

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	O2-補-E-01-0150_改0
提出年月日	2020年6月18日

工事計画に係る補足説明資料

補足-150 【竜巻への配慮に関する説明書】

2020年6月

東北電力株式会社

補足説明資料

工認添付書類	補足説明資料
VI-1-1-2-3 竜巻への配慮に関する説明書	補足-150-1 竜巻への配慮に関する説明書の補足説明資料
VI-1-1-2-別添 1 屋外に設置されている重大事故等対処設備の 抽出	

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	O2-補-E-01-0150-1_改0
提出年月日	2020年6月18日

補足-150-1 【竜巻への配慮に関する説明書の補足説明資料】

目 次

1. 竜巻の影響を考慮する施設について
 - 1.1 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出について
 - 1.2 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設の選定について
 - 1.3 建屋開口部の調査結果について
 - 1.4 飛来物の選定について
 - 1.5 砂利等の極小飛来物による外部事象防護対象施設への影響について
 - 1.6 屋外重大事故等対処設備の竜巻防護設計について
 - 1.7 竜巻影響評価の風速場モデルの適用について
 - 1.8 飛散評価における竜巻の不確かさを踏まえた評価条件の設定について

1.1 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の
抽出について

1.1 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出について

1.1.1 抽出方針

女川原子力発電所構内の構築物，系統及び機器から，以下の手順により外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設を抽出した。抽出フローを図 1.1-1 及び図 1.1-2 に示す。

Step1：安全施設（安全重要度クラス 1，2，3）及び安全施設以外の施設から外部事象防護対象施設*を抽出する。

注記*：外部事象に対し必要な構築物，系統及び機器（発電用原子炉を停止するため，また停止状態にある場合は引き続きその状態を維持するために必要な異常の発生防止の機能又は異常の影響緩和の機能を有する構築物，系統及び機器）として，「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」（以下「重要度分類指針」という。）における安全重要度クラス 1，2 に属する施設，安全評価上期待する安全重要度クラス 3 に属する構築物，系統及び機器並びにそれを内包する区画を含む。

また，外部事象防護対象施設を内包する建屋（外部事象防護対象施設となる建屋を除く。）は，機械的強度を有すること等により，内包する外部事象防護対象施設の安全機能を損なわない設計及び外部事象防護対象施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。ここで，外部事象防護対象施設及び外部事象防護対象施設を内包する建屋を併せて，外部事象防護対象施設等という。

上記以外の「その他の施設」については，竜巻及びその随件事象に対して機能維持，又は，竜巻及びその随件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，必要に応じプラントを停止し，安全上支障のない期間に修復すること等の対応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，安全機能を損なわない設計とすることから評価完了とする。

Step2：屋外施設

外部事象防護対象施設等として抽出された設備の設置場所を確認し，竜巻襲来時に風圧，気圧差及び飛来物衝突の影響を受ける屋外施設（外部事象防護対象施設を内包する区画を含む。）を外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設とする。

Step3：外気と繋がる設備

外気との接続があるため，竜巻襲来時に気圧差荷重の影響を受ける換気空調設備等を外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設とする。

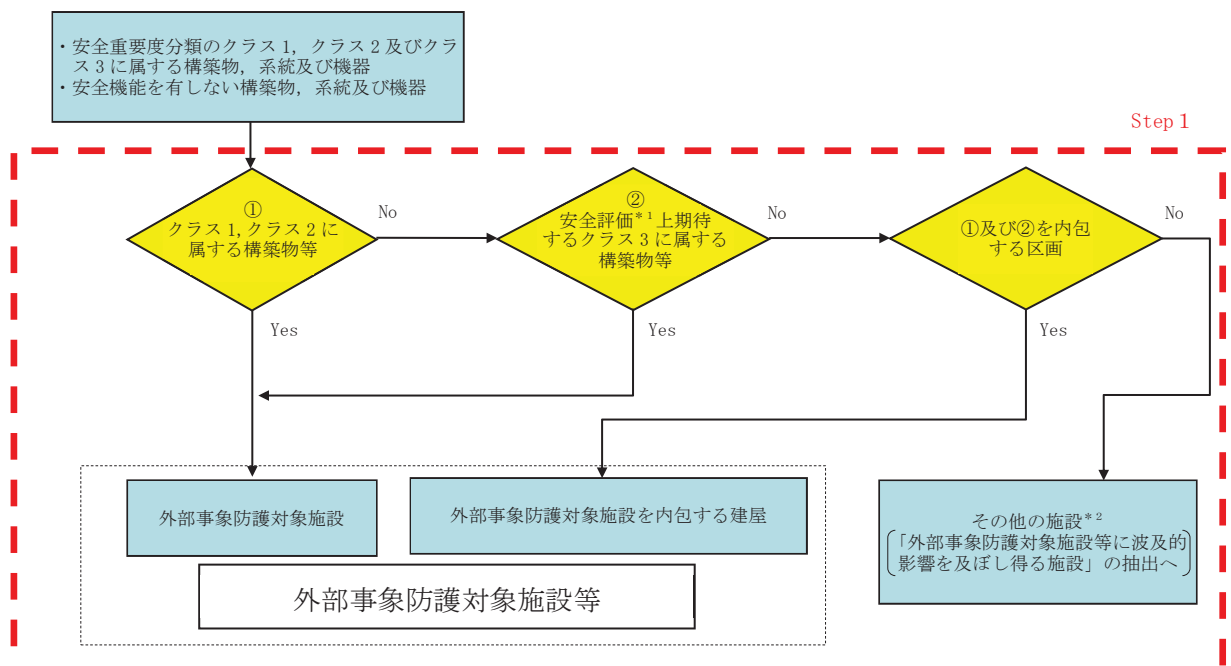
Step4：外殻となる施設による防護が期待できない設備

外部事象防護対象施設が設置されている施設等の外殻による防護機能が期待できないものを外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設とする。

なお、外殻による防護に期待できるかは、外殻となる建屋・構築物等の竜巻荷重に対する健全性の確認結果による。

1.1.2 抽出結果

外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出結果を表 1.1-1 に示す。



注記 *1：運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故解析

*2：竜巻及びその随件事象に対して機能維持すること，竜巻及びその随件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又は安全上支障のない期間に修復すること等の対応が可能であることを確認する。

図 1.1-1 外部事象防護対象施設等の抽出フロー

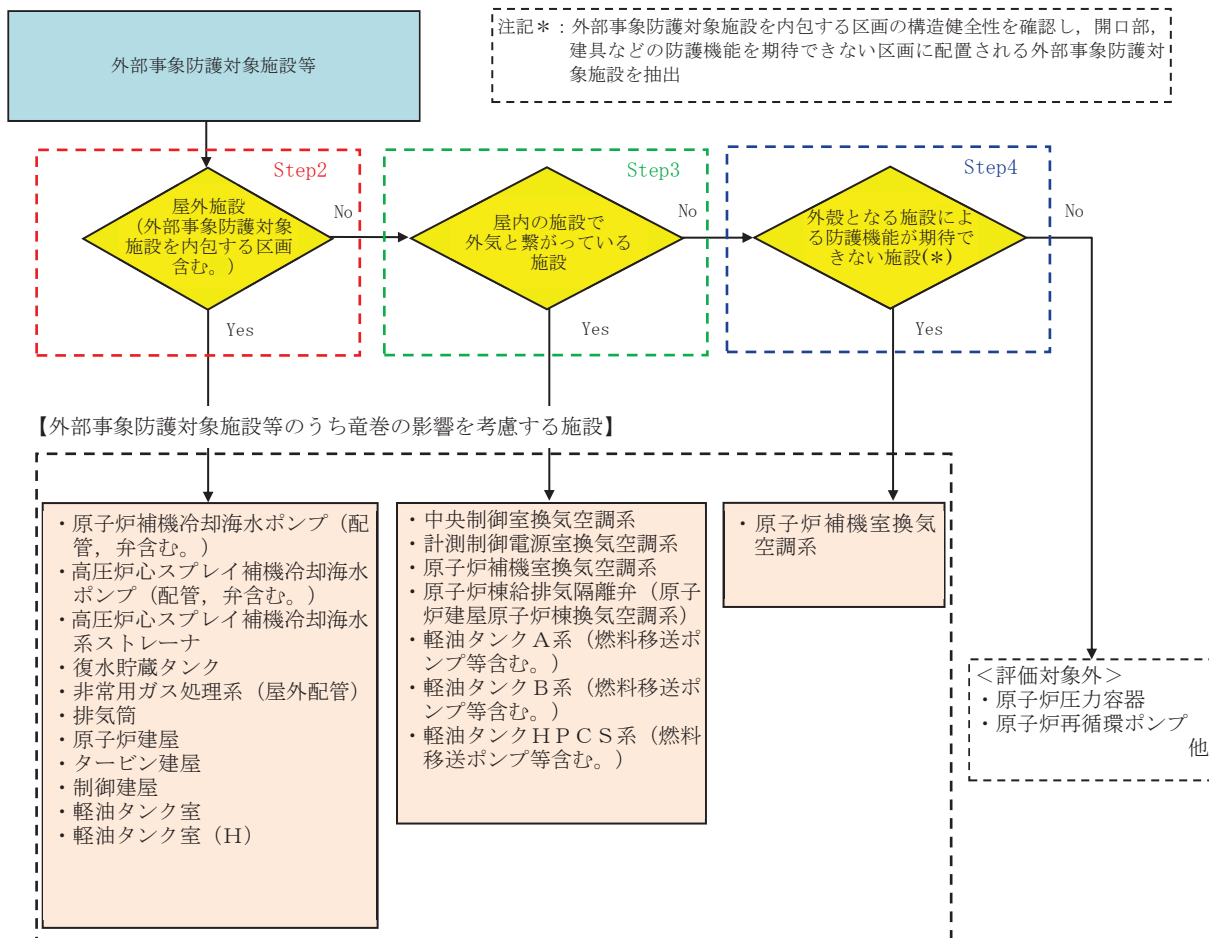


図 1.1-2 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出フロー

表 1.1-1 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出結果 (1/7)

○ : Yes × : No - : 該当せず*3

分類	定義	重要度分類指針		女川原子力発電所第2号機		抽出の観点*1				設置場所*2	抽出結果	備考				
		機能	構築物, 系統又は機器	構築物, 系統又は機器		STEP										
						1	2	3	4							
PS-1	その損傷又は故障により発生する事象によって、(a)炉心の著しい損傷、又は(b)燃料の大量の破損を引き起こすおそれのある構築物、系統及び機器	1) 原子炉冷却材圧力バウンダリ機能	原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系(計装等の小口径配管・機器は除く。)	原子炉圧力容器	原子炉再循環ポンプ	配管, 弁	原子炉冷却材圧力バウンダリ隔離弁	制御棒駆動機構ハウジング	中性子束計装ハウジング	○	×	×	×	R	-	
				原子炉再循環ポンプ	配管, 弁	原子炉冷却材圧力バウンダリ隔離弁	制御棒駆動機構ハウジング	中性子束計装ハウジング	○	×	×	×	R	-		
				制御棒駆動機構ハウジング	中性子束計装ハウジング	○	×	×	×	R	-					
				制御棒カップリング	制御棒駆動機構ハウジング	○	×	×	×	R	-					
				炉心シュラウド	シュラウドサポート	○	×	×	×	R	-					
				上部格子板	炉心支持板	○	×	×	×	R	-					
		3) 炉心形状の維持機能	炉心支持構造物(炉心シュラウド, シュラウドサポート, 上部格子板, 炉心支持板, 制御棒案内管), 燃料集合体(ただし, 燃料を除く。)	燃料支持金具	制御棒案内管	制御棒駆動機構ハウジング	燃料集合体(上部タイププレート)	燃料集合体(下部タイププレート)	燃料集合体(スペーサ)	○	×	×	×	R	-	
				燃料支持金具	制御棒案内管	制御棒駆動機構ハウジング	燃料集合体(上部タイププレート)	燃料集合体(下部タイププレート)	燃料集合体(スペーサ)	○	×	×	×	R	-	
				燃料集合体(上部タイププレート)	燃料集合体(下部タイププレート)	燃料集合体(スペーサ)	○	×	×	×	R	-				
				燃料集合体(下部タイププレート)	燃料集合体(スペーサ)	○	×	×	×	R	-					
				直接関連系(燃料集合体)	チャンネルボックス	○	×	×	×	R	-					
				制御棒	制御棒案内管	制御棒駆動機構	制御棒駆動機構カップリング	○	×	×	×	R	-			
				制御棒	制御棒案内管	制御棒駆動機構	制御棒駆動機構カップリング	○	×	×	×	R	-			
				制御棒	制御棒案内管	制御棒駆動機構	制御棒駆動機構カップリング	○	×	×	×	R	-			
MS-1	1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し, 残留熱を除去し, 原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し, 敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物, 系統及び機器	1) 原子炉の緊急停止機能	原子炉停止系の制御棒による系(制御棒及び制御棒駆動系(スクラム機能))	直接関連系(制御棒駆動水圧系)	水圧制御ユニット(スクラムパイロット弁, スクラム弁, アクキュムレータ, 窒素容器, 配管, 弁)	○	×	×	×	R	-					
				制御棒	制御棒案内管	制御棒駆動機構	制御棒駆動機構カップリング	○	×	×	×	R	-			
				制御棒	制御棒案内管	制御棒駆動機構	制御棒駆動機構カップリング	○	×	×	×	R	-			
				制御棒	制御棒案内管	制御棒駆動機構	制御棒駆動機構カップリング	○	×	×	×	R	-			
	2) 未臨界維持機能	原子炉停止系(制御棒による系, ほう酸水注入系)	直接関連系(制御棒駆動水圧系)	制御棒駆動機構	制御棒駆動機構ハウジング	○	×	×	×	R	-					
			ほう酸水注入系(ポンプ, 注入弁, タンク出口弁, 貯蔵タンク, ポンプ吸込配管及び弁, 注入配管及び弁)	○	×	×	×	R	-							
			ほう酸水注入系(ポンプ, 注入弁, タンク出口弁, 貯蔵タンク, ポンプ吸込配管及び弁, 注入配管及び弁)	○	×	×	×	R	-							
3) 原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止機能	逃がし安全弁(安全弁としての開機能)	主蒸気逃がし安全弁(安全弁としての開機能)	○	×	×	×	R	-								

注記*1: 1=外部事象防護対象施設等, 2=屋外設備, 3=外気と繋がる設備, 4=外殻となる施設による防護が期待できない設備
 *2: R=原子炉建屋, C=制御建屋, T=タービン建屋, LO=軽油タンク室, LOH=軽油タンク室(H), D=固体廃棄物貯蔵所, HB=補助ボイラー建屋, TSC=緊急時対策建屋
 *3: 抽出の観点1~4の評価の結果, 該当せず
 *4: 屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備(波及的影響(機能的影響)を及ぼし得る施設)として抽出

表 1.1-1 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出結果 (2/7)

○ : Yes × : No - : 該当せず*3

分類	定義	機能	構築物, 系統又は機器	女川原子力発電所第2号機				設置場所*2	抽出結果	備考				
				抽出の観点*1										
				STEP										
1	2	3	4											
MS-1	1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し, 残留熱を除去し, 原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し, 敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物, 系統及び機器	4) 原子炉停止後の除熱機能	残留熱を除去する系統 (残留熱除去系 (原子炉停止時冷却モード), 原子炉隔離時冷却系, 高圧炉心スプレイ系, 逃がし安全弁 (手動逃がし機能), 自動減圧系 (手動逃がし機能))	残留熱除去系 (ポンプ, 熱交換器, 原子炉停止時冷却モードのルートとなる配管及び弁)				○	×	×	×	R	-	
				直接関連系 (残留熱除去系)		熱交換器バイパス配管及び弁		○	×	×	×	R	-	
				原子炉隔離時冷却系 (ポンプ, サプレッションチェンバ, タービン, サプレッションチェンバから注水先までの配管, 弁)				○	×	×	×	R	-	
				直接関連系 (原子炉隔離時冷却系)		タービンへの蒸気供給配管, 弁		○	×	×	×	R	-	
						ポンプミニマムフローラインの配管, 弁		○	×	×	×	R	-	
						サプレッションチェンバ内のストレーナ		○	×	×	×	R	-	
						復水貯蔵タンク		○	○	×	×	屋外	○	
						ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込弁		○	×	×	×	R	-	
						ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込配管, 弁		○	×	×	×	R	-	
						潤滑油冷却器及びその冷却器までの冷却水供給配管		○	×	×	×	R	-	
				高圧炉心スプレイ系 (ポンプ, サプレッションチェンバ, サプレッションチェンバからスプレイ先までの配管, 弁, スプレイスパーージャ)				○	×	×	×	R	-	
				直接関連系 (高圧炉心スプレイ系)		ポンプミニマムフローラインの配管, 弁		○	×	×	×	R	-	
						サプレッションチェンバ内のストレーナ		○	×	×	×	R	-	
						復水貯蔵タンク		○	○	×	×	屋外	○	
						ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込弁		○	×	×	×	R	-	
						ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込配管, 弁		○	×	×	×	R	-	
				主蒸気逃がし安全弁 (手動逃がし機能)				○	×	×	×	R	-	
				直接関連系 (主蒸気逃がし安全弁 (手動逃がし機能))		原子炉圧力容器から主蒸気逃がし安全弁までの主蒸気配管		○	×	×	×	R	-	
駆動用室素源 (アキュムレータ, アキュムレータから主蒸気逃がし安全弁までの配管, 弁)		○	×			×	×	R	-					
自動減圧系 (手動逃がし機能)				○	×	×	×	R	-					
直接関連系 (自動減圧系 (手動逃がし機能))		原子炉圧力容器から主蒸気逃がし安全弁までの主蒸気配管		○	×	×	×	R	-					
		駆動用室素源 (アキュムレータ, アキュムレータから主蒸気逃がし安全弁までの配管, 弁)		○	×	×	×	R	-					

注記*1: 1=外部事象防護対象施設等, 2=屋外設備, 3=外気と繋がる設備, 4=外殻となる施設による防護が期待できない設備

*2: R=原子炉建屋, C=制御建屋, T=タービン建屋, L0=軽油タンク室, LOH=軽油タンク室 (H), D=固体廃棄物貯蔵所, HB=補助ボイラー建屋, TSC=緊急時対策建屋

*3: 抽出の観点1~4の評価の結果, 該当せず

*4: 屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備 (波及的影響 (機能的影響) を及ぼし得る施設) として抽出

表 1.1-1 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出結果 (3/7)

○ : Yes × : No - : 該当せず*3

分類	定義	重要度分類指針		女川原子力発電所第2号機		抽出の観点*1				設置場所*2	抽出結果	備考
		機能	構築物, 系統又は機器	構築物, 系統又は機器		STEP						
				1	2	3	4					
MS-1	1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し, 残留熱を除去し, 原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し, 敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物, 系統及び機器	5) 炉心冷却機能	非常用炉心冷却系 (低圧炉心スプレイ系, 低圧注水系, 高圧炉心スプレイ系, 自動減圧系)	残留熱除去系 (低圧注水モード) (ポンプ, サプレッションチェンバ, サプレッションチェンバから注水先までの配管, 弁 (熱交換器バイパスライン含む), 注水ヘッダ)	○	×	×	×	R	-		
				直接関連系 (残留熱除去系 (低圧注水モード))	ポンプミニマムフローラインの配管, 弁	○	×	×	×	R	-	
					サプレッションチェンバ内のストレーナ	○	×	×	×	R	-	
				低圧炉心スプレイ系 (ポンプ, サプレッションチェンバ, サプレッションチェンバからスプレイ先までの配管, 弁, スプレイスパーージャ)	○	×	×	×	R	-		
				直接関連系 (低圧炉心スプレイ系)	ポンプミニマムフローラインの配管, 弁	○	×	×	×	R	-	
					サプレッションチェンバ内のストレーナ	○	×	×	×	R	-	
				高圧炉心スプレイ系 (ポンプ, サプレッションチェンバ, サプレッションチェンバからスプレイ先までの配管, 弁, スプレイスパーージャ)	○	×	×	×	R	-		
				直接関連系 (高圧炉心スプレイ系)	ポンプミニマムフローラインの配管, 弁	○	×	×	×	R	-	
					サプレッションチェンバ内のストレーナ	○	×	×	×	R	-	
		復水貯蔵タンク	○	○	×	×	屋外	○				
		ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込弁	○	×	×	×	R	-				
		ポンプの復水貯蔵タンクからの吸込配管, 弁	○	×	×	×	R	-				
		自動減圧系 (主蒸気逃がし安全弁)	○	×	×	×	R	-				
		直接関連系 (自動減圧系 (主蒸気逃がし安全弁))	原子炉圧力容器から主蒸気逃がし安全弁までの主蒸気配管	○	×	×	×	R	-			
			駆動用窒素源 (アキュムレータ, アキュムレータから主蒸気逃がし安全弁までの配管, 弁)	○	×	×	×	R	-			
		6) 放射性物質の閉じ込め機能, 放射線の遮へい及び放出低減機能	原子炉格納容器, 原子炉格納容器隔離弁, 原子炉格納容器スプレイ冷却系, 原子炉建屋, 非常用ガス処理系, 非常用再循環ガス処理系, 可燃性ガス濃度制御系	原子炉格納容器 (格納容器本体, 貫通部, 所員用エアロック, 機器搬出入用ハッチ)	○	×	×	×	R	-		
				直接関連系 (原子炉格納容器)	ベント管	○	×	×	×	R	-	
					スプレイ管	○	×	×	×	R	-	
	真空破壊弁			○	×	×	×	R	-			
	主蒸気逃がし安全弁排気管のクエンチャ			○	×	×	×	R	-			
原子炉建屋 (原子炉建屋原子炉棟) (ブローアウトパネル付き)	○			○	×	×		○				
直接関連系 (原子炉建屋 (原子炉建屋原子炉棟))	原子炉棟給排気隔離弁			○	×	○	×	R	○	(原子炉建屋原子炉棟換気空調系)		
原子炉格納容器隔離弁及び原子炉格納容器バウンダリ配管	○			×	×	×	R	-				
直接関連系 (原子炉格納容器隔離弁及び原子炉格納容器バウンダリ配管)	主蒸気隔離弁駆動用空気又は窒素源 (アキュムレータ, アキュムレータから主蒸気隔離弁までの配管, 弁)	○	×	×	×	R	-					
主蒸気流量制限器	○	×	×	×	R	-						

注記*1: 1=外部事象防護対象施設等, 2=屋外設備, 3=外気と繋がる設備, 4=外殻となる施設による防護が期待できない設備

*2: R=原子炉建屋, C=制御建屋, T=タービン建屋, LO=軽油タンク室, LOH=軽油タンク室 (H), D=固体廃棄物貯蔵所, HB=補助ボイラー建屋, TSC=緊急時対策建屋

*3: 抽出の観点1~4の評価の結果, 該当せず

*4: 屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備 (波及的影響 (機能的影響) を及ぼし得る施設) として抽出

表 1.1-1 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出結果 (4/7)

○ : Yes × : No - : 該当せず*3

重要度分類指針			女川原子力発電所第2号機				抽出の観点*1				設置場所*2	抽出結果	備考
分類	定義	機能	構築物, 系統又は機器		STEP								
			構築物, 系統又は機器		1	2	3	4					
MS-1	1) 異常状態発生時に原子炉を緊急に停止し, 残留熱を除去し, 原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧を防止し, 敷地周辺公衆への過度の放射線の影響を防止する構築物, 系統及び機器	6) 放射性物質の閉じ込め機能, 放射線の遮へい及び放出低減機能	原子炉格納容器, 原子炉格納容器隔離弁, 原子炉格納容器スプレイ冷却系, 原子炉建屋, 非常用ガス処理系, 非常用再循環ガス処理系, 可燃性ガス濃度制御系	残留熱除去系 (格納容器スプレイ冷却モード) (ポンプ, 熱交換器, サプレッションチェンバ, サプレッションチェンバからスプレイ先 (ドライウェル及びサプレッションチェンバ気相部) までの配管, 弁, スプレイ管 (ドライウェル及びサプレッションチェンバ))	○	×	×	×	R	-			
				直接関連系 (残留熱除去系 (格納容器スプレイ冷却モード))	ポンプミニマムフローラインの配管, 弁	○	×	×	×	R	-		
					サプレッションチェンバ内のストレーナ	○	×	×	×	R	-		
				非常用ガス処理系 (乾燥装置, 排風機, フィルタ装置, 原子炉建屋原子炉棟吸込口から排気筒までの配管, 弁)	○	×	×	×	R	-			
					○	○	×	×	屋外	○	一部の屋外配管		
				直接関連系 (非常用ガス処理系)	乾燥装置 (乾燥機能部分)	○	×	×	×	R	-		
				可燃性ガス濃度制御系 (再結合装置, 格納容器から再結合装置までの配管, 弁, 再結合装置から格納容器までの配管, 弁)	○	×	×	×	R	-			
	直接関連系 (可燃性ガス濃度制御系)	残留熱除去系 (再結合装置への冷却水供給をつかさどる部分)	○	×	×	×	R	-					
	遮蔽設備 (原子炉遮蔽壁, 一次遮蔽壁, 二次遮蔽壁)	○	×	×	×	R	-						
	2) 安全上必要なその他の構築物, 系統及び機器	1) 工学的安全施設及び原子炉停止系への作動信号の発生機能	安全保護系	原子炉停止系への作動信号の発生機構 ・原子炉保護系の安全保護回路	○	×	×	×	R, C	-			
				工学的安全施設への作動信号の発生機構 ・非常用炉心冷却系作動の安全保護回路 ・主蒸気隔離の安全保護回路 ・原子炉格納容器隔離の安全保護回路 ・非常用ガス処理系作動の安全保護回路	○	×	×	×	R, C	-			
		2) 安全上特に重要な関連機能	非常用所内電源系, 制御室及びその遮へい, 非常用換気空調系, 非常用補機冷却水系, 直流電源系 (いずれも, MS-1 関連のもの)	直接関連系 (非常用交流電源設備)	非常用交流電源設備 (ディーゼル機関, 発電機, 発電機から非常用負荷までの配電設備及び電路)	○	×	○	○	R	○	関連設備として原子炉補機室換気空調系を抽出	
					燃料系 (デイトンクからディーゼル機関まで)	○	×	×	×	R, 屋外	-	燃料油ドレンタンクミスト配管*4	
					始動用空気系 (空気だめからディーゼル機関まで)	○	×	×	×	R	-		
吸気系					○	×	×	×	R, 屋外	-	排気消音器*4		
冷却水系					○	×	×	×	R	-			
潤滑油系	○	×	×	×	R, 屋外	-	機関ミスト配管, 潤滑油サンブタンクミスト配管, 潤滑油補給タンクミスト配管*4						
燃料移送系 (軽油タンク A系, 軽油タンク B系及び軽油タンク HPCS系からデイトンクまで)	○	×	×	×	R, LO, LOH, 屋外	-	燃料デイトンクミスト配管*4						
軽油タンク A系, 軽油タンク B系	○	×	○	×	LO, 屋外	○	軽油タンク A系ベント配管, 軽油タンク B系ベント配管*4						
軽油タンク HPCS系	○	×	○	×	LOH, 屋外	○	軽油タンク HPCS系ベント配管*4						

注記*1: 1=外部事象防護対象施設等, 2=屋外設備, 3=外気と繋がる設備, 4=外殻となる施設による防護が期待できない設備

*2: R=原子炉建屋, C=制御建屋, T=タービン建屋, LO=軽油タンク室, LOH=軽油タンク室 (H), D=固体廃棄物貯蔵所, HB=補助ボイラー建屋, TSC=緊急時対策建屋

*3: 抽出の観点 1~4 の評価の結果, 該当せず

*4: 屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備 (波及的影響 (機能的影響) を及ぼし得る施設) として抽出

表 1.1-1 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出結果 (5/7)

○ : Yes × : No - : 該当せず*3

重要度分類指針				女川原子力発電所第2号機				抽出の観点*1				設置場所*2	抽出結果	備考
分類	定義	機能	構築物, 系統又は機器	構築物, 系統又は機器		STEP								
						1	2	3	4					
MS-1	2)安全上必須なその他の構築物, 系統及び機器	2)安全上特に重要な関連機能	非常用所内電源系, 制御室及びその遮へい, 非常用換気空調系, 非常用補機冷却水系, 直流電源系 (いずれも, MS-1 関連のもの)	中央制御室及び中央制御室遮蔽		○	×	×	×	C	-			
				中央制御室換気空調系 (放射線防護機能及び有毒ガス防護機能) (再循環送風機, 再循環フィルタ装置, 空気調和装置, 送風機, 排風機, ダクト及びダンパ)		○	×	○	×	C	○			
				原子炉補機冷却水系 (ポンプ, 熱交換器, 非常用系負荷冷却ライン配管, 弁 (MS-1 関連))		○	×	×	×	R	-			
				直接関連系 (原子炉補機冷却水系)	サージタンク	○	×	×	×	R	-			
				高圧炉心スプレィ補機冷却水系 (ポンプ, 熱交換器, 配管, 弁)		○	×	×	×	R	-			
				直接関連系 (高圧炉心スプレィ補機冷却水系)	サージタンク	○	×	×	×	R	-			
				原子炉補機冷却海水系 (ポンプ, 配管, 弁, ストレーナ (MS-1 関連))		○	○	×	×	R, 屋外	○	屋外設備であるポンプ, 一部の配管及び弁には竜巻防護対策を実施		
				直接関連系 (原子炉補機冷却海水系)	ストレーナ (異物除去機能をつかさどる部分)	○	×	×	×	R	-			
					取水路 (屋外トレンチ含む)	○	×	×	×	屋外	-	地下埋設		
				高圧炉心スプレィ補機冷却海水系 (ポンプ, 配管, 弁, ストレーナ)		○	○	×	×	R, 屋外	○	屋外設備であるポンプ, 一部の配管及び弁には竜巻防護対策を実施		
				直接関連系 (高圧炉心スプレィ補機冷却海水系)	ストレーナ (異物除去機能をつかさどる部分)	○	○	×	×	R, 屋外	○			
	取水路 (屋外トレンチ含む)	○	×	×	×	屋外	-	地下埋設						
非常用直流電源設備 (蓄電池, 蓄電池から非常用負荷までの配電設備及び電路 (MS-1 関連))		○	×	×	×	R, C	-							
計測制御用電源設備 (蓄電池から非常用計測制御装置までの配電設備及び電路 (MS-1 関連))		○	×	○	×	R, C	○	関連設備として計測制御電源室換気空調系を抽出						
PS-2	1)その損傷又は故障により発生する事象によって, 炉心の著しい損傷又は燃料の大量の破損を直ちに引き起こすおそれはないが, 敷地外への過度の放射性物質の放出のおそれのある構築物, 系統及び機器	1)原子炉冷却材を内蔵する機能 (ただし, 原子炉冷却材圧力バウンダリから除外されている計装等の小口径のもの及びバウンダリに直接接続されていないものは除く。)	主蒸気系, 原子炉冷却材浄化系 (いずれも, 格納容器隔離弁の外側のみ)	原子炉冷却材浄化系 (原子炉冷却材圧力バウンダリ以外の部分)		○	×	×	×	R	-			
				主蒸気系 (原子炉冷却材圧力バウンダリ以外の部分)		○	×	×	×	R, T	-			
				原子炉隔離時冷却系 (原子炉冷却材圧力バウンダリ以外の部分でタービン止め弁まで)		○	×	×	×	R	-			

注記*1 : 1=外部事象防護対象施設等, 2=屋外設備, 3=外気と繋がる設備, 4=外殻となる施設による防護が期待できない設備
 *2 : R=原子炉建屋, C=制御建屋, T=タービン建屋, LO=軽油タンク室, LOH=軽油タンク室 (H), D=固体廃棄物貯蔵所, HB=補助ボイラー建屋, TSC=緊急時対策建屋
 *3 : 抽出の観点 1~4 の評価の結果, 該当せず
 *4 : 屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備 (波及的影響 (機能的影響) を及ぼし得る施設) として抽出

表 1.1-1 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出結果 (6/7)

○ : Yes × : No - : 該当せず*3

分類	定義	重要度分類指針		女川原子力発電所第2号機				抽出の観点*1	設置場所*2	抽出結果	備考			
		機能	構築物, 系統又は機器	構築物, 系統又は機器										
				1	2	3	4							
PS-2	1) その損傷又は故障により発生する事象によって、炉心の著しい損傷又は燃料の大量の破損を直ちに引き起こすおそれはないが、敷地外への過度の放射性物質の放出のおそれのある構築物, 系統及び機器	2) 原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていないものであって、放射性物質を貯蔵する機能	放射性廃棄物処理施設 (放射能インベントリの大きいもの), 使用済燃料プール (使用済燃料貯蔵ラックを含む。)	気体廃棄物処理系 (活性炭式希ガスホールドアップ装置)				○	×	×	×	T	-	
				使用済燃料プール (使用済燃料貯蔵ラックを含む)				○	×	×	×	R	-	
				新燃料貯蔵庫 (臨界を防止する機能) (新燃料貯蔵ラック)				○	×	×	×	R	-	
	3) 燃料を安全に取り扱う機能	燃料取扱設備	燃料交換機				○	×	×	×	R	-		
			原子炉建屋クレーン				○	×	×	×	R	-		
			直接関連系 (燃料取扱設備)	原子炉ウエル			○	×	×	×	R	-		
	2) 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に作動を要求されるものであって、その故障により、炉心冷却が損なわれる可能性の高い構築物, 系統及び機器	1) 安全弁及び逃がし弁の吹き止まり機能	逃がし安全弁 (吹き止まり機能に関連する部分)	主蒸気逃がし安全弁 (吹き止まり機能)				○	×	×	×	R	-	
MS-2	1) PS-2 の構築物, 系統及び機器の損傷又は故障により敷地周辺公衆に与える放射線の影響を十分小さくするようにする構築物, 系統及び機器	1) 燃料プール水の補給機能	非常用補給水系	残留熱除去系 (ポンプ, サプレッションチェンバ, サプレッションチェンバ内のストレーナから燃料プールまでの配管, 弁)				○	×	×	×	R	-	
				直接関連系 (残留熱除去系)	ポンプミニマムフローラインの配管, 弁			○	×	×	×	R	-	
					サプレッションチェンバ内のストレーナ			○	×	×	×	R	-	
	2) 放射性物質放出の防止機能	放射性気体廃棄物処理系の隔離弁, 排気筒 (非常用ガス処理系排気筒の支持機能以外)	気体廃棄物処理系の隔離弁				○	×	×	×	T	-		
			排気筒				○	○	×	×	屋外	○		
			燃料プール冷却浄化系の燃料プール注入逆止弁				○	×	×	×	R	-		
		燃料集合体落下事故時放射能放出を低減する系	原子炉建屋 (原子炉建屋原子炉棟 (ブローアウトパネル付き))				○	○	×	×		○	外殻施設	
			直接関連系 (原子炉建屋原子炉棟)	原子炉棟給排気隔離弁			○	×	○	×	屋外	○	(原子炉建屋原子炉棟換気空調系)	
			非常用ガス処理系 (乾燥装置, 排風機, フィルタ装置, 原子炉建屋原子炉棟吸込口から排気筒までの配管, 弁)				○	×	×	×	R	-		
			直接関連系 (非常用ガス処理系)	乾燥装置 (乾燥機能部分)			○	×	×	×	R	-		

注記*1: 1=外部事象防護対象施設等, 2=屋外設備, 3=外気と繋がる設備, 4=外殻となる施設による防護が期待できない設備

*2: R=原子炉建屋, C=制御建屋, T=タービン建屋, LO=軽油タンク室, LOH=軽油タンク室 (H), D=固体廃棄物貯蔵所, HB=補助ボイラー建屋, TSC=緊急時対策建屋

*3: 抽出の観点 1~4 の評価の結果, 該当せず

*4: 屋外にある外部事象防護対象施設付属設備 (波及の影響 (機能的影響) を及ぼし得る施設) として抽出

表 1.1-1 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出結果 (7/7)

○ : Yes × : No - : 該当せず*3

分類	定義	重要度分類指針		女川原子力発電所第2号機				設置場所*2	抽出結果	備考	
		機能	構築物, 系統又は機器	構築物, 系統又は機器							
				抽出の観点*1							
				1	2	3	4				
MS-2	2) 異常状態への対応上特に重要な構築物, 系統及び機器	1) 事故時のプラント状態の把握機能	事故時監視計器の一部	・中性子束 (起動領域モニタ) ・原子炉スクラム用電磁接触器の状態 ・制御棒位置	○	×	×	×	R, C	-	
				・原子炉水位 (広帯域) ・原子炉水位 (燃料域) ・原子炉圧力	○	×	×	×	R, C	-	
				・ドライウエル圧力 ・圧力抑制室圧力 ・サブプレッションプール水温度 ・格納容器内雰囲気放射線モニタ	○	×	×	×	R, C	-	
				[低温停止への移行] ・原子炉圧力 ・原子炉水位 (広帯域)	○	×	×	×	R, C	-	
				[ドライウエルスプレイ] ・原子炉水位 (広帯域) ・原子炉水位 (燃料域) ・ドライウエル圧力 ・圧力抑制室圧力	○	×	×	×	R, C	-	
				[サブプレッションチェンバ冷却] ・原子炉水位 (広帯域) ・原子炉水位 (燃料域) ・サブプレッションプール水温度	○	×	×	×	R, C	-	
				[可燃性ガス濃度制御系起動] ・格納容器内雰囲気酸素濃度 ・格納容器内雰囲気酸素濃度	○	×	×	×	R, C	-	
	2) 異常状態の緩和機能	BWR には対象機能なし	(対象外)								
	3) 制御室外からの安全停止機能	制御室外原子炉停止装置 (安全停止に関連するもの)	中央制御室外原子炉停止装置	○	×	×	×	C	-		
MS-3	2) 異常状態への対応上必要な構築物, 系統及び機器	1) 緊急時対策上重要なもの及び異常状態の把握機能	原子力発電所緊急時対策所, 試料採取系, 通信連絡設備, 放射線監視設備, 事故時監視計器の一部, 消火系, 安全避難通路, 非常用照明	放射線監視設備 (気体廃棄物処理設備エリア排気放射線モニタ)	○	×	×	×	T	-	
外殻となる施設				制御建屋	○	○	×	×		○	外殻施設
				タービン建屋	○	○	×	×		○	外殻施設
				軽油タンク室	○	○	×	×		○	外殻施設
				軽油タンク室(H)	○	○	×	×		○	外殻施設

注記*1: 1=外部事象防護対象施設等, 2=屋外設備, 3=外気と繋がる設備, 4=外殻となる施設による防護が期待できない設備

*2: R=原子炉建屋, C=制御建屋, T=タービン建屋, LO=軽油タンク室, LOH=軽油タンク室 (H), D=固体廃棄物貯蔵所, HB=補助ボイラー建屋, TSC=緊急時対策建屋

*3: 抽出の観点1~4の評価の結果, 該当せず

*4: 屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備 (波及的影響 (機能的影響) を及ぼし得る施設) として抽出

1.2 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設
の選定について

1.2 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設の選定について

1.2.1 抽出方針

女川原子力発電所構内の構築物、系統及び機器のうち外部事象防護対象施設等を除く施設（以下「その他の施設」という。）より、外部事象防護対象施設等に対する波及的影響として、以下の観点から波及的影響を及ぼし得る施設を抽出する。

(1) 機械的影響の観点での抽出

外部事象防護対象施設等に対して、機械的影響の観点から、施設が倒壊することにより、外部事象防護対象施設等の機能を喪失させる可能性がある施設及び隣接する施設を抽出する。

図 1.2-1 に示すとおり、隣接施設及び施設の高さが外部事象防護対象施設等との距離以上である施設を抽出した。

抽出フローを図 1.2-2 に、抽出結果を表 1.2-1 及び図 1.2-3 に示す。

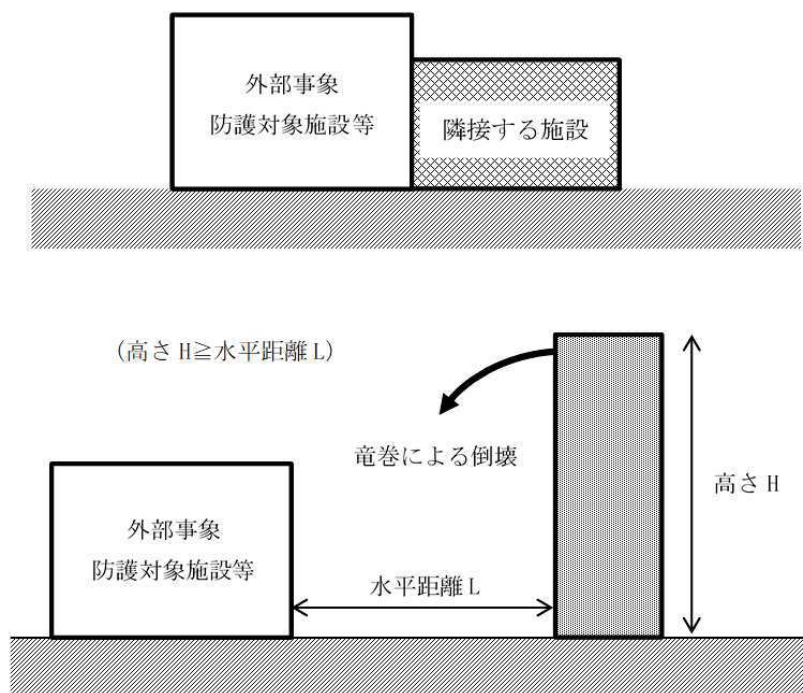


図 1.2-1 隣接する施設及び倒壊により外部事象防護対象施設等に損傷を及ぼし得る施設

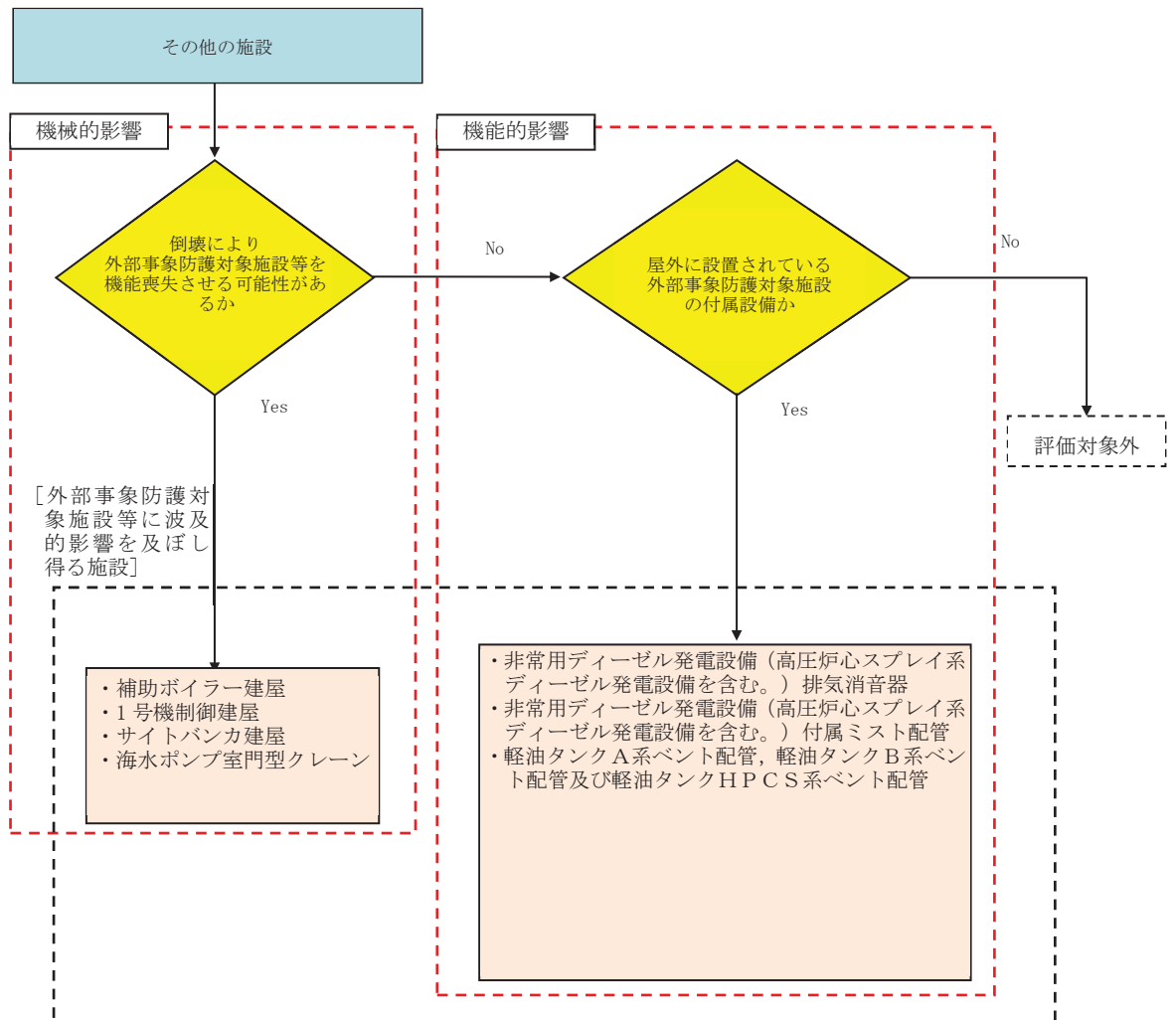


図 1.2-2 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出フロー

表 1.2-1 機械的影響の観点からの抽出結果

外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設	外部事象防護対象施設等	地上高 (m)	外部事象防護対象施設等までの最短距離 (m)	抽出結果
1号機制御建屋	制御建屋	—	隣接	○
補助ボイラー建屋	制御建屋 タービン建屋	—	隣接	○
サイトバンカ建屋	タービン建屋	約 44	約 22	○
海水ポンプ室門型クレーン	原子炉補機冷却海水ポンプ等	約 23	約 36* ¹	○* ²
窒素貯槽	原子炉建屋	約 4	約 9	—
PLR-VVVF 入力変圧器	原子炉建屋	約 3	約 8	—
除塵装置電源室	軽油タンク室	約 5	約 13	—
3号機硫酸貯槽	軽油タンク室 (H)	約 3	約 13	—

(注) 機械的影響の観点からの主な抽出結果を記載している。

注記*1：通常待機位置における最短距離

*2：海水ポンプ室門型クレーンはストッパーにより固定されているが、破損した場合には竜巻の風圧を受け移動し、原子炉補機冷却海水ポンプ等に隣接する可能性があるため抽出する

