

【公開版】

提出年月日	令和元年 11 月 29 日	R 1
日本原燃株式会社		

M O X 燃 料 加 工 施 設 に お け る  
新 規 制 基 準 に 対 す る 適 合 性

安全審査 整理資料

第 9 条：外部からの衝撃による損傷の防止  
(竜巻)

## 目 次

### 1 章 基準適合性

#### 1. 基本方針

##### 1. 1 要求事項の整理

##### 1. 2 要求事項に対する適合性

##### 1. 3 規則への適合性

#### 2. 竜巻影響評価の基本方針

#### 3. 設計対象施設

#### 4. 基準竜巻・設計竜巻の設定

##### 4. 1 竜巻検討地域の設定

##### 4. 2 基準竜巻の最大風速の設定

##### 4. 3 設計竜巻の最大風速の設定

#### 5. 設計荷重（竜巻）の設定

##### 5. 1 設計飛来物の設定

##### 5. 2 荷重の組合せと許容限界

#### 6. 評価に使用する風速場モデルについて

#### 7. 竜巻防護設計

##### 7. 1 竜巻防護施設のうち建屋に設置される竜巻防護施設（外気と繋がっている竜巻防護施設を除く）

##### 7. 2 竜巻防護施設のうち建屋に設置されるが防護が期待できない竜巻防護施設

##### 7. 3 竜巻防護施設のうち建屋内の施設で外気と繋がっている竜巻防護施設

##### 7. 4 竜巻防護施設を設置する施設

##### 7. 5 竜巻随件事象に対する設計

## 8. 手順等

### 8. 1 飛来物発生防止対策

## 2章 補足説明資料

## 1 章 基準適合性

## 1. 基本方針

### 1. 1 要求事項の整理

外部からの衝撃による損傷の防止について、事業許可基準規則第九条とウラン・プルトニウム混合酸化物燃料加工施設安全審査指針の比較並びに当該指針を踏まえたこれまでの許認可実績により、事業許可基準規則第九条において追加された要求事項を整理する。（第1－1表）

第1-1表 事業許可基準規則第九条とMOX指針 比較表 (1 / 5)

事業許可基準規則 第九条 (外部からの衝撃による損傷の防止)	MOX指針	備考
<p>1 安全機能を有する施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。</p> <p>(解釈)</p> <p>1 第9条は、設計基準において想定される自然現象（地震及び津波を除く。）に対して、安全機能を有する施設が安全機能を損なわないために必要な措置を含む。</p> <p>2 第1項に規定する「想定される自然現象」とは、敷地の自然環境を基に、洪水、風（台風）、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、地滑り、火山の影響、生物学的事象、森林火災等から適用されるものをいう。</p> <p>3 第1項に規定する「想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないもの」とは、設計上の考慮を要する自然現象又はその組合せに遭遇した場合において、自然事象そのものがもたらす環境条件及びその結果として当該施設で生じ得る環境条件において、その設備が有する安全機能が達成されることをいう。</p>	<p>指針1. 基本的条件</p> <p>事故の誘因を排除し、災害の拡大を防止する観点から、MOX燃料加工施設の立地地点及びその周辺における以下の事象を検討し、安全確保上支障がないことを確認すること。</p> <p>1. 自然環境</p> <p>(1)地震、津波、地すべり、陥没、台風、高潮、洪水、異常寒波、豪雪等の自然現象</p> <p>(2)地盤、地耐力、断層等の地質及び地形等</p> <p>(3)風向、風速、降雨量等の気象</p> <p>(4)河川、地下水等の水象及び水理</p>	<p>追加要求事項</p>

第1-1表 事業許可基準規則第九条とMOX指針 比較表 (2/5)

事業許可基準規則 第九条 (外部からの衝撃による損傷の防止)	MOX指針	備考
	<p>指針14. 地震以外の自然現象に対する考慮</p> <p>1. MOX燃料加工施設における安全上重要な施設は、MOX燃料加工施設の立地地点及びその周辺における自然環境をもとに津波、地すべり、陥没、台風、高潮、洪水、異常寒波、豪雪等のうち予想されるものを設計基礎とすること。</p> <p>2. これらの設計基礎となる事象は、過去の記録の信頼性を十分考慮のうえ、少なくともこれを下回らない苛酷なものであって、妥当とみなされるものを選定すること。</p> <p>3. 過去の記録、現地調査の結果等を参考にして必要のある場合には、異種の自然現象を重畳して設計基礎とすること。</p>	<p>前記のとおり</p>

第1-1表 事業許可基準規則第九条とMOX指針 比較表 (3/5)

事業許可基準規則 第九条 (外部からの衝撃による損傷の防止)	MOX指針	備考
<p>2 安全上重要な施設は、当該安全上重要な施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該安全上重要な施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならない。</p> <p>(解釈)</p> <p>4 第2項に規定する「大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象」とは、対象となる自然現象に対応して、最新の科学的技術的知見を踏まえて適切に予想されるものをいう。なお、過去の記録、現地調査の結果、最新知見等を参考にして、必要のある場合には、異種の自然現象を重畳させるものとする。</p> <p>5 第2項に規定する「適切に考慮したもの」とは、大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により安全上重要な施設に作用する衝撃及び設計基準事故が発生した場合に生じる応力を単純に加算することを必ずしも要求するものではなく、それぞれの因果関係及び時間的变化を考慮して適切に組み合わせた場合をいう。</p>	<p>指針14. 地震以外の自然現象に対する考慮</p> <p>1. MOX燃料加工施設における安全上重要な施設は、MOX燃料加工施設の立地地点及びその周辺における自然環境をもとに津波、地すべり、陥没、台風、高潮、洪水、異常寒波、豪雪等のうち予想されるものを設計基礎とすること。</p> <p>2. これらの設計基礎となる事象は、過去の記録の信頼性を十分考慮のうえ、少なくともこれを下回らない苛酷なものであって、妥当とみなされるものを選定すること。</p> <p>3. 過去の記録、現地調査の結果等を参考にして必要のある場合には、異種の自然現象を重畳して設計基礎とすること。</p>	<p>追加要求事項</p>



第1-1表 事業許可基準規則第九条とMOX指針 比較表 (4/5)

事業許可基準規則 第九条 (外部からの衝撃による損傷の防止)	MOX指針	備考
<p>3 安全機能を有する施設は、工場等内又はその周辺において想定される加工施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）に対して安全機能を損なわないものでなければならない。</p> <p>(解釈)</p> <p>1 第9条は、設計基準において想定される自然現象（地震及び津波を除く。）に対して、安全機能を有する施設が安全機能を損なわないために必要な措置を含む。</p> <p>6 第3項は、設計基準において想定される加工施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）に対して、安全機能を有する施設が安全機能を損なわないために必要な重大事故等対処設備への措置を含む。</p>	<p>指針1 基本的条件 事故の誘因を排除し、災害の拡大を防止する観点から、MOX燃料加工施設の立地地点及びその周辺における以下の事象を検討し、安全確保上支障がないことを確認すること。</p> <p>2. 社会環境 (1) 近接工場における火災・爆発等 (2) 航空機事故等による飛来物等 (3) 農業、畜産業、漁業等食物に関する土地利用及び人口分布 (解説)</p> <p>2 社会環境に関する事象として注目すべき点は、近接工場における事故及び航空機に係る事故である。 近接工場における事故については、事故の種類と施設までの距離との関連においてその影響を評価した上で、必要な場合、安全上重要な施設が適切に保護されていることを確認すること。 航空機に係る事故については、航空機に係る施設の事故防止対策として、航空機の施設上空の飛行制限等を勘案の上、その発生の可能性について評価した上で、必要な場合は、安全上重要な施設のうち特に重要と判断される施設が、適切に保護されていることを確認すること。</p>	<p>追加要求事項</p>

第1-1表 事業許可基準規則第九条とMOX指針 比較表 (5 / 5)

事業許可基準規則 第九条 (外部からの衝撃による損傷の防止)	MOX指針	備考
<p>7 第3項に規定する「加工施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）」とは、敷地及び敷地周辺の状況を基に選択されるものであり、飛来物（航空機落下等）、ダムの崩壊、爆発、近隣工場等の火災、有毒ガス、船舶の衝突、電磁的障害等をいう。なお、上記の「航空機落下」については、「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について」（平成14・07・29原院第4号（平成14年7月30日原子力安全・保安院制定））等に基づき、防護設計の要否について確認する。</p>		<p>前記のとおり</p>

## 1. 2 要求事項に対する適合性

### (1) 外部からの衝撃による損傷の防止

安全機能を有する施設は、本施設敷地の自然環境を基に想定される洪水、風（台風）、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、地滑り、火山の影響、生物学的事象、森林火災等の自然現象（地震及び津波を除く。）又は地震及び津波を含む組合せに遭遇した場合において、自然現象そのものもたらす環境条件及びその結果として本施設で生じ得る環境条件においても安全機能を損なわない設計とする。

なお、本施設敷地で想定される自然現象のうち、洪水、地滑りについては、立地的要因により設計上考慮する必要はない。

上記に加え、安全上重要な施設に対しては、最新の科学的技術的知見を踏まえ当該安全上重要な施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該安全上重要な施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を、それぞれの因果関係及び時間的变化を考慮して適切に組み合わせる。

また、安全機能を有する施設は、本施設敷地内又はその周辺の状況を基に想定される飛来物（航空機落下等）、ダム の崩壊、爆発、近隣工場等の火災、有毒ガス、船舶の衝突、電磁的障害等のうち本施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であつて人為によるもの（故意によるものを除く。以下、「人為事象」という。）に対して安全機能を損なわない設計とする。

なお、本施設敷地又はその周辺において想定される人為事象のうち、ダム の崩壊、船舶の衝突については、立地的要因により設計上考慮する必要はない。

自然現象及び人為事象（故意によるものを除く。）の組み合わせにつ

いては、地震、津波、風（台風）、竜巻、凍結、降水、積雪、火山の影響、生物学的事象、森林火災等を考慮する。事象が単独で発生した場合の影響と比較して、複数の事象が重畳することで影響が増長される組合せを特定し、その組合せの影響に対しても安全機能を損なわない設計とする。

ここで、想定される自然現象及び人為事象（故意によるものを除く。）に対して、安全機能を有する施設が安全機能を損なわないために必要な安全機能を有する施設以外の施設又は設備等への措置を含める。

## （2）竜巻

安全機能を有する施設のうち安全上重要な施設は、想定される竜巻が発生した場合においても、作用する設計荷重に対して防護する施設（以下、「竜巻防護施設」という。）とし、その安全機能を損なわない設計とする。また、その他の安全機能を有する施設については、竜巻及びその随伴事象に対して機能を維持すること、若しくは竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障が生じない期間での修復を行うこと又はそれらを適切に組み合わせることにより、その安全機能を損なわない設計とする。

竜巻に対する防護設計を行うための設計竜巻の最大風速は  $100\text{m/s}$  とし、設計荷重は、設計竜巻による風圧力による荷重、気圧差による荷重及び飛来物の衝撃荷重を組み合わせた設計竜巻荷重並びに竜巻防護施設の安全機能を損なわないよう、設計竜巻に対して設計上の考慮を行う施設全体（以下、「設計対象施設」という。）に常時作用する荷重、運転時荷重及びその他竜巻以外の自然現象による荷重等を適切に組み合わせたものとして設定する。

竜巻防護施設の安全機能を損なわないようにするため、設計対象施設に影響を及ぼす飛来物の発生防止対策として、飛来物となる可能性のあるもののうち、運動エネルギー及び貫通力の大きさを踏まえ、設計上考慮すべき飛来物（以下、「設計飛来物」という。）を設定する。なお、飛来物となり得る資機材及び車両のうち、竜巻防護対策によって防護できない可能性のあるものは、固縛、建屋収納、退避又は撤去を実施する。

また、敷地外から飛来するおそれがあり、かつ敷地内からの飛来物による衝撃荷重を上回ると想定されるものとして、むつ小川原ウィンドファームの風力発電のブレードがあるが、ブレードの飛来距離を考慮すると、ブレードが設計対象施設まで到達するおそれはないことから、ブレードは設計飛来物として考慮しない。

### 1. 3 規則への適合性

(外部からの衝撃による損傷の防止)

第九条 安全機能を有する施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。次項において同じ。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。

2 安全上重要な施設は、当該安全上重要な施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象により当該安全上重要な施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮したものでなければならない。

3 安全機能を有する施設は、工場等内又はその周辺において想定される加工施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であつて人為によるもの（故意によるものを除く。）に対して安全機能を損なわないものでなければならない。

#### 適合のための設計方針

##### 第1項及び第2項について

安全機能を有する施設は、設計基準において想定される自然現象（地震及び津波を除く。）に対して本施設の安全性を損なわない設計とする。また、安全上重要な施設は、想定される自然現象により作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮する。

##### (1) 竜巻

安全機能を有する施設は、竜巻が発生した場合においても安全機能を損なわない設計とする。

安全上重要な施設は、当該安全上重要な施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される竜巻により当該安全上重要な施設に作用する衝撃及び設計基準事故時に生ずる応力を適切に考慮した設計とする。

## 2. 竜巻影響評価の基本方針

原子力規制委員会の定める「加工施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成25年12月6日原子力規制委員会規則第十七号）」第九条では、外部からの衝撃による損傷の防止として、安全機能を有する施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならないとしており、敷地の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、竜巻を挙げている。

本施設の供用期間中に極めてまれに発生する突風、強風を引き起こす自然現象としての竜巻及びその随伴事象等によって安全機能を有する施設の安全機能を損なわない設計であることを評価するため、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（平成25年6月19日 原規技発第13061911号 原子力規制委員会決定）（以下、「竜巻ガイド」という。）を参照し、以下の竜巻影響評価について実施する。

- (1) 設計竜巻及び設計荷重（設計竜巻荷重及びその他の組合せ荷重の設定
- (2) 本施設における飛来物に係る調査
- (3) 飛来物発生防止対策
- (4) 考慮すべき設計荷重に対する設計対象施設の構造健全性等の評価を行い、必要に応じ対策を行うことで安全機能が維持されることの確認

安全機能を有する施設は、本施設が竜巻の影響を受ける場合においてもその安全機能を確保するために、竜巻に対して安全機能を損なわない設計とする。



その上で、竜巻によってその安全機能が損なわれないことを確認する施設を、全ての安全機能を有する構築物及び設備・機器とする。設計竜巻から防護する施設（以下、「竜巻防護施設」という。）としては、安全評価上その機能を期待する構築物及び設備・機器を漏れなく抽出する観点から、安全上重要な構築物及び設備・機器を抽出し、竜巻により臨界防止及び閉じ込め等の安全機能を損なわないよう機械的強度を有すること等により、安全機能を損なわない設計とする。

また、竜巻防護施設を設置する建屋及びその施設の破損等により竜巻防護施設に波及的影響を及ぼして安全機能を喪失させる可能性がある施設は、機械的強度を有すること等により、竜巻防護施設の安全機能を損なわない設計とする。ここで、竜巻防護施設、竜巻防護施設を設置する建屋及びその施設の破壊等により竜巻防護施設に波及的影響を及ぼして安全機能を喪失させる可能性がある施設を併せて、設計対象施設という。

上記に含まれない安全機能を有する施設は、竜巻及びその随伴事象に対して機能を維持すること若しくは竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間での修復を行うこと又それらを適切に組み合わせることにより、その安全機能を損なわない設計とする。

【補足説明資料 2 - 1】

### 3. 設計対象施設

設計対象施設は、竜巻防護施設の安全機能を損なわないよう、設計竜巻に対して設計上の考慮を行う施設全体とする。

安全機能を有する施設のうち安全評価上その機能を期待する施設の安全機能を維持し、かつ、火災・爆発の防止、臨界防止等の安全機能を損なわないようにするため、安全上重要な施設を竜巻防護施設とする。

これらの施設を添5第18図から添5第20図に示す選定フローに従い、竜巻による風圧力、気圧差及び飛来物に対する設計対象施設として選定する。ただし、竜巻防護施設を設置する建屋については、「竜巻防護施設を設置する施設」として設計対象施設に選定する。また、建屋に設置される竜巻防護施設のうち第3-1図に示す選定フローに従い選定される設計荷重（竜巻）に対して十分な耐力を有さない建屋に設置される竜巻防護施設及び開口部を有する室に設置される竜巻防護施設のうち添5-第21図に示す選定フローに従い選定される竜巻防護施設は、建屋に設置されるが防護が期待できない竜巻防護施設として選定する。

以上の選定結果から、竜巻防護施設は以下のように分類できる。

- a. 建屋に設置される竜巻防護施設（外気と繋がっている竜巻防護施設を除く）
- b. 建屋に設置されるが防護が期待できない竜巻防護施設
- c. 屋外の竜巻防護施設
- d. 建屋内の施設で外気と繋がっている竜巻防護施設

また、安全上重要な施設以外の安全機能を有する施設については、建物・構築物の高さ、竜巻防護施設又は竜巻防護施設を設

置する施設との距離を考慮し、破損又は転倒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おそれのあるものを、竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設として選定する。

選定した結果から、設計対象施設は以下に分類される。

- ・ 建屋に設置される竜巻防護施設（外気と繋がっている施設を除く。）
- ・ 建屋に設置されるが防護が期待できない竜巻防護施設
- ・ 屋外の竜巻防護施設
- ・ 建屋内の施設で外気と繋がっている竜巻防護施設
- ・ 竜巻防護施設を設置する施設
- ・ 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設

竜巻防護施設のうち、建屋に設置される竜巻防護施設（外気と繋がっている施設を除く。）、建屋に設置されるが防護が期待できない竜巻防護施設、屋外の竜巻防護施設及び建屋内の施設で外気と繋がっている竜巻防護施設並びに竜巻防護施設を設置する施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設を以下のとおり選定する。

- a. 建屋に設置される竜巻防護施設（外気と繋がっている施設を除く。）

(a) 燃料加工建屋内の竜巻防護施設

燃料加工建屋は「竜巻防護施設を設置する施設」として選定する。竜巻防護施設を設置する施設として燃料加工建屋があり、全ての竜巻防護施設は燃料加工建屋に収納される。

- b. 建屋に設置されるが防護が期待できない竜巻防護施設

(a) 非常用所内電源設備の非常用発電機の給気系及び排気系

- c. 屋外の竜巻防護施設

本施設は竜巻防護施設を全て燃料加工建屋に収納することから、該当する施設はない。

- d. 建屋内の施設で外気と繋がっている竜巻防護施設
  - (a) 気体廃棄物の廃棄設備の建屋排気設備
  - (b) 気体廃棄物の廃棄設備の工程室排気設備
  - (c) 気体廃棄物の廃棄設備のグローブボックス排気設備
  - (d) 非常用所内電源設備の非常用発電機の給気系及び排気系
- e. 竜巻防護施設を設置する施設

竜巻防護施設を設置する施設を以下のとおり選定する。

- (a) 燃料加工建屋
- f. 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設

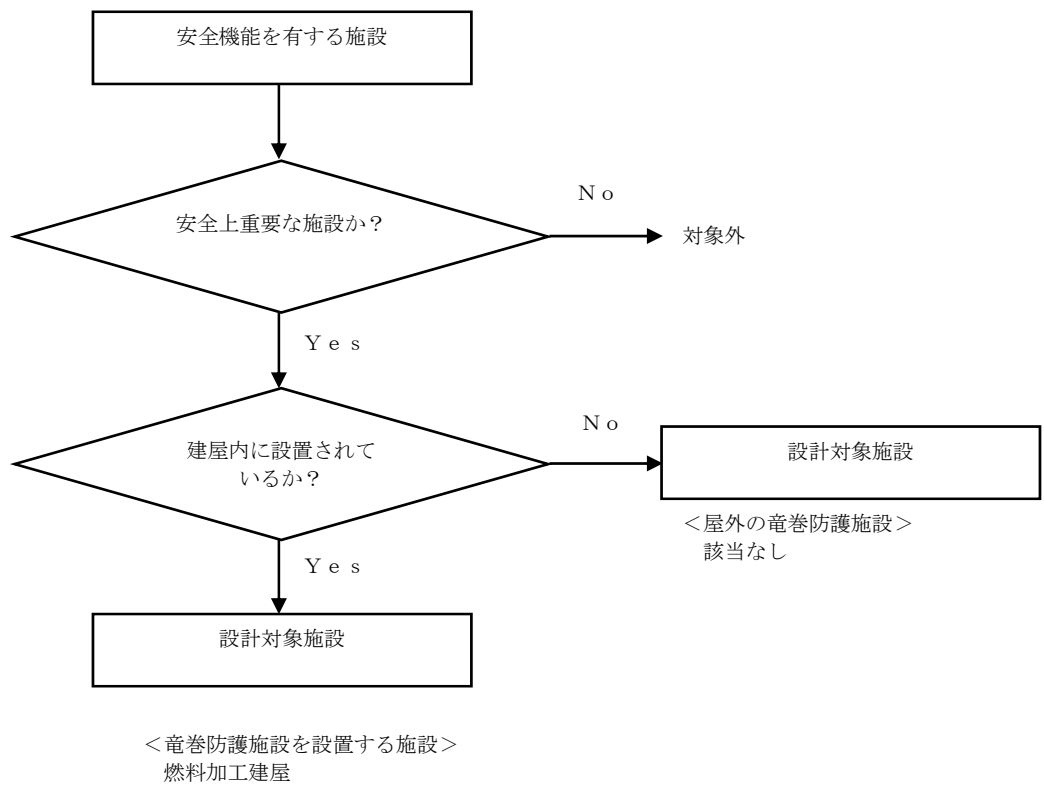
竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設に該当する施設はない。

また、排気筒は燃料加工建屋に隣接しているが、燃料加工建屋は、排気筒の転倒により、燃料加工建屋の安全機能を損なわない設計とする。

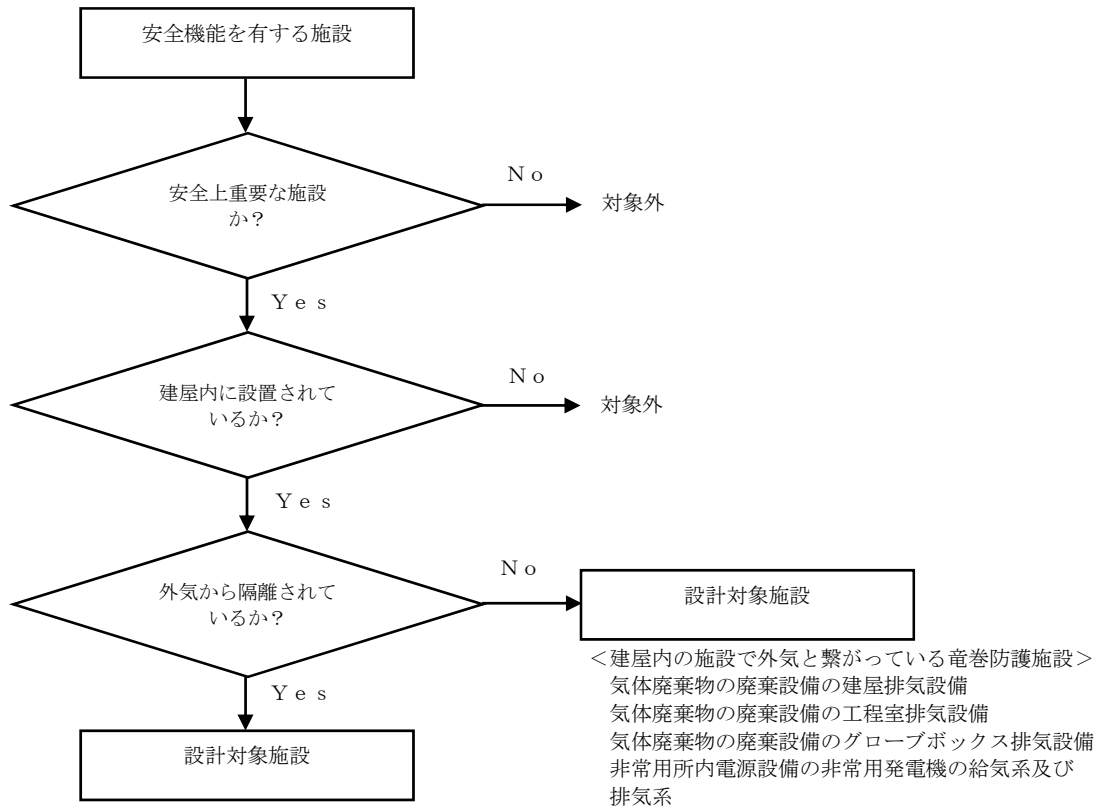
なお、エネルギー管理建屋については、その破損により発生する飛来物の影響により周辺の設計対象施設に影響を及ぼさない対策を実施する。エネルギー管理建屋は、建物各層に生ずる層せん断力が建物各層の保有水平耐力以下であることを確認する。エネルギー管理建屋の屋根及び外壁は、飛来するおそれがあり、かつ飛来時の運動エネルギー及び貫通力が設計飛来物を超えるものは飛散させない対策を実施する。エネルギー管理建屋の屋外機器については、飛来するおそれがあり、かつ飛来時の運動エネルギー及び貫通力が設計飛来物を超えるものは、固

縛又は補強による対策を実施する。また、エネルギー管理建屋の屋上に設置する重量機器は、架台に固定し、架台は構造骨組みに固定する。また、エネルギー管理建屋の高圧ガストレーラ庫に設置する水素ガスの貯蔵容器は、燃料加工建屋に対して、高圧ガス保安法に基づいた保安距離を維持するために、竜巻により飛散しないように固縛を実施する。

【補足説明資料 3-1～3-4】

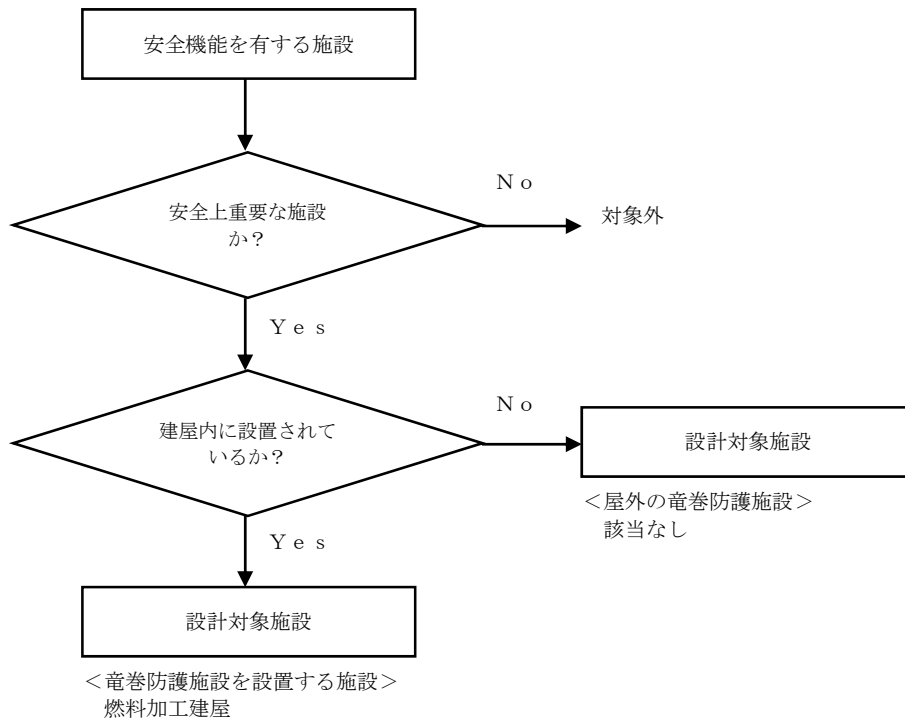


添5第18図 風圧力に対する設計対象施設の選定フロー



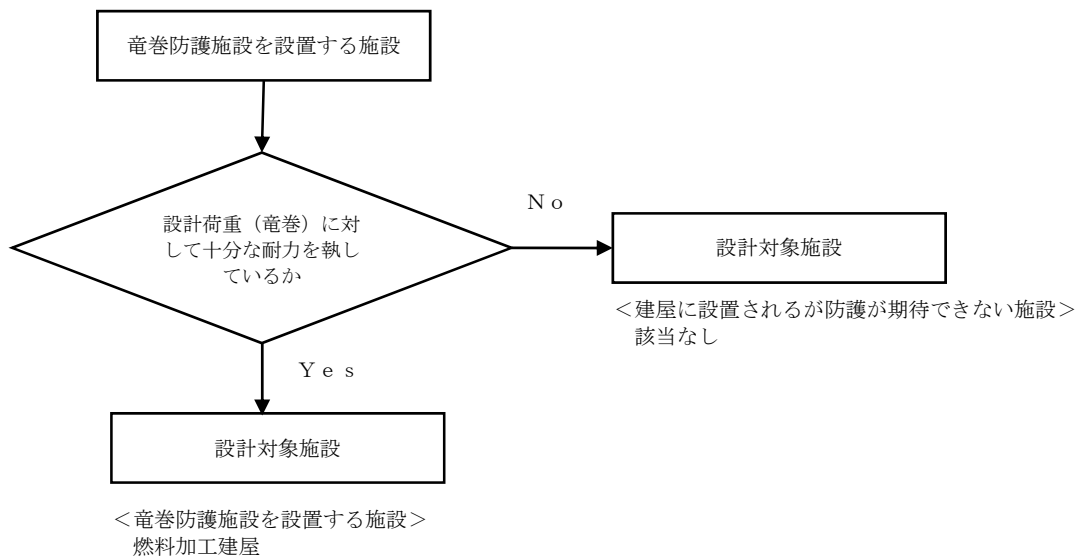
<竜巻防護施設を設置する施設>  
 燃料加工建屋

添5第19図 気圧差に対する設計対象施設の選定フロー

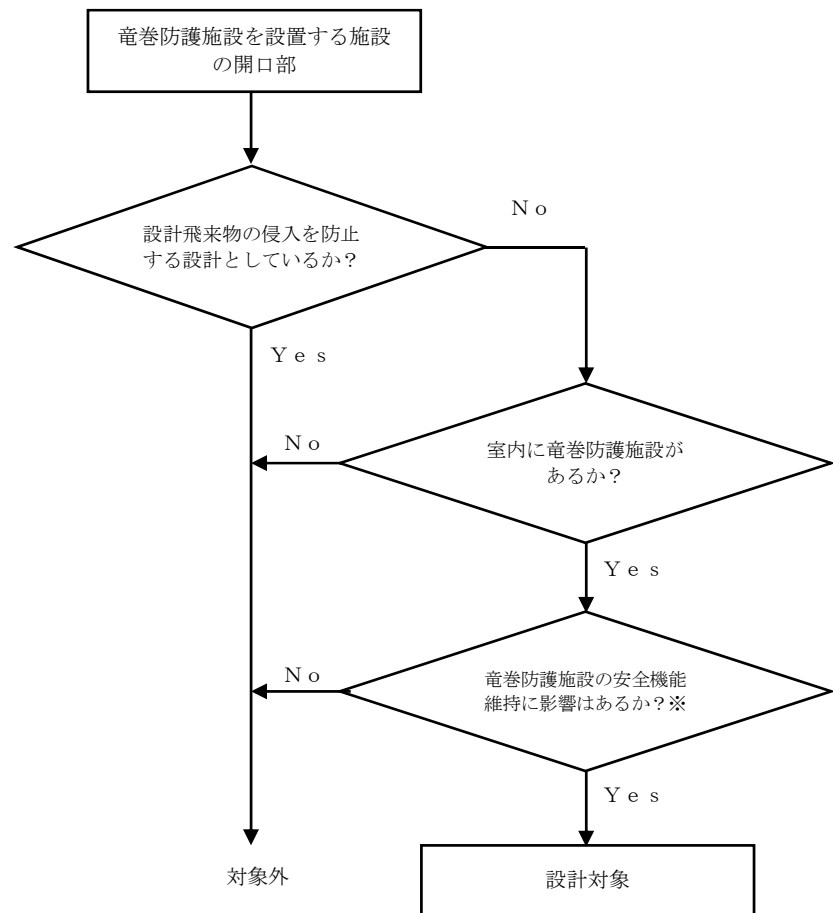


添5第20図 飛来物に対する設計対象施設の選定フロー





第3-1図 建屋の耐力に関する設計対象施設の選定フロー



<建屋に設置されるが防護が期待できない竜巻防護施設>  
非常用所内電源設備の非常用発電機の給気系及び排気系

※設計飛来物が開口部を通じて室内へ侵入した場合に、安全上重要な施設へ衝突する可能性の有無を確認する。

添5第21図 開口部に対する設計対象施設の選定フロー

#### 4. 基準竜巻・設計竜巻の設定

基準竜巻及び設計竜巻の設定は竜巻ガイドを参考に実施する。

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

##### 4. 1 竜巻検討地域の設定

竜巻検討地域の設定は、竜巻ガイドを参考に本施設が立地する地域、気象条件の類似性を考慮して実施する。

###### (1) 本施設が立地する地域の気候

本施設が立地する地域は、竜飛岬から奥羽山脈の分水嶺より東側にあり、その地域の気候は、日本海側の気候と太平洋側の気候の両面の特徴を合わせもっている。東北地方を気温、降水及び風により詳細に区分した気候区分を添3-チ第1図に示す。これによると、本施設が立地する地域は、区分Ⅲ（青森県北部及び東部地域）のうち区分Ⅲb（太平洋側にあるが冬は日本海側の気候でやませの影響が強い）に属している。

###### (2) 本施設が立地する地域の竜巻発生の観点での特徴

添3-チ第2図に示すとおり、本施設が立地する地域周辺においては、もともと竜巻の発生数は少なく、独立行政法人原子力安全基盤機構が東京工芸大学に委託した研究の成果（以下、「東京工芸大学委託成果」という。）で示されている、全国19個の竜巻集中地域からも離れている。

竜巻発生時の総観場は、東京工芸大学委託成果を参考に、気象庁「竜巻等の突風データベース」の総観場を、竜巻を発生させる親雲の発生要因を考慮して、7種に再編した総観場を用い、竜巻の発生要因別の地域分布の特徴を把握した。竜巻の発生要因別地域分布を

添3-チ第3図に、その特徴を添3-チ第1表に示す。

立地地域周辺における竜巻の発生状況は、日本海側や茨城県以西の太平洋側における発生状況とも特徴が異なり、日本海側に特徴的な寒候期の竜巻の発生はほとんどなく、暖候期に竜巻が発生している。また、茨城県以西の太平洋側で特徴的な台風起源の竜巻の発生はなく、太平洋海岸付近及び海上での竜巻の発生はほとんどない。

### (3) 竜巻検討地域

竜巻検討地域の設定は、竜巻ガイドを参考に、本施設が立地する地域の気候及び竜巻発生観点での特徴を踏まえて実施する。当該地域はもともと竜巻の発生数が少ないため、以下のa. からd. に示す条件を考慮して、青森県から岩手県の太平洋側（竜飛岬から御崎岬）及び北海道地方の南側（白神岬から襟裳岬）の海岸線に沿った海側5km及び陸側10kmの範囲を竜巻検討地域に設定する（面積約18000km<sup>2</sup>）。添3-チ第4図に竜巻検討地域を示す。

- a. 立地地域の気候及び竜巻発生観点での特徴を踏まえ、青森県（竜飛岬より太平洋側）から岩手県を基本とする。
- b. IAEAの基準を参考に、本施設を中心とする100000km<sup>2</sup>（半径約180km）の範囲を目安とし、その範囲に掛かる北海道南西部は、立地地域と同じ太平洋側に面していることを考慮して、竜巻検討地域に含める。
- c. 竜巻検討地域は、分水嶺及び関口武による気候区分（1959）を参考に設定する。
- d. 本施設が海岸線から約5kmの位置に立地していること及び竜巻の発生がほとんど海岸線付近であることから、海岸線に沿った海側5km及び陸側10kmの範囲を考える。

ここで、設定した竜巻検討地域の妥当性を確認するために、竜巻検討

地域における竜巻の発生要因の出現比率と，日本海側及び太平洋側における出現比率とを比較した結果を添3-1第5図に示す。竜巻検討地域における竜巻の発生要因の出現比率は，日本海側及び太平洋側の出現比率とも傾向が異なっていることが確認できる。

また，藤田スケール3以上の竜巻の発生しやすさの地域性の検討として，「突風関連指数」による解析を行う。突風関連指数として，積乱雲を発生させる上昇流の強さの目安であるCAPE (Convective Available Potential Energy：対流有効位置エネルギー) 及び積乱雲がスーパーセルに発達しやすいかどうかの指標となるSReH (Storm Relative Helicity：ストームの動きに相対的なヘリシティ) を算出する。

これらの指数は，竜巻発生環境場との関連づけで，国内外で広く利用され知見が蓄積されている。CAPEの概念を添3-1第6図に，SReHの概念を添3-1第7図に示す。

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

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

ここで，式(a)のgは重力加速度， $\theta$ はストーム周囲の温位， $\theta'$ は下層の空気塊を上空に持ち上げた際の温位であり，dzは鉛直方向の層厚である。LFCは自由対流高度，ELは平衡高度である。式(b)のVは水平風速ベクトル， $\boldsymbol{\omega}$ は鉛直シアに伴う水平渦度，Cはストームの移動速度である。

各指数の計算は，ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) の再解析データ ECMWF-Interim (1989年以降：水平分解能約

70km) 及びERA40 (1989年まで: 水平分解能約250km) を基に, 水平分解能 5 km, 時間分解能 1 時間に解析した気象データセットを用いて, 1961年から2010年までの50年間について行い, それに基づいて両指数が同時に閾値を超過する頻度を計算する。同時超過頻度の算出に当たっては, 竜巻発生時には少なからず降水がもたらされるため, 降水量の閾値 (4 mm/h) を設定する。また, CAPEは降水過程により安定化し小さくなり得るため, 周辺のCAPE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を参考に, 当該メッシュの風上側半径25kmの扇状範囲内のCAPEの最大値を算出する。

CAPEについては, 緯度及び季節で絶対値が大きく変動するため, 暖候期 (5月~10月) 及び寒候期 (11月~4月) に分けて, それぞれ閾値を設定する。藤田スケール3以上の竜巻が発生し得る環境場として以下の閾値を用いる。

[暖候期 (5月~10月) ]

CAPE : 1, 200 J/kg, SReH :  $350\text{m}^2/\text{s}^2$

[寒候期 (11月~4月) ]

CAPE : 500 J/kg, SReH :  $350\text{m}^2/\text{s}^2$

暖候期及び寒候期に対する同時超過頻度分布の算出結果を添3一チ第8図に示す。暖候期においては, 太平洋側及び東シナ海から対馬海峡にかけては比較的大きな値となっている。また, 沿岸域では, 茨城県東海岸から西の本州太平洋側, 九州太平洋側及び東シナ海側で高く, 特に宮崎平野沿岸では大きい値となっている。それに比べて, 日本海側及び茨城県以北の太平洋側の値は1から2桁以上小さな値であり, 藤田スケール3規模の竜巻の発生が未だ確認されていないことと対応している。

本手法による解析により, 藤田スケール3以上の竜巻の発生しやすさの

地域性を特定でき、竜巻検討地域において藤田スケール3以上の竜巻は極めて発生し難いといえる。

#### 4. 2 基準竜巻の最大風速の設定

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

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

過去に発生した竜巻による最大風速 ( $V_{B1}$ ) の設定に当たっては、日本で過去 (1961年から2013年12月) に発生した最大の竜巻は藤田スケール3であり、藤田スケール3における風速は70m/sから92m/sであることから、その最大風速を基に  $V_{B1}$  を92m/sとする。第4-1表に日本で過去に発生した藤田スケール3の竜巻一覧を示す。

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

竜巻最大風速のハザード曲線は、竜巻ガイドを参考とした既往の算定方法に基づき、具体的には、東京工芸大学委託成果を参考に算定する。本評価は、竜巻データの分析、竜巻風速、被害幅及び被害長さの確率密度分布の算定、相関係数の算定並びにハザード曲線の算定によって構成される。

##### a. 竜巻の発生頻度の分析

気象庁「竜巻等の突風データベース」に掲載されている竜巻年別発生確認数 (添3-チ第9図) を基に、竜巻検討地域 (海岸線から陸側に10km, 海側に5kmの計15km幅の範囲) における1961年から2013年12月までの53年間の統計量を藤田スケール別に算出する。また、観測体制の変遷による観測データ品質のばらつきを踏まえ、以下の (a) から (c) の基本的な考え方に基づいて整理を行う。

##### (a) 被害が小さくて見過ごされやすい藤田スケール0及び藤田スケール不明の竜巻に対しては、観測体制が強化された2007年以降の年間



発生数や標準偏差を用いる。

- (b) 被害が比較的軽微な藤田スケール1竜巻に対しては、観測体制が整備された1991年以降の年間発生数や標準偏差を用いる。
- (c) 被害が比較的大きく見逃されることがないと考えられる藤田スケール2及び藤田スケール3竜巻に対しては、観測記録が整備された1961年以降の全期間の年間発生数や標準偏差を用いる。

また、藤田スケール不明の竜巻については、以下の取扱いを行う。

陸上で発生した竜巻及び海上で発生して陸上へ移動した竜巻については、被害があつて初めてその藤田スケールが推定されるため、陸上での藤田スケール不明の竜巻は、被害が少ない藤田スケール0竜巻とみなす。

一方、海上で発生しその後上陸しなかった竜巻については、その竜巻の藤田スケールを推定することは困難であることから、「沿岸部近傍での竜巻の発生特性は、陸上と海上とで類似している」という仮定に基づいて各藤田スケールに分類する。

以上を踏まえて、添3一チ第3表のとおり、観測データから53年間の推定データを評価する。

竜巻は気象事象の中でも極めて稀に発生する事象であり、発生数の変動（標準偏差）が大きい分布となり、東京工芸大学委託成果にポリヤ分布への適合性が良いことが示されている。以上より、ハザード曲線の評価に当たって使用する竜巻の年発生数の確率分布は、添3一チ第10図に示すとおりポリヤ分布を採用する。

#### b. 竜巻風速、被害幅及び被害長さの確率密度分布並びに相関係数

竜巻検討地域における53年間の竜巻の発生数、被害幅及び被害長さを基に、確率密度分布については竜巻ガイド及び竜巻ガイドが参考としている東京工芸大学委託成果を参考に、添3一チ第11図から添3一チ第13

図に示すとおり対数正規分布に従うものとする。

また、53年間の推定データの作成に伴う被害幅又は被害長さの情報が  
ない竜巻には、被害幅又は被害長さを有する竜巻の観測値を与える。そ  
の際には、被害幅又は被害長さが長いほうから優先的に用いることで、被  
害幅又は被害長さの平均値が大きくなるように評価を行う。

さらに、1961年以降の観測データのみを用いて、添3一チ第4表に示  
すとおり竜巻風速、被害幅及び被害長さについて相関係数を求める。

#### c. 竜巻影響エリアの設定

本施設においては、添3一チ第14図に示すとおり設計対象施設を包含  
する円を竜巻影響エリアとして設定する。

なお、竜巻影響エリアを円形とするため、竜巻の移動方向には依存性  
は生じない。

#### d. ハザード曲線の算定

T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ、竜巻風速が $V_0$ 以上とな  
る確率を求め、ハザード曲線を求める。

