$

$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ 1/r & (r \geq 1) \end{cases}$$

半径方向風速 $V_r = -\frac{1}{2} V_\theta$

上昇風速 $V_z = \frac{2}{3} V_\theta$

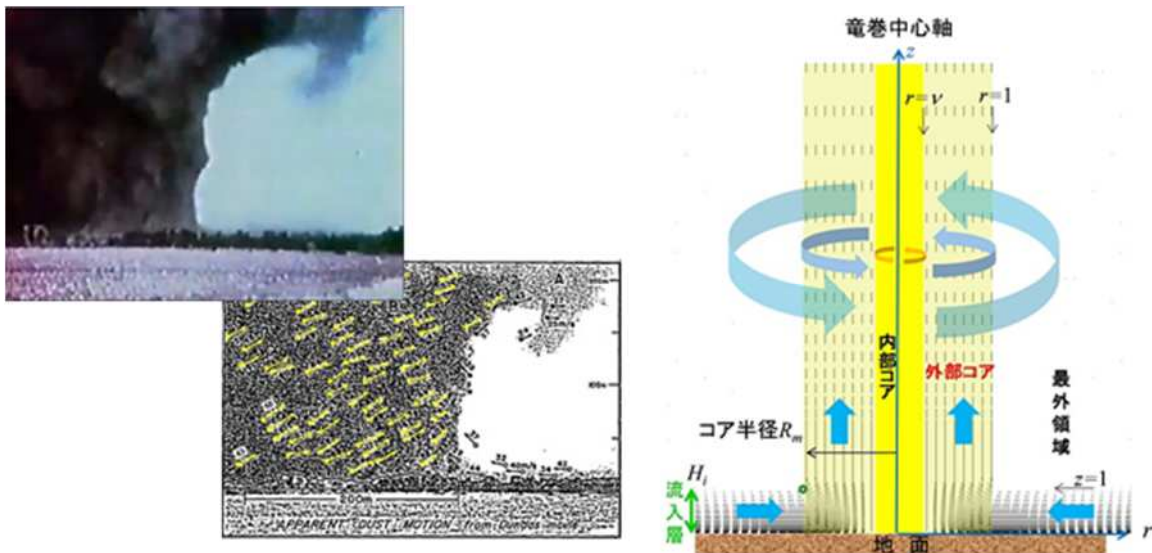
水平方向風速 $V_h = \sqrt{V_\theta^2 + V_r^2} = V_m F_r(r)$



Simiu, E. and Cordes, M., Tornado-Borne Missile Speeds, NBSIR 76-1050, 1976

2. 風速場モデル (フジタモデル)

- ・実観測に基づいて考案されたモデルであり、実際に近い風速場構造を表現
 - －半径方向に3領域 (内部コア, 外部コア, 最外領域),
 - 高さ方向に2領域 (流入層, 非流入層)
 - －地表面付近での竜巻中心に向かう強い水平方向流, 及び外部コアにおける上昇流を表現
- ・比較的簡易な代数式により, 高さ方向の風速分布や上昇風速も含めて風速場を表現できる
 - －地表面付近の風速場をより良く表現しており, 地上にある物体の挙動評価に適する



無次元座標 $r = R/R_m, \quad z = Z/H_i$

接線風速 $V_\theta = F_r(r)F_h(z)V_m$

$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ 1/r & (r \geq 1) \end{cases} \quad F_h(z) = \begin{cases} z^6 & (z < 1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases}$$

$$V_r = \begin{cases} 0 & (r \leq v) \\ \frac{V_\theta \tan \alpha_0}{1-v^2} \left(1 - \frac{v^2}{r^2}\right) & (v < r < 1) \\ V_\theta \tan \alpha_0 & (r \geq 1) \end{cases}$$

$$\tan \alpha_0 = \begin{cases} -A(1-z^{15}) & (z < 1) \\ B\{1 - \exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

上昇風速

$$V_z = \begin{cases} \frac{3}{28} \frac{\eta V_m}{1-v^2} A(16z^6 - 7z^8) & (z < 1) \\ \frac{\eta V_m B \exp(-k(z-1))}{k(1-v^2)} \{2 - \exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

k_0, k, v, η, A, B は定数

Fujita, T. T., Workbook of Tornadoes and High Winds for Engineering Applications, U. Chicago, 1978

