

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (15/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所 [※]	竜巻	
					評価	防護方法
第51条 原子炉格納容器下部の熔融炉心を冷却するための設備	格納容器スプレイ (格納容器スプレイポンプ) (交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合)	格納容器スプレイポンプ 格納容器スプレイ冷却器 配管等	緩和設備	A/B	○	建屋内
		燃料取替用水ピット	緩和設備	R/B	○	建屋内
		原子炉補機冷却設備	48条に記載		—	—
	代替格納容器スプレイ (代替格納容器スプレイポンプ) (交流動力電源及び原子炉補機冷却機能が健全である場合)	代替格納容器スプレイポンプ 燃料取替用水ピット 補助給水ピット 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		代替格納容器スプレイ (代替格納容器スプレイポンプ) (代替電源) (全交流動力電源又は原子炉補機冷却機能喪失時)	代替格納容器スプレイポンプ 燃料取替用水ピット 補助給水ピット 配管等	緩和設備	R/B	○
	熔融炉心の落下遅延・防止	炉心注水 (高压注入ポンプ) 炉心注水 (余熱除去ポンプ) 炉心注水 (充てんポンプ) 代替炉心注水 (B-格納容器スプレイポンプ) 代替炉心注水 (代替格納容器スプレイポンプ) 代替炉心注水 (B-充てんポンプ)	47条に記載		—	—
第52条 水素爆発による原子炉格納容器の破損を防止するための設備	水素濃度低減 (原子炉格納容器内水素処理装置)	原子炉格納容器内水素処理装置 原子炉格納容器内水素処理装置温度計	緩和設備	C/V	○	建屋内
		原子炉格納容器	原子炉格納容器に記載		—	—
	水素濃度低減 (格納容器水素イグナイタ)	格納容器水素イグナイタ 格納容器水素イグナイタ温度	緩和設備	C/V	○	建屋内
		原子炉格納容器	原子炉格納容器に記載		—	—
	水素濃度監視	可搬型格納容器内水素濃度計測ユニット 可搬型ガスサンプル冷却器用冷却ポンプ 可搬型代替ガスサンプリング圧縮装置 格納容器空気サンプルライン隔離弁 作用可搬型窒素ガスポンプ	緩和設備	R/B	○	建屋内
		可搬型格納容器内水素濃度計測ユニット 可搬型代替ガスサンプリング圧縮装置 格納容器空気サンプルライン隔離弁 作用可搬型窒素ガスポンプ	緩和設備	R/B	○	建屋内
		可搬箇所：可搬型大型送水ポンプ車、ホース延長・回収車 (送水車用)、可搬型ホース	緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		常設箇所：接続口、配管等	緩和設備	屋外 A/B 廻り及び R/B 内	○	分散配置 (2箇所は建屋内)
		格納容器雰囲気ガス試料採取設備、配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載		—	—

凡例 ○：竜巻に対し安全機能を維持できる
 又は竜巻による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる (防止設備)
 又は竜巻により損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備、防止でも緩和でもない設備)
 —：他の項目にて整理
 ※ R/B：原子炉建屋、A/B：原子炉補助建屋、C/V：原子炉格納容器、DG/B：ディーゼル発電機建屋、CWP/B：循環水ポンプ建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (16/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所 [※]	竜巻	
					評価	防護方法
第53条 水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備	アンユラス空気浄化設備による水素排出(交流動力電源及び直流電源が健全である場合)	アンユラス空気浄化ファン アンユラス空気浄化フィルタユニット、配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		排気筒	緩和設備	屋外	○	補修を実施
	アンユラス空気浄化設備による水素排出(全交流動力電源又は直流電源が喪失した場合)	B-アンユラス空気浄化ファン B-アンユラス空気浄化フィルタユニット 配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		可搬箇所：アンユラス全量排気弁操作 用可搬型窒素ガスポンペ、ホース・弁 排気筒	緩和設備	R/B	○	建屋内
	水素濃度監視	可搬箇所：可搬型アンユラス水素濃度 計測ユニット、ホース・弁	緩和設備	R/B	○	建屋内
		常設箇所：接続口・配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
第54条 使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備	使用済燃料ピットへの注水	可搬箇所：可搬型大型送水ポンプ車、 ホース延長・回収車(送水車用)、可搬 型ホース	防止設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載			
	使用済燃料ピットへのスプレイ	可搬箇所：可搬型大型送水ポンプ車、 可搬型スプレイノズルホース延長・回 収車(送水車用)、可搬型ホース	緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載			
	燃料取扱棟(貯蔵槽内燃料体等)への放水	可搬型大容量海水送水ポンプ車、可搬 型ホース等 放水砲	55条に記載		○	分散配置
	使用済燃料ピットの監視	使用済燃料ピット水位(AM用) 使用済燃料ピット温度(AM用)	防止設備・緩和設備	R/B	○	代替設備 (使用済燃料ピット 水位及び使用済燃料 ピット温度)
		使用済燃料ピット水位(可搬型)	防止設備・緩和設備	R/B	○	代替設備 (使用済燃料ピット 水位)
		使用済燃料ピット可搬型エリアモニタ	防止設備・緩和設備	R/B, A/B	○	代替設備 (使用済燃料ピット エリアモニタ)
使用済燃料ピット監視カメラ (使用済燃料ピット監視カメラ空冷装 置(注)を含む。)		防止設備・緩和設備	R/B A/B	○	防護対策実施	
第55条 工場等外への放射性物質の拡散を抑制するための設備	大気への拡散抑制 (炉心の著しい 損傷及び原子 炉格納容器の 破損時)	可搬型大容量海水送水ポンプ車、可搬 型ホース等 放水砲	緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
	非常用取水設備	非常用取水設備に記載				
	海洋への拡散抑制 (炉心の著しい 損傷時及び 原子炉格納容 器の破損時)	放射性物質吸着剤 荷揚場シルトフェンス	緩和設備	屋外(地下)	○	影響なし

注：使用済燃料ピット監視カメラ空冷装置は可搬型重大事故等対処設備

凡例 ○：竜巻に対し安全機能を維持できる
又は竜巻による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる(防止設備)
又は竜巻により損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備、防止でも緩和でもない設備)
—：他の項目にて整理
※ R/B：原子炉建屋、A/B：原子炉補助建屋、C/V：原子炉格納容器、DG/B：ディーゼル発電機建屋、CWP/B：循環水ポンプ建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (17/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所 [※]	竜巻	
					評価	防護方法
第56条 重大事故等の収束に必要な水の供給設備	大気への拡散抑制 (使用済燃料ピット内燃料体等の著しい損傷時)	可搬型大型送水ポンプ車 可搬型スプレインゾル ホース延長・回収車(送水車用) 可搬型ホース 配管等	緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載		—	—
	大気への拡散抑制 (使用済燃料ピット内燃料体等の著しい損傷時)	可搬型大容量海水送水ポンプ車, 可搬型ホース 放水砲	緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		海洋への拡散抑制 (使用済燃料ピット内燃料体等の著しい損傷時)	放射性物質吸着剤 荷揚場シルトフェンス	緩和設備	屋外(地下)	○
	航空機燃料火災への泡消火	可搬型大容量海水送水ポンプ車, 可搬型ホース 放水砲, 泡混合設備	緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		非常用取水設備	非常用取水設備に記載		—	—
	重大事故等の収束のための水源 ※水源としては, 海も使用可能	燃料取替用水ピット 補助給水ピット 代替給水ピット	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
		2次系純水タンク ろ過水タンク	(代替淡水源)	屋外	○	分散配置
		原水槽	(代替淡水源)	屋外	○	分散配置
		ほう酸タンク	44条に記載		—	—
	水の供給	可搬箇所: 可搬型大型送水ポンプ車, ホース延長・回収車(送水用)	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		常設箇所: 接続口, 配管等	防止設備・緩和設備	A/B, R/B	○	建屋内
非常用取水設備		非常用取水設備に記載		—	—	
第57条 電源設備	常設代替交流電源設備による給電	代替非常用発電機, 電路等	防止設備・緩和設備	屋外	○	代替設備 (ディーゼル発電機)
		ディーゼル発電機燃料油貯油槽	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	影響なし
		ディーゼル発電機燃料油移送ポンプ, 配管等	防止設備・緩和設備	DG/B	○	建屋内
		可搬箇所: 可搬型タンクローリー, ホース	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
	可搬型代替交流電源設備による給電	可搬箇所: 可搬型代替電源車	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		常設箇所: 接続口, 電路	防止設備・緩和設備	屋外 R/B 及び A/B 廻り	○	分散配置
		ディーゼル発電機燃料油貯油槽	防止設備・緩和設備	屋外(地下)	○	影響なし
		ディーゼル発電機燃料油移送ポンプ, 配管等	防止設備・緩和設備	DG/B	○	建屋内
		可搬箇所: 可搬型タンクローリー, ホース	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置

凡例 ○: 竜巻に対し安全機能を維持できる
 又は竜巻による損傷を考慮した場合でも, 対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる(防止設備)
 又は竜巻により損傷を考慮して, 代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備, 防止でも緩和でもない設備)
 —: 他の項目にて整理
 ※ R/B: 原子炉建屋, A/B: 原子炉補助建屋, C/V: 原子炉格納容器, DG/B: ディーゼル発電機建屋, CWP/B: 循環水ポンプ建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (18/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所 [※]	竜巻	
					評価	防護方法
第57条 電源設備	所内常設蓄電式直流電池設備による給電	蓄電池（非常用） 後備蓄電池，電路等	防止設備・緩和設備	A/B	○	建屋内
	可搬型代替直流電源設備による給電	可搬箇所：可搬型直流電源用発電機	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		可搬箇所：可搬型直流変換器	防止設備・緩和設備	A/B	○	建屋内
		ディーゼル発電機燃料油貯油槽	防止設備・緩和設備	屋外（地下）	○	影響なし
		可搬箇所：可搬型タンクローリー，ホース	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
	代替所内電気設備による給電	代替非常用発電機	防止設備・緩和設備	屋外	○	代替設備 (ディーゼル発電機)
		可搬型代替電源車	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		ディーゼル発電機燃料油貯油槽	防止設備・緩和設備	屋外（地下）	○	影響なし
		可搬箇所：可搬型タンクローリー，ホース	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		代替所内電気設備変圧器 代替所内電気設備分電盤 代替格納容器スプレイポンプ変圧器盤	防止設備・緩和設備	A/B	○	建屋内
	燃料補給設備	ディーゼル発電機燃料油貯油槽	防止設備・緩和設備	屋外（地下）	○	影響なし
		可搬型タンクローリー，ホース	防止設備・緩和設備	可搬型 SA 設備 保管場所	○	分散配置
		ディーゼル発電機燃料油移送ポンプ，配管等	防止設備・緩和設備	DG/B	○	建屋内
	非常用交流電源設備	ディーゼル発電機 ディーゼル発電機燃料油移送ポンプ ディーゼル発電機燃料油サービスタンク 配管等	防止設備・緩和設備	DG/B	○	建屋内
		ディーゼル発電機燃料油貯油槽	防止設備・緩和設備	屋外（地下）	○	影響なし
		原子炉補機冷却設備	48 条に記載		—	—

凡例 ○：竜巻に対し安全機能を維持できる

又は竜巻による損傷を考慮した場合でも，対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる（防止設備）

又は竜巻により損傷を考慮して，代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備，防止でも緩和でもない設備）

—：他の項目にて整理

※ R/B：原子炉建屋，A/B：原子炉補助建屋，C/V：原子炉格納容器，DG/B：ディーゼル発電機建屋，CWP/B：循環水ポンプ建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (19/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所 [※]	竜巻	
					評価	防護方法
第58条 計装設備	温度計測 (原子炉容器内の温度)	1次冷却材温度 (広域-高温側) 1次冷却材温度 (広域-低温側)	防止設備・緩和設備	C/V	○	建屋内
	圧力計測 (原子炉容器内の圧力)	1次冷却材圧力 (広域)	防止設備・緩和設備	C/V	○	建屋内
	水位計測 (原子炉容器内の水位)	加圧器水位 原子炉容器水位	防止設備	C/V	○	建屋内
	注水量計測 (原子炉容器への注水量)	高压注入流量 低压注入流量	(設計基準対象施設)	A/B	○	建屋内
	注水量計測 (原子炉格納容器への注水量)	代替格納容器スプレイポンプ出口積算流量	防止設備・緩和設備	A/B	○	建屋内
		B-格納容器スプレイ冷却器出口積算流量 (AM用)				
	注水量計測 (原子炉格納容器への注水量)	代替格納容器スプレイポンプ出口積算流量	防止設備・緩和設備	A/B	○	建屋内
		B-格納容器スプレイ冷却器出口積算流量 (AM用)				
	注水量計測 (原子炉格納容器への注水量)	高压注入流量 低压注入流量	(設計基準対象施設)	A/B	○	建屋内
		温度計測 (原子炉格納容器内の温度)	格納容器内温度	防止設備・緩和設備	C/V	○
	圧力計測 (原子炉格納容器内の圧力)	原子炉格納容器圧力 格納容器圧力 (AM用)	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
	水位計測 (原子炉格納容器内の水位)	格納容器再循環サンプ水位 (広域) 格納容器再循環サンプ水位 (狭域)	防止設備・緩和設備	C/V	○	建屋内
		格納容器水位 原子炉下部キャビティ水位				
	水素濃度計測 (原子炉格納容器内の水素濃度)	可搬型格納容器内水素濃度計測ユニット (格納容器内水素濃度)	緩和設備	R/B	○	建屋内
	水素濃度計測 (アニュラス内の水素濃度)	可搬型アニュラス水素濃度計測ユニット (アニュラス水素濃度 (可搬型))	緩和設備	R/B	○	建屋内
	線量計測 (原子炉格納容器内の放射線量率)	格納容器内高レンジエリアモニタ (低レンジ) 格納容器内高レンジエリアモニタ (高レンジ)	防止設備・緩和設備	C/V	○	建屋内
	出力計測 (未臨界の維持又は監視)	出力領域中性子束 中間領域中性子束 中性子源領域中性子束	防止設備	C/V	○	建屋内
	温度計測 (最終ヒートシンクの確保)	可搬型温度計測装置 (格納容器再循環ユニット入口温度/ 出口温度)	防止設備・緩和設備	A/B 緊急時対策所指揮所	○	建屋内
	水位計測 (最終ヒートシンクの確保)	蒸気発生器水位 (狭域) 蒸気発生器水位 (広域)	(設計基準対象施設)	C/V	○	建屋内
		原子炉補機冷却水サージタンク水位	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内
注水量計測 (最終ヒートシンクの確保)	補助給水流量	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内	
圧力計測 (最終ヒートシンクの確保)	原子炉格納容器圧力	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内	
	主蒸気ライン圧力	(設計基準対象施設)	R/B	○	建屋内	
	原子炉補機冷却水サージタンク圧力 (可搬型)	防止設備・緩和設備	R/B 緊急時対策所指揮所	○	建屋内	

凡例 ○：竜巻に対し安全機能を維持できる
 又は竜巻による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる (防止設備)
 又は竜巻により損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備、防止でも緩和でもない設備)
 一：他の項目にて整理
 ※ R/B：原子炉建屋、A/B：原子炉補助建屋、C/V：原子炉格納容器、DG/B：ディーゼル発電機建屋、CWP/B：循環水ポンプ建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (20/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所 [※]	竜巻	
					評価	防護方法
第58条 計装設備	水位計測（格納容器パイパスの監視）	蒸気発生器水位（狭域）	防止設備	C/V	○	建屋内
	圧力計測（格納容器パイパスの監視）	主蒸気ライン圧力	防止設備	R/B	○	建屋内
		1次冷却材圧力（広域）	防止設備・緩和設備	C/V	○	建屋内
	水位計測（水源の確保）	燃料取替用水ピット水位	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
		補助給水ピット水位	（設計基準対象施設）	R/B	○	建屋内
		ほう酸タンク水位	防止設備	A/B	○	建屋内
	水位計測（使用済燃料ピットの監視）	使用済燃料ピット水位（AM用）	防止設備・緩和設備	R/B	○	代替設備（使用済燃料ピット水位）
		使用済燃料ピット水位（可搬型）	防止設備・緩和設備	R/B	○	代替設備（使用済燃料ピット水位）
	温度計測（使用済燃料ピットの監視）	使用済燃料ピット温度（AM用）	防止設備・緩和設備	R/B	○	代替設備（使用済燃料ピット温度）
	線量計測（使用済燃料ピットの監視）	使用済燃料ピット可搬型エリアモニタ	防止設備・緩和設備	R/B, A/B	○	代替設備（使用済燃料ピットエリアモニタ）
	状態監視（使用済燃料ピットの監視）	使用済燃料ピット監視カメラ（使用済燃料ピット監視カメラ空冷装置（注）を含む。）	防止設備・緩和設備	R/B, A/B	○	防護対策実施
	温度、圧力、水位及び流量に係わるものの計測	可搬型計測器	防止設備・緩和設備	A/B	○	建屋内
	パラメータ記録	可搬型温度計測装置（格納容器再循環ユニット入口温度／出口温度）	防止設備・緩和設備	A/B 緊急時対策所 指揮所	○	建屋内
		データ収集計算機	緩和設備	A/B （屋外設備含む。）	○	建屋内設備は影響なし、屋外設備は代替設備（有線系、無線系）により機能維持可能
		データ表示端末	緩和設備	緊急時対策所 指揮所 （屋外設備含む。）	○	建屋内設備は影響なし、屋外設備は代替設備（有線系、無線系）により機能維持可能
その他	6-A, B母線電圧 A, B一直流コントロールセンタ母線電圧	（設計基準対象施設）	A/B	○	建屋内	
	A-高圧注入ポンプ及び油冷却器補機冷却水流量（AM用） A-高圧注入ポンプ電動機補機冷却水流量（AM用）	防止設備	A/B	○	建屋内	
	原子炉補機冷却水冷却器補機冷却海水流量（AM用）	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内	
	原子炉補機冷却水供給母管流量（AM用）					

注：使用済み燃料ピット監視カメラ空冷装置は可搬型重大事故等対処設備

凡例 ○：竜巻に対し安全機能を維持できる
 又は竜巻による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる（防止設備）
 又は竜巻により損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）
 ー：他の項目にて整理
 ※ R/B：原子炉建屋、A/B：原子炉補助建屋、C/V：原子炉格納容器、DG/B：ディーゼル発電機建屋、CWP/B：循環水ポンプ建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (21/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所 [※]	竜巻	
					評価	防護方法
第59条 運転員が原子炉制御室にとどまるための設備	居住性の確保	中央制御室	(重大事故等対処施設)	A/B	○	建屋内
		中央制御室遮へい 中央制御室非常用循環ファン 中央制御室給気ファン 中央制御室循環ファン 中央制御室非常用循環フィルタユニット 中央制御室給気ユニット、ダクト等	防止設備・緩和設備	A/B	○	建屋内
		可搬型照明(SA) 酸素濃度・二酸化炭素濃度計	防止でも緩和でもない設備	A/B	○	建屋内
	汚染の持ち込み防止	可搬型照明(SA)	防止でも緩和でもない設備	A/B	○	建屋内
	放射性物質の濃度低減 (交流動力電源及び直流電源が健全である場合)	アニュラス空気浄化ファン アニュラス空気浄化フィルタユニット、配管等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		排気筒	緩和設備	屋外	○	補修を実施
	放射性物質の濃度低減 (全交流動力電源又は直流電源が喪失した場合)	アニュラス空気浄化ファン アニュラス空気浄化フィルタユニット、ダクト等	緩和設備	R/B	○	建屋内
		可搬箇所：アニュラス全量排気弁操作可能搬室窒素ガスポンプ、ホース・弁	緩和設備	R/B	○	建屋内
		排気筒	緩和設備	屋外	○	補修を実施
	第60条 監視測定設備	モニタリングポストの代替設定	可搬型モニタリングポスト 伝送路	防止でも緩和でもない設備	緊急時対策所待機所	○
放射能観測車の代替設定		可搬型ダスト・よう素サンプラ NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータ GM汚染サーベイメータ	防止でも緩和でもない設備	緊急時対策所待機所	○	建屋内
放射線量の測定		可搬型モニタリングポスト 電離箱サーベイメータ 伝送路	防止でも緩和でもない設備	緊急時対策所待機所	○	建屋内
		小型船舶	防止でも緩和でもない設備	屋外	○	分散配置
放射性物質濃度(空气中・水中・土壌中)及び海上モニタリング		可搬型ダスト・よう素サンプラ NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータ GM汚染サーベイメータ α線シンチレーションサーベイメータ β線サーベイメータ 電離箱サーベイメータ	防止でも緩和でもない設備	緊急時対策所待機所	○	建屋内
		小型船舶	防止でも緩和でもない設備	屋外	○	分散配置
気象観測設備の代替測定		可搬型気象観測設備、伝送路	防止でも緩和でもない設備	緊急時対策所待機所	○	建屋内
緊急時対策所付近の気象観測項目の測定		可搬型気象観測設備、伝送路	防止でも緩和でもない設備	緊急時対策所待機所	○	建屋内

凡例 ○：竜巻に対し安全機能を維持できる

又は竜巻による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる(防止設備)

又は竜巻により損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能(緩和設備、防止でも緩和でもない設備)

－：他の項目にて整理

※ R/B：原子炉建屋、A/B：原子炉補助建屋、C/V：原子炉格納容器、DG/B：ディーゼル発電機建屋、CWP/B：循環水ポンプ建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (22/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所 [※]	竜巻	
					評価	防護方法
第61条 緊急時対策所		緊急時対策所	(重大事故等対処施設)	屋外	○	影響なし
		緊急時対策所遮へい	緩和設備	屋外	○	影響なし
	居住性の確保 (緊急時対策所遮へい及び緊急時対策所換気設備)	可搬箇所：可搬型新設緊急時対策所空気浄化ファン 可搬型新設緊急時対策所空気浄化フィルタユニット、配管等	緩和設備	指揮所用空調上屋 待機所用空調上屋	○	建屋内
		常設箇所：接続口、配管等	緩和設備	屋外	○	防護対策実施
		可搬箇所：空気供給装置、配管等	緩和設備	指揮所用空調上屋 待機所用空調上屋	○	建屋内
		常設箇所：接続口、配管等	緩和設備	屋外	○	防護対策実施
		圧力計 酸素計・二酸化炭素濃度計	防止でも緩和でもない設備	緊急時対策所指揮所、 緊急時対策所待機所	○	建屋内
		緊急時対策所可搬型エリアモニタ	緩和設備	緊急時対策所指揮所、 緊急時対策所待機所	○	建屋内
		可搬型モニタリングポスト 可搬型気象観測設備	60条に記載		-	-
	必要な情報の把握	データ収集計算機 ERSS 伝送サーバ データ表示端末	62条に記載	-	-	
	電源の確保 (緊急時対策所)	可搬箇所：緊急時対策所用発電機、電路	防止設備・緩和設備	屋外	○	分散配置
		常設箇所：接続口、電路等	防止設備・緩和設備	緊急時対策所指揮所、 緊急時対策所待機所	○	建屋内
	通信設備 (緊急時対策所)	衛生電話設備 (固定) 衛生電話設備 (FAX) 衛生携帯電話 トランシーバ インターフォン テレビ会議システム (指揮所・待機所間) 統合原子力防災ネットワークを用いた 通信連絡設備	62条に記載	-	-	

凡例 ○：竜巻に対し安全機能を維持できる
 又は竜巻による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる (防止設備)
 又は竜巻により損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備、防止でも緩和でもない設備)
 -：他の項目にて整理
 ※ R/B：原子炉建屋, A/B：原子炉補助建屋, C/V：原子炉格納容器, DG/B：ディーゼル発電機建屋, CWP/B：循環水ポンプ建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (23/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所 [※]	竜巻	
					評価	防護方法
第62条 通信連絡を行うために必要な設備	発電所内の通信連絡	衛星電話設備 (固定型)	防止設備・緩和設備	A/B 緊急時対策所指揮所 (屋外設備含む。)	○	建屋内設備は影響なし、屋外設備は分散配置された代替設備 (有線系・衛星系) により機能維持可能
		衛星電話設備 (携帯型) 無線連絡設備 (携帯型)	防止設備・緩和設備	A/B 緊急時対策所指揮所 緊急時対策所待機所 (屋外設備含む。)	○	建屋内設備は影響なし、屋外設備は分散配置された代替設備 (無線系、衛星系) により機能維持可能
		携行型通話装置	防止設備・緩和設備	A/B	○	建屋内
		インターフォン テレビ会議システム (指揮所・待機所間)	防止設備・緩和設備	緊急時対策所指揮所 緊急時対策所待機所 (屋外設備含む。)	○	建屋内設備は影響なし、屋外設備は分散配置された代替設備 (有線系、無線系) により機能維持可能
		データ収集計算機	緩和設備	A/B (屋外設備含む。)	○	建屋内設備は影響なし、屋外設備は代替設備 (有線系、無線系) により機能維持可能
		データ表示端末	緩和設備	緊急時対策所指揮所 (屋外設備含む。)	○	建屋内設備は影響なし、屋外設備は代替設備 (有線系、無線系) により機能維持可能
	発電所外の通信連絡	衛星電話設備 (固定型) 衛星電話設備 (FAX) 衛星電話設備 (携帯型)	緩和設備	A/B 緊急時対策所指揮所 (屋外設備含む。)	○	建屋内設備は影響なし、屋外設備は分散配置された代替設備 (有線系・衛星系) により機能維持可能
		統合原子力防災ネットワークを用いた通信連絡設備	防止でも緩和でもない設備	A/B 緊急時対策所指揮所 (屋外設備含む。)	○	建屋内設備は影響なし、屋外設備は分散配置された代替設備 (有線系、衛星系) により機能維持可能
		データ収集計算機 ERSS 伝送サーバ	防止でも緩和でもない設備	A/B (屋外設備含む。)	○	建屋内設備は影響なし、屋外設備は代替設備 (有線系、衛星系) により機能維持可能

凡例 ○：竜巻に対し安全機能を維持できる
 又は竜巻による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる (防止設備)
 又は竜巻により損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能 (緩和設備、防止でも緩和でもない設備)
 一：他の項目にて整理
 ※ R/B：原子炉建屋、A/B：原子炉補助建屋、C/V：原子炉格納容器、DG/B：ディーゼル発電機建屋、CWP/B：循環水ポンプ建屋

第1表 竜巻に対する重大事故等対処設備の影響評価 (24/24)

設置許可基準	重大事故等対処設備		分類	保管・設置箇所 [※]	竜巻	
					評価	防護方法
1次冷却設備	1次冷却設備	蒸気発生器 1次冷却材ポンプ 原子炉容器（炉心支持構造物を含む） 加圧器 1次冷却材管 加圧器サージ管	防止設備・緩和設備	C/V	○	建屋内
原子炉格納容器	原子炉格納容器	原子炉格納容器	防止設備・緩和設備	C/V	○	建屋内
燃料取扱及び貯蔵設備	使用済燃料貯蔵槽	使用済燃料ピット	防止設備・緩和設備	R/B	○	建屋内
非常用取水設備	非常用取水設備	貯留堰	防止設備・緩和設備	屋外	○	影響なし
		取水口 取水路 取水ピットスクリーン室 取水ピットポンプ室	防止設備・緩和設備	屋外	○	影響なし

凡例 ○：竜巻に対し安全機能を維持できる

又は竜巻による損傷を考慮した場合でも、対応する設計基準対象施設が竜巻に対し安全機能を維持できる（防止設備）

又は竜巻により損傷を考慮して、代替設備による機能維持や安全上支障のない期間での修復等の対応が可能（緩和設備、防止でも緩和でもない設備）

－：他の項目にて整理

※ R/B：原子炉建屋，A/B：原子炉補助建屋，C/V：原子炉格納容器，DG/B：ディーゼル発電機建屋，CWP/B：循環水ポンプ建屋

評価対象施設の抽出について

1. 抽出方針

泊発電所 3 号炉における評価対象施設の抽出フローを第 1 図及び第 2 図、抽出結果を第 1 表に示す。具体的には、以下の手順で抽出した。

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^{※1}を抽出する。

※1：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、「重要度分類審査指針」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

また、外部事象防護対象施設を内包する建屋は、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、必要に応じてプラントを停止し、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。）を評価対象施設とする。

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評価対象施設とする。

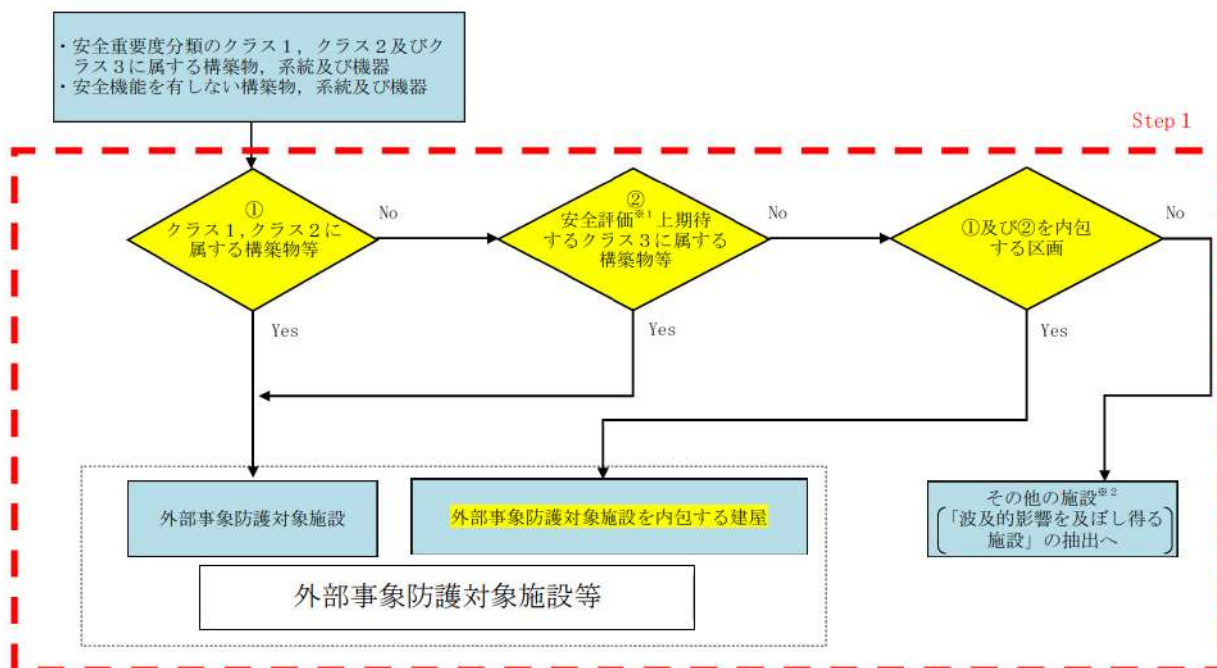
Step4 : 外殻となる施設による防護が期待できない設備

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評価対象施設とする。

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。

2. 抽出結果

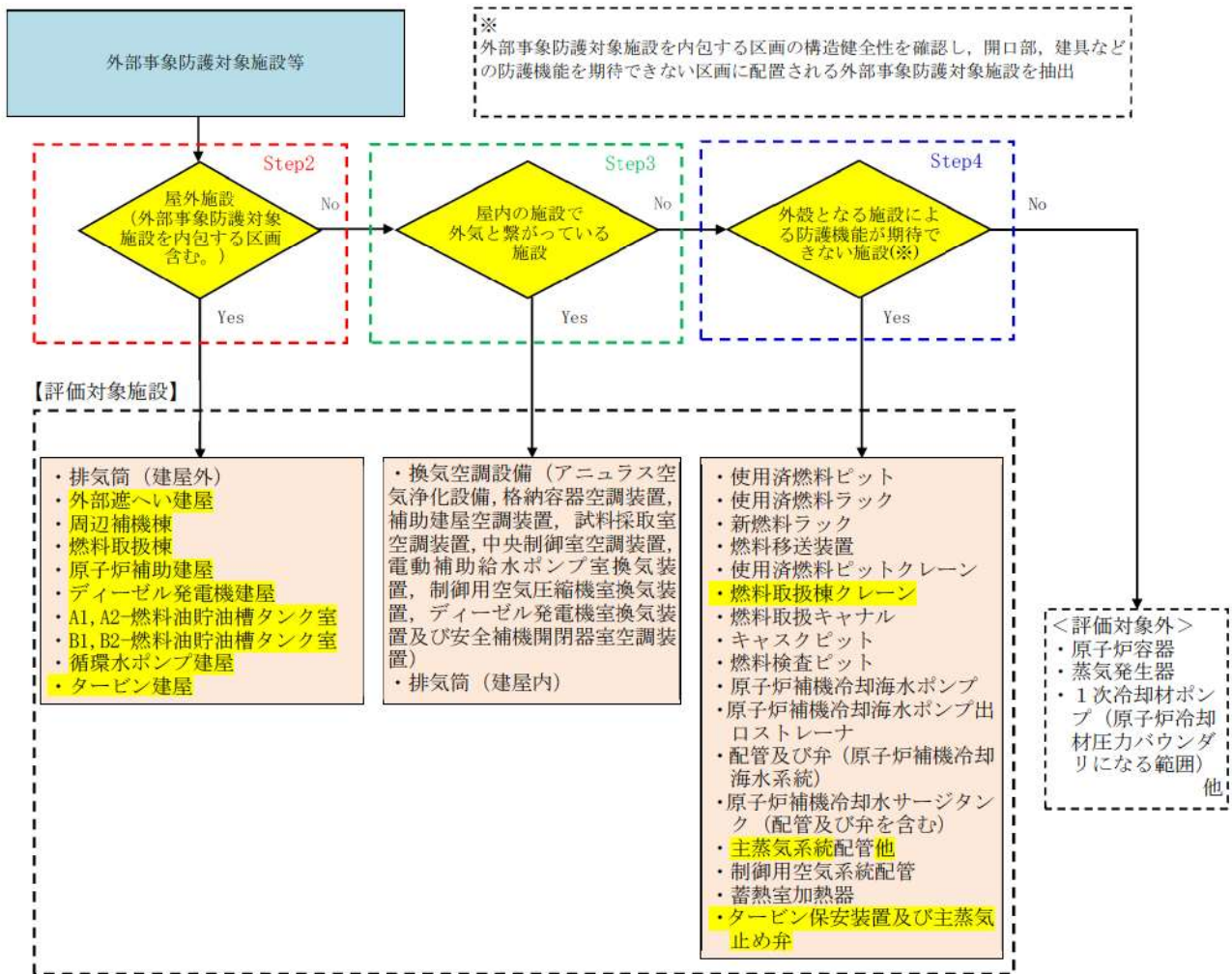
外部事象防護対象施設等及び評価対象施設の抽出フローを第1図及び第2図に、外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設抽出結果を第1表に示す。



※1 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故解析

※2 竜巻及びその随伴事象に対して機能維持すること、竜巻及びその随伴事象による損傷を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること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。

第1図 外部事象防護対象施設等の抽出フロー



第2図 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出フロー

第1表 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出結果 (1/16)

分類	定義	重要度分類指針		抽出の観点 ^{※1} STEP	設置 場所 ^{※2}	評価 対象 施設	備考				
		機能	構造物, 系統 又は機器					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つて、(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造物、系統及び機器	1) 原子炉冷却材圧力パウンダリ機能 2) 過剰反応度の印加防止機能 3) 炉心形状の維持機能	構造物, 系統 又は機器 原子炉冷却材圧力パ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) 制御棒駆動装置圧力パウンダリ	原子炉炉容器	R/B	—	—				
				蒸気発生器	R/B	—	—				
				1次冷却材ポンプ(原子炉冷却材圧力パウンダリによる制御)	R/B	—	—				
				加圧器	R/B	—	—				
				配管・弁	R/B	—	—				
				原子炉冷却材圧力パウンダリ 隔離弁	R/B	—	—				
				制御棒駆動装置圧力パウンダリ	R/B	—	—				
				炉内計装引出管	R/B	—	—				
				制御棒駆動装置圧力パウンダリ	R/B	—	—				
				炉心槽	R/B	—	—				
				上部炉心支持板	R/B	—	—				
				上部炉心支持柱	R/B	—	—				
				下部炉心支持柱	R/B	—	—				
燃料集合体(燃料は除く)	R/B	—	—								

※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＝外設となる施設による防護が期待できない設備
 ※2：R/B：原子炉建屋(外部遮へい建屋、周辺補機棟、燃料取扱棟)、A/B：原子炉補助建屋、DG/B：ディーゼル発電機建屋、CWP/B：循環水ポンプ建屋
 ※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)

第1表 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出結果 (3/16)

分類	定義	機能	構造物, 系統 又は機器	抽出の観点 ^{※1}				設置 場所 ^{※2}	評価 対象 施設	備考	
				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, 原子炉冷却材圧力パ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造物, 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(余熱除去系, 補助給水系, 蒸気発生器2次側隔離弁までの主蒸気系・給水系, 主蒸気安全弁, 主蒸気逃がし弁(手動逃がし機能))	余熱除去設備	○	×	×	×	—	—	
				余熱除去ポンプ	○	×	×	×	—	—	
				余熱除去冷却器	○	×	×	×	—	—	
				配管及び弁 (余熱除去運転モードのルートとなる範囲)	○	×	×	×	—	—	
				直接関連系 (余熱除去設備) ポンプミニマムフローライン配管, 弁	○	×	×	×	—	—	
				補助給水設備	○	×	×	×	—	—	
				電動補助給水ポンプ	○	×	×	×	R/B	—	電動補助給水ポンプ室換気装置 ^{※5}
				電動補助給水ポンプ室換気装置	○	×	×	×	R/B	○	—
				タービン動補助給水ポンプ	○	×	×	×	R/B	—	タービン動補助給水ポンプ排気管 ^{※4}
				補助給水ピット	○	×	×	×	R/B	—	—
				配管及び弁 (補助給水ピットから補助給水ポンプを経て主給水配管との合流部までの範囲)	○	×	×	×	R/B	○	—
				直接関連系 (補助給水設備) 管, 弁	○	×	×	×	R/B	—	—
				蒸気発生器2次側隔離弁までの主蒸気設備	○	×	×	×	R/B	—	—
				蒸気発生器	○	×	×	×	R/B	—	—
				主蒸気隔離弁	○	×	×	×	R/B	○	—
主蒸気安全弁	○	×	×	×	R/B	○	主蒸気安全弁排気管 ^{※4}				
主蒸気逃がし弁 (手動逃がし機能)	○	×	×	×	R/B	○	主蒸気排逃し消音器 ^{※4}				
配管及び弁 (蒸気発生器から主蒸気隔離弁の範囲)	○	×	×	×	R/B	○	—				
蒸気発生器2次側隔離弁までの主給水設備	○	×	×	×	R/B	—	—				
蒸気発生器	○	×	×	×	R/B	—	—				
主給水隔離弁	○	×	×	×	R/B	○	—				
配管及び弁 (蒸気発生器から主給水隔離弁の範囲)	○	×	×	×	R/B	○	—				

※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=外設となる施設による防護が期待できない設備

※2: R/B: 原子炉建屋 (外部遮へい建屋, 周辺補機棟, 燃料取扱棟), A/B: 原子炉補助建屋, DG/B: ディーゼル発電機建屋, CWP/B: 循環水ポンプ建屋

※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 (被及的影響 (機能的影響) を及ぼし得る施設として抽出)

※5: 電動補助給水ポンプ等の冷却の観点から評価対象とする。(STEP3で抽出)

第1表 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出結果 (4/16)

分類	定義	機能	構造物, 系統 又は機器	重要度分類指針		抽出の観点 ^{※1} STEP	設置 場所 ^{※2}	評価 対象 施設	備考				
				機能	構造物, 系統 又は機器					1	2	3	4
										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ナ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造物, 系統及び機器	5) 炉心冷却機能	非常用炉心冷却系 (低圧注入系, 高圧注入系, 蓄圧注入系)	拍発電所3号炉	構造物, 系統又は機器								
				低圧注入系									
				余熱除去ポンプ	○	×	×	×	A/B	-	-		
				余熱除去冷却器	○	×	×	×	A/B	-	-		
				燃料取替用水ピット	○	×	×	×	R/B	-	-		
				格納容器再循環サンプ	○	×	×	×	R/B	-	-		
				配管及び弁 (燃料取替用水ピット及び格納容器再循環サンプから余熱除去ポンプ, 余熱除去冷却器を経て1次冷却設備までの範囲)	○	×	×	×	R/B	-	-		
				直接関連系 (低圧注入系)	○	×	×	×	A/B	-	-		
				高圧注入系	○	×	×	×	R/B	-	-		
				燃料取替用水ピット	○	×	×	×	A/B	-	-		
				高圧注入ポンプ	○	×	×	×	R/B	-	-		
				配管及び弁 (燃料取替用水ピット及び格納容器再循環サンプから高圧注入ポンプを経て1次冷却設備までの範囲)	○	×	×	×	A/B	-	-		
				格納容器再循環サンプ	○	×	×	×	R/B	-	-		
				直接関連系 (高圧注入系)	○	×	×	×	A/B	-	-		
				蓄圧注入系	○	×	×	×	R/B	-	-		
蓄圧タンク	○	×	×	×	R/B	-	-						
配管及び弁 (蓄圧タンクから1次冷却設備の範囲)	○	×	×	×	R/B	-	-						
原子炉格納容器	原子炉格納容器, アニュラス, 原子炉格納容器隔離弁, 原子炉格納容器スプレイ系, アニュラス空気再循環設備, 安全補機室空気浄化系, 可燃性ガス濃度制御系	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, アニュラス, 原子炉格納容器隔離弁, 原子炉格納容器スプレイ系, アニュラス空気再循環設備, 安全補機室空気浄化系, 可燃性ガス濃度制御系	拍発電所3号炉	構造物, 系統又は機器								
原子炉格納容器	○	×	×	×	R/B	-	-	-					
格納容器本体	○	×	×	×	R/B	-	-	-					
貫通部 (ベネトレーション)	○	×	×	×	R/B	-	-	-					
エアロック	○	×	×	×	R/B	-	-	-					
機器搬入口	○	×	×	×	R/B	-	-	-					
アニュラス	○	×	×	×	R/B	-	-	-					
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/B	-	-	-					

※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=外設となる施設による防護が期待できない設備
 ※2: R/B: 原子炉建屋 (外部遮へい建屋, 周辺補機棟, 燃料取扱棟), A/B: 原子炉補助建屋, DG/B: ディーゼル発電機建屋, CWP/B: 循環水ポンプ建屋
 ※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)

第1表 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出結果 (6/16)

分類	定義	機能	構造物、系統又は機器	重要度分類指針				抽出の観点 ^{※1}	設置場所 ^{※2}	評価対象施設	備考
				拍発電所3号炉							
				STEP	1	2	3				
MS-1	2) 安全上必須なその他の構造物、系統及び機器	1) 工学的な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	構造物、系統又は機器	構造物、系統又は機器	○	×	×	×	R/B A/B	—	安全系の計装盤等
				原子炉保護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 ・工学的な安全施設への作動信号の発生機構 ・非常用炉心冷却設備作動の安全保護回路、主蒸気ライン隔離の安全保護回路、原子炉格納容器スプレイ作動の安全保護回路、原子炉格納容器隔離の安全保護回路 非常用交流電源設備	○	×	×	×	R/B A/B DG/B	—	—
MS-1	2) 安全上特に重要な関連機能	非常用内電源系、制御室及びその連へい・換気空調系、原子炉補機冷却水系、原子炉補機冷却海水系、直流電源系、制御用圧縮空気設備（いずれも、MS-1関連のもの）	非常用内電源系、制御室及びその連へい・換気空調系、原子炉補機冷却水系、原子炉補機冷却海水系、直流電源系、制御用圧縮空気設備（いずれも、MS-1関連のもの）	ダイゼル機関	○	×	×	×	DG/B	○	ダイゼル発電機排気消音器 ^{※4} ダイゼル発電機室換気装置 ^{※5} 蓄熱室加熱器 ^{※6}
				ダイゼル発電機	○	×	×	×	DG/B	○	—
				ダイゼル発電機室換気装置	○	×	×	×	DG/B	○	—
				蓄熱室加熱器	○	×	×	×	DG/B	○	—
				ダイゼル発電機から非常用負荷までの配電設備及び配電回路	○	×	×	×	R/B A/B DG/B	—	—
				燃料系	○	×	×	×	DG/B 燃料油貯油槽 タンク室	○	ダイゼル発電機燃料油貯油槽ベント管 ^{※4}
MS-1	2) 安全上特に重要な関連機能	非常用内電源系、制御室及びその連へい・換気空調系、原子炉補機冷却水系、原子炉補機冷却海水系、直流電源系、制御用圧縮空気設備（いずれも、MS-1関連のもの）	非常用内電源系、制御室及びその連へい・換気空調系、原子炉補機冷却水系、原子炉補機冷却海水系、直流電源系、制御用圧縮空気設備（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）	○	×	×	×	DG/B	○	—
				吸気系	○	×	×	×	DG/B	○	—
				始動用空気系（始動用空気だめ（日動供給）からダイゼル機関まで） 冷却水系 潤滑油系	○	×	×	×	DG/B	○	—

※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＝外設となる施設による防護が期待できない設備
 ※2：R/B：原子炉建屋（外部遮へい建屋、周辺補機棟、燃料取扱棟）、AB：原子炉補助建屋、DG/B：ダイゼル発電機建屋、CWP/B：循環水ポンプ建屋
 ※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）
 ※5：ダイゼル機関、ダイゼル発電機等の始動の観点から評価対象とする。（STEP3及びSTEP4で抽出）
 ※6：寒冷地におけるダイゼル機関の急速始動の観点から評価対象とする。（STEP4で抽出）

第1表 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出結果 (7/16)

分類	定義	機能	構造物, 系統 又は機器	重要度分類指針				抽出の観点 ^{※1} STEP	設置 場所 ^{※2}	評価 対象 施設	備考
				抽出手順							
				1	2	3	4				
MS-1	2) 安全上必須なその他の構造物, 系統及び機器	2) 安全上特に重要な関連機能	非常用内電源系, 制御室及びその遮へい・換気空調系, 原子炉補機冷却水系, 原子炉補機冷却海水系, 直流電源系, 制御用圧縮空気設備 (いずれも, MS-1 関連のもの)	建築物, 系統又は機器	○	○	○	○	A/B	○	-
				中央制御室及び中央制御室遮へい	○	○	○	○	A/B	○	-
				中央制御室換気空調装置 (放射線防護機能及び有機ガス防護機能)	○	○	○	○	A/B	○	-
				中央制御室非常用循環ファン	○	○	○	○	A/B	○	-
				中央制御室非常用循環ファンユニット	○	○	○	○	A/B	○	-
				中央制御室給気ユニット	○	○	○	○	A/B	○	-
				中央制御室循環ファン	○	○	○	○	A/B	○	-
				ダクト及びびダンパ	○	○	○	○	A/B	○	-
				原子炉補機冷却水設備	○	○	○	○	A/B	○	-
				原子炉補機冷却水ポンプ	○	○	○	○	R/B	-	-
				原子炉補機冷却水冷却器	○	○	○	○	R/B	-	-
				配管及び弁 (MS-1 関連補機への冷却水ラインの範囲)	○	○	○	○	R/B A/B	○	-
				直接関連系 (原子炉補機冷却水設備)	○	○	○	○	R/B	○	-
				原子炉補機冷却海水設備	○	○	○	○	CWP/B	○	-
				原子炉補機冷却海水ポンプ	○	○	○	○	CWP/B	○	-
原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ (海水の管路を構成する部分のみ)	○	○	○	○	R/B	-	-				
原子炉補機冷却水冷却器海水入口ストレーナ	○	○	○	○	R/B	-	-				
配管及び弁 (MS-1 関連補機への海水供給ラインの範囲)	○	○	○	○	R/B CWP/B	○	-				
直接関連系 (原子炉補機冷却海水設備)	○	○	○	○	CWP/B	○	-				
取水路 (屋外トレンチ含む)	○	○	○	○	屋外	-	地下埋設				

※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=外設となる施設による防護が期待できない設備

※2: R/B: 原子炉建屋 (外部遮へい建屋, 周辺補機棟, 燃料取扱棟), A/B: 原子炉補助建屋, DG/B: ディーゼル発電機建屋, CWP/B: 循環水ポンプ建屋

※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)

第1表 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出結果 (8/16)

分類	定義	機能	構造物, 系統 又は機器	重要度分類指針		抽出の観点 ^{※1}				設置 場所 ※2	評価 対象 施設	備考
				泊発電所3号炉	STEP							
					1	2	3	4				
MS-1	2) 安全上必須なその他の構造物, 系統及び機器 2) 安全上特に重要な関連機能		構造物, 系統 又は機器 非常用内電源系, 制御室及びその遮へい・換気空調系, 原子炉補機冷却海水系, 直流電源系, 制御用圧縮空気設備 (いずれも, MS-1 関連のもの)	非常用直流電源設備		○	×	×	×		-	蓄電池室排気装置 ^{※5} 安全相機関閉器 空気調湿装置 ^{※6}
				蓄電池		○	×	×	×	A/B	-	
				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/B A/B DG/B	-	
				安全相機関閉器室の遮へい		○	×	×	×	A/B	○	
				制御用圧縮空気設備		○	×	×	×	R/B A/B DG/B	-	
				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/B A/B DG/B	-	
				制御用圧縮空気設備		○	×	×	×	R/B A/B DG/B	-	
				制御用空気圧縮装置		○	×	×	×	R/B	-	
				配管及び弁 (MS-1 関連補機 (主蒸気逃がし弁, アンモニア系空気浄化系及び中央制御室空調系, 燃料採取室排気系のMS-1の空気作動弁)への制御用空気供給ラインの範囲)		○	×	×	×	R/B	○	
				制御用空気圧縮機室空調装置		○	×	×	×	R/B	○	
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造物, 系統及び機器	1) 原子炉炉冷却材を内蔵する機能 (ただし, 原子炉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)	化学体積制御設備の抽出系・浄化系	化学体積制御設備の抽出系・浄化ライン		○	×	×	×		-	制御用空気圧縮機室空調装置 ^{※7}
				再生熱交換器		○	×	×	×	R/B	-	
				余剰抽出冷却器		○	×	×	×	R/B	-	
				非再生冷却器		○	×	×	×	R/B	-	
				冷却材混床式脱塩塔		○	×	×	×	A/B	-	
				冷却材陽イオン脱塩塔		○	×	×	×	A/B	-	
				冷却材脱塩塔入口フィルタ		○	×	×	×	A/B	-	
				冷却材フィルタ		○	×	×	×	A/B	-	
				体積制御タンク		○	×	×	×	A/B	-	
				充てんポンプ		○	×	×	×	A/B	-	
※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/B: 原子炉建屋 (外部遮へい建屋, 周辺補機棟, 燃料取扱棟), A/B: 原子炉補助建屋, DG/B: ディーゼル発電機建屋, CWP/B: 循環水ポンプ建屋 ※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) ※5: 外部事象防護対象施設の観点から評価対象とする。(STEP3で抽出) ※6: 蓄電池等の冷却の観点から評価対象とする。(STEP3及びSTEP4で抽出) ※7: 制御用空気圧縮装置等の冷却の観点から評価対象とする。(STEP3及びSTEP4で抽出)												

第1表 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出結果 (9/16)

分類	定義	機能	構造物, 系統 又は機器	重要度分類指針				評価 対象 施設	備考	
				抽出の観点 ^{※1}						
				STEP 1	STEP 2	STEP 3	STEP 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、敷地外への温度の放射性物質の放出のおそれのある構造物, 系統及び機器 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造物系統, 及び機器 3) 燃料を安全に取り扱う機能 4) 安全弁及び逃がし弁の吹き止まり機能	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), 使用済燃料ピット (使用済燃料ピットラックを含む)	放射能ガスホルダー	放射能ガスホルダー	放射能ガスホルダー	放射能ガスホルダー	放射能ガスホルダー	放射能ガスホルダー	
		3) 燃料を安全に取り扱う機能	燃料取扱設備	燃料取扱設備	燃料取扱設備	燃料取扱設備	燃料取扱設備	燃料取扱設備	燃料取扱設備	
		4) 安全弁及び逃がし弁の吹き止まり機能	加圧器安全弁, 加圧器逃がし弁 (いずれも、吹き止まり機能に関する部分)	加圧器安全弁 (吹き止まり機能)	加圧器安全弁 (吹き止まり機能)	加圧器安全弁 (吹き止まり機能)	加圧器安全弁 (吹き止まり機能)	加圧器安全弁 (吹き止まり機能)	加圧器安全弁 (吹き止まり機能)	加圧器安全弁 (吹き止まり機能)
		放射能ガスホルダー	放射能ガスホルダー	放射能ガスホルダー	放射能ガスホルダー	放射能ガスホルダー	放射能ガスホルダー	放射能ガスホルダー	放射能ガスホルダー	放射能ガスホルダー
		使用済燃料ピット	使用済燃料ピット	使用済燃料ピット	使用済燃料ピット	使用済燃料ピット	使用済燃料ピット	使用済燃料ピット	使用済燃料ピット	使用済燃料ピット
		燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット
		燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット
		燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット
		燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット
		燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット
		燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット
		燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット
		燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット
		燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット	燃料取扱ピット

○: Yes X: No -: 該当せず^{※5}

※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=外設となる施設による防護が期待できない設備
 ※2: R/B: 原子炉建屋 (外部遮へい建屋, 周辺補機棟, 燃料取扱棟), A/B: 原子炉補助建屋, DG/B: ディーゼル発電機建屋, CWP/B: 循環水ポンプ建屋
 ※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)

第1表 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出結果 (10/16)

分類	定義	重要度分類指針		抽出の観点 ^{※1}	設置場所 ^{※2}	評価対象施設	備考				
		機能	構造物、系統又は機器					STEP			
								1	2	3	4
MS-2	1) PS-2 の構造物、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造物、系統及び機器	機能 1) 燃料プールの補給機能 2) 放射性物質放出の防止機能	構造物、系統又は機器 使用済燃料ピット補給水系 放射性気体廃棄物処理系の隔離弁、燃料集合体落下事故時放射能放出を低減する系、排気筒(補助建屋)	○	○	○	○				
				○	○	○	○				
				○	○	○	○				
		2) 異常状態への対応上特に重要な構造物、系統及び機器	構造物、系統又は機器 燃料取替用水ピット 燃料取替用水ポンプ 配管及び弁 (燃料取替用水ピットから燃料取替用水ポンプを経て、使用済燃料ピットまでの範囲) 放射性気体廃棄物処理設備の隔離弁 中性子源領域中性子束 原子炉トリップ遮断器の状態 ほう素濃度 (サンプリング分析) 1次冷却材圧力 1次冷却材高温側温度 (広域) 及び1次冷却材低温側温度 (広域) 加圧器水位 格納容器圧力 格納容器高レンジエリアモニタ (低レンジ/高レンジ) 格納容器高レンジエリアモニタ (高レンジ) 低温停止への移行 ・1次冷却材圧力、1次冷却材高温側温度 (広域) 及び1次冷却材低温側温度 (広域)、加圧器水位、ほう酸タンク水位 蒸気発生器隔離 ・蒸気発生器水位 (広域)、補助給水ライオン流量 蒸気発生器2次側除熱 ・蒸気発生器水位 (広域)、蒸気発生器水位 (狭域)、補助給水ライオン流量、主蒸気ライン圧力、補助給水ピット水位 再循環モードへの切替 ・燃料取替用水ピット水位、格納容器再循環サンプ水位 (広域)、格納容器再サンプ水位 (狭域)	○	○	○	○				
				○	○	○	○				
				○	○	○	○				
				○	○	○	○				
				○	○	○	○				
				○	○	○	○				
				○	○	○	○				
				○	○	○	○				
				○	○	○	○				
				○	○	○	○				
				○	○	○	○				
				○	○	○	○				

○: Yes X: No - : 該当せず
 ※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=外設となる施設による防護が期待できない設備
 ※2: R/B: 原子炉建屋 (外部遮へい建屋, 周辺補機棟, 燃料取扱棟), A/B: 原子炉補助建屋, DG/B: ディーゼル発電機建屋, CWP/B: 循環水ポンプ建屋
 ※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)

第1表 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出結果 (11/16)

分類	定義	機能	構築物、系統又は機器	重要度分類指針					評価対象施設	備考		
				抽出の観点 ^{※1}				設置場所 ^{※2}				
				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	2) 異常状態の緩和機能 3) 制御室からの安全停止機能	構築物、系統又は機器 加圧器逃がし弁 (手動開閉機能) (後備ヒータ)、加圧器逃がし弁元弁 (閉時能) 制御室外原子炉停止装置 (安全停止に関連するもの)	拍発電所3号炉 構築物、系統又は機器	○	○	○	○	R/B	—	—	
PS-3	1) 異常状態の起因事象となるものであって、PS-1及びPS-2以外の構築物、系統及び機器	1) 原子炉冷却材保持機能 (PS-1、PS-2以外のもの) 2) 原子炉冷却材の循環機能 3) 放射性物質の貯蔵機能	原子炉冷却材圧力バウナダリから除外される計装等の小口径配管、弁 1次冷却材ポンプ及びその関連系 放射性廃棄物処理施設 (放射能インペントリの小さいもの)	加圧器逃がし弁及び弁 試験採取系配管、弁 ドレン配管、弁 ペント配管、弁 1次冷却材ポンプ 化学体積制御設備 (封水注入系、1次冷却材ポンプスタブパイプ、配管、弁) 液体廃棄物処理系 (加圧器逃がしタンク、格納容器サブ、廃液貯蔵ピット、冷却材貯蔵タンク、格納容器冷却材ドレンタンク、補助建屋サブタンク、洗浄排水タンク、洗浄排水蒸発装置、洗浄排水蒸留水タンク、洗浄排水濃縮廃液タンク、洗浄排水濃縮廃液移送容器、廃液蒸留水タンク、酸液ドレンタンク、濃縮廃液タンク) (固体廃棄物処理設備 (使用済樹脂貯蔵タンク、固体廃棄物貯蔵庫、ベイヤ、補固体焼却設備)) 新燃料貯蔵庫 新燃料ラック	○	○	○	○	○	R/B	—	—

※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＝外設となる施設による防護が期待できない設備

※2：R/B：原子炉建屋 (外部遮へい建屋、周辺補機棟、燃料取扱棟)、A/B：原子炉補助建屋、DG/B：ディーゼル発電機建屋

※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 (波及的影響 (機能的影響) を及ぼし得る施設として抽出)

第1表 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出結果 (12/16)

分類	定義	機能	構築物、系統又は機器	抽出の観点 ^{※1}		設置場所 ^{※4}	評価対象施設	備考
				重要度分類指針				
				1	2			
PS-3	1) 異常状態の起因事象となるものであって、PS-1及びPS-2以外の構築物、系統及び機器 4) 電源供給機能（非常用を除く）	機能	構築物、系統又は機器	発電機及びその励磁装置（発電機、励磁装置）	×	×	×	×
				タービン発電機固定子巻線冷却水系	×	×	×	×
				直接関連系（発電機及びその励磁装置）	×	×	×	×
				タービン発電機ガス系	×	×	×	×
				タービン発電機密封油系	×	×	×	×
				励磁装置	×	×	×	×
				蒸気タービン（主タービン、主要弁、配管）	×	×	×	×
				直接関連系（蒸気タービン）	×	×	×	×
				タービン制御系	×	×	×	×
				タービン潤滑油系	×	×	×	×
				復水設備（復水器、復水ポンプ、循環水ポンプ、配管、弁）	×	×	×	×
				復水設備（復水器、復水ポンプ、配管、弁）	×	×	×	×
				復水器空気抽出系（機械式空気抽出系、配管、弁）	×	×	×	×
				取水設備（屋外トレンチを含む）	×	×	×	×
				給水設備（電動主給水ポンプ、タービン動主給水ポンプ、給水加熱器、配管、弁）	×	×	×	×
				直接関連系（隔離弁以後）、給水系（隔離弁以前）、送電線、変圧器、開閉所	×	×	×	×
				駆動用蒸気	×	×	×	×
				循環水系（循環水ポンプ、配管、弁）	×	×	×	×
				直接関連系（箱環水系）	×	×	×	×
				取水設備（屋外トレンチを含む）	×	×	×	×
常用所内電源設備（発電機又は外部電源系から所内負荷までの配電設備及び電路（MS-1間連以外））	×	×	×	×				
直流電源設備（蓄電池、蓄電池から常用負荷までの配電設備及び電路（MS-1間連以外））	×	×	×	×				
計測制御用電源設備（電源装置から常用計測制御装置までの配電設備及び電路（MS-1間連以外））	×	×	×	×				
制御棒駆動装置用電源設備	×	×	×	×				
送電線	×	×	×	×				
変圧器（主変圧器、所内変圧器、予備変圧器、後備変圧器、電路）	×	×	×	×				
直接関連系（変圧器）	×	×	×	×				
油劣化防止装置	×	×	×	×				
冷却装置	×	×	×	×				
発電機負荷開閉器	×	×	×	×				
開閉所（母線、遮断器、断路器、電路）	×	×	×	×				

※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/B：原子炉建屋（外部遮へい建屋、周辺補機棟、燃料取扱棟）、A/B：原子炉補助建屋、DG/B：ディーゼル発電機建屋

※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）

第1表 外部事象防護対象施設等のうち評価対象施設の抽出結果 (16/16)

分類	定義	重要度分類指針		評価対象施設	備考							
		機能	構築物、系統又は機器			抽出の観点 ^{※1}						
						1	2	3	4			
			構築物、系統又は機器	拍発電所3号炉								
	外部事象防護対象施設を内包する建屋			原子炉建屋 (外部遮へい建屋、周辺補機棟、燃料取扱棟)								外設施設
				原子炉補助建屋								外設施設
				ディーゼル発電機建屋								外設施設
				循環水ポンプ建屋								外設施設
				タービンポンプ建屋								外設施設
				原子炉補機冷却海水ポンプ抽出ユニット建屋								外設施設
				AI, A2-燃料油貯油槽タンク室								外設施設
				BI, B2-燃料油貯油槽タンク室								外設施設
				タービン建屋								外設施設
				電気建屋								外設施設

○: Yes X: No -: 該当せず^{※2}

※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=外設となる施設による防護が期待できない設備

※2: R/B: 原子炉建屋 (外部遮へい建屋, 周辺補機棟, 燃料取扱棟), A/B: 原子炉補助建屋, DG/B: ディーゼル発電機建屋, CWP/B: 循環水ポンプ建屋, P/B: 電気建屋, T/B: タービン建屋

※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 (機能的影響) を及ぼし得る施設として抽出)

※5: 循環水ポンプ建屋については、風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及び常時作用する荷重又は設計飛来物の衝突による影響を受け、屋根、壁及び開口部 (扉類) が損傷する可能性があるため、当該建屋内の外部事象防護対象施設が安全機能を損なわないかを評価し、安全機能を損なう可能性がある場合には、電送飛来物防護対策設備又は運用による電送防護対策を実施すること

※6: タービン建屋については、蒸気発生器への過剰給水の緩和手段 (タービントリップ機能) として期待している、タービン保安装置及び主蒸気止め弁を内包する建屋であるため、評価対象として抽出する。電送を起因として蒸気発生器への過剰給水が発生することはないが、独立事象としての重量の可能性を考慮し、安全上支障のない期間に補修等の対応を行うことで、タービン保安装置及び主蒸気止め弁が安全機能を損なわない設計とすることから、外設防護機能に関する評価は実施しない。また、当該建屋は、外部事象防護対象施設を内包する原子炉建屋の隣接建屋であるため、原子炉建屋への波及的影響評価を実施する。

○津波防護施設等については、評価対象施設等に抽出されないが、別紙1に示すとおり、拍発電所の津波防護施設等については、基準津波の高さや防護範囲の広さ等その重要性に鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う。

外部事象に対する津波防護施設，浸水防止設備
及び津波監視設備の防護方針について

1. 概要

津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備（以下「津波防護施設等」という。）の外部事象に対する防護方針を以下に示す。