前述のとおり、竜巻の年発生数の確率分布としてポリヤ分布の適合性  
が高い。ポリヤ分布は式 (a) で示される (Wen and Chu)。

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

ここで、Nは竜巻の年発生数、 $v$ は竜巻の年平均発生数、Tは年数で  
ある。 $\beta$ は分布パラメータであり、式 (b) で示される。

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

ここで、 $\sigma$ は竜巻の年発生数の標準偏差である。

Dを竜巻影響評価の対象構造物が風速 $V_0$ 以上の竜巻に遭遇する事象

と定義し、対象構造物が1つの竜巻に遭遇し、その竜巻の風速が $V_0$ 以上となる確率を $R(V_0)$ としたとき、 $T$ 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ、竜巻風速が $V_0$ 以上となる確率は式(c)で示される。

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

この $R(V_0)$ は、竜巻影響評価の対象地域の面積を $A_0$ （すなわち、竜巻検討地域の面積約 $1.8 \times 10^4 \text{km}^2$ ）、1つの竜巻の風速が $V_0$ 以上となる面積を $DA(V_0)$ とすると式(d)で示される。

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

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

本評価では、以下のようにして $DA(V_0)$ の期待値を算出し、式(d)により $R(V_0)$ を推定して、式(c)により $P_{V_0,T}(D)$ を求める。風速を $V$ 、被害幅を $w$ 、被害長さを $l$ 、移動方向を $\alpha$ とし、同時確率密度関数を用いると、 $DA(V_0)$ の期待値は式(e)で示される(Garson et al.)。

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

ここで、 $H(\alpha)$ 及び $G(\alpha)$ はそれぞれ、竜巻の被害長さ及び被害幅方向に沿った面に対象構造物を投影したときの長さである。竜巻影響エリアを円形で設定しているため、 $H(\alpha)$ 、 $G(\alpha)$ ともに竜巻影響エリアの直径130mで一定となる(竜巻の移動方向に依存しない)。S

は竜巻影響エリアの面積（直径130mの円の面積：約 $1.3 \times 10^4 \text{m}^2$ ）を表す。竜巻影響エリアの直径を $D_0$ とした場合の計算式は式（f）で示される。

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

風速の積分範囲の上限値は、ハザード曲線の形状が不自然にならない程度に大きな値として120m/sに設定する。

また、 $W(V_0)$ は、竜巻の被害幅のうち風速が $V_0$ を超える部分の幅であり、式（g）で示される。この式により、被害幅内の風速分布に応じて被害様相に分布がある（被害幅の端ほど風速が小さくなる）ことが考慮されている（Garson et al.）。

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

ここで、係数の1.6について、既往の研究では例えば0.5や1.0などの値も提案されている。竜巻ガイドが参考としている文献（Garson et al.）では、観測値が不十分であるため、より厳しい評価となるよう1.6を用いることが推奨されており、本検討でも1.6を用いる。また、本施設の竜巻影響評価では、ランキン渦モデルによる竜巻風速分布に基づいて設計竜巻の特性値を設定する。ランキン渦モデルは高さ方向によって風速及び気圧が変化しないため、地表から上空まで式（g）を適用できる。なお、式（g）において係数を1.0とした場合がランキン

ン渦モデルに該当する。

また、 $V_{min}$ は、`gale intensity velocity`と呼ばれ、被害が発生し始める風速に位置づけられる。米国気象局NWS (`National Weather Service`) では、`gale intensity velocity`は34から47ノット(17.5から24.2m/s)とされている。また、気象庁が使用している風力階級では、風力8は疾強風(`gale`:17.2から20.7m/s)、風力9は大強風(`strong gale`:20.8から24.4m/s)と分類されており、風力9では「屋根瓦が飛ぶ。人家に被害が出始める。」とされている。以上を参考に、本評価においては、 $V_{min}=25\text{m/s}$ とする。なお、この値は藤田スケール0(17から32m/s)のほぼ中央値に相当する。

以上より、竜巻検討地域を対象に算定したハザード曲線を添3-チ第15図に示す。

e. 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 ( $V_{B2}$ )

竜巻最大風速のハザード曲線により設定する最大風速 $V_{B2}$ は、竜巻ガイドを参考に年超過確率 $10^{-5}$ に相当する風速とし、37m/sとする。

f. 1km範囲ごとの評価 (参考評価)

竜巻検討地域を海岸線に沿って1km範囲ごとに細分化した短冊状の範囲を対象にハザード曲線を求める。評価の条件として、発生数は、短冊状の範囲を通過した竜巻もカウントしている。被害幅及び被害長さは、それぞれ1km範囲内の被害幅及び被害長さを用いる。以上に基づいて、竜巻検討地域の評価と同様の方法で算定したハザード曲線を添3-第16図に示す。これより、年超過確率 $10^{-5}$ に相当する風速を求めると、海岸線から陸側1kmを対象とした場合の54m/sが最大となる。ただし、本施設は海岸線から陸側1kmの範囲にないため、本評価は参考とする。

(3) 基準竜巻の最大風速

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 $V_{B2}=37\text{m/s}$  より、本施設における基準竜巻の最大風速 $V_B$ は $92\text{m/s}$  とする。風速 $92\text{m/s}$  に相当する年超過確率は、ハザード曲線より $1.5\times 10^{-8}$ である。

#### 4. 3 設計竜巻の最大風速の設定

本施設が立地する地域の特性を考慮して、基準竜巻の最大風速の割り増しを検討し、設計竜巻の最大風速を設定する。

本施設では、敷地周辺が平坦であり、地形効果による竜巻の増幅を考慮する必要はないと考えられるため、基準竜巻の最大風速に対する割り増しは行わず、設計竜巻の最大風速は92m/sとなるが、竜巻に対する設計に当たっては、蓄積されている知見の少なさといった不確定要素を考慮し、設計及び運用に安全余裕を持たせるために、設計竜巻の最大風速を100m/sとする。風速100 m/sに相当する年超過確率は、ハザード曲線より $5.23 \times 10^{-9}$ である。

【補足説明資料4-1～4-6】

添3-1第1表 竜巻の発生要因別の地域分布の特徴

総観場 <sup>注)</sup>	気象庁竜巻データベースの分類	発生分布の特徴
台風	台風	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、藤田スケール2、藤田スケール3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	全国的に発生頻度が高く、藤田スケール2、藤田スケール3の竜巻も見られる。特に、南～西方向に開けた地域はより頻度が高い。
季節風(夏)	暖気の移流, 熱帯低気圧, 湿舌, 太平洋高気圧	太平洋側や内陸を中心に、全国的に多くみられる。
季節風(冬)	寒気の移流, 気圧の谷, 大陸高気圧, 季節風	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)	関東以西でみられる。
局地性	局地性擾乱, 雷雨(熱雷), 雷雨(熱雷を除く), 地形効果, 局地性降水	地形的な影響によるものであり、全国で発生している。
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	全国的に発生数が少なく、地域差はみられない。

注) 東京工芸大学委託成果を参考に、気象庁「竜巻等の突風データベース」の総観場を、竜巻を発生させる親雲の発生要因を考慮して、7種に再編した。

第4-1表 日本で過去に発生したF3竜巻  
(気象庁「竜巻等の突風データベース」より作成)

発生日時	発生場所			
	緯度	経度	都道府県	市町村
1971年07月07日07時50分	35度54分20秒	139度40分45秒	埼玉県	大宮市
1990年12月11日19時13分	35度28分39秒	140度18分57秒	千葉県	茂原市
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
2006年11月07日13時23分	43度59分20秒	143度42分25秒	北海道 網走支庁	佐呂間町
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	つくば市

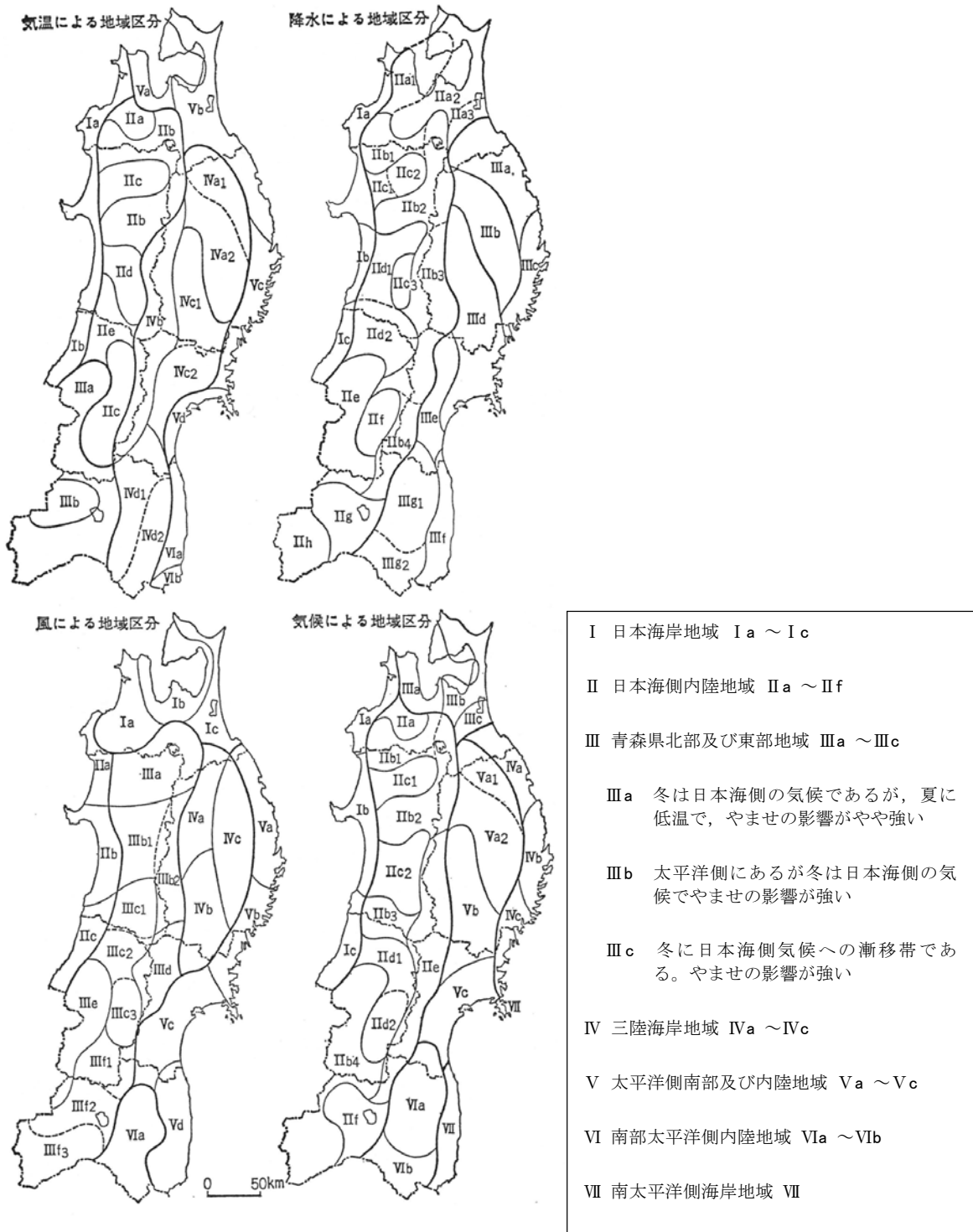


添 3 - 千 第 3 表 竜巻発生数の分析結果

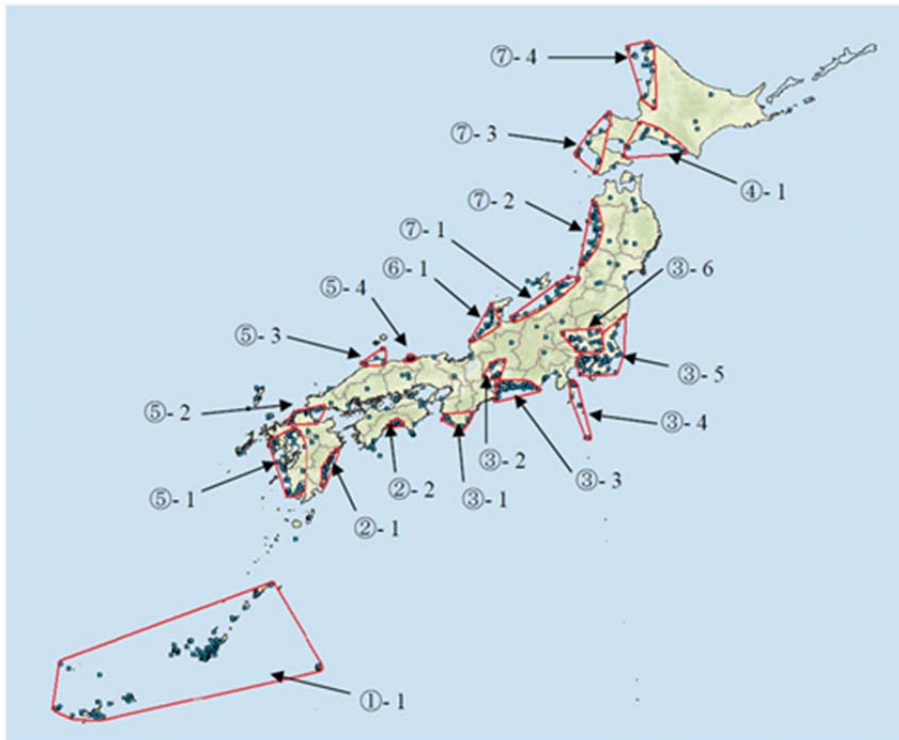
発生数の統計		(陸上+上陸) 竜巻							海上竜巻	総数
		F0	F1	F2	F3	F4	不明	小計	不明	
1961/1~2013/12 (53年間)	期間内総数 (個)	6	9	4	0	0	1	20	5	25
	年平均 (個)	0.11	0.17	0.08	0.00	0.00	0.02	0.38	0.09	0.47
	標準偏差 (個)	0.58	0.51	0.27	0.00	0.00	0.14	0.97	0.41	1.08
1991/1~2013/12 (23年間)	期間内総数 (個)	6	9	2	0	0	1	18	5	23
	年平均 (個)	0.26	0.39	0.09	0.00	0.00	0.04	0.78	0.22	1.00
	標準偏差 (個)	0.86	0.72	0.29	0.00	0.00	0.21	1.35	0.60	1.48
2007/1~2013/12 (7年間)	期間内総数 (個)	5	3	0	0	0	0	8	4	12
	年平均 (個)	0.71	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	1.14	0.57	1.71
	標準偏差 (個)	1.50	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	1.86	0.98	2.06
推定データ (53年間) (按分後)	期間内総数 (個)	57	32	6	0	0	0			95
	年平均 (個)	1.07	0.58	0.11	0.00	0.00	0.00			1.76
	標準偏差 (個)	1.83	0.88	0.33	0.00	0.00	0.00			2.06
推定データ (53年間) (全竜巻)	期間内総数 (個)	57	32	6	0	0	0			95
	年平均 (個)	1.08	0.60	0.11	0.00	0.00	0.00			1.79
	標準偏差 (個)	1.83	0.88	0.33	0.00	0.00	0.00			2.06

添 3 - 千 第 4 表 竜巻風速, 被害幅及び被害長さの相関係数

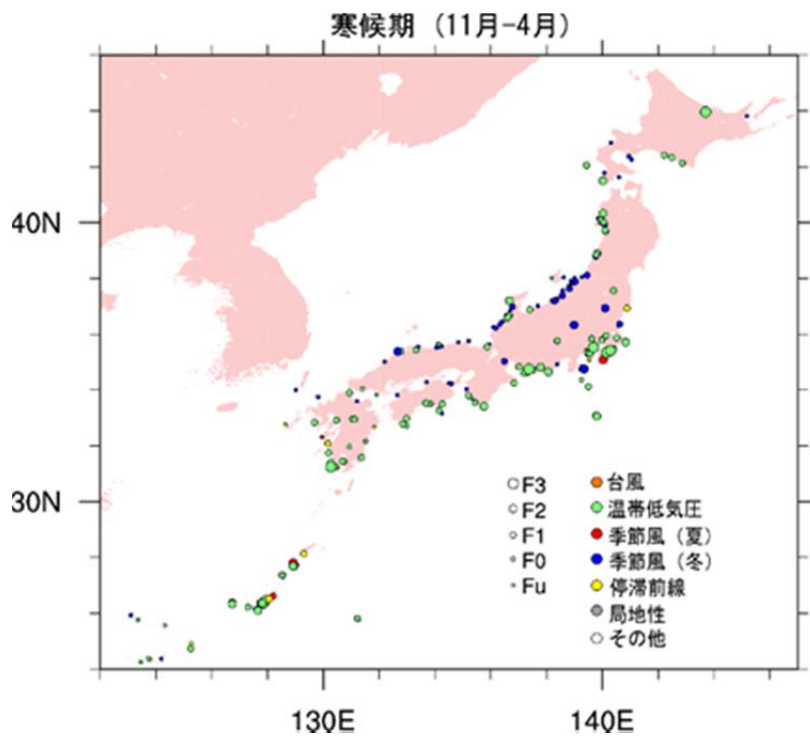
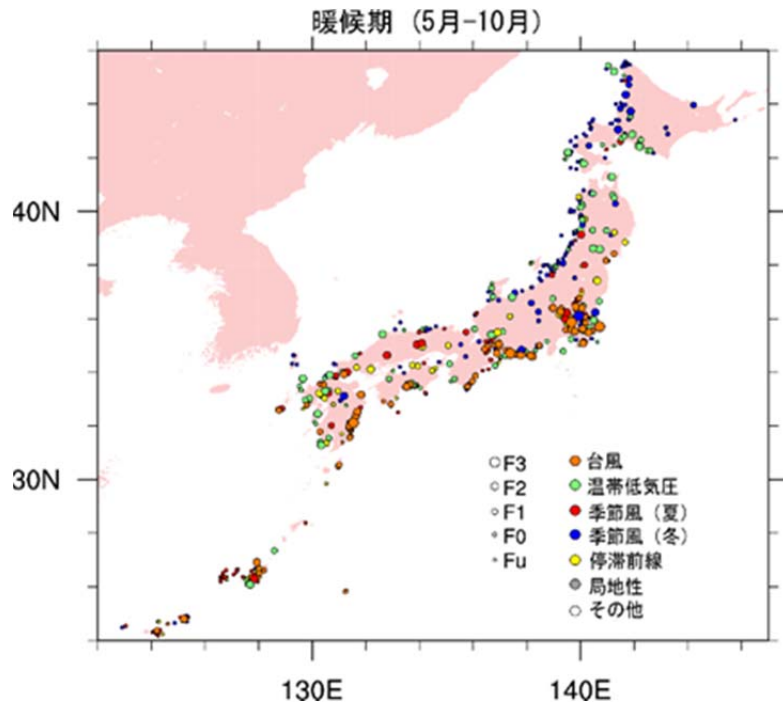
相関係数 (対数)	風速 (m/s)	被害幅 (m)	被害長さ (m)
風速 (m/s)	1.0000	0.0800	0.4646
被害幅 (m)	0.0800	1.0000	0.2418
被害長さ (m)	0.4646	0.2418	1.0000



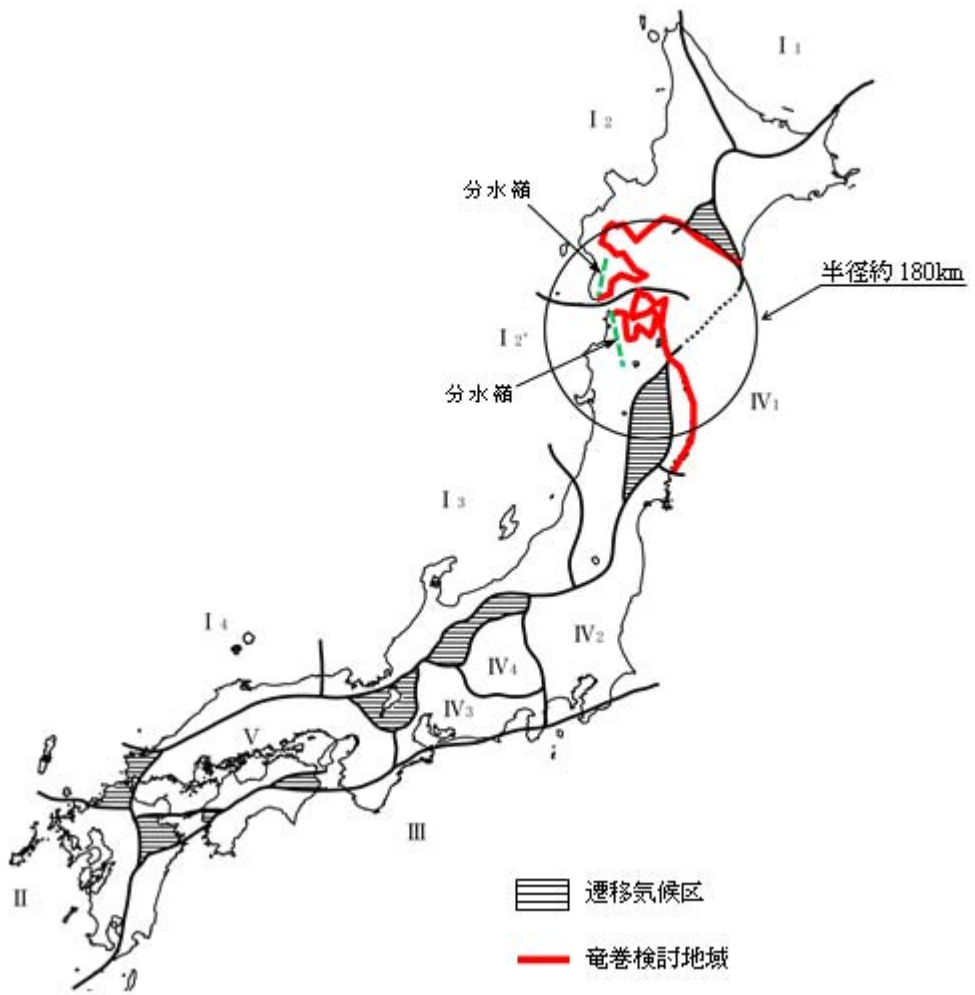
添3-1第1図 吉野正敏（1967年）による東北地方の気候区分



添3-チ第2図 竜巻の発生地点と竜巻が集中する19個の地域

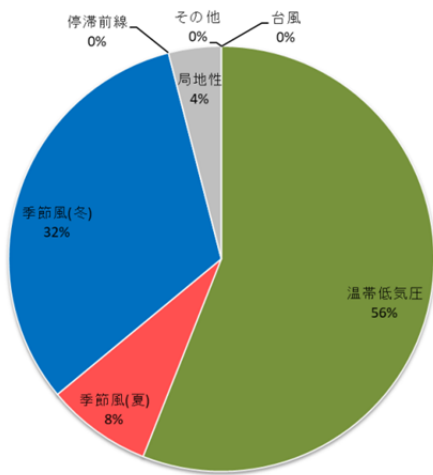


添3-千第3図 竜巻の発生要因別地域分布



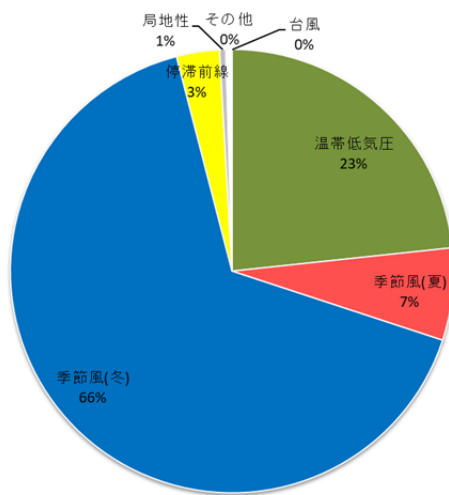
添3-千第4図 竜巻検討地域

関口武 (1959) : 日本の気候区分を基に作成



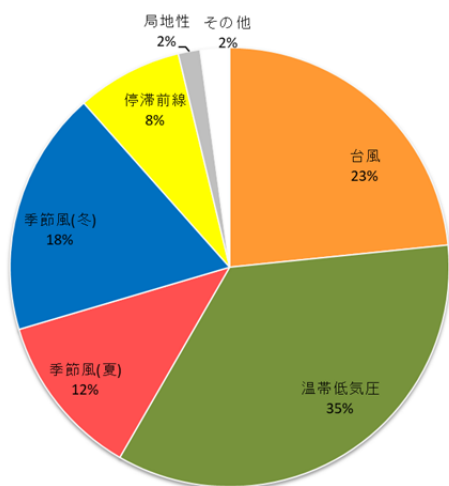
◆ 竜巻検討地域

- ・ 「温帯低気圧」を起源とする竜巻が多い。
- ・ 太平洋側で多くみられる「台風」を起源とする竜巻は確認されていない。



◆ 北海道～山口県の日本海側 (223 事例)

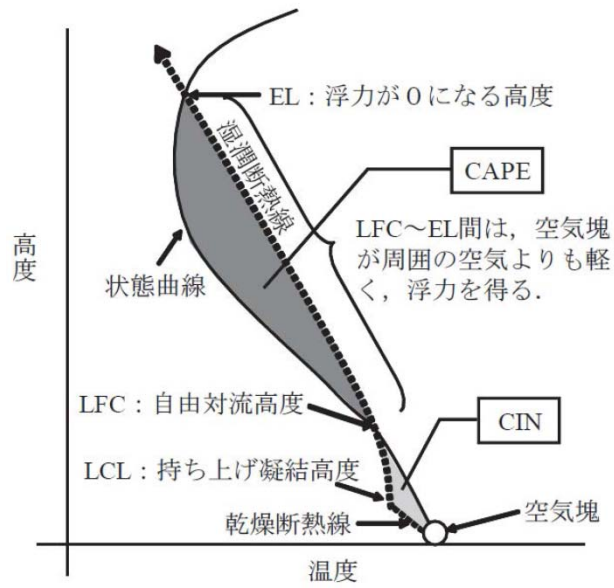
- ・ 「季節風(冬)」を起源とする竜巻が多い。
- ・ 「台風」を起源とする竜巻は確認されていない。



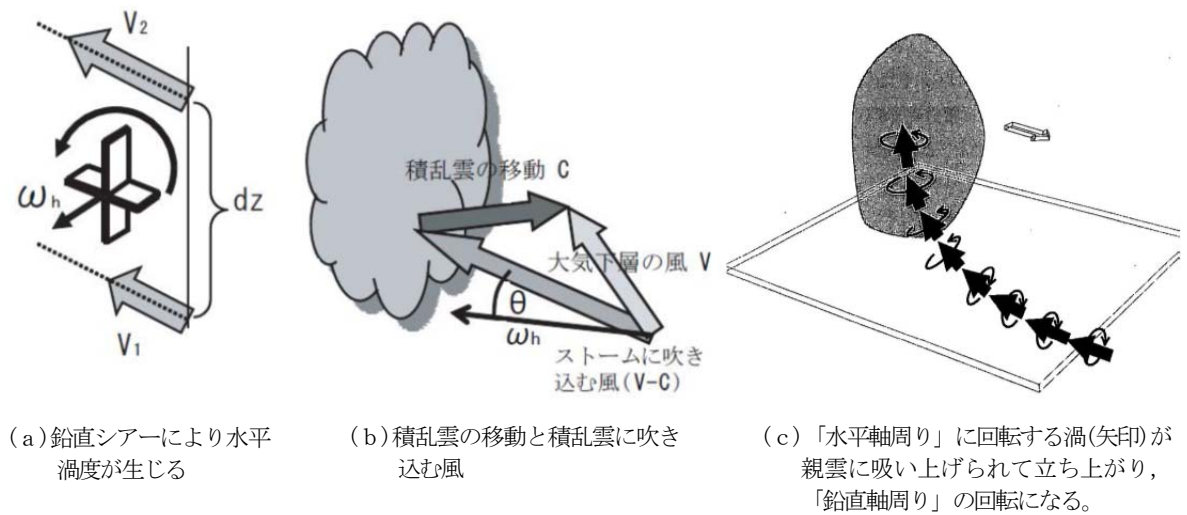
◆ 茨城県以西の太平洋側 (372 事例)

- ・ 竜巻検討地域と比較して、「台風」、「季節風(夏)」、「停滞前線」を起源とする竜巻が多い。
- ・ 太平洋側から暖かく湿った気流が、竜巻の親雲の発達を促すと考えられる。

添 3 - 千第 5 図 竜巻検討地域等における竜巻の発生要因の出現比率

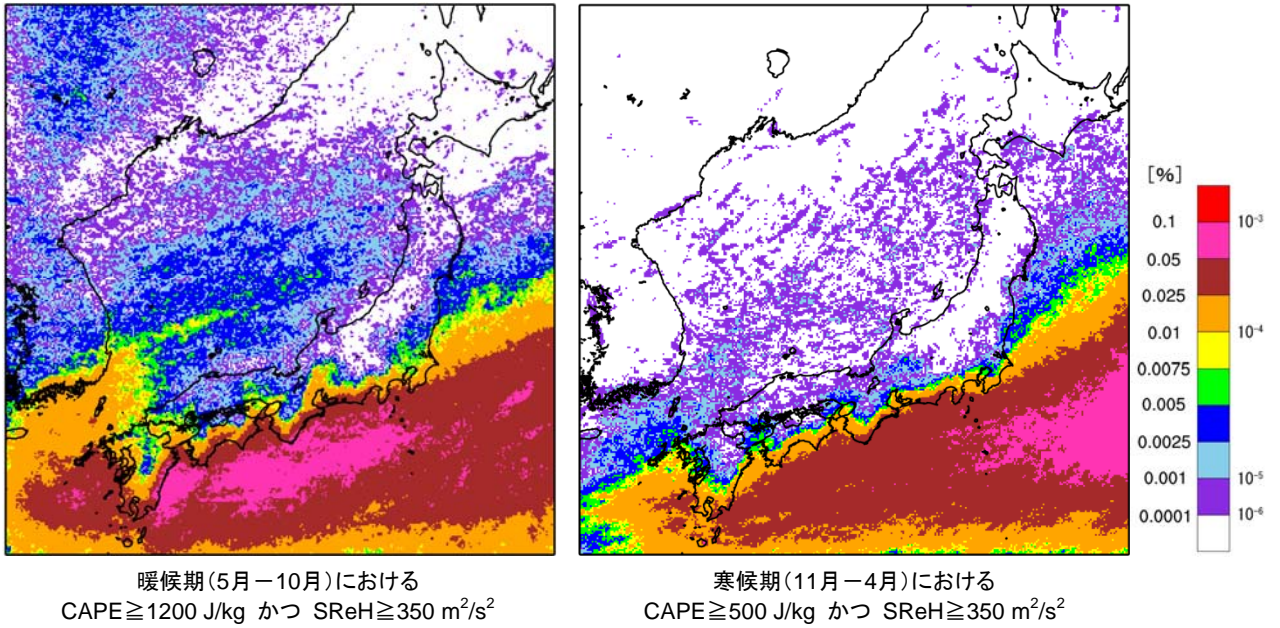


添3-千第6図 CAPEの概念

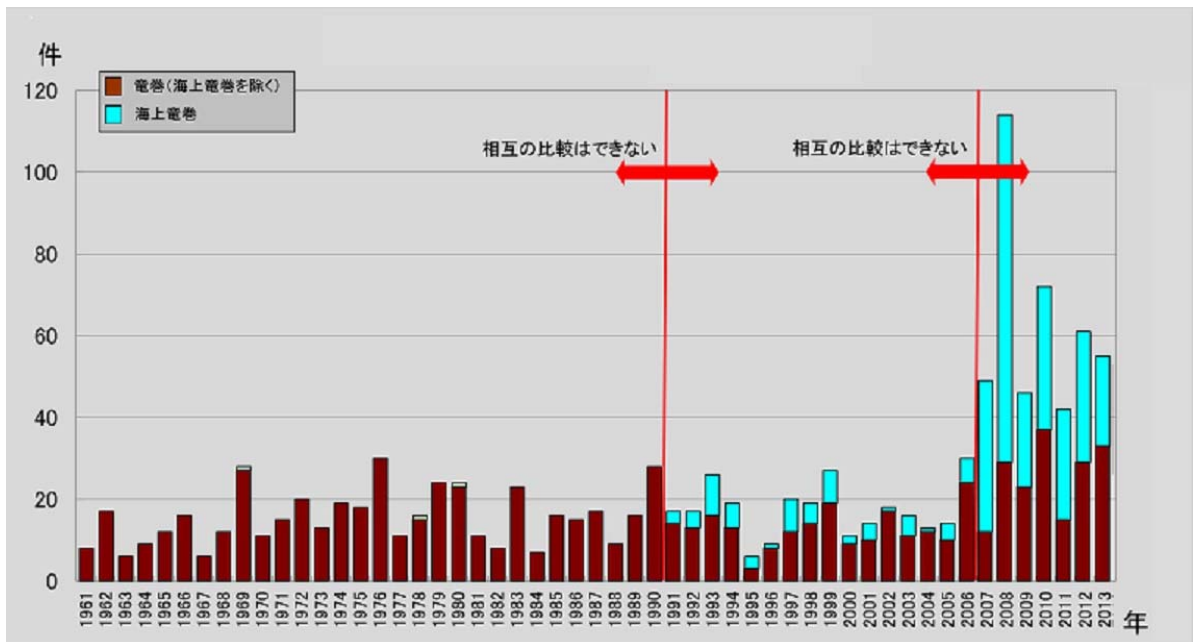


添3-千第7図 SREHの概念



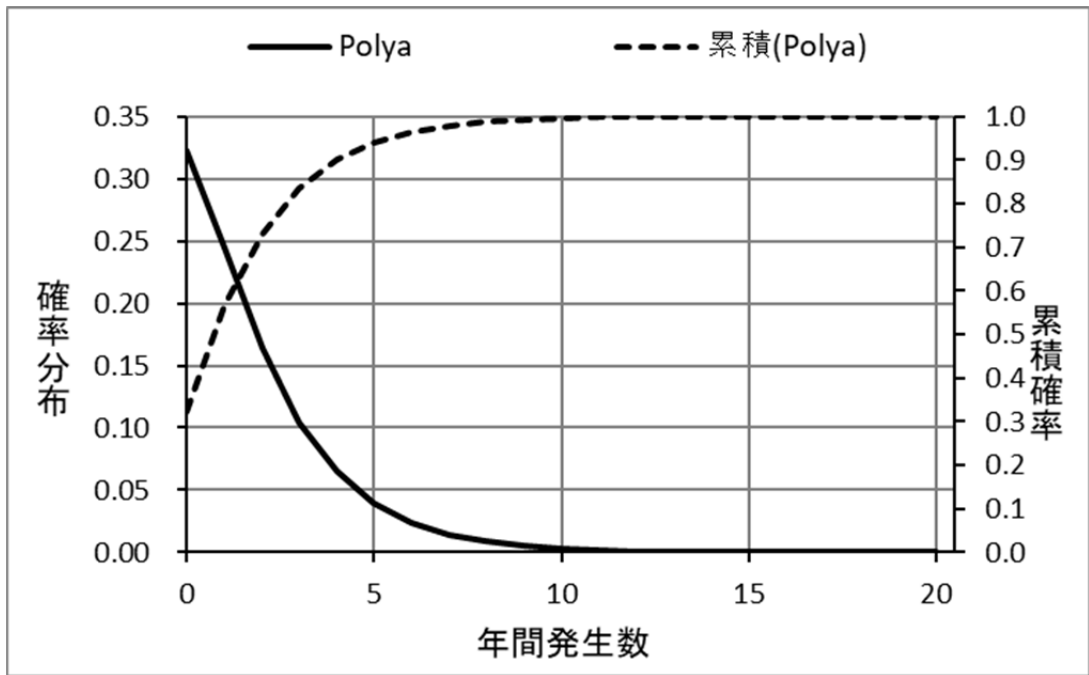


添3-チ第8図 同時超過頻度分布の算出結果

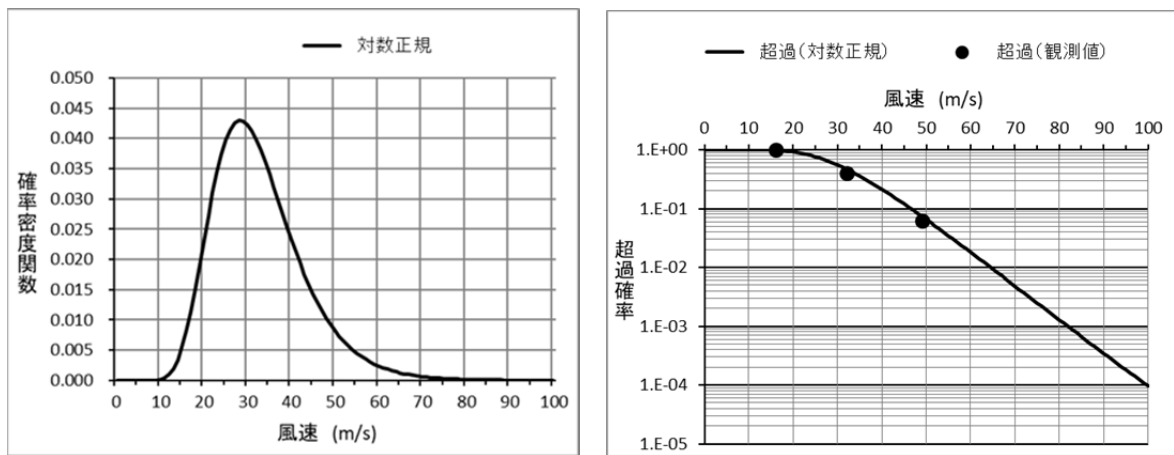


(出典：気象庁「竜巻等の突風データベース」)

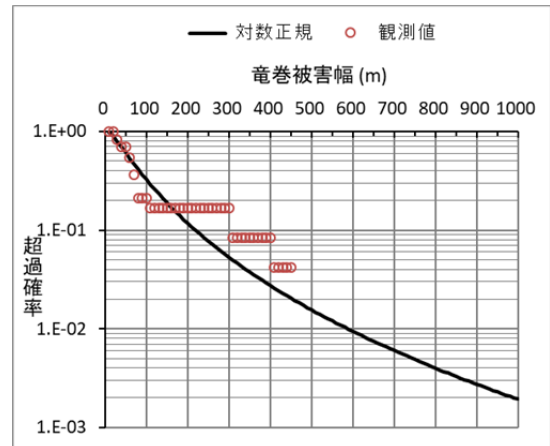
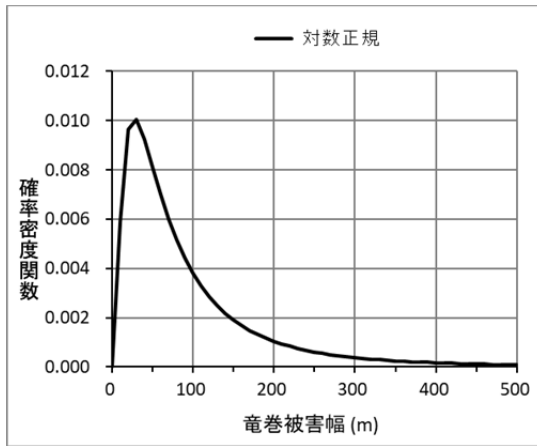
添3-チ第9図 竜巻年別発生確認数



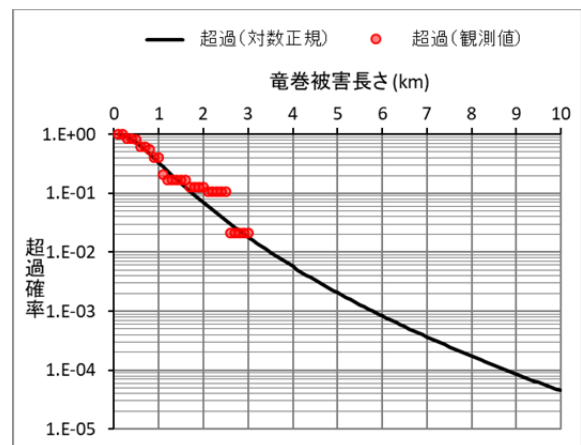
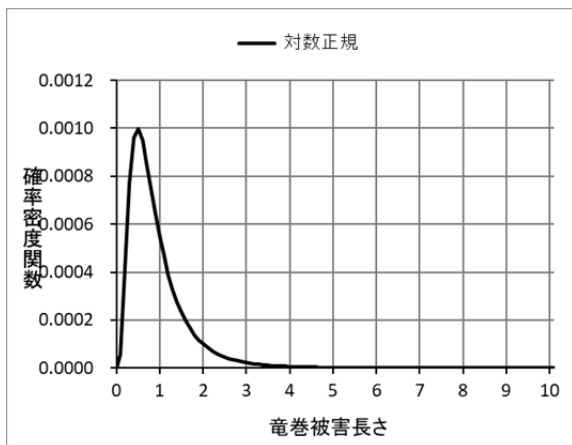
添3-千第10図 竜巻検討地域における竜巻発生数の確率分布と累積確率



添3-千第11図 風速の確率密度分布(左)と超過確率(右)