3. 竜巻による風を受ける物体の挙動

・飛来物の運動方程式

$$\frac{d\mathbf{V}_M}{dt} = \frac{\rho C_D A}{2 m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) - g\mathbf{k} + L\mathbf{k}$$

┌──────────①──────────┐ ② ③

\mathbf{V}_M : 飛来物の速度ベクトル
 \mathbf{V}_w : 飛来物位置での風速ベクトル
 \mathbf{k} : 鉛直上向きのベクトル
 ρ : 空気密度
 g : 重力加速度
 m : 飛来物の質量
 C_D : 飛来物の抗力係数
 A : 飛来物の見付面積

・各々の加速度の成分

①物体が空気から受ける力(抗力) : 物体がランダムに回転し、各面が均等に風を受けると仮定

抗力係数×見付面積 : $C_D A = \frac{1}{3} (C_{Dx} A_x + C_{Dy} A_y + C_{Dz} A_z)$

②重力

③物体の上下面での空気の流れの差による生じる力(揚力)

揚力加速度 : $L = \frac{\rho C_L a}{2 m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M|_{x,y}^2 f\left(\frac{Z}{d}\right)$

C_L : 地面での揚力係数
 a : 地上に置かれた物体の見付面積

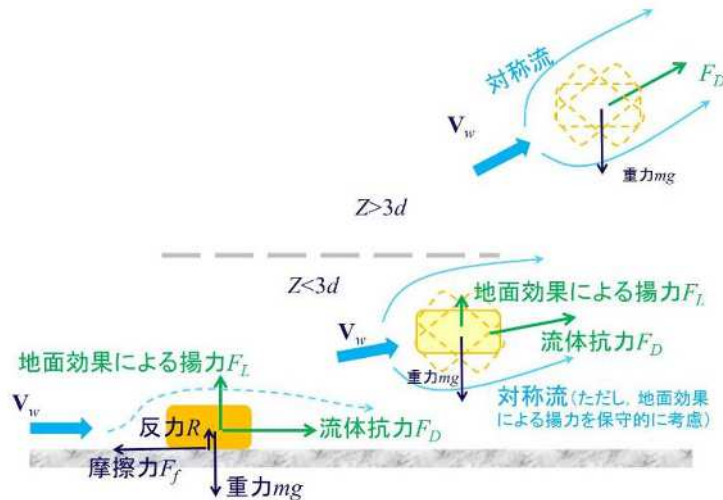
—揚力の生じ方は、物体と地面の接触状態に依存(接触面が大きければ揚力は生じにくい)

—接触状態を実際に確認するのは難しいことから、揚力を大きく見積もるため、地上にある物体にも揚力が作用すると仮定

—物体と地面の距離が近い場合、揚力が生じる方向に空気の流れが地面の影響を受ける(地面効果)ため、実験に基づき係数を設定

$$f\left(\frac{Z}{d}\right) = \frac{1 - Z/3d}{1 + Z/d} (Z \leq 3d), \quad 0 (Z > 3d), \quad Z = z - \frac{d}{2}$$

(物体の高さが0の場合に1、寸法(高さ)の3倍の場合に0となる)



江口讓，杉本聡一郎，服部康男，平口博丸，竜巻による物体の浮上・飛来解析コード TONBOS の開発，電力中央研究所 研究報告 N14002，2014.

- ・物体が揚力により浮き上がる際の挙動を理論的に評価するのは難しい
(物体の傾き，物体表面に生じる圧力の分布等まで模擬するのは現実的ではない)
- ・これに準ずる方法として，物体が浮き上がりやすくなる（すなわち，揚力が大きくなる）ように係数 (C_{La}) を設定することで，飛散挙動の保守的な取扱いが可能になる
- ・一方，抗力係数×見付面積 ($C_D A$) と揚力係数×見付面積 (C_{La}) の関係は， $C_D A > C_{La}$ が成立
→係数として，揚力係数×見付面積 (C_{La}) に代わり抗力係数×見付面積 ($C_D A$) を用いることで，物体が浮き上がりやすくなる評価とすることが可能

$$\text{揚力加速度： } L = \frac{\rho C_D A}{2m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M|_{x,y}^2 f\left(\frac{Z}{d}\right)$$

