付録 D 高標高山岳が及ぼす影響

1990 年 12 月 11 月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）の海抜 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。

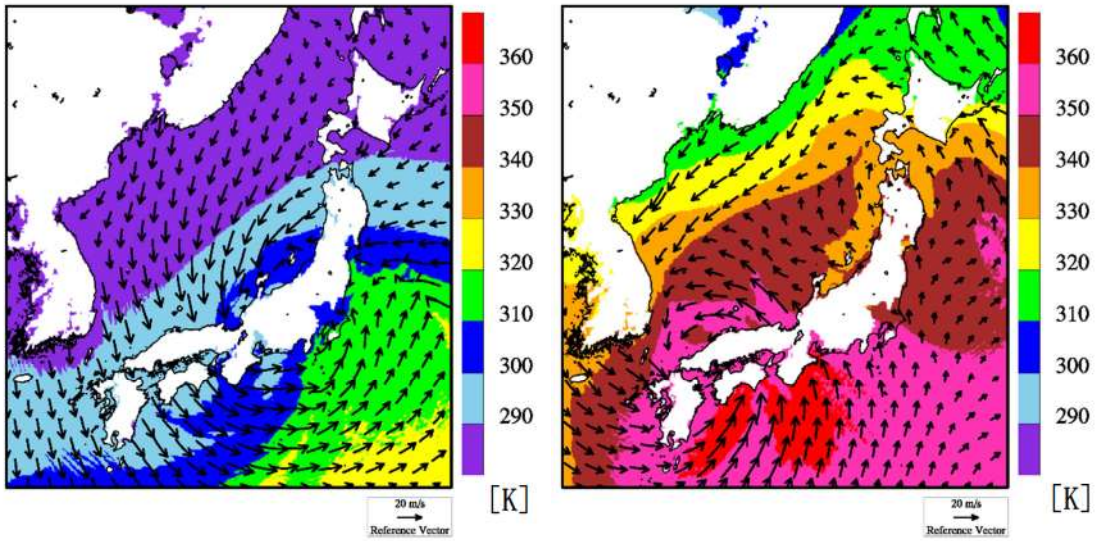


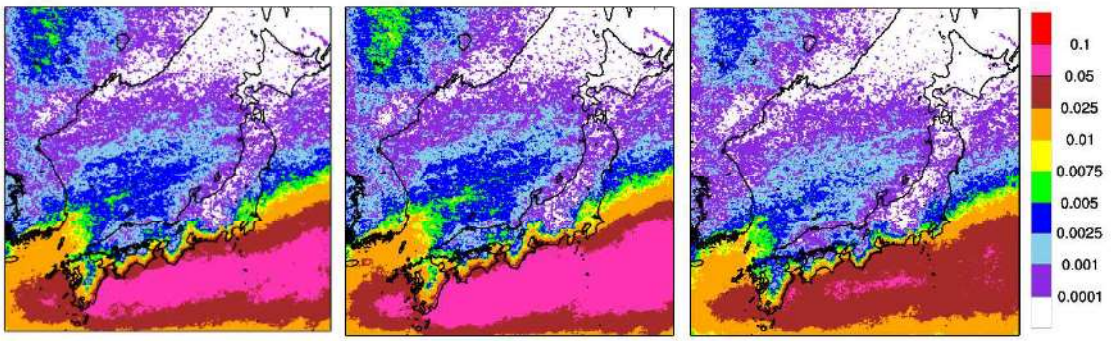
図 D-1　海抜 100m 高度における風向・風速及び相当温位
（左：1990/12/11 F3 事例，右：1999/09/24 F3 事例）

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。



閾値 3.3　　閾値 3.0　　閾値 3.6

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）

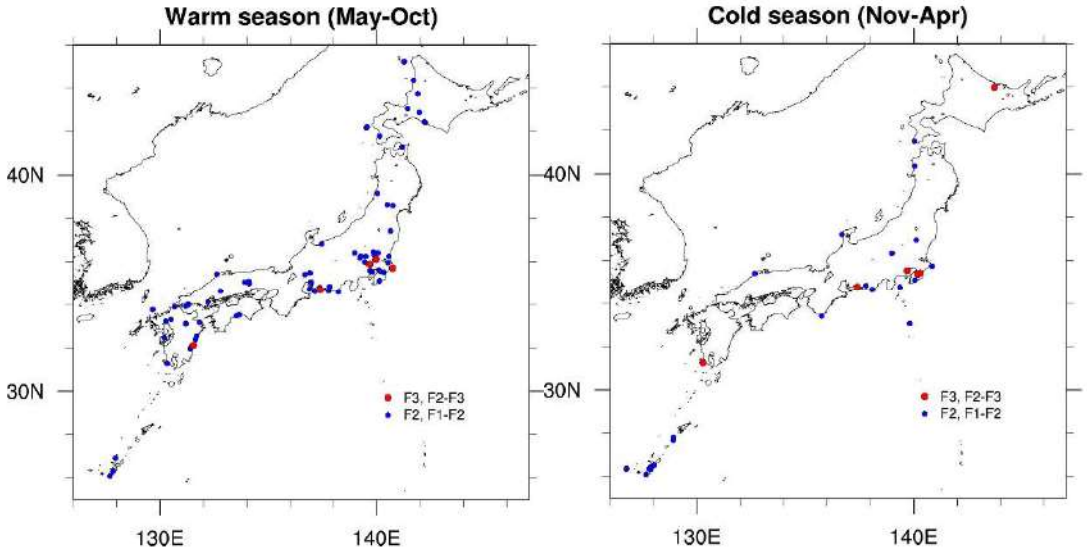
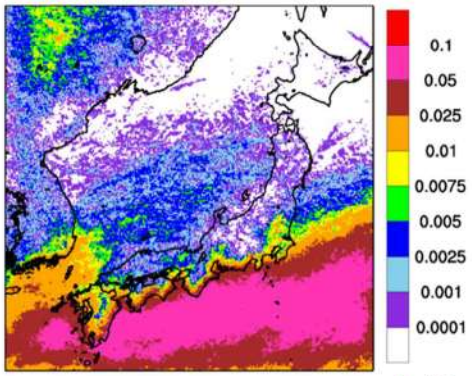


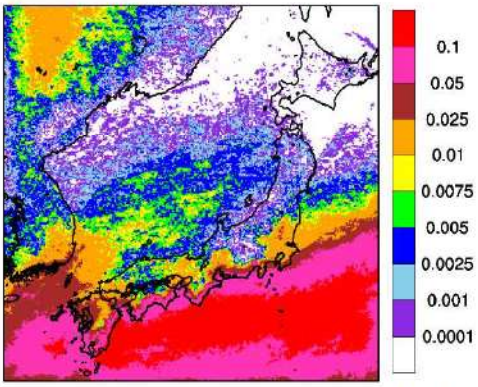
図 E-2　F3 竜巻（F2-F3 を含む）及び F2 竜巻（F1-F2 を含む）の発生箇所
（左：暖候期，右：寒候期）

(b)SReH と CAPE（暖候期）

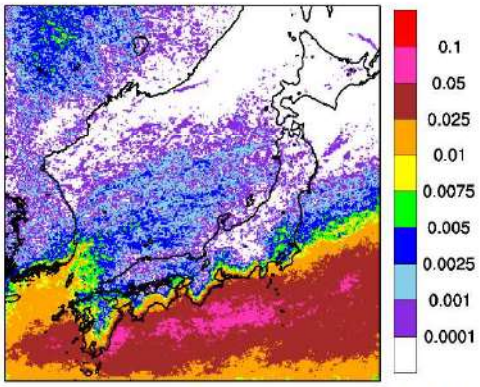
今回用いた閾値は，SReH が 250 m^2/s^2，CAPE が 1,600J/kg である。そこで，SReH を 200～300m^2/s^2（50m^2/s^2刻み），CAPE を 1,550～1,650J/kg（50J/kg 刻み）で変化させ，各組み合わせで検討した。図 E-3 は 5 ケース分プロットしたものである。閾値を小さくするほど，頻度は全体的に大きくなる。



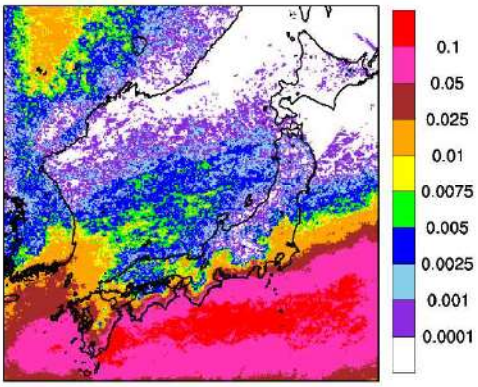
SReH 閾値：250m^2/s^2
CAPE 閾値：1,600J/kg　［%］



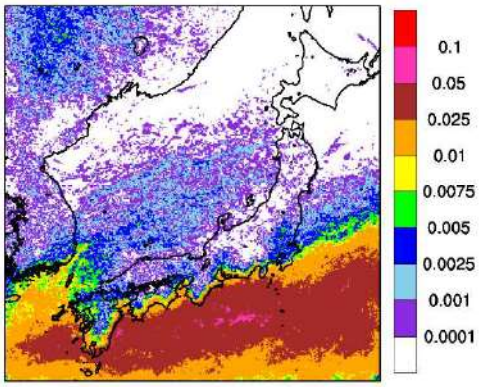
SReH 閾値：200m^2/s^2
CAPE 閾値：1,550J/kg　［%］



SReH 閾値：300m^2/s^2
CAPE 閾値：1,550J/kg　［%］



SReH 閾値：200m^2/s^2
CAPE 閾値：1,650J/kg　［%］



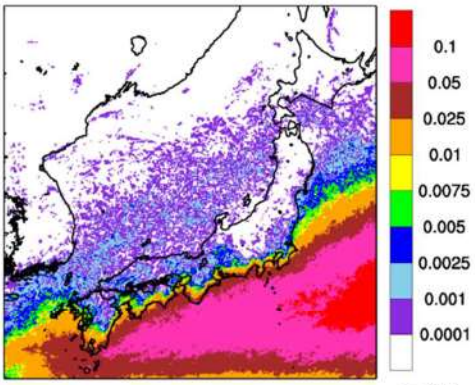
SReH 閾値：300m^2/s^2
CAPE 閾値：1,650J/kg　［%］

図 E-3　同時超過頻度分布（暖候期）

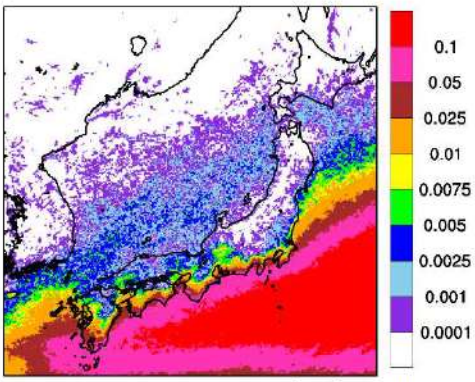
今回設定した閾値（SReH の閾値：250m^2/s^2，CAPE の閾値：1,600J/kg）に対する頻度分布の 0.01%前後よりも大きな地域が，発生箇所を含包していることがわかる。特に，いずれかの閾値を大きくすると，EHI の場合と同様に，関東平野内の F3 竜巻の発生箇所を含包できない傾向にある。特に SReH の感度が高い。SReH と CAPE の両方の閾値を小さくした場合(SReH:200 m^2/s^2,CAPE の閾値:1,550J/kg)においては，全体的な頻度は高まり，内陸部深くまで頻度が高まっており，閾値を小さくしすぎていることがわかるが，それでも日本海側沿岸・北日本と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

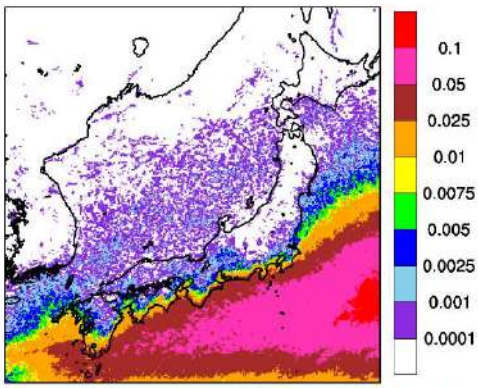
以上より，閾値に幅を持たせた分析結果では，閾値を小さくするほど，小さな竜巻が発生する環境場をカウントするため，超過頻度が大きくなる。暖候期は寒候期に比べて閾値にやや敏感であるが，茨城県以西の太平洋側沿岸域と，日本海側及び北日本の沿岸域との差は維持されることを確認できた。これは，EHI を用いる場合でも，CAPE と SReH を用いる場合においても同様である。