2. 防護に関する考え方

以下の考え方にに基づき，泊発電所において設計上考慮すべき外部事象に対する津波防護施設等の機能維持のための対応の要否について整理した。

外部事象に対する津波防護施設等の機能維持対応要否判断フローを図 1 に示す。

- (1) 設計上考慮すべき事象が，津波若しくは津波の随伴，重畳が否定できない事象に該当するかを確認する。定量的な重畳確率が求められない事象については，保守的にその影響を考慮する。
- (2) 津波の随伴，重畳が否定できない場合は，当該事象による津波防護施設の機能喪失モードの有無を確認する。機能喪失モードが認められる場合は，設計により健全性を確保する。
- (3) 津波の随伴，重畳が有意でないと評価される事象についても，泊発電所の津波防護施設については，基準津波の高さや防護範囲の広さ等その重要性に鑑み，自主的に機能維持のための配慮を行う。

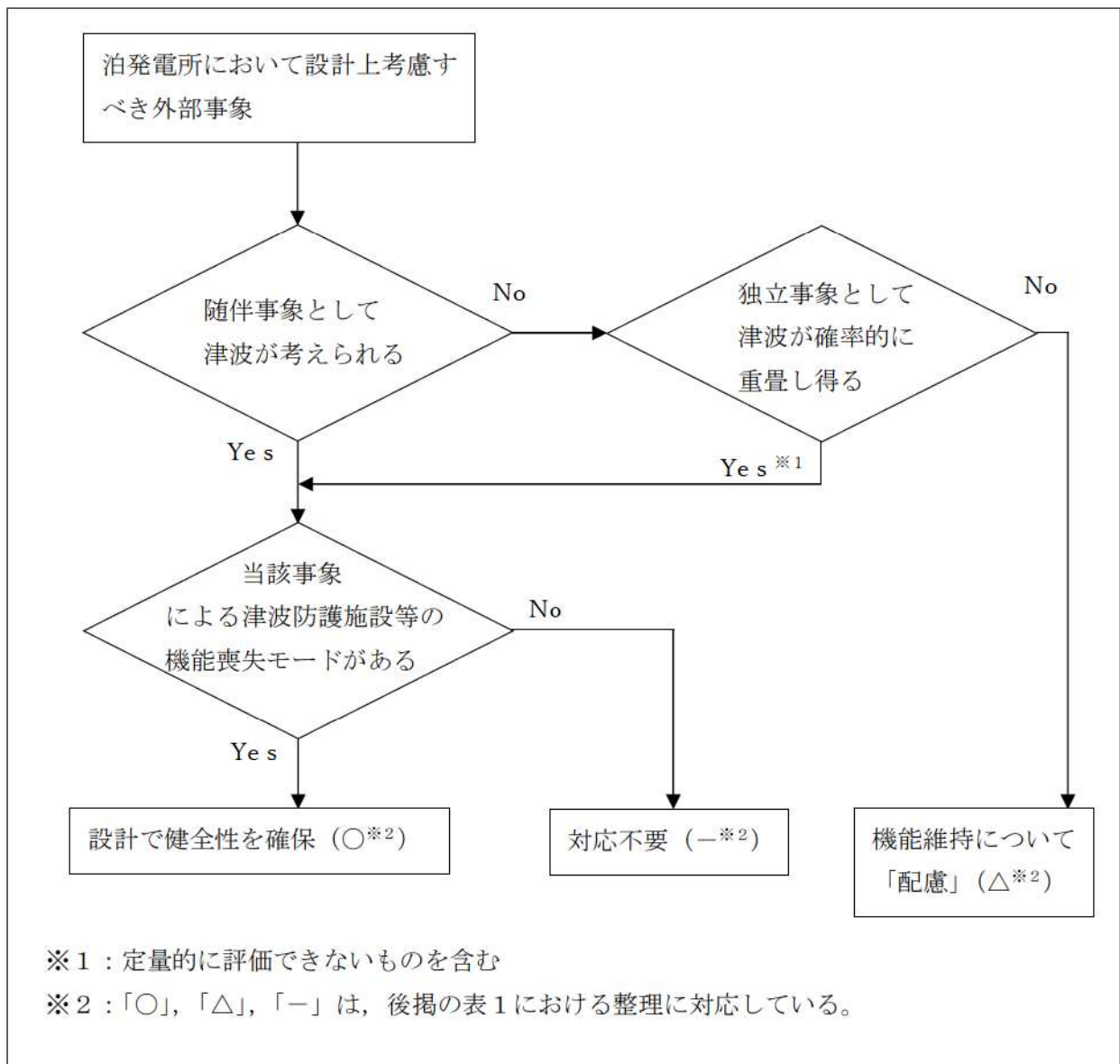


図1 外部事象に対する津波防護施設等の機能維持対応要否判断フロー

3. 検討結果

上記フローに基づく各事象に対する防護方針の検討結果を以下に示す。

(詳細は表1にとおり)

(1) 津波の随伴、重畳が否定できない事象^{※1}に対する防護方針

これらの外部事象に対しては、津波との随伴若しくは重畳の可能性を否定できないため、荷重の重ね合わせのタイミングを考慮した上で設計への反映の要否を検討し、津波防護施設等への影響が考えられる事象に対しては、津波防護施設等の機能を維持する設計とする。

※1：地震，風（台風），凍結，降水，積雪，落雷，地滑り，生物学的事象，森林火災

(2) 津波の随伴、重畳が有意ではない事象（竜巻，火山の影響）に対する防護方針

「竜巻」，「火山の影響」の2つの外部事象に津波は随伴せず，また，基準津波との重畳の確率も有意ではないため，津波防護施設等を防護対象施設とはしないものの，津波防護施設等の機能が要求される時にはその機能を期待できるように以下の対応を自主的に実施する。

a. 竜巻

設計竜巻と基準津波が重畳する年超過確率は約●（/年）であり，竜巻と津波の重畳は有意ではないと評価されるが，竜巻が襲来した場合には必ず作用する風荷重に対しては，津波防護施設等の健全性を維持する設計とする。また，竜巻が襲来した場合でも，必ずしも津波防護施設に作用するとは限らない竜巻飛来物の衝撃荷重に対しては，大規模な損傷に至り難い構造とする。

追而【地震津波側審査の反映】

(上記の●については，地震津波側審査結果を受けて反映のため)

b. 火山の影響

設計で想定する降下火砕物の噴火と基準津波が重畳する年超過確率は約●（/年）^{※2}であり，火山の影響と基準津波の重畳は有意ではないと評価されるが，降下火砕物の堆積荷重について長期荷重に対する構造健全性を確保するとともに，降灰後に適宜除去が可能な設計とする。

※2: 約●万年前の●を考慮

追而【地震津波側審査の反映】

(上記の●については，地震津波側審査結果を受けて反映のため)

表1 外部事象に対する津波防護施設等の対応方針整理表 (1/3)

設計上考慮すべき外部事象	① 随伴事象として津波を考慮要	② 独立事象として津波が重畳し得る	津波との重畳を考慮要(①か②が○)	津波防護施設の機能喪失による安全施設等の機能喪失の可能性	設計への反映の可否	機能維持のための対応方針
地震	○	-	○	あり 地震荷重により損傷した場合、安全施設等への津波の到達、浸水による機能喪失が想定される。	○	耐震Sクラスとして基準地震動Ssに対し健全性を維持し、津波に対する防護機能を維持する。また、津波と余震の組み合わせも考慮する。
風(台風)	-	○	○	あり 風荷重により損傷した場合、安全施設等への津波の到達、浸水による機能喪失が想定される。	○	・風荷重、津波荷重を考慮した設計とする。 ・津波監視カメラは、風荷重を考慮した設計とする。
竜巻	-	-	-	なし 以下とおり、重畳の頻度は無視し得る。 ・設計竜巻の確率：約 2.5×10^{-7} /年 ・基準津波の年超過率：約●●/年 ^{※3} →重畳確率：約●●/年 年超過率が 1×10^{-7} /年未満であり、有意ではない。	△	防潮堤・3号戸取水ピットスクリーン室防水壁の設計においては、自主的に以下の配慮を行い、信頼性を高める。 ・風圧力に対しては、健全性を維持する設計とする。 ・飛来物については、大規模な損傷に至り難い構造とする。 ・津波監視カメラ ^{※1} は、風荷重を考慮した設計とする。

※1：津波監視カメラを含めた監視カメラの外部事象に対する考えは別紙2参照

※3：設置変更許可申請書添付書類六「●・●超過確率の参照」を考慮

追而【地震津波側審査の反映】

(上記●については、地震津波側審査結果を受けて反映のため)

○：津波の随伴、重畳が否定できないため、設計で健全性を確保する事象

△：津波の随伴、重畳は有意ではないが、機能維持については設計上配慮する事象

○：津波の随伴、重畳が不要な事象

表1 外部事象に対する津波防護施設等の対応方針整理表 (2/3)

設計上考慮すべき外部事象	① 随伴事象として津波を考慮する要	② 独立事象として津波が重畳し得る	津波との重畳を考慮要(①か②が○)	津波防護施設等の機能喪失による安全施設等の機能喪失の可能性	設計への反映の要否	機能維持のための対応方針
凍結	—	○	○	あり 凍害により止水目地が損傷した場合、安全施設等への津波の到達、浸水による機能喪失が想定される。	○	止水目地は最低気温を考慮した設計とする。
降水	—	○	○	なし 降雨による海水面の上昇は無視し得る。	—	—
積雪	—	○	○	あり 積雪荷重により損傷した場合、安全施設等への津波の到達、浸水による機能喪失が想定される。	○	積雪荷重と津波荷重を考慮した設計とする。
落雷	—	○	○	あり 落雷による津波監視設備の機能喪失が想定される	○	津波監視設備については、既設避雷設備の遮へい範囲内への設置を行う。

: 津波の随伴、重畳が否定できないため、設計で健全性を確保する事象 (○)
 : 津波の随伴、重畳は有意ではないが、機能維持については設計上配慮する事象 (△)
 : 対応が不要な事象 (—)

表1 外部事象に対する津波防護施設等の対応方針整理表 (3/3)

設計上考慮すべき外部事象	① 随伴事象として津波を考慮要	② 独立事象として津波が重畳し得る	津波との重畳を考慮要(②が①が○)	津波防護施設の機能喪失による安全施設等の機能喪失の可能性	設計への反映要否	機能維持のための対応方針
火山の影響	—	—	—	なし 以下のおとおり、重畳の頻度は無視し得る。 ・想定する火山の確率：●/年 ^{**2} ・基準津波の年超過率：●/年 ^{**3} ⇒重畳確率：●/年 年超過率が 1×10^{-7} /年未満であり有意ではない。	△	設計にて長期荷重に対する構造健全性を確保するとともに、降灰後に降下火砕物を適時除去可能な設計とする。
地滑り	—	○	○	なし 地滑りにより津波防護施設が機能喪失に至ることはない。	—	—
生物的事象	—	○	○	なし 生物による影響(閉塞、侵入)による機能喪失モードを有しない。	—	—
森林火災	—	○	○	なし 防火帯により森林との離隔距離が確保されるため、熱影響を受けることはない。	—	—

※2：敷地で確認された降下火砕物の層厚は●cmと評価しており、この降下火砕物噴出年代は約●万年前であることを考慮

※3：設置変更許可申請書添付書類六「●、●超過確率の参照」を考慮

追而【地震津波側審査の反映】

(上記●については、地震津波側審査結果を受けて反映のため)

○：津波の随伴、重畳が否定できないため、設計で健全性を確保する事象(○)

△：津波の随伴、重畳は有意ではないが、機能維持については設計上配慮する事象(△)

—：対応が不要な事象(—)

竜巻影響評価における監視カメラの扱いについて

1. 概要

中央制御室には、発電用原子炉施設の外の状況を把握するために、原子炉建屋屋上他に設置した監視カメラの映像により、津波等の自然現象を昼夜にわたり監視できる設備を設置することとしている。本設備について、竜巻の影響を考慮した防護方針について以下にまとめる。

2. 竜巻影響について

(1) 設計方針

監視カメラは外部事象防護対象施設ではないが、損傷した場合でも外部事象防護対象施設に対して波及的影響を及ぼさないこと、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等の対応により安全機能を損なわない設計としている。具体的には、竜巻発生時において監視カメラの機能を期待できるように、竜巻の風荷重(100m/s)に対し、監視カメラの構造健全性を維持する設計とする。

また、監視カメラが損傷したとしても代替設備及び措置(運転員による確認)によって、原子炉施設に影響を及ぼす可能性がある自然現象等を把握することが可能な設計としている。(図1及び表1参照)

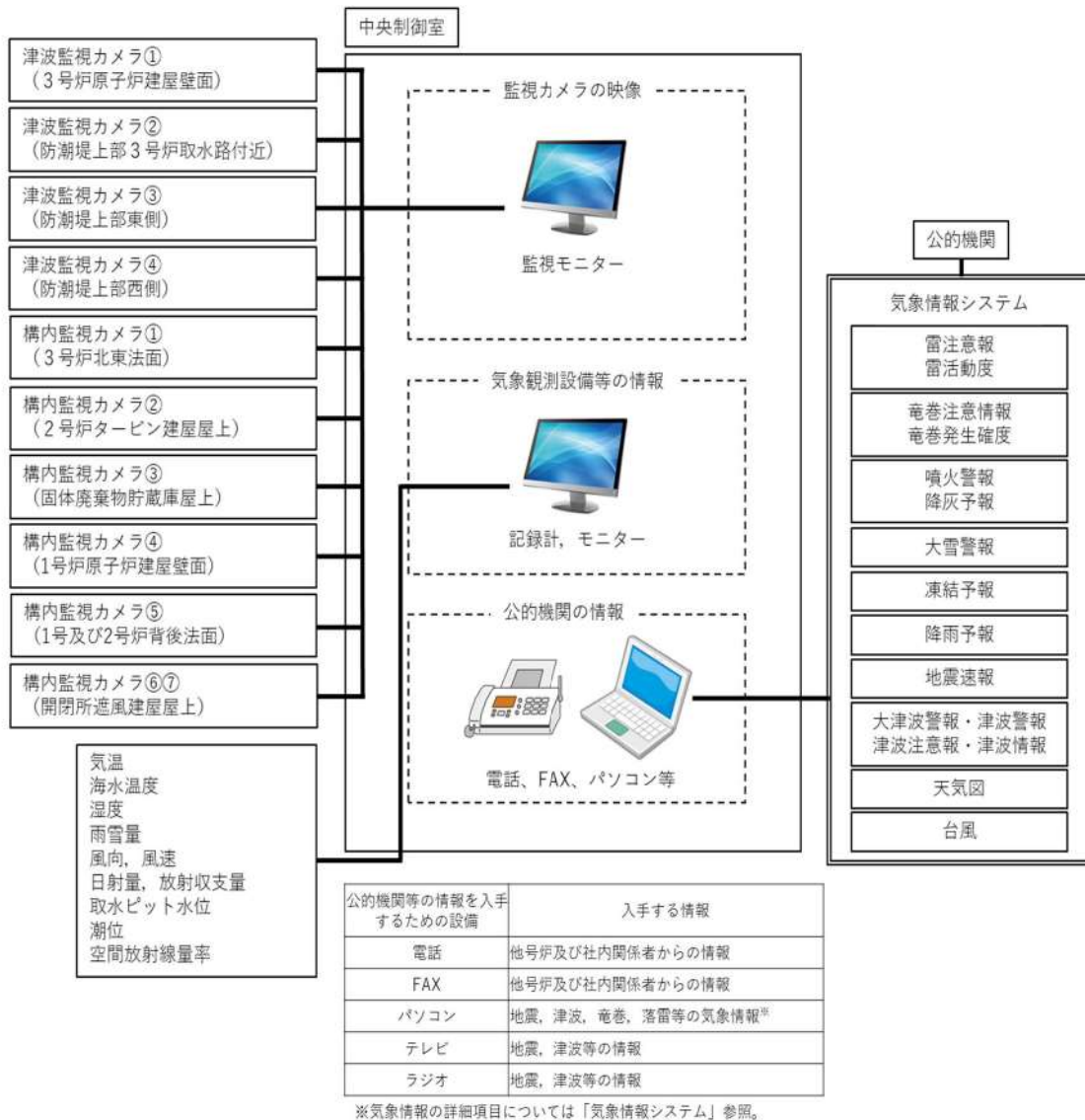


図1 中央制御室における外部状況の把握イメージ

表1 監視カメラにより把握可能な自然現象等

自然現象等	監視カメラにより把握できる 発電用原子炉施設の外の状況	監視カメラ以外の 設備等による把握手段
地震	地震による発電所構内及び発電用原子炉施設の損壊状況	公的機関（地震速報）
津波	津波の襲来状況や発電所構内の浸水状況	取水ピット水位計
		潮位計
		公的機関（津波警報・注意報）
風（台風）	風（台風）・竜巻（飛来物含む）による 発電所構内及び発電用原子炉施設の損壊 状況	気象観測設備（風向，風速）
竜巻		公的機関（台風，竜巻注意情報）
降水	発電所構内の浸水状況	気象観測設備（雨雪量）
積雪	発電所構内及び発電用原子炉施設の積雪 状況	気象観測設備（雨雪量）
落雷	発電所構内及び発電用原子炉施設周辺の 落雷状況	公的機関（雷注意報）
地滑り	発電所構内及び発電用原子炉施設周辺の 地滑り状況	目視確認 ^{※1}
火山の影響	発電所構内及び発電用原子炉施設の降下 火砕物堆積状況	目視確認 ^{※1}
生物学的事象	発電所前方の海面における海生生物（ク ラゲ等）の襲来状況	取水ピット水位計 ^{※2}
森林火災	火災状況，ばい煙の方向確認	目視確認 ^{※1}
飛来物 （航空機落下）	飛来物による発電所構内及び発電用原子 炉施設の損壊状況	目視確認 ^{※1}
近隣工場等の火災	火災状況，ばい煙の方向確認	目視確認 ^{※1}
船舶の衝突	船舶の衝突による発電用原子炉施設の損 壊状況	目視確認 ^{※1}

※1 建屋外で状況確認

※2 取水口が閉塞した場合，取水ピットの水位が低下するため把握可能

耐震Sクラス施設について

「竜巻影響評価ガイド」においては、竜巻及びその随伴事象等によって発電用原子炉施設の安全性を損なわない設計であることを確認する施設（竜巻影響評価ガイドにおいては竜巻防護施設と定義）は「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の重要度分類における耐震Sクラスの設計を要求される設備（系統、機能）及び建屋、構築物等とされている。一方、今回の竜巻影響評価では、安全重要度分類のクラス1、クラス2及び安全評価上その機能に期待するクラス3に属する施設を外部事象防護対象施設として選定しているため、外部事象防護対象施設に該当しない耐震Sクラス施設の有無について確認した結果、第1表に示すとおり、津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備が抽出されたが、以下の理由により、竜巻影響評価の対象として追加する必要はないと判断した。

〈津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を評価対象施設としない理由〉

- ・津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備は、津波に対して機能を発揮する施設であり、竜巻と津波の重畳の考慮要否を検討することで、竜巻に対する機能維持の要否が判断可能である。
- ・竜巻及びその随伴事象によりこれらの施設が損傷することを想定した場合、基準津波に対する影響を考慮する必要があるが、津波と竜巻は発生原因が異なり独立事象であること、及び基準津波の年超過確率（● /年）と設計竜巻（ $V_D=100\text{m/s}$ ）の発生頻度（約 2.5×10^{-7} /年）を踏まえると、敷地レベルを超える津波と設計竜巻が同時に発生する可能性は小さい。また、基準津波と設計竜巻の発生頻度を踏まえると、竜巻及びその随伴事象により津波防護施設等が損傷した場合でも当該機能が必要となる前に修復等の対応が可能と考えられる。

追而【地震津波側審査の反映】
（上記●については、地震津波側審査結果を受けて反映のため）

第1表 耐震Sクラス設備における評価対象施設の抽出結果 (1/2)

耐震重要度分類	機能別分類	設備別分類	構築物, 系統又は機器	安全重要度クラス 1 or 2 or 3 (※1)
Sクラス	a. 「原子炉冷却材圧力バウンダリ」 (「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則(平成25年6月28日告示)」において記載されている定義と同様)を構成する機器・配管系	主要設備	・原子炉容器	○
			・原子炉冷却材圧力バウンダリに属する容器・配管・ポンプ・弁	○
		補助設備	・隔離弁を閉とするに必要な電気及び計装設備	○
		直接支持構築物	・原子炉容器・蒸気発生器・1次冷却材ポンプ・加圧器の支持構築物	○
	・機器・配管, 電気計装設備等の支持構築物		○	
	b. 使用済燃料を貯蔵するための施設	主要設備	・使用済燃料ピット	○
			・使用済燃料ラック	○
	c. 原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための施設, 及び原子炉の停止状態を維持するための施設	主要設備	・制御棒クラスタ及び制御棒駆動装置(トリップ機能に関する部分)	○
			・化学体積制御設備のうち, ほう酸注入ライン	○
		補助設備	・炉心支持構築物及び制御棒クラスタ案内管	○
			・非常用電源及び計装設備	○
	直接支持構築物	・機器・配管, 電気計装設備等の支持構築物	○	
	d. 原子炉停止後, 炉心から崩壊熱を除去するための施設	主要設備	・主蒸気・主給水設備(主給水逆止弁より蒸気発生器2次側を経て, 主蒸気隔離弁まで)	○
			・補助給水設備	○
			・余熱除去設備	○
		補助設備	・原子炉補機冷却水設備(当該主要設備に係るもの)	○
			・原子炉補機冷却海水設備	○
			・燃料取替用水ピット	○
			・炉心支持構築物(炉心冷却に直接影響するもの)	○
		直接支持構築物	・非常用電源及び計装設備	○
e. 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後, 炉心から崩壊熱を除去するための施設	主要設備	・安全注入設備	○	
		・余熱除去設備(再循環用)	○	
		・燃料取替用水ピット	○	
	補助設備	・原子炉補機冷却水設備(当該主要設備に係るもの)	○	
		・原子炉補機冷却海水設備	○	
		・中央制御室の遮へいと空調設備	○	
		・非常用電源及び計装設備	○	
直接支持構築物	・機器・配管, 電気計装設備等の支持構築物	○		

※1 クラス3については, 安全評価上その機能に期待するものに限る。

第1表 耐震Sクラス設備における評価対象施設の抽出結果 (2/2)

耐震重要度分類	機能別分類	設備別分類	構築物, 系統又は機器	安全重要度クラス1 or 2 or 3 (※1)	
Sクラス	f. 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に, 圧力障壁となり放射性物質の拡散を直接防ぐための施設	主要設備	・原子炉格納容器	○	
			・原子炉格納容器バウンダリに属する配管・弁	○	
		補助設備	・隔離弁を閉とするに必要な電気及び計装設備	○	
		直接支持構造物	・機器・配管等の支持構造物 ・電気計装設備の支持構造物	○ ○	
	g. 放射性物質の放出を伴うような事故の際に, その外部放散を抑制するための施設であり, 上記f. 以外の施設	主要設備		・原子炉格納容器スプレイ設備	○
				・燃料取替用水ピット	○
				・アニュラスシール	○
				・アニュラス空気浄化設備	○
		補助設備	・排気筒	○	
		直接支持構造物	・原子炉補機冷却水設備 (当該主要設備に係るもの) ・原子炉補機冷却海水設備 ・非常用電源及び計装設備	○ ○ ○	
	h. 津波防護機能を有する設備及び浸水防止機能を有する設備	主要設備		・津波防護施設 (防潮堤, 3号炉取水ピットスクリーン室防水壁, 1号及び2号炉取水路流路縮小工, 3号炉放水ピット流路縮小工, 1号及び2号炉放水路逆流防止設備, 貯留堰)	該当しない
				・浸水防止設備 (水密扉, 貫通部止水蓋, ドレンライン逆止弁, 浸水防止蓋, 貫通部止水処置)	該当しない
		直接支持構造物	・機器等の支持構造物	該当しない	
	i. 敷地における津波監視機能を有する施設	主要設備	・津波監視カメラ, 取水ピット水位計, 潮位計	該当しない	
		補助設備	・非常用電源及び計装設備	○	
		直接支持構造物	・機器, 電気計装設備等の支持構造物	○	
j. その他	主要設備		・使用済燃料ピット水補給ライン	○	
			・炉内構造物	○	
			・非常用電源及び計装設備	○	
			・機器・配管, 電気計装設備等の支持構造物	○	

※1 クラス3については, 安全評価上その機能に期待するものに限る。

緊急時対策所の竜巻防護方針について

1. 竜巻に対する防護方針

緊急時対策所は、設計基準対象施設かつ重大事故等対処施設として位置付けられており、それぞれに対し以下の防護方針に基づき、必要とされる機能を維持する設計としている。

設計基準対象施設としては、安全重要度分類のクラス3施設（MS-3）に対する防護方針に従い、損傷する場合を考慮して、代替設備により必要な機能を確保すること、安全上支障のない期間での修復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、その安全機能を損なわない設計とすることとしている。

また、重大事故等対処施設としては、緊急時対策所に配置される種々の重大事故等対処設備に対し、同一機能の設備には多様性を考慮する等の配慮により、共通要因である設計竜巻により設計基準事故対処設備等と同時に機能を喪失しないようにすることで、必要な機能を維持する方針としている。

2. 防護方針への適合性

緊急時対策所においては、設計基準対象施設及び重大事故等対処施設として、「設置許可基準規則」第34条及び第61条に示される要求に応じた各種の設備が設置される。これら設備の配置等の特徴を踏まえ、竜巻に対する機能維持のための方針を整理した結果を表1に示す。

大部分の設備は緊急時対策所及び空調上屋に内包されるが、緊急時対策所は重大事故等対処施設として要求される遮蔽性、耐震性を考慮した堅牢な構造であり、また、空調上屋は緊急時対策所と同等な設計であることから、内部の設備は設計竜巻に対し防護される^{*}。また、屋外の一部設備が仮に竜巻により損傷した場合でも、同一機能を有する他の設備が多様性及び多重性をもって配備されている。

以上より、上述の設計基準対象施設としての防護方針及び重大事故等対処施設としての防護方針に適合したものとなっている。

※：緊急時対策所及び空調上屋については、外部事象防護対象施設を内包する建屋（周辺補機棟等）と同じ評価手法により、設計荷重に対して構造健全性が維持されることを確認している。

表1 緊急時対策所の設備と竜巻に対する設計方針（1／2）

必要な機能	設計基準事故対処設備等	重大事故等対処設備	保管・設置箇所	竜巻に対する機能維持
居住性の確保	緊急時対策所	同左	屋外	構造健全性を確保
	—	緊急時対策所遮へい	屋外	構造健全性を確保
	—	可搬箇所： 可搬型新設緊急時対策所 空気浄化ファン 可搬型新設緊急時対策所 空気浄化フィルタユニット、 ダンパ等	屋内	空調上屋による外殻防護
	—	常設箇所： 接続口、ダンパ等	屋内 屋外	【屋内設備】 緊急時対策所および空調 上屋による外殻防護 【屋外設備】 防護対策実施
	—	可搬箇所： 空気供給装置、配管等	屋内	空調上屋による外殻防護
	—	常設箇所： 接続口、配管等	屋内 屋外	【屋内設備】 緊急時対策所および空調 上屋による外殻防護 【屋外設備】 防護対策実施
	—	圧力計	屋内	緊急時対策所による外殻 防護
	酸素濃度・二酸化炭素濃度 計	同左	屋内	緊急時対策所による外殻 防護
	—	緊急時対策所可搬型エリ アモニタ	屋内	緊急時対策所による外殻 防護
	—	可搬型モニタリングポスト 可搬型気象観測設備	屋内	緊急時対策所による外殻 防護
必要な情報の 把握	データ収集計算機 ERSS 伝送サーバ データ表示端末	同左	屋内 一部屋外	【屋内設備】 原子炉補助建屋及び緊急 時対策所による外殻防護 【屋外設備】 仮に一部の設備が損傷し た場合でも多様性を有す る他の回線で代替
電源の確保	非常用低圧母線	—	屋内	緊急時対策所による外殻 防護
	—	可搬箇所： 緊急時対策所用発電機、 電路	屋外	分散配置
	—	常設箇所： 接続口、電路	屋内 屋外	【屋内設備】 緊急時対策所による外殻 防護 【屋外設備】 防護対策実施

表1 緊急時対策所の設備と竜巻に対する設計方針（2/2）

必要な機能	設計基準事故対処設備等	重大事故等対処設備	保管・設置箇所	竜巻に対する機能維持
通信設備	衛生電話設備（固定型） 衛生電話設備（FAX） 衛生電話設備（携帯型） 無線連絡設備（携帯型） 統合原子力防災ネットワークに接続する通信連絡設備	同左	屋内 一部屋外	【屋内設備】 原子炉補助建屋及び緊急時対策所による外殻防護 【屋外設備】 仮に一部の設備が損傷した場合でも多様性を有する他の回線で代替
	—	インターフォン テレビ会議システム（指揮所・待機所間）	屋内 一部屋外	【屋内設備】 原子炉補助建屋及び緊急時対策所による外殻防護 【屋外設備】 仮に一部の設備が損傷した場合でも多様性を有する他の回線で代替
	運転指令設備 加入電話設備 電力保安通信用電話設備 移動無線設備 社内テレビ会議システム 専用電話設備	—	屋内 一部屋外	【屋内設備】 原子炉補助建屋及び緊急時対策所による外殻防護 【屋外設備】 仮に一部の設備が損傷した場合でも多様性を有する他の回線で代替

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について

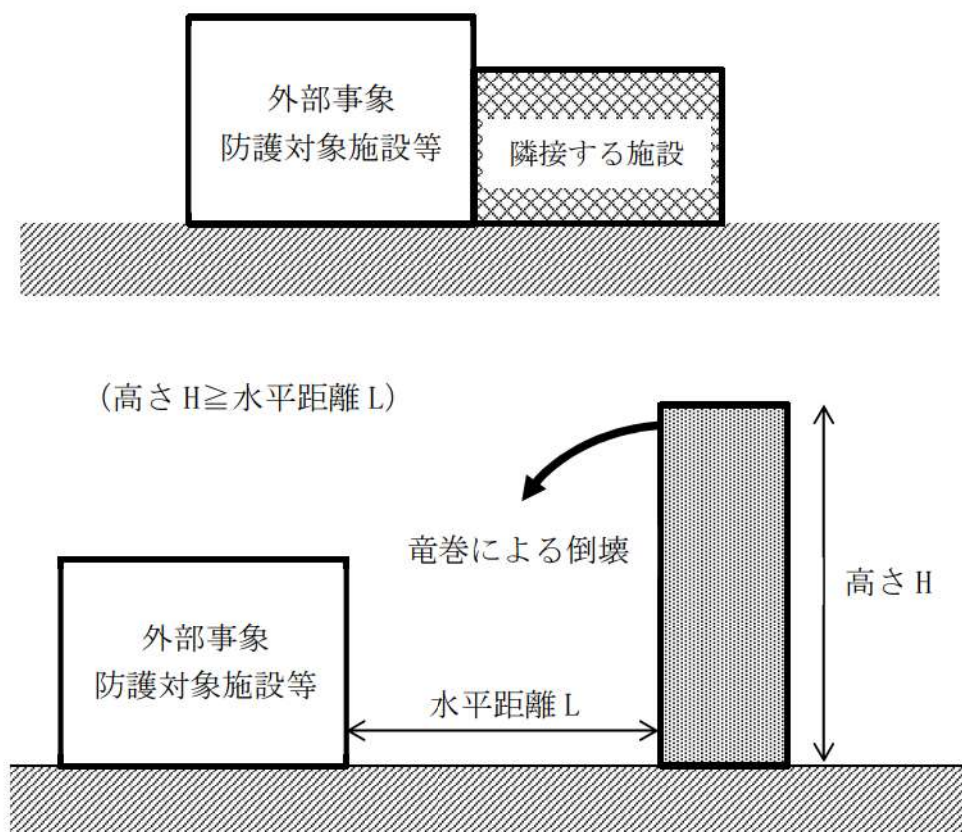
1. 抽出方針

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。）のうち、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。

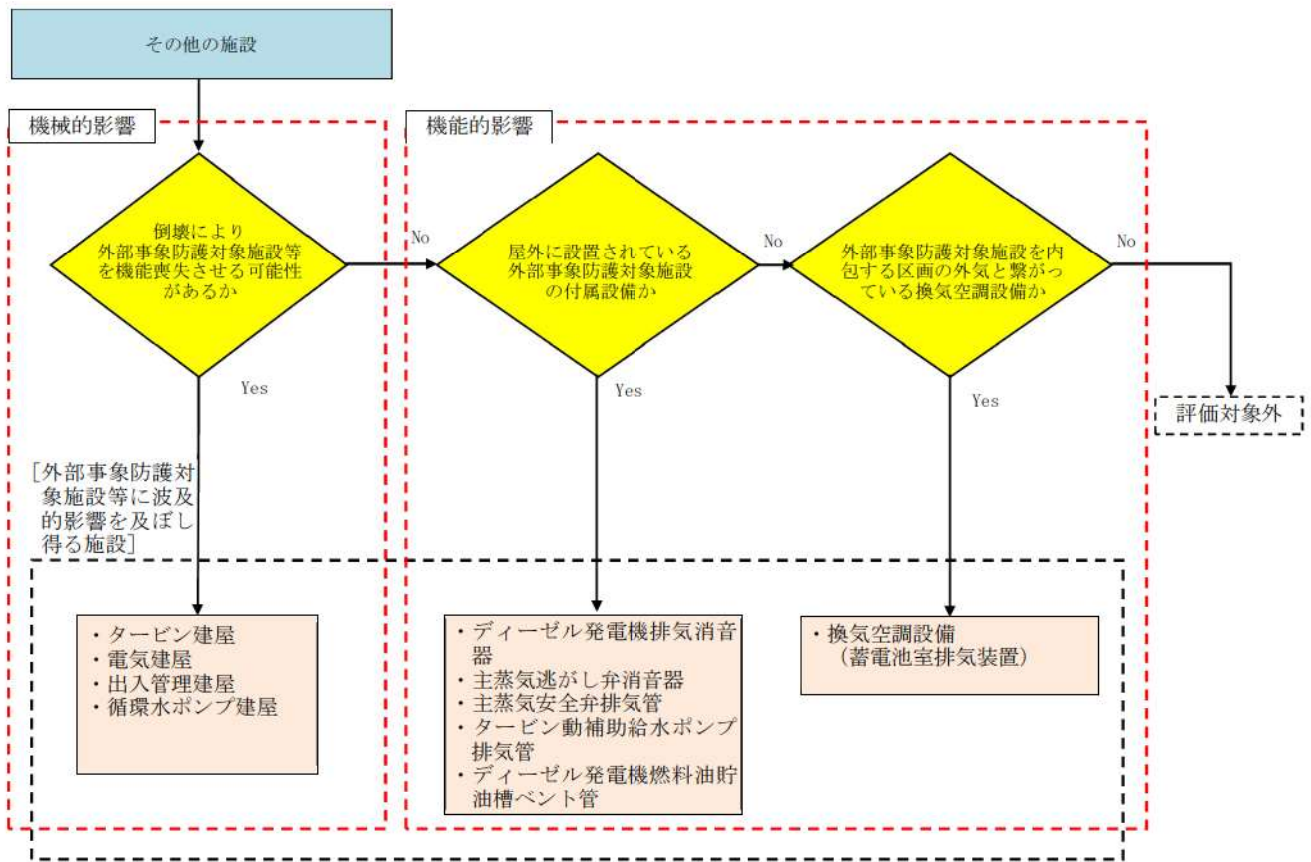
1.1 機械的影響の観点での抽出

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。第 1.1.1 図に示すとおり、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。

抽出フローを第 1.1.2 図に、抽出結果を第 1.1.1 表及び第 1.1.3 図に示す。また、抽出結果の詳細を、別紙 1 「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に係る調査結果について」に示す。



第 1.1.1 図 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



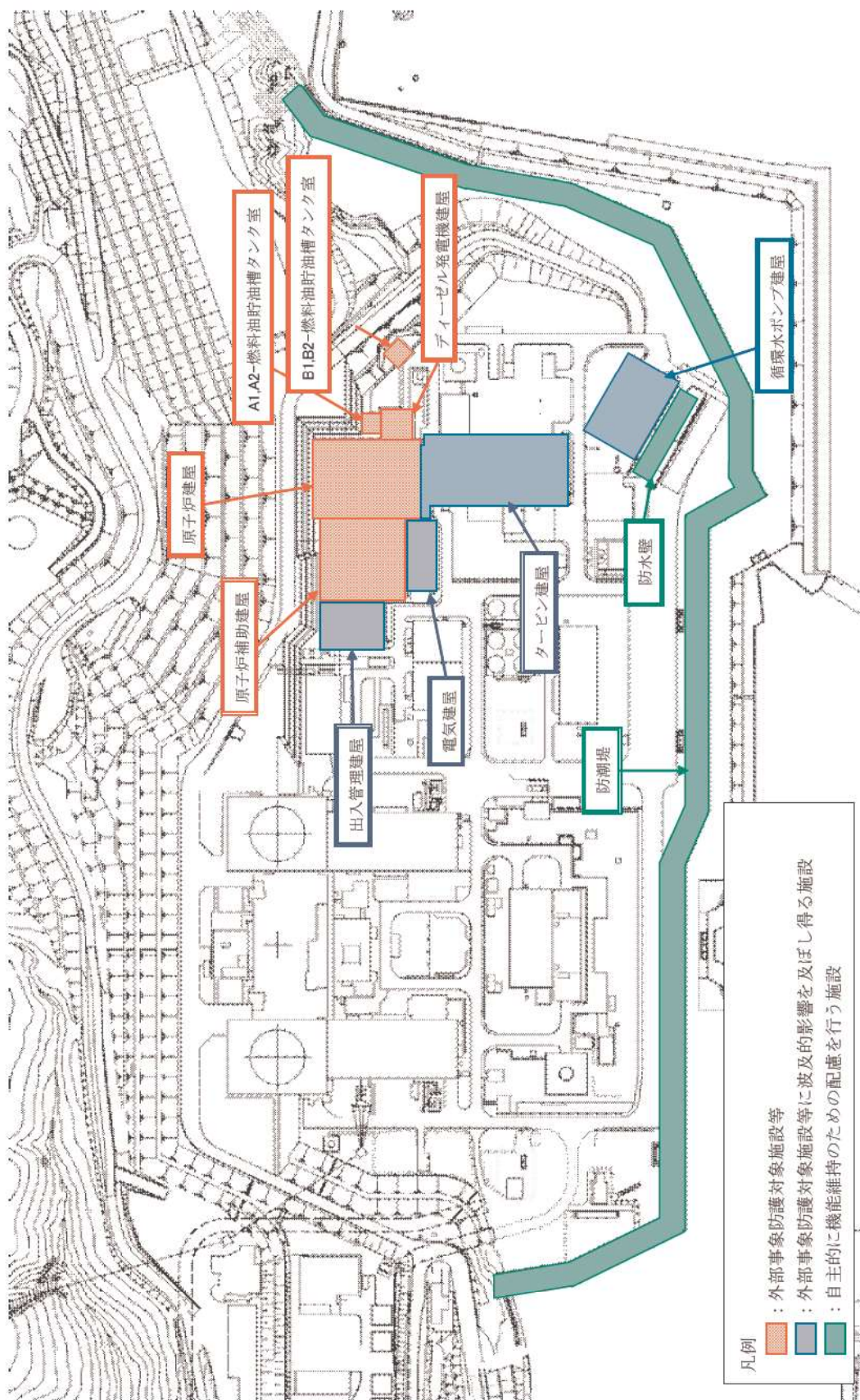
第 1.1.2 図 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出フロー

第 1.1.1 表 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へ 損傷を及ぼす可能性のある 建物及び構築物等	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
タービン建屋	原子炉建屋	30.7	隣接	○
電気建屋	原子炉建屋 原子炉補助建屋	18.7	隣接	○
出入管理建屋	原子炉補助建屋	15.8	隣接	○
循環水ポンプ建屋	原子炉補機冷却海水ポンプ, 原子炉補機冷却海水ポンプ出口 ストレーナ	30.6	建屋内設置※1	○

(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。

※1：循環水ポンプ建屋は、原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ、原子炉補機冷却海水ポンプ、配管及び弁（原子炉補機冷却海水系統）を内包している。



第 1.1.3 図 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

2.1 外部事象防護対象施設の付属施設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。抽出結果を第 2.1.1 表に示す。

第 2.1.1 表 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	屋外にある付属施設
ディーゼル発電機	ディーゼル発電機排気消音器
主蒸気逃がし弁	主蒸気逃がし弁消音器
	主蒸気安全弁排気管
タービン動補助給水ポンプ	タービン動補助給水ポンプ排気管
A1,A2-燃料油貯油槽タンク室 B1,B2-燃料油貯油槽タンク室	ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管

2.2 外部事象防護対象施設を内包する区画の外気と繋がっている換気空調設備

外部事象防護対象施設に対して、機能的影響の観点（外部事象防護対象施設を内包する区画の外気と繋がっている換気空調設備）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。抽出結果を第 2.2.1 表に示す。

第 2.2.1 表 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	外部事象防護対象施設を内包する区画の外気と繋がっている換気空調設備
蓄電池	換気空調設備（蓄電池室排気装置）

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に係る 調査結果について

泊発電所における波及的影響を及ぼし得る施設に係るウォークダウンは、平成 25 年 6 月 24～25 日、平成 27 年 7 月 24 日～11 月 17 日及び令和 4 年 11 月 22 日に実施した。

調査では、外部事象防護対象施設及び外部事象防護対象施設の外殻に波及的影響を及ぼし得る施設を抽出し、倒壊による影響を及ぼす可能性について確認を行った。

1. 調査範囲

外部事象防護対象施設等の周りの最も高い構築物である補助ボイラー煙突の高さを基準として、約 45m の範囲とした。

2. 調査方法

調査範囲内にある施設について、外部事象防護対象施設等の周辺の状態を確認し、隣接施設及び比較的近接している施設を抽出するとともに、倒壊による影響の可能性の観点から寸法測定、設置場所の確認、写真撮影等を行った。具体的な内容については以下のとおり。

(1) 寸法測定

外部事象防護対象施設等からの離隔距離の測定、対象物の平面寸法及び高さを、計測器による測定及び図面等により確認した。

(2) 設置場所

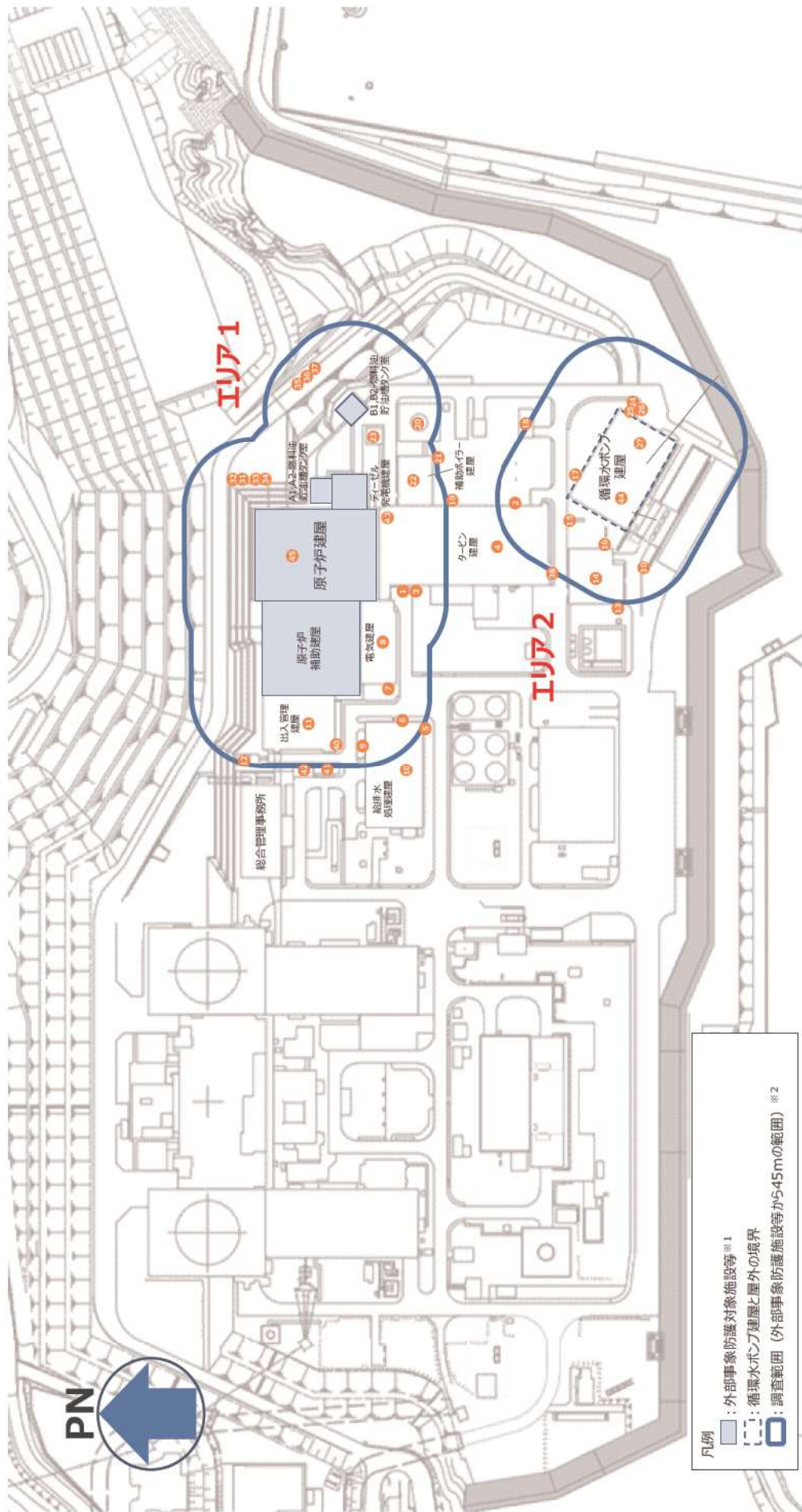
確認した施設について、配置図の作成及び、写真撮影を実施した。

その他、現地で確認できない情報（重量、寸法等）については、設計図書等により確認した。

3. 調査結果

本調査で抽出された、波及的影響を及ぼし得る施設を第 3.1 図～第 3.3 図及び第 3.1 表～第 3.3 表に示す。外部事象防護対象施設等から約 45m の範囲内に設置されている設備及び建物・構築物を合わせて 45 施設を抽出し、第 3.4 図のフローに基づいて評価を行った。

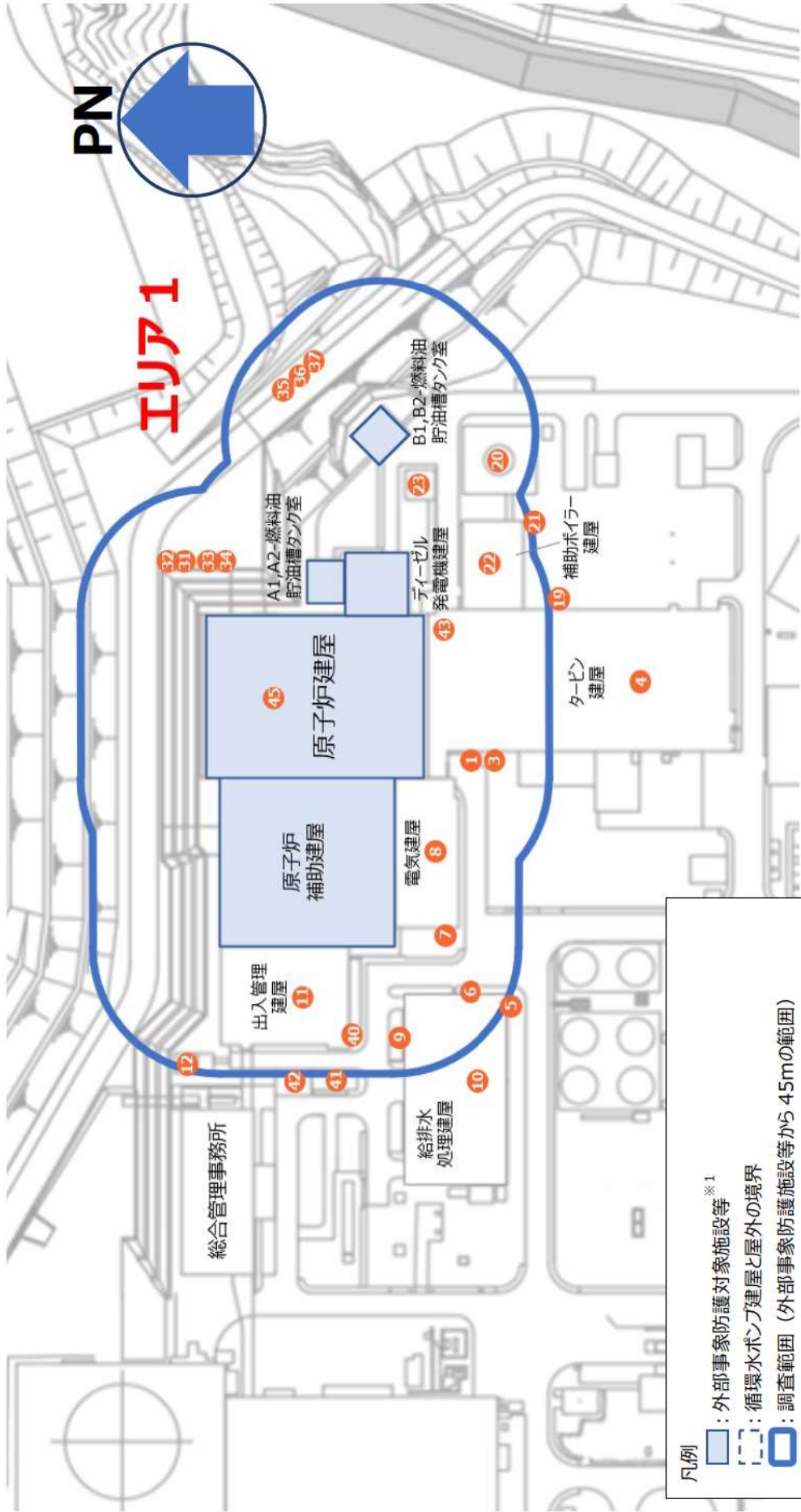
その結果、外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設の評価対象として、タービン建屋、電気建屋、出入管理建屋及び補助ボイラー建屋に加え、基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性に鑑み自主的に機能維持のための配慮を行う防潮堤及び 3 号炉取水ピットスクリーン室防水壁の 6 施設を選定した。



※1：タービン建屋は、電巻を起因として蒸気発生器への過剰給水が発生することはないが、独立事象としての重量の可能性を考慮し、安全上支障のない期間に補修等の対応を行うことで、タービン保安装置及び主蒸気止め弁が安全機能を損なわない設計とするため、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対象とする。

※2：外部事象防護対象施設等である原子炉補機冷却海水ポンプおよび原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナーへの波及的影響調査範囲については、保守的に循環水ポンプ建屋（点線）から45mの範囲を調査した。

第3.1図 波及的影響を及ぼし得る可能性のある施設配置図（調査エリア）



※1：タービン建屋は、竜巻を起因として蒸気発生器への過剰給水が発生することはないが、独立事象としての重畳の可能性を考慮し、安全上支障のない期間に補修等の対応を行うことで、タービン保安装置及び主蒸気止め弁が安全機能を損なわない設計とするため、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対象とする。

第3.2図 波及的影響を及ぼし得る可能性のある施設配置図（エリア1）



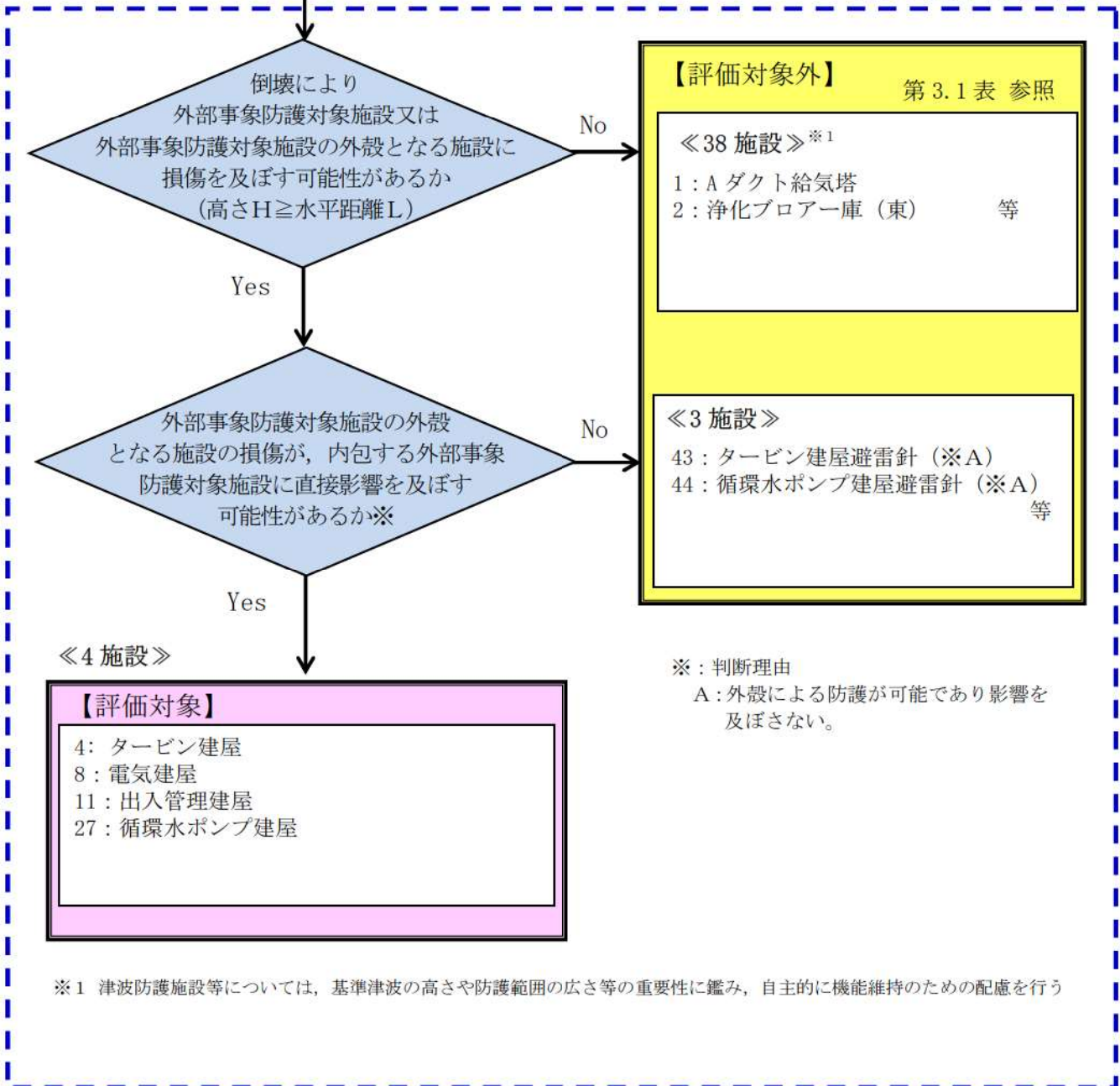
※1：タービン建屋は、竜巻を起因として蒸気発生器への過剰給水が発生することはないが、独立事象としての重量の可能性を考慮し、安全上支障のない期間に補修等の対応を行うことで、タービン保安装置及び主蒸気止め弁が安全機能を損なわない設計とするため、外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出対象とする。

※2：外部事象防護対象施設等である原子炉補機冷却海水ポンプ及び原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナーへの波及的影響調査範囲については、保守的に循環水ポンプ建屋（点線）から45mの範囲を調査した。

第3.3図 波及的影響を及ぼし得る可能性のある施設配置図（エリア2）

外部事象防護対象施設等の約 45m の範囲内に設置されている設備及び建物・構築物

波及的影響評価判定



第 3.4 図 倒壊による波及的影響を及ぼし得る可能性のある施設の評価判定フロー

第 3.1 表 倒壊により外部事象防護対象施設又は外部事象防護対象施設の外殻となる施設に
 損傷を及ぼす可能性がある施設 評価対象外一覧表【36 施設※】

No.	施設名	No.	施設名	No.	施設名
1	A ダクト給気塔	16	G ダクト給気塔	31	代替給電用接続盤 3 (1) (2)
2	浄化槽ブローアーク (東)	17	電気防食装置	32	代替給電用接続盤 3 (3) (4)
3	電気防食装置	18	3号機発電機ガスボンベ貯蔵庫	33	3-代替非常用発電機保守分電盤 (1)
5	D ダクト排気塔	19	電気防食装置	34	3号機移動用発電機車用保守分電盤
6	A ダクト排気塔	20	3号機補助ボイラー燃料タンク	35	制御盤 (P P A 2 5 6)
7	CV ケーブルダクト排気塔	21	補助ボイラー煙突	36	制御盤 (P P A 2 5 3)
9	F ダクト給気塔	22	補助ボイラー建屋	37	中継盤 (P P J 2 0 1)
10	給排水処理建屋	23	油計量タンク	38	H ダクト給気塔 (タービン建屋南)
12	洞道冷却ファン建屋	24	制御盤 (P P A 2 1 7)	39	H ダクト排気塔 (タービン建屋南)
13	E ダクト給気塔	25	連絡装置収納盤 (S T 2 2 2)	40	F ダクト排気塔 (出入管理建屋南)
14	海水淡水化設備建屋	26	小屋	41	旧 3 号出入管理建屋
15	G ダクト排気塔	30	3-スクリーン室橋形クレーン電源盤	42	制御盤

※ 防潮堤及び防水壁については、基準津波の高さや防護範囲の広さ等の重要性を鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う。

第 3.2 表 外部事象防護対象施設の外殻の損傷が、内包する外部事象防護対象施設に
 直接影響を及ぼす可能性がある施設 評価対象外一覧表【3 施設】

No.	施設名	No.	施設名	No.	施設名
43	タービン建屋避雷針 (※A)	44	循環水ポンプ建屋避雷針 (※A)	45	原子炉建屋避雷針 (※A)

※：判断理由

A：外殻による防護が可能であり影響を及ぼさない。

第3.3表 現地調査結果における波及的影響を及ぼし得る施設の抽出結果(1/3)

No.	設備名称	安全 重要度 クラス	波及的影響を及ぼす対 象(外部事象防護対象施 設の外殻となる建屋及 び構築物等)	地上高(m) H	外部事象防護対象施 設の外殻となる建 屋及び構築物等ま での最短距離(m) L	L-H(m)	波及的影響		評価対象
							倒壊により外部事象防護 対象施設又は外部事象防護 対象施設の外殻となる施 設に損傷を及ぼす可能性 があるか (高さH≧水平距離L)	外部事象防護対象施設の外 殻となる施設の損傷が、 内包する外部事象防護対 象施設に直接影響を及ぼ す可能性があるか	
1	Aダクト給気塔	NON	原子炉建屋	3.5	13.3	9.8	-	-	-
2	浄化槽ブローア一庫(東)	NON	原子炉補機冷却海水ボ ンプ	1.8	68.8	67.0	-	-	-
3	電気防食装置	NON	原子炉建屋	1.7	21.9	20.2	-	-	-
4	タービン建屋	PS-3	原子炉建屋	40.7	隣接	-	○	○	○
5	Dダクト排気塔	NON	原子炉補助建屋	3.4	43.9	40.5	-	-	-
6	Aダクト排気塔	NON	原子炉補助建屋	3.4	28.2	24.8	-	-	-
7	CVケーブールドクト排気塔	NON	原子炉補助建屋	2.5	14.5	12.0	-	-	-
8	電気建屋	PS-3	原子炉建屋 原子炉補助建屋	18.7	隣接	-	○	○	○
9	Fダクト給気塔	NON	原子炉補助建屋	3.5	29.3	25.8	-	-	-
10	給排水処理建屋	PS-3	原子炉建屋	13.6	18.2	4.6	-	-	-
11	出入管理建屋	MS-3	原子炉補助建屋	15.8	隣接	-	○	○	○
12	潤道冷却ファン建屋	PS-3	原子炉補助建屋	16.6	40.4	23.8	-	-	-
13	Eダクト給気塔	NON	原子炉補機冷却海水ボ ンプ	3.5	48.8	45.3	-	-	-
14	海水淡水化設備建屋	PS-3	原子炉補機冷却海水ボ ンプ	15.4	16.8	1.4	-	-	-
15	Gダクト排気塔	NON	原子炉補機冷却海水ボ ンプ	3.7	7.6	3.9	-	-	-
16	Gダクト給気塔	NON	原子炉補機冷却海水ボ ンプ	3.7	9.9	6.2	-	-	-
17	電気防食装置	NON	原子炉補機冷却海水ボ ンプ出口ストレーナ	1.7	29.0	27.3	-	-	-
18	3号機発電機 ガスボンベ貯蔵庫	NON	原子炉補機冷却海水ボ ンプ出口ストレーナ	5.2	70.4	65.2	-	-	-

○：該当
-：該当せず

第3.3表 現地調査結果における波及的影響を及ぼし得る施設の抽出結果(2/3)

No.	設備名称	安全 重要度 クラス	波及的影響を及ぼす対 象(外部事象防護対象施 設の外殻となる建屋及 び構築物等)	地上高(m) H	外部事象防護対象施 設の外殻となる建 屋及び構築物等ま での最短距離(m) L	L-H(m)	波及的影響		評価対象
							倒壊により外部事象防護 対象施設又は外部事象防護 対象施設の外殻となる施 設に損傷を及ぼす可能性 があるか (高さH \geq 水平距離L)	外部事象防護対象施設の外 殻となる施設が、 内包する外部事象防護対 象施設に直接影響を及ぼ す可能性があるか	
19	電気防食装置	NON	原子炉建屋	1.7	45.9	44.2	-	-	-
20	3号機補助ボイラー燃料タンク	PS-3	ディーゼル発電機建屋	25.6	42.2	16.6	-	-	-
21	補助ボイラー煙突	PS-3	ディーゼル発電機建屋	42.7	42.9	0.2	-	-	-
22	補助ボイラー建屋	PS-3	ディーゼル発電機建屋	12.7	19.3	6.6	-	-	-
23	油計量タンク	NON	B1, B2-燃料油 貯油槽タンク室	12.5	12.6	0.1	-	-	-
24	制御盤 (P P A 2 1 7)	NON	原子炉補機冷却海水ボ ンプ出口ストレーナ	1.7	45.0	43.3	-	-	-
25	連絡装置取納盤 (S T 2 2 2)	NON	原子炉補機冷却海水ボ ンプ出口ストレーナ	1.5	38.4	36.9	-	-	-
26	小屋	NON	原子炉補機冷却海水ボ ンプ出口ストレーナ	3	40.3	37.3	-	-	-
27	循環水ポンプ建屋	PS-3	原子炉補機冷却海水ボ ンプ、原子炉補機冷却 海水ポンプ出口ストレ ーナ	32.7	上屋(※1)	-	○	○	○
28	防水壁(新設)	NON	基準津波や防護範囲の広さ等の重要性を鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う。						
29	防潮堤(新設)	NON	基準津波や防護範囲の広さ等の重要性を鑑み、自主的に機能維持のための配慮を行う。						
30	3-スクリーン室 橋形クレーン電源盤	NON	原子炉補機冷却海水ボ ンプ	1.7	22.4	20.6	-	-	-
31	代替給電用接続盤3(1)(2)	NON	原子炉建屋	3.9	17.3	13.4	-	-	-
32	代替給電用接続盤3(3)(4)	NON	原子炉建屋	3.9	20.1	16.2	-	-	-
33	3-代替非常用発電機 保守分電盤(1)	NON	原子炉建屋	1.8	15.3	13.5	-	-	-

※1 循環水ポンプ建屋は、取水ビットポンプ室、原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ、原子炉補機冷却海水ポンプ、原子炉補機冷却海水ポンプ並びに配管及び弁(原子炉補機冷却海水系統)の上屋であり、これら
を覆うように配置されている。

○：該当
-：該当せず

第3.3表 現地調査結果における波及的影響を及ぼし得る施設の抽出結果(3/3)