C_DA と C_La の比較

	C _D A	C _L a
円柱*(直径 D, 長さ L)	約 0.47DL	~0.2DL
自動車*(Dodge Dart)	約 129ft ²	約 48.7ft ²
自動車**(セダン, 1/6 模型)	約 12.1m ²	約 7.8m ²
自動車**(ミニバン, 1/6 模型)	約 14.6m ²	約 7.9m ²



・浮き上がりの判定

- 揚力が重力を上回った場合に浮き上がりが発生
- 上記と同様に、揚力係数×見付面積(C_La)よりも大きな抗力係数×見付面積(C_DA)を用いることで、物体が浮き上がり始める風速(V_w)の条件が小さくなり、物体の浮き上がりを保守的に判定することが可能

$$\frac{\rho C_{L}a}{2 m} V_w^2 > g \quad \Rightarrow \quad \frac{\rho C_{D}A}{2 m} V_w^2 > g$$

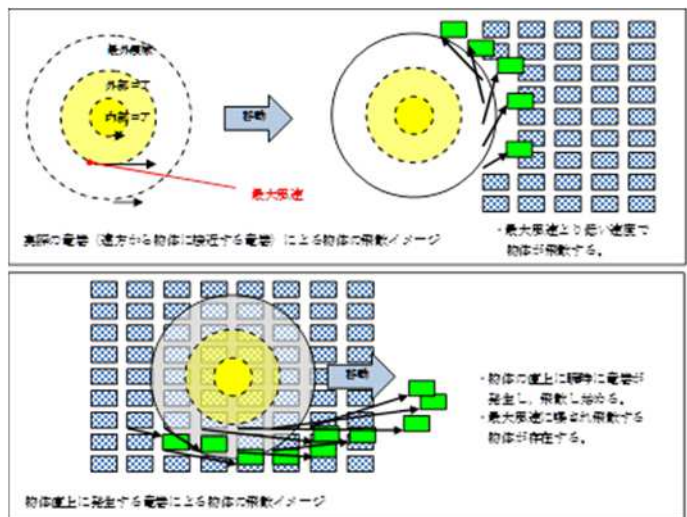
*EPRI, Wind Field and Trajectory Models for Tornado-Propelled Objects, report NP-748, 1978.

**Schmidlin, T., Hammer, B., King, P., Ono, Y., Miller, L. S. and Thumann, G., Unsafe at any (wind) speed?

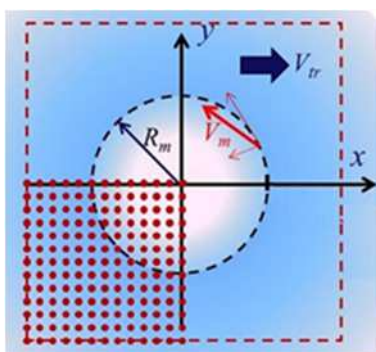
-Testing the stability of motor vehicles in severe winds-, Vol.83, No.12, pp.1821-1830, 2002.

4. 多点配置の手法による不確かさを考慮した保守性

- ・ 竜巻が物体に与える速度の不確かさを考慮するため、多点配置の手法を採用
 - － 竜巻周囲に仮想的に多数個の評価対象物品を配置し各々につき評価を実施
(初期竜巻中心を中心とし、一辺が竜巻半径の4倍の正方形の領域に 51×51 個の物体を配置)
 - － 評価値 (速度, 高さ, 距離) として, 飛散させた物体のうち最大となるものを選択
- ・ 実際の竜巻は遠方から物体に近づくため, 最大風速より低い風速に曝され飛散
- ・ 物体の直上に竜巻を発生させる設定とすることで, 実際より厳しい結果を与える



飛散の比較イメージ



多点配置のイメージ

5. モデルの実事例との比較 ①F-スケールとの比較

- ・ F-スケール：竜巻等の突風により発生した建築物や車両等の被害状況から、竜巻風速を推定するために考案された指標
- ・ F-スケールで示されている自動車の被災状況と各スケールに対応する最大風速 (69m/s, 92m/s, 116m/s) を用いた自動車の飛散解析結果とを比較
- ・ 自動車の飛散評価結果は各スケールに対応する自動車の被災状況と概ね合致