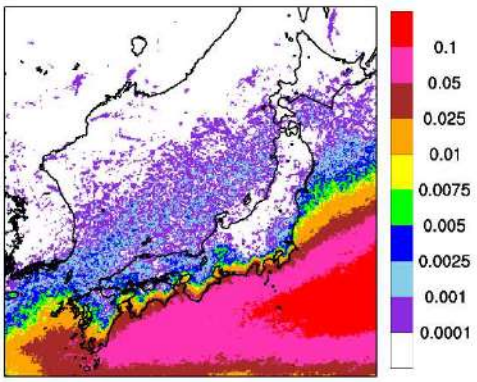
SReH 閾値：250 m^2/s^2 ［%］
CAPE 閾値：600 J/kg



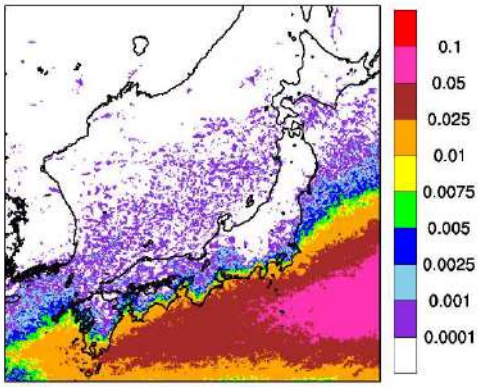
SReH 閾値：200m^2/s^2 ［%］
CAPE 閾値：550J/kg



SReH 閾値：300m^2/s^2 ［%］
CAPE 閾値：550J/kg



SReH 閾値：200m^2/s^2 ［%］
CAPE 閾値：650J/kg



SReH 閾値：300m^2/s^2 ［%］
CAPE 閾値：650J/kg

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	－

※ 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
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	－	－
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	－

	発生日	発生場所	Fスケール※	総観場1	総観場2	総観場3
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	—	—
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	—

	発生日	発生場所	Fスケール※	総観場1	総観場2	総観場3
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	－	－
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	－

	発生日	発生場所	Fスケール※	総観場1	総観場2	総観場3
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	－	－
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	－	－

	発生日	発生場所	F スケール※	総観場 1	総観場 2	総観場 3
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	鹿児島県指宿郡頴娃町	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	－	－

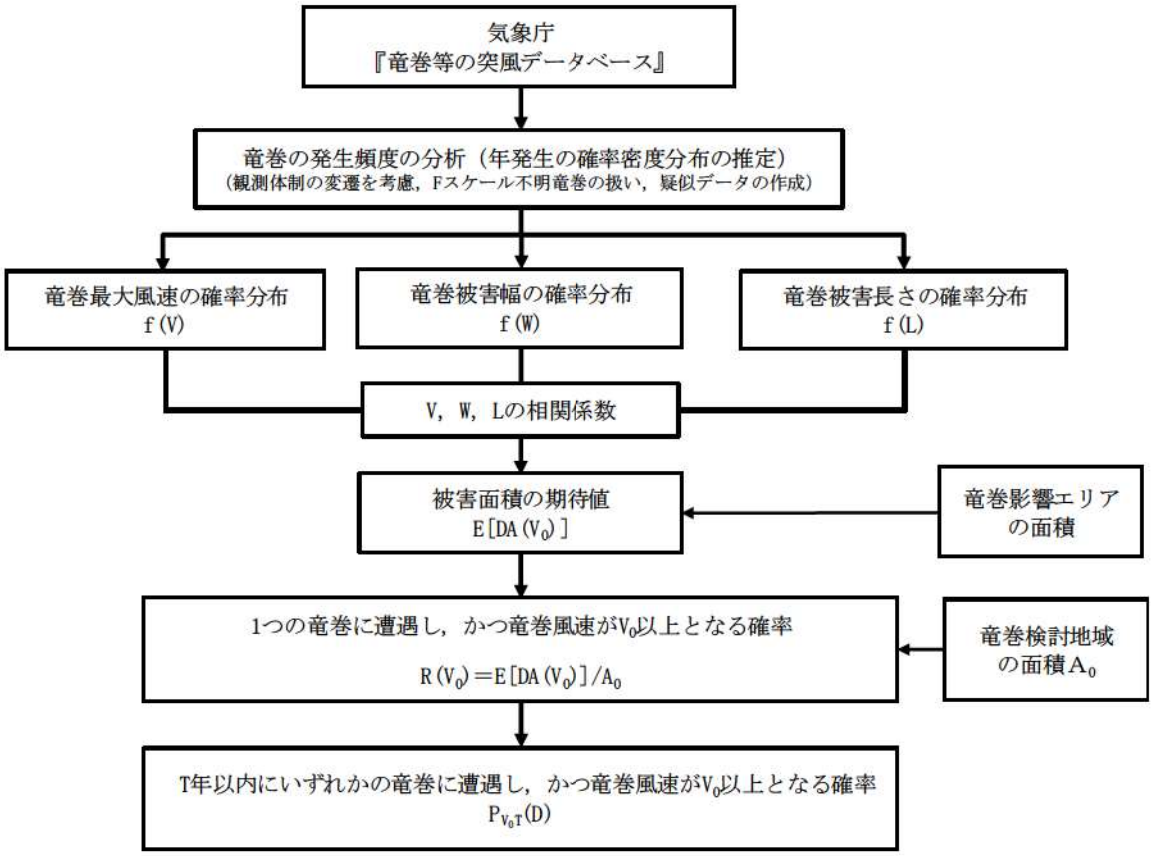
	発生日	発生場所	Fスケール※	総観場1	総観場2	総観場3
528	2011/8/20	北海道後志地方(海上)	不明	気圧の谷	－	－
529	2011/8/20	北海道後志地方(海上)	不明	気圧の谷	－	－
530	2011/8/21	長崎県平戸市	F0	停滞前線	その他(低気圧)	－
531	2011/8/21	福岡県福岡市	F1	その他(低気圧)	－	－
532	2011/8/22	北海道宗谷地方(海上)	不明	気圧の谷	－	－
533	2011/8/22	沖縄県(海上)	不明	太平洋高気圧	－	－
534	2011/8/22	沖縄県(海上)	不明	太平洋高気圧	－	－
535	2011/8/23	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，被害があって初めてその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。

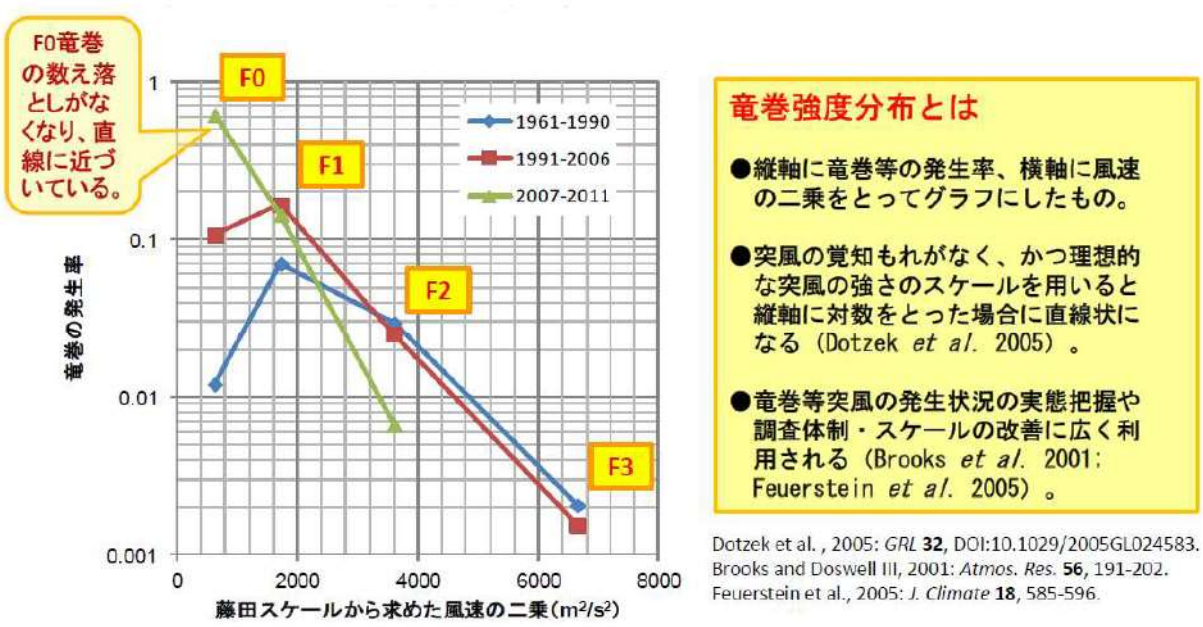
また，第2.1図に示す日本における竜巻強度分布の変遷より，理想的な竜巻強度分布（縦軸：竜巻の発生率，横軸：風速の二乗）は直線上になる。今回の実施した疑似データ作成方法においても，直線となる期間からＦスケールごとの使用データを選定しており，適切な方法と考えられる。

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	・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）。 ・被害のない海上竜巻は含んでいない。
1991 年～2006 年	・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。 ・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。
2007 年～	・気象庁が突風事例の調査体制を強化し，評定の精度が向上。 ・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。 ・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。

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
			F0	F1	F2	F3	（陸上）	（海上）	（含む不明）
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



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。

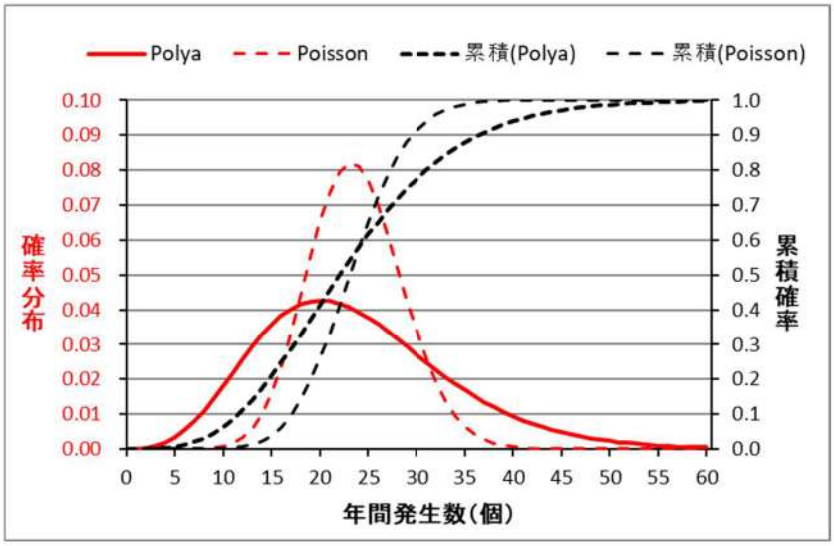
第2.2図は，求められた発生数の平均値（23.73個）と標準偏差（9.91個）に対するポアソン分布とポリヤ分布である。ポアソン分布（破線）は平均値のみで決まるが，ポリヤ分布(実線)は標準偏差の影響を受けるため，かなり幅の広い分布形となっている。なお，これらの分布形に関しては【参考資料2】で述べる（式(1)，(2)参照)。

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。

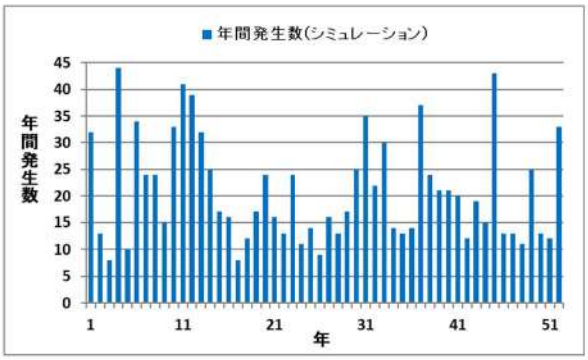
具体的には，Ｆスケール毎に採用した期間内の観測値及び不明な陸上・海上竜巻が，繰り返しランダムに現れるものとして，各年の発生数をシミュレーションし，52年間の発生数データを作成する。そのデータを観測値と見なした場合に，関数形を推定し第2.2図の結果と比較する。

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。

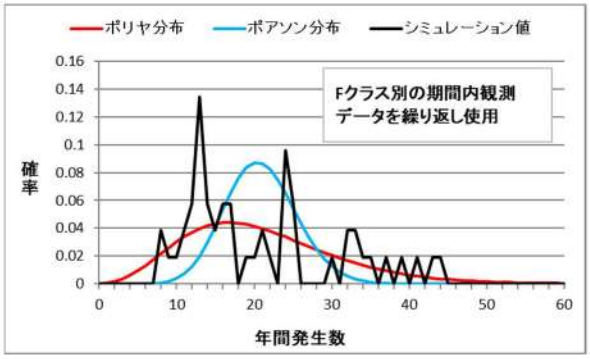
第2.3図(a)は，このようにして作成した52年間の発生数時系列の一例である。F0や不明竜巻に関する最近の増加特性を反映させている。同図(b)(c)は，シミュレーションされた発生数の確率分布を推定した結果である。この結果は，第2.2図の結果と非常に類似していることがわかる。また，ポアソン分布に比べて，ポリヤ分布の方が発生数への適合度は高いと言える。