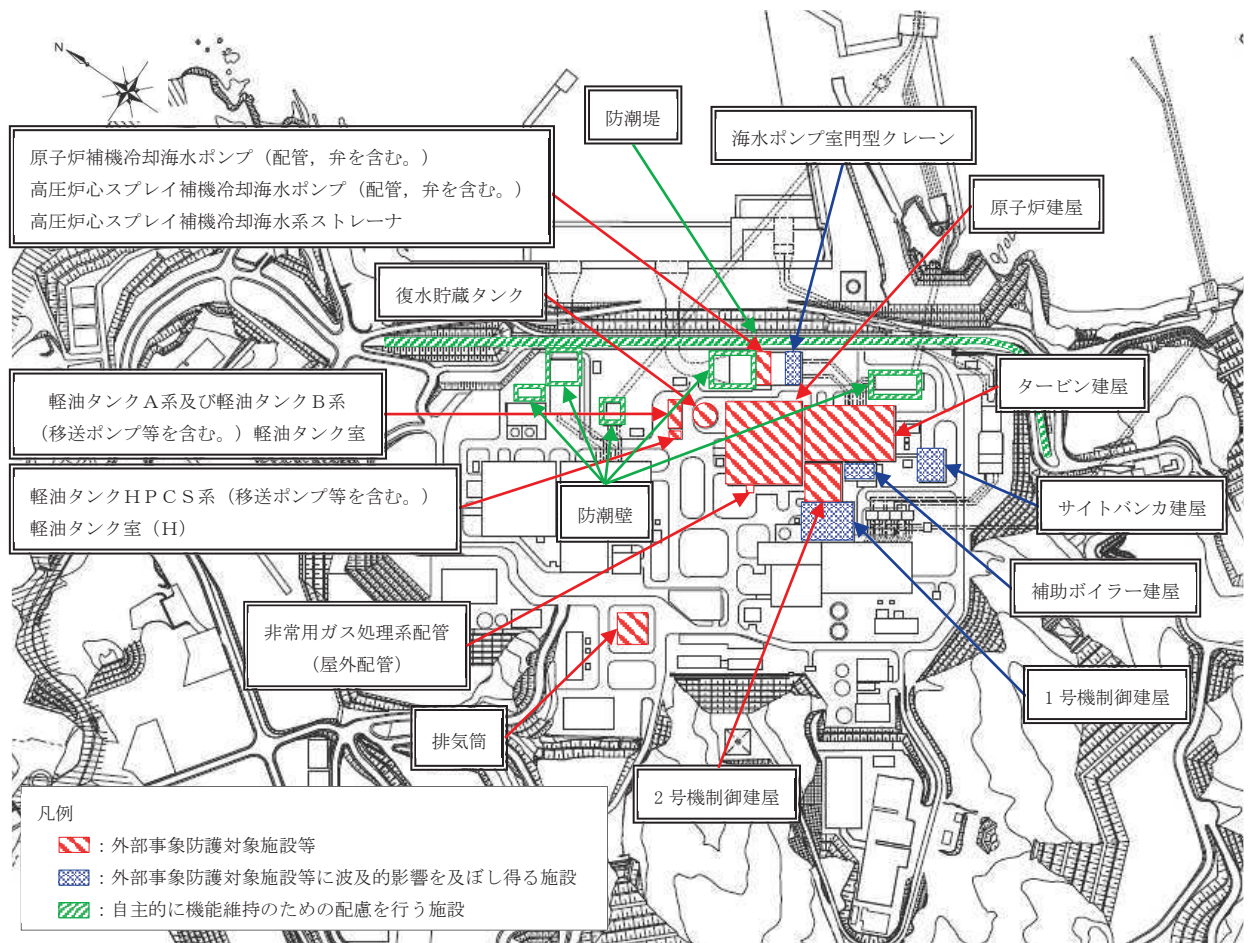


図 1.2-3 機械的影響の観点からの抽出結果

(2) 機能的影響の観点での抽出

a. 外部事象防護対象施設の付属設備のうち屋外にある設備

外部事象防護対象施設に対して、機能的影響の観点（「屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備」）から、機能喪失に陥った場合に外部事象防護対象施設も機能喪失する可能性がある施設を抽出した。抽出結果を表 1.2-2 に示す。

表 1.2-2 機能的影響の観点からの抽出結果

外部事象防護対象施設	屋外にある外部事象防護対象施設の付属設備
非常用ディーゼル発電設備	排気消音器
	機関ミスト配管
	潤滑油サンプタンクミスト配管
	燃料デイタンクミスト配管
	燃料油ドレンタンクミスト配管
高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備	排気消音器
	機関ミスト配管
	潤滑油補給タンクミスト配管
	燃料デイタンクミスト配管
	燃料油ドレンタンクミスト配管
軽油タンク A 系	軽油タンク A 系ベント配管
軽油タンク B 系	軽油タンク B 系ベント配管
軽油タンク H P C S 系	軽油タンク H P C S 系ベント配管

1.3 建屋開口部の調査結果について

1.3 建屋開口部の調査結果について

外部事象防護対象施設に影響を及ぼす可能性がある建屋開口部を調査した結果を以下に示す。調査の結果、表 1.3-1 に示す建屋開口部のうち、No. 12～17 について設計飛来物が衝突した場合に貫通し、外部事象防護対象施設に影響を及ぼす可能性があるため、竜巻防護対策を実施する。表 1.3-1 に示す No. 5～10 については、水密扉への交換を行うものであり、設計飛来物が貫通しないことを確認している。

なお、他の貫通、裏面剥離するおそれのある箇所については、周辺に外部事象防護対象施設、外部事象防護対象施設の安全機能を損なう可能性がある発火性又は引火性物質を内包する機器及び溢水源がないことが調査により確認できたことから、対策は不要である。

表 1.3-1 外部事象防護対象施設に影響を及ぼす可能性がある建屋開口部

建屋	図番号	開口部 番号	外部事象防護対象施設	開口部の 貫通の有無	竜巻防護対策 の要否
原子炉建屋	図 1.3-1	1	非常用ガス処理系 (屋外配管)	有	不要 (非常用ガス 処理系 (屋外配 管) を損傷させ た場合でも閉塞 することはない ことから, 安全機 能を損なわない)
	図 1.3-1	5	原子炉建屋 (原子炉建屋大物 搬入口)	無	不要
	図 1.3-1	6	非常用ディーゼル発電機 (A)	無	不要
	図 1.3-1	7, 8	非常用ディーゼル発電機 (A) 制御盤	無	不要
	図 1.3-1	9	高圧炉心スプレイ系ディーゼ ル発電機	無	不要
	図 1.3-1	10	非常用ディーゼル発電機 (B)	無	不要
	図 1.3-2	12	原子炉補機室換気空調系 (原 子炉補機 (A) 室排風機)	有	要 (竜巻防護鋼板 の設置)
	図 1.3-2	13	原子炉補機室換気空調系 (原 子炉補機 (B) 室排風機)	有	要 (竜巻防護鋼板 の設置)
	図 1.3-3	14	原子炉補機室換気空調系 (非 常用ディーゼル発電機 (A) 室 排気ダンパ)	有	要 (竜巻防護鋼板 の設置)
	図 1.3-3	15	原子炉補機室換気空調系 (原 子炉補機 (HPCS) 室排風機)	有	要 (竜巻防護鋼板 の設置)
	図 1.3-3	16	原子炉補機室換気空調系 (高 圧炉心スプレイ系ディーゼル 発電機室排気ダンパ)	有	要 (竜巻防護鋼板 の設置)
	図 1.3-3	17	原子炉補機室換気空調系 (非 常用ディーゼル発電機 (B) 室 排気ダンパ)	有	要 (竜巻防護鋼板 の設置)
	図 1.3-5	30	原子炉建屋 (原子炉建屋ブロ ーアウトパネル)	有	不要 (貫通した場 合には速やかに プラント停止し, 補修を実施する ことから, 安全機 能を損なわない)

- : 建屋開口部を貫通する場合には設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突し、影響を及ぼすおそれがある
(建屋開口部に対する設計飛来物による貫通評価を実施し、貫通の有無を確認する。外部事象防護対象施設等への影響を確認し、必要に応じて防護対策を実施)
- : 建屋開口部を貫通する場合でも、周辺に外部事象防護対象施設がないため影響を及ぼさない(防護対策不要)
- : 外部事象防護対象施設

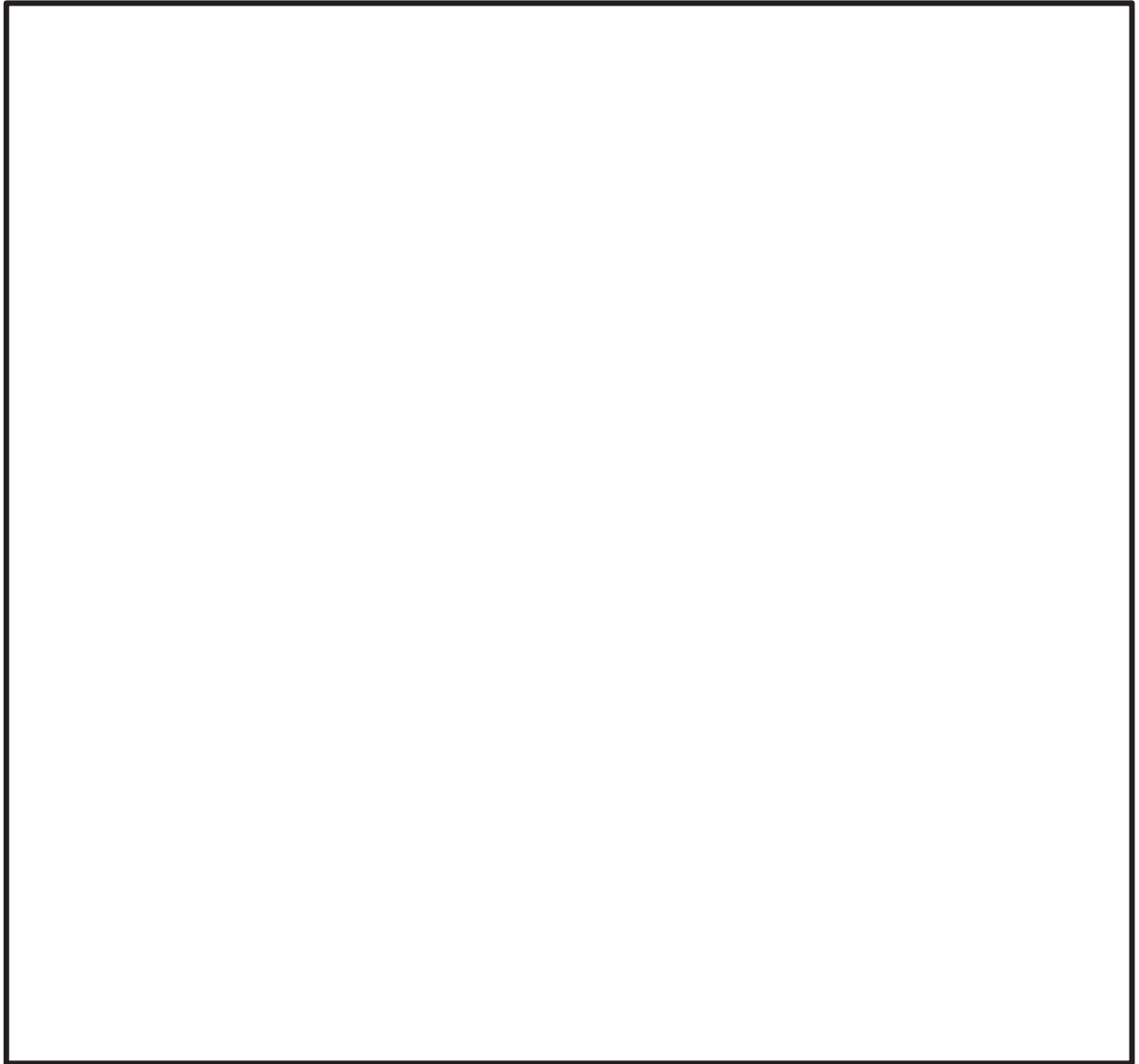


図 1.3-1 原子炉建屋 地上1階における開口部

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

- : 建屋開口部を貫通する場合には設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突し、影響を及ぼすおそれがある
(建屋開口部に対する設計飛来物による貫通評価を実施し、貫通の有無を確認する。外部事象防護対象施設等への影響を確認し、必要に応じて防護対策を実施)
- : 建屋開口部を貫通する場合でも、周辺に外部事象防護対象施設がないため影響を及ぼさない (防護対策不要)
- : 外部事象防護対象施設

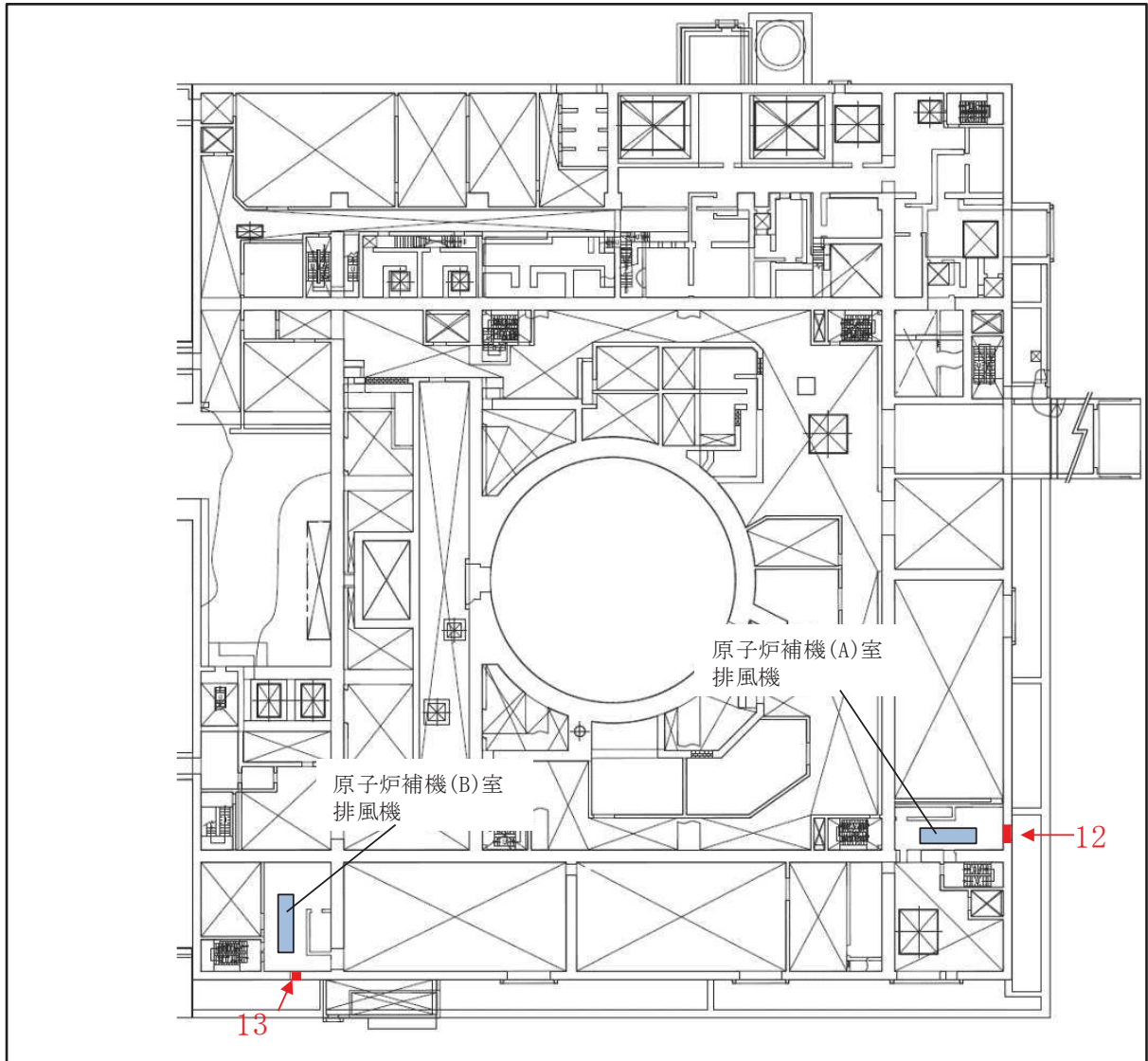


図 1.3-2 原子炉建屋 地上中 2 階における開口部

- : 建屋開口部を貫通する場合には設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突し、影響を及ぼすおそれがある
(建屋開口部に対する設計飛来物による貫通評価を実施し、貫通の有無を確認する。外部事象防護対象施設等への影響を確認し、必要に応じて防護対策を実施)
- : 建屋開口部を貫通する場合でも、周辺に外部事象防護対象施設がないため影響を及ぼさない(防護対策不要)
- : 外部事象防護対象施設

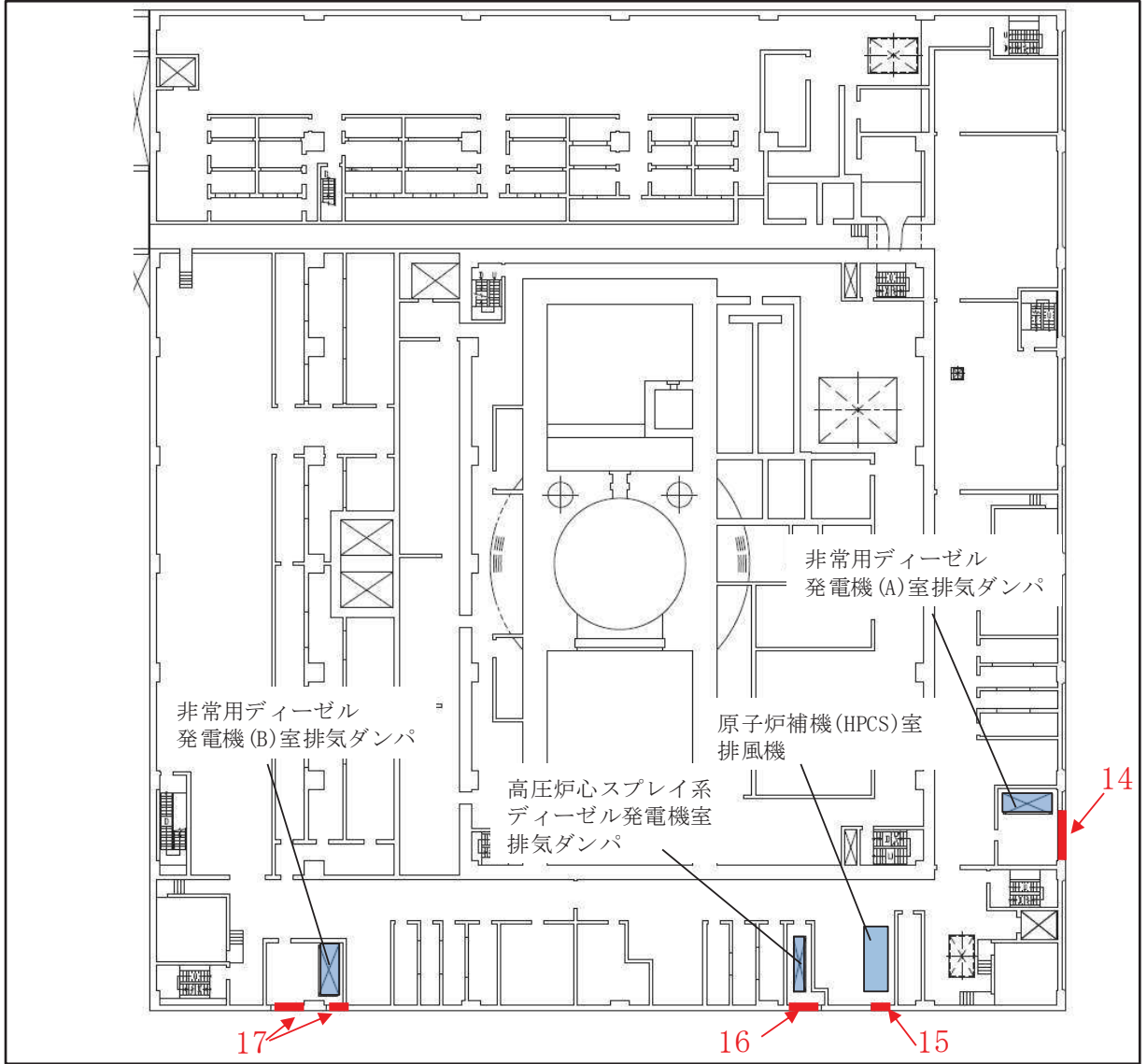


図 1.3-3 原子炉建屋 地上2階における開口部

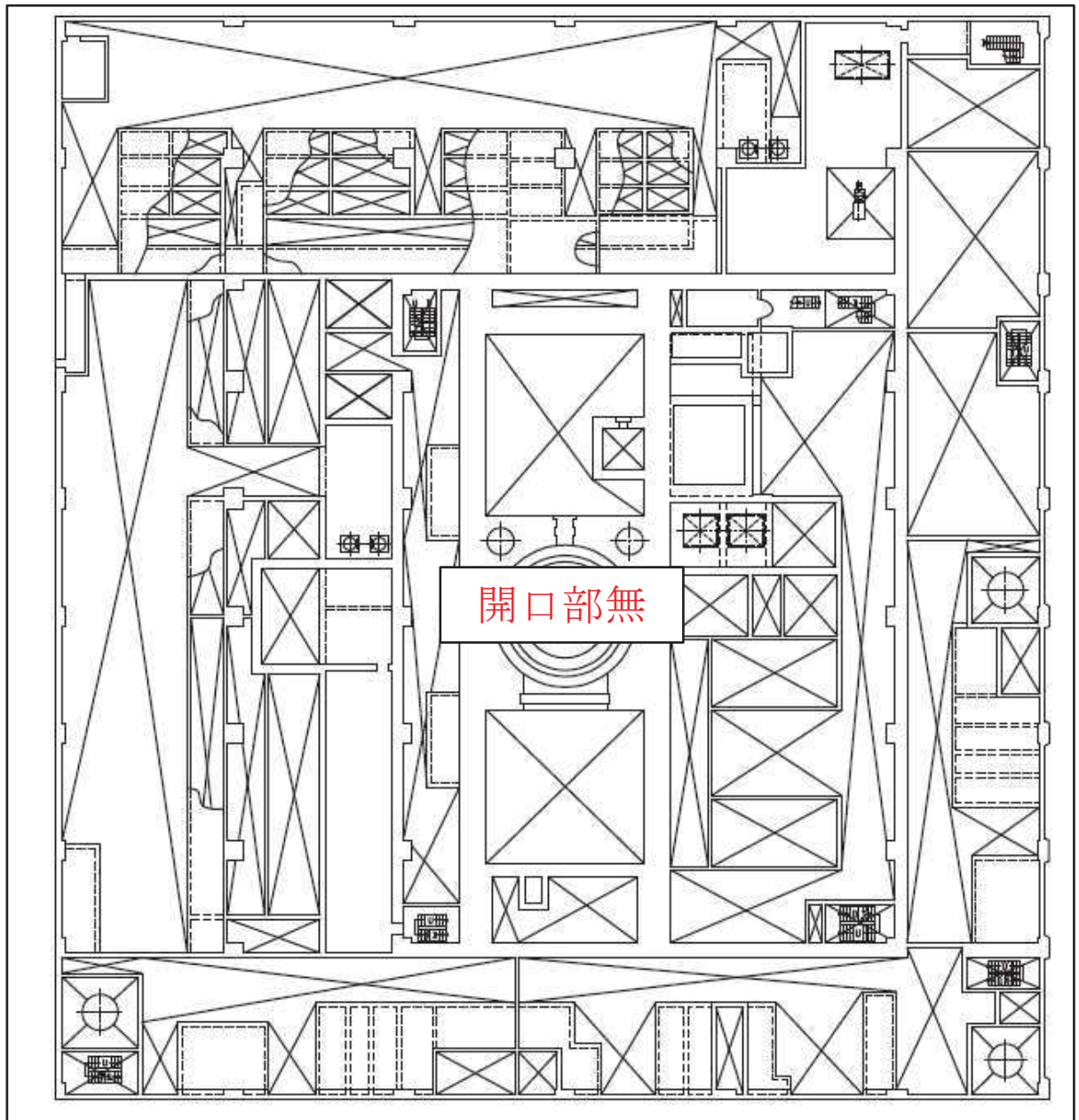


図 1.3-4 原子炉建屋 地上中 3 階における開口部

- : 建屋開口部を貫通する場合には設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突し、影響を及ぼすおそれがある
(建屋開口部に対する設計飛来物による貫通評価を実施し、貫通の有無を確認する。外部事象防護対象施設等への影響を確認し、必要に応じて防護対策を実施)
- : 建屋開口部を貫通する場合でも、周辺に外部事象防護対象施設がないため影響を及ぼさない (防護対策不要)
- : 外部事象防護対象施設

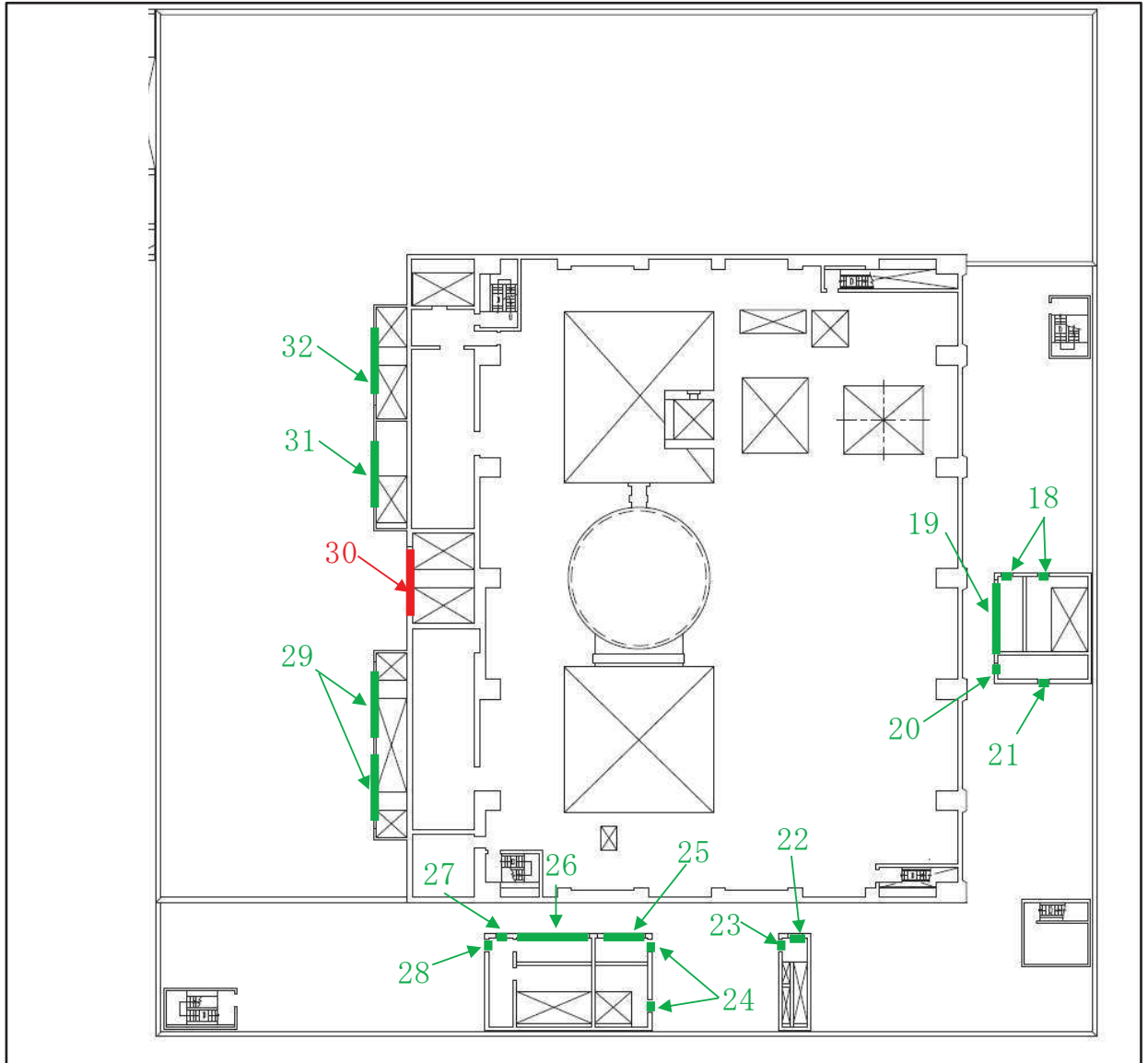


図 1.3-5 原子炉建屋 地上3階における開口部

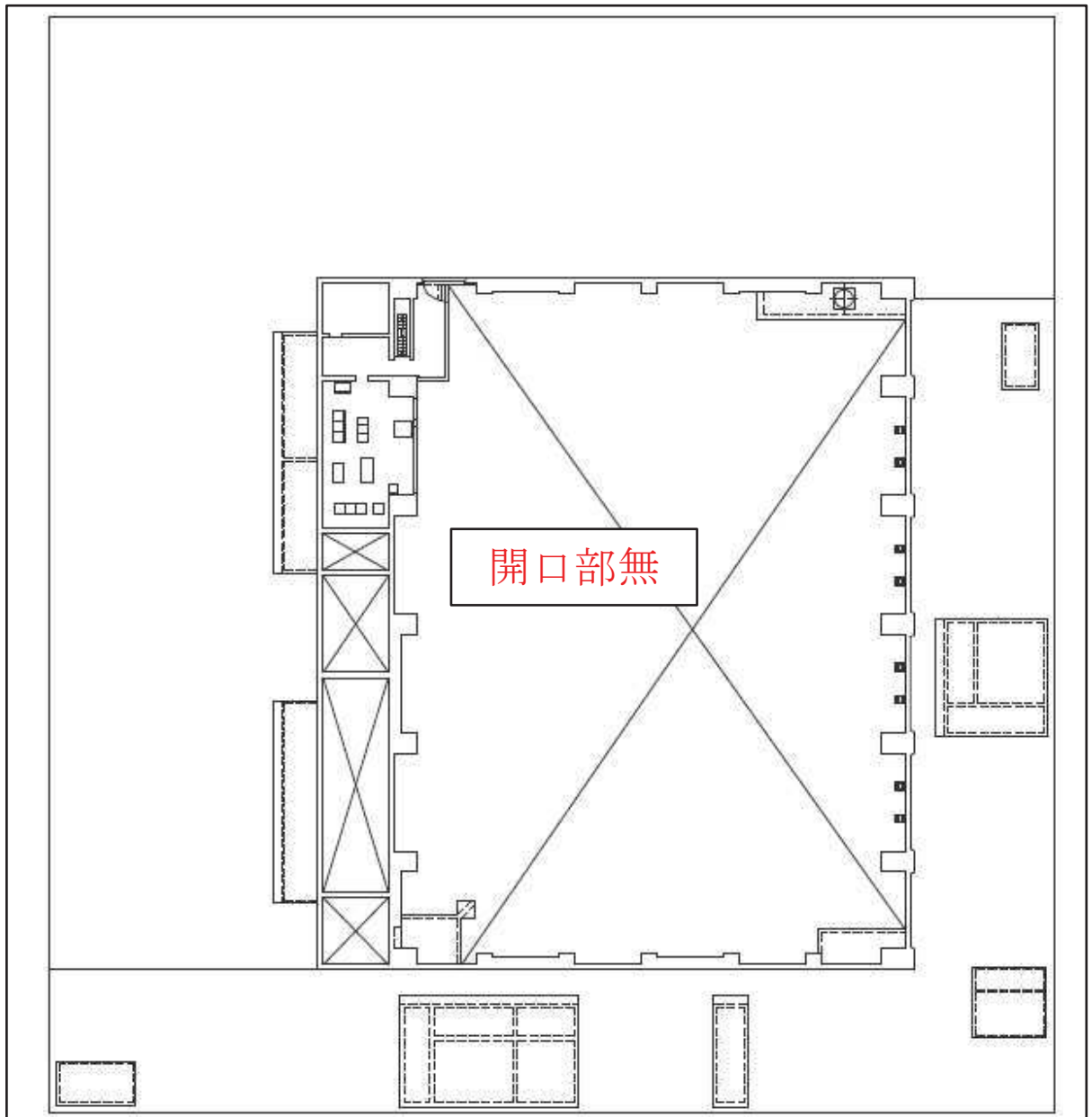


図 1.3-6 原子炉建屋 地上中4階における開口部

- : 建屋開口部を貫通する場合には設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突し、影響を及ぼすおそれがある
(建屋開口部に対する設計飛来物による貫通評価を実施し、貫通の有無を確認する。外部事象防護対象施設等への影響を確認し、必要に応じて防護対策を実施)
- : 建屋開口部を貫通する場合でも、周辺に外部事象防護対象施設がないため影響を及ぼさない(防護対策不要)
- : 外部事象防護対象施設

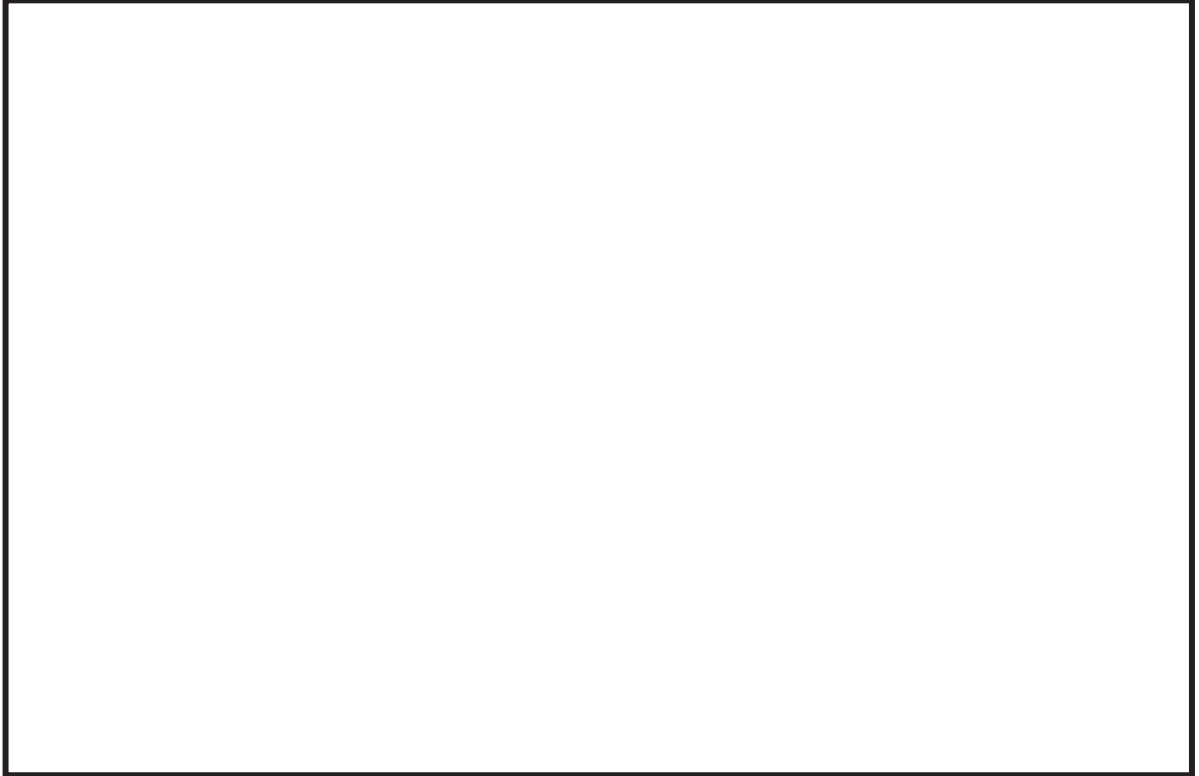


図 1.3-7 タービン建屋 地上1階における開口部

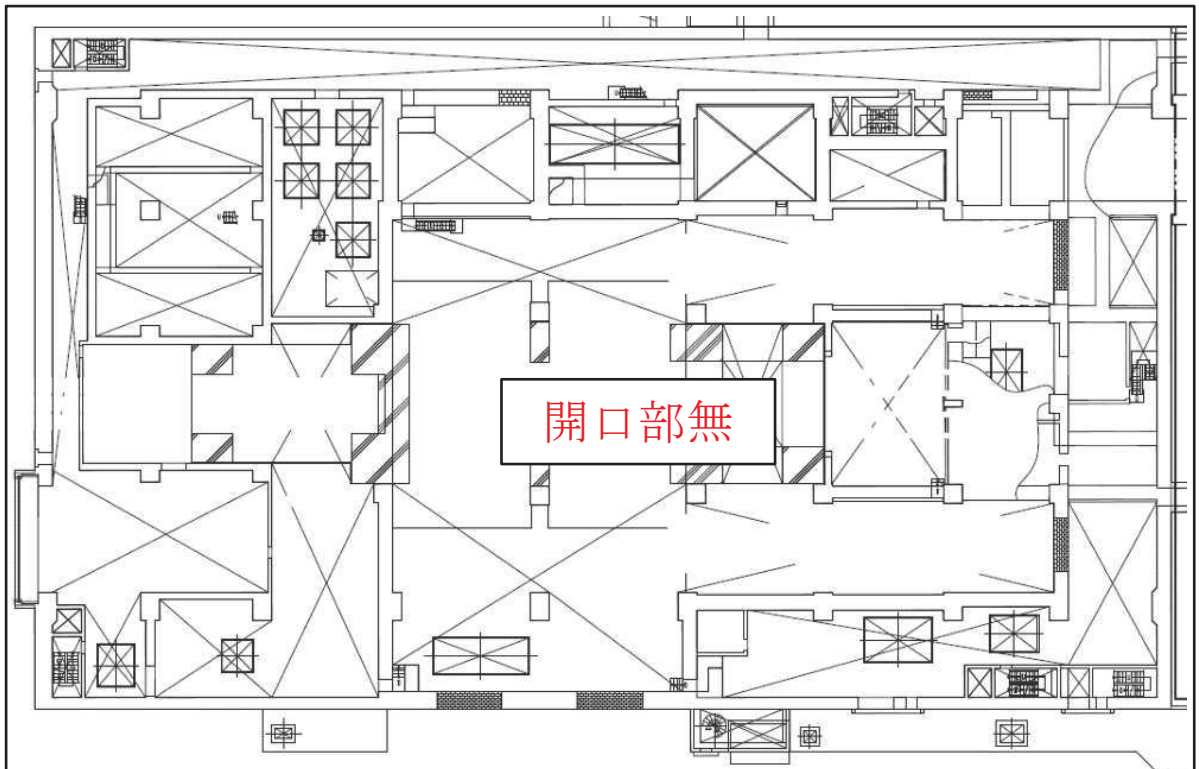


図 1.3-8 タービン建屋 地上中2階における開口部

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

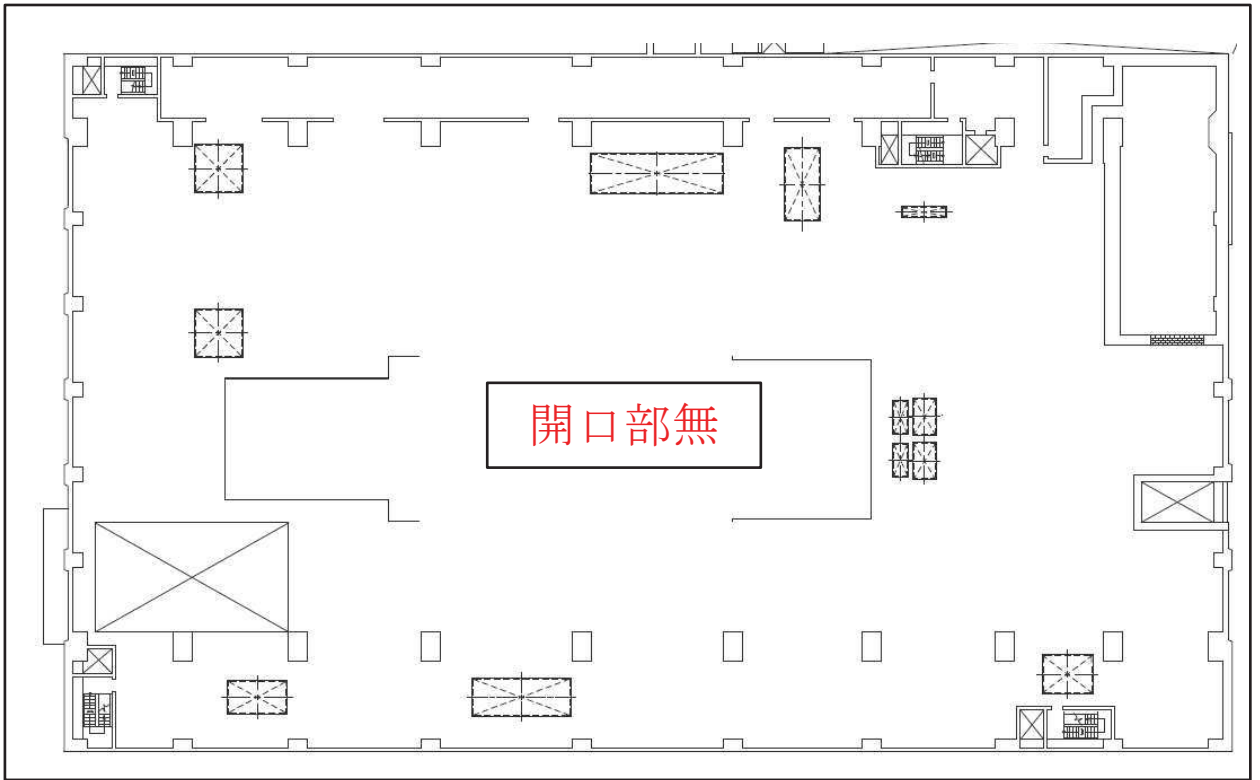


図 1.3-9 タービン建屋 地上2階における開口部

- : 建屋開口部を貫通する場合には設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突し、影響を及ぼすおそれがある
(建屋開口部に対する設計飛来物による貫通評価を実施し、貫通の有無を確認する。外部事象防護対象施設等への影響を確認し、必要に応じて防護対策を実施)
- : 建屋開口部を貫通する場合でも、周辺に外部事象防護対象施設がないため影響を及ぼさない (防護対策不要)
- : 外部事象防護対象施設

