

【公開版】

提出年月日	令和2年6月26日	R9
日本原燃株式会社		

六ヶ所廃棄物管理施設における  
新規制基準に対する適合性

安全審査 整理資料

第8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. 設計対処施設

#### 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 竜巻防護対象施設を収納する建屋

##### 7. 2 建屋内の施設で外気と繋がっている竜巻防護対象施設

##### 7. 3 竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設

##### 7. 4 竜巻随伴事象に対する設計

#### 8. 手順等

### 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八条と再処理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八条において追加された要求事項を整理する。（第8. 1表（竜巻））

第8. 1 表 (竜巻) 事業許可基準規則第八條と再処理施設安全審査指針 比較表 (1 / 3)

事業許可基準規則 第八條 (外部からの衝撃による損傷の防 止)	再処理施設安全審査指針	備考
<p>1 廃棄物管理施設は、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性を損なわないものでなければならぬ。</p> <p>(解釈)</p> <p>1 第1項に規定する「想定される自然現象」とは、廃棄物管理施設の敷地及びその周辺の自然環境を基に、最新の科学的知見に基づき、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。なお、必要のある場合には、異種の自然現象の重畳を考慮すること。</p> <p>2 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性を損なわないもの」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、自然事象そのものもたらず環境条件及びその結果として廃棄物管理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. 基本的立地条件</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、再処理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、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>(解説)</p> <p>1 自然環境及び社会環境について、申請者が行った文献調査及び現地調査の結果を、建物・構築物の配置を含む設計の妥当性の判断及び各種の評価に用いることが適切であることを確認するほか、必要に応じ現地調査等を行い、申請者の行った各種の調査結果の確認を行うものとする。</p>	<p>追加要求事項</p>



第8. 1表 (竜巻) 事業許可基準規則第八條と再処理施設安全審査指針 比較表 (2 / 3)

<p>事業許可基準規則 第八條 (外部からの衝撃による損傷の防 止)</p>	<p>再処理施設安全審査指針</p>	<p>備 考</p>
	<p>指針14 地震以外の自然現象に対する考慮</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 再処理施設における安全上重要な施設は、再処理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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ol>	<p>前記のとおり</p>

第8. 1 表 (竜巻) 事業許可基準規則第八条と再処理施設安全審査指針 比較表 (3 / 3)

事業許可基準規則 第八条 (外部からの衝撃による損傷の防止)	再処理施設安全審査指針	備考
<p>2 廃棄物管理施設は、事業所又はその周辺において想定される当該廃棄物管理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。) に対して安全性を損なわないものでなければならぬ。</p> <p>(解釈)</p> <p>3 第2項に規定する「想定される当該廃棄物管理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もと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、船舶の衝突又は電磁的障害等をいう。なお、「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)) 等を参考にし、防護設計の要否について確認すること。近隣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は、その影響を評価した上で、必要な場合、廃棄物管理施設の安全性を確保する上で必要な施設が適切に保護されていることを確認すること。</p>	<p>指針1 基本的立地条件</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、再処理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</p> <p>(1) 近接工場における火災、爆発等</p> <p>(2) 航空機事故等による飛来物等</p> <p>(3) 水の利用状況、飲食物の生産・流通状況、人口分布状況等</p> <p>(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。</p> <p>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離隔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。</p> <p>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>

## 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

廃棄物管理施設は、敷地内又はその周辺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も、安全性を損なわない設計とする。

なお、敷地内又はその周辺で想定される自然現象のうち、洪水及び地滑り並びに津波については、立地的要因により設計上考慮する必要はない。

また、廃棄物管理施設は、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廃棄物管理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。）（以下「人為事象」という。）に対して安全性を損なわない設計とする。

なお、敷地内又はその周辺において想定される人為事象のうち、ダムの崩壊及び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の組合せについては、地震、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。これらの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性を損なわない設計とする。

## (2) 竜巻

安全機能を有する施設は、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安全機能を有する施設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。

安全機能を有する施設の安全機能を損なわないようにするため、安全機能を有する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。飛来物となり得る資機材及び車両のうち、衝突時に与える運動エネルギー又は貫通力が設計飛来物によるものより大きくなるものについては、固定、固縛、建屋収納、退避又は撤去を実施する。

また、再処理事業所外から飛来するおそれがあり、かつ、再処理事業所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がある場合は、設計飛来物として考慮の可否を検討する。

竜巻に対する防護設計においては、機械的強度を有する建物により保護すること等により、安全機能を有する施設の安全機能を損なわない設計とすること、若しくは竜巻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理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。

### 1. 3 規則への適合性

(外部からの衝撃による損傷の防止)

第八条 廃棄物管理施設は、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性を損なわないものでなければならない。

2 廃棄物管理施設は、事業所又はその周辺において想定される当該廃棄物管理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。）に対して安全性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項について

廃棄物管理施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）に対して廃棄物管理施設の安全性を損なわない設計とする。

##### (1) 竜巻

日本で過去（1961年～2013年12月）に発生した最大の竜巻から、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、将来の竜巻発生に関する不確実性を踏まえ、基準竜巻の最大風速を安全側に切り上げて、設計竜巻の最大風速を100m/sとし、安全機能を有する施設の安全機能を損なわないよう、飛来物の発生防止対策及び竜巻防護対策を行う。

##### a. 飛来物の発生防止対策

竜巻により再処理事業所内の資機材が飛来物となり、安全機能を有する施設の安全機能を損なわないよう、以下の対策を行う。

- (a) 飛来物となる可能性のあるものを固定，固縛，建屋収納又は敷地から撤去する。
- (b) 車両の周辺防護区域内への入構の管理，竜巻の襲来が予想される場合の車両の固縛又は飛来対策区域外の退避場所への退避を行う。

#### b. 竜巻防護対策

安全機能を有する施設は，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，若しくは竜巻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修理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。

安全上重要な施設は，竜巻防護対象施設とし，建物の外壁及び屋根により建物全体で適切に防護することにより安全機能を損なわない設計とすることを基本とする。

竜巻の発生に伴い，降雹が考えられるが，降雹による影響は竜巻防護設計にて想定している設計飛来物の影響に包絡される。また，冬季における竜巻の発生を想定し，積雪による荷重を適切に考慮する。

## 2. 竜巻影響評価の基本方針

原子力規制委員会の定める「廃棄物管理施設の位置、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三十一号）」第八条では、外部からの衝撃による損傷防止として、廃棄物管理施設は、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性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。

廃棄物管理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件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) 廃棄物管理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処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、廃棄物管理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、廃棄物管理施設の全ての安全機能を有する構築物、系統及び機器とする。設計竜巻から防護する施設（以下「竜巻防護対象施設」という。）としては、冷却及び遮蔽の安全機能を確保する観点から、安全上重要な機能を有する構築物、系統及び機器を抽出する。竜巻防護対象施設及びそれらを収納する建屋（以下「竜巻防護対象施設等」という。）は、竜巻により冷却及び遮蔽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、その施設の倒壊等により竜巻防護対象施設等に波及的影響を及ぼして安全機能を損なわせる可能性がある施設及び竜巻防護対象施設を収納する建屋は、機械的強度を有すること等により、竜巻防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。ここで、竜巻防護対象施設、竜巻防護対象施設を収納する建屋及びその施設の倒壊等により竜巻防護対象施設等に波及的影響を及ぼして安全機能を損なわせる可能性がある施設を併せて、設計対処施設という。

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理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。

なお、ガラス固化体輸送容器（以下「輸送容器」という。）にガラス固化体を収納した輸送容器は廃棄物管理施設内に一時的に保管されることを踏まえ、竜巻によりガラス固化体を収納した輸送容器に波及的破損を与えない設計とする。

【補足説明資料 2-1】



### 3. 設計対処施設

設計対処施設は、竜巻防護対象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は、冷却及び遮蔽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対象施設とする。

これらの施設を第8.1図（竜巻）～第8.3図（竜巻）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処施設として選定するとともに竜巻防護対象施設を収納する建屋を設計対処施設として選定する。また、建屋に収納される竜巻防護対象施設のうち第8.4図（竜巻）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しない建屋に収納される竜巻防護対象施設及び開口部を有する室に設置される竜巻防護対象施設のうち第8.5図（竜巻）に示す選定フローに従い選定される竜巻防護対象施設は、建屋に収納されるが防護が期待できない竜巻防護対象施設として選定する。

以上の選定結果から、竜巻防護対象施設は以下のように分類できる。

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

なお、建屋に収納されるが防護が期待できない竜巻防護対象施設及び屋外の竜巻防護対象施設に該当する施設はない。

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、当該施設の破損等により竜巻防護対象施設等に波及的影響を及ぼして安全機

能を損なわせる可能性がある施設又はその施設の特定の区画を，竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設として選定する。

竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設としては，竜巻防護対象施設等を除く構築物，系統及び機器の中から，竜巻防護対象施設等に対し，倒壊による機械的影響を及ぼし得る施設及び付属施設の破損等による機能的影響を及ぼし得る施設を以下のとおり選定する。

竜巻防護対象施設等に機械的影響を及ぼし得る施設としては，建物・構築物の高さや竜巻防護対象施設等との距離を考慮して，破損又は倒壊により竜巻防護対象施設等に波及的影響を及ぼして安全機能を損なわせるおそれがある施設を竜巻防護対象施設に機械的影響を及ぼし得る施設として選定する。

竜巻防護対象施設に機能的影響を及ぼし得る施設としては，竜巻防護対象施設の付属設備のうち屋外にあるもので，風圧力，気圧差及び飛来物の衝突による破損等により竜巻防護対象施設の安全機能を損なわせるおそれがある施設を竜巻防護対象施設に機能的影響を及ぼし得る施設として選定する。

なお，安全上重要な施設以外の安全機能を有する施設で竜巻防護対象施設の付属設備のうち屋外にあるものに該当する施設はないことから，竜巻防護対象施設に機能的影響を及ぼし得る施設はない。

選定した結果から，設計対処施設は以下に分類される。

- ・ 竜巻防護対象施設を収納する建屋
- ・ 建屋内の施設で外気と繋がっている竜巻防護対象施設
- ・ 竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設