No.	設備名称	安全 重要度 クラス	波及的影響を及ぼす対 象(外部事象防護対象施 設の外殻となる建屋及 び構築物等)	地上高(m) H	外部事象防護対象施 設の外殻となる建 屋及び構築物等ま での最短距離(m) L	L-H(m)	波及的影響		評価対象
							倒壊により外部事象防護 対象施設又は外部事象防護 対象施設の外殻となる施 設に損傷を及ぼす可能性 があるか (高さH \geq 水平距離L)	外部事象防護対象施設の外 殻となる施設の損傷が、 内包する外部事象防護対 象施設に直接影響を及ぼ す可能性があるか	
34	3号機移動用発電機車用 保守分電盤	NON	原子炉建屋	1.8	15.3	13.5	-	-	-
35	制御盤 (PPA256)	NON	B1, B2-燃料油 貯油槽タンク室	2.3	25.4	23.1	-	-	-
36	制御盤 (PPA253)	NON	B1, B2-燃料油 貯油槽タンク室	2.0	23.9	21.9	-	-	-
37	中継盤 (PPJ201)	NON	B1, B2-燃料油 貯油槽タンク室	1.9	23.9	22.0	-	-	-
38	Fダクト給気塔 (タービン建屋南)	NON	原子炉建屋	3.4	47.2	43.8	-	-	-
39	Fダクト排気塔 (タービン建屋南)	NON	原子炉建屋	1.9	27.6	25.7	-	-	-
40	Fダクト排気塔 (出入管理建屋南)	NON	原子炉補助建屋	3.4	27.0	23.6	-	-	-
41	旧3号出入管理建屋	NON	原子炉補助建屋	4.4	44.1	39.7	-	-	-
42	制御盤	NON	原子炉補助建屋	1.7	44.1	42.4	-	-	-
43	タービン建屋避雷針	NON	原子炉建屋	9.0	2.0	-7.0	○	-	-
44	循環水ポンプ建屋避雷針	NON	原子炉補助機冷却海水ボ ンプ, 原子炉補助機冷却 海水ポンプ出口ストレ ーナ	9.5	屋上	-	○	-	-
45	原子炉建屋避雷針	NON	原子炉建屋	5.9	屋上	-	○	-	-

○:該当
-:該当せず

気候区分について

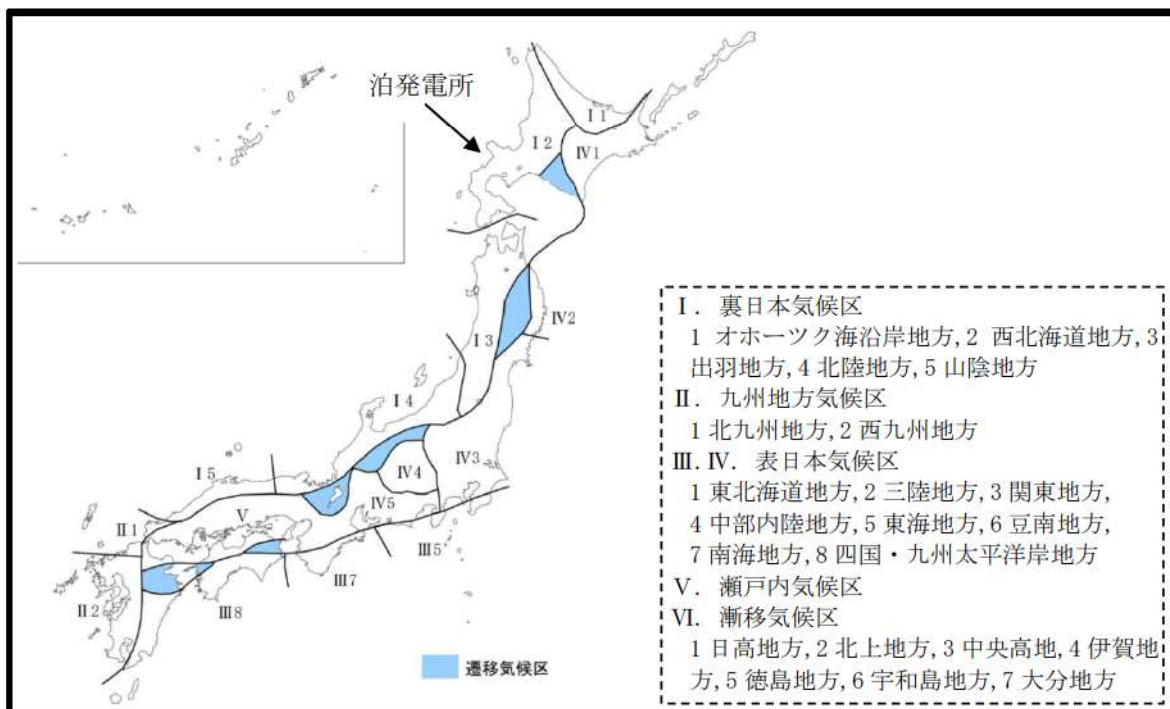
気候区分（関口 1959）は、以下の4種類の気候要素を基に、気候の境界を表したものである。

- ① 気温の日較差（1日の最高気温と最低気温の差）
- ② 雨天日数
- ③ 日照率
- ④ 気候の乾湿

4つの気候要素を基に作成された気候区分を第1図に示す。

第1図より、泊発電所は区分I2に属している。また、日本海側（裏日本）と太平洋側（表日本）は判然と区別されていることが分かる。

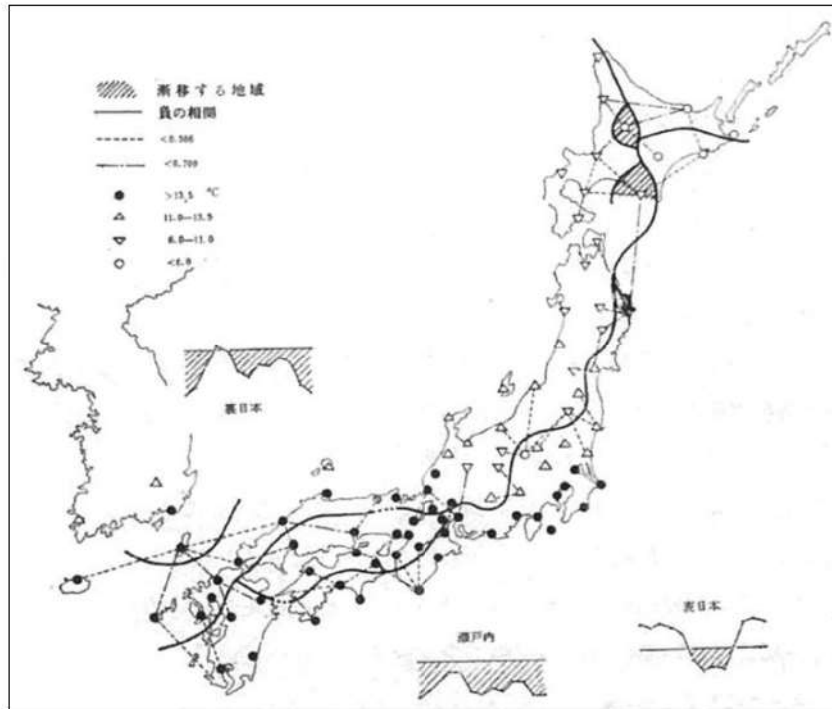
なお、第2図～第5図に示すとおり、①～④の各気候要素の気候区分、いずれにおいても日本海側（裏日本）と太平洋側（表日本）は判然と区別されている。



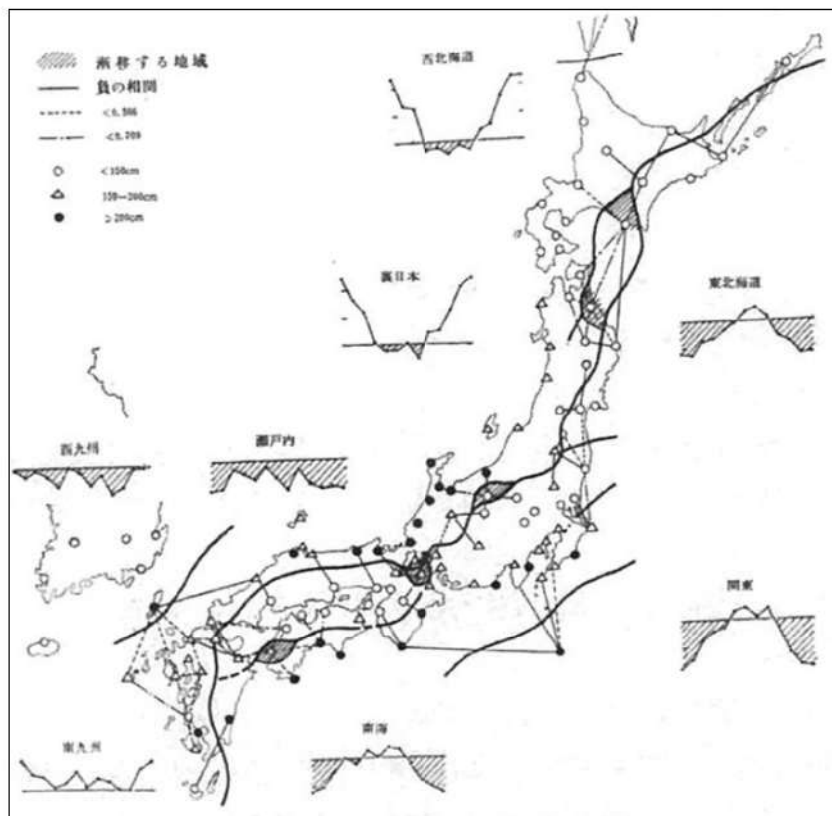
第1図 日本の気候区分（関口）

（内閣官房「第5回 道州制ビジョン懇談会 区割り基本方針検討専門委員会資料※」より引用）

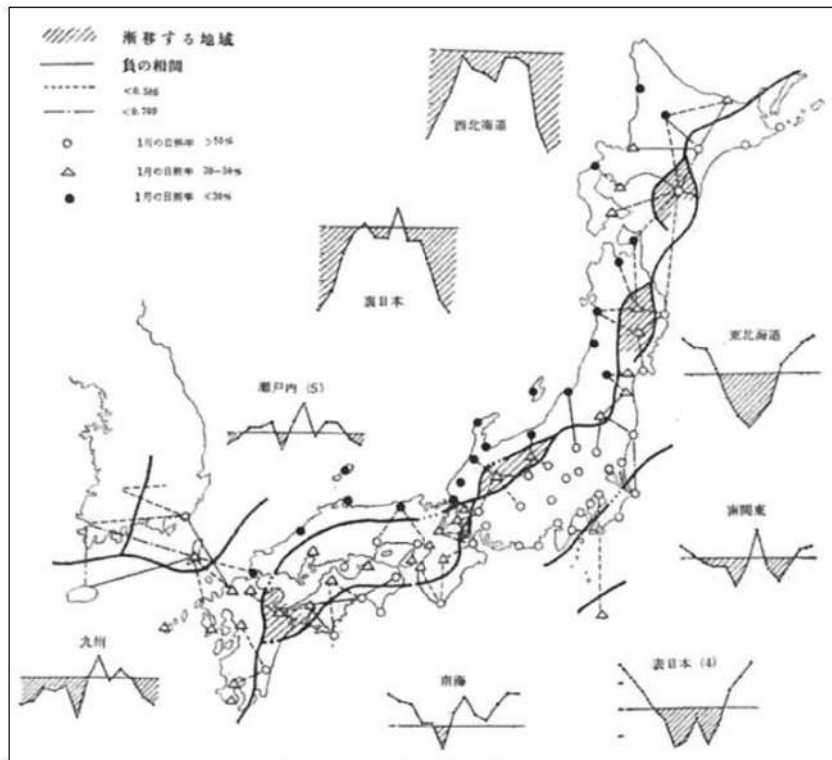
※出典：関口武「日本の気候区分」東京教育大学地理学研究報告（1959）



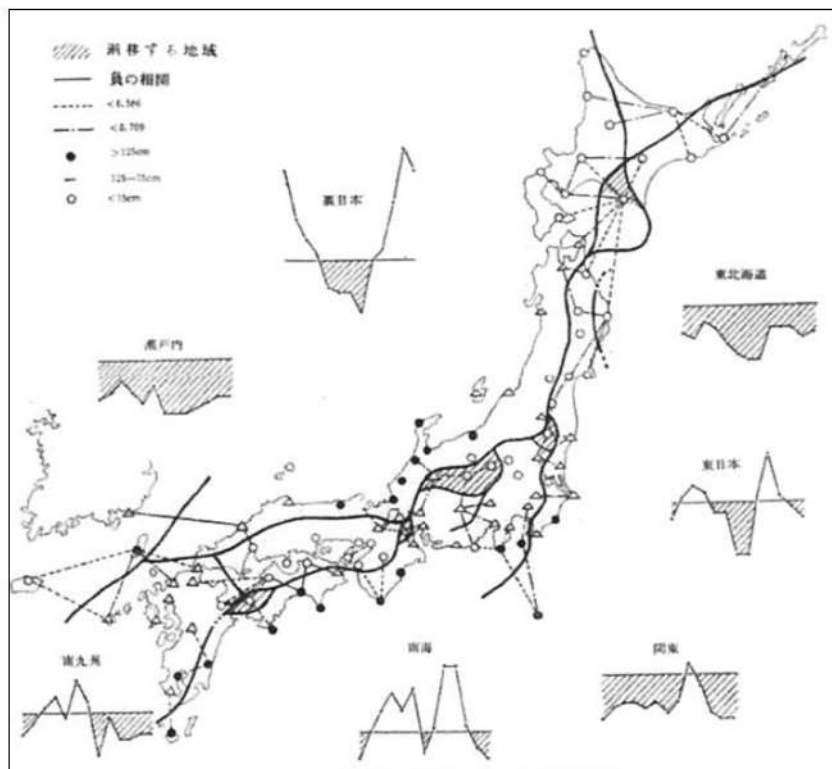
第2図 気温の日較差の年変化型による気候区分



第3図 雨天日数による気候区分



第4図 日照率による気候区分



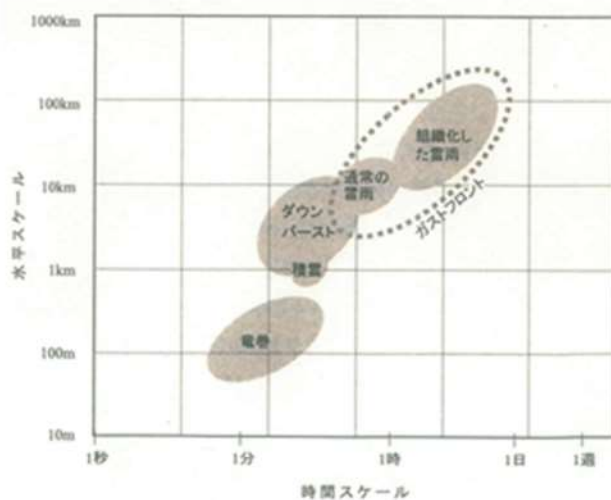
第5図 気候の乾湿による気候区分

数値気象解析にもとづく竜巻検討地域の設定について

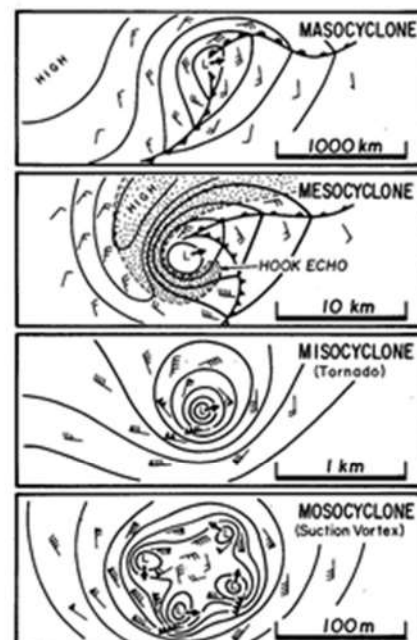
1. はじめに

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

竜巻の発生メカニズムを考える際、時空間スケールの階層構造が重要である（第1-2図）。ある大気現象は、スケールのより小さな現象を内包しており、竜巻の場合、竜巻の漏斗雲内の気流は数十メートル～数百メートル規模（マイクロスケールと呼ばれる（Orlanski 1975）；第1-2図では“MISOCYCLONE”と記載されている）の現象であるのに対し、竜巻を引き起こすもとの積乱雲である親雲のスケールは数キロメートル～数十キロメートル規模（メソスケールと呼ばれる。第1-2図では“MESOCYCLONE”と記載されている）である。台風、低気圧、前線等のいわゆる総観場は、数百キロメートル～数千キロメートル規模（総観スケールと呼ばれる。第1-2図では“MASOCYCLONE”と記載されている）として扱われる。また、竜巻内部には吸い込み渦（第1-2図では“Suction Vortex”と記載されている）と呼ばれるさらに強い渦が形成されることもある。



第1-1図 雷雨とその関連現象の時空間スケール（大野 2001）



第1-2図 竜巻発生時の渦の多重構造 (Fujita 1981)

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

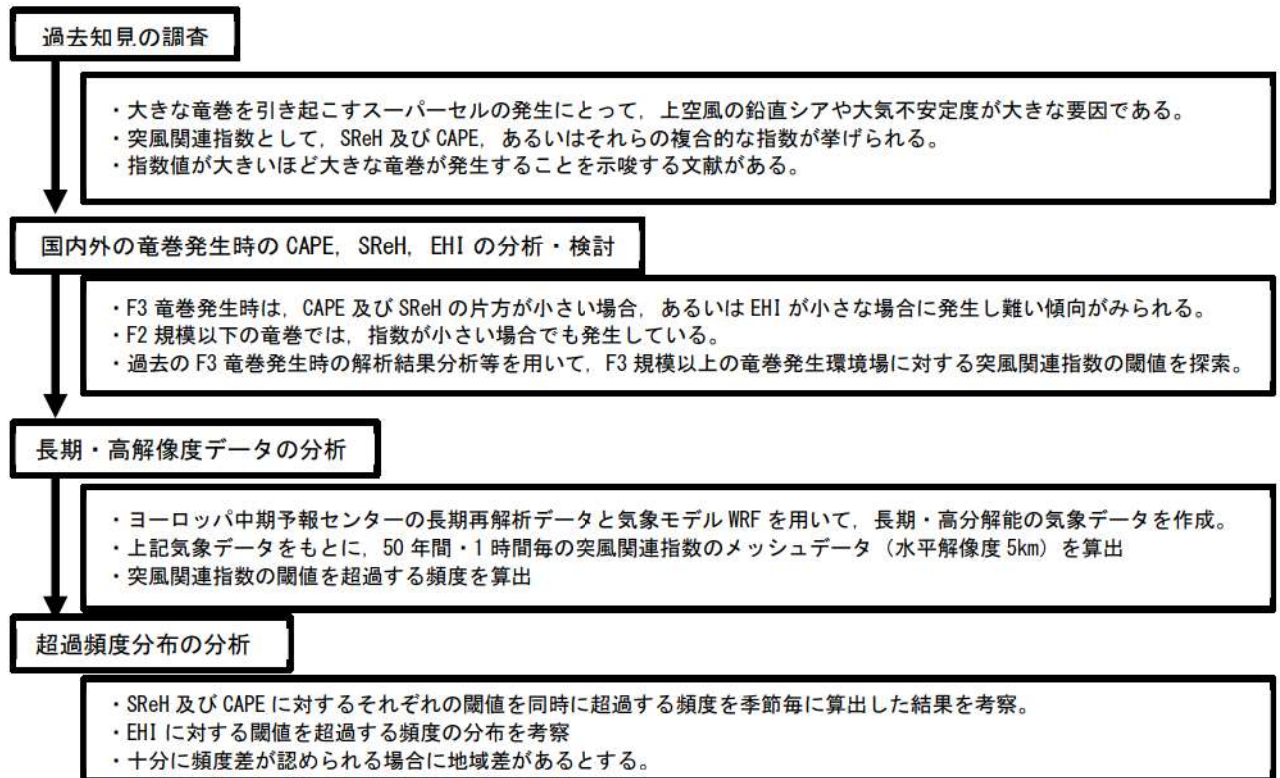
竜巻影響評価ガイドでは、基準竜巻風速 V_{B1} の設定の際に国内最大規模の竜巻ではなく竜巻検討地域内における記録等を参照する場合には、その明確な根拠を提示する必要があると記載されている。そのため、総観スケールの気象場の分析結果のみではなく、メソスケールあるいはマイクロスケールの気象場の特徴から地域性が見られる理由、及び竜巻検討地域内の記録を参照して V_{B1} を設定できる根拠をより気象力学的に明らかにすることが必要である。ただし、上述のように、マイクロスケールでの議論は極めて困難である。

そこで、マイクロスケールで発生する竜巻現象を包含する気象場（以下、「環境場」という。）として、親雲の水平スケールに対応するメソスケールの気象場を対象として、F3規模以上の竜巻の発生に適した環境場が生起する頻度についてその地域性の有無を検討する。以下、第2節では竜巻の発生メカニズムについて簡単に触れ、竜巻発生環境場を議論する上で重要な視点について述べる。第3節では、発生環境場の指標として活用されている突風関連指数について、本検討で用いる突風関連指数の概要を述べる。第4節では、気象モデルを用いて顕著な竜巻の数値シミュレーションを行い、気象場や突風関連指数解析結果を考察する。この結果をもとに、第5節において過去50年間の気象解析データを用いて、突風関連指数の地域性について分析し、F3規模以上の竜巻発生に適した環境場の生成のし易さを観点とした地域性の有無について考察する。第6節では北海道網走支庁佐呂間町にて発生したF3竜巻の特殊性、及び竜巻検討地域設定に対する取り扱いについて述べる。

なお、メソスケールでの地域性を検討するに際し、ヨーロッパ中期予報センターの長期再解析データをもとに、気象モデルを用いたダウンスケーリングと呼ばれる手法により当該スケールに対する空間分解能（水平解像度5km）を有する気象データを作成した。今回、1961年～2010年の1時間毎のデータを使用した。その検討フローを第1-3図に示す。

過去の既往文献や、国内外で発生した大きな竜巻を対象とした発生環境場に関する解析結果をもとに、不確かさも考慮して突風関連指数の閾値を設定し、長期間にわたる気象データにおいて、その閾値を超過する頻度を算出し、得られた頻度分布におい

て定性的に十分に差があるかどうかを観点として地域性の有無を考察した。



第1-3図 メソスケールでの分析フロー

2. 竜巻の発生メカニズム・分類とメソスケール分析の有効性

2.1 竜巻の発生メカニズム

竜巻の発生メカニズムは二つに大別されると考えられている（新野 2007）。一つは、スーパーセルと呼ばれる特徴的な構造を有する巨大積乱雲に伴うもの（第2.3-1図に例示した模式図参照）であり、もう一つは、気温・湿度や風向・風速が急変する局地的な前線（第2.3-2図に例示した模式図参照）に伴うものである。

スーパーセルを伴う竜巻では、大気下層における鉛直シア（風向が上下で逆転する、あるいは風速が上下で大きく異なる場合に生じる）に伴って水平軸を有した渦管が形成され、それが上昇気流によって数キロメートル上空まで持ち上がる。その際、メソサイクロンと呼ばれる直径3・4km～10km程度の鉛直軸回りの強い渦が積乱雲中にでき、その下部に竜巻が発生する（Klemp and Wilhelmson 1978；第2.3-1図参照）。このように、メソサイクロンの形成がこの種の竜巻の最大の特徴である（新野2007）。第2.3-1図に示すように、鉛直シアによりスーパーセル内では降水粒子の落下域（下降流域）と上昇流域が分離されるため、巨大な積乱雲にまで発達し、長時間持続しうる。国内で発生したF2規模以上の竜巻に対し、スーパーセルあるいはミニチュア（ミニ）スーパーセルが存在したことを観測・解析した成果も得られている（Suzuki et al. 2000, Mashiko et al. 2009等）。また、水平風速のマイクロスケールの空間スケールを有す

る竜巻漏斗雲の形成メカニズムについては、水平渦が上昇気流により引き伸ばされることの影響、あるいはメソサイクロンが地表面付近の上昇気流への影響等が指摘されている (Noda and Niino 2010) が、多くは未解明であり、レーダ観測や数値実験による研究が行われている。しかし、メソサイクロンが強いほど竜巻強度が大きくなるという関係性が、最先端のドップラーレーダを用いた詳細観測により分かってきている。(Burgess et al. 2002)

一方、局地前線に伴う竜巻では、気温・湿度、風向・風速が水平方向に鋭く変化する局地的前線面において、水平シア流の不安定や傾圧的作用等により生成した鉛直軸周りの渦が鉛直方向に引き伸ばされることによって発生する (Lee and Wilhelmson 1997)。スーパーセルとは大気成層が大きく異なり (Doswell and Evans 2003)、降水粒子が地上に達する段階になると下降気流が上昇気流を打ち消すため (Byers-Braham の概念)、積乱雲がこれ以上発達せず、衰弱・消滅する。そのため、強い竜巻が生じ難いと考えられている。局地的に水平スケールは数キロメートル以下であり、メソスケールのうち小さなスケール (メソスケール)、あるいはマイクロスケールにあたる。この種の渦は、上記のサイクロンに対してマイソサイクロンと呼ばれている。

2.2 竜巻の分類

上記にて説明した発生メカニズムの観点から、メソサイクロンの形成が大きな竜巻の発生と深く関わっていることがわかる。米国では、メソサイクロンが形成される竜巻は、スーパーセル型と呼ばれるF2~F5規模を想定した顕著な竜巻として分類され、F1規模以下の竜巻は局地前線等に伴う非スーパーセル型と分類されている (Rasmussen and Blanchard 1998, Doswell and Evans 2003)。国内にて発生したF2-F3を含めた全てのF3竜巻(6事例)¹もメソサイクロンを伴うスーパーセル型であったと報告されている (第2.3-1表)。

そこで、飯塚・加治屋 (2011)、Bluestein (2013) 及びその他の検討 (Rasmussen and Blanchard 1998, Doswell and Evans 2003) と同様に、メソサイクロンの有無で竜巻を分類することとし、メソサイクロンを有する場合を「スーパーセル型」、そうでない場合を「非スーパーセル型」と定義する。

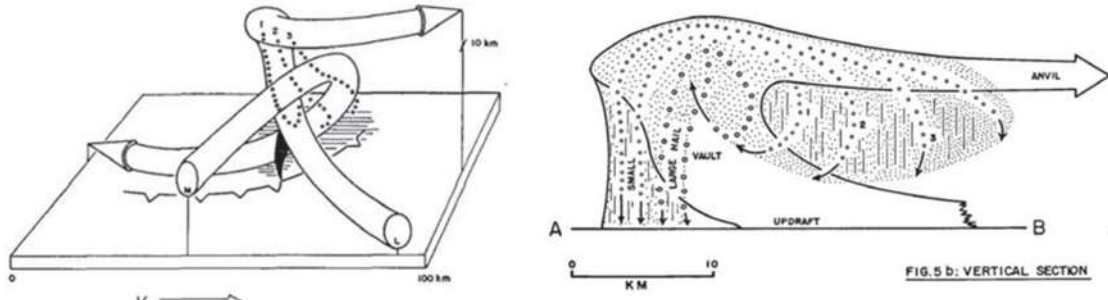
なお、スーパーセル型・非スーパーセル型竜巻の同定に関する国内の検討例として、飯塚・加治屋 (2011) による分析が見られ、2006年~2009年間の3ヶ年においてスーパーセル型竜巻の竜巻強度は、F2及びF3 (3事例)、F1 (6事例)、F0 (8事例)、F不明 (2事例) であったのに対し、非スーパーセル型竜巻では、F2及びF3竜巻 (0事例)、F1 (9事例)、F0 (11事例)、F不明 (5事例) であったと報告している。分析期間は短いものの、国内で発生したF3竜巻のスーパーセル型の竜巻強度の傾向を考慮すれば、大きな竜巻は米国と同様に基本的にスーパーセル型に分類できるといえる。

¹ 気象庁データベースにおける括弧つき F2-F3 竜巻 ((F2-F3) と記載された竜巻) は過去に 5 事例 (1960 年代に 4 事例、1990 年に 1 事例) 報告されている。これらの竜巻については解析を実施した文献が見あたらなかったため、第 2.3-1 表には記載していない。

2.3 メソスケールでの分析の有効性

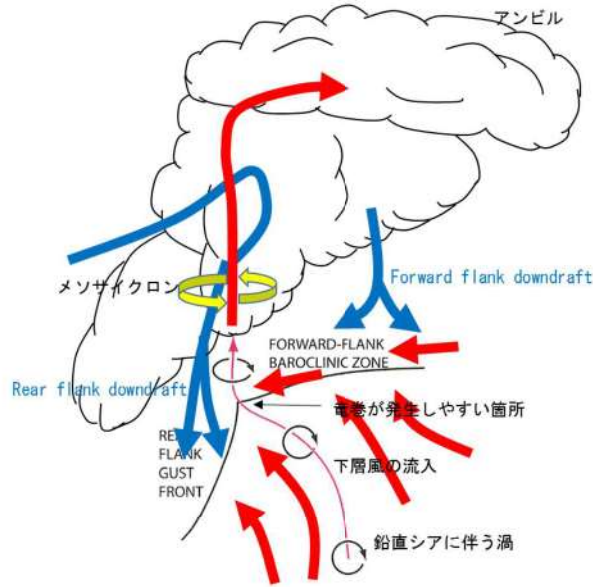
空間スケールの観点では、メソスケール気象場の分析はスーパーセル型竜巻の発生しやすさの傾向・地域性を分析する目的には十分であるが、空間スケールの小さく、竜巻強度も小さい非スーパーセル型竜巻に対しては向かない。また、竜巻強度の観点では、大きな竜巻（国内最大強度のF3を含むF2以上の規模の竜巻）の発生しやすさがメソスケール気象場の分析により検討することができる。したがって、設計基準を考える際には、スーパーセル型竜巻の発生を観点とした地域性を検討することが妥当である。

そこで、3節以降では、突風関連指数と呼ばれる竜巻の発生しやすさを指数化した量を用いて、大きな竜巻の発生しやすさについて分析し、その地域性について検討する。その際、スーパーセル型竜巻はメソサイクロンを有する点が特徴的であり、その発生はメソスケールにおける風の鉛直シアや大気不安定性と深く関わっている (Bluestein 2013, Klemp and Wilhelmson 1978, Rotunno and Klemp 1985, Trapp 2013) ことから、SReH及びCAPE、あるいはEHIと呼ばれる突風関連指数を用いる。



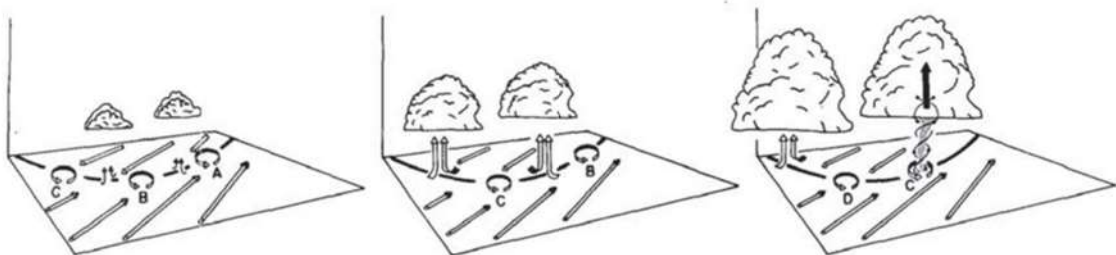
風況場

鉛直断面構造



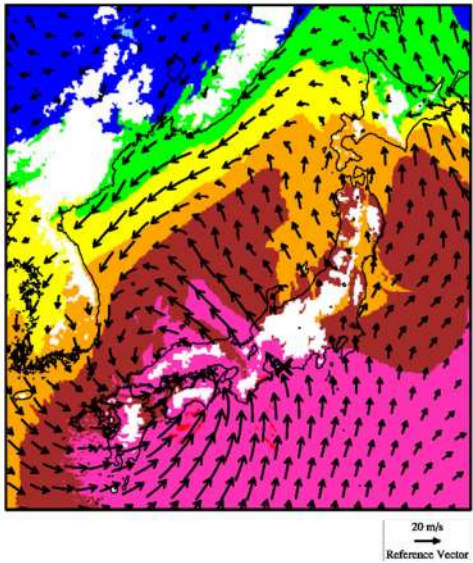
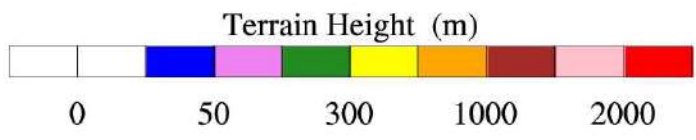
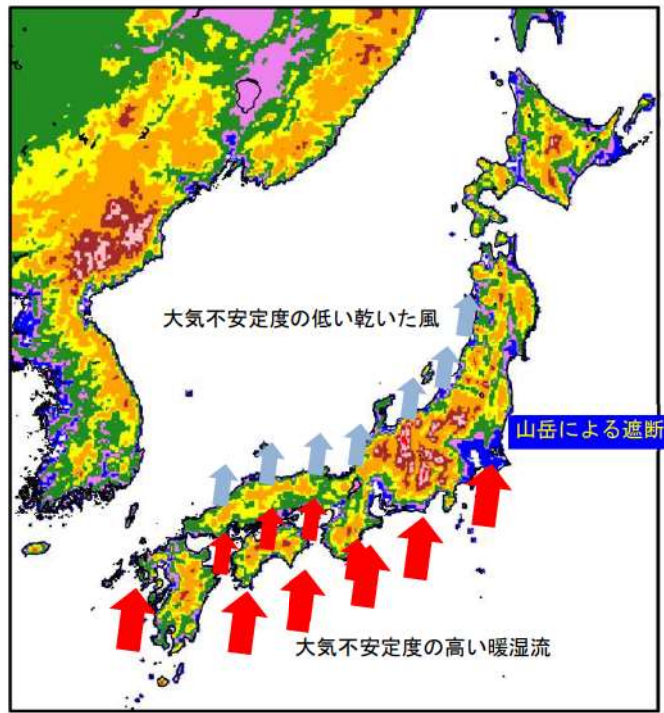
メソサイクロンの形成メカニズム

第 2.3-1 図 スーパーセル型雷雨の構造 (Browning 1964, Bluestein 2013 に加筆)

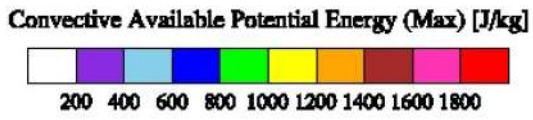
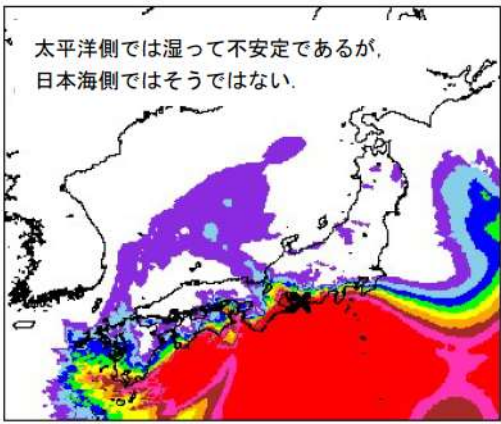


第2.3-2図 局地前線に伴う竜巻の発生機構に関する模式図 (Wakimoto and Wilson 1989)

(上向きの黒い⇒が上昇気流を表す)



500m 高度における温位 (カラー) 及び風向・風速



大気不安定度 (CAPE) の分布

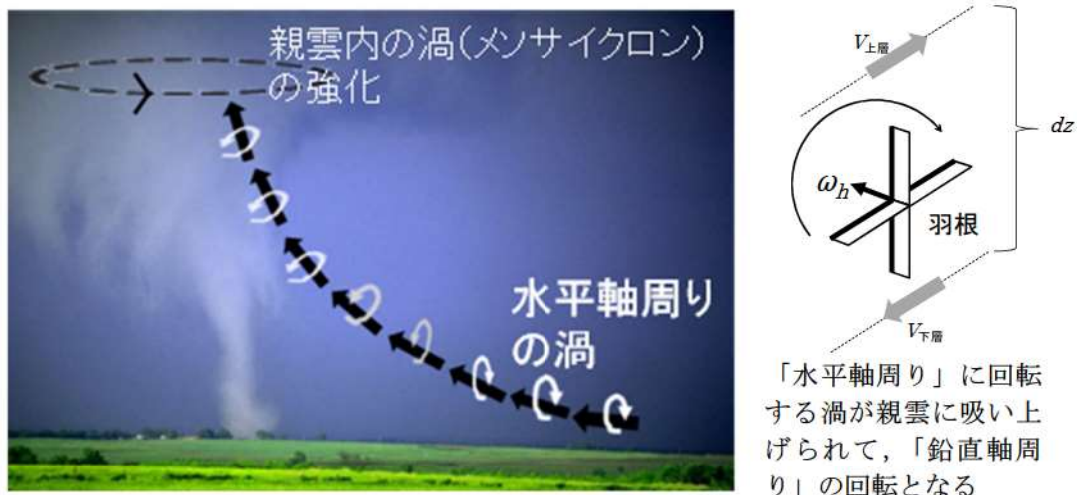
第2.3-3図 (上) 総観スケールでの気流場の模式図 (カラーは標高を表す) 及び
(下) 1999年9月に豊橋にて発生したF3竜巻の事例

第 2.3-1 表 過去に国内にて発生した F3 規模竜巻の概要

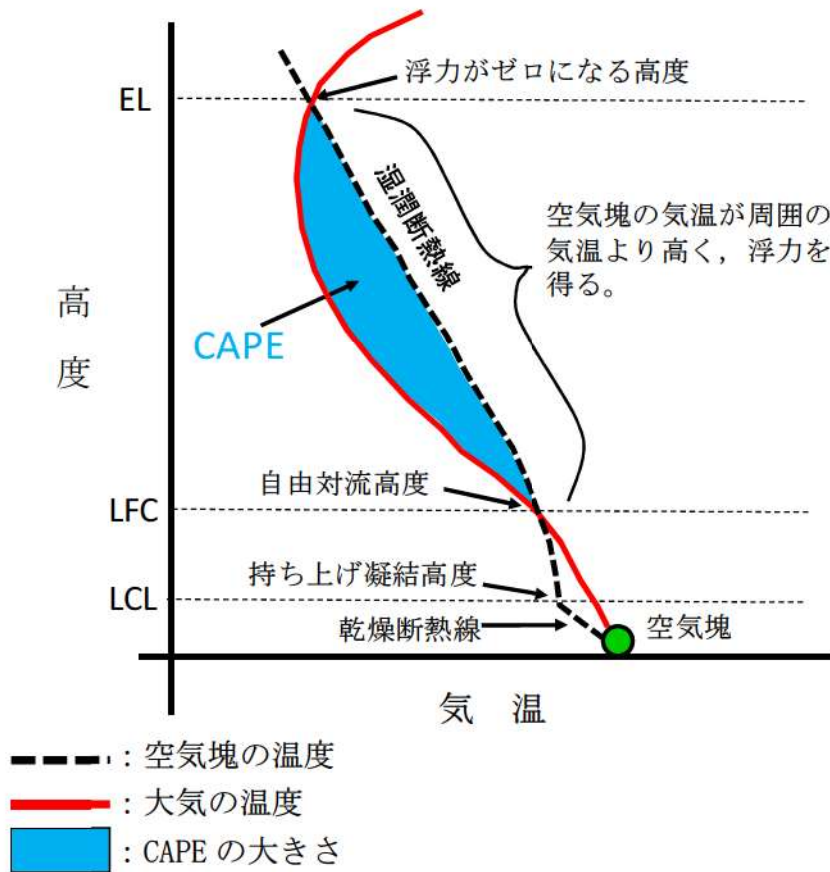
発生日	発生場所 (県・市町村)	F スケール	主な総観場	メソサイクロンの存在を 報告した資料・文献
1971/7/7	埼玉県浦和市	(F3)	台風	Fujita et al. (1972)
1978/2/28	神奈川県川崎市	F2-F3	寒冷前線	村松 (1979)
1990/12/11	千葉県茂原市	F3	暖気の移流	鈴木・新野 (1991), Niino et al. (1993)
1999/9/24	愛知県豊橋市	F3	台風	坪木ら (2000)
2006/11/7	網走支庁佐呂間町	F3	寒冷前線	Kato and Niino (2007)
2012/5/6	茨城県常総市	F3	気圧の谷	Yamauchi et al. (2013)

3. 突風関連指数

突風関連指数はこれまで数多く提案されており、気象庁における現業においても竜巻探知・予測に活用されている（瀧下 2011 等）。ここでは、国内外で最も知見が蓄積された指数として SReH (Storm Relative Helicity: ストームの動きに相対的なヘリシティ; Davies-Jones et al. 1990), CAPE (Convective Available Potential Energy: 対流位置有効エネルギー; Moncrieff and Miller 1976) を用いる。第 3-1 図及び第 3-2 図にそれぞれ、両指数の算出概念を表す。概して、SReH は風の鉛直シア（高度方向の風向・風速差）に伴って発生する大気中の水平渦度が親雲に取り込まれる度合、CAPE は大気中の不安定度合の指標である。値が大きいほどその度合が高くなる。大気下層の空気塊を「持ち上げて」乾燥断熱線及び湿潤断熱線を求め、空気塊が自由対流高度に達した際に積乱雲の発達するポテンシャルとして CAPE を計算する。



第 3-1 図 SReH の算出概念



第 3-2 図 CAPE の算出概念

両指数の算出式は以下のとおりである。

$$\text{SReH} = \int_{\text{地上}}^{\text{高度}3\text{km}} (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega} \, dz \quad (1)$$

$$\text{CAPE} = \int_{\text{LFC}}^{\text{EL}} g \frac{\theta_e'(z) - \theta_e(z)}{\theta_e(z)} \, dz \quad (2)$$

ここで、式(1)の \mathbf{V} は水平風速ベクトル、 $\boldsymbol{\omega}$ は鉛直シアに伴う水平渦度であり、 \mathbf{C} のストームの移動速度は Bunkers et al. (2000) にしたがって、長期再解析データから得られる地上高 6km の平均風速と、シアベクトル（地上高 5.5~6km 層の水平風ベクトルと 0~0.5km 層の水平風ベクトルの差）から算出する関係式にて求めた。式(2)の g は重力加速度、 θ_e はストーム周囲の相当温位、 θ_e' は持ち上げ空気塊の相当温位であり、 dz は鉛直方向の層厚である。LFC は自由対流高度と呼ばれ、前線周辺の風の水平方向の収束、太陽による地表面加熱、地形による強制上昇

等によって、空気塊がこの高度まで何らかの要因で持ち上げられると ($\theta_e < \theta_e'$ となり) 自身の浮力だけで上昇し、平衡高度 EL ($\theta_e = \theta_e'$ となる) に達するまで積乱雲が発達する (第 3-2 図)。なお、温位とは、式(3)に示すように気温 T と気圧 p に関する量であり、ある空気塊を断熱的に基準圧力 1,000hPa に戻したときの絶対温度である。気温は高度によって変わるが、温位は同じ空気塊では常に一定 (断熱過程では温位は保存される) な物理量であるため、空気塊のあたたかさ、浮力特性、及び不安定性を把握するのに用いられる (付録 A 参照)。

$$\theta = T \left(\frac{1,000}{p} \right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (R: \text{気体定数}, C_p: \text{定圧比熱}) \quad (3)$$

二つの空気塊を比較した場合、温位の高い空気塊は軽く上昇しやすく (不安定であり)、単位体積中に含みうる水蒸気量が多いと、大きな積乱雲の発生につながる。竜巻が発生する積乱雲の中では、水蒸気が降水粒子に変化しているため、その際に発生する潜熱の影響が考慮された相当温位が保存される。乾燥している気象場では相当温位と温位は等しい。

式(1)を見ればわかるように、SReH は、上端高度の違いによって値が変わる。上端を地上から 3km とした場合、その殆どが地上から 1km までの大気によるヘリシテューであるという指摘 (Rasmussen 2003) があるが、1km 高さは夏場では境界層高さ (雲底高度) 程度と低めであるため、本検討では多くの既往検討と同様に 3km とする。また、持ち上げる空気塊の性質によって CAPE の値は変わる。地表から 500m 程度上空までの平均的な性質を持つ空気塊を持ち上げたときの MLCAPE (Mean Layer CAPE) がよく用いられる。本検討では、地表から 500m 上空までで最も不安定な空気塊を持ち上げる。このようにして求められた CAPE は MUCAPE (Most Unstable CAPE) と呼ばれる。大気下層に冷気がありその上空で対流が発生する場合を考慮することができる。このような場合、MLCAPE では安定な大気とみなされることにより CAPE 値が非常に小さくなる傾向にある (付録 B 参照)。

本検討では、SReH と CAPE に加え、EHI と呼ばれる SReH と CAPE の複合指数を用いた分析も行った。Davies (1993) は EHI 算出に MLCAPE を用いたが、本検討では MUCAPE を用いて以下のように EHI を算出した。

$$EHI = \frac{SReH \times CAPE}{160,000} \quad (4)$$

4. 国内で発生した F3 竜巻及び日本海側 F2 竜巻の数値シミュレーション

竜巻発生時の気象場（風向・風速，気温，気圧，水蒸気量等）を数値気象モデルにより解析し，その解析結果をもとに突風関連指数を算出する。気象モデルとして WRF (Weather Research and Forecasting) モデル (Skamarock et al. 2005) バージョン 3.2.1 を用いた。

WRFモデルは，気象力学・物理現象を数値モデル化したものであり，（竜巻の親雲の水平スケールに対応する）メソスケール（水平方向2km～20km程度）の気象要素を解析できるコミュニティモデルとして世界的に利用されている（付録C参照）。主な計算条件は第4-1表に記すとおりである。電力中央研究所による長期高解像度再解析データセット（橋本ら 2013）と同様の条件を採用しており，ネスティングと呼ばれる技法を用いて，水平解像度15kmで解析した結果をもとに水平解像度5kmの解析結果を得る。これにより，粗い水平空間分解能（ECMWF ERA-Interim：約70 km，ECMWF ERA-40：約250km）の初期・境界値データから詳細メッシュの気象場を解析できる。なお，30 分間隔で計算結果を出力し，当時の天気図や気象レーダ画像等を参考にして竜巻発生時刻と解析結果における降雨域の通過時刻との違いや，対応する降雨域の有無を確認することにより，計算結果に大きな問題がないことを確認した。気象庁の竜巻等の突風データベースでは，1988年以降の事例に対しては天気図に加え，レーダ画像も掲載されている。1988年以降の事例については WRFモデルによる解析結果の適切性をレーダ画像と天気図から判断した。1987年以前の事例についてはF3竜巻については天気図から判断した。基本的に，発生時刻から±1時間内に擾乱が竜巻発生地点周辺を通過することを適切性の判断基準とした。

第 4-1 表 WRF モデルセットアップの概要

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

分析対象事例は，第4-2表に示すとおり，過去に発生したF3竜巻（1987年以前のF2-F3竜巻は除く），1988年以降に日本海側で発生したF1-F2，F2竜巻とした（F3竜巻は5事

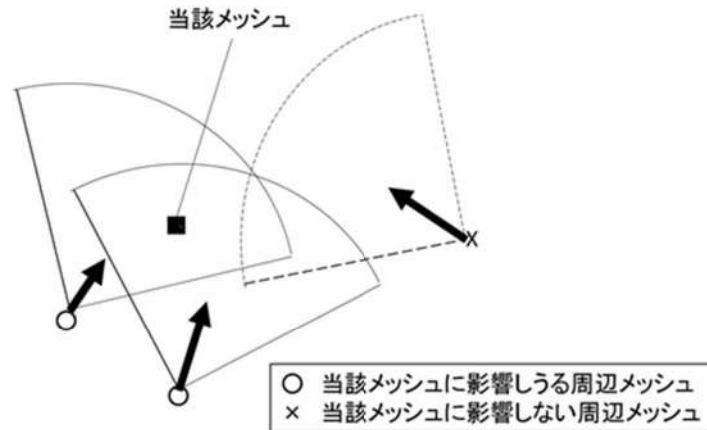
例，F2-F3竜巻は1事例，F2竜巻は3事例，F1-F2竜巻は1事例)。1987年以前に発生した竜巻については，(初期値・境界値データとして使用しているECMWF ERA40の水平空間分解能が約250kmと粗いために，竜巻通過時刻や発生箇所が実際に比べて乖離する場合がある¹ため) この資料では対象としていない。ただし，F3竜巻に対しては1987年以前の竜巻に対しても解析を行い，計算結果の適切性も確認している。なお，対象事例に対して適切性が低いことを理由に除外した事例はない。

第 4-2 表 分析対象事例の概要

発生日時	季節	発生地点	Fスケール	計算開始日時	SReH	MaxCAPE
2012/05/06 12:35	暖候期	茨城県常総市	F3	2012/05/06 03時	270	2115
2006/11/07 13:23	寒候期	北海道網走支庁佐呂間町	F3	2006/11/07 03時	714	813
1999/09/24 11:07	暖候期	愛知県豊橋市	F3	1999/09/24 03時	403	2459
1990/12/11 19:13	寒候期	千葉県茂原市	F3	1990/12/11 09時	649	1201
1971/07/07 07:50	暖候期	埼玉県浦和市	F3	1971/07/06 15時	337	1746
1990/02/19 15:15	寒候期	鹿児島県枕崎市	F2-F3	1990/02/19 03時	745	373
1991/06/12 13:30	暖候期	富山県魚津市	F2	1991/06/12 03時	227	1358
1990/04/06 02:55	寒候期	石川県羽咋郡	F2	1990/04/05 15時	484	889
1989/03/16 19:20	寒候期	島根県簸川郡	F2	1989/03/16 09時	329	430
1999/11/25 15:40	寒候期	秋田県八森町	F1-F2	1999/11/25 03時	363	1222

第4-2表中のSReHと最大CAPEの値は，発生地点を中心とした東西・南北100km四方内の最大値である。ここで，最大CAPEを求めた理由と方法は以下のとおりである。雲物理過程により擾乱（竜巻を伴う積乱雲）が発生すると，発生前の大気不安定な状況が解消されるため，竜巻発生地点のCAPE値は周囲に比べて低くなる傾向がある。つまり，解析データでは，ある格子点（メッシュ）で竜巻を伴う擾乱が発生している時，その格子点に対するCAPE値は周辺のメッシュ値に比べて小さめになりうる（瀧下2011等）。これは，CAPE値の大きさをもって竜巻の規模を定量的に検討する際に問題となる。そこで，Rasmussen and Blanchard (1998)を参考に，各格子点に対して，地上～500m高度までの平均風向を算出し，その風向に対して当該地点から風下側に扇形の影響範囲を設け，影響範囲内のCAPE値の最大値を求めるように工夫した（第4-1図）。その際，扇形の半径は15km，中心角として平均風向を中心に±45度の範囲をとった。この最大値が最大CAPEにあたる。このように算定することにより，周辺のCAPE値の大きな空気塊が当該メッシュを含むスーパーセルに向かって流入することを考慮できる。

¹ 「5. 竜巻発生環境場の生起頻度分析」ではWRFモデルで解析された1961年から50年間のデータを用いるが，発生時刻や発生箇所にも多少の違いがあったとしても事象を漏れなくカウントできれば地域性の検討には問題ない。

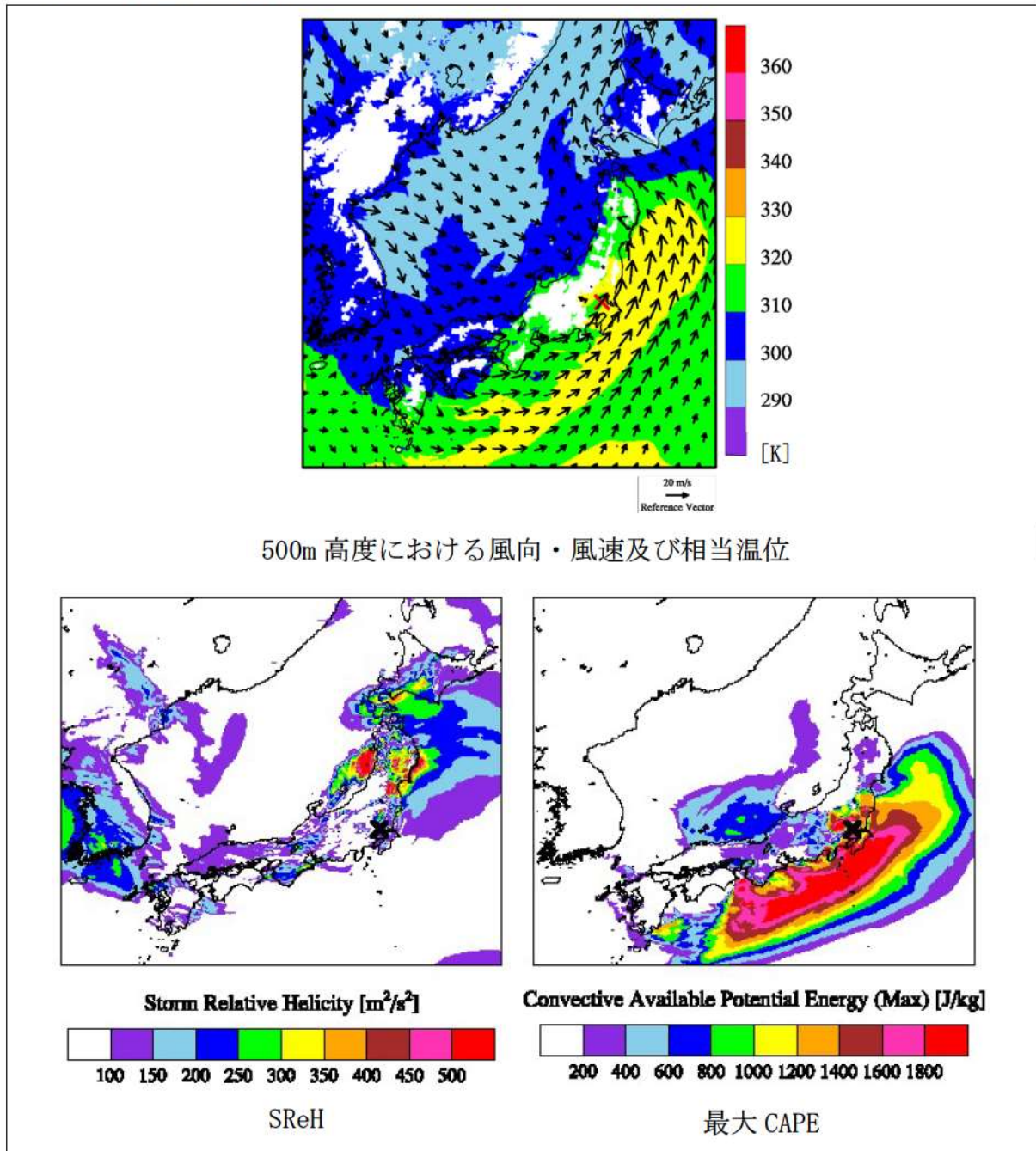


第 4-1 図 最大 CAPE 値の抽出方法の概念図

以下では，解析した気象場として，500m 高度における風向・風速と相当温位の分布図，突風関連指数の解析結果として SReH 及び最大 CAPE の分布図を示す。全て 5 km 水平解像度の計算結果である。

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

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

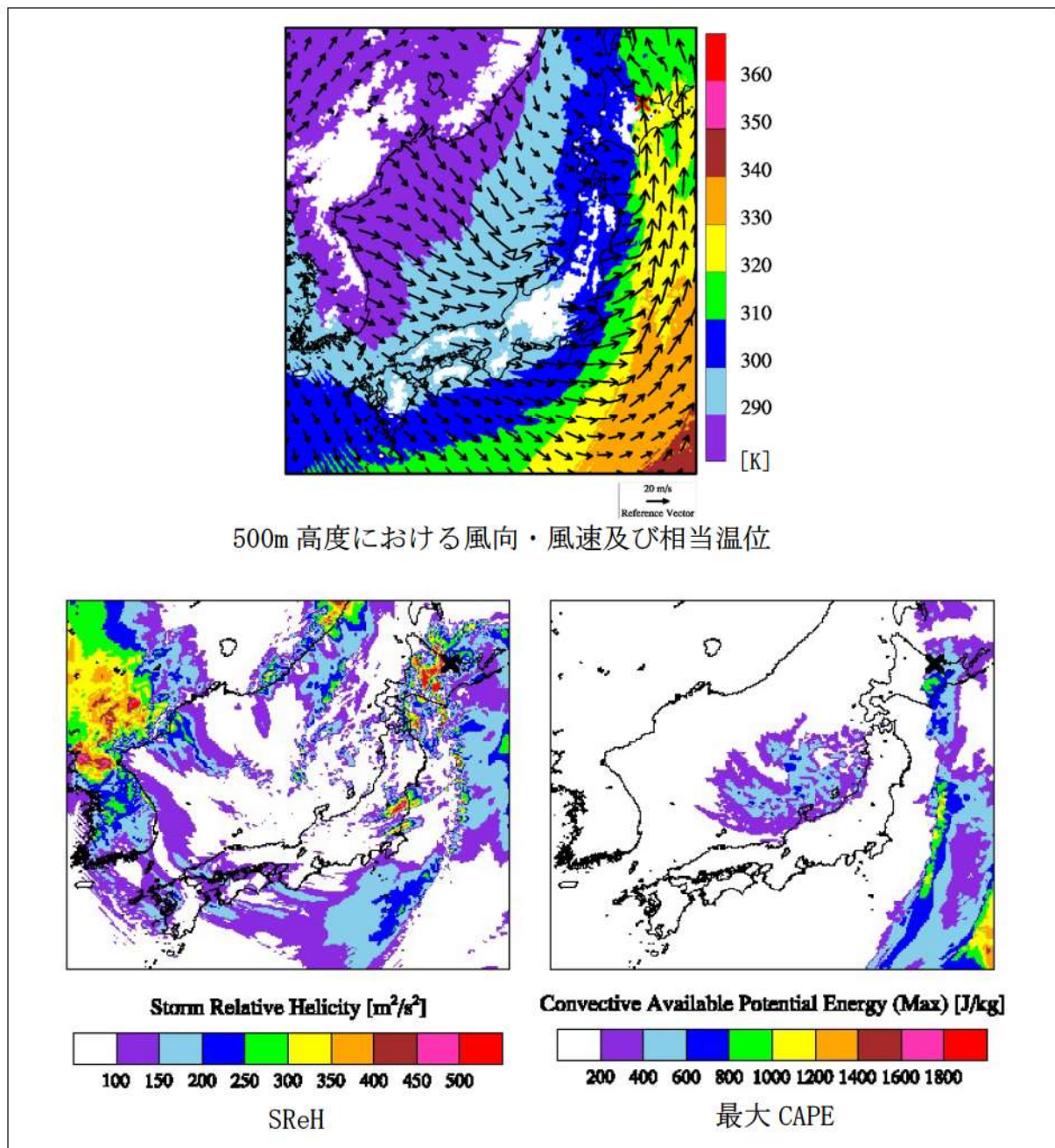


第 4.1-1 図 2012/05/06 の F3 事例における気象場と突風関連指数

4.2 北海道佐呂間町(2006/11/07)F3 事例 (寒冷前線・暖気の移流)

寒冷前線の西側では北西～西よりの冷たい風（寒色系）が、東側では南よりの暖かい風（暖色系）が吹いており、気温差と風の収束により積乱雲が発生・発達しやすい状況にある。特に、道東・オホーツク地方には太平洋から暖かく、不安定な空気塊が流入している。

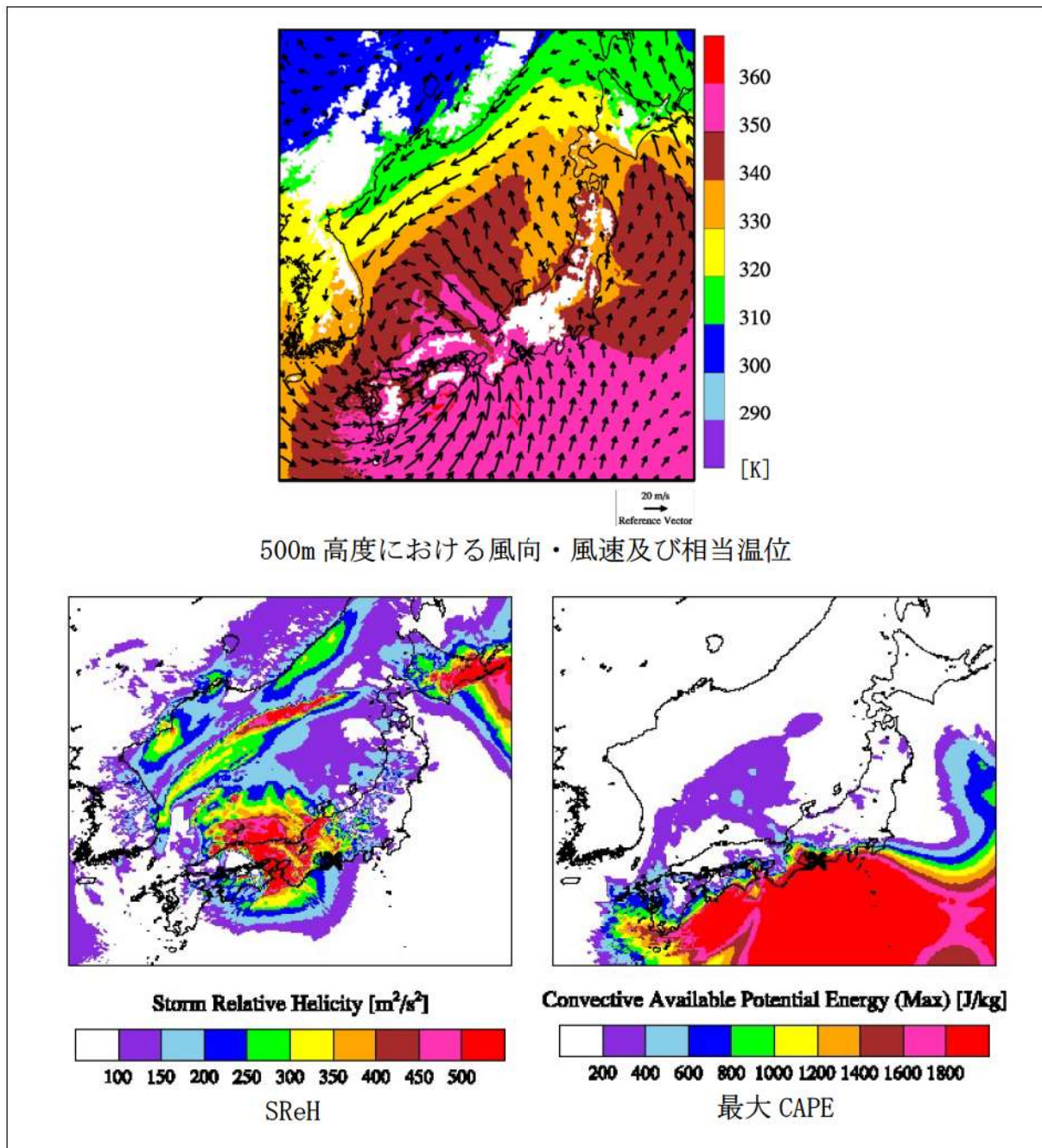
大気不安定度は道東の中でも南側で高くなっており、非常に高い風のシア（高い SReH）と相まって親雲が発達しやすい状況が解析されている。なお、同日に、周辺地域において 2 個の小さな竜巻も発生した。日本海側の中でも能登半島周辺より北側で季節風が吹き込み、大気がやや不安定になっている（CAPE が高めになっている）が、SReH が低く、道東・オホーツク海地方の状況とは異なる。



第 4.2-1 図 2006/11/07 の F3 事例における気象場と突風関連指数

4.3 愛知県豊橋市(1999/09/24)F3 事例 (台風)