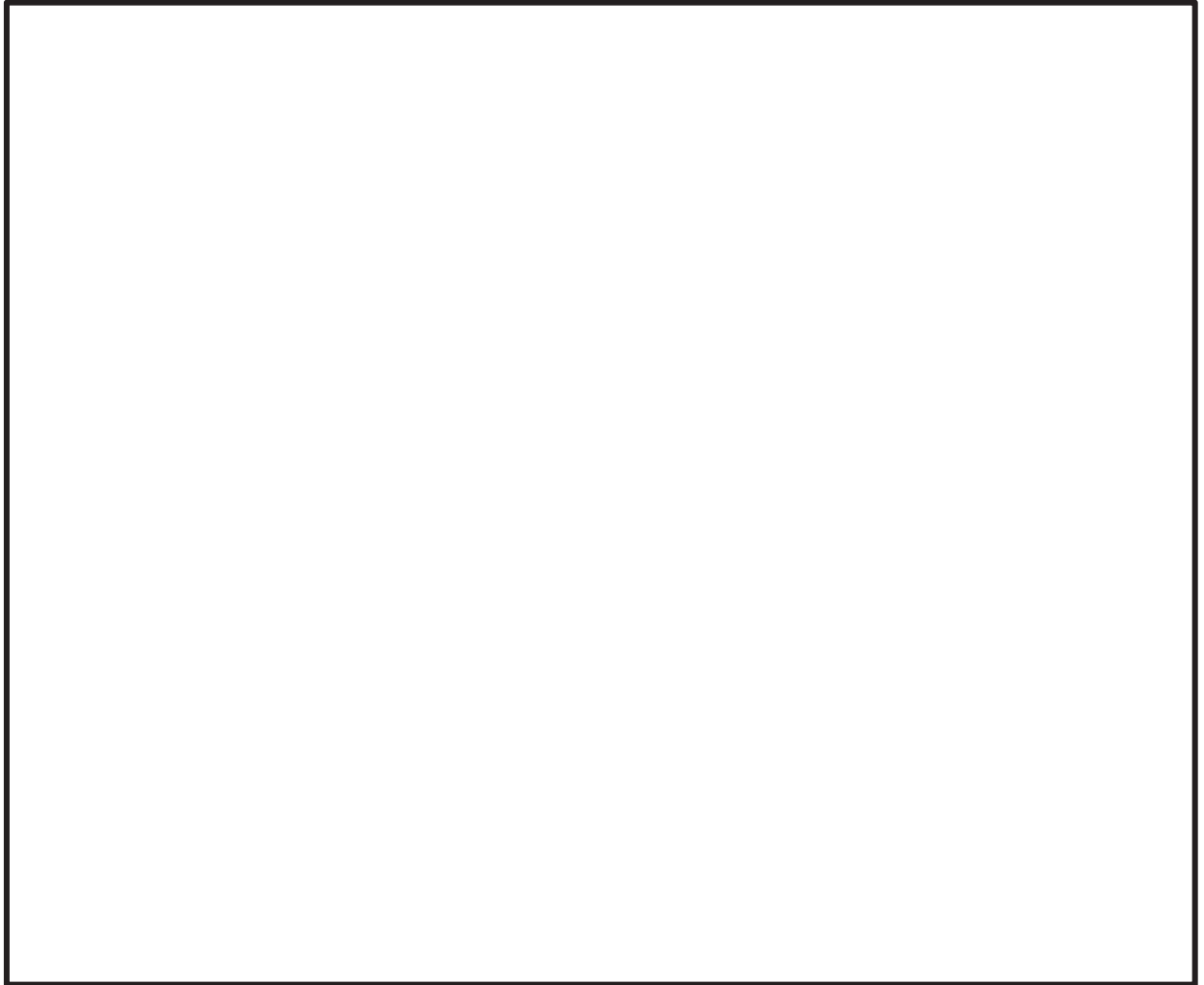


図 1.3-10 制御建屋 地上1階における開口部

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

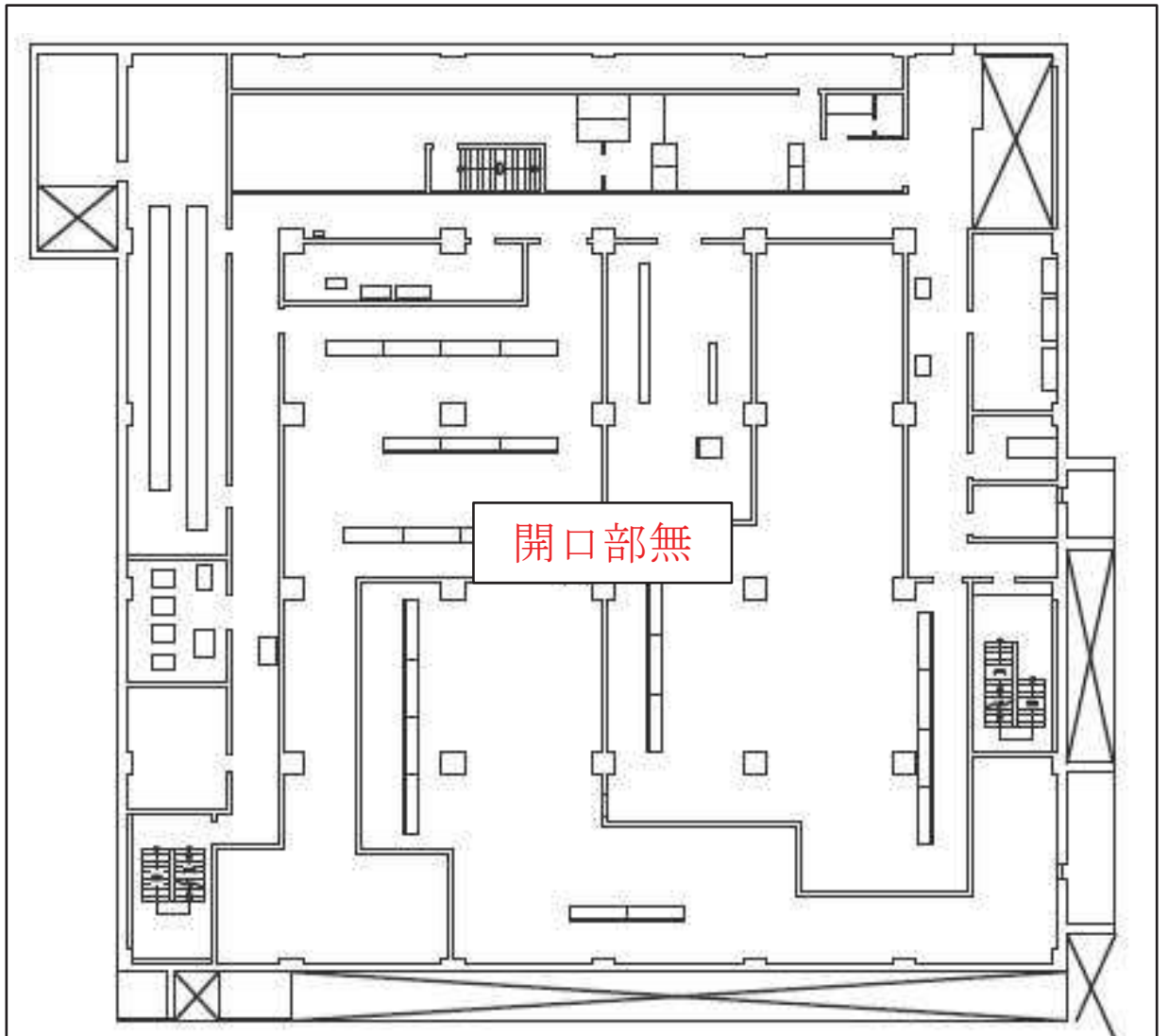


図 1.3-11 制御建屋 地上2階における開口部

- : 建屋開口部を貫通する場合には設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突し、影響を及ぼすおそれがある
(建屋開口部に対する設計飛来物による貫通評価を実施し、貫通の有無を確認する。外部事象防護対象施設等への影響を確認し、必要に応じて防護対策を実施)
- : 建屋開口部を貫通する場合でも、周辺に外部事象防護対象施設がないため影響を及ぼさない (防護対策不要)
- : 外部事象防護対象施設

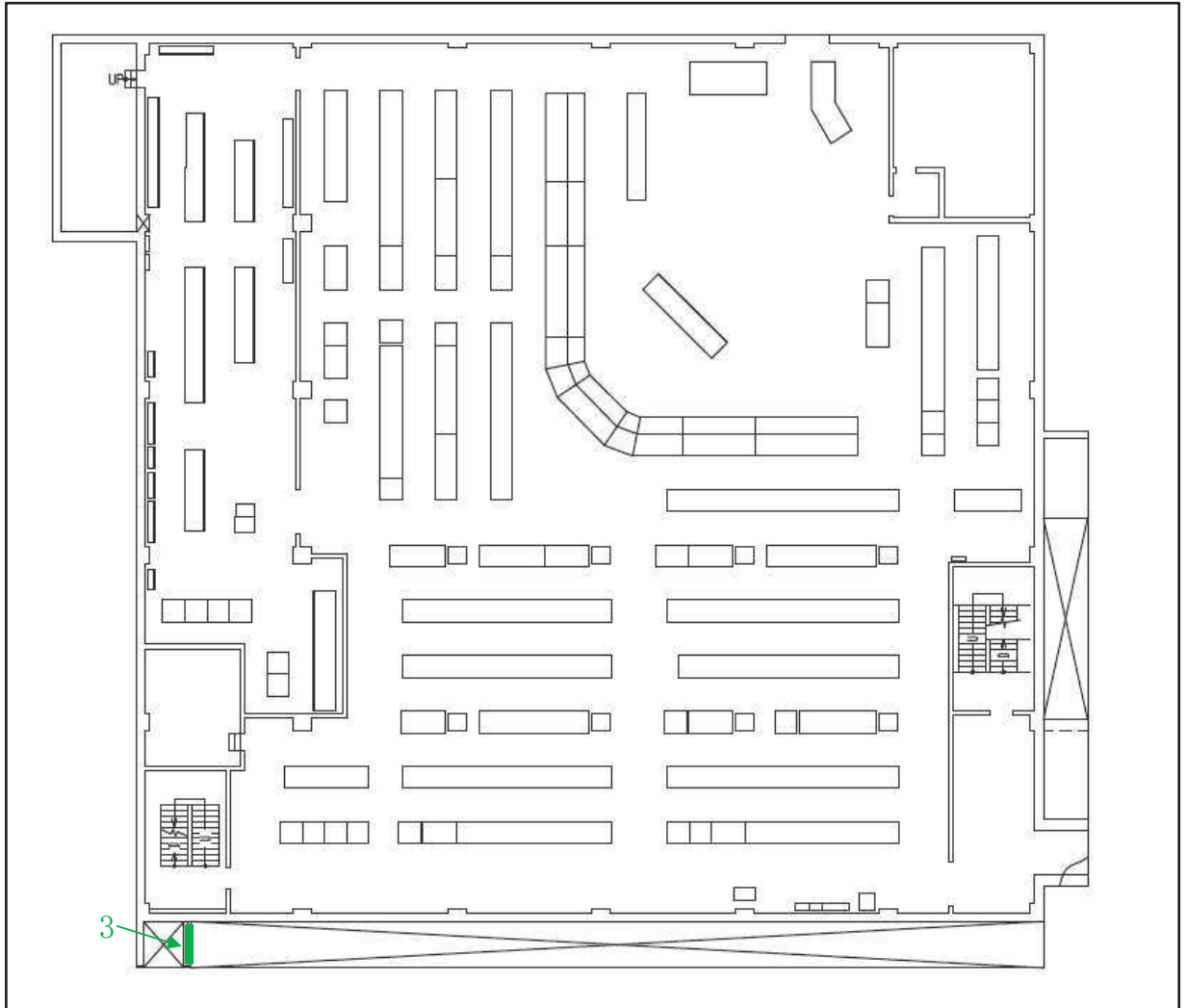


図 1.3-12 制御建屋 地上3階における開口部

- : 建屋開口部を貫通する場合には設計飛来物が外部事象防護対象施設に衝突し、影響を及ぼすおそれがある
(建屋開口部に対する設計飛来物による貫通評価を実施し、貫通の有無を確認する。外部事象防護対象施設等への影響を確認し、必要に応じて防護対策を実施)
- : 建屋開口部を貫通する場合でも、周辺に外部事象防護対象施設がないため影響を及ぼさない(防護対策不要)
- : 外部事象防護対象施設

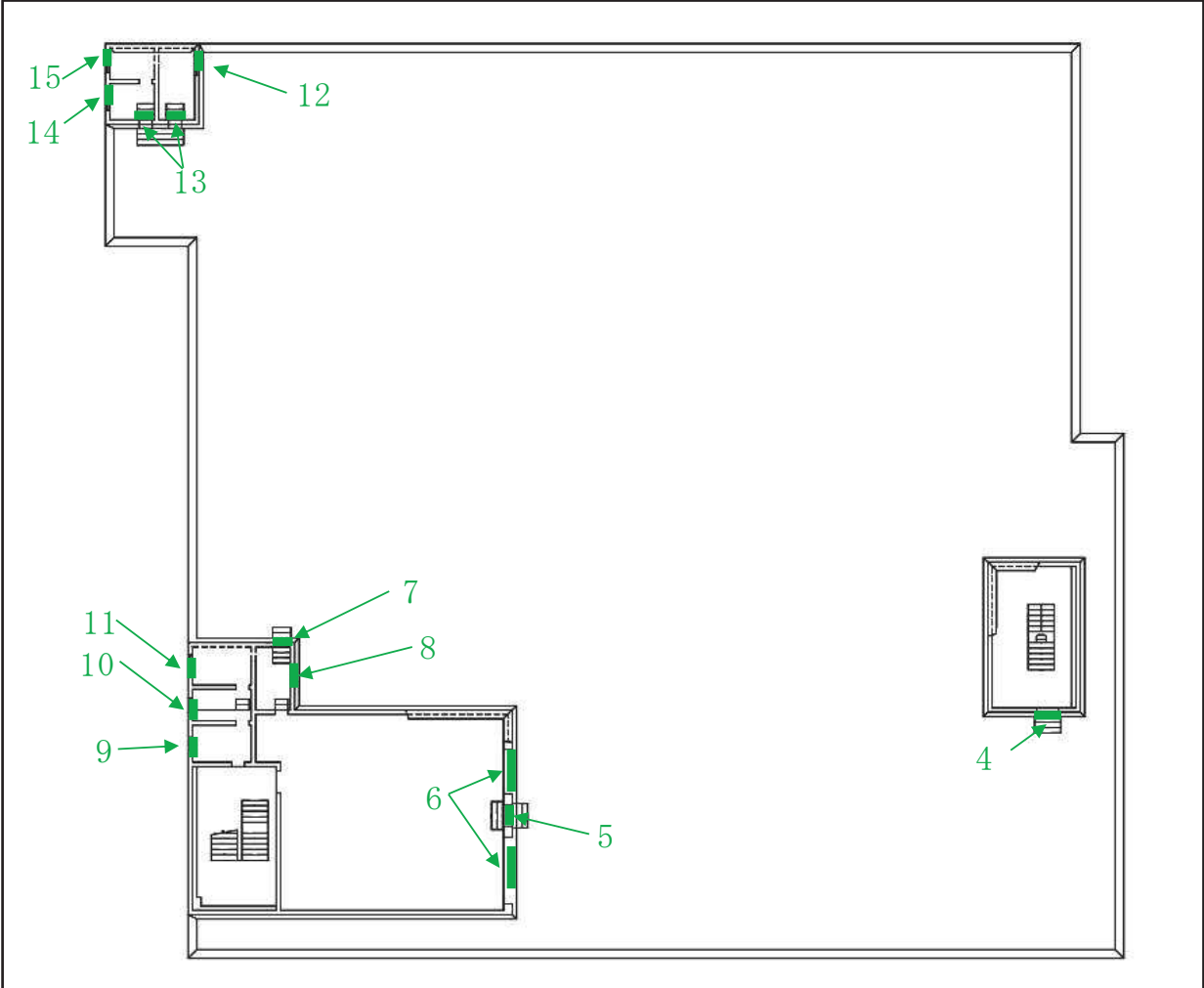


図 1.3-13 制御建屋 屋上階における開口部

1.4 飛来物の選定について

1.4 飛来物の選定について

発電所構内において屋外に保管している資機材及び駐車している車両については、外部事象防護対策施設及び外部事象防護対象施設を内包する建屋（以下「外部事象防護対象施設等」という。）への影響の有無を確認し、影響を及ぼすおそれがあるものについては、飛来物として選定し、固定、固縛又は外部事象防護対象施設等から離隔する等の飛来物発生防止対策を講じる必要がある。

以下に、飛来物の選定及び飛来物発生防止対策の要否を判定する手順について説明する。

1.4.1 飛散評価

飛来物源である資機材及び車両が、設計竜巻により飛来物化し、飛散した評価を行う。

飛散評価は、寸法、質量、形状及びこれらの値より算出する空力パラメータ、並びに初期高さにより、解析コード「TONBOS」によって最大飛来速度、飛散高さ、水平飛散距離を算出する。以下に飛散評価に用いる数値を説明する。

なお、「TONBOS」で用いる設計竜巻の風速場モデルはフジタモデルとし、竜巻影響評価へのフジタモデルの適用については、別紙1に示す。

(1) 空力パラメータの算出 ($C_D A/m$ (m^2/kg))

空力パラメータは飛来物の各寸法（長さ×幅×奥行き（高さ））より受圧面積を算出し、飛来物の質量及び抗力係数より算出する。a. 項に算出式、b. 項に計算例を示す。

a. 算出式

空力パラメータの算出は (1.1) 式により算出する。

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{c(C_{D1}A_1 + C_{D2}A_2 + C_{D3}A_3)}{m} \quad \dots (1.1)$$

m : 質量 (kg)

c : 1/3

C_{D1} , C_{D2} , C_{D3} : 抗力係数 (表 1.4-1, 図 1.4-1)

A_1 , A_2 , A_3 : 受圧面積 (m^2) (図 1.4-1)

表 1.4-1 飛来物の抗力係数

飛来物形状	c	C_{D1}	C_{D2}	C_{D3}
① 棒状物体	1/3	2.0	0.7 (円形断面) 1.2 (矩形断面)	0.7 (円形断面) 1.2 (矩形断面)
② 板状物体	1/3	1.2	1.2	2.0
③ 塊状物体	1/3	2.0	2.0	2.0

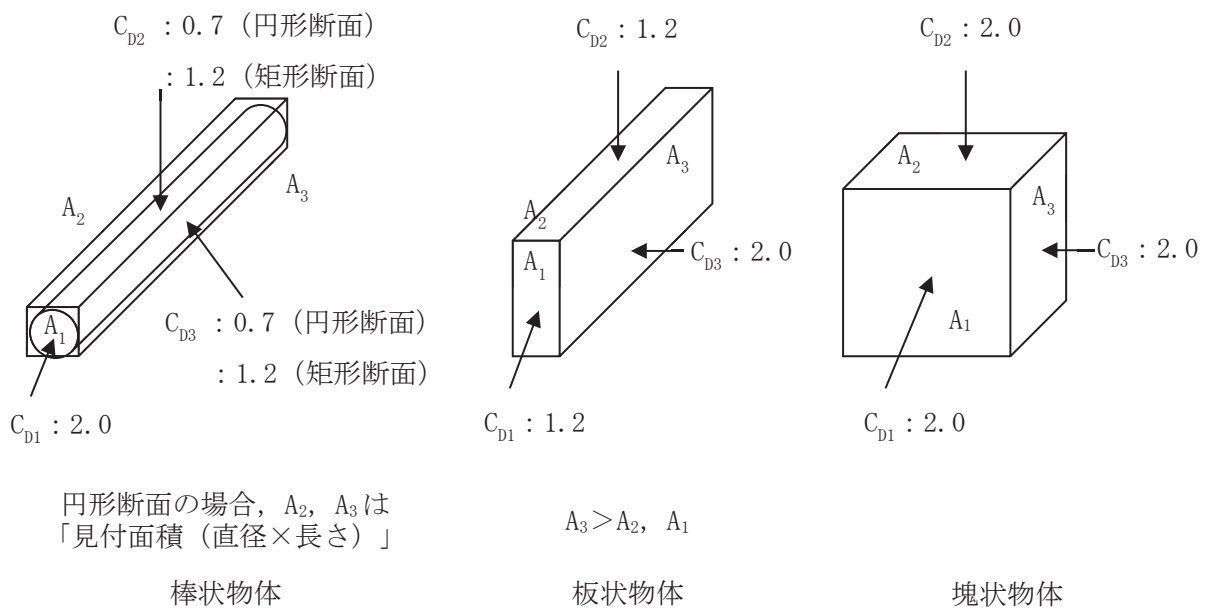


図 1.4-1 飛来物の形状と抗力係数の関係

b. 計算例

(a) 鉄パイプ (棒状物体) (図 1.4-2)

長さ : 2.0m 直径 : 0.05m 質量 : 8.4kg

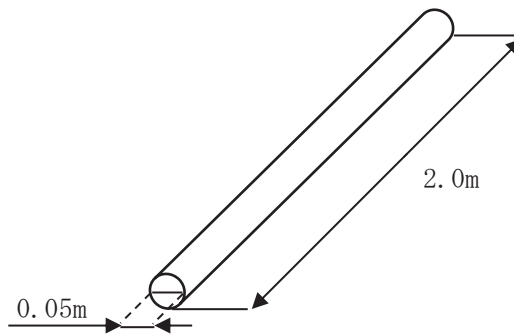


図 1.4-2 鉄パイプ

円形断面であるので, 抗力係数 C_D は, $C_{D1}=2.0, C_{D2}=0.7, C_{D3}=0.7$ である。

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{c(C_{D1}A_1 + C_{D2}A_2 + C_{D3}A_3)}{m} \quad \text{より, 空力パラメータは,}$$

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{1/3 \times (2.0 \times \pi/4 \times 0.05 \times 0.05 + 0.7 \times 2.0 \times 0.05 + 0.7 \times 2.0 \times 0.05)}{8.4} = 0.0058 \quad [\text{m}^2/\text{kg}]$$

(b) コンクリート板 (板状物体) (図 1.4-3)

長さ : 1.5m 幅 : 1.0m 高さ : 0.15m 質量 : 540kg

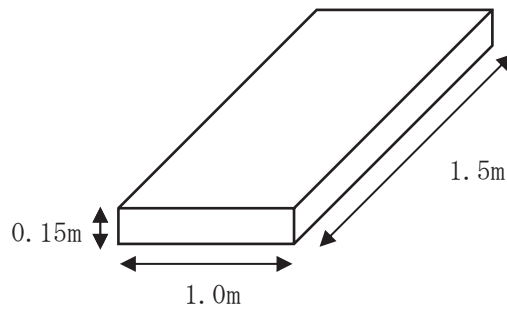


図 1.4-3 コンクリート板

板状物体であるので、抗力係数 C_D は、 $C_{D1}=1.2$, $C_{D2}=1.2$, $C_{D3}=2.0$ である。

$\frac{C_D A}{m} = \frac{c(C_{D1}A_1 + C_{D2}A_2 + C_{D3}A_3)}{m}$ より、空力パラメータは、

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{1/3 \times (1.2 \times 1.0 \times 0.15 + 1.2 \times 0.15 \times 1.5 + 2.0 \times 1.5 \times 1.0)}{540} = 0.0022 \text{ [m}^2/\text{kg]}$$

(c) 車両 (塊状物体) (図 1.4-4)

長さ : 4.36m 幅 : 1.695m 高さ : 1.46m 質量 : 1140kg

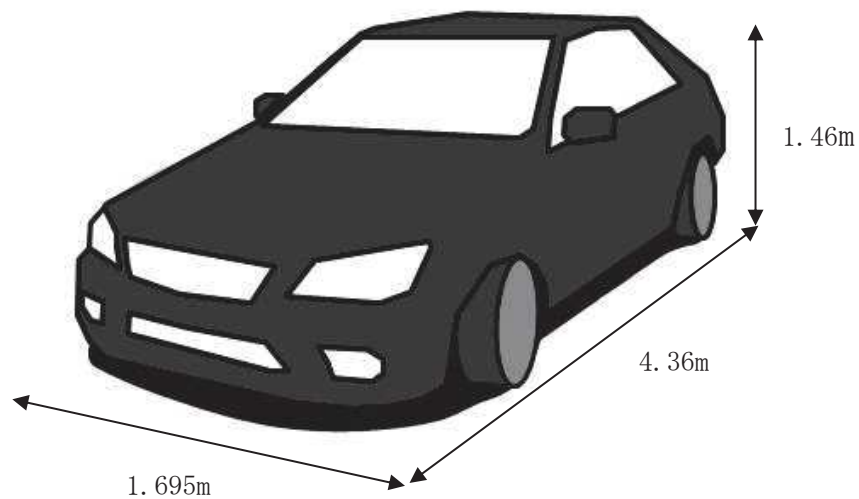


図 1.4-4 車両

塊状物体であるので、抗力係数 C_D は、 $C_{D1}=2.0$, $C_{D2}=2.0$, $C_{D3}=2.0$ である。

$\frac{C_D A}{m} = \frac{c(C_{D1}A_1 + C_{D2}A_2 + C_{D3}A_3)}{m}$ より、空力パラメータは、

$$\frac{C_D A}{m} = \frac{1/3 \times (2.0 \times 1.695 \times 1.46 + 2.0 \times 1.46 \times 4.36 + 2.0 \times 4.36 \times 1.695)}{1140} = 0.0095 \text{ [m}^2/\text{kg]}$$

(2) 初期高さ

飛散評価に必要な初期高さは、図 1.4-5 に示すとおり評価対象の飛来物と地表面との高低差である。現地調査結果を踏まえて設定するか、配置位置が特定できず、高所にも配置される可能性のある評価対象は、発電所の配置等を考慮し適切に設定する。

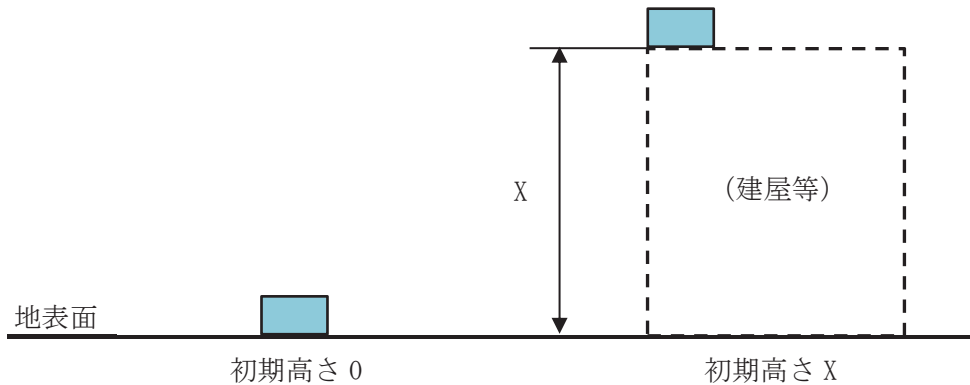


図 1.4-5 初期高さのイメージ図

(3) 飛来物の最大速度、飛散高さ及び飛散距離の算出

飛来物の仕様による入力条件をもとに、解析コード「TONBOS」を用いて、飛来物の最大速度、飛散高さ及び飛散距離を求める。図 1.4-6 に飛散距離及び飛散高さの飛跡のイメージを示す。

解析コード「TONBOS」の詳細については、添付書類「VI-5 計算機コード概要」に示す。

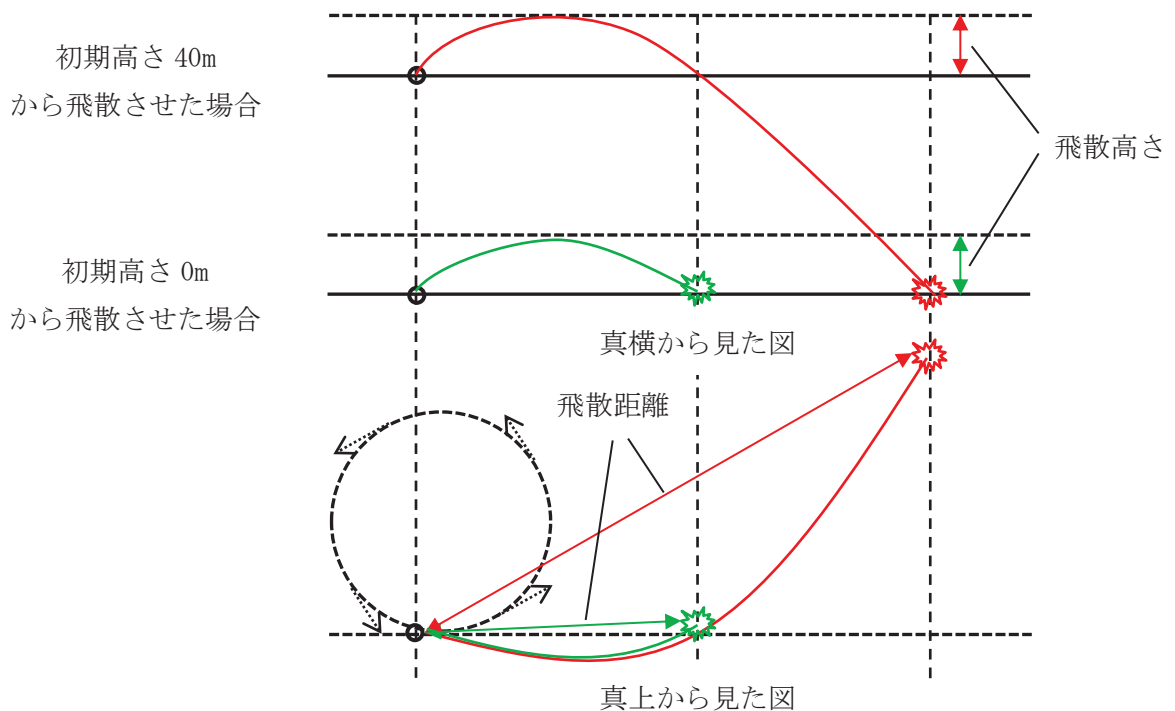


図 1.4-6 飛散評価における飛跡イメージ

表 1.4-2 に、(1) b. 項の計算例に示した、鉄パイプ、コンクリート板及び車両の飛散評価による各数値の算出結果を示す。

表 1.4-2 飛来物例の最大速度等の算出結果

飛来物の種類	棒状物体 (円形断面)	板状物体	塊状物体
	鉄パイプ	コンクリート板	車両
寸法(m)	長さ×直径 2.0×0.05	長さ×幅×高さ 1.5×1.0×0.15	長さ×幅×高さ 4.36×1.695×1.46
質量 (kg)	8.4	540	1140
空力パラメータ (m ² /kg)	0.0058	0.0022	0.0095
初期高さ (m)	10.1	40	0
飛来物の 最大水平速度 (m/s)	43.7	31.4	49.5
飛来物の 最大鉛直速度 (m/s)	13.6	27.0	7.8
飛散高さ (m)	0	0	5.2
飛散距離 (m)	91.3	71.9	139.8

(4) 運動エネルギーの算出

飛散評価によって算出された飛来物の最大速度より、運動エネルギーを算出する。

a. 運動エネルギーの算出式

飛来物の運動エネルギーEは下式によって算出する。

$$E = \frac{1}{2} M \cdot V^2$$

M：飛来物の質量(kg)

V：飛来物の最大速度(m/s)

b. 計算例

(a) 鉄パイプ (棒状物体)

質量：8.4kg 最大速度：43.7m/s

運動エネルギー (水平) = $(8.4 \times 43.7^2) / 2 = 8.0$ [kJ]

(b) コンクリート板 (板状物体)

質量 : 540kg 最大速度 : 31.4m/s

運動エネルギー (水平) = $(540 \times 31.4^2) / 2 = 266.2$ [kJ]

(c) 車両 (塊状物体)

質量 : 1140kg 最大速度 : 49.5m/s

運動エネルギー (水平) = $(1140 \times 49.5^2) / 2 = 1397$ [kJ]

(5) 貫通厚さの算出

飛来物の貫通厚さを、以下のコンクリートに対する貫通限界厚さの算出式に使用されている修正 NDRC 式 (1.2), Degen 式 (1.3) 及び鋼板に対する貫通限界厚さの算出式に使用されている BRL 式から算出する。

<修正 NDRC 式及び Degen 式>

$$\begin{aligned} \frac{x_c}{\alpha_c d} \leq 2 \text{ の場合 } \quad \frac{x_c}{d} &= 2 \left\{ \left(\frac{12145}{\sqrt{F_c}} \right) N d^{0.2} \frac{M}{d^3} \left(\frac{V}{1000} \right)^{1.8} \right\}^{0.5} \\ \frac{x_c}{\alpha_c d} \geq 2 \text{ の場合 } \quad \frac{x_c}{d} &= \left(\frac{12145}{\sqrt{F_c}} \right) N d^{0.2} \frac{M}{d^3} \left(\frac{V}{1000} \right)^{1.8} + 1 \\ \frac{x_c}{\alpha_c d} \leq 1.52 \text{ の場合 } \quad t_p &= \alpha_p d \left\{ 2.2 \left(\frac{x_c}{\alpha_c d} \right) - 0.3 \left(\frac{x_c}{\alpha_c d} \right)^2 \right\} \\ 1.52 \leq \frac{x_c}{\alpha_c d} \leq 13.42 \text{ の場合 } \quad t_p &= \alpha_p d \left\{ 0.69 + 1.29 \left(\frac{x_c}{\alpha_c d} \right) \right\} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} (1.2) \\ (1.3) \end{array} \right\}$$

t_p : 貫通限界厚さ (cm)

x_c : 貫入深さ (cm)

F_c : コンクリートの設計基準強度 (kgf/cm²) *

注記* : コンクリート強度は、被衝突物毎に設定する。

d : 飛来物の直径 (cm) (飛来物の衝突面の外形の最小投影面積に等しい円の直径)

M : 飛来物の質量 (kg)

V : 飛来物の最大水平速度 (m/s)

N : 飛来物の先端形状係数 (=1.14)

α_c : 飛来物の低減係数 (=1.0)

α_p : 飛来物の低減係数 (=1.0)

<BRL 式>

$$T^3 = \frac{0.5mv^2}{1.4396 \times 10^9 \cdot K^2 \cdot d^2}$$

T : 貫通限界厚さ (m)

d : 飛来物が衝突する衝突断面の等価直径 (m)

(最も投影面積が小さくなる衝突断面の等価直径)

K : 鋼板の材質に関する係数 (=1.0)

m : 飛来物の質量 (kg)

v : 飛来物の飛来速度 (m/s)

表 1.4-3 に、(1) b. 項の計算例に示した、鉄パイプ、コンクリート板及び車両の貫通厚さの算出結果を示す。

表 1.4-3 飛来物例の貫通厚さの算出結果

飛来物の種類	棒状物体 (円形断面)	板状物体	塊状物体
	鉄パイプ	コンクリート板	車両
寸法 (m)	長さ×直径 2.0×0.05	長さ×幅×高さ 1.5×1.0×0.15	長さ×幅×高さ 4.36×1.695×1.46
質量 (kg)	8.4	540	1140
飛来物の 最大水平速度 (m/s)	43.7	31.4	49.5
飛来物の 最大鉛直速度 (m/s)	13.6	27.0	7.8
コンクリートの 貫通限界厚さ (水平) (cm)	9.6	26.6	34.2
コンクリートの 貫通限界厚さ (鉛直) (cm)	3.7	23.3	6.6
鋼板の貫通限界厚さ (水平) (mm)	14.4	7.5	5.6
鋼板の貫通限界厚さ (鉛直) (mm)	3.1	6.1	0.5

1.4.2 対策要否の判定

1.4.1 項にて算出した運動エネルギーが、以下に示す観点より設計飛来物に包含されていない物品については、飛来物発生防止対策（固縛，固定又は外部事象防護対象施設等から隔離）を行う。

図 1.4-7 に、飛来物発生防止対策の例として車両に対する固縛対策の概要図を示す。

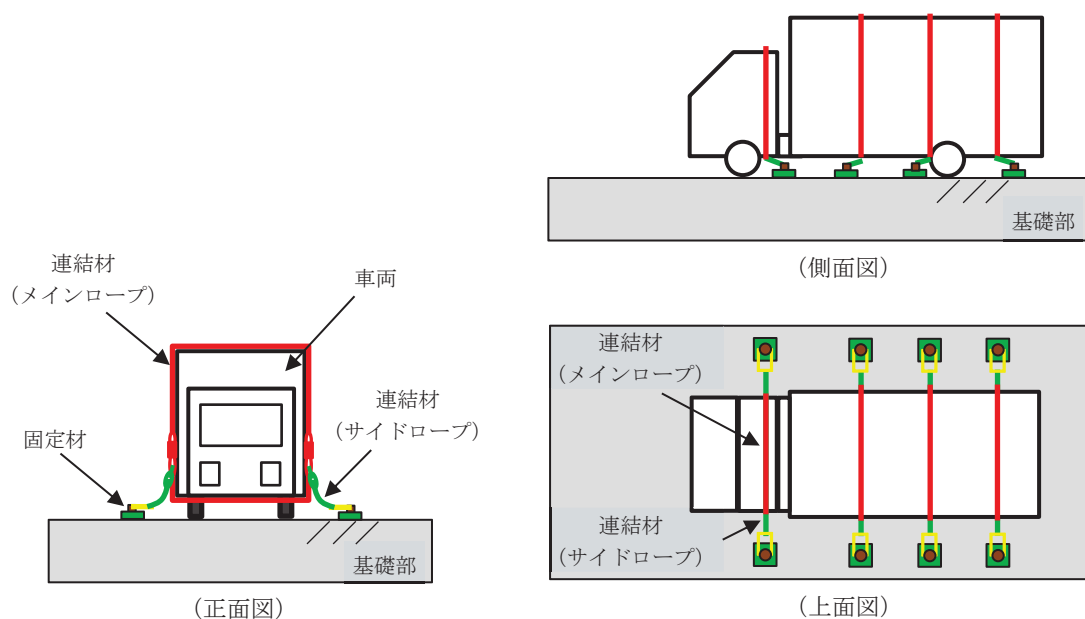


図 1.4-7 飛来物発生防止対策のうち車両に対する固縛対策の概要図

飛来物源である資機材及び車両に対して、飛来物として選定し、飛来物発生防止対策の要否の判定をするフローを図 1.4-8 に示す。

[飛来物発生防止対策要否の観点]

- ・ 設計飛来物（鋼製材）の運動エネルギー146.4kJより大きいもの。
- ・ コンクリートの貫通厚さとして貫通厚さが22.5cm*より大きいもの。
- ・ 鋼板の貫通厚さとして貫通厚さが27.6mmより大きいもの。

注記*：コンクリート基準強度330kgf/cm²の場合の例

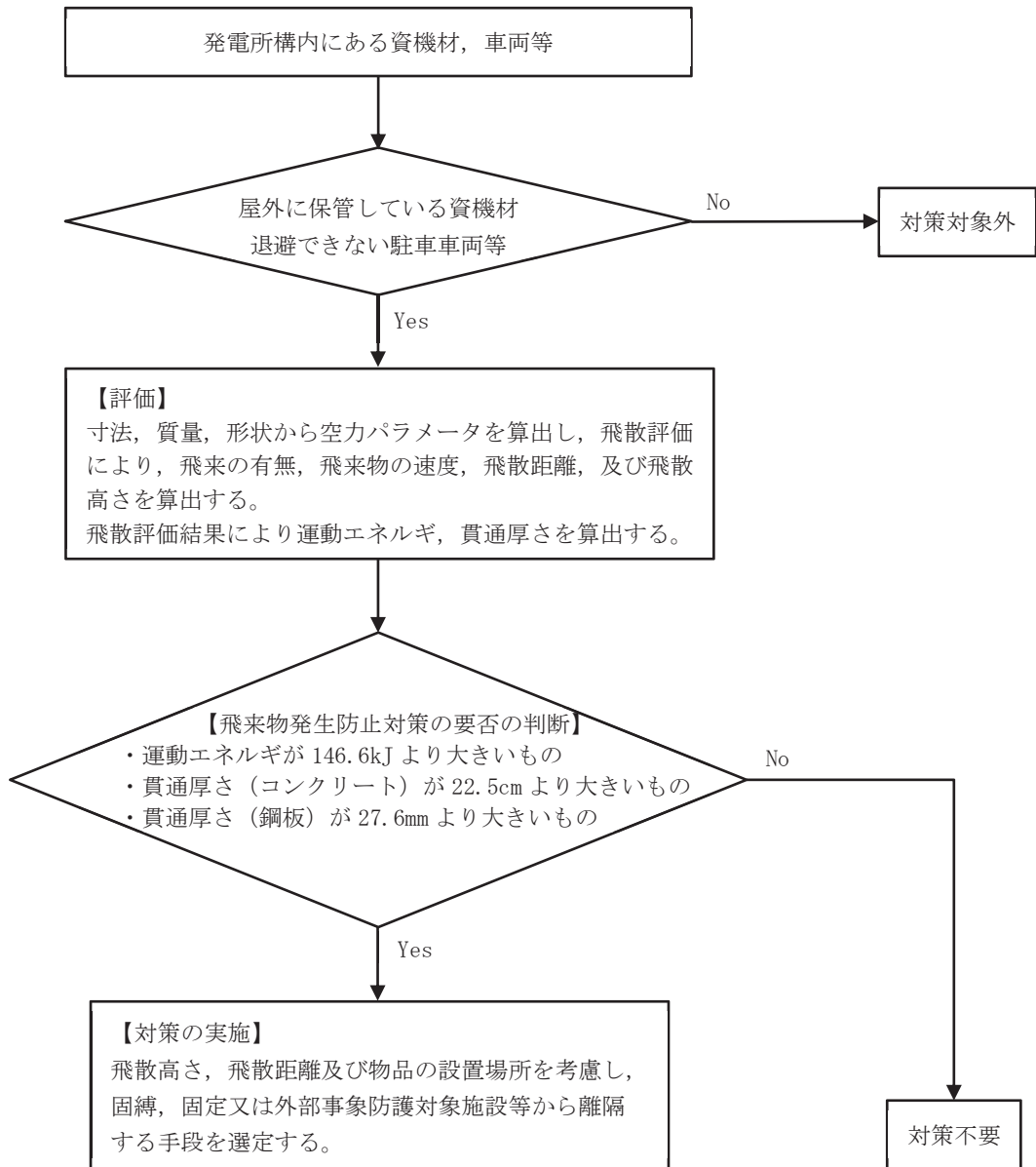


図 1.4-8 飛来物の選定及び飛来物発生防止対策の要否の判定フロー

竜巻影響評価におけるフジタモデルの適用について

1. はじめに

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」⁽¹⁾（以下「NRA ガイド」という。）に従い竜巻影響評価を行う上で、設計飛来物の飛来速度を設定するための風速場モデルを選定する必要がある。

これまでの竜巻飛来物評価において用いられている風速場モデルとして、米国 NRC の基準類に記載されている「ランキン渦モデル⁽²⁾⁽³⁾」、原子力安全基盤機構の調査研究報告書に記載されている「LES (Large-eddy simulation)」の数値解析⁽⁴⁾があるが、当社の竜巻影響評価においては、藤田博士が考案した竜巻渦の工学モデル DBT-77 (DBT : Design Basis Tornado)⁽⁵⁾（以下「フジタモデル」という。）を用いた飛散評価手法*により飛来物の飛散評価を実施することとした。

図 1 に風速場モデルの選定及び飛来物評価方法に関する検討フローを示す。また、図 2 に竜巻影響評価の基本フローと、フジタモデルを適用する箇所を示す。

次節以降において、フジタモデルの詳細や、フジタモデルを適用した理由等を説明する。

注記*：フジタモデルの風速場と物体の浮上・飛来モデルを実装した数値解析コード⁽⁶⁾

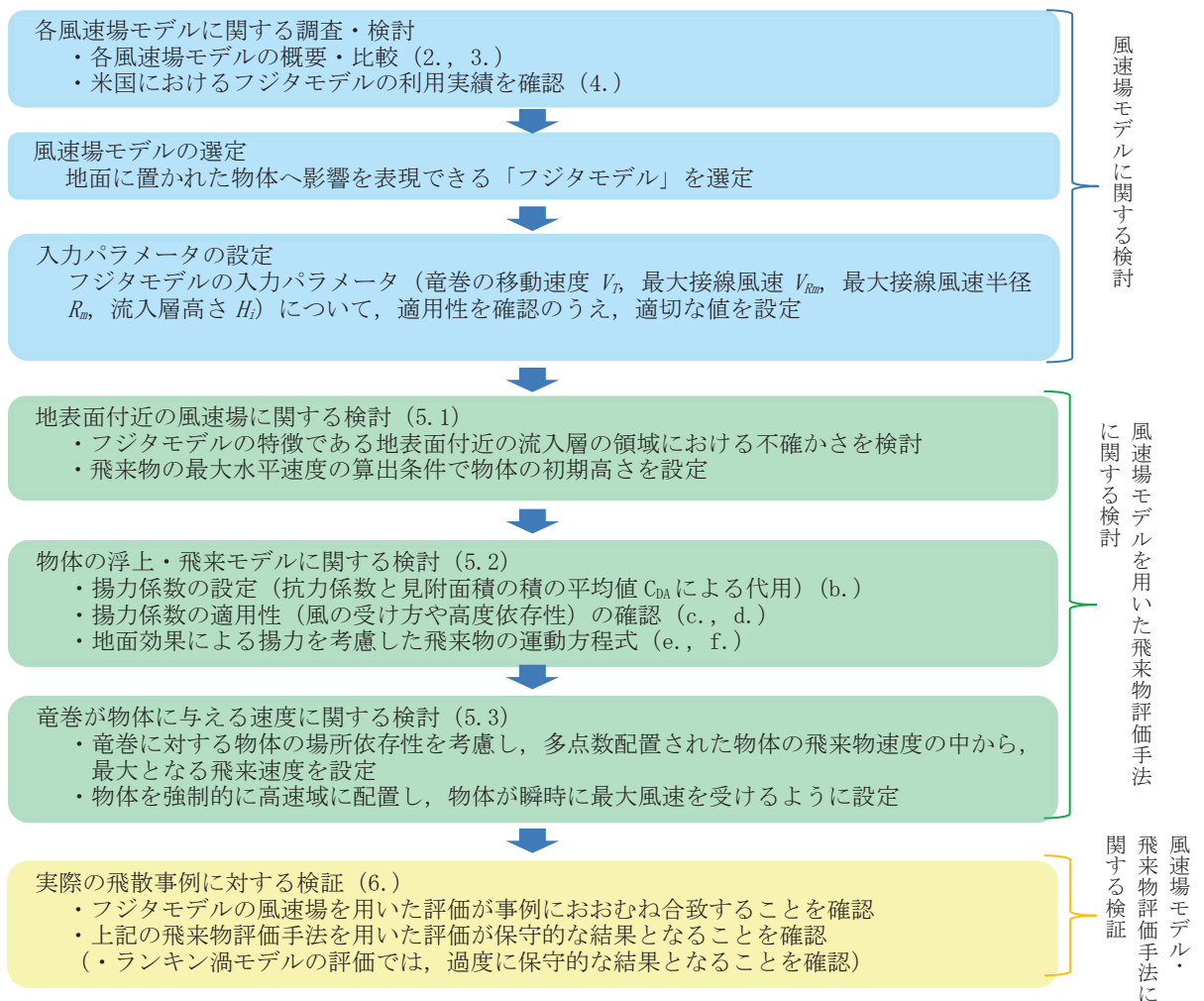


図 1 風速場モデルの選定及び飛来物評価方法に関する検討フロー
(括弧内の数字は、本資料の節番号)

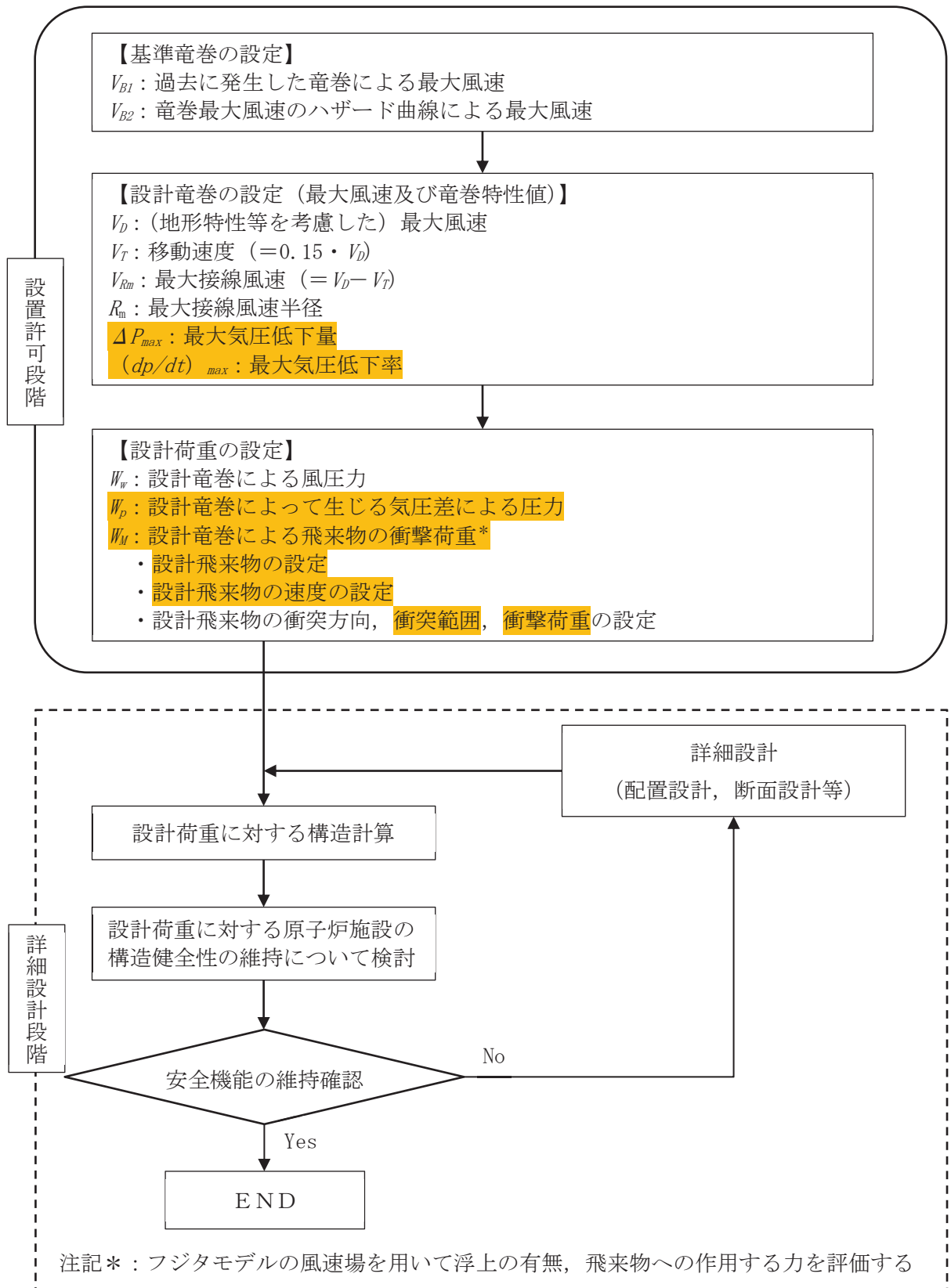


図2 竜巻影響評価フローとフジタモデルの関連箇所

2. 各風速場モデルの概要

2.1 フジタモデル

フジタモデルは、米国 NRC が実際の竜巻風速場をモデル化したいという要望により、藤田博士が 1978 年に竜巻観測記録を基に考案した工学モデルである⁽⁵⁾。

このフジタモデルの作成に当たっては、1974 年 8 月の米国カンザス州 Ash Valley 等で発生した竜巻のビデオ画像（図 3）を写真図化分析し、竜巻の地上痕跡調査及び被災状況調査結果と照合することで、図 4（左）に示すような風速ベクトルを作成している。このベクトル図を基に作成された流線モデル（図 4（右））から、竜巻風速場を代数式で表わすようにしている。