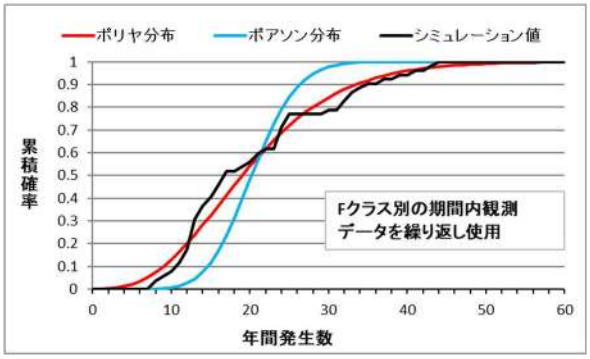
第2.2図　竜巻年発生数の確率分布（赤）と累積分布（黒）



(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
			F0	F1	F2	F3	（陸上）	（海上）	（含む不明）
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
			F0	F1	F2	F3	（陸上）	（海上）	（含む不明）
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。

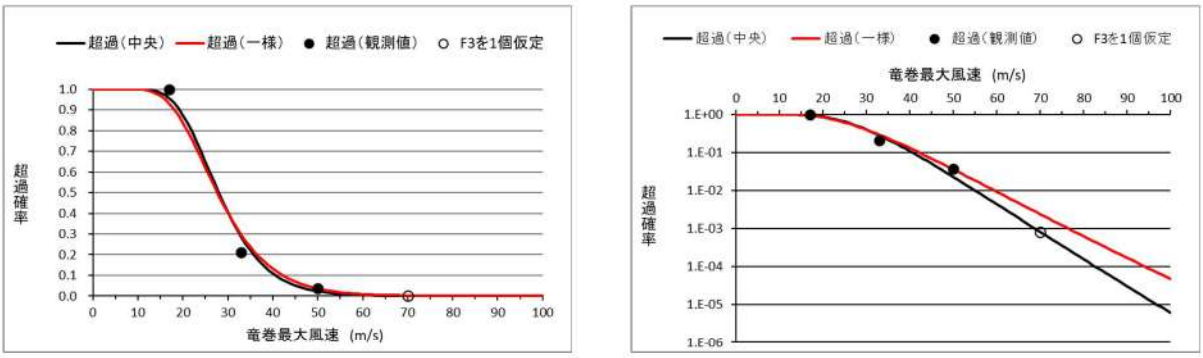
竜巻の被害長さの確率密度分布，超過確率分布の算定結果を第4.5図に示す。算定結果は，超過確率の図より観測結果を適切に推定できていることがわかる。

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。

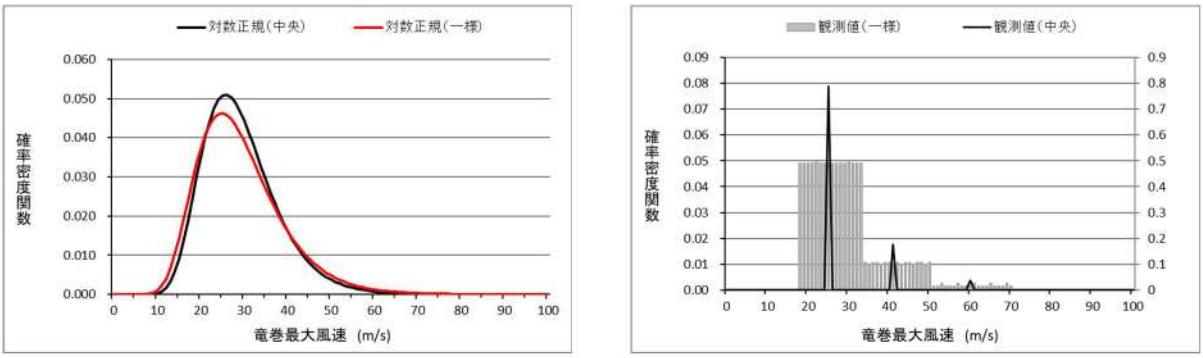
なお，竜巻最大風速，被害幅，被害長さの確率密度分布の推定では，発生頻度が重要であるために繰り返しサンプリングを行ったデータを用いたが，以下の理由により，相関係数の推定ではそのような措置を行わず，観測の元データを基に推定した。

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。

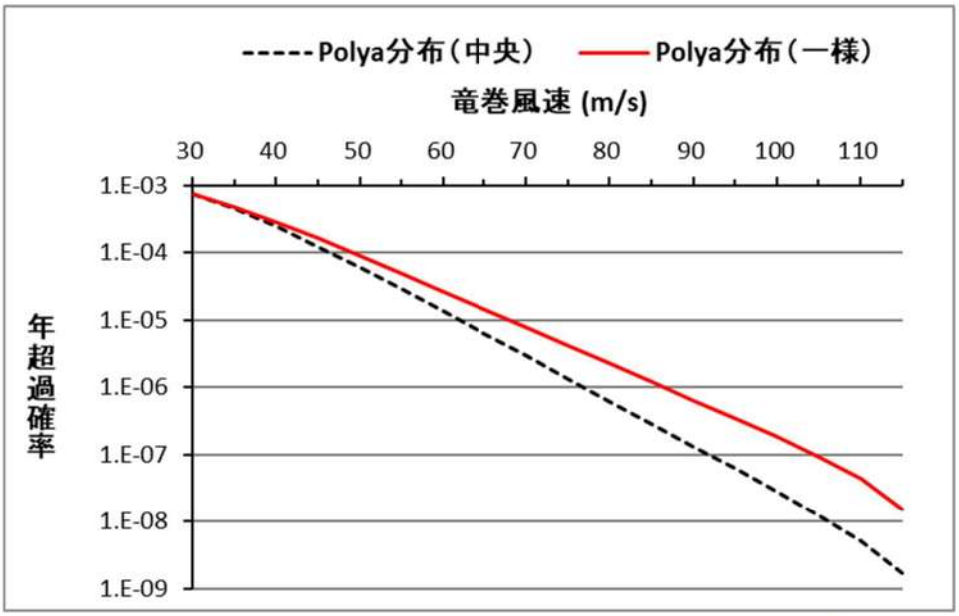


(a)超過確率



(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５km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

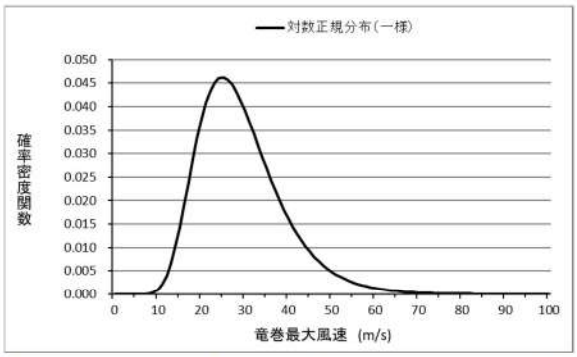
（単位：個）

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

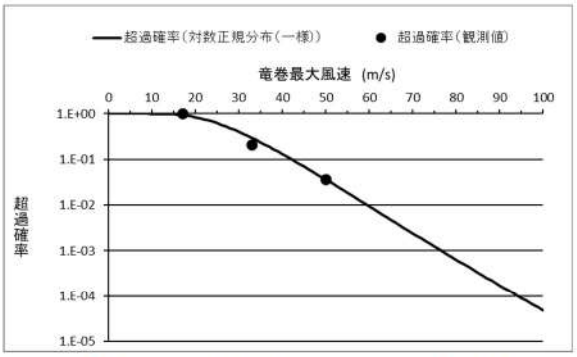
第 4.2 表(2)　竜巻最大風速，被害幅，被害長さの相関係数（単位無し）

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

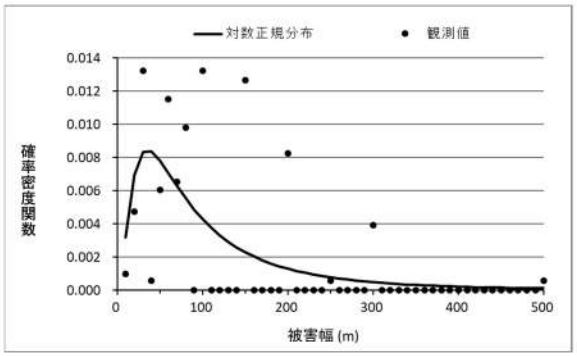
*竜巻最大風速と被害幅は無相関との知見が得られたため，ハザード算定の際には，相関係数 0 として計算



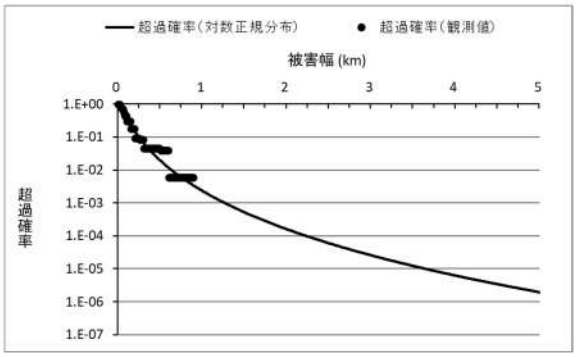
第 4.3 図(1) 竜巻最大風速の確率密度分布



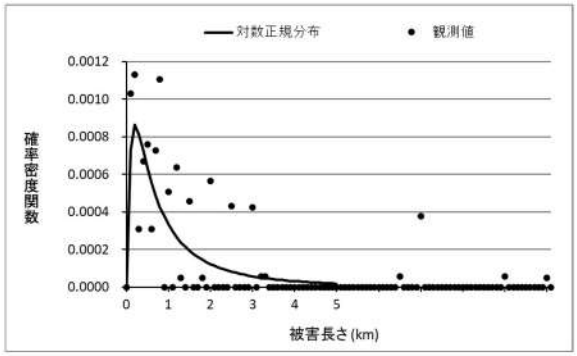
第 4.3 図(2) 竜巻最大風速の超過確率分布



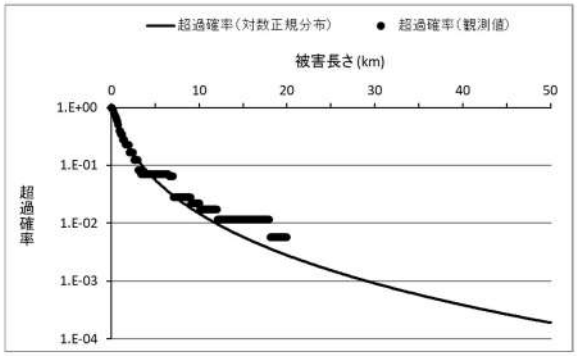
第 4.4 図(1) 被害幅の確率密度分布



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

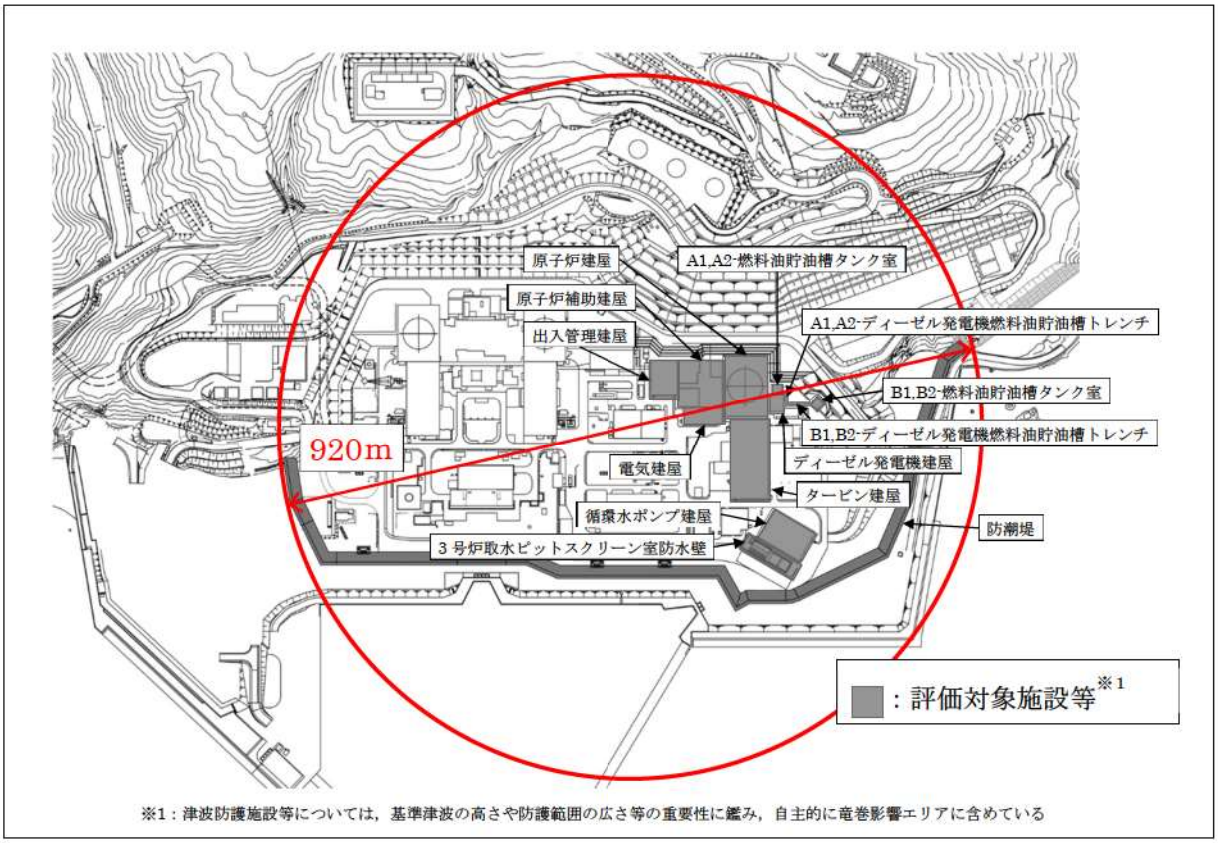
5. 竜巻影響エリア

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664,000m^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。