添3-チ第12図 被害幅の確率密度分布（左）と超過確率（右）



添3-チ第13図 被害長さの確率密度分布（左）と超過確率（右）



**竜巻影響エリアの設定**

- ・本施設においては設計対象施設を包含する円を竜巻影響エリアとして設定する。
- ・なお、竜巻影響エリアを円形とするため、竜巻の移動方向には依存性は生じない。

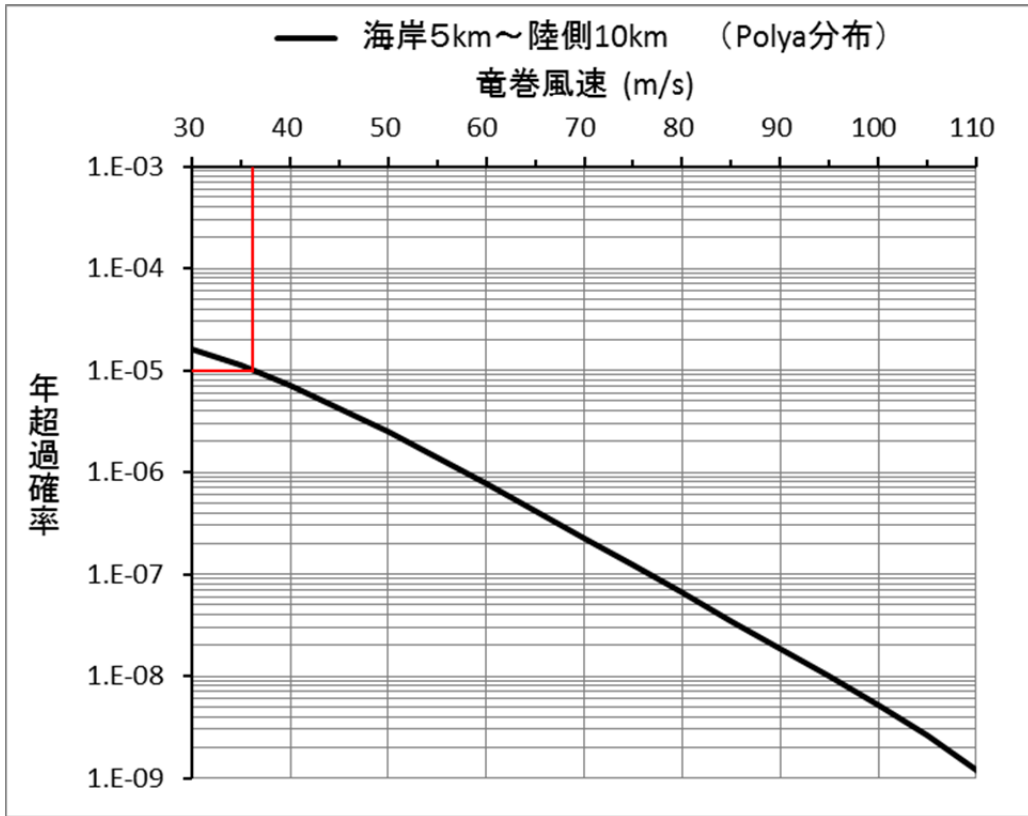
本施設を収容する建物及び構築物は、標高約55mに設置。

エリア番号	エリア直径 (m)	エリア面積 (m <sup>2</sup> )
①	125	12300
評価に用いる値	130	13300

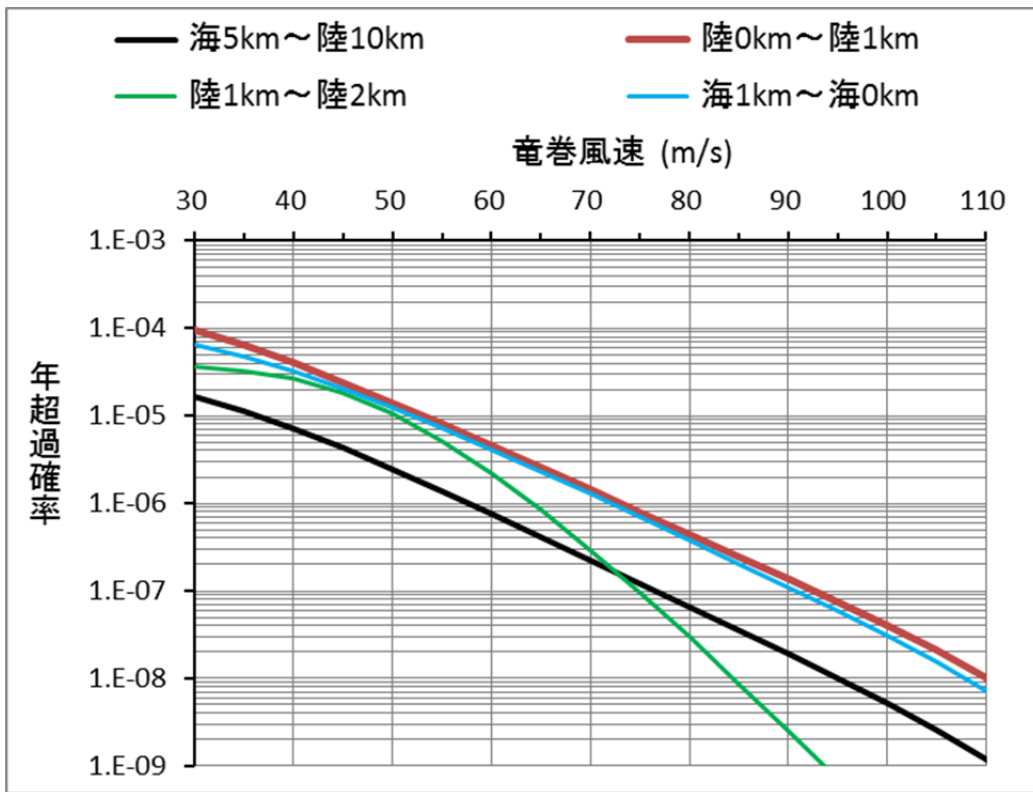
→竜巻影響エリア

直径：130m 面積：13300m<sup>2</sup>

添3-チ第14図 竜巻影響エリア  
4-26



添3-チ第15図 竜巻最大風速のハザード曲線（竜巻地域検討）



添3-チ第16図 竜巻最大風速のハザード曲線（1 km 範囲）（参考）

## 5. 設計荷重（竜巻）の設定

設計竜巻の特性値については、現状、設定に足る十分な信頼性を有した観測記録等が無い場合、竜巻ガイドを参考に設定する。設計竜巻の特性値を添5第25表に示す。また、設計竜巻については、今後も継続的に観測データ及び増幅に関する新たな知見の収集に取り組み、必要な事項については適切に反映を行う。

### (1) 設計竜巻の移動速度（ $V_T$ ）

設計竜巻の移動速度（ $V_T$ ）は、東京工芸大学委託成果を参考に、日本の竜巻における移動速度と最大竜巻風速の関係に基づく以下の式を用いて算定する。

$$V_T = 0.15 \times V_D$$

$V_D$  (m/s) : 設計竜巻の最大風速

### (2) 設計竜巻の最大接線風速（ $V_{Rm}$ ）

設計竜巻の最大接線風速（ $V_{Rm}$ ）は、米国原子力規制委員会の基準類を参考に、以下の式を用いて算定する。

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

### (3) 設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径（ $R_m$ ）

設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径（ $R_m$ ）は、東京工芸大学委託成果による日本の竜巻の観測記録を基に提案されたモデルを参考として、以下の値を用いる。

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

### (4) 設計竜巻の最大気圧低下量（ $\Delta P_{max}$ ）

設計竜巻の最大気圧低下量（ $\Delta P_{max}$ ）は、米国原子力規制委員会の基準類のランキン渦モデルによる風速分布を参考に、以下の式を用いて算定する。

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

$\rho$  : 空気密度 (1.22 (kg/m<sup>3</sup>))

(5) 設計竜巻の最大気圧低下率 ( $(dp/dt)_{\text{max}}$ )

設計竜巻の最大気圧低下率 ( $(dp/dt)_{\text{max}}$ ) は、米国原子力規制委員会の基準類のランキン渦モデルによる風速分布を参考に、以下の式を用いて算定する。

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

## 5. 1 設計飛来物の設定

竜巻ガイドを参考に現地調査により敷地内をふかんした調査及び検討を行い、敷地内の資機材の設置状況を踏まえ、設計対象施設に衝突する可能性のある飛来物を抽出する。抽出した飛来物に竜巻ガイドに例示される飛来物を加え、それぞれの寸法、質量及び形状から飛来の有無を判断し、運動エネルギー及び貫通力を考慮して、竜巻防護対策によって防護が出来ない可能性があるものは、浮き上がり又は横滑りの有無を考慮した上で、固縛、建屋収納又は敷地からの撤去により飛来物とならないようにする。

車両については、周辺防護区域への入構を管理するとともに、竜巻の襲来が予想される場合には、停車又は走行している場所に応じて固縛するか避難場所へ退避することにより、飛来物とならないよう管理を行うことから、設計飛来物として考慮しない。

また、敷地外から飛来するおそれがあり、かつ敷地内からの飛来物による衝撃荷重を上回ると想定されるものとしてむつ小川原ウィンドファームの風力発電施設のブレードがある。むつ小川原ウィンドファームの風力発電施設から設計対象施設までの距離及び設計竜巻によるブレードの飛来距離を考慮すると、ブレードが設計対象施設まで到達するおそれはないことから、ブレードは設計飛来物として考慮しない。

以上のことから、設計対象施設に衝突する可能性がある飛来物として、竜巻ガイドに例示される鋼製材及び鋼製パイプを設計飛来物として設定する。

なお、降下火砕物の粒子による影響については、設計飛来物の影響に包含される。



添5 第26表に加工施設における設計飛来物を示す。

## 5. 2 荷重の組合せと許容限界

### (1) 竜巻防護施設等に作用する設計竜巻荷重

設計竜巻により設計対象施設に作用する設計竜巻荷重を以下に示す。

#### a. 風圧力による荷重

竜巻の最大風速による荷重であり、竜巻ガイドを参考に次式のとおり算出する。

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

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

$A$  : 施設の受圧面積

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

である。ここで、

$\rho$  : 空気密度

$V_D$  : 設計竜巻の最大風速

である。

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設計対象施設が存在する場合には、鉛直方向の最大風速に基づいて算出した鉛直方向の風圧力による荷重についても考慮した設計とする。

#### b. 気圧差による荷重

外気と隔離されている区画の境界部が気圧差による圧力影響を受ける設備並びに竜巻防護施設を設置する施設の建屋壁及び屋根においては、設計竜巻による気圧低下によって生じる設計対象施設の内外の気圧差による圧力荷重を考慮し、より厳しい結果を与える「閉じた施設」を想定して次式のとおり算出する。「閉じた施設」とは通気がない施設であり、施設内部の圧力が竜巻の通過以前と以後で等しいとみなせる。一方、施設の外側の圧力は竜巻の通過中に変化し、施設内外に圧力を生じさせる。

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

ここで、

$W_p$  : 気圧差による荷重

$\Delta P_{max}$  : 最大気圧低下量

$A$  : 施設の受圧面積

である。

#### c. 飛来物の衝撃荷重

竜巻ガイドを参考に、衝突時の荷重が大きくなる向きで設計飛来物が設計対象施設に衝突した場合の衝撃荷重を算出する。

また、貫通評価においても、設計飛来物の貫通力が大きくなる向きで衝突することを考慮して評価を行う。

#### (2) 設計竜巻荷重の組合せ

設計対象施設の設計に用いる設計竜巻荷重は、竜巻ガイドを参考に風圧力による荷重 ( $W_w$ )、気圧差による荷重 ( $W_p$ ) 及び設計飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ ) を組み合わせた複合荷重とし、複合荷重  $W_{T1}$  及び  $W_{T2}$  は米国原子力規制委員会の基準類を参考として、以下のとおり設定する。

$$W_{T1} = W_P$$

$$W_{T2} = W_W + (1/2) \cdot W_P + W_M$$

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

### (3) 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定

設計竜巻荷重と組み合わせる荷重は、以下のとおりとする。

#### a. 竜巻防護施設等に常時作用する荷重及び運転時荷重

設計対象施設に常時作用する荷重及び運転時荷重としては、死荷重（固定荷重）及び活荷重（積載荷重，機器・配管からの荷重等）を適切に組み合わせる。

#### b. 竜巻以外の自然現象による荷重

竜巻は積乱雲や積雲に伴って発生する現象であり，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，降雹及び降水である。これらの自然現象により発生する荷重の組合せの考慮は，以下のとおりとする。

なお，風（台風）に対しては，「その他外部衝撃」にて考慮することとしている建築基準法に基づく風荷重が設計竜巻を大きく下回ることから，設計竜巻荷重に包含される。

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

#### (a) 落 雷

竜巻及び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，荷重は発生しない。

#### (b) 積 雪

本施設の立地地域は，冬季においては積雪があるため，冬

季における竜巻の発生を想定し、建築基準法に基づいて積雪の荷重を適切に考慮する。

(c) 降 雹

降雹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程度の大型の降雹を仮定した場合でも、その質量は約0.5kgである。竜巻及び降雹が同時に発生する場合においても、直径10cm程度の降雹の終端速度は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て十分小さく、降雹の衝突による荷重は設計竜巻荷重に包含される。

(d) 降 水

竜巻及び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、設計竜巻荷重に包含される。

c. 設計基準事故時荷重

設計対象施設に作用させる設計荷重には、設計基準事故時に生ずる応力の組合せを適切に考慮する設計とする。

設計基準事故は、設備・機器における内部事象を起因とするものであり、外部からの荷重である竜巻との因果関係はない。また、竜巻に対して竜巻防護施設の安全機能を損なわない設計とすることから、竜巻の影響及び時間的变化による設計基準事故への進展も考えられない。したがって、設計竜巻と設計基準事故は独立事象となる。独立事象である設計竜巻と設計基準事故が同時に発生する頻度は十分小さいと考えられる。以上のことから、設計竜巻荷重と設計基準事故時荷重の組合せは考慮しない。

仮に、設計基準事故発生時に、風速が小さく発生頻度の高い竜

巻が襲来したとしても、設計基準事故時に期待する影響緩和機能は、竜巻による影響を受けない設計とすることから、設計基準事故発生時の竜巻の襲来を考慮する必要はない。

#### (4) 許容限界

建屋・構築物の設計において、設計飛来物の衝突による貫通及び裏面剥離発生の有無の評価については、貫通及び裏面剥離が発生する限界厚さ及び部材の最小厚さを比較することにより行う。さらに、設計荷重（竜巻）により発生する変形又は応力が安全上適切と認められる規格及び規準による許容応力度等の許容限界に対して安全余裕を有する設計とする。

設備の設計においては、設計飛来物の衝突による貫通の有無の評価について、貫通が発生する限界厚さ及び部材の最小厚さを比較することにより行う。さらに、設計荷重（竜巻）により発生する応力が安全上適切と認められる規格及び規準による許容応力の許容限界に対して安全余裕を有する設計とする。

【補足説明資料 5-1～5-6】

添5第25表 設計竜巻の特性値

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

添5第26表 加工施設における設計飛来物

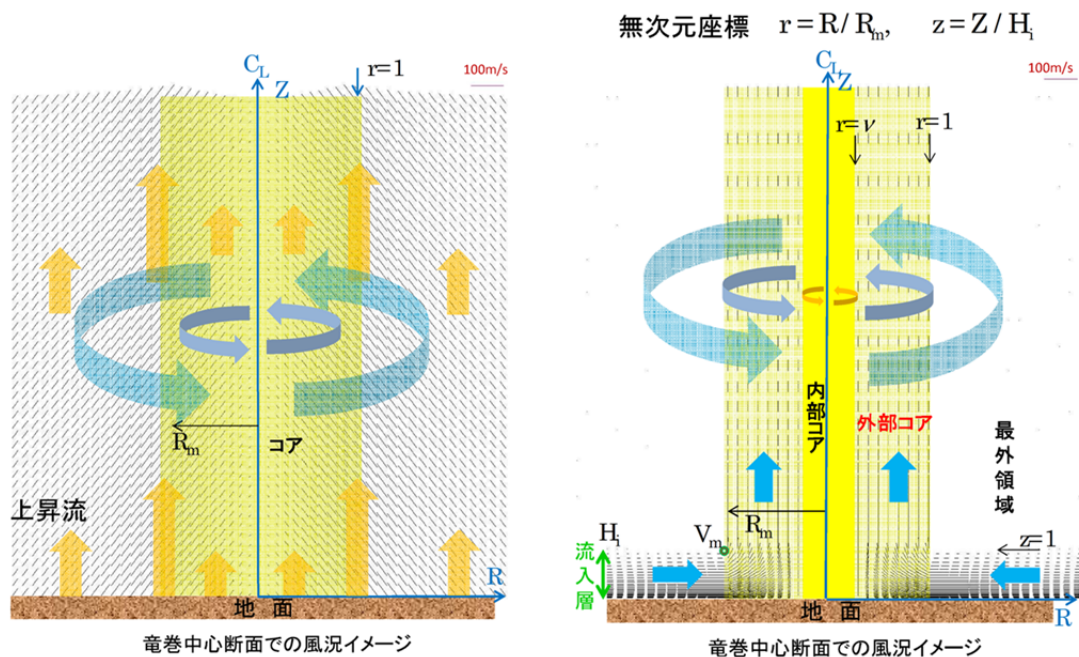
飛来物の種類	鋼製パイプ	鋼製材
寸法 (m)	長さ×直径 2.0×0.05	長さ×幅×奥行き 4.2×0.3 ×0.2
質量 (kg)	8.4	135
最大水平速度 (m/s)	49	51
最大鉛直速度 (m/s)	33	34

6. 評価に使用する風速場モデルについて

ランキン渦モデルはNRCガイドで採用されており，利用実績が高く，非常に簡単な式で風速場を記述することができる。しかし，風速場が高さに依存しないため，地表面付近では非現実的な風速場となることがデメリットとしてあげられる。

フジタモデルはランキン渦モデルと比較して，解析プログラムが複雑であるが，観測に基づき考案され，実際に近い竜巻風速場をモデル化している。第6-1図に風速場モデルを示す。

本施設の竜巻影響評価では，基本的にランキン渦モデルを採用するが，車両の固縛又は退避の運用において考慮する離隔距離の設定においては，車両が全て地表面にあることから，地表面の風速場をよく再現しているフジタモデルを採用する。



第6-1図 風速場モデル

(ランキン渦モデル (左) , フジタモデル (右) )

【補足説明資料6-1】



## 7. 竜巻防護設計

竜巻に対する防護設計においては、竜巻ガイドを参考に、基準竜巻、設計竜巻及び設計荷重を適切に設定し、竜巻防護施設を設置する区画の構造健全性を確保するため、建物の外壁及び屋根により建物全体を保護し、以下の事項に対して安全機能を損なわない設計とする。

- (1) 飛来物の衝突による建屋・構築物の貫通，裏面剥離及び設備・機器の損傷
- (2) 設計竜巻荷重及びその他の荷重（常時作用する荷重，運転時荷重，竜巻以外の自然現象による荷重及び設計基準事故時荷重）を適切に組み合わせた設計荷重（竜巻）
- (3) 竜巻による気圧の低下

竜巻防護施設，竜巻防護施設を設置する施設及び竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設の設計竜巻からの防護設計方針を以下に示す。

7. 1 竜巻防護施設のうち建屋に設置される竜巻防護施設（外気と繋がっている竜巻防護施設を除く。）

竜巻防護施設のうち建屋に設置され防護される竜巻防護施設（外気と繋がっている竜巻防護施設を除く。）は、建屋による防護により、設計荷重（竜巻）による影響に対して安全機能を損なわない設計とする。具体的には以下のとおりである。

建屋内に設置される竜巻防護施設（外気と繋がっている竜巻防護施設を除く。）は、燃料加工建屋に設置され、設計荷重（竜巻）並びに設計飛来物の衝突による貫通及び裏面剥離を防止することによって安全機能を損なわない設計とする。

ただし、建屋による防護が期待できない場合には7. 2のとおりとする。

## 7. 2 竜巻防護施設のうち建屋に設置されるが防護が期待できない竜巻防護施設

竜巻防護施設のうち建屋に設置されるが防護が期待できない竜巻防護施設には、非常用所内電源設備の非常用発電機が該当する。設計荷重（竜巻）による影響に対して非常用所内電源設備の非常用発電機の安全機能を損なわない設計とするため、非常用所内電源設備の非常用発電機の給気口及び排気口に対しては、設計飛来物の侵入による損傷を考慮して、給気系及び排気系を建物・構築物により防護する。また、燃料加工建屋の外壁開口部のうち、設計飛来物の侵入により安全機能に影響を与え得る開口部については、建物・構築物で設計飛来物の侵入を防止する設計とする。具体的には、設計飛来物の侵入を防止するため、非常用所内電源設備の非常用発電機の給気系については建物により設計飛来物の侵入を防止し、排気系は煙道の一部を構成する構築物により設計飛来物の侵入を防止する。

### 7. 3 竜巻防護施設のうち建屋内の施設で外気と繋がっている竜巻防護施設

建屋に設置され防護される竜巻防護施設のうち，外気と繋がっている竜巻防護施設は，気圧差荷重に対して健全性を維持できる強度を有する設計とする。

#### 7. 4 竜巻防護施設を設置する施設

竜巻防護施設を設置する施設は、設計荷重（竜巻）に対して構造健全性を維持する設計とし、施設内の竜巻防護施設の安全機能を損なわない設計とする。また、設計飛来物の衝突に対しては、貫通及び裏面剥離が防止できる設計とする。

## 7. 5 竜巻随件事象に対する設計

竜巻ガイドを参考に、竜巻随件事象として以下の事象を想定し、これらの事象が発生した場合においても、竜巻防護施設が安全機能を損なわない設計とする。

### (1) 火 災

竜巻により敷地内にある危険物タンク（ボイラ用燃料受入れ・貯蔵所及びディーゼル発電機用燃料受入れ・貯蔵所）が損傷し、漏えい及び防油堤内での火災が発生したとしても、火災源と竜巻防護施設を設置する施設の位置関係を踏まえて熱影響を評価し、竜巻防護施設を設置する施設の許容温度を超えない設計とすることにより、竜巻防護施設の安全機能に影響を与えない設計とすることを「外部火災防護に関する設計」にて考慮する。

設計飛来物の侵入により竜巻防護施設へ波及的影響を及ぼし得る開口部については、建物・構築物により設計飛来物の侵入を防止する設計を行うことを考慮すると、設計飛来物が侵入することはないことから、設計竜巻により建屋内に火災が発生し、竜巻防護施設に影響を及ぼすことは考えられない。

### (2) 溢 水

竜巻により、屋外機器の破損による溢水を想定し、溢水源と竜巻防護施設の位置関係を踏まえた影響評価を行った上で、溢水が竜巻防護施設を設置する施設の開口部まで到達しない設計とする。

### (3) 外部電源喪失

竜巻と同時に発生する外部電源喪失に対しては、非常用所内電源設備を竜巻から防護し、その安全機能を維持することにより、竜巻防護施設の安全機能を確保する設計とする。

【補足説明資料 7 - 1】

## 8. 手順等

### 8. 1 飛来物発生防止対策

設計竜巻による飛来物の発生防止を図るため、以下の事項を考慮した手順を定める。

- (1) 設計対象施設以外の建屋、屋外施設及び資機材で飛来物となる可能性のあるものは、浮き上がり又は横滑りの有無を考慮した上で、飛来時の運動エネルギー及び貫通力が設計飛来物である鋼製材よりも大きなものについて、設置場所に応じて固縛、建屋収納又は敷地からの撤去を実施することを手順に定める。
- (2) 車両については、周辺防護区域内への入構を管理するとともに、車両から離隔距離を取るべき施設(以下、「離隔対象施設」という。)を選定し、竜巻の襲来が予想される場合に車両が飛来物とならないよう固縛又は離隔対象施設に対して車両の最大飛来距離を算出した結果に安全余裕を考慮した距離より遠方に退避を実施することを手順に定める。
- (3) 竜巻防護施設を設置する施設のうち、車両が竜巻により飛来し、衝突した時の貫通限界厚さ及び裏面剥離限界厚さが壁厚を上回る施設については、離隔対象施設とする。離隔対象施設の検討に当たっては、現地調査で抽出した車両を対象とする。車両の諸元及び空力パラメータを添5第29表に示す。また、車両の最大水平速度は、竜巻ガイドを参考に算出する最大風速100m/sの竜巻の特性値を基に、ランキン渦モデルにより算出する。

竜巻防護施設を設置する施設である燃料加工建屋の壁厚は、車両の衝突による貫通限界厚さ及び裏面剥離限界厚さを下回らない設計であることを確認し、燃料加工建屋は、離隔対象施設ではないこと



を確認する。なお、敷地内を巡回しており、速やかに退避行動に移ることができる大型バスについては、竜巻防護施設を設置する施設である燃料加工建屋に飛来しないように運用を定めることにより、飛来を想定する車両に含めない。

- (4) 車両の運用については、敷地内に位置する再処理施設及び廃棄物管理施設に対して、車両による影響を与えないことを踏まえた手順を整備する。
- (5) 竜巻に対する運用管理を確実に実施するために必要な技術的能力を維持・向上させることを目的とし、教育及び訓練を定期的実施する。
- (6) 竜巻により本施設に影響を及ぼすおそれが予見される場合は、全工程停止、送排風機停止及び必要に応じて外気と繋がっている経路のダンパの閉止を行うことを手順に定める。

【補足説明資料 8-1～8-5】

添5第29表 現地調査で抽出した車両の諸元及び空力パラメータ

車両の種類	長さ (m)	幅 (m)	高さ (m)	質量 (kg)	空力パラメータ $C_D A/m$ ( $m^2/kg$ )
大型バス	12	2.5	3.8	12100	0.0047
トラック	8.5	2.2	2.5	3790	0.0080
乗用車 普通	4.4	1.7	1.5	1140	0.0097
乗用車 ワゴン1	4.8	1.8	1.5	1510	0.0082
乗用車 ワゴン2	5.2	1.9	2.3	1890	0.0092
軽自動車1	3.4	1.5	1.6	840	0.0102
軽自動車2	3.4	1.5	1.5	710	0.0116

## 2 章 補足説明資料

## 加工施設 安全審査 整理資料 補足説明資料リスト

## 第9条:外部からの衝撃による損傷の防止(竜巻)

加工施設 安全審査補足説明資料(今回提出)				備考
資料No.	名称	提出日	Rev	
補足説明資料2-1	竜巻影響評価ガイドへの適合性	11/29	0	
補足説明資料3-1	設計対象施設の選定について			
補足説明資料3-2	竜巻に対して防護する必要のある開口部の選定について	11/29	0	
補足説明資料3-3	耐震Sクラス施設について	11/29	0	
補足説明資料3-4	エネルギー管理建屋における竜巻襲来時の波及的影響への対策について			
補足説明資料4-1	竜巻検討地域の設定について	11/29	0	
補足説明資料4-2	竜巻検討地域の範囲設定について	11/29	0	
補足説明資料4-3	竜巻検討地域の設定の妥当性について	11/29	0	
補足説明資料4-4	竜巻影響エリアの設定の妥当性について			
補足説明資料4-4	ハザード曲線による竜巻最大風速( $V_{B2}$ )の計算について	11/29	0	
補足説明資料4-5	海上のFスケール不明竜巻の按分方法の妥当性について	11/29	0	
補足説明資料4-6	竜巻発生数の確率分布(ポアソン, ポリヤ分布)がハザード結果に及ぼす影響について	11/29	0	
補足説明資料5-1	評価対象施設等の設計荷重について	11/29	0	
補足説明資料5-2	設計飛来物の設定	11/29	0	
補足説明資料5-3	敷地外からの飛来物の考慮について	11/29	0	
補足説明資料5-4	設計飛来物の設定における1次スクリーニングについて	11/29	0	
補足説明資料5-5	竜巻時に発生する降雹について	11/29	0	
補足説明資料5-6	空力パラメータについて	11/29	0	
補足説明資料6-1	ランキン渦モデルとフジタモデルの適用の考え方について	11/29	0	
参考資料1	フジタモデルの適用について	11/29	0	
参考資料2	竜巻による物体の浮上・飛来解析について	11/29	0	
補足説明資料7-1	竜巻随件事象の抽出及び設計について			
補足説明資料8-1	飛来物の発生防止対策について			
補足説明資料8-2	車両の退避について			
補足説明資料8-3	竜巻襲来までに要する時間の設定の妥当性について			
補足説明資料8-4	加工施設 運用, 手順説明資料 外部からの衝撃による損傷の防止(竜巻)			
補足説明資料8-5	竜巻発生確度ナウキャスト及び雷ナウキャストについて	11/29	0	

令和元年 11 月 29 日 RO

補足説明資料 2 - 1 (9 条 竜巻)

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>2. 設計の基本方針</p> <p>2.1 設計対象施設</p> <p>以下の（１）及び（２）に示す施設を設計対象施設とする。</p> <p>（１）竜巻防護施設</p> <p>「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震 S クラスの設計を要求される設備（系統・機器）及び建屋・構築物等とする。</p> <p>（２）竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設</p> <p>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<sup>(注 2.1)</sup>。</p> <p>-----</p> <p>解説 2.1 設計対象施設</p> <p>設計竜巻荷重は、基準地震動 <math>S_s</math> 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。</p> <p>竜巻防護施設の例としては、原子炉格納容器や安全機能を有する系統・機器（配管を含む）等が考えられる。外殻となる施設等による防護機能が期待できる設計対象施設の例としては、原子炉格納容器に内包された安全機能を有する設備等が考えられる。</p> <p>-----</p> <p>(注 2.1) 竜巻防護施設を内包する区画。</p>	<p>⇒竜巻防護施設としては安全上重要な施設を選定しており、耐震 S クラスの設備とはしていないが、事業許可基準規則第 9 条及び第 14 条に則った選定としている。</p> <p>なお、安全上重要な施設は耐震 S クラスの設備を包含し、かつ耐震 S クラスでないものも含んでいる（「安全上重要な施設＞耐震 S クラスの設備」）。</p> <p>⇒破損又は転倒により、上記の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おそれのあるものを「竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設」として選定している。</p> <p>⇒外殻となる建屋によって防護される竜巻防護施設については、外殻となる建屋を「竜巻防護施設を設置する施設」として設計対象施設に選定している。</p>

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>2.2 設計の基本的な考え方</p> <p>2.2.1 設計の基本フロー</p> <p>図 2.1 に設計の基本フローを示す。設置許可段階では、基準竜巻、設計竜巻及び設計荷重が適切に設定されていること、並びに設計荷重に対して、機能・配置・構造計画等を経て抽出された設計対象施設の安全機能が維持される方針であることを確認する。ただし、設計荷重については、設置許可段階において、その基本的な種類や値等が適切に設定されていることを確認する。</p> <p style="text-align: center;">図 2.1 設計の基本フロー</p> <p>解説 2.2.1 設計の基本フロー</p> <p>詳細設計段階においては、配置・断面設計等を経て詳細な仕様が設定された施設を対象に、</p>	<p>⇒3. 参照。</p>

補 2-1-2

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>設計荷重の詳細を設定し、設計荷重に対する構造計算等を実施し、その結果得られた施設の変形や応力等が構造健全性評価基準を満足すること等を確認して、安全機能が維持されることが確認されることを想定している。</p> <p>2.2.2 設計対象施設に作用する荷重</p> <p>以下に示す設計荷重を適切に設定する。</p> <p>(1) 設計竜巻荷重</p> <p>設計竜巻荷重を以下に示す。</p> <p>①風圧力</p> <p>設計竜巻の最大風速による風圧力</p> <p>②気圧差による圧力</p> <p>設計竜巻における気圧低下によって生じる設計対象施設内外の気圧差による圧力</p> <p>③飛来物の衝撃荷重</p> <p>設計竜巻によって設計対象施設に衝突し得る飛来物（以下、「設計飛来物」という）が設計対象施設に衝突する際の衝撃荷重</p> <p>(2) 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重</p> <p>設計竜巻荷重と組み合わせる荷重を以下に示す。</p> <p>①設計対象施設に常時作用する荷重、運転時荷重等</p> <p>②竜巻以外の自然現象<sup>(注2.3)</sup>による荷重、設計基準事故時荷重等</p> <p>(注 2.3) 竜巻と同時発生が想定され得る雷、雪、雹及び大雨等の自然現象を含む。</p>	<p>⇒設計竜巻荷重を以下の通りとしている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・風圧力による荷重</li> <li>・気圧差による荷重</li> <li>・飛来物の衝撃荷重</li> </ul> <p>⇒設計竜巻荷重と組み合わせる荷重として以下のものを考慮することとしている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・竜巻防護施設等に常時作用する荷重及び運転時荷重（死荷重（固定荷重）、活荷重（積載荷重、機器・配管からの荷重等））</li> <li>・竜巻以外の自然現象による荷重（積雪）</li> </ul>



補 2-1-4

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>なお、上記（２）の②の荷重については、竜巻以外の自然現象及び事故の発生頻度等を参照して、上記（２）の①の荷重と組み合わせることの適切性や設定する荷重の大きさ等を判断する。</p> <p>2.2.3 施設の安全性の確認</p> <p>設計竜巻荷重及びその他組み合わせ荷重（常時作用している荷重、竜巻以外の自然現象による荷重、設計基準事故時荷重等）を適切に組み合わせた設計荷重に対して、設計対象施設、あるいはその特定の区画<sup>(注 2.4)</sup>の構造健全性等が維持されて安全機能が維持される方針であることを確認する。</p> <p>（注 2.4）竜巻防護施設を内包する区画。</p>	<p>なお、設計竜巻荷重には設計基準事故時に生ずる応力を適切に組み合わせる方針としているが、設計基準事故は内部事象に起因するものであること、及び竜巻に対して安全上重要な施設の安全機能を損なわない設計とする方針であり、竜巻との因果関係はなく、竜巻の影響による時間的変化による設計基準事故への進展も考えられないことから、竜巻と設計基準事故時荷重との組合せは考慮する必要はないものと整理している。また、設計基準事故発生時に、風速が小さく発生頻度の高い竜巻が襲来することについても、設計基準事故時に期待する影響緩和機能は、竜巻による影響を受けない設計とするため、考慮する必要はないものと整理している。</p> <p>⇒設計竜巻からの防護設計方針を以下の通りとし、安全機能を損なわない設計とする方針としている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 建屋に設置され防護される竜巻防護施設                     <p>建屋による防護により、設計荷重（竜巻）の影響を受けない設計とする。</p> </li> <li>・ 建屋に設置されるが防護が期待できない竜巻防護施設                     <p>建物・構築物による防護により、設計荷重（竜巻）の影響を受けない設計とする。</p> </li> <li>・ 屋外の竜巻防護施設                     <p>本施設は竜巻防護施設を全て燃料加工建屋に収納することから、該当する施設はない。</p> </li> <li>・ 外気と繋がっている竜巻防護施設                     <p>設計荷重（竜巻）の影響を受けても安全機能を損なわない設計とする。</p> </li> </ul>

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>3. 基準竜巻・設計竜巻の設定</p> <p>3.1 概要</p> <p>設置許可段階の安全審査において、基準竜巻及び設計竜巻が適切に設定されていることを確認する。</p> <hr/> <p>解説 3.1 基準竜巻・設計竜巻の最大風速の設定</p> <p>設計竜巻荷重を設定するまでの基本的な流れは解説図 3.1 に示すとおりである。</p> <div data-bbox="488 624 976 1114" style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px auto; width: fit-content;"> <pre>             graph TD             A["<b>竜巻検討地域の設定</b> 発電所が立地する地域及び竜巻発生 の観点から気象条件等が類似の 地域"] --&gt; B["<b>基準竜巻の最大風速(V<sub>B</sub>)の設定</b> (竜巻検討地域における竜巻の発生 頻度や最大風速の年超過確率等 を参照した上で最大風速を設定)"]             B --&gt; C["<b>設計竜巻の最大風速(V<sub>D</sub>)の設定</b> (発電所サイト特性<sup>(注3.1)</sup>等を考慮 してV<sub>B</sub>の割り増し等を行い最大 風速を設定) V<sub>D</sub> = α · V<sub>B</sub>、α ≥ 1"]             C --&gt; D["<b>設計竜巻の特性値の設定</b> (V<sub>D</sub>等に基づいて移動速度、最大 気圧低下量等の特性値を設定)"]             D --&gt; E["<b>設計竜巻荷重(F<sub>D</sub>)の設定</b> (風圧力、気圧差、飛来物の衝突 による衝撃荷重を設定)"]             </pre> </div> <p>解説図 3.1 基準竜巻・設計竜巻の設定に係る基本フロー</p> <p>3.2 竜巻検討地域の設定</p> <p>竜巻検討地域は、原子力発電所が立地する地域及び竜巻発生観点から原子力発電所が立地する地域と気象条件等が類似の地域から設定する。</p> <p>(注 3.1) 地形効果による竜巻の増幅特性等</p>	<p>⇒3.3、3.4 参照。</p>

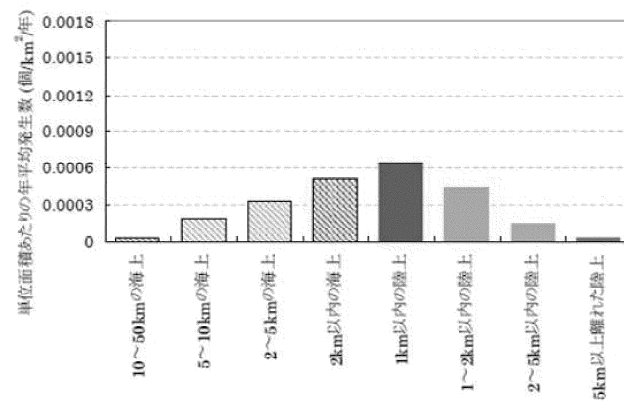
原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>解説 3.2 竜巻検討地域の設定</p> <p>(1) 基本的な条件</p> <p>竜巻検討地域の設定にあたっては、IAEA の基準<sup>(※1)</sup>が参考になる。IAEA の基準では、ある特定の風速を超過する竜巻の年発生頻度の検討にあたって竜巻の記録を調査する範囲として、およそ 10 万 km<sup>2</sup> を目安にあげている。この IAEA の基準を参考として、竜巻検討地域の目安を、原子力発電所を中心とする 10 万 km<sup>2</sup> の範囲とする。しかしながら、日本では、例えば日本海側と太平洋側とで気象条件が異なる等、比較的狭い範囲で気象条件が大きく異なる場合があることから、必ずしも 10 万 km<sup>2</sup> に拘らずに、竜巻発生の観点から原子力発電所が立地する地域と気象条件等が類似する地域を調査した結果に基づいて竜巻検討地域を設定することを基本とする。</p> <p>(2) 原子力発電所が海岸線付近に立地する場合の竜巻検討地域の設定</p> <p>解説図 3.2 に日本における竜巻の発生分布<sup>(※2)</sup>を示す。解説図 3.2 より日本における竜巻の発生位置は、海岸線付近に集中している傾向が伺える。解説図 3.3 に日本の海岸線付近における竜巻の発生状況を示す。解説図 3.3 をみると、海岸線から 1km 以内の陸上では単位面積あたりの 1 年間の平均発生数は <math>6.0 \times 10^{-4}</math> (個/km<sup>2</sup>/年) を少し超える程度であり、海岸線から離れるに従って竜巻の発生数が減少する傾向が伺える。例えば、解説図 3.3 の陸上側のグラフの分布をみると、海岸線から 5km 以上離れた地域では、竜巻の発生数が急激に減少する傾向がみられる。以上の傾向を踏まえて、原子力発電所が海岸線付近に立地する場合は、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こととする。なお、原子力発電所がこの範囲（海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km の範囲）を逸脱する地域に立地する場合は、海岸線付近で竜巻の発生が増大する特徴を踏まえつつ竜巻検討地域の範囲を別途検討する必要がある。</p>	<p>⇒本施設を中心とした 10 万 km<sup>2</sup> (半径約 180 km) を目安として竜巻検討地域を設定している。</p> <p>⇒竜巻検討地域、日本海側及び太平洋側とで比較を行うことにより、竜巻検討地域における竜巻発生の傾向が、日本海側、太平洋側のいずれとも異なることを確認している。</p> <p>⇒本施設が立地する地域の気候、竜巻発生の観点からの特徴（総観場）の類似性を考慮して竜巻検討地域を設定している。</p> <p>⇒類似の気候区分に分類される範囲（岩手県沿岸南部）については、半径 180 km の範囲外であっても竜巻検討地域に含めた。</p> <p>⇒本施設は海岸から約 5～10 km の地点に立地しているが、竜巻の発生のほとんどが海岸線付近であることから、海岸線に沿った海側 5 km、陸側 10 km を竜巻検討地域として考慮している。</p>

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド

ガイドへの適合性の確認結果



解説図 3.2 日本における竜巻の発生分布（1961～2011年、気象庁作成）<sup>(注2)</sup>



解説図 3.3 日本の海岸線付近における竜巻の発生状況<sup>(注3)</sup> (注3.2)  
(1961～2009年12月、規模：F0以上)

(注 3.2) 被害の痕跡が残りにくい海上竜巻は、単位面積あたりの年平均発生数が、実際の発生数より特に少ない可能性が考えられる。

3.3 基準竜巻の設定

以下の基本的な方針に基づいて基準竜巻の最大風速 ( $V_B$ ) を設定する。ここで、 $V_B$  は最大瞬間

補 2-1-8

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>風速とする。</p> <p>(1) 基準竜巻の最大風速(<math>V_B</math>)は、竜巻検討地域において、過去に発生した竜巻の規模や発生頻度、最大風速の年超過確率等を考慮して適切に設定する。</p> <p>(2) 基準竜巻の最大風速(<math>V_B</math>)は、下記に示す <math>V_{B1}</math> と <math>V_{B2}</math> のうちの大きな風速とする。</p> <p>①過去に発生した竜巻による最大風速(<math>V_{B1}</math>)</p> <p>日本で過去に発生した竜巻による最大風速を <math>V_{B1}</math> として設定することを原則とする。ただし、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の最大風速を十分な信頼性のあるデータ等に基づいて評価できる場合においては、「日本」を「竜巻検討地域」に読み替えることができる。</p> <p>②竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(<math>V_{B2}</math>)</p> <p>竜巻検討地域における竜巻の観測記録等に基づいて作成した竜巻最大風速のハザード曲線上において、年超過確率(<math>P_{B2}</math>)に対応する竜巻最大風速を <math>V_{B2}</math> とする。ここで、<math>P_{B2}</math> は <math>10^{-5}</math> (暫定値) を上回らないものとする。</p> <p>また、竜巻検討地域において基準竜巻の最大風速(<math>V_B</math>)が発生する可能性を定量的に確認するために、<math>V_B</math> の年超過確率を算定することとする。なお、<math>V_B</math> が <math>V_{B1}</math> から決定された場合 (<math>V_B=V_{B1}</math> の場合) は、<math>V_{B2}</math> の算定に用いた竜巻最大風速のハザード曲線を用いて、<math>V_B</math> の年超過確率を算定する。ちなみに、米国 NRC の基準類<sup>(参 4)</sup>では、設計に用いる竜巻 (設計基準竜巻 : Design-basis tornado) の最大風速は、年超過確率 <math>10^{-7}</math> の風速として設定されている。</p> <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> <p>… 解説 3.3 基準竜巻の最大風速 (<math>V_B</math>) の設定          …          … 解説 3.3.1 過去に発生した竜巻による最大風速(<math>V_{B1}</math>)の設定          …</p>	<p>⇒基準竜巻の最大風速は日本で過去に発生した竜巻による最大風速 (<math>V_{B1}</math>) と竜巻検討地域における竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (<math>V_{B2}</math>) のうち、大きな風速を設定することとしている。</p> <p>⇒<math>V_{B1}</math> は、日本で過去 (1961 年から 2013 年 12 月) に発生した竜巻の最大風速 (92m/s) としている。</p> <p>⇒作成したハザード曲線において年超過確率が <math>10^{-5}</math> に相当する風速 (約 37 m/s) を <math>V_{B2}</math> としている。</p> <p>⇒本施設においては、<math>V_B=V_{B1}=92\text{m/s}</math> としている。92m/s に相当する年超過確率は、<math>1.5 \times 10^{-8}</math> である。</p>