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

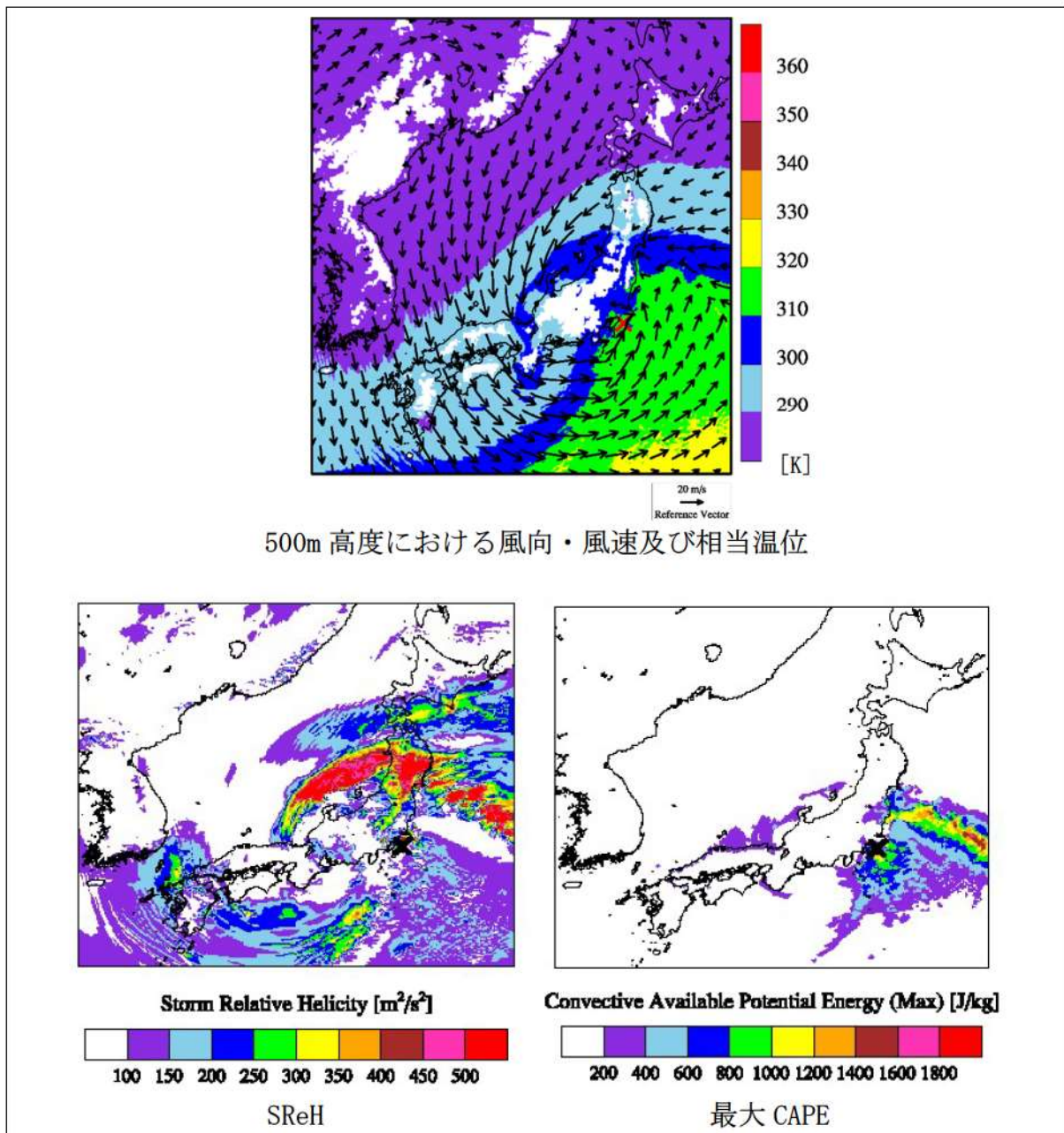


第 4.3-1 図 1999/09/24 の F3 事例における気象場と突風関連指数

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

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

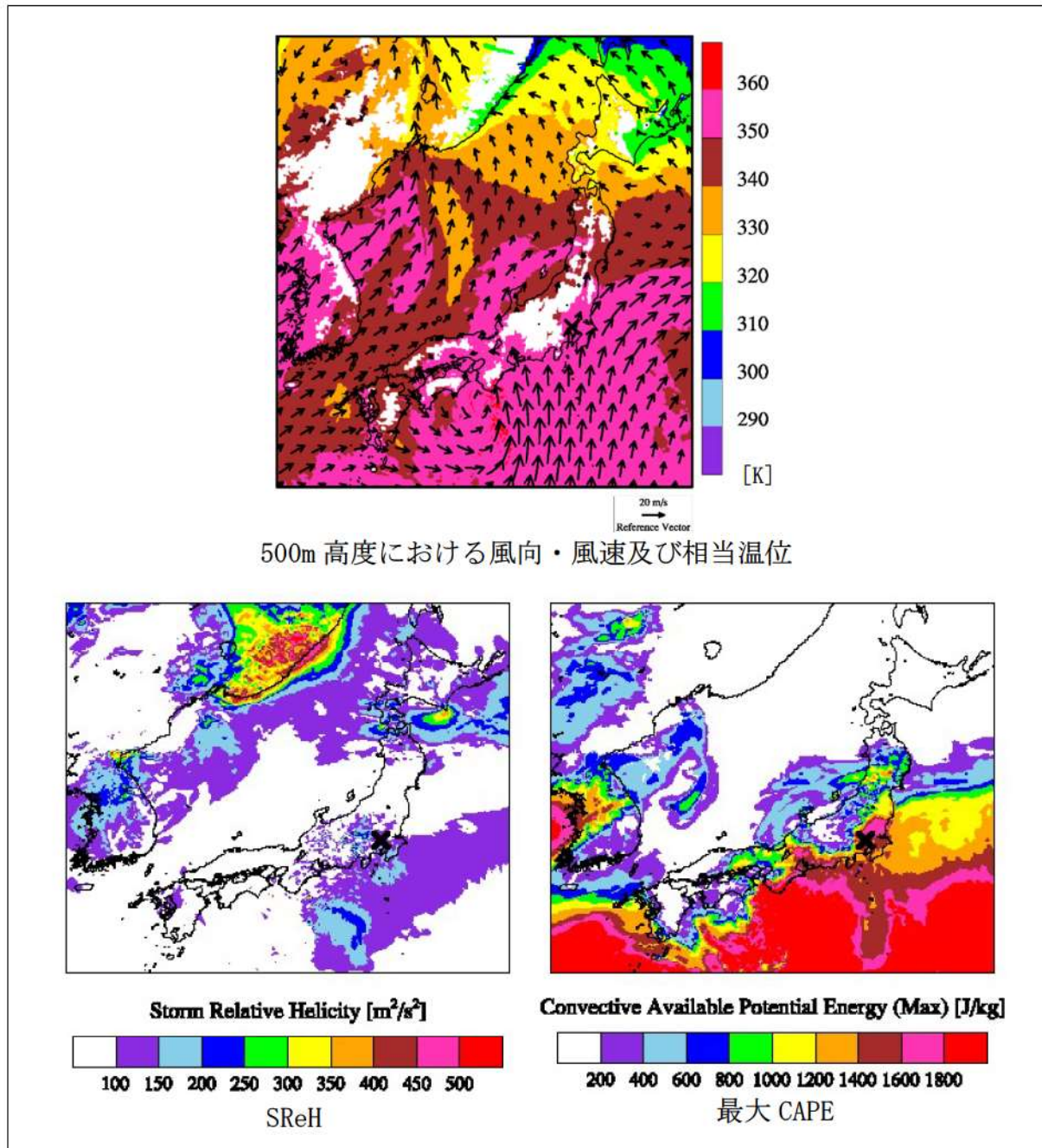
日本海側の低気圧をとりまくように、特に北側で SReH が非常に高くなっているが、温位が低く、CAPE の値も小さくなっている。一方、福島県沖に CAPE の高い領域が見られるが、SReH の値は大きくなく、相当温位も比較的 low、房総半島周辺とは状況が異なる。



第 4.4-1 図 1990/12/11 の F3 事例における気象場と突風関連指数

4.5 埼玉県浦和市(1971/07/07)F3 事例 (台風)

台風の中心は紀伊半島の南西沖にあり、中部から東日本にかけては、太平洋側から非常に CAPE が高く、不安定な空気塊が流入している。SReH は、1999/09/24 F3 事例 (豊橋竜巻) ほど大きくはないが、発生地点周辺では SReH が比較的高くなっており (×でやや見づらい)、SReH と CAPE の両方が共に大きい環境場となっていた。

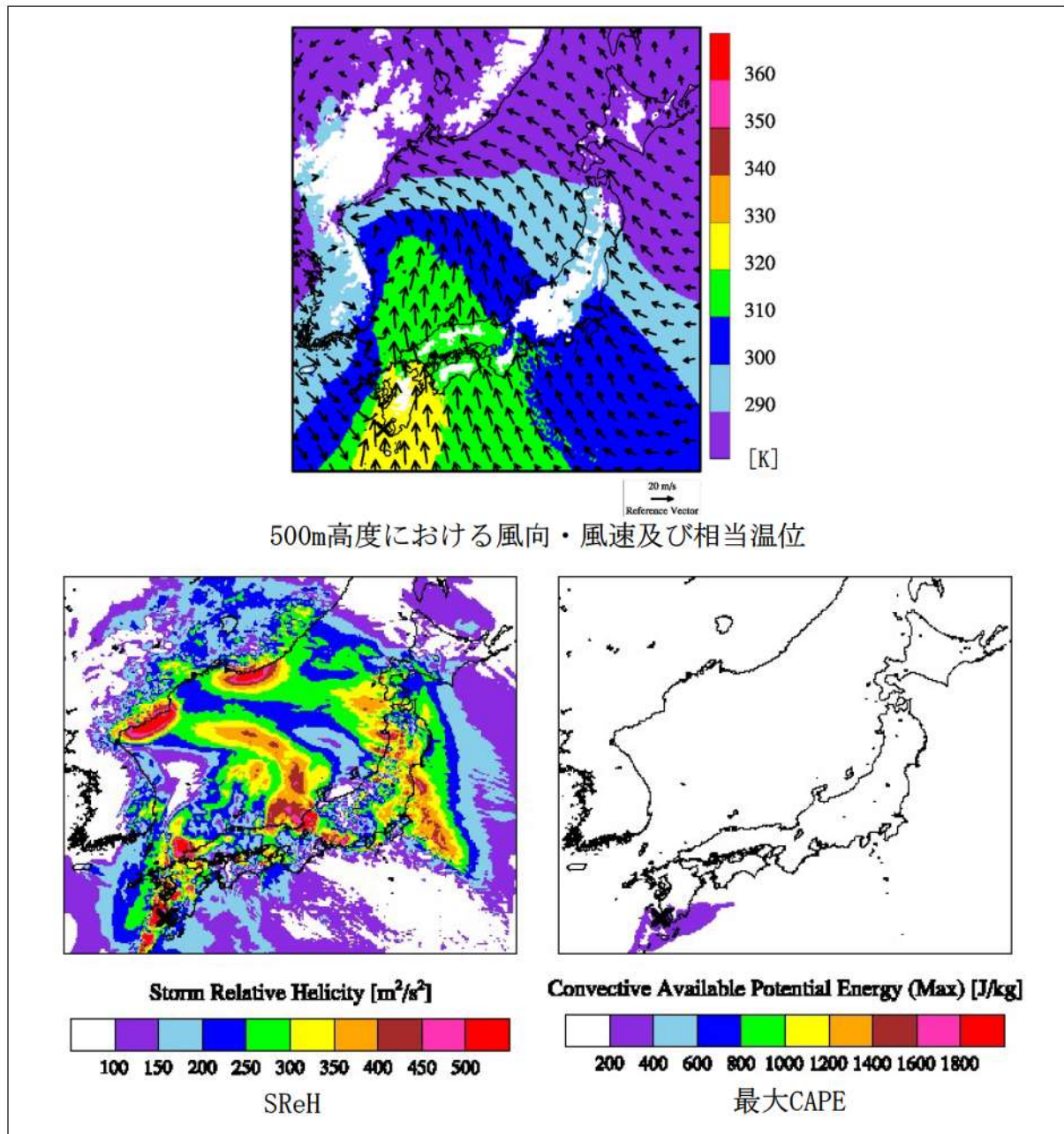


第 4.5-1 図 1971/07/07 の F3 事例における気象場と突風関連指数

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

朝鮮半島東部の沖合にある低気圧から寒冷前線と温暖前線が伸び、九州から近畿にかけては比較的暖かい気流が太平洋側から流入している。その中でも発生地点周辺には最も暖かい空気塊が流入しており、鹿児島県南部では局所的に CAPE の値がやや高くなっている。

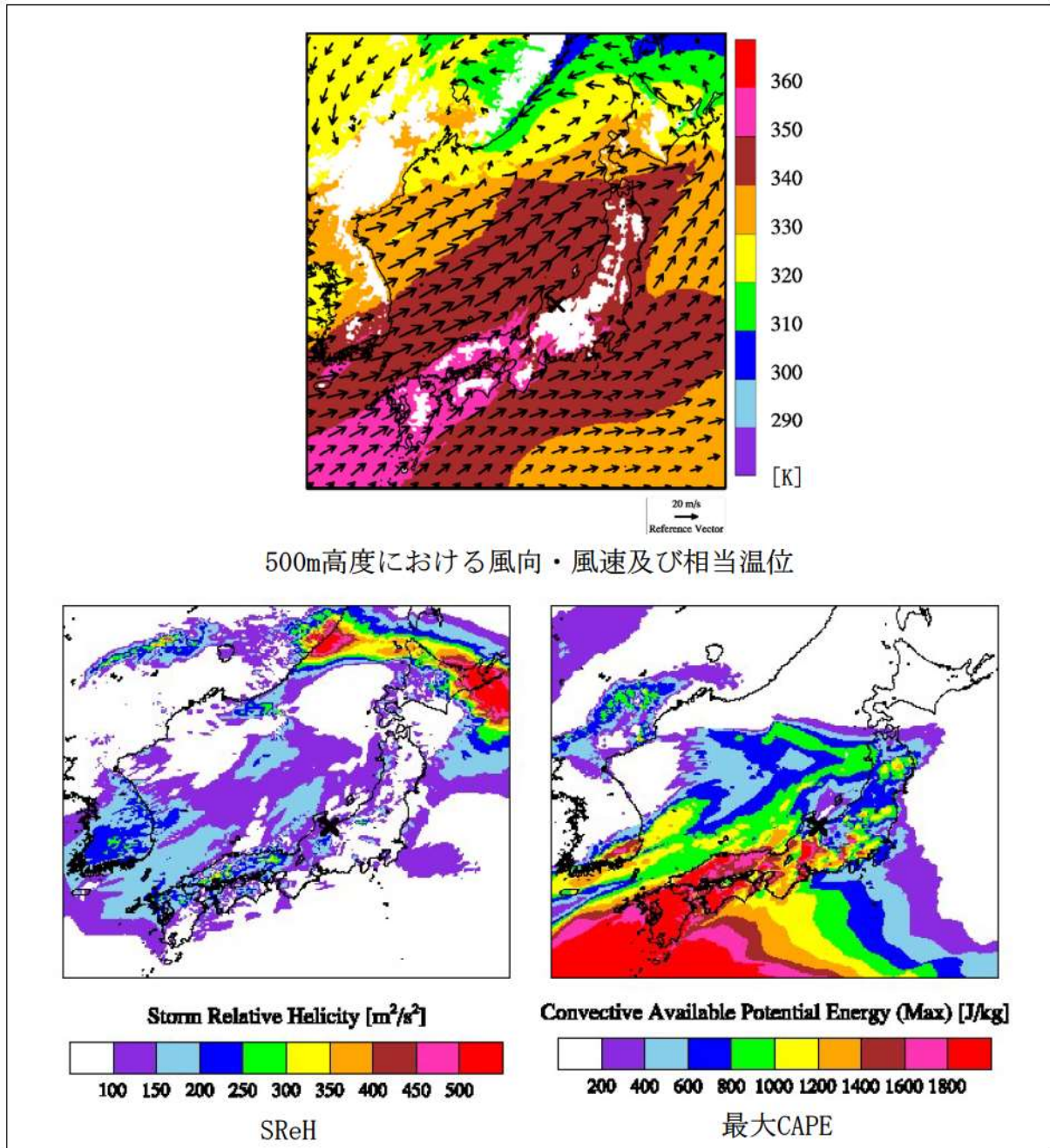
しかし、CAPE 値は F3 竜巻事例に見られるほど高くない。一方、寒冷前線に沿って SReH が非常に高かった。不安定性にやや欠けていたのが、F3 規模には至らなかった理由の一つであると考えられる。



第4.6-1図 1990/02/19のF2-F3事例における気象場と突風関連指数

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

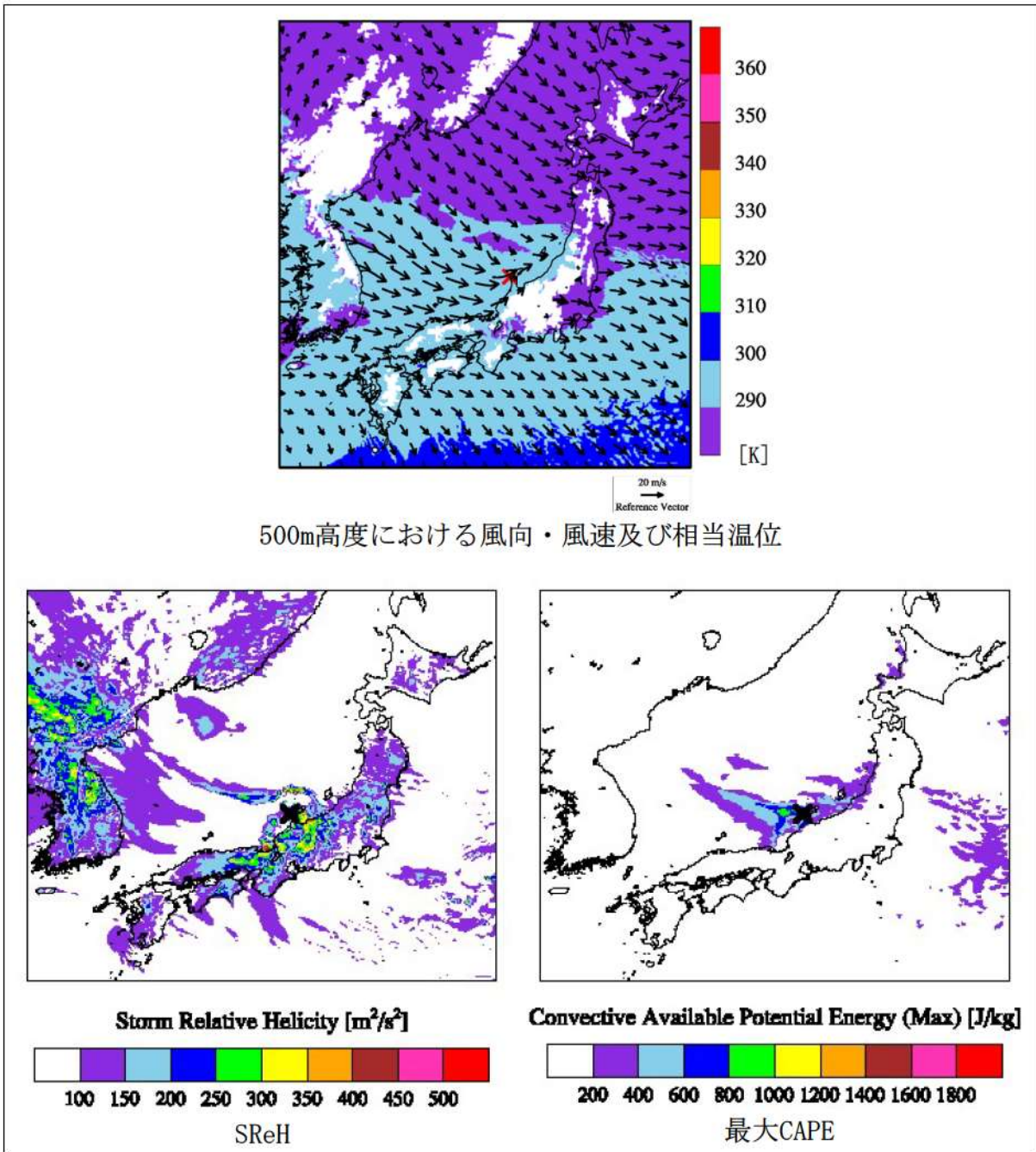
日本海側沿岸に沿って寒冷前線があり、その北側では西南西の風が吹いている。空気塊の暖かさとしては太平洋側と同等のもの(茶色)が、対馬海峡から日本海に入り込んでおり、青森県沖まで到達している。ただし、大気不安定度は暖候期にしては大きくなく、寒冷前線南側の九州から近畿にかけての不安定度(CAPE分布の赤い領域)と比べるとかなり小さい。SReHの値も特段高い傾向は見られず、F3発生時の環境場とは様相が異なる。



第4.7-1図 1991/06/12のF2事例における気象場と突風関連指数

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

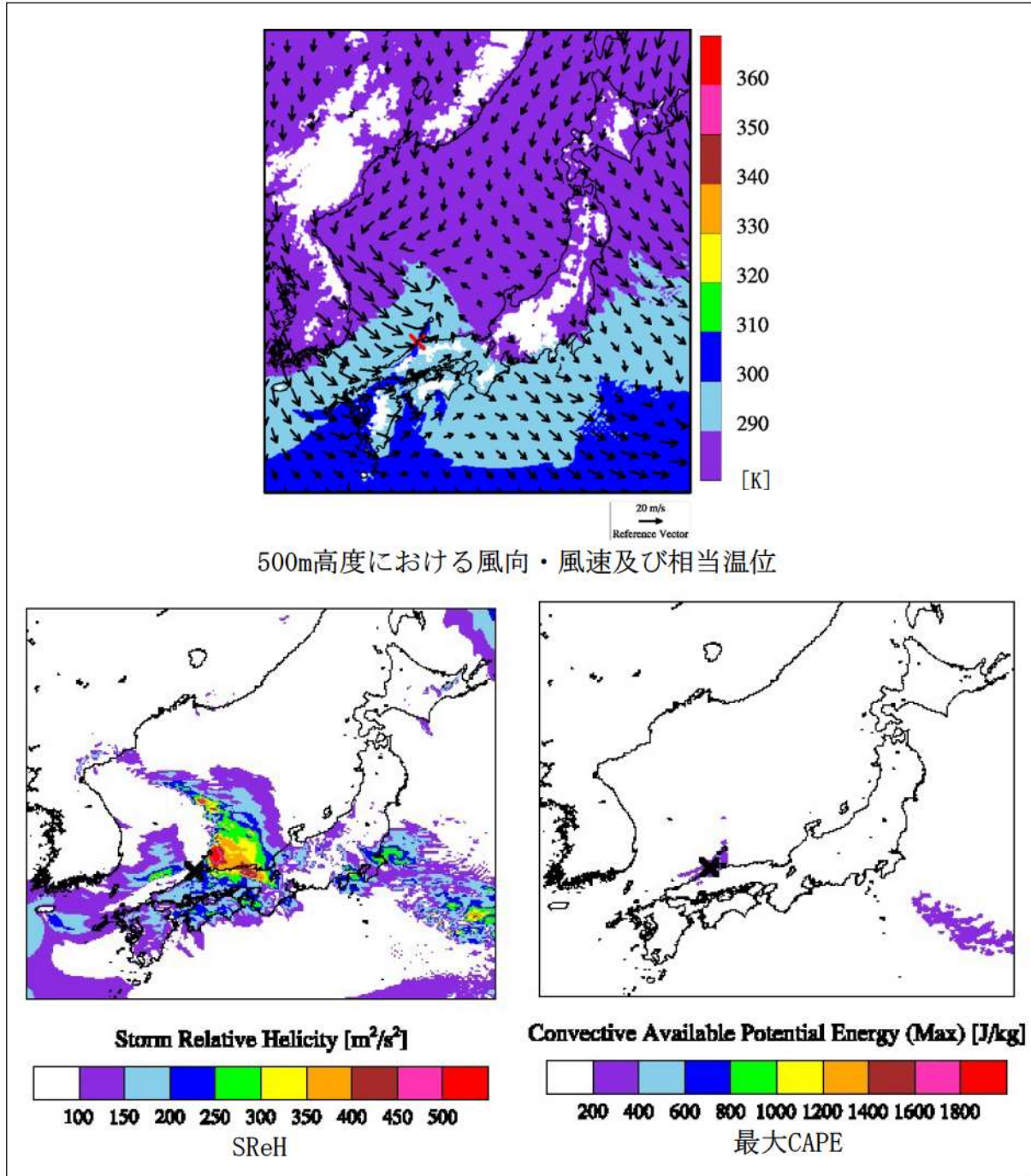
オホーツク海にある低気圧と九州の南西海上にある高気圧との間で、西高東低の気圧配置となっており、朝鮮半島東部から季節風が能登半島から敦賀湾に向かって流れ込んでいる。冬季によく見られる状況といえる。能登半島周辺での不安定度の高さは、海上で寒気が暖められて大気が不安定になったことが原因であり、SReH も高めである。特に能登半島周辺では高い。不安定化のメカニズムは異なるが2006/11/07 F3 竜巻 (佐呂間竜巻) と似た環境場になっている。ただし、SReH が佐呂間竜巻に比べて4割程度低く、これがF3規模に達しなかった理由の一つであると考えられる。



第4.8-1図 1990/04/06のF2事例における気象場と突風関連指数

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

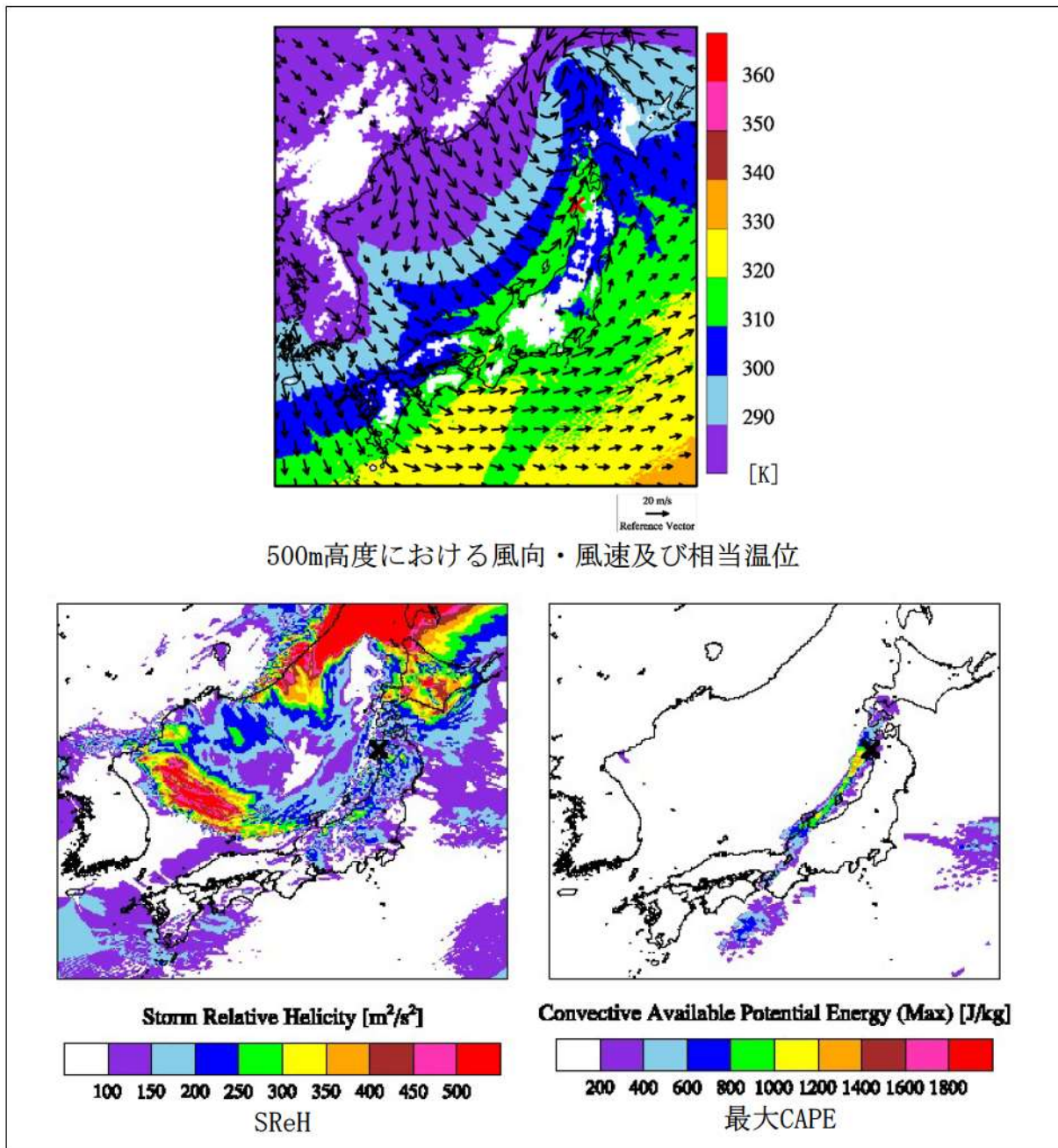
西高東低の弱い冬型の気圧配置にあり、朝鮮半島から寒気が流入している。島根県の沖で渦状の流れが形成されており、SReH がかなり高くなっている。しかし、やや不安定な大気になっているものの、他の日本海側 F2 事例よりもさらに不安定度が低くなっており、環境場の観点では、F3 規模まで発達するには不安定度合が欠如していたと考えられる。



第4.9-1図 1989/03/16のF2事例における気象場と突風関連指数

4.10 秋田県八森町(1999/11/25)日本海側 F1-F2 事例（日本海低気圧・寒冷前線）

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



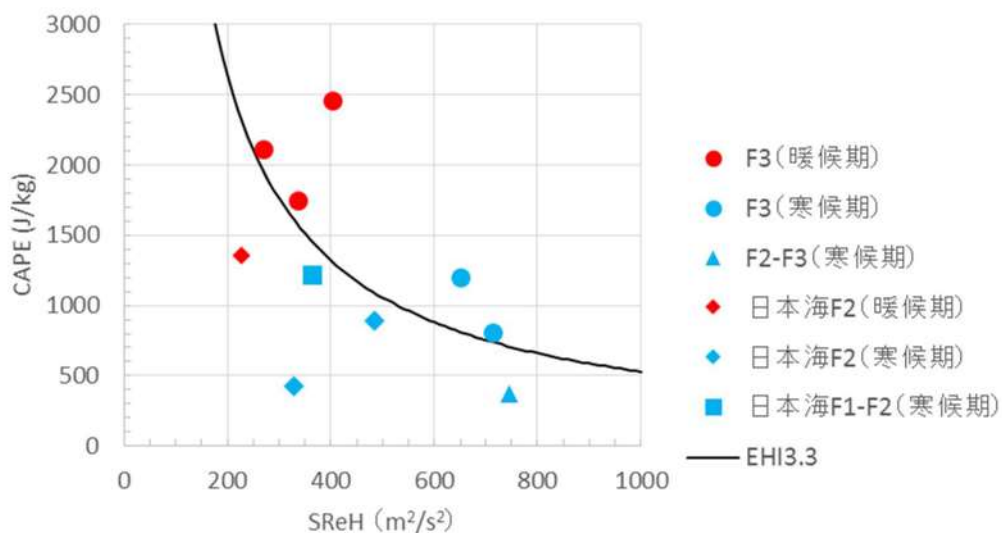
第4.10-1図 1999/11/25のF1-F2事例における気象場と突風関連指数

4.11 SReH・CAPE と竜巻強度との関係性

10 事例を分析した結果から以下の傾向が見られる。

- ① F3 竜巻事例では共通して、SReH と最大 CAPE の両方が大きく、太平洋側からの暖湿流の流入が見られた。寒候期（11 月～4 月）に発生した事例では CAPE が暖候期（5 月～10 月）に比べて小さいが、SReH が非常に大きく、大気不安定度の小ささを補っているようである。
- ② 今回分析した F2-F3 竜巻時の発生環境場は、CAPE（大気不安定度）が F3 竜巻発生時に比べてかなり低かった。F2 規模と F3 規模とで風速レベルで違いが大きく、本検討において F2-F3 竜巻を F3 竜巻と混合して扱うべきではない。
- ③ F2 竜巻でも SReH は F3 竜巻事例と同レベルの大きさになりうる。冬季の西高東低型の気圧配置下での日本海上での気団変質時、寒冷前線通過時、暖候期の場合は対馬海峡から日本海に向かって空気塊が流れ込む時に大気がやや不安定な状況が見られたが、多くの事例で大気不安定度は F3 竜巻発生時よりも小さかった。不安定度が大きかった事例もあるが、その場合 SReH が大きくなかった。つまり、両指数が共に大きくなる状況は見られなかった¹。

第 4.11-1 図は第 4-2 表における SReH と最大 CAPE の値を竜巻のカテゴリ別にプロットしたものである。F3 竜巻においては、暖候期と寒候期で CAPE の大きさが大きく異なっており（「5. 竜巻発生環境場の生起頻度分析」参照）、寒候期では暖候期に比べて値が小さいが、SReH が非常に大きい傾向が見られる。



第 4.11-1 図 SReH と最大 CAPE の関係

事例数が少ないことが課題であるが、日本海側の F2 規模竜巻の発生環境場では小

¹太平洋側の F2, F2-F3 竜巻はこの点で日本海側の F2 竜巻と異なるようである。太平洋側からの暖気流の流入下で起こるため、F3 竜巻と同レベルあるいは大きな指数になるケースが見られる。実際、小さな竜巻が F3 竜巻発生時の前後あるいはほぼ同時に発生することが F3 竜巻 5 事例中 4 事例見られた。

さな指数値の下でも竜巻が発生しているという点において、F3規模竜巻の発生環境場との違いが見られる。SReHとして $250\sim 300\text{m}^2/\text{s}^2$ 程度以上、(最大)CAPEとして $1,600\text{J}/\text{kg}$ (暖候期)あるいは $600\text{J}/\text{kg}$ (寒候期)程度以上の環境場においてF3竜巻が発生しているとみなすことができる。EHIに対しては、3.3程度を超える場合にF3竜巻が発生している。この場合、季節に分けずに通年単位で分析できる可能性がある。

国内外の関連研究をレビューしたものを付録Bに記した。現時点では各研究とも課題がある状況であるが、特に米国での成果では、F3規模以上とそれ以外といった大きな竜巻とそれ以外を区分けすることにおいては両指数が活用できそうである。そこで、次節では、国内最大規模F3あるいはそれ以上の規模の竜巻が発生するのに適した環境場を対象に、その生起頻度の地域性について検討する。

5. 竜巻発生環境場の生起頻度分析

前節において過去に発生した竜巻に対する環境場を分析したところ、国内で(太平洋側で)発生したF3竜巻では、SReHと(最大MU)CAPEの両方が大きな値をとる傾向が見られた。ここでは、SReHとCAPEそれぞれに対してある閾値を設け、その閾値を同時に超える頻度を分析することにより、国内最大規模F3あるいはそれ以上の規模の竜巻発生を観点とした地域性について議論する。(杉本ら 2014a) また、参考としてEHIに対しても同様に検討することとする。

5.1 用いる気象データ

突風関連指数の地域性を見出すには、詳細なメッシュ間隔でかつ長期間のデータが必要である。そこで、ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)の再解析データERA-Interim(1989年以降;水平分解能約70km)及びERA40(1989年まで;水平分解能約250km)をもとに、気象モデルを用いて数値的に気象場を解析したデータセット(橋本ら 2011)を用いる。当データセットは、気象庁と電力中央研究所が共同で作成したJRA-25再解析データ(Onogi et al. 2007)よりも $5\text{km}\cdot 1$ 時間毎と時空間解像度が細かく、豪雨事例の再現性も高まっている(橋本ら 2013)。本検討では、1961年から2010年までの50年間にわたって1時間毎に解析されたデータを用いる。詳細メッシュでかつこれほど長期間のデータセットは他に類をみない。

ECMWFの再解析データは、地球温暖化予測を目的として世界的に広く活用されており、最も精度が高いものと認識されている。しかし、空間分解能が非常に粗いため、物理的ダウンスケーリング手法として、WRFモデルを用いた長期再解析により 5km メッシュの気象場を算出してデータセットを作成し、本データセットで解析されている上空風、気温、気圧等の気象データを用いて、SReHとCAPEの値を1時間毎・ 5km メッシュで算出した。50年間にわたるデータサンプル数は各メッシュに対して約 4.4×10^5 個存在することとなる。

5.2 季節間の傾向差

F3 竜巻の発生環境場の特徴として、寒候期（11月～4月）に発生した竜巻の CAPE が暖候期（5月～10月）に比べて小さく、SReH が高い傾向にあった。こうした季節に応じた指数の特徴の違いについて考察する。

第 5.3-1 図は、SReH の閾値を $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、CAPE（最大 CAPE ではない）の閾値を 250 J/kg に設定し、各指数に対する超過頻度（全体の母数に対する割合（%））を各モデル格子点に対して月別に算出したものである。ここでは小さな閾値を設定している¹。SReH に対しては、日本海及び沿岸域では冬季に頻度が大きく、大きな値をとる傾向が示唆されている。また、関東平野、及び日高山脈周辺では年間を通じて他地域に比べて高い頻度を有している。7月 は全体的に低くなっている。一方、CAPE に対しては、寒候期で低い値をとり、暖候期で高い値をとる傾向が見られ、緯度依存性も見られ、Chuda and Niino(2005)の分析結果と整合している。この緯度依存性は、熱帯域ほど暖かく、高い雲ができやすいことと関係している。CAPE については、季節・緯度依存性が強く、南に行くほど、暖かい季節になるほど絶対値が大きくなっている。加藤(2008a)でも指摘されているように超過頻度を検討する上ではこの特徴を踏まえる必要がある。そのため、以下の検討では、季節に応じた最大 CAPE の閾値を設定して超過頻度を求めている。

ところで、閾値が変わると第 5.3-1 図で見られる頻度分布もそれに応じて変わるが、相対的な頻度大小関係はある程度保持される。国内最大規模 F3 の竜巻は太平洋側沿岸の平野部で発生しているが、CAPE の値は基本的に南ほど高い値をとるため、CAPE の地域性とは整合しない（例えば、沖縄では F3 竜巻は発生していない）。また、SReH においても整合しない（例えば、日本海側で F3 竜巻は発生していない）。少なくとも片方の指数だけでは F3 竜巻発生地点の地域傾向を説明することはできない。したがって、SReH・CAPE の関係性（第 4.11-1 図）から両方の指数を考慮した場合に説明づけられるか否かがポイントとなる。

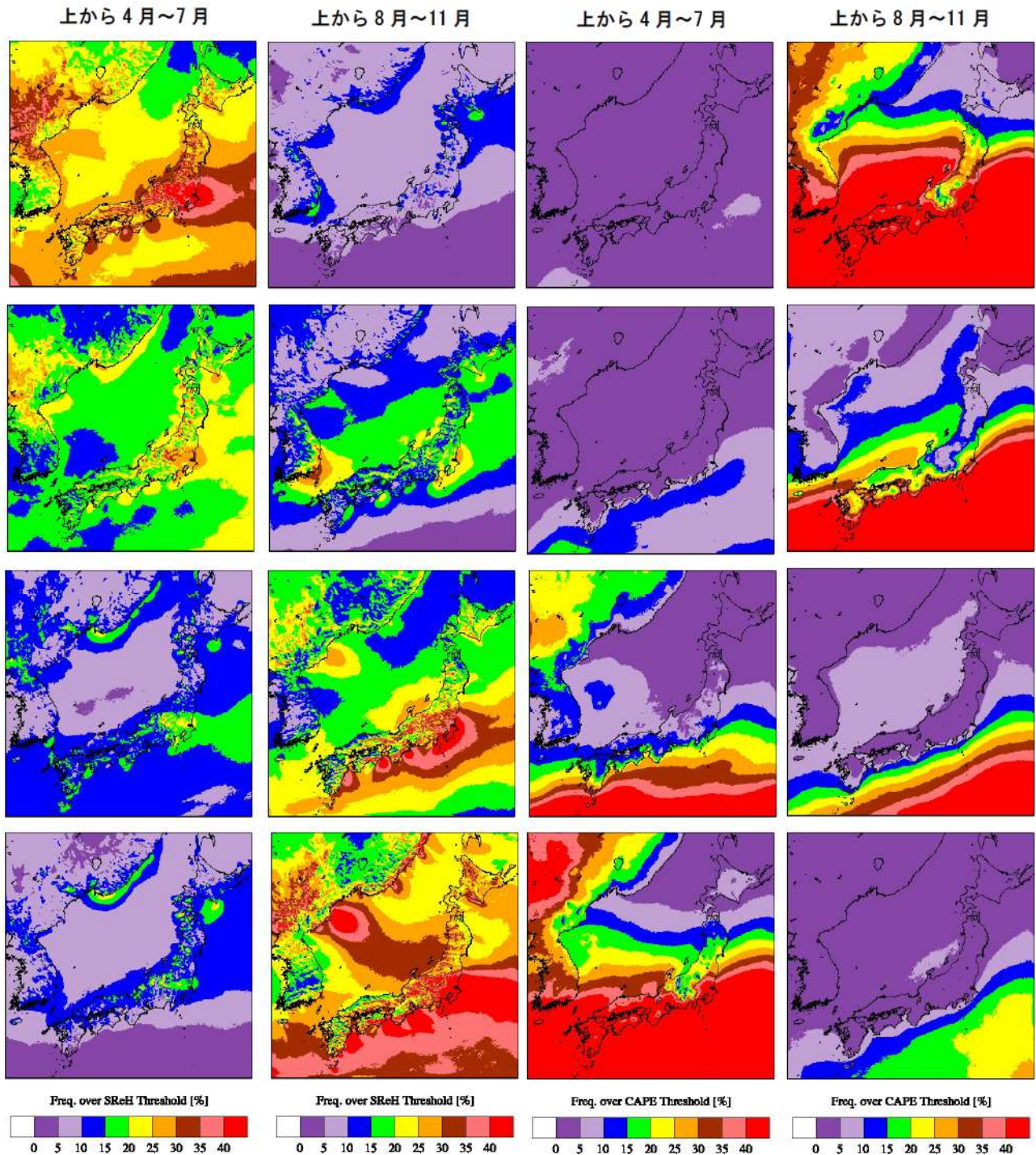
5.3 同時超過頻度分布に見られる傾向

前節における検討結果（第 4.11-1 図）を踏まえ、SReH の閾値を $250 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、CAPE の閾値を $1,600 \text{ J/kg}$ （暖候期）あるいは 600 J/kg （寒候期）として、同時超過頻度を算出する。また、竜巻発生時には降水現象を伴うものと考えられることから、降水量の閾値 2 mm/hr を条件に追加した。なお、降水量の閾値については頻度値の大小に若干影響を及ぼすが、結果の解釈には全く影響しないことを確認している。

暖候期・寒候期別に同時超過頻度を算出した結果を第 5.3-2 図に示す。また、第 5.3-3 図は、気象庁の「竜巻等の突風データベース」で確認された F2-F3 竜巻及び F3 竜巻の発生箇所を示したものである。暖候期においては、同時超過頻度 0.01%前後の地域が茨城県以西の太平洋側及び九州の沿岸域の平野部に広がっており、超過

¹閾値を小さく設定するという事は、スーパーセルだけではなく、小さな雷雨発生の環境場も捕捉することを意味する。

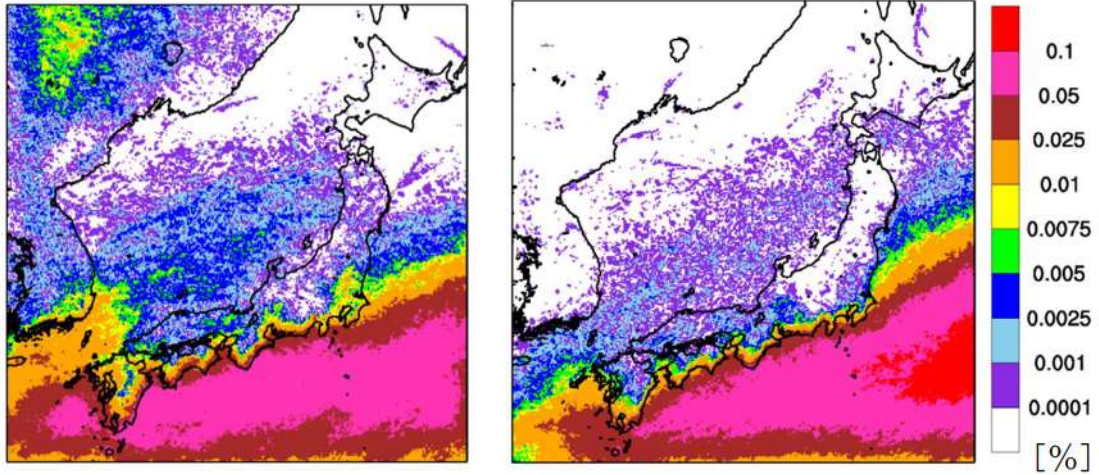
頻度の高い地域は F3 規模の竜巻の発生箇所を含包している。つまり、超過頻度の高い地域で F3 規模以上の竜巻発生に適した環境場が整いやすいことが示唆されている。それに対し、日本海側，東北太平洋側，及び北海道・下北半島といった北日本での超過頻度の値は、1～2 オーダ以上小さな値となっている。



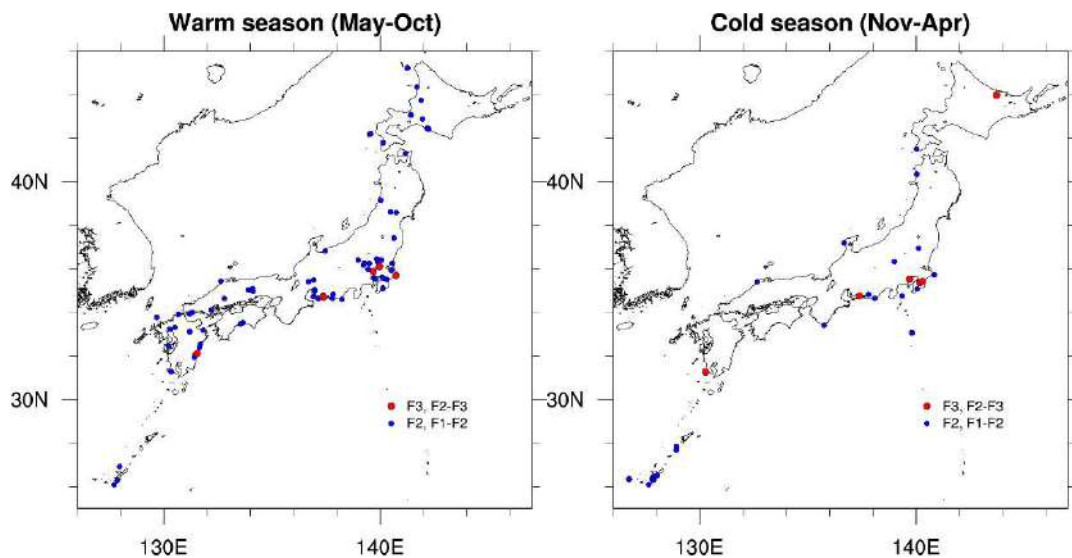
第 5. 3-1 図 月別の SRh (左側 2 列) 及び CAPE (右側 2 列) の超過頻度分布

また、寒候期の超過頻度分布では、頻度が高い地域が南側にシフトしているが、F3 竜巻発生箇所がより沿岸に近い地点に限られていることと対応している。全体的に暖

候期に見られる傾向と同様であり、また F3 規模竜巻の発生数に季節間の差が見られないことも反映されている。このように、過去の F3 竜巻発生時の環境場の解析結果を踏まえて設定した SReH と CAPE の閾値を両方超過する頻度の分布は、実際の F3 竜巻の発生箇所の傾向と整合している。



第 5.3-2 図 同時超過頻度分布 (F3 規模以上を対象; 左: 暖候期, 右: 寒候期)
(実績ベースの閾値 (SReH : 250 m²/s², 最大 CAPE : 1,600 J/kg (暖) 600J/kg (寒)))



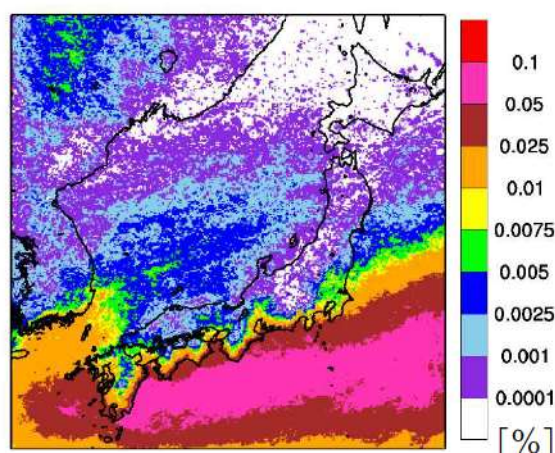
第 5.3-3 図 F3 竜巻 (F2-F3 を含む) 及び F2 竜巻 (F1-F2 を含む) の発生箇所
(左: 暖候期, 右: 寒候期)

同時超過頻度分布は、閾値を「超過する」という意味において、F3 規模あるいはそれ以上の規模の竜巻が発生するのに適した環境場の生起しやすさを表現していると解釈できる。

この分布では、高標高山岳 (九州山地, 四国山地, 中国山地, 中央アルプス等) の

南北で頻度が大きく異なっており、これら山岳によって太平洋側からの暖気流が遮断される効果（第 2.3-3 図参照）が大きな竜巻の発生に影響していることも示唆されている。

EHI を用いた場合、第 5.3-2 図に見られる両季節の傾向の中間的な傾向が見られる。第 5.3-4 図は、EHI の閾値を 3.3（第 4.11-1 図参照）にした際の超過頻度分布である。通年単位で閾値を設定しているため、中間的な傾向を示すのは妥当である。また、SReH と CAPE の両方の指数を用いる方法においても問題がないことを示唆している。つまり、米国とは異なり（付録 B 参照）、国内においては、SReH あるいは CAPE の片方が異常に大きく、EHI がある程度高い値を示すような事例が稀であるからである。



第 5.3-4 図 超過頻度分布（通年；EHI の閾値：3.3）

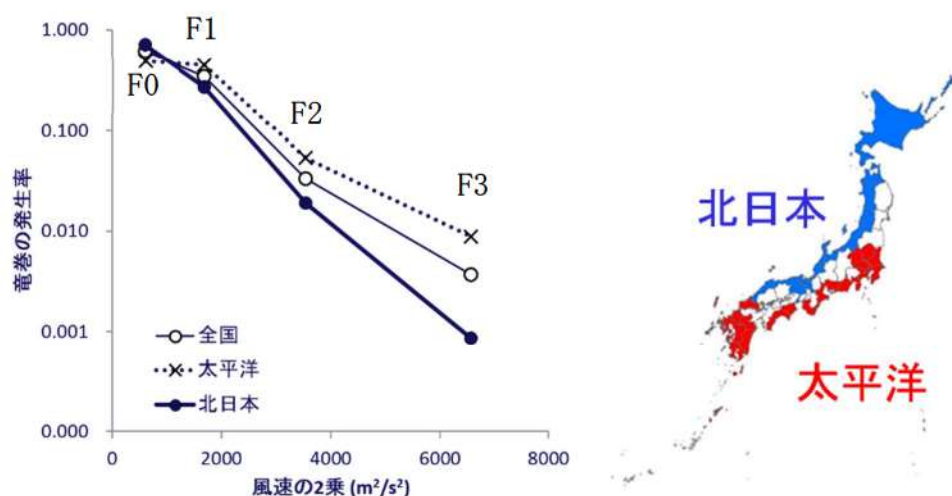
5.4 F3 規模の最大風速を考慮すべき地域

第 5.3-2 図より国内最大規模の F3 竜巻が発生するのに適した環境場が形成される頻度には地域差があることがわかった。この分布形態から実際に F3 規模の竜巻を考慮すべき地域を特定するには確率論的な議論が必要である。つまり、国内の竜巻影響評価ガイドに記載されている超過確率 10^{-5} 、米国の評価ガイド等 (Ramsdell and Rishel 2007, U.S. NRC 2007) で記載されている超過確率 10^{-7} を参考として必要となる風速レベルを考慮する必要がある。

第 5.4-1 図は、ハザード評価と同様に海上 F 不明竜巻を按分して各 F スケール竜巻の 51.5 年間（1961 年～2012 年 6 月）疑似発生数を分析し、F スケール毎に発生率（対象 F スケールの発生数/疑似発生数）を地域別にプロットしたものである。太平洋側と北日本とでは竜巻の全発生数に大差はないことから、この発生率で対象 F スケール竜巻の発生しやすさを概ね把握することができる。Dotzek et al. (2005) と同様、F スケールが大きくなるほど指数的に頻度が低減しているが、F3 規模の発生率は、茨城県以西太平洋側・九州沿岸では、その他の地域に比べ 1 オーダ程度発生率が高くなっており、突風関連指数の分析結果と整合していることがわかる。日本海側沿岸や東北太平洋側・下北半島では、F3 竜巻が発生していないため、もっと

頻度が小さくなることが予想できる。また、F2 規模になると地域差が小さくなり、F0 規模ではむしろ太平洋側の方が若干少なくなることも見てとれる。

九州電力川内原子力発電所を対象とした竜巻影響評価において、(海岸線に対して陸側・海側 5km の竜巻検討地域に対する) ハザード評価結果では、F3 規模竜巻 (風速 92m/s) に対する超過確率は大凡 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ にある。上記のように、日本海側を含む北日本では F3 規模竜巻の発生しやすさ、及び発生数は、太平洋側に比べて少なくとも 1 オーダは低いことを考慮すると、F3 規模竜巻の風速が生起する確率は、超過確率にして $10^{-7} \sim 10^{-8}$ を下回る。この超過確率レベルは米国の評価ガイドに規定されているレベルを下回っている。そのため、北日本・日本海側の地域では、F3 規模竜巻の風速レベルは基準竜巻風速としては想定範囲外の範疇に入ると考えることができる。



第 5.4-1 図 各 F スケールの発生率

5.5 閾値が同時超過頻度の分析結果に及ぼす感度

小さな閾値を設定すると、雷雨 (非竜巻)・小さな竜巻の発生を勘案することとなるため、全体的に頻度値が上昇し、(発生実績と同様に) 地域性が明瞭でなくなる。一方、非常に大きな閾値を設定すると、F4・F5 規模の非常に大きな竜巻に着目することになり、高頻度域は太平洋側のさらに限定された地域になる。杉本ら (2014b) は、国内最大規模の F3 規模が発生する環境場として適切な閾値を、SReH については $150 \sim 550 \text{ m}^2/\text{s}^2$ の範囲 ($100 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 刻み)、最大 CAPE に対しては、 $200 \sim 1,500 \text{ J/kg}$ (100 J/kg 刻み) の範囲の値の組み合わせで検討した。最適とみなされた組み合わせに対する結果は第 5.3-2 図に示した結果に概ね沿ったものとなっている (付録 E)。

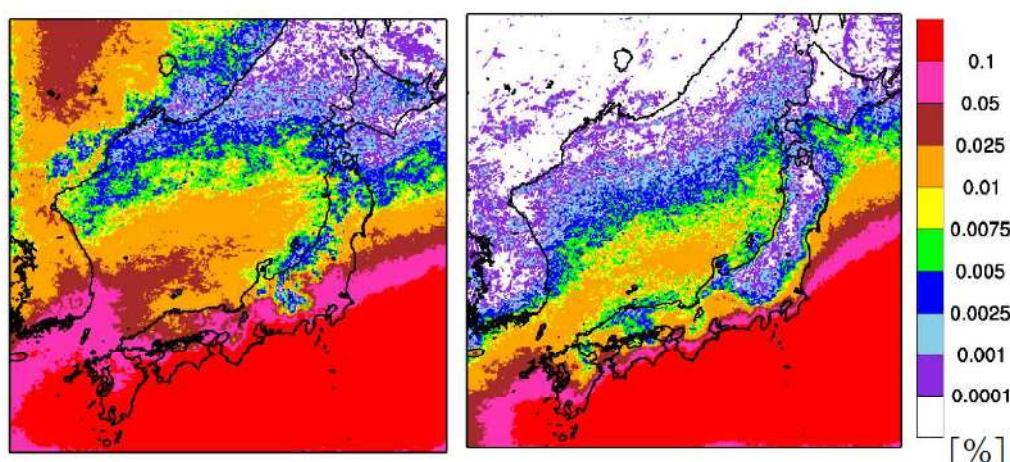
突風関連指数を用いたメソスケール分析はスーパーセル型竜巻に適するため、非スーパーセル型竜巻を含む F2 規模の竜巻を含めた分析に SReH や CAPE といった突風関連指数を用いる適用性は微妙ではあるが、ここでは F2 規模以上の竜巻の発生頻度を念頭においた閾値について考えてみる。第 4.11-1 図の結果から両指数の閾値を

$$\text{SReH} : 200 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

最大 CAPE : 1,000J/kg (暖候期), 350J/kg (寒候期)

とする¹。ただし、暖候期については 参考にできる竜巻が 1 事例しかないため、650J/kg の閾値についても検討する。EHI を用いる場合、島根県で発生した 1989/03/16 F2 事例以外は 1.5~2.0 前後の EHI に入っているが、1989/03/16 F2 事例では 0.8 強にとどまっている。そこで、1.5 と 0.8 を EHI の閾値として超過頻度の算出を試みる。

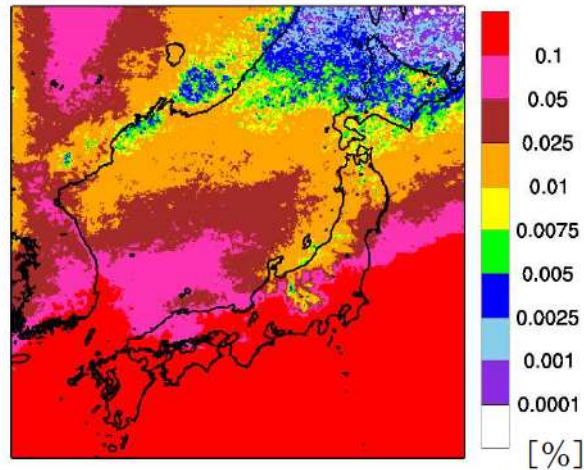
同時超過頻度の算出結果を第 5.5-1 図に示す。F3 規模以上の竜巻を対象とする場合よりも頻度は全体的に上がっている。第 5.3-2 図では奄美・沖縄方面では本州（茨城県以西）太平洋側に比べて頻度がやや低くなる傾向が推測されるが、第 5.5-1 図では奄美・沖縄地方でも値が高い傾向が推測され、実際の発生箇所（第 5.3-3 図）に整合している。



第 5.5-1 図 同時超過頻度分布 (F2 規模以上を対象 ; 左 : 暖候期, 右 : 寒候期)
(SReH の閾値 : $200\text{m}^2/\text{s}^2$, 最大 CAPE の閾値 : 1,000J/kg (暖) 350J/kg (寒))

暖候期においては、福島県から宮城県の太平洋側及び本州日本海側沿岸での頻度が高まり、中部地方以西では内陸も含めて頻度が高く、東日本も内陸深くまで頻度が高くなっている。実際の F2 規模以上の発生箇所の多くを包含できている。しかし、北海道の石狩地方以北で F2 竜巻が計 4 個発生しているが、同時超過頻度はかなり低い。CAPE の閾値を 1,000J/kg から 650 J/kg 程度まで落とすと対応性は高まり (第 5.5-2 図)、能登半島以北の日本海側・北日本における頻度は本州・中日本以南に比べて少し低い程度となって、全体的に地域間の差は薄れる。第 5.4-1 図 (F2 規模以上の場合、全国平均からの差は、太平洋側とそれ以外の地域ともに 1 オーダの差はない) を踏まえると、第 5.5-2 図の方がベターと考えられる。

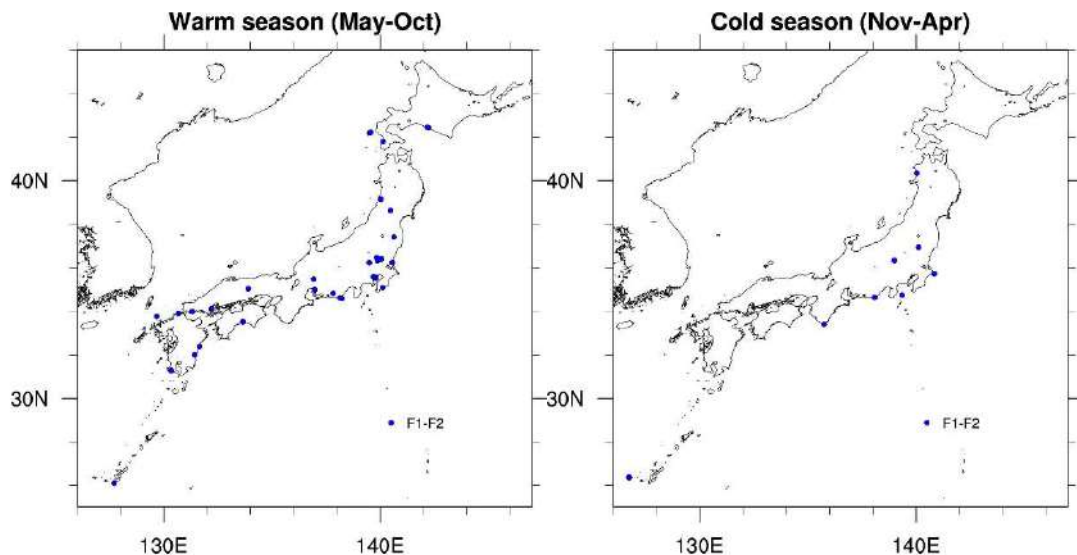
¹太平洋側 F2・F1-F2 竜巻の場合は F3 規模に対する閾値を同時に超過する竜巻がいくつか存在する。その一部は F3 竜巻 (茂原竜巻, 豊橋竜巻, つくば竜巻) とともに発生したものである。環境場としては F3 竜巻が発生している状況下でも、マイクロスケールの気象メカニズム等で小さな竜巻が発生することがあると解釈できる。つまり、閾値は、環境場 (親雲スケールの気象場) を観点とした、対象規模の竜巻が発生するための「必要条件」であるといえる。



第 5.5-2 図 同時超過頻度分布 (暖候期)
 (SReH の閾値 : $200\text{m}^2/\text{s}^2$, 最大 CAPE の閾値 : $650\text{J}/\text{kg}$)

オホーツク地方で頻度が高く、F2 規模程度の竜巻が発生する環境場は東北・道南地方に匹敵した確率で形成されうるといえる。

寒候期においても福島県から宮城県の太平洋側、襟裳岬から道南方面の沿岸部、及び本州・道南の日本海側沿岸で頻度が大きくなっている。道南より北側の日本海側沿岸で頻度が増えていないのは実態と整合している。中央アルプス以北の中央山地で頻度は低めである。この地域で竜巻は 2 箇所発生している (第 5.3-3 図) が、共に F1-F2 規模の小さな竜巻である (第 5.5-3 図)。

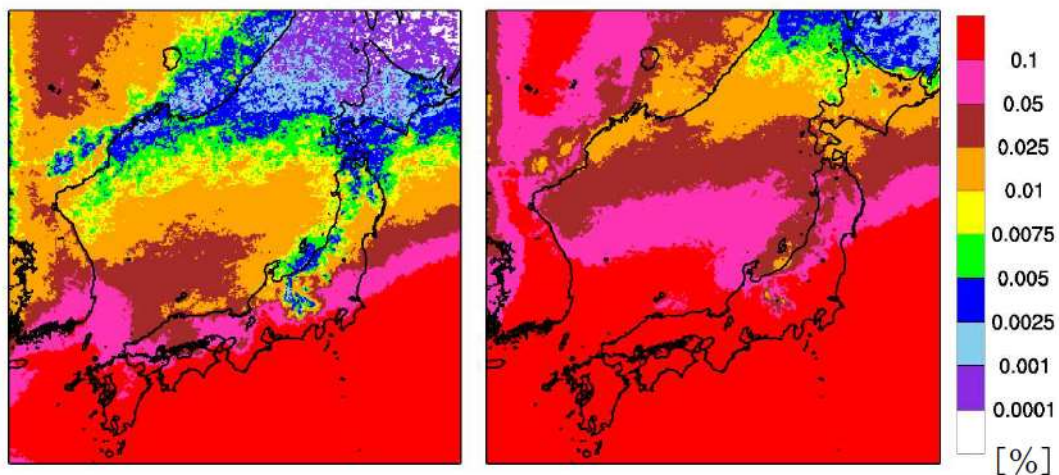


第 5.5-3 図 F1-F2 竜巻の発生箇所

「4. 国内で発生した F3 竜巻及び日本海側 F2 竜巻の数値シミュレーション」における個別竜巻の分析事例において、暖候期に対しては 1988 年以降に発生した F2 あるいは F1-F2 竜巻が 1 事例しかない。第 5.5-1 図に示した東北太平洋側沿岸から道