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

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

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

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。

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

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

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

$DA(V_0)$：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。

$$\begin{aligned} DA(V_0)&=WL+HL+WG+AB \quad ;\mathrm{Vi}\geq \mathrm{V}_0 \\ DA(V_0)&=0 \quad ;\mathrm{Vi}<\mathrm{V}_0 \end{aligned} \qquad (6.5)$$

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。

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

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（・）：確率密度分布

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

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

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

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・被害長さと構造物寸法の積，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}=25m/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(α)及び G(α)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。

$$H(\alpha) = G(\alpha) = D_0 \tag{6.8}$$

したがって，式(6.6)は式(6.6')と表すことができる。

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

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。

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

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

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。

$$\sigma_{ln}^2 = \ln\left(CV^2 + 1\right) \tag{6.11}$$

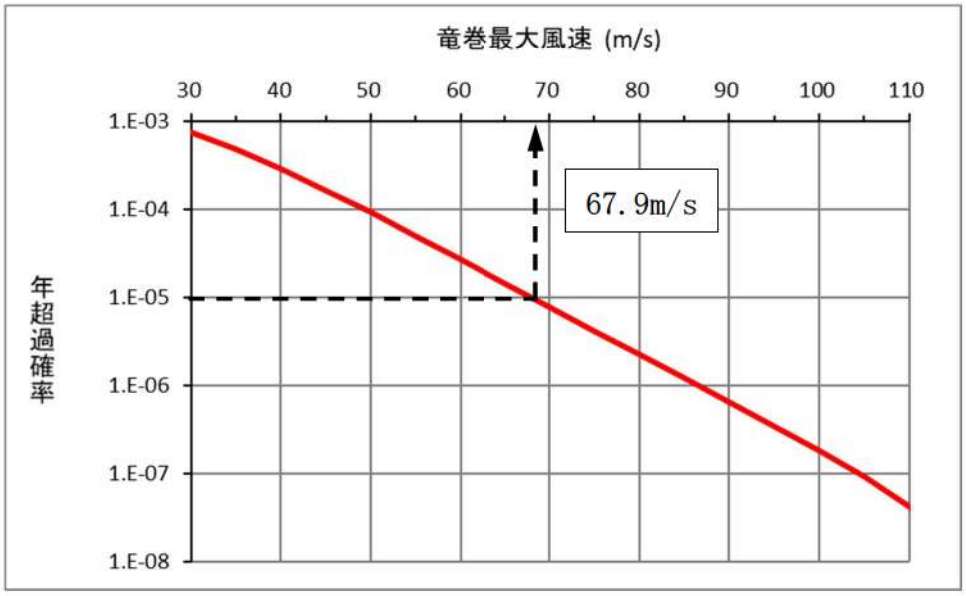
$$\mu_{ln} = \ln(\mu) - \frac{\sigma_{ln}^2}{2} \tag{6.12}$$

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５km の範囲）

7.　１km 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１km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。

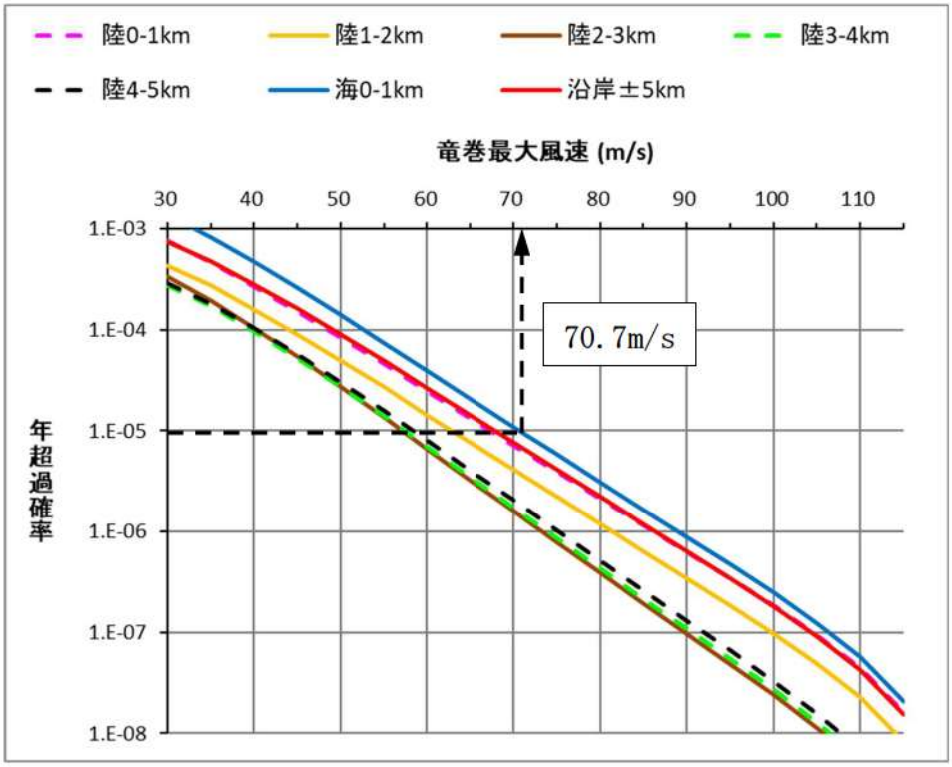
- 被害幅及び被害長さは，それぞれ１km範囲内の被害幅及び被害長さを用いる
- 海側の竜巻発生位置は不明な場合が多く，竜巻移動経路が短冊を横切る長さを精度良く求められないため，海側0-1kmのセグメント長さの評価に陸側0-1km短冊の値を代用する方法を用いる
- １km範囲ごとの領域のデータ数は少ないため，相関係数は±５kmでの値を代用する

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５㎞の範囲内で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，海側0～1㎞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㎞範囲ごと及び陸側及び海側それぞれ５㎞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５km	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
			F0	F1	F2	F3	（陸上）	（海上）	（含む不明）
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
			F0	F1	F2	F3	（陸上）	（海上）	（含む不明）
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
			F0	F1	F2	F3	（陸上）	（海上）	（含む不明）
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
			F0	F1	F2	F3	（陸上）	（海上）	（含む不明）
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
			F0	F1	F2	F3	（陸上）	（海上）	（含む不明）
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

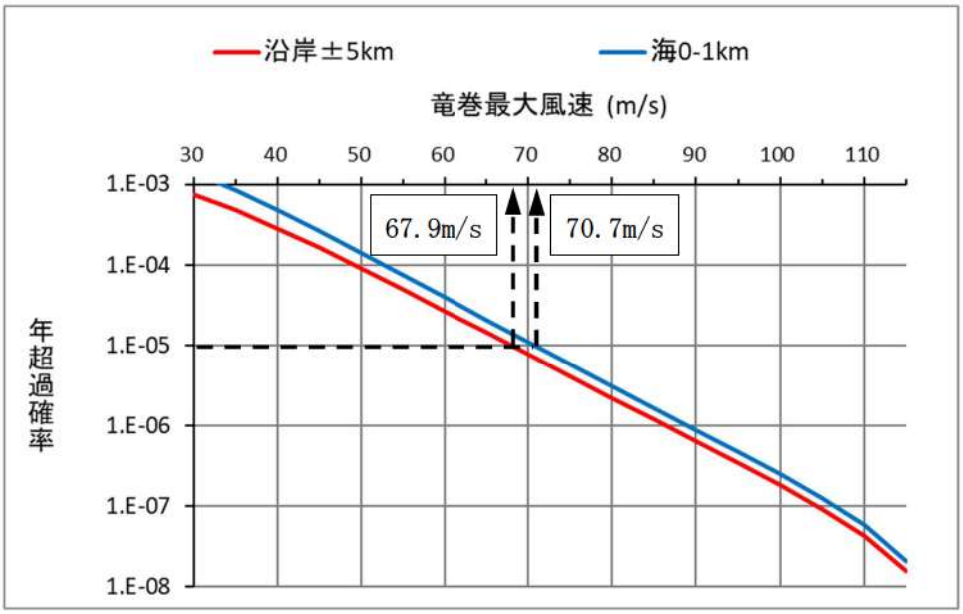
竜巻検討地域（海0-1km）	発生数の統計	小計	竜巻スケール				不明		総数
			F0	F1	F2	F3	（陸上）	（海上）	（含む不明）
1961～2012/6（51.5年間）	期間内総数	31	10	14	7	0	11	40	82
	平均値（年）	0.60	0.19	0.27	0.14	－	0.21	0.78	1.59
	標準偏差（年）	1.11	0.89	0.53	0.35	－	0.67	2.47	3.44
1991～2012/6（21.5年間）	期間内総数	21	10	8	3	0	10	40	71
	平均値（年）	0.98	0.47	0.37	0.14	－	0.47	1.86	3.30
	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５km の範囲全域（竜巻検討地域）及び竜巻検討地域を１km 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５km 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１km 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５km の範囲全域及び１km 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}＝70.7m/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５km の範囲及び１km 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。

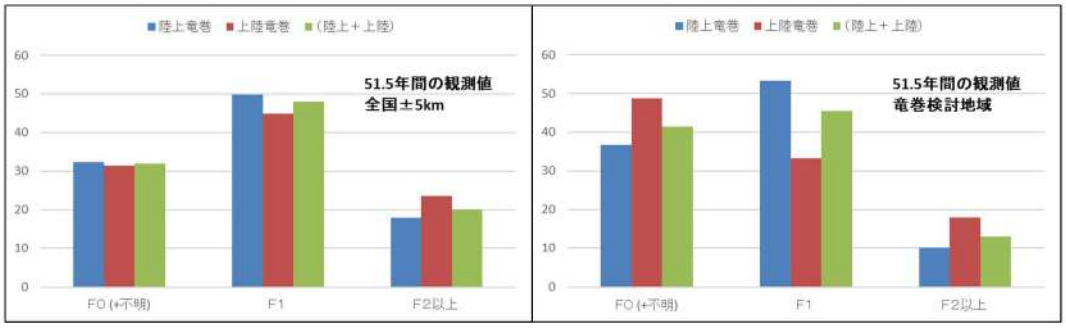
表１　Ｆスケールごとの竜巻発生数の割合

(a)全国沿岸±５km

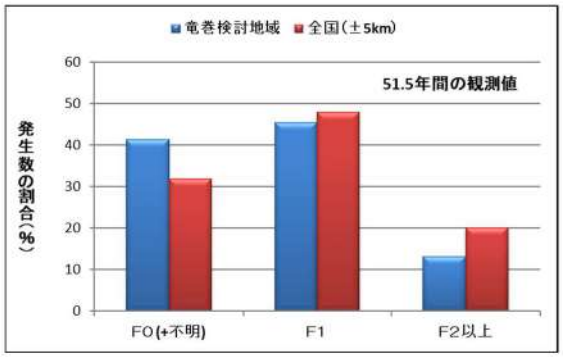
発生数の割合（%）	F0（+不明）	F1	F2以上
陸上竜巻	32	50	18
上陸竜巻	31	45	24
(陸上＋上陸)	32	48	20

(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。

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

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

ここで，Nは竜巻の年発生数，ν 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。

$$\text{ポアソン分布：} P_{V_0,T}(D) = 1 - \exp\left[-\nu R(V_0)T\right] \qquad (3)$$

$$\text{ポリヤ分布：} P_{V_0,T}(D) = 1 - \left[1+\beta\nu R(V_0)T\right]^{-1/\beta} \qquad (4)$$

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，$\beta \to 0$ 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。

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

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）。

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

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。

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

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，

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

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。

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

ここで，次の近似を用いている。

$$\left[1 - R(V_0)\right]^N \approx 1 - N \times R(V_0) \tag{10}$$

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。

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

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，

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

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。

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

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。

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

したがって，式(3)（あるいは式(13)）は，式(14)を用いると，

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

と表され，$R(V_0)$ が小さい場合は，次式で近似できる。

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

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。

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

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（偶然的不確実さ）
　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。

$$P^* = P_0 + \underline{(N-1)(P_0 - \overline{P})} \qquad (1)$$

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

・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＋１σ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	風速（U）		幅（W）		長さ（L）		相関係数		
（疑似データ 1222 個）	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（＋１σ）	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。