フジタモデルの特徴は、地表面付近における竜巻中心に向かう強い水平方向の流れ及び外部コアにおける上昇流といった、実際の竜巻風速場を表現できる点にある。



図 3 Ash Valley 竜巻（1974. 8. 30）のビデオ画像

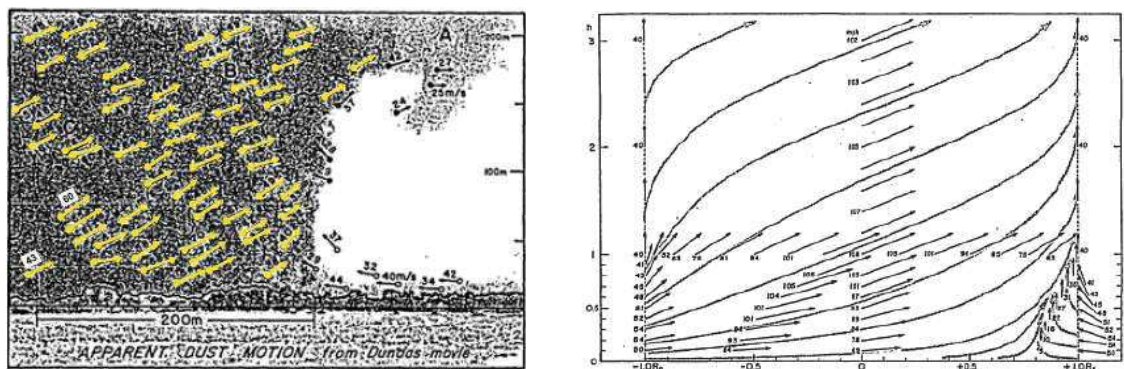


図 4 分析によって作成した風速ベクトル（左）、ベクトル図より作成したフジタモデル流線（右）

フジタモデルの風速場は図5に示すように半径方向に3つの領域（内部コア、外部コア及び最外領域）で構成され、鉛直方向は流入層と非流入層とで構成される。流入層では圧力勾配が遠心力よりも卓越するため、竜巻中心方向に向かう強い水平方向の流れ V_r があり、この空気の流れ込みが外部コア内での上昇流 V_z となる。また、接線風速や鉛直風速は高さ方向に変化し、特に、地表面付近では水平風速に境界層型の分布がある。また、流体の連続式（質量保存式）を満たす形で定式化されており、力学的に根拠のある風速場となっている。

フジタモデル DBT-77 における接線風速等の関係式については、Fujita Workbook⁽⁵⁾のChapter6に下記のとおり記載されている（Chapter6では、フジタモデル DBT-78は引用されていない）。

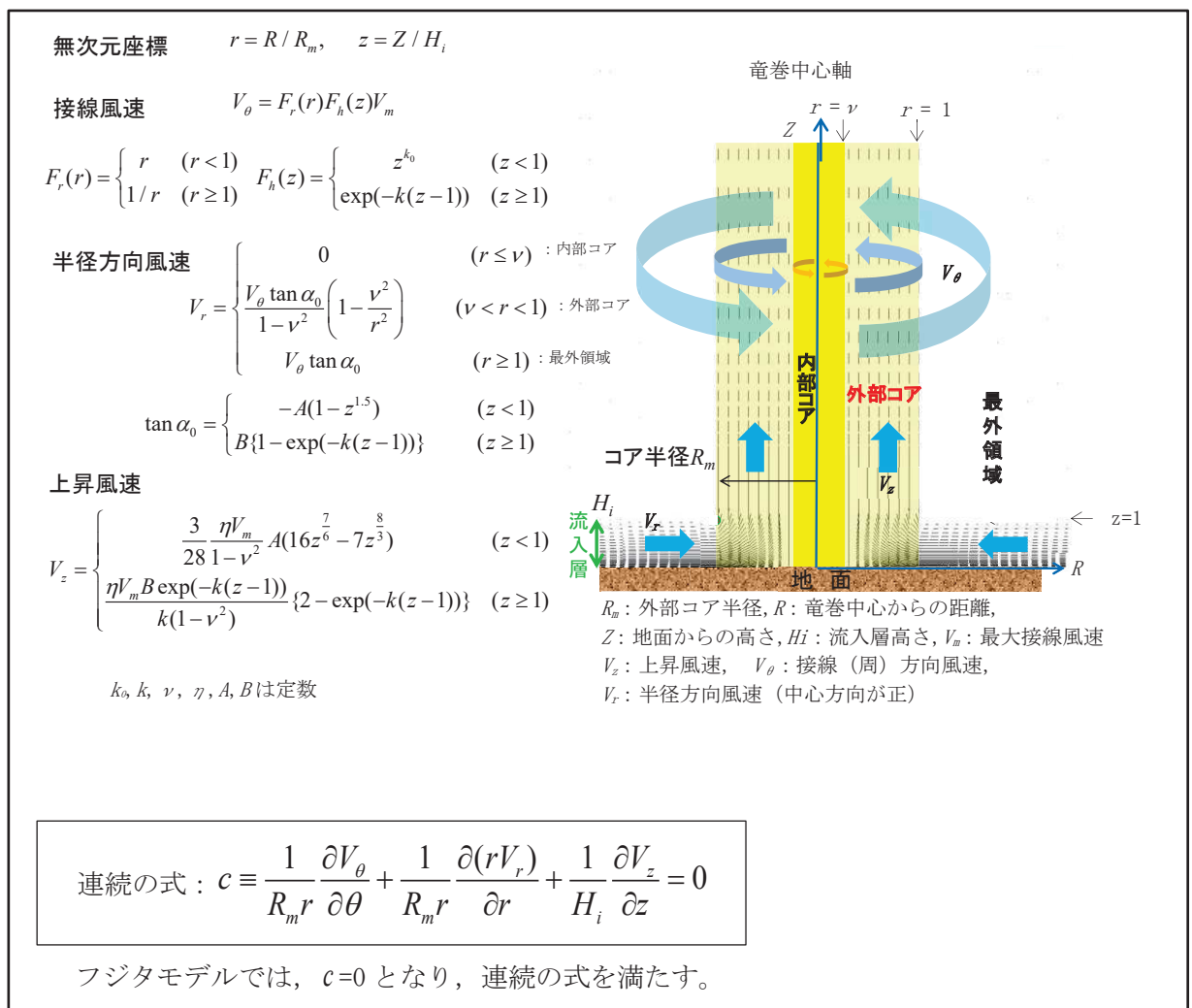


図5 フジタモデルの概要

内部コアの半径 R_ν と外部コアの半径 R_m の比 $\nu = R_\nu/R_m$ については、Fujita(5)が以下の経験式を提案しているので、これを用いた。

$$\nu = 0.9 - 0.7 \exp(-0.005 R_m) \tag{1}$$

また、流入層は、地面との摩擦により低下した遠心力と圧力分布のバランスが崩れ、流体が竜巻中心方向の低圧部に引き込まれることにより形成されることから、摩擦の影響がおよぶ範囲のみで形成される。Fujita(5)は流入層高さ H_i を竜巻中心の低圧部の大きさ(外部コア半径) R_m に比例するものとして、以下の経験式を提案しており、これを用いた。

$$H_i = \eta R_m \quad (2)$$

ここで、 η は1以下の正の値であり、Fujita Workbook(5)の(6.4)式より $\eta = 0.55(1 - \nu^2)$ で定義される。

上記式において、外部コア半径 $R_m = 30\text{m}$ の場合、 $\eta = 0.501$ ($H_i = 15\text{m}$) となり、原子力安全基盤機構の調査研究報告書⁽⁴⁾の第2.2.3.10図における流入層高さ(竜巻半径の比($\eta = 0.4$ 程度)や、Kosiba⁽¹⁴⁾により示されている流入層高さ($H_i = 10 \sim 14\text{m}$ 以下)とおおむね同じである。

また、Fujita Workbook⁽⁵⁾では竜巻事例を可視化して分析しており、外部コア半径(R_m)が約120mと大きな竜巻に対して、流入層高さ(H_i)は約70mと観測していることから、 η は約0.58($120/70 = 0.583$)と推測される。この場合、 R_m が30mの場合には H_i は17.5mと算定される。

なお、その他の定数についても、Fujita⁽⁵⁾の提案している値として、 $k_0 = 1/6$, $k = 0.03$, $A = 0.75$, $B = 0.217$ を用いた。

2.2 ランキン渦モデル

ランキン渦モデルは、米国 NRC ガイドでも採用されており、設計竜巻の特性値を設定する際に用いられている。しかし、米国で開発された飛来物速度評価用のランキン渦モデル⁽³⁾は、竜巻中心に向かう半径方向風速 V_r と上昇風速 V_z を特別に付加している(図6)。そのため、流れの連続の式(質量保存式)を満たしておらず、図7に示すように地面から吹き出しが生じるような流れとなっており、地上からの物体の浮上・飛散を現実的に模擬することができない。ランキン渦モデルを用いて飛散評価を行う場合、地上の物体であっても空中浮遊状態を仮定して評価することになる。

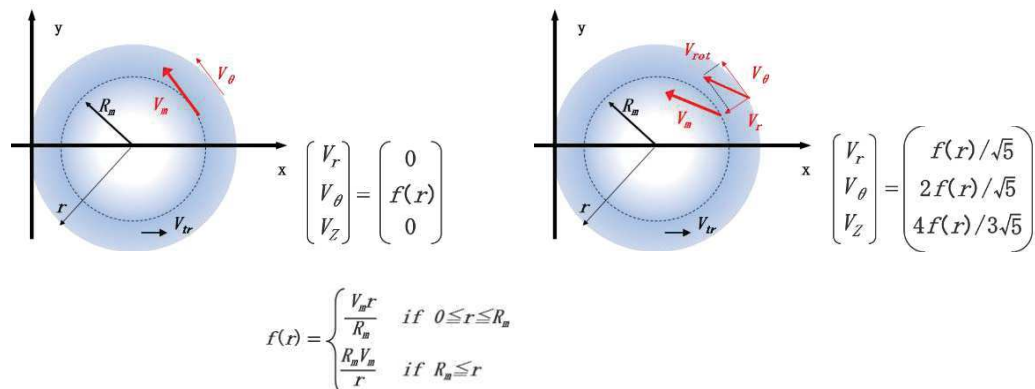


図6 設計竜巻圧力用のランキン渦モデル(左)と飛来物速度評価用のランキン渦モデル(右)

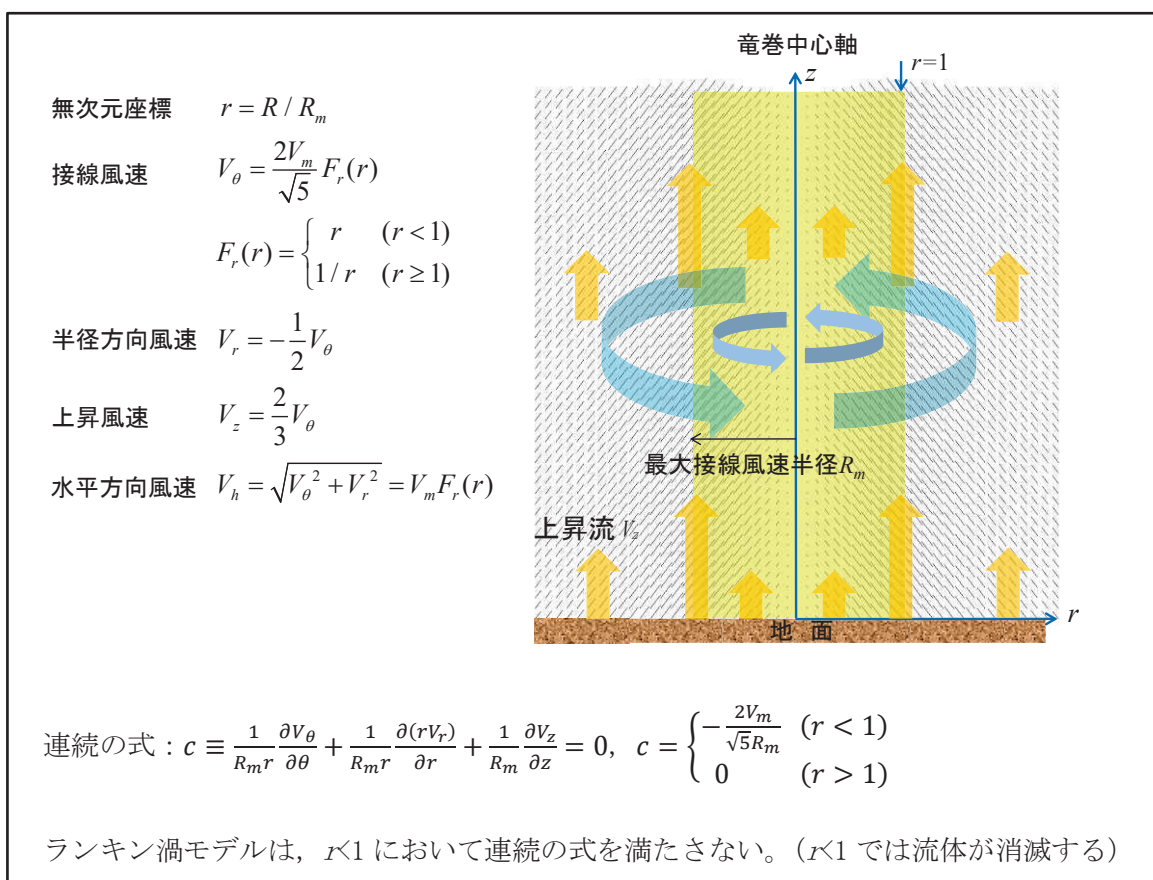


図7 飛来物速度評価用のランキン渦モデルの概要

2.3 非定常乱流渦モデル (LES による数値解析)

LES は、非定常な乱流場を数値的に計算する手法として、NRA ガイドにおける飛来物の最大速度の設定例にも活用されている。図 8 に LES による渦の発生状況を示す。

古典的な Smagorinsky モデルに基づく LES の基礎方程式 (運動量保存式及び質量保存式) は、流体が非圧縮性であると仮定する場合、以下のようになる。

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_1 \frac{\partial U_i}{\partial x_1} + U_2 \frac{\partial U_i}{\partial x_2} + U_3 \frac{\partial U_i}{\partial x_3} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + (\nu + \nu_s) \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_3^2} \right) - f_i \quad (i=1, 2, 3) \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial x_1} + \frac{\partial U_2}{\partial x_2} + \frac{\partial U_3}{\partial x_3} = 0 \quad (4)$$

ここで、 U_i 及び P は i 方向の流速ベクトル及び圧力を表し、 ν は動粘性係数を、 f_i は i 方向の外力加速度を表す。また x_i は i 方向の座標を表す。

一方、Smagorinsky モデルの渦粘性係数 ν_s は以下のように定義される。

$$\nu_s = (C_s h)^2 \sqrt{\sum_{i,j=1}^3 2S_{ij}^2} \quad (5)$$

ここで、 h は解像スケール (メッシュ幅相当)、 C_s は Smagorinsky 定数を表し、ひずみ速度テンソル S_{ij} は $S_{ij} = 0.5(\partial U_i / \partial x_j + \partial U_j / \partial x_i)$ で定義される。

以上のとおり、LES は風速の時間的な変動 (乱流) を考慮できる点が特長となっている。

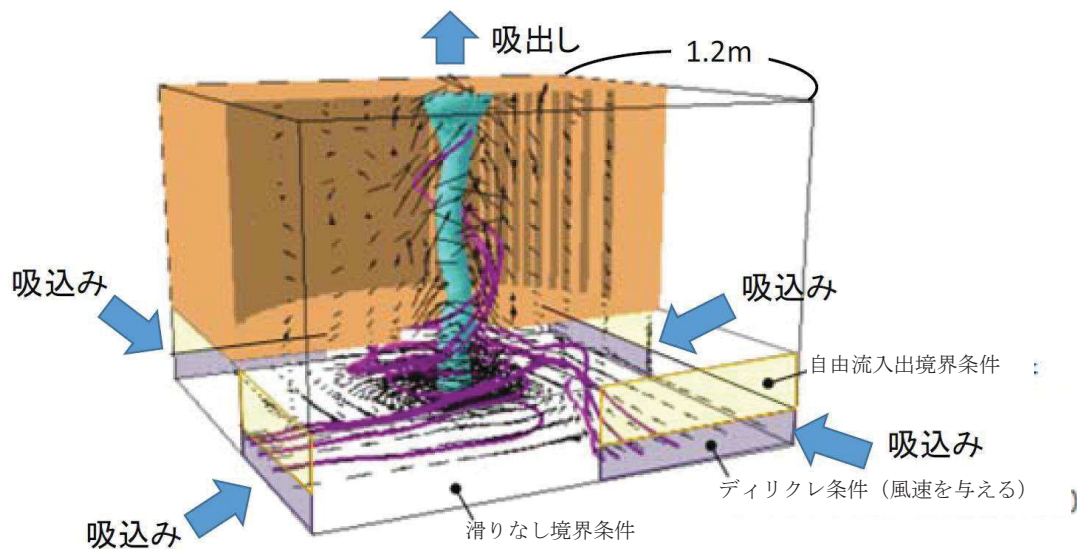


図 8 LES 計算領域内での竜巻状の渦の発生状況

以上が一般的な LES の説明となる。LES の手法自体は、広く活用されているものであるが、実スケールでの精緻な評価を行うためには、必要なメッシュ解像度の確保に膨大な計算機資源が必要となる。

また、NRA ガイドで例示されている LES による数値解析については、条件設定等に関して下記のような問題点がある。

NRA ガイドで例示されている LES による解析では、境界条件(側面からの流入風速の分布等)や解析領域の形状(流入箇所を局所的に配置等)を調整して人為的な乱れを与え、竜巻状の渦を生成している。渦の生成にあたって、以下のような条件を仮定していることから、実スケールでの評価を実施するには課題があるものと考えられる。

- ・人為的な流入境界条件(流入風速分布や流入箇所の局所的配置等)を設定していることから、流入境界条件の影響を受ける地表面付近の竜巻風速場の再現はできていないものと考えられる。
- ・小規模な計算領域によるシミュレーションであり、実スケールへの適用(飛来物評価)の際には単純に速度を規格化して飛来物評価に適用している。

⇒風速の規格化の際には、時間平均の最大風速を 100m/s (風速+移動速度)に設定している。Maruyama⁽⁷⁾によれば、瞬間的な周方向風速は 1.7 倍程度まで大きくなる場合があり、移動速度と合わせると最大 160 m/s 程度まで達するため、飛来物評価の際に非常に保守的な結果が算出されることが考えられる。

⇒流速が早い場合には粘性の影響は小さくなる傾向となるが、その影響については考慮していないことから、特に地表面付近については風速場の再現はできていないものと考えられる。

(参考：フジタモデルを適用した場合の飛来物の飛跡)

図 9 にフジタモデルを適用した場合におけるコンテナの飛散解析(長さ 6m×幅 2.4m×高さ 2.6m, 質量 2300kg, $C_D A/m=0.0105$, 最大風速 100m/s)における飛跡を示す。

また、フジタモデルの流入層高さ H_i は、外部コア半径 $R_m=30m$ の場合、 $H_i=15m$ であり、2.1 節に記載のとおり他の文献⁽⁴⁾⁽¹⁴⁾ともおおむね整合しているが、ここでは、その不確実性を考慮し、流入層高さ H_i を±10%変化させた場合の飛跡も示す。

$H_i=15m$ の際のコンテナの最大飛散距離 189.4m に対し、流入層高さ H_i を±10%変化させた場合の最大飛散距離は 183.4m(-3.2%), 194.7m(+2.8%)となる。

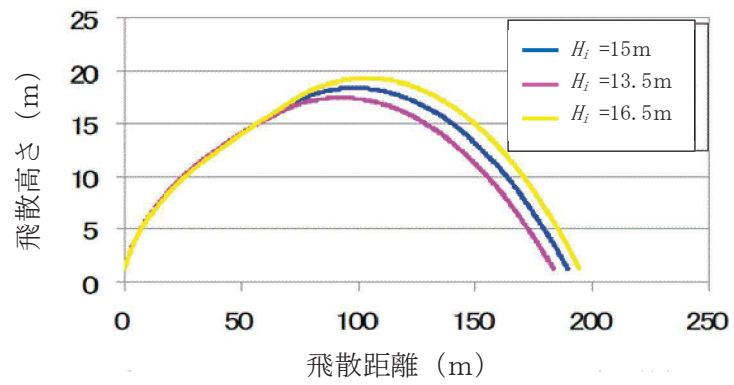


図9 流入層高さを変化させた場合のコンテナの飛跡（最大風速 100m/s）

3. 各風速場モデルの比較

各風速場モデルの特徴の比較を表1に示す。また、フジタモデルとランキン渦モデルの風速場構造の比較を図10に示す。フジタモデルの風速場構造の流線は、竜巻風速場に即した形で表現されており、地上からの物体の浮上・飛散解析が可能となっていることがフジタモデルの大きなメリットとなっている。それに対し、ランキン渦モデルは上空での水平方向風速の観点からは比較的良好に表現できると言えるものの、地上付近では実現象と乖離しており、地上からの飛散挙動は解析できない。LESも同様に地上付近での風速場が実現象と乖離しているため、地上からの飛散挙動を解析できない。よって、竜巻影響評価に用いる風速場モデルとしてフジタモデルを選定することは妥当であると考えられる。

表1 各風速場モデルの特徴の比較

風速場モデル	使用実績	特徴	問題点
フジタモデル	<ul style="list-style-type: none"> 竜巻飛来物設計速度、飛散高さに関する米国(DOE)重要施設の設計基準作成に利用されている 【対象施設の例】 Pantex Plant(テキサス州), Oak Ridge(X-10, K-25, Y-12)(テネシー州), Savannah River Site(サウスカロライナ州) 	<ul style="list-style-type: none"> 実観測に基づいて考案されたモデルであり、実際に近い風速場構造を表現している 比較的簡易な代数式により風速場を表現できる 流体の連続式を満たす定式化 <p>地上に設置した状態から飛来物の挙動を解析できる</p>	<ul style="list-style-type: none"> 実際の竜巻における地表面付近の状況をモデル化することは不確かさを含むため、フジタモデルを用いる評価を行う場合には、パラメータ設定時において不確かさの考慮が必要
ランキン渦モデル	<ul style="list-style-type: none"> 米国NRC Regulatory Guide 1.76で採用されている NRAガイド(設計竜巻の特性値の設定)で例示されている 	<ul style="list-style-type: none"> 簡易な式で上空での水平方向の風速場を表現できる 	<ul style="list-style-type: none"> 風速場に高度依存性がなく、上昇流が全領域に存在する(地面からも吹き出しがある)ため、実現象から乖離 流体の連続式を満たしていない <p>地上からの飛散挙動を解析できない</p>
非定常乱流渦モデル(LES)	<ul style="list-style-type: none"> NRAガイドにおいて、飛来物及び最大速度の設定例に使用されている 	<ul style="list-style-type: none"> 風速の時間的な変動、乱れをある程度模擬できる 	<ul style="list-style-type: none"> 小規模領域での計算結果を、実スケールサイズに規格化するため、粘性の影響が実現象と乖離(特に地表面付近) 人為的な境界条件を設定しており、地面や境界近傍で実現象と乖離 実スケールに規格化した場合の平均風速が100m/sとなるため、飛来物評価が非常に保守的な場合がある(瞬間的な最大値は160 m/s程度) <p>地上からの飛散挙動を解析できない</p> <ul style="list-style-type: none"> 実スケールでの解析は、膨大な計算機資源が必要になるため、現実的ではない

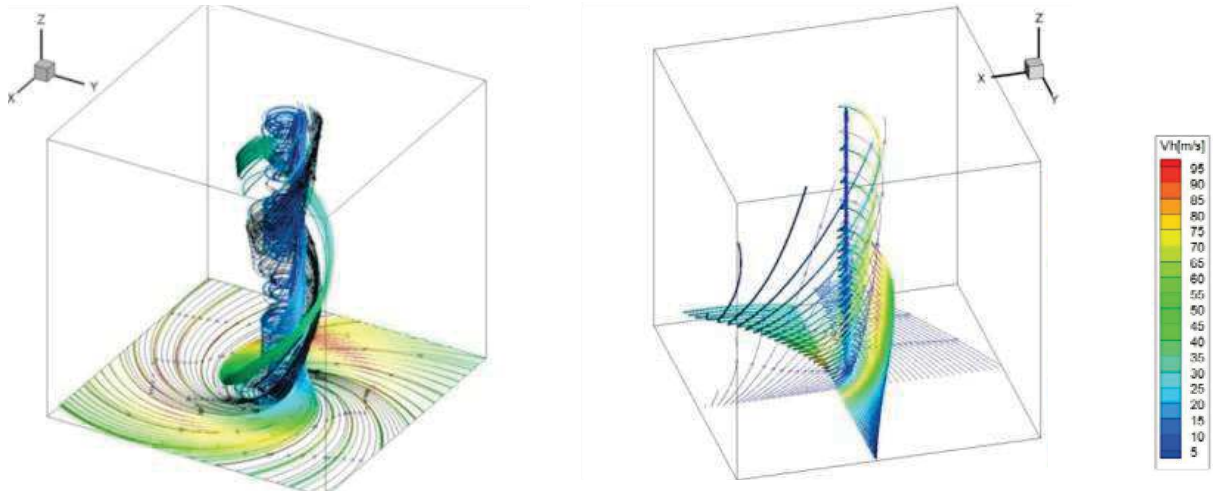


図10 フジタモデル（左）とランキン渦モデル（右）の風速場構造の比較

4. 米国におけるフジタモデルの取り扱い

4.1 フジタモデルの利用実績

米国エネルギー省 (DOE : Department of Energy) が管理するエネルギー関連施設等に適用する基準⁽⁸⁾において、竜巻飛来物速度、飛散高さの設定にフジタモデルを用いた計算結果が使用されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ (文献(8)のD.4節: Windborne missile criteria specified herein are based on windstorm damage documentation and computer simulation of missiles observed in the field. . . . Computer simulation of tornado missiles is accomplished using a methodology developed at Texas Tech University.). この基準では、施設に要求される性能ごとにカテゴリ 0 から 4 まで分類し、カテゴリ 0 から 2 は一般的な建築物、カテゴリ 3, 4 は核物質や危険物質を取り扱う施設に適用される。カテゴリ 3, 4 に該当する施設として、Pantex Plant, Oak Ridge (X-10, K-25, Y-12) 及び Savannah River Site が挙げられている。フジタモデルの技術的な妥当性の検証については、米国 DOE 管轄のローレンス・リバモア国立研究所報告書⁽¹¹⁾にてまとめられている。この報告書では、フジタモデル DBT-77 を他の風速場モデルと比較検討しており、「流体力学の連続の式を満足する (Fluidmechanics equations of continuity are satisfied)」こと、「モデル流況は、竜巻の映像分析で得られる流れの空間分布と整合する (Flow patterns are consistent with the spatial distribution of flow observed in photogrammetric analysis of tornado movies)」こと等を利点として挙げている。

また、実際の事例に対するフジタモデルの検証としては、1978年12月3日に米国ルイジアナ州 Bossier 市で発生した F4 竜巻による鋼製材の飛来について、フジタモデル DBT-77 で再現した事例⁽⁹⁾がローレンス・リバモア国立研究所報告書⁽¹¹⁾及び米国気象学会論文集⁽¹²⁾に掲載されている。

なお、米国 LES (Louisiana Energy Services) の濃縮施設 (NEF: National Enrichment Facility) では、上記の DOE 施設の基準に基づき竜巻飛来物 (鋼鉄パイプや木材の板等) を設定しており、米国 NRC は当該施設に対する安全評価報告書 (NUREG-1827)⁽¹³⁾の中で竜巻飛来物に対する LES の竜巻設計を是認している。 (“Based on the review of the information concerning tornados and tornado-generated missiles, NRC concludes: (i) the information is accurate and is from reliable sources; and (ii) the design bases tornado-generated missiles are acceptable because they were determined based on an appropriate DOE standard. The use of a DOE standard is an acceptable approach to NRC staff.”)

4.2 NRC ガイドでの取り扱い

2.1 節でも述べたとおり、フジタモデルは実際の竜巻風速場をモデル化したいという米国 NRC の要請を受けて考案されたものであるが、米国 NRC Regulatory Guide 1.76⁽²⁾では、フジタモデルについて “The NRC staff chose the Rankine combined vortex model for its simplicity, as compared to the model developed by T. Fujita (Ref. 7).” と述べられており、単に数式の簡易さを理由にランキン渦モデルが選定されている。また、NRC スタッフ自身で水平方向の飛来物速度 (Simiu らの運動方程式⁽³⁾) を計算するプログラムを開発している (“The NRC staff developed a computer program to calculate the maximum horizontal missile speeds by solving these equations.”) ことが明記されている。

したがって、米国 NRC ガイドでランキン渦モデルが採用されているのは、フジタモデルより簡易であるという理由が主であり、竜巻風速場としての優劣を指摘されたものではない。

(参考)：米国におけるランキン渦モデル以外の風速場モデルの利用実績

米国 NRC は、竜巻防護対策の追加を検討しているプラントに対し、確率論的竜巻飛来物評価手法 TORMIS の利用を承認している。

TORMIS は、米国の EPRI で開発され、原子力発電所の構造物・機器への竜巻飛来物の衝突・損傷確率を予測する計算コードであり、同コードでは、ランキン渦モデル以外の風速場モデル（統合風速場モデル）が利用されている（米国 NRC においても、ランキン渦モデル以外の風速場モデルが認められていないわけではない）。

5. 飛来物評価における不確定性の考慮

フジタモデルの風速場を適用することで、より現実的な竜巻影響評価を行うことが可能と考えられるが、モデルの特徴を踏まえた不確定性を考慮する必要がある。また、竜巻による物体の飛散挙動の不確定性についても考慮する必要がある。

本節では、フジタモデルの地表面付近の風速場に関する不確定性や、物体の浮上・飛来モデルにおける不確定性、竜巻が物体に与える速度に関する不確定性について、飛来物評価の中でどのように考慮しているかという点について説明する。

5.1 地表面付近の風速場に関する不確定性の考慮

フジタモデルの風速場を用いた飛散評価手法⁽⁶⁾は、地上付近の風速分布を考慮して実施していることから、物体の初期高さが評価結果に影響がある。このため、当社で実施するフジタモデルの風速場の適用に対して以下の検討を実施した。

(1) 流入層高さの感度解析

フジタモデルの特徴として流入層があるが、図11に示すとおり、モデル化においては地表面付近の領域に対し、必ずしも十分な分析がなされていない可能性がある（飛散評価においては地表面に近づくに従い風速が減少し地表面（高さ0m）では0m/sになるようモデル化されている）。

また、当社の飛散評価においては、流入層高さを17.5mと設定しており、この流入層高さの感度解析を行った結果、表2に示すとおり、流入層が低い場合に、僅かではあるが評価結果を厳しく与えることを確認した。

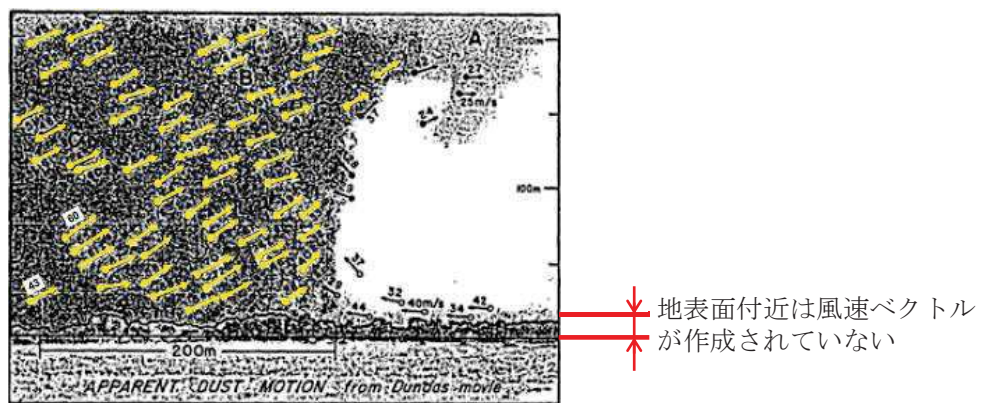


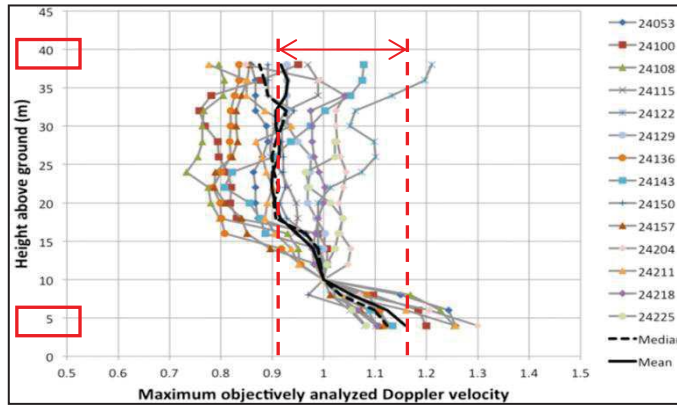
図11 写真図化分析で作成された風速ベクトル⁽⁵⁾

表2 流入層高さの感度解析結果（下線部：最大値）

【条件】 飛来物：鋼製材 風速：100m/s	流入層高さ				
	10m	12.5m	15m	17.5m	20m
最大飛散高さ[m]	<u>0.3</u>	0.2	0.2	0.2	0.2
最大飛散距離[m]	<u>8.7</u>	7.3	6.5	5.8	5.0
最大速度（水平）[m/s]	<u>14.0</u>	12.7	11.7	11.0	10.2
最大速度（鉛直）[m/s]	<u>1.1</u>	1.0	0.9	0.9	0.8

(2) 至近の研究報告

Kosiba and Wurman 2013⁽¹⁴⁾によると、図12に示すとおり地上高さ約5mにおける風速は地上高さ約40mに比べて約25%大きな値が観測されたことが報告されている。



- 14箇所の観測点における風速を観測した結果、強い風は地上5m付近で観測されており、地上10m付近では約15%減少し、地上10~40mでは約10%減少する
- 地上から3m程度は観測を行っていない
- 実線は平均値を表す

図12 地上高さと風速分布⁽¹⁴⁾

以上のことから、設備影響評価における、設計飛来物の条件としては、飛来物の速度の不確かさを考慮する必要があると判断し、当社が実施するフジタモデルの風速場を用いた飛散評価の条件（初期高さ）設定においては、飛散評価結果が厳しくなるように感度解析の結果を踏まえて、最大水平速度の算出条件を設定することで、地表面付近の風速場の不確かさを考慮した。また、女川原子力発電所の特徴である敷地の高さについても適切に考慮して飛散評価を行うこととする。

(参考) 初期高さと速度の関係（鋼製材の例）

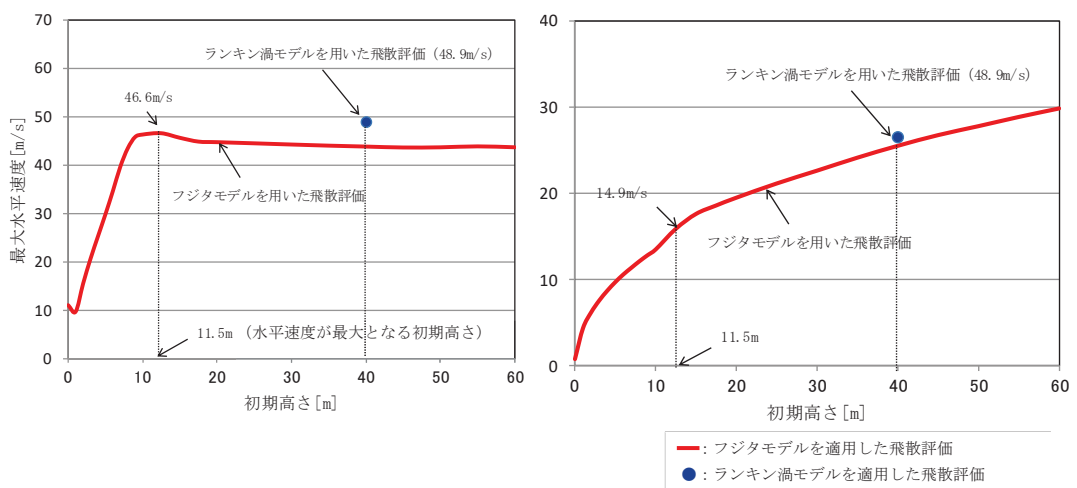


図13 設計飛来物（鋼製材）の初期高さと速度の関係

5.2 物体の浮上・飛来モデルにおける不確定性の考慮

本評価における物体の浮上・飛来モデルの考え方で、その中で保守性の観点から評価上考慮している点について説明する。

a. 物体の揚力の計算式

物体が空中にある場合、物体に作用する力は、NRA ガイドの飛来物運動モデル⁽³⁾⁽⁴⁾と同様に、飛来物は図 14 のようにランダムに回転しているものとし、平均的な抗力（流れの速度方向に平行な力） F_D と重力のみが作用する飛行モデルを採用している。

一方、物体が地面に置かれている場合や地面に近い場合は、地面効果による揚力（次頁参照）を考慮している⁽⁶⁾。具体的には、物体の形状が流れ方向の軸に関して対称であっても、図 15 に示すように地面の存在により流れが非対称になり、物体上部の圧力が低くなることで物体を浮上させる駆動力が生じることから、これを揚力 F_L として考慮する。

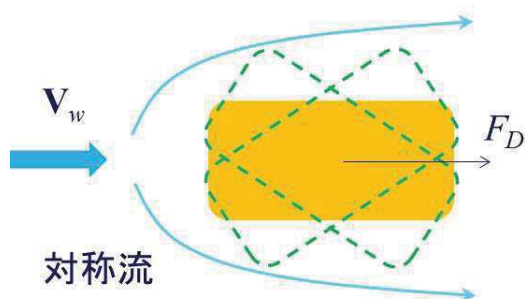


図 14 空中で飛来物へ作用する力

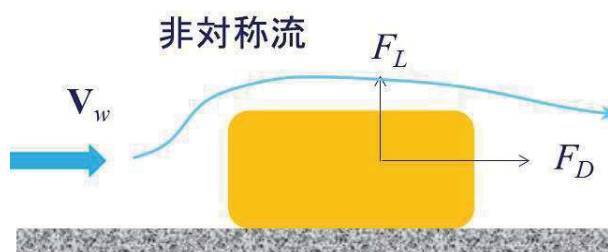


図 15 地面付近で飛来物へ作用する力

このような揚力 F_L は地面での揚力係数 C_L 、地上での物体の見附面積（風向方向から見た投影面積） a を用いて、以下のように表される⁽¹⁵⁾。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L a |V_w - V_M|_{x,y}^2 \quad (6)$$

ただし、 ρ は空気密度、 V_M は飛来物の速度ベクトル、 V_w は風速ベクトル、 $|*|_{x,y}$ は*の x, y 成分（水平成分）の大きさを表す。

(参考) 地上の物体における地面効果による揚力について

物体や地面は完全な滑面ではなく、凹凸を有しているため、完全接触と非接触の領域に区別される。物体の地面への投影面積を A とし、物体と地面の完全接触面積を s とした場合、無風時（図 16 左）は物体が流体に接する全表面で圧力は一定 (p_0) とみなせるため、鉛直方向(上向き)に作用する揚力 F_{L0} は、以下で与えられる。

$$F_{L0} = -p_0 A + p_0 (A - s) = -p_0 s \quad (7)$$

吸盤のように完全に地面に密着している場合は $s = A$ となるため、大気圧 p_0 に投影面積 A を乗じた力が下向きに作用し、物体と地面の間に僅かに空隙が生じる場合には、大気圧 p_0 に完全接触面積 s を乗じた力が下向きに作用することになるため、いずれの場合においても揚力は発生しないことが分かる。

一方、竜巻通過時（図 16 右）の物体に圧力差に伴う流体力が作用（簡単のため上面での圧力 p_1 、下面での圧力 p_2 と仮定）する場合、鉛直方向の流体力 F_L は、以下で与えられる（圧力分布がある任意形状の物体についても圧力の表面積分を用いれば同様に計算は可能）。

$$F_L = -p_1 A + p_2 (A - s) \quad (8)$$

吸盤のように完全に地面に密着している場合は $s = A$ となるため、上面の圧力 p_1 に投影面積 A を乗じた力が下向きに作用するが、物体と地面の間に僅かに空隙が生じる場合には、地面と物体の接触状態によっては上向きの力が発生することがある。実際には、地面と物体の接触状態を確認することは難しいことから、本評価においては、保守的に地上における物体に揚力が作用することとしている。

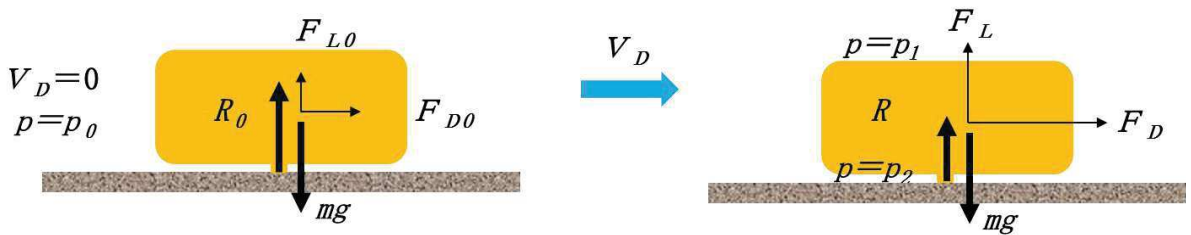


図 16 部分的に地面に接する物体に作用する力（左：無風時，右：強風時）

b. 揚力係数の設定

(6) 式の C_{La} は風洞実験から求められる値であるが、実験条件（風を受ける方向等）により様々な値を取り得るため、それを包含するような係数を設定することが望ましい。

本評価では、条件によらず保守性を確保できるよう、 C_{La} に代わり以下で定義される抗力係数と見附面積の積の平均値 $C_D A$ を用いることとする。

$$C_D A = \frac{1}{3}(C_{Dx} A_x + C_{Dy} A_y + C_{Dz} A_z) \quad (9)$$

ここで、 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、その他も同様である。

飛来物の運動モデルを図 17 に示す。上記 (9) 式の考え方は、図 17 に当てはめ整理すると以下のとおり。

- 物体がある程度浮き上がった後の状態（図 17 の B）であれば、物体はランダム回転し、物体各面に均等に風を受けるものと考えられること。
- 物体が地面におかれた状態（図 17 の A）から、実際に浮き上がる際には、物体の上面や下面での圧力が均一ではなく、傾きながら浮き上がるようなことも考えられるが、このような挙動を理論的に評価することは難しい。

そのため、これに準ずる方法として、評価に用いる係数は、地面から浮かせた状態で実測された C_{La} のうち、物体が地面に置かれた状態（図 17 の A）にできる限り近い場合の値よりも大きな係数を用いることで、保守性は確保できると考えられること。

- 物体が地面におかれた状態（図 17 の A）と物体がある程度浮き上がった状態（図 17 の B）での評価にて、共通の係数を用いることは、地上からの物体浮上・飛散評価における実用性の観点からも望ましいこと。

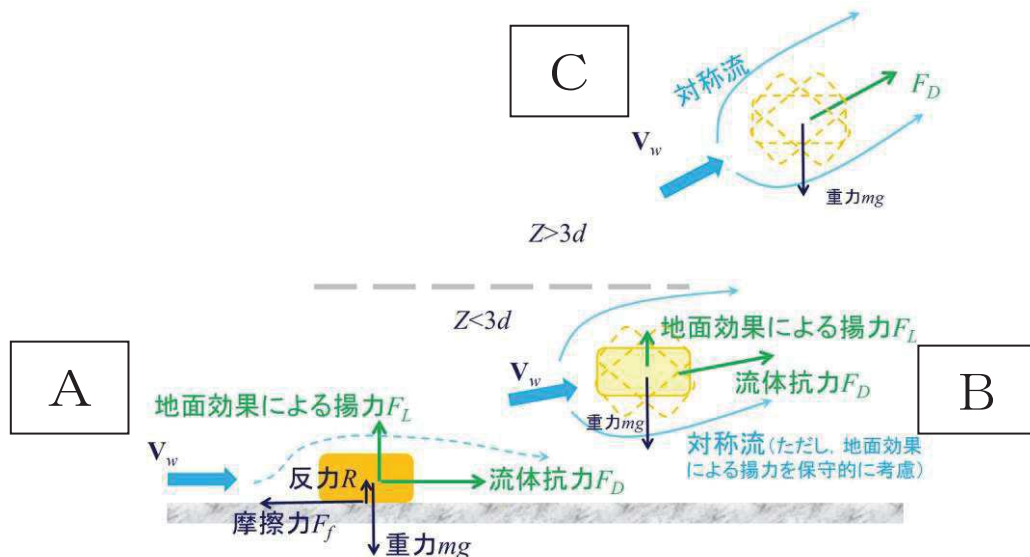


図 17 飛来物の運動モデルの模式図

(A : 地面上, B : $Z < 3d$ の高度範囲, C : $Z > 3d$ の高度範囲)