南・道東にかけての頻度において、暖候期の方が低いというのは海水温の高さの季節性との整合性にも欠けるため、最大CAPEの閾値は1,000J/kgよりも小さくした方がよいと思われる。第5.5-2図で用いた閾値650 J/kgの妥当性の判断は今後発生するであろうF2規模の竜巻の発生を踏まえた分析結果をもとに再度検討する必要があるが、概ね発生状況の地域性は表現できている。

EHIを用いた場合、EHI1.5では、第5.5-1図の暖候期、寒候期の状況を平均的に見た時の頻度分布に大凡あてはまる(第5.5-4図左図)。1989/03/16 F2事例を参考に0.8まで閾値を下げると、地域性は殆ど見られなくなる(第5.5-4図右図)。上述のように、暖候期の分布は第5.5-1図よりも閾値を下げた第5.5-2図の分布の方がよい傾向が見られることから、EHI1.5の結果は頻度を過少に評価している可能性がある。しかし、閾値を0.8まで落とした結果では、茨城県以西太平洋側+九州沿岸と、それ以外の地域との差がかなり小さく、落としすぎのようである。いずれにしても、F2規模以上の竜巻を対象とする場合、F3規模以上を対象とする場合とは異なって季節間での発生数の差があり(第5.3-3図)、EHIを用いた通年評価をすることについては議論の余地が大きい。



第5.5-4図 超過頻度分布(通年; EHIの閾値: (左) 1.5, (右) 0.8)

6. 佐呂間竜巻に対する考察

第5.3-2図の同時超過頻度分布において、北海道では超過頻度が非常に低いですが、網走支庁網走支庁佐呂間町ではF3竜巻が発生している。ここではこの竜巻に対する考察及び影響評価における取り扱いの方向性について述べる。

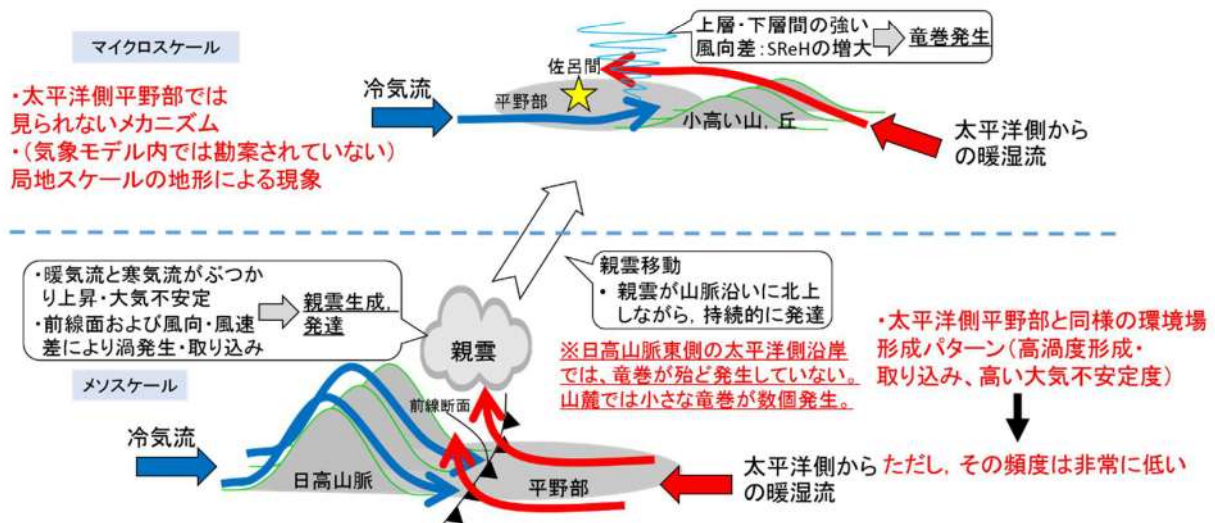
佐呂間竜巻の発生メカニズムについて過去の知見を踏まえ、第6-1図のように模式的に示した。第4.2-1図に示したように、当竜巻発生時においては、太平洋側からの暖気流が道東・オホーツク地方に流入している環境下で、高いSReHを伴う寒冷前線が通過しており、第4.11-1図に示すように、SReH、CAPEともに一定の高さを保持していた。この意味で、太平洋側で過去に発生したF3竜巻の環境場の特徴と同様の特徴を有する。ただし、CAPEについては、第4.2-1図に示したように、SReHとは異なる

り、降水域が発達した日高山脈の東側に広く高い値をとっているわけではなかった。一方、加藤（2008b）が以下のように指摘しているように、この竜巻に対しては周辺地形によるマイクロスケールの影響を無視できない。

「下層での鉛直シアの強化は、ガストフロントの前面下層の気圧低下による水平風加速に加えて、強い鉛直渦度生成領域の風上（南南東）側に南南西～北北東に伸びる最大標高 600m 以上で幅 10km ほどの尾根による山岳波の影響を少なからず受けている。実際の竜巻発生位置の風上側にも同様な尾根が存在していることから、佐呂間竜巻は地形の影響を受けて発生したと考えられる。」

このマイクロスケールの効果は環境場では考慮できない（解像できない）ため、両指数の値は、特に SReH では第 4. 11-1 図でプロットした結果よりも高まっている可能性が高い¹。

前節でも議論したように、オホーツク地方は北海道の中でも F2 規模以上の竜巻であれば本州北日本と同等の頻度で環境場が形成されやすい地域であるが、F3 規模以上の竜巻に対しては環境場が形成され難い、つまり F3 規模に到る程度に大気不安定な空気塊の流入と高渦度を有した総観場の通過が同時に発生する頻度が極めて低い。佐呂間竜巻が地形影響を受けていることを踏まえると、竜巻発生を観点とした気候としては、この地域で F3 規模の竜巻発生に適した環境場は極めて生起しがたく、佐呂



第 6-1 図 佐呂間竜巻の発生メカニズムに関する模式図

間竜巻発生時においても F3 規模竜巻の発生には（特に最大 CAPE においては）微妙な環境場であった²が、近隣の周辺地形の影響を強く受けて F3 規模の竜巻発生に到ったと解釈するのが妥当と考えられる。

上述のように、竜巻発生環境場に関する同時超過頻度分布（第 5. 3-2 図）、及び発

¹MLCAPE の値は非常に小さく（瀧下ら 2011）、MUCAPE の値は大きめであることから、尾根を乗り越えた先の佐呂間町上空における（寒冷前線起因の）冷氣流の上側で、大気が局所的に不安定になっている可能性は否定できない。

²佐呂間竜巻は季節の変わり目に発生したが、暖候期の傾向が強かった（第 5. 5-1 図参照）といえる。

生率の分析結果（第 5.4-1 図）をもととした超過確率の議論では、竜巻検討地域の設定及び基準竜巻風速 V_{B1} の設定に佐呂間竜巻を特段考慮する必要はない。それはこの竜巻が基準竜巻設定で対象としている地域性・空間スケールよりも局地的・小さな空間スケールを有する地形影響を受けたものであるからである。むしろ、この影響については、竜巻影響評価ガイドにおける設計竜巻 V_D の設定時に考慮するのがガイドの趣旨に沿っている。

佐呂間竜巻のような竜巻が発生するかどうかについては、当時の気象場（総観場（寒冷前線）、気流場、大気不安定度）と周辺地形の類似性を確認すればよい。確認のポイントとしては、これまでに説明した気象場の分析結果を踏まえれば以下 2 点である。

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

この条件を満たせば、寒冷前線通過時に、暖かい空気塊が尾根を乗り越えて寒冷前線起因の冷氣流の上側に流入できる。このような確認を行う必要があるのは、東北太平洋側や北海道オホーツク地方・道南地方等太平洋に面した地域に立地した発電所である。発電所は沿岸部に立地しているため、佐呂間竜巻で影響を及ぼしたような尾根形状の島が沖近くに存在するかがポイントとなる。日本海側沿岸部に立地した発電所においては、高標高山岳の影響が大きい（第 2.3-3 図）、不安定性の非常に大きい暖湿流が流れ込むような状況は生じがたい。

7. まとめと今後の課題

以上、数値気象モデル及びモデル解析データをもととした竜巻検討地域の設定方法について、特に検討地域における最大竜巻規模を基準竜巻風速 V_{B1} として採用できるかどうかを観点として、竜巻発生環境場の分析を行った。その結果、以下の結果が得られた。

- ・ F3 規模の竜巻、F2-F3 規模の竜巻（1988 年以降）、日本海側 F2 規模の竜巻（1988 年以降）、及び日本海側 F1-F2 規模の竜巻（1988 年以降）を対象に、WRF モデルと ECMWF 再解析データを用いた気象解析を行い、5 km 解像度での気象場と突風関連指数（SReH・CAPE）の分布を分析した。
- ・ 上記竜巻事例に対して竜巻発生地点周辺における SReH と CAPE の両指数の値を分析し、F3 規模以上の場合と F2 規模以上の場合の両方に対して、地域性を考える際の妥当な閾値について検討した。
- ・ F3 規模以上の竜巻を対象とした閾値を同時に超過する頻度の分布を 50 年間の長期再解析データをもとに算定した。その結果、茨城県以西の太平洋側沿岸及び九州沿岸の平野部で頻度が高く、実際の竜巻発生箇所とも整合していた。一方、その他の地域では、上記太平洋側地域に比べて 1~2 オーダ以下の頻度であった。
- ・ 総観スケールでの気流場では、日本列島の高標高山脈によって太平洋側から流れ

込む不安定性の高い暖湿流が遮断され（第 2.3-3 図）、この気流パターンが F3 規模の大きな竜巻が日本海側で発生せず、茨城県以西の太平洋側沿岸域において発生するという実績と関係していると考えられる。大きな竜巻はさまざまな総観場区分に発生しているが、総観場区分で「局地性」と判定された竜巻は、スケールの小さな非スーパーセル型であり、上記太平洋側沿岸域と対応していない。一方、総観場として「台風性」と判定された大きな竜巻の発生箇所は対応している。そのため、台風性の大きな竜巻の発生箇所を検討地域の設定の参考にすることは一つの方法として考えられる。

- ・ 同時超過頻度分布の特徴は、疑似竜巻発生数を用いた F3 竜巻の発生率の地域差と対応していた。2 つの突風関連指数を用いた分析は地域性検討に有効であると考えられる。また、超過確率の観点では、 10^{-7} の超過確率以上の風速を検討対象とするのであれば、F3 竜巻の風速レベルを考慮すべき地域は上記太平洋側・九州の沿岸域に限られる。
- ・ 佐呂間竜巻に関連して、オホーツク地方は気候的には F2 竜巻が一定以上の生起確率で発生しうる地域であるが、F3 規模以上の竜巻発生環境場は極めて形成されがたい地域である。佐呂間竜巻に対しては周辺地形の影響を少なからず受けたことが報告されており、基準竜巻設定ではなく、設計竜巻設定時にこの竜巻と類似したものが発生する可能性を定性的に考慮するのが評価ガイドに沿っている。
- ・ EHI を用いた評価は、F3 規模以上の場合では概ね良好であるが、F2 規模以上の場合では、季節間の発生数の違いが大きいため、通年レベルでの評価が難しいようである。現時点では、季節を分けて SReH と最大 CAPE を用いて評価する方がベターだと思われる。
- ・ メソスケールで分析した結果は、竜巻の発生メカニズムの観点において、大きな竜巻の発生に対する大気場の必要条件を把握する上で有効である。総観場傾向から設定した検討地域は、メソスケールでの分析結果と概ね整合した。
- ・ メソスケールでの検討によって得られた必要条件的な傾向は、突風関連指数の分析においては、実際には大きな竜巻が発生しなくとも発生しうる環境場であった事例を排除していないため、実態よりも広い範囲で大きな竜巻が発生しうる地域を評価する点において保守的な評価を行っているといえる。

今後の課題として、将来的な気候変動により規模や発生数の増加傾向となることは否定できないため、最新のデータ・知見をもって気候変動の影響に注視し、必要に応じて見直しを実施していくものとする。

参考文献

- Bluestein, H. B., 2013: Severe Convective Storms and Tornadoes. Springer, 456 pp.
- Brady, R. H., and E. J. Szoke, 1989: A case study of nonmesocyclone tornado development in northeast Colorado: similarities to waterspout formation. *Mon. Wea. Rev.*, 843-856.
- Browning, K. A., 1964: Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. *J. Atmos. Res.*, 21, 634-639.
- Bunkers, M. J., B. A. Klimowski, J. W. Zeitler, R. L. Thompson, and M. L. Weisman, 2000: Predicting supercell motion using a new hodograph technique. *Wea. Forecasting*, 15, 61-79.
- Burgess, D. W., M. A. Magsig, J. Wurman, D. C. Doswell, and Y. Richardson, 2002: Radar observations of the 3 May 1999 Oklahoma City tornado. *Wea. Forecasting*, 17, 456-471.
- Chuda, T., and H. Niino, 2005: Climatology of environmental parameters for mesoscale convections in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, 391-408.
- Davies, J. M., 1993: Hourly helicity, instability, and EHI in forecasting supercell tornadoes. 17th Conf. on Severe Local Storms, St. Louis, MO, Amer. Meteor. Soc., 107-111.
- Davis-Jones, R., D. Burgess, and M. Foster, 1990: Test of helicity as a tornado forecast parameter. 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB., Canada, Amer. Meteor. Soc., 588-592.
- Doswell III, C. A., and J. S. Evans, 2003: Proximity sounding analysis for derechos and supercells: an assessment of similarities and differences. *Atmos. Res.*, 67-68, 117-133.
- Dotzek, N., M. V. Kurgansky, J. Grieser, B. Feuerstein, and P. Nevir, 2005: Observational evidence for exponential tornado intensity distributions over specific kinetic energy. *Geophys. Res. Letters*, 32, L24813, doi:10.1029/2005GL024583.
- Fujita, T. T., 1981: Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scale. *J. Atmos. Sci.*, 38, 1511-1534.
- Klemp, J. B., and R. B. Wilhelmson, 1978: Simulations of right- and left-moving storms produced through storm splitting. *J. Atmos. Sci.*, 35, 1097-1110.
- Lee, B. D., and R. B. Wilhelmson, 1997: The numerical simulation of nonsupercell tornadogenesis. Part II: Evolution of a family of tornadoes along a weak outflow boundary. *J. Atmos. Sci.*, 54, 2387-2415.

- Mashiko, W., H. Niino, and T. Kato, 2009: Numerical simulation of tornadogenesis in an outer-rainband minisupercell of typhoon Shanshan on 17 September 2006. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 4238-4260.
- Moncrieff, M., and M. J. Miller, 1976: The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 373-394.
- Noda, A. T., and H. Niino, 2010: A numerical investigation of a supercell tornado: Genesis and vorticity budget. *J. Meteor. Soc. Japan*, 88, 135-159.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 369-432.
- Orlanski, I., 1975: A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 56, 527-530.
- Ramsdell, J. V. Jr., and J. P. Rishel, 2007: Tornado climatology of the contiguous United States. NUREG/CR-4461, Revision 2.
- Rasmussen, E. N.: 2003: Refined supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 18, 530-535.
- Rasmussen, E. N., and D. Blanchard, 1998: A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 13, 1148-1164.
- Roberts, R. D., and J. W. Wilson, 1995: The genesis of three nonsupercell tornadoes observed with dual-Doppler radar. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 3408-3436.
- Rotunno, R., and J. B. Klemp, 1985: On the rotation and propagation of simulated supercell storms. *J. Atmos. Sci.*, 42, 271-292.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers: A description of the advanced research WRF version 2. NCAR Tech. Note, NCAR/TN-468+STR, 88 pp., 2005.
- Suzuki, O, H. Niino, H. Ohno, and H. Nirasawa, 2000: Tornado-producing mini supercells associated with Typhoon 9019. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 1868-1882.
- Trapp, R. J., 2013: *Mesoscale-Convective Processes in the Atmosphere*. Cambridge, 346 pp.
- U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, 2007: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1.
- Wakimoto, R. M., and J. W. Wilson, 1989: Non-supercell tornadoes. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1113-1140.
- 飯塚義浩, 加治屋秋実, 2011: 数値予報資料から求めた竜巻に関連する大気環境

指数の統計的検証. 天気, 58, 19-30.

- ・ 大野久雄, 2001: 雷雨とメソ気象. 東京堂出版, 309 pp.
- ・ 原子力規制委員会, 2013: 原子力発電所の竜巻評価ガイドの制定について. 原管研発第13061911号, 2013年6月19日制定
(http://www.nsr.go.jp/nra/kettei/data/20130628_jitsuyoutatsumaki.pdf).
- ・ 加藤輝之, 2008a: 竜巻発生環境に関する研究 (I) - 竜巻をもたらす発生環境に関する統計的研究 -, 平成19年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進, 6-12.
- ・ 加藤輝之, 2008b: 竜巻発生環境に関する研究 (III) - スーパーセルを伴う竜巻の発生機構の研究 -, 平成19年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進, 39-44.
- ・ 杉本聡一郎, 野原大輔, 平口博丸, 2014a: 国内既往最大規模の竜巻を対象とした発生頻度の地域性について. 2014年度保全学会年次学術講演会, 395-402.
- ・ 杉本聡一郎, 野原大輔, 平口博丸, 2014b: 突風関連指数を用いた大きな竜巻の発生環境場の地域性に関する検討. 2014年度日本気象学会春季大会講演予稿集, B464.
- ・ 瀧下洋一, 2011: 竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報について - 突風に関する防災気象情報の改善 -. 測候時報, 78, 57-93.
- ・ 新野 宏, 2007: 竜巻. 天気, 54, 933-936.
- ・ 橋本篤, 平口博丸, 豊田康嗣, 中屋耕, 2011: 温暖化に伴う日本の気候変化予測 (その1) - 気象予測・解析システムNuWFASの長期気候予測への適用性評価 -. 電力中央研究所報告 N10044, 22pp.
- ・ 橋本篤, 平口博丸, 田村英寿, 服部康男, 松梨史郎, 2013: 領域気候モデルを用いた過去53年間の気象・気候再現. 電力中央研究所報告, N13004, 18 pp.

付録 A 温位について

気体の状態方程式によれば、同じ気圧下で密度が小さいほど気体の温度は高くなる。したがって、ある空気塊が周囲よりも高温であれば、その空気塊は浮力を得て上昇する。この時、下層での空気塊の気温が高いからといって、ある高い高度に断熱的に持ち上げた空気塊は、その高度の周囲の気温より高いとは限らない。同じ高度（気圧）で気温の高低を比較してはじめて、空気塊が浮力を受けるかどうかがわかる。温位を用いれば、本文の式(3)のように、1,000hPa という基準気圧（高度）での気温を算出するため、二つの空気塊の相対的な暖かさや浮力の発生有無を容易に判断できる。

1万メートル程度上空における飛行機の客室内の気温を例にとると、客室内は与圧されて800hPa程度の気圧となっており、温位は310K程度とする。それに対し、飛行高度での気圧（100～200hPa）での気温が約-70℃とすると温位は360K程度である。外気をそのまま取り込むと、温位は保存されるため、客室内での温位360Kに対する気温は約60℃となる。このため、外気を取り込んだ際に空気を冷やす必要がある（吉崎・加藤 2007）。上空ほど気温は低いため、パラドックス的に感じるが、このように温位を用いれば空気塊の暖かさについて容易に把握・比較することが可能である。温位が高いほど暖かく、上昇しやすいということから、大気の不安定性を論じるのに温位や相当温位が使われるのはそういう理由である。

参考文献

- ・吉崎正憲，加藤輝之，2007：豪雨・豪雪の気象学。朝倉書店，187 pp.

付録 B SReH 及び CAPE と竜巻強度との関係に関する過去文献のレビュー

B-1 これまでの知見整理

Davies (1993)は、最も近い観測点で得られたラジオゾンデデータから SReH をはじめとした鉛直シア関係の指数に関する調査を行い、例えば 0-3km SReH については、平均値として F2・F3 竜巻の場合 $369\text{m}^2/\text{s}^2$ (21 事例)、F4・F5 竜巻の場合 $539\text{m}^2/\text{s}^2$ (10 事例) と報告した。ただし、スーパーセル竜巻のポテンシャルの見積もりには、大気不安定性と風のシアもしくは SReH の組み合わせを調べるべきであると指摘している。Johns et al. (1993)は、F2 規模以上の竜巻に対して 0-2km SReH と CAPE との間に図 B-1 の関係性を報告した。

殆どの F2 規模以上の竜巻が $\text{EHI} (= \text{CAPE} \times \text{SReH} / 160,000)$ 2 程度を超える場合に発生していることがみてとれる。また、F4・F5 規模の竜巻 (図中の Violent ○) の場合、より大きな EHI で発生している傾向にある。関連した成果は、 $\text{EHI} > 2$ でスーパーセルが発達する可能性が非常に高く、 $\text{EHI} > 4$ で非常に大きな竜巻が発生する可能性が高いとする文献にも見られる (Davies 1993)。

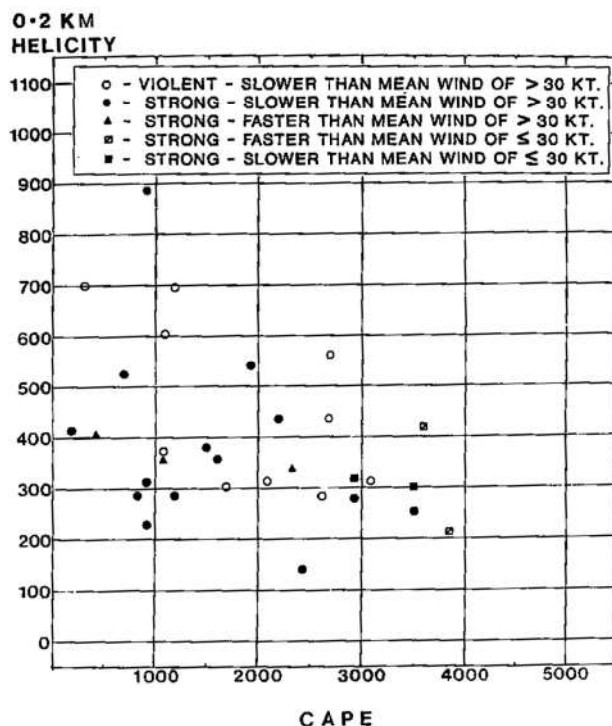


図 B-1 CAPE と 0-2km SReH の関係
(プロットは F2 規模以上。○は F4・F5 規模)

Rasmussen and Blanchard (1998)は、1992 年に米国で実施されたラジオゾンデデータ (0 時 UTC (世界標準時) の約 3000 のデータ) を分析し、竜巻発生地点から 400km 以内の観測地点のデータから竜巻発生時の突風関連指数の

気候学的特性について調べた。F2 規模以上の竜巻とそれ以外の差（中央値の差）は、SReH, CAPE 単独で用いる場合よりも両方を複合させた EHI の方が区別できていることが見てとれる（図 B-2）。ただし、F2 規模以上の竜巻が発生した範囲のうち値の小さな EHI で F1 規模以下の竜巻が発生しているケースもある。

全ての竜巻・非竜巻を対象とすると、EHI のヒストグラムの結果では、竜巻発生指標としての EHI の有効性が低いと考えられるという報告もある（櫻井・川村 2008）。上記で取りあげた各文献を踏まえれば、突風関連指数の適用性は F0・F1 規模以上か非竜巻かという小さな竜巻の発生有無の区別には向かず、F2 規模以上か否かの区別では適用性が高まり、むしろ F3・F4 規模以上か否かといった大きな竜巻の発生有無を議論するのに適しているといえる。なお、Rasmussen and Blanchard (1988) では、F3 規模以上の高強度の竜巻とそれ以外を区別することについては検討していない。

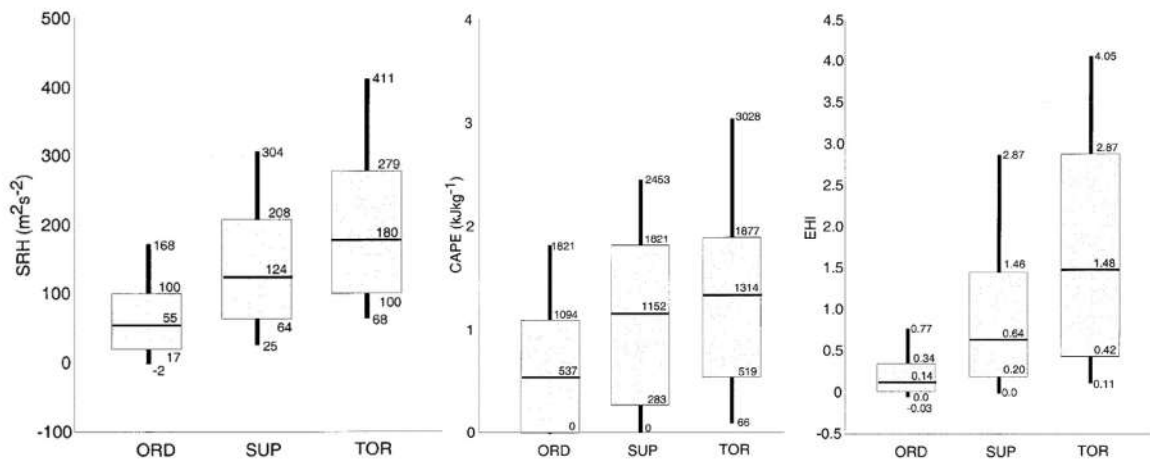


図 B-2 各突風指数(左：SReH, 中：CAPE, 右：EHI)に対する箱ひげ図(箱は値の小さい方から 25%から 75%の範囲を表し、箱中の太線は中央値を示す。TOR は F2 規模以上の竜巻, SUP は F1 規模以下の竜巻, ORD は非スーパーセル雷雨を表す。)

Rasmussen (2003) は、SReH を求める際の地上からの層厚について検討し、これまでガイドライン的に使われてきた 0-3km SReH (Davies-Jones et al. 1990) の殆どは、地上から 1km までの大気 (0-1km SReH) に起因するため、SReH 算出の層厚を 0-1km とすることを提案している。その他、SReH を求める際のストームの移動ベクトル算出方法についてもいくつか方法がある。指数の算出手法に関連して、CAPE についてはより複雑である。特に、数値モデルによる解析値・予測値を算出する場合、対流不安定が解消されることにより CAPE 値が小さく見積もられる場合がある (瀧下 2011)。そのため、Rasmussen and Blanchard (1998) では、その影響を軽減する算出方法を用いている。また、CAPE を算出する際の持ち上げ空気塊の性質によりさまざまな種類の CAPE がある。例えば、地上数キ

ロまでの大気の平均的な性質を持たせることもあれば (MLCAPE と呼ばれる), 最大の不安定度になる高さの空気塊を持ち上げることもできる (MUCAPE)。MLCAPE がよく用いられることが多いが, 一般的に MUCAPE の方が値は高く (Chuda and Niino 2008), 米国の SPC (Storm Prediction Center) のような実運用の場で MUCAPE が SCP ($= \text{MUCAPE}/1,000 \times 0\text{-}3\text{km SReH}/100 \times \text{BulkRichardson Number}/40$) の算出に用いられる場合がある (※今回の検討でも MUCAPE を用いている)。特に, 下層に寒気があり, その上に暖気がある安定した条件下のケース (佐呂間竜巻の佐呂間町付近では地形影響でその傾向が増大していると考えられる) では MLCAPE にもとづく不安定度は非常に小さくなる。このように, SReH や CAPE の算出方法についても議論すべき余地がある。

ゾンデデータを用いる解析は, 竜巻発生地点との距離差が大きいことが課題である。そこで, 数値気象モデルによる解析・予測による格子点データを用いた分析もなされている。米国の水平解像度 40km 予報データ (1 時間毎) を用いた分析では (Thompson et al. 2003), SReH, CAPE, EHI の全体的な傾向として Rasmussen and Blanchard (1988) と同様の結果が得られているが, F2 規模以上の竜巻に対する EHI の中央値が 2 程度と大きくなる等, Davies (1993) に近い結果となっている。SCP では F2 規模以上とそれ以外の差が顕著であり (図 B-3), CAPE や SReH に関連した複合関連指数として EHI 以外の指数の検討の余地がある

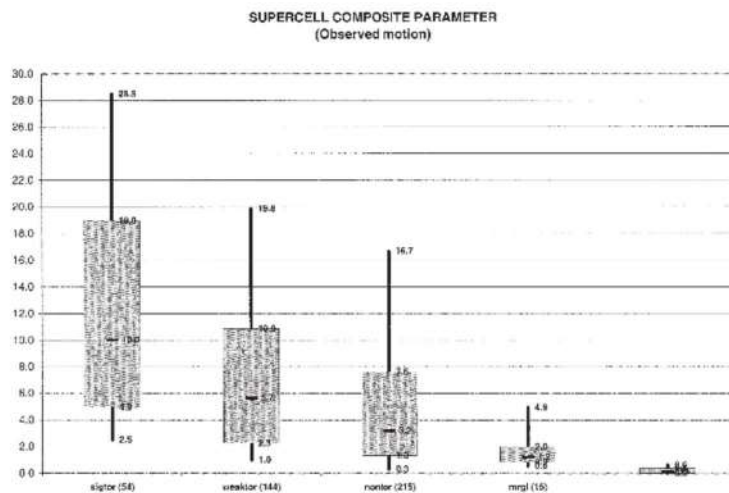


図 B-3 SCP に対する箱ひげ図 (sigtor は F2 規模以上, weaktor は F1 規模以下, nontor は非竜巻, mrgl はややスーパーセル化したストーム, nonsuper は非スーパーセルストームを表し, 括弧内の数字は事例数を表す。箱ひげ図の意味は図 B-2 と同じ。)

飯塚・加治屋 (2011) は, 気象庁のメソ客観解析データ (水平解像度 10km・鉛直総数 16 層・3 時間毎) のデータを用いて, 2006 年 2 月から 3 ヶ年の間に発生

した 141 個の竜巻・非発生事例を分析した。その際、発生地点から 40km 範囲内に存在する格子点に対する突風関連指数の最大値をピックアップしている。他文献と同様に CAPE や SReH 単独では竜巻・非竜巻の区別、あるいはスーパーセル竜巻・非スーパーセルの区別が明瞭でないが、EHI のような複合パラメータではより明瞭になっている (図 B-4)。図 B-4 では F スケール別の傾向も示されているが、F1 規模と F2・F3 規模 (F3 は佐呂間竜巻のみ) との間に差はなく、米国の結果とはやや異なる。現象論の観点では、大きな竜巻はスーパーセル化が明瞭となり、大きな空間スケールの現象が駆動力 (large-scale forcing) となって発生するため、数 km から十数 km 程度の空間代表性を有する格子点データやラジオゾンデデータをもととした突風関連指数で十分に議論ができる一方、小さな竜巻は大きな竜巻を伴わない場合は large-scale forcing の影響が小さい、局地的な擾乱に伴う頻度が多くなるため、突風関連指数との関連性が薄れていると解釈できる。

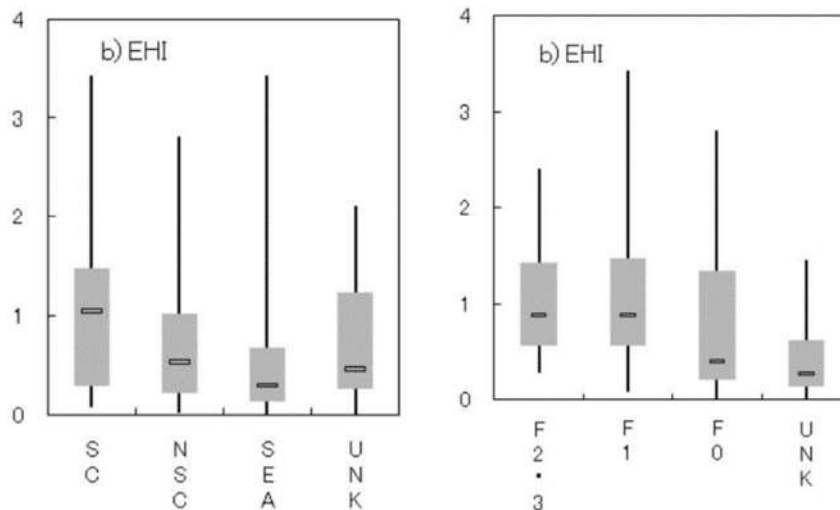


図 B-4 EHI に対する箱ひげ図 (左: 竜巻種別, 右: F スケール別; SC はスーパーセル型竜巻, NSC はノンスーパーセル型竜巻, SEA は海上竜巻, UNK は陸上竜巻でスーパーセル判定ができなかった竜巻を表す。)

瀧下 (2011) は、気象庁の数値予報資料 (MSM) (気象庁メソ客観解析データと空間分解能等は同じ仕様だが解析データではなく、予報データである) を用いて、2004 年から 3 ヶ年に発生した竜巻やダウンバースト発生時の SReH, CAPE, EHI の関係を調べた (図 B-5)。発生地点を中心とした 50km 四方内の最大の値を採用している。この図から、最も大きく、唯一の F3 竜巻である佐呂間竜巻の環境場において (ML) CAPE が非常に小さく (それゆえ、EHI も非常に小さく)、また、F1 竜巻と F2・F3 竜巻で特段の違いが見られないことから、指数で竜巻強度を判断するのは困難であると結論づけている。

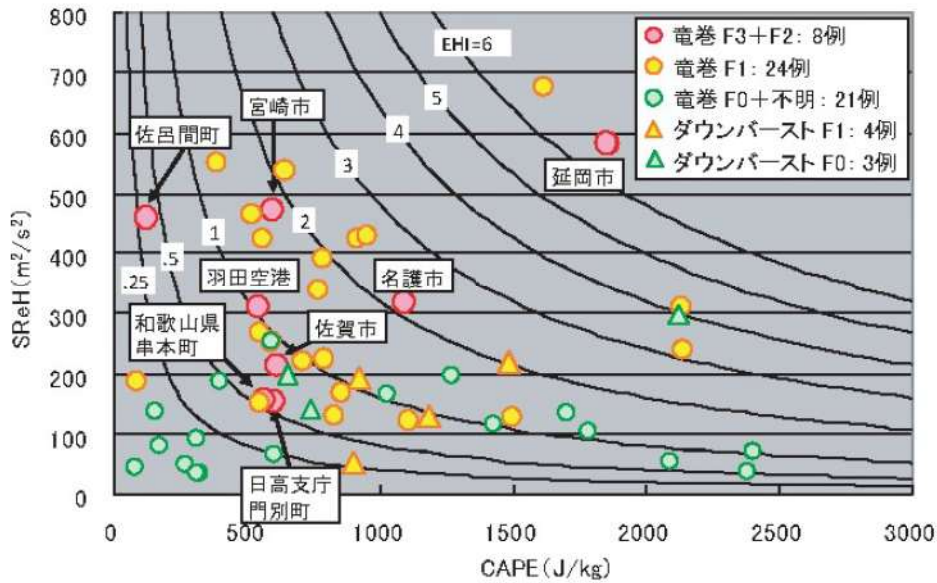


図 B-5 竜巻及びダウンバースト事例における分析例

F1 竜巻と F2・F3 竜巻の区別については、これまで挙げた文献同様、やはり困難なようである。しかし、佐呂間竜巻において CAPE 値が非常に小さい点についてはその解釈に注意しなければならない。同種のデータを用いた飯塚・加治屋 (2011) は、850hPa 以下の総数は 7 層しかなく、ゾンデ観測データよりも鉛直分解能が粗いため、結果の解釈には注意を要することを指摘している。つまり、CAPE 算出において、適切な空気塊を持ち上げていない可能性は否定できない。また、加藤 (2008a) が指摘するように、佐呂間竜巻発生時には、佐呂間町の南東側にある山を暖気流が乗り越え、佐呂間町付近では下層では冷たい西よりの気流と、その直上に東よりの暖気流が流れ込み、鉛直シアが増大していたと考えられる。このような場合、地表面付近がやや安定傾向となるため上述のように、MLCAPE の値は非常に小さくなる。MUCAPE の場合は地表面付近の大気が冷たい場合に、その上空で発生しうる elevated convection を考慮できるが、佐呂間竜巻に対して結果的に CAPE 値が大きくなる (本文参照)。つまり、算出方法に検討の余地が大きいため、佐呂間竜巻といった 1 つの F3 竜巻事例をもって、SReH, CAPE 系の突風関連指数の限界を断じることが難しい。

B-2 今後の研究の方向性

以上のように、検討時点でのデータの品質等々が低かった等、各文献ともに検討の余地があり、今後は各文献の知見を全て踏まえた解析方法・データをもって分析・考察することが重要である。大局的には、スーパーセル化が顕著な (F3 規模程度以上の) 大きな竜巻とそれ以外の竜巻の発生環境場は、EHI 値の差が有意である傾向が見られることから、SReH 値と CAPE 値とから地域レベルでの傾向を

議論できる可能性がある。また、こうした突風関連指数の活用は、F2 規模以上とそれ以外の比較が限度であり、F1 規模以上とそれ以外というように、小さな竜巻の発生予測への指数の活用は向かないと考えられる。

欧米や国内の気象学会では、突風関連指数の有効性について現在も検討がなされている。もととするデータ品質の観点では、これまで離れた箇所の高層ゾンデデータや空間解像度の粗い解析・予測データをもとに分析されてきた点が課題であり、高精度な解析データをもって、これまでの文献・知見が正しいかどうか確認する必要がある。その際、過去文献において指数値の算出に工夫されている点を可能な限り採用するとともに、SReH, CAPE をはじめとした単一指数もしくはそれらの組み合わせ (加藤 2008b) に加え, EHI, SCP, STP 等の複合パラメータの説明性の高さについて広範に適用性を検討することが求められる。

現時点では、時空間解像度の高い長期気象解析データ (水平解像度 5km・10 分毎データ) をもとに、CAPE に対する算出方法を工夫した上で、SReH, CAPE の特性、加藤(2008b)と同様に SReH と CAPE を組み合わせて用いた方法、及び EHI について検討し、SReH と CAPE を用いる方法と EHI を用いる手法とでは、F3 規模以上の竜巻が発生する地域性を観点とした解析結果に大差がないことを確認した (本文参照)。

参考文献

- ・ Chuda, T., and H. Niino, 2005: Climatology of environmental parameters for mesoscale convections in Japan. J. Meteor. Soc. Japan, 83, 391-408.
- ・ Davies, J. M., 1993: Hourly helicity, instability, and EHI in forecasting supercell tornadoes. 17th Conf. on Severe Local Storms, St. Louis, MO., Amer. Meteor. Soc., 107-111.
- ・ Davies, J. M., and R. H. Johns, 1993: Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes. 1. Wind shear and instability. The Tornado: Its structure dynamics, prediction, and hazards. C. Church, D. Burgess, C. Doswell and R. Davies-Jones, Eds., American Geophysical Union, 573-582.
- ・ Johns, R. H., J. M. Davies, and P. W. Leftwich, 1993: Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes. 2. Variations in the combination of wind and instability parameters. The Tornado: Its structure dynamics, prediction, and hazards. C. Church, D. Burgess, C. Doswell and R. Davies-Jones, Eds., American Geophysical Union, 573-582.
- ・ Rasmussen, E. N., and D. O. Blanchard, 1998: A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. Wea.

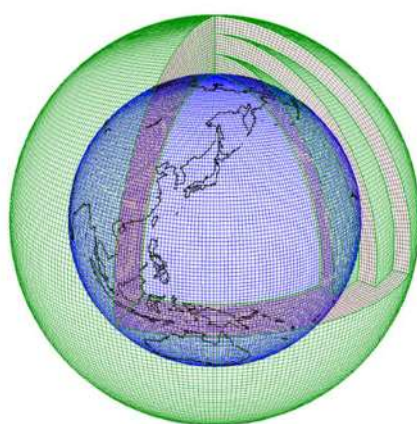
Forecasting, 13, 1148-1164.

- Rasmussen, E. N.: 2003: Refined supercell and tornado forecast parameters. Wea. Forecasting, 18, 530-535.
- Thompson, R. L., R. Edwards, J. A. Hart, K. L. Elmore, and P. Markowski, 2003: Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle. Wea. Forecasting, 18, 1243-1261.
- 飯塚義浩, 加治屋秋実, 2011: 数値予報資料から求めた竜巻に関連する大気環境指数の統計的検証. 天気, 58, 19-30.
- 加藤輝之, 2008a: 竜巻発生環境場に関する研究(Ⅲ)ースーパーセルを伴う竜巻の発生機構の研究ー, 平成19年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進, 39-44.
- 加藤輝之, 2008b: 竜巻発生環境場に関する研究(Ⅰ)ー竜巻をもたらす発生環境に関する統計的研究ー, 平成19年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進, 6-12.
- 瀧下洋一, 2011: 竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報についてー突風に関する防災気象情報の改善ー. 測候時報, 78, 57-93.

付録C 気象モデルの概要

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

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



図C-1 計算グリッド構造の例

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

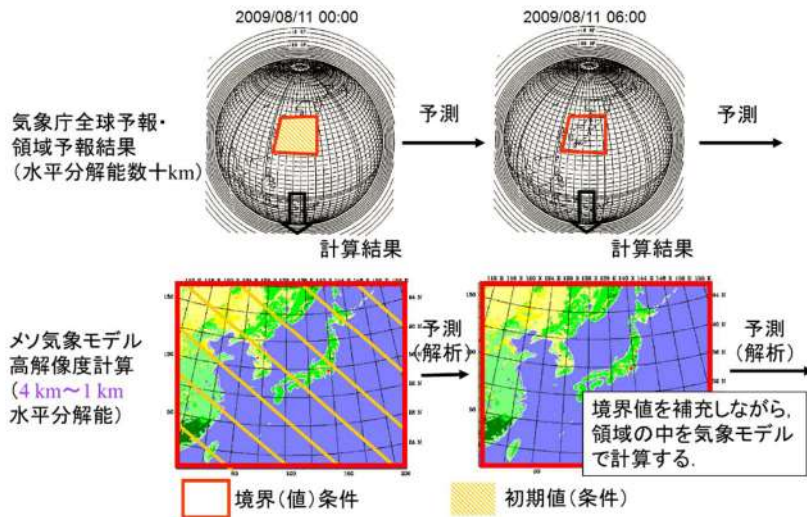


図 C-2 気象モデルを用いた解析・予測計算の流れの概念図
(気象庁全球モデルを例に)

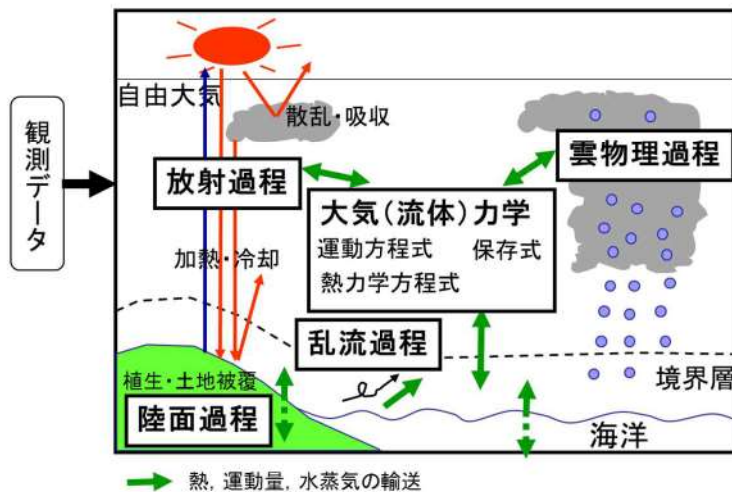


図 C-3 気象モデルを用いた計算の模式図

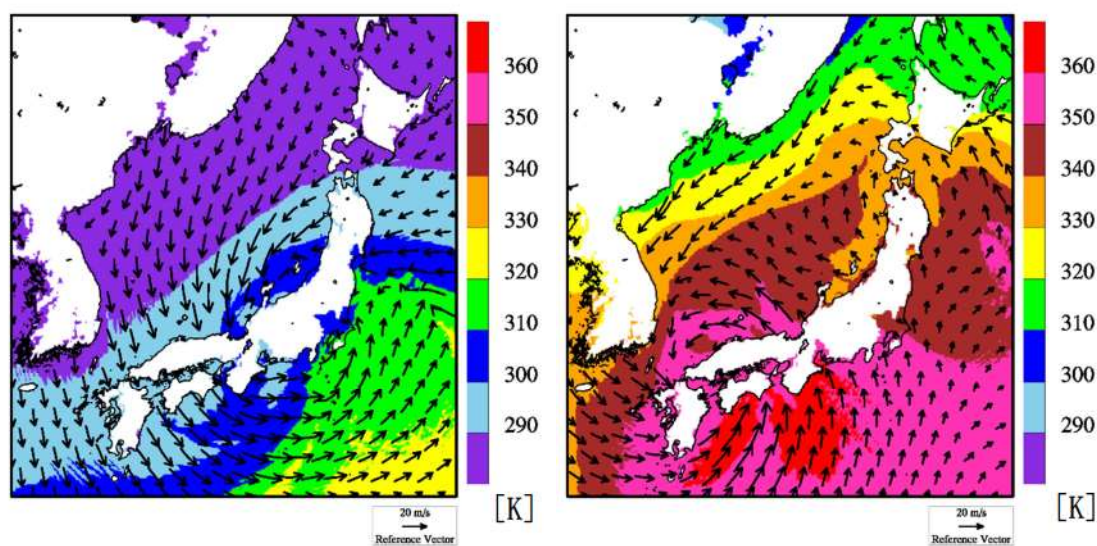
参考文献

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

付録D 高標高山岳が及ぼす影響

1990年12月11日に千葉県茂原市で発生した日本最大級F3竜巻時（総観場：暖気の移流、気圧の谷、寒冷前線）の海拔100m高度における気象場（風向・風速及び相当温位の分布）を図D-1左図に示す。太平洋上は（相当温位の高い）暖かく湿潤な大気状態にあり、12月の冬季としては暖かく湿った大気（緑色）が太平洋側から千葉県南東部房総半島沿岸に発生した地点に流れ込んでいることが解析されている。この大気は内陸部に中心をもつ低気圧の大きな渦に沿って日本海側へ運ばれているが、日本海側では、相当温位が低くなり、不安定性が解消されていることがわかる。

このような高い山岳の南側と北側で空気塊の性質が変わることはいずれのF3規模の竜巻でも見られている（例えば、図D-1右図）。太平洋側から流入した大気下層の空気塊が山岳を越えようとした場合、空気塊の上昇に伴い気温が低下し、昇り斜面上空で空気塊が飽和して降水粒子が生成され、湿潤不安定な状態が解消されることもある。この場合、空気塊が山岳を乗り越えたとしても乾燥・安定化の進んだ空気塊になるため、太平洋沿岸部で竜巻を引き起こした大気が、例えば日本列島の中央部に存在する高く複雑な山岳域を湿潤不安定な状態のまま乗り越えて日本海側に流入して大きな竜巻を引き起こすことは考えられない。つまり、台風等の接近・通過時の渦度が高い時間帯に同時に太平洋側から暖かく湿った空気塊が特に開けた平野部（関東平野、濃尾平野、宮崎平野等）に流入するというF3規模竜巻の発生シナリオが日本海側ではあてはまり難いことを示唆している。



図D-1 海拔100m高度における風向・風速及び相当温位
(左：1990/12/11 F3事例，右：1999/09/24 F3事例)

付録 E 閾値の感度

突風関連指数に不確実性が存在するのは確かである。そこで、今回設定した閾値に対してばらつき分を考慮し、ばらつき分が超過頻度分布にどのような影響を及ぼすかについて確認した。

(a) EHI

今回用いた閾値 3.3 に対し、3.0 及び 3.6（もともとの値の±1 割程度）の閾値にした場合の超過頻度分布を図 E-1 に示す。閾値を 3.6 にした場合、関東平野内での F3 竜巻の発生箇所を含包できておらず（図 E-2 参照）、値として大きすぎることがわかる。一方、閾値を 3.0 にすると、対馬海上からの暖気流入に対応して島根県沖に高い値（超過頻度分布の 0.01% 前後以上）が見られるようになる。いずれの閾値においても、日本海側沿岸域・北日本と太平洋側沿岸域との差は維持されている。

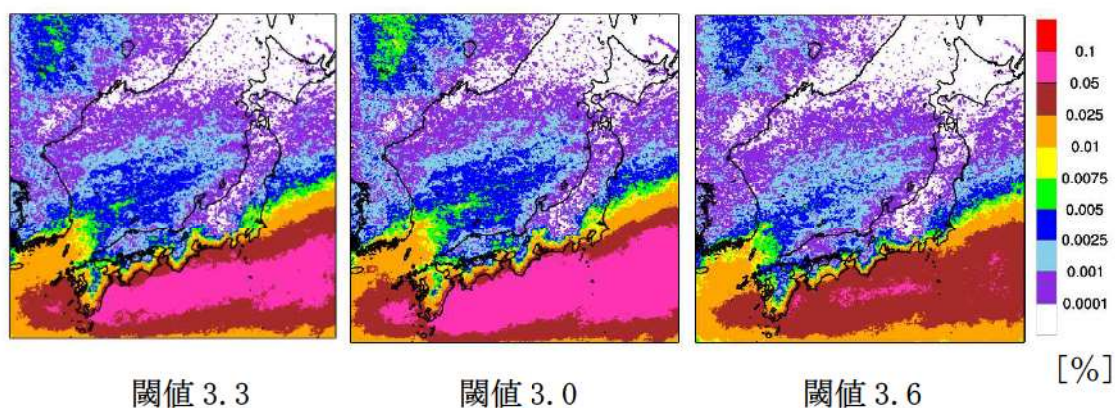


図 E-1 同時超過頻度分布（EHI の閾値は左から、3.3, 3.0, 3.6）

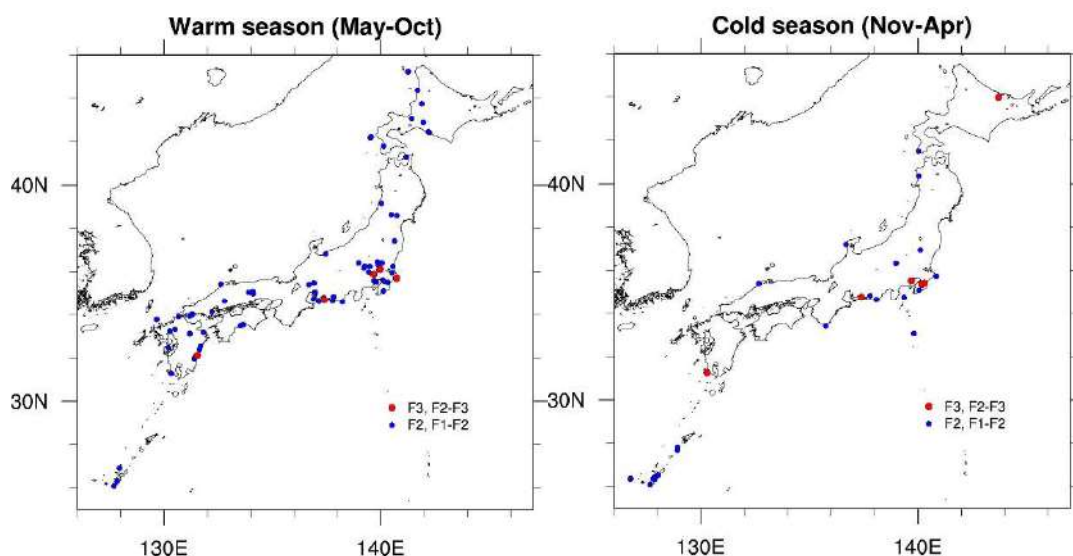


図 E-2 F3 竜巻（F2-F3 を含む）及び F2 竜巻（F1-F2 を含む）の発生箇所
（左：暖候期，右：寒候期）

(b) SReH と CAPE (暖候期)

今回用いた閾値は、SReH が $250 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、CAPE が $1,600 \text{ J/kg}$ である。そこで、SReH を $200 \sim 300 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ($50 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 刻み)、CAPE を $1,550 \sim 1,650 \text{ J/kg}$ (50 J/kg 刻み) で変化させ、各組み合わせで検討した。図 E-3 は 5 ケース分プロットしたものである。閾値を小さくするほど、頻度は全体的に大きくなる。

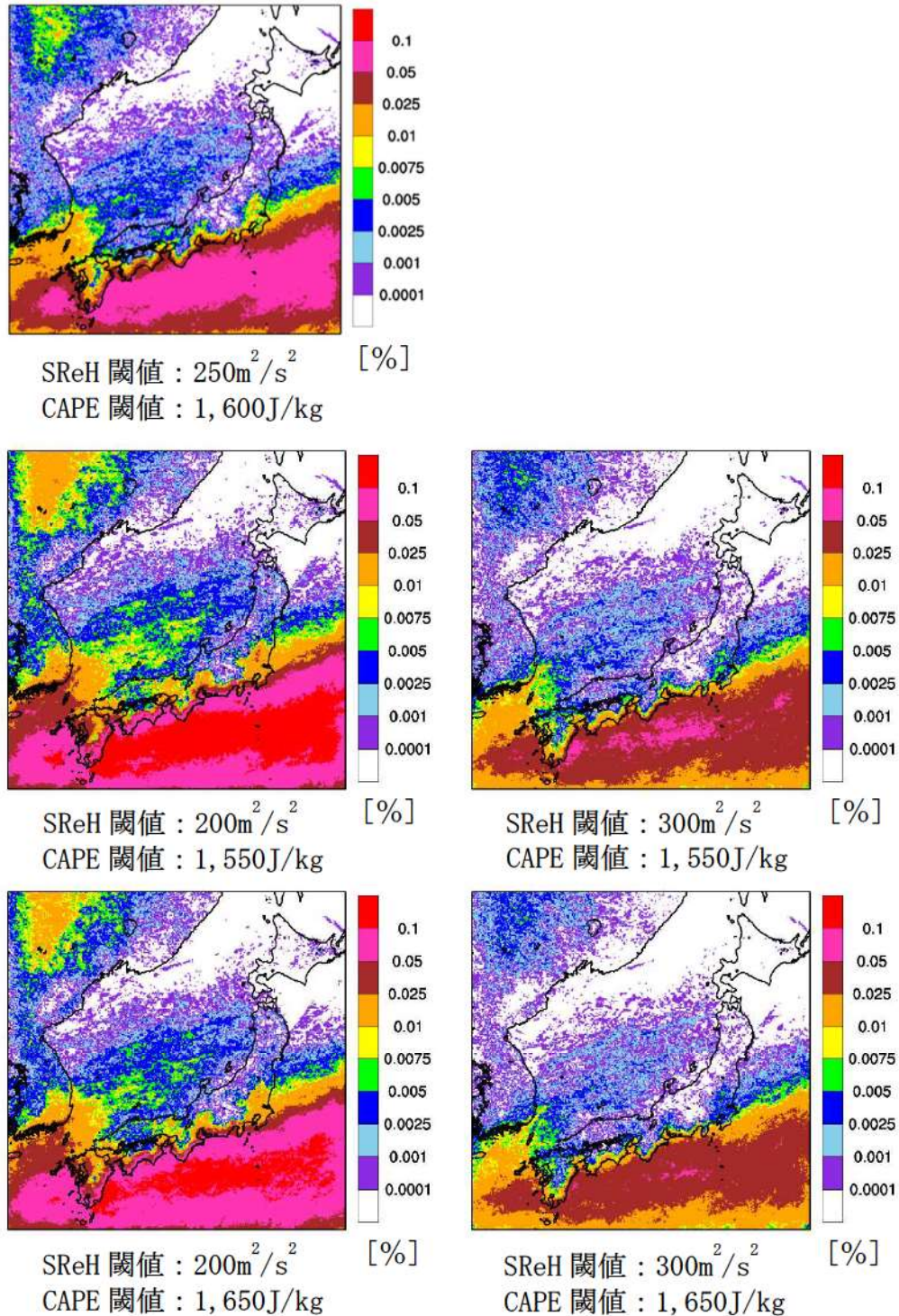


図 E-3 同時超過頻度分布 (暖候期)

今回設定した閾値（SReHの閾値： $250\text{m}^2/\text{s}^2$ ，CAPEの閾値： $1,600\text{J}/\text{kg}$ ）に対する頻度分布の0.01%前後よりも大きな地域が，発生箇所を含包していることがわかる。特に，いずれかの閾値を大きくすると，EHIの場合と同様に，関東平野内のF3竜巻の発生箇所を含包できない傾向にある。特にSReHの感度が高い。SReHとCAPEの両方の閾値を小さくした場合（SReH： $200\text{m}^2/\text{s}^2$ ，CAPEの閾値： $1,550\text{J}/\text{kg}$ ）においては，全体的な頻度は高まり，内陸部深くまで頻度が高まっており，閾値を小さくしすぎていることがわかるが，それでも日本海側沿岸・北日本と茨城県以西太平洋側との差異は維持されている。

図E-4は寒候期に対する図であるが，今回設定した閾値（SReHの閾値： $250\text{m}^2/\text{s}^2$ ，CAPEの閾値： $600\text{J}/\text{kg}$ ）に対しては，0.025%前後より大きな値をとる地域がF3竜巻の発生箇所を含包している。暖候期ほど閾値に敏感ではないが，暖候期に対する感度分析の傾向が寒候期に対しても見られる。

以上より，閾値に幅を持たせた分析結果では，閾値を小さくするほど，小さな竜巻が発生する環境場をカウントするため，超過頻度が大きくなる。暖候期は寒候期に比べて閾値にやや敏感であるが，茨城県以西の太平洋側沿岸域と，日本海側及び北日本の沿岸域との差は維持されることを確認できた。これは，EHIを用いる場合でも，CAPEとSReHを用いる場合においても同様である。

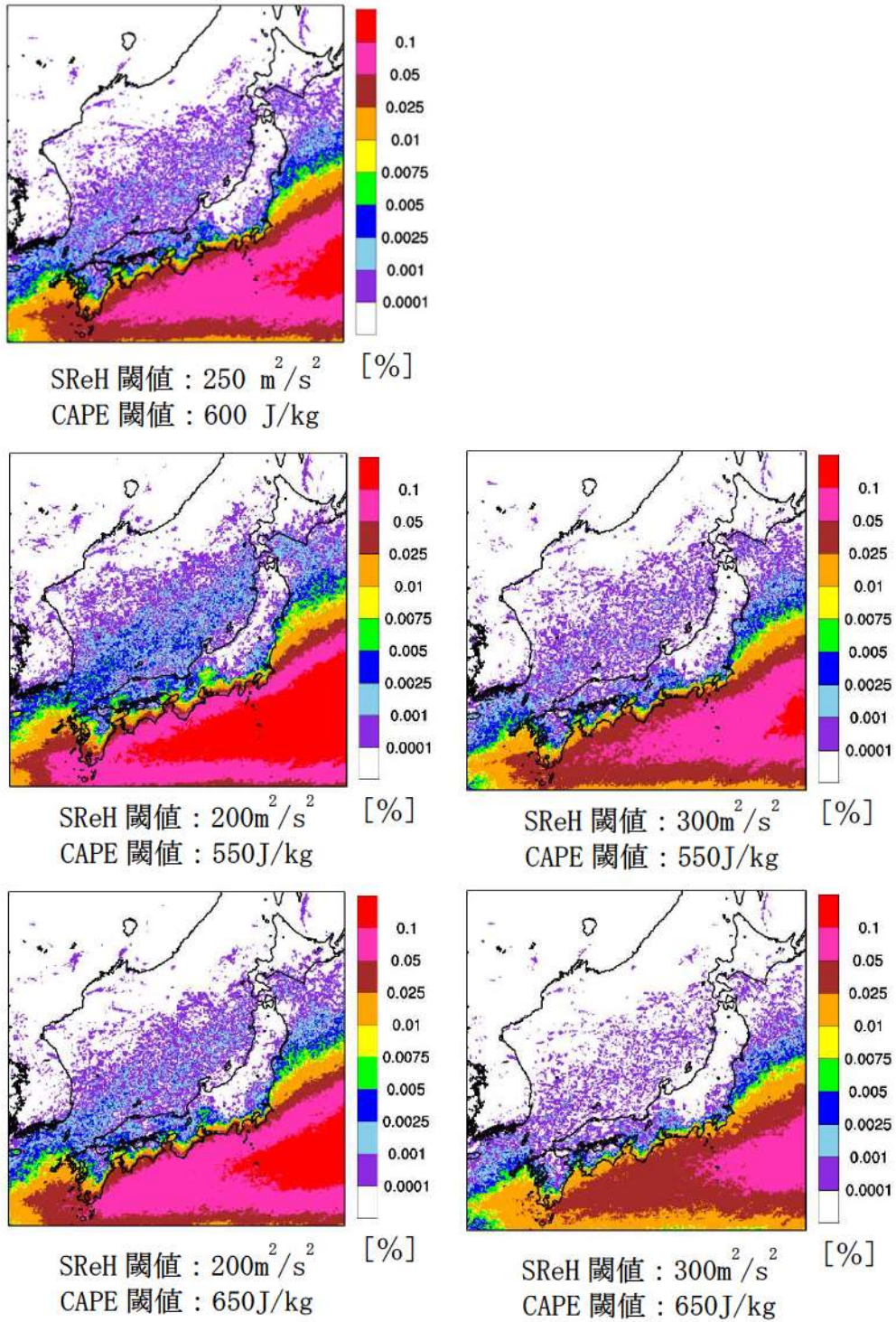


図 E-4 同時超過頻度分布 (寒候期)

竜巻検討地域及び全国で発生した竜巻

1. 竜巻検討地域において発生した竜巻

気象庁の竜巻等の突風データベースより、1961年～2012年6月の51.5年間を対象とした、竜巻検討地域で過去に発生した竜巻の一覧を下表に示す。

	発生日	発生場所	Fスケール※	総観場1	総観場2	総観場3
1	1962/9/28	北海道東利尻町	(F2)	寒冷前線	—	—
2	1965/9/30	秋田県秋田市	F1	日本海低気圧	温暖前線	—
3	1965/9/30	秋田県西目村	F0～F1	日本海低気圧	温暖前線	—
4	1968/1/8	新潟県中頸城郡大潟町	F1	季節風	—	—
5	1969/6/22	山口県阿武郡須佐町	F1	寒冷前線	—	—
6	1969/11/18	山形県酒田市	F1	気圧の谷	—	—
7	1971/2/1	石川県河北郡内灘町	F1	日本海低気圧	寒冷前線	—
8	1971/10/17	北海道羽幌町	(F2)	寒気の移流	—	—
9	1971/10/17	北海道羽幌町	F0～F1	寒気の移流	—	—
10	1972/11/21	富山県黒部市	F1	寒冷前線	寒気の移流	季節風
11	1973/5/21	石川県羽咋郡押水町	F0～F1	寒冷前線	日本海低気圧	—
12	1973/9/27	北海道礼文町	F1	閉塞前線	—	—
13	1973/10/22	秋田県秋田市	F1	日本海低気圧	寒冷前線	—
14	1974/8/8	秋田県山本郡峰浜村	F0～F1	寒冷前線	—	—
15	1974/10/3	北海道奥尻郡奥尻町	(F1～F2)	温暖前線	—	—
16	1974/10/20	北海道檜山郡上ノ国町	(F1～F2)	寒冷前線	—	—
17	1975/5/31	島根県簸川郡大社町	(F2)	日本海低気圧	局地性じょう乱	寒気の移流
18	1975/5/31	島根県簸川郡大社町	F0～F1	日本海低気圧	局地性じょう乱	寒気の移流
19	1975/5/31	島根県簸川郡大社町	F0～F1	日本海低気圧	局地性じょう乱	寒気の移流
20	1975/9/8	北海道奥尻郡奥尻町	(F1～F2)	日本海低気圧	暖気の移流	—
21	1977/1/13	石川県金沢市	F0～F1	日本海低気圧	寒気の移流	—
22	1978/8/14	北海道豊富町	不明	日本海低気圧	—	—
23	1979/10/31	石川県羽咋郡富来町	F0～F1	寒気の移流	日本海低気圧	—