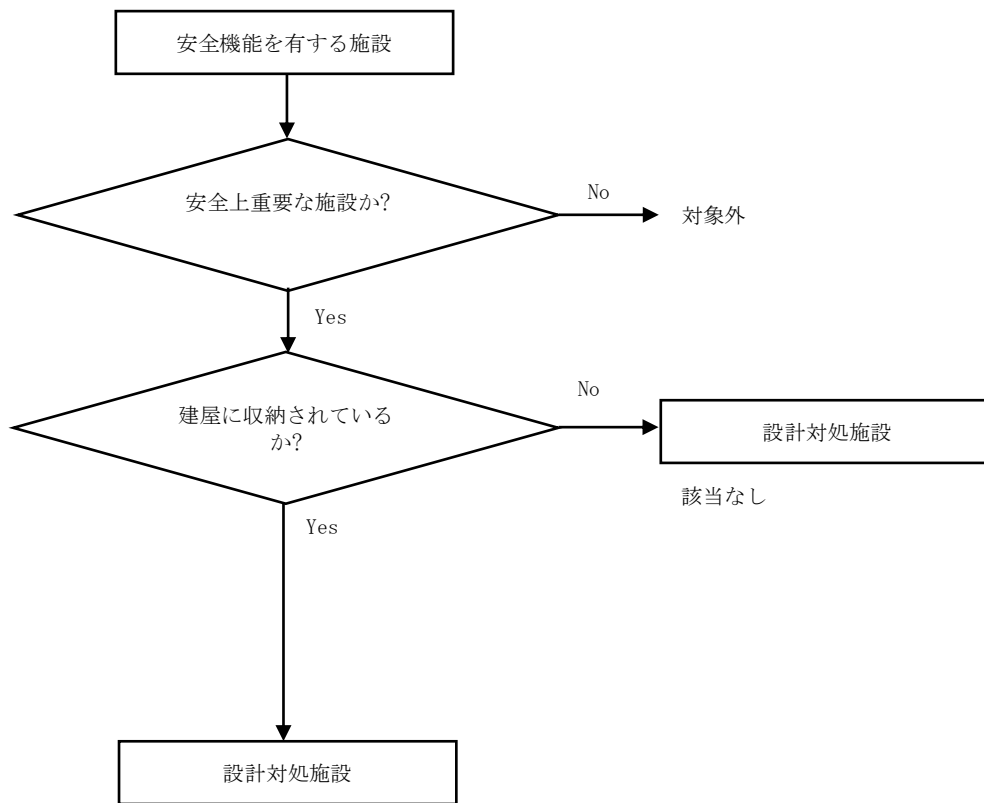
竜巻防護対象施設のうち，建屋内の施設で外気と繋がっている竜巻防護対象施設として，ガラス固化体貯蔵設備の収納管を選定する。

竜巻防護対象施設を収納する建屋としてガラス固化体貯蔵建屋及びガラス固化体貯蔵建屋B棟を選定する。

竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設として、北換気筒（ガラス固化体受入れ・貯蔵建屋換気筒）及びガラス固化体受入れ建屋を選定する。

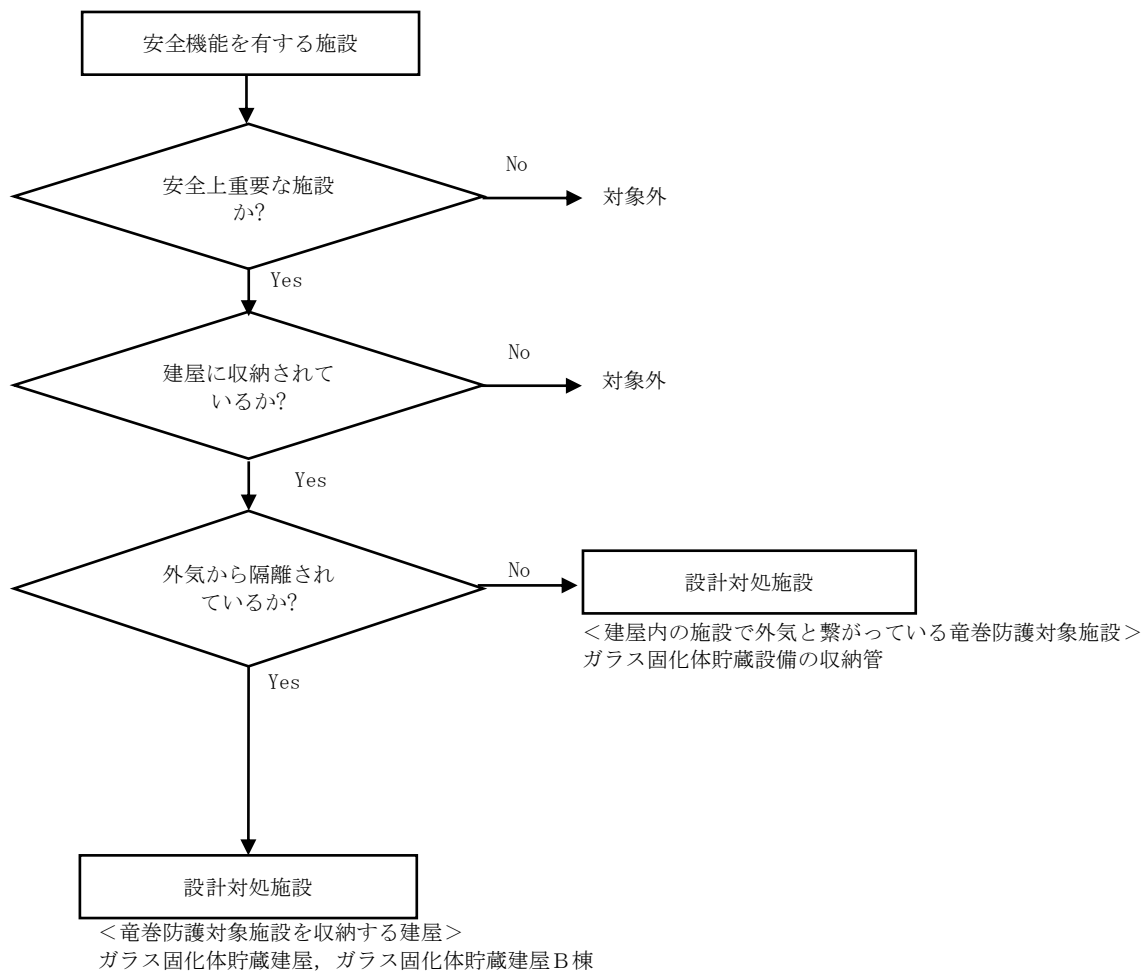
なお、廃棄物管理施設内に一時的に保管されるガラス固化体を収納した輸送容器は、竜巻により波及的破損を与えない設計とする。