物体の飛散解析におけるモデル化の基本的な考え方は、地面における揚力係数 C_L と見附面積 a の積 $C_L a$ をより大きな値で置き換えて、浮上現象を保守的に評価できるようにすることであり、この保守的な代用値として飛行定数 $C_D A/m$ と同類の $C_D A$ の利用が適切であることを以下で説明する。

物体が風速 U を受ける場合の揚力係数 C_L は、一般にその定義により揚力 F_L と以下の関係にある。

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 C_L a \quad (10)$$

これを変形すると、 $C_L a = 2F_L / \rho U^2$ となり、風速、風向及び物体の向きが一定であれば、揚力 F_L 及び速度圧 $q = 1/2 \rho U^2$ は見附面積 a の取り方には無関係の物理量であるので、 $C_L a$ も見附面積 a の取り方（風向投影面積や揚力方向投影面積）に依存しないことが分かる。一方、同じ風速 U が同じ物体に作用する場合であっても、地面に置かれた物体の向きと風向の関係によって積 $C_L a$ は変化する（例えば、円柱の長手方向と風向が平行な場合の揚力は小さいが、直角の場合には最大となる）。

そこで、典型的な塊状物体・柱状物体・板状物体が地面に置かれた場合の $C_L a$ の最大値（又はそれに近い値）の実測結果と物体の幾何学形状のみで決定される $C_D A$ の値を比較した。（表 3）

表 3 より、 $C_D A > C_L a$ の関係が成立しており、 $C_L a$ の代用として $C_D A$ の利用が適切であることが確認できる。なお、 $C_D A$ は各方向の抗力係数と見附面積の積の平均値であり、例えば一辺 d の立方体では $C_D A = 2d^2$ 、一辺 d の平板では $C_D A = 0.66d^2$ となる。両者には約 3 倍の違いがあるが、いずれの場合も実際の $C_L a$ 値よりも大きな値であり、揚力の評価モデルとして $C_L a$ 値の代わりに $C_D A$ を用いることで保守性は確保できる。

また、以上の揚力のモデル化の説明は浮上時（図 17 の状態 A）に対するものであるが、この揚力が物体高さの 3 倍までの飛散高度の範囲で連続的に低減するように作用するようにモデル化しており、図 17 の状態 A, B, C の全領域で揚力の連続性が確保されている。

表3 主な物体の C_{DA} と地面に置かれた物体の C_{La} (実測値) の大小関係 (1/2)

形状	物体	仕様	C_{DA}^{*1}	C_{La} (実測値)	C_{La} (実測値) に係る試験条件等
塊状	自動車	実物の Dodge Dart (長さ 16.7ft., 幅. 8ft., 高さ 4.3ft.)	129ft. ²	48.7ft. ²	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁶⁾ (風速 22~31m/s, $Re=2.8 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6$) C_{La} が最大となる流入角での値を C_{La} (実測値) として記載
		1/6 縮尺模型 (セダン: 長さ 4.85m, 幅 1.79m, 高さ 1.69m, 質量 1633kg)	12.07 m ²	7.76 m ²	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽²²⁾ (風速 0~150m/s, $Re=0 \sim 3 \times 10^6$) 4 つのタイヤに作用する地面からの反力のうち, 少なくとも一つがゼロとなった時点の風速 U から C_{La} 値を計算 ($C_{La} = 2mg / \rho U^2$) C_{La} が最大となる流入角での値を C_{La}(実測値)として記載
		1/6 縮尺模型 (ミニバン: 長さ 5.12m, 幅 1.94m, 高さ 1.42m, 質量 2086kg)	14.58 m ²	7.89 m ²	
	立方体	一辺の長さ D	$2D^2$	0.2D ² 程度	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁷⁾ ($Re=8000 \sim 28000$) 流入方向と立方体面の一面が垂直になる配置における値を C_{La}(実測値)として記載
柱状	円柱	長さ λ , 直径 D	0.47D λ	0.2D λ	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁶⁾ ($Re=1.3 \times 10^6$) 流入方向と円柱の軸直角方向が垂直になる配置(円柱の軸方向は地面と平行)における値を C_{La}(実測値)として記載
				0.05D $\lambda \sim 0.23D \lambda$	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験 ($Re=3.5 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^5$) 流入方向と円柱の軸直角方向が垂直になる配置(円柱の軸方向は地面と平行)における値を C_{La}(実測値)として記載
	角柱	長さ λ , 断面が一辺 D の正方形	0.8D λ (1.3D λ) ^{*2}	0.5D $\lambda \sim 0.7D \lambda$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験⁽¹⁷⁾ ($Re=8000 \sim 28000$) 長方形断面(アスペクト比 4:3)の角柱は地面から 0.167D 以上離れると揚力は負となる(電中研風洞実験) 流入方向と角柱の軸方向が垂直になる配置(角柱の軸方向は地面と平行)における値を C_{La}(実測値)として記載
					長さ λ , 高さ D, 幅 B の長方形断面

注記*1: 柱状及び平板では微少項を無視して記載

*2: 塊状をみなせる場合

表3 主な物体の $C_D A$ と地面に置かれた物体の C_{La} (実測値) の大小関係 (2/2)

形状	物体	仕様	$C_D A^{*1}$	C_{La} (実測値)	C_{La} (実測値)に係る試験条件等
平板	薄い平板	長さ λ , 幅 B , 厚さ D ($B=200\text{mm}$, $D=5\text{mm}$, $\lambda=1000\text{mm}$ の場合)	0.66B λ	0に近い値 (地面から0.25B離 れた位置で $C_{La}=0.04B\lambda$)	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験⁽¹⁸⁾(幅 Bに基づく $Re=2\times 10^5$) 流入方向と平板の長さ方向が垂直になる配置(平板は地面と平行)における値を C_{La}(実測値)として記載
	薄い翼	長さ λ , 幅 B , 厚さ D ($B=100\text{mm}$, $D=15\text{mm}$, $\lambda=300\text{mm}$) (参考文献(20)では B の代 わりに c で表記)		0.2B λ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 風洞試験(21)(幅 B(参考文献(20)では c)に基づく $Re=2.2\times 10^5$) 流入方向と翼の長さ方向が垂直になる配置(翼面は地面と平行)
	平板状 ブロック	長さ λ , 幅 B , 厚さ D	0.66B λ 0.66(B λ +D (B+ λ))* ²	0.1B λ 程度	<ul style="list-style-type: none"> 水路試験(19)($Re=5\times 10^4$程度) 流入方向と平板状ブロックの長さ方向が垂直になる配置(平板状ブロックは地面と平行)における値を C_{La}(実測値)として記載

注記*1: 柱状及び平板では微少項を無視して記載

*2: 塊状をみなせる場合

c. 設定した揚力係数の適用性の確認

地面における揚力係数 C_L と見附面積 a の積 $C_L a$ が、飛行定数 C_{DA}/m と同類の C_{DA} で代用できることについて、表 3 における $C_L a$ (実測値) が竜巻における飛来物の飛散解析に適用可能であることについて、レイノルズ数の観点から確認を行った。

表 3 の各文献中の実験でのレイノルズ数 Re は同表の備考欄に示すとおり、 10^4 から 10^6 の範囲にある。

ここで、実物の自動車 (Dodge Dart : 長さ 16.7ft., 幅 5.8ft., 高さ 4.3ft.) では風速を 30mph (13m/s) から 120mph (54m/s) まで変化させてレイノルズ数の影響を調べた結果、風速は各空力係数に対して顕著な影響がないことが確認されている⁽¹⁶⁾。

これは、剥離点が物体角部等に固定されてレイノルズ数にほとんど依存しないためであり、このような特性を有する立方体等についてもレイノルズ数依存性はないものと考えられる。

一方、円柱周りの流れのように剥離点が曲面上にある場合については、図 18 に示すようにレイノルズ数 Re が変化すると、剥離点が移動し、抗力係数等が変化することが知られている。表 3 の EPRI の円柱の風洞試験結果⁽¹⁶⁾は $Re=1.3 \times 10^6$ の高レイノルズ数条件で得られたものであり、竜巻中の円柱状の飛来物のレイノルズ数範囲に入るものと考えられる (例えば、相対風速 92 m/s の直径 0.1m のパイプのレイノルズ数は $Re=6 \times 10^5$ 程度)。また、電力中央研究所我孫子地区内の吹出式開放型風洞 (吹出口寸法 : 高さ 2.5m × 幅 1.6m, 風速 : 3.0~16.5m/s) においても、壁 (地面) 近くに設置した円柱 (直径 100mm × 模型長 1000mm) を対象として、 $Re=3 \times 10^4$ から 1×10^5 程度までの揚力係数の測定試験が行われている。

EPRI の風洞試験と電力中央研究所の風洞試験には、レイノルズ数条件に大きな違いがあるが、図 19 に示すとおり風洞試験で得られた円柱揚力係数に顕著な相違は認められない。

以上より、地面における各物体の揚力係数 C_L と見附面積 a の積 $C_L a$ はレイノルズ数にほとんど依存せず、表 3 に示す風洞試験結果に基づくモデル化は妥当であると考えられる。

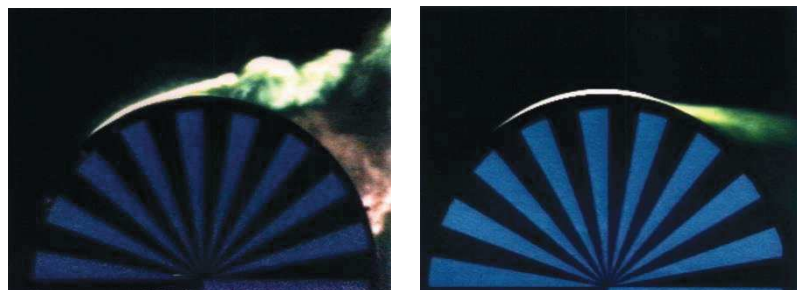


図 18 可視化した円柱周りの流れ⁽²⁰⁾ (左 : $Re \approx 4 \times 10^4$, 右 : $Re \approx 2 \times 10^5$)

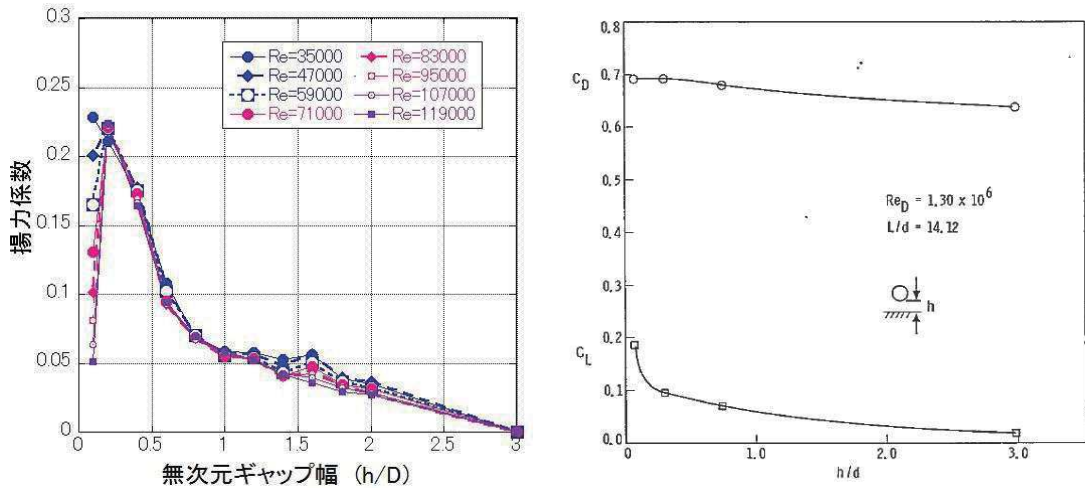


図 19 電力中央研究所の風洞試験 (Re=3×10⁴~1×10⁵) (左) と EPRI の風洞試験⁽¹⁶⁾ (Re =1.3×10⁶) で得られた円柱揚力係数 (右)

d. 揚力の高さ依存性

この地面効果による揚力は高さとともに減衰するので、既往の風洞実験の結果⁽¹⁶⁾⁽²³⁾を考慮して、物体高さ d の物体にかかる揚力は、物体底面が地面から $3d$ の高度であるとき消滅すると仮定した。

具体的には、地面から z の距離 (高度) にある物体に作用する揚力加速度 L を以下の関数形でモデル化した。(Z: 物体底面の高度)

$$L = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} |V_w - V_M|_{x,y}^2 f(Z/d) \quad (11)$$

ただし、 $f(Z/d)$ は、EPRI の風洞実験結果⁽¹⁶⁾を参考に、以下の反比例式とした。

$$f(Z/d) = \begin{cases} \{1 - (Z/3d)\} / \{1 + (Z/d)\}, & Z = z - d/2 \quad (Z \leq 3d) \\ Z = 0 & (Z > 3d) \end{cases} \quad (12)$$

また、以下において、塊状物体 (自動車)、柱状物体 (角柱、円柱) 及び板状物体 (平板) の風洞試験結果を踏まえ、物体高さ d の物体にかかる揚力は、物体底面が地面から $3d$ の高度で消滅するとした仮定が適切であることを確認する。

(a) 塊状物体 (自動車) の揚力の高さ依存性

自動車の揚力係数は、EPRI の風洞試験⁽¹⁶⁾にて、地面及び風洞中央 ($h/d \doteq 3.5$) に設置した場合にて計測されており、図 20(a) に示すように流入角 (0° は正面、 90° は側面に風を受ける角度) に依存した揚力係数が得られている。

また、図 20(b)にて、EPRI の風洞試験によって得られた揚力係数と本モデルにて代用した揚力係数の関係を示す。EPRI の風洞試験では空中での自動車の姿勢は地面設置と同じ姿勢に保たれているため、空中においても揚力係数がゼロとはならないが、実際に飛来する自動車の姿勢はランダムに変化することから、平均的な揚力係数は本モデルでの代用揚力係数に近い物と考えられる。

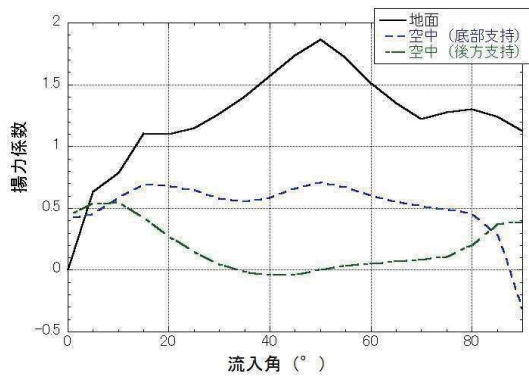


図 20(a) 地面及び風洞中央に設置した自動車の揚力係数の流入角依存性

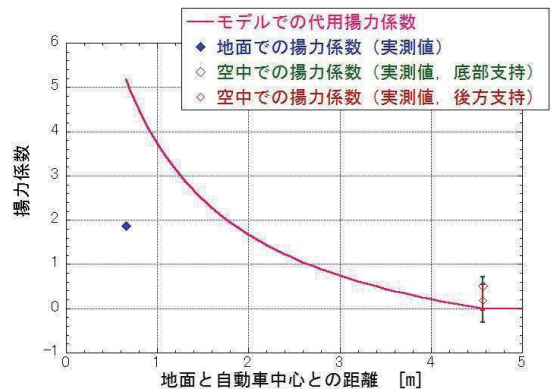


図 20(b) 自動車の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

(b) 柱状物体（角柱・円柱）の揚力の高さ依存性

角柱の揚力係数は、電力中央研究所我孫子地区内の吹出式開放型風洞（吹出口寸法：高さ 2.5m×幅 1.6 m，風速：3.0～16.5m/s）にて測定しており、図 21 にその結果を示す。角柱の場合、地面から 0.167D 以上離れると揚力は負となるので、正の揚力を与える本モデルの代用揚力式（図 21 の赤線）は保守的な結果となっていることが分かる。

円柱の揚力係数は、EPRI の風洞試験⁽¹⁶⁾にて測定しており、図 22 に示すように本モデルの代用揚力係数（図 22 の赤線）は実際の円柱に働く揚力の最大揚力係数よりも大きな値となっているため、保守的な結果となっていることが分かる。

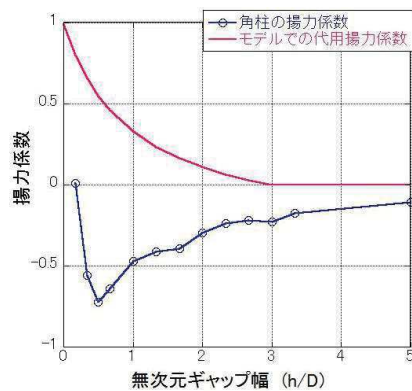
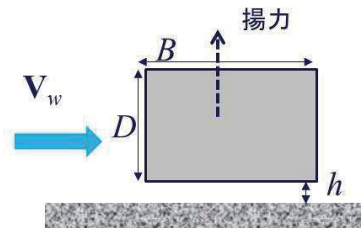


図 21 角柱の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係
(幅 B=80mm×高さ D=60mm×模型長 1000mm)



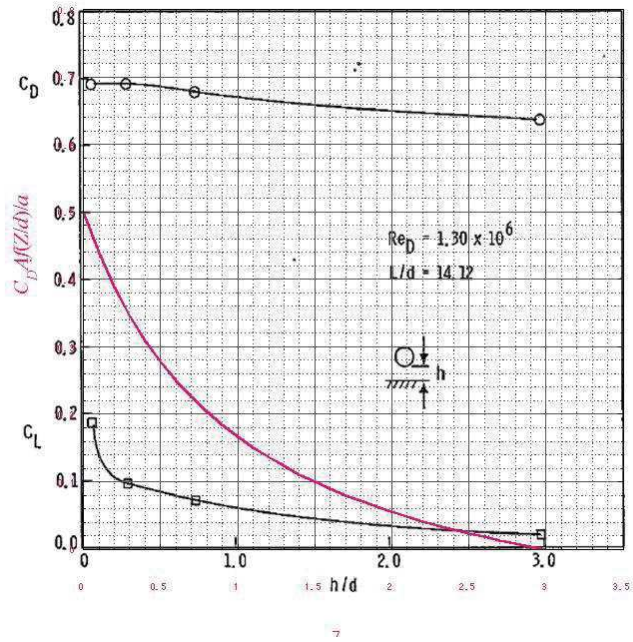


図 22 円柱の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

(c) 板状物体（平板）の揚力の高さ依存性

平板の揚力係数は、平面的な形状を有する翼（迎角 0° ）の試験結果⁽²¹⁾に基づき考察すると、本モデルで代用した揚力係数（図 23 の赤線）は実際の翼に働く地面効果による揚力係数よりもおおむね大きな値となっている。また、この翼は奥行方向が長い形状で流れに直交するような配置となっており、実際の平板に比べて揚力が作用しやすいことを考慮すると、実際の平板の揚力係数はさらに小さいものと考えられる。

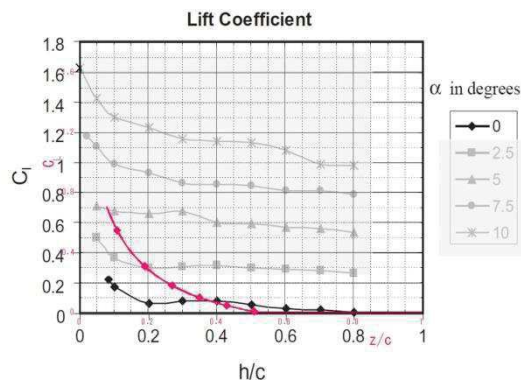


Fig. 8. Coefficient of lift at varying ground clearances for different angles of attack.

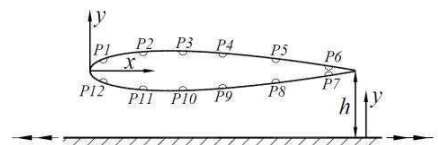


Fig. 2. Locations of pressure tappings.

図 23 翼の風洞試験による揚力係数と本モデルで代用した揚力係数の関係

e. 飛来物の運動方程式

上記 a. から d. 項を踏まえ、重力加速度 g 、上向きの単位ベクトル \mathbf{k} を用いて、飛行物体の運動方程式は以下のように記述される。

$$\frac{d\mathbf{V}_M}{dt} = \frac{1}{2}\rho \frac{C_D A}{m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) - (g - L)\mathbf{k} \quad (13)$$

飛来物の位置 $\mathbf{X}_M(t)$ と速度 $\mathbf{V}_M(t)$ の時刻歴の計算には陽解法（一定加速度法）を用いた。

具体的には、時刻 $t = \tau$ における飛来物の位置 $\mathbf{X}_M(\tau)$ と速度 $\mathbf{V}_M(\tau)$ を既知として、時刻 $t = \tau + \Delta\tau$ における飛来物の速度と位置を以下の式で求めた。ただし、 $\mathbf{A}(\tau)$ は上記運動方程式の右辺に対応する時刻 $t = \tau$ における加速度ベクトルである。

$$\mathbf{V}_M(\tau + \Delta\tau) = \mathbf{V}_M(\tau) + \mathbf{A}(\tau)\Delta\tau \quad (14)$$

$$\mathbf{X}_M(\tau + \Delta\tau) = \mathbf{X}_M(\tau) + \mathbf{V}_M(\tau)\Delta\tau + \frac{\mathbf{A}(\tau)\Delta\tau^2}{2} \quad (15)$$

$\mathbf{A}(\tau)$ の計算には、時刻 $t = \tau$ における風速場も必要であるが、初期に原点に位置する竜巻の中心が x 軸上を移動速度 V_w で移動することを仮定しており、任意の時刻での風速場を陽的に求められるため、飛来物速度・位置を算出することができる。

f. 飛来物の運動方程式（(13)式）に関する考察

地上面の物体（図 17 の状態 A）が浮上するには、地面からの反力が消滅（ $R < 0$ 、つまり $mg < F_L$ ）する条件で浮上し、浮上後は、(13) 式を成分表示した以下の飛来物の運動方程式に従って飛散する。

$$\frac{dV_{M,x}}{dt} = \frac{1}{2}\rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} (V_{w,x} - V_{M,x}) \quad (16)$$

$$\frac{dV_{M,y}}{dt} = \frac{1}{2}\rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} (V_{w,y} - V_{M,y}) \quad (17)$$

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} = \frac{1}{2}\rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{(V_{w,x} - V_{M,x})^2 + (V_{w,y} - V_{M,y})^2 + (V_{w,z} - V_{M,z})^2} (V_{w,z} - V_{M,z}) - g + L \quad (18)$$

ここで、飛来物速度 $\mathbf{V}_M = (V_{M,x}, V_{M,y}, V_{M,z})$ 、竜巻風速 $\mathbf{V}_w = (V_{w,x}, V_{w,y}, V_{w,z})$ であり、右辺第 1 項が流体抗力 F_D の加速度を表しており、(18) 式の右辺第 3 項が地面効果による揚力 F_L の加速度を表している。上記の式で、物体が静止している状態（上記の式(16)～(18)で飛来物速度 \mathbf{V}_M を 0) を仮定すると、以下の式となる。

$$\frac{dV_{M,x}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,x} \quad (16')$$

$$\frac{dV_{M,y}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,y} \quad (17')$$

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} \sqrt{V_{w,x}^2 + V_{w,y}^2 + V_{w,z}^2} \times V_{w,z} - g + L \quad (18')$$

フジタモデルでは、物体が地面上にある場合（図 17 の状態 A）では上昇速度はゼロに近く、地面で静止している飛来物が受ける上昇速度はほぼゼロであるため、式（18'）の右辺第 1 項は右辺第 2、第 3 項に比べてはるかに小さな量となり、以下のとおり物理的に合理的な関係式が成立する。

$$\frac{dV_{M,z}}{dt} \approx -g + L \quad (19)$$

例として、竜巻コア半径 30m、最大風速 92m/s の竜巻が原点に位置し x 方向に 14m/s で移動する場合、点 (0, -30m) における式（18'）の右辺第 1 項の値（z 方向抗力（流体抗力）による加速度）と第 3 項の値（地面効果による揚力加速度）を図 24 に示す。

図 24 より、地面上（z=0）においては、z 方向抗力による加速度は十分小さく、地面効果による揚力加速度の影響が大きいことが分かる。

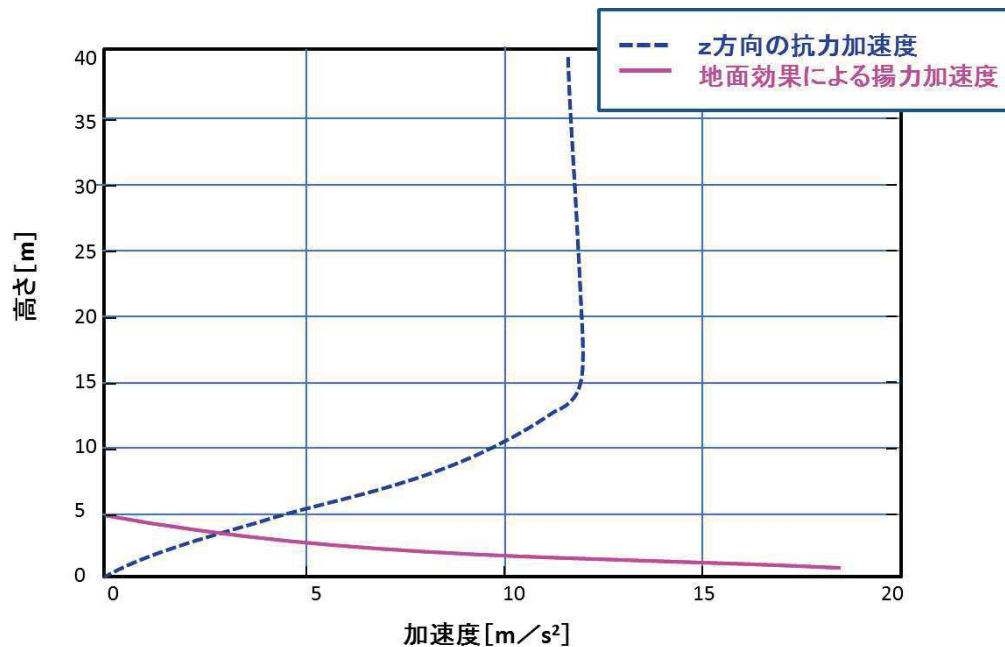


図 24 地面近傍の飛来物に作用する z 方向の加速度
 (飛来物の特性： $0.5 \rho C_D A / m = 0.004 [\text{m}^{-1}]$, $d = 1.31 [\text{m}]$)

なお、高さ方向の依存性が考慮されていないランキン渦の場合は、上昇風速が水平風速の約 60%にも達するため、地面から非現実的な風の噴出が発生する。地面効果は地面の存在によって水平な風が物体付近で湾曲・剥離することによって生じるものであるが、ランキン渦の風速場では地面の有無によって物体周りの流況が大きく変化せず、地面効果は物理的に発現しにくいいため、ランキン渦モデルを用いた解析においては鉛直方向による揚力 L を付加していない（図 25）。

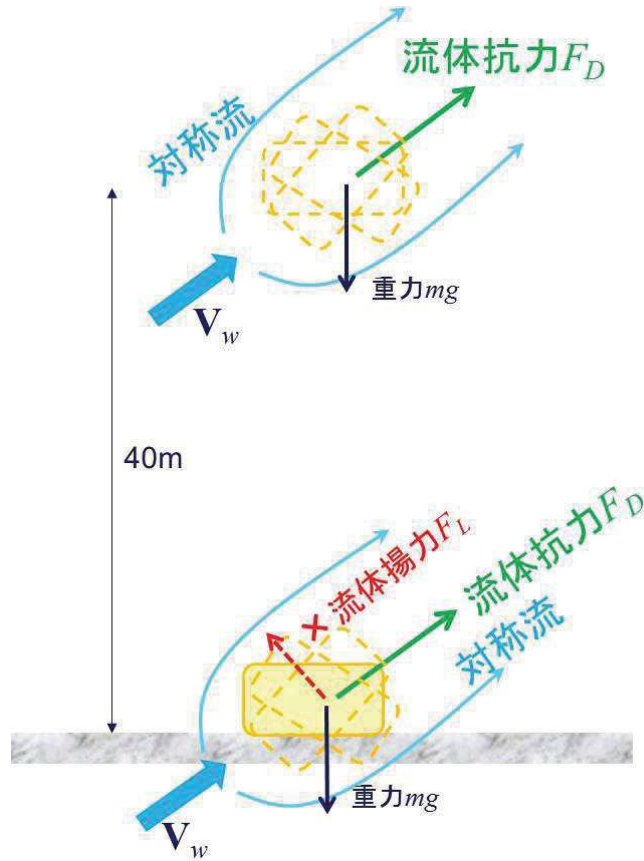


図 25 ランキン渦の場合の飛来物の運動モデルの模式図

5.3 竜巻が物体に与える速度に関する不確定性の考慮

竜巻によって飛散する物体の飛来速度や飛散距離は、同じ竜巻内であっても物体の受ける風速（物体がある位置の竜巻風速）によって大きく変動する。その影響度合いを確認するため、米国 NRC ガイド⁽²⁾に記載されている方法（物体の 1 点配置）と、物体を多点多配置した場合の飛来速度の違いを比較した。配置の違いについて、図 26 に示す。

1 点配置の場合は、特定位置（竜巻進行方向の竜巻半径の位置 $(x, y) = (R_m, 0)$ ）に物体 1 個を設置する。また多点多配置の場合は、竜巻半径の 4 倍の正方形の領域に 51×51 個の物体を配置する。その上で飛散させた物体のうち、最も速度が大きくなったものをその物体の飛来速度とする。

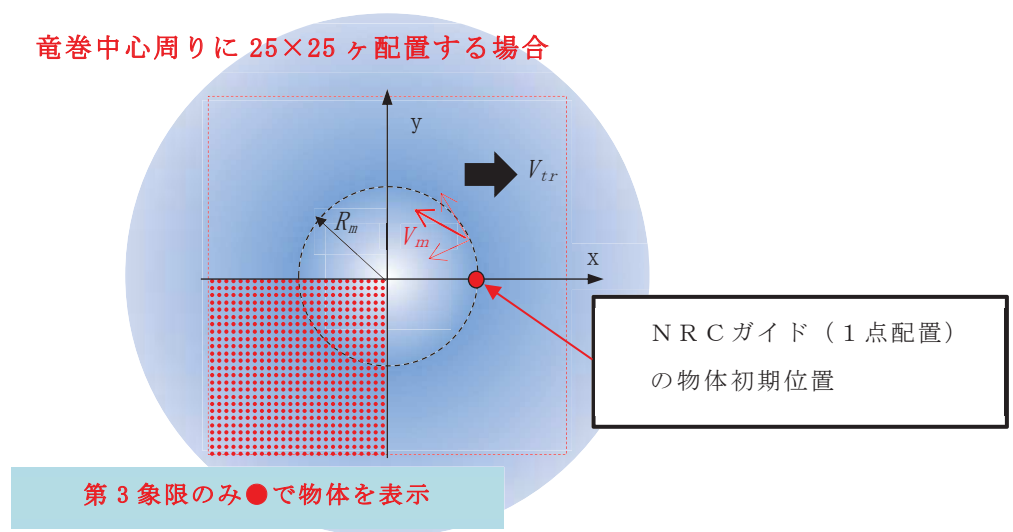
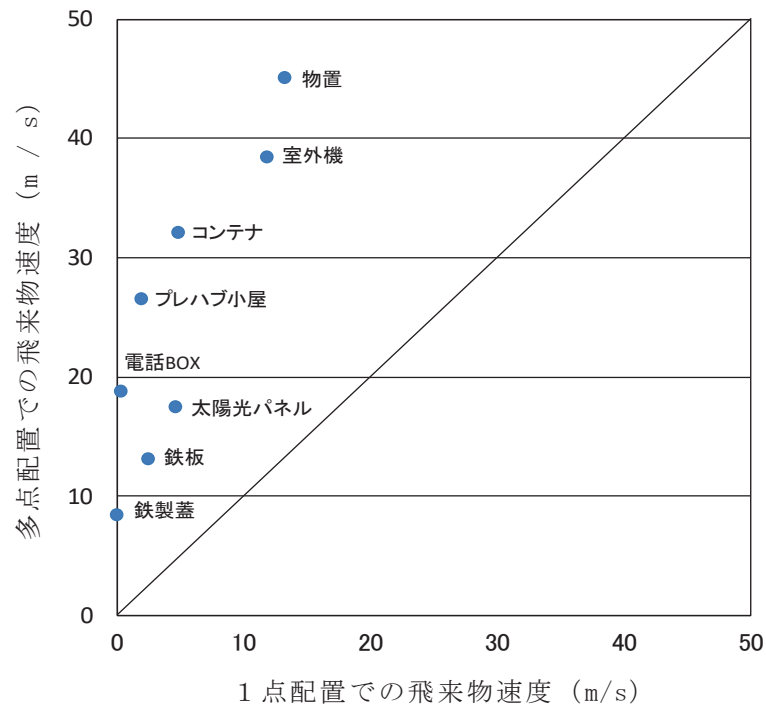


図 26 飛来物評価における竜巻と物体の位置関係

評価条件は、一例として竜巻の最大風速を 69m/s に設定し、フジタモデルの風速場を用いて地上から飛散させるものとする。また、NRA ガイドの記載より竜巻の移動速度 V_{tr} を 10m/s、竜巻コア半径 R_m を 30m とする。飛散させる物体のパラメータとして、原子力安全基盤機構の調査研究報告書⁽⁴⁾に掲載されている物体の飛行定数（5.2 節の $C_D A$ を質量で割った値 $C_D A / m (\text{m}^2/\text{kg})$ ）を用いた。図 27 に比較結果を示す。

米国 NRC ガイド⁽²⁾で用いられている 1 点配置の手法と比較し、多点多配置の手法では、飛行定数の大きい物体の多くが 1 点配置に比べて大きな飛来速度となった。多点多配置することで、その竜巻風速場における最大風速（最大接線風速と半径方向風速のベクトル和が竜巻移動方向と重なる点）を受ける物体が出てくるため、このような結果となったと考えられる。

したがって、物体を多点多配置することは、竜巻から受ける風速に関する不確定性を考慮できるものと考えられるため、本検討における方法として適用することとする。



物体名称	長さ	幅	高さ	質量	$C_D A/m$
	(m)	(m)	(m)	(kg)	(m^2/kg)
物置	1.80	0.90	1.50	120	0.0315
室外機	0.80	0.25	0.30	10	0.0343
コンテナ	2.40	2.60	6.00	2300	0.0105
プレハブ小屋	5.00	5.00	3.00	4400	0.0083
電話BOX	0.30	0.30	0.40	13	0.0169
太陽光パネル	1.20	1.00	0.05	14.5	0.0582
鉄板	2.00	0.25	0.04	7.6	0.0486
鉄製蓋	0.70	0.50	0.03	6.8	0.0364

図 27 1点配置時と多点配置時の最大飛来物速度の比較（上）と物体のパラメータ（下）

図 26 に示す物体の多点配置（竜巻半径の 4 倍の正方形の領域に 51×51 個の物体を配置）を初期状態として適用したが、この手法は、物体の直上に竜巻を発生させており、竜巻発生地点の不確定についても考慮した設定となる。

図 28 に遠方から物体に接近する竜巻と、物体直上に発生する竜巻による飛散の比較イメージ図を示す。竜巻に遭遇する状況（海上で竜巻が発生して上陸する場合など）を考慮すると、竜巻は遠方から物体に近づくため、最大風速より低い風速に曝され、飛散することになる。しかし、物体の直上に竜巻を発生させる設定とすることで、実際の竜巻による飛散と比較して、より厳しい結果を与えることになる。

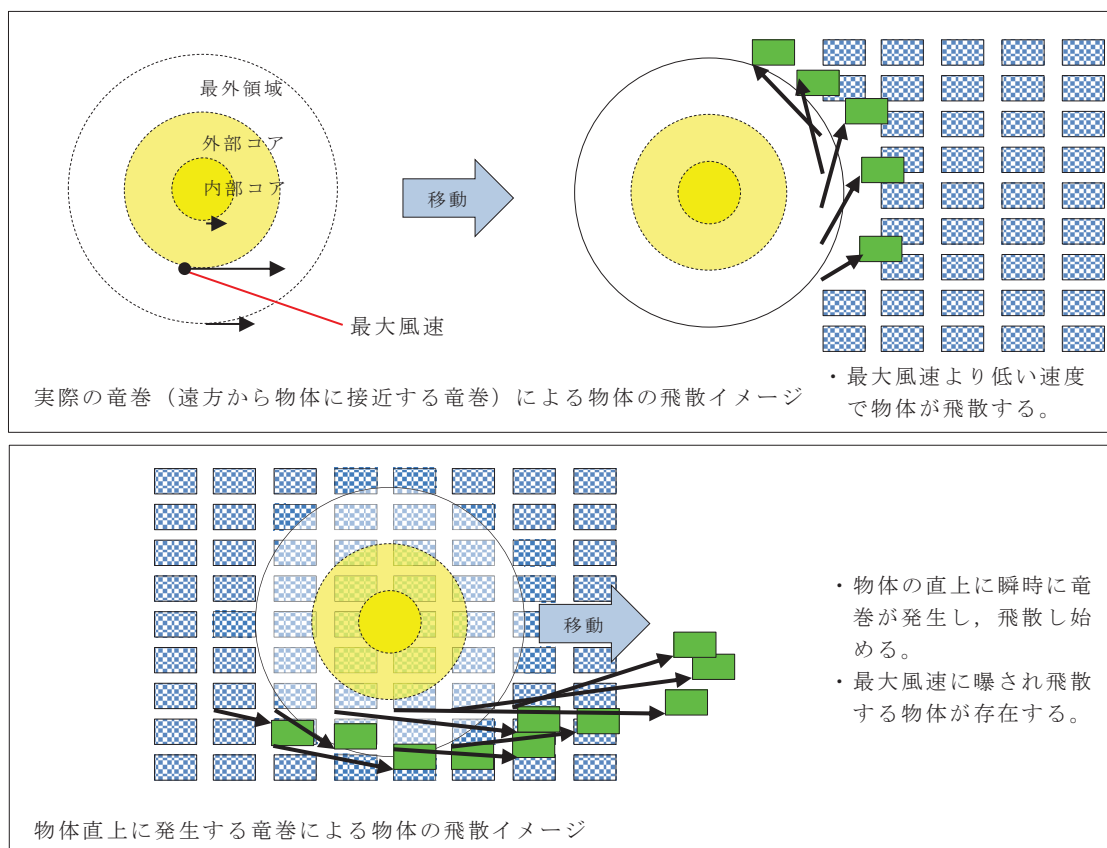


図 28 物体に接近する竜巻と物体直上に発生する竜巻の比較イメージ図

この物体を多点配置する方法と、竜巻を直上に発生させる方法を組み合わせることにより、必ずその竜巻による最大風速に曝される物体が発生するため、竜巻が物体に与える速度の不確定性を考慮することができると思う。

5.4 飛来物評価法のまとめ

当社が実施するフジタモデルの風速場を用いた飛散評価手法では、物体の初期高さを保守的に最大水平速度の算出条件で設定することで、地上付近の風速場の不確かさを考慮した。

飛来物の浮上・飛散モデルにおいて、実際の実験結果よりも浮上しやすい係数を設定することで、浮上に関する不確定性を考慮できるような設定とした。

また、物体を多点配置し、その物体直上での竜巻が発生するという設定を組み合わせることにより、竜巻風速場内の物体が受ける風速の不確定性を考慮し、その竜巻において最大となる飛来速度が評価できるような設定とした。

以上により、フジタモデルを用いて飛来物の飛散速度評価を行う場合でも、竜巻による物体飛散の不確定性を考慮した評価結果が得られるものと考えられる。

6. 実際の飛散状況に対する検証

前節までで、フジタモデルの風速場を用いる優位性や、飛来物評価を行う上で考慮している事項等について説明した。

本節では、フジタモデルの風速場や、前節の飛来物評価法を適用した場合、実際の事例等に比べて妥当な結果となるかどうかの検証を行った。

6.1 フジタモデルを用いた飛散解析結果とフジタスケールとの比較

フジタスケールは、竜巻等の突風により発生した建築物や車両等の被害状況から、当時の竜巻風速を推定するために考案された指標である。このフジタスケールで示されている自動車の被災状況を表4に示す。

ここで、各スケールに対応する最大風速（69m/s, 92m/s, 116m/s）を用いて、フジタモデルによる自動車飛散解析を行った。その結果を表5に示す。

フジタモデルによる自動車飛散解析の結果は、各スケールに対応する自動車の被災状況とおおむね合致していると考えられる。なお、ランキン渦モデルを用いた場合は、F2相当の風速（69m/s）で評価しても大きく飛散することになり、フジタスケールの定義の観点からは過度に保守的な結果となる。

表4 フジタスケールで示されている自動車の被災状況⁽²⁸⁾

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

表5 フジタモデルによる自動車の飛散解析結果

フジタスケールとの対応	最大水平風速 [m/s]	竜巻接線速度 [m/s]	竜巻飛散速度 [m/s]	計算結果		
				速度 [m/s]	距離 [m]	高さ [m]
F2	69	59	10	1	1.4	0
F3	92	79	13	23	34	1.1
F4	116	99	17	42	59	3.1

6.2 米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例

1978年4月17日に米国のミシシッピ州にて建設中の Grand Gulf 原子力発電所に F3 の竜巻が来襲した⁽²⁴⁾。主な被害として、建設中の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、冷却塔の一部が破損したことが挙げら

れる。

また、竜巻によりトレーラーが台から剥がれ移動したことや、直径 8 から 10 インチの木が折れた事例等も確認されており、図 29 は、竜巻による飛来物の飛散状況が定量的に分かる事例として、資材置き場のパイプの飛散状況を示したものである。なお、通過時の竜巻規模は F2 であったと考えられている。このパイプはコンクリート・石綿製で、長さは 8 フィート、直径（内径）は 8 インチであった。このパイプの飛散状況に対して、フジタモデルあるいはランキン渦モデルを風速場として用いた飛来解析を行った⁽²⁹⁾。その計算条件は過去の記録に基づき表 6 のとおりとした。



“Courtesy of Hathi Trust” <http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015037472209#view=lup;seq=65>⁽¹⁹⁾

図 29 Grand Gulf 原子力発電所資材置き場におけるパイプの散乱状況

被害状況	<ul style="list-style-type: none"> パイプを収納した木箱（一部は二段重ね）は浮上せず転倒し、パイプが周辺 7m から 9m に散乱。 (Pieces of pipe were scattered over the area, but none traveled more than 25–30ft. The pipe joints are 8 in. dia x 8ft long.⁽²⁰⁾)
------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

表 6 Grand Gulf 原子力発電所の竜巻によるパイプ飛散の再現をする上での計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	67m/s
	最大接線風速	53.6m/s
	移動速度	13.4m/s
	コア半径	45.7m
飛来物条件	直径（外径）	9inch(0.2286m)
	物体高さ	0.229m
	密度	1700kg/m ³
	飛行定数 $C_D A/m$	0.0080m ² /kg
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> 物体個数 51 × 51 個、竜巻半径の 4 倍を一辺とする正方形内 ($x, y = [-2Rm, +2Rm]$) に等間隔配置。 設置高さ 1m (パイプが収納されていた木箱が 2 段重ねで配置されていた状況を想定。) 	

計算結果を表7に示す。フジタモデルを風速場とした場合は、パイプがほとんど飛散せず、木箱が倒れた影響で散らばったと思われる状況とおおむね合致している。

なお、参考としてランキン渦モデルで評価した場合、飛散距離や最大水平速度に大きな違いがあり、実際の報告と比較して過度に保守的な評価結果となる。

表7 Grand Gulf原子力発電所のパイプの飛散計算結果

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

注記*1:ランキン渦モデルでは地上付近の風速場を模擬できていないが、フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較をするため、フジタモデルと同条件とした。

*2:初期物体高さからの飛散高さ。

6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例

2006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、佐呂間竜巻と言う。）により、4tトラックが約40m移動したことが報告されている⁽²⁵⁾。被災状況を図30に示す。この事例では被災時に4tトラックに乗員2名が乗車しており、4tトラックの初期位置と移動位置が分かっている（図30左上画像の②）。また、4tトラックのほかにも2台の自動車（図30左上画像の③と⑥）について、初期位置と被災後の移動位置が分かっている。このように竜巻被災前後で車両等の位置が明確になっている事例は極めてまれである。なお、竜巻飛来物の再現計算は、竜巻が頻発する米国でもほとんど実施されていない。この理由としては、来襲した実際の竜巻特性を精度よく計測・推測することが困難であることや自動車等の移動前後の位置が不明確な場合が多いことが挙げられる。



図30 佐呂間竜巻 (2006. 11. 7) による被災状況 (工事事務所敷地内の車両被災)⁽²⁵⁾

文献(24)で示されている竜巻被害の方向を で加筆

ここでは、フジタモデルを風速場として用いた車両 (4tトラック, 乗用車) 飛散評価を行い、実際の被害状況と比べて妥当な結果となるかどうかの確認を行った。方法としては、下記のとおりとした。

- a. 竜巻特性や飛来物 (4tトラック, 乗用車) の状況を現実的に設定した場合の再現解析
- b. 原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証

a. 竜巻特性や飛来物の状況を現実的に設定した場合の再現解析

(a) 4tトラックの飛散解析

再現解析の条件として、入手可能なデータ⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾に基づき、合理的と考えられる竜巻特性条件と飛来物（4tトラック）の条件を表8のように設定した。初期配置の条件として、配置個数は1個とし、竜巻が遠方から近づく状況設定としている。また、風速60m/s以下では浮上しない設定となっている。その上で、竜巻との距離を合理的な範囲で変化させ、佐呂間竜巻の再現性を確認した。