	発生日	発生場所	Fスケール*	総観場 1	総観場 2	総観場 3
	※ Fスケールは、ア) 被害の詳細な情報等から推定できたもの、イ) 文献等からの引用又は被害のおおまかな情報等から推定したものが、F2以上の事例ではア)とイ)を区別し、イ)の場合には値を括弧で囲んでいる。以降、本表においては記載を省略する。					
24	1979/11/2	北海道松前郡松前町	(F2)	日本海低気圧	温暖前線	—
25	1980/10/31	北海道門別町	(F1~F2)	閉塞前線	—	—
26	1984/11/19	鳥取県米子市	F1	寒冷前線	—	—
27	1987/1/11	秋田県南秋田郡若美町	F0~F1	その他(低気圧)	—	—
28	1987/1/11	秋田県八竜町	F1	その他(低気圧)	—	—
29	1989/3/16	島根県簸川郡大社町	(F2)	局地性じょう乱	寒気の移流	—
30	1990/4/6	石川県羽咋郡富来町	F2	オホーツク海低気圧	気圧の谷	—
31	1991/1/13	新潟県(海上)	不明	日本海低気圧	—	—
32	1991/2/15	福井県(湖上)	F1	二つ玉低気圧	—	—
33	1991/9/17	北海道後志支庁(海上)	不明	寒気の移流	気圧の谷	局地性じょう乱
34	1991/12/11	石川県金沢市	F1	寒冷前線	—	—
35	1992/9/13	北海道宗谷支庁(海上)	不明	移動性高気圧	—	—
36	1992/9/17	北海道増毛町	F1	寒気の移流	—	—
37	1992/9/17	北海道留萌支庁(海上)	不明	寒気の移流	—	—
38	1993/9/26	北海道留萌市	不明	寒気の移流	—	—
39	1993/10/17	新潟県(海上)	不明	不安定線	—	—
40	1993/10/17	石川県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
41	1993/10/17	新潟県(海上)	不明	不安定線	—	—
42	1993/10/23	新潟県(海上)	不明	寒冷前線	—	—
43	1993/11/24	新潟県(海上)	不明	季節風	—	—
44	1994/3/26	山形県酒田市	F1	寒気の移流	気圧の谷	—
45	1994/9/1	新潟県(海上)	不明	寒冷前線	気圧の谷	雷雨(熱雷を除く)
46	1994/10/5	北海道門別町	F1	寒冷前線	—	—
47	1994/10/5	北海道門別町	F1~F2	寒冷前線	—	—
48	1995/12/1	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
49	1996/9/5	秋田県由利郡金浦町	不明	日本海低気圧	寒冷前線	—
50	1996/10/8	北海道遠別町	F1	気圧の谷	寒気の移流	—
51	1996/11/30	新潟県柏崎市	F1	寒気の移流	—	—
52	1997/1/22	新潟県新潟市	F0	寒気の移流	—	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
53	1997/10/7	北海道苫小牧市	F1	雷雨(熱雷を除く)	暖気の移流	寒気の移流
54	1998/9/24	京都久美浜町	不明	停滞前線	暖気の移流	—
55	1998/10/31	石川県(海上)	不明	日本海低気圧	—	—
56	1998/11/15	山形県酒田市	F1	寒冷前線	—	—
57	1999/10/8	石川県(海上)	不明	寒冷前線	—	—
58	1999/10/29	秋田県能代市	F0~F1	寒冷前線	—	—
59	1999/11/25	秋田県八森町	(F1~F2)	日本海低気圧	寒冷前線	—
60	2000/7/25	福井県福井市	不明	停滞前線	—	—
61	2000/7/25	福井県坂井郡三国町	不明	停滞前線	—	—
62	2001/6/1	青森県西津軽郡岩崎村	F1	局地性じょう乱	—	—
63	2001/6/19	福井県敦賀市	F1	日本海低気圧	—	—
64	2002/9/23	富山県下新川郡朝日町	F0~F1	寒気の移流	局地性じょう乱	—
65	2002/9/24	秋田県由利本荘市	F1	寒気の移流	—	—
66	2002/11/4	石川県加賀市	F0	寒気の移流	—	—
67	2002/11/5	福井県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
68	2003/9/29	北海道日高支庁(海上)	不明	気圧の谷	—	—
69	2003/10/18	福井県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
70	2004/8/15	北海道礼文郡礼文町	F0 未満	気圧の谷	—	—
71	2004/10/22	北海道門別町	F2	寒冷前線	暖気の移流	—
72	2005/1/12	鳥取県(海上)	不明	季節風	寒気の移流	—
73	2005/10/2	北海道伊達市	F0	寒冷前線	—	—
74	2005/11/18	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
75	2005/12/5	島根県出雲市	F1	寒気の移流	—	—
76	2005/12/25	山形県酒田市	F1	寒冷前線	—	—
77	2006/10/11	北海道新ひだか町	F1	寒冷前線	—	—
78	2006/10/11	北海道新ひだか町	F1	寒冷前線	—	—
79	2006/11/7	北海道日高町	不明	寒冷前線	暖気の移流	—
80	2006/11/7	北海道日高町	F1	寒冷前線	—	—
81	2006/11/9	北海道奥尻郡奥尻町	F1	寒冷前線	暖気の移流	—
82	2007/8/24	山形県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
83	2007/8/24	山形県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
84	2007/10/1	北海道後志支庁(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
85	2007/10/1	北海道後志支庁(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
86	2007/10/1	北海道檜山支庁(海上)	不明	気圧の谷	—	—
87	2007/10/4	北海道胆振支庁(海上)	不明	気圧の谷	暖気の移流	地形効果
88	2007/10/4	北海道留萌支庁(海上)	不明	気圧の谷	暖気の移流	—
89	2007/10/4	北海道檜山支庁(海上)	不明	気圧の谷	—	—
90	2007/10/11	青森県(海上)	不明	気圧の谷	—	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
91	2007/10/11	青森県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
92	2007/10/16	島根県(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
93	2007/10/17	北海道渡島支庁(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
94	2007/11/22	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
95	2007/12/2	山形県酒田市	F0	気圧の谷	—	—
96	2008/6/1	秋田県(海上)	不明	日本海低気圧	—	—
97	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
98	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
99	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
100	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
101	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
102	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
103	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
104	2008/8/14	山形県(海上)	不明	熱帯低気圧 (台風以外)	暖気の移流	—
105	2008/8/15	鳥取県鳥取市	F0 以下	熱帯低気圧 (台風以外)	雷雨(熱雷 を除く)	—
106	2008/9/14	北海道宗谷支庁(海上)	不明	寒気の移流	—	—
107	2008/9/14	北海道宗谷支庁(海上)	不明	寒気の移流	—	—
108	2008/9/21	新潟県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
109	2008/10/1	秋田県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
110	2008/10/1	秋田県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
111	2008/10/10	秋田県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
112	2008/10/10	秋田県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
113	2008/10/10	秋田県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
114	2008/10/11	北海道檜山郡江差町	F0	寒冷前線	—	—
115	2008/10/15	新潟県新潟市	F0	気圧の谷	—	—
116	2008/10/15	山形県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
117	2008/10/15	新潟県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
118	2008/10/26	新潟県新潟市	F0	寒冷前線	—	—
119	2008/10/27	福井県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
120	2008/10/30	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
121	2008/10/30	鳥取県岩美郡岩美町	F0	寒気の移流	—	—
122	2008/10/30	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
123	2008/10/31	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
124	2008/11/2	新潟県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
125	2008/11/7	北海道様似郡様似町	F0~F1	寒冷前線	—	—
126	2008/11/19	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
127	2008/11/19	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
128	2008/11/20	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
129	2008/11/20	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
130	2008/11/20	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
131	2008/11/20	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
132	2008/11/20	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
133	2008/11/20	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
134	2008/11/23	石川県羽咋郡志賀町	F0~F1	気圧の谷	寒気の移流	—
135	2009/1/24	北海道檜山支庁(海上)	不明	寒気の移流	—	—
136	2009/1/24	北海道檜山支庁(海上)	不明	寒気の移流	—	—
137	2009/2/7	秋田県秋田市	F0	寒冷前線	—	—
138	2009/3/14	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
139	2009/8/23	山形県鶴岡市	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
140	2009/8/23	山形県鶴岡市	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
141	2009/9/10	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
142	2009/9/10	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
143	2009/9/13	山形県鶴岡市	F0	日本海低気圧	—	—
144	2009/10/4	秋田県秋田市	不明	気圧の谷	—	—
145	2009/10/27	新潟県糸魚川市	不明	寒気の移流	—	—
146	2009/10/30	青森県西津軽郡深浦町	F0	寒冷前線	寒気の移流	—
147	2009/10/30	秋田県能代市	F1	寒冷前線	—	—
148	2009/11/3	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
149	2009/11/3	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
150	2009/11/3	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
151	2009/11/3	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
152	2009/11/3	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
153	2009/12/18	石川県金沢市	F0	寒気の移流	—	—
154	2009/12/18	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
155	2010/8/25	北海道留萌地方(海上)	不明	気圧の谷	—	—
156	2010/8/25	北海道留萌市	F0 未満	気圧の谷	—	—
157	2010/9/7	秋田県秋田市	F0	停滞前線	—	—
158	2010/9/16	兵庫県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
159	2010/9/17	新潟県(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
160	2010/9/17	新潟県長岡市	F0 以下	気圧の谷	寒気の移流	—
161	2010/10/15	石川県羽咋郡志賀町	F0	気圧の谷	寒気の移流	—
162	2010/10/15	新潟県胎内市	F0	気圧の谷	寒気の移流	—
163	2010/10/15	新潟県胎内市	F1	気圧の谷	寒気の移流	—
164	2010/10/17	秋田県山本郡八峰町	F0	気圧の谷	—	—
165	2010/10/17	秋田県潟上市	F0	気圧の谷	—	—
166	2010/10/26	北海道石狩地方(海上)	不明	寒気の移流	—	—
167	2010/10/26	北海道後志地方(海上)	不明	寒気の移流	—	—
168	2010/10/26	北海道石狩地方(海上)	不明	寒気の移流	—	—
169	2010/10/26	北海道石狩市	F0 未満	寒気の移流	—	—
170	2010/10/26	北海道石狩地方(海上)	不明	寒気の移流	—	—
171	2010/10/26	北海道石狩地方(海上)	不明	寒気の移流	—	—
172	2010/10/26	北海道後志地方(海上)	不明	寒気の移流	—	—
173	2010/10/26	北海道檜山地方(海上)	不明	寒気の移流	—	—
174	2010/11/12	秋田県山本郡八峰町	F0	寒冷前線	—	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
175	2010/11/29	石川県羽咋郡志賀町	F0	寒気の移流	—	—
176	2010/11/29	福井県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
177	2010/11/29	福井県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
178	2010/11/29	福井県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
179	2010/12/3	新潟県新潟市	F0	気圧の谷	寒気の移流	—
180	2010/12/3	新潟県新潟市	F0 未満	気圧の谷	寒気の移流	—
181	2010/12/3	新潟県新潟市	F1	気圧の谷	寒気の移流	—
182	2010/12/9	新潟県上越市	F0～F1	気圧の谷	寒気の移流	—
183	2010/12/15	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
184	2010/12/16	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
185	2010/12/17	北海道後志地方(海上)	不明	気圧の谷	—	—
186	2010/12/18	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
187	2010/12/24	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
188	2010/12/27	石川県羽咋郡志賀町	F0	寒気の移流	—	—
189	2010/12/29	京都(海上)	不明	寒気の移流	—	—
190	2010/12/29	京都(海上)	不明	寒気の移流	—	—
191	2011/1/3	新潟県(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
192	2011/3/9	福井県あわら市	F0 未満	寒気の移流	—	—
193	2011/3/9	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
194	2011/3/31	新潟県(海上)	F0 未満	気圧の谷	寒気の移流	—
195	2011/8/13	青森県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
196	2011/8/20	北海道後志地方(海上)	不明	気圧の谷	—	—
197	2011/8/20	北海道後志地方(海上)	不明	気圧の谷	—	—
198	2011/8/20	北海道後志地方(海上)	不明	気圧の谷	—	—
199	2011/8/22	北海道宗谷地方(海上)	不明	気圧の谷	—	—
200	2011/9/20	北海道宗谷地方(海上)	不明	気圧の谷	—	—
201	2011/11/15	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
202	2011/11/15	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
203	2011/11/15	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
204	2011/11/15	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
205	2011/11/15	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
206	2011/11/24	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
207	2011/11/25	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
208	2011/12/24	石川県(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
209	2012/2/1	島根県出雲市	F0	寒冷前線	—	—

2. 全国の沿岸±5km 範囲で発生した竜巻

気象庁の竜巻等の突風データベースより、1961年～2012年6月の51.5年間を対象とした、全国の沿岸±5km 範囲で過去に発生した竜巻の一覧を下表に示す。

	発生日	発生場所	F スケール*	総観場 1	総観場 2	総観場 3
1	1961/1/24	鹿児島県川辺郡知覧町	F1	寒冷前線	—	—
2	1961/1/24	福岡県北九州市	F1	寒冷前線	—	—
3	1961/10/7	静岡県清水市	F1	寒冷前線	—	—
4	1962/7/2	茨城県稲敷郡東村	(F2)	温暖前線	梅雨前線	局地性じょう乱
5	1962/8/26	静岡県浜松市	(F2)	台風	—	—
6	1962/8/26	静岡県榛原郡御前崎町	(F1～F2)	台風	—	—
7	1962/9/28	北海道東利尻町	(F2)	寒冷前線	—	—
8	1962/12/30	静岡県千浜村	(F1～F2)	二つ玉低気圧	温暖前線	—
9	1964/1/17	東京都八丈町	F2	南岸低気圧	—	—
10	1965/9/5	青森県むつ市	(F2)	閉塞前線	—	—
11	1965/9/30	秋田県秋田市	F1	日本海低気圧	温暖前線	—
12	1965/9/30	秋田県西目村	F0～F1	日本海低気圧	温暖前線	—
13	1965/10/14	東京都大田区	(F1～F2)	温暖前線	—	—
14	1967/3/23	千葉県銚子市	(F1～F2)	寒冷前線	—	—
15	1967/10/28	千葉県鴨川町	(F2)	台風	—	—
16	1967/10/28	千葉県飯岡町	(F2～F3)	台風	—	—
17	1968/1/8	新潟県中頸城郡大潟町	F1	季節風	—	—
18	1968/8/28	高知県南国市	(F1～F2)	台風	—	—
19	1968/9/24	宮崎県宮崎市	F1	台風	—	—
20	1968/9/24	宮崎県高鍋町	(F2)	台風	—	—
21	1968/9/24	宮崎県高鍋町	(F2～F3)	台風	—	—
22	1968/9/24	宮崎県高鍋町	(F2)	台風	—	—
23	1969/6/22	山口県阿武郡須佐町	F1	寒冷前線	—	—
24	1969/8/23	千葉県鴨川町	(F1～F2)	台風	—	—
25	1969/10/11	北海道根室支庁(海上)	不明	気圧の谷	—	—
26	1969/11/18	山形県酒田市	F1	気圧の谷	—	—
27	1969/12/7	愛知県豊橋市	(F2～F3)	二つ玉低気圧	—	—
28	1970/7/7	長崎県福江市	F1	熱帯低気圧 (台風以外)	—	—
29	1971/2/1	石川県河北郡内灘町	F1	日本海低気圧	寒冷前線	—
30	1971/8/31	静岡県清水市	F0～F1	台風	—	—
31	1971/8/31	千葉県鴨川市	不明	台風	—	—

※ F スケールは、ア) 被害の詳細な情報等から推定できたもの、イ) 文献等からの引用又は被害のおおまかな情報等から推定したものがあり、F2 以上の事例ではア) とイ) を区別し、イ) の場合には値を括弧で囲んでいる。以降、本表においては記載を省略する。

	発生日	発生場所	F スケール*	総観場 1	総観場 2	総観場 3
32	1971/8/31	千葉県千葉市	(F2)	台風	—	—
33	1971/8/31	千葉県飯岡町	不明	台風	—	—
34	1971/9/8	千葉県飯岡町	(不明)	台風	—	—
35	1971/10/17	北海道羽幌町	(F2)	寒気の移流	—	—
36	1971/10/17	北海道羽幌町	F0～F1	寒気の移流	—	—
37	1972/6/6	沖縄県糸満市	不明	東シナ海低気圧	暖気の移流	—
38	1972/6/6	沖縄県糸満市	(F1～F2)	東シナ海低気圧	暖気の移流	—
39	1972/6/6	鹿児島県大島郡知名町	F1	寒冷前線	—	—
40	1972/11/21	富山県黒部市	F1	寒冷前線	寒気の移流	季節風
41	1973/5/21	石川県羽咋郡押水町	F0～F1	寒冷前線	日本海低気圧	—
42	1973/9/27	北海道礼文町	F1	閉塞前線	—	—
43	1973/10/22	秋田県秋田市	F1	日本海低気圧	寒冷前線	—
44	1974/3/13	福島県いわき市	F1	移動性高気圧	—	—
45	1974/4/21	長崎県西彼杵郡外海町	F1	寒冷前線	—	—
46	1974/6/6	静岡県静岡市	F0～F1	気圧の谷	—	—
47	1974/7/6	高知県南国市	(F1～F2)	台風	暖気の移流	—
48	1974/7/8	静岡県磐田郡福田町	F1	台風	停滞前線	—
49	1974/7/8	静岡県小笠郡浜岡町	(F1～F2)	台風	梅雨前線	—
50	1974/8/8	秋田県山本郡峰浜村	F0～F1	寒冷前線	—	—
51	1974/10/3	北海道奥尻郡奥尻町	(F1～F2)	温暖前線	—	—
52	1974/10/20	北海道檜山郡上ノ国町	(F1～F2)	寒冷前線	—	—
53	1975/2/6	鹿児島県大島郡伊仙町	(F2)	南岸低気圧	—	—
54	1975/2/15	東京都大島町	(F1～F2)	季節風	寒気の移流	—
55	1975/5/31	島根県簸川郡大社町	(F2)	日本海低気圧	局地性じょう乱	寒気の移流
56	1975/5/31	島根県簸川郡大社町	F0～F1	日本海低気圧	局地性じょう乱	寒気の移流
57	1975/5/31	島根県簸川郡大社町	F0～F1	日本海低気圧	局地性じょう乱	寒気の移流
58	1975/8/22	三重県熊野市	F1	台風	—	—
59	1975/9/8	北海道奥尻郡奥尻町	(F1～F2)	日本海低気圧	暖気の移流	—
60	1975/10/12	長崎県東彼杵郡東彼杵町	F1	寒冷前線	不安定線	その他(低気圧)
61	1975/10/12	熊本県本渡市	F2	寒冷前線	—	—
62	1975/11/14	高知県安芸郡東洋町	F1	南岸低気圧	温暖前線	—
63	1975/11/15	東京都三宅島三宅村	F1	南岸低気圧	温暖前線	—
64	1975/11/15	千葉県大網白里町	F1	南岸低気圧	—	—
65	1976/2/28	鹿児島県阿久根市	F1	不安定線	—	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
66	1976/8/16	福岡県遠賀郡芦屋町	(F1～F2)	寒冷前線	—	—
67	1976/10/23	沖縄県南風原村	F1	東シナ海低気圧	暖気の移流	—
68	1977/1/13	石川県金沢市	F0～F1	日本海低気圧	寒気の移流	—
69	1977/9/8	福岡県福岡市	F1	寒冷前線	台風	寒気の移流
70	1978/2/10	鹿児島県加世田市	F1	寒冷前線	暖気の移流	—
71	1978/2/28	神奈川県川崎市	F2～F3	寒冷前線	暖気の移流	—
72	1978/8/14	北海道豊富町	不明	日本海低気圧	—	—
73	1978/10/27	長崎県西彼杵郡西彼町	F1	局地性じょう乱	寒冷前線	暖気の移流
74	1979/5/27	茨城県鹿島郡旭村	(F1～F2)	気圧の谷	寒気の移流	雷雨(熱雷を除く)
75	1979/9/3	宮崎県宮崎市	F1	台風	—	—
76	1979/10/31	石川県羽咋郡富来町	F0～F1	寒気の移流	日本海低気圧	—
77	1979/11/2	北海道松前郡松前町	(F2)	日本海低気圧	温暖前線	—
78	1980/8/28	長崎県富江町	F1	局地性じょう乱	暖気の移流	—
79	1980/10/13	鹿児島県中種子町	F1	台風	—	—
80	1980/10/14	宮崎県宮崎市	F1	台風	—	—
81	1980/10/14	宮崎県宮崎市	F1	台風	—	—
82	1980/10/31	北海道門別町	(F1～F2)	閉塞前線	—	—
83	1981/6/29	佐賀県佐賀郡川副町	F1	梅雨前線	—	—
84	1983/3/12	沖縄県糸満市	F1	東シナ海低気圧	その他	—
85	1983/4/4	熊本県玉名郡長洲町	F1	寒冷前線	—	—
86	1983/9/25	沖縄県伊是名村	(F2)	台風	—	—
87	1983/9/25	沖縄県東村	F1	台風	—	—
88	1983/9/27	長崎県南松浦郡富江町	F1	台風	—	—
89	1984/11/19	鳥取県米子市	F1	寒冷前線	—	—
90	1985/6/23	福岡県北九州市	F1	梅雨前線	暖気の移流	—
91	1985/8/31	宮崎県日向市	(F1～F2)	台風	暖気の移流	—
92	1985/9/28	鹿児島県枕崎市	(F1～F2)	東シナ海低気圧	—	—
93	1985/10/5	高知県土佐市	F1	台風	太平洋高気圧	暖気の移流
94	1985/10/5	高知県高知市	F1	台風	大陸高気圧	暖気の移流
95	1986/12/19	愛知県渥美郡赤羽根町	F1	閉塞前線	—	—
96	1987/1/5	沖縄県勝連町	(F2)	寒冷前線	—	—
97	1987/1/11	秋田県南秋田郡若美町	F0～F1	その他(低気圧)	—	—

	発生日	発生場所	F スケール*	総観場 1	総観場 2	総観場 3
98	1987/1/11	秋田県八竜町	F1	その他(低気圧)	—	—
99	1987/8/30	長崎県富江町	F1	台風	—	—
100	1988/9/25	和歌山県串本町	F1	寒冷前線	暖気の移流	—
101	1989/3/16	島根県簸川郡大社町	(F2)	局地性じょう乱	寒気の移流	—
102	1989/7/4	沖縄県沖縄市	F2	停滞前線	暖気の移流	—
103	1989/9/22	大阪府泉南郡岬町	F1	寒冷前線	—	—
104	1990/2/19	鹿児島県枕崎市	(F2～F3)	寒冷前線	暖気の移流	その他(低気圧)
105	1990/3/12	三重県志摩郡志摩町	F1	日本海低気圧	寒冷前線	—
106	1990/4/3	沖縄県国頭郡金武町	F2	寒冷前線	—	—
107	1990/4/6	石川県羽咋郡富来町	F2	オホーツク海低気圧	気圧の谷	—
108	1990/9/19	静岡県浜松市, 舞阪町, 雄踏町	不明	台風	—	—
109	1990/12/11	千葉県鴨川市	(F2)	暖気の移流	気圧の谷	雷雨(熱雷を除く)
110	1990/12/12	茨城県海上～那珂湊市	F1	寒気の移流	局地性じょう乱	その他
111	1991/1/13	新潟県(海上)	不明	日本海低気圧	—	—
112	1991/2/13	沖縄県国頭郡恩納村	不明	東シナ海低気圧	暖気の移流	—
113	1991/2/13	沖縄県那覇市	F1	東シナ海低気圧	暖気の移流	—
114	1991/2/15	福井県(湖上)	F1	二つ玉低気圧	—	—
115	1991/4/7	沖縄県島尻郡具志川村	F2	暖気の移流	寒冷前線	—
116	1991/4/7	沖縄県島尻郡具志川村	F1～F2	暖気の移流	寒冷前線	—
117	1991/9/17	北海道後志支庁(海上)	不明	寒気の移流	気圧の谷	局地性じょう乱
118	1991/11/28	宮崎県日南市	F1	南岸低気圧	—	—
119	1991/11/28	和歌山県日置川町	F0～F1	南岸低気圧	—	—
120	1991/11/28	東京都新島若郷	F0	南岸低気圧	—	—
121	1991/12/11	石川県金沢市	F1	寒冷前線	—	—
122	1992/1/6	鹿児島県大島郡知名町	F1	東シナ海低気圧	寒冷前線	暖気の移流
123	1992/2/15	沖縄県島尻郡具志川村	F1	寒冷前線	—	—
124	1992/3/31	沖縄県(海上)	不明	東シナ海低気圧	暖気の移流	—
125	1992/4/15	和歌山県日置川町	不明	寒冷前線	—	—
126	1992/5/17	沖縄県(海上)	不明	東シナ海低気圧	暖気の移流	—
127	1992/8/7	宮城県本吉郡唐桑町	F1	局地性じょう乱	雷雨(熱雷)	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
128	1992/9/13	北海道宗谷支庁(海上)	不明	移動性高気圧	—	—
129	1992/9/17	北海道増毛町	F1	寒気の移流	—	—
130	1992/9/17	北海道留萌支庁(海上)	不明	寒気の移流	—	—
131	1992/9/22	沖縄県名護市	F1	台風	—	—
132	1992/11/19	宮崎県北浦町	不明	不安定線	移動性高気圧	—
133	1993/1/7	和歌山県印南町	不明	南岸低気圧	—	—
134	1993/1/23	沖縄県竹富町	F0	停滞前線	—	—
135	1993/5/27	沖縄県西原町	F1	梅雨前線	—	—
136	1993/6/18	福岡県大牟田市	F1	停滞前線	—	—
137	1993/9/3	高知県土佐清水市	F1	台風	—	—
138	1993/9/3	宮崎県延岡市	F0～F1	台風	—	—
139	1993/9/3	高知県吾川郡春野町	F2	台風	—	—
140	1993/9/26	北海道留萌市	不明	寒気の移流	—	—
141	1993/10/17	新潟県(海上)	不明	不安定線	—	—
142	1993/10/17	石川県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
143	1993/10/17	新潟県(海上)	不明	不安定線	—	—
144	1993/10/23	新潟県(海上)	不明	寒冷前線	—	—
145	1993/11/24	新潟県(海上)	不明	季節風	—	—
146	1993/12/1	鹿児島県指宿郡穎娃町	F1	寒冷前線	暖気の移流	—
147	1993/12/1	鹿児島県垂水市	F1	寒冷前線	—	—
148	1994/2/9	山口県(海上)	不明	寒冷前線	季節風	寒気の移流
149	1994/3/23	鹿児島県大島郡伊仙町	F0～F1	その他(低気圧)	—	—
150	1994/3/26	山形県酒田市	F1	寒気の移流	気圧の谷	—
151	1994/8/20	沖縄県伊良部町	F2	台風	—	—
152	1994/9/1	新潟県(海上)	不明	寒冷前線	気圧の谷	雷雨(熱雷を除く)
153	1994/9/29	愛知県豊橋市	F1	台風	—	—
154	1994/9/29	愛知県蒲郡市	F1	台風	—	—
155	1994/9/29	静岡県新居町	F0～F1	台風	—	—
156	1994/10/4	高知県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
157	1994/10/4	高知県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
158	1994/10/4	高知県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
159	1994/10/4	高知県香美郡赤岡町	F0	暖気の移流	—	—
160	1994/10/4	高知県南国市	F0	暖気の移流	—	—
161	1994/10/5	北海道門別町	F1	寒冷前線	—	—
162	1994/10/5	北海道門別町	F1～F2	寒冷前線	—	—
163	1994/10/12	高知県芸西村	F0～F1	日本海低気圧	暖気の移流	—
164	1995/9/23	沖縄県読谷村	F0	台風	—	—
165	1995/9/23	沖縄県与那城町	F1	台風	—	—
166	1995/12/1	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—

	発生日	発生場所	Fスケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
167	1996/3/30	鹿児島県枕崎市	F1	寒冷前線	日本海低気圧	—
168	1996/7/1	鹿児島県喜入町	F1	停滞前線	—	—
169	1996/7/5	千葉県千葉市	F2	日本海低気圧	温暖前線	—
170	1996/8/4	長崎県大村市	F0	局地性じょう乱	—	—
171	1996/9/5	秋田県由利郡金浦町	不明	日本海低気圧	寒冷前線	—
172	1996/10/4	愛媛県(海上)	不明	日本海低気圧	寒気の移流	—
173	1996/10/8	北海道遠別町	F1	気圧の谷	寒気の移流	—
174	1996/11/30	新潟県柏崎市	F1	寒気の移流	—	—
175	1997/1/22	新潟県新潟市	F0	寒気の移流	—	—
176	1997/3/29	沖縄県糸満市	F2	寒冷前線	—	—
177	1997/5/20	和歌山県(海上)	不明	南岸低気圧	寒気の移流	—
178	1997/9/6	高知県(海上)	不明	停滞前線	暖気の移流	—
179	1997/9/14	鹿児島県熊毛郡中種子町	F1	台風	—	—
180	1997/9/16	高知県南国市	F1	台風	暖気の移流	—
181	1997/9/28	愛媛県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
182	1997/10/5	福岡県(海上)	不明	寒冷前線	—	—
183	1997/10/7	北海道苫小牧市	F1	雷雨(熱雷を除く)	暖気の移流	寒気の移流
184	1997/10/14	長崎県壱岐郡郷ノ浦町	F1~F2	寒冷前線	局地性じょう乱	暖気の移流
185	1997/10/14	長崎県壱岐郡郷ノ浦町	F1	局地性じょう乱	寒冷前線	暖気の移流
186	1997/11/17	東京都八丈町	F1	温暖前線	暖気の移流	—
187	1997/11/28	鹿児島県知名町	F0	東シナ海低気圧	暖気の移流	—
188	1998/1/14	沖縄県豊見城村	F0	寒冷前線	暖気の移流	—
189	1998/2/14	沖縄県竹富町	F0	寒冷前線	—	—
190	1998/2/17	沖縄県久米島具志川村	F1~F2	停滞前線	—	—
191	1998/2/19	沖縄県南大東村	F1	その他(低気圧)	—	—
192	1998/4/18	高知県(海上)	不明	南岸低気圧	—	—
193	1998/9/2	長崎県(海上)	不明	気圧の谷	局地性じょう乱	—
194	1998/9/16	宮城県名取市	F1	台風	暖気の移流	—
195	1998/9/18	宮崎県宮崎市	F1	台風	—	—
196	1998/9/24	京都久美浜町	不明	停滞前線	暖気の移流	—
197	1998/9/24	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
198	1998/10/17	宮崎県児湯郡川南町	F0~F1	台風	—	—
199	1998/10/17	宮崎県日向市	F0	台風	—	—
200	1998/10/31	石川県(海上)	不明	日本海低気圧	—	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
201	1998/11/15	山形県酒田市	F1	寒冷前線	—	—
202	1999/4/10	高知県芸西村	F1	その他(低気圧)	気圧の谷	—
203	1999/5/4	愛知県渥美郡赤羽根町	F1	日本海低気圧	—	—
204	1999/6/30	静岡県富士市	F0	日本海低気圧	寒冷前線	—
205	1999/7/3	沖縄県(海上)	不明	停滞前線	暖気の移流	—
206	1999/7/21	沖縄県(海上)	不明	熱帯低気圧(台風以外)	—	—
207	1999/8/12	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
208	1999/8/21	山口県阿知須町	(F1～F2)	暖気の移流	雷雨(熱雷)	—
209	1999/9/23	長崎県式見町	F0～F1	停滞前線	局地性じょう乱	台風
210	1999/9/24	高知県南国市	F1	台風	暖気の移流	—
211	1999/9/24	山口県小野田市	F2	台風	—	—
212	1999/9/24	愛知県豊橋市	F3	台風	—	—
213	1999/9/24	愛知県蒲郡市	F1	台風	—	—
214	1999/9/24	愛知県小坂井町	F2	台風	—	—
215	1999/9/24	愛知県海部郡弥富町	F1	台風	—	—
216	1999/10/8	石川県(海上)	不明	寒冷前線	—	—
217	1999/10/20	香川県(海上)	不明	大陸高気圧	寒気の移流	暖気の移流
218	1999/10/27	茨城県多賀郡十王町	F1	南岸低気圧	—	—
219	1999/10/29	秋田県能代市	F0～F1	寒冷前線	—	—
220	1999/11/1	愛知県西尾市	F1	日本海低気圧	—	—
221	1999/11/2	静岡県静岡市	不明	その他(前線)	寒気の移流	—
222	1999/11/15	高知県大方町	F0～F1	日本海低気圧	寒気の移流	—
223	1999/11/25	秋田県八森町	(F1～F2)	日本海低気圧	寒冷前線	—
224	2000/7/25	福井県福井市	不明	停滞前線	—	—
225	2000/7/25	福井県坂井郡三国町	不明	停滞前線	—	—
226	2000/8/7	千葉県(海上)	不明	雷雨(熱雷)	—	—
227	2000/9/11	和歌山県新宮市	F0～F1	台風	停滞前線	暖気の移流
228	2000/9/11	愛知県南知多町	F2	台風	停滞前線	—
229	2000/12/25	東京都大島町	F1	寒気の移流	—	—
230	2001/1/13	沖縄県糸満市	F0	寒冷前線	—	—
231	2001/5/29	愛知県東海市	F0	局地性降水	—	—
232	2001/6/1	青森県西津軽郡岩崎村	F1	局地性じょう乱	—	—
233	2001/6/19	福井県敦賀市	F1	日本海低気圧	—	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
234	2001/7/8	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
235	2001/7/9	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
236	2001/8/4	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
237	2001/8/4	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
238	2001/10/1	和歌山県南部町	F0～F1	日本海低気圧	暖気の移流	—
239	2002/1/21	愛知県田原町	F1	二つ玉低気圧	温暖前線	暖気の移流
240	2002/4/3	沖縄県沖縄市	F2	東シナ海低気圧	気圧の谷	暖気の移流
241	2002/9/23	富山県下新川郡朝日町	F0～F1	寒気の移流	局地性じょう乱	—
242	2002/9/24	秋田県由利本荘市	F1	寒気の移流	—	—
243	2002/10/6	鹿児島県加世田市	F1	寒冷前線	—	—
244	2002/10/6	鹿児島県鹿児島市	F1	寒冷前線	—	—
245	2002/10/6	愛知県南知多町	F1	二つ玉低気圧	—	—
246	2002/10/7	東京都大島町	F1	日本海低気圧	—	—
247	2002/10/7	神奈川県横須賀市	F1	日本海低気圧	雷雨(熱雷を除く)	暖気の移流
248	2002/10/15	静岡県磐田郡浅羽町, 小笠郡大須賀町, 小笠郡大東町	F0	日本海低気圧	寒冷前線	—
249	2002/11/3	香川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
250	2002/11/4	石川県加賀市	F0	寒気の移流	—	—
251	2002/11/5	福井県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
252	2002/12/16	高知県室戸市	F0～F1	日本海低気圧	暖気の移流	—
253	2003/1/11	東京都(海上)	不明	気圧の谷	—	—
254	2003/6/19	宮崎県東臼杵郡門川町	F1	台風	—	—
255	2003/7/19	山口県岩国市	F1～F2	梅雨前線	—	—
256	2003/8/8	宮崎県日南市	F0～F1	台風	—	—
257	2003/8/8	宮崎県日向市	F0～F1	台風	—	—
258	2003/8/28	山口県山陽町	F1	寒冷前線	局地性じょう乱	—
259	2003/9/12	高知県高知市	F1	台風	暖気の移流	—
260	2003/9/29	北海道日高支庁(海上)	不明	気圧の谷	—	—
261	2003/10/12	宮崎県延岡市	F0	その他(低気圧)	—	—
262	2003/10/12	高知県安芸市	F0～F1	停滞前線	暖気の移流	—
263	2003/10/18	福井県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
264	2004/6/1	沖縄県北中城村	不明	梅雨前線	暖気の移流	—
265	2004/6/27	佐賀県佐賀市	F2	梅雨前線	—	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
266	2004/8/15	北海道礼文郡礼文町	F0 未満	気圧の谷	—	—
267	2004/9/16	福岡県北九州市	F1	暖気の移流	雷雨(熱雷)	—
268	2004/9/27	沖縄県名護市	F1	台風	—	—
269	2004/9/27	沖縄県今帰仁村	F1	台風	—	—
270	2004/9/29	愛知県豊橋市	F0～F1	台風	—	—
271	2004/9/30	東京都大田区	F1～F2	台風	—	—
272	2004/10/22	北海道門別町	F2	寒冷前線	暖気の移流	—
273	2005/1/12	鳥取県(海上)	不明	季節風	寒気の移流	—
274	2005/1/27	沖縄県読谷村	F1	寒冷前線	暖気の移流	—
275	2005/5/1	高知県高知市	F0～F1	その他(低気圧)	暖気の移流	—
276	2005/9/5	宮崎県宮崎市	F1	台風	—	—
277	2005/10/2	北海道伊達市	F0	寒冷前線	—	—
278	2005/11/18	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
279	2005/12/5	島根県出雲市	F1	寒気の移流	—	—
280	2005/12/25	山形県酒田市	F1	寒冷前線	—	—
281	2006/1/19	鹿児島県瀬戸内町	F1	停滞前線	—	—
282	2006/3/28	和歌山県串本町	F1～F2	日本海低気圧	寒冷前線	—
283	2006/4/20	神奈川県藤沢市	F1	寒冷前線	—	—
284	2006/8/13	佐賀県(海上)	不明	雷雨(熱雷)	—	—
285	2006/8/29	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
286	2006/9/17	宮崎県日南市	F1	台風	—	—
287	2006/9/17	宮崎県日向市	F1	台風	—	—
288	2006/9/17	宮崎県延岡市	F2	台風	—	—
289	2006/9/17	大分県臼杵市	F2	台風	—	—
290	2006/9/19	高知県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
291	2006/9/25	沖縄県南大東村	F0	その他	—	—
292	2006/10/11	北海道新ひだか町	F1	寒冷前線	—	—
293	2006/10/11	北海道新ひだか町	F1	寒冷前線	—	—
294	2006/11/6	和歌山県(海上)	不明	日本海低気圧	—	—
295	2006/11/7	北海道日高町	不明	寒冷前線	—	—
296	2006/11/7	北海道日高町	F1	寒冷前線	暖気の移流	—
297	2006/11/9	北海道奥尻郡奥尻町	F1	寒冷前線	暖気の移流	—
298	2006/11/11	山口県山口市	F0	寒冷前線	—	—
299	2006/11/18	沖縄県名護市	F2	停滞前線	—	—
300	2006/11/22	沖縄県東村	F1	停滞前線	暖気の移流	—
301	2006/11/26	高知県土佐清水市	F1	南岸低気圧	暖気の移流	—
302	2007/2/14	沖縄県島尻郡座間味村	F0～F1	寒冷前線	暖気の移流	—
303	2007/2/14	和歌山県日高郡印南町	F1	日本海低気圧	寒冷前線	—
304	2007/3/15	沖縄県中頭郡読谷村	F1	気圧の谷	暖気の移流	—
305	2007/4/18	沖縄県宮古島市	F1	寒冷前線	—	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
306	2007/5/31	千葉県(海上)	不明	雷雨(熱雷を除く)	寒気の移流	—
307	2007/8/24	山形県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
308	2007/8/24	山形県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
309	2007/8/28	沖縄県(海上)	不明	雷雨(熱雷)	—	—
310	2007/8/28	沖縄県(海上)	不明	雷雨(熱雷)	—	—
311	2007/8/29	沖縄県(海上)	不明	その他(高気圧)	気圧の谷	—
312	2007/8/29	沖縄県(海上)	不明	その他(高気圧)	気圧の谷	—
313	2007/9/2	沖縄県(海上)	不明	太平洋高気圧	雷雨(熱雷)	—
314	2007/9/9	福岡県(海上)	不明	気圧の谷	局地性じょう乱	—
315	2007/9/14	宮崎県延岡市	不明	台風	—	—
316	2007/10/1	北海道後志支庁(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
317	2007/10/1	北海道後志支庁(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
318	2007/10/1	北海道檜山支庁(海上)	不明	気圧の谷	—	—
319	2007/10/4	北海道胆振支庁(海上)	不明	気圧の谷	暖気の移流	地形効果
320	2007/10/4	北海道留萌支庁(海上)	不明	気圧の谷	暖気の移流	—
321	2007/10/4	佐賀県佐賀市	F0	太平洋高気圧	気圧の谷	—
322	2007/10/4	北海道檜山支庁(海上)	不明	気圧の谷	—	—
323	2007/10/9	鹿児島県出水郡長島町	不明	東シナ海低気圧	—	—
324	2007/10/9	鹿児島県(海上)	不明	東シナ海低気圧	—	—
325	2007/10/9	鹿児島県(海上)	不明	東シナ海低気圧	—	—
326	2007/10/11	青森県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
327	2007/10/11	青森県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
328	2007/10/14	三重県(海上)	不明	停滞前線	気圧の谷	—
329	2007/10/14	長崎県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
330	2007/10/14	長崎県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
331	2007/10/16	島根県(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
332	2007/10/17	北海道渡島支庁(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
333	2007/11/22	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
334	2007/12/2	山形県酒田市	F0	気圧の谷	—	—
335	2008/3/25	神奈川県(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
336	2008/3/25	神奈川県(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
337	2008/3/25	神奈川県(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
338	2008/3/27	鹿児島県いちき串木野市	F1	東シナ海低気圧	—	—
339	2008/3/27	鹿児島県垂水市	F1	東シナ海低気圧	—	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
340	2008/4/7	高知県土佐清水市	F0	その他(低気圧)	—	—
341	2008/4/9	鹿児島県枕崎市	F0	東シナ海低気圧	—	—
342	2008/4/23	愛知県豊橋市	不明	気圧の谷	—	—
343	2008/5/1	鹿児島県熊毛郡中種子町	F0	その他(低気圧)	—	—
344	2008/5/19	愛知県(海上)	不明	気圧の谷	南岸低気圧	—
345	2008/5/27	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
346	2008/5/27	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
347	2008/5/27	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
348	2008/6/1	秋田県(海上)	不明	日本海低気圧	—	—
349	2008/6/29	高知県安芸市	F0	梅雨前線	—	—
350	2008/7/3	沖縄県(海上)	不明	太平洋高気圧	気圧の谷	—
351	2008/7/22	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
352	2008/7/22	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
353	2008/7/22	沖縄県島尻郡与那原町	F0 未満	気圧の谷	—	—
354	2008/7/22	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
355	2008/7/22	沖縄県島尻郡与那原町付近	不明	気圧の谷	—	—
356	2008/7/22	沖縄県島尻郡与那原町付近	不明	気圧の谷	—	—
357	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
358	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
359	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
360	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
361	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
362	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
363	2008/7/30	鳥取県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
364	2008/8/8	沖縄県(海上)	不明	その他(低気圧)	—	—
365	2008/8/8	沖縄県石垣市	不明	その他(低気圧)	—	—
366	2008/8/12	福岡県(海上)	不明	その他(低気圧)	暖気の移流	—
367	2008/8/12	福岡県福津市	F0	その他(低気圧)	暖気の移流	—
368	2008/8/14	山形県(海上)	不明	熱帯低気圧(台風以外)	暖気の移流	—
369	2008/8/15	鳥取県鳥取市	F0 以下	熱帯低気圧(台風以外)	雷雨(熱雷を除く)	—
370	2008/8/16	千葉県千葉市	F0 以下	台風	停滞前線	雷雨(熱雷)
371	2008/8/16	千葉県(海上)	不明	台風	停滞前線	雷雨(熱雷)

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
372	2008/8/26	鹿児島県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
373	2008/9/6	愛媛県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
374	2008/9/14	北海道宗谷支庁(海上)	不明	寒気の移流	—	—
375	2008/9/14	北海道宗谷支庁(海上)	不明	寒気の移流	—	—
376	2008/9/21	香川県仲多度郡多度津町	F1	停滞前線	—	—
377	2008/9/21	新潟県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
378	2008/9/21	徳島県鳴門市	F0 未満	停滞前線	—	—
379	2008/10/1	秋田県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
380	2008/10/1	秋田県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
381	2008/10/7	沖縄県(海上)	不明	停滞前線	—	—
382	2008/10/7	沖縄県(海上)	不明	停滞前線	—	—
383	2008/10/7	沖縄県島尻郡久米島町	F0 未満	停滞前線	—	—
384	2008/10/7	沖縄県(海上)	不明	停滞前線	—	—
385	2008/10/7	沖縄県名護市	F0~F1	停滞前線	—	—
386	2008/10/10	秋田県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
387	2008/10/10	秋田県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
388	2008/10/10	秋田県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
389	2008/10/10	沖縄県糸満市	不明	気圧の谷	—	—
390	2008/10/11	北海道檜山郡江差町	F0	寒冷前線	—	—
391	2008/10/15	新潟県新潟市	F0	気圧の谷	—	—
392	2008/10/15	山形県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
393	2008/10/15	新潟県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
394	2008/10/24	三重県志摩市	F1	南岸低気圧	—	—
395	2008/10/26	新潟県新潟市	F0	寒冷前線	—	—
396	2008/10/27	福井県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
397	2008/10/27	千葉県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
398	2008/10/27	千葉県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
399	2008/10/27	千葉県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
400	2008/10/27	千葉県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
401	2008/10/27	千葉県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
402	2008/10/30	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
403	2008/10/30	鳥取県岩美郡岩美町	F0	寒気の移流	—	—
404	2008/10/30	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
405	2008/10/31	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
406	2008/11/2	新潟県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
407	2008/11/3	徳島県(海上)	不明	その他(前線)	寒気の移流	—
408	2008/11/7	北海道様似郡様似町	F0~F1	寒冷前線	—	—
409	2008/11/8	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
410	2008/11/19	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
411	2008/11/19	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
412	2008/11/20	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
413	2008/11/20	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
414	2008/11/20	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
415	2008/11/20	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
416	2008/11/20	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
417	2008/11/20	石川県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
418	2008/11/23	石川県羽咋郡志賀町	F0~F1	気圧の谷	寒気の移流	—
419	2008/12/5	東京都品川区	F1	寒冷前線	—	—
420	2008/12/6	大分県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
421	2009/1/24	北海道檜山支庁(海上)	不明	寒気の移流	—	—
422	2009/1/24	北海道檜山支庁(海上)	不明	寒気の移流	—	—
423	2009/2/7	秋田県秋田市	F0	寒冷前線	—	—
424	2009/2/26	沖縄県(海上)	不明	その他(高気圧)	—	—
425	2009/3/9	沖縄県糸満市	F0	寒冷前線	—	—
426	2009/3/14	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
427	2009/6/26	沖縄県(海上)	不明	梅雨前線	—	—
428	2009/7/6	沖縄県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
429	2009/7/6	沖縄県石垣市	不明	暖気の移流	—	—
430	2009/7/25	高知県安芸市	F0	梅雨前線	—	—
431	2009/7/30	沖縄県(海上)	不明	その他(高気圧)	—	—
432	2009/8/8	沖縄県宮古島市	不明	台風	—	—
433	2009/8/8	沖縄県宮古島市	F0	台風	—	—
434	2009/8/8	沖縄県(海上)	不明	台風	—	—
435	2009/8/23	山形県鶴岡市	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
436	2009/8/23	山形県鶴岡市	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
437	2009/9/10	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
438	2009/9/10	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
439	2009/9/13	山形県鶴岡市	F0	日本海低気圧	—	—
440	2009/9/15	沖縄県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
441	2009/10/4	秋田県秋田市	不明	気圧の谷	—	—
442	2009/10/8	千葉県山武郡九十九里町	F1	台風	暖気の移流	—
443	2009/10/27	新潟県糸魚川市	不明	寒気の移流	—	—
444	2009/10/30	青森県西津軽郡深浦町	F0	寒冷前線	寒気の移流	—
445	2009/10/30	秋田県能代市	F1	寒冷前線	—	—
446	2009/11/3	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
447	2009/11/3	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
448	2009/11/3	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
449	2009/11/3	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
450	2009/11/3	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
451	2009/11/6	熊本県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
452	2009/11/11	静岡県掛川市	F0	寒気の移流	—	—
453	2009/11/13	宮崎県児湯郡川南町	F0	その他(低気圧)	—	—
454	2009/12/18	石川県金沢市	F0	寒気の移流	—	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
455	2009/12/18	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
456	2010/2/1	鹿児島県南さつま市	F0	東シナ海低気圧	寒冷前線	—
457	2010/2/1	鹿児島県南九州市	F0	東シナ海低気圧	寒冷前線	—
458	2010/4/24	長崎県(海上)	不明	移動性高気圧	—	—
459	2010/4/29	高知県安芸市	F0	寒冷前線	—	—
460	2010/6/25	宮崎県児湯郡都農町	F0	梅雨前線	—	—
461	2010/7/9	和歌山県東牟婁郡那智勝浦町	F0	梅雨前線	—	—
462	2010/7/25	沖縄県(海上)	不明	太平洋高気圧	—	—
463	2010/7/28	沖縄県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
464	2010/8/4	愛知県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
465	2010/8/11	高知県香南市	F0	台風	暖気の移流	—
466	2010/8/14	沖縄県(海上)	不明	太平洋高気圧	—	—
467	2010/8/18	沖縄県(海上)	不明	太平洋高気圧	—	—
468	2010/8/25	北海道留萌地方(海上)	不明	気圧の谷	—	—
469	2010/8/25	北海道留萌市	F0 未満	気圧の谷	—	—
470	2010/9/7	秋田県秋田市	F0	停滞前線	—	—
471	2010/9/13	沖縄県島尻郡伊是名村	F0	太平洋高気圧	—	—
472	2010/9/16	兵庫県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
473	2010/9/17	新潟県(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
474	2010/9/17	新潟県長岡市	F0 以下	気圧の谷	寒気の移流	—
475	2010/9/23	和歌山県(海上)	不明	停滞前線	—	—
476	2010/9/28	静岡県焼津市	F0	二つ玉低気圧	—	—
477	2010/10/2	沖縄県(海上)	不明	その他(高気圧)	—	—
478	2010/10/2	沖縄県(海上)	不明	その他(高気圧)	—	—
479	2010/10/7	高知県(海上)	不明	その他(高気圧)	—	—
480	2010/10/9	千葉県南房総市	F0	その他(低気圧)	—	—
481	2010/10/15	石川県羽咋郡志賀町	F0	気圧の谷	寒気の移流	—
482	2010/10/15	新潟県胎内市	F0	気圧の谷	寒気の移流	—
483	2010/10/15	新潟県胎内市	F1	気圧の谷	寒気の移流	—
484	2010/10/17	秋田県山本郡八峰町	F0	気圧の谷	—	—
485	2010/10/17	秋田県潟上市	F0	気圧の谷	—	—

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
486	2010/10/22	沖縄県島尻郡久米島町	F0 以下	停滞前線	暖気の移流	—
487	2010/10/26	北海道石狩地方(海上)	不明	寒気の移流	—	—
488	2010/10/26	北海道後志地方(海上)	不明	寒気の移流	—	—
489	2010/10/26	北海道石狩地方(海上)	不明	寒気の移流	—	—
490	2010/10/26	北海道石狩市	F0 未満	寒気の移流	—	—
491	2010/10/26	北海道石狩地方(海上)	不明	寒気の移流	—	—
492	2010/10/26	北海道石狩地方(海上)	不明	寒気の移流	—	—
493	2010/10/26	北海道後志地方(海上)	不明	寒気の移流	—	—
494	2010/10/26	北海道檜山地方(海上)	不明	寒気の移流	—	—
495	2010/11/1	千葉県山武郡九十九里町	F0	南岸低気圧	—	—
496	2010/11/12	秋田県山本郡八峰町	F0	寒冷前線	—	—
497	2010/11/22	鹿児島県大島郡和泊町	F0	停滞前線	暖気の移流	—
498	2010/11/29	石川県羽咋郡志賀町	F0	寒気の移流	—	—
499	2010/11/29	福井県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
500	2010/11/29	福井県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
501	2010/11/29	福井県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
502	2010/12/3	神奈川県鎌倉市	F0～F1	日本海低気圧	暖気の移流	—
503	2010/12/3	新潟県新潟市	F0	気圧の谷	寒気の移流	—
504	2010/12/3	新潟県新潟市	F0 未満	気圧の谷	寒気の移流	—
505	2010/12/3	新潟県新潟市	F1	気圧の谷	寒気の移流	—
506	2010/12/9	新潟県上越市	F0～F1	気圧の谷	寒気の移流	—
507	2010/12/15	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
508	2010/12/16	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
509	2010/12/17	北海道後志地方(海上)	不明	気圧の谷	—	—
510	2010/12/18	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
511	2010/12/24	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
512	2010/12/27	石川県羽咋郡志賀町	F0	寒気の移流	—	—
513	2010/12/29	京都(海上)	不明	寒気の移流	—	—
514	2010/12/29	京都(海上)	不明	寒気の移流	—	—
515	2011/1/2	長崎県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
516	2011/1/2	長崎県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
517	2011/1/3	新潟県(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
518	2011/2/3	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
519	2011/2/11	沖縄県豊見城市	F0	停滞前線	—	—
520	2011/2/25	沖縄県(海上)	不明	その他(高気圧)	—	—
521	2011/3/9	福井県あわら市	F0 未満	寒気の移流	—	—
522	2011/3/9	鳥取県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
523	2011/3/31	新潟県(海上)	F0 未満	気圧の谷	寒気の移流	—
524	2011/5/28	沖縄県石垣市	F1	台風	—	—
525	2011/7/18	三重県津市	F0	台風	暖気の移流	—
526	2011/8/13	青森県(海上)	不明	暖気の移流	—	—
527	2011/8/20	北海道後志地方(海上)	不明	気圧の谷	—	—

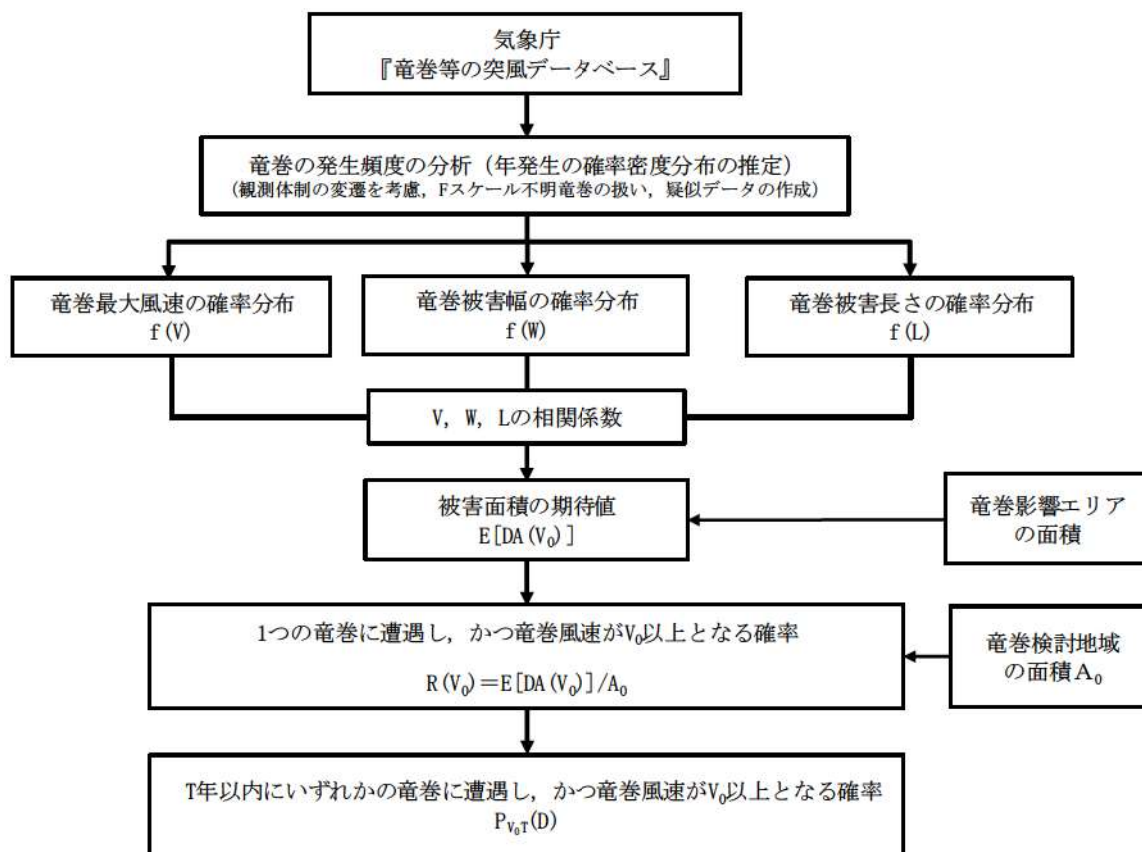
	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
528	2011/8/20	北海道後志地方(海上)	不明	気圧の谷	—	—
529	2011/8/20	北海道後志地方(海上)	不明	気圧の谷	—	—
530	2011/8/21	長崎県平戸市	F0	停滞前線	その他(低気圧)	—
531	2011/8/21	福岡県福岡市	F1	その他(低気圧)	—	—
532	2011/8/22	北海道宗谷地方(海上)	不明	気圧の谷	—	—
533	2011/8/22	沖縄県(海上)	不明	太平洋高気圧	—	—
534	2011/8/22	沖縄県(海上)	不明	太平洋高気圧	—	—
535	2011/8/23	長崎県(海上)	不明	停滞前線	—	—
536	2011/9/20	北海道宗谷地方(海上)	不明	気圧の谷	—	—
537	2011/10/14	宮崎県延岡市	F0	暖気の移流	—	—
538	2011/10/21	高知県土佐清水市	F0	暖気の移流	—	—
539	2011/11/15	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
540	2011/11/15	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
541	2011/11/15	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
542	2011/11/15	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
543	2011/11/15	新潟県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
544	2011/11/18	鹿児島県大島郡徳之島町	F2	停滞前線	暖気の移流	—
545	2011/11/24	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
546	2011/11/25	富山県(海上)	不明	寒気の移流	—	—
547	2011/11/30	沖縄県(海上)	不明	停滞前線	気圧の谷	—
548	2011/12/4	東京都(海上)	不明	寒気の移流	—	—
549	2011/12/4	東京都(海上)	不明	寒気の移流	—	—
550	2011/12/4	東京都(海上)	不明	寒気の移流	—	—
551	2011/12/4	東京都(海上)	不明	寒気の移流	—	—
552	2011/12/24	石川県(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
553	2012/2/1	島根県出雲市	F0	寒冷前線	—	—
554	2012/2/28	沖縄県うるま市	F0	停滞前線	—	—
555	2012/5/9	愛知県(海上)	不明	気圧の谷	寒気の移流	—
556	2012/5/13	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
557	2012/5/13	沖縄県(海上)	不明	気圧の谷	—	—
558	2012/6/5	沖縄県島尻郡南大東村	F0	台風	—	—

竜巻最大風速のハザード曲線の求め方

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（以下「竜巻影響評価ガイド」という。）に基づき、竜巻に遭遇し、かつ竜巻がある風速以上になる確率モデルの推定法（Wen and Chu及びGarson et al.）に基づいて竜巻最大風速のハザード曲線を算定し、 V_{B2} を算定した。具体的には、独立行政法人原子力安全基盤機構が東京工芸大学に委託した研究の成果（以下「東京工芸大学委託成果」という。）も参考とし以下のとおり算定した。

1. 評価フロー

本評価は、竜巻の発生頻度の分析、竜巻最大風速・被害幅・被害長さの確率密度分布及び相関係数の算定、並びにハザード曲線の算出によって構成されている。評価フローを第1.1図に示す。



第 1.1 図 竜巻最大風速のハザード曲線の評価フロー

2. 竜巻の発生頻度の分析

2.1 適用データ

気象庁「竜巻等の突風データベース」より竜巻検討地域における1961年～2012年6月までの竜巻発生データを用いた。

2.2 竜巻の発生頻度

気象庁「竜巻等の突風データベース」は1961年以降のデータがデータベース化されているが、第2.1表に示すとおり、観測体制は近年になるほど強化されており、年代により観測値の質にばらつきがある。観測体制が強化された2007年以降は、発生数が非常に多くなっており、海上竜巻の増加が特に顕著である。ただし、これら海上竜巻の多くは、その詳細が“不明”となっているのも特徴である。

観測体制の変遷や観測された竜巻の特徴を考慮して、解析に用いるデータの観測期間を以下のように設定した。

- ✓ 観測体制が強化された2007～2012/6（5.5年間）
- ✓ 観測体制が整備された1991～2012/6（21.5年間）
- ✓ 観測記録が整備された1961～2012/6（51.5年間）

上記3つの観測期間について、竜巻発生数、年間平均発生数及びその標準偏差をFスケールごとに調査した結果を第2.2表に示す。同表の1～3段目までは、1961～、1991～、2007～2012/6の結果をそれぞれ表し、小計はF0からF3竜巻の発生数の合計、総数は不明（陸上・海上）も含めた合計を表す。

1961年以降の51.5年間で、209個の竜巻が観測されているが、そのうちの45個（22%）はF1竜巻である。詳細が不明な竜巻は122個観測されているが、そのうちの97個は2007年以降の5.5年間に観測された竜巻（海上竜巻92個、上陸竜巻5個）である。F0竜巻については、29個観測されており、そのうち25個は2007年以降の観測である（残りの4個は1997年、2002年、2004年、2005年に観測）。

一方、F2竜巻については、51.5年間で13個観測されているが、2007年以降の発生例は無く、観測体制の強化に伴う影響をそれほど受けていないことが示唆される。また、F3竜巻の観測例が無いことも本竜巻検討地域の特徴である。

以上の結果を踏まえ、疑似的な51.5年間のデータや統計量をFスケールごとに作成した。その基本的な考え方は以下のとおりである。

- ① 被害が小さくて見過ごされやすいF0及びFスケール不明竜巻は、観測体制が強化された2007年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ② 被害が比較的軽微なF1竜巻については、観測体制が整備された1991年以降の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ③ 被害が比較的大きく見逃されることが少ないF2、F3竜巻については、観測データが整備された1961年1月以降の全期間の年間発生数や標準偏差を採用する。
- ④ 51.5年間の発生数を、①～③の観測期間との比率からFスケールごとに推

計する。

このようにして得られた結果（以下「疑似データ」という。）を第2.2表の4段目に示す。ここでの小計には、陸上での不明竜巻を含めた。その結果、51.5年間に発生した竜巻1220個のうち、不明も含む陸上竜巻が358個、海上竜巻は862個と推定された。

竜巻は、被害があつて初めてそのFスケールが推定されるため、陸上での不明竜巻（上陸竜巻を含む）は被害が少ないF0竜巻に分類するのが合理的である。一方、海上竜巻（非上陸）については、その竜巻スケールを推定することは困難であるが、沿岸部近傍での竜巻の発生特性は陸上と海上では類似していると考えられる【参考資料1】。そこで、以下のような仮定の下に、検討地域の竜巻発生数を推計した。

- ⑤ 陸上で発生したFスケールが不明な竜巻、及び海上で発生しその後上陸したFスケール不明竜巻はF0に含める。これにより、すべての陸上竜巻をF0～F3に分類する。
- ⑥ 沿岸部近傍での海上竜巻の発生特性は、陸上竜巻の発生特性と類似しているとの仮定の下、不明な海上竜巻の発生数を陸上竜巻のFスケール別発生比率で按分する。

このようにして得られた結果を第2.2表の5段目に示す。検討地域における51.5年間の竜巻の発生総数は1222個、その8割弱がF0、2割弱がF1と推定された。また、F2竜巻は、実際の観測数は51.5年間で13個であったが、海上竜巻を考慮したため、疑似データでは45個に増加している。

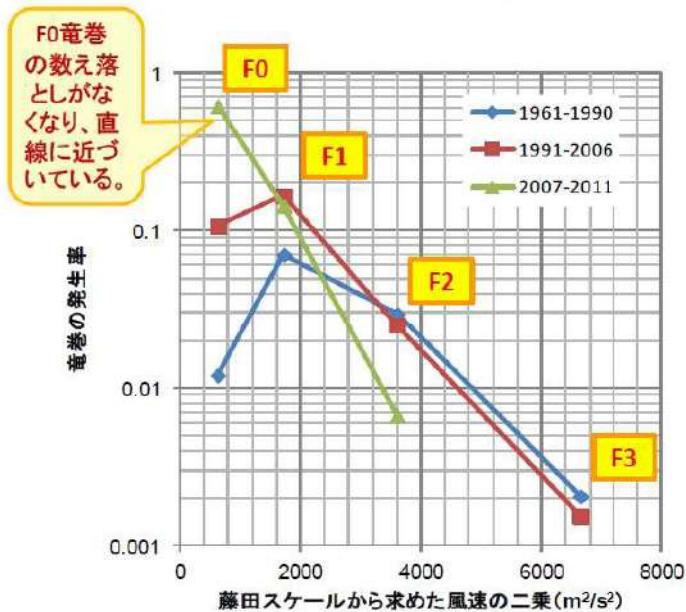
また、第2.1図に示す日本における竜巻強度分布の変遷より、理想的な竜巻強度分布（縦軸：竜巻の発生率、横軸：風速の二乗）は直線上になる。今回の実施した疑似データ作成方法においても、直線となる期間からFスケールごとの使用データを選定しており、適切な方法と考えられる。

第 2.1 表 年代による竜巻の発生確認数の違い

年代	竜巻の発生確認数
1961年～1990年	<ul style="list-style-type: none"> ・ 当時から気象庁が竜巻として公表していたものに、災害報告、調査・研究報告、新聞などの資料からあらためて収集した事例のうち一定規模以上のものから、気象庁が竜巻と判定したものを加えた数。(当時存在が明らかでなかったダウンバーストも本事例に含まれている可能性がある)。 ・ <u>被害のない海上竜巻は含んでいない。</u>
1991年～2006年	<ul style="list-style-type: none"> ・ 災害報告、調査・研究報告、新聞などの資料からあらためて収集した全ての事例から、気象庁が竜巻と判定したものの数。 ・ <u>被害のない海上竜巻も含んでいるが、目撃情報のうち集約できているものは一部に限られている。</u>
2007年～	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>気象庁が突風事例の調査体制を強化し、評価の精度が向上。</u> ・ 報道や目撃情報等も含めた広範な情報源から収集した事例から、気象庁が竜巻と判定したものの数。 ・ <u>幅広く情報を入手していることから、海上竜巻の発生確認数が格段に増加。</u>

第 2.2 表 竜巻発生数の分析結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	87	29	45	13	0	12	110	209
	平均値(年)	1.69	0.56	0.87	0.25	-	0.23	2.14	4.06
	標準偏差(年)	2.53	1.99	1.03	0.52	-	0.68	5.89	7.91
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	58	29	26	3	0	11	110	179
	平均値(年)	2.70	1.35	1.21	0.14	-	0.51	5.12	8.33
	標準偏差(年)	3.49	2.95	1.15	0.36	-	0.98	8.37	10.98
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	31	25	6	0	0	5	92	128
	平均値(年)	5.64	4.55	1.09	-	-	0.91	16.73	23.27
	標準偏差(年)	6.22	4.94	1.34	-	-	1.69	10.96	15.13
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	358	235	63	13	0	47	862	1220
	平均値(年)	6.92	4.55	1.21	0.25	-	0.91	16.73	23.64
	標準偏差(年)	5.37	4.94	1.15	0.52	-	1.69	10.96	12.21
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1222	962	215	45	0	0	0	1222
	平均値(年)	23.57	18.59	4.12	0.86	-	-	-	23.57
	標準偏差(年)	9.91	9.63	2.13	0.96	-	-	-	9.91



竜巻強度分布とは

- 縦軸に竜巻等の発生率、横軸に風速の二乗をとってグラフにしたもの。
- 突風の覚知もれがなく、かつ理想的な突風の強さのスケールを用いると縦軸に対数をとった場合に直線状になる (Dotzek *et al.* 2005)。
- 竜巻等突風の発生状況の実態把握や調査体制・スケールの改善に広く利用される (Brooks *et al.* 2001; Feuerstein *et al.* 2005)。

Dotzek et al., 2005: *GRL* **32**, DOI:10.1029/2005GL024583.
 Brooks and Doswell III, 2001: *Atmos. Res.* **56**, 191-202.
 Feuerstein et al., 2005: *J. Climate* **18**, 585-596.