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果														
<p>本文に記載のとおり、日本で過去に発生した竜巻による最大風速を <math>V_{B1}</math> として設定することを原則とする。</p> <p>また、過去に発生した竜巻による最大風速は、竜巻による被害状況等に基づく既往のデータベース、研究成果等について十分に調査・検討した上で設定する必要がある。</p> <p>日本における過去最大級の竜巻としては、例えば、1990 年 12 月に千葉県茂原市で発生した竜巻、2012 年 5 月に茨城県常総市からつくば市で発生した竜巻等があげられる。竜巻検討地域の観測記録等に基づいて <math>V_{B1}</math> を設定する場合において、これら過去最大級の竜巻を考慮しない場合には、その明確な根拠を提示する必要がある。</p> <p>竜巻による被害状況から推定された最大風速を参照して設定された藤田スケールを用いて基準竜巻の最大風速を設定する場合<sup>(注 3.3)</sup>は、藤田スケールの各階級 (F0~F5) の最大風速を用いる。解説表 3.1 に藤田スケールと風速の関係を示す。なお、風速計等によって観測された風速記録がある場合には、その風速記録を用いてもよい。</p> <p style="text-align: center;">解説表 3.1 藤田スケールと風速の関係<sup>(参 5)</sup></p> <table border="1" data-bbox="450 863 1010 1153"> <thead> <tr> <th>スケール</th> <th>風速</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>17~32m/s (約 15 秒間の平均)</td> </tr> <tr> <td>F1</td> <td>33~49m/s (約 10 秒間の平均)</td> </tr> <tr> <td>F2</td> <td>50~69m/s (約 7 秒間の平均)</td> </tr> <tr> <td>F3</td> <td>70~92m/s (約 5 秒間の平均)</td> </tr> <tr> <td>F4</td> <td>93~116m/s (約 4 秒間の平均)</td> </tr> <tr> <td>F5</td> <td>117~142m/s (約 3 秒間の平均)</td> </tr> </tbody> </table> <p>解説 3.3.2 竜巻最大風速のハザード曲線を用いた最大風速 (<math>V_{B2}</math>) の算定</p> <p>既往の算定方法 (Wen&amp;Chu<sup>(参 6)</sup> 及び Garson et. al<sup>(参 7, 参 8)</sup>) に基づいて <math>V_{B2}</math> を算定する方法について、その基本的な考え方を以下に例示する。竜巻最大風速のハザード曲線の算定は、解説図 3.4 に示す算定フローに沿って実施する。なお、本ガイドに示す <math>V_{B2}</math> の具体的な算定</p>	スケール	風速	F0	17~32m/s (約 15 秒間の平均)	F1	33~49m/s (約 10 秒間の平均)	F2	50~69m/s (約 7 秒間の平均)	F3	70~92m/s (約 5 秒間の平均)	F4	93~116m/s (約 4 秒間の平均)	F5	117~142m/s (約 3 秒間の平均)	<p>⇒<math>V_{B1}</math> は、日本で過去 (1961 年から 2013 年 12 月) に発生した竜巻の最大風速 (92m/s) としている。</p> <p>⇒竜巻最大風速のハザード曲線の算定にあたっては、東京工芸大学委託成</p>
スケール	風速														
F0	17~32m/s (約 15 秒間の平均)														
F1	33~49m/s (約 10 秒間の平均)														
F2	50~69m/s (約 7 秒間の平均)														
F3	70~92m/s (約 5 秒間の平均)														
F4	93~116m/s (約 4 秒間の平均)														
F5	117~142m/s (約 3 秒間の平均)														

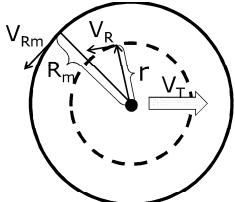
原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>方法については、独立行政法人原子力安全基盤機構が東京工芸大学に委託した研究の成果<sup>(参 3)</sup>が参考になる。</p> <p>また、竜巻最大風速のハザード曲線の算定方法については、技術的見地等からその妥当性を示すことを条件として、いずれの方法を用いてもよいが、竜巻影響エリアの設定の基本的な考え方は、以下の「(1) 竜巻影響エリアの設定」に従うことを原則とする。</p> <p>(注 3.3) 解説 3.3.3 参照</p> <p>(1) 竜巻影響エリアの設定</p> <p><math>V_{B2}</math> の算定にあたっては、まず始めに <math>V_{B2}</math> の発生エリアである竜巻影響エリアを設定する。竜巻影響エリアは、原子力発電所の号機ごとに設定する。号機ごとのすべての設計対象施設の設置面積の合計値及び推定される竜巻被害域(被害幅、被害長さ、移動方向等から設定)に基づいて、竜巻影響エリアを設定する。</p> <p>竜巻による被害域幅、被害域長さ及び移動方向は、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の記録に基づいて対数正規分布等を仮定して設定することを基本とする。また、竜巻による被害域幅、被害域長さ及び移動方向の設定に使用する竜巻の観測記録や仮定条件等は、後述する竜巻の最大風速の確率密度分布の設定に用いる観測記録や仮定条件等との整合性を持たせることを原則とし、<math>V_{B2}</math> の算定に使用するデータ等には一貫性を持たせるように配慮する。</p> <p>(2) 竜巻の年発生数の確率分布の設定</p> <p>竜巻の年発生数の確率分布は、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の記録等に基づいてポアソン過程等により設定することを基本とする。具体的には、竜巻検討地域を海岸線から陸側及び海側それぞれ 5km の範囲に設定した場合は、少なくとも 1km 範囲ごとに竜巻の年発生数の確率分布を算定し、そのうちの <math>V_{B2}</math> が最も大きな値として設定される確率分布を設計で用いることとする。</p>	<p>果を参考としている。</p> <p>⇒本施設の竜巻影響エリアの設定にあたっては、設計対象施設を包含する円の面積をすべて足し合わせた合計値としている。</p> <p>⇒竜巻影響エリアを円形とし、竜巻の移動方向に依存性が生じないようにしている。</p> <p>⇒竜巻検討地域における 53 年間の竜巻の発生数、被害幅及び被害長さを基に、確率密度分布については竜巻ガイド及び東京工芸大学委託成果を参考に、対数正規分布に従うものとして設定している。また、各々の確率密度分布を設定する際に使用するデータには一貫性を持たせている。</p> <p>⇒竜巻は気象現象の中でも極めて稀に発生する事象であり、発生数の変動(標準偏差)が大きい分布となり、東京工芸大学委託成果にポリヤ分布への適合性が良いことが示されている。したがって、ハザード曲線の評価に当たって使用する年発生数の確率分布は、ポリヤ分布を採用する。</p>

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>(3) 竜巻最大風速の確率密度分布の設定</p> <p>竜巻最大風速の確率密度分布は、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の記録等に基づいて対数正規分布等を仮定して設定することを基本とする。竜巻最大風速の確率密度分布の設定にあたっては、竜巻の年発生数の確率分布の設定と同様に、竜巻検討地域を 1km 範囲ごとに区切ってそれぞれの範囲で確率分布を算定し、そのうちの <math>V_{B2}</math> が最も大きな値として設定される確率分布を設定する等、配慮する。</p> <p>竜巻最大風速の確率密度分布の設定にあたって使用する観測された竜巻の最大風速を藤田スケールに基づいて評価する場合<sup>(注3.3)</sup>は、藤田スケールの各階級 (F0~F5) の最小風速から最大風速のうち、<math>V_{B2}</math> が最も大きくなる風速を用いる。ただし、風速計等によって観測された風速記録がある場合には、その風速記録を用いてもよい。</p> <p>(4) 竜巻最大風速のハザード曲線の算定</p> <p>上記で設定した竜巻の年発生数の確率分布及び竜巻最大風速の確率密度分布を用いて、竜巻最大風速のハザード曲線を算定する。</p> <p>なお、竜巻最大風速のハザード曲線の算定において、竜巻最大風速の確率密度分布の積分の上限値を設定する場合は、竜巻最大風速の評価を行うハザード曲線が不自然な形状にならないように留意する。</p> <p>(5) 年超過確率(<math>P_{B2}</math>)に対応する竜巻最大風速(<math>V_{B2}</math>)の算定</p> <p>上記で算定した竜巻最大風速のハザード曲線において年超過確率が <math>P_{B2}</math> (<math>\leq 10^{-5}</math> (暫定値)) の竜巻最大風速を <math>V_{B2}</math> とする。</p>	<p>⇒竜巻検討地域における 53 年間の竜巻の発生数、被害幅及び被害長さを基に、確率密度分布については竜巻ガイド及び竜巻ガイドが参考としている東京工芸大学委託成果を参考に、対数正規分布に従うものとして設定している。</p> <p>⇒T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ、竜巻風速が <math>V_0</math> 以上となる確率を求め、ハザード曲線を求めている。また、風速の積分範囲の上限値は、ハザード曲線の形状が不自然にならない程度に大きな値として 120 m/s に設定している。</p> <p>⇒竜巻最大風速のハザード曲線により設定する最大風速 <math>V_{B2}</math> は、竜巻ガイドを参考に年超過確率 <math>10^{-5}</math> に相当する風速とし、37m/s としている。</p>



原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<div data-bbox="369 252 1120 678" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p style="text-align: center;">解説図 3.4 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(<math>V_{B2}</math>)の算定フロー</p> </div> <p>解説 3.3.3 日本版改良藤田スケールの適用について</p> <p>2015 年 12 月に気象庁により策定され、2016 年 4 月から竜巻等の突風の調査に使用されている日本版改良藤田スケール（以下「JEF スケール」という。）は、日本の建築物等の種類や特性を踏まえた被害指標及び被害度が用いられており、個別被害から求められる風速の精度の向上が図られている。一方で、2016 年 4 月以降に蓄積された JEF スケールにより評定された竜巻の風速等に関するデータのみで竜巻最大風速の大きさと発生頻度との関係を把握することは困難であることから、<math>V_B</math> の設定は、JEF スケールのデータではなく、2016 年 3 月以前に藤田スケールにより評定された竜巻の風速等に関するデータを用いて行うものとする。ただし、藤田スケールの階級 F3 の最大風速 92m/s に近い値又はそれを超える値が JEF スケールで評定された場合には、気象庁の評定等を踏まえ、その値の扱いを別途検討する。</p>	<p>ガイドへの適合性の確認結果</p> <p>⇒<math>V_B</math> の設定においては、JEF スケールによるデータは使用せず、F スケールによるデータのみを使用している。</p>

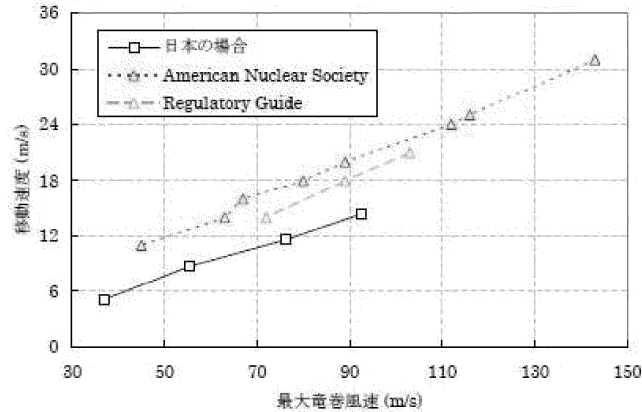
原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>3.4 設計竜巻の設定</p> <p>以下の基本的な方針に基づいて設計竜巻の最大風速 (<math>V_D</math>) 及び特性値を設定する。ここで、<math>V_D</math> は最大瞬間風速とする。</p> <p>(1) 設計竜巻の最大風速 (<math>V_D</math>) は、原子力発電所が立地する地域の特性（地形効果による竜巻の増幅特性等）等を考慮して、科学的見地等から基準竜巻の最大風速 (<math>V_B</math>) の適切な割り増し等を行って設定されていること。なお、<math>V_D</math> は、<math>V_B</math> を下回らないものとする。</p> <p>(2) 設計竜巻の特性値は、設計竜巻の最大風速 (<math>V_D</math>)、並びに竜巻検討地域において過去に発生した竜巻の特性等を考慮して適切に設定する。</p> <hr/> <p>解説 3.4 設計竜巻の最大風速 (<math>V_D</math>) 及び特性値の設定</p> <p>解説 3.4.1 設計竜巻の最大風速 (<math>V_D</math>) の設定で考慮する地形効果による竜巻の増幅特性</p> <p>丘陵等による地形効果によって竜巻が増幅する可能性があると考えられる<sup>(参9 ほか)</sup>ことから、原子力発電所が立地する地域において、設計対象施設の周辺地形等によって竜巻が増幅される可能性について検討を行い、その検討結果に基づいて設計竜巻の最大風速 (<math>V_D</math>) を設定する。</p> <p>なお、竜巻が丘陵や段差等の上空を通過した際には、竜巻が減衰する可能性が指摘されている<sup>(参10、参11)</sup>が、<math>V_D</math> の設定においては、そのような減衰の効果は考慮しない。</p> <p>解説 3.4.2 設計竜巻の特性値の設定</p> <p>解説 3.4.2.1 概要</p> <p>竜巻検討地域で観測された竜巻に関する情報、並びに設計竜巻の最大風速 (<math>V_D</math>) 等に基づいて、下記(1)～(5)に示す設計竜巻の各特性値を設定する。</p> <p>(1) 移動速度 (<math>V_T</math>)</p> <p>(2) 最大接線風速 (<math>V_{Rm}</math>)</p>	<p>⇒本施設の敷地周辺は核燃料物質加工事業変更許可申請添付書類三チ、(ハ)に記載のとおり平坦であり、本来は地形効果による増幅を考慮する必要はないが、竜巻に対する設計に当たっては、蓄積されている知見の少なさといった不確定要素を考慮し、設計及び運用に安全余裕を持たせるために、設計竜巻の最大風速を 100m/s としており、基準竜巻 (92m/s) を上回る設定としている。</p> <p>⇒設計竜巻の設定において、竜巻の減衰効果は考慮していない。</p> <p>⇒左記(1)～(5)に示される各特性値を設定している。</p>

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>(3) 最大接線風速半径 (<math>R_m</math>)</p> <p>(4) 最大気圧低下量 (<math>\Delta P_{max}</math>)</p> <p>(5) 最大気圧低下率 <math>(dp/dt)_{max}</math></p> <p>(1)～(5)の各特性値については原則として、十分な信頼性を有した観測記録等に基づいて設定したものを、その根拠の明示を条件として用いる。ただし、設定に足る十分な信頼性を有した観測記録等がない場合には、解説 3.4.2.2 及び 3.4.2.3 に示す方法で各特性値を設定することができる。</p> <p>解説 3.4.2.2 設計竜巻の特性値の設定に係る基本的な考え方</p> <p>竜巻に関する観測データが不足している等の理由により、観測データ等に基づいた十分に信頼できる数学モデルの構築が困難な場合は、米国 NRC の基準類<sup>(参 4)</sup>を参考として、ランキン渦モデルを仮定して竜巻特性値を設定する。解説図 3.5 にランキン渦モデルの概要を示す。ランキン渦では、高さ方向によって風速及び気圧が変化しない平面的な流れ場を仮定している。</p> <p>なお、ランキン渦モデルに比べてより複雑な竜巻渦を仮定した数学モデル等を使用して竜巻特性値を設定する場合は、その技術的な妥当性を示す必要がある。</p> <div data-bbox="338 1007 1160 1209" style="border: 1px solid black; padding: 5px;">  <p> <math>V_T</math>: 竜巻の移動速度  <math>V_R</math>: 接線風速、<math>r</math>: 竜巻渦中心からの半径  <math>V_{Rm}</math>: 最大接線風速、<math>R_m</math>: 最大接線風速が生じる位置での半径  <math>V_R = V_{Rm} \cdot (r/R_m)</math> (<math>r \leq R_m</math>の範囲)  <math>V_R = V_{Rm} \cdot (R_m/r)</math> (<math>r \geq R_m</math>の範囲)                 </p> </div> <p>解説図 3.5 ランキン渦モデルの概要</p>	<p>⇒設計竜巻の特性値は、ランキン渦モデルを仮定した解説 3.4.2.3 に基づく設定方法に従い設定している。</p>

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>解説 3.4.2.3 設計竜巻の特性値の設定</p> <p>(1) 設計竜巻の移動速度 (<math>V_T</math>) の設定</p> <p>設計竜巻の移動速度 (<math>V_T</math>) は、以下の算定式を用いて <math>V_D</math> から <math>V_T</math> を算定する。</p> $V_T = 0.15 \cdot V_D \cdots (3.1)$ <p>ここで、<math>V_D</math>(m/s) は設計竜巻の最大風速を表す。(3.1)式は、解説図 3.6 に示される日本の竜巻の観測記録に基づいた竜巻移動速度と最大風速との関係<sup>(参 3)</sup>を参考として設定したものである。解説図 3.6 をみると、青線で示す日本の竜巻による移動速度は、米国 NRC の基準類等<sup>(参 4)</sup>による移動速度と比べて、同じ最大竜巻風速に対して小さい。解説図 3.6 に示される日本の竜巻に対する移動速度は、藤田スケールに基づいた階級 (F3、F2 及び F2～F3、F1 及び F1～F2、F0 及び F0～F1) ごとの平均値であるが、日本で発生する竜巻を個別にみれば、スーパーセルに伴って発生する竜巻等、米国の竜巻に比べて移動速度が速いものも存在すると考えられる。</p> <p>本ガイドでは、設計竜巻の最大速度 (<math>V_D</math>) が一定の場合、移動速度が遅い方が、最大気圧低下量 (<math>\Delta P_{max}</math>) が大きな値になる ((3.2)式、(3.4)式) ことを考慮して、スーパーセルに伴って発生する竜巻等の移動速度が速い竜巻の特性は採用せずに、観測記録の平均値に基づいた解説図 3.6 の日本の竜巻における移動速度と最大竜巻風速の関係に基づく(3.1)式を採用することにした。</p>	<p>⇒設計竜巻の特性値を以下の通り設定している。</p> <p>移動速度 (<math>V_T</math>) : 15 m/s</p>

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド

ガイドへの適合性の確認結果



解説図 3.6 竜巻の移動速度と最大風速の関係<sup>(参3)</sup>

(2) 設計竜巻の最大接線風速 ( $V_{Rm}$ ) の設定

設計竜巻の最大接線風速 ( $V_{Rm}$ ) は、米国 NRC の基準類<sup>(参4)</sup>を参考として、以下の算定式を用いて  $V_{Rm}$  を算定する。

$$V_{Rm} = V_D - V_T \dots (3.2)$$

ここで、 $V_D$  (m/s) 及び  $V_T$  (m/s) は、設計竜巻の最大風速及び移動速度である。

(3) 設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径 ( $R_m$ ) の設定

設計竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径 ( $R_m$ ) は、日本における竜巻の観測記録をもとに提案された竜巻モデル<sup>(参3)</sup>に準拠して以下の値を用いる。

$$R_m = 30 \text{ (m)} \dots (3.3)$$

(4) 設計竜巻の最大気圧低下量 ( $\Delta P_{max}$ ) の設定

設計竜巻の最大気圧低下量 ( $\Delta P_{max}$ ) は、米国 NRC の基準類<sup>(参4)</sup>を参考として、ランキン渦モデルによる風速分布に基づいて、最大気圧低下量 ( $\Delta P_{max}$ ) を設定する。

$$\Delta P_{max} = \rho \cdot V_{Rm}^2 \dots (3.4)$$

ここで、 $\rho$  及び  $V_{Rm}$  は、それぞれ空気密度、設計竜巻の最大接線風速を示す。

⇒設計竜巻の特性値を以下の通り設定している。

最大接線風速 ( $V_{Rm}$ ) : 85 m/s

⇒設計竜巻の特性値を以下の通り設定している。

最大接線風速半径 ( $R_m$ ) : 30 m

⇒設計竜巻の特性値を以下の通り設定している。

最大気圧低下量 ( $\Delta P_{max}$ ) : 89 hPa

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>(5) 設計竜巻の最大気圧低下率<math>((dp/dt)_{max})</math>の設定</p> <p>設計竜巻の最大気圧低下率<math>((dp/dt)_{max})</math>は、米国 NRC の基準類<sup>(参4)</sup>を参考として、ランキン渦モデルによる風速分布に基づいて、最大気圧低下量<math>(\Delta P_{max})</math>及び最大気圧低下率<math>((dp/dt)_{max})</math>を設定する。</p> $(dp/dt)_{max} = (V_T/R_m) \cdot \Delta P_{max} \cdots (3.5)$ <p>ここで、<math>V_T</math> 及び <math>R_m</math> は、それぞれ設計竜巻の移動速度及び最大接線風速が生じる位置での半径を表す。</p> <p>4. 施設の設計</p> <p>4.1 概要</p> <p>設置許可段階の安全審査において以下を確認する。</p> <p>①設計荷重（設計竜巻荷重及びその他の組み合わせ荷重）が適切に設定されていること。ただし、設置許可段階においては、その基本的な種類や値等が適切に設定されていることを確認する。（設計対象施設の各部位に作用させる設計荷重の詳細は、詳細設計段階において確認する）</p> <p>②設計荷重に対して、設計対象施設の構造健全性等が維持されて安全機能が維持される方針であること。</p>	<p>⇒設計竜巻の特性値を以下の通り設定している。</p> <p>最大気圧低下率<math>((dp/dt)_{max})</math> : 45 hPa/s</p> <p>⇒ガイドに従い、設計竜巻荷重及び組合せ荷重を設定している。</p> <p>⇒設計竜巻からの防護設計方針を以下の通りとし、安全機能を損なわない設計とする方針としている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 建屋に設置され防護される竜巻防護施設 建屋による防護により、設計荷重（竜巻）の影響を受けない設計とする。</li> <li>・ 建屋に設置されるが防護が期待できない竜巻防護施設 建物・構築物による防護により、設計荷重（竜巻）の影響を受けない</li> </ul>

補 2-1-18

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>4.2 設計対象施設 「2.1 設計対象施設」に示したとおりとする。</p> <p>4.3 設計荷重の設定 4.3.1 設計竜巻荷重の設定 「2.2.2 設計対象施設に作用する荷重」の「(1) 設計竜巻荷重」で示した「風圧力」、「気圧差による圧力」及び「飛来物の衝撃荷重」について、それぞれ技術的見地等から妥当な荷重を設定する。</p> <p>-----                  解説 4.3.1 設計竜巻荷重の設定                  解説 4.3.1.1 設計竜巻の最大風速による風圧力の設定                  解説 4.3.1.1.1 概要                  設計竜巻の最大風速(<math>V_D</math>)等に基づいて、設計竜巻によって設計対象施設に作用する風圧力を設定する。                  -----                  解説 4.3.1.1.2 基本的な考え方                  (1) 風圧力の算定に用いる風力係数</p>	<p>設計とする。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・屋外の竜巻防護施設 本施設は竜巻防護施設を全て燃料加工建屋に収納することから、該当する施設はない。</li> <li>・外気と繋がっている竜巻防護施設 設計荷重(竜巻)の影響を受けても安全機能を損なわない設計とする。</li> </ul> <p>⇒ 「2.1 設計対象施設」参照。</p> <p>⇒ 「2.2.2 設計対象施設に作用する荷重」参照。</p>

補 2-1-19

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>竜巻によって生じた被害状況と対応する最大風速は、一般的には、竜巻等の非定常な流れ場の気流性状を考慮した風力係数を用いるのではなく、いわゆる通常の強風等を対象とした風力係数を用いて、逆算により推定されることから、本ガイドにおける風圧力の算定には、通常の強風等を対象とした風力係数を用いることを基本とする。</p> <p>(2) 設計竜巻による鉛直方向の風圧力</p> <p>竜巻による最大風速は、一般的には、竜巻によって生じた被害状況と対応する水平方向の風速として算定される。しかしながら、実際の竜巻によって生じた被害は、少なからず鉛直方向の風速の影響も受けていると考えられる。</p> <p>よって、本ガイドでは、設計竜巻の水平方向の最大風速(<math>V_D</math>)には、鉛直方向の風速の影響も基本的には含まれているとみなす。</p> <p>ただし、鉛直方向の風圧力に対して特に脆弱と考えられる設計対象施設が存在する場合は、<math>V_D</math> を入力値とした竜巻の数値解析結果等から推定される鉛直方向の最大風速等に基づいて算定した鉛直方向の風圧力を考慮した設計を行う。</p> <p>解説 4.3.1.1.3 設計竜巻による風圧力の設定</p> <p>設計竜巻の最大風速(<math>V_D</math>)による風圧力(<math>P_D</math>)の算定について以下に示す。</p> <p>設計竜巻の水平方向の最大風速によって設計対象施設(屋根を含む)に作用する風圧力(<math>P_D</math>)は、「建築基準法施行令」、「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説(2004)」等を準用して、下式により算定する。</p> <p>なお、(4.2)式の <math>V_D</math> は最大瞬間風速であり、「建築基準法施行令」、「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説(2004)」の最大風速と定義が異なることに留意する。</p> $P_D = q \cdot G \cdot C \cdot A \cdots (4.1)$ <p>ここで、<math>q</math> は設計用速度圧、<math>G</math> はガスト影響係数、<math>C</math> は風力係数、<math>A</math> は施設の受圧面積を表し、<math>q</math> は下式による。</p>	<p>⇒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弱いと考えられる設計対象施設が存在する場合には、鉛直方向の最大風速に基づいて算出した鉛直方向の風圧力による荷重についても考慮した設計としている。</p> <p>⇒ガイドに示される式により風圧力を算定することとしている。</p>



原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p><math>q = (1/2) \cdot \rho \cdot V_D^2 \cdots (4.2)</math></p> <p>ここで、<math>\rho</math> は空気密度、<math>V_D</math> は設計竜巻の最大風速である。</p> <p>(4.1)式に示すように、風圧力(<math>P_D</math>)は、(4.2)式で求められる設計用速度圧(<math>q</math>)に、ガスト影響係数(<math>G</math>)、風力係数(<math>C</math>)及び施設の受圧面積(<math>A</math>)を乗じて算定する。</p> <p>ガスト影響係数<math>G</math>は、風の乱れによる建築物の風方向振動の荷重効果を表すパラメータであり、強風中における建築物の最大変位と平均変位の比で定義される。本ガイドの最大竜巻風速(<math>V_D</math>)は、最大瞬間風速として扱うことから<math>G=1.0</math>を基本とする。</p> <p>風力係数(<math>C</math>)は、「建築基準法施行令」、「日本建築学会 建築物荷重指針・同解説(2004)」等を参考として、施設の形状や風圧力が作用する部位(屋根、壁等)に応じて適切に設定する。</p> <p>解説 4.3.1.2 設計竜巻における気圧低下によって生じる設計対象施設内外の気圧差による圧力の設定</p> <p>解説 4.3.1.2.1 概要</p> <p>前記において設定した設計竜巻による最大気圧低下量(<math>\Delta P_{max}</math>)及び最大気圧低下率(<math>dP/dt</math>)<sub>max</sub>に基づいて設計対象施設に作用する気圧差による圧力を設定する。</p> <p>解説 4.3.1.2.2 基本的な考え方</p> <p>設計竜巻によって引き起こされる最大気圧低下量及び最大気圧低下率によって設計対象施設に作用する圧力を算定する際の基本的な考え方を以下に示す。なお、以下の考え方は、米国 NRC 基準類<sup>(参 12)</sup>を参考としている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>完全に開かれた構築物等の施設が竜巻に曝されたとき、施設の内圧と外圧は竜巻通過中に急速に等しくなる。したがって、施設の内外の気圧の変化はゼロに近づくとみなせる。</li> <li>閉じた施設(通気がない施設)では、施設内部の圧力は竜巻通過以前と以後で等しいとみなせる。他方、施設の外側の圧力は竜巻の通過中に変化し、施設内外に圧力差を生じさせ</li> </ul>	<p>⇒風圧力の算定に用いるガスト影響係数<math>G=1.0</math>としている。</p> <p>⇒風力係数は、施設の形状や風圧力が作用する部位に応じて設定することとしている。</p> <p>⇒ガイドに示される式により気圧差による圧力を設定することとしている。</p> <p>⇒外気と隔離されている区画の境界部が気圧差による圧力影響を受ける設備並びに竜巻防護施設を設置する施設の建屋壁及び屋根においては、設</p>

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>る。この圧力差により、閉じた施設の隔壁（構築物等の屋根・壁及びタンクの頂部・胴部等）に外向きに作用する圧力が生じるとみなせる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>部分的に閉じた施設（通気がある施設等）については、竜巻通過中の気圧変化により施設に作用する圧力は複雑な過程により決定される。また、部分的に閉じた設計対象施設への圧力値・分布の精緻な設定が困難な場合は、施設の構造健全性を評価する上で厳しくなるように作用する圧力を設定することとする。</li> </ul> <p>解説 4.3. 1.2.3 気圧差による圧力を作用させる施設の設定</p> <p>気圧差による圧力を作用させる対象は、原子力発電所の図面等を参照して十分に検討した上で設定する。</p> <p>(1) 建屋・構築物等</p> <p>建屋・構築物等の主要な部材（壁、屋根等）に気圧差による圧力を作用させることは当然であるが、気圧差による圧力の影響を受けることが容易に想定される以下の施設については、気圧差による圧力の影響について検討を行い、当該施設が破損した場合の安全機能維持への影響についても確認を行うこととする。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>建屋・構築物等の開口部に設置された窓、扉、シャッター等</li> <li>外気と隔離されているとみなせる区画の隔壁等（天井等）</li> </ul> <p>(2) 設備</p> <p>設備の主要な部材に気圧差による圧力を作用させることは当然であるが、気圧差による圧力の影響を受けることが容易に想定される以下の設備については、気圧差による圧力の影響について検討を行い、当該設備が破損した場合の安全機能維持への影響についても確認を行うこととする。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>外気と隔離されているとみなせる区画の境界部（空調系ダクト類等）</li> <li>圧力差の影響を受け得る計器類や空調装置等</li> </ul>	<p>計竜巻による気圧低下によって生じる設計対象施設の内外の気圧差による圧力荷重を考慮し、より厳しい結果を与える「閉じた施設」を想定して評価を行うこととしている。例えば、開口が存在する建屋の健全性評価においては「閉じた施設」を想定することで気圧差の影響を加味して保守的に評価している。</p> <p>⇒建屋（竜巻防護施設を設置する施設）については、気圧差による荷重を含む設計荷重（竜巻）に対して安全機能を損なわない設計とすることとしている。</p> <p>⇒気圧差の影響を受けることが想定される設備（建屋内の施設で外気と繋がっている竜巻防護施設）については、気圧差による荷重を受けても安全機能を損なわない設計とすることとしている。</p>

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>解説 4.3.1.3 設計竜巻による飛来物が設計対象施設に衝突する際の衝撃荷重の設定</p> <p>解説 4.3.1.3.1 概要</p> <p>設計竜巻の最大風速(<math>V_D</math>)及び特性値等に基づいて、設計飛来物を選定あるいは設定し、それら設計飛来物の飛来速度を設定する。そして、設計飛来物が設定した飛来速度で設計対象施設に衝突することを想定して、飛来物の衝突による設計対象施設への衝撃荷重を設定する。</p> <p>解説 4.3.1.3.2 基本的な考え方</p> <p>竜巻等の突風による被害は、風圧力によって引き起こされるだけでなく、飛来物による被害もかなりの部分を占める。また、竜巻による飛来物は上昇気流の影響もあって比較的遠方まで運ばれる可能性がある。これらの事項に留意して、設計対象施設に到達する可能性がある飛来物について検討を行った上で、設計飛来物を選定あるいは設定する。</p> <p>一般的には、遠方からの飛来物は相対的に重量が軽いものが多く、仮に衝突した場合でも衝撃荷重は相対的に小さいと考えられることから、設計対象施設に到達する可能性がある飛来物を検討する範囲は、原子力発電所の敷地内を原則とする。ただし、原子力発電所の敷地外からの飛来物による衝撃荷重が、原子力発電所の敷地内からの飛来物による衝撃荷重を上回ると想定され得る場合は、原子力発電所の敷地外からの飛来物も考慮する。</p> <p>また、設計飛来物として、最低限以下の①～③を選定あるいは設定することとする。なお、以下の①～③の設定にあたっては、米国 NRC の基準類<sup>(※13)</sup>を参考とした。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>①大きな運動エネルギーをもつ飛来物 (自動車等)</li> <li>②施設の貫入抵抗を確認するための固い飛来物 (鉄骨部材等)</li> <li>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 (砂利等)</li> </ul>	<p>⇒ガイドを参考に実施した現地調査の結果やガイドに例示された飛来物を検討することにより、設計飛来物を設定している。</p> <p>また、ガイドを参考として設計飛来物の衝撃荷重を算出することとしている。</p> <p>⇒ガイドを参考に実施した現地調査の結果やガイドに例示された飛来物を検討することにより、設計飛来物を設定している。</p> <p>⇒設計飛来物の設定にあたっては、敷地外から飛来するおそれのあるものとして風力発電施設のブレードについても敷地への到達の可能性を検討したうえで除外している。</p> <p>⇒設計対象施設に衝突する可能性のある飛来物のうち、寸法、質量、形状から飛来の有無を判断し、運動エネルギー及び貫通力を考慮するとともに、竜巻防護対策によって防護できない可能性があるものを固縛、撤去することによって飛来させないことを前提とした上で、鋼製材及び鋼製パイプを設計飛来物としている。</p>

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>解説 4.3.1.3.3 設計飛来物の速度の設定</p> <p>(1) 基本的な考え方</p> <p>設計飛来物に設定する速度は、設計竜巻によって飛来した際の最大速度とする。設計飛来物の最大水平速度 (<math>V_{Hmax}</math>) は、非定常な乱流場を数値的に解析できる計算手法等による計算結果等に基づいて設定することを基本とする。ただし、安全側の設計になるように、設計竜巻の最大風速 (<math>V_p</math>) を設計飛来物の最大水平速度として設定してもよい。</p> <p>設計飛来物の最大鉛直速度 (<math>V_{Vmax}</math>) は、最大水平速度と同様に計算等により求めても良いし、米国 NRC の基準類<sup>(参4)</sup>を参考に設定した下式により算定してもよい。</p> $V_{Vmax} = (2/3) \cdot V_{Hmax} \cdots (4.3)$ <p>ここで、<math>V_{Hmax}</math> は、設計飛来物の最大水平速度を表す。</p> <p>(2) 設計飛来物の設定例</p> <p>設計飛来物の選定あるいは設定、並びに設計飛来物の最大速度を設定する際の参考として、解説表 4.1 に飛来物及びその最大速度の設定例を示す。解説表 4.1 の棒状物、板状物及び塊状物の最大水平速度 (<math>V_{Hmax}</math>) は、設計竜巻の最大風速 (<math>V_p</math>)=100(m/s) とした条件下で解析的に算定した結果<sup>(参3)</sup>である。また、解説表 4.1 の最大鉛直速度 (<math>V_{Vmax}</math>) は、米国 NRC の基準類<sup>(参4)</sup>を参考として設定した(4.3)式を用いて算定した結果である。</p> <p>なお、解説表 4.1 に示した飛来物よりも小さな開口部を飛来物が通過することの影響等を確認する場合は、さらに小さな飛来物を設定する必要がある。</p>	<p>⇒設計飛来物の最大水平速度は、ランキン渦モデルを仮定し「竜巻による物体の浮上・飛来解析コード」を用いて算出した結果及びガイドに記載された値を参考に設定している。</p> <p>⇒設計飛来物の最大鉛直速度は、ガイドに示される米国NRCの基準類を参考に設定し、最大水平速度の2/3としている。</p> <p>⇒設計対象施設に衝突する可能性のある飛来物のうち、寸法、質量、形状から飛来の有無を判断し、運動エネルギー及び貫通力を考慮するとともに、竜巻防護対策によって防護できない可能性があるものを固縛、撤去することによって飛来させないことを前提とした上で、鋼製材及び鋼製パイプを設計飛来物としている。</p> <p>⇒開口部の洗い出しにおいては、建屋図面の確認を行い、全ての開口部を抽出している。なお、設計飛来物よりも小さい開口部はないことを確認している。</p>

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド

ガイドへの適合性の確認結果

解説表 4.1 飛来物及び最大速度の設定例 (V<sub>D</sub>=100(m/s)の場合)

飛来物の種類	棒状物		板状物	塊状物	
	鋼製パイプ	鋼製材	コンクリート板	コンテナ	トラック
サイズ (m)	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2	長さ×幅×厚さ 1.5×1×0.15	長さ×幅×奥行 2.4×2.6×6	長さ×幅×奥行 5×1.9×1.3
質量 (kg)	8.4	135	540	2300	4750
最大水平速度 M <sub>V</sub> H <sub>max</sub> (m/s)	49	51	30	60	34
最大鉛直速度 M <sub>V</sub> V <sub>max</sub> (m/s)	33	34	20	40	23

解説 4.3.1.3.4 設計飛来物の衝突方向、衝突範囲及び衝撃荷重の設定

設計飛来物が設計対象施設に衝突する方向は、安全側の設計になるように設定する。

設計飛来物が到達する範囲について解析結果等から想定される場合は、その技術的根拠を示した上で設計飛来物が到達しない範囲を設定することができる。

各設計飛来物による衝撃荷重は、設計飛来物の形状及び剛性等の機械的特性を適切に設定した衝撃解析等の計算結果に基づいて設定するか、あるいは、安全側の設計となるように配慮して設計飛来物を剛体と仮定して設定してもよい。

解説 4.3.1.4 設計竜巻荷重の組み合わせ

設計対象施設の設計に用いる設計竜巻荷重は、設計竜巻による風圧力による荷重(W<sub>w</sub>)、気圧差による荷重(W<sub>p</sub>)、及び設計飛来物による衝撃荷重(W<sub>M</sub>)を組み合わせた複合荷重とし、複合荷重 W<sub>T1</sub> 及び W<sub>T2</sub> は、米国 NRC の基準類 (参<sup>12</sup>)を参考として設定した下式により算定する。

$$W_{T1} = W_p \cdots (4.4)$$

$$W_{T2} = W_w + 0.5 \cdot W_p + W_M \cdots (4.5)$$

ここで、(4.4)式及び(4.5)式の各変数は下記のとおり。

⇒竜巻ガイドを参考に、衝突時の荷重が大きくなる向きで設計飛来物が設計対象施設に衝突した場合の衝撃荷重を算出することとしている。また、貫通評価においても、設計飛来物の貫通力が大きくなる向きで衝突することを考慮して評価を行うこととしている。

⇒ガイドに従って設計竜巻荷重の組み合わせを考慮することとしている。

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p> <math>W_{T1}</math>、<math>W_{T2}</math>：設計竜巻による複合荷重  <math>W_W</math>：設計竜巻の風圧力による荷重  <math>W_P</math>：設計竜巻による気圧差による荷重  <math>W_M</math>：設計飛来物による衝撃荷重                      なお、設計対象施設には <math>W_{T1}</math> 及び <math>W_{T2}</math> の両荷重をそれぞれ作用させる。                 </p> <p>4.3.2 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重の設定</p> <p>「2.2.2 設計対象施設に作用する荷重」の「(2) 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重」に示した各荷重について、それぞれ技術的見地等から妥当な荷重として設定し、設計竜巻荷重と組み合わせる。</p> <p>4.4 施設の構造健全性の確認</p> <p>4.4.1 概要</p> <p>設計竜巻荷重及びその他組み合わせ荷重（常時作用している荷重、竜巻以外の自然現象による荷重、設計基準事故時荷重等）を適切に組み合わせた設計荷重に対して、設計対象施設、あるいはその特定の区画<sup>(注 4.1)</sup>の構造健全性が維持されて安全機能が維持される方針であることを確認する。</p> <p>(注 4.1) 竜巻防護施設を内包する区画。</p> <p>4.4.2 建屋、構築物等の構造健全性の確認</p> <p>設計荷重に対して、建屋・構築物等の構造健全性が維持されて安全機能が維持される方針であることを確認する。</p>	<p>⇒設計対象施設には <math>W_{T1}</math> 及び <math>W_{T2}</math> の両荷重をそれぞれ作用させることとしている。</p> <p>⇒設計竜巻荷重と組み合わせる荷重として以下のものを考慮することとしている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 竜巻防護施設等に常時作用する荷重及び運転時荷重（死荷重（固定荷重）、活荷重（積載荷重、機器・配管からの荷重等）</li> <li>・ 竜巻以外の自然現象による荷重（積雪）</li> </ul>

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>(1) 設計荷重によって施設に生じる変形・応力等の算定</p> <p>建屋・構築物等の形状や特徴等を反映して設定した設計荷重によって設計対象施設に生じる変形や応力等を算定する方針である。設計対象施設に生じる変形や応力等は、その技術的な妥当性を確認した上で、原則として、現行の法律及び基準類<sup>(注4.2)</sup>等に準拠して算定する。</p> <p>(2) 構造健全性の確認</p> <p>「(1) 設計荷重によって施設に生じる変形・応力等の算定」で算定される変形・応力等に基づいて、設計対象施設（建屋・構築物等）が以下の構造健全性評価基準を満足する方針であることを確認する。</p> <p>①竜巻防護施設（外殻となる施設等による防護機能が確認された竜巻防護施設を除く）</p> <p>設計対象施設が終局耐力等の許容限界<sup>(注4.2)</sup>に対して妥当な安全余裕を有している。</p> <p>②竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設</p> <p>1)設計対象施設あるいはその特定の区画<sup>(注4.3)</sup>が、終局耐力等の許容限界<sup>(注4.2)</sup>に対して妥当な安全余裕を有している。</p> <p>2)設計飛来物が設計対象施設あるいはその特定の区画<sup>(注4.3)</sup>に衝突した際に、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えない。<sup>(注4.4)</sup></p> <p>(注4.2) 建築基準法、日本工業規格、日本建築学会及び土木学会等の規準・指針類、並びに日本電気協会の原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1987）等に準拠する。</p> <p>(注4.3) 竜巻防護施設を内包する区画。</p> <p>(注4.4) 貫通及び裏面剥離（コンクリート等の部材に衝突物が衝突した際に、衝突面の裏面でせん断破壊等に起因した剥離が生じる破壊現象）に対して、施設の構造健全性を確認することを基本とする。</p>	<p>⇒設計竜巻からの防護設計方針を以下の通りとし、安全機能を損なわない設計とする方針としている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・竜巻防護施設を設置する施設</li> </ul> <p>設計荷重（竜巻）に対して施設内の竜巻防護施設の安全機能を損なわない設計とする。設計飛来物の衝突に対しては、貫通、裏面剥離を防止し、竜巻防護施設を設置する区画の構造健全性を確保することにより、竜巻防護施設の安全機能を損なわない設計とする。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設</li> </ul> <p>竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設に該当する施設はない。</p>

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>4.4.3 設備の構造健全性の確認</p> <p>設計荷重に対して、設備（系統・機器）の構造健全性が維持されて安全機能が維持される方針であることを確認する。</p> <p>(1) 設計荷重によって施設に生じる変形・応力等の算定</p> <p>設備の形状や特徴等を反映して設定した設計荷重によって設計対象施設に生じる変形や応力等を算定する方針である。設計対象施設に生じる変形や応力等は、その技術的な妥当性を確認した上で、原則として、現行の法律及び基準類<sup>(注4.5)</sup>等に準拠して算定する。</p> <p>(2) 構造健全性の確認</p> <p>「(1) 設計荷重によって施設に生じる変形・応力等の算定」で算定される変形・応力等に基づいて、設計対象施設（設備）が以下の構造健全性評価基準を満足する方針であることを確認する。</p> <p>①竜巻防護施設（外殻となる施設等による防護機能が確認された竜巻防護施設を除く）</p> <p>設計対象施設が許容応力度等に基づく許容限界<sup>(注4.5)</sup>に対して適切な安全余裕を有している。</p> <p>②竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設</p> <p>1)設計対象施設あるいはその特定の区画<sup>(注4.6)</sup>が、許容応力度等に基づく許容限界<sup>(注4.5)</sup>に対して適切な安全余裕を有している。</p> <p>2)設計飛来物が設計対象施設あるいはその特定の区画<sup>(注4.6)</sup>に衝突した際に、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えない。<sup>(注4.7)</sup></p> <p>(注4.5) 建築基準法、日本工業規格、日本建築学会及び土木学会等の規準・指針類、並びに日本電気協会の原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1987）等に準拠する。</p> <p>(注4.6) 竜巻防護施設を内包する区画。</p>	<p>⇒設計竜巻からの防護設計方針を以下の通りとし、安全機能を損なわない設計とする方針としている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・建屋に設置され防護される竜巻防護施設 建屋による防護により、設計荷重（竜巻）の影響を受けない設計とする。</li> <li>・建屋に設置されるが防護が期待できない竜巻防護施設 建物・構築物による防護により、設計荷重（竜巻）の影響を受けない設計とする。</li> <li>・屋外の竜巻防護施設 本施設は竜巻防護施設を全て燃料加工建屋に収納することから、該当する施設はない。</li> <li>・外気と繋がっている竜巻防護施設 設計荷重（竜巻）の影響を受けても安全機能を損なわない設計とする。</li> <li>・竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設に該当する施設はない。</li> </ul>