**【補足説明資料 3-1～3-3】**

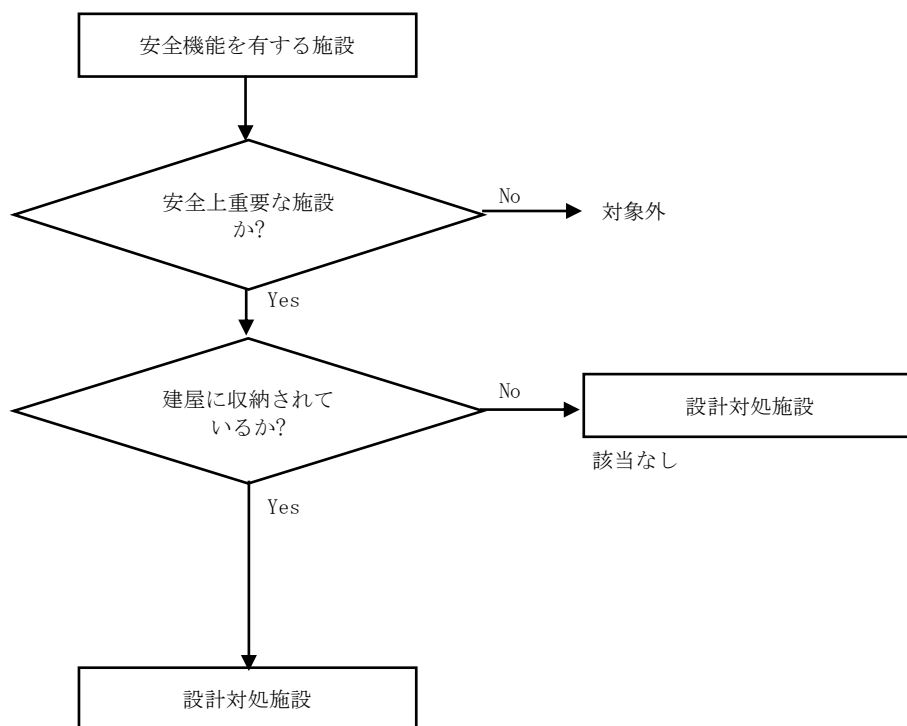


<竜巻防護対象施設を収納する建屋>  
 ガラス固化体貯蔵建屋, ガラス固化体貯蔵建屋B棟

第8. 1 図（竜巻） 風圧力に対する設計対処施設の選定フロー

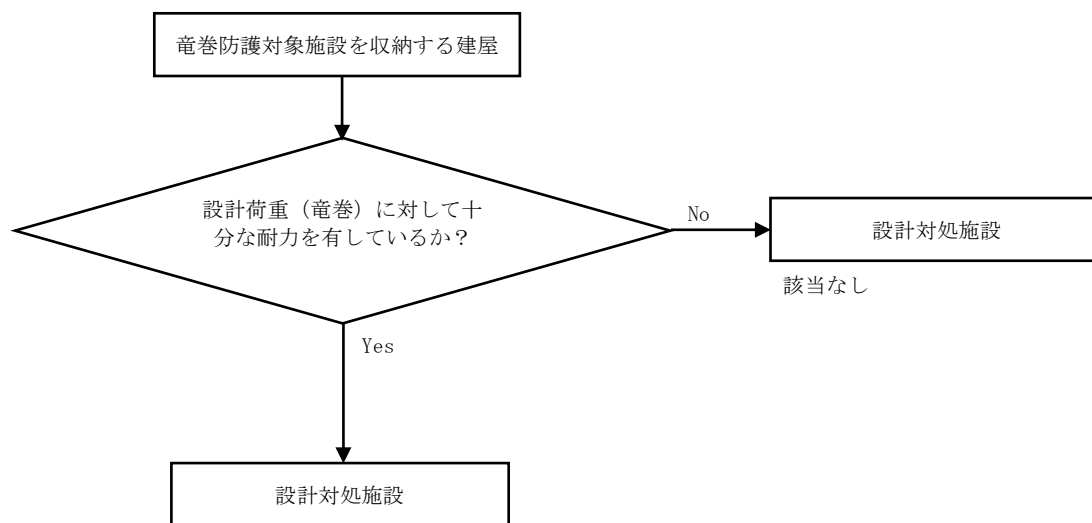


第8. 2 図（竜巻） 気圧差に対する設計対処施設の選定フロー



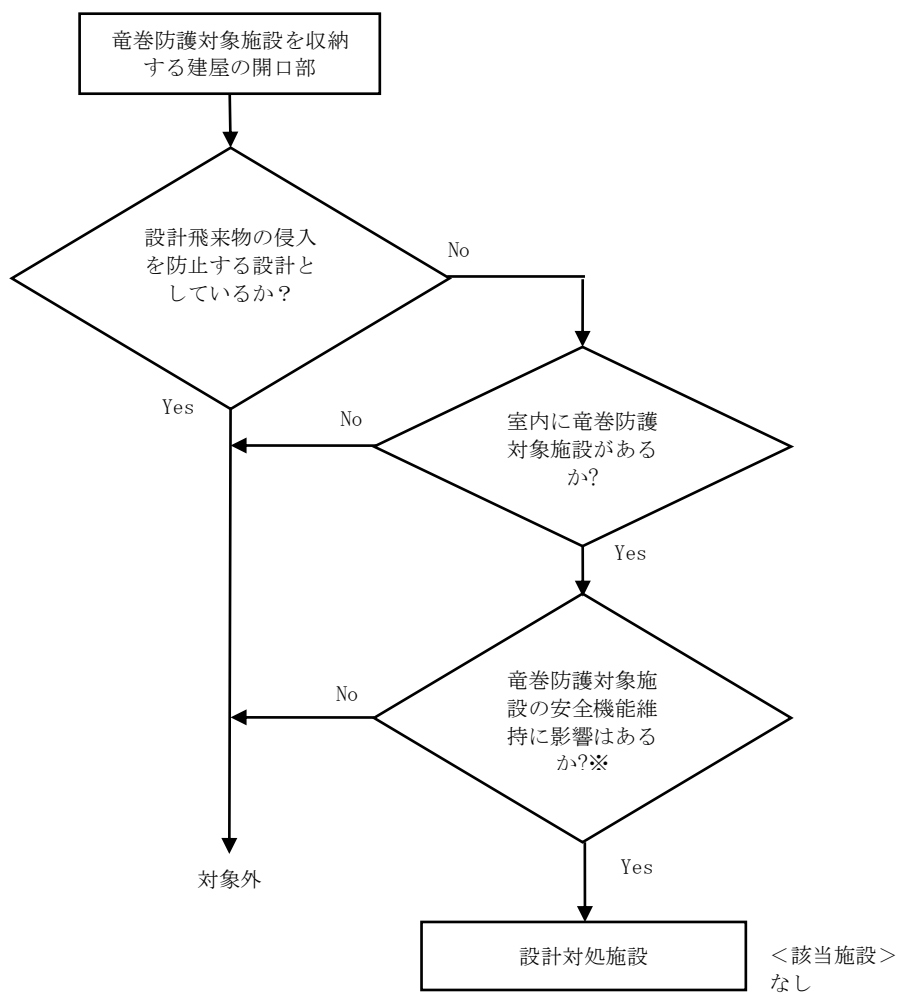
<竜巻防護対象施設を収納する建屋>  
 ガラス固化体貯蔵建屋, ガラス固化体貯蔵建屋B棟

第8. 3図 (竜巻) 飛来物に対する設計対処施設の選定フロー



＜竜巻防護対象施設を収納する建屋＞  
 ガラス固化体貯蔵建屋， ガラス固化体貯蔵建屋B棟

第8. 4図（竜巻） 建屋の耐力に関する設計対処施設の選定フロー



※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8. 5図 (竜巻) 開口部に対する設計対処施設の選定フロー



#### 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

竜巻検討地域は、竜巻ガイドを参考に廃棄物管理施設が立地する地域、気象条件の類似性の観点から検討し設定する。

###### (1) 廃棄物管理施設が立地する地域の気候

廃棄物管理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第8. 6図（竜巻）に示す。これによると、廃棄物管理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型でやませの影響が強い）に属している。

###### (2) 廃棄物管理施設が立地する地域の竜巻発生観点での特徴

第8. 7図（竜巻）に示すとおり、廃棄物管理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第8.

8 図（竜巻）に，その特徴を第 8. 2 表（竜巻）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，廃棄物管理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. ～ 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 5 k m 及び陸側 10 k m の範囲を竜巻検討地域に設定する（面積約 18, 000 k m<sup>2</sup>）。第 8. 9 図（竜巻）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. I A E A の基準を参考に，廃棄物管理施設を中心とする 10 万 k m<sup>2</sup>（半径約 180 k m）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. 廃棄物管理施設が海岸線から約 5 k m 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 k m 及び陸側 10 k m 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第8.10図（竜巻）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SR e H（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付けで、国内外で広く利用され知見が蓄積されている。CAPEの概念を第8.11図（竜巻）に、SR e Hの概念を第8.12図（竜巻）に示す。

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

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

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70 km) 及びERA40 (1989年まで：水平分解能約250 km) 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～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25 km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)]

$$\text{CAPE} : 1,200 \text{ J/kg}, \quad \text{SR e H} : 350 \text{ m}^2 / \text{s}^2$$

[寒候期(11月～4月)]

$$\text{CAPE} : 500 \text{ J/kg}, \quad \text{SR e H} : 350 \text{ m}^2 / \text{s}^2$$

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第8.13図(竜巻)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1～2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～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～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8. 3表 (竜巻) に日本で過去に発生した藤田スケール3の竜巻の一覧を示す。

##### (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 (第8. 14図 (竜巻)) 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～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)～(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、第8.4表（竜巻）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、第8.15図（竜巻）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、第8.16図（竜巻）～第8.18図（竜巻）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、第8.5表（竜巻）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

廃棄物管理施設の設計対処施設を包含する円を設置面積とみなし、第8.19図（竜巻）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。

#### 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（W e n a n d C h u）。

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

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。



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

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。

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

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。

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

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.)。

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

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180m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180mの円の面積：約 $2.6 \times 10^4 \text{ m}^2$ ）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。

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

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、廃棄物管理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付けられる。米国気象局 NWS (National Weather Service) では、*gale intensity velocity* は34～47ノット (17.5～24.2m/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* : 17.2～20.7m/s) , 風力9は大強風 (*strong gale* : 20.8～24.4m/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 (17～32m/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第8.20図（竜巻）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、39m/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 1 k m 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第 8. 21 図（竜巻）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 1 k m を対象とした場合の  $56\text{m/s}$  が最大となる。ただし、廃棄物管理施設は海岸線から陸側 1 k m 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  $V_{B2} = 39\text{m/s}$  より、廃棄物管理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  $1.86 \times 10^{-8}$  である。

#### 4. 3 設計竜巻の最大風速の設定

廃棄物管理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。

廃棄物管理施設では、敷地が平坦であり、竜巻の増幅を考慮する必要のある地形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、将来の竜巻発生に関する不確実性を踏まえ、基準竜巻の最大風速を安全側に切り上げて、設計竜巻の最大風速を100m/sとする。風速100m/sに相当する年超過確率は、ハザード曲線より $6.66 \times 10^{-9}$ である。

【補足説明資料 4-1～4-6】

第8. 2表（竜巻） 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、F2、F3スケールの強い竜巻も多い。
温帯低気圧	南岸低気圧、日本海低気圧、二つ玉低気圧、東シナ海低気圧、オホーツク海低気圧、その他(低気圧)、寒冷前線、温暖前線、閉塞前線	全国的に発生頻度が高く、F2、F3スケールの竜巻も見られる。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8. 3表（竜巻） 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	発生場所
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