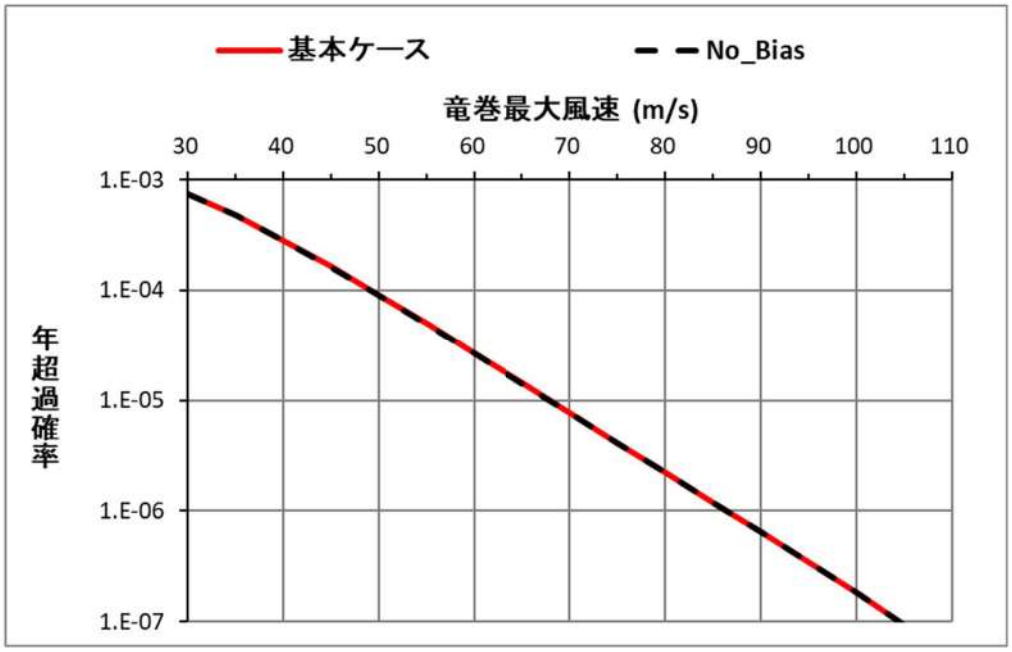


図１　基本ケースとバイアス補正後ケースのハザード算定結果比較

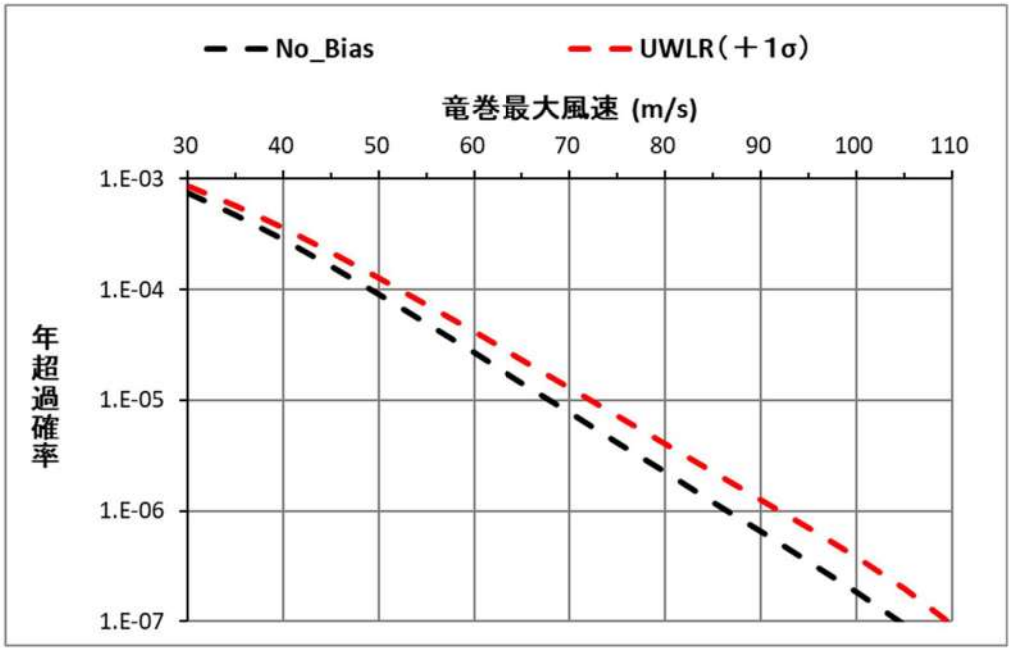


図２　バイアス補正後ケースと全パラメータ＋１σケースのハザード算定結果比較

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}=70.7m/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X1, X2, …, Xn 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

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

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

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

とする。 $\hat{\psi}_{(i)}$ の平均値を

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

により求める。バイアス値は次式で与えられる。

$$\hat{B}IAS = (n-1)(\hat{\psi}_{(\bullet)} - \hat{\psi}) \qquad (4)$$

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。

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

また，Jackknife 法による推定幅は，

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

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～∞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}～∞の超過確率が打ち切りに伴う誤差になる。

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

東京工芸大学委託成果では，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。

東京工芸大学委託成果では，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考える。

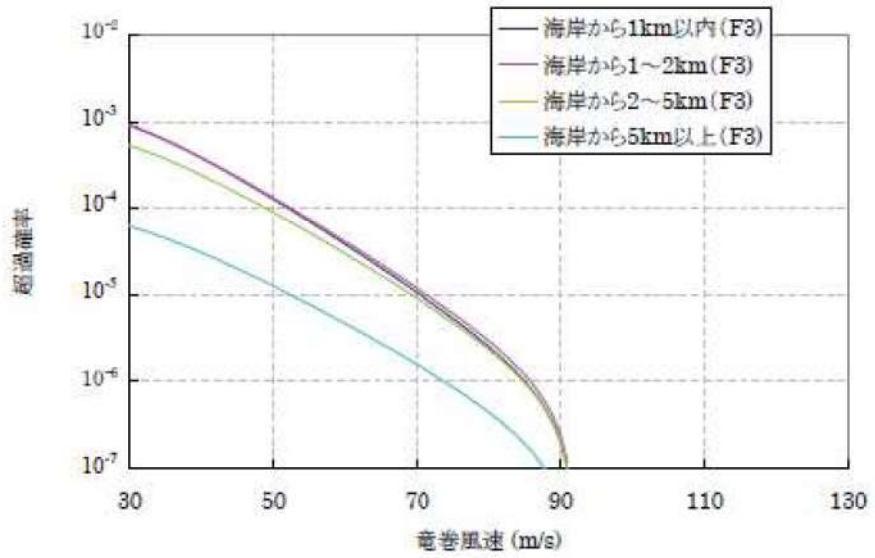


図 2.1.2.14 竜巻風速の確率密度の積分の上限を 92.6m/s（F3 の上限値）にした場合の竜巻リスクの計算結果（全国平均）

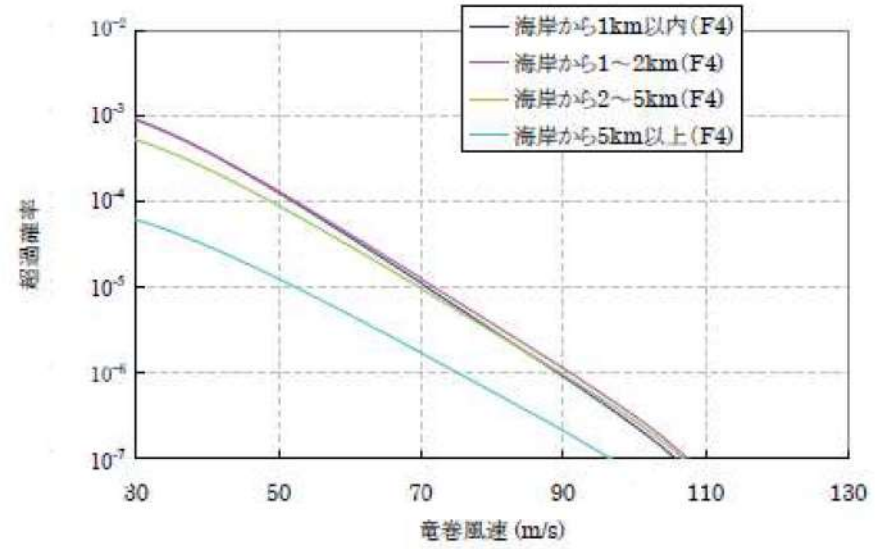


図 2.1.2.15 竜巻風速の確率密度の積分の上限を 116.2m/s（F4 の上限値）にした場合の竜巻リスクの計算結果（全国平均）

92

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

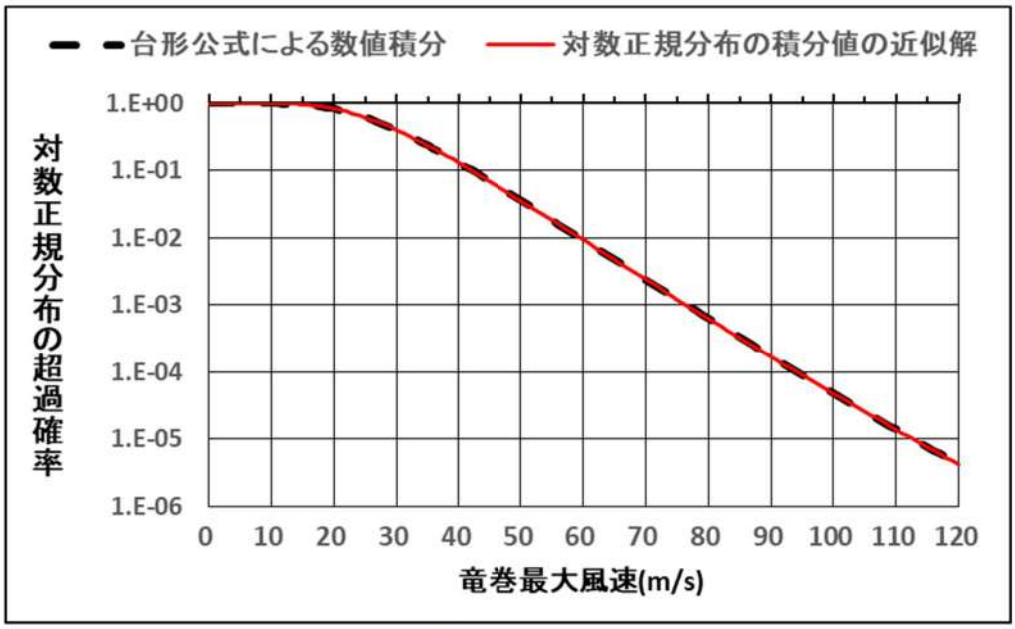


図3　風速の確率分布の積分精度の検証（近似解との比較）

地形効果による竜巻風速への影響について

1. はじめに

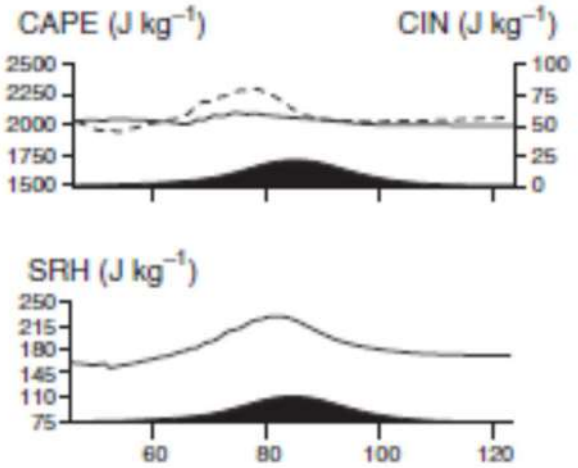
「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」において，丘陵等による地形効果によって竜巻が増幅する可能性があると考えられることから，原子力発電所が立地する地域において，設計対象施設の周辺地形等によって竜巻が増幅される可能性について検討を行い，その検討結果に基づいて設計竜巻の最大風速（V_D）を設定することが求められている。

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

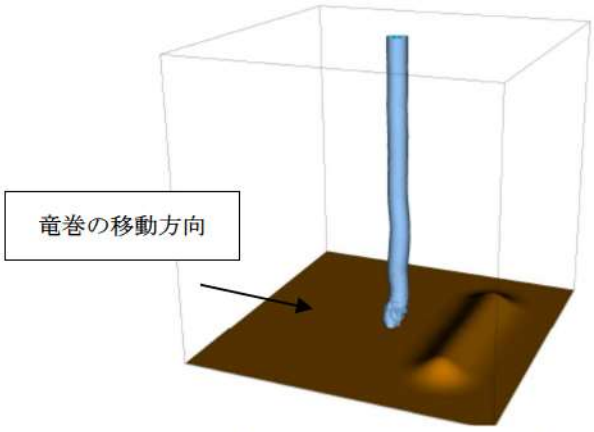
マイクロスケールの地形の起伏が竜巻の旋回流及び強風に与える影響の定量的評価は，未だ，研究課題である（Karstens 2012）。しかしながら，定性的な知見を与える関連研究は存在する。そこで用いられている主な手法は，①被害状況調査，②風洞実験，③数値シミュレーションとなる。