車両と竜巻中心との距離を18m, 20m, 22mとした場合の解析結果を表9及び図31に示す。車両の軌跡は竜巻中心との相対位置関係に敏感であるが、各ケースとも飛散方向が実際の移動方向とおおむね合致しており、特に車両と竜巻中心との距離を20mとしたケース2では飛散距離もほぼ正確に再現されている。このように、フジタモデルを風速場とした飛散解析で、飛来物が地上に設置された状況からの飛散挙動が再現できることが確認できた。

また、フジタモデルとランキン渦モデルの比較の観点から、ケース2を対象として解析を行った。解析の結果は表9に示すとおり、ランキン渦モデルの場合は過大な結果を与えることが確認された。

表8 佐呂間竜巻の4tトラックの計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92m/s	
	最大接線風速	70m/s	
	移動速度	22m/s	
	コア半径	20m	
飛来物条件	車種不明のため、三菱ふそうPA-FK71Dの仕様を採用。	車両長さ	8.1m
		車両幅	2.24m
		車両高さ	2.5m
		車両重量	4000kg
	飛行定数 $C_D A/m$	0.0056m ² /kg	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> ・物体個数1個。 ・竜巻は遠方から物体に近づくが、風速60m/s以下では浮上しない。 ・フジタモデル：設置高さ0m ・ランキン渦モデル：初期高さ40m 		

表9 佐呂間竜巻での4tトラックの飛散計算結果

解析ケース	車両と竜巻中心との距離	計算結果(フジタモデル)			
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度	
フジタモデル	1	22m	45.4m	2.8m	25.8m/s
	2	20m	35.5m	2.3m	22.2m/s
	3	18m	25.9m	1.7m	18.8m/s
ランキン渦モデル	2	20m	70.5m	40.0m	22.1m/s

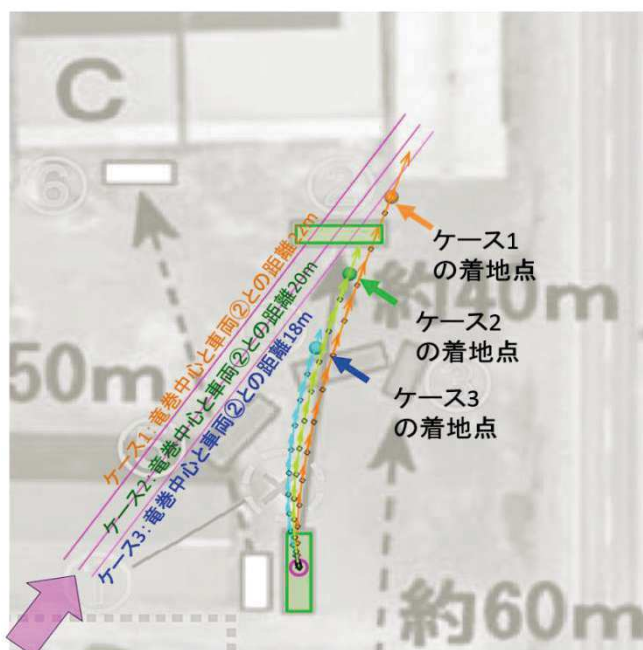


図31 フジタモデルによるトラック飛散の再現解析結果

(b) 乗用車の飛散解析

白い乗用車（図30の⑥）の被災事例を対象として、物体を1点初期配置した条件で最大水平速度等を計算した。

乗用車の計算条件について、表10に示す。

表10 佐呂間竜巻の乗用車の計算条件

竜巻条件	表8と同様		
飛来物条件	乗用車 〔トヨタカローラを仮定〕	車両長さ	4.40m
		車両幅	1.70m
		車両高さ	1.50m
	飛行定数 $C_D A / m$	0.0097m ² /kg	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> 物体個数1個 竜巻は遠方から物体に近づくが、風速60m/s以下では浮上しない フジタモデル：設置高さ0m ランキン渦モデル：初期高さ40m 		

乗用車と竜巻中心との距離を、18m、20m、22mとした場合の解析結果を表11及び図32に示す。飛散距離についてはケース1でおおむね合致している。

飛散方向については、飛び出し方向はおおむね合致しているものの、最終的な着地点には多少のずれが生じている。これは乗用車（白）が建物（A棟）に近接して駐車していたため、この建物の倒壊の影響を受けて飛散方向のずれが生じたものと推定される。

なお、赤い乗用車（図30の③）について評価した場合は、竜巻中心との距離が大きいため飛散しない解析結果となった。ただし、実際には、赤い乗用車は全壊・飛散したプレハブ建物（軽量鉄骨造2階建て、図30のA）の直ぐ下流側に駐車しており、その瓦礫の影響を受けて一緒に移動したものと考えられる。

また、フジタモデルとランキン渦モデルの比較の観点から、ケース1を対象として解析を行った。解析の結果は表11に示すとおり、ランキン渦モデルの場合は過大な結果を与えることが確認された。

表11 佐呂間竜巻での乗用車の飛散計算結果

解析ケース	乗用車と竜巻中心との距離	計算結果(フジタモデル)			
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度	
フジタモデル	1	22m	51.9m	3.6m	28.9m/s
	2	20m	43.5m	3.4m	24.7m/s
	3	18m	34.7m	2.9m	21.1m/s
ランキン渦モデル	1	22m	105.8m	40.0m	27.7m/s

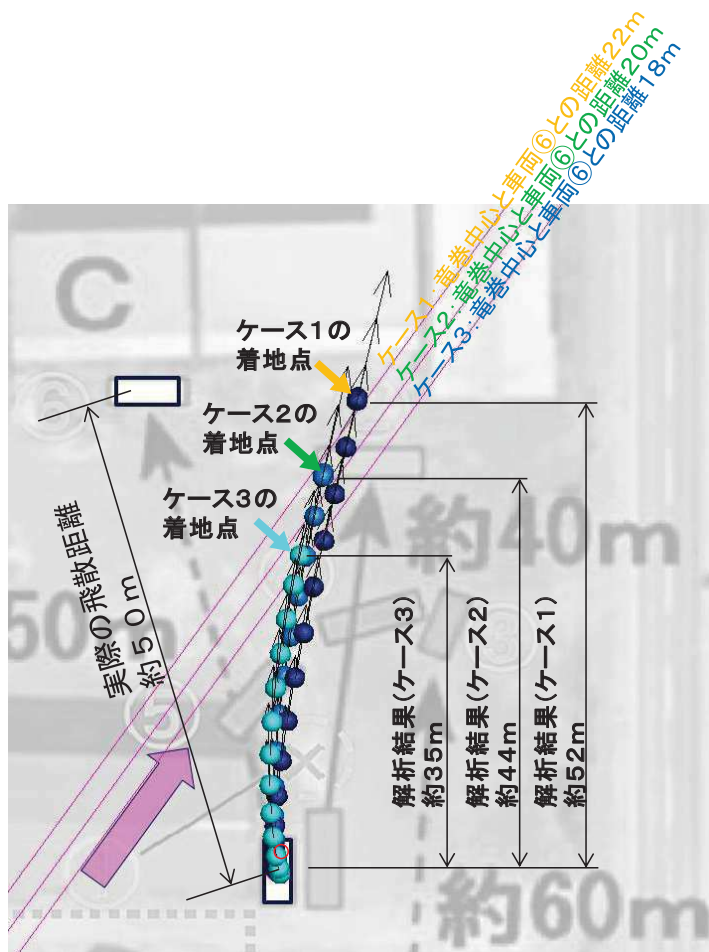


図32 フジタモデルによる乗用車飛散の再現解析結果

(c) 多点配置等を考慮した場合の竜巻評価の影響

前述の佐呂間竜巻の再現解析に対して、物体を多点配置した場合の影響について確認する。竜巻条件と飛来物条件を表12のとおり設定した。

表12 多点配置時の計算条件

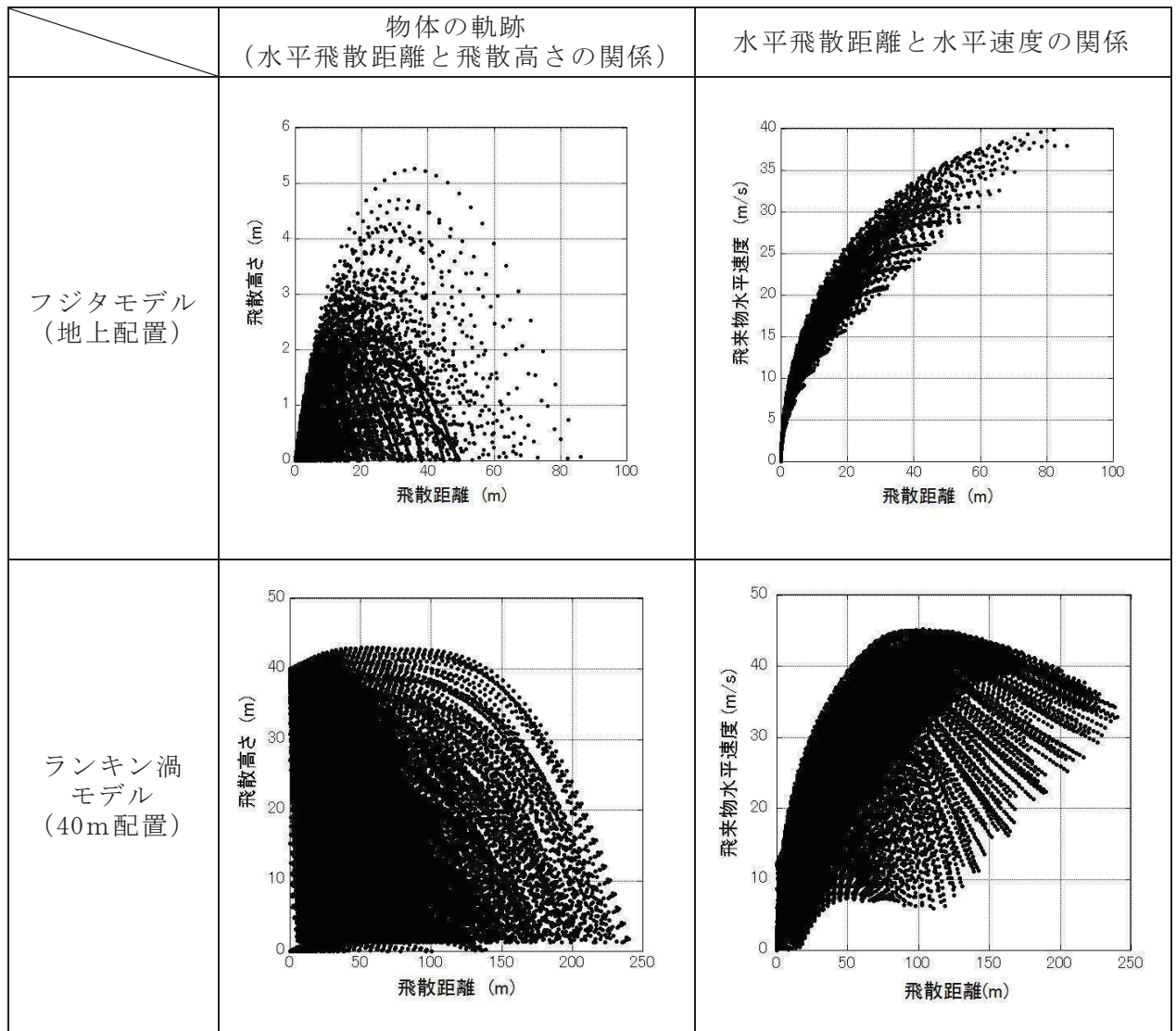
竜巻条件	表 8 と同様	
飛来物条件	4tトラック	表 9 と同様
	乗用車	表 10 と同様
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> 物体個数 51×51 個，竜巻半径の 4 倍を一辺とする正方形内に等間隔配置 フジタモデル：初期高さ 0m ランキン渦モデル：初期高さ 40m 	

飛散解析結果として、0.1秒毎の物体の軌跡（水平飛散距離と飛散高さの関係）及び水平飛散距離と物体の水平速度の関係を表13及び表14に示す。フジタモデル及びラ

ンキン渦モデルを用いた解析結果は1点配置に比べていずれも保守的な評価となっており、特にランキン渦モデルは被災状況に対して過度に保守性があることが分かる。

表 13 多点配置を考慮した解析結果 (4tトラック)

(表 13-1 : 物体の飛跡と水平速度の関係)

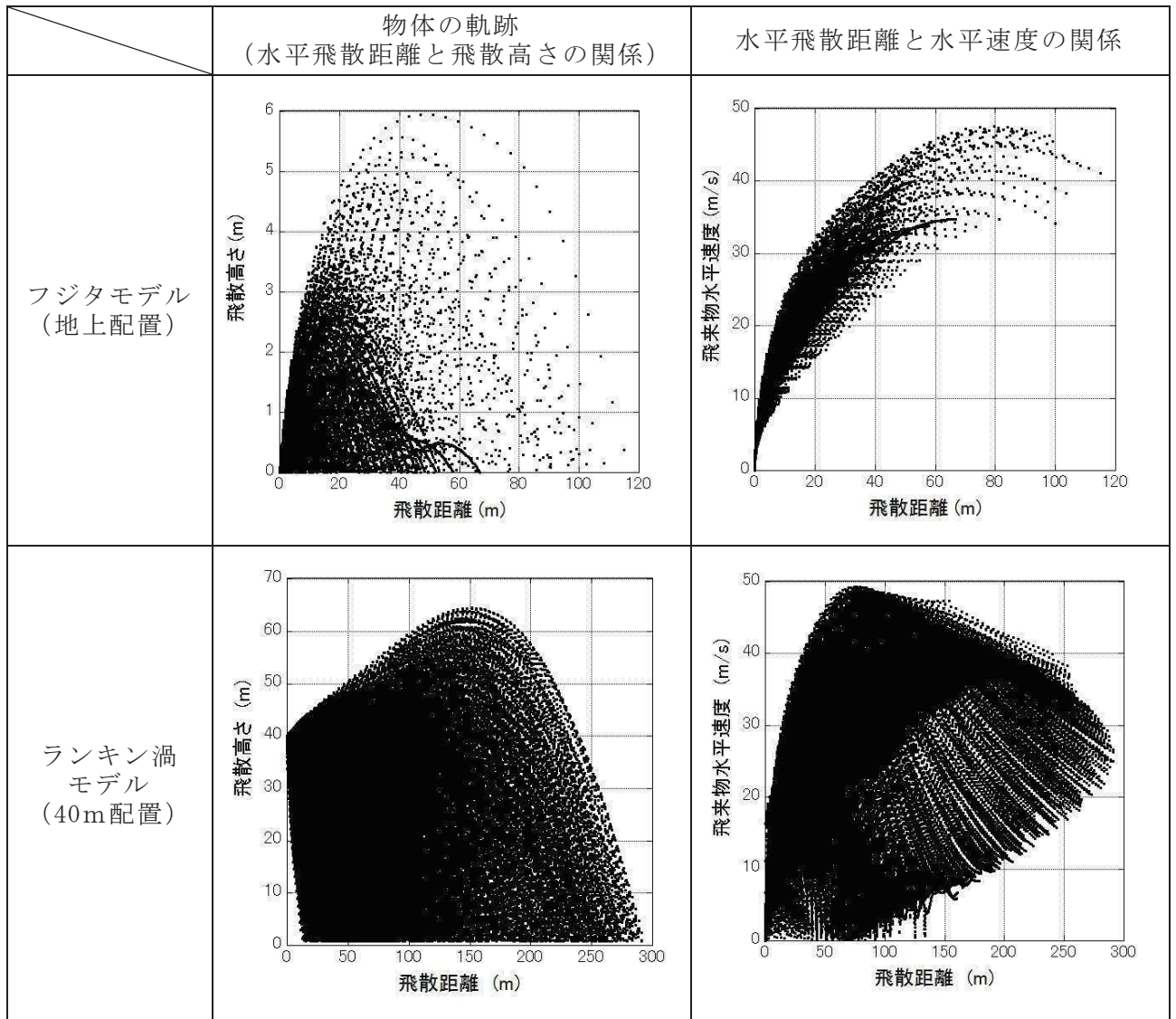


(表 13-2 : 飛跡及び水平速度の最大値)

	最大飛散距離	最大飛散高さ	最大水平速度
フジタモデル	86.5m	5.3m	39.9m/s
ランキン渦モデル	240.5m	3.1m (初期高さ 40m から)	45.2m/s

表 14 多点配置を考慮した計算結果（乗用車）

（表 14-1：物体の飛跡と水平速度の関係）



（表 14-2：飛跡及び水平速度の最大値）

	最大飛散距離	最大飛散高さ	最大水平速度
フジタモデル	116.9m	6.0m	47.6m/s
ランキン渦モデル	293.0m	24.4m (初期高さ 40m から)	49.3m/s

b. 原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証⁽²⁷⁾

ここでは、原子力発電所に適用する飛来物評価法の竜巻条件・物体初期配置条件で前述の佐呂間竜巻における4tトラック及び乗用車の被災事例を評価し、佐呂間竜巻での実際の被災状況（移動距離等）との結果を比較する。

(a) 4tトラックの飛散解析

計算条件について表15に示す。竜巻条件としては、最大風速を92m/sとし、その他の特性量については、NRAガイドに例示されている方法に従い、移動速度 V_{tr} を14m/s（最大風速の15%）、竜巻コア半径 R_m を30mとした。

表15 原子力発電所に適用する飛来物評価法の計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92m/s
	最大接線風速	78m/s
	移動速度	14m/s
	コア半径	30m
飛来物条件	表8と同様	
初期配置	<ul style="list-style-type: none"> ・物体個数51×51個，竜巻半径の4倍を一辺とする正方形内($x, y = [-2R_m, +2R_m]$)に等間隔配置。 ・設置高さ0m 	

表16に実際の被災状況と、原子力発電所に適用する飛来物評価法の結果の比較を示す。また、図33に被災後の4tトラックの状況を示す。

フジタモデルによる飛散評価結果として、4tトラックの最大飛来物速度は36m/s、最大飛散高さは3.6m、最大飛散距離は63.4mとなった。

実際の4tトラック飛散距離は約40mであり、フジタモデルによる飛散距離の評価結果はこれを上回った。また、飛散高さや最大水平速度については、直接の比較は出来ないものの、4tトラックの乗員2名が存命であったこと、被災後の4tトラックがほぼ元の外形を留めていることなどから、原子力発電所に適用する飛来物評価法で飛散解析をした場合でも、実際の被災状況と比較して妥当な結果となるものと考えられる。

なお、参考として同様の検証をランキン渦モデルでも実施した。ランキン渦モデルによる評価では、最大飛散高さ、最大飛散距離ともに実際の被災状況と比較して非常に保守性が大きい結果となっていることが分かる。

表16 実際の被災状況と「原子力発電所の飛来物評価法」の結果の比較

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ*2	最大水平速度
フジタモデル (地上)	63.4m	3.6m	36.0m/s (毎時130km)
ランキン渦モデル (地上*1)	193.7m	11.7m	43.9m/s
ランキン渦モデル (40m)	254.9m	11.7m	43.9m/s
実際の被災状況	約40m	4tトラックの運転席に 乗車していた乗員2名が 幸いにも存命で救出さ れ、搬送先の病院で聞 き取り調査に応じてお り ⁽²⁵⁾ 、被災した4tトラ ックが地面からは3.6m 以上の高所から落下し たとは考えにくい。	被災後もほぼ元の外形 を留めていることが示 されており ⁽²⁵⁾ 、実際の 飛来物速度は本解析で 得られた最大飛来物速 度(約130km/h)を遙かに 下回るものと推察でき る。

注記*1:ランキン渦モデルでは地上付近の風速場を模擬できていないが、フジタモデルの計算結果(飛散距離)と比較をするため、フジタモデルと同条件とした。

*2:初期物体高さからの飛散高さ。



図33 竜巻による被災後の4tトラックの様子⁽²⁶⁾⁽³⁰⁾

(b) 乗用車(白)の飛散解析

4tトラックの場合と同様に、原子力発電所に適用する飛来物評価条件で乗用車の飛散解析を行った場合の結果を表17に示す。

乗用車の場合も、フジタモデルによる評価が実際の被災状況を包含する結果となっている。

表17 「原子力発電所の飛来物評価法」の評価結果の比較（乗用車の場合）

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ*2	最大水平速度
フジタモデル (地上)	82.3m	4.2m	44.1m/s
ランキン渦モデル (地上*1)	269.6m	39.4m	49.6m/s
ランキン渦モデル (40m)	305.8m	39.4m	49.6m/s
実際の被災状況	約50m	—	—

注記*1:ランキン渦モデルでは地上付近の風速場を模擬できていないが、フジタモデルの計算結果（飛散距離）と比較をするため、フジタモデルと同条件とした。

*2:初期物体高さからの飛散高さ。

7. 飛散以外の挙動に対する考慮

前節までで、飛来物の竜巻による挙動のうち、飛散に関する評価手法について説明をした。実際の竜巻による飛来物の挙動としては、飛散だけではなく、横滑りや転がりによる挙動が発生することも考えられるため、本節では、これらの飛来物の挙動について、下記の2点に分けて考察する。

- (a) 飛散する物体における横滑りや転がりの影響
- (b) 飛散しない物体における横滑りや転がりの影響

(a) 飛散する物体における横滑りや転がりの影響

「5.3 竜巻が物体に与える速度に関する不確定性の考慮」に記載のとおり、本検討においては、竜巻を直上に発生させる方法を採用していることから、実際には横滑りや転がりを伴い移動する物体も強制的に高速域に配置され、浮上をして飛散することになる。この場合、空中では地面の摩擦力を受けないため、実際に比べて大きな水平速度が得られることになる。

また、浮上後に地面に衝突する場合は、運動エネルギーの大部分は物体や地面の変形・破損等で消費されることから、落下後の横滑りや転がりによる移動距離は実際には小さいものと考えられる。

「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」における飛散した4tトラックや乗用車は、実際には飛散だけではなく、横滑りや転がりを伴ったものと考えられるが、飛散解析より得られた飛散距離や最大水平速度は、実際の被災状況よりも保守的な評価となっていることから、飛散過程における不確実性を裕度として包含している。

(b) 飛散しない物体における横滑りや転がりの影響

飛散しない物体においても、竜巻による風荷重が静止摩擦力より大きい場合には、横滑りをする。また、横滑りをしない場合でも、風荷重によるモーメントが自重のモーメントよりも大きい場合には転がることになる。このように、竜巻により横滑りや転がる場合には、地面での摩擦力の影響を受けながら移動することから、移動距離や水平速度は十分に小さいものと考えられる。

また、物体と評価対象施設等の間に、障害物となるフェンス等がある場合には、横滑りや転がった物体が評価対象施設等に到達することは阻止される。

以上より、飛散しない物体が横滑りや転がりにより、障害物の影響を受けず、評価対象施設等と衝突することが想定される場合については、横滑りや転がった物体の影響が設計飛来物の影響に包含されることを確認し、包含されない場合には固縛等の措置を実施する。固縛等の措置に当たっては、フジタモデルの風速場より求まる風荷重に、地面での摩擦力を適切に考慮した上で、設計用荷重を設定する。

8. まとめ

フジタモデルは、米国NRCによる要望で実際の竜巻観測記録を基に考案された風速場モデルであり、米国DOEの重要施設に対する設計基準の作成の際にも用いられている。フジタモデルは、他のモデルではできなかった地上からの物体の浮上を評価することができる点が大きなメリットである。

これは、「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」の「a. 竜巻特性や飛来物の状況を現実的に設定した場合の再現解析」において、フジタモデルを風速場とした飛散解析結果が実際の飛散状況とおおむね合致していることから、確認することができる。

また、フジタモデルにより算出される風速 (V_w) は、飛来物の飛散評価のインプットとして用いるものであり、設計竜巻の最大風速の算出に当たっては「5. 飛来物評価における不確定性の考慮」のとおり、竜巻を多数の物体の直上に瞬時に発生させて物体が最大風速を受けるような初期条件を用いる等の評価手法により、不確実性も含めて飛来物速度等を保守的に評価できるようにしている。

これにより、「6.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例」の「b. 原子力発電所に適用する飛来物評価法による検証」では、本評価手法を用いることでフジタモデルにおいても実際の飛散状況に対して、保守性を有した妥当な結果となることを確認している。

地上からの浮上・飛散評価を行うことのメリットは、発電所敷地内に数多く存在する物の中から、竜巻による飛来物化の影響度合いを、浮上の有無の観点を含めて把握できることである。竜巻飛来物の影響（浮上の有無、飛散高さ、飛散距離、最大速度等）を適切に把握し、飛来物の発生防止対策や評価対象施設の防護対策の範囲や強度について、保守性を確保することで実効性の高い竜巻防護対策を実施することが可能となると考えられる。

評価全体として一定の保守性を確保しつつ、適切な竜巻対策によりプラント全体の安全性を向上させるため、当社の竜巻影響評価については、フジタモデルを適用することとする。

9. 参考文献

- (1) 原子力規制委員会，2013： 原子力発電所の竜巻影響評価ガイドの制定について， 原規技発第13061911号，平成25年6月19日制定，平成26年9月一部改正。
- (2) U.S.Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.76:Design-BasisTornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March2007.
- (3) Simiu,E. and Cordes,M.,Tornado-Borne Missile Speeds,NBSIR76-1050, 1976.
- (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) Fujita,T.T.,Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications, U.Chicago, 1978.
- (6) 江口譲，杉本聡一郎，服部康男，平口博丸，竜巻による物体の浮上・飛来解析コードTONBOSの開発，電力中央研究所 研究報告N14002,2014.
- (7) Maruyama, T.,Simulation of flying debris using a numerically generatedtornado-like vortex. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol.99 (4) ,pp.249-256, 2011.
- (8) U.S. Department of Energy, Natural Phenomena Hazards Design and Evaluation Criteria for Department of Energy Facilities, DOE-STD-1020-2002,2002.
(<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0302/ML030220224.pdf>)
- (9) Malaeb, D.A.,Simulation of tornado-generated missiles. M.S.thesis,Texas, Tech University, 1980
- (10) P. -H. Luan,Estimates of Missile Speeds in Tornadoes, M.S. thesis,Texas, Tech University,1987.
- (11) J. R. McDonald,Rationale for Wind-Borne Missile Criteria for DOE facilities, UCRL-CR-135687, Lawrence Livermore National Laboratory, 1999.
(<https://e-reports-ext.11nl.gov/pdf/236459.pdf>)
- (12) McDonald, J.R.,T, Theodore Fujita:His contribution to tornado knowledge through damage documentation and the Fujita scale . Bull. Amer. Meteor. Soc. , 82, pp. 63-72, 2001
- (13) NUREG-1827 Safety Evaluation Report for the National Enrichment Facility in Lea County,New Mexico (Docket No.70-3103)

- (14) Karen A. Kosiba and Joshua Wurman, 2013: The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. *Wea. Forecasting*, 28, 1552–1561.
- (15) 日本鋼構造協会, 構造物の耐風工学, p82
- (16) EPRI, Wind field and trajectory models for tornado-propelled objects, report NP-2898, 1978.
- (17) 林建二郎・大井邦昭・前田稔・斉藤良, 開水路中に水没設置された立方体及び棧粗度の流体力, 土木学会論文集B1 (水工学) Vol. 67, No. 4, I_1141-I_1146, 2011.
- (18) 松宮央登, 中岡宏一, 西原 崇, 木村吉郎: 太陽光発電パネルに作用する空気力の地面効果に関する風洞実験, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 446-454, 2014.
- (19) 山本晃一, 林建二郎, 関根正人, 藤田光一, 田村正秀, 西村晋, 浜口憲一郎, 護岸ブロックの抗力・揚力係数, 及び相当粗度の計測方法について, 水工学論文集, 第44巻, pp1053~1058, 2000.
- (20) 江口 讓, 西原 崇, 水流动試験による電線の風荷重低減化のメカニズム解明, 電力中央研究所 研究報告U96050, 1997.
- (21) M. R. Ahmed, S. D. Sharma, An investigation on the aerodynamics of a symmetrical airfoil in ground effect, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29, pp. 633-647, 2005.
- (22) Schmidlin, T., Hammer, B., King, P., Ono, Y., Miller, L. S. and Thumann, G., Unsafe at any (wind) speed? -Testing the stability of motor vehicles in severe winds-, Vol. 83, No. 12, pp. 1821-1830, 2002.
- (23) Lei, C., Cheng, L. and Kavanagh, K., Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 80, pp. 263-286, 1999.
- (24) Fujita, T. T., and J. R. McDonald, Tornado damage at the Grand Gulf, Mississippi nuclear power plant site: Aerial and ground surveys, U.S. Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-0383, 1978.
- (25) 札幌管区气象台: 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. 災害時気象調査報告, 災害時自然現象報告書, 2006年第1号, 2006.
(<http://www.jma-net.go.jp/sapporo/tenki/yohou/saigai/saroma/saroma.htm>にて閲覧可能。)
- (26) 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. 建築研究所 災害調査, 46, 2006.
(<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/other.html>)
- (27) 江口讓, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 原子力発電所での竜巻飛来物速度の合理的評価法 (Fujitaの竜巻モデルを用いた数値解析コードの妥当性確認), 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 823, 2015.

- (28) Fujita, T. T., 1971: Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity. SMRP Research Paper 91, University of Chicago, Chicago, IL, 42 pp
- (29) 日本保全学会 原子力規制関連事項検討会, 2015: 軽水型原子力発電所の竜巻影響評価における設計竜巻風速および飛来物速度の設定に関するガイドライン (JSM-NRE-009)
- (30) 土木学会 平成 18 年 11 月北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査報告書

1.5 砂利等の極小飛来物による外部事象防護対象施設への影響について

1.5 砂利等の極小飛来物による外部事象防護対象施設への影響について

設計飛来物に包含される砂利のような極小飛来物及び砂等の粒子状の飛来物について、外部事象防護対象施設への影響の有無を確認する。

砂利及び砂等による外部事象防護対象施設への影響としては、以下の事項が考えられることから、これらについて評価する。

- (1) 砂利のような極小飛来物による貫通及び衝突
- (2) 砂等の粒子状の飛来物による目詰まり、閉塞及び噛込み

1.5.1 砂利のような極小飛来物による貫通及び衝突

(1) 貫通について

砂利のような極小飛来物が外部事象防護対象施設（鋼板部分）に衝突した場合の貫通限界厚さを算出するような知見はないが、設計飛来物による貫通評価に示している貫通限界厚さを求めるBRL式*を用いて、砂利のデータ（サイズ、質量、速度）を用いて貫通厚さを求める。

砂利による鋼板の貫通限界厚さの算出結果は表 1.5-1 に示す。

表 1.5-1 より、貫通限界厚さは1mm未満であるため、砂利による貫通の影響はないと考える。

注記*：別紙1参照

表 1.5-1 砂利による鋼板の貫通評価結果

項目	単位	砂利
サイズ	mm	40
質量	g	200
最大水平速度	m/s	59.3
最大鉛直速度	m/s	22.6~37.9*
水平貫通限界厚さ	mm	1mm未満
鉛直貫通限界厚さ	mm	1mm未満

注記*：敷地内の高台を考慮して設定。

(2) 衝撃について

砂利やひょう等の極小飛来物の衝突は瞬間的で、衝突時間が極めて短いため、設備は振動しにくく破壊は生じないと考えられる。これは高速の極小飛来物が設備に衝突した場合、設備に生じる荷重は衝突時間の非常に短い片振幅波形(図 1.5-1)となるため、設備に有意な変位(応力)は生じないためである。

この衝撃にて伝達される荷重について、機械工学便覧(基礎編α2 機械力学)の「過渡応答・衝撃」に、衝突時間と応答加速度に関係が次のとおり示されている。

図 1.5-2 では、横軸は衝突時間(t_r)と衝突される設備の固有周期(T)との比として t_r/T 、縦軸は応答加速度 \ddot{X}_{max} (設備へ伝わった加速度)と入力加速度 \ddot{X}_{0max} (設備へ伝えようとした加速度)の応答加速度比として $\ddot{X}_{max}/\ddot{X}_{0max}$ の関係としてまとめられている。

図 1.5-2 より衝突時間が非常に短く設備の固有周期との比 $2\pi t_r/T$ が非常に小さいと、応答加速度比 $\ddot{X}_{max}/\ddot{X}_{0max}$ は非常に小さい値となる。これは衝突時間が非常に短いと、設備に有意な変位(応力)が生じないことを表している。

$$\ddot{X}_{max}/\ddot{X}_{0max} \Leftrightarrow 2\pi t_r/T$$

\ddot{X}_{0max} : 飛来物による衝撃パルスを入力最大加速度

\ddot{X}_{max} : 設備の応答最大加速度

t_r : 衝撃パルスの作用時間(飛来物と設備との接触時間)

T : 設備の固有周期

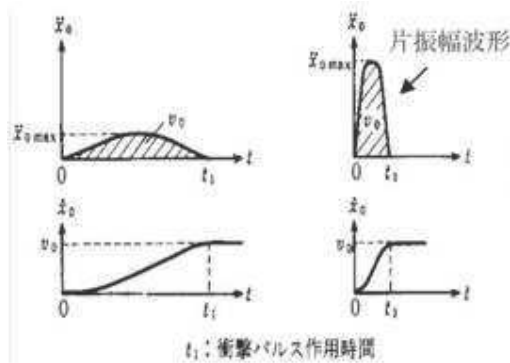


図 1.5-1 片振幅波形 他

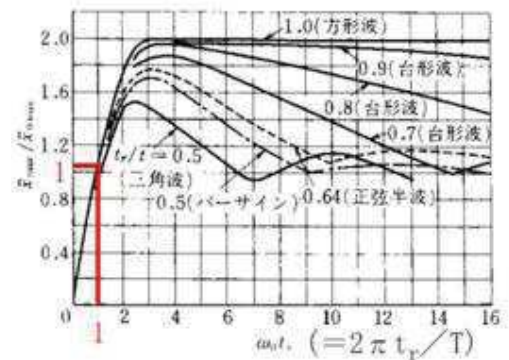


図 1.5-2 衝突時間と応答加速度の関係
(機械工学便覧(基礎編α2 機械力学))

図 1.5-2 より、飛来物の速度が速くて衝撃パルスの作用時間 (t_r) が設備の固有周期 (T) の $1/(2\pi)$ 倍より短い場合 (横軸が 1 より小さい場合) には、入力加速度と応答加速度の比は 1 を下回り、エネルギーの伝達は小さくなることがわかる。

砂利やひょう等の極小飛来物による荷重は、このような短時間の衝突となるため、設備全体に影響を及ぼす荷重はごくわずかしか発生しないため、衝撃による影響はないと考える。

1.5.2 砂等の粒子状の飛来物による目詰まり、閉塞及び嘔込み

砂等の粒子状の飛来物による目詰まり、閉塞及び嘔込みの影響を受ける施設として、表 1.5-2 に示す屋外の外部事象防護対象施設、外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設及び外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設について評価する。

表 1.5-2 目詰まり、閉塞、嘔込みの影響を受ける施設

分類	評価施設
屋外の外部事象防護対象施設	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉補機冷却海水ポンプ ・高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ ・排気筒 ・非常用ガス処理系 (屋外配管)
外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設	<ul style="list-style-type: none"> ・中央制御室換気空調系 ・計測制御電源室換気空調系 ・原子炉補機室換気空調系
外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設	<ul style="list-style-type: none"> ・非常用ディーゼル発電設備 (高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備を含む。) 排気消音器 ・非常用ディーゼル発電設備 (高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備を含む。) 付属ミスト配管 ・軽油タンク A 系ベント配管, 軽油タンク B 系ベント配管, 軽油タンク H P C S 系ベント配管

(1) 屋外の外部事象防護対象施設

a. 原子炉補機冷却海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ

(a) 換気系、電気系及び計装制御系に対する機械的影響

原子炉補機冷却海水ポンプ電動機及び高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ電動機は、外気を直接電動機内部に取り込まない冷却方式であり、電動機内部に砂等の粒子状の飛来物の侵入はない。(図 1.5-3 及び図 1.5-4)

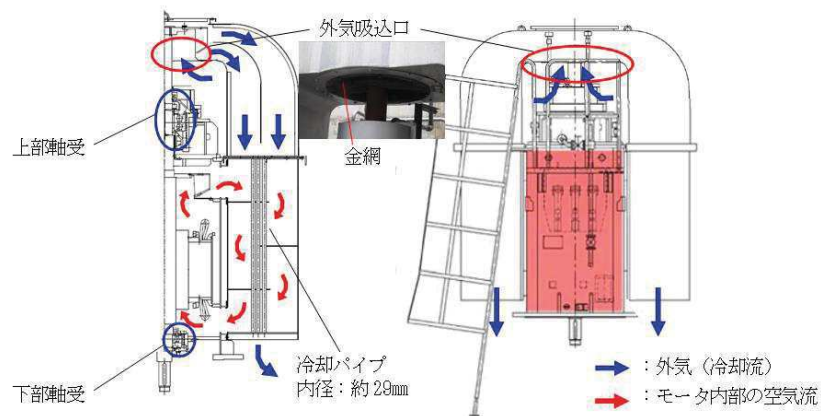


図 1.5-3 原子炉補機冷却海水ポンプ電動機の冷却方式

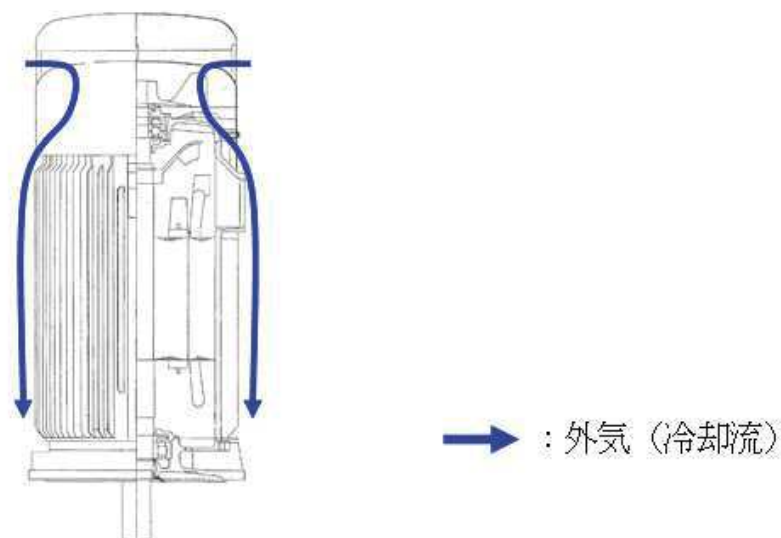


図 1.5-4 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ電動機の冷却方式

b. 排気筒及び非常用ガス処理系（屋外配管）

排気筒は常時排気があることから、砂等の粒子状の飛来物は排気筒及び非常用ガス処理系（屋外配管）内に侵入し難い。（図 1.5-5）

また、竜巻の通過に要する時間は短時間であるため、排気筒及び非常用ガス処理系（屋外配管）が閉塞する量の飛来物は侵入し難い。

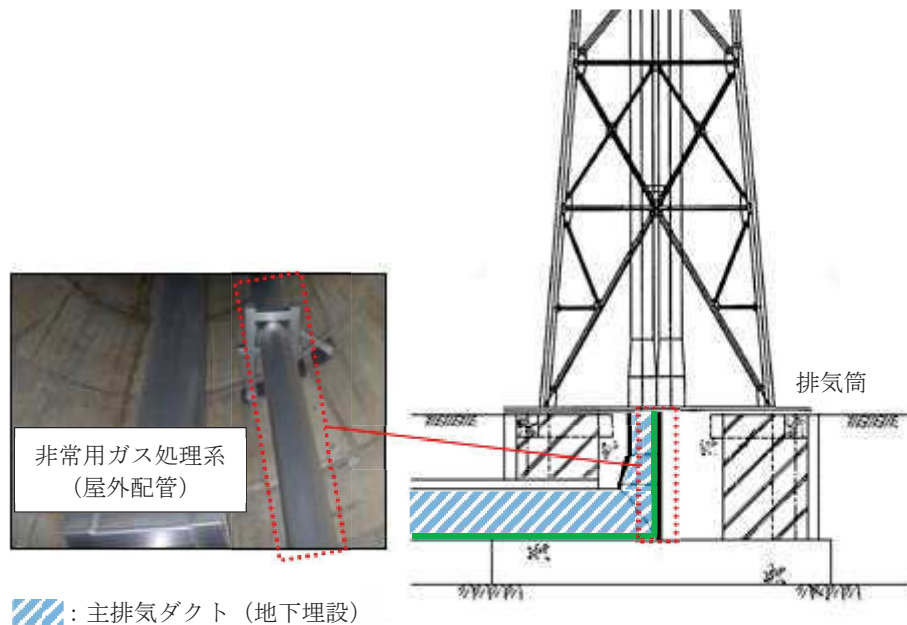


図 1.5-5 排気筒及び非常用ガス処理系（屋外配管）

(2) 外気と繋がっている屋内の外部事象防護対象施設

a. 中央制御室換気空調系、計測制御電源室換気空調系及び原子炉補機室換気空調系

中央制御室換気空調系、計測制御電源室換気空調系及び原子炉補機室換気空調系の外気取口にはルーバが取り付けられており、下方から吸い込む構造となっていることから、上方より降下してくる砂等の粒子状の飛来物に対し、取り込み難い構造となっている。また、外気取入口にはバグフィルタが設置されており、砂等の粒子状の飛来物が外気取入口に侵入した場合であっても、バグフィルタの捕集効率は粒径約 $2\mu\text{m}$ に対して 80%以上であるため、給気を供給する設備に対して影響はない。

また、各フィルタについては、建屋等からのアクセス性が良く、必要に応じて、取替え又は清掃することにより目詰まり、閉塞を取り除くことができる。（図 1.5-6 及び図 1.5-7）

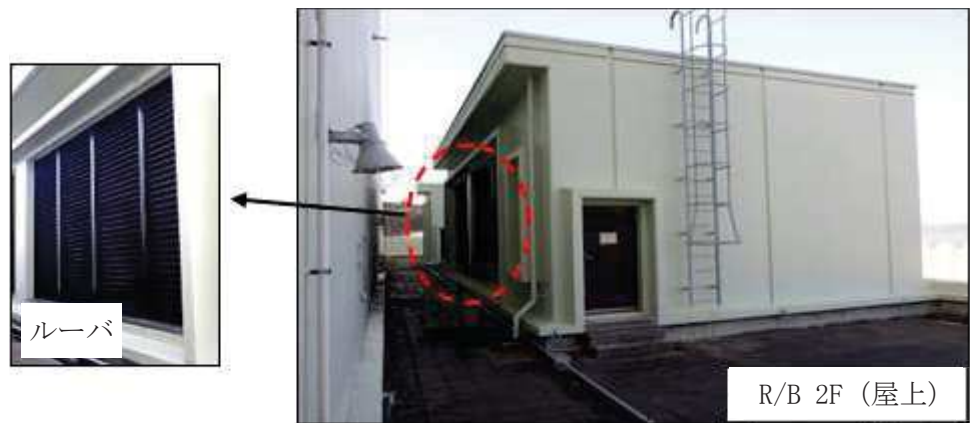


図 1.5-6 原子炉補機 (A) 室換気空調系の外気取入口

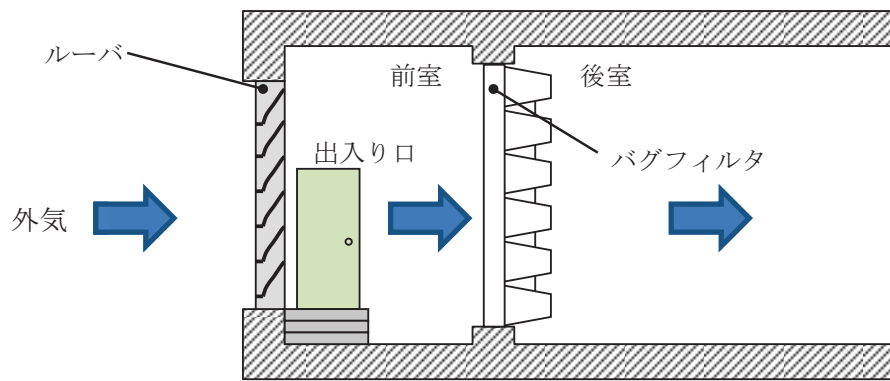


図 1.5-7 換気空調系の外気取入口イメージ図

(3) 外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼす可能性がある施設

- a. 非常用ディーゼル発電設備（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備を含む。）排気消音器

非常用ディーゼル発電設備（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備を含む。）排気消音器の開口部は横方向であり，砂等の粒子状の飛来物が侵入し難い構造となっている。また，竜巻の通過に要する時間は短時間であるため，閉塞する量の粒子状の飛来物は侵入し難い。（図 1.5-8）



図 1.5-8 非常用ディーゼル発電設備排気消音器

- b. 非常用ディーゼル発電設備（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備を含む。）付属ミスト配管

非常用ディーゼル発電設備（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備を含む。）付属ミスト配管は下向きの構造となっており，砂等の粒子状の飛来物が侵入し難い構造となっている。（図 1.5-9）



図 1.5-9 非常用ディーゼル発電設備付属ミスト配管

- c. 軽油タンク A系ベント配管，軽油タンク B系ベント配管，軽油タンク H P C S系ベント配管

軽油タンクは大気開放タンクであり，開口部であるベント配管は下向きの構造となっており，砂等の粒子状の飛来物が侵入し難い構造となっている。（図 1.5-10）



図 1.5-10 軽油タンクベント配管

BRL 式について

BRL 式は ISES7607-3 「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」（高温構造安全技術研究組合）」に引用されており，タービンミサイル評価について（昭和 52 年 7 月 20 日 原子炉安全専門審査会）」の中で，鋼板に対する貫通厚さの算出式に使用されている。

$$T^3 = \frac{0.5 \times M \times V^2}{1.4396 \times 10^9 \times K^2 \times d^2}$$

T：鋼板貫通限界厚さ（m）

M：ミサイル質量（kg）

V：ミサイル速度（m/s）

d：ミサイル直径（m）

K：鋼板の材質に関する係数（≒1.0）

1.6 屋外重大事故等対処設備の竜巻防護設計について

1.6 屋外重大事故等対処設備の竜巻防護設計について

1.6.1 女川原子力発電所における重大事故等対処設備の具体的な竜巻防護設計方針

(1) 設計の考え方について

女川原子力発電所の屋外重大事故等対処設備においては、技術基準規則第 54 条の要求事項を踏まえた設計方針に従って、位置的分散による機能維持に加え、技術基準規則第 7 条の要求事項を踏まえた設計方針に従って、浮き上がり又は横滑りによって外部事象防護対象施設等又は防護対策施設に衝突し、外部事象防護対象施設等の機能に影響を及ぼす可能性がある場合には、飛来物とならないよう固縛する設計とする。