第 2.1 図 日本における竜巻強度分布の変遷
 (出典：気象庁「竜巻等突風の強さの評定に関する検討会」第一回資料 3)

2.3 年発生数の確率密度分布の設定

設定に当たっては、竜巻は気象事象の中でも極めてまれに発生する事象であり、発生数の変動（標準偏差）が大きい分布であることから、東京工芸大学委託成果にならってポリヤ分布により設定した。

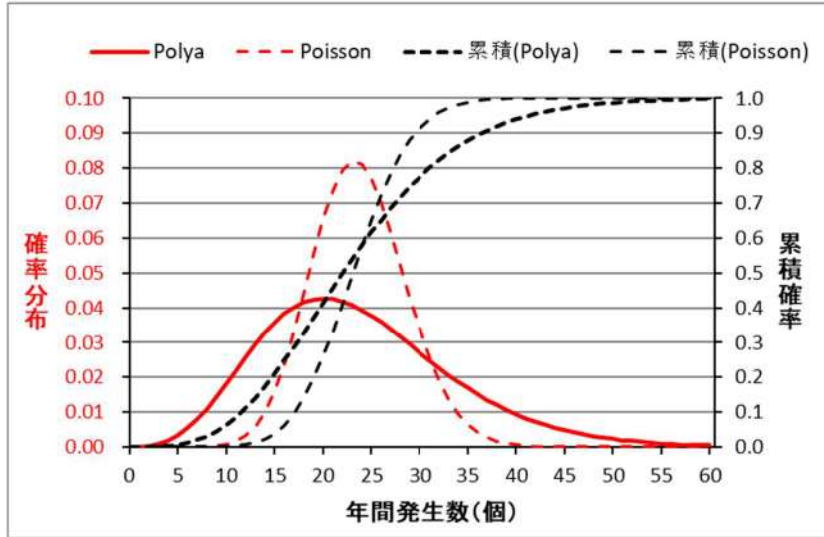
第2.2図は、求められた発生数の平均値（23.73個）と標準偏差（9.91個）に対するポアソン分布とポリヤ分布である。ポアソン分布（破線）は平均値のみで決まるが、ポリヤ分布（実線）は標準偏差の影響を受けるため、かなり幅の広い分布形となっている。なお、これらの分布形に関しては【参考資料2】で述べる（式(1)、(2)参照）。

さらに、擬似データを作成した時の基本的な考え方に則り、発生数のシミュレーションを行い、どのような竜巻発生数の推移を想定しているかを検討した。

具体的には、Fスケール毎に採用した期間内の観測値及び不明な陸上・海上竜巻が、繰り返しランダムに現れるものとして、各年の発生数をシミュレーションし、52年間の発生数データを作成する。そのデータを観測値と見なした場合に、関数形を推定し第2.2図の結果と比較する。

例えばF0の場合、信頼できるデータは最近5～6年間のデータしかないため、この内の一個のデータを乱数により抽出し、その年のF0の発生数のデータとする。F0に加えるべき陸上の不明や、海上竜巻についても、乱数を発生させて毎年の発生数をシミュレーションする。F1～F3についても同様であり、これら全ての発生数を合算し、その年の発生数とする。

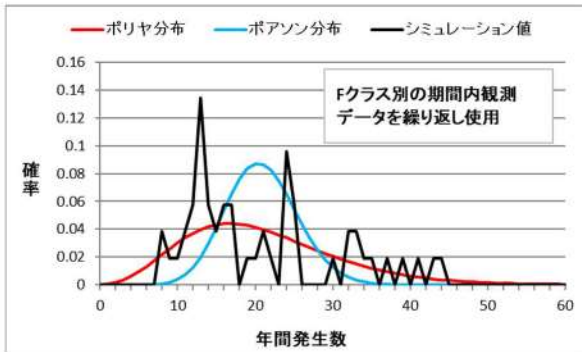
第2.3図(a)は、このようにして作成した52年間の発生数時系列の一例である。F0や不明竜巻に関する最近の増加特性を反映させている。同図(b)(c)は、シミュレーションされた発生数の確率分布を推定した結果である。この結果は、第2.2図の結果と非常に類似していることがわかる。また、ポアソン分布に比べて、ポリヤ分布の方が発生数への適合度は高いと言える。



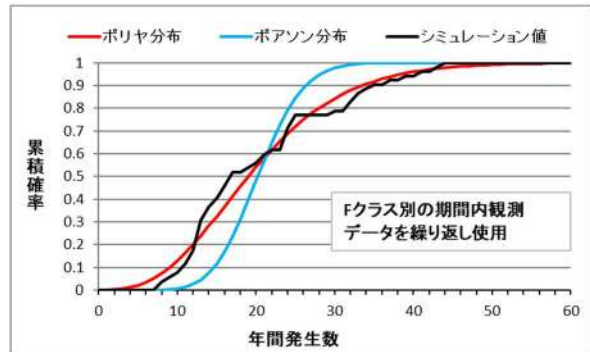
第2.2図 竜巻年発生数の確率分布（赤）と累積分布（黒）



(a) 発生数の時系列



(b) 分布関数の比較



(c) 累積確率

第2.3図 発生数シミュレーションの結果

3. 竜巻の被害幅、被害長さの分析

竜巻発生数と同様にして、3つの観測期間を対象にして、被害幅の観測データを解析した結果を第3.1表に示す。ここで記載した不明とは、被害幅とFスケールの両方若しくは片方が不明であることを表す。また、気象庁のデータベース上で、被害幅が0mと記録されている竜巻も不明扱いとし、解析対象からは除外した。

本竜巻検討地域では、51.5年間に209個の竜巻が観測されているが、Fスケールが分かっているものが87個（第2.2表の1段目の小計）、Fスケールと幅の両方が分かっているものが63個（第3.1表の1段目の小計）である。被害幅の解析に利用可能なデータ数は、発生数のデータ数に比べて少ないことが分かる。先に推定したFスケールごとの発生数（第2.2表）との整合性も確保する必要がある。そこで、以下のようにして51.5年間の被害幅の統計量を推定した。

- ① 統計量を確保するために、1961年以降の観測データを使用し、Fスケール別に被害幅データを抽出する。このデータを基に、Fスケール別に被害幅のデータや平均値・標準偏差を求める（第3.1表の上段）。
- ② 各スケール別の51.5年間のデータ数は、①で得られる観測値ではなく、第2.2表で推定された51.5年間の疑似データの発生数とする。
- ③ 具体的には、①で抽出されたFスケール別の被害幅データを大きい順に並び替え^{*}、②で設定した51.5年間の発生数分だけ繰り返し集積を行い、51.5年間の疑似データ（幅のデータ）を作成する。
- ④ 作成された疑似データの平均値や標準偏差を求める。

※：51.5年間の発生数分だけ繰り返し集積する際に、より大きな被害幅データを集積することで保守的なデータとなるように、大きい順に並べ替えた。

このようにして求めた結果を第3.1表の最下段に示す。Fスケール別の平均値や標準偏差は、繰り返し集積を行っている関係で、最上段の観測値とは若干異なっている（若干大きい）。以上により、Fスケールごとの被害幅の発生特性を保持しつつ、発生数との整合性を確保することができる。

被害長さについても、被害幅と同様の解析を行った。結果を第3.2表に示す。

第 3.1 表 被害幅の解析結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	被害幅 の統計 (m)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	63	24	32	7	0	36	110	209
	平均値 (m)	118	116	109	167	-			
	標準偏差 (m)	146	124	103	324	-			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	50	24	24	2	0	19	110	179
	平均値 (m)	115	116	118	65	-			
	標準偏差 (m)	115	124	113	49	-			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	28	22	6	0	0	8	92	128
	平均値 (m)	119	121	113	-	-			
	標準偏差 (m)	115	128	66	-	-			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1222	962	215	45	0	0	0	1222
	平均値 (m)	118	116	112	179	-			
	標準偏差 (m)	132	122	102	314	-			

第 3.2 表 被害長さの解析結果

竜巻検討地域 (沿岸±5km)	被害長さ の統計 (km)	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	67	25	34	8	0	32	110	209
	平均値 (km)	2.315	1.072	3.147	2.663	-			
	標準偏差 (km)	3.775	1.443	4.839	3.054	-			
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	51	25	23	3	0	18	110	179
	平均値 (km)	1.437	1.072	1.826	1.500	-			
	標準偏差 (km)	1.803	1.443	2.182	1.323	-			
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	28	22	6	0	0	8	92	128
	平均値 (km)	1.700	1.168	3.650	-	-			
	標準偏差 (km)	2.247	1.515	3.544	-	-			
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	1222	962	215	45	0	0	0	1222
	平均値 (km)	1.550	1.082	3.391	2.773	-			
	標準偏差 (km)	2.654	1.421	4.962	2.948	-			

4. 竜巻最大風速，被害幅，被害長さの確率分布，相関係数

竜巻ハザードを評価するためには，一つの竜巻が発生した際の，竜巻最大風速・被害幅・被害長さの確率分布が必要となる。そこで，本竜巻検討地域における51.5年間の竜巻の発生数・被害幅・被害長さのデータ（第4.1表）を用いて各確率密度分布を求める。その際，竜巻影響評価ガイド並びに東京工芸大学委託成果を参照して，確率密度関数が対数正規分布に従うものとした。

①竜巻最大風速の確率密度分布

Fスケールの竜巻風速には幅があるため，具体的な風速の設定方法には任意性があり，Fスケールの範囲内のある値（中央値等）に設定する方法やFスケールの風速範囲内で一様に分布すると仮定する方法等が考えられる。

第4.1図に竜巻最大風速が中央値に集中した場合（黒い実線）及び一様に分布するとした場合（赤い実線）について，風速の分布形（超過確率）を推定した結果を示す。

●印は，各Fスケール下限値における観測値（疑似51.5年間データ）の超過確率を表しており，例えば，F0の下限値(17m/s)以上となる確率は1.0，F1の下限値(33m/s)以上となる確率は約0.2である。また，○印は，F3が1個観測された場合を仮定してプロットをした。

ハザード解析においては，特定の風速以上となる確率が重要であることから，●印で表された観測値ベースの超過確率と適合度が高い分布形が望ましい。第4.1図(a)の○印も含めて評価すると，中央値の方が一様分布の場合よりも適合度が良いと言える。

一方，後述のハザード解析において，竜巻最大風速が中央値に集中した場合及び一様分布するとした場合で計算した結果，第4.2図のとおり一様分布とした場合の方が中央値で代表させる場合よりも厳しいハザード曲線となっている。

以上より，ハザードを保守的に評価するとの観点から，風速分布としては一様分布を採用した。風速分布を一様分布とした場合の竜巻最大風速の確率密度分布，年超過確率分布の算定結果を第4.3図に示す。算定結果は，超過確率の図より観測結果を適切に推定できており，風速の大きいエリアにおいても不自然な形となっていないことがわかる。

②竜巻の被害幅の確率密度分布

竜巻の被害幅は，竜巻最大風速とは異なり具体的な値が直接観測されていることから，任意性はなく，観測値から作成した疑似データに基づき，確率密度分布を推定する。

竜巻の被害幅の確率密度分布，年超過確率分布の算定結果を第4.4図に示す。算定結果は，超過確率の図より観測結果を適切に推定できていることがわかる。

③竜巻の被害長さの確率密度分布

竜巻の被害長さは、竜巻最大風速とは異なり具体的な値が直接観測されていることから、任意性はなく、観測値から作成した疑似データに基づき、確率密度分布を推定する。

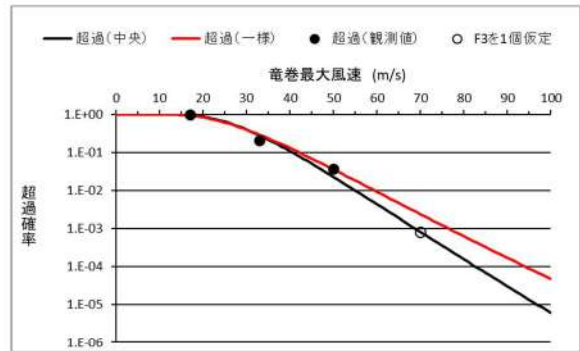
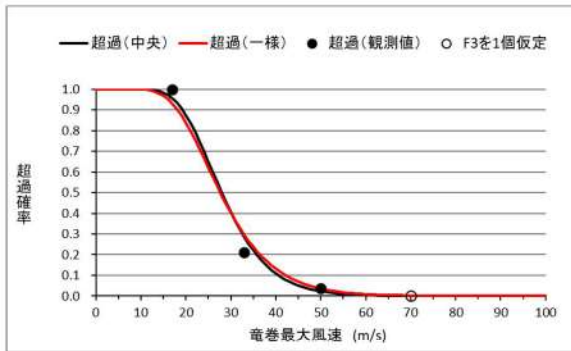
竜巻の被害長さの確率密度分布、超過確率分布の算定結果を第4.5図に示す。算定結果は、超過確率の図より観測結果を適切に推定できていることがわかる。

ハザード曲線を算定する際、2変量又は3変量の確率分布関数を対象とするため、竜巻最大風速、被害幅、被害長さの相関係数の検討を実施した。相関係数は、1961年以降の観測データで、3変量が同時に観測されているデータを用いるのが理想的であるが、十分なデータ数を確保するため、風速と幅のみが観測されているデータ等、2変量の比較が行える観測データも併せて用いて相関係数を算定した。

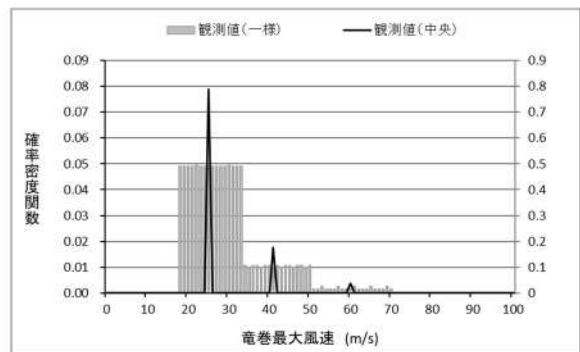
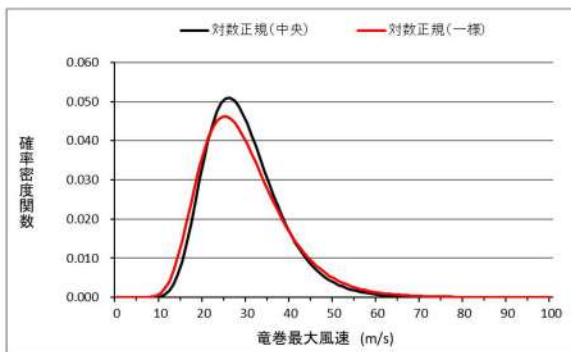
なお、竜巻最大風速、被害幅、被害長さの確率密度分布の推定では、発生頻度が重要であるために繰り返しサンプリングを行ったデータを用いたが、以下の理由により、相関係数の推定ではそのような措置を行わず、観測の元データを基に推定した。

Fスケール不明やF0竜巻では、被害規模が小さいために被害幅や被害長さの観測データがF2竜巻に比べて得られる機会が少なく、ばらつきも大きいものと考えられる。そのようなデータをサンプリングにより増やすと、F2竜巻で見られる相関の高さが反映されない算定結果になることが懸念される。

第4.2表に示す算定結果によれば、本竜巻検討地域では、竜巻最大風速と被害長さには0.32程度、被害幅と被害長さには、0.46程度の相関が認められた。相関を求めた際のデータ数、平均値、標準偏差及び相関係数を第4.2表に示す。

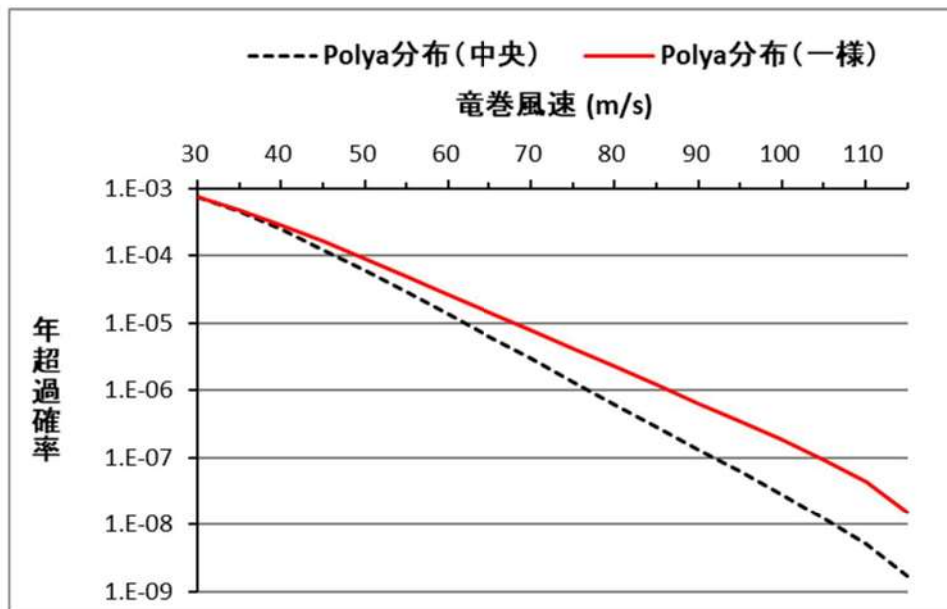


(a) 超過確率



(b) 確率密度関数 (左：推定値, 右：観測値)

第4.1図 竜巻最大風速の確率分布の推定結果と観測値の比較



第4.2図 風速分布の違いによる竜巻最大風速のハザード曲線の比較
(陸側及び海側それぞれ5 kmの範囲)

第 4.1 表 竜巻検討地域における竜巻パラメータ (51.5 年間の推定結果)

	パラメータ	統計量	小計	竜巻スケール			
				F0	F1	F2	F3
疑似 51.5年間 (全竜巻)	発生数	期間内総数	1222	962	215	45	0
		年平均(個)	24	19	4	1	-
		標準偏差(個)	10	10	2	1	-
	被害幅	期間内総数	1222	962	215	45	0
		平均値(m)	118	116	112	179	-
		標準偏差(m)	132	122	102	314	-
	被害長	期間内総数	1222	962	215	45	0
		平均値(km)	1.550	1.082	3.391	2.773	-
		標準偏差(km)	2.654	1.421	4.962	2.948	-

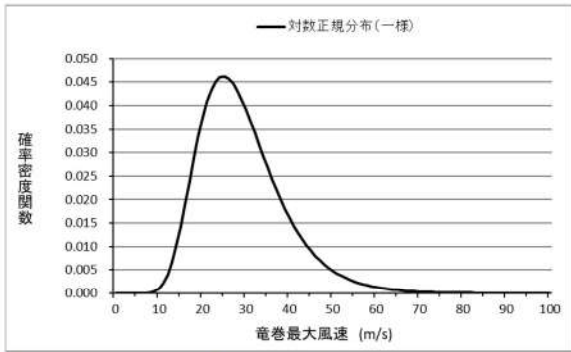
第 4.2 表(1) 相関係数算定に用いた竜巻最大風速, 被害幅, 被害長さのデータ数
(単位: 個)

データ数	竜巻最大風速	被害幅	被害長さ
竜巻最大風速	87	63	67
被害幅	63	66	61
被害長さ	67	61	68

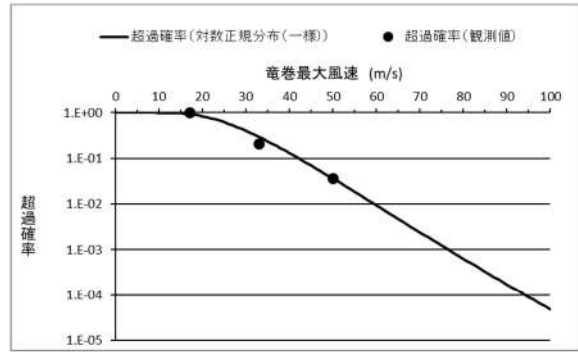
第 4.2 表(2) 竜巻最大風速, 被害幅, 被害長さの相関係数 (単位無し)

相関係数	竜巻最大風速	被害幅	被害長さ
竜巻最大風速	1.000	-0.060*	0.319
被害幅	-0.060*	1.000	0.458
被害長さ	0.319	0.457	1.000

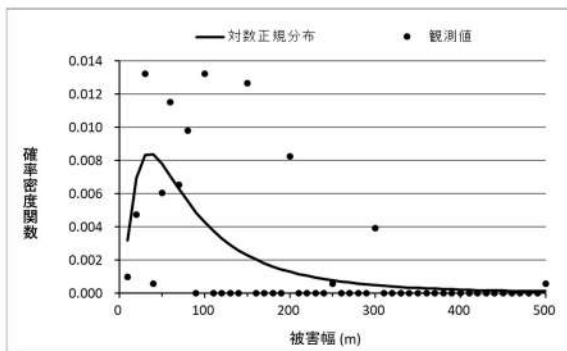
*竜巻最大風速と被害幅は無相関との知見が得られたため, ハザード算定の際には, 相関係数0として計算



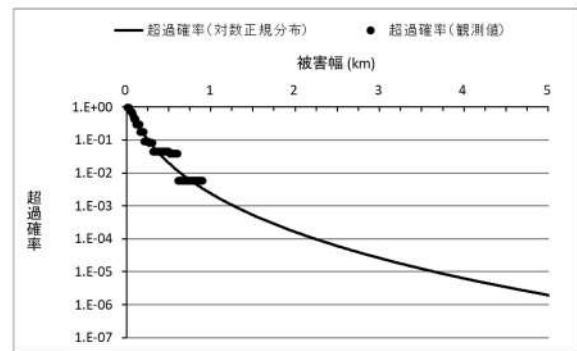
第 4.3 図(1) 竜巻最大風速の確率密度分布



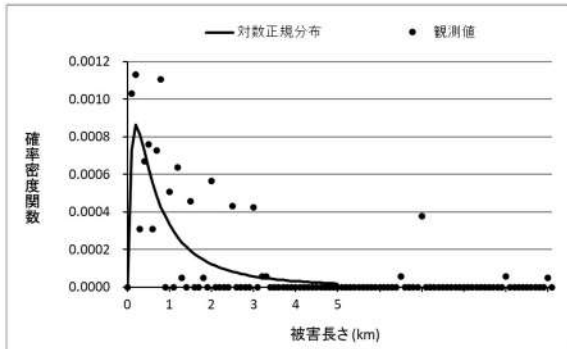
第 4.3 図(2) 竜巻最大風速の超過確率分布



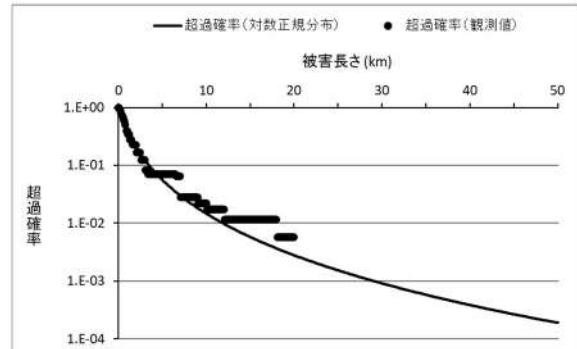
第 4.4 図(1) 被害幅の確率密度分布



第 4.4 図(2) 被害幅の超過確率分布



第 4.5 図(1) 被害長さの確率密度分布



第 4.5 図(2) 被害長さの超過確率分布

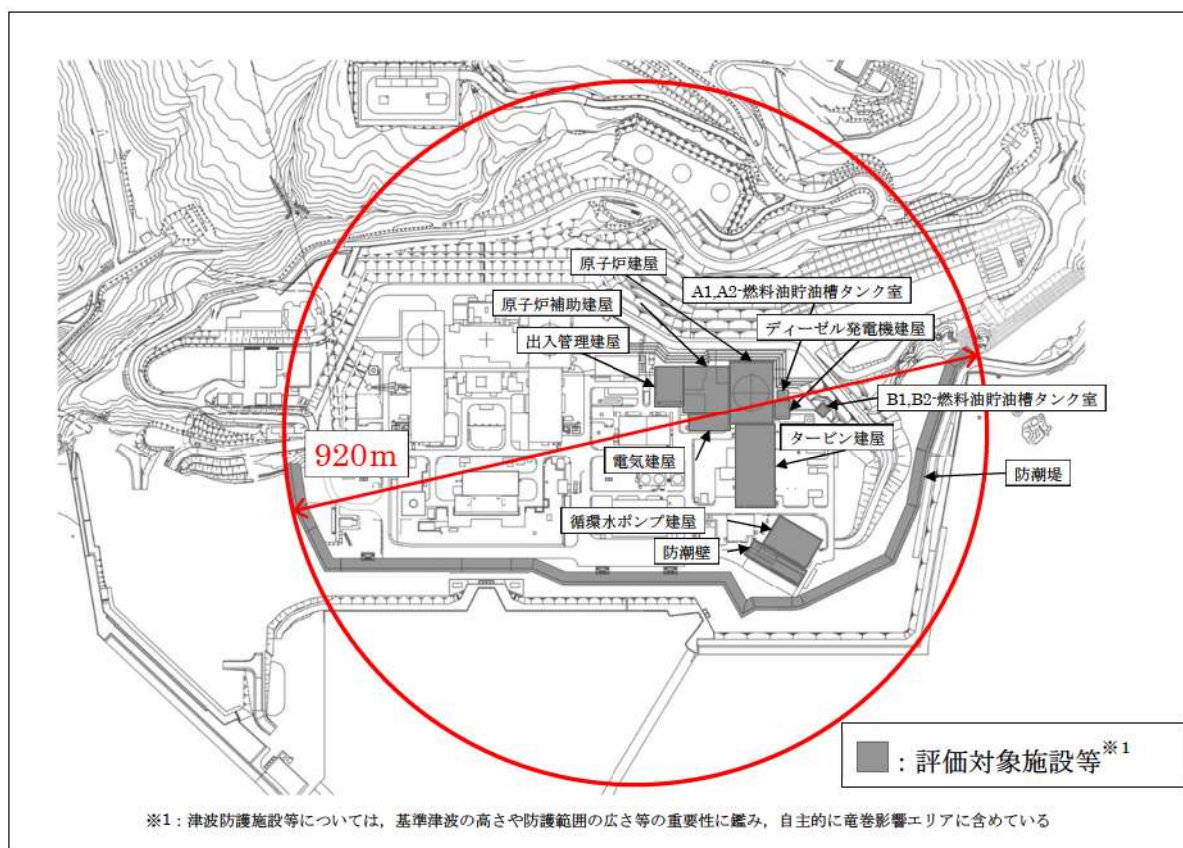
5. 竜巻影響エリア

竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) の算定に当たり、 V_{B2} の発生エリアである竜巻影響エリアを設定する。竜巻影響エリアは、泊発電所3号炉の評価対象施設等を十分な余裕をもって包絡するエリアとして設定する。

第5.1図に泊発電所3号炉の竜巻影響エリアを示す。

竜巻影響エリアは、泊発電所3号炉の評価対象施設を包絡する円形のエリア（直径920m、面積約664,000 m^2 ）として設定した。

なお、竜巻影響エリアを円形とするため、竜巻移動方向の依存性はない（式(6.8)及び式(6.6')参照）。



第5.1図 評価対象施設の位置

6. ハザード曲線の算定

東京工芸大学委託成果によれば、Wen and Chu は、竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速がある値以上になる確率モデルの推定法を提案している。竜巻の発生がポアソン過程に従うと仮定した場合、竜巻の年発生数の確率分布は、式(6.1)に示すポリヤ分布の適合性が良いとされている。本ハザード曲線の算定においても、東京工芸大学委託成果にならって適合性の良いポリヤ分布により設定した。

$$P_T(N) = \frac{(\nu T)^N}{N!} (1 + \beta \nu T)^{-N-1/\beta} \prod_{k=1}^{N-1} (1 + \beta k) \quad (6.1)$$

ここで、

N : 竜巻の年発生数

ν : 竜巻の年平均発生数

T : 年数

σ : 竜巻の年発生数の標準偏差

$$\beta = \left(\frac{\sigma^2}{\nu} - 1 \right) \times \frac{1}{\nu} \quad (6.2)$$

対象とする構造物が、1つの竜巻に遭遇し、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率を $R(V_0)$ とした時、 T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率は式(6.1)から導出され以下の式(6.3)となる。

$$P_{V_0, T}(D) = 1 - [1 + \beta \nu R(V_0) T]^{-1/\beta} \quad (6.3)$$

ここで、

D : 対象とする構造物が風速 V_0 以上の竜巻に遭遇する事象

$R(V_0)$: リスク評価対象構造物が1つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が V_0 以上となる確率

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0} \quad (6.4)$$

$DA(V_0)$: 竜巻による構造物の被害面積

$E[DA(V_0)]$: $DA(V_0)$ の期待値

A_0 : リスクの評価対象とする地域の面積

次に、 $E[DA(V_0)]$ の求め方を説明する。

1個の竜巻の風速が V_0 以上となる面積 $DA(V_0)$ は以下のように表される。

$$\begin{aligned} DA(V_0) &= WL + HL + WG + AB & ; V_i \geq V_0 \\ DA(V_0) &= 0 & ; V_i < V_0 \end{aligned} \quad (6.5)$$

ここで、 W は竜巻の被害幅、 L は被害長さ、 A, B は構造物の寸法、 H と G は竜巻の被害幅や長さ方向への構造物の投影長さである。

上記の関係を、竜巻最大風速・被害幅・被害長さ・竜巻移動方向の確率密度分布を用いると、 $DA(V_0)$ の期待値は式(6.6)のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
 E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\
 &+ \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty H(\alpha) l f(V, l, \alpha) dV dl d\alpha + \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) G(\alpha) f(V, w, \alpha) dV dw d\alpha \quad (6.6) \\
 &+ AB \int_{V_0}^\infty f(V) dV
 \end{aligned}$$

ここで、

V : 竜巻最大風速

W : 竜巻の被害幅

l : 竜巻の被害長さ

α : 竜巻の移動方向

$f(\cdot)$: 確率密度分布

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

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

$$W(V_0) = \left(\frac{V_{\min}}{V_0} \right)^{1/1.6} w \quad (6.7)$$

式(6.6)の右辺第1項は、被害幅と被害長さの積、すなわち被害面積を表しており、いわゆる点構造物に対する被害、第2項と第3項は、被害幅・被害長さ×構造物寸法の積、すなわち面構造物あるいは線状構造物の被害面積を表す。竜巻の幅は長さに比べて短いため、第3項の寄与は第2項に比べて1オーダー小さい。第4項は建物面積 AB に依存する項である。

$W(V_0)$ は、竜巻の被害幅のうち風速が V_0 以上となる部分の幅であり、式(6.7)により算出される。この式により、被害幅内の風速分布に応じて被害様相に分布があることが考慮されている。 V_{\min} は、竜巻被害が発生する最小風速であり、Garson は gale intensity velocity と呼んでいる (gale とは非常に強い風の意)。米国の気象局 (National Weather Service) では、34~47 ノット (17.5~24.2m/s) とされている。日本の気象庁では、気象通報にも用いられている風力階級において、風力8が疾強風 (gale, 17.2~20.7m/s)、風力9は大強風 (strong gale, 20.8~24.4m/s) と分類されており、風力9では「屋根瓦が飛ぶ。人家に被害が出始める」とされている。以上を参考にして、 $V_{\min}=25\text{m/s}$ とした。この値は、F0 (17~32m/s) のほぼ中央値に相当する。なお、この値よりも小さな V_{\min} (例えば、F0 の最小風速 17m/s) を用いると、風速 V_0 以上となる被害面積は小さくなる。

また、 $H(\alpha)$ 及び $G(\alpha)$ はそれぞれ、竜巻の被害長さ及び被害幅方向に沿った面に竜巻影響評価対象構造物を投影した時の長さである。前述の 5. にて竜巻影響エリア

を円形（直径 D_0 ）で設定しているため、竜巻の移動方向には依存せず、一定値となる。

$$H(\alpha) = G(\alpha) = D_0 \quad (6.8)$$

したがって、式(6.6)は式(6.6')と表すことができる。

$$\begin{aligned} E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl \\ &+ D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty l f(V, l) dV dl + D_0 \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw \\ &+ (D_0^2 \pi / 4) \int_{V_0}^\infty f(V) dV \end{aligned} \quad (6.6')$$

2変量、3変量の対数正規分布は、以下の式(6.9)又は式(6.10)のように表される。

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \frac{1}{xy} \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left\{ \left(\frac{\ln(x)-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2 - 2\rho\left(\frac{\ln(x)-\mu_x}{\sigma_x}\right)\left(\frac{\ln(y)-\mu_y}{\sigma_y}\right) + \left(\frac{\ln(y)-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2 \right\}\right] \quad (6.9)$$

$$\begin{aligned} f(x, y, z) &= \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \begin{vmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} \\ \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} \\ \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} & \sigma_z^2 \end{vmatrix}^{1/2}} \times \frac{1}{xyz} \\ &\times \exp\left[-\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \ln(x)-\mu_x & \ln(y)-\mu_y & \ln(z)-\mu_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} \\ \sigma_x\sigma_y\rho_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} \\ \sigma_x\sigma_z\rho_{xz} & \sigma_y\sigma_z\rho_{yz} & \sigma_z^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \ln(x)-\mu_x \\ \ln(y)-\mu_y \\ \ln(z)-\mu_z \end{pmatrix}\right] \end{aligned} \quad (6.10)$$

ここに μ_x , μ_y , μ_z は変量 $\ln(x)$, $\ln(y)$, 及び $\ln(z)$ の平均値であり, σ_x , σ_y , σ_z は変量 $\ln(x)$, $\ln(y)$, 及び $\ln(z)$ の標準偏差を表す。また, ρ_{xy} は $\ln(x)$ と $\ln(y)$ の相関係数を表し, ρ_{yz} 等についても同様である。

なお, 変量 x と $\ln(x)$ の平均値をそれぞれ μ , μ_{\ln} , 標準偏差をそれぞれ σ , σ_{\ln} と表せば, これらの間には以下の関係がある。

$$\sigma_{\ln}^2 = \ln(CV^2 + 1) \quad (6.11)$$

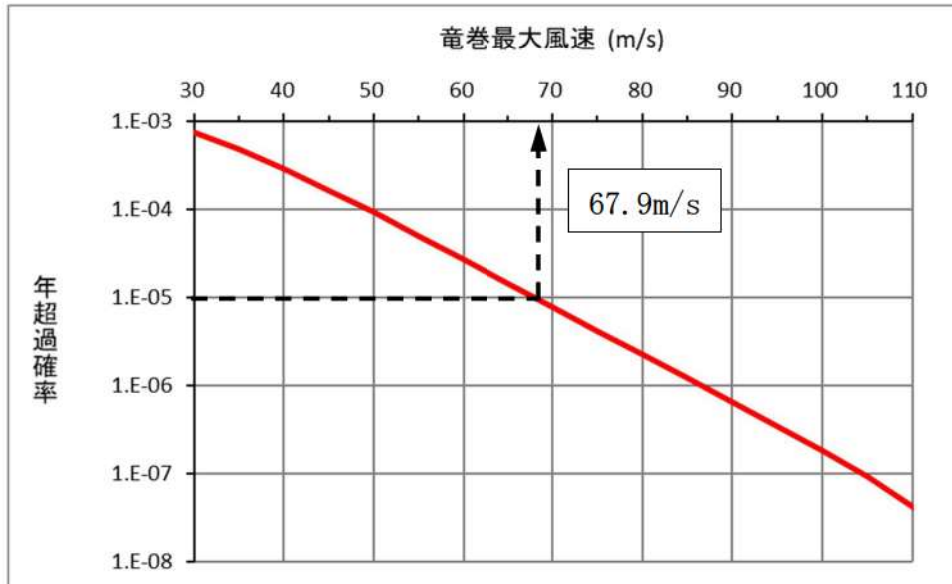
$$\mu_{\ln} = \ln(\mu) - \frac{\sigma_{\ln}^2}{2} \quad (6.12)$$

ここに, CV は変動係数 (σ/μ) である。本評価では上記の関係式を用いて, 4.にて求めた竜巻最大風速, 被害幅, 被害長さの平均値及び標準偏差から μ_x , σ_x 等

を定めた。

竜巻最大風速のハザード曲線の算定結果を第 6.1 図に示す。第 6.1 図より、竜巻影響評価ガイドを参考に年超過確率 10^{-5} に相当する風速は 67.9m/s となった。

なお、竜巻最大風速のハザード曲線の算定において、風速の積分範囲の上限値はハザード曲線の形状が不自然にならない程度に大きな値として 120m/s に設定している【参考資料 4】。



第 6.1 図 竜巻最大風速のハザード曲線（陸側及び海側それぞれ 5 km の範囲）

7. 1 km 範囲ごとの領域での竜巻ハザード曲線について

ガイドに従い、竜巻検討地域を 1 km 範囲ごとに細分化した場合の竜巻最大風速のハザード曲線の算定を行った。算定においては、以下の条件で算定を行った。計算に使用するパラメータは第 7.1 表に示す。

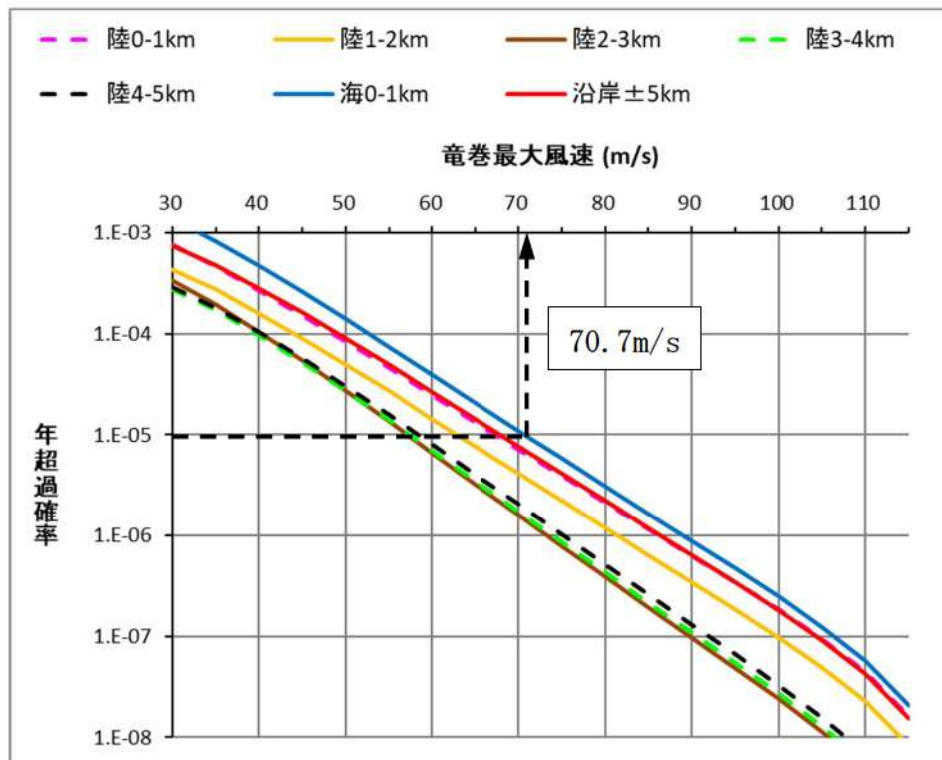
- ・ 被害幅及び被害長さは、それぞれ 1 km 範囲内の被害幅及び被害長さを用いる
- ・ 海側の竜巻発生位置は不明な場合が多く、竜巻移動経路が短冊を横切る長さを精度良く求められないため、海側 0-1km のセグメント長さの評価に陸側 0-1km 短冊の値を代用する方法を用いる
- ・ 1 km 範囲ごとの領域のデータ数は少ないため、相関係数は ± 5 km での値を代用する

第7.1表 保守的なハザード曲線算定に用いるパラメータ

竜巻検討地域 (1kmごとエリア)	統計量	発生数	風速	幅	長さ	相関係数		
		(個)	m/s	m	m	U~W	W~L	W~L
±5km	平均値	23.73	29.1919	117.8969	1550.491	(検討地域±5kmの値を代用)		
	標準偏差	9.91	9.8882	131.5575	2653.688			
陸0-1km	平均値	4.76	29.1388	122.1061	616.184			
	標準偏差	4.07	10.2770	151.6410	447.236			
陸1-2km	平均値	2.06	30.5236	190.9434	768.849			
	標準偏差	2.20	10.4155	170.2353	423.820			
陸2-3km	平均値	2.04	28.6714	176.7619	688.648			
	標準偏差	1.59	9.4043	179.6123	369.356			
陸3-4km	平均値	1.15	31.1864	217.4576	876.983			
	標準偏差	0.82	9.9156	211.2307	309.282			
陸4-5km	平均値	0.97	32.3000	283.6000	1016.240			
	標準偏差	0.95	10.2059	242.5440	185.356			
海0-1km	平均値	9.32	28.7010	91.9833	616.184			
	標準偏差	5.36	9.9741	118.8510	447.236			

以上の条件で算定した竜巻最大風速のハザード曲線を陸側及び海側5kmの範囲内の竜巻最大風速のハザード曲線と併せて第7.1図に示す。

第7.1図より、年超過確率 10^{-5} に相当する風速が最も大きく評価されたのは、陸側0~1km範囲での70.7m/sであった。



第7.1図 竜巻最大風速のハザード曲線
(1 km 範囲ごと及び陸側及び海側それぞれ5 km の範囲)

第7.2表 年超過確率 10^{-5} に対応した竜巻最大風速

短冊ケース	竜巻最大風速[m/s]
陸 0～1km	67.3
陸 1～2km	63.0
陸 2～3km	57.1
陸 3～4km	57.4
陸 4～5km	58.4
海 0～1km	70.7
(参考) 陸側及び海側それぞれ 5 km	67.9

参考に陸側0～1km, 1～2km, 2～3km, 3～4km, 4～5km, 海側0～1kmの竜巻発生・通過数を第7.3～7.8表に示す。

第7.3表 陸側0～1km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸0-1km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	56	18	26	12	0	12	0	68
	平均値(年)	1.09	0.35	0.50	0.23	-	0.23	-	1.32
	標準偏差(年)	1.79	1.38	0.70	0.47	-	0.68	-	2.00
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	36	18	15	3	0	11	0	47
	平均値(年)	1.67	0.84	0.70	0.14	-	0.51	-	2.19
	標準偏差(年)	2.47	2.06	0.79	0.36	-	0.98	-	2.71
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	20	16	4	0	0	5	0	25
	平均値(年)	3.64	2.91	0.73	-	-	0.91	-	4.55
	標準偏差(年)	4.47	3.58	1.09	-	-	1.69	-	4.80
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	245	150	36	12	0	47	0	245
	平均値(年)	4.75	2.91	0.70	0.23	-	0.91	-	4.75
	標準偏差(年)	4.07	3.58	0.79	0.47	-	1.69	-	4.07
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	245	197	36	12	0	0	0	245
	平均値(年)	4.75	3.82	0.70	0.23	-	-	-	4.75
	標準偏差(年)	4.07	3.96	0.79	0.47	-	-	-	4.07

第7.4表 陸側1～2km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸1-2km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	34	10	20	4	0	1	0	35
	平均値(年)	0.66	0.19	0.39	0.08	-	0.02	-	0.68
	標準偏差(年)	1.19	0.77	0.63	0.27	-	0.14	-	1.19
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	23	10	11	2	0	0	0	23
	平均値(年)	1.07	0.47	0.51	0.09	-	-	-	1.07
	標準偏差(年)	1.64	1.16	0.68	0.30	-	-	-	1.64
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	12	8	4	0	0	0	0	12
	平均値(年)	2.18	1.45	0.73	-	-	-	-	2.18
	標準偏差(年)	2.84	2.08	0.86	-	-	-	-	2.84
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	106	75	27	4	0	0	0	106
	平均値(年)	2.04	1.45	0.51	0.08	-	-	-	2.04
	標準偏差(年)	2.20	2.08	0.68	0.27	-	-	-	2.20
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	106	75	27	4	0	0	0	106
	平均値(年)	2.04	1.45	0.51	0.08	-	-	-	2.04
	標準偏差(年)	2.20	2.08	0.68	0.27	-	-	-	2.20

第7.5表 陸側2～3km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸2-3km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	27	10	14	3	0	0	0	27
	平均値(年)	0.52	0.19	0.27	0.06	-	-	-	0.52
	標準偏差(年)	1.02	0.66	0.57	0.24	-	-	-	1.02
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	18	10	7	1	0	0	0	18
	平均値(年)	0.84	0.47	0.33	0.05	-	-	-	0.84
	標準偏差(年)	1.38	0.97	0.57	0.22	-	-	-	1.38
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	12	9	3	0	0	0	0	12
	平均値(年)	2.18	1.64	0.55	-	-	-	-	2.18
	標準偏差(年)	2.22	1.46	0.88	-	-	-	-	2.22
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	105	85	17	3	0	0	0	105
	平均値(年)	2.02	1.64	0.33	0.06	-	-	-	2.02
	標準偏差(年)	1.59	1.46	0.57	0.24	-	-	-	1.59
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	105	85	17	3	0	0	0	105
	平均値(年)	2.02	1.64	0.33	0.06	-	-	-	2.02
	標準偏差(年)	1.59	1.46	0.57	0.24	-	-	-	1.59

第7.6表 陸側3～4km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸3-4km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	21	4	16	1	0	0	0	21
	平均値(年)	0.41	0.08	0.31	0.02	-	-	-	0.41
	標準偏差(年)	0.67	0.27	0.58	0.14	-	-	-	0.67
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	12	4	8	0	0	0	0	12
	平均値(年)	0.56	0.19	0.37	-	-	-	-	0.56
	標準偏差(年)	0.75	0.40	0.59	-	-	-	-	0.75
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	7	4	3	0	0	0	0	7
	平均値(年)	1.27	0.73	0.55	-	-	-	-	1.27
	標準偏差(年)	1.04	0.55	0.88	-	-	-	-	1.04
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	59	38	20	1	0	0	0	59
	平均値(年)	1.12	0.73	0.37	0.02	-	-	-	1.12
	標準偏差(年)	0.80	0.55	0.59	0.14	-	-	-	0.80
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	59	38	20	1	0	0	0	59
	平均値(年)	1.12	0.73	0.37	0.02	-	-	-	1.12
	標準偏差(年)	0.80	0.55	0.59	0.14	-	-	-	0.80

第7.7表 陸側4～5km範囲の竜巻発生・通過数

竜巻検討地域 (陸4-5km)	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	18	3	14	1	0	0	0	18
	平均値(年)	0.35	0.06	0.27	0.02	-	-	-	0.35
	標準偏差(年)	0.66	0.24	0.63	0.14	-	-	-	0.66
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	11	3	8	0	0	0	0	11
	平均値(年)	0.51	0.14	0.37	-	-	-	-	0.51
	標準偏差(年)	0.75	0.36	0.74	-	-	-	-	0.75
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	7	3	4	0	0	0	0	7
	平均値(年)	1.27	0.55	0.73	-	-	-	-	1.27
	標準偏差(年)	1.04	0.58	1.28	-	-	-	-	1.04
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	50	29	20	1	0	0	0	50
	平均値(年)	0.94	0.55	0.37	0.02	-	-	-	0.94
	標準偏差(年)	0.94	0.58	0.74	0.14	-	-	-	0.94
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	50	29	20	1	0	0	0	50
	平均値(年)	0.94	0.55	0.37	0.02	-	-	-	0.94
	標準偏差(年)	0.94	0.58	0.74	0.14	-	-	-	0.94

第7.8表 海側0～1km範囲の竜巻発生・通過数

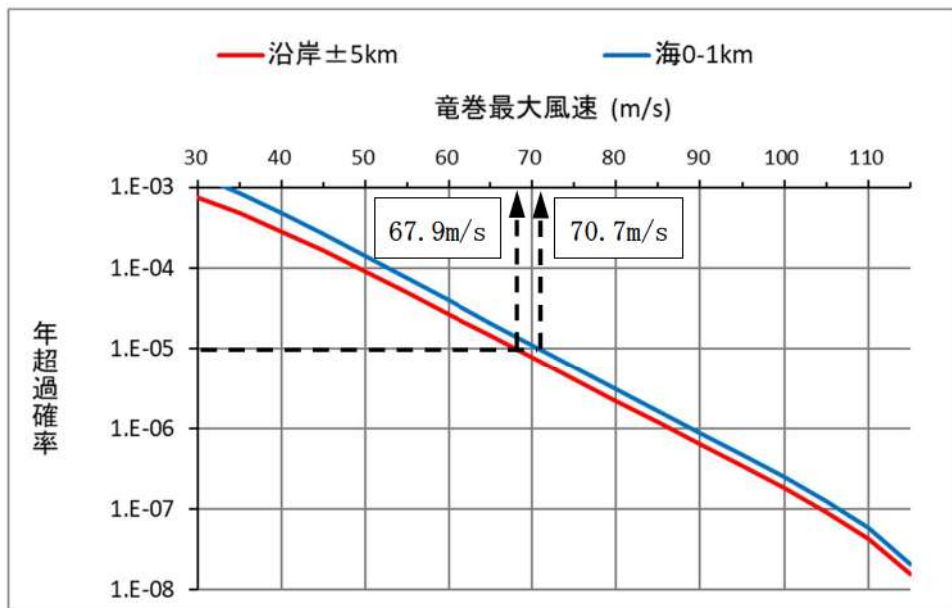
竜巻検討地域 (海0-1km)	発生数 の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数 (含む不明)
			F0	F1	F2	F3	(陸上)	(海上)	
1961～ 2012/6 (51.5年間)	期間内総数	31	10	14	7	0	11	40	82
	平均値(年)	0.60	0.19	0.27	0.14	-	0.21	0.78	1.59
	標準偏差(年)	1.11	0.89	0.53	0.35	-	0.67	2.47	3.44
1991～ 2012/6 (21.5年間)	期間内総数	21	10	8	3	0	10	40	71
	平均値(年)	0.98	0.47	0.37	0.14	-	0.47	1.86	3.30
	標準偏差(年)	1.55	1.35	0.67	0.36	-	0.97	3.61	4.86
2007～ 2012/6 (5.5年間)	期間内総数	11	9	2	0	0	5	34	50
	平均値(年)	2.00	1.64	0.36	-	-	0.91	6.18	9.09
	標準偏差(年)	2.71	2.48	0.86	-	-	1.69	5.56	7.58
疑似 51.5年間 (陸上竜巻)	期間内総数	159	85	20	7	0	47	319	478
	平均値(年)	3.05	1.64	0.37	0.14	-	0.91	6.18	9.24
	標準偏差(年)	3.09	2.48	0.67	0.35	-	1.69	5.56	6.36
疑似 51.5年間 (全竜巻)	期間内総数	480	397	61	22	0	0	0	480
	平均値(年)	9.18	7.65	1.12	0.41	-	-	-	9.18
	標準偏差(年)	5.36	5.20	1.15	0.60	-	-	-	5.36

8. 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})

第 8.1 図に、海岸線から陸側及び海側それぞれ 5 km の範囲全域 (竜巻検討地域) 及び竜巻検討地域を 1 km 範囲ごとに細分化した場合の竜巻最大風速のハザード曲線を示す。

第 8.1 図より、陸側及び海側それぞれ 5 km の範囲全域を対象とした場合の年超過確率 10^{-5} における風速は 67.9m/s、竜巻検討地域を 1 km 範囲ごとに細分化した場合の年超過確率 10^{-5} における風速は 70.7m/s (海側 0～1km) となった。

よって、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2}) は、陸側及び海側それぞれ 5 km の範囲全域及び 1 km 範囲の竜巻最大風速のハザード評価結果のうち大きい方を採用し、 $V_{B2}=70.7\text{m/s}$ とする。



第 8.1 図 竜巻最大風速のハザード曲線
(陸側及び海側それぞれ 5 km の範囲及び 1 km 範囲)

【参考資料 1】

海上のFスケール不明竜巻の按分方法の妥当性について

51. 5年間の疑似データを推定する際に、海上で発生したFスケール不明竜巻（非上陸竜巻）を、Fスケールが判明している陸上竜巻（含む上陸竜巻）のFスケールごとの発生比率で按分している。そこでは、沿岸部近傍での竜巻の発生特性は陸上と海上とでは類似している、と仮定している。他の合理的な按分方法も無いのが実情ではあるが、観測結果を基に、この仮定の妥当性について考察する。

ここでは、陸上で発生した竜巻（以下「陸上竜巻」という。）と、水上で発生しその後上陸した竜巻（以下「上陸竜巻」という。）を区別して考える。

表1及び図1は、陸上竜巻、上陸竜巻及び（陸上＋上陸）竜巻のそれぞれの竜巻区分に対して、F0, F1, F2以上の竜巻が占める割合である。全国の上陸竜巻の場合、Fスケールごとの割合はそれぞれ31, 45, 24%となっており、陸上竜巻との間に大きな差は無い（数%以内）。上陸竜巻は海上で発生した竜巻であることから、海上でのFスケール不明竜巻のFスケールごとの発生割合は、上陸竜巻の発生割合と同様だと考えられる。

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

一方、竜巻検討地域の上陸竜巻の場合、Fスケールごとの割合はそれぞれ49, 33, 18%であり、陸上竜巻の値と10～20%程度異なる。竜巻検討地域の場合、F0の割合が全国の値に比べて大きく、逆にFスケールの大きな竜巻の割合が同程度少なくなっており、地域的な特性が見られる。上陸竜巻と陸上竜巻の割合の差が、地域特性によるものかデータ数が少ない事によるものか判断できないが、（陸上＋上陸）竜巻の割合は、全国の値に比較的近くなる（F0の数が多いという地域特性は残る）。したがって、（陸上＋上陸）竜巻の割合で按分する本手法は、データ数が少ない場合にも有効な手法だと考えられる。

表1 Fスケールごとの竜巻発生数の割合

(a) 全国沿岸±5km

発生数の割合 (%)	F0 (+不明)	F1	F2以上
陸上竜巻	32	50	18
上陸竜巻	31	45	24
(陸上+上陸)	32	48	20

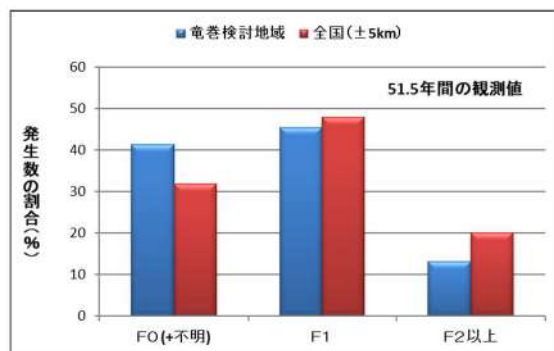
(b) 竜巻検討地域

発生数の割合 (%)	F0 (+不明)	F1	F2以上
陸上竜巻	37	53	10
上陸竜巻	49	33	18
(陸上+上陸)	41	45	13



(a) 全国±5km

(b) 竜巻検討地域



(c) (陸上+上陸) 竜巻

図1 Fスケールごとの発生数の割合

【参考資料 2】

竜巻発生数の確率分布（ポアソン，ポリヤ分布）がハザード結果に及ぼす影響

1. 竜巻発生確率とハザード曲線

Wen and Chu は、竜巻に遭遇し、かつ竜巻風速がある値以上となる確率の推定法を提案している。それによれば、竜巻の発生がポアソン過程に従うと仮定した場合、竜巻の年発生数の確率分布はポアソン分布若しくはポリヤ分布に適合する。

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

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

ここで、Nは竜巻の年発生数、 v は竜巻の年平均発生数、Tは年数である。

また、T年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、 V_0 以上の竜巻風速に見舞われる確率 $P_{V_0,T}(D)$ は次式で表される。

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

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

ここで、 $R(V_0)$ は、検討対象とする構造物が、ある一つの竜巻に遭遇し、竜巻風速が V_0 以上となる確率である。

2. ポアソン分布とポリヤ分布

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

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

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

ポリヤ分布は、分散と平均値が異なるような現象への適合度が高く、 β が大きい場合は分散の大きな分布形を表し、 $\beta \rightarrow 0$ の時にはポアソン分布に近づく。Thom(1963) は、米国中部を対象とした竜巻発生数の分析を行い、ポアソン過程が実態と乖離する場合があることを指摘するとともに、ポリヤ分布による適合性が高いことを示した。

また、東京工芸大学委託成果では、陸上竜巻（含む上陸竜巻）及び水上竜巻のいずれに対しても、ポリヤ分布の適合度が高いことを示した。

ポリヤ分布は、疫病の流行、ある単語を含む文書数を数える文書頻度等の言語処理等に活用されており、ある事象が起こった場合に、それによって周囲にも現象が起こりやすくなる現象（弱い伝播性）が考慮されている。竜巻の場合では、前線や台風により竜巻が発生した場合、同時多発的に複数の竜巻が発生する（tornado outbreak と呼ばれる）状況が考えられる（Wen and Chu, 1973）。

3. 確率論から見た近似式

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

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

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

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

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

逆に、 N 個の竜巻が発生したときに、いずれかの竜巻により被害（最低1回、最大 N 回）を受ける確率は次式となる。

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

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

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

となる。 $R(V_0)$ が十分小さければ、上式は次のように近似できる。

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

ここで、次の近似を用いている。

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

竜巻被害の場合、 $R(V_0)$ は通常 10^{-3} 以下であるから、式(10)の近似は非常に良い精度で成り立つ。

以上のことから、式(9)より、1年間にいずれかの竜巻により被害を受ける確率は次式で近似できる。

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

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

4. ポアソン分布とポリヤ分布のハザードの近似式

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

式(8)の $P(N)$ としてポアソン分布を仮定し、

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

となることを考慮すると、式(11)の厳密な式は以下のとおりである。

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

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

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

したがって、式(3) (あるいは式(13)) は、式(14)を用いると、

$$P_{V_0}(D) = 1 - \exp(-\nu R(V_0)) = 1 - \left(1 + \frac{(-\nu R(V_0))}{1!} + \frac{(-\nu R(V_0))^2}{2!} + \dots \right) \quad (15)$$

と表され、 $R(V_0)$ が小さい場合は、次式で近似できる。

$$P_{V_0}(D) \approx \nu R(V_0) \quad (16)$$

ポリヤ分布の場合も同様に、一般の2項定理を用いると、次式で近似できる。

$$\begin{aligned} P_{V_0}(D) &= 1 - [1 + \beta \nu R(V_0)]^{-1/\beta} = 1 - \left(1 + \left(\frac{-1}{\beta} \right) \beta \nu R(V_0) + \dots \right) \\ &\approx \nu R(V_0) \end{aligned} \quad (17)$$

以上のことから、竜巻のように一つの竜巻に対する被害確率が非常に小さな現象に対しては、年被害確率は竜巻発生数の平均値にのみ依存し、発生数の確率分布形状にはほとんど無関係であることが分かる。

【参考資料 3】

竜巻ハザードの推定幅（推定誤差）に関する考察

1. はじめに

自然現象評価では、不確実さの存在を認識することが重要であるため、竜巻ハザードに関わる不確かさの要素について、以下のとおり整理した。

- ① 確率分布形選択に伴う不確実さ（認識論的不確実さ）
確率分布形選択に伴うパラメータ不確実さ
- ② データ量が少ないことに伴う不確実さ（認識論的不確実さ）
データ収集期間が51.5年間分であることから、地震等と比較するとデータ量が少ないことに伴うパラメータ不確実さ
- ③ データの不確実さ（偶発的不確実さ）
今後データ収集が進み、疑似データ同様のデータが収集されたとした場合でも残る、データそのものの不確実さ

これらの不確実さ要素がハザード評価に及ぼす影響について検討する。

2. Jackknife法を用いたハザードの推定誤差

2.1 竜巻パラメータとハザードの推定誤差

疑似データ209個の竜巻データに対して、Jackknife法を適用した。Jackknife法は水文統計分野で広く使用される手法で、国土交通省が定める河川行政の技術分野に関する基準である「河川砂防技術基準」においても、確率分布モデルのバイアスを補正すると共に、その安定性を評価する手法として挙げられている。母集団分布を仮定しないノンパラメトリックな方法であり、高い適用性をもつ。