F-スケールで示されている自動車の飛散状況

F-スケール	風速 (m/s)	自動車の被災状況
F2	50-69	cars blown off highway (自動車が道路からそれる)
F3	70-92	cars lifted off the ground (自動車が地面から浮上する)
F4	93-116	cars thrown some distances or rolled considerable distances (自動車がある距離を飛ばされる, または, かなりの距離を転がる)

自動車の飛散評価結果

F-スケールとの対応	最大水平風速 (m/s)	竜巻接線風速 (m/s)	竜巻移動速度 (m/s)	計算結果		
				速度 (m/s)	距離 (m)	高さ (m)
F2	69	59	10	1.0	1.4	0
F2*	89	59	30	23	25	0.9
F3	92	79	13	23	34	1.1
F4	116	99	17	42	59	3.1

(*)自動車の走行を考慮し、竜巻の移動速度を増大させた場合

江口讓, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 竜巻による物体の浮上・飛来解析コード TONBOS の開発, 電力中央研究所 研究報告 N14002, 2014. 他

6. モデルの実事例との比較 ②Gland Gulf 原子力発電所の竜巻事例

- ・建設中の Grand Gulf 原子力発電所(米国ミシシッピ州)に竜巻が来襲(1978. 4. 17)
- ・建設中の冷却塔内部に設置されていたクレーンが倒壊し、冷却塔の一部が破損する等の被害
- ・竜巻による物品の飛散状況が定量的に分かる事例として、資材置き場におけるパイプの散乱状況が報告されている
 - －パイプを収納した木箱(一部は二段重ね)は浮上せずに転倒し、パイプが周辺7～9mに散乱(Pieces of pipe were scattered over the area, but none traveled more than 25-30 ft.)
 - －パイプはコンクリート・石綿製、長さ8ft、直径(内径)8in.
 - －通過時の竜巻規模はF2と考えられている



Grand Gulf 原子力発電所資材置き場におけるパイプの散乱状況

"Courtesy of Hathi Trust"

<http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015037472209#view=1up;seq=65>

7. モデルの実事例との比較 ②Grand Gulf 原子力発電所の竜巻事例

- ・パイプの飛散状況に対して、飛散評価を実施
 - －竜巻条件：設計竜巻風速 67m/s, 最大接線風速 53.6m/s, 移動速度 13.4m/s, コア半径 45.7m
 - －飛来物条件：直径(外径)9in. (0.2286m), 物体高さ 0.229m, 密度 1700kg/m³, 飛行定数 C_DA/m 0.0080m²/kg
 - －初期配置：物体個数 51×51 個を、竜巻半径の 4 倍を一辺とする正方形内 (x, y=[-2Rm, +2Rm]) に等間隔配置
- ・飛散評価の結果、パイプがほとんど飛散せず、木箱が倒れた影響で散らばったと思われる状況と概ね合致
- ・なお、ランキン渦モデルにより評価した場合、飛散距離や最大水平速度で実際の状況と比較して過度に保守的な評価結果

Grand Gulf 原子力発電所のパイプの飛散計算結果

風速場モデル	初期物体高さ	計算結果 (TONBOS)		
		飛散距離	飛散高さ ^{*2}	最大水平速度
フジタモデル	1m	1.2m	0.0m	4.9m/s
ランキン渦モデル	1m ^{*1}	42.6m	0.34m	30.7m/s
	40m	227m	0.34m	40.9m/s