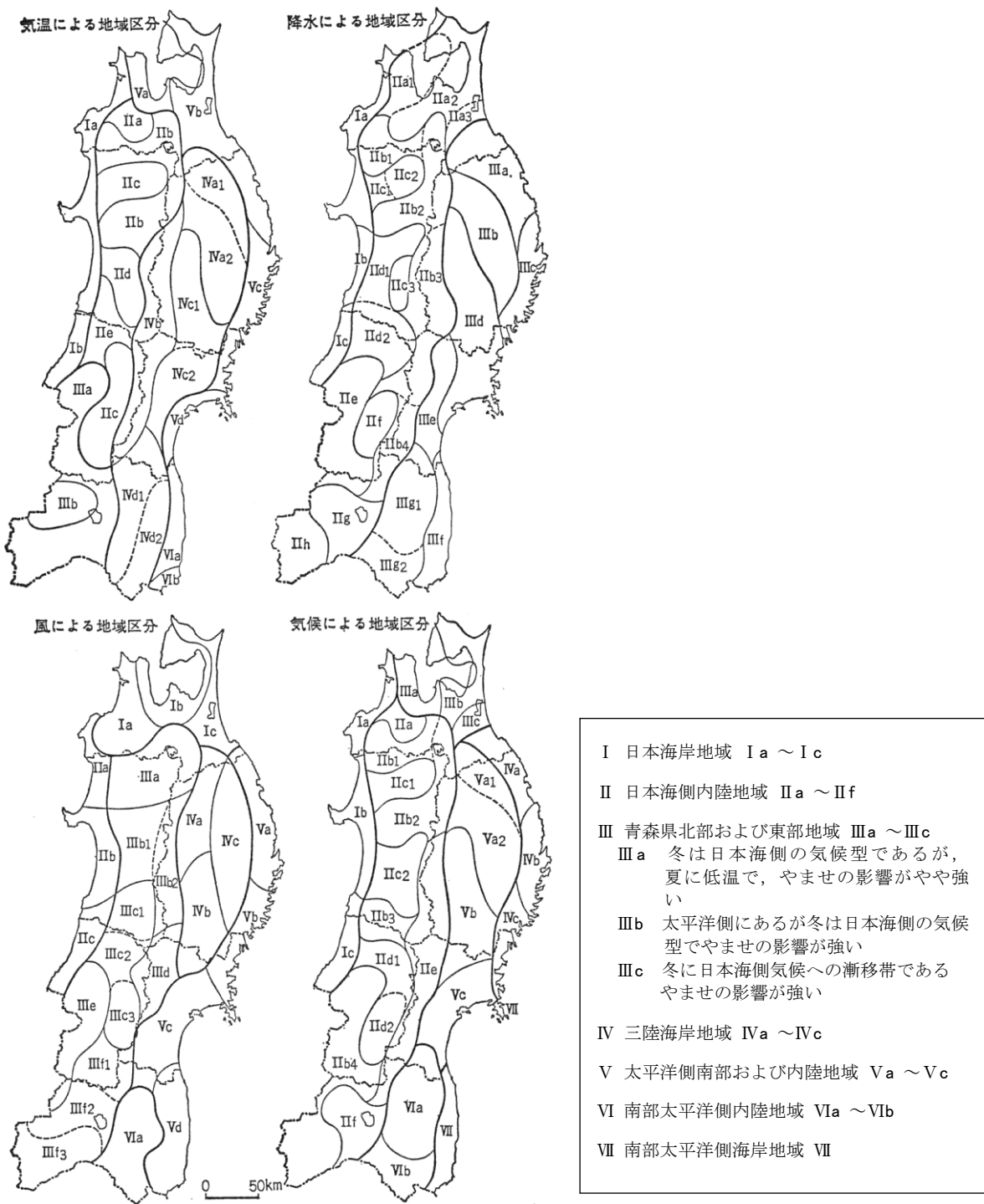
第8. 4表 (竜巻) 竜巻発生数の分析結果

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					
1961/1～2013/12 (53年間)	期間内総数 (個)	6	9	4	0	0	0	0	1	20	不明	25
	年平均 (個)	0.11	0.17	0.08	0.00	0.00	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	0	1	1	18	5	23
	年平均 (個)	0.26	0.39	0.09	0.00	0.00	0.04	0.78	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	0	8	4	12
	年平均 (個)	0.71	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	1.14	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) (抜分後)	期間内総数 (個)	57	32	6	0	0	0	95	0	95		95
	年平均 (個)	1.07	0.58	0.11	0.00	0.00	0.00	1.76	0.00	1.76		1.76
	標準偏差 (個)	1.83	0.88	0.33	0.00	0.00	0.00	2.06	0.00	2.06		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	0	95		95
	年平均 (個)	1.08	0.60	0.11	0.00	0.00	0.00	1.79	0.00	1.79		1.79
	標準偏差 (個)	1.83	0.88	0.33	0.00	0.00	0.00	2.06	0.00	2.06		2.06

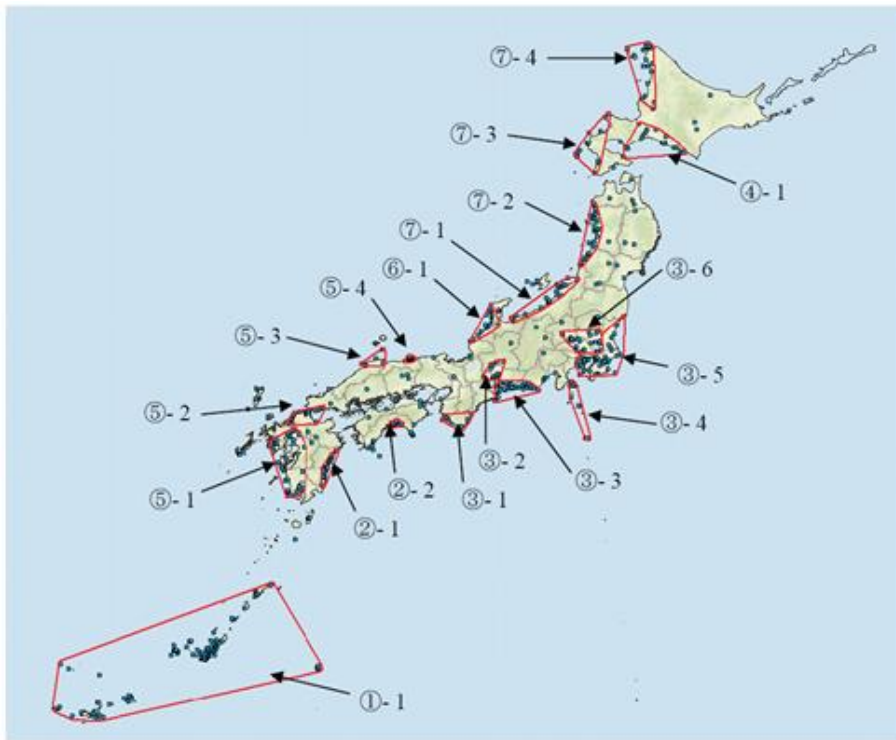
第8.5表（竜巻） 竜巻風速，被害幅及び被害長さの相関係数

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

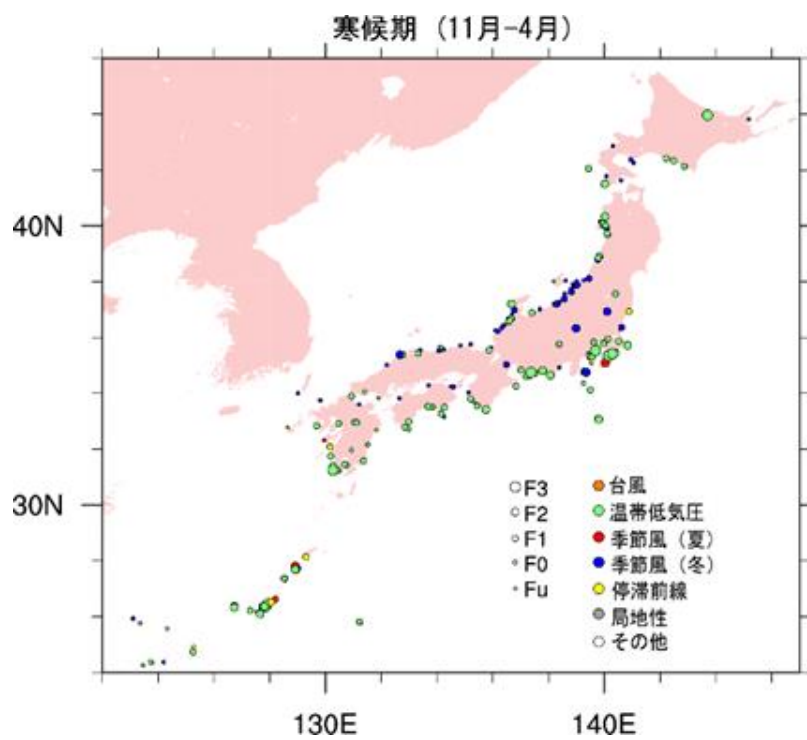
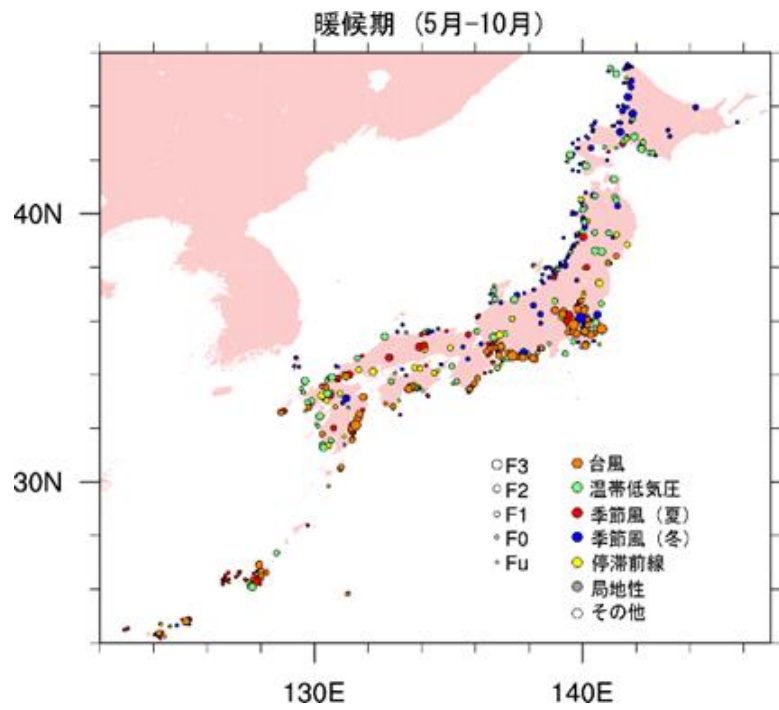




第8. 6図 (竜巻) 吉野正敏 (1967~) による東北地方の気候区分



第8. 7図（竜巻） 竜巻の発生地点と竜巻が集中する19個の地域

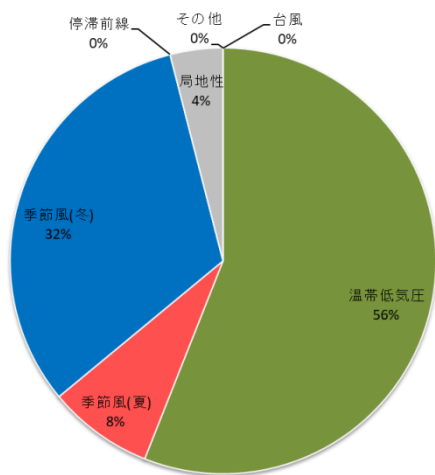


第8. 8図 (竜巻) 竜巻の発生要因別地域分布



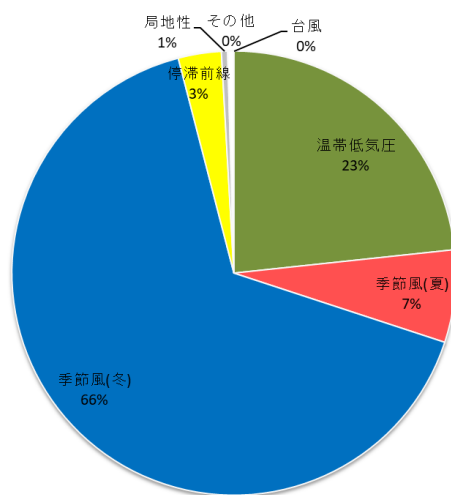
第8.9図（竜巻） 竜巻検討地域

関口武（1959）：日本の気候区分を基に作成



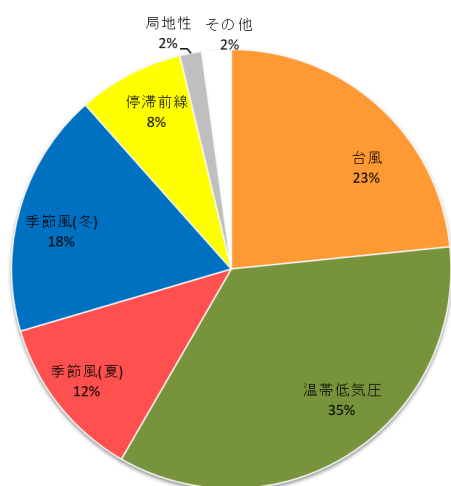
#### ◆ 竜巻検討地域

- ・ 「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)