原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>(注 4.7) 貫通及び裏面剥離（コンクリート等の部材に衝突物が衝突した際に、衝突面の裏面 でせん断破壊等に起因した剥離が生じる破壊現象）に対して、施設の構造健全性を確 認することを基本とする。</p> <p>4.5 その他の確認事項</p> <p>4.4 に示す以外の確認事項については、原子力発電所の図面等を参照して十分に検討した上 で設定する。例えば、中央制御室等の重要な区画等や非常用発電機等の重要な設備等に繋がる 給排気ダクト類へ作用する風圧力が安全機能維持に与える影響等、安全機能維持の観点から重 要と考えられる確認事項を設定する。そして、それぞれの項目について検討を行い、安全機能 が維持される方針であることを確認する。</p> <p>5. 竜巻随伴事象に対する考慮</p> <p>5.1 概要</p> <p>竜巻随伴事象に対して、竜巻防護施設の安全機能が維持される方針であることを確認する。</p> <p>5.2 基本的な考え方及び検討事項</p> <p>検討対象とする竜巻随伴事象は、原子力発電所の図面等を参照して十分に検討した上で設定 する。</p> <p>ただし、竜巻随伴事象として容易に想定される以下の事象については、その発生の可能性に ついて検討を行い、必要に応じてそれら事象が発生した場合においても安全機能が維持される 方針であることを確認する。</p>	<p>⇒本施設の配置をもとに、各々の施設への竜巻の影響を検討し、随伴事象 を検討している。</p> <p>⇒竜巻随伴事象として火災、溢水、外部電源喪失を想定し、これらの事象 に対しても竜巻防護施設が安全機能を損なわない設計とすることとして いる。</p>

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>(1) 火災</p> <p>設計竜巻等により燃料タンクや貯蔵所等が倒壊して、重油、軽油及びガソリン等の流出等に起因した火災が発生した場合においても、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えない。</p> <p>(2) 溢水等</p> <p>設計竜巻による気圧低下等に起因した使用済燃料プール等の水の流出、屋外給水タンク等の倒壊による水の流出等が発生した場合においても、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えない。</p> <p>(3) 外部電源喪失</p> <p>設計竜巻、設計竜巻と同時発生する雷・雹等、あるいはダウンバースト等により、送電網に関する施設等が損傷する等して外部電源喪失に至った場合においても、竜巻防護施設の安全機能の維持に影響を与えない。</p> <p>6. 附則</p> <p>この規定は、平成25年7月8日より施行する。</p> <p>本ガイドに記載されている以外の計算方法等を設計で使用する場合は、技術的見地等からその妥当性を示す必要がある。</p>	<p>⇒竜巻により敷地内にある危険物タンクの損傷、漏えい及び防油堤内での火災の発生を想定しても、竜巻防護施設の安全機能に影響を与えない設計とすることとしている。</p> <p>設計飛来物の侵入により竜巻防護施設へ影響を及ぼし得る開口部については、建物・構築物により設計飛来物の侵入を防止する設計を行うことを考慮するとから、飛来物の侵入及び建屋内での火災の発生を防止する設計とすることとしている。</p> <p>⇒屋外タンクの破損による溢水を想定して溢水源と竜巻防護施設の位置関係を踏まえた影響評価を行った上で、竜巻防護施設の安全機能に影響を与えない設計とすることとしている。</p> <p>⇒設計竜巻と同時に発生する外部電源喪失については、非常用所内電源系統を竜巻から防護することで、安全機能を維持する設計とすることとしている。</p>

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド	ガイドへの適合性の確認結果
<p>また、竜巻等の発生頻度、特性及びメカニズム等に関する情報、並びに竜巻等による被害の実情に関する情報等が不足している現在の日本の状況では、竜巻等に係る最新情報の調査・入手に努めるとともに、本ガイドは、最新情報を反映して適宜見直しを行うものとする。</p> <p>なお、将来に観測された竜巻の最大風速が、過去に観測された竜巻の最大風速を上回った場合は、本設計の妥当性について再度見直すこととする。</p>	

令和元年 11 月 29 日 RO

補足説明資料 3 - 2 (9 条 竜巻)

竜巻に対して防護する必要のある開口部の選定について

## 1. 選定方針

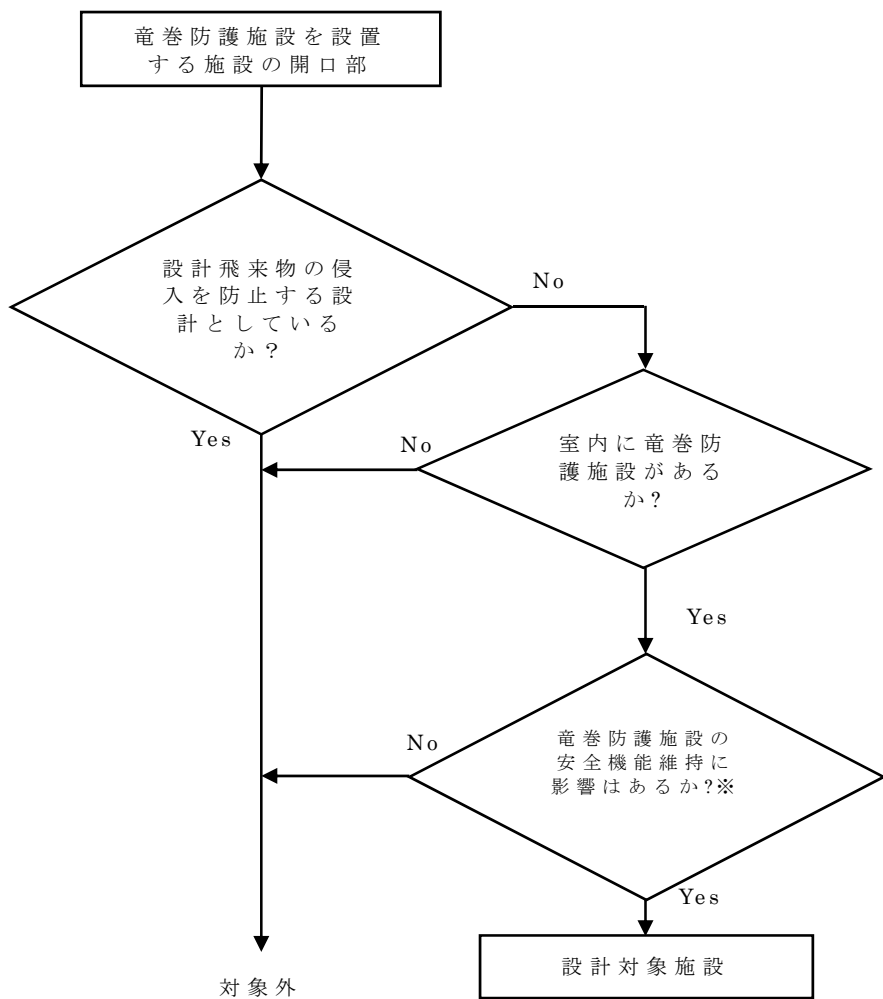
建屋に設置される開口部は、第3-2-1図に示す選定フローに従って竜巻防護施設への影響の有無を検討し、影響を受ける竜巻防護施設については、「建屋に設置されるが防護が期待できない竜巻防護施設」として選定する。

具体的には、開口部を有する室に竜巻防護施設が設置されているか図面によって確認し、設置されている場合には、開口部からの飛来物侵入により竜巻防護施設に影響を与えるおそれがあるか検討する。影響を与えるおそれがあると判断した開口部は防護対策を施す対象とするとともに、影響を受ける竜巻防護施設を、「建屋に設置されるが防護が期待できない竜巻防護施設」として選定する。

## 2. 設計対象施設の選定結果

第3-2-1図示す選定フローに従い選定した開口部は、非常用所内電源設備の非常用発電機の給気系及び排気系となる。

以上



< 建屋に設置されるが防護が期待できない竜巻防護施設 >  
 非常用所内電源設備の非常用発電機の給気系及び排気系

※設計飛来物が開口部を通じて室内へ侵入した場合に、安全上重要な施設へ衝突する可能性の有無を確認する。

第 3 - 2 - 1 図 開口部に対する設計対象施設の選定フロー

令和元年 11 月 29 日 RO

補足説明資料 3 - 3 (9 条 竜巻)

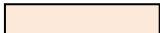
## 耐震Sクラス施設について


「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（以下、「竜巻ガイド」という。）においては、竜巻及びその随伴事象等によって施設の安全性を損なわない設計であることを確認する施設（以下、「竜巻防護施設」という。）は「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震Sクラスの設計を要求される設備（系統，機能）及び建屋，構築物等とされている。

これに対して、当社の竜巻影響評価においては安全上重要な施設を竜巻防護施設として選定しているが、当社の耐震Sクラス施設は全て安全上重要な施設であるため、竜巻ガイドで要求される竜巻防護施設を網羅している。

耐震重要度分類および安全上重要な施設の関係

耐震重要度分類	安全機能を有する施設	
Sクラス	安重	
Bクラス	安重	非安重
Cクラス	安重	非安重

 : ガイドに基づき設定した竜巻防護施設の範囲

 : 当社における竜巻防護施設の範囲

また、竜巻ガイドにおいて、耐震Sクラス施設に波及的影響を及ぼし得る施設についても設計対象施設として評価することを要求されているが、これについても上述の竜巻防護施設（安全上重要な施設）に波及的影響を及ぼして安全機能を喪失させるおそれがある施設を選定している。

以上



令和元年 11 月 29 日 RO

補足説明資料 4 - 1 (9 条 竜巻)

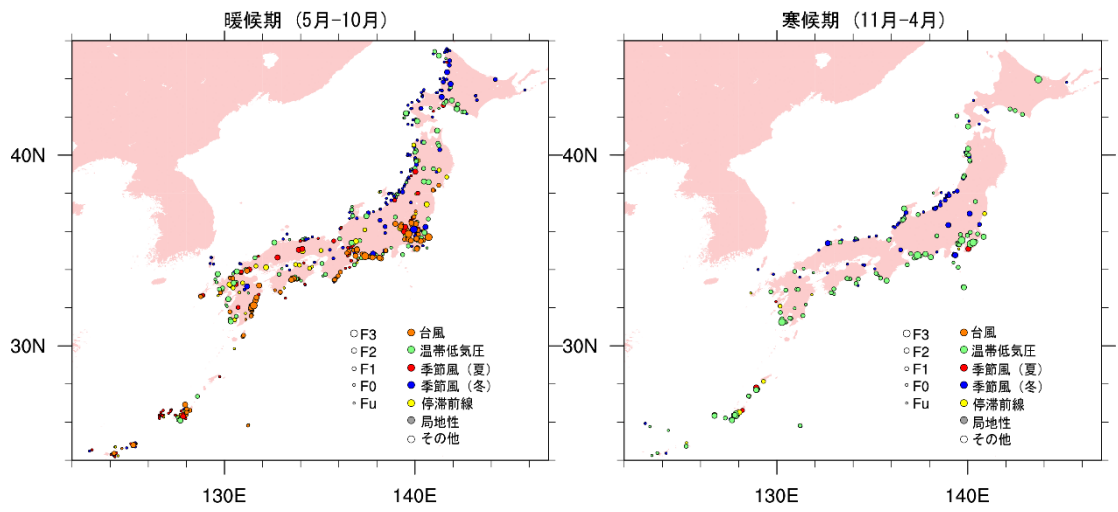
## 竜巻検討地域の設定について

## 1. 総観場に基づく気象条件

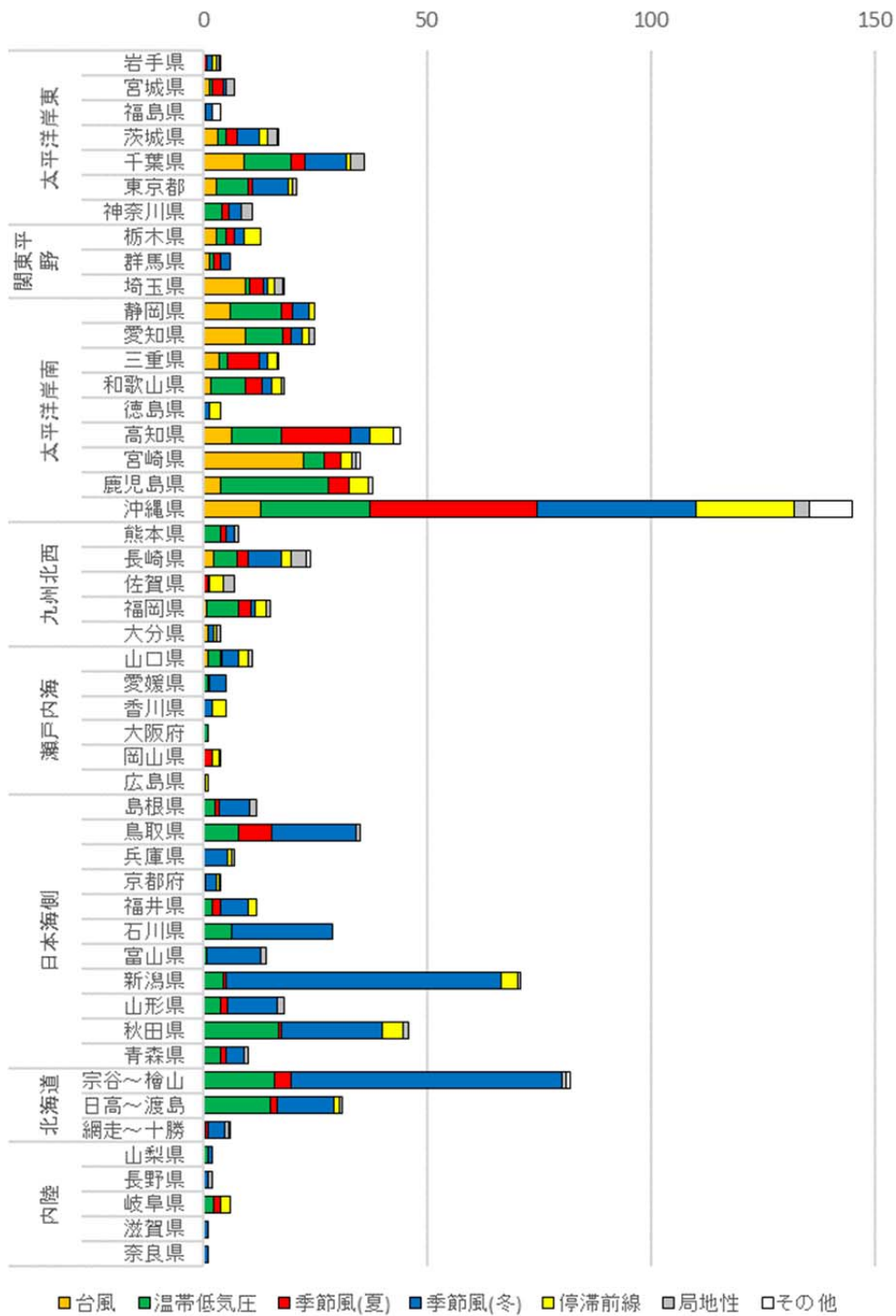
竜巻発生時の総観場は、東京工芸大学委託成果<sup>(1)</sup>を参考に、気象庁「竜巻等の突風データベース」の総観場を、竜巻を発生させる親雲の発生要因を考慮して7種(台風, 温帯低気圧, 季節風(夏), 季節風(冬), 停滞前線, 局地性及びその他)に再編した総観場を用い、竜巻の発生要因別の地域分布の特徴を把握した。

「竜巻等の突風データベース」において1961年1月～2013年12月に発生位置が示された竜巻の季節別の竜巻発生位置を第4-1-1図に示す。また、各都道府県での要因別発生数及び発生要因比率をそれぞれ第4-1-2図及び第4-1-3図に示す。

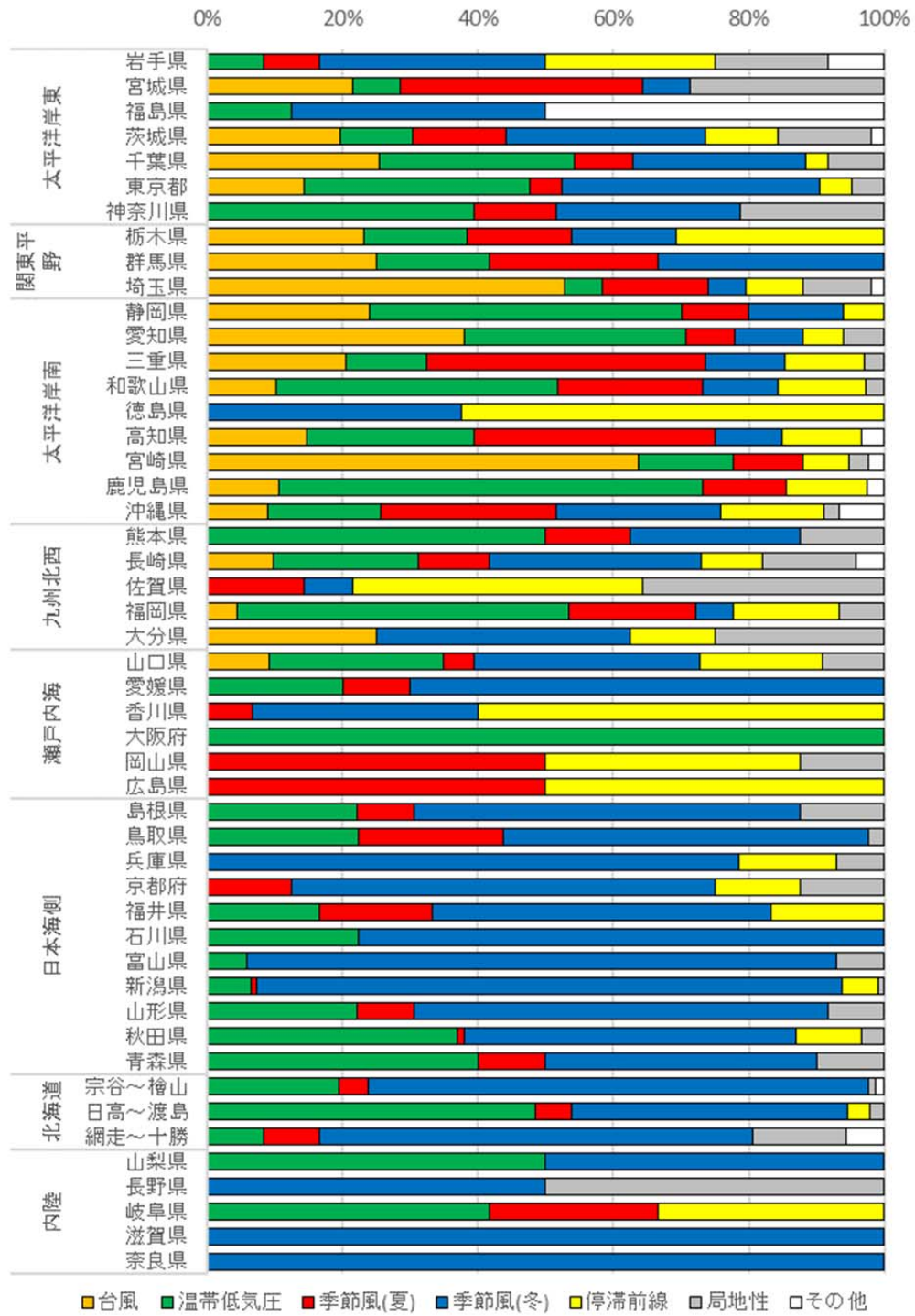
これらより、台風起因の竜巻は関東以西の太平洋側(特に東～南方向に開けた地域)で発生数が多く、F2及びF3スケールの竜巻も多いこと、温帯低気圧起因の竜巻は全国的に発生数が多く、F2及びF3スケールの竜巻もみられ、特に南～西方向に開けた地域はより発生数が多いことがわかる。また、季節風(夏)起因の竜巻は太平洋側や内陸を中心に、全国的に発生していること、季節風(冬)起因の竜巻は日本海側や関東以北で発生数が多いこと、停滞前線起因の竜巻は関東以西で発生していることがわかる。



第 4 - 1 - 1 図 季節別の竜巻発生位置  
(左：暖候期，右：寒候期)



第 4 - 1 - 2 図 各都道府県での要因別発生数



第 4 - 1 - 3 図 各都道府県での発生要因比率

## 2. 竜巻検討地域の設定

本施設が立地する地域の気候と竜巻発生 の観点での特徴を踏まえ、原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」(平成 25 年 6 月 19 日 原規技発第 13061911 号 原子力規制委員会決定)を参考に以下の a. ~ d. の条件を考慮して竜巻検討地域を設定する。第 4-1-4 図に竜巻検討地域を示す。

- a. 立地地域の気候及び竜巻発生 の観点での特徴を踏まえ、青森県(竜飛岬より太平洋側)から岩手県を基本とする。
- b. IAEA の基準<sup>(2)</sup>を参考に、本施設を中心とする 10 万 km<sup>2</sup> (半径約 180 km) の範囲を目安とし、その範囲に掛かる北海道南西部は、立地地域と同じ太平洋側に面していることを考慮して、竜巻検討地域に含める。
- c. 竜巻検討地域は、分水嶺及び関口武による気候区分<sup>(3)</sup>(1959)を参考に設定する。
- d. 本施設が海岸線から約 5 km の位置に立地していること及び竜巻の発生がほとんど海岸線付近であることから、海岸線に沿った海側 5 km 及び陸側 10 km の範囲を考える。

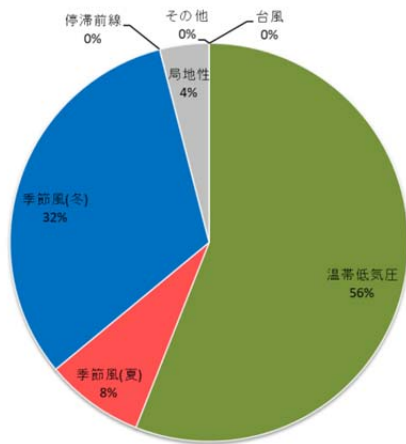
設定した竜巻検討地域の妥当性を確認するために、竜巻検討地域における竜巻の発生要因の出現比率と、日本海側及び太平洋側における出現比率とを比較した結果を第 4-1-5 図に示す。

竜巻検討地域では、温帯低気圧起因の竜巻が多く、太平洋側で多くみられる台風起因の竜巻は確認されていない。一方、北海道～山口県の日本海側では季節風（冬）起因の竜巻が多く、台風起因の竜巻は確認されていない。また、茨城県以西の太平洋側では竜巻検討地域と比較して、台風、季節風（夏）及び停滞前線起因の竜巻が多い。以上より、竜巻検討地域における竜巻の発生要因の出現比率は、日本海側及び太平洋側の出現比率とも傾向が異なっていることが確認できる。



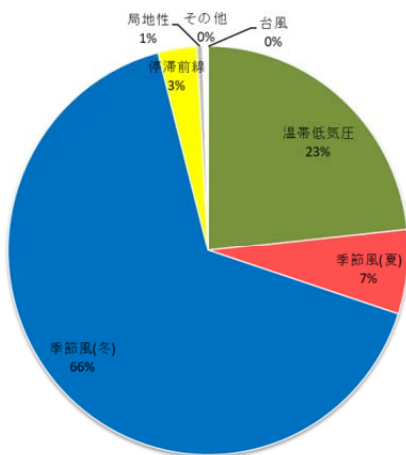
第4-1-4図 竜巻検討地域





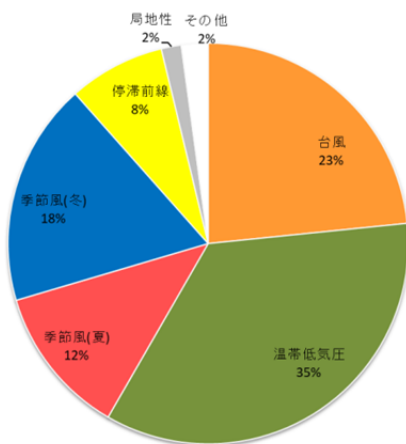
#### ◆ 竜巻検討地域

- 「温帯低気圧」を起源とする竜巻が多い。
- 太平洋側で多くみられる「台風」を起源とする竜巻は確認されていない。



#### ◆ 北海道～山口県の日本海側(223事例)

- 「季節風(冬)」を起源とする竜巻が多い。
- 「台風」を起源とする竜巻は確認されていない。



#### ◆ 茨城県以西の太平洋側(372事例)

- 竜巻検討地域と比較して、「台風」、「季節風(夏)」、「停滞前線」を起源とする竜巻が多い。
- 太平洋側から暖かく湿った気流が、竜巻の親雲の発達を促すと考えられる。

第 4 - 1 - 5 図 竜巻検討地域等における竜巻の発生要因の出現比率

### 3. 参考文献

- (1) 東京工芸大学. 平成 21～22 年度原子力安全基盤調査研究 (平成 22 年度): 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究. 2011-02.
- (2) IAEA Safety Standards Series No. SSG-18: 2011. Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. IAEA.
- (3) 関口武. “日本の気候区分”. 東京教育大学地理学研究報告. 東京教育大学理学部地理学教室, 1959-03.

以 上

令和元年 11 月 29 日 RO

補足説明資料 4 - 2 (9 条 竜巻)

## 竜巻検討地域の範囲設定について

竜巻検討地域の設定は、「竜巻影響評価ガイド」を参考に、本施設が立地する地域の気候及び竜巻発生の特徴を踏まえて実施する。

「竜巻影響評価ガイド」では、日本における竜巻の発生位置は海岸線付近に集中している傾向が伺えること及び原子力発電所が海岸線付近に立地していることを前提に、竜巻検討地域を陸側及び海側それぞれ5 kmを目安とするとしているが、立地地点が海岸線から5 kmの範囲を逸脱する場合は、海岸線付近で竜巻の発生が増大する特徴を踏まえ竜巻検討地域を設定することを定めている。

本施設は海岸線から5～10 km内陸に位置しており、ガイドにて示されている陸側及び海側5 kmの範囲を逸脱している。

したがって、本施設の竜巻検討地域は立地地点を包含する陸側10 kmをベースとし、海側5 kmも加えることにより、竜巻検討地域が保守的な設定となるよう考慮している。



「竜巻影響評価ガイド」（抜粋）

解説 3.2（2）原子力発電所が海岸線付近に立地する場合の  
竜巻検討地域の設定

……海岸線から5km以上離れた地域では、竜巻の発生数が急激に減少する傾向が見られる。以上の傾向を踏まえて、原子力発電所が海岸線付近に立地する場合は、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こととする。

なお、原子力発電所がこの範囲を逸脱する地域に立地する場合は、海岸線付近で竜巻の発生が増大する特徴を踏まえつつ竜巻検討地域の範囲を別途検討する必要がある。

以 上

令和元年 11 月 29 日 RO

補足説明資料 4 - 3 (9 条 竜巻)

## 竜巻検討地域の設定の妥当性について

### 1. 分水嶺によって竜巻検討地域を日本海側から区画することについて

I A E A の基準を参考に、本施設を中心とする 10 万  $\text{km}^2$  (半径約 180  $\text{km}$ ) の範囲を竜巻検討地域の目安とした。ただし、当該範囲内の日本海側については、分水嶺を境界とし、竜巻検討地域には含めない。

洋上から流入した温暖湿潤な大気が山岳を越えようとした場合、空気塊の上昇に伴い気温が低下し、昇り斜面上空で空気塊が飽和して降水粒子が生成され、湿潤不安定な状態が解消されることから、山岳を乗り越えた大気は大きな竜巻を引き起こしがたい。よって、発生する竜巻の特性は分水嶺を境界にして大きく異なることになる。

1961 年～2013 年 12 月の期間の竜巻の集計によると、日本海側では季節風（冬）を起源とする竜巻がほとんどを占めるのに対し、竜巻検討地域では、季節風（冬）を起源とする竜巻は少なく、温帯低気圧を起源とする竜巻が多い。（第 4 - 3 - 1 図）

このため、竜巻検討地域は分水嶺で区画することは妥当と考えられる。

## 2. 東北太平洋側（福島以北～岩手）の総観場について

東北太平洋側（福島以北～岩手）までの地域は，立地地域から半径約 180 k m の範囲外であるため，竜巻検討地域に含めない。

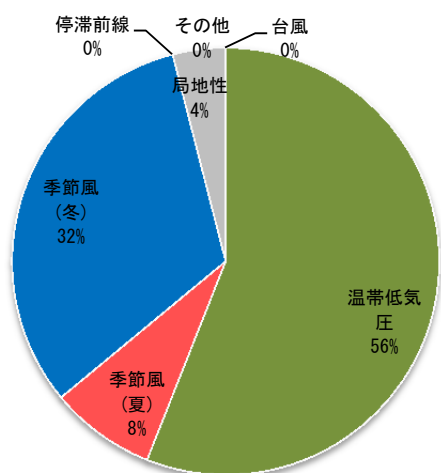
なお，東北太平洋側の地域での発生数は他地域に比べて少なく，地域特有の総観場は見られない。茨城以西では台風及び暖気移流に伴う竜巻が多く，このことが F 3 規模の竜巻の多さにつながっているのに対し，東北太平洋側では台風由来の竜巻が少ないことで茨城以西とは異なる特徴があるので，竜巻検討地域に茨城以西を含めることも適当でない。

（第 4 - 3 - 2 図）

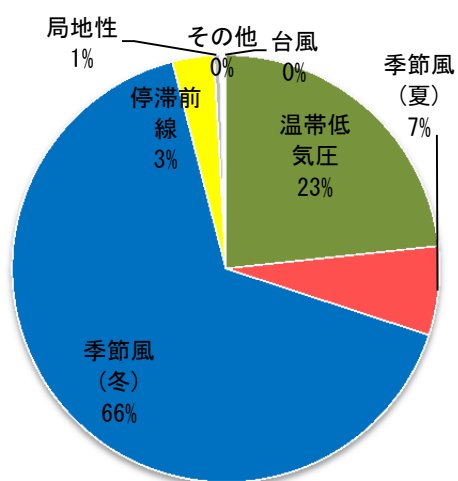
以 上



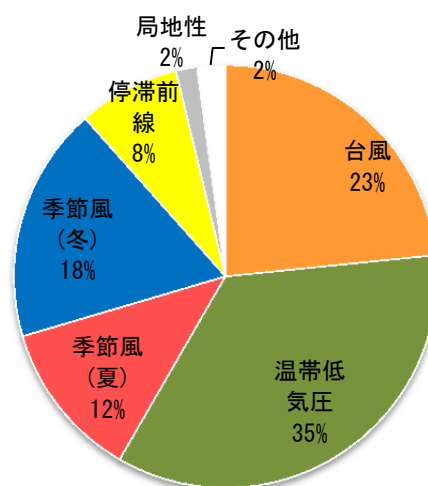
竜巻検討地域



日本海側

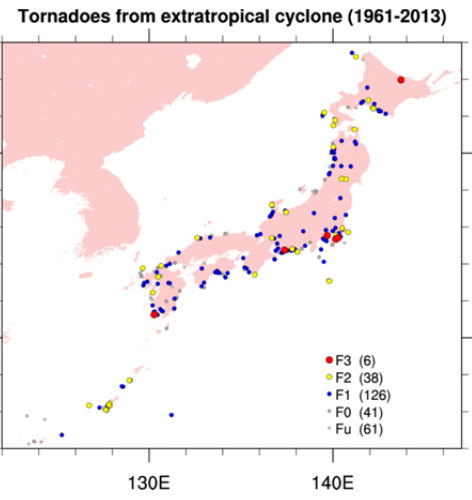
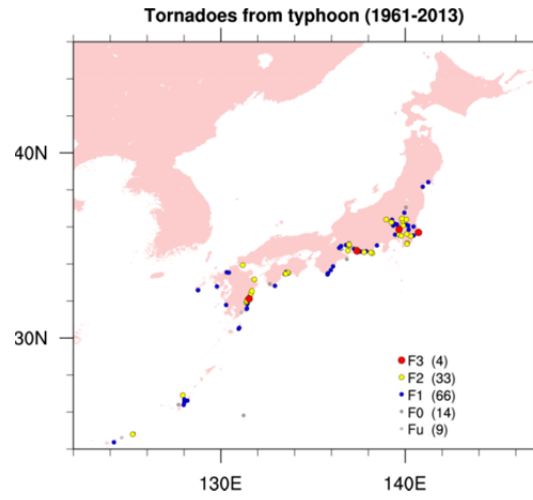


太平洋側



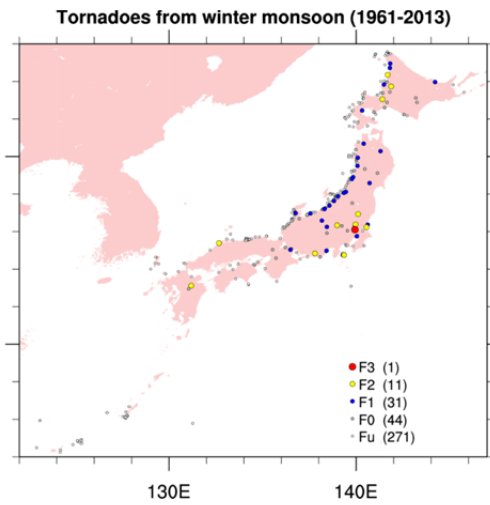
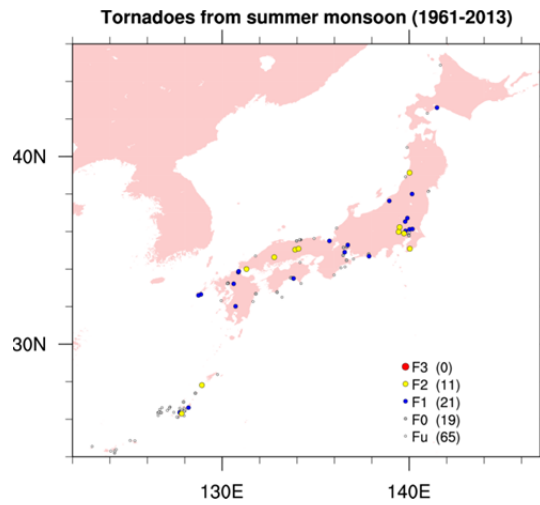
第 4 - 3 - 1 図 竜巻検討地域等における竜巻発生要因の出現比率

台風



温帯低気圧

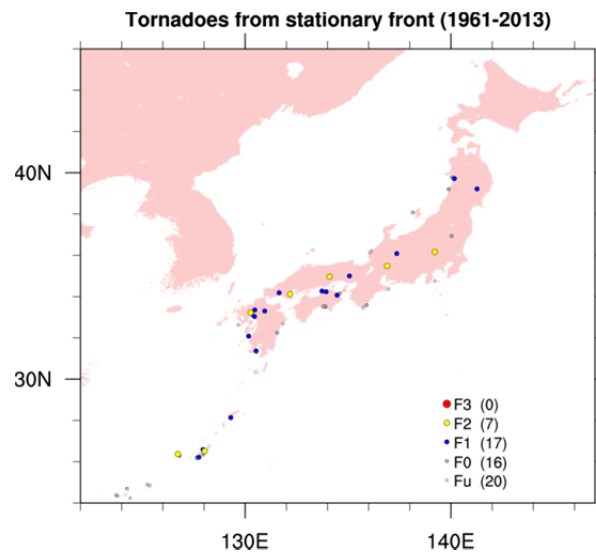
季節風 (夏)



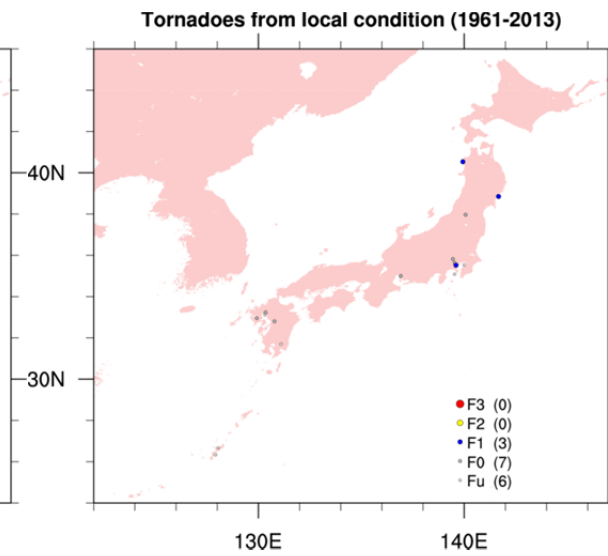
季節風 (冬)

第 4 - 3 - 2 図 竜巻の発生要因別地域分布

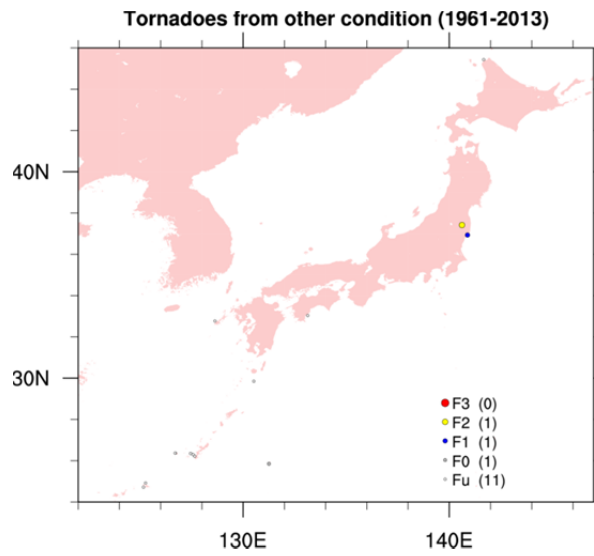
停滞前線



局地性



その他



補 4-3-5

第 4 - 3 - 2 図 竜巻の発生要因別地域分布 (つづき)

令和元年 11 月 29 日 RO

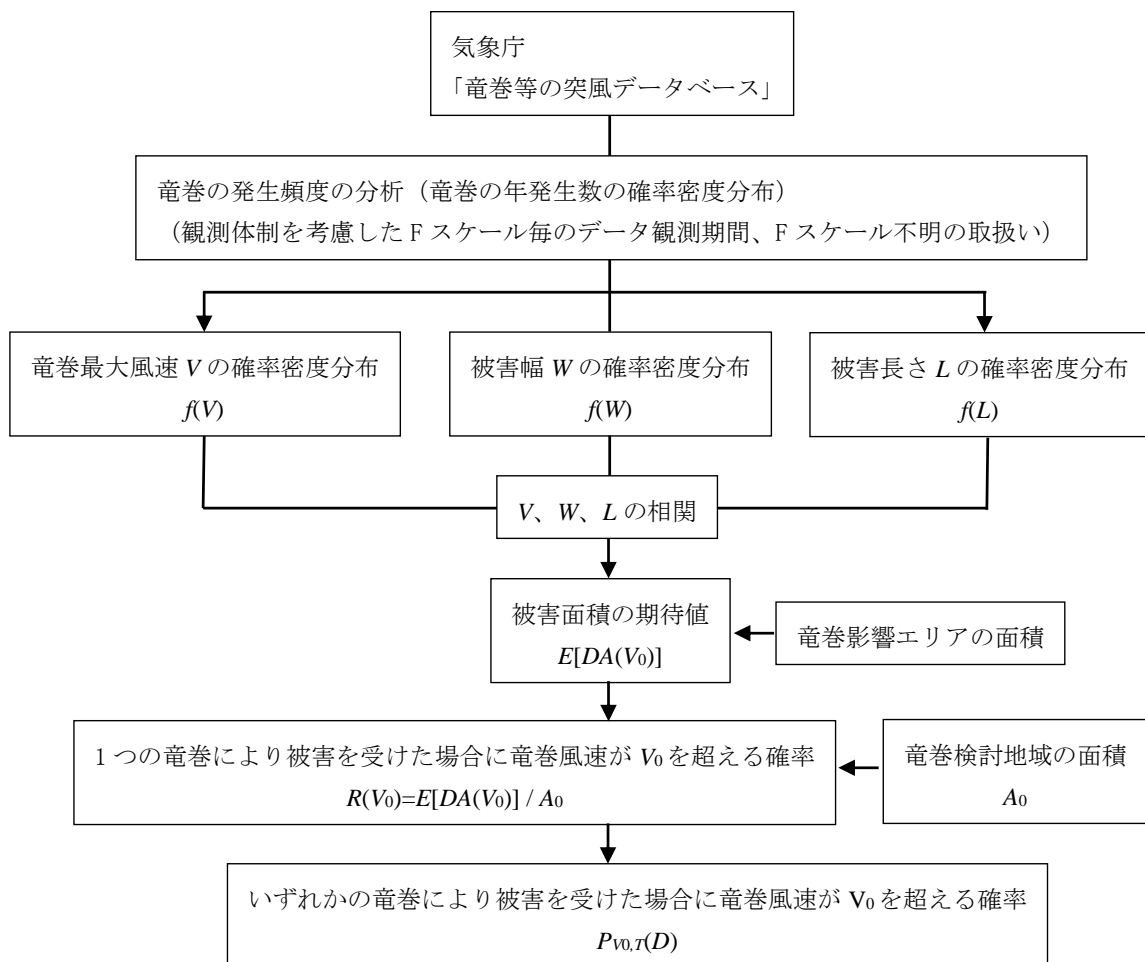
補足説明資料 4 - 4 (9 条 竜巻)

ハザード曲線による竜巻最大風速 ( $V_{B2}$ ) の計算について

1. 評価フロー

竜巻ガイドの解説 3.3.2 に例示された  $W e n \& C h u$ <sup>(1)</sup> 及び  $G a r s o n e t a l.$ <sup>(2)</sup><sup>(3)</sup> による最大風速  $V_{B2}$  を算定する。具体的な算定方法については、東京工芸大学委託成果「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」<sup>(4)</sup> を参考とする。

第 4-4-1 図にハザード曲線の算定フローを示す。



第 4-4-1 図 ハザード曲線の算定フロー  
補 4-4-1

## 2. 竜巻発生頻度の分析

### (1) 竜巻発生頻度の補正

気象庁「竜巻等の突風データベース」より、竜巻検討地域における1961年1月～2013年12月のデータを用いて、竜巻の発生数を分析する。観測体制が段階的に強化されたため、観測データの精度には差がある。特に2007年以降の発生数は非常に多くなっている。したがって、観測データを以下の3つの期間に分け、補正を行う。

- a. 2007年1月～2013年12月（7年間）
- b. 1991年1月～2013年12月（23年間）
- c. 1961年1月～2013年12月（53年間）

上記3つの観測期間それぞれに対して、竜巻発生数、年間平均発生数及びその標準偏差をFスケール毎に調査した結果を第1表に示す。

擬似的な53年間のデータや統計量は以下を基本的な考え方として作成した。

- a. F 0 及び F スケール不明の竜巻については、観測体制が強化される前は見過ごされた可能性が高いことから、観測体制が強化された2007年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- b. F 1 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や標準偏差を採用する。
- c. F 2 及び F 3 スケールの竜巻については、見逃される可能性が少ないため1961年以降の全期間の年間発生数や標準偏差を採用する。

d. 53年間の発生数を上記 a～c の観測期間との比率から F スケールごとに推計する。

e. 海上の F スケール不明竜巻については補足説明資料 4-5 に記載のとおり，按分する。陸上の F スケール不明竜巻については，被害が確認されなかったということであるため F0 竜巻とする。