*1：地上付近の風速場を模擬できていないが、比較のため同条件とした

*2：初期物体高さからの飛散高さ

日本保全学会原子力規制関連事項検討会，原子力発電所の竜巻影響評価について－設計風速および飛来物速度の評価－，2014.9.9

8. モデルの実事例との比較 ③佐呂間の竜巻事例

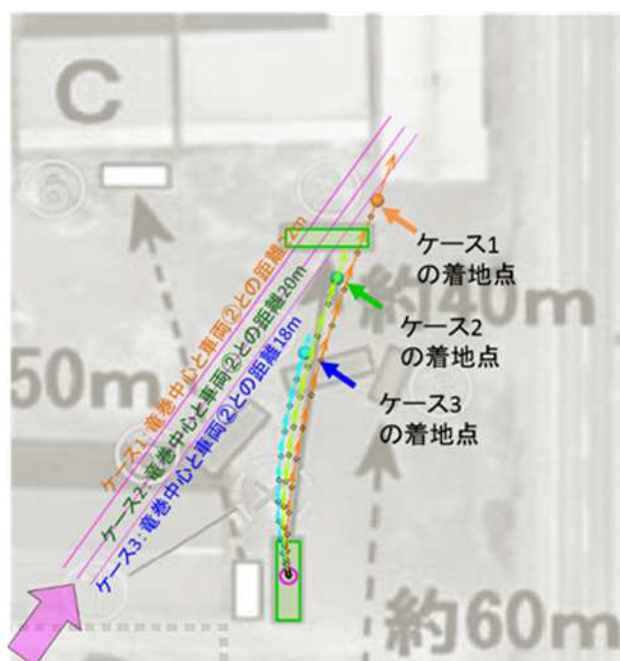
- ・北海道網走支庁佐呂間町で竜巻が発生(2006. 11. 7)
- ・4tトラックは約40m移動(初期位置と移動位置が判明している)



佐呂間竜巻(2006. 11. 7)による被災状況: 工事事務所敷地内の車両被災
(竜巻経路 → を追加)

9. モデルの実事例との比較 ③佐呂間の竜巻事例

- ・トラックに対し，車両と竜巻中心との距離を変化させて飛散評価を実施
 - －竜巻条件：設計竜巻風速 92m/s，最大接線風速 70m/s，移動速度 22m/s，コア半径 20m
 - －飛来物条件：車両長さ 8.1m，車両幅 2.24m，車両高さ 2.5m，車両重量 4000kg，飛行定数 $C_D A/m$ 0.0056m²/kg
(車種不明のため，三菱ふそう PA-FK71D の仕様とした)
 - －初期配置：竜巻中心からの距離は 18m，20m，22m の 3 ケースを実施
(竜巻は遠方から物体に近づくが，風速 60m/s 以下では浮上しない)
- ・軌跡は竜巻中心との位置関係に依存するが，各ケースとも飛散方向が実際の方
向と概ね合致
- ・特に車両と竜巻中心との距離を 20m としたケースでは，飛散距離もほぼ正確
に再現
- ・地上に設置された状況からの飛散挙動が再現できることを確認



佐呂間竜巻での4tトラックの飛散計算結果

日本保全学会原子力規制関連事項検討会，原子力発電所の竜巻影響評価について－設計風速および飛来物速度の評価－，2014.9.9

10. モデルの実事例との比較 ③佐呂間の竜巻事例

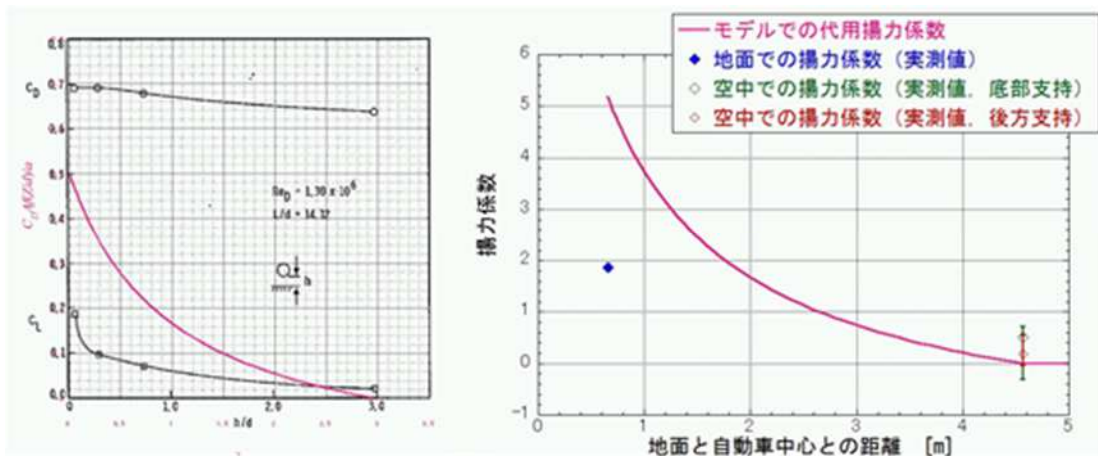
(多点配置を考慮した飛来物評価)