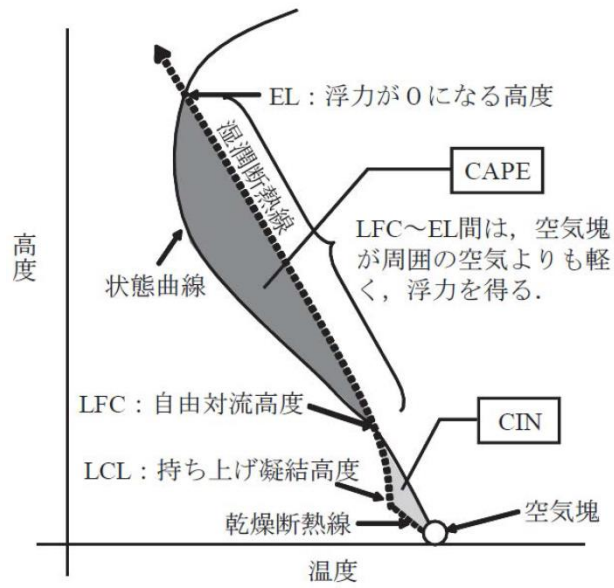
- ・ 「季節風(冬)」を起源とする竜巻が多い。
- ・ 「台風」を起源とする竜巻は確認されていない。



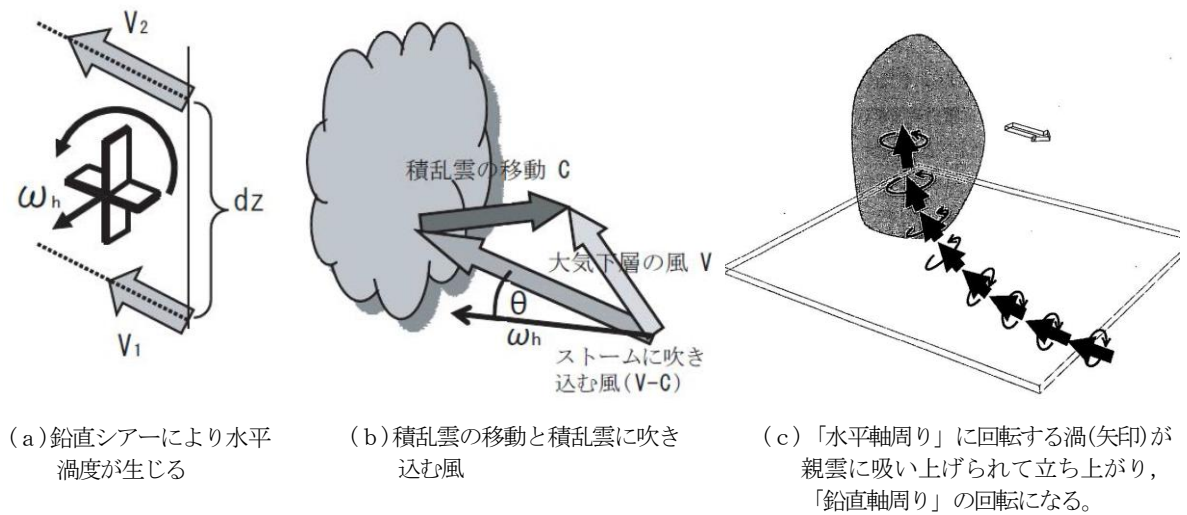
#### ◆ 茨城県以西の太平洋側 (372 事例)