以上の分析結果を第 4-4-1 表に示す。竜巻検討地域において，53年間に 25 個の竜巻が観測されたことに対し，95 個の竜巻が発生したと推定した。

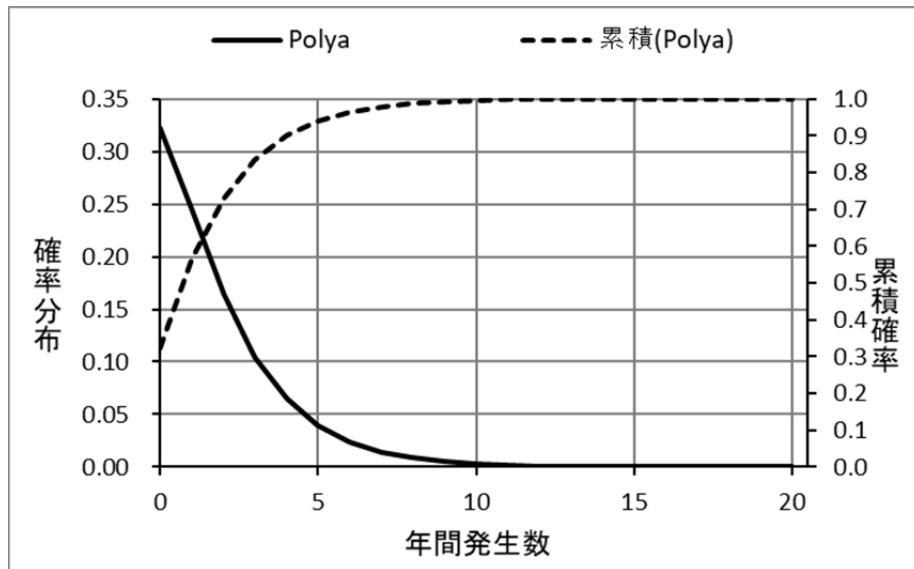
第 4-4-1 表 竜巻発生数の分析結果

	発生数の統計	(陸上+上陸) 竜巻						小計	海上竜巻 不明	総数
		竜巻スケール								
		F0	F1	F2	F3	F4	不明			
1961_01～ 2013_12 (53年間)	期間内総数(個)	6	9	4	0	0	1	20	5	25
	年平均(個)	0.11	0.17	0.08	0.00	0.00	0.02	0.38	0.09	0.47
	標準偏差(個)	0.58	0.51	0.27	0.00	0.00	0.14	0.97	0.41	1.08
1991_01～ 2013_12 (23年間)	期間内総数(個)	6	9	2	0	0	1	18	5	23
	年平均(個)	0.26	0.39	0.09	0.00	0.00	0.04	0.78	0.22	1.00
	標準偏差(個)	0.86	0.72	0.29	0.00	0.00	0.21	1.35	0.60	1.48
2007_01～ 2013_12 (7年間)	期間内総数(個)	5	3	0	0	0	0	8	4	12
	年平均(個)	0.71	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	1.14	0.57	1.71
	標準偏差(個)	1.50	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	1.86	0.98	2.06

	発生数の統計	竜巻スケール						総数
		F0	F1	F2	F3	F4	不明	
疑似 (53年間) (按分後)	期間内総数(個)	57	32	6	0	0	0	95
	年平均(個)	1.07	0.58	0.11	0.00	0.00	0.00	1.76
	標準偏差(個)	1.83	0.88	0.33	0.00	0.00	0.00	2.06
疑似 (53年間) (全竜巻)	期間内総数(個)	57	32	6	0	0	0	95
	年平均(個)	1.08	0.60	0.11	0.00	0.00	0.00	1.79
	標準偏差(個)	1.83	0.88	0.33	0.00	0.00	0.00	2.06

## (2)年発生数の確率密度分布の設定

竜巻の年発生数の確率密度分布の設定に当たっては、竜巻は気象条件の中でも極めて稀に発生する事象であり、発生数の変動（標準偏差）が大きい分布となり、東京工芸大学委託成果にポリヤ分布への適合性が良いことが示されているため、ハザード曲線の評価に当たって使用する竜巻の年発生数の確率分布は第4-4-2図に示すポリヤ分布を採用する。



第4-4-2図 竜巻検討地域における竜巻発生数の確率密度分布と累積確率



### 3. 竜巻の被害幅及び被害長さの分析

被害幅及び被害長さについても発生数と同様に解析する。被害幅及び被害長さの解析に利用可能なデータ数は、発生数のデータ数に比べてかなり少ない。したがって、以下の手順で53年間の被害幅及び被害長さの統計量の分析を行った。

- a. 統計量を確保するために、1961年以降の観測データを使用し、被害幅及び被害長さのデータをFスケール別に抽出する。
- b. 抽出されたFスケール別の被害幅データを大きい順に並び替え、53年間の発生数分だけ繰り返しサンプリングを行い、擬似53年間のデータとする。
- c. 擬似53年間のデータについて平均値及び標準偏差を求める。

第4-4-2表及び第4-4-3表に擬似53年間のデータを基に分析した被害幅及び被害長さの平均値及び標準偏差を示す。

第 4 - 4 - 2 表 被害幅の統計量

	竜巻幅 の統計 (m)	計	竜巻スケール					不明	総数
			F0	F1	F2	F3	F4		
1961_01～ 2013_12 (53 年間)	期間内総数	15	4	9	2	0	0	10	25
	平均値 (m)	130	50	188	33	0	0		
	標準偏差 (m)	146	22	174	4	0	0		
疑似 (53年間) (全竜巻)	期間内総数	95	57	32	6	0	0	0	95
	平均値 (m)	102	50	207	33	0	0		
	標準偏差 (m)	123	19	166	3	0	0		

第 4 - 4 - 3 表 被害長さの統計量

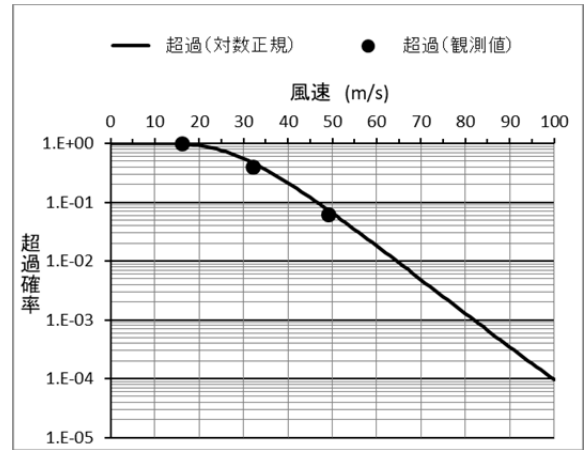
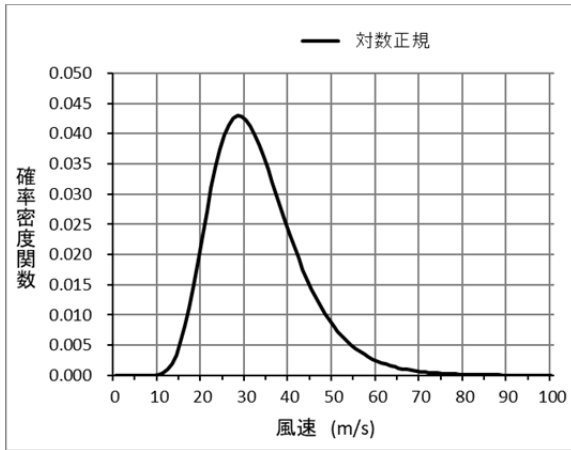
	被害長さ の統計 (km)	計	竜巻スケール					不明	総数
			F0	F1	F2	F3	F4		
1961_01～ 2013_12 (53 年間)	期間内総数	16	4	9	3	0	0	9	25
	平均値 (m)	1,188	625	1,222	1,833	0	0		
	標準偏差 (m)	845	350	807	1,258	0	0		
疑似 (53年間) (全竜巻)	期間内総数	95	57	32	6	0	0	0	95
	平均値 (m)	934	632	1,303	1,833	0	0		
	標準偏差 (m)	692	307	781	1,125	0	0		

4. 竜巻風速，被害幅及び被害長さの確率密度分布及び相関係数

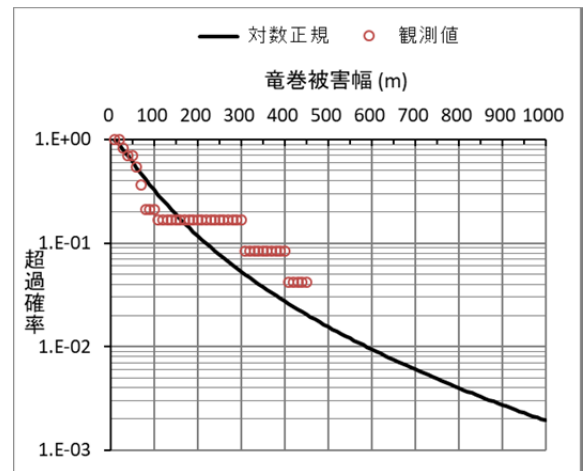
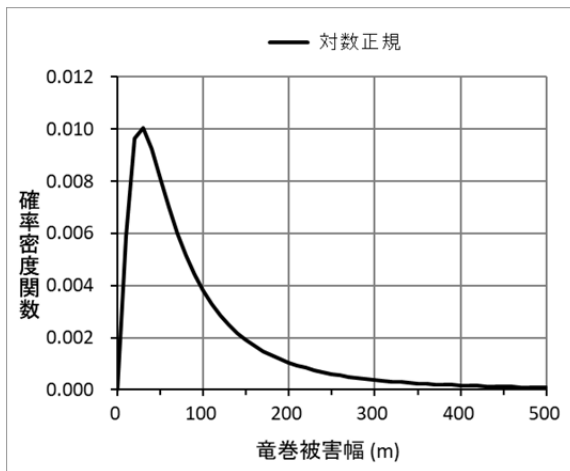
竜巻検討地域における竜巻の発生数，被害幅及び被害長さは，前記で評価した統計量を有する対数正規分布に従うものとする。第4-4-4表に統計量を示す。それぞれの確立密度分布については，第4-4-3図～第4-4-5図に示す。さらに，1961年以降の観測データのみを用いて，第4-4-5表に示すとおり竜巻風速，被害幅及び被害長さについて相関係数を求める。

第4-4-4表 発生数，被害幅及び被害長さの統計量

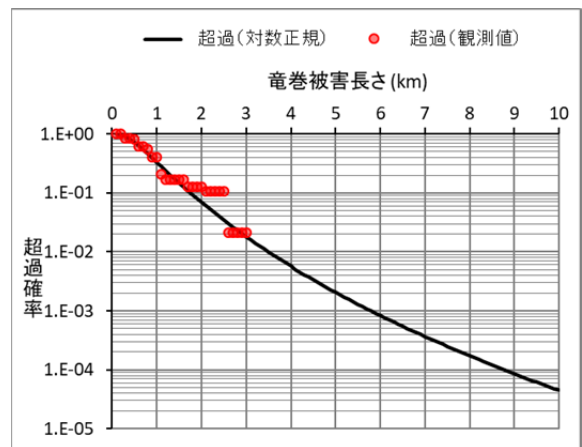
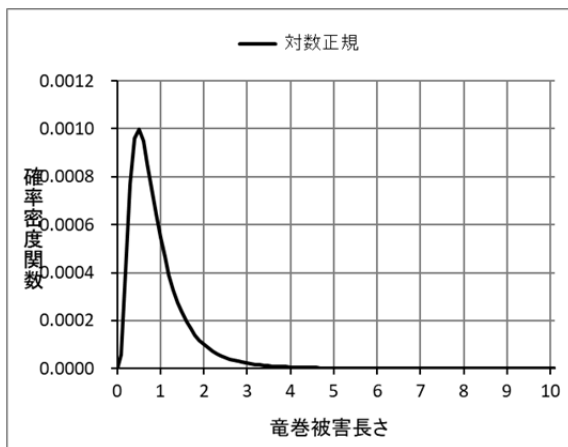
			計	竜巻スケール				
				F0	F1	F2	F3	F4
疑似 (53年間) (全竜巻)	発生数	期間内総数	95	57	32	6	0	0
		年平均(個)	1.79	1.08	0.60	0.11	0.00	0.00
		標準偏差(個)	2.06	1.83	0.88	0.33	0.00	0.00
	被害幅	期間内総数	95	57	32	6	0	0
		平均値(m)	102	50	207	33	0	0
		標準偏差(m)	123	19	166	3	0	0
	被害長	期間内総数	95	57	32	6	0	0
		平均値(m)	934	632	1,303	1,833	0	0
		標準偏差(m)	692	307	781	1,125	0	0



第 4 - 4 - 3 図 風速の確率密度分布 (左) と超過確率 (右)



第 4 - 4 - 4 図 被害幅の確率密度分布 (左) と超過確率 (右)



第 4 - 4 - 5 図 被害長さの確率密度分布 (左) と超過確率 (右)

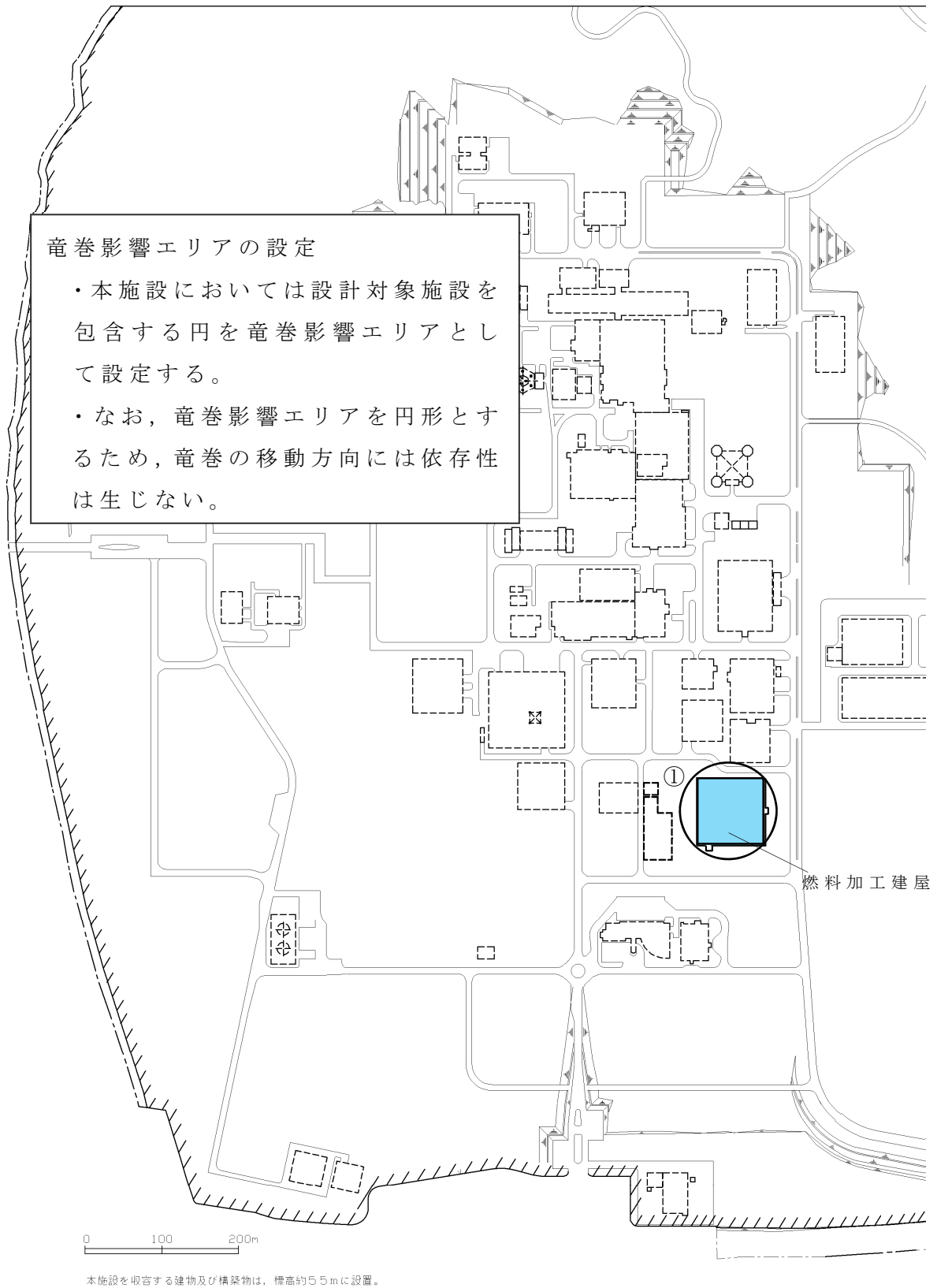
第 4 - 4 - 5 表 竜巻風速，被害幅及び被害長さの相関係数

相関係数（対数）	風速 (m/s)	被害幅 (m)	被害長さ (m)
風速 (m/s)	1.0000	0.0800	0.4646
被害幅 (m)	0.0800	1.0000	0.2418
被害長さ (m)	0.4646	0.2418	1.0000

## 5. 竜巻影響エリアの設定

本施設においては設計対象施設を包含する円を設置面積とみなし、これらの設置面積の合計値と等価な面積の円を第4-4-6図に示すとおり竜巻影響エリアとして設定する。

なお、竜巻影響エリアを円形とするため、竜巻の移動方向には依存性は生じない。



エリア番号	エリア直径 (m)	エリア面積 (m <sup>2</sup> )
①	125	12300
評価に用いる値	130	13300

→ 竜巻影響エリア  
直径：130m 面積：13300m<sup>2</sup>

第4-4-6図 竜巻影響エリア

補4-4-11

## 6. ハザード曲線の算定方法

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、以下に示すとおり竜巻ガイドの解説3.3.2に例示されたWen & Chu及びGarson et al.の方法に沿って、ハザード曲線を算定する。

### (1) 評価方法

Dを評価対象構造物が風速 $V_0$ 以上の竜巻に遭遇する事象とし、ある竜巻が評価対象構造物を襲い、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。

a. 前記に基づき、竜巻の最大風速 $V$ 、被害幅 $w$ 及び被害長さ $l$ の統計値から、次式の3次元対数正規分布型の確率密度分布を与える。

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

ここで、

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

である。

$\mathbf{x}$ は最大風速、被害幅及び被害長さの対数値 $\ln(V)$ 、 $\ln(w)$ 、 $\ln(l)$ によるベクトル、 $\boldsymbol{\mu}$ は各統計値から評価した最大風速、被害幅及び被害長さの対数値の平均からなるベクトル、 $\Sigma$ は $\ln(V)$ 、 $\ln(w)$ 、 $\ln(l)$ から評価した標準偏差 $\sigma_V$ 、 $\sigma_w$ 、 $\sigma_l$ と相関係数 $\rho_{Vw}$ 、 $\rho_{wl}$ 、 $\rho_{Vl}$ からな



る分散共分散行列である。

- b. 被災領域内には，竜巻の被害幅のうち風速が  $V_D$  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，*G a l e i n t e n s i t y* と呼ばれ（*G a l e* は「非常に強い風」という意味），被害が発生し始める風速に位置づけられる。米国気象局 *N W S*（*N a t i o n a l W e a t h e r S e r v i c e*）では，34ノット～47ノット（ $17.5\text{m/s} \sim 24.2\text{m/s}$ ）とされ，また，気象庁が使用している風力階級では，風力9は大強風（*s t r o n g g a l e* :  $20.8\text{m/s} \sim 24.4\text{m/s}$ ）と分類され，「屋根瓦が飛ぶ。人家に被害が出始める。」とされていることを参考に， $V_{min}$  を  $25\text{m/s}$  とした。なお，この値は *F 0*（ $17\text{m/s} \sim 32\text{m/s}$ ）のほぼ中央値に相当する。

- c. 得られた平均と分散共分散行列を基に，竜巻影響エリアの代表幅  $D_0$  を考慮し，次式にて，被災面積期待値  $E[D A(V_0)]$  を算定する。

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

ここで、 $H(\alpha)$ 及び $G(\alpha)$ は、それぞれ竜巻の被害長さ及び被害幅方向に沿った面に竜巻影響評価対象構造物を投影した時の長さである。

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

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

ここで、 $\alpha$ は竜巻の移動方向であり、 $A$ と $B$ は評価対象構造物（四角形）の寸法である。

一方、設計対象施設では、竜巻影響エリアを円形で設定しているため、 $H$ 及び $G$ ともに竜巻影響エリアの直径で一定（竜巻の移動方向に依存しない。）となる。

$S$ は竜巻影響エリアの面積（約 $1.3 \times 10^4 \text{ m}^2$ ）を表わす。円の直径を $D_0$ とした場合は、以下の式にて表わされる。

$$\begin{aligned}
E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0)lf(V, w, l)dVdw dl + D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty lf(V, l)dVdl \\
&\quad + D_0 \int_0^\infty \int_{V_0}^\infty W(V_0)f(V, w)dVdw + S \int_{V_0}^\infty f(V)dV
\end{aligned}$$

ここで、 $f(V, l)$ 、 $f(V, w)$ 、 $f(V)$ は、多変量の対数正規分布である $f(V, w, l)$ をもとに各成分を抽出した関数

である。

- d. 竜巻検討地域の面積  $A_0$  (約  $18000 \text{ km}^2$ ) 及び上記の被災面積期待値  $E[DA(V_0)]$  から、評価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  $R(V_0)$  を次式にて算定する。

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

- e. 前述のとおり、竜巻の年発生数の確率密度分布としては、ポリヤ分布の適合性が高い。ポリヤ分布は次式で示される。

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

ここで、 $N$  : 竜巻の年発生数

$v$  : 竜巻の年平均発生数

$T$  : 年数

$\beta$  : 分布パラメータであり次式で示される。

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

$\sigma$  : 竜巻の年発生数の標準偏差

である。

発生数がポリヤ分布に従うものとし、年超過確率  $P_{V_0}$  を以下の式により算出する。なお、年超過確率  $P_{V_0}$  は、年被災確率が十分小さいことより、Garson et al. が示す近似式を用いて表すことができる。

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

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

ここで、P は単位面積当たりの年被災確率である。

以上のことから、竜巻のように被災確率が非常に小さな現象に対しては、年超過確率は竜巻発生数の平均値のみに依存し、発生数の確率密度分布形状にはほとんど無関係であることがわかる。

## (2) ハザード曲線

前項で示した評価方法に基づいて、竜巻影響評価の対象構造物が、T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速が $V_0$ 以上となる確率 $P_{V_0,T}$ を次式によって算出し、ハザード曲線を算定する。

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

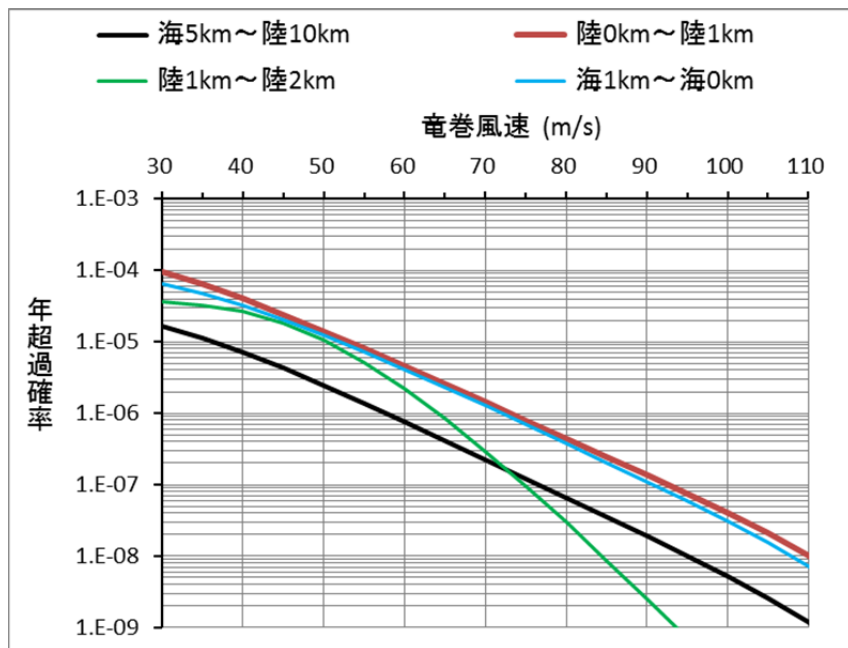
また、ハザード曲線の算定において、風速の積分範囲の上限値はハザード曲線の形状が不自然にならない程度に大きな値として 120m/s に設定する。

## 7. 竜巻最大風速のハザード曲線

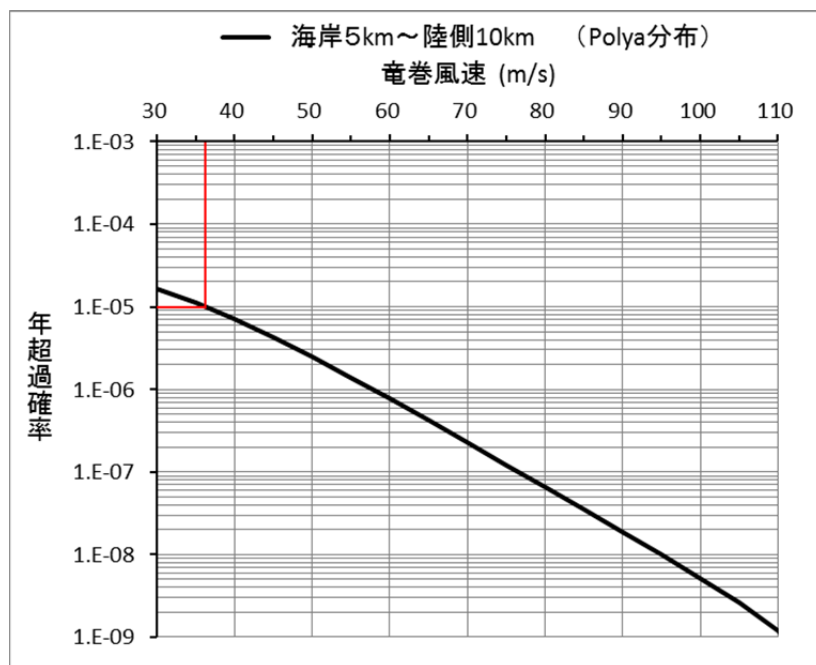
算定した竜巻最大風速のハザード曲線を，第4-4-7図に示す。

ハザード曲線により設定する最大風速 ( $V_{B2}$ ) は竜巻ガイドを参考に，年超過確率  $10^{-5}$  に相当する風速とし， $37\text{m/s}$  とする。

なお，竜巻検討地域を海岸線に沿って  $1\text{km}$  範囲ごとに細分化した短冊状の範囲を対象にハザード曲線を求めた結果，陸側  $0\text{km}$  から  $1\text{km}$  までの  $1\text{km}$  幅領域における  $54\text{m/s}$  が最大となるが，本施設は海岸線から陸側  $1\text{km}$  の範囲にないため，本評価は参考とする。



(a) ハザード曲線算定結果



(b)  $V_{B2}$  に相当するハザード曲線 (海岸 5 km ~ 陸側 10 km)

第 4 - 4 - 7 図 竜巻検討地域でのハザード曲線

## 8. 参考文献

- (1) Yi-kwei Wen and Shin-Lung Chu. “Tornado Risks and Design Wind Speed” . Journal of the Structural Division, ASCE, 1973-12, Vol. 99, No. 12.
- (2) Robert C. Galson, C. Allin Cornell and Jose Morla Catalan. “Tornado Design Winds Based on Risk” . Journal of the Structural Division, ACSE, 1975-09, Vol. 101, No. 9.
- (3) Robert C. Galson, C. Allin Cornell and Jose Morla Catalan. “Tornado Risk Evaluation Using Wind Speed Profiles” . Journal of the Structural Division, ASCE, 1975-05, Vol. 101, No. 5.
- (4) 東京工芸大学. 平成 21～22 年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. 2011-02.

以 上



令和元年 11 月 29 日 RO

補足説明資料 4 - 5 (9 条 竜巻)

## 海上の F スケール不明竜巻の按分方法の妥当性について

53 年間の疑似データを推定する際に，海上で発生した F スケール不明竜巻（非上陸の海上竜巻）を，F スケールが判明している陸上竜巻（上陸竜巻を含む）の F スケールごとの発生比率で按分している。ここで，「沿岸部近傍での竜巻の発生特性は，陸上と海上とでは類似している」と仮定した。観測結果を基に，この仮定の妥当性について考察する。

以下では，陸上で発生した竜巻（以下，「陸上竜巻」という。）と海上で発生しその後上陸した竜巻（以下，「上陸竜巻」という。），及び海上で発生し上陸しなかった竜巻（以下，「海上竜巻」という。）を区別して考える。

第 4-5-1 表及び第 4-5-1 図は，陸上竜巻，上陸竜巻及び（陸上＋上陸）竜巻のそれぞれの竜巻区分に対して，「F 0＋不明」，F 1，「F 2 以上」の竜巻が占める割合を，過去 53 年間の竜巻データの分析から求めた。表 1 (a) 及び図 1 (a) は，全国の沿岸 15km 幅（海側 5km～陸側 10km）での分析結果である。陸上竜巻の場合，F スケール毎の割合はそれぞれ約 33，50 及び 17% であり，上陸竜巻との間に大きな差はない（数%以内）。上陸竜巻は海上で発生した竜巻であることから，海上での F スケール不明竜巻の F スケールごとの発生割合は，上陸竜巻の発生割合と同様だと考えられる。

上陸竜巻と陸上竜巻の発生割合に大きな差は見られないこと

は、海側と陸側の F スケールごとの発生割合が類似していることを示唆している。したがって、海上での F スケール不明竜巻を、陸上竜巻（あるいは（陸上＋上陸）竜巻）の発生割合で按分する手法は妥当な方法だと考えられる。

一方、第 4－5－1 表 (b) 及び第 4－5－1 図 (b) は、竜巻検討地域における同様の分析結果であり、陸上竜巻と上陸竜巻の F スケールごとの割合には差があり、陸上竜巻では（F 0＋不明）竜巻の割合が大きい傾向にある。しかしながら、竜巻検討地域における（陸上＋上陸）竜巻の割合は全国の沿岸 15km 幅での割合とほぼ同じである。

したがって、海上の F スケール不明竜巻を（陸上＋上陸）竜巻の割合で按分する本手法は、本竜巻検討地域のようにデータ数が少ない場合にも有効な手法だと考えられる。

以 上

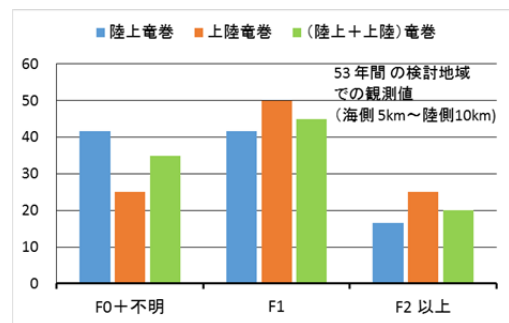
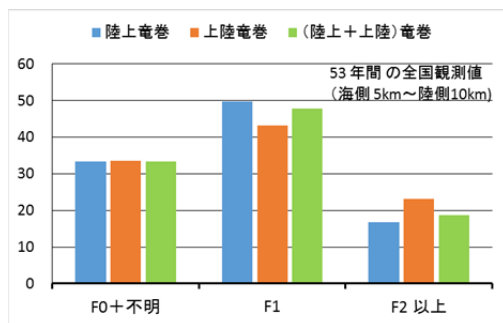
第 4 - 5 - 1 表 F スケール毎の竜巻発生数とその割合

(a) 全国沿岸 15 k m 幅 (海側 5 k m ~ 陸側 10 k m)

全国沿岸 53年間 (海5km~陸10km)	竜巻発生数の割合 (%)			竜巻発生数(個)		
	F0+不明	F1	F2 以上	F0+不明	F1	F2 以上
陸上竜巻	33.3	49.8	16.8	95	142	48
上陸竜巻	33.6	43.2	23.2	42	54	29
(陸上+上陸)竜巻	33.4	47.8	18.8	137	196	77

(b) 竜巻検討地域の沿岸 15 k m 幅 (海側 5 k m ~ 陸側 10 k m)

検討地域 53年間 (海5km~陸10km)	竜巻発生数の割合 (%)			竜巻発生数(個)		
	F0+不明	F1	F2 以上	F0+不明	F1	F2 以上
陸上竜巻	41.7	41.7	16.7	5	5	2
上陸竜巻	25.0	50.0	25.0	2	4	2
(陸上+上陸)竜巻	35.0	45.0	20.0	7	9	4



(a) 全国沿岸 15km 幅

(b) 竜巻検討地域の沿岸 15km 幅

第 4 - 5 - 1 図 F スケール毎の竜巻発生数の割合

(海側 5km ~ 陸側 10km)

令和元年 11 月 29 日 RO

補足説明資料 4 - 6 (9 条 竜巻)

竜巻発生数の確率分布（ポアソン，ポリヤ分布）が  
ハザード結果に及ぼす影響について

1. 竜巻発生確率とハザード曲線

W e n & C h u<sup>(1)</sup>は、竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速がある値以上となる確率の推定法を提案している。それによれば、竜巻の発生がポアソン過程に従うと仮定した場合、竜巻の年発生数の確率密度分布はポアソン分布若しくはポリヤ分布に適合する。

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

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

ここで、Nは竜巻の年発生数、vは竜巻の年平均発生数、Tは年数である。また、T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、V<sub>0</sub>以上の竜巻風速に見舞われる確率P<sub>v<sub>0</sub>,T</sub>(D)は次式で表される。

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

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

ここで、R(V<sub>0</sub>)は、評価対象とする構造物が、ある一つ

の竜巻に遭遇し，竜巻風速が  $V_0$  以上となる確率である。

## 2. ポアソン分布とポリヤ分布

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

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

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

ポリヤ分布は，分散と平均値が異なるような現象への適合度が高く， $\beta$  が大きい場合は分散の大きな分布形を表し， $\beta \rightarrow 0$  のときにはポアソン分布に近づく。「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究<sup>(2)</sup>」成果では，陸上竜巻（含む上陸竜巻）及び海上竜巻のいずれに対しても，ポリヤ分布の適合度が高いことを示した。

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

### 3. 確率論から見た近似式

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

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

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

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

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

逆に， $N$ 個の竜巻が発生したときに，いずれかの竜巻によ



り被害（最低1回，最大N回）を受ける確率は次式となる。

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

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

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

となる。R(V<sub>0</sub>)が十分小さければ，上式は次のように近似できる。

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

ここで，次の近似を用いている。

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

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

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

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

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

#### 4. ポアソン分布とポリヤ分布のハザードの近似式

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

式 (8) の  $P(N)$  としてポアソン分布を仮定し，

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

となることを考慮すると，(11) 式の厳密な式は以下のとおりである。

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

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

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

したがって，式（3）又は式（13）は，式（14）を用いると，

$$\begin{aligned}
P_{V_0}(D) &= 1 - \exp(-vR(V_0)) \\
&= 1 - \left( 1 + \frac{(-vR(V_0))}{1!} + \frac{(-vR(V_0))^2}{2!} + \dots \right)
\end{aligned} \tag{15}$$

と表され， $R(V_0)$ が小さい場合は，次式で近似できる。

$$P_{V_0}(D) \approx vR(V_0) \tag{16}$$

ポリヤ分布の場合も同様に，一般の二項定理を用いると，次式で近似できる。

$$P_{v_0}(D) = 1 - [1 + \beta v R(V_0)]^{-1/\beta} = 1 - \left(1 + \left(\frac{-1}{\beta}\right) \beta v R(V_0) + \dots\right) \quad (17)$$

$$\approx v R(V_0)$$

以上のことから，竜巻のように1つの竜巻に対する被害確率が非常に小さな現象に対しては，年被害確率は竜巻発生数の平均値にのみ依存し，発生数の確率密度分布形状にはほとんど無関係であることがわかる。

< 参考文献 >

- (1) Wen. Y. K and Chu. S. L. (1973): Tornado risks and design wind speed, Proceedings of American Society of Civil Engineering, Journal of the Structural Division 99, 2409-2421
- (2) 東京工芸大学 (2011) : 平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究(平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構

以 上

令和元年 11 月 29 日 RO

補足説明資料 5 - 1 (9 条 竜巻)

評価対象施設等の設計荷重について

設計対象施設の評価に用いる評価荷重について別表 1 に整理する。

別表1 設計対象施設の評価に用いる評価荷重一覧表（1 / 1）

設計対象施設		設計竜巻荷重								備考
		W <sub>W</sub> , W <sub>P</sub> , W <sub>M</sub> の選定※1				複合荷重の設定※2				
		設置場所	W <sub>W</sub>	W <sub>P</sub>	W <sub>M</sub>	W <sub>T1</sub>	W <sub>T2</sub>			
W <sub>P</sub>	W <sub>W</sub>					0.5W <sub>P</sub>	W <sub>M</sub>			
竜巻防護施設を設置する施設	・燃料加工建屋	屋外	○	○	○	○	○	○	○	
屋外施設	該当なし	/	/	/	/	/	/	/	/	
建屋に設置されるが防護が期待できない施設	・非常用所内電源設備の非常用発電機の給気系及び排気系	屋内	×	×	○	-	-	-	○	
竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設	該当なし	/	/	/	/	/	/	/	/	
建屋内の施設で外気と繋がっている施設	・気体廃棄物の廃棄設備の建屋排気設備	屋内	×	○	×	○	-	-	-	
	・気体廃棄物の廃棄設備の工程室排気設備	屋内	×	○	×	○	-	-	-	
	・気体廃棄物の廃棄設備のグローブボックス排気設備	屋内	×	○	×	○	-	-	-	
	・非常用所内電源設備の非常用発電機の給気系及び排気系	屋内	×	○	×	○	-	-	-	

注記)

※1 表中記号について対象とする荷重の考慮の有無を示す。○：考慮する ×：考慮しない

※2 複合荷重の構成について、○のついた構成で評価を実施。○：実施ケース -：該当しないケース

以上



令和元年 11 月 29 日 RO

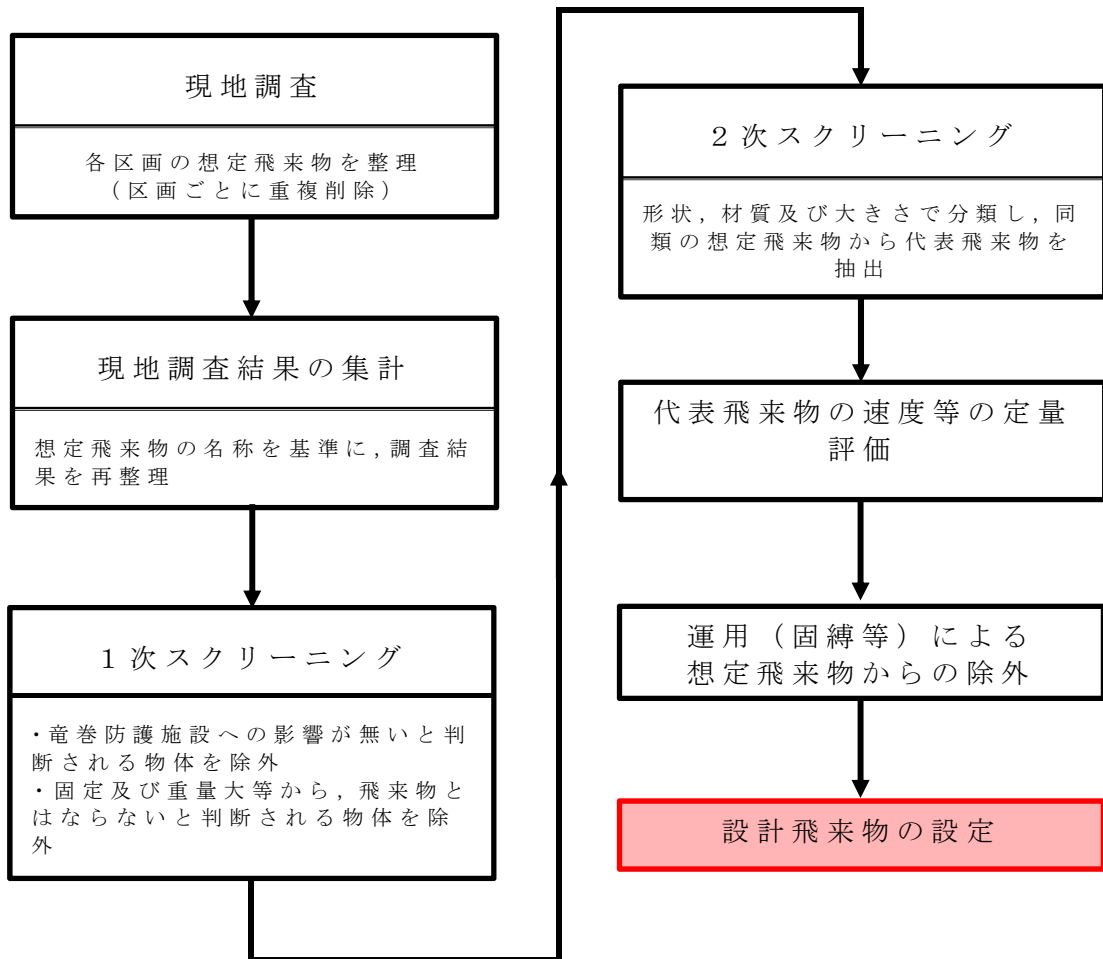
補足説明資料 5 - 2 (9 条 竜巻)

## 設計飛来物の設定

### 1. はじめに

設計飛来物の設定にあたっては、再処理事業所において、飛来物となる可能性のある対象物（以下、「想定飛来物」という。）を現地調査※し、これらの中から竜巻影響評価に用いる代表的な飛来物（以下、「代表飛来物」という。）について定量評価を行った上で、設計飛来物の設定を行った。第5-2-1図に設計飛来物の設定フローを示す。

※ 本現地調査は、再処理施設及び廃棄物管理施設に対して行われたものである。本施設は、現在建設中であるものの、再処理施設及び廃棄物管理施設は既に試運転（通水作動試験）後10年ほど経過しているため、同じ再処理事業所として、これら2施設の現地調査で得られた飛来物の情報は本施設の運転時の想定として有効である。