Jackknife法は大きさ n 個の標本のうち i 番目の 1 データのみを欠いたデータ数 $n-1$ 個の標本をすべての i について作成し (n セット作成することになる)、これらの標本から求めた統計量を基に不偏推定値及びそのまわりの推定誤差を算定する手法である。(具体的な計算方法は後述)

n 個の全データを使って求められた再現期待値 (例えば風速平均値の場合、 n セットの風速平均の平均) を P_0 とすると、バイアス補正した推定値 (以下「Jackknife 推定値」という。) P^* とその標準偏差の推定値 (以下「Jackknife 推定幅」という。) ΔP^* は次式で与えられる。

$$P^* = P_0 + \frac{(N-1)(P_0 - \bar{P})}{N} \quad (1)$$

$$\Delta P^* = \sqrt{N-1} \Delta P \quad (2)$$

- P_0 : N個の全データを使って求められた再現期待値（例えば風速平均値の場合Nセットの風速平均の平均）
- P^* : バイアス補正した推定値（以下「Jackknife 推定値」という。）
- ΔP^* : P^* の標準偏差の推定値（以下「Jackknife 推定幅」という。）
- \bar{P} : 分布を仮定した場合の推定値（以下「推定値」という。）
- ΔP : nセットの風速平均データの標準偏差
- (1)式の下線部 : バイアス（母数の真の値と推定値の差）

本検討で得られた結果を表1に示す。

例えば風速の平均値の場合、Jackknife推定値は29.192m/sであり、対数正規分布を仮定した場合と同じである。また、Jackknife推定幅は0.283m/sと推定される。

これらの平均値と標準偏差、及びそれぞれの推定幅を基に、すべてのパラメータを+1 σ とした場合のハザードを計算した。計算条件の一覧を表2に示す。また、ハザードの推定結果を図1、図2及び表3に示す。

図1よりデータの変動に伴うバイアス誤差は小さいことが確認できる（①、②の不確実さ推定）。ハザードについては表3より、サンプリング誤差に伴う不確実さについて信頼度84%をカバーする値として、年超過確率 10^{-5} において72.23m/sであると言える（③の不確実さを考慮）。

表1 Jackknife 法により得られた竜巻パラメータの特性

竜巻検討地域 (疑似データ 1222 個)	風速 (U)		幅 (W)		長さ (L)		相関係数		
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	U~W	U~L	W~L
平均	29.192	9.888	117.9	131.6	1550.5	2653.7	-0.0600	0.3190	0.4574
標準偏差	0.008	0.008	0.1	0.2	2.2	5.4	0.0194	0.0176	0.0409
全データ	29.192	9.888	117.9	131.6	1550.5	2653.7	-0.0599	0.3190	0.4572
バイアス	0.000	-0.004	0.0	-0.2	0.0	-6.6	-0.0080	-0.0030	0.0083
Jackknife 推定値	29.192	9.893	117.9	131.7	1550.5	2660.3	-0.0518	0.3162	0.4507
Jackknife 推定幅	0.283	0.296	3.8	6.8	75.9	187.3	0.1506	0.1056	0.1325

表2 ハザードの計算条件

ケース名	統計量	発生数	風速	幅	長さ	U~W	U~L	W~L
基本 (全データ)	平均	23.728	29.192	117.897	1550.491	-0.0599	0.3190	0.4572
	標準偏差	9.914	9.888	131.558	2653.688			
バイアス補正後	平均	23.728	29.192	117.897	1550.491	-0.0518	0.3162	0.4507
	標準偏差	9.914	9.893	131.733	2660.295			
風速・幅・長さ・相関 (+1 σ)	平均	23.728	29.475	121.660	1626.404	0.0995	0.4082	0.5503
	標準偏差	9.914	10.188	138.526	2847.556			

注) 発生数の平均と標準偏差は、疑似データの値を使用。

注) 負の相関係数は0と置く。

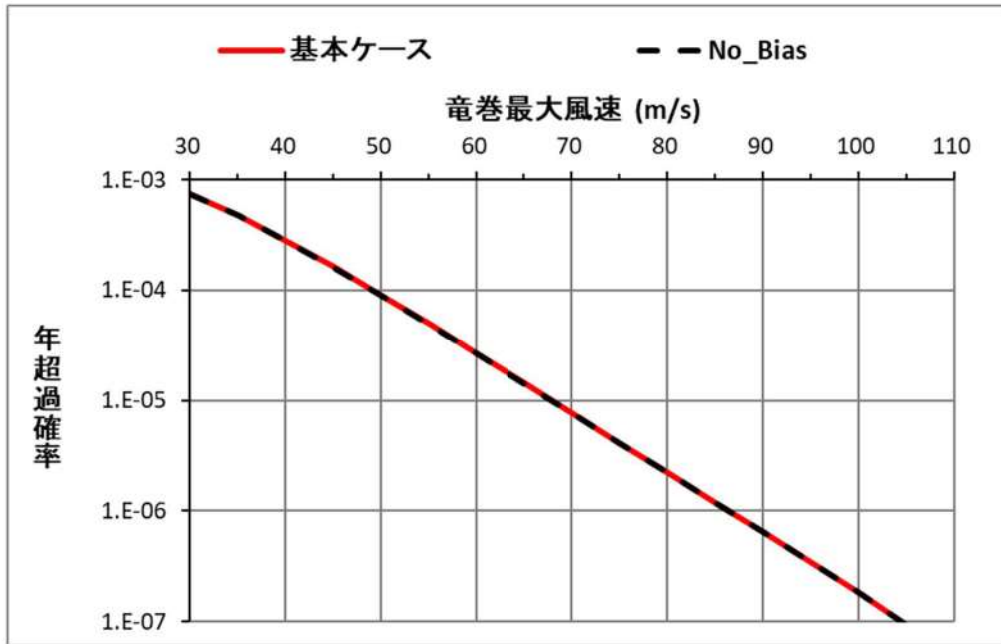


図1 基本ケースとバイアス補正後ケースのハザード算定結果比較

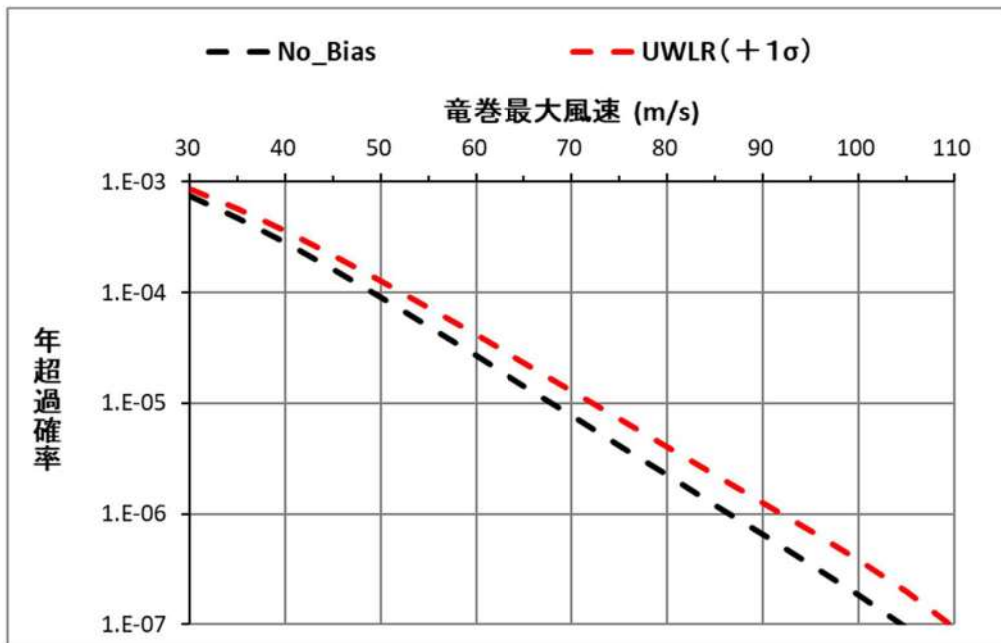


図2 バイアス補正後ケースと全パラメータ+1σケースのハザード算定結果比較

表3 ハザード推定結果

ケース名	超過確率に対応する竜巻風速				バイアス補正後の竜巻風速との差			
	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷
基本ケース	49.14	67.90	86.45	104.39	0.02	0.03	0.03	0.02
バイアス補正後	49.12	67.87	86.42	104.37	0.00	0.00	0.00	0.00
風速・幅・長さ・相関 (+1σ)	52.13	72.23	91.93	109.51	3.01	4.36	5.51	5.14

3. まとめ

不確実さ要素のハザード算定への影響について以下のような結果が得られた。

① 確率分布形選択に伴う不確実さ（認識論的不確実さ）

⇒バイアス補正を実施してもハザードは年超過確率 10^{-5} において 1 m/s 以下の
変化であったことから、影響は限定的である。

② データ量が少ないことに伴う不確実さ（認識論的不確実さ）

⇒①同様、バイアス補正を実施してもハザードは年超過確率 10^{-5} において 1 m/s
以下の変化であったことから、安定した標本となっており、母集団の確率特
性をよく表現できていると考えられる

③ データ（疑似データ）の不確実さ（偶然的な不確実さ）

⇒データの不確実さを考慮したハザード評価により、サンプリング誤差の不確
実さについて信頼度 84%をカバーする値として、年超過確率 10^{-5} において
72.23m/s であると言える。

以上より、 $V_{B2}=70.7\text{m/s}$ は高い信頼度を持った数値と推測されることから、合理的
に望ましい対策を検討するために使用可能な数値と判断できる。

Jackknife 法の具体的な手順

大きさ n の標本の各データを X_1, X_2, \dots, X_n とする。これを用いて求める母集団の特性
を推定する統計量（竜巻ハザードの場合、各パラメータの平均及び分散）を

$$\hat{\psi} = \psi(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

とする。大きさ n 個の標本のうち i 番目の 1 データのみを欠いたデータ数 $n-1$ 個の標
本を用いた統計量を

$$\hat{\psi}_{(i)} = \psi(X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, X_{i+1}, \dots, X_n)$$

とする。 $\hat{\psi}_{(i)}$ の平均値を

$$\hat{\psi}_{(\bullet)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{\psi}_{(i)} \quad (3)$$

により求める。バイアス値は次式で与えられる。

$$\hat{BIAS} = (n-1)(\hat{\psi}_{(\bullet)} - \hat{\psi}) \quad (4)$$

これを用いて統計量のバイアスを補正した Jackknife 推定値は次式で与えられる。

$$\tilde{\psi} = \hat{\psi} - \hat{BIAS} = n\hat{\psi} - (n-1)\hat{\psi}_{(\bullet)}$$

また、Jackknife 法による推定幅は、

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{n-1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{\psi}_{(i)} - \hat{\psi}_{(\bullet)})^2 \quad (5)$$

で求められる。

【参考資料 4】

竜巻風速の積分範囲（～120m/s）について

竜巻ハザードの計算では、下記の式を数値積分して、一つの竜巻が発生したときに、風速 V_0 以上となる被害面積の期待値を求める。風速に関しては、 $V_0 \sim \infty$ までが積分範囲（ V_0 以上の超過確率）であるが、実際には無限大まで積分できないため、ある風速（ V_{\max} ）で打ち切らざるを得ない。その場合、 $V_{\max} \sim \infty$ の超過確率が打ち切りに伴う誤差になる。

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

東京工芸大学成果では、この積分の打ち切り風速をFが上限（92.6m/s）とした場合と、F4の上限（116.2m/s）とした場合のハザードが比較されている（図1参照）。図1から分かるように、打ち切り風速により、高風速域でのハザードに違いが見られる。

東京工芸大学成果では、日本で発生する竜巻の風速が100m/s程度と見積もり、積分の上限も100m/s程度が妥当であろうとしている。一方、米国のガイドによる風速を踏まえ、日本で起こりうる竜巻最大風速を103m/sと想定し、積分の上限を92.5m/sとした場合と116.2m/sとした場合のハザードの竜巻風速を加重平均している（図2参照）。

一方で、大きな打ち切り風速を設定すると、数値積分上の誤差が蓄積し、ハザードの推定精度に影響を及ぼすことが懸念される。

ここで、風速の対数正規分布の超過確率評価における積分精度を確認するために、現行評価の計算結果と別の計算手法を用いた計算結果との比較を行うことで、現行評価手法の妥当性を確認した。現行評価では超過確率を求めるために、積分手法として一般的に用いられる台形公式を使用した数値積分を行っている。また、対数正規分布の積分式は、数学的手法により特定の関数形に置換することで近似解が得られることから、精度確認の比較計算として、この近似解を求める計算を行った。両計算によって得られる超過確率の比較を行うことで、現行評価の積分精度に問題がないことを確認している。（図3参照）

図3より、風速の対数正規分布（風速のみの1次元分布）は、120m/s程度までは正確に積分できることを確認した上で、ハザードの積分の上限を120m/sに設定し、110

～115m/s程度までのハザードを評価対象とした。

竜巻影響評価ガイドでは、「竜巻最大風速の確率密度分布の積分の上限値を設定する場合は、竜巻最大風速の評価を行うハザード曲線が不自然な形状にならないように留意する」と記されているが、本検討で得られたハザード曲線は、図1に示されたような問題点はほとんど無いものとする。

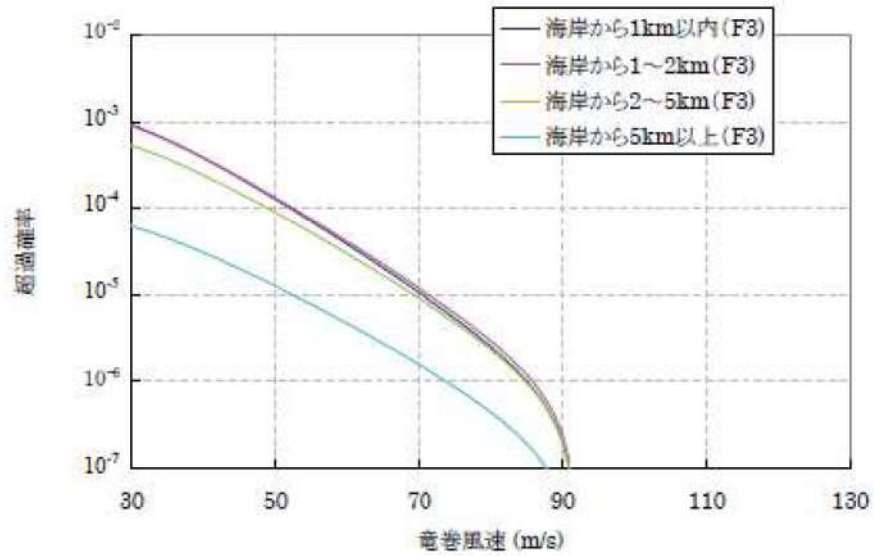


図 2.1.2.14 竜巻風速の確率密度の積分の上限を 92.6m/s (F3 の上限値) にした場合の竜巻リスクの計算結果 (全国平均)

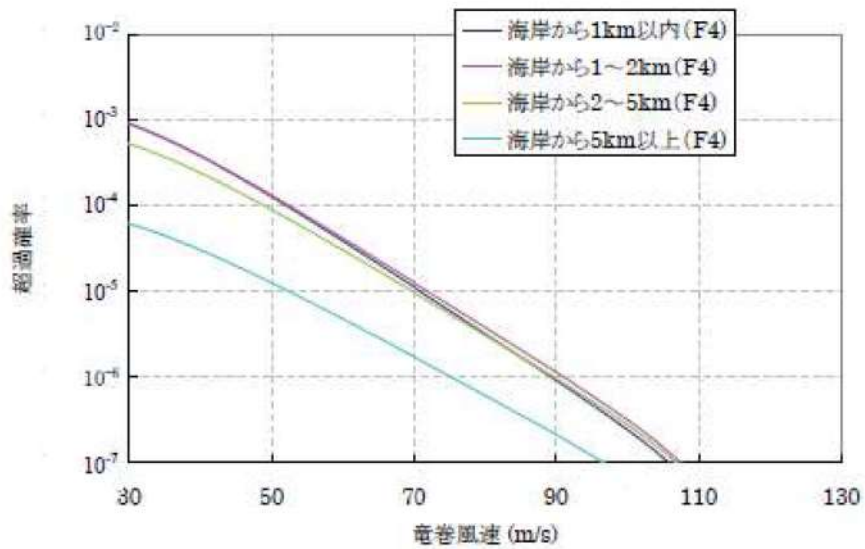


図 2.1.2.15 竜巻風速の確率密度の積分の上限を 116.2m/s (F4 の上限値) にした場合の竜巻リスクの計算結果 (全国平均)

図1 東京工芸大学委託成果より抜粋

気象庁の突風データベースに残されている最大の竜巻は F3 である。しかし、1990 年 12 月 11 日に千葉県茂原市で発生した竜巻の最大竜巻風速は 100m/s と予想され、F4 と判定すべきではないかという見解もある。そのため、本節で示した竜巻リスクの計算を行う場合、竜巻風速の確率密度分布を積分する上限値も 100m/s 程度にするのが妥当と思われる。

一方、米国の Regulatory Guide [12]では、超過確率が 10^{-7} に相当する竜巻風速を原子力施設のガイドラインとして設定しており、その値は下記の通りである。

- i) Region I (アメリカ中央部) : 103m/s (230mph)
- ii) Region II (東海岸、北部国境およびグレートプレーンズの西部) : 89m/s (200mph)
- iii) Region III (合衆国西部) : 72m/s (160mph)

米国の Regulatory Guide [12]に設定されている竜巻風速は、Region I では F4 に相当し、Region II および Region III では F3 に相当する。

この傾向を踏まえ、日本で起こりうる竜巻風速の最大値を 103m/s と想定し、竜巻風速の確率密度分布を積分する上限を 92.5m/s とした場合と 116.2m/s とした場合の竜巻風速を加重平均化した。そうして計算した超過確率が 10^{-5} 、 10^{-6} 、および 10^{-7} に相当する竜巻風速(全国平均)を表 2.1.2.22 および図 2.1.2.20 に示す。Regulatory Guide と同じ超過確率が 10^{-7} に相当する竜巻風速は、海岸から 5km 以内の陸地では 98m/s 程度で海岸から 5km 以上離れた陸地では 91m/s となり、米国の場合と大きな違いが見られない結果となっている。

図 2.1.2.1 に示した 7 個の地域の場合も、発生しうる最大の竜巻風速が 103m/s を想定した場合の超過確率が 10^{-5} 、 10^{-6} 、および 10^{-7} に相当する竜巻風速を、加重平均によって計算した。その結果を表 2.1.2.23 および図 2.1.2.21 に示す。海岸から 5km 以内の地域では、地域④の一部と地域⑤を除いて全て F4 の竜巻に相当する風速である。前述したように、地域④と地域⑤では人口密度が小さいため竜巻の単位面積あたりの観測数が実際よりも小さい可能性がある。その点を考慮すると、海岸から 5km 以内の超過確率が 10^{-7} に相当する竜巻風速は日本全国全ての地域で 100m/s 程度になるとと思われる。海岸から 5km 以上離れた地域では、地域に関係なく 10^{-7} に相当する竜巻風速は 80 から 90m/s である。

図 2.1.2.2 に示した 19 個の地域では、竜巻の発生頻度が顕著に高くなっている(図 2.1.2.5)。この 19 個の地域の 92.5m/s と 116.2m/s を積分の上限とした場合の竜巻リスクを計算した。その結果から超過確率が 10^{-5} 、 10^{-6} 、および 10^{-7} に相当する竜巻風速を取り出し、上記と同様の加重平均化した竜巻風速を計算した。その結果を表 2.1.2.24～表 2.1.2.26 および図 2.1.2.22～図 2.1.2.24 に示す。図 2.1.2.1 に示した 7 個の地域に分けた場合に比べて、図 2.1.2.2 に示した 19 個の地域の竜巻風速が大きくなる傾向にある。その傾向は超過確率が 10^{-6} と 10^{-5} の場合に、よりはっきりと表れている。特に、高知県南部(②-2)、静岡県(③-3)、北海道南部(④-1)、鳥取県の一部(⑤-4)、秋田県(⑦-2)の海岸地域のリスクは高い傾向にある。

図2 東京工芸大学委託成果より抜粋

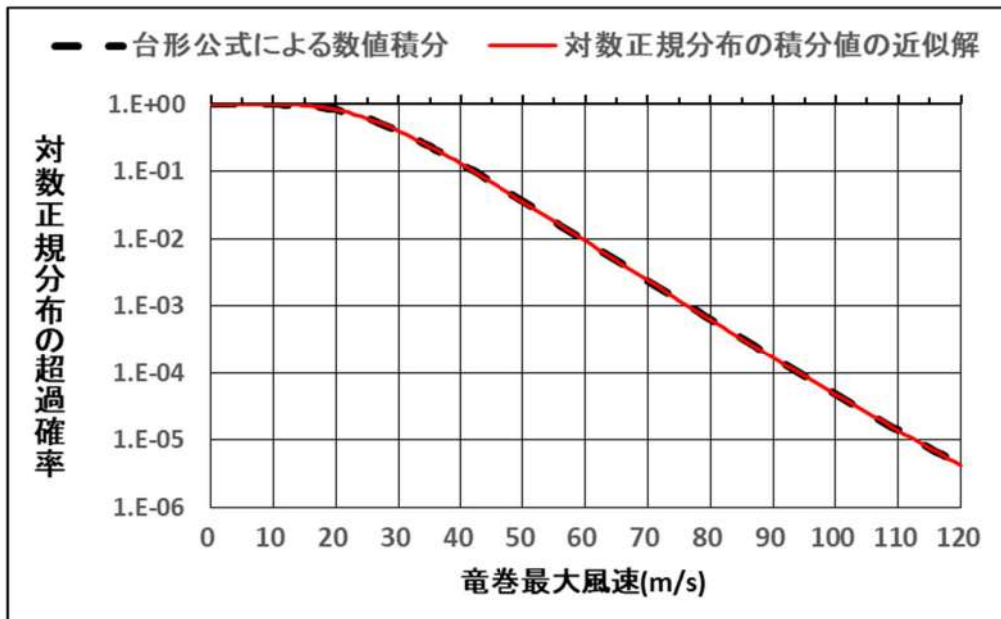


図3 風速の確率分布の積分精度の検証（近似解との比較）

地形効果による竜巻風速への影響について

1. はじめに

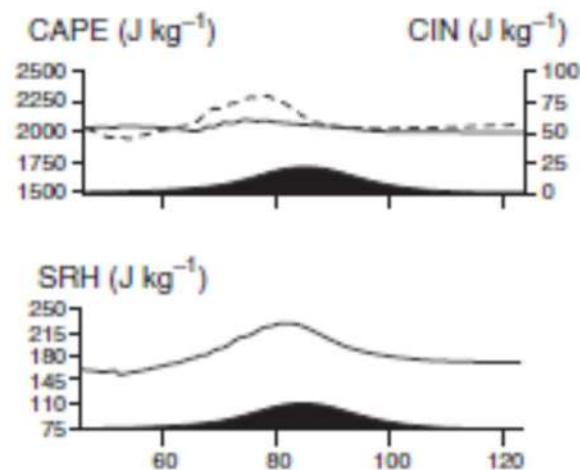
「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」において、丘陵等による地形効果によって竜巻が増幅する可能性があると考えられることから、原子力発電所が立地する地域において、設計対象施設の周辺地形等によって竜巻が増幅される可能性について検討を行い、その検討結果に基づいて設計竜巻の最大風速 (V_D) を設定することが求められている。

ここでは、既往の研究に基づく地形起伏の竜巻の風速への影響に関する知見を取りまとめる。

2. 対象とする地形起伏スケールの整理

竜巻に対する地形の効果は、スーパーセルスケールへの関与によるメソスケールでの「発生」等への影響と、渦の旋回流への関与によるマイクロスケールでの「風速」等への影響とに大別される。

前者への言及として、例えば、Markowsk and Dotezk(2011)による数値気象モデル (CM1) を用いた検討等がある。ここでは、メソスケールの地形 (尾根幅数十km程度) が、CAPEやSRHといった、竜巻の発生要因を支配するパラメータに与える影響が論点となる。加藤らによる佐呂間竜巻への分析もこれに相当すると考えられる。



第2-1図 メソスケール尾根地形に起因するCAPE, SRH等のパラメータの変化を調べた例

一方、竜巻風速 V_D に対する地形影響には、後者が相当する。ここでは、タッチダウンした漏斗雲により発生する旋回流及びそれに随伴して生じる強風への地形影響が論点となる。ここで考慮すべき地形の規模としては、前述のメソスケールのものと比べて小さく数百 m 規模と考えられる (Karstens 2012, Lewellen 2012)。

3. マイクロスケールの地形の起伏が竜巻の旋回流強度及び強風に与える影響

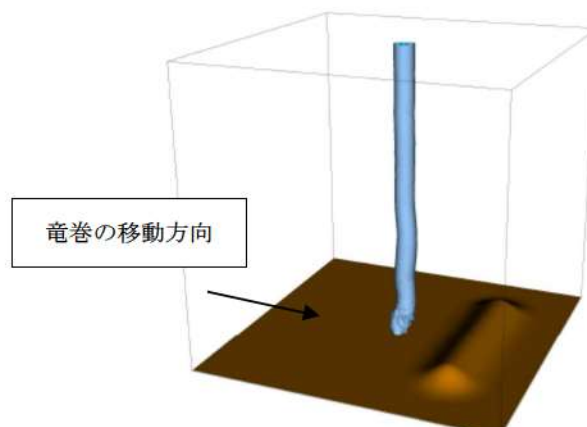
マイクロスケールの地形の起伏が竜巻の旋回流及び強風に与える影響の定量的評価は、未だ、研究課題である (Karstens 2012)。しかしながら、定性的な知見を与える関連研究は存在する。そこで用いられている主な手法は、①被害状況調査、②風洞実験、③数値シミュレーションとなる。

- ① 被害状況調査 (Forbes 1998, Karstens 2012) では、実際の竜巻の被害を精査し、被害状況と地形特性との関係を調べる。これにより、被害が発生しやすい地形特性を分析し、そこから旋回流強度及び風速の強弱を類推することになる。
- ② 風洞実験 (Karstens 2012) では、風洞実験の測定部に尾根や斜面といった地形模型を入れ、その上部に竜巻発生装置を設置し、それを移動させたときの、地表面近傍の圧力・風速分布を調べる。



第 3-1 図 風洞実験の様子 (Karstens 2012)

- ③ 数値シミュレーション (Lewellen 2012) では、竜巻の旋回流や移動及び地形の起伏を模擬した流体解析コードによる、数値実験を行い、旋回流の強度や風速及び竜巻の構造に関連する圧力分布を調べる。

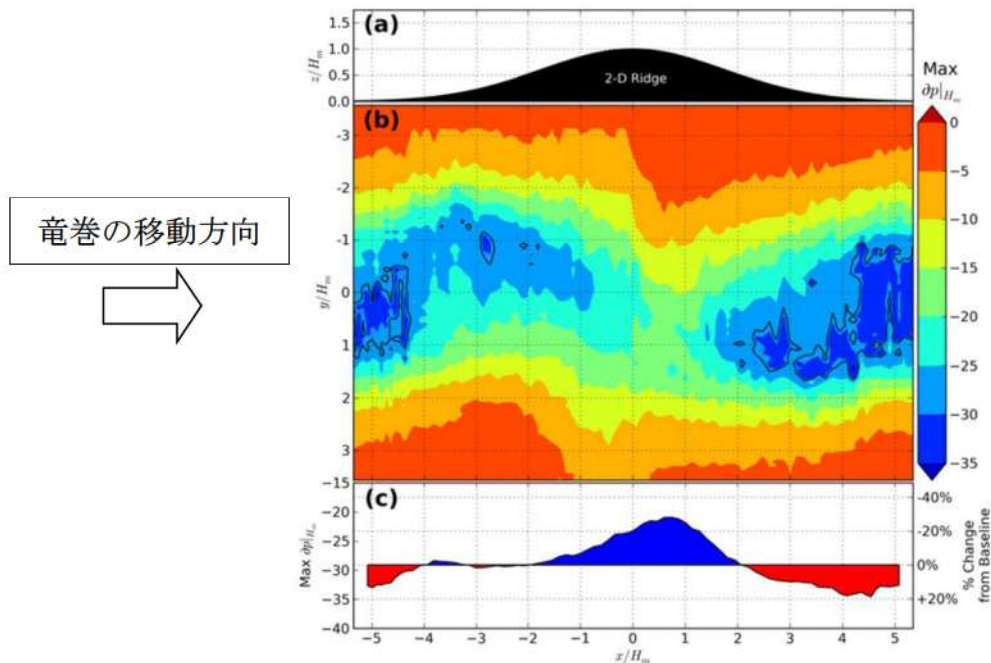


第 3-2 図 数値シミュレーションのセットアップ

これらを通じて、マイクロスケールの地形の起伏に起因する竜巻の旋回流や風速の強化に対する知見が得られている。被害状況調査により、竜巻の強化が下り斜面や尾根の裾で生じる可能性が示唆されている (Forbes 1998, Karstens 2012)。また、実被害調査の知見を支持する結果が風洞実験・数値シミュレーションにおいても確認されている。二次元尾根地形を対象とした場合の風洞実験 (Karstens 2012) 及び数値シミュレーション (Lewellen 2012) の結果をそれぞれ、第3-3図、第3-4図に示す。風洞実験の結果である第3-3図において、(a)に示す二次元尾根地形を図中左側から右側に竜巻を模擬した旋回流が移動するときの地表面で測定された圧力の最大値が(b)になる。ここで実験仕様の制約上、風速のデータは取得されておらず、風速に相当するものとして、圧力勾配 (圧力の高いところから低いところへ流れる風の駆動力になり、風速に相当する) を(c)に示している。(c)の結果から、

- ① 圧力勾配 (図(c)) が斜面において、正・負の値を持つこと (=旋回流が強弱する)
- ② 斜面に比べ尾根の上・下流の平坦な部ではほぼフラットとなること (=旋回流の強度が変化しない)

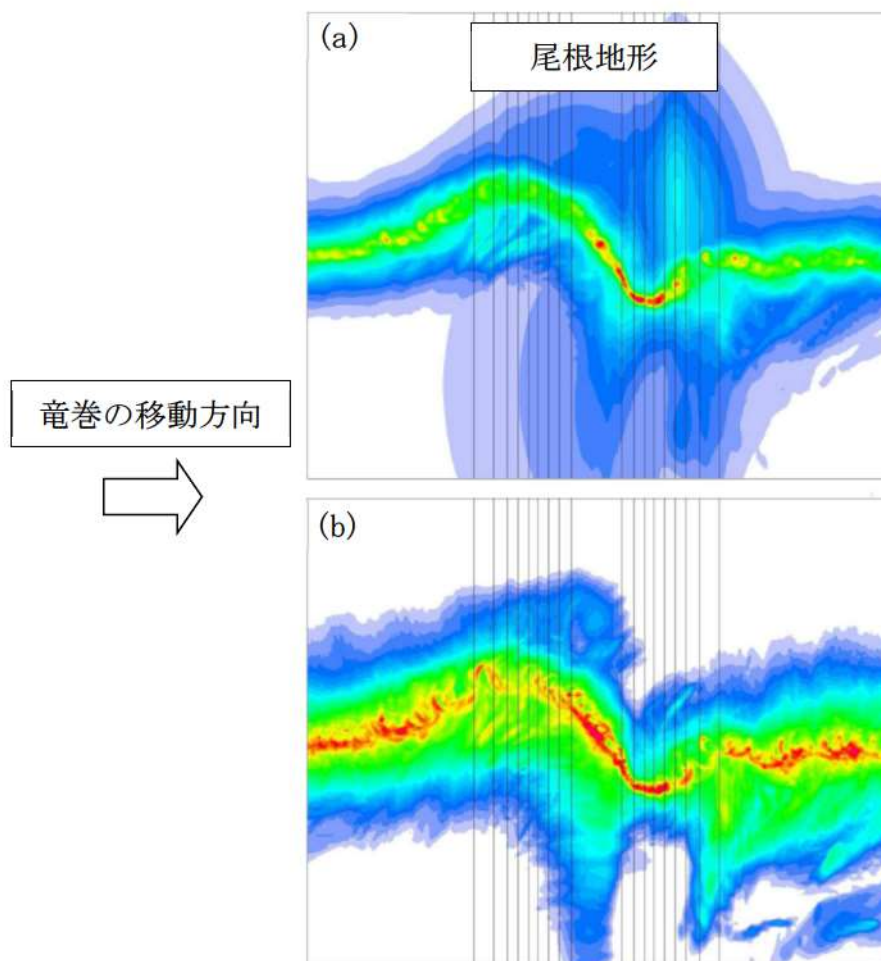
を理解できる。



第3-3図 尾根地形を竜巻が通過するときの地表面圧力及び圧力勾配 (風速に相当)

数値シミュレーション結果である第3-4図において、ピーク圧力が(a)、風速が(b)になる。シミュレーションは風速の取扱いを可能としており、第3-4図の(b)のような結果の議論を可能としている。図中の黒色実線が等高線を意味し、竜巻は、第3-3図と同じく図中左側から右側へと移動している。この結果も、下記のとおり第3-3図の知見と整合している。

- ・ 上り斜面では圧力が増加し（緑色→赤色）、下り斜面では圧力が減少（赤色→緑色）する（実験で得られた知見①を支持）
- ・ ピーク圧力の高い領域は尾根頂部に限定され、平坦部の圧力は上流側と下流側とで同レベルとなる。（実験で得られた知見②を支持）



第3-4図 尾根地形を竜巻が通過するときの地表面ピーク圧力及び風速

ここで地形の規模として尾根高さ H_m に対して $\pm 5H_m$ を考慮していることにも留意を願いたい。これは、尾根高さが100mの場合、 $\pm 500m$ にわたる地形を対象としていることを意味する。

また、これらの研究が、地形の起伏の影響範囲が、斜面及び尾根・山の頂・裾部に限定されることを示唆していることを強調したい。第3-3図、第3-4図にみられるとおり、地形の下流側の平坦部における風速や圧力の値は、地形を乗り越える前の上流部の値に相当する。

4. 泊発電所における地形効果による竜巻の増幅可能性について

第 4-1 図に泊発電所周辺の地形図，第 4-2 図に泊発電所周辺の地表面粗度カラーコンタ（地表面粗度については参考資料 3 に示す），第 4-3 図に泊発電所周辺の標高及び防潮堤高さ，第 4-4 図に竜巻検討地域で発生した竜巻の移動方向を示す。

第 4-1 図～第 4-3 図に示すとおり，発電所が立地する敷地は，敷地前面（北西～南西方向）が日本海に面し，背後は積丹半島中央部の山嶺に続く標高 40m から 130m の丘陵地である。

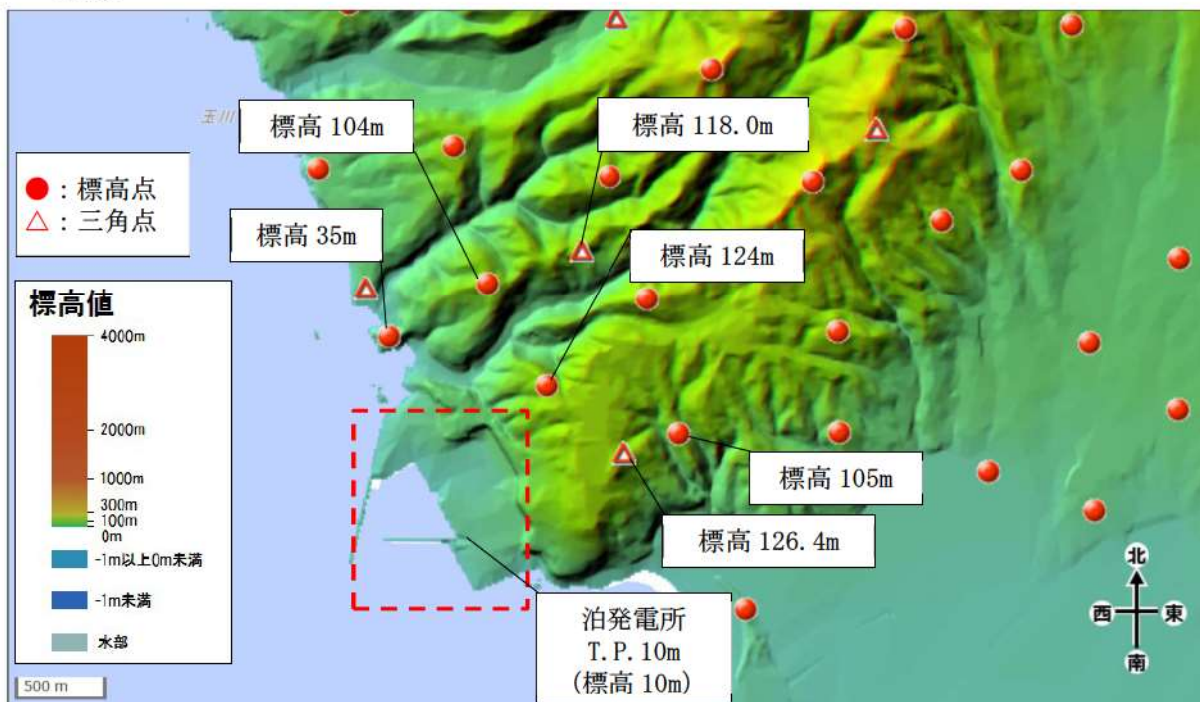
また，第 4-4 図より，竜巻検討地域で発生した竜巻は，海側から陸側に移動する方向が多く，竜巻風速は減衰する方向であった。

仮に竜巻が海上から発電所に進入してきた場合は，地表面粗度の影響を受けて竜巻は減衰した後，さらに防潮堤(T.P. 16.5m)で減衰するため，竜巻による施設への影響は限定的となると考えられる。また，山側から発電所の敷地に移動してきた場合についても，発電所周辺は広く森林が存在しており，竜巻は森林による粗度の影響を大きく受けるため減衰する。

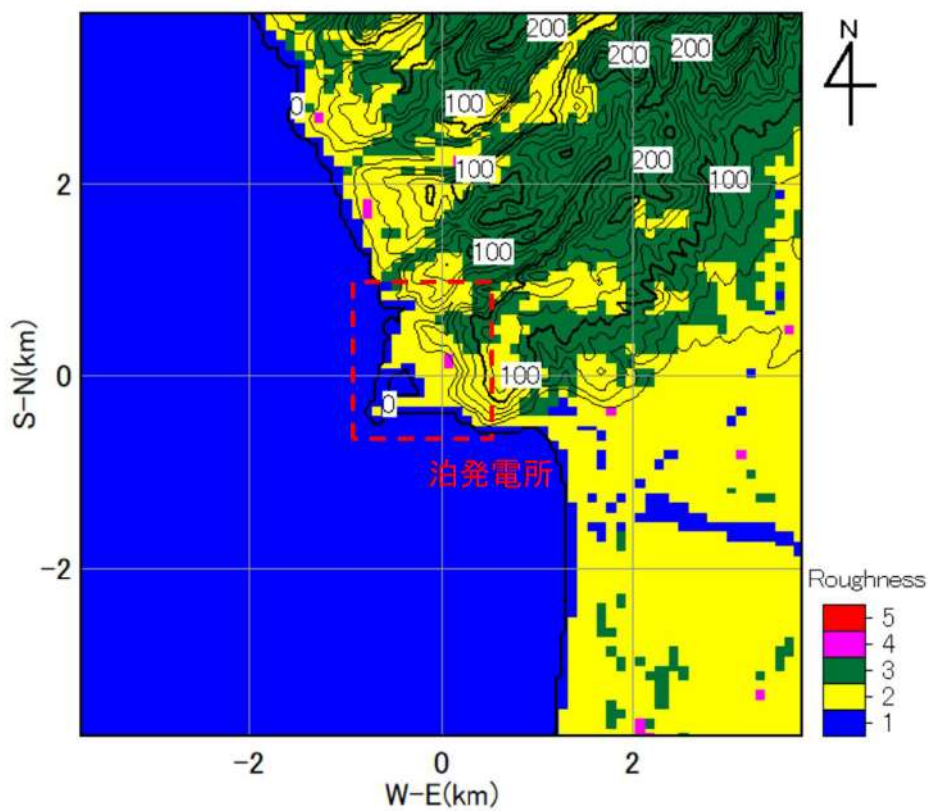
したがって，泊発電所において地形効果による竜巻の増幅を考慮する必要はないと考えられる。

地理院地図

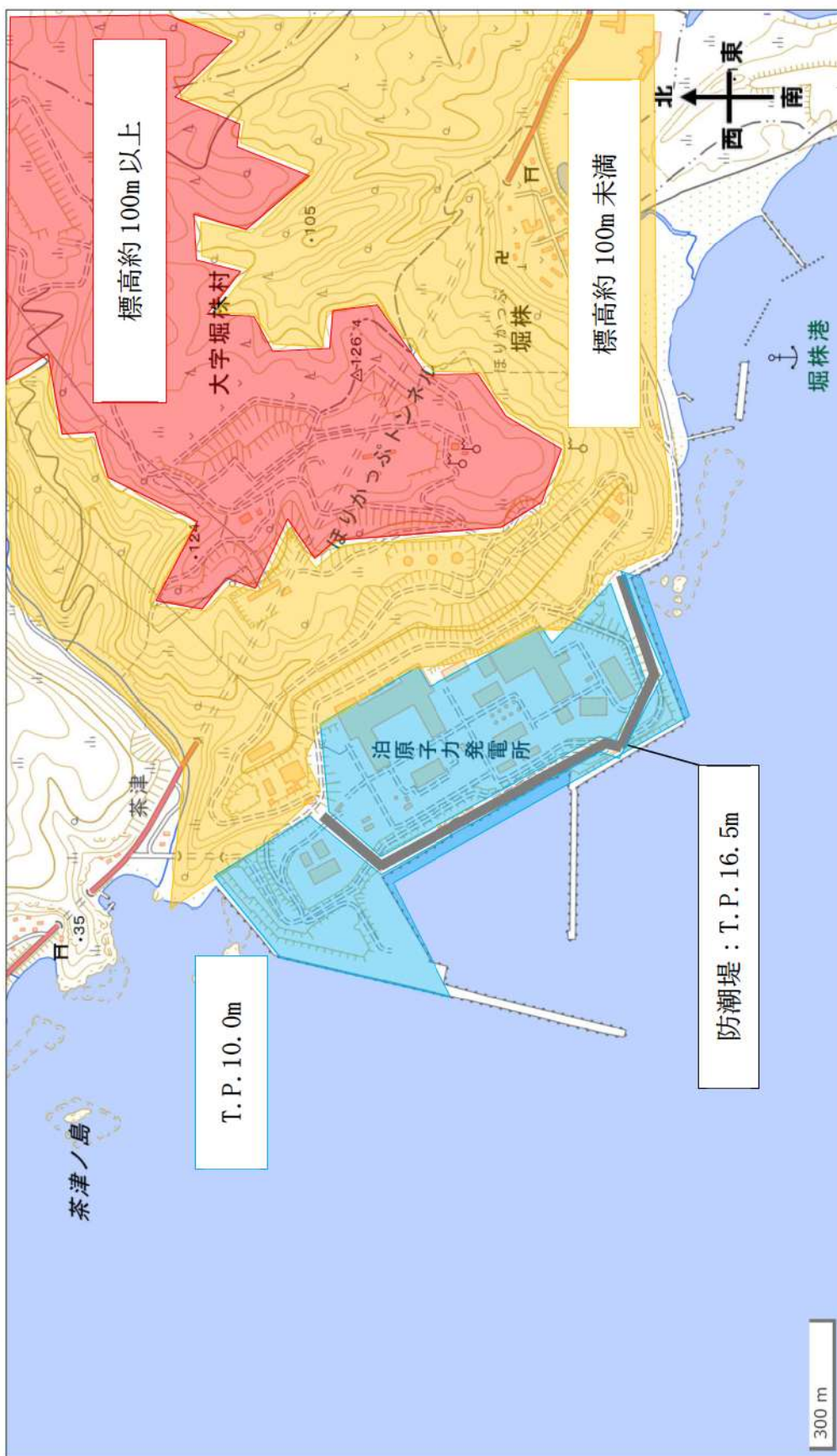
GSI Maps



第 4-1 図 泊発電所周辺の地形 (国土地理院「電子国土 Web」より作成)



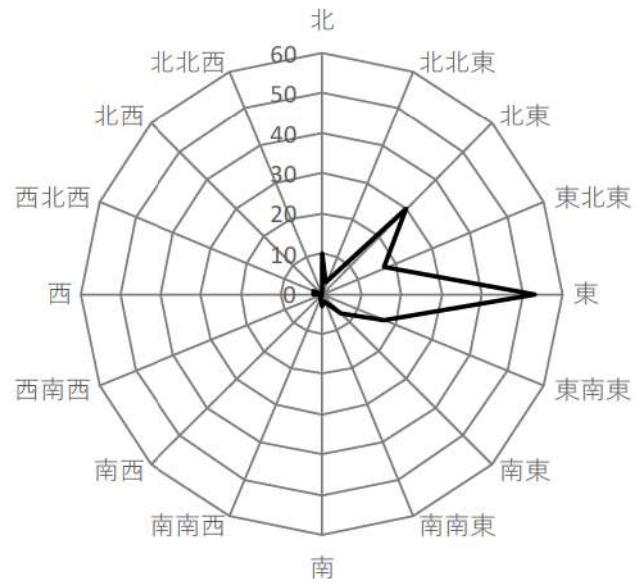
第 4-2 図 泊発電所周辺の地表面粗度



第 4-3 図 泊発電所の周辺の標高及び防潮堤高さ

[個]

北	10
北北東	3
北東	30
東北東	17
東	53
東南東	17
南東	7
南南東	2
南	3
南南西	1
南西	0
西南西	0
西	2
西北西	2
北西	0
北北西	0
計	147



第 4-4 図 竜巻移動方向

参考文献

- Forbes GS (1998) Topographic influences on tornadoes in Pennsylvania. Proc 19th Conf Severe local storms Amer Meteorol Soc, mineapolis, MN, pp.269-272.
- Karstens CD (2012) Observations and laboratory simulations of tornadoes in complex topographical regions. Graduate theses and dissertations of Iowa state univ, paper12778.
- Lewellen DC (2012) Effects of topography on tornado dynamics: A simulation study. 26th Conference on Severe Local Storms Amer Meteorol Soc, Nashville, TN, 4B.1.

参考資料1：地形の起伏に起因する竜巻の旋回流の強弱に対する物理的解釈

ここでは、本資料で示した地形の起伏による竜巻の旋回流の強弱に対する物理的解釈を示す。なおここで示す、角運動量保存則に基づく解釈の妥当性を被害状況調査 (Forbes 1998, Karstens 2012) や風洞実験 (Karstens 2012) も支持している。

一般的に、回転する流れでは、「回転の中心からの距離」と「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質がある。これは角運動量保存則と呼ばれるが、角運動量保存則と Holton (1992) を参考に、竜巻旋回流が形成された後における渦の伸長・収縮に伴う旋回流風速の増速・減速機構を以下に導く。竜巻のコア部分を一つの鉛直軸を有する剛体運動の気柱と仮定すると、上り坂を越える場合 (渦1から渦2へ移動する場合) には渦の長さが短くなる。その際、角運動量の保存則は次式のように表される。

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{r_1} \int_0^{h_1} (\rho r^2 \omega_1) dh \cdot r dr d\phi = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_2} \int_0^{h_2} (\rho r^2 \omega_2) dh \cdot r dr d\phi \quad (1)$$

$$\frac{1}{4} r_1^4 \omega_1 h_1 = \frac{1}{4} r_2^4 \omega_2 h_2 \quad (2)$$

ここで、 ω は角速度、 r は渦コア (気柱) の半径、 h は渦コア (気柱) の高さ、 ρ は空気密度であり、添字の1と2はそれぞれ、渦1と渦2に対する値を表す。また、気柱の体積が保存されるので、式(3)が成立する。

$$\pi r_1^2 h_1 = \pi r_2^2 h_2 \Rightarrow r_2^2 = \frac{h_1}{h_2} r_1^2 \quad (3)$$

この関係を式(2)に代入すると、式(4)が得られる。

$$\frac{\omega_1}{h_1} = \frac{\omega_2}{h_2} \Rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega}{h} \right) = 0 \quad (4)$$

(4)の関係式は「渦位 (ポテンシャル渦度) の保存式」に相当するものであり、角速度 ω は地上高さ h に比例することがわかる。また、式(3)より、渦の半径 r は $h^{1/2}$ に反比例するので、竜巻の最大接線風速 ($\omega \times r$) は $h^{1/2}$ に比例する。そのため、竜巻の渦が上り斜面を移動する時、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動する時には強まる。

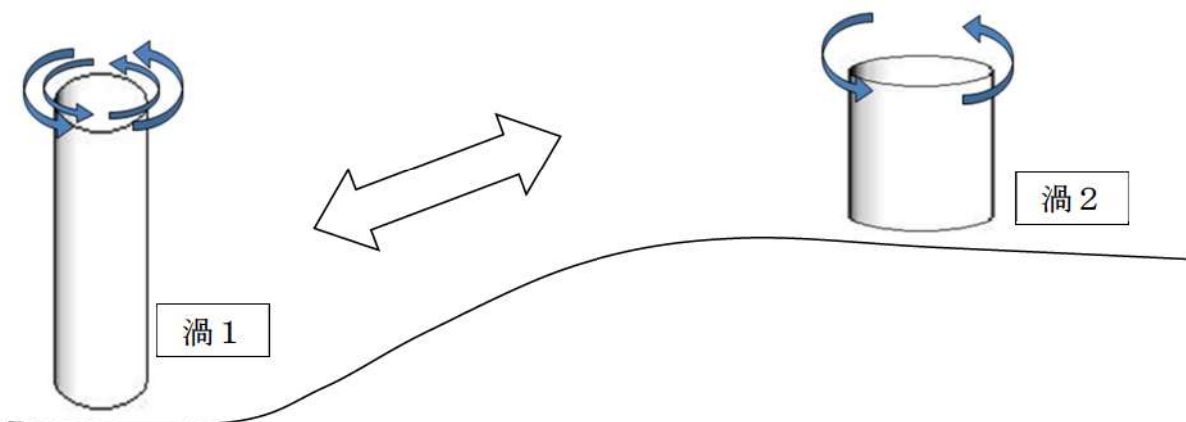


図1 竜巻旋回流の地形影響に関する模式図

参考資料2：竜巻による旋回流を対象とした数値シミュレーションへのレビュー

竜巻影響評価ガイド及びその解説に記載されている参考文献において、地形影響による旋回流の強化の評価技術として、数値シミュレーションの援用が例示されている。ここでは、ラージエディシミュレーション (LES) という技法が用いられている。LES では、風の運動を支配する方程式系を数値的に解くことにより、風の三次元分布の非定常な変化を求める。計算自体には仮定が少ないのが長所であるが、膨大な計算資源が必要であること、計算の初期・境界条件の設定が難しいことが欠点である。竜巻の実際の流れ場を対象とした場合、より難しいものとなる。

具体的には、LES では、風の変動を大規模なものと同規模なものに分離し、前者を数値シミュレーションの中で直接的に再現し、後者を物理法則から妥当性を類推できる仮定にもとづくモデル (サブグリッドモデル) で表現する。そのため、計算精度が格子解像度、計算手法やサブグリッドモデルの現象再現性に強く依存する。一方、表 1 に示すとおり、近年の竜巻数値流体計算に用いられている格子解像度や計算手法には、様々なものが用いられており、適切な手法として統一的な知見が得られていないのが現状といえる。

このことを勘案して、本資料では、数値シミュレーションの結果を援用して、旋回流の増減への定性的評価及びその挙動への物理的解釈を与えることとし、定量的な数値の取扱いは行わないこととした。

表 1 近年の竜巻数値流体計算の主要仕様

文献	解析体系	地表面境界条件	乱流モデル	解析手法	格子解像度	解析領域
Lewellen (2013)	複雑地形上実スケール竜巻	空力的粗度	LES (TKE型)	Lewellen(2007)と同じ (IB法を付加)	5m以下	2x2x2km
Natarajan and Hangan (2012)	実験スケール竜巻	不明 (ノンスリップ?)	LES (動的スマゴリンスキ型)	商用コードFluentベース (2次精度中心差分 hexahedral grid)	不明 (セル数は 2.5e6)	実験サイズ (半径=0.4m)
Maruyama (2011)	実験スケール竜巻	ノンスリップ	LES (標準スマゴリンスキ型)	RIAM-COMPACT (Kajishima Scheme)	最大風速半径の1/8	実験サイズ
Lewellen et al. (2008)	飛散物を含む実スケール竜巻	空力的粗度	LES (TKE型)	Lewellen(2007)と同様 (2流体モデルを付加)	不明	不明
Lewellen and Lewellen (2007)	実スケール竜巻	空力的粗度	LES (TKE型)	2次精度中心差分	不明	不明

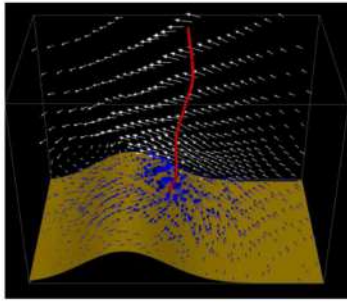
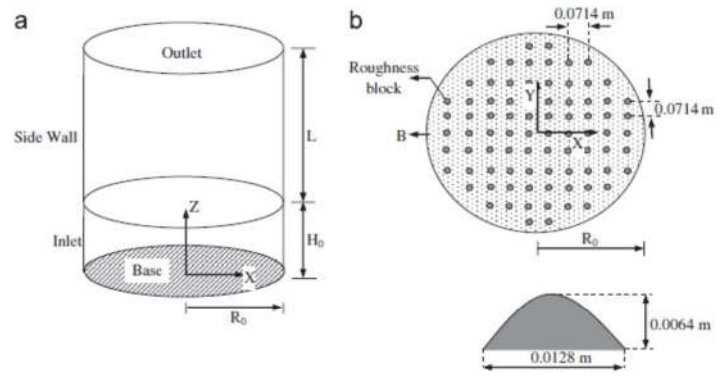


Figure 7: Sample velocity vectors 10 m above the surface (blue) and on a selected vertical plane (white) for a tornado heading upslope (moving right to left); vectors are given in a reference frame with the ground at rest. The red line represents the mean vortex core position at the time. The simulation case is that of fig. 4.

(a) Lewellen (2012)



(b) Natarajan and Hangan (2012)

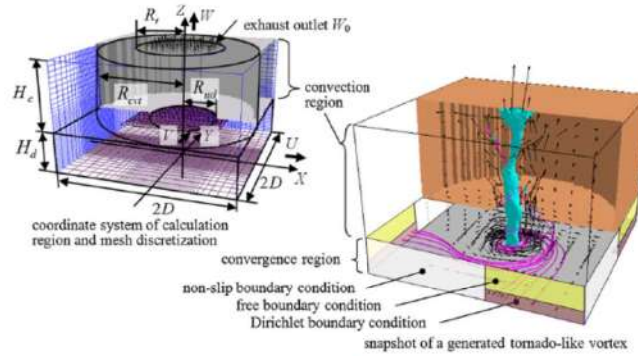


Fig. 1. Numerical tornado simulator.

(c) Maruyama (2011)

図1 近年の竜巻数値流体計算の解析モデル

参考資料3：地表面粗度について

1. 概要

本資料において、既往の研究に基づく地表面粗度の物理的意味及び竜巻等の暴風時の風速への影響に関する知見を取りまとめる。

2. 地表面粗度の定義

大気の運動（風）は、地表面の影響を受けるが、地表面に近いほどその影響は強い。影響を受ける範囲は1-2kmに及ぶことが一般的で、その範囲を大気境界層と呼ぶ。その中でも表面から数十メートルまでの領域は特にその影響が著しく、「接地層」といわれる（竹内・近藤 1981）。

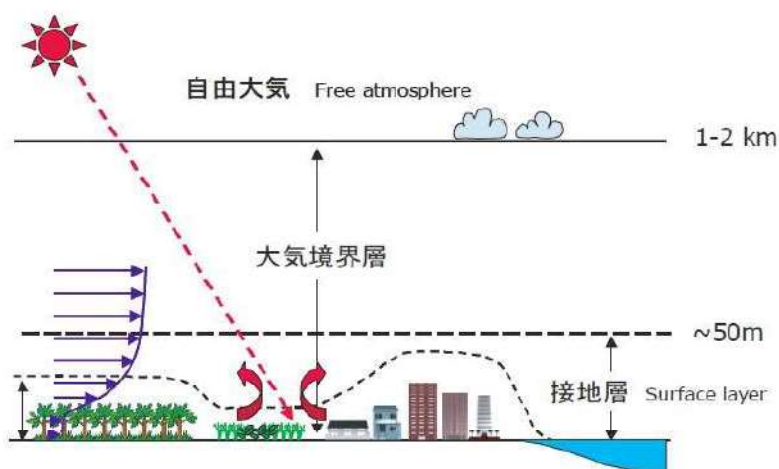


図1 大気の鉛直構造の模式図

風速は、地表面において0となり上空に向かうにつれて増加する。強風状態において、この風速の鉛直分布は対数分布と合致する。この対数分布の性状は、地表面の細かな凸凹が与える摩擦抵抗により定まる。この摩擦抵抗による風速分布への効果を示す指標を「粗度長」（地表面粗度）と定義する（塩谷 1992；近藤 2000）。

接地層内の風速 U は、地表面からの高さ z に対して、粗度長 z_0 を用いて

$$U(z) = c \ln(z/z_0) \quad (1)$$

により整理される（ここで、 c はカルマン定数と摩擦速度から導き出される係数）。

3. 粗度長の値

粗度長の値は、既往の研究において、様々な地表面状態に対して示されている。そこで得られている概略値を以下に示す。

地表面	粗度長[m]
水（広くて静かな面）	$10^{-6} - 10^{-5}$
砂・砂漠	0.0003
土	0.001 - 0.01
草（草丈 0.02 - 0.1 m）	0.003 - 0.01
草（草丈 0.25 - 1.0 m）	0.04 - 0.10
農地	0.04 - 0.20
果樹園	0.5 - 1.0
森林	1.0 - 6.0
大都市（東京）	2.0

竹内・近藤 1981 より

地表面	粗度長[m]
湖や海面	$10^{-3} - 10^{-5}$
水田	0.01 - 0.05
草（草丈 0.1 m）	0.01 - 0.03
草（草丈 1.0 m）	0.1 - 0.3
田園集落	0.2 - 0.5
森林	0.3 - 1.0
大都市	1 - 3

近藤 2000 より

粗度長が地表面の細かな凹凸の度合いに呼応し増減することを確認できる。

4. 粗度長を加味した風速の算定

この粗度長を考慮した建築物の耐風設計（強風を対象とした建築物の風荷重設定）手順を日本建築学会が取りまとめている（日本建築学会 2004）。ここでは、地表面の状況に応じた粗度長の変化を5つの区分に分類して取り扱うことにしている。

粗度区分	評価地点及び風上側地域の地表面の状況
I	海面又は湖面のような、ほとんど障害物のない地域
II	田園地帯や草原のような農作物程度の障害物がある地域、樹木、低層建築物などが散在している地域
III	樹木・低層建築物が多数存在する地域、あるいは中層建築物（4 - 9階）が散在している地域
IV	中層建築物（4 - 9階）が主となる市街地
V	高層建築物（10階以上）が密集する市街地

そして、式(1)の対数分布を近似するものとして、次式で示されるべき分布とともに、各粗度区

分に対して式中のパラメータとして下表の値を提示している。

$$U(z) = c(z/z_G)^\alpha \quad (z_b < z \leq z_G) \quad (2)$$

粗度区分	I	II	III	IV	V
z_b (m)	5	5	10	20	30
z_G (m)	250	350	450	550	650
α	0.1	0.15	0.2	0.27	0.35

ここで、 z_G は風速が地表面粗度の影響を受けない高さ、 z_b は風速が周囲の建築物の影響を受ける上限高さとして、指針で設定されたものである。

地表面の凹凸が大きくなるほど、 z_b 、 z_G 、 α （べき指数）の値も大きくなる。粗度区分 I-V に対して、式(2)から得られる風速の鉛直分布を図 2 に示す。

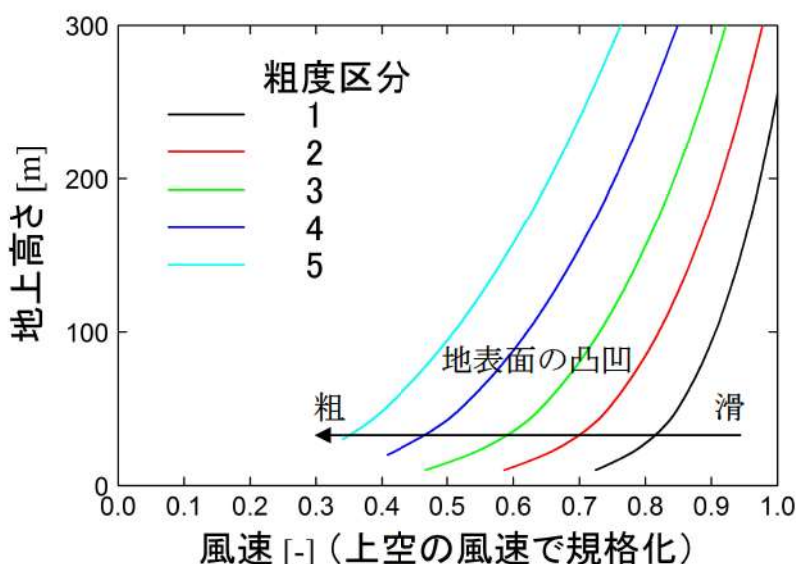


図 2 粗度区分と風速の鉛直分布との関係

ここで、地表面の凹凸による地表面近傍における風速の減速を議論するため、同一の上空風速 ($z = z_G$ の風速) に対する分布を提示している（粗度区分 I の場合は $z_G=250\text{m}$ の風速との比較、粗度区分 II の場合は $z_G=350\text{m}$ の風速との比較）。すなわち、横軸の数字は地表面粗度の影響に起因する減速の度合いを意味する。地上に近づくにつれて・粗度区分が大きくなるにつれて、地表面近傍の風速が小さくなることを確認できる。例えば、地上高さ 10m の風速は、粗度区分が I から II に変化することで 20% 程度低下し、III に変化することで 35% 程度低下する。

5. 竜巻の風速に対する粗度長の効果

4 章に示した風速の算定手順は、強風を対象としたものであり、地表面状態が森林等柔なものか

らビル等の剛なものまでを包括して、地表面の凹凸が、強風の減衰をもたらすことを示唆するものである。

なお、竜巻は通常の強風と異なり、強い渦（旋回流）構造を有する。地表面粗度は、この竜巻の旋回流を減衰させる効果を有する（例えば、Dessens 1972, Leslie 1977, Lewellen and Sheng 1979, Rostek and Snow 1985, Church 1993, Natarajan and Hangan 2012）。また、地表面粗度の構成物が飛来物として運動することも竜巻の風速を大きく減少させることも示唆されている（Lewellen et al. 2008）。

これらの知見から、表面の凹凸、すなわち地表面粗度の増加とともに竜巻に起因する強風の風速が低下するといえる。

参考文献

- ・ 近藤（2000） 地表面に近い大気の科学 324pp
- ・ 塩谷（1992） 強風の性質 開発社 201pp
- ・ 竹内・近藤（1981） 大気科学講座 1 地表に近い大気 東大出版 226pp
- ・ 日本建築学会（2004） 建築物荷重指針・同解説 丸善 651pp
- ・ Church CR（1993） The tornado: its structure, dynamics, prediction and hazards. American Geophysics Union.
- ・ Hattori Y et al.（2010） Wind-tunnel experiment on logarithmic-layer turbulence under the influence of overlying detached eddies. *Boundary-Layer Meteorol* 134, pp269-283.
- ・ Leslie F W（1997） Surface roughness effects on suction vortex formation. *J Atmos Sci* 34, pp.1022-1027.
- ・ Lewellen WS, Sheng YP（1979） Influence of surface conditions on tornado wind distribution. *Proc 11th Conf Severe local storms*, pp.375-378.
- ・ Lewellen DC, Gong B, Lewellen WS（2008） Effects of finescale debris on near-surface tornado dynamics. *J Atmos Scipp*.3247-3262.
- ・ Natarajan D, Hangan H（2012） Large eddy simulations of translation and surface roughness effects on tornado-like vortices. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 104-106, pp.577-584.
- ・ Rostek WF, Snow JT（1985） Surface roughness effects on tornado like vortices. *Proc. 15th Conf Severe local storms*, pp.252-255.