- ・ 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。

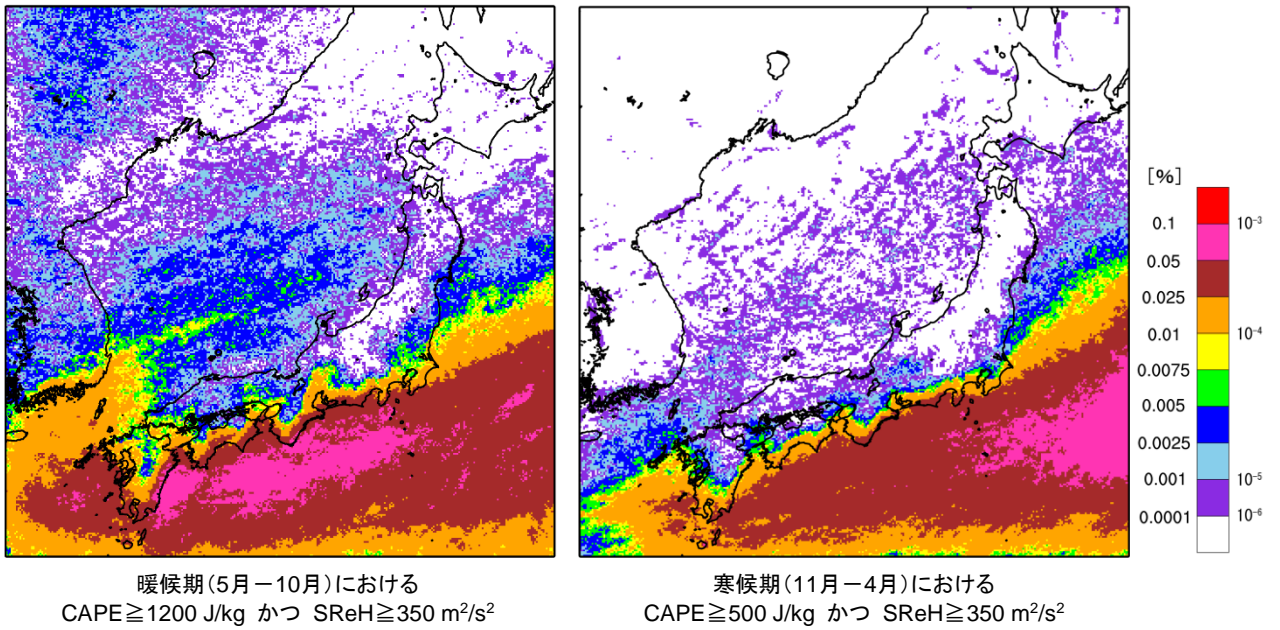
第 8. 10 図 (竜巻) 竜巻検討地域等における竜巻の発生要因の出現比率



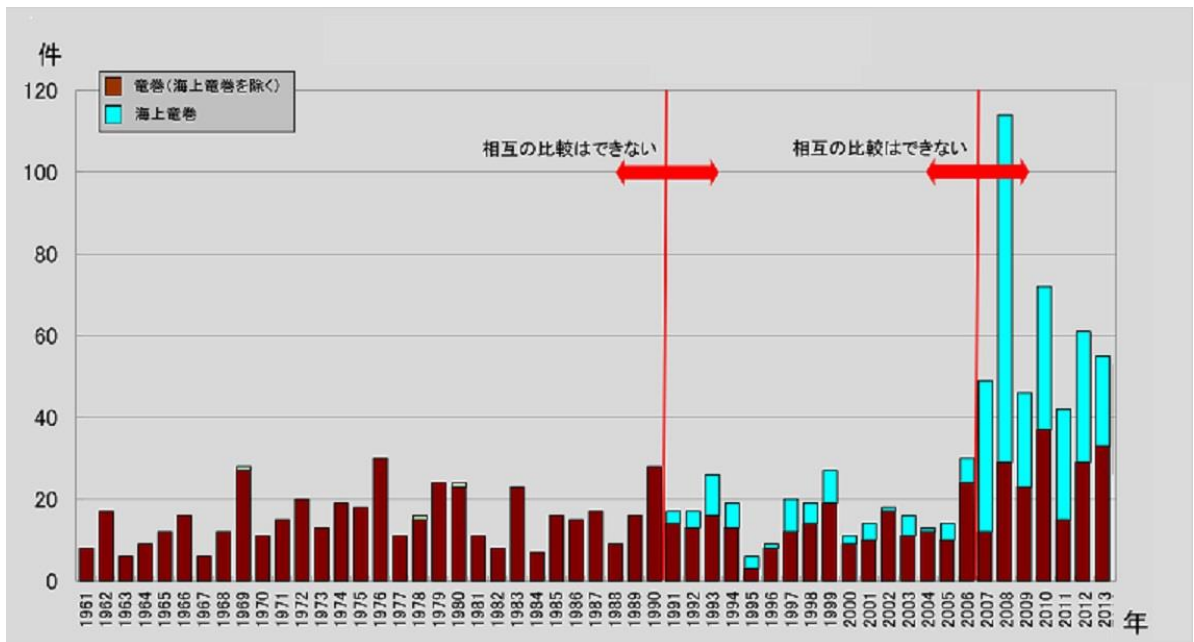
第8. 11 図 (竜巻) CAPE の概念



第8. 12 図 (竜巻) S R e H の概念

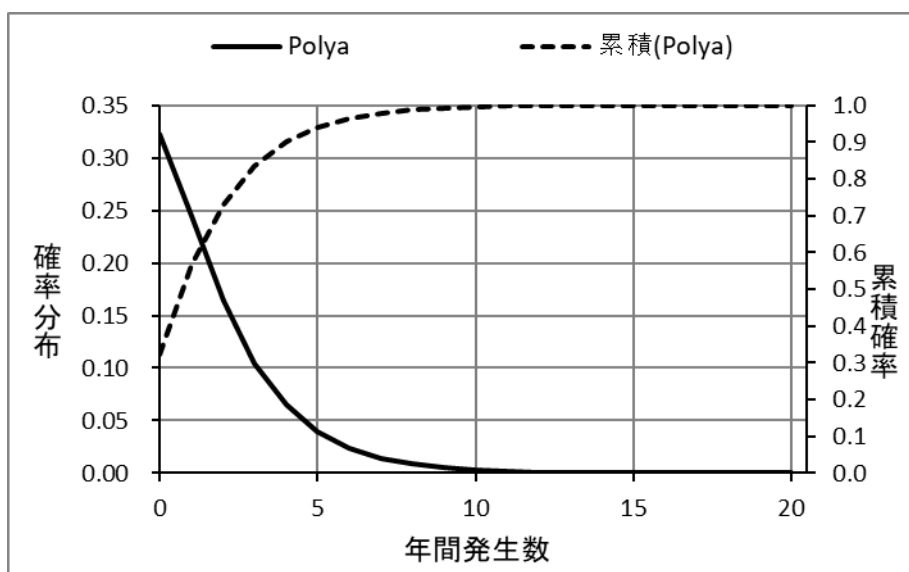


第 8. 13 図 (竜巻) 同時超過頻度分布の算出結果

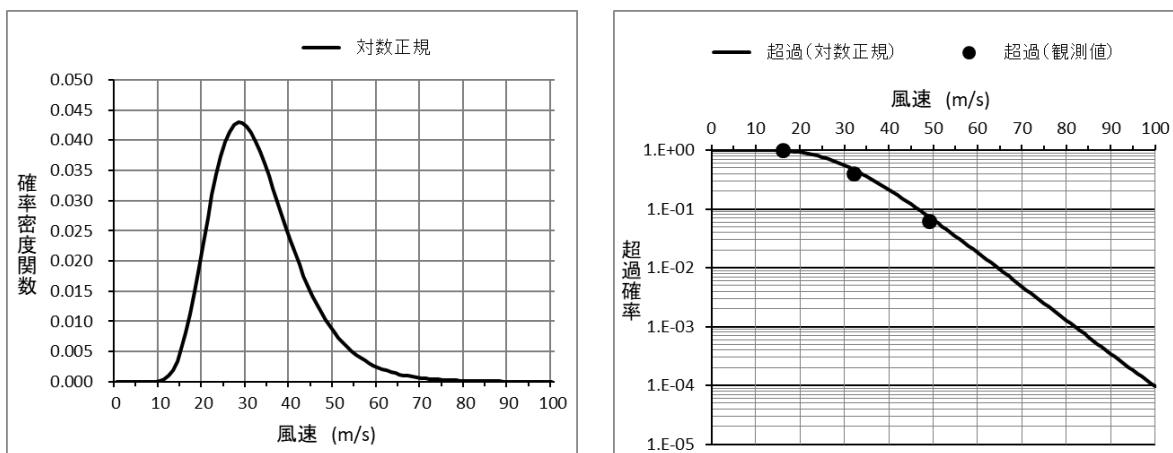


(出典：気象庁「竜巻等の突風データベース」)

第 8. 14 図 (竜巻) 竜巻年別発生確認数

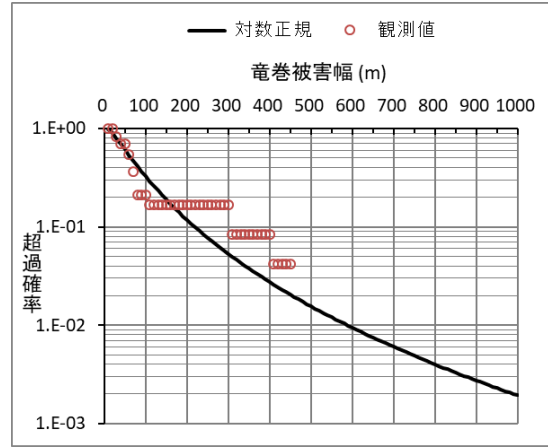
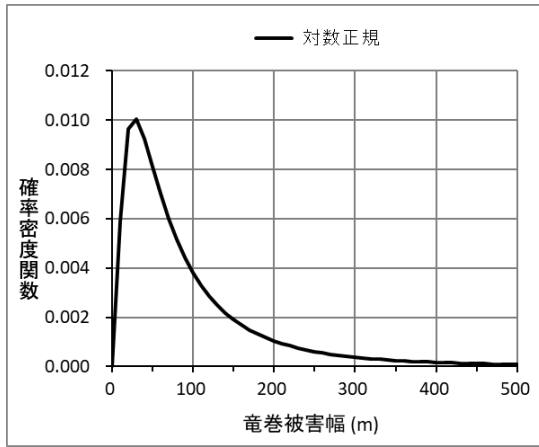


第 8. 15 図 (竜巻) 竜巻検討地域における竜巻発生数の確率分布と累積確率

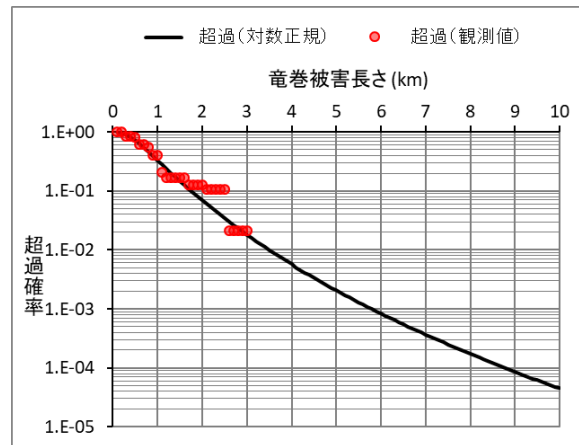
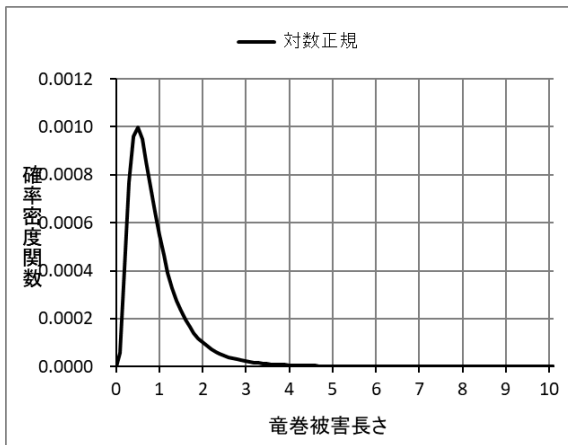


第 8. 16 図 (竜巻) 風速の確率密度分布 (左) と超過確率 (右)