第 5 - 2 - 1 図 設計飛来物の設定フロー

第5-2-1表 現地調査結果の集計

1	仮設足場	26	仮設トイレ	51	航空障害灯	76	コンクリート ミキサ車
2	足場板	27	カラーコーン	52	高所作業車	77	コンテナ
3	足場階段	28	ガラス扉	53	鋼製足場	78	コンテナ (バンボディ)
4	LPガス 容器置場	29	仮囲い用 鉄板	54	鋼製階段	79	コンプレッサー
5	アスファルト 残材	30	換気口	55	鋼製カゴ	80	柵(単管 パイプ)
6	アルミ製 ステップ	31	監視用電柱	56	鋼製架台	81	産廃コンテナ (鋼製)
7	アルミ製 はしご	32	看板	57	鋼製架台 (フレーム)	82	産廃ボックス (カゴ)
8	アルミ製蓋	33	看板(合成樹脂 製)	58	鋼製材	83	室外機
9	アルミ フェンス	34	危険物倉庫	59	鋼製残材	84	室外機囲い
10	アンテナ	35	気象海象観測 ブイ	60	鋼製スリーブ	85	自動販売機
11	石	36	気象海象観測 ブイ架台	61	鋼製スロープ	86	しゃへいプロ ック用型枠
12	移動式タンク	37	気象海象観測 ブイ部品	62	鋼製朝礼台	87	砂利
13	埋込金物	38	救急車	63	鋼製箱	88	重機(パワー ショベル)
14	液化酸素 タンク	39	給水車	64	鋼製バリケード	89	重機(ホイール ローダ)
15	液化窒素 タンク	40	給油口	65	鋼製蓋	90	重機(クローラ キャリア)
16	塩ビパイプ	41	重機(杭打機)	66	鋼製フレーム	91	重機(クローラ クレーン)
17	大型バス	42	クランプ	67	構台	92	重機用 バケット
18	覆工板	43	乗用車	68	鋼矢板 (廃材)	93	合成樹脂製 資材
19	ガードレール	44	グレーチング	69	コンクリート U字溝	94	合成樹脂製 タンク
20	ガードレール ポスト	45	重機(ラフター クレーン)	70	コンクリート 残材	95	合成樹脂製 パレット
21	カーブミラー	46	軽トラック	71	コンクリート 試験体	96	合成樹脂製 蓋
22	加工台	47	ケーブル	72	コンクリート 製蓋	97	合成樹脂製 水タンク
23	ガスボンベ	48	木製ケーブル ドラム	73	コンクリート 製ポール	98	消火器
24	仮設小屋	49	鋼管	74	コンクリート 棒	99	消火器格納箱
25	仮設タンク	50	航空識別灯 管制器	75	コンクリート ポンプ車	100	消火栓

第5-2-1表 現地調査結果の集計（つづき）

101	昇降機カゴ	126	貯湯槽	151	バリケード部品 (合成樹脂製)	176	木製パレット
102	消防自動車	127	ディーゼル ポンプ	152	反射鏡	177	木製蓋
103	照明	128	鉄筋	153	ヒートポンプ チラー	178	モルタル ブロック
104	照明器具	129	形鋼	154	百葉箱	179	融雪制御盤
105	照明塔	130	鉄板	155	標識	180	ハンド パレット
106	水槽	131	電光掲示板	156	フェンス	181	リヤカー
107	制御盤	132	電信柱	157	フォークリフト	182	冷却器
108	設備機器	133	テント	158	合成樹脂製箱	183	レーダー
109	設備小屋	134	電話ボックス	159	合成樹脂製 バリケード	184	ワイヤー
110	側溝グレーチン グ	135	投光器	160	プレハブ小屋	185	ワイヤ メッシュ
111	側溝コンクリー ト製蓋	136	道路緩衝材	161	プレハブ倉庫	186	散水車
112	台車	137	土のう	162	分電盤	187	避雷針
113	タイヤ	138	トラック	163	木製板		
114	担架格納箱	139	トラック (ユニック)	164	ベンチ		
115	単管ごみ 置き場	140	ドラム缶	165	防雪フェンス		
116	単管製小屋	141	泥落とし機	166	ホース		
117	単管手摺	142	ネコ車	167	ホース格納箱		
118	鉄鋼パイプ	143	燃料タンク	168	ポンプ		
119	単管バリケード	144	配管	169	マンホール蓋		
120	脚立	145	配管用部品	170	水タンク		
121	タンク	146	配電盤	171	木・合成樹脂 廃材		
122	タンクローリー	147	バケツ	172	木製角材		
123	端子盤	148	発電機	173	木製朝礼台		
124	ダンプトラック	149	鋼製ハッチ	174	木製廃材		
125	貯水タンク	150	パラボナ アンテナ	175	木製箱		

## 2. 1次スクリーニング

1次スクリーニングでは、現地調査の集計結果のうち、想定飛来物が以下に示す条件を満たすものを設計飛来物の選定から除外する。

- ・強固に固定されている想定飛来物
- ・体積に対する重量が非常に大きく、設計飛来物とはならないと判断される想定飛来物
- ・強度及び剛性が低く、竜巻防護施設に与える影響が小さいと判断される想定飛来物


1次スクリーニングにおいて除外される想定飛来物を、第5-2-2表に示す。

第5-2-2表 設計飛来物から除外する想定飛来物

<p>強固に固定されているため、あるいは、体積に対する重量が非常に大きい ため、設計飛来物とはならないと判断 されるもの</p>		<p>強度及び剛性が低く、竜巻防護施設に影響を 及ぼさないと判断されるもの</p>		
				
構台	水槽	木・合成樹脂廃材	木製板	カラーコーン
				
貯湯槽	ヒートポンプ チラー	タイヤ	塩ビパイプ	木製朝礼台
				
換気口	室外機（業務用大型）	ベンチ	プレハブ小屋	ケーブル
				
ポンプ	重機（クローラ クレーン）	木製パレット	木製ケーブル ドラム	プレハブ倉庫
				
電話ボックス	危険物倉庫	ホース	木製蓋	合成樹脂製資材
				
設備機器	冷却器	標識（合成樹脂製）	ワイヤー	看板（合成樹脂製）

第5-2-2表 設計飛来物から除外する想定飛来物（つづき）

強固に固定されているため、あるいは、体積に対する重量が非常に大きいため、設計飛来物とはならないと判断されるもの		強度及び剛性が低く、竜巻防護施設に影響を及ぼさないと判断されるもの		
				
液化酸素タンク	電信柱	合成樹脂製タンク	テント	バリケード部品 (合成樹脂製)
				
重機（杭打機）	液化窒素タンク	看板（木製）	百葉箱	水タンク
				
コンプレッサー	監視用電柱	木製角材	パラボナアンテナ	土のう
				
制御盤	貯水タンク	仮設トイレ	アルミフェンス	フェンス
				
コンクリート製蓋 (固定されたもの)	照明塔	木製廃材	ガラス扉	合成樹脂製 パレット
				
端子盤	重機 (パワーショベル)	ワイヤメッシュ	木製箱	合成樹脂製蓋

 については核不拡散上の観点から公開できません



第 5 - 2 - 2 表 設計飛来物から除外する想定飛来物（つづき）

強固に固定されているため、あるいは、体積に対する重量が非常に大きいため、設計飛来物とはならないと判断されるもの		強度及び剛性が低く、竜巻防護施設に影響を及ぼさないと判断されるもの		
				
給油口	コンクリート試験体	仮設小屋	道路緩衝材	
				
避雷針	融雪制御盤			
				
配管	鋼製ハッチ			

注) 本表の写真は代表例を示す。

### 3. 2次スクリーニング

2次スクリーニングでは，1次スクリーニングで除外の対象とならなかった想定飛来物を対象に，飛来物の定量評価に資するためのスクリーニングを実施する。

2次スクリーニングの実施方針，手順を以下に示す。

- ・ 想定飛来物を棒状，板状及び塊状の3つの形状に分類する。
- ・ さらに，面積や重量などの観点から同類と見做せるものに分類し，代表飛来物を抽出する。その際，竜巻影響評価ガイドに例示された飛来物も代表飛来物とすることを考慮する。
- ・ 分類された想定飛来物から，定量評価に用いる代表飛来物を抽出する。抽出は，主として外形寸法に着目して実施する。いずれの分類にも属しない想定飛来物は，そのまま代表飛来物として選定とする。

第5-2-3表に棒状，板状及び塊状に分類した想定飛来物の代表を，それぞれ示す。各形状で代表とする想定飛来物は以下である。




棒状：鋼製パイプ／形鋼／角形鋼管／鋼管

板状：マンホール蓋／敷き鉄板／覆工板

塊状：コンクリートU字溝／自動販売機／室外機／

コンテナ／産廃コンテナ／発電機／気象海象観測ブイ

第 5 - 2 - 3 表 2 次スクリーニング結果まとめ

代表飛来物	棒状	板状	塊状		
複数の 想定飛来物の代表として抽出した飛来物					
	鋼鉄パイプ	マンホール蓋	コンクリート U字溝	産廃コンテナ	
					
	形鋼	敷き鉄板	自動販売機	発電機	
					
	角形鋼管	覆工板	室外機	気象海象観測ブイ	
					
角形鋼管		コンテナ			

第5-2-3表 2次スクリーニング結果まとめ (つづき)

代表飛来物	棒状	板状	塊状		
単 独 で 代 表 と し て 選 定 し た 飛 来 物					
	コンクリート製 ボール	鋼製架台	乗用車	フォークリフト	高所作業車
					
	コンクリート棒	コンクリート製 蓋	トラック	クローラキャリア	コンクリート ポンプ車
					
	ドラム缶	側溝コンクリート 製蓋	ホイールローダー	消防自動車	コンクリート ミキサ車
					
	ガスポンペ		ラフタークレーン	タンクローリー	ダンプトラック
					
鉄筋		大型バス	散水車	砂利	

#### 4. 代表飛来物の定量評価

##### 4. 1 評価方法

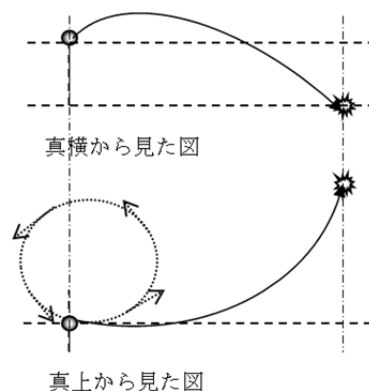
代表的な飛来物の速度，飛散距離および飛散高さは，竜巻による風速場の中での飛来物の軌跡を計算することで評価する。仮定する風速場は，鉛直方向には構造が変化しないランキン渦とする。その風速場の中で，質点系にモデル化した飛来物は，相対速度の2乗に比例した抗力を受けるものとする。この時，飛来物の運動は次式にて表される。

$$m\ddot{x}(t) = \frac{1}{2}\rho C_D A \left( V(x(t)) - \dot{x}(t) \right) |V(x(t)) - \dot{x}(t)| - mgJ$$

ここで、飛来物の質量を  $m$ ，代表面積を  $A$ ，抗力係数を  $C_D$ ，時刻  $t$  での飛来物の位置を  $x(t)$ ，速度を  $\dot{x}(t)$ ，加速度を  $\ddot{x}(t)$ ，時刻  $t$  での飛来物位置での風速を  $V(x(t))$ ，空気密度を  $\rho$ ，重力を  $g$ ，重力方向成分のみ  $1$  のベクトルを  $J$  とする。

なお，抗力係数  $C_D$  は，3方向の面積で重みづけした平均とする。

具体的な飛散距離及び飛散高さの評価においては，上式を離散化することで計算を行う。



第5-2-2図 飛来物の軌跡評価のイメージ  
補5-2-12

#### 4. 2 評価条件

竜巻の最大風速，移動速度，旋回風速，最大半径（ $R_m$ とする）及び空気密度は，第5-2-4表のとおりとする。

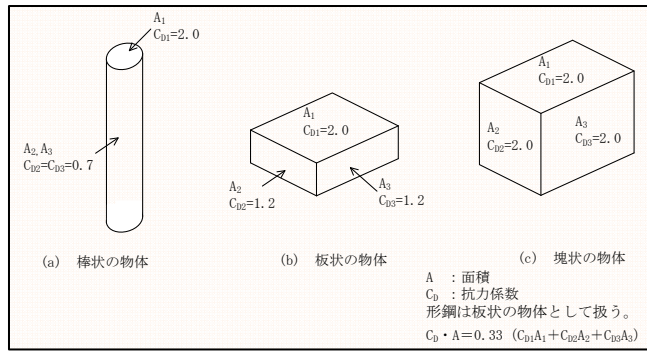
飛来物の初期位置は，水平方向には竜巻の中心より  $2R_m$  の円の内部領域に，半径について  $0.1R_m$  ごと，角度方向について5度ごとの位置にばら撒かれているものとする。鉛直方向には高さ40mの位置にあるものとする。初速は  $0\text{ m/s}$  とする。

飛来物が高さ0mの位置に到達するまでの間の最大速度，最大高さ及び最大飛距離を算定する。

抗力係数は既往文献<sup>(1)</sup>に基づいて，第5-2-3図のとおりとする。

第5-2-4表 飛来物評価時の竜巻諸元

最大風速（ $\text{m/s}$ ）	100
移動速度（ $\text{m/s}$ ）	15
旋回風速（ $\text{m/s}$ ）	85
最大半径（ $\text{m}$ ）	30
空気密度（ $\text{kg/m}^3$ ）	1.22



第 5 - 2 - 3 図 抗力係数

#### 4. 3 評価結果

3 項で選定した代表飛来物を対象に、竜巻速度が 100m / s における飛来物の諸元を定量評価した結果を第 5 - 2 - 5 表に示す。

第 5 - 2 - 5 表 代表飛来物の諸元算定結果

代表飛来物	サイズ			質量 [ k g ]	空力パラメータ	速度 [ m / s ]	運動エネルギー [ k J ]	備考
	長さ [ m ]	幅 [ m ]	奥行 [ m ]					
棒状 コンクリート製ボール	16	0.40	0.40	1400	0.0022	39	1064700	空力パラメータが 0.0028 以下であり、浮き上がらない。
棒状 コンクリート製ボール	12	0.35	0.35	930	0.0022	39	707265	空力パラメータが 0.0028 以下であり、浮き上がらない。
棒状 角形鋼管 ( □ - 300 × 300 )	6.1	0.30	0.30	492	0.0041	45	498150	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
棒状 鉄筋 ( D 13 )	12	0.013	0.013	11.9	0.0061	49	14286	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
棒状 鉄筋 ( D 38 )	12	0.038	0.038	107	0.0020	38	77254	空力パラメータが 0.0028 以下であり、浮き上がらない。
棒状 形鋼 ( H - 300 × 300 )	4.0	0.30	0.30	372	0.0036	43	343914	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
棒状 形鋼 ( H - 200 × 200 )	5.0	0.20	0.20	250	0.0043	45	253125	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
棒状 形鋼 ( H - 200 × 150 )	6.0	0.19	0.15	179	0.0063	49	214890	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
棒状 形鋼 ( H - 175 × 175 )	5.0	0.18	0.18	202	0.0048	46	213716	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
棒状 鋼管 ( 250 φ )	6.0	0.27	0.27	254	0.0031	42	224028	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
棒状 鋼管 ( 200 φ )	6.0	0.22	0.22	181	0.0036	43	167335	浮き上がるが設計飛来物による防護で対策可能。
棒状 鋼製材	4.2	0.30	0.20	135	0.0089	51	219308	設計飛来物とする。
棒状 角形鋼管 ( □ - 100 × 100 )	4.0	0.10	0.10	96.4	0.0045	46	101991	浮き上がるが設計飛来物による防護で対策可能。
棒状 コンクリート棒	2.0	0.16	0.16	123	0.0029	41	103382	浮き上がるが設計飛来物による防護で対策可能。
棒状 鉄筋 ( D 38 )	6.0	0.038	0.038	53.7	0.0020	38	38771	空力パラメータが 0.0028 以下であり、浮き上がらない。
棒状 形鋼 ( H - 400 × 200 )	1.7	0.40	0.20	111	0.0056	48	127872	浮き上がるが設計飛来物による防護で対策可能。
棒状 鋼管 ( 100 φ )	5.0	0.11	0.11	61.0	0.0043	45	61763	浮き上がるが設計飛来物による防護で対策可能。
棒状 鉄筋 ( D 13 )	6.0	0.013	0.013	5.97	0.0061	49	7167	浮き上がるが設計飛来物による防護で対策可能。
棒状 ドラム缶 ( 軽油 200 L 入り )	0.89	0.59	0.59	188	0.0023	39	142974	空力パラメータが 0.0028 以下であり、浮き上がらない。
棒状 ガスボンベ	1.5	0.23	0.23	57.0	0.0033	43	52697	浮き上がるが設計飛来物による防護で対策可能。
棒状 鋼製パイプ	6.0	0.049	0.049	16.4	0.0084	52	22173	浮き上がるが設計飛来物による防護で対策可能。
棒状 鋼製パイプ	2.0	0.050	0.050	8.40	0.0057	49	10084	設計飛来物とする。
棒状 ドラム缶	0.90	0.60	0.60	24.0	0.0203	63	47628	浮き上がるが設計飛来物による防護で対策可能。
板状 鋼板 ( 敷鉄板 ) 大	6.1	1.5	0.022	1600	0.0039	44	1548800	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
板状 鋼板 ( 敷鉄板 ) 小	3.0	1.5	0.022	802	0.0038	44	776336	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
板状 鋼製架台	2.6	2.8	0.20	1640	0.0032	42	1446480	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
板状 覆工板	3.0	1.0	0.19	640	0.0036	43	591680	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
板状 コンクリート板	1.5	1.0	0.15	540	0.0021	39	410670	空力パラメータが 0.0028 以下であり、浮き上がらない。
板状 覆工板	2.0	1.0	0.19	430	0.0036	43	397535	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
板状 マンホール蓋 ( 大 )	0.98	0.98	0.060	88.0	0.0062	49	105644	浮き上がるが設計飛来物による防護で対策可能。
板状 コンクリート製 蓋	0.80	0.50	0.10	96.0	0.0033	43	88752	浮き上がるが設計飛来物による防護で対策可能。
板状 側溝コンクリート 製蓋	1.0	0.40	0.060	57.6	0.0052	47	63619	浮き上がるが設計飛来物による防護で対策可能。
板状 マンホール蓋 ( 小 )	0.65	0.65	0.050	33.5	0.0074	51	43567	浮き上がるが設計飛来物による防護で対策可能。



第5-2-5表 代表飛来物の諸元算定結果（つづき）

代表飛来物	サイズ			質量 [kg]	空力パラメータ	速度 [m/s]	運動エネルギー [kJ]	備考
	長さ [m]	幅 [m]	奥行 [m]					
空調室外機	0.80	0.25	0.30	10.0	0.0343	—	—	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
ラフター クレーン（1）	11	2.6	3.5	26500	0.0019	37	18139250	空力パラメータが0.0028以下であり、浮き上がらない。
ラフター クレーン（2）	11	2.6	3.5	31900	0.0016	32	16332800	空力パラメータが0.0028以下であり、浮き上がらない。
消防自動車	9.5	2.5	3.4	16200	0.0027	41	13616100	空力パラメータが0.0028以下であり、浮き上がらない。
大型バス	12	2.5	3.8	12100	0.0047	46	12801800	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
コンクリート ミキサー車	7.9	2.5	3.7	10200	0.0038	44	9873600	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
ダンプトラック	7.7	2.5	3.3	10500	0.0034	43	9707250	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
コンクリート ポンプ車	7.5	2.2	3.0	9170	0.0033	43	8477665	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
タンクローリー	9.2	2.5	3.0	8660	0.0045	46	9162280	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
高所作業車	7.4	2.2	3.6	7870	0.0043	45	7968375	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
クローラキャリア	5.7	2.5	2.9	11500	0.0022	39	8745750	空力パラメータが0.0028以下であり、浮き上がらない。
発電機（大）	4.2	1.4	2.1	6060	0.0020	38	4375320	空力パラメータが0.0028以下であり、浮き上がらない。
ホイールローダー	6.2	2.3	3.0	7270	0.0037	44	7037360	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
トラック	5.0	1.9	1.3	4750	0.0026	40	3800000	空力パラメータが0.0028以下であり、浮き上がらない。
フォークリフト	3.8	1.3	2.1	4350	0.0024	40	3480000	空力パラメータが0.0028以下であり、浮き上がらない。
フォークリフト	3.6	1.1	2.1	3600	0.0026	40	2880000	空力パラメータが0.0028以下であり、浮き上がらない。
トラック	8.5	2.2	2.5	3790	0.0080	52	5124080	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
気象海象観測 ブイ	8.0	2.5	2.5	4000	0.0075	51	5202000	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
散水車	5.7	2.2	2.3	3420	0.0060	49	4105710	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
コンテナ	6.0	2.4	2.6	2300	0.0105	60	4140000	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
乗用車 ワゴン2	5.2	1.9	2.3	1890	0.0092	53	2654505	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
発電機（中）	2.1	1.0	1.6	1640	0.0029	41	1378420	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
乗用車 ワゴン1	4.8	1.8	1.5	1510	0.0082	52	2041520	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
乗用車	3.1	1.6	1.3	1430	0.0052	47	1579435	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
乗用車 普通	4.4	1.7	1.5	1140	0.0097	54	1662120	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
発電機（小）	1.5	0.65	1.2	670	0.0036	43	619415	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
乗用車 軽自動車1	3.4	1.5	1.6	840	0.0102	55	1270500	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
コンテナ	2.4	2.3	3.7	1100	0.0138	59	1914550	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
乗用車 軽自動車2	3.4	1.5	1.5	710	0.0116	56	1113280	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
コンクリート U字溝	2.0	0.45	0.40	290	0.0043	45	293625	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
自動販売機（大）	1.8	1.4	0.74	365	0.0089	53	512643	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
室外機 （オフィス用）	1.4	0.94	0.32	140	0.0098	54	204120	浮き上がるが設計飛来物による防護で対策可能。
産廃コンテナ	1.9	1.9	1.1	260	0.0198	63	515970	飛散対策により、飛来物とならないようにする。
鉄球	0.025	0.025	0.025	0.0669	0.0034	43	62	評価上浮き上がるが、運動エネルギーは十分小さい。
砂利	0.010	0.010	0.010	0.00134	0.0233	65	3	評価上浮き上がるが、運動エネルギーは十分小さい。

注）空力パラメーター0.025を超えるものについては算定不可

## 5. 設計飛来物の設定

運動エネルギー及び貫通限界厚さが鋼製材よりも大きなものは適切な対策を実施し飛来物としないことから、残りのものうち、最も運動エネルギー及び貫通限界厚さが大きな鋼製材を設計飛来物として設定した。また、防護対象施設の評価において鋼製材の評価に包含できないものとして、竜巻防護ネットを通過する可能性がある鋼製パイプを設計飛来物として設定した。第5-2-6表に設計飛来物を示す。

第5-2-6表 設計飛来物

飛来物の種類	鋼製パイプ	鋼製材
寸法 (m)	長さ×直径 2.0×0.05	長さ×幅×奥行き 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	8.4	135
最大水平速度 (m/s)	49	51

### <参考文献>

- (1) 【JNES】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

以上

令和元年 11 月 29 日 RO

補足説明資料 5 - 3 (9 条 竜巻)

## 敷地外からの飛来物の考慮について

### 1. はじめに

原子力発電所の竜巻影響評価ガイドの要求事項を踏まえ、再処理事業所の敷地の近隣に設置されている風力発電施設のブレードが設計竜巻によって飛来した場合を想定し、設計対象施設への到達の可能性の有無を確認した。

### <原子力発電所の竜巻影響評価ガイドの要求事項>

#### 4. 3. 1 設計竜巻荷重の設定

##### 解説 4. 3. 1. 3. 2 基本的な考え方

・・・(略)・・・

一般的には、遠方からの飛来物は相対的に重量が軽いものが多く、仮に衝突した場合でも衝撃荷重は相対的に小さいと考えられることから、設計対象施設に到達する可能性がある飛来物を検討する範囲は、原子力発電所の敷地内を原則とする。ただし、原子力発電所の敷地外からの飛来物による衝撃荷重が、原子力発電所の敷地内からの飛来物の衝撃荷重を上回ると想定され得る場合は、原子力発電所の敷地外からの飛来物も考慮する。

## 2. 風力発電施設の概要

第5-3-1表 風力発電施設の概要

発電所名称	むつ小川原 ウィンドファーム
定格出力	1500 kW / 基 <sup>(1)</sup>
ローター直径	64 m <sup>(1)</sup>
ハブまでの高さ	68 m <sup>(1)</sup>
設計対象施設 までの最短距離	約 1000 m

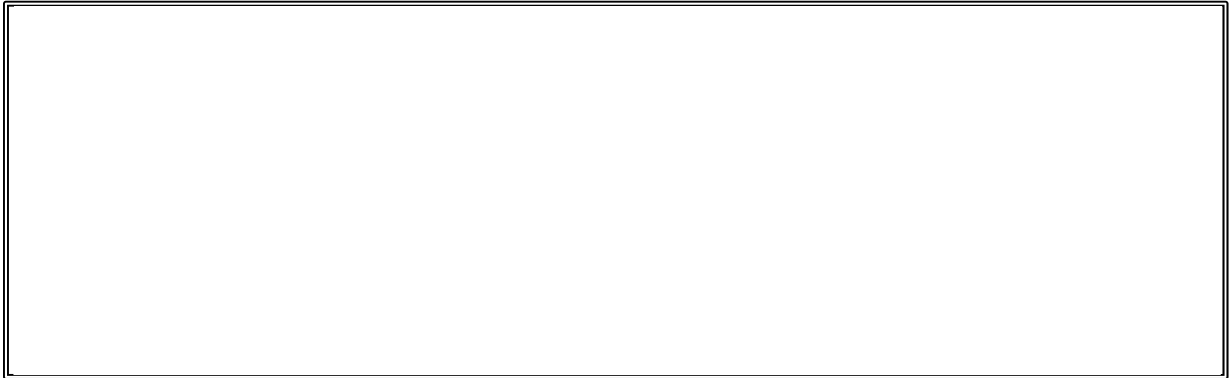
(1) むつ小川原ウィンドファームHPより



第5-3-1図 風力発電設備の寸法

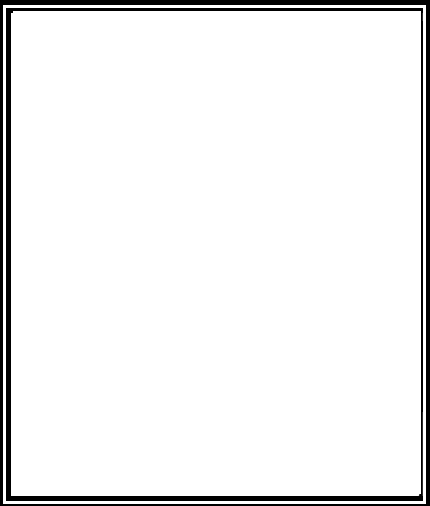
### 3. 設計竜巻による飛来距離の評価

ブレードのサイズ及び重量の情報を用いて、設計竜巻（ランキン渦モデル，最大風速 100m / s）による物体の浮上・飛来解析コード（TONBOS）による最大飛来距離の算出を行った。



第 5 - 3 - 2 図 風力発電機のブレード寸法

第 5 - 3 - 2 表 ブレードサイズ及び最大飛来距離

長さ	
高さ	
幅	
重量	
最大飛来距離	

風力発電施設から設計対象施設までの最短距離は、ブレードの最大飛来距離に比べて十分余裕があり、ブレードが設計対象施設へ到達することは考えられない。

#### 4. まとめ

- ・ 敷地外から飛来するおそれがあり，かつ敷地内からの飛来物による衝撃荷重を上回ると想定されるものとして，むつ小川原ウィンドファームの風力発電施設のブレードがある。
- ・ むつ小川原ウィンドファームの風力発電施設から設計対象施設までの距離及び設計竜巻によるブレードの飛来距離を考慮すると，ブレードが設計対象施設まで到達するおそれはないことから，ブレードは設計飛来物として考慮しない。

以 上

令和元年 11 月 29 日 RO

補足説明資料 5 - 4 (9 条 竜巻)



## 設計飛来物の設定における1次スクリーニングについて

設計飛来物の設定において、1次スクリーニングでは、以下に示す条件を満たすものを設計飛来物の選定から除外する。

- ・竜巻防護施設への影響が無いと判断される物体を除外する。
- ・固定、重量大等から、飛来物とはならないと判断される物体を除外する。

このうち、「竜巻防護施設への影響がないと判断される物体」は、過去の主な竜巻の被害概要の調査結果等から、このような物品の状況について検討を行った結果より判断した。

以下に、平成2年以降の主な竜巻による被害概要の調査結果等に基づく検討結果を示す。

(1) 分解され小型軽量となる物品（屋外屋根及びガラス窓）

竜巻の被害概要調査結果において、分解され小型軽量となる物品として屋外屋根及びガラス窓が確認できた。これらの被害状況を以下に示す。

a. 屋外屋根

第5-4-1図～第5-4-5図に屋外屋根の被害状況を示す。これらより、屋外屋根については、F0～F3の竜巻において、形を保ったままではなく、分解された状態で飛来していることが分かる。また、厚みが薄いことから形状が変形しており柔飛来物と見なせると考えられることから、衝突の際に与える衝撃荷重及び貫通力については、設計飛来物である鋼製材の評価に包含されると考えられる。



第5-4-1図 平成16年6月27日佐賀県で発生した  
F2竜巻による屋外屋根の被害状況<sup>(1)</sup>



屋外トイレ屋根の損傷



カーポート屋根の飛散及び骨組の損傷



カーポート屋根の損傷

第5-4-2図 平成18年9月17日宮崎県延岡市で発生した

F2竜巻による屋外屋根の被害状況<sup>(2)</sup>



折板の損傷



カーポートの被害

第5-4-3図 平成21年10月8日茨城県土浦市で発生した  
F1竜巻による屋外屋根の被害状況<sup>(3)</sup>



周囲の田に散乱した屋根ふき材

第5-4-4図 平成24年2月1日島根県出雲市で発生した  
F0竜巻による屋外屋根の被害状況<sup>(4)</sup>



電線等に引っ掛かった飛来物（鋼板製屋根材）



飛来物（鋼板製屋根材）の衝突 飛散した飛来物（鋼板製屋根材）



飛散した折板屋根の損傷状況



ガソリンスタンドの折板屋根の脱落

駐車場の折板屋根の著しい変形

第5-4-5図 平成24年5月6日茨城県つくば市で発生した

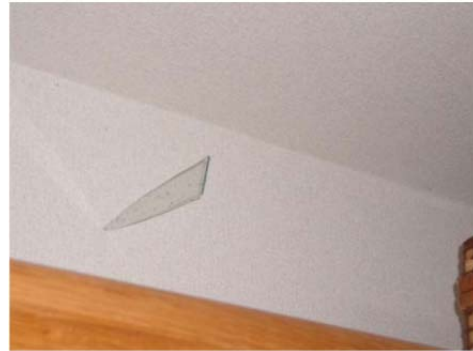
F3竜巻による屋外屋根の被害状況<sup>(5)</sup>

b. ガラス窓

第5-4-6図～第5-4-11図に示すとおり，ガラス窓についてはF0～F3及びEF5の竜巻において損壊し，分解されていることが確認できる。分解された状態では小型軽量となっており，その影響は設計飛来物である鋼製材若しくは鋼製パイプに包含されると考えられる。



エントランスの窓ガラスの破損



破損した窓ガラス片の  
屋内壁面への突き刺さり

第5-4-6図 平成18年9月17日宮崎県延岡市で発生した  
F2竜巻によるガラス窓の被害状況<sup>(2)</sup>



バスの窓ガラス破損

第5-4-7図 平成20年5月25日米国アイオワ州で発生した  
EF5竜巻によるガラス窓の被害状況<sup>(6)</sup>



窓ガラスの損壊



窓ガラスの飛来物衝突痕

第5-4-8図 平成21年7月27日群馬県館林市での

F1(F2)竜巻によるガラス窓の被害状況<sup>(7)</sup>



倉庫の窓ガラスと屋根の被害状況



窓ガラスの損壊



出窓部の窓ガラスの損壊



エントランスのガラス損壊

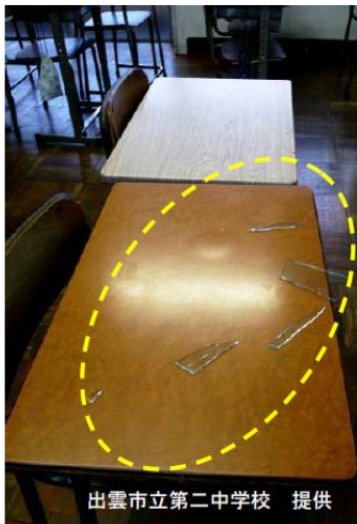
第5-4-9図 平成21年10月8日茨城県土浦市で発生した

F1竜巻によるガラス窓の被害状況<sup>(3)</sup>



出雲市立第二中学校 提供

体育館窓ガラスの損傷



出雲市立第二中学校 提供

教室



出雲市立第二中学校 提供

廊下



出雲市立第二中学校 提供

屋外に面した窓ガラス

第5-4-10 図 平成24年2月1日島根県出雲市で発生した  
F0竜巻によるガラス窓の被害状況<sup>(4)</sup>





店舗の窓ガラスの被害状況



店舗の窓ガラスの被害状況



ガラスの被害状況（飛来物衝突痕）



ガラスの被害状況（飛来物衝突痕）

第5-4-11図 平成24年5月6日茨城県つくば市で発生した

F3竜巻によるガラス窓の被害状況<sup>(5)</sup>

(2) 再処理事業所の屋外屋根及びガラス窓の状況

再処理事業所における屋外屋根の状況を第5-4-12図、ガラス窓の状況を第5-4-13図に示す。再処理事業所におけるこれらの物品の構造については、上記の被害にあった物品の構造と大きく変わらないことから、竜巻通過時には同様の被害状況になると考えられ、飛来物としては設計飛来物の影響に包含されると考えられる。



第5-4-12図 再処理事業所における屋外屋根



第5-4-13図 再処理事業所におけるガラス窓の状況

(3) 損傷するが飛散しない物品（樹木とフェンス）

竜巻の被害概要調査結果等における「損傷するが飛散しない物品」に関し、再処理事業所に存在する物品としてシャッター、樹木、フェンス及び仮設足場が確認できた。これらの被害状況を以下に示す。

a. シャッター

第5-4-14図～第5-4-18図にシャッターの被害状況を示す。これらより、シャッターについては、F1～F3及びEF5の竜巻において形状は変形しているが、固定部は外れていないことが確認できる。なお、外れて飛来物となったとしても、衝突の際に与える衝撃荷重及び貫通力については、上記の屋外屋根と同様、設計飛来物である鋼製材の評価に包含されると考えられる。



シャッターの外れ

第5-4-14図 平成20年5月25日米国アイオワ州で発生したEF5竜巻によるシャッター被害状況<sup>(6)</sup>



シャッターの変形

第5-4-15 図 平成21年10月8日茨城県土浦市で発生した  
F1 竜巻によるシャッターの被害状況<sup>(3)</sup>



シャッターの外れ

第5-4-16 図 平成21年7月27日群馬県館林市で発生した  
F1 (F2) 竜巻によるシャッター被害状況<sup>(7)</sup>



消防団施設のシャッターの変形

第5-4-17図 平成24年5月6日茨城県つくば市で発生した  
F3竜巻によるシャッターの被害状況<sup>(5)</sup>



シャッターの外れ

第5-4-18図 平成25年9月2日埼玉県で発生した  
F2竜巻によるシャッターの被害状況<sup>(8)</sup>

b. 樹木

第5-4-19図～第5-4-25図に樹木の被害状況を示す。これらより、樹木について、F1～F3及びEF5の竜巻において幹の折損、根の引き抜き等が見られるが、折れた場合若しくは引き抜かれた場合のいずれにおいても、その場で倒壊しているのみであることが確認できる。これは、竜巻の風荷重により樹木が損壊を受けた後では、竜巻が既に通り過ぎているためと考えられ、飛来物となることは考えにくい。



倒木（倒れない樹木もあり）



倒木

第5-4-19図 平成14年7月10日群馬県境町で発生した  
F2竜巻による樹木被害<sup>(9)</sup>



樹木の転倒



樹木の転倒

第5-4-20図 平成18年9月17日宮崎県延岡市で発生した  
F2竜巻による樹木被害状況<sup>(2)</sup>



樹木の折損

第5-4-21 図 平成20年5月25日米国アイオワ州で発生したEF5竜巻による樹木被害状況<sup>(6)</sup>



倒木

第5-4-22 図 平成21年7月19日岡山県美作市で発生したF2竜巻による樹木被害状況<sup>(10)</sup>



倒木

第5-4-23 図 平成21年10月8日茨城県土浦市で発生したF1竜巻による樹木被害状況<sup>(3)</sup>



樹木の折損



樹木の折損と鳥居の被害



樹木の被害



樹木の被害

第5-4-24図 平成24年5月6日茨城県つくば市で発生した  
F3竜巻による樹木被害状況<sup>(5)</sup>





樹木の被害



樹木の倒壊による小屋組の被害



樹木の被害



樹木の被害



樹木の被害



樹木の被害

第5-4-25 図 平成25年9月2日埼玉県で発生した

F2竜巻による樹木被害状況<sup>(8)</sup>

## C. フェンス

第5-4-26図～第5-4-28図にフェンスの被害状況を示す。これらより、フェンス類については、F1～F3の竜巻において傾き、倒壊等が見られるが、樹木と同様にその場で倒壊しているのみであり、倒壊した後では、竜巻は既に通り過ぎていているのみであり、倒壊した後では、竜巻は既に通り過ぎていていると考えられていることから、竜巻により巻き上げられ、飛来物となることは考えにくい。



フェンスの著しい変形



フェンスの変形

第5-4-26図 平成21年7月27日群馬県館林市で発生した  
F1 (F2) 竜巻によるフェンスの被害状況<sup>(7)</sup>



フェンスの変形



道路標識の倒壊

第5-4-27図 平成24年5月6日茨城県つくば市で発生した  
F3 竜巻によるフェンス類の被害状況<sup>(5)</sup>



フェンスの倒壊



屋上フェンスの変形



フェンスの変形



フェンス支柱部の破損



看板の変形



フェンスの変形（工事中の建築物）



フェンスの倒壊

第5-4-28図 平成25年9月2日埼玉県で発生した  
F2竜巻によるフェンス類の被害状況<sup>(8)</sup>

#### d. 仮設足場

第5-4-29 図に仮設足場の被害状況を示す。これにより、仮設足場については、F 2 の竜巻において倒壊していることが確認できる。各足場パイプは容易に分解せず、仮設足場はほぼ組み立てられた状態で倒壊しているため、飛来物となることは考えにくい。

また、仮に倒壊して後に分解し飛来物となったとしても、その影響は設計飛来物である鋼製材若しくは鋼製パイプに包含されると考えられる。

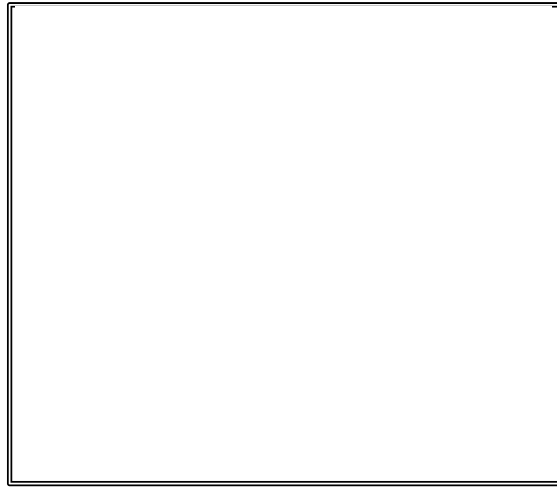


第5-4-29 図 平成18年9月17日宮崎県延岡市で発生した  
F 2 竜巻による仮設足場の被害状況<sup>(11)</sup>

#### (4) 再処理事業所のシャッター、樹木、フェンス及び仮設足場の状況

再処理事業所におけるシャッターの状況を第5-4-30 図に、樹木の状況を第5-4-31 図に示す。上記の被害実績に示された樹木と大きく変わらないと考えられることから、竜巻通過時には、同様の被害状況になり、幹の折損若しくは根の引き抜きによ

りその場で倒壊するのみと考えられる。



第5-4-30 図 再処理事業所におけるシャッターの状況



第5-4-31 図 再処理事業所における樹木の状況

□: 核不拡散上の観点から公開できません

再処理事業所におけるフェンスの状況を第5-4-32図に示す。上記にて示した被害にあったフェンスの構造と大きく変わらないことから、竜巻通過時には、同様の被害状況になり変形若しくは倒壊するのみと考えられる。



第5-4-32図 再処理事業所におけるフェンスの状況

□: 核不拡散上の観点から公開できません

再処理事業所における仮設足場の状況を第5-4-33図に示す。上記にて示した被害にあった仮設足場の構造と大きく変わらないことから、竜巻通過時には、同様の被害状況になり変形若しくは倒壊するのみと考えられる。



第5-4-33図 再処理事業所における仮設足場の状況

以上より，シャッター，樹木，フェンス及び仮設足場は，竜巻により損傷若しくは倒壊するが，飛散せず設計飛来物としての選定は不要と判断した。

< 参考文献 >

- (1) 「佐賀市・鳥栖市竜巻現地被害調査報告」(平成16年7月13日)
- (2) 「2006年台風13号被害調査報告-延岡市の竜巻被害と飯塚市文化施設の屋根被害-」(平成18年10月10日)
- (3) 「平成21年10月8日茨城県土浦市竜巻被害調査報告」(平成21年10月13日)
- (4) 「平成24年2月1日島根県出雲市で発生した突発被害調査報告」(平成24年2月14日)
- (5) 「平成24年(2012年)5月6日に茨城県つくば市で発生した建築物等の竜巻被害調査報告」(ISSN1346-7328 国総研資料第703号 ISSN0286-4630 建築研究資料第141号平成25年1月)
- (6) 「米国アイオワ州におけるトルネード被害調査報告」(平成20年6月9日)
- (7) 「平成21年7月27日群馬県館林市竜巻被害調査報告」(平成21年8月17日一部修正)
- (8) 「平成25年9月2日に発生した竜巻による埼玉県越谷市, 北葛飾郡松伏町及び千葉県野田市での建築物等被害(速報)」(国土交通省国土技術政策総合研究所独立行政法人建築研究所平成25年9月10日一部修正)
- (9) 「群馬県境町で発生した突風による建築物等の被害について」(平成14年7月26日独立行政法人建築研究所)
- (10) 「平成21年7月19日岡山県美作市竜巻被害調査報告」(平



成 21 年 8 月 4 日)

(11) 「2006 年台風 13 号に伴って発生した竜巻による延岡市の  
建物被害」

以 上

令和元年 11 月 29 日 RO

補足説明資料 5 - 5 (9 条 竜巻)

## 竜巻時に発生する降雹について

竜巻と同時に発生する自然現象のうち、降雹についての評価結果を示す。

雹は積乱雲から降る直径 5 mm 以上の氷の粒であり、文献<sup>(1)</sup>より直径の上限は 10 cm，終端速度は 59 m/s として評価を実施した。この雹の質量は約 0.5 kg であり、運動エネルギーは約 0.9 kJ である。

直径 10 cm の雹と設計飛来物の運動エネルギーとの比較を第 1 表に示す。これより、雹の運動エネルギーは設計飛来物の運動エネルギーより十分小さく、雹の衝突による荷重は設計竜巻荷重に包含できると言える。

第 5-5-1 表 粒径 10 cm の雹と設計飛来物との比較

評価対象	運動エネルギー (kJ)
雹 (直径 10 cm)	0.9
設計飛来物 (鋼製材)	79

< 参考文献 >

(1) 小倉義光．一般気象学．第 2 版，東京大学出版会，1999．

以 上

令和元年 11 月 29 日 RO

補足説明資料 5 - 6 (9 条 竜巻)