位置的分散による重大事故等対処設備の機能維持設計は、VI-1-1-6「安全設備及び重大事故等対処設備が使用される条件の下における健全性に関する説明書」にて示すため、以下では、固縛等に関する設計の考え方を示す。

1.6.2 固縛の設計方針

固縛については、浮き上がり又は横滑りによって外部事象防護対象施設等又は防護対策施設に衝突し、外部事象防護対象施設等又は防護対策施設の機能に影響を及ぼさない設計とするため、全ての屋外重大事故等対処設備を検討の対象とする。

ただし、屋外重大事故等対処設備のうち、重大事故等に対処するために必要な機能を損なわないよう、風荷重の作用しない場所に配置する設計又は設計竜巻の風圧力による荷重を考慮した設計とする設備は、竜巻防護が実施されていることから、固縛対象設備の選定候補から除外する。(表 1.6-1 参照)

1.6.3 固縛対象設備の選定

屋外重大事故等対処設備を対象に、浮き上がり又は横滑りによって外部事象防護対象施設等又は防護対策施設に衝突し、外部事象防護対象施設等又は防護対策施設を損傷させる可能性の有無を確認し、表 1.6-1 に示した屋外重大事故等対処設備から固縛対象設備を選定する。

固縛対象として選定した屋外重大事故等対処設備及びその保管場所を表 1.6-2、図 1.6-1 に示す。

表 1.6-1 固縛対象設備の選定候補 (1/2)

	固縛対象設備の選定方針	常設／可搬	設備
(1)	<p>外部事象防護対象施設等又は防護対策施設に衝突し損傷させる可能性の有無を確認し、固縛対象設備を選定する。</p> <p>また、同じ機能を有する他の重大事故用対処設備に衝突し損傷させる可能性の有無を確認し、固縛対象設備を選定する。</p>	可搬	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大容量送水ポンプ (タイプ I) ・ 大容量送水ポンプ (タイプ II) ・ ホース延長回収車 ・ 送水用ホース*1 ・ 注水用ヘッダ ・ 原子炉補機代替冷却水系熱交換器ユニット ・ 耐熱ホース*2 ・ 除熱用ヘッダ*2 ・ 可搬型窒素ガス供給装置 ・ 窒素供給用ホース*3 ・ 窒素供給用ヘッダ ・ 放水砲 ・ 泡消火薬剤混合装置 ・ シルトフェンス ・ 小型船舶 ・ 可搬型モニタリングポスト ・ ブルドーザ ・ バックホウ ・ 電源車 ・ 電源車 (緊急時対策所用) ・ ケーブル*4 ・ タンクローリ ・ 給油用ホース*5 ・ 軽油払出用ホース*5 ・ 代替気象観測設備

注記*1：保管用のコンテナに格納されているため、設備を内包するコンテナの評価で代表する。

*2：原子炉補機代替冷却水系熱交換器ユニットの車内に格納されているため、同車両の評価で代表する。

*3：可搬型窒素ガス供給装置の車内に格納されているため、同車両の評価で代表する。

*4：電源車及び電源車 (緊急時対策所用) の車内に格納されているため、同車両の評価で代表する。

*5：タンクローリの車内に格納されているため、同車両の評価で代表する。

表 1.6-1 固縛対象設備の選定候補 (2/2)

	固縛対象設備の選定方針	常設／可搬	設備
(2)	固定されている設備であり，竜巻の風圧力による荷重の影響を受けにくく，飛来物化しないと考えられるため，固縛対象設備として選定しない。	常設	<ul style="list-style-type: none"> ・ガスタービン発電機 ・ガスタービン発電設備燃料移送ポンプ ・緊急時対策所遮蔽 ・原子炉建屋ブローアウトパネル
(3)	外部事象防護対象施設を兼ねており，設計竜巻の風圧力による荷重，気圧差による荷重及びその他考慮すべき荷重に耐えうる設計であるため，固縛対象設備として選定しない。	常設	<ul style="list-style-type: none"> ・復水貯蔵タンク ・原子炉補機冷却海水ポンプ ・高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ
(4)	竜巻の風圧力による荷重の影響を受けにくい構造物であり，飛来物化しないと考えられるため，固縛対象設備として選定しない。	常設	<ul style="list-style-type: none"> ・海水ポンプ室 ・取水口 ・貯留堰 ・取水路

注記*1：保管用のコンテナに格納されているため，設備を内包するコンテナの評価で代表する。

*2：原子炉補機代替冷却水系熱交換器ユニットの車内に格納されているため，同車両の評価で代表する。

*3：可搬型窒素ガス供給装置の車内に格納されているため，同車両の評価で代表する。

*4：電源車及び電源車（緊急時対策所用）の車内に格納されているため，同車両の評価で代表する。

*5：タンクローリの車内に格納されているため，同車両の評価で代表する。

表 1.6-2 固縛対象として選定した屋外重大事故等対処設備の保管場所一覧

設備	保管場所*1
大容量送水ポンプ（タイプⅠ）	①②③④
大容量送水ポンプ（タイプⅡ）	①③④
ホース延長回収車	②③④
送水用ホース*2	①②③④
注水用ヘッダ	②③④
原子炉補機代替冷却水系熱交換器ユニット*3	①③④
可搬型窒素ガス供給装置*4	①④
窒素供給用ヘッダ	①④
放水砲	①④
泡消火薬剤混合装置	①④
シルトフェンス	①④
小型船舶	①④
可搬型モニタリングポスト	①②④
ブルドーザ	①④
バックホウ	①④
電源車*5	②③④
電源車（緊急時対策所用）*5	⑤
タンクローリ*6	②③④
代替気象観測設備	②④

注記*1：図 1.6-1 における保管場所の番号を示す。

*2：保管用のコンテナに格納されているため，設備を内包するコンテナの評価で代表する。

*3：耐熱ホース及び除熱用ヘッダを含む。

*4：窒素供給用ホースを含む。

*5：ケーブルを含む。

*6：給油用ホース及び軽油払出用ホースを含む。

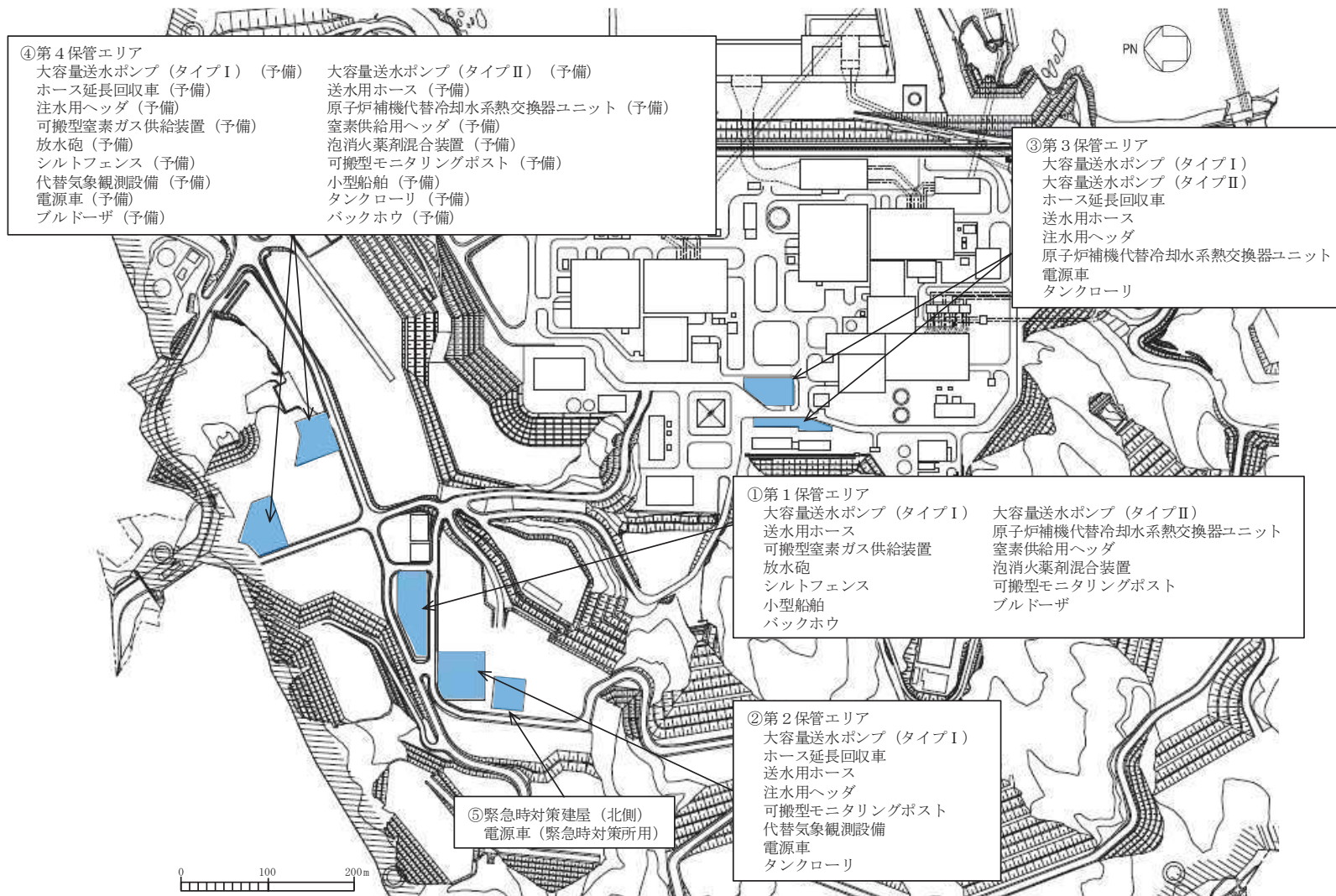


図 1.6-1 固縛対象として選定した屋外重大事故等対処設備の保管場所

1.7 竜巻影響評価の風速場モデルの適用について

1.7 竜巻影響評価の風速場モデルの適用について

1.7.1 女川原子力発電所の竜巻影響評価における風速場モデル

女川原子力発電所の竜巻影響評価の風速場モデルは、地上からの物体の浮上・飛散解析が可能であり、多数の飛来物源が想定される地上付近で竜巻の中心に向かう流れを考慮した 3次元の風速場を持つ、フジタモデル DBT-77 (DBT:Design Basis Tornado) (以下「フジタモデル」という。)を採用した。

風速場モデルの適用状況について表 1.7-1 に整理する。

また、設計飛来物の速度設定における評価条件については、「1.8 飛散評価における竜巻の不確かさを踏まえた評価条件の設定について」に示す。

1.7.2 屋外の重大事故等対処設備の固縛装置設計の風速

屋外の重大事故等対処設備に設置する固縛装置は、固縛対象となる重大事故等対処設備(以下「固縛対象設備」という。)が受ける設計竜巻の水平風速を基に設計するが、この際の竜巻の風速分布はフジタモデルを採用し、図 1.7-1 の検討モデルにて算出する。

フジタモデルの風速場における、固縛対象設備に作用する水平方向の風速は、固縛対象設備が地表面に設置されるため、設計竜巻の水平風速の最大値に対し、地表面付近における竜巻と地面との摩擦の影響を考慮した値となる。

設計竜巻を固縛対象設備が受けるときの最大水平風速について、可搬型窒素ガス供給装置の例を図 1.7-2 に示す。

表 1.7-1 女川原子力発電所の竜巻風速場モデルの適用状況 (1/2)

竜巻評価に影響する要素		女川原子力発電所の設定値		備考
基本の風速場モデル		フジタモデル		
設計竜巻 の特性値	最大風速	V_D	100m/s	
	最大接線風速	V_{Rm}	85m/s	
	移動速度	V_T	15m/s	
	最大接線風速半径	R_m	30m	
	流入層高さ	H_i	15m	
	最大気圧低下量	ΔP_{max}	76hPa	
	最大気圧低下率	$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}$	53hPa/s	評価には用いない
設計飛来物の速度 (最大水平風速)		鋼製材	46.6m/s	流入層高さ(H_i) : 17.5m 初期高さ : 11.5m
		砂利	59.3m/s	流入層高さ(H_i) : 17.5m 初期高さ : 8.0m

表 1.7-1 女川原子力発電所の竜巻風速場モデルの適用状況 (2/2)

竜巻評価に影響する要素			女川原子力発電所の設定値	備考
飛散解析	飛来物源の初期高さ	h	物品の実際の設置面と地面の高さ	
	最大水平速度	MV_{Hmax}	フジタモデル風速場に基づく飛散解析の値	解析コード：TONBOS
	最大鉛直速度	MV_{Vmax}	フジタモデル風速場に基づく飛散解析の値	解析コード：TONBOS
	最大飛散距離	$M D$	フジタモデル風速場に基づく飛散解析の値	解析コード：TONBOS
飛来物発生 対策の要否	運動エネルギー	E	上記の飛散解析結果を基に評価	*鋼板：BRL式，コンクリート：修正 NDRC式，Degen式
	貫通限界厚さ	t_p^*		
	離隔距離	D_{req}		
固縛設計	風速分布	—	フジタモデルの風速場での固縛対象設備の中心位置の風速	
	初期高さ	h	固縛対象設備の設置面と地面との高さ	

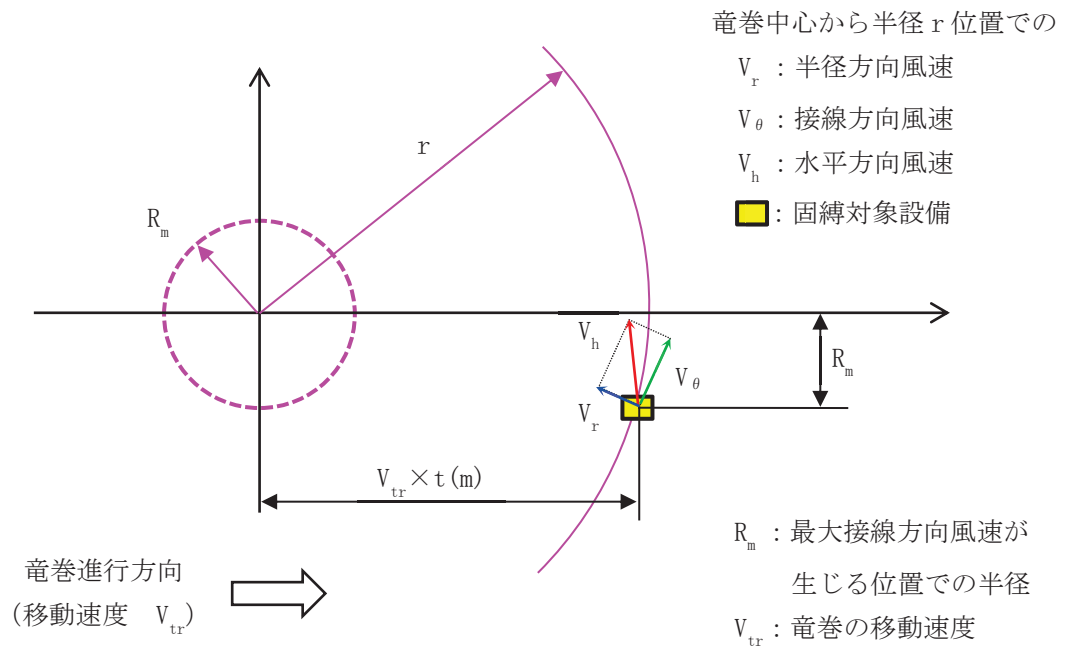


図 1.7-1 固縛対象設備に作用する風速分布の検討モデル

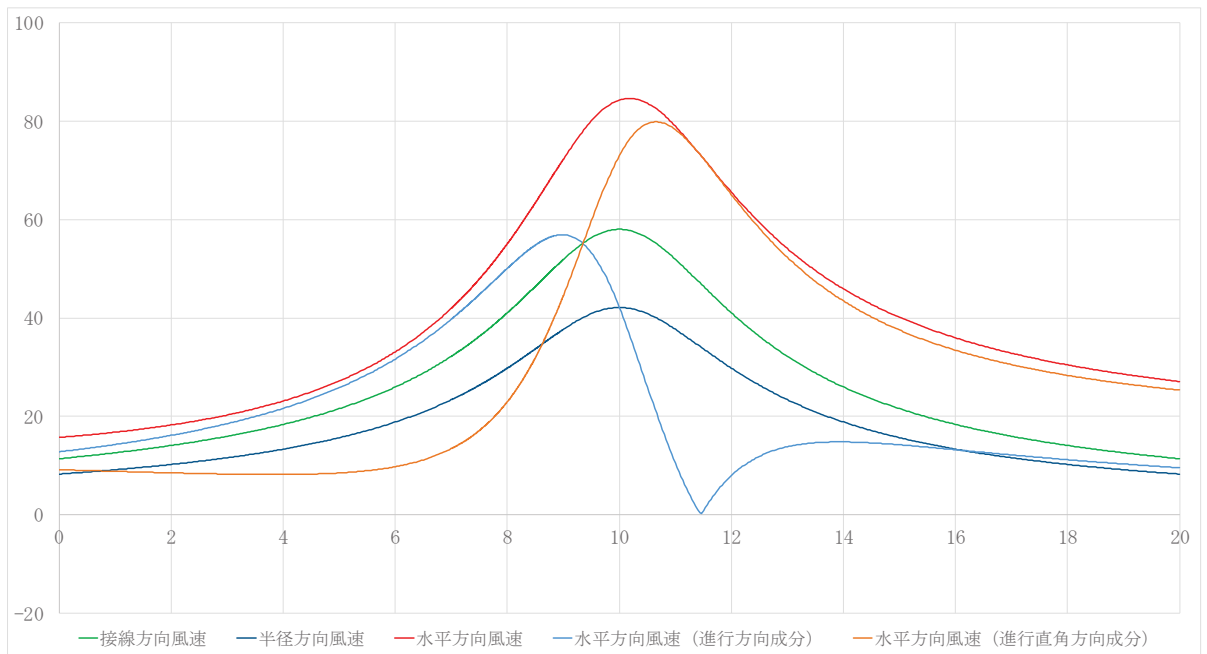


図 1.7-2 可搬型窒素ガス供給装置に作用する設計竜巻の風速の時刻歴分布

1.8 飛散評価における竜巻の不確かさを踏まえた評価条件の設定について

1.8 飛散評価における竜巻の不確かさを踏まえた評価条件の設定について

1.8.1 飛散評価に影響を及ぼすパラメータについて

(1) 風速場モデルの特徴と課題

a. フジタモデルの特徴

当社が採用する竜巻風速場モデルであるフジタモデルは、実際の竜巻の風速場をモデル化したいという米国 NRC の要望を受けて、藤田博士が竜巻観測記録に基づき考案したモデルであり、「地表面付近における竜巻中心に向かう強い水平方向の流れの風速場を流入層としてモデル化している」という他のモデルにはない特徴を持っている。

このように地表面の風速場をモデル化することで、地面からの浮上・飛散評価を行うことが可能となり、発電所敷地内に数多く存在する物品に対する竜巻による影響度合いを把握できる。

竜巻飛来物について、浮上の有無、飛散高さ、飛散距離、最大速度等を適切に把握することで、飛来物の発生防止対策や竜巻の影響を考慮する施設に対する防護対策の範囲や強度について、保守性を確保しつつ実効性の高い竜巻防護対策を実施することが可能となると考えられる。

b. フジタモデルの適用における課題

フジタモデルでは、地表面において水平風速に境界層型の分布がある流入層があり、竜巻コアに向かう強い水平方向の流れが発生する。また、この流れが竜巻コア内では上昇流となる。

この流入層のモデルは、地表面に近づくに従い風速が減少していき、地表面（高さ0m）では0m/sとなるような風速分布となっている。

しかしながら、図1.8-1の写真図化分析に示すとおり、フジタモデルの作成に当たっては、地表面付近の風速ベクトルが作成されていないため、地表面付近の領域に対し、必ずしも十分な分析がなされていない可能性がある。

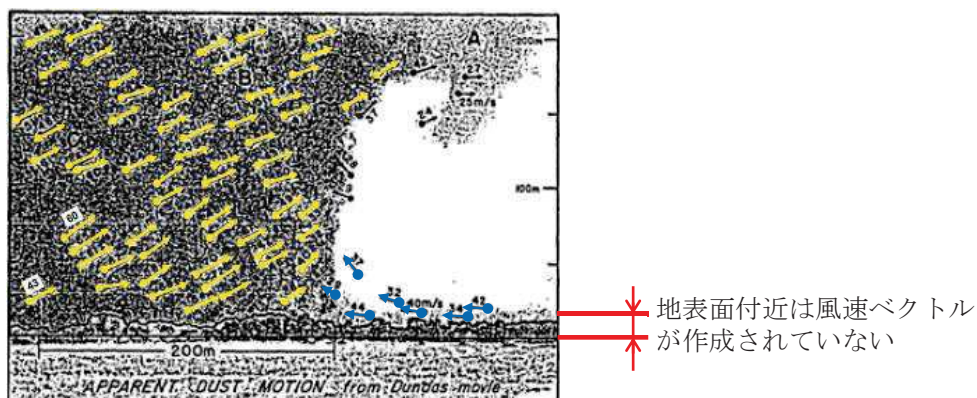
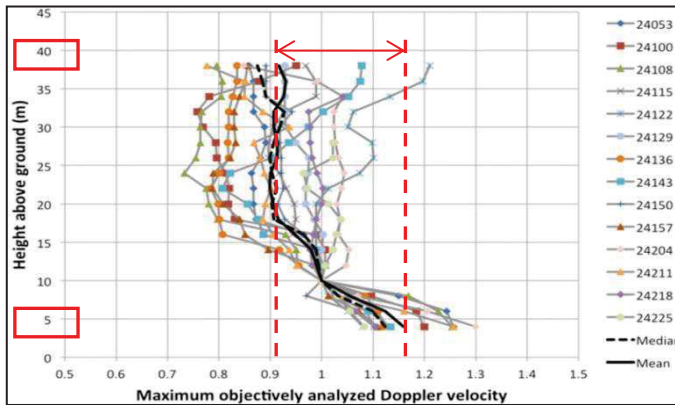


図1.8-1 写真図化分析で作成された風速ベクトル (2)に一部加筆

(2) 至近の研究報告

Kosiba and Wurman 2013⁽³⁾ (図1.8-2) によると、地上高さ約5mにおける風速は地上高さ約40mに比べて約25%大きな値が観測されたことが報告されている。



- 14箇所の観測点における風速を観測した結果、強い風は地上5m付近で観測されており、地上10m付近では約15%減少し、地上10~40mではさらに約10%減少する
- 地上から3m程度は観測を行っていない
- 実線は平均値を表す

図 1.8-2 地上高さと風速分布 ⁽³⁾ に一部加筆

ただし、地上から高さ3m程度は観測していないこと等も踏まえて、本研究の結論としては、地表面付近の竜巻特性として一般化するには更なる観察が必要であるとしている。

よって、現状では、実際の竜巻における地表面付近の状況をモデル化することには、不確かさを含んでいるものとする。

(3) 地表面付近における竜巻風速の不確かさが飛散評価に与える影響

(1)及び(2)で述べたとおり、地表面付近における竜巻風速の不確かさを踏まえると、フジタモデルの流入層高さの設定が飛散評価に影響を及ぼすと考えられることから、飛来物の初期高さを地表面(0m)とし、流入層高さを変化させて設計飛来物(鋼製材)の飛散評価を行った結果、表1.8-1に示すとおり、基本ケースである15m(Fujitaにより提案された算出式による値)に比べて、流入層高さが低い場合には、僅かではあるが評価結果が大きくなることを確認した。これは、地表面付近では流入層高さが小さくなるにつれて流入風の影響を大きく受けることになるためである。

このように、流入層高さは飛散評価結果に影響を与えることが確認された(添付1参照)。

また、フジタモデルは高さ方向に分布をもつ渦モデルであるため、飛来物の初期高さの設定が飛散評価に影響を及ぼすことが考えられる。以上より、飛散評価に影響を及ぼすパラメータである流入層高さ及び飛来物の初期高さの影響について検討を行う必要があると判断した。

表1.8-1 流入層高さの感度解析結果(鋼製材)

風速100m/s 初期高さ0m	流入層高さ(15m:基本ケース)				
	10m	12.5m	15m	17.5m	20m
最大飛散高さ[m]	<u>0.3</u>	0.2	0.2	0.2	0.2
最大飛散距離[m]	<u>8.7</u>	7.3	6.5	5.8	5.0
最大速度(水平)[m/s]	<u>14.0</u>	12.7	11.7	11.0	10.2
最大速度(鉛直)[m/s]	<u>1.1</u>	1.0	0.9	0.9	0.8

1.8.2 フジタモデルにおける流入層高さと初期高さの影響について

(1) 流入層高さと初期高さの感度解析

フジタモデルの飛散評価においては、流入層高さと飛来物の初期高さが飛散評価結果に影響を及ぼすことから、設計飛来物（鋼製材，砂利）に対して、これらを変化させた感度解析を行い、関係性を確認した。

鋼製材及び砂利の流入層高さは、最新の研究（Kosiba⁽³⁾ら，2013）においては、流入層高さは約6m～9mと低く推測されているものの、以下に示すような様々な知見を幅広く確認した結果を踏まえ、流入層高さの感度解析の範囲を6m～17.5mと設定して確認を行うこととした。

- ・Kosiba⁽³⁾らの観測結果から算定：6～9m
- ・原子力安全基盤機構の調査研究報告書⁽³⁾による解析：12m
- ・Fujita Workbook⁽²⁾の竜巻事例で示されている条件で算定：17.5m
- ・工学的モデルによる流入層高さの算出方法による算定：15m

範囲の考え方の詳細は添付2に示す。

(2) 流入層高さと飛来物の初期高さが飛散評価結果に与える影響の感度解析結果

流入層高さ及び飛来物の初期高さの感度解析結果については、添付1に示すとおりであり、初期高さが0m（地表面）付近では、流入層高さが低い場合に僅かに値が大きくなる傾向になるものの、初期高さが高く、流入層高さも高い場合に大きな値が算出されることを確認した。

また、「算出した鉛直速度」に対して、「最大飛散高さ（初期高さを含む）からの自由落下時の最大鉛直速度」は流入層高さの影響を受けず、大きな値が算出されることを確認した。

流入層高さ及び飛来物の初期高さが飛散評価結果に与える影響の感度解析結果の整理結果を表1.8-2に示す。

表 1.8-2 流入層高さ及び飛来物の初期高さが飛散評価結果に与える影響の感度解析結果のまとめ

			初期高さ			
			鋼製材：約 11m まで（地表面除く） 砂利：約 5m まで（地表面除く）		鋼製材：約 11m 以上 砂利：約 5m 以上	
			水平速度	鉛直速度	水平速度	鉛直速度
流入層高さ H_i	H_i 範囲①	鋼製材：6～15m 砂利：6～10m	初期高さの増加に従い値が大きくなる	初期高さの増加に従い値が増加	<ul style="list-style-type: none"> ・最大値が算出される ・最大値となった後は初期高さが増えることによる変化は緩やか 	物品は浮上せず、初期高さの増加に従い値が増加
	H_i 範囲②	鋼製材：15～17.5m 砂利：10～17.5m	H_i 範囲①と同様の傾向であるが、わずかに値が小さい	H_i が大きくなっても、物品が浮上しないため、値に影響しない	<ul style="list-style-type: none"> ・最大値が算出される ・H_i 範囲①と同様の傾向であるが、<u>わずかに値は大きい</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ・H_i が大きくなることで、物品が浮上し、<u>値が大きくなる</u> ・「自由落下時の鉛直速度」は「算出した鉛直速度」より<u>大きい</u>

(3) 不確かさを踏まえた設計飛来物の飛散評価条件の設定

感度解析結果を踏まえて、飛散評価条件は以下のとおり設定した。

a. 流入層高さ

飛散評価結果が厳しくなるよう、感度解析における流入層高さの上限である 17.5m と設定した。

b. 設計飛来物の初期高さ

現場ウォークダウンの結果、仮設資材の設置状況は最大でも約 1.2m 程度である (図 1.8-3) ことが確認されたが、感度解析の結果を踏まえて、飛散評価結果が厳しくなるように、鋼製材の初期高さは約 11m 以上、砂利の初期高さは約 5m 以上とし、水平速度の算出条件の初期高さとして、鋼製材は 11.5m、砂利は 8.0m を適用する。

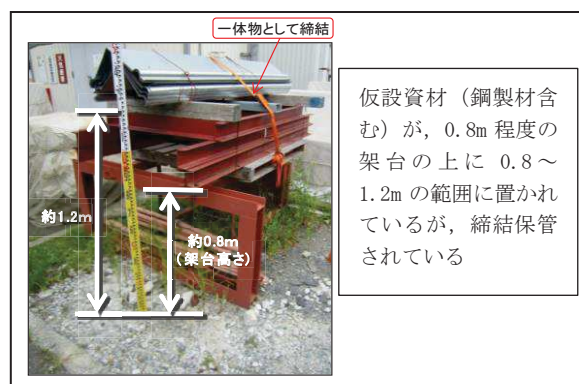


図 1.8-3 仮設資材の配置状況 (例)

c. 高台高さ

女川原子力発電所は海に面し、三方を丘陵地に囲まれた地形となっていることから、各高台からの飛散解析 (高台高さに加えて、初期高さも考慮) を行い、高台から到達する (飛散範囲内に含まれる) 竜巻の影響を考慮する施設等*に対しては、高台を考慮した飛散評価条件とする。また、以下の事項についても考慮する。

- ・実際は構築物や地形による障壁が考えられるが、これらは考慮せず飛散評価を行い、飛散範囲を設定する。
- ・複数の高台から設計飛来物が到達する場合は、設計飛来物が到達する高台のうち最も高い高台から飛散した場合の飛散評価を適用する。
- ・砂利は、竜巻防護ネットの金網を通過した場合に、非常用海水ポンプ (原子炉補機冷却海水ポンプ、高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプ) に影響を及ぼすため、ポンプ室の地上面からピット底面までの深さも考慮した飛散評価条件とする。

注記* : 「1.1 外部事象防護対象施設等のうち竜巻の影響を考慮する施設の抽出について」及び「1.2 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設の選定について」に示す施設を、竜巻影響評価の対象施設 (以下「竜巻の影響を考慮する施設等」という。) とする。

1.8.3 設計飛来物の条件について

前項で示した飛散評価条件に基づき飛散評価した結果を踏まえ、設計飛来物の速度等については、以下のとおり設定する。

(1) 最大水平速度

流入層高さ，初期高さが飛散評価結果に与える影響の感度解析結果における水平速度の最大値を適用する。

- ・鋼製材：46.6m/s
- ・砂利：59.3m/s

(2) 最大鉛直速度

飛散高さから地面まで自由落下した場合の最大鉛直速度を適用する。

- ・鋼製材：16.7m/s～34.7m/s
- ・砂利：22.6m/s～37.9m/s

敷地の高台から設計飛来物が到達する竜巻の影響を考慮する施設等に対しては、高台を考慮した鉛直速度を設定する。

(3) 飛散高さ，飛散距離

飛散評価条件に基づき設定する。

(4) 設計飛来物の諸元

女川原子力発電所における設計飛来物の諸元を表 1.8-3 に示す。

表 1.8-3 女川原子力発電所における設計飛来物の諸元

項目	飛来物の種類		
	砂利	鋼製材	
サイズ (m)	縦×横×高さ 0.04×0.04×0.04 ^{*1}	縦×横×高さ 4.2×0.3×0.2	
質量 (kg)	0.2	135	
初期高さ (m) ^{*2}	8.0	11.5	
計算結果 ^{*3}	最大水平速度 (m/s)	59.3	46.6
	最大鉛直速度 (m/s)	22.6～37.9 ^{*4}	16.7～34.7 ^{*4}
	浮き上がり高さ (m)	18.0	2.6
	飛散距離 (m)	209.5	139.4

注記*1：砂利のサイズは、竜巻防護ネットの金網が目開き 5cm×5cm を 2 枚重ね、4cm×4cm を 1 枚重ねの構造となっていることを考慮して選定

*2：初期高さは感度解析結果を踏まえて最大水平速度の算出条件を適用

*3：設計竜巻風速 100m/s，当社が実施するフジタモデルの風速場を用いた飛散評価手法による結果

*4：敷地内の高台を考慮して設定

図 1.8-4 に、敷地内の高台①～⑯からの設計飛来物（鋼製材，砂利）の飛散範囲，表 1.8-4 及び表 1.8-5 に設計飛来物の最大水平速度，最大鉛直速度を示す。

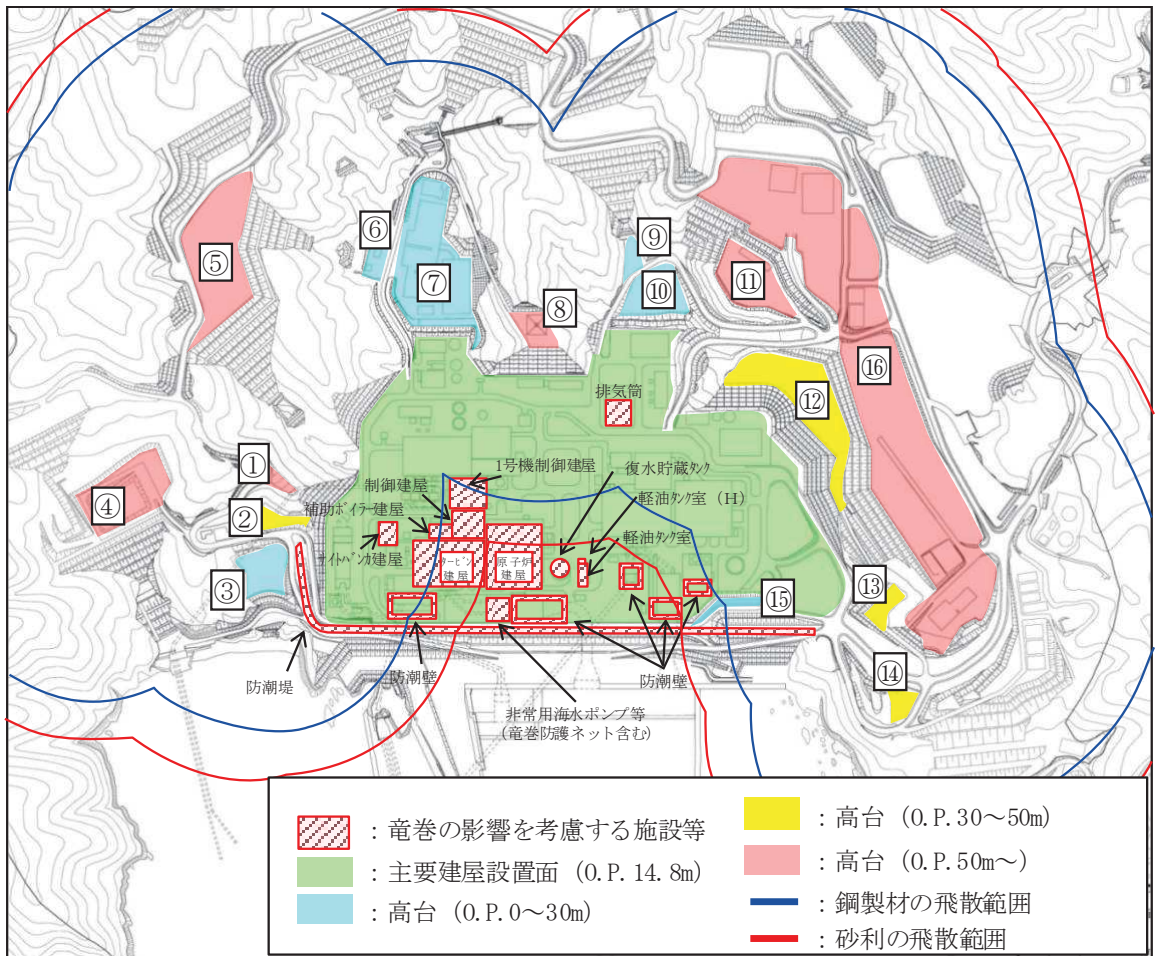


図 1.8-4 各高台からの設計飛来物（鋼製材，砂利）の飛散範囲

表 1.8-4 竜巻の影響を考慮する施設等の飛来物評価条件（鋼製材）

主な竜巻の影響を考慮する施設等*	設計飛来物（鋼製材）が到達する高台のうち最大鉛直速度が最も大きくなる高台* ¹		鋼製材	
			最大水平速度 [m/s]	最大鉛直速度 [m/s]* ²
防潮堤	⑩	0. P. 62m	46. 6	34. 7
タービン建屋	①	0. P. 56m		32. 9
補助ボイラー建屋	①	0. P. 56m		32. 9
サイトバンカ建屋	①	0. P. 56m		32. 9
防潮壁	①	0. P. 56m		32. 9
排気筒	⑧	0. P. 50m		31. 1
1号機制御建屋	⑧	0. P. 50m		31. 1
制御建屋	無		16. 7	
原子炉建屋				
軽油タンク室				
軽油タンク室（H）				
復水貯蔵タンク				
竜巻防護ネット* ³				

注記*1：番号は図 1.8-4 の高台の位置を示す

*2：高台の上空 11.5m の高さからの飛散評価結果（飛散高さからの自由落下速度）

*3：非常用海水ポンプの竜巻防護対策

表 1.8-5 竜巻の影響を考慮する施設等の飛来物評価条件（砂利）

主な竜巻の影響を考慮する施設等	設計飛来物（鋼製材）が到達する高台のうち最大鉛直速度が最も大きくなる高台* ¹		砂利	
			最大水平速度 [m/s]	最大鉛直速度 [m/s]* ²
防潮堤	⑩	0. P. 62m	59. 3	37. 9
タービン建屋	①	0. P. 56m		36. 3
補助ボイラー建屋	①	0. P. 56m		36. 3
サイトバンカ建屋	①	0. P. 56m		36. 3
防潮壁	①	0. P. 56m		36. 3
排気筒	⑧	0. P. 50m		34. 6
1号機制御建屋	①	0. P. 56m		36. 3
制御建屋	①	0. P. 56m		36. 3
原子炉建屋	①	0. P. 56m		36. 3
軽油タンク室	無			22. 6
軽油タンク室（H）				
復水貯蔵タンク				
非常用海水ポンプ				
竜巻防護ネット* ⁴			27. 2* ³	
			22. 6	

注記*1：番号は図 1.8-4 の高台の位置を示す

*2：高台の上空 8.0m の高さからの飛散評価結果（飛散高さからの自由落下速度）

*3：海水ポンプ室の地上面からピット底面までの深さ（11.8m）を考慮

*4：非常用海水ポンプの竜巻防護対策

1.8.4 最大鉛直速度に対する保守性の確認

(1) 原子力発電所の竜巻影響評価ガイドに対する考え方

原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（以下「NRA ガイド」という。）では、設計飛来物の最大鉛直速度を以下のとおり設定できると示されている。

【NRAガイドより抜粋】

解説 4.3.1.3.3 設計飛来物の速度の設定

(1) 基本的な考え方

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 (${}_M V_{Hmax}$) 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 (V_D) を設計飛来物の最大水平速度として設定してもよい。

設計飛来物の最大鉛直速度 (${}_M V_{Vmax}$) 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^(参4)を参考に設定した下式により算定してもよい。

$${}_M V_{Vmax} = (2/3) \cdot {}_M V_{Hmax} \cdots (4.3)$$

ここで、 ${}_M V_{Hmax}$ は、設計飛来物の最大水平速度を表す。

(2) NRA ガイドに対する考え方

設計飛来物の最大鉛直速度については、NRA ガイドで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し、LES (Large-eddy-simulation) を用いた飛来物の飛散評価結果が例示されている。しかしながら、LES を実際の竜巻スケールの評価に適用するには、境界条件の設定等の様々な課題がある。

このため、当社は藤田博士が実観測に基づき考案し、実際の被害状況（飛散距離）に対しても再現性がある竜巻渦モデルであるフジタモデルを用いた飛散評価を行っている。

(3) 最大鉛直速度の設定における保守性

最大鉛直速度の設定においては、フジタモデルの風速場を用いて飛散評価を実施するに当たり、風速場モデルの不確かさ及び実際の竜巻現象に対する不確かさを「流入層高さ」及び「飛来物の初期高さ」の設定において考慮している。

また、当社の竜巻影響評価においては、「基準竜巻の設定」から「竜巻の影響を考慮する施設等の構造健全性の確認」までの評価全体において不確かさを考慮した設定としていることから、竜巻影響評価全体としての保守性が確保されている。

1.8.5 竜巻の影響を考慮する施設等に対する評価条件の設定

設備影響評価において、飛来物の衝突を想定する範囲（影響範囲）は、保守的に「設計飛来物が到達する高さ」以上の範囲もカバーする観点から、図 1.8-5 に示すとおり、竜巻の影響を考慮する施設等の全面に設計飛来物が影響を及ぼすものとして評価する。これにより、飛散速度の設定から設備影響評価までの一連の評価において保守性を考慮している。

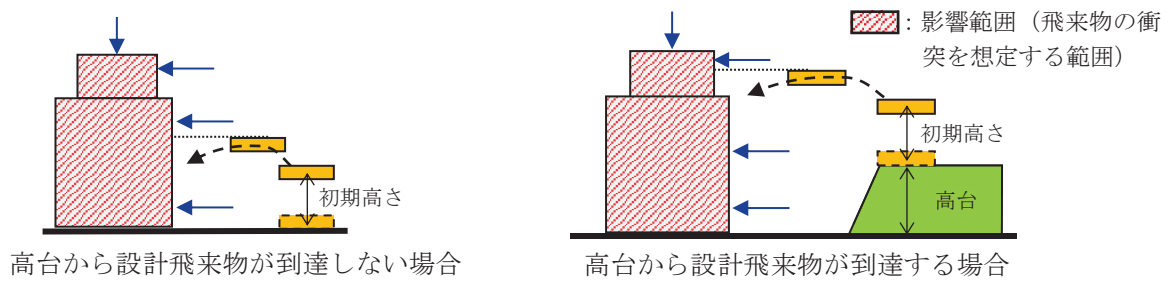


図1.8-5 影響範囲

以上

(添付資料)

1. 流入層高さが地表面付近の物体に与える影響
2. 流入層高さの感度解析範囲の考え方
3. 鉛直速度に対する流入層高さの影響
4. 流入層高さを変化させた場合の感度解析結果

参考文献

- (1) 江口譲, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 竜巻による物体の浮上・飛来解析コード TONBOS の開発, 電力中央研究所 研究報告 N14002, 2014.
- (2) Fujita, T.T., Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications, U.Chicago, 1978.
- (3) Karen A. Kosiba and Joshua Wurman: The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. Weather and Forecasting, 28, 1552-1561, 2013.
- (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.