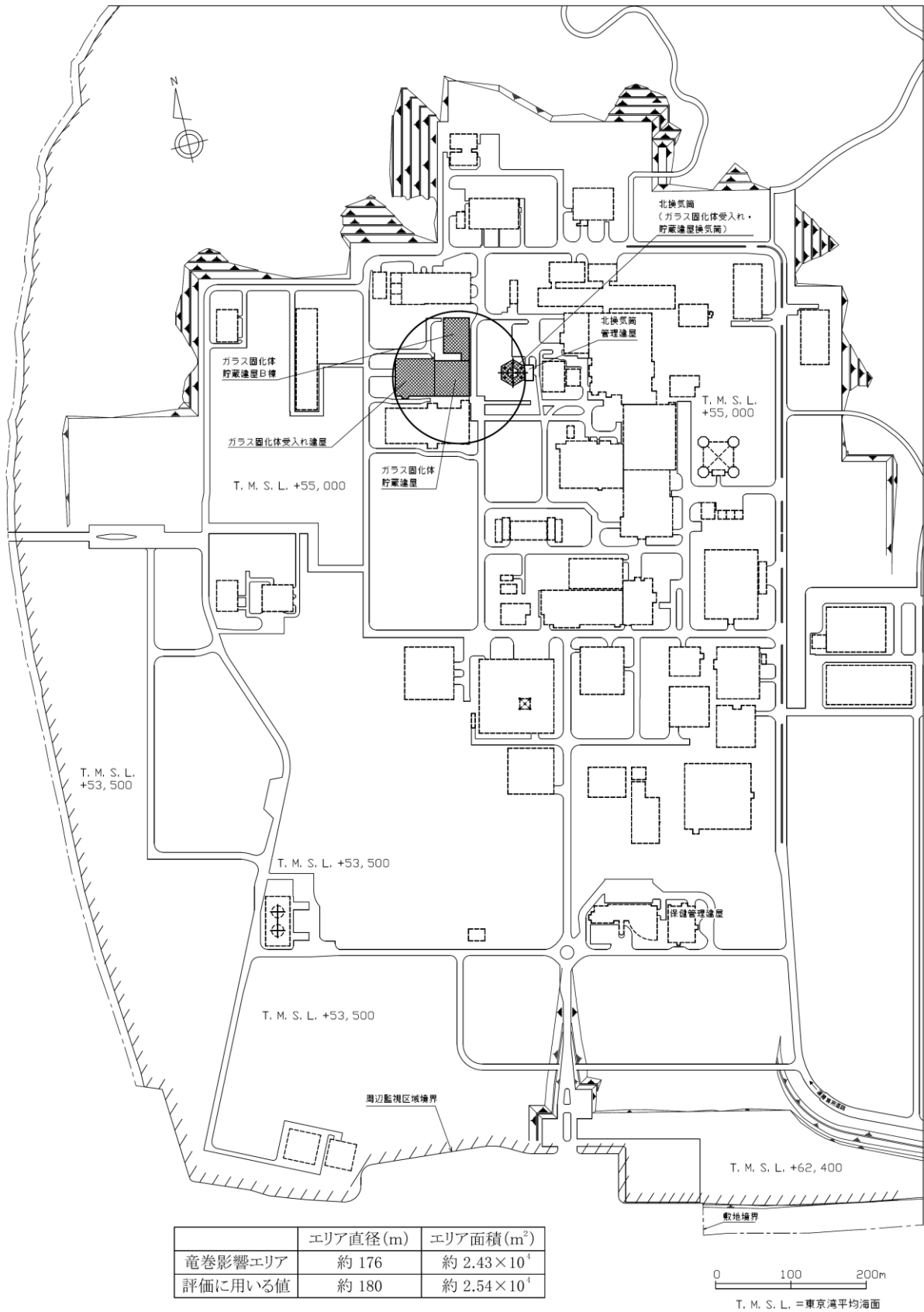




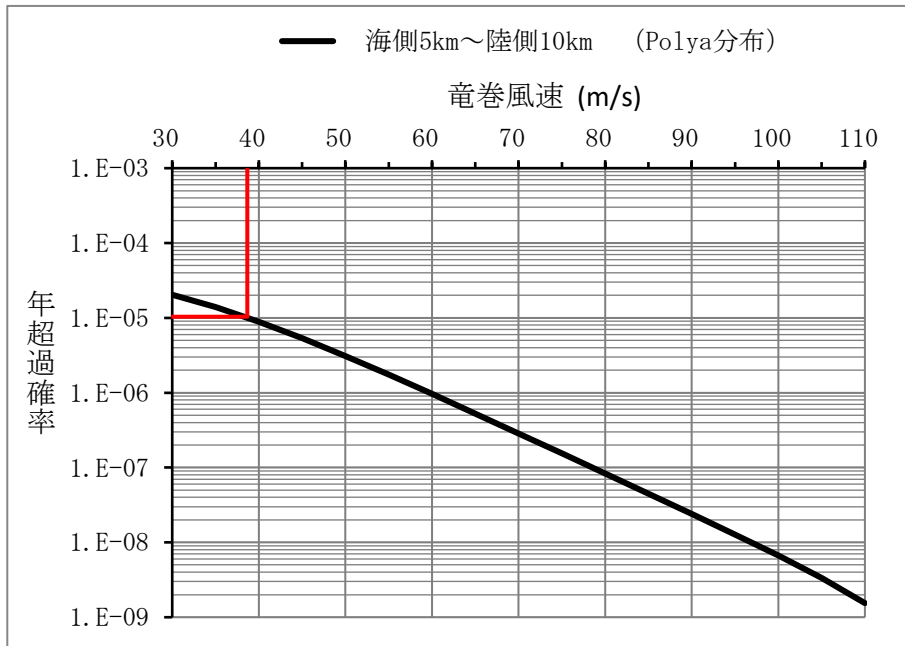
第 8. 17 図 (竜巻) 被害幅の確率密度分布 (左) と超過確率 (右)



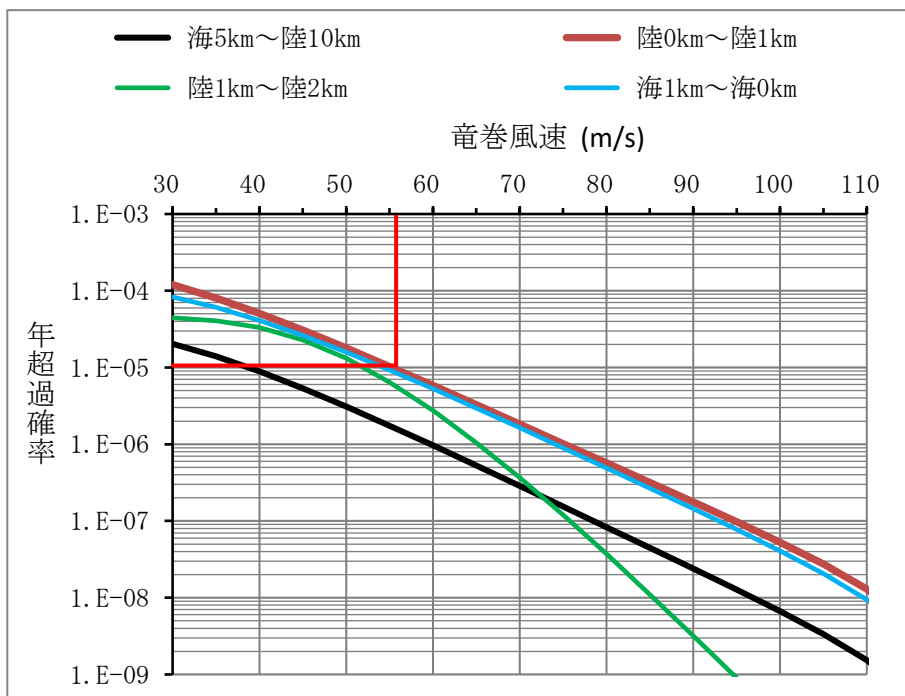
第 8. 18 図 (竜巻) 被害長さの確率密度分布 (左) と超過確率 (右)



第 8. 19 図 (竜巻) 竜巻影響エリア



第8.20 図（竜巻） 竜巻最大風速のハザード曲線（竜巻検討地域）



第8.21 図（竜巻） 竜巻最大風速のハザード曲線（1km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第8.6表（竜巻）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。

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

$\rho$  : 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)<sub>max</sub>)

設計竜巻の最大気圧低下率 ((dp/dt)<sub>max</sub>) 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。

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

## 5. 1 設計飛来物の設定

竜巻ガイドを参考に再処理事業所内をふかんした現地調査及び検討を行い、再処理事業所内の資機材の設置状況を踏まえ、設計対処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の大きさを考慮して、設計竜巻により設計対処施設に衝突し得る飛来物（以下「設計飛来物」という。）を設定する。衝突時に設計対処施設に与える運動エネルギー又は貫通力が設計飛来物によるものより大きくなるものについては、浮き上がり又は横滑りの有無を考慮した上で、固定、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、固縛又は退避を必要とする区域（以下「飛来対策区域」という。）を設定し、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又は飛来対策区域外の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、再処理事業所外から飛来するおそれがあり、かつ、再処理事業所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処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、ブレードが設計対処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、竜巻ガイドに例示される鋼製材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

包絡される。

第8. 7表（竜巻）に廃棄物管理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) 設計対処施設に作用する設計竜巻荷重

設計竜巻により設計対処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 (施設の形状や風圧力が作用する部位に応じて設定する。)

$A$  : 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せい弱と考えられる設計対処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対象施設を収納する建屋の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処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。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処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

設計対処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。

$$W_{T1} = W_P$$

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

設計対処施設には $W_{T1}$ 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。

【補足説明資料5-7】

a. 設計対処施設に常時作用する荷重及び運転時荷重

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」で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、設計竜巻荷重に包絡される。

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

廃棄物管理施設の立地地域は、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5 mm以上の氷の粒であり、仮に直径10 cm程度の大型の降雹を仮定した場合でも、その質量は約0.5 kg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10 cm程度の降雹の終端速度は59 m/s，運動エネルギーは約0.9 kJ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絡される。

(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，設計竜巻荷重に包絡される。

(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以下の規格及び規準等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。

- ・ 建築基準法
- ・ 日本産業規格
- ・ 日本建築学会等の基準，指針類
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1987（日本電気協会）
- ・ 原子力エネルギー協会（NEI）の基準・指針類

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以下の規格及び規準等による許容応力等の許容限界に対して安全余裕を有する設計とする。

- ・ 日本産業規格
- ・ 日本建築学会等の基準，指針類
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1987（日本電気協会）
- ・ 原子力エネルギー協会（NEI）の基準・指針類

【補足説明資料 5-1～5-7】

第8.6表（竜巻） 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

第8.7表（竜巻） 廃棄物管理施設における設計飛来物

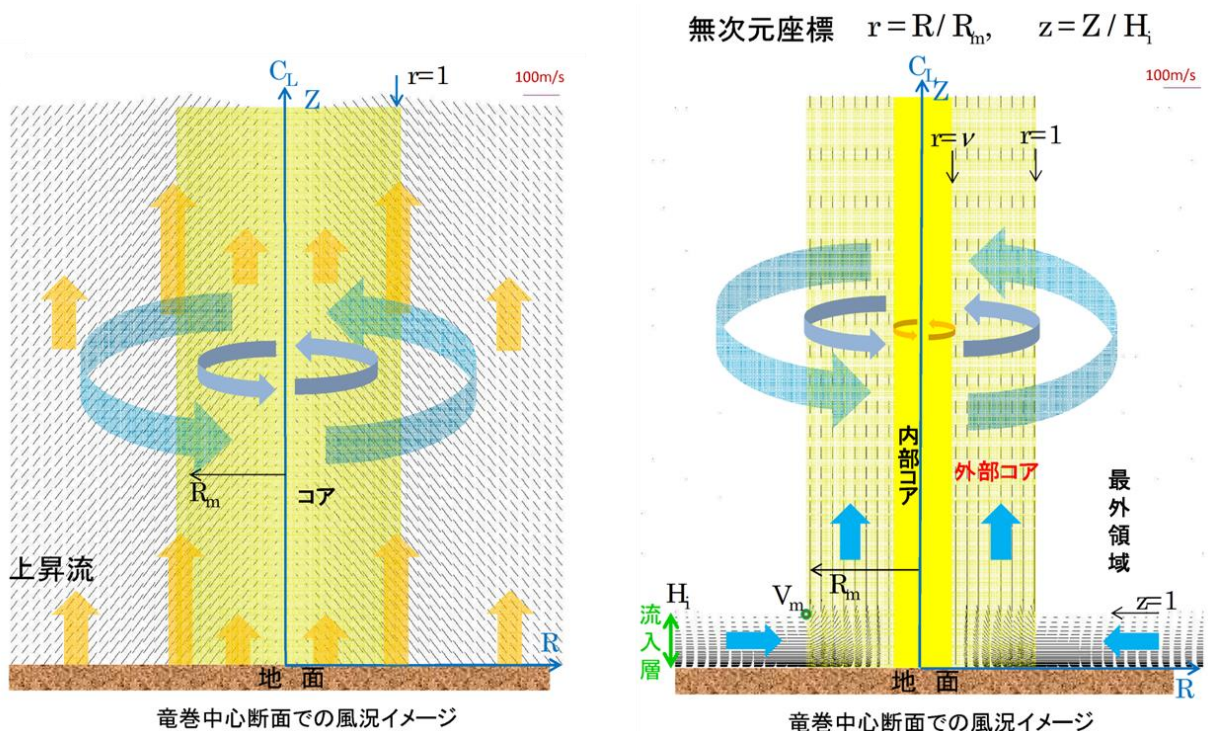
飛来物の種類	鋼製材
寸法 (m)	長さ×幅×奥行き 4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	135
最大水平速度 (m/s)	51
最大鉛直速度 (m/s)	34

## 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米国原子力規制委員会の基準類で採用されており、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8.22図（竜巻）に風速場モデルを示す。

廃棄物管理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8.22図（竜巻） 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、竜巻防護対象施設又は竜巻防護対象施設を収納する区画の構造健全性を確保するため、機械的強度を有する、建物の外壁及び屋根により建物全体を保護すること等により、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（系統・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，運転時荷重及び竜巻以外の自然現象による荷重）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

竜巻防護対象施設，竜巻防護対象施設を収納する建屋及び竜巻防護対象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。また，設計対処施設及び防護対策等を第8.8表（竜巻）に示す。