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。



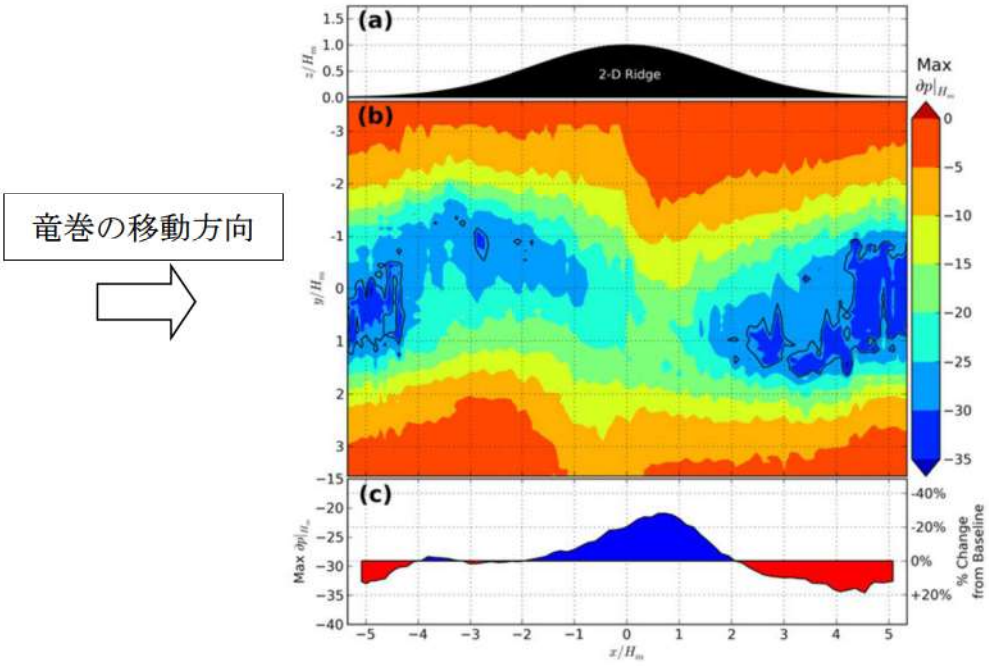
第 3-2 図 数値シミュレーションのセットアップ

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に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に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・下流の平たん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）

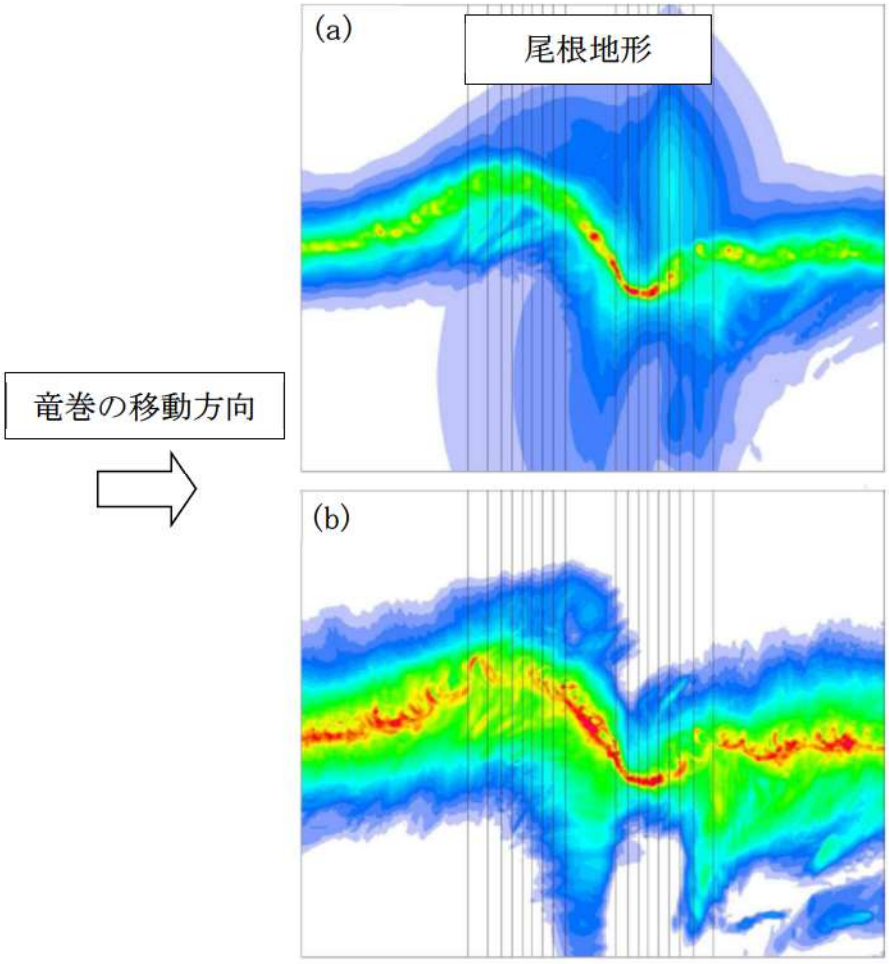
を理解できる。



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，平たん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Hmに対して±5Hm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，±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，地形の下流側の平たん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

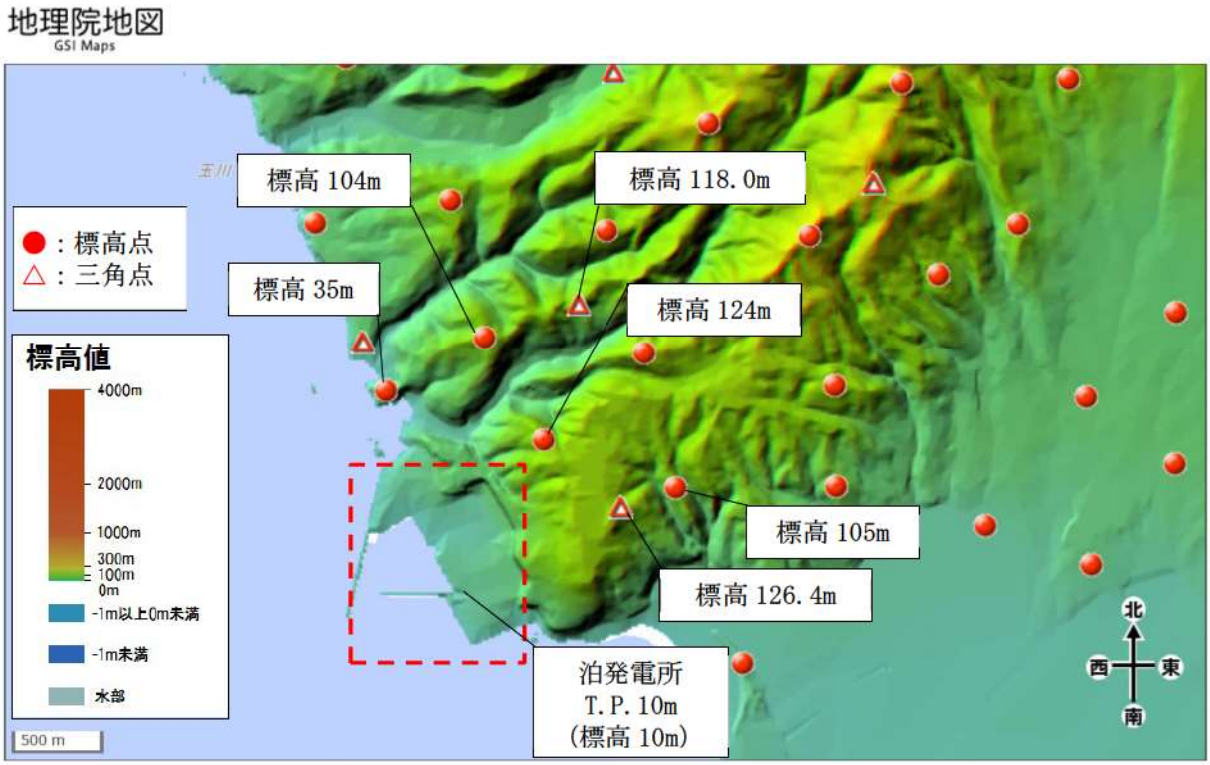
第 4-1 図に泊発電所周辺の地形図，第 4-2 図に泊発電所周辺の地表面粗度カラーコンタ（地表面粗度については参考資料 3 に示す），第 4-3 図に泊発電所周辺の標高及び防潮堤高さ，第 4-4 図に竜巻検討地域で発生した竜巻の移動方向を示す。

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。

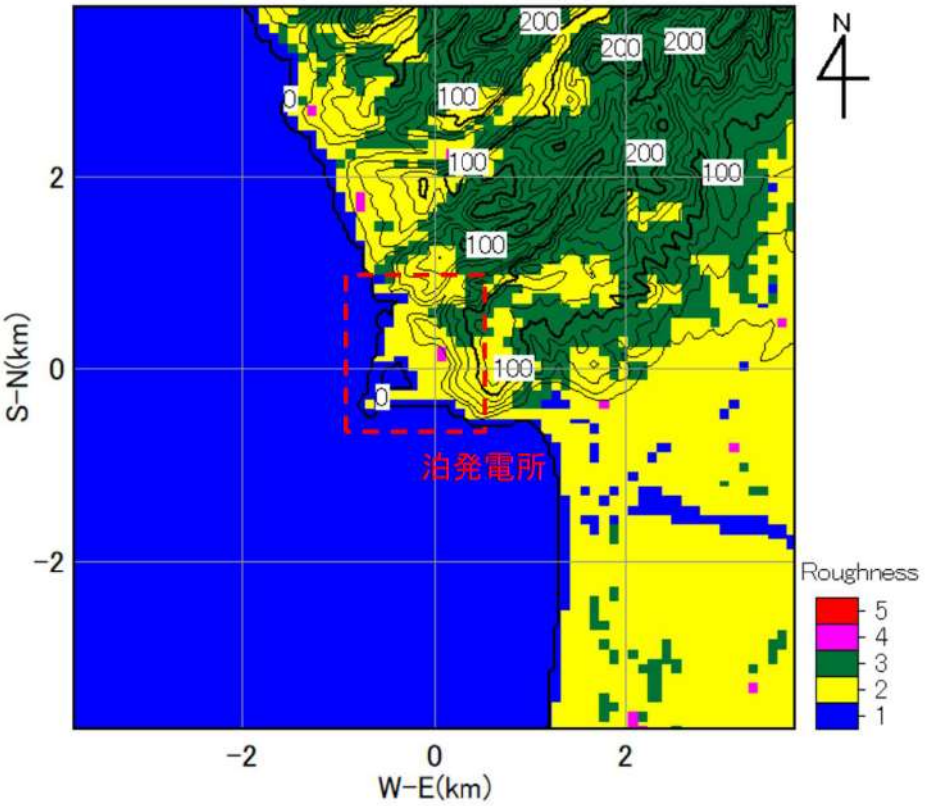
また，第 4-4 図より，竜巻検討地域で発生した竜巻は，海側から陸側に移動する方向が多く，竜巻風速は減衰する方向であった。