流入層高さが地表面付近の物体に与える影響

フジタモデルを用いた飛散評価では、竜巻の流入層と地表面付近の物体の初期高さが影響する。ここでは、流入層のモデル化の概要及び設計飛来物の飛散評価に対する流入層高さ(範囲:6m~17.5m)の感度解析結果を示す。

1. フジタモデルにおける流入層高さのモデル化

(1) 風速場の概要

フジタモデルを用いた飛散評価における風速場は図 1 に示すように、半径方向に 3 つの領域(内部コア、外部コア、最外領域)で構成され、鉛直方向は流入層と非流入層で構成される。

流入層では竜巻中心方向に向かう強い流れ(流入風)があり、この空気の流れ込みが外部コア内での上昇風となる。

流入風の最大風速は流入層の上限で発生するようにモデル化しており、地表面に近づくにつれて連続的に減衰する(図 2 参照)。

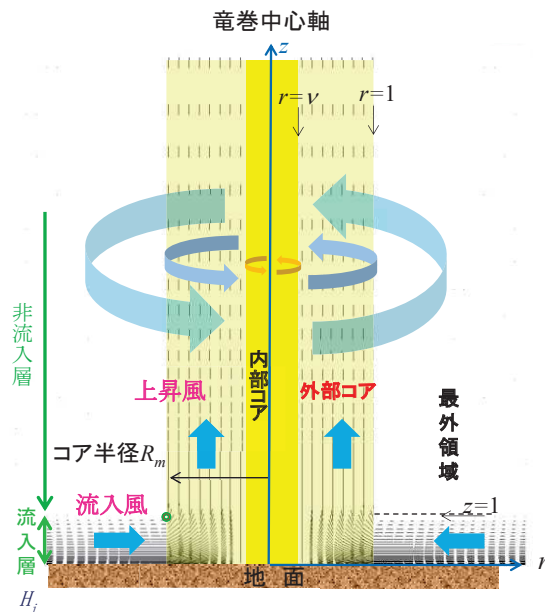


図 1 フジタモデルの飛散評価手法を用いた風速場 (イメージ)

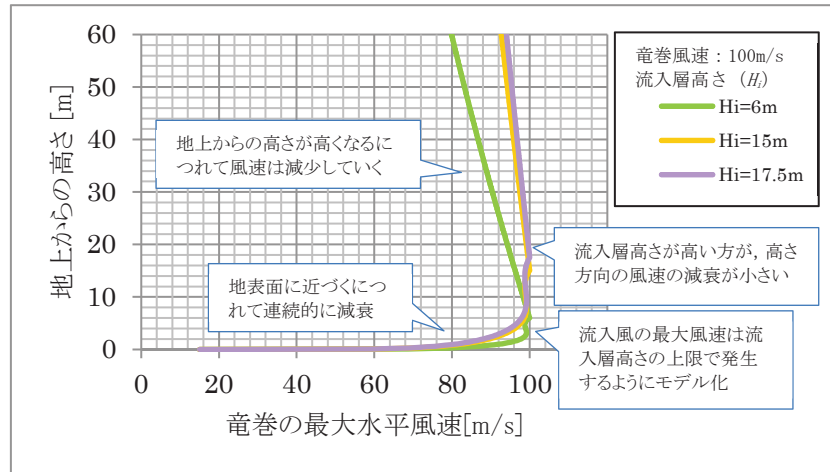


図2 フジタモデルの風速場における最大水平風速と地上からの高さの関係
($H_i=6m, 15m, 17.5m$ の場合)

(2) 地面効果の影響

地表面付近の物品については、保守的に物品が浮上しやすくするために、物品の形状に応じた揚力（地面効果）を加えている。揚力は空力パラメータに応じて決定され、物体高さの3倍までの高さの範囲で連続的に減衰するように作用する。

(3) 風速場における上昇風及び流入風

流入層高さが異なる場合でも、竜巻の規模（風速、外部コア半径等）が同じ場合には、流入風速の最大値は変わらないことから、流入層内における同一の高さの物品は、流入層高さが高い場合に比べて、低い場合の方が大きな流入風速の影響を受ける（図3参照）

また、流入層高さが高い場合の方が、流入層内の流量が大きいため、流入層高さが低い場合に比べて、外部コア内の上昇風速が大きくなる（図3参照）

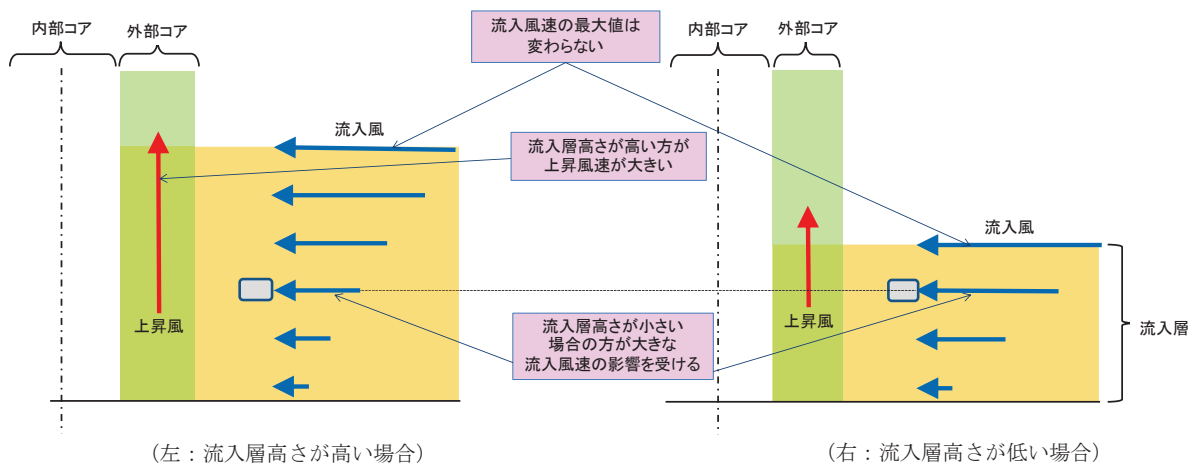


図3 風速場における流入風と上昇風のイメージ

2. 流入層高さが飛散評価に与える影響の感度解析結果

設計飛来物（鋼製材，砂利）に対し，流入層高さの感度解析の範囲を6m～17.5mとした場合の感度解析結果及び考察を示す。

2.1 鋼製材の感度解析結果の傾向及び影響

(1) 最大水平速度に対する影響

特徴的な傾向として，初期高さが増加するに従い，約11mまでは水平速度が大きく増加し，その後の変化は緩やかとなる。（図4，5参照，a.～c.は物品の初期高さを示す）

- a. 初期高さが0m（地表面）では，地面効果による大きな揚力を受けて，わずかに浮上する。また，流入層高さが低い方が流入風は大きく，地面効果により高く浮上する。このため，高い流入風の影響を受けることとなり，流入層高さが低い方が水平速度はわずかに大きくなる。
- b. 初期高さが低い場合（約11mまでの範囲（地表面除く））は，流入層高さが低い方が，流入層内で相対的に大きな流入風を受けるため，わずかであるが値が大きくなる。
- c. 初期高さが高い場合（約11m以上の範囲）は，図4に示すように流入層高さが高い方が大きな竜巻の水平風速の影響を受けることから，水平速度は大きくなる。初期高さが高くなるにつれて，竜巻の水平風速は緩やかに減少していくようにモデル化していることから，水平速度も同様に低下していく。

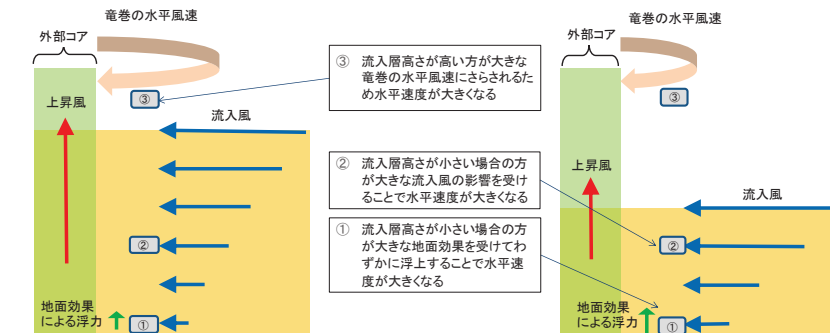


図4 飛散イメージ（水平速度，左：流入層高さが高い，右：流入層高さが低い）

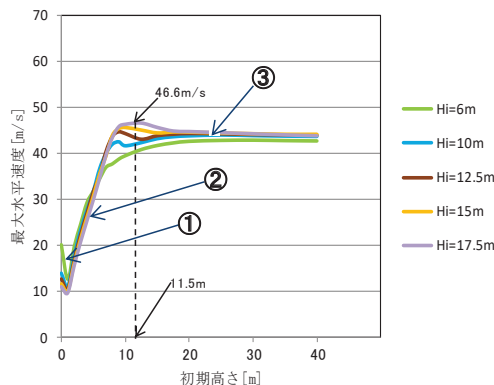


図5 水平速度の感度解析結果（鋼製材）

(2) 最大鉛直速度に対する影響

特徴的な傾向として、鋼製材の浮上条件に到達しない初期高さ約 11m までは、ほぼ同じ鉛直速度となる。(図 6, 7 参照, a. ~d. は物品の初期高さを示す)

- a. 初期高さが 0m (地表面) では、地面効果による大きな揚力を受けて、わずかに浮上する。流入層高さが低い方が、より大きい流入風によって地面効果を大きく受けるようにモデル化しているため、わずかに高く浮上する。このため、高い流入風の影響を受けて、鉛直速度がわずかに大きくなる。
- b. 初期高さが低い場合 (約 11m までの範囲 (地表面除く)) では、流入層高さが高い場合でも浮上条件に到達せず、飛散高さが変わらないことから、鉛直速度は流入層高さが影響を受けない。
- c. 初期高さが約 11m からは、流入層高さが高い方が浮上するため、鉛直速度が増加する。(図 7 右参照)
- d. 初期高さが高い場合 (約 11m 以上の範囲) では、流入層高さが高くなるに連れ、竜巻コア内の上昇風の影響を受けて浮上するため、鉛直速度が増加する傾向となる。

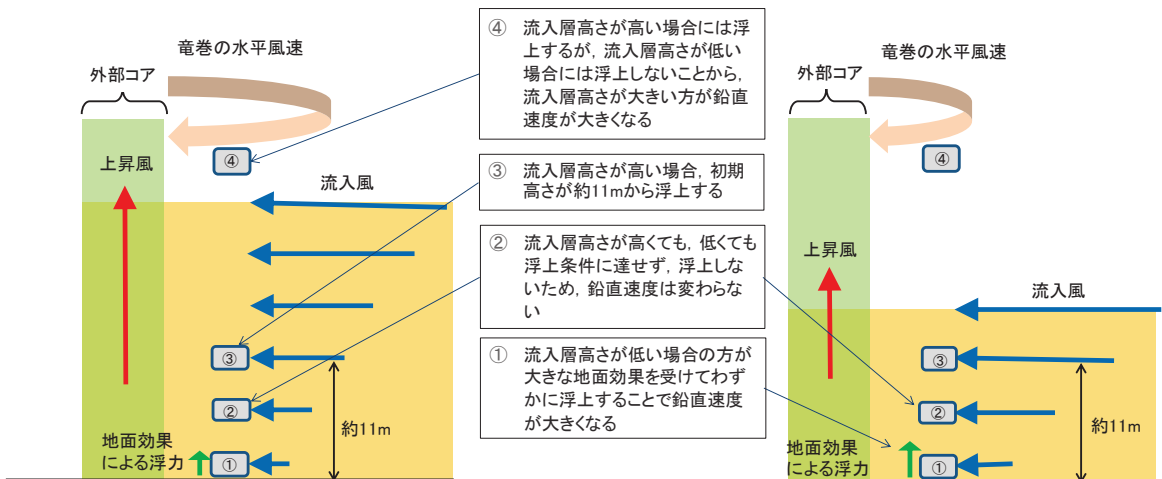


図 6 飛散イメージ (鉛直速度, 左: 流入層高さが高い, 右: 流入層高さが低い)

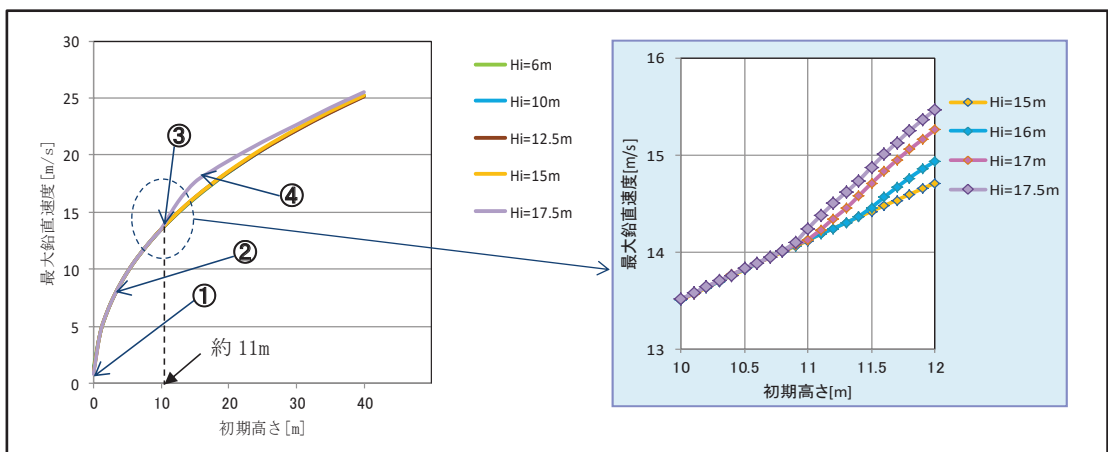


図 7 鉛直速度の感度解析結果 (鋼製材)

2.2 砂利の感度解析結果の傾向及び影響

特徴的な傾向として、鋼製材同様に初期高さが増加するに従い、約 8m までは水平速度が大きく増加し、その後の変化は緩やかとなる。

(1) 最大水平速度に対する影響 (図 8 参照)

- ・初期高さが 0m (地表面) 付近では、地面効果による大きな揚力を受けて、わずかに浮上する。流入層高さが低い方が流入風が大きく、地面効果により高く浮上する。このため、高い流入風の影響を受けて、水平速度はわずかに大きくなる。
- ・初期高さが増加するに従い、約 5m までは水平速度が大きく増加し、その後の変化は緩やかになる。
- ・流入層高さの影響は鋼製材と同様の傾向である。

(2) 最大鉛直速度に対する影響 (図 9 参照)

- ・初期高さが 0m (地表面) 付近では、地面効果による大きな揚力を受けて、わずかに浮上する。流入層高さが低い方が流入風が大きく、地面効果により高く浮上する。このため鉛直速度はわずかに大きくなる。
- ・初期高さが低い場合 (約 5m までの範囲) では、流入層高さが高い場合でも浮上条件に到達せず、飛散高さが変わらないことから、鉛直速度は影響を受けない。
- ・初期高さが高い場合 (約 5m 以上の範囲) では、流入層高さが高くなるに従い、竜巻コア内の上昇風の影響を受けて浮上することから、鉛直速度が増加する傾向となる。
- ・流入層高さの影響は鋼製材と同様の傾向である。

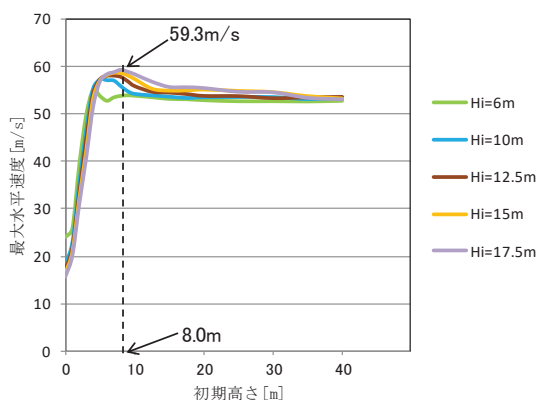


図 8 水平速度の感度解析結果 (砂利)

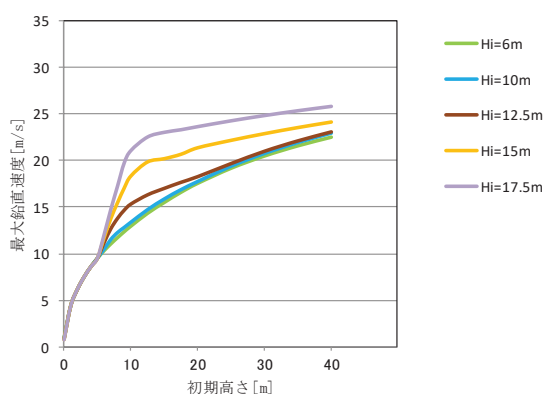


図 9 鉛直速度の感度解析結果 (砂利)

2.3 鉛直速度に対する自由落下速度の感度

物体が風速場内で落下する場合、上昇風を受けるため、純粋な自由落下と挙動が異なることから、鉛直速度における自由落下速度の影響について確認した。

(1) 自由落下速度の影響（図 10、11 参照）

- 物品は竜巻の風速場の影響により浮上し、地表面に落下する挙動となるため、自由落下時の鉛直速度の影響が支配的となる。
- 「算出した鉛直速度」と飛散評価により得られる「最大飛散高さからの自由落下時の最大鉛直速度」を比較すると、「算出した鉛直速度」は上昇風の影響を受け、落下時に減速されるため、最大飛散高さからの自由落下時の最大鉛直速度の方が大きく算出されることを確認した。
- 流入層高さは上昇風速の大きさに影響を及ぼすことから、「算出した鉛直速度」は流入層高さの影響を受ける。

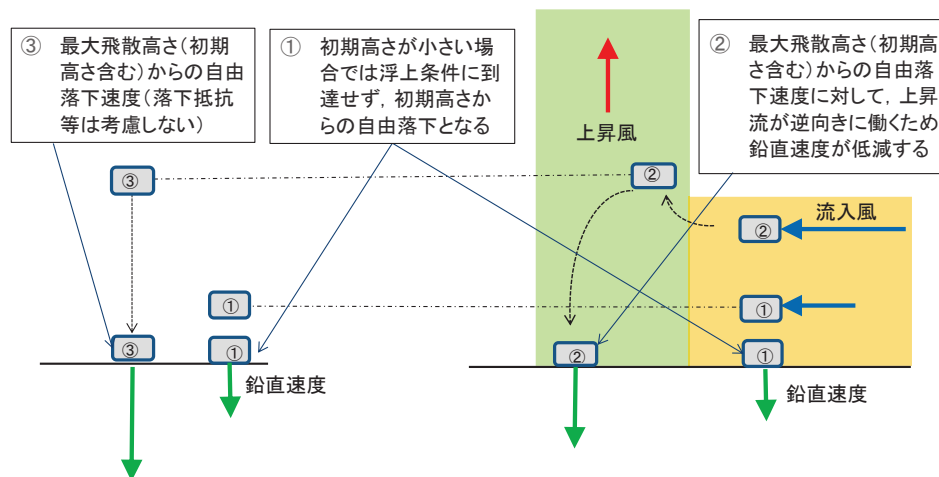
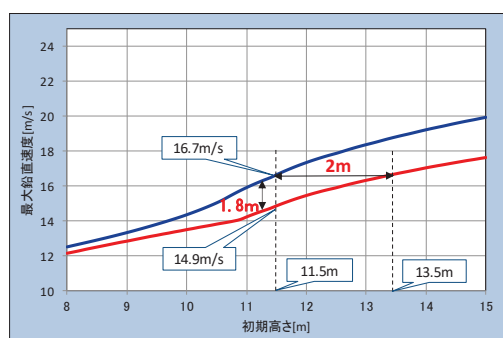


図 10 鉛直速度のイメージ

(左：自由落下による鉛直速度，右：風速場の影響を受ける鉛直速度)



・ 「自由落下による鉛直速度」の増加分（約 1.8m/s）は「算出した鉛直速度」における「初期高さ：約 2m」の増加に相当する

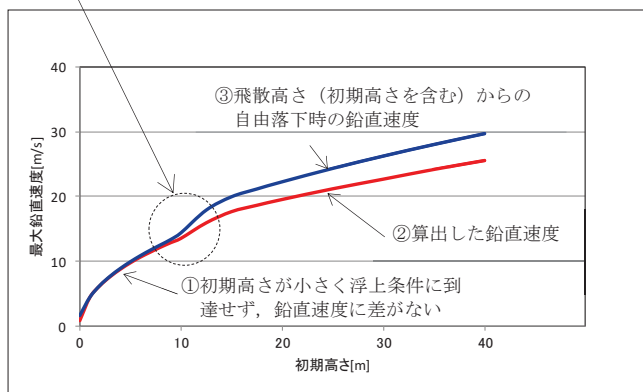


図 11 鉛直速度と初期高さの関係（鋼製材，流入層高さ：17.5m）

以上

流入層高さの感度解析範囲の考え方

流入層高さは飛散評価に影響を与えることから、適切な流入層高さで評価する必要がある。この影響を確認するにあたり、流入層高さの感度解析範囲を 6m～17.5m と設定した。

以下に流入層高さの感度解析範囲の考え方について示す。

1. 流入層高さの感度解析範囲の考え方

(1) 最新の竜巻観測・研究結果

Kosiba⁽¹⁾らの観測結果においては、外部コア半径 (R_m) が約 50m の竜巻に対して、竜巻中心方向への流入風 (1m/s～7m/s) は地面から 10～14m 以下で発生したと観測していることから、外部コア半径と流入層高さの比 (η) は 0.2～0.3 以上と推測される。この場合、 R_m が 30m の場合には流入層高さ (H_i) は 6m～9m 程度と算定される。

(2) 解析による流入層高さの推測

原子力安全基盤機構の調査研究報告書⁽²⁾による解析においては、 R_m が 30m における η は 0.4 程度であり、 H_i は 12m 程度となっている。

(3) Fujita Workbook⁽³⁾による竜巻事例に対する分析による流入層高さの推測

Fujita Workbook⁽³⁾では竜巻事例を可視化して分析しており、 R_m が約 120m と大きな竜巻に対して、 H_i は約 70m と観測していることから、 η は 0.58 ($120/70=0.583$) であると記載されている。文献⁽⁴⁾では流入層高さは R_m に比例するとされているが、 R_m が 30m と比較的小さな竜巻に $\eta=0.58$ を適用した場合には、 H_i は 17.5m となる。

(4) 工学的モデルによる流入層高さの設定

Fujita Workbook⁽³⁾における工学的モデルとして、 H_i を R_m の関数として以下のとおり設定しており、設計竜巻の最大風速 $V_D=100\text{m/s}$ の場合、 $R_m=30\text{m}$ であり、 η が約 0.5 であることから、 $H_i=15\text{m}$ と算出される。

$$H_i = \eta R_m \quad (1)$$

η : 流入層高さ と 外部コア半径 の比

$$\eta = 0.55(1 - \nu^2) \quad (2)$$

ν : 内部コア半径 と 外部コア半径 の比

$$\nu = 0.9 - 0.7 \exp(-0.005 R_m) \quad (3)$$

3. 流入層高さの感度解析範囲の設定について

上記の検討を踏まえると、最新の研究⁽¹⁾で流入層高さは約 6m～9m と低く推測されているものの、過去の知見を幅広く確認した結果、 R_m が 30m の竜巻に対する流入層高さの感度解析範囲は 6m～17.5m が妥当と判断した。

参考文献

- (1) Karen A. Kosiba and Joshua Wurman : The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. *Weather and Forecasting*, 28, 1552-1561, 2013 .
- (2) 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.
- (3) Fujita, T. T., *Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications*, U. Chicago, 1978.
- (4) Howard B. Bluestein, *Severe Convective Storms and Tornadoes -- Observations and Dynamics--*, Springer, 2013.

鉛直速度に対する流入層高さの影響

1. 風速場モデルの影響の確認

最大鉛直速度は自由落下による最大速度に対して、竜巻コア内の上昇風が影響を及ぼすことから、以下の評価結果の比較によって影響を確認した。

- ・ 飛散評価により得られる最大鉛直速度
- ・ 飛散評価により得られる最大飛散高さからの自由落下時の最大鉛直速度

図 1 に示すとおり、流入層高さ (H_f) が 17.5m と高い場合には、鉛直速度は大きな上昇風の影響を受けることになるが、最大飛散高さからの自由落下時の最大鉛直速度はこの影響を受けないことから、飛散高さからの自由落下時の最大鉛直速度が大きく算出されることを確認した。

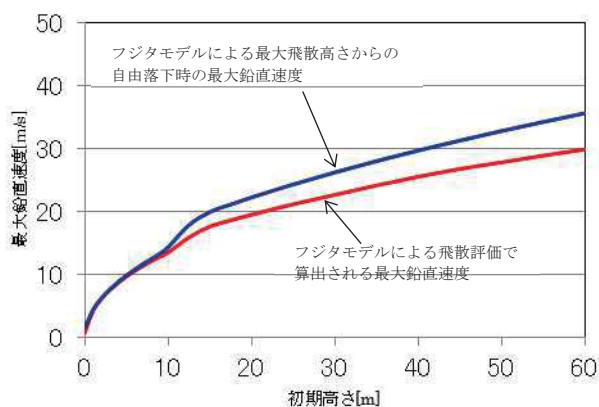


図 1 最大鉛直速度と初期高さの関係 (鋼製材, $H_f=17.5\text{m}$)

2. 流入層高さの最大鉛直速度への影響

流入層高さを変化させたときの最大鉛直速度及び最大飛散高さから自由落下した場合の鉛直速度への影響を確認した。結果を表 1 及び表 2 に示す。

鋼製材の場合には、 $H_f=17.5\text{m}$ のときの飛散高さから自由落下した場合の最大鉛直速度が最大であり、16.7m/s となった。また、砂利の場合には $H_f=17.5\text{m}$ のときの飛散高さから自由落下した場合の最大鉛直速度が最大であり、22.6m/s となった。

表 1 流入層を変化させた場合の飛散高さ及び自由落下速度 (鋼製材)

条件	風速：100m/s, 初期高さ：11.5m				
	6.0	10	12.5	15	17.5
流入層高さ (H_f) [m]	6.0	10	12.5	15	17.5
飛散評価により得られる最大鉛直速度 [m/s]	14.4	14.4	14.4	14.4	14.9
飛散高さ [m]*	11.5	11.5	11.7	12.8	14.1
飛散高さから自由落下した場合の最大鉛直速度 [m/s]	15.0	15.0	15.1	15.8	16.7

注記*：飛散高さは初期高さを含んだ値

表2 流入層を変化させた場合の飛散高さ及び自由落下速度（砂利）

条件	風速：100m/s, 初期高さ：8.0m				
	6.0	10	12.5	15	17.5
流入層高さ(H_i) [m]	6.0	10	12.5	15	17.5
飛散評価により得られる最大鉛直速度[m/s]	11.7	12.3	13.8	15.5	17.2
飛散高さ[m]*	8.2	12.0	15.6	20.2	26.0
飛散高さから自由落下した場合の最大鉛直速度[m/s]	12.7	15.4	17.5	19.9	22.6

注記*：飛散高さは初期高さを含んだ値

流入層高さを変化させた場合の感度解析結果

流入層高さが飛散評価に与える影響を確認するため、設計飛来物である鋼製材及び砂利に対する流入層高さの感度解析を実施した。

感度解析の設定条件を表 1、鋼製材に対する感度解析の結果を表 2～表 5 及び砂利に対する感度解析の結果を表 6～表 9 にそれぞれ示す。

表 1 感度解析条件

項目	設計飛来物の種類	
	砂利	鋼製材
設計竜巻風速[m/s]	100	
サイズ[m]	縦×横×高さ 0.04×0.04×0.04	縦×横×高さ 4.2×0.3×0.2
質量[kg]	0.2	135
流入層高さ(H _i) [m]	6, 10, 12.5, 15, 17.5	
飛来物評価手法	フジタモデルの風速場を用いた飛来物評価手法	
初期高さ[m]	初期高さは飛来物の地面からの高さを示す（高台からの飛散評価の場合は、「高台高さ+初期高さ」からの飛散評価を実施）	

表2 鋼製材に対する感度解析結果 (O.P. 14.8m)

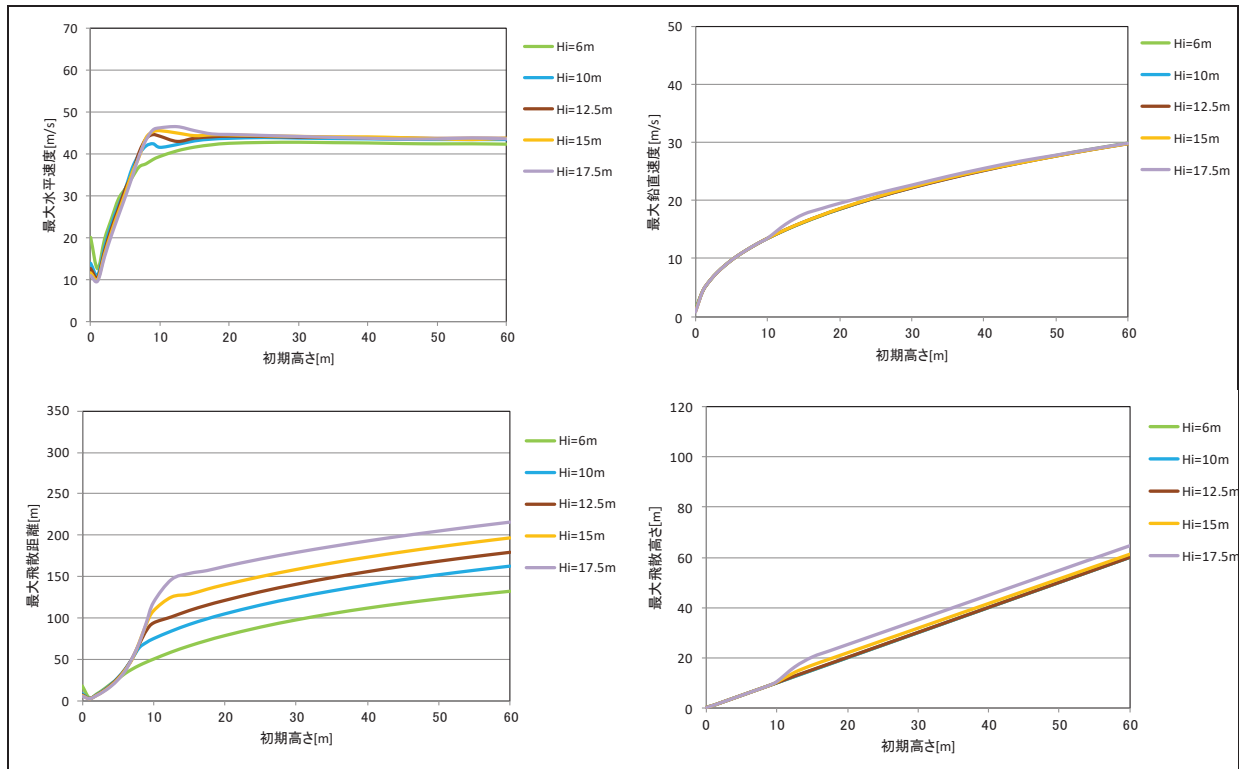


表3 鋼製材に対する感度解析結果 (O. P. 50m)

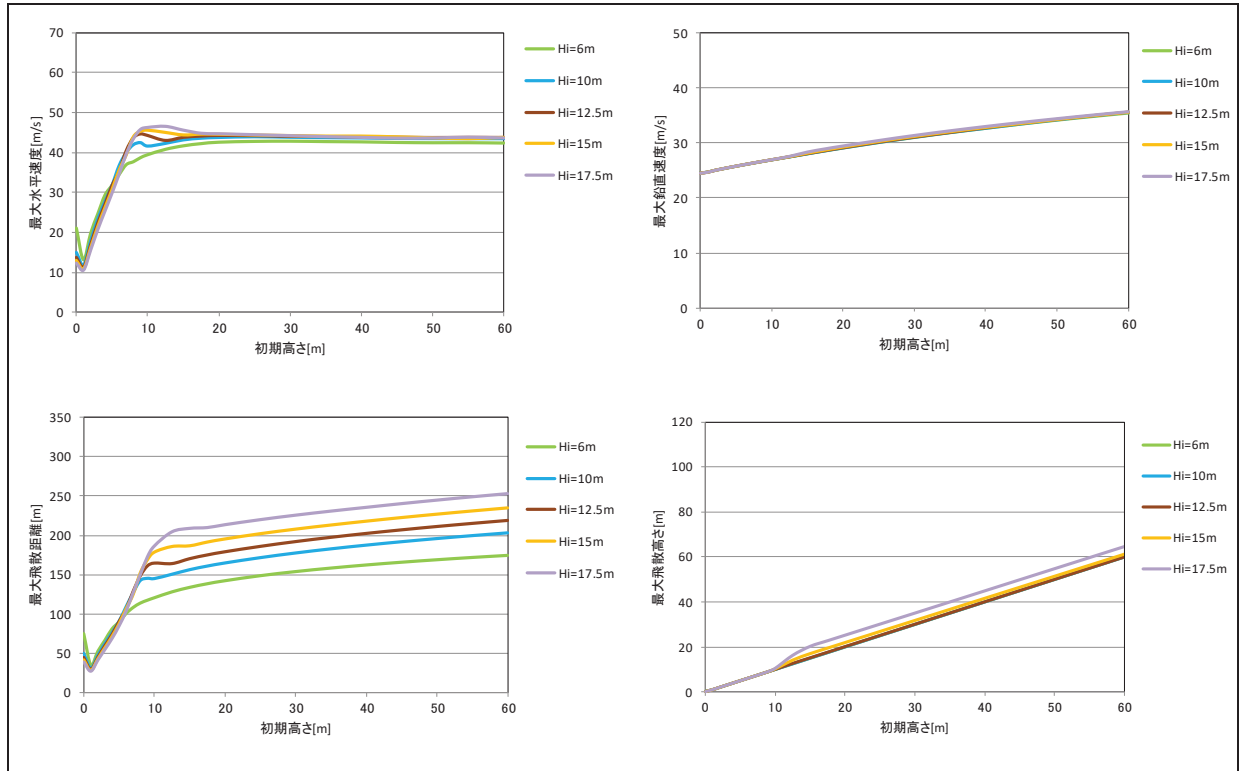


表4 鋼製材に対する感度解析結果 (O. P. 56m)

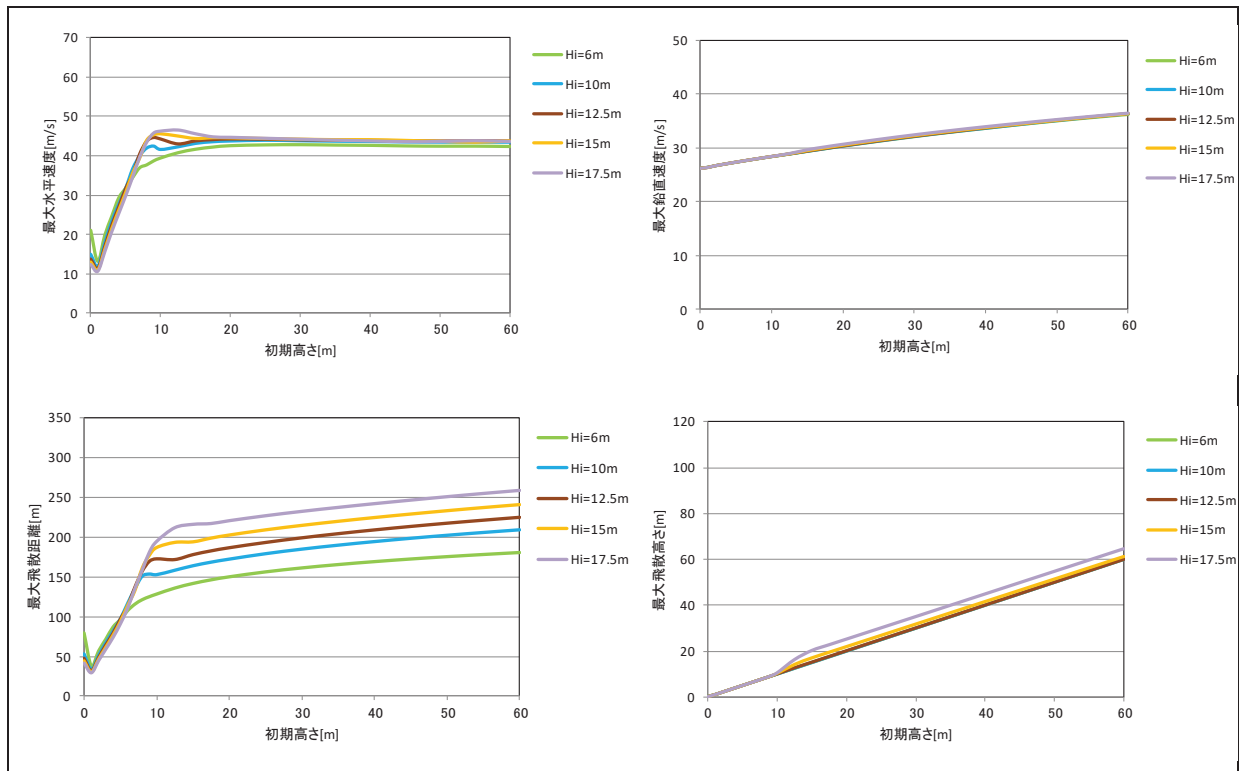


表5 鋼製材に対する感度解析結果 (O. P. 62m)

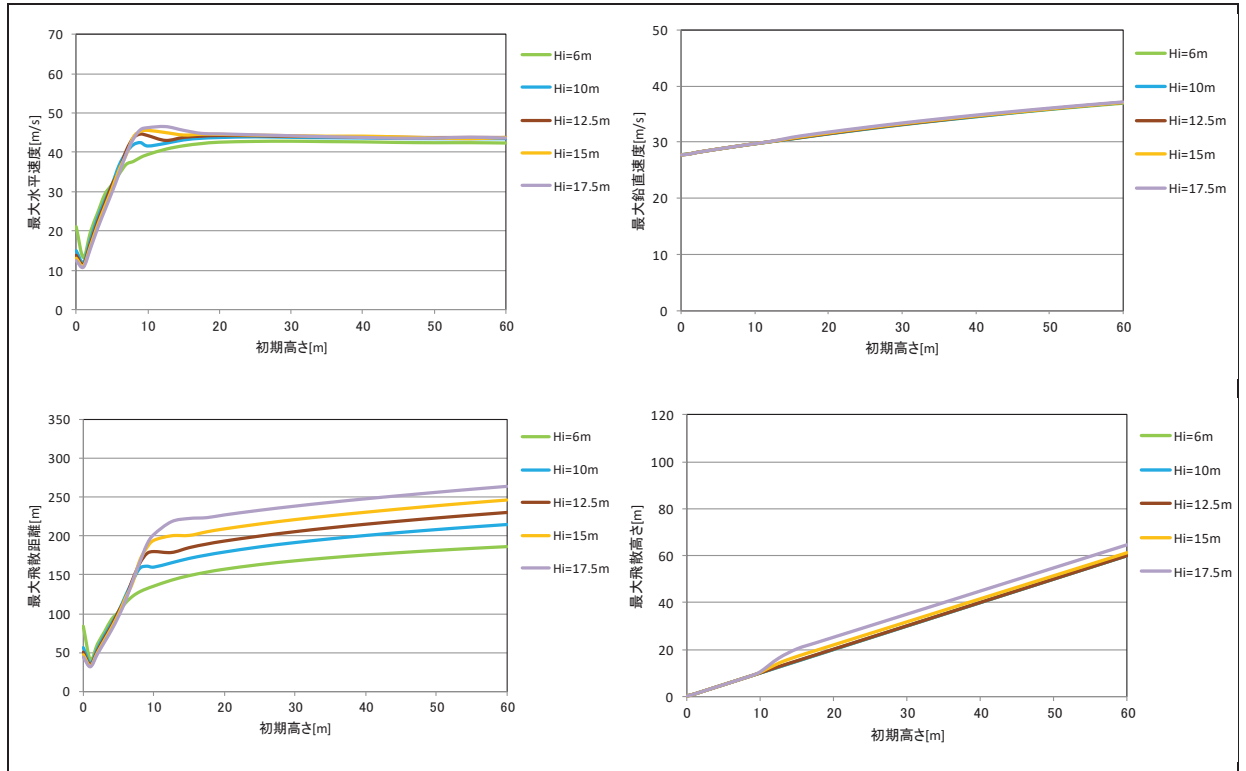


表6 砂利に対する感度解析結果 (O. P. 14. 8m)

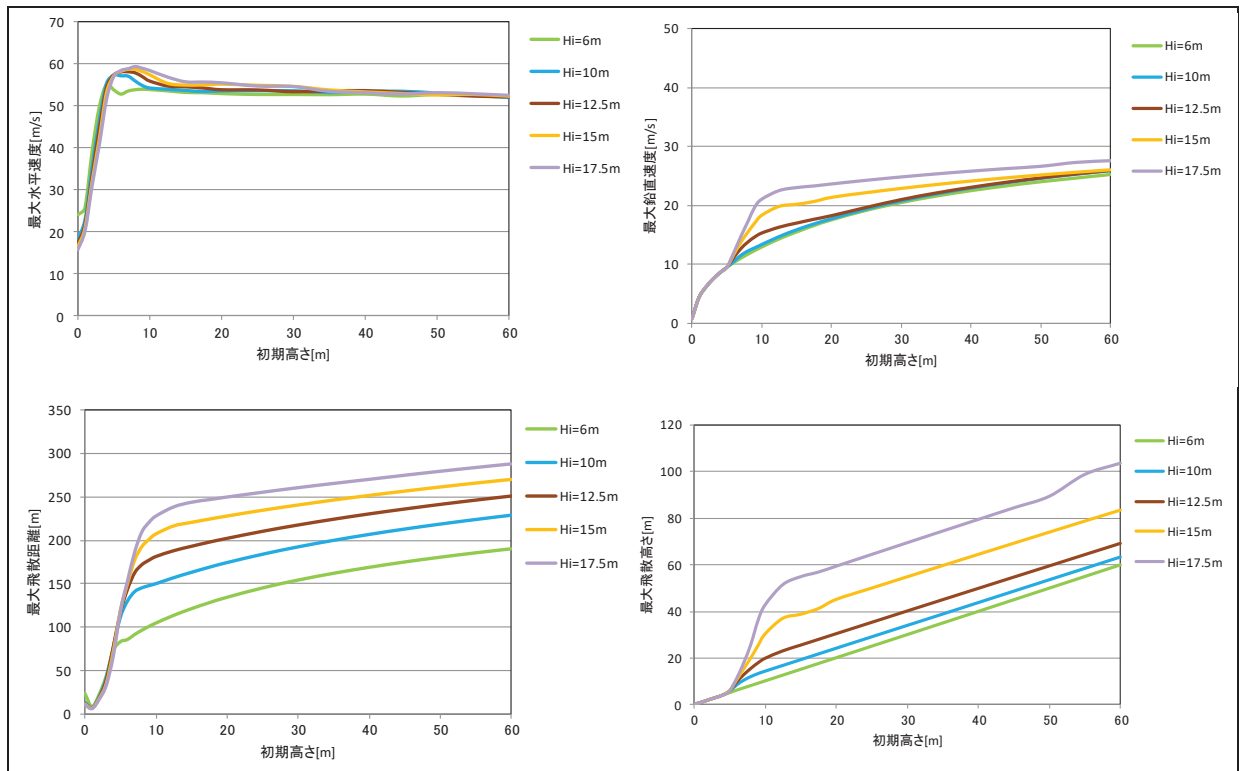


表7 砂利に対する感度解析結果 (O. P. 50m)

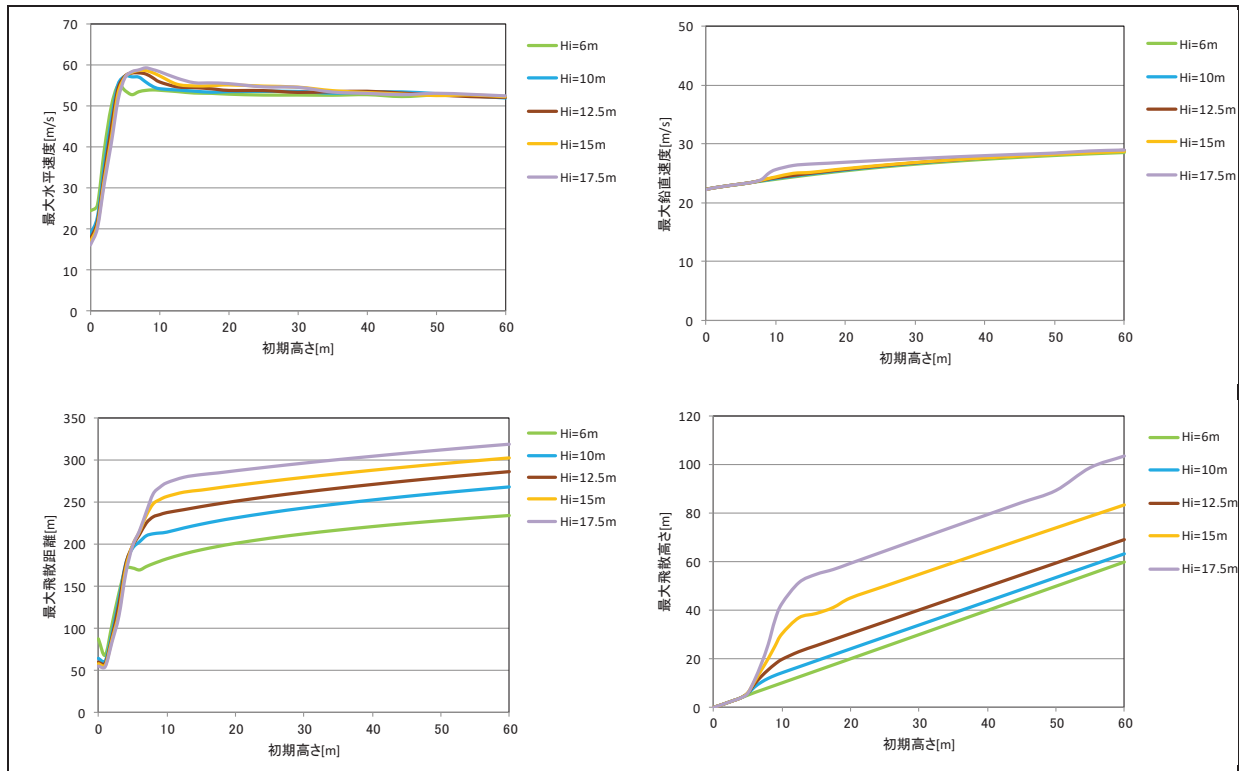


表8 感度解析結果 (砂利 O. P. 56m)

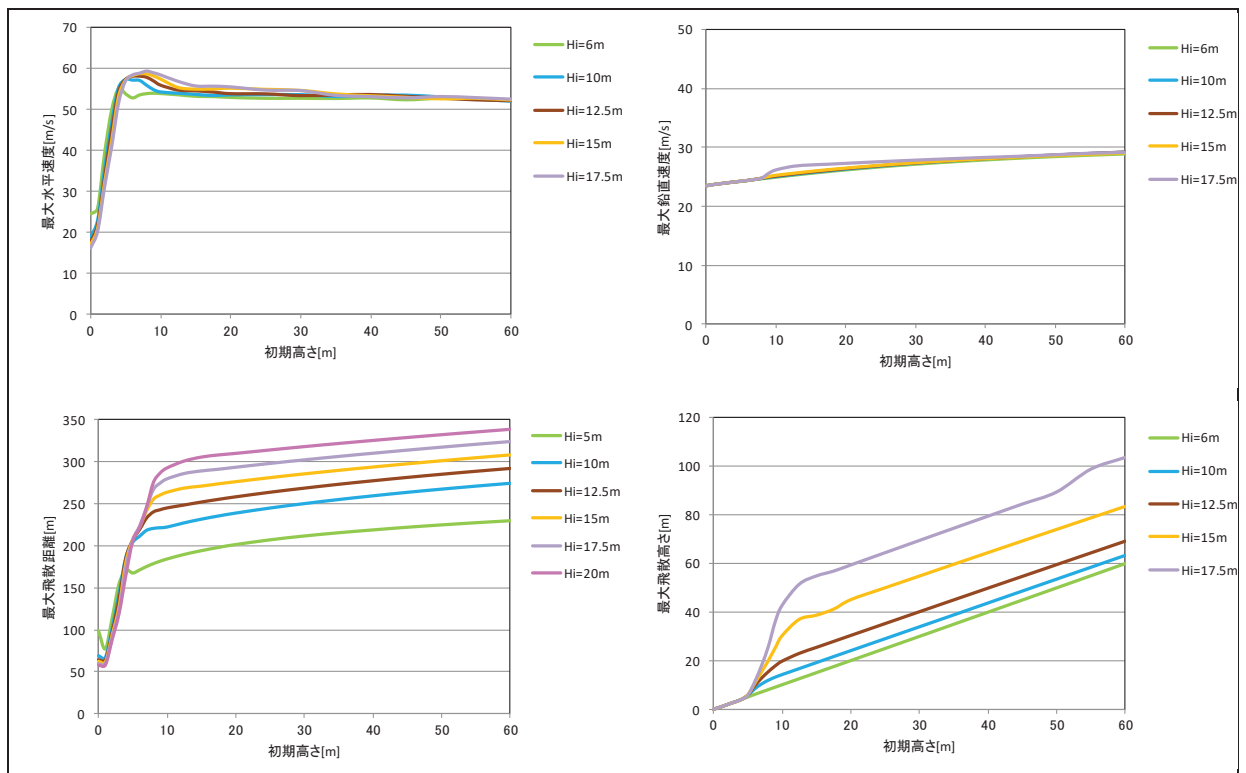


表9 感度解析結果 (砂利 O.P. 62m)