## 7. 1 竜巻防護対象施設を収納する建屋

竜巻防護対象施設を収納する建屋は、設計荷重（竜巻）に対して、主架構の構造健全性を維持するとともに、個々の部材の破損により施設内の竜巻防護対象施設が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、貫通及び裏面剥離の発生により竜巻防護対象施設が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。

### a. ガラス固化体貯蔵建屋及びガラス固化体貯蔵建屋B棟

設計荷重（竜巻）に対して主架構の構造健全性を維持するとともに、個々の部材の破損により竜巻防護対象施設が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、貫通及び裏面剥離の発生により施設内の竜巻防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。



## 7. 2 建屋内の施設で外気と繋がっている竜巻防護対象施設

外気と繋がっている竜巻防護対象施設は、気圧差荷重に対して構造健全性を維持し、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。

### a. ガラス固化体貯蔵設備の収納管

ガラス固化体貯蔵設備の収納管は、通風管との間に冷却空気を流す構造としている。

収納管は気圧差による荷重に対して構造健全性を維持できるよう十分な強度を有する設計とし、安全機能を損なわない設計とする。

### 7. 3 竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設

竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設については、設計荷重（竜巻）を考慮しても倒壊等に至らないよう必要に応じて補強すること等により、周辺の竜巻防護対象施設の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。

北換気筒（ガラス固化体受入れ・貯蔵建屋換気筒）及びガラス固化体受入れ建屋は、倒壊等に至った場合には周辺の施設に波及的影響を及ぼすおそれがあることから、設計飛来物の衝突による貫通及び風圧力による荷重を考慮しても倒壊等に至らない設計とし、周辺の竜巻防護対象施設の安全機能を損なわない設計とする。

## 7. 4 竜巻随件事象に対する設計

竜巻ガイドを参考に、過去の他地域における竜巻被害状況及び再処理施設の配置を図面等により確認した結果、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、竜巻防護対象施設が安全機能を損なわない設計とする。

### (1) 火 災

竜巻により屋外にある危険物貯蔵施設等（ボイラ用燃料受入れ・貯蔵所、ディーゼル発電機用燃料油受入れ・貯蔵所及びボイラ用燃料貯蔵所）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、火災源と竜巻防護対象施設の位置関係を踏まえて熱影響を評価した上で、竜巻防護対象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。

建屋内に設置される竜巻防護対象施設には、開口部を有する室に設置されるものはないため、設計飛来物の侵入により建屋内に火災が発生し、竜巻防護対象施設に影響を及ぼすことは考えられない。

### (2) 溢 水

再処理事業所内の屋外タンク等の破損による溢水を想定し、溢水源と竜巻防護対象施設を収納する建屋の位置関係を踏まえた影響評価を行った上で、溢水が竜巻防護対象施設を収納する建屋の開口部まで到達しないよう施設を配置する。

竜巻防護対象施設を収納する建屋のうち開口部を有する室については、設計飛来物の侵入による建屋内の溢水が発生したとしても、竜巻防護対象施設の安全機能に影響を与えることはない。

また、建屋貫通部への止水処理をすることにより、屋外タンク等の破損による溢水が建屋内に浸入することを防止する。

### (3) 外部電源喪失

竜巻防護対象施設には、外部電源の給電を受けるものはないため、設計竜巻、設計竜巻と同時に発生する雷・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による外部電源喪失が発生しても、竜巻防護対象施設の安全機能を損なうことはない。

【補足説明資料 7-1】

第8. 8表（竜巻） 設計対処施設及び防護対策等

設計対処施設		竜巻の最大風速	想定する設計飛来物	飛来物対策	防護対策
竜巻防護対象施設を収納する建屋	ガラス固化体貯蔵建屋	100m/s	鋼製材	固縛又は車両の退避等の飛来物発生防止	設計荷重（竜巻）に対して主架構の構造健全性を維持するとともに、個々の部材の破損により施設内の竜巻防護対象施設が安全機能を損なわない設計
	ガラス固化体貯蔵建屋B棟				設計飛来物の衝突に対して貫通及び裏面剥離により安全機能を損なわない設計
建屋内の施設で外気と繋がっている竜巻防護対象施設	ガラス固化体貯蔵設備の収納管				気圧差荷重に対して構造健全性を維持できる十分な強度を有する設計
竜巻防護対象施設に波及的影響を及ぼし得る施設	北換気筒（ガラス固化体受入れ・貯蔵建屋換気筒）				風荷重及び設計飛来物の衝撃荷重に対し倒壊しない強度を有する設計
	ガラス固化体受入れ建屋				

## 8. 手順等

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。

- 資機材等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定、固縛、建屋収納又は敷地からの撤去を行う。
- 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、飛来対策区域を設定し、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飛来対策区域外の退避場所へ退避する。
- 飛来対策区域は、車両から距離を取るべき離隔対象施設と車両との間を取るべき離隔距離を考慮して設定する。

離隔距離の検討に当たっては、先ず解析により車両の最大飛来距離を求める。解析においては、フジタモデルの方がランキン渦モデルよりも地表面における竜巻の風速場をよく再現していること及び車両は地表面にあることから、フジタモデルを適用する。フジタモデルを適用した車両の最大飛来距離の算出結果を第8.9表（竜巻）に示す。車両の最大飛来距離の算出結果は170mであるが、フジタモデルを適用した解析における不確実性を補うため、算出結果に安全余裕を考慮して、離隔距離を200mとする。

飛来対策区域を第8.23図（竜巻）のとおりとする。

- 車両の退避場所は、周辺防護区域内及び周辺防護区域外に設ける。

また、フジタモデルを適用した解析における不確実性を補うため、周辺防護区域内の退避場所に退避する車両については固縛の対象とする。

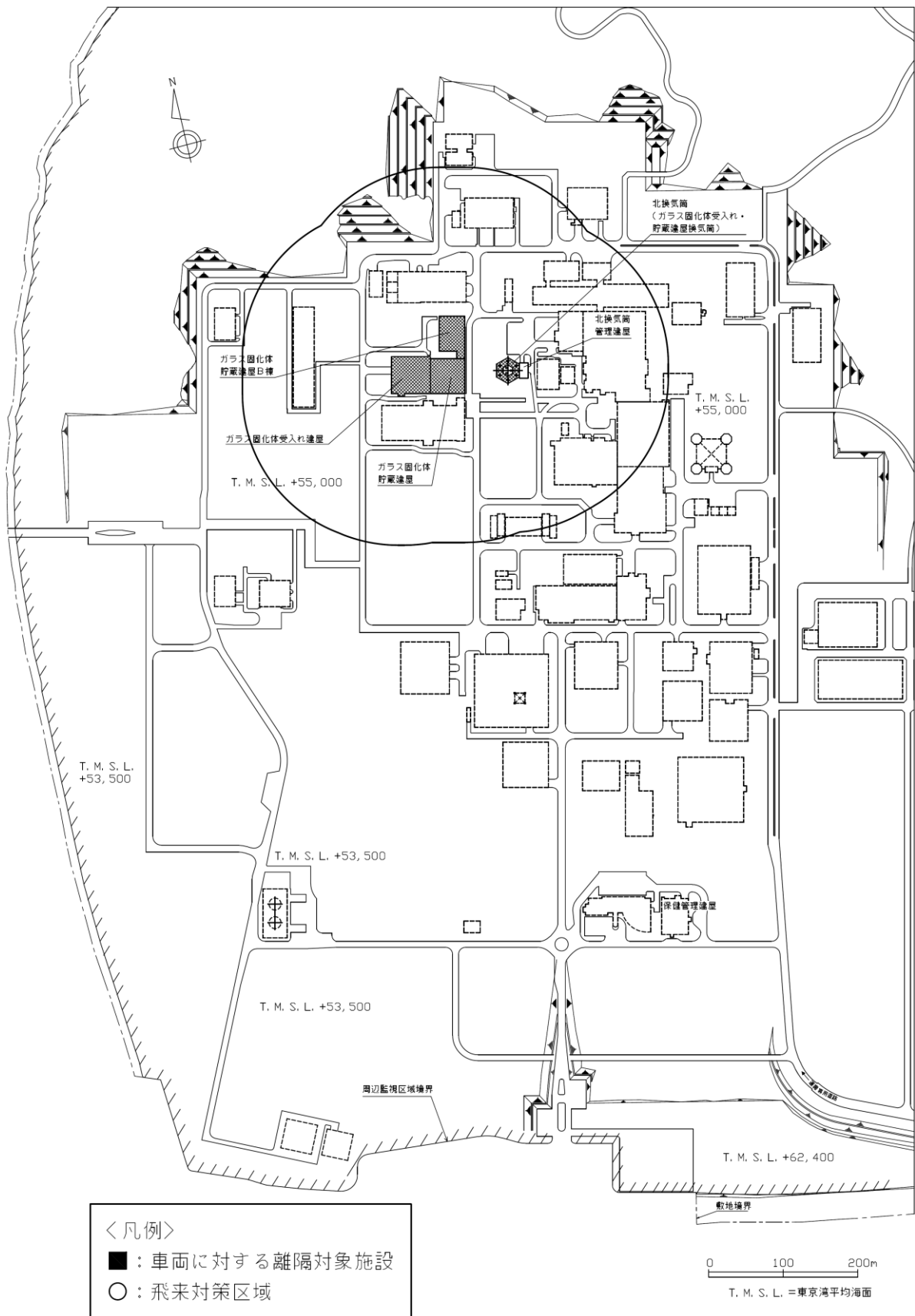
- 竜巻に対する運用管理を確実に実施するために必要な技術的能力を維持・向上させることを目的とし、教育及び訓練を定期的に行う。

【補足説明資料 8-1～8-5】

第8. 9表 (竜巻) 現地調査にて抽出した車両の諸元及び最大飛来距離

車両の種類	長さ (m)	幅 (m)	高さ (m)	質量 (k g)	最大飛来距離 (m)
大型バス	12	2.5	3.8	12,100	130
トラック	8.5	2.2	2.5	3,790	160
乗用車 普通	4.4	1.7	1.5	1,140	150
乗用車 ワゴン1	4.8	1.8	1.5	1,510	90
乗用車 ワゴン2	5.2	1.9	2.3	1,890	170
軽自動車1	3.4	1.5	1.6	840	160
軽自動車2	3.4	1.5	1.5	710	170





第8.23図 (竜巻) 車両に対する離隔対象施設と飛来対策区域