## 空力パラメータについて

空中での物体の飛散については以下の運動方程式が用いられる。

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

ここで、各変数は以下で定義される。

$\mathbf{V}_M$ ：飛来物の速度ベクトル

$\mathbf{V}_w$ ：風速ベクトル（竜巻の渦風速と移動速度の和）

$\rho$ ：空気密度

$C_D A$ ：飛来物の抗力係数と見附面積の積の平均値

$m$ ：飛来物の質量

$g$ ：重力加速度

$\mathbf{k}$ ：鉛直上向き単位ベクトル

式（1）の右辺に現れる  $C_D A/m$  は飛行定数とよばれる物体固有の空力パラメータであり、米国 N R C 規制ガイド R G 1.<sup>(1)</sup>76 で引用されている文献<sup>(2)</sup> および原子力規制委員会「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」<sup>(3)</sup> で引用されている文献<sup>(4)</sup> と同様に以下の式で定義される。

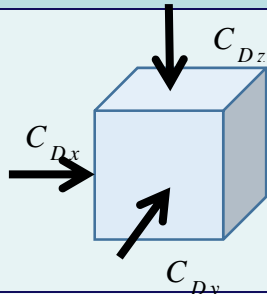
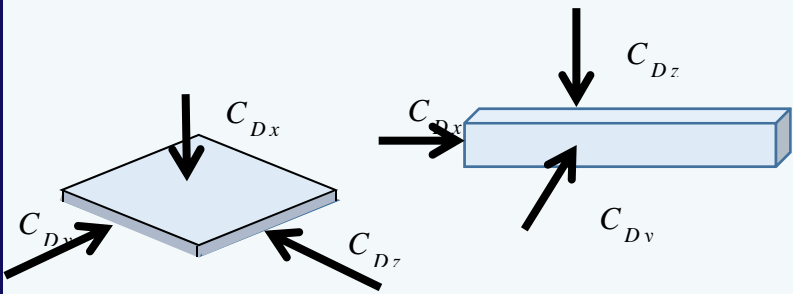
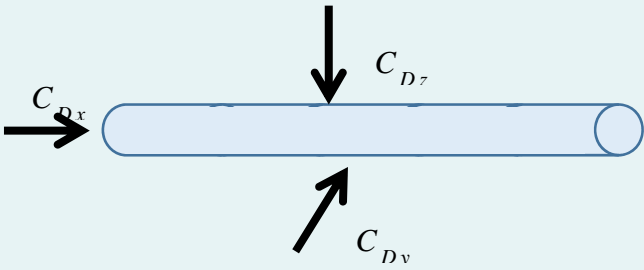
$$\frac{C_D A}{m} = c \frac{C_{Dx} A_x + C_{Dy} A_y + C_{Dz} A_z}{m} \quad (2)$$

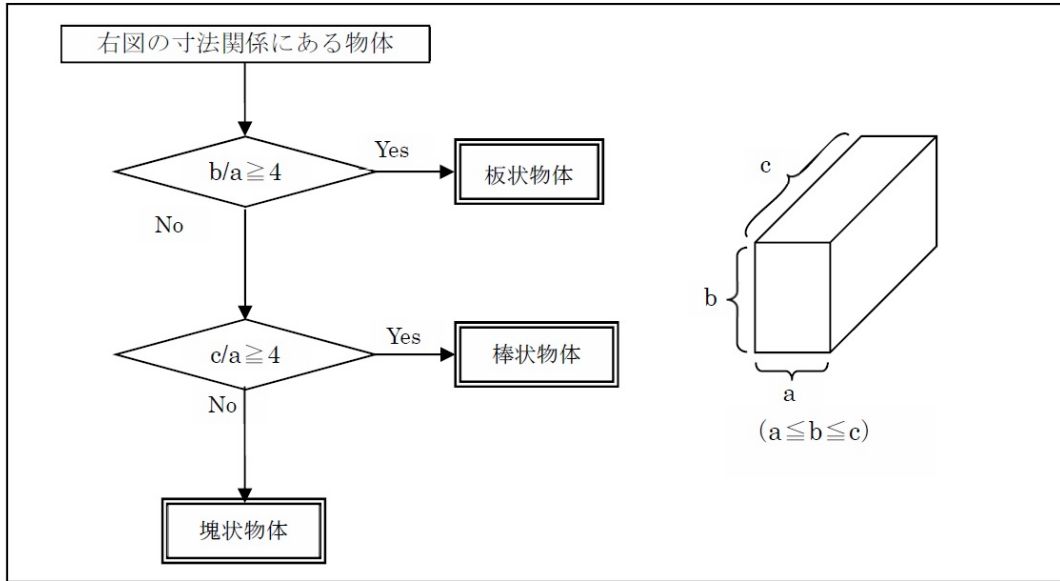
ここで、 $c$  は定数（1 / 3）， $C_{Dx}$  は空中での X 軸方向流れに対する抗力係数， $A_x$  は X 軸方向流れに対する見附面積であり， $C_{Dy}$  や  $A_y$  等も同様である。 $C_{Dx}$  等の値は，物体が塊状，板状，棒状（円柱），棒状（円柱以外）によって第 5 - 6 - 1 表のよ

うに定められている。また，塊状，板状，棒状の分類は物体の  
アスペクト比によって，第5－6－1図のフローで判定される。

第5-6-1表 空力パラメータ算出のための抗力係数値

(<sup>4</sup>文献に基づき作成)

物体形状	$C_{Dx}$	$C_{Dy}$	$C_{Dz}$	風向
塊状物体	2.0	2.0	2.0	
板状物体, 棒状物体 (円柱以外)	2.0	1.2	1.2	
棒状物体 (円柱)	2.0	0.7	0.7	



第 5 - 6 - 1 図 塊状，板状，棒状の判定フロー  
 (文献<sup>(5)</sup>の添付図 C - 4 - 1 を引用)



< 参考文献 >

- ( 1 ) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Design-basis tornado and tornado missiles for nuclear power plants, Regulatory Guide 1.76, Revision 1 (2007).
- ( 2 ) Simiu, E. and Scanlan, R. H., Wind effects on structures: fundamentals and applications to design, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ (1996).
- ( 3 ) 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 (改正: 原規技発第 1812177 号, 2018).
- ( 4 ) 東京工芸大学, 平成 21~22 年度原子力安全基盤調査研究(平成 22 年度) 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究成果報告書 (2011).
- ( 5 ) 日本機械学会, 発電用原子力設備規格 竜巻飛来物の衝撃荷重による構造物の構造健全性評価手法ガイドライン (2018/07/09 意見受付終了)

以 上

令和元年 11 月 29 日 RO

補足説明資料 6 - 1 (9 条 竜巻)

## ランキン渦モデルとフジタモデルの適用の考え方について

### 評価に使用する風速場モデルについて

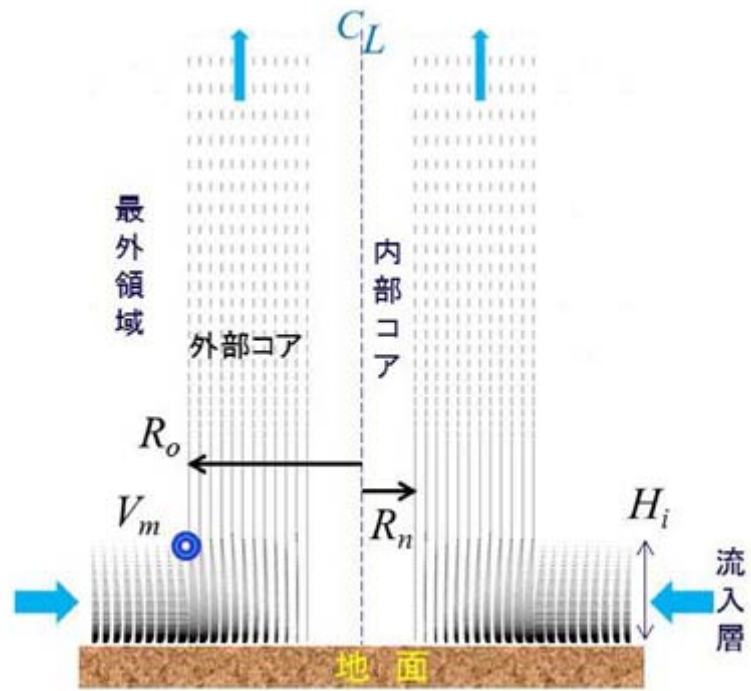
ランキン渦モデルはNRCガイドで採用されており、利用実績が高く、非常に簡単な式で風速場を記述することができる。しかし、風速場が高さに依存しないため、地表面付近では非現実的な風速場となることがデメリットとしてあげられる。

フジタモデルはランキン渦モデルと比較して、解析プログラムが複雑であるが、観測に基づき考案され、実際に近い竜巻風速場をモデル化している。第6-1-1図に風速場モデルを示す。1978年のGrand Gulf原子力発電所の竜巻被災や、平成18年の佐呂間町での竜巻被災における地上物の転倒または移動状況は、フジタモデルを用いると実際に確認された状況をよく再現することがわかっている（参考資料1）。

本施設の竜巻影響評価では、基本的にランキン渦モデルを採用する。

ただし、車両の固縛又は退避の運用において考慮する離隔距離の設定においては、車両が全て地表面にあることから、地表面の風速場をよく再現しているフジタモデルを採用する。

以上



第 6 - 1 - 1 図 フジタモデルの風況イメージ

令和元年 11 月 29 日 RO

補足説明資料 6 - 1 (9 条 竜巻)

参考資料 1

## フジタモデルの適用について

## 1. 概要

フジタモデルは、米国NRCの要望により藤田博士が開発した竜巻風速場の工学モデルであり、竜巻動画の写真図化分析、竜巻の地上痕跡調査及び被災状況調査に基づき提案されたものである。ランキン渦と同様に代数式で風速場が表現されるが、数式はやや複雑である。

フジタモデルは、半径方向に3つの領域（内部コア・外部コア・最外領域）、高さ方向に2つの領域（流入層、非流入層）に分割して風速場をモデル化している。上昇流（ $V_z$ ）は外部コアのみに存在し、地表面付近で竜巻中心に向かう強い流れ（ $V_r$ ）があるほか、接線風速  $V_\theta$  は高さ依存性がある。

フジタモデルには以下の特徴がある。

- －観測に基づき考案され、実際に近い竜巻風速場をモデル化している。
- －比較的簡単な代数式で風速場を表現しうる。
- －米国NRCガイドでもランキン渦モデルと並列に参照されている。
- －ランキン渦モデルと比較して、風況をモデル化する上で解析プログラムが複雑（近年の計算機能力向上と竜巻評価コードの高度化により、問題点は解決された）。

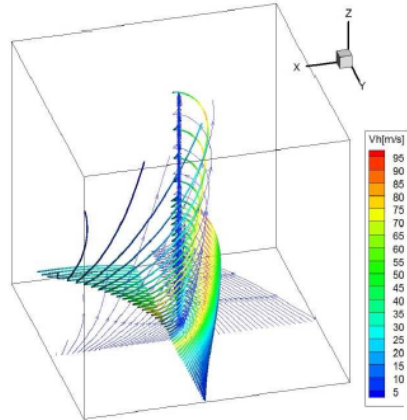
具体的な工学モデルは参考資料2に示す。

竜巻の風速場モデルとして利用されている「ランキン渦モデル」、「フジタモデル」の風況イメージを第1図に示す。

## ランキン渦モデル

### モデル概要

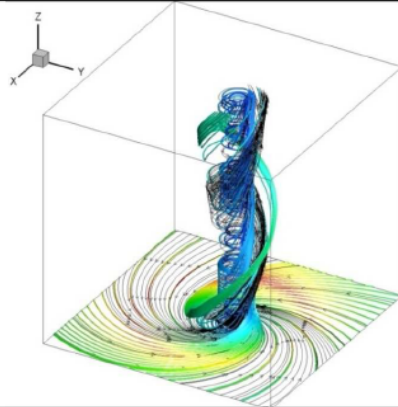
地面からも上昇流が発生するモデルであり、実現象と乖離。



## フジタモデル

### モデル概要

地表面で渦の中心に向かう水平方向の流れがモデル化されており、実現象をよく再現。



出典：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― 改定4  
2014年9月9日 日本保全学会 原子力規制関連事項検討会

第1図 「ランキン渦モデル」, 「フジタモデル」の風況イメージ

## 2. フジタモデルの適用の可能性について

### (1) 自動車飛散実績との比較

藤田スケール（以下、「Fスケール」という。）の風速条件で自動車の浮上・飛散をフジタモデルで計算した結果と、各Fスケールにおける実際の被災状況を比較すると、第1表及び第2表に示すとおりよく一致しており、フジタモデルは実際に近い竜巻風速場をモデル化していると言える。

第1表 竜巻による自動車飛散実績（Fスケール別）

Fスケール	風速[m/s]	自動車の被災状況
F 2	50～69	<sup>(1)</sup> cars blown off highway（自動車が道から <sup>(2)</sup> 吹き飛ばされる）
F 3	70～92	<sup>(1)</sup> cars lifted off the ground（自動車はも <sup>(2)</sup> ち上げられて飛ばされる）
F 4	93～116	cars thrown some distances or rolled <sup>(1)</sup> considerable distances <sup>(2)</sup> （自動車は何十メートルも空中飛行する）



第2表 フジタモデルによる自動車の飛散評価結果 (江口ら)<sup>(3)</sup>

F スケール との対応	最大水 平風速 $V_D$ [m/s]	竜巻接 線速度 $V_m$ [m/s]	竜巻移 動速度 $V_{tr}$ [m/s]	計算結果		
				速度 [m/s]	距離 [m]	高さ [m]
F2 (静止)	69	59	10	1.0	1.4	0
F2 (走行) ※	89	59	30	23	25	0.9
F3 (静止)	92	79	13	23	34	1.1
F4 (静止)	116	99	17	42	59	3.1

※ 竜巻移動速度に対する自動車の相対走行速度を 20m/s (72km/h) と仮定し、竜巻の移動速度に加えた場合

(2) 1978年4月17日, Grand Gulf 原子力発電所の竜巻被災事例

過去に発生した竜巻による被害状況とフジタモデルによる再現計算との比較を文献調査した。

1978年4月17日, ミシシッピ州で建設中の Grand Gulf 原子力発電所に来襲した竜巻の規模は, 風速はF 2相当の 56~67 m/s と<sup>(5)</sup>推定されるが, 変電設備でF 3竜巻相当の被害が見られた<sup>(4)</sup>。

冷却塔の耐風設計風速は 40 m/s であり, これを 40~70%超える風速にも耐えた<sup>(5)</sup>が, 冷却塔内部に設置されていたコンクリート流し込み用のクレーンが倒壊し, 建設中の冷却塔 (高さ 138 m) に衝突し, 一部が破損した。

Grand Gulf 原子力発電所資材置き場のパイプ飛散状況は, 次のように報告されている。

パイプを収納した木箱 (一部 2 段重ね) は浮上せず転倒しパイプが散乱するが, 7~9 mにとどまる。(Pieces of pipe were scattered over a large area, but none travelled more than 25-30 ft.)<sup>(5)</sup>

上に掲げる実際の Grand Gulf 原子力発電所資材置き場のパイプ飛散被害状況に対して, 工学モデルを用いた再現計算をして比較する。

計算条件は第3表のとおりとする。

第3表 Grand Gulf 原子力発電所パイプ飛散の計算条件

パイプ仕様	名称：Transite パイプ，材質：コンクリート・石綿製，長さ：8 ft.，直径（内径）：8 in.
計算での仮定	外径 9 in.，密度 $1700 \text{ kg/m}^3$ ， →飛行定数 $C_d A / m = 0.008 \text{ m}^2 / \text{kg}$ ，物体高さ $d = 0.229 \text{ m}$
竜巻条件	最大風速 $V_d = 67 \text{ m/s}$ ，最大接線風速 $V_m = 53.6 \text{ m/s}$ ， 移動速度 $13.4 \text{ m/s}$ ，竜巻半径 $R_m = 45.7 \text{ m}$

計算結果は第4表のとおりであった。

第4表 Grand Gulf 原子力発電所パイプ飛散の計算結果

モデル	初期高さ (m)	飛散距離 (m)	飛散高さ (初期高さから の浮上高さ)	最大水平速度 (m/s)
フジタモデル	1 *	1.2	浮上なし	4.9
ランキン渦モデル	40	227	0.34 m	40.9
ランキン渦モデル	1	42.6	0.34 m	30.7

\* 2段重ねで配置されていた状況を踏まえ設定

再現計算結果と実際の被災状況の記録を比較すると、フジタモデルでは、初期高さから浮上しないとの結果が得られ、実際に確認された状況（浮上せずに転倒した木箱からパイプが散乱）を再現して

いると評価できる。

一方、ランキン渦モデルでは、飛散高さが初期高さを1 mとした場合においても実際に確認された状況とパイプの飛散状況に大きな差があり、地表面での風況場は過大な結果を与えることがわかった。

よって、竜巻対策を実施する上で、ランキン渦モデルを用いた場合は非常に過大な対策となるが、フジタモデルを用いた場合は実現象に即したより現実的な対策が可能といえる。

### (3) 佐呂間竜巻（平成 18 年 11 月 7 日）による被災事例

#### a. 佐呂間竜巻の被害状況から確認されたパラメータを用いた飛来距離計算

平成 18 年 11 月 7 日に北海道網走支庁佐呂間町に発生した竜巻（以下「佐呂間竜巻」という。）により工事事務所敷地内の車両が被災した事例について、実際の被災状況と、工学モデルによる飛来距離の計算結果を比較した。

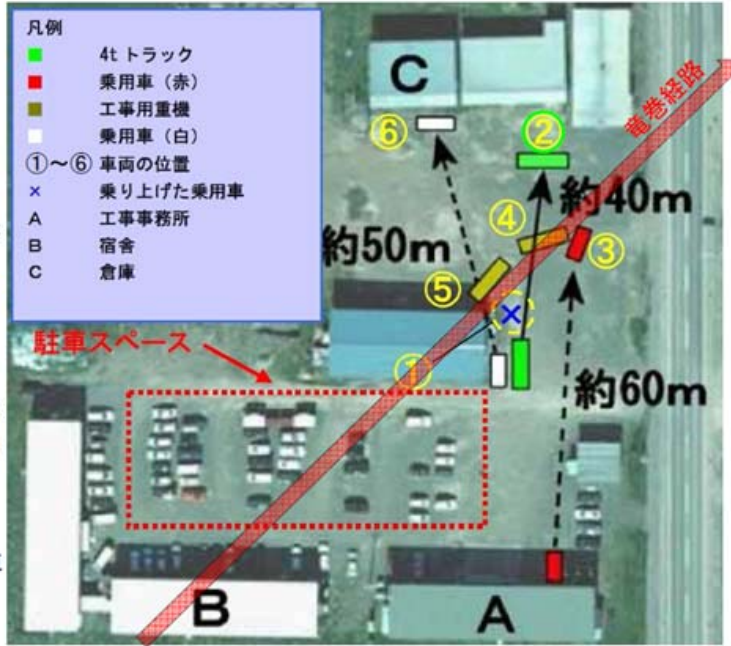
この被災事例では、工事事務所近傍に停車していた 4 トントラック（第 2 図の②）に乗車していた 2 名が竜巻来襲時の被災状況の一部（竜巻来襲前の車両位置等）を証言している。この 2 名は来襲直前に座席下に潜り込んだが直後に気絶し、着地点付近で車外に投げ出されたところを救出されている。

佐呂間竜巻による被害状況から確認されたパラメータを用い、解析コードにより飛来距離算定を行った結果、竜巻の移動経路と車両の位置関係に依存するが、確認された被害状況（4 トントラック②の移動距離 40m）と概ね合致した。

4tトラック②に乗車していた2名が竜巻来襲時の被災状況の一部(右図、工事事務所Aの飛散開始、車両②および⑥の竜巻来襲前の車両位置)を証言している。  
この2名は来襲直前に座席下に潜り込んだが直後に気絶し、着地点付近で車外に投げ出されたところを救出されている。

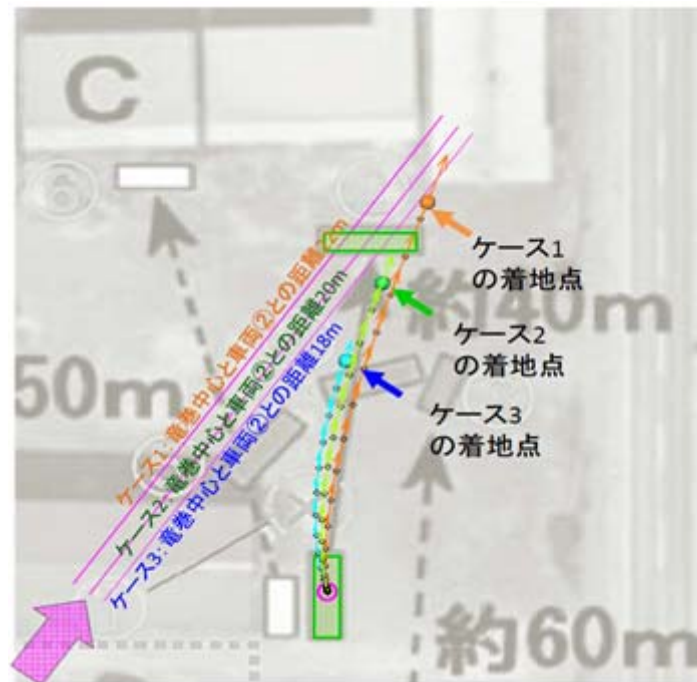
- ①乗用車×: 他の乗用車に乗り上げ(元の駐車位置は不明)
- ②4tトラック■: 竜巻経路の左側(約45°方向)に約40m移動
- ③乗用車■: 約60m移動(全壊・飛散した工事事務所Aの瓦礫とともに移動したものと考えられる)
- ④⑤重機: (元の駐機位置は不明)
- ⑥乗用車□: 竜巻経路の左側(約65°方向)に約50m移動(駐車位置横の倉庫は全壊・飛散)

周囲の建物や大型車両の影響が少ない4tトラック■を計算対象として選択



竜巻の前後に位置が確認された車両の移動状況[文献(3)]  
(写真は被災前の航空写真。文献(4)で示されている竜巻経路を➡で加筆。)

第2図 佐呂間竜巻による被災状況<sup>(6)(7)</sup>



第3図 佐呂間竜巻のパラメータを用いた飛来距離計算結果

第5表 佐呂間竜巻による飛来距離の算定条件と結果

条件	算定条件・結果	備考
空力パラメータ	$C_{La} / m = 0.0044$ $C_{DA} / m = 0.0056$	被災した4トントラックは車種不明のため、三菱ふそう PA-FK71D (8.1 m×2.24 m×高さ2.5 m, 質量4,000 kg) の仕様を採用した。物体が空中にある場合の抗力の算定には $C_{DA} / m$ の値を用い、揚力の算定には $C_{La} / m = 0.0044$ に相当する条件を設定*。物体高さ $d = 2.5$ m とする。
竜巻と車両の位置関係	竜巻の進行方向の右側，中心移動経路から 18～22 m の位置	被害状況から推定される位置関係を入力条件として設定。現場の詳細が不明のため，18, 20, 22m の 3 パターンについて評価を実施した。
竜巻最大風速	92 m / s	被害状況から推定される風速 (F 3) を設定。
竜巻移動速度	22 m / s	被害記録から算定される移動速度を設定。
最大接線風速半径	20 m	被害状況から推定される最大接線風速半径を設定。
飛来距離	26～45 m	実際に確認された車両の移動距離 (約 40m) と概ね合致。

※竜巻は遠方から接近するため，参考文献(8)の風洞試験結果を参考として，「風速 60 m/s 以下では浮上・移動しない条件」を設定する。 $C_{La} / m = 0.0044$  は，風速 60m/s 以下では浮上/移動しない条件に相当する。

b. 佐呂間竜巻の条件を用いた場合の最大飛来距離の算定

佐呂間竜巻における被害状況から確認された各種パラメータを用いて、解析コードによる最大飛来距離の算定を行った。

最大飛来距離の算定においては、空力パラメータ（揚力の算定）に保守性を考慮した。

最大飛来距離の算定結果は 82m となり、実際に確認された車両の移動距離（約 40m）に比べて大きい算定結果が得られた。

第 6 表 佐呂間竜巻のパラメータを用いた場合の最大飛来距離の算定条件と結果

条件	算定条件・結果	備考
空力パラメータ	$C_{La} / m = 0.0056$ $C_{DA} / m = 0.0056$	揚力の算定においても $C_{DA} / m$ の値を設定。
車両の位置関係	竜巻の進行方向に対して右側 $90^\circ$ ，最大接線風速半径の真下付近	車両が竜巻の最大風速を受ける位置関係を設定。
最大風速	92 m/s	被害状況から推定される風速（F3）を設定。
移動速度	22 m/s	被害記録から算定される移動速度を設定。
最大接線風速半径	20 m	被害状況から推定される最大接線風速半径を設定。
最大飛来距離	82 m	

出典：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 ― 改定 4，  
2014 年 9 月 4 日 日本保全学会 原子力規制関連事項検討会



### 3. まとめ

フジタモデルは観測に基づき考案された竜巻風速場の工学モデルであり、実際に近い竜巻風速場をモデル化している。1978年の Grand Gulf 原子力発電所の竜巻被災や、平成 18 年の佐呂間町での竜巻被災における地上物の転倒または移動状況は、フジタモデルを用いると実際に確認された状況をよく再現することがわかっている。

#### 4. 参考文献

- (1) Fujita, T. T., Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity, SMRP Research Paper 91 (1971), University of Chicago, Chicago, IL, p.42.
- (2) 気象庁 HP
- (3) 江口 譲, 杉本聡一郎, 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
- (4) J. R. McDonald, T. Theodore Fujita : His Contribution to Tornado Knowledge through Damage Documentation and the Fujita Scale, pp.63-72, vol.82, no.1, Bull. of Amer. Meteor. Soc., 2001
- (5) T. Fujita and J. R. McDonald : Tornado damage at the Grand Gulf, Mississippi, nuclear power plant site: Aerial and ground surveys. NNUREG/CR-0383, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 1978.
- (6) 札幌管区気象台 : 災害時気象調査報告, 平成 18 年 11 月 7 日から 9 日に北海道 (佐呂間町他) で発生した竜巻等の突風, 災害時自然現象報告書 2006 年第 1 号, 2006
- (7) 建築研究所 構造研究グループ 奥田泰雄・喜々津仁密・村上知徳, 2006 年佐呂間町竜巻 被害調査報告, 2006 年 11 月 21 日
- (8) T. Schmidlin et al., UNSAFE AT ANY (WIND) SPEED? Testing the Stability of Motor Vehicles in Severe Winds, pp.1821-1830, vol.83, no.12, Bull. of Amer. Meteor. Soc., 2002

以 上

令和元年 11 月 29 日 RO

補足説明資料 6 - 1 (9 条 竜巻)

参考資料 2

## 竜巻による物体の浮上・飛来解析について

### (1) フジタモデルによる竜巻風速場

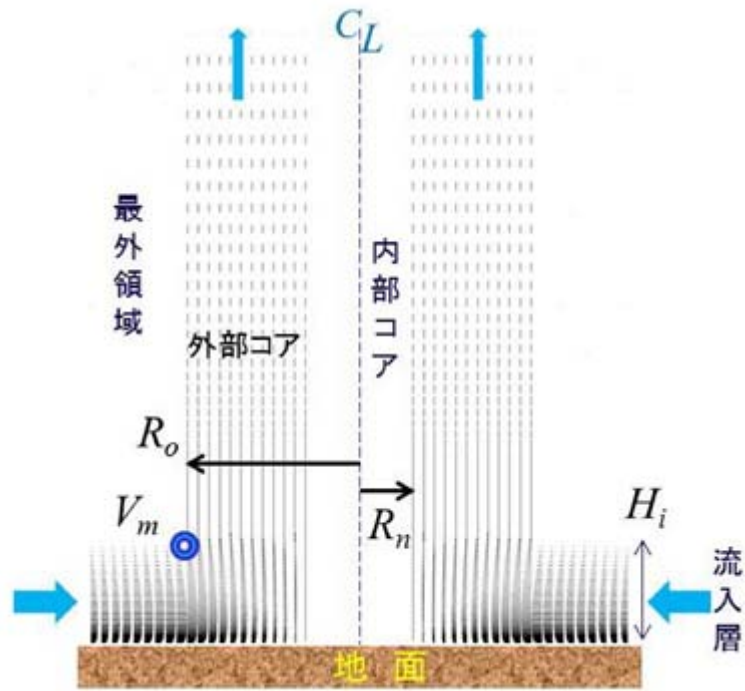
#### a. フジタモデルの概要

フジタモデルでは、参考資料 1 に示すように、竜巻を半径方向に 3 つの領域（内部コア、外部コア、最外領域）に分割してモデル化している。

内部コアでは、中心周りに剛体回転運動するのみであり、上昇流はない。

外部コアでは、剛体回転運動と強い上昇流がある。

最外領域では、自由渦（ランキン渦モデルとほぼ同じ）として回転運動するが、地面付近で竜巻中心に向かう強い流れ（流入層）がある。



第1図 Fujita モデルの風速領域（ $x-z$ 断面）

内部コア半径  $R_n$  は外部コア半径  $R_o$  に比例する。

$$R_n = nR_o \quad (1)$$

$N$  は1以下の正の値であり，以下の経験式が与えられる。

$$N = 0.9 - 0.7 \exp(-0.005R_o) \quad (2)$$

流入層の高さ  $H_i$  も外部コア半径  $R_o$  に比例する。

$$H_i = iR_o \quad (3)$$

$i$  は1以下の正値であり，以下の経験式で与えられる。

$$i = 0.55(1 - n^2) \quad (4)$$

#### b. 周方向風速

周方向風速  $V_\theta$  は以下のようにモデル化している。

$$V_\theta = F_r(r')F_h(z')V_m \quad (5)$$

ただし,  $r' = r/R_0$  ,  $z' = z/H_i$  (6) a, b

$F_r(r')$  及び  $F_h(z')$  は以下のとおり定義される。

$$F_r(r') = \begin{cases} r' & (r' < 1) \\ 1/r' & (r' \geq 1) \end{cases} \quad (7)$$

$$F_h(z') = \begin{cases} z'^{k_0} & (z' < 1) \\ \exp(-k(z' - 1)) & (z' \geq 1) \end{cases} \quad (8)$$

定数  $k_0$  ,  $k$  の値は,  $k_0 = 1/6$  ,  $k = 0.03$  としている。

### c. 半径方向風速

半径方向風速  $V_r$  は, 以下のように周方向風速  $V_\theta$  に比例する。

$$V_r = V_\theta \tan \alpha$$

$\tan \alpha$  は以下の関数にて与えられる。

$$\tan \alpha = \begin{cases} 0 & (r' \leq n) \\ \frac{\tan \alpha_0}{1-n^2} \left(1 - \frac{n^2}{r'^2}\right) & (n < r' < 1) \\ \tan \alpha_0 & (r' \geq 1) \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{ただし, } \tan \alpha_0 = \begin{cases} -A_m(1 - z'^{1.5}) & (z' < 1) \\ B_m \{1 - \exp(-k(z' - 1))\} & (z' \geq 1) \end{cases} \quad (10)$$

$$B_m = \frac{3}{(k_0+1)(k_0+2.5)} k A_m \quad , \quad A_m = 0.75 \quad (11)$$

### d. 上昇風速

上昇風速  $V_z$  は以下のようにモデル化している。

$$V_z = \begin{cases} 0 & (r' \leq n) \\ V_m w_0 & (n < r' < 1) \\ 0 & (r' \geq 1) \end{cases} \quad (12)$$

ただし,

$$w_0 = \begin{cases} \frac{3}{28} \cdot \frac{i}{1-n^2} A_m \left( 16z'^7 - 7z'^8 \right) & (z' < 1) \\ \frac{iB_m \exp(-k(z'-1))}{k(1-n^2)} \{ 2 - \exp(-k(z'-1)) \} & (z' \geq 1) \end{cases} \quad (13)$$

e. 風速ベクトル

時刻  $t = 0$  で竜巻中心が原点に位置するものとし、竜巻が  $x$  軸方向に移動速度  $V_{tr}$  で移動すると仮定すると、時刻  $t$ 、座標  $(x, y, z)$  における風速場  $V_w$  の各風速成分は以下のように与えられる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_r \cos \theta - V_\theta \sin \theta \\ V_r \sin \theta + V_\theta \cos \theta \\ V_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{tr} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

ただし、 $\theta$  は竜巻中心と各点を結ぶ線分が  $x$  軸となす角であり、竜巻中心からの距離  $r$  は以下で定義されるものである。

$$r = \sqrt{(x - V_{tr}t)^2 + y^2} \quad (15)$$

## (2) 飛来物の運動

### a. 空中での運動

空中では平均抗力と重力のみが外力として作用するものとした。

ただし、地面付近では地面の存在により流れが非対称になること(地面効果)による揚力加速度  $L$  を考慮した。

物体の空中での運動方程式は以下のようになる。

$$\frac{dV_M}{dt} = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{C_D A}{m} |V_w - V_M| (V_w - V_M) - (g - L)K \quad (16)$$

$V_M$  : 飛来物の速度ベクトル

$\rho$  : 空気密度

$C_D A$  : 飛来物の各方向の抗力係数と見附面積の積の平均値

$m$  : 飛来物の質量

$g$  : 重力加速度

$K$  : 鉛直上向きの単位ベクトル

地面効果による揚力加速度  $L$  は、 $x-y$  平面内の相対速度の 2 乗に比例し、さらに揚力は物体高さ  $d$  の 3 倍までの高さで減衰・消滅するものとし、揚力による加速度  $L$  を以下のようにモデル化した。

$$L = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{C_L a}{m} |V_w - V_M|_{x,y}^2 f\left(\frac{Z}{d}\right) \quad (17)$$

ただし、 $f\left(\frac{Z}{d}\right) = \frac{1 - (Z/3d)}{1 + (Z/d)}$  ,  $Z = z - \frac{d}{2}$

$C_L$  : 地上での揚力係数

$a$  : 地上での物体の見附面積

$|_{x,y}$  :  $x, y$  成分のみの大きさ

- $C_L a$  は風洞実験や数値シミュレーションで定められるが、本モデルでは  $C_D A$  で代用することとした。



$$L = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{C_D A}{m} |V_w - V_M|_{x,y}^2 f\left(\frac{Z}{d}\right) \quad (18)$$

b. 地面での運動

地面効果による揚力加速度  $L$  と重力が鉛直方向の外力として作用するものとし、揚力加速度  $L$  が重力よりも大きい場合 ( $L > g$ ) に物体が浮上し、空中運動に移行するとした。

c. 時間積分法

時刻  $t$  における竜巻の風速場は式 (14) で与えられるので、式 (16) を時間積分することによって飛来物の速度  $V_M(t)$  と位置  $X_M(t)$  の時刻歴を求めることができる。

時刻  $\tau$  から  $\tau + \Delta\tau$  における加速度が一定と仮定すると、

$$\frac{dV_M(t)}{dt} = A(\tau) \quad (19)$$

$A(\tau)$  : 加速度ベクトル

となり、式 (16) は以下のようなになる。

$$A(\tau) = k|V_w(\tau) - V_M(\tau)|(V_w(\tau) - V_M(\tau)) - (g - L)K \quad (20)$$

ここで、 $k = \rho C_D A / 2m$  とした。

式 (19) を時間積分すると以下の速度式  $V_M(t)$  及び物体の位置  $X_M(t)$  を得る。

$$V_M(t) = V_M(\tau) + A(\tau)(t - \tau) \quad (21)$$

$$X_M(t) = X_M(\tau) + V_M(\tau)(t - \tau) + \frac{A(\tau)}{2}(t - \tau)^2 \quad (22)$$

(21), (22) より、時刻  $t = \tau + \Delta\tau$  における飛来物の速度  $V_M(t)$  と位置  $X_M(t)$  は以下で与えられる。

$$V_M(\tau + \Delta\tau) = V_M(\tau) + A(\tau)\Delta\tau \quad (23)$$

$$X_M(\tau + \Delta\tau) = X_M(\tau) + V_M(\tau)\Delta\tau + \frac{A(\tau)\Delta\tau^2}{2} \quad (24)$$

(23), (24) の右辺は時刻 $t = \tau$ における既知の速度・位置の関数なので、時間積分を行うことができる。

出典： 江口 譲，杉本 聡一郎，服部 康男，平口 博丸，電力中央研究所報告「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，平成 26 年 6 月

以 上

令和元年 11 月 29 日 RO

補足説明資料 8 - 5 (9 条 竜巻)

## 竜巻発生確度ナウキャスト及び雷ナウキャストについて

### 1. 竜巻発生確度ナウキャストとは

10 k m 格子単位で「竜巻が発生する可能性の程度」を2つの階級（発生確度1, 2）で解析し, 10分ごとに1時間先までの予測を行うものであり, 気象庁より提供される。

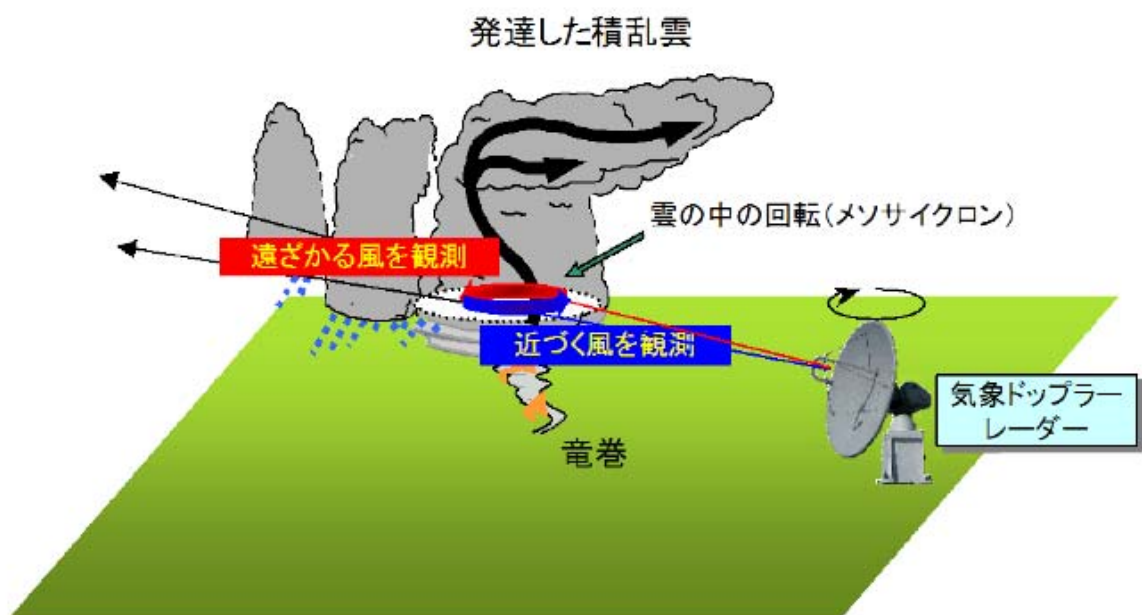
竜巻などの激しい突風は, 規模が小さくレーダーなどの観測機器で直接実体を捉えることができないため, 竜巻をもたらす発達した積乱雲の中にある直径数キロのメソサイクロンの検出又は, 大気環境, 積乱雲の発生場所・発生状況から突風の発生可能性を表す指数「突風危険指数」が基準を満たした場合に発生確度の解析を開始し, 降水強度の解析と重ねて降水強度が強い格子を発生確度1, 2と判断する。

#### (1) 発生確度1

メソサイクロンの検出又は突風危険指数の基準を満たした(O R 条件) 格子の周辺 100 k m 範囲は「積乱雲が発生すれば突風の可能性がある」領域(発生確度1背景)と考え, この領域の降水強度が強い格子を「発生確度1」と判定する。

## (2) 発生確度 2

メソサイクロンの検出及び突風危険指数の基準を満たした(A  
ND条件) 格子の周辺 40 k m 範囲は「積乱雲が発生すれば突風の  
可能性が発生確度 1 背景より高い」領域(発生確度 2 背景)と  
考え、この領域の降水強度が強い格子を「発生確度 2」と判定す  
る。



第 8 - 5 - 1 図 気象ドップラーレーダーによる積乱雲中の  
メソサイクロンの検出<sup>(1)</sup>

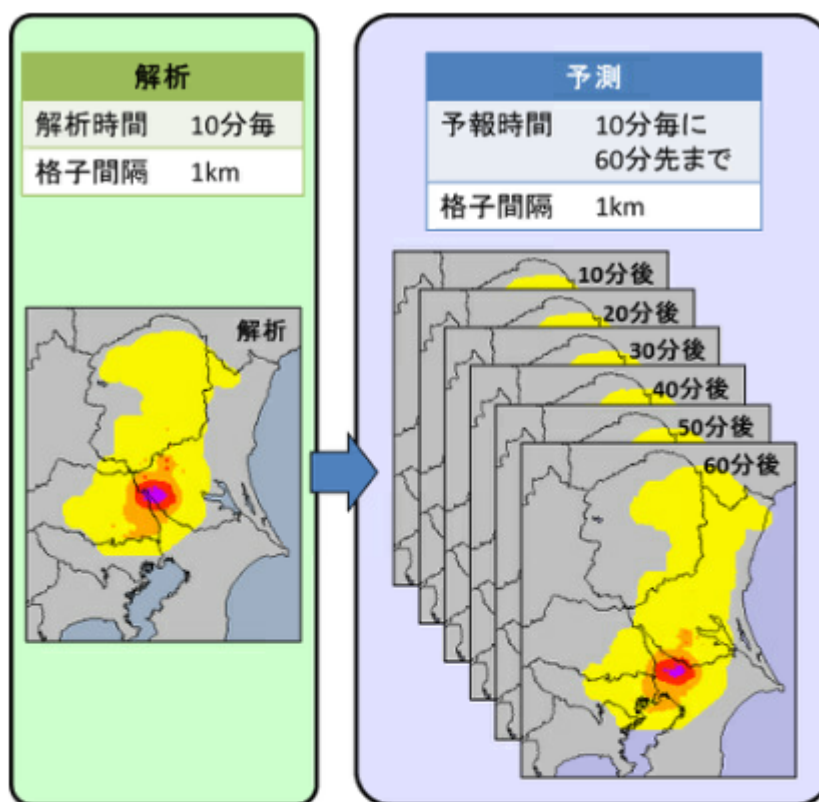
## 2. 雷ナウキャストとは

雷ナウキャストは、雷の激しさや雷の可能性を 1 k m 格子単位  
で解析し、10 分ごとに 1 時間先までの予測を行うものであり、  
気象庁より提供される。

雷の解析は、雷監視システムによる雷放電の検知及びレーダー  
観測などを基にして活動度 1 ~ 4 で表される。予測については、

雷雲の移動方向に移動させるとともに、雷雲の盛衰傾向も考慮している。

雷ナウキャストでは、雷監視システムによる雷放電の検知数が多いほど激しい雷が発生している（活動度が高い）としており、雷放電を検知していない場合でも、雷雲の特徴から雷雲解析するとともに、雷雲が発達する可能性のある領域も解析している。



活動度	雷の状況	
4	激しい雷	落雷が多数発生している。
3	やや激しい雷	落雷がある。
2	雷あり	電光が見えたり雷鳴が聞こえる。落雷の可能性が高くなっている。
1	雷可能性あり	現在は雷は発生していないが、今後落雷の可能性はある。

第 8 - 5 - 2 図 雷ナウキャストの解析，予測及び活動度<sup>(2)</sup>

< 参考文献 >

(1) 竜巻などの激しい突風に関する気象情報の利活用について

(平成 22 年 3 月気象庁)

(2) 雷ナウキャストとは 気象庁HP

以 上