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。

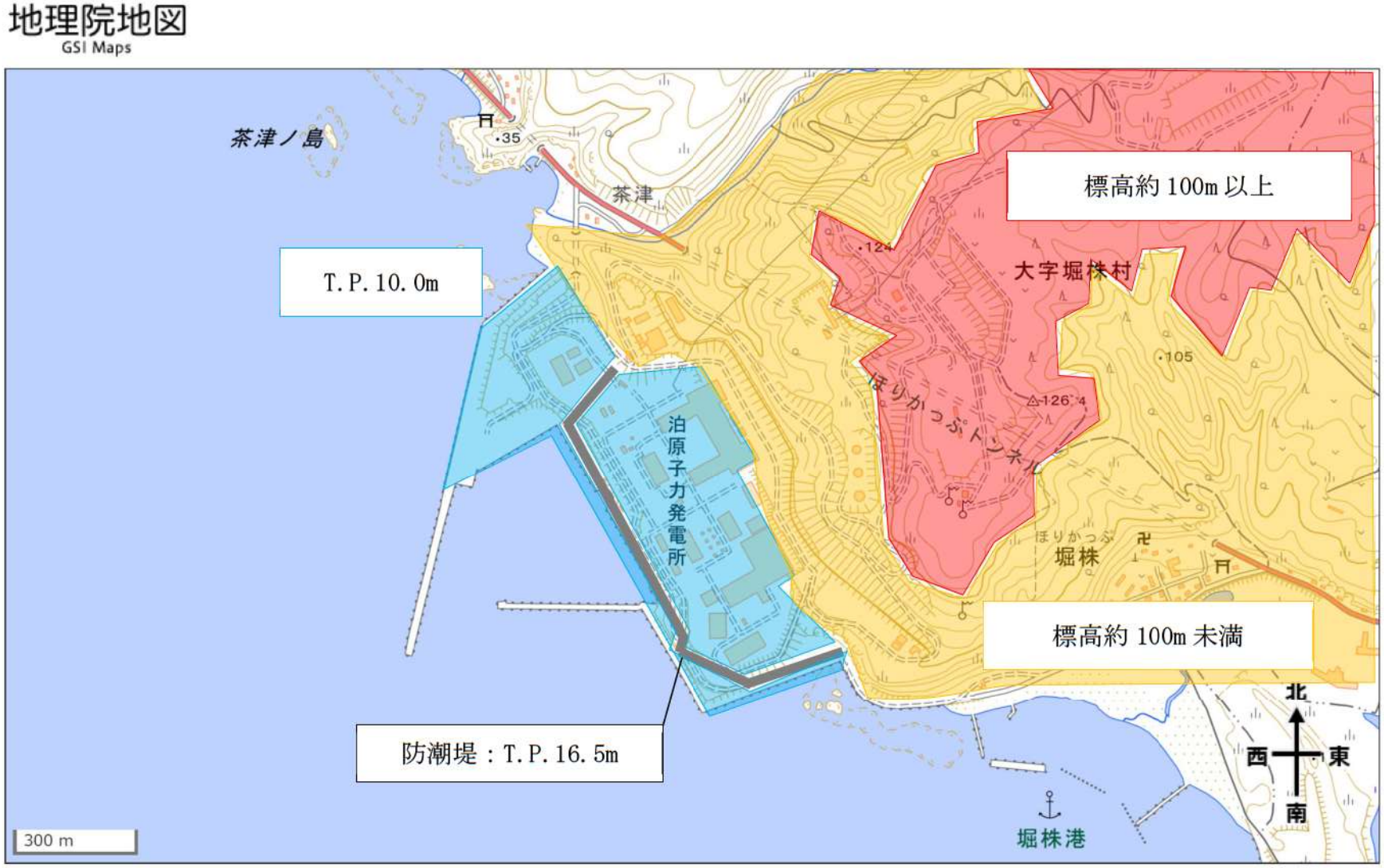
したがって，泊発電所において地形効果による竜巻の増幅を考慮する必要はないと考えられる。



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）



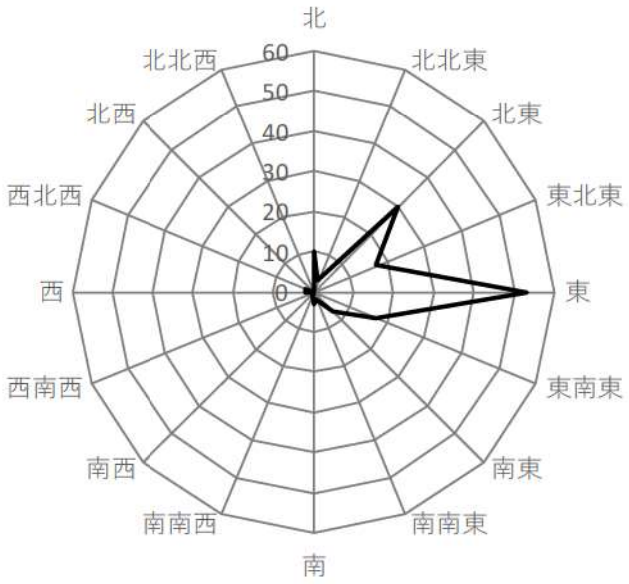
第 4-2 図　泊発電所周辺の地表面粗度



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。

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

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

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。

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

この関係を式(2)に代入すると，式(4)が得られる。

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

(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。

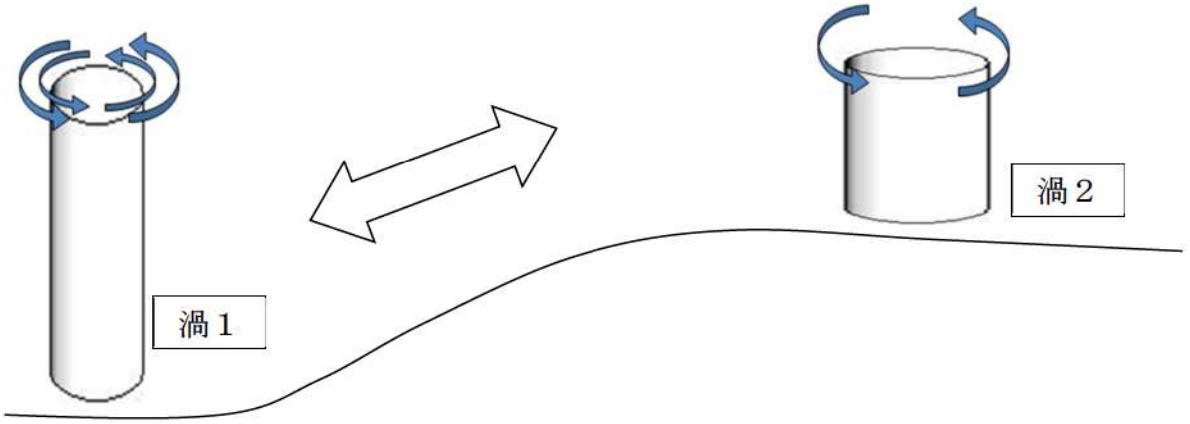


図１　竜巻旋回流の地形影響に関する模式図

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小規模なものとに分離し，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 Sheme)	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

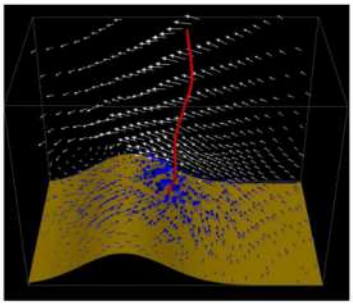
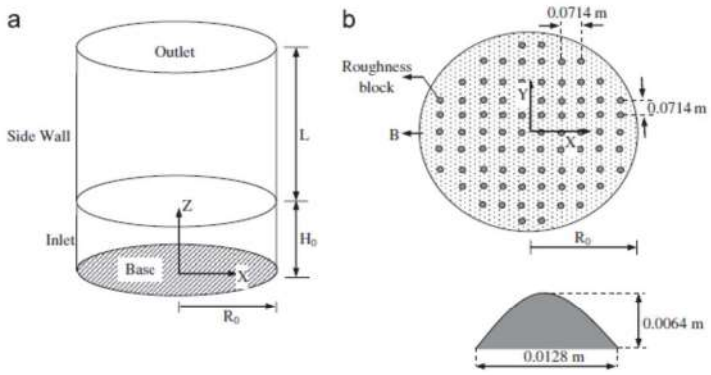


Figure 7: Sample velocity vectors 10 m above the surface (blue) and on a selected vertical plane (white) for a tornado heading upslope (moving right to left); vectors are given in a reference frame with the ground at rest. The red line represents the mean vortex core position at the time. The simulation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

(a) Lewellen (2012)



(b) Natarajan and Hangan (2012)

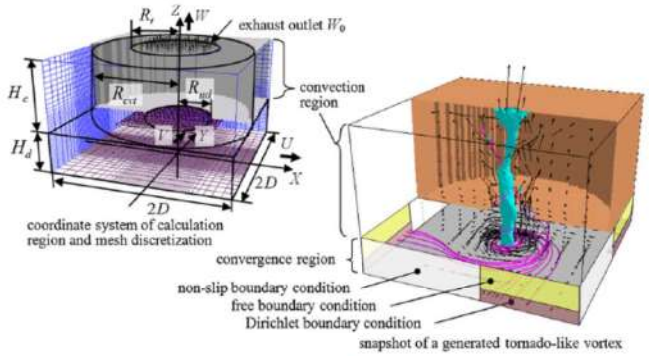


Fig. 1. Numerical tornado simulator.

(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）。

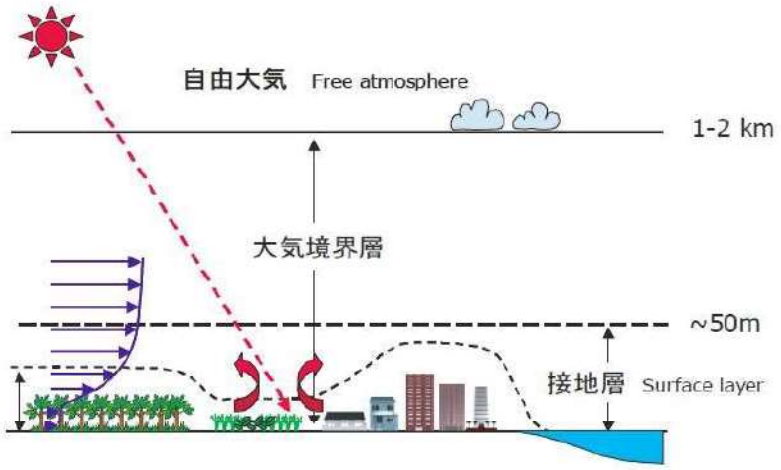


図 1　大気の鉛直構造の模式図

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_oを用いて

$$U(z)=c\ln(z/z_o) \qquad (1)$$

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。

$$U(z)=c(z/z_G)^{\alpha} \qquad (zb < z \leq z_G) \qquad (2)$$

粗度区分	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
zb (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，zG は風速が地表面粗度の影響を受けない高さ，zb 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，zb，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。

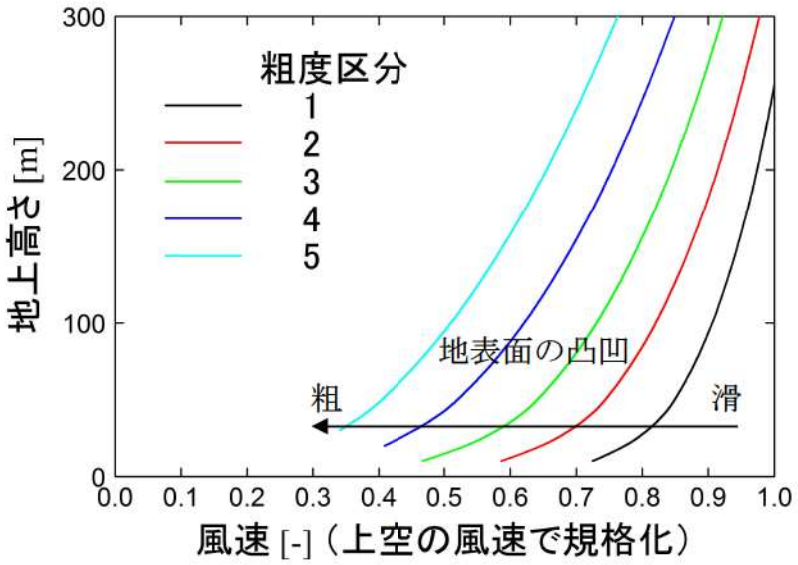


図 2　粗度区分と風速の鉛直分布との関係

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 zG＝250m の風速との比較，粗度区分Ⅱの場合は zG＝350m 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)。

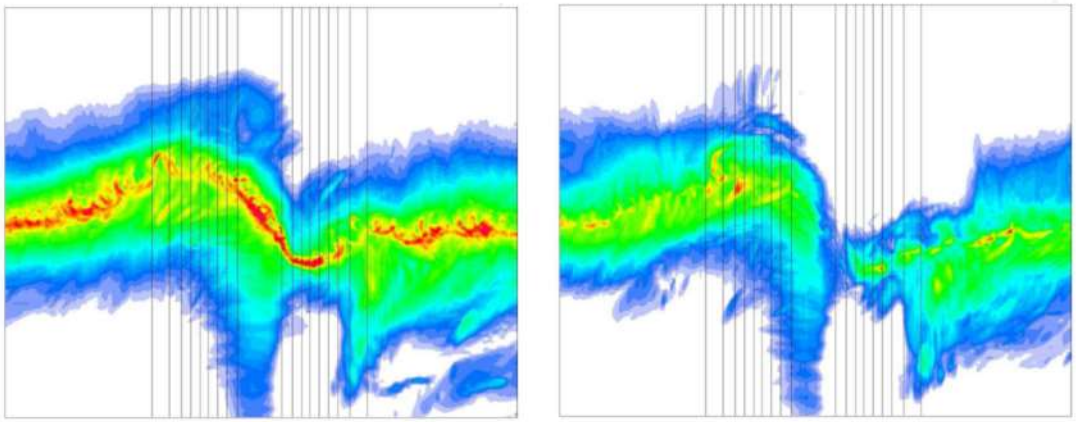
これらの知見から，表面の凹凸，すなわち地表面粗度の増加とともに竜巻に起因する強風の風速が低下するといえる。

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.