- 多点配置を考慮した飛来物評価で佐呂間竜巻における4tトラックの被災事例を評価し、実際の被災状況と結果を比較
- パイプの飛散状況に対して、飛散評価を実施
 - － 竜巻条件：設計竜巻風速 92m/s，最大接線風速 78m/s，移動速度 14m/s，コア半径 30m
 - － 飛来物条件：三菱ふそう PA-FK71D の仕様（前に同じ）
 - － 初期配置：物体個数 51×51 個を，竜巻半径の 4 倍を一辺とする正方形内 ($x, y = [-2R_m, +2R_m]$) に等間隔配置
- 多点配置を考慮した飛散評価結果と実際の被災状況を比較した結果，保守性の観点からも妥当な結果が得られている
 - － 最大飛散速度：36m/s (130 km/h) → 被災後もほぼ元の外形を留めており，実速度は評価結果をはるかに下回ると推察
 - － 最大飛散高さ：3.6m → 乗員 2 名が幸い存命で救出されており，トラックが 3.6m 以上の高所から落下したとは考え難い
 - － 最大飛散距離：63.4m → 実際の飛散距離 (約 40m) を上回る

江口讓，杉本聡一郎，服部康男，平口博丸，原子力発電所での竜巻飛来物速度の合理的評価法，日本機械学会論文集，vol.81，No.823，2015

11. 今回用いた飛散評価手法の保守性 ①揚力係数の設定による保守性

- ・揚力を大きく見積もることによる，飛散評価上の影響
 - －初期状態（物体は地上に存在）では，浮き上がるかどうか
 - －浮き上がりやすい判定を行うことで，本来飛散しない条件の物体でも評価上飛散を発生させる
 - －飛散状態（物体は空中に存在）では，どれだけ浮き上がって飛散距離が長くなるか
 - －浮き上がることで滞空時間が長くなり，飛散距離が増加
 - －高さ方向に風速分布を持つ場合，高度を増すことでより周囲の風速（鉛直/水平）が増加して物体が加速され，飛散速度や飛散距離，浮き上がり高さが増加
- ・風洞実験の結果等を踏まえ，大きな揚力係数を設定することで揚力をより大きく見積もり，保守的な評価を実施



(円柱の場合)

(自動車の場合)

設定した揚力係数(抗力係数で代用)の、実際の揚力係数との比較

EPRI, Wind Field and Trajectory Models for Tornado-Propelled Objects, report NP-748, 1978.に基づく

12. 今回用いた飛散評価手法の保守性 ②多点配置の手法による保守性

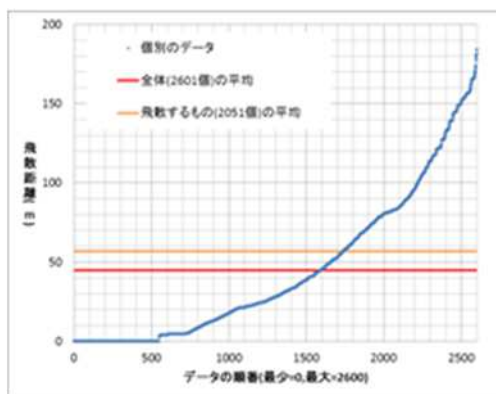
・多点配置(51×51=2601 個)の手法における評価結果の分布例

－飛散距離：最大値は平均(飛散するものの)の約3倍

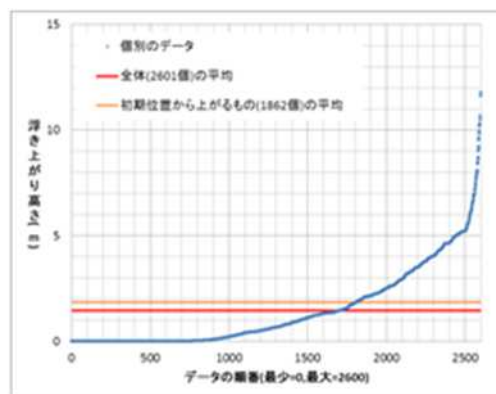
－浮き上がり高さ：最大値は平均(初期位置から上がるものの)の約6倍

→多点配置の手法により、竜巻が物体に与える速度の不確かさを考慮

－竜巻中心から見て進行方向後ろ側からの飛散のような、現実性の小さいケース(竜巻の進行に伴い風速がピークを過ぎてから飛散)も含めて評価を行っている



飛散距離の分布



浮き上がり高さの分布

- ・ワゴン車
- ・初期高さ 7.5m
- ・風速場はフジタモデル

設計竜巻に対する風速設定(100m/s)の保守性ともあわせ、飛散評価全体として一定の保守性を確保した評価となっている。

外部事象防護施設に対する竜巻飛来物の衝突による影響について

1. 金属キャスク

金属キャスクの外筒の板厚は約 2cm であり、重量のある、または鋭い物体が外筒上に落下した場合、外筒が貫通し、外筒により覆われている中性子遮蔽材（レジン）の一部が失われる可能性がありうることから、遮蔽機能が低下する場合を考える。なお、本体胴の板厚は約 25cm であり、本体胴の貫通に至るまでには大きな余裕があることから、金属キャスクの閉じ込め機能には影響しない。

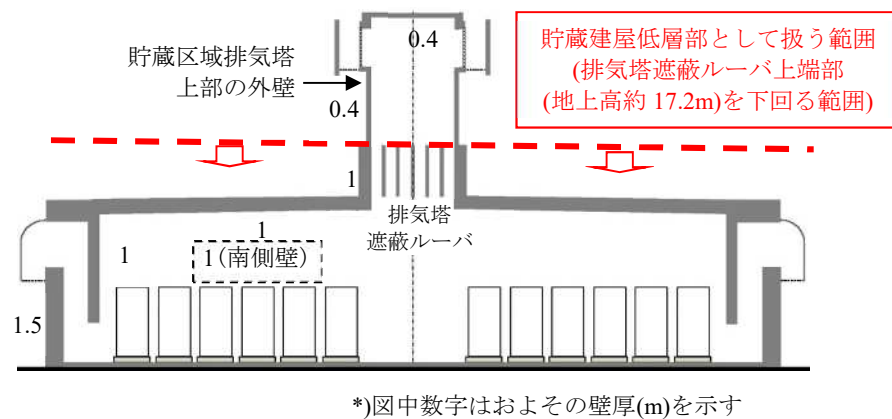
金属キャスク外筒への物体の落下により破損する中性子遮蔽材の範囲は一部に限定されると考えられるが、遮蔽機能の低下による影響を把握するため、非現実的ではあるが金属キャスクの全体にわたり中性子遮蔽材が完全に失われた極端な状態を仮定する。

このような場合を仮定しても金属キャスク周囲の線量は、核燃料輸送物としての特別の試験条件（輸送物の安全性を評価する観点から輸送法令に基づき想定する過酷な条件）を対象とした遮蔽解析（1m 貫通試験）の結果に基づき保守的に見積もっても 9mSv/h 程度（金属キャスク表面から 1m の位置）であり、特別の試験条件における設計基準(10mSv/h)を下回っている。また、敷地境界における線量の増加量は保守的に見積もっても 0.07 μ Sv/h 程度と周辺監視区域外における線量限度(1mSv/年 \div 0.11 μ Sv/h)を下回る値であり、著しい増加とはならない。なお、貯蔵中に金属キャスクの中性子遮蔽材が損傷するような事象が仮に生じた場合、輸送にあたっては輸送物としての適切な対処を行った上で実施する。

このように、金属キャスクへの竜巻飛来物の衝突については、そもそも可能性が極めて小さい状況で、極端に保守的な状態を仮定しても遮蔽機能の低下は設計基準の範囲内に留まり、また敷地周辺への影響も極めて小さいことから、竜巻飛来物が金属キャスクの基本的安全機能に直接影響する可能性は極めて小さく、貯蔵建屋の開口部を通過する飛来物を設定する必要はないと考えられる。

2. 使用済燃料貯蔵建屋

現実的には、竜巻飛来物の衝突により使用済燃料貯蔵建屋の基本的安全機能を損なうことはないが、仮に竜巻飛来物の衝突により貯蔵区域排気塔上部の外壁に裏面剥離が発生したとしても、排気塔直下には金属キャスクを貯蔵しないことから、落下したコンクリート片が金属キャスクに衝突して影響を及ぼす可能性は小さく、また補修により建屋壁の遮蔽機能の復旧を図れることから、使用済燃料貯蔵建屋の基本的安全機能に影響はない。(別添5-1図参照)



別添5-1図 貯蔵区域断面図 (東西方向)