参考資料 4：地形と粗度との重畳について

ここでは，本資料で示した粗度による竜巻の減衰について，別資料で示した地形効果との重畳について言及する。地表面粗度と地形効果との重畳について，Lewellen（2012）により実施された LES が一つの知見を与えている。この LES では，高さ 100m の尾根を越える竜巻の減衰を 2 種類の地表面粗度（zo=2cm と 20cm）に対して調べている。それにより得られた最大風速のカラーコンタを以下に示す。



地表面粗度 zo=2cm の場合　　地表面粗度 zo=20cm の場合

図 1　最大風速のカラーコンタ

地表面粗度の値によらず，地形の起伏に伴う竜巻進路は蛇行している。竜巻の移動に伴う，最大瞬間風速の値の強弱は，地表面粗度に伴い異なる挙動を呈するが，地表面粗度の増加は，最大風速の低下に寄与していることを確認できる。

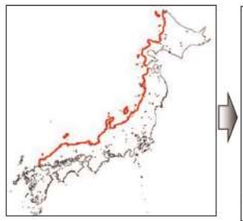
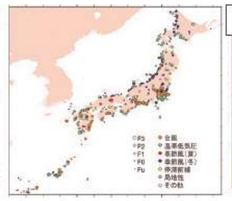
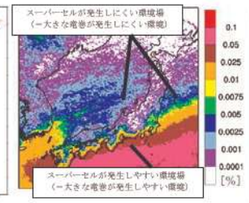
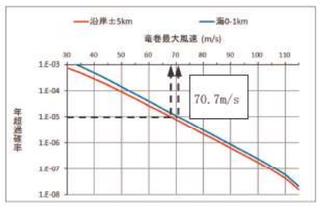
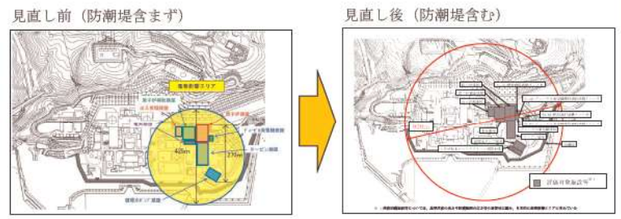
この結果は，本資料が説明した地表面粗度による竜巻風速の減衰について，地形の起伏が重畳する場合も同様の結論となることを示唆する。

参考文献

・ Lewellen, D. C. (2012) Effects of topography on tornado dynamics: A simulation study. 26th Conference on Severe Local Storms, Amer. Meteorol. Soc., Nashville, TN, 4B. 1.

竜巻影響評価の概要及び保守性について

➢ 竜巻影響評価の実施においては，竜巻に対する自然現象としての不確実性を考慮し，基準竜巻の設定から設備影響評価までの一連の評価において保守性を確保している

評価の流れ	保守性
1. 竜巻検討地域の設定 1.1 申請時は気候区分から類似性を確認し，同じ気象条件を持つと推測される日本海海岸を竜巻検討地域として選定していた（図 1） 1.2 その後，襟裳岬以西の海岸線も，総観場の分析等から気象条件の類似性を有すると判断し，竜巻検討地域を見直して設定（図 2）  図 1 申請時の竜巻検討地域 図 2 見直し後の竜巻検討地域	**【竜巻検討地域の設定に対する保守性】（添付資料 2.1，2.2）** 1.1 気候区分を参考に，冬季の季節風の影響を強く受ける北海道西部，東北地方，北陸地方及び中国地方の各日本海側を選定した 1.2 その後，竜巻発生に関する総観場の傾向，竜巻集中地域に係る検討及び突風関連指数の観点で地域特性の検討を行った結果，襟裳岬以西の海岸線も類似性があると判断したため，北海道から本州の日本海側及び北海道の襟裳岬以西へと竜巻検討地域を見直した(図 3～5)  図 3 総観場分布  図 4 EHI の超過頻度分布 (EHI 閾値 3.3) 図 5 竜巻集中地域
2. 基準竜巻 (V_B) の設定 2.1 V_{B1}：申請時は竜巻検討地域及びその周辺地域の発生実績も踏まえ 69m/s (F2 の上限値) に設定していたが，日本全国で過去に発生した最大竜巻から設定するよう見直し，92m/s（F3 の上限値）と設定 2.2 V_{B2}：ハザード曲線より，年超過確率 10^{-5} における風速は 70.7m/s と設定（図 6） 2.3 V_{B1} と V_{B2} のうち大きい風速は 92m/s であるため，基準竜巻の最大風速 (V_B) を 92m/s に設定  図 6 竜巻風速の年超過確率分布	**【竜巻観測データの不確かさに対する保守性】（添付資料2.3，2.4）** 2.1 日本海側は，太平洋側と比較し，竜巻の発生実績が少なく規模も小さいと考えるが，V_{B1} の設定においては，竜巻観測データの不確かさを考慮し，日本全国で過去に発生した竜巻の最大値を設定 2.2 なお，V_{B2} の算定に用いた竜巻影響エリア（図 7）は自主的に津波防護施設である防潮堤及び 3 号炉取水ピットスクリーン室防水壁を取り込むことにより，年超過確率 10^{-5} の竜巻風速は 63.4m/s から 70.7m/s に増加  図 7 竜巻影響エリア（左：見直し前，右：見直し後）
3. 設計竜巻 (V_D) の設定 3.1 V_B＝92m/s を安全側に切り上げて，設計竜巻の最大風速（V_D）は 100m/s に設定	**【将来的な気候変動を勘案した保守性】（添付資料 2.5）** 3.1 将来的な気候変動による竜巻発生の不確実性を考慮し，V_B＝92m/s を安全側に切り上げて V_D＝100m/s に設定
4. 風速場モデルの設定 4.1 竜巻影響評価ガイドに示されるランキン渦モデルを選定	**【飛散評価に対する保守性】（添付資料 3.3）** 4.1 風速場に高さ依存性がなく，上昇流が全領域に存在する（地面からも吹き出しがある）ため，地上に置かれた物体であっても，物体の初期高さを 40m（空中浮遊状態）と仮定して飛散評価を実施
5. 評価対象施設等の構造健全性の確認 5.1 設計飛来物である鋼製材の速度は，竜巻影響評価ガイド改正前の最大水平速度及び最大鉛直速度として，評価対象施設等に対する構造健全性の確認を実施	**【鋼製材の速度設定に対する保守性】（添付資料3.3）** 5.1 設計飛来物のうち，設計竜巻の最大風速 100m/s における衝突時の運動エネルギー又は貫通力の大きさが最大である鋼製材の速度は，衝撃荷重による影響を保守的に評価するため，竜巻影響評価ガイド改正前の最大水平速度 57m/s，最大鉛直速度 38m/s と設定して評価

竜巻影響評価及び竜巻対策の概要

【設計竜巻荷重，設計荷重の設定】

竜巻影響評価ガイドに基づき，設計竜巻荷重は，設計竜巻の風圧力による荷重（W_W），気圧差による荷重（W_P）及び飛来物による衝撃荷重（W_M）を適切に組み合わせた荷重を設定するとともに，設計竜巻荷重と組み合わせる荷重（竜巻以外の自然現象による荷重等）は，設計竜巻荷重に包絡されるもしくは考慮すべき荷重ではないことを確認する。W_W，W_P，W_M は，設計竜巻の最大風速 V_D=100m/s，風速場モデルをランキン渦モデルとした場合の荷重を設定する。

【設計飛来物の選定】

泊発電所の飛来物に係るウォークダウンを行い，発電所構内の常設物（マンホール蓋等），仮設物（資機材等）及び二次飛来物（屋根等）の中から，それらの飛来物発生防止対策の可否，固定状況，過去の被害事例や代表性（運動エネルギー，貫通力等）を踏まえ，設計飛来物を選定した。

砂利　　鋼製パイプ　　鋼製材

図１　泊発電所の設計飛来物（イメージ）

表１　設計飛来物の緒元

項　目	飛来物の種類		
	砂利	鋼製パイプ	鋼製材
サイズ（m）	長さ×幅×奥行 0.04×0.04×0.04※1	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2
質量（kg）	0.18	8.4	135
最大水平速（m/s）	62※2	49※4	57※4
最大鉛直速度（m/s）	42※3	33※4	38※4

※1 砂利のサイズは，竜巻防護ネットの金網が目開き5cm×5cmを２枚重ね，4cm×4cmを１枚重ねの構造，又は４cm×４cmを３枚重ねの構造となっていることを考慮して選定
※2 設計竜巻風速100m/s，当社が実施するランキン渦モデルの風速場を用いた飛散評価手法による結果
※3 竜巻影響評価ガイドに基づき最大水平速度の2/3 として算出
※4 衝撃荷重による影響を保守的に評価するため，竜巻影響評価ガイドに示される竜巻の最大風速（V_D）＝100m/s の場合と同じ値とする。また，鋼製材については，竜巻影響評価ガイド改正前の値とする。

【竜巻影響評価】

設計荷重に対し，評価対象施設等（施設，設備）の構造健全性評価を行い，必要に応じて対策を行うことで，構造健全性を維持すること，又は損傷した場合は，取替，補修が可能なこと，波及影響も考慮した上で安全機能が維持されていることの確認を行う。

（１）施設の評価

①評価対象施設（原子炉建屋（外部遮へい建屋），原子炉建屋（周辺補機棟），原子炉建屋（燃料取扱棟），原子炉補助建屋，ディーゼル発電機建屋，燃料油貯油槽タンク室，ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ）の構造骨組評価，局部評価，設計飛来物の衝突に関する評価及び建屋外周部建具（扉等）に関する評価を実施し，内包する外部事象防護対象施設の安全機能に影響を及ぼさないことを確認し，影響がある場合には，防護対策を実施する。

②外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設（タービン建屋，電気建屋，出入管理建屋，循環水ポンプ建屋）の構造骨組評価を実施し，倒壊により外部事象防護対象施設等が影響を受けないことを確認する。

※ 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の重要性に鑑み，自主的に機能維持のための配慮を行う

（２）設備の評価

評価対象施設（排気筒，換気空調設備（アニュラス空気浄化設備，格納容器空調装置，補助建屋空調装置，試料採取室空調装置，中央制御室空調装置，電動補助給水ポンプ室換気装置，制御用空気圧縮機室換気装置，ディーゼル発電機室換気装置及び安全補機開閉器室空調装置），使用済燃料ピット，使用済燃料ラック，新燃料ラック，燃料移送装置，使用済燃料ピットクレーン，燃料取扱棟クレーン，燃料取替キャナル，キャスクピット，燃料検査ピット，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，配管及び弁（原子炉補機冷却海水系），原子炉補機冷却水サージタンク（配管及び弁含む），主蒸気系配管他，制御用空気系配管，蓄熱室加熱器，ディーゼル発電機燃料油移送配管）に対して，設計荷重に対する強度評価及び必要に応じて設計飛来物による貫通評価を実施し，評価対象施設の安全機能に影響を及ぼさないことを確認する。評価対象施設に影響がある場合には，防護対策を実施する。

外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る設備（ディーゼル発電機排気消音器，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排気管，ディーゼル発電機燃料油貯油槽ベント管，換気空調設備（蓄電池室排気装置））は，設計荷重に対する強度評価を実施し，外部事象防護対象施設等の安全機能に波及的影響を及ぼさないことを確認する。

【飛散防止対策】

設計飛来物に選定した鋼製材より運動エネルギー及び貫通力が大きいものについては，設置場所等に応じて固縛等を実施する。

（１）資機材・車両

・飛散影響・横滑りを考慮するエリア内に設置する資機材等（発電機，コンテナ等）は，飛散防止の観点から，移設・撤去を行う。また，移設や撤去が困難なものについては，浮き上がりや横滑りを考慮し固縛等を行う運用とする。

・車両の飛散防止対策としては，移設，撤去，固縛に加え，作業中車両について竜巻発生確度ナウキャスト等を活用し即座に車両を移動できる体制を整え，飛散影響・横滑りを考慮するエリア外への退避を行う運用とする。

（２）仮設足場

・竜巻による風圧力の影響により仮設足場の各部材が容易に飛散しないよう，足場材の緊結等の適切な飛散防止対策行う運用とする。

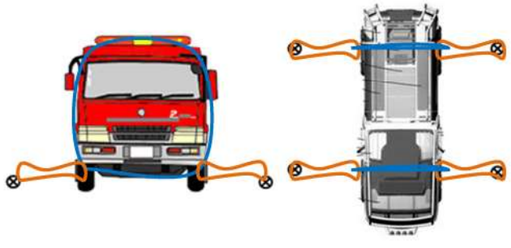


図２　車両の固縛イメージ

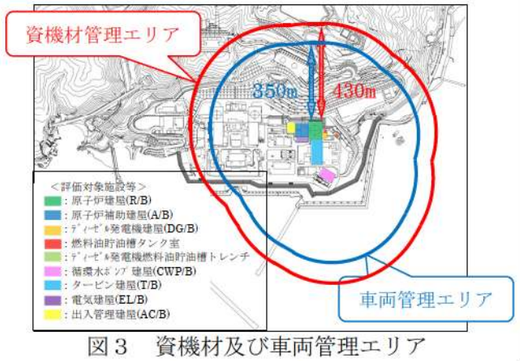


図３　資機材及び車両管理エリア

【防護対策】

設計飛来物によって損傷する可能性がある外部事象防護対象施設について，下記のとおり防護対策を実施する。

（１）竜巻防護ネットによる防護

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，配管及び弁（原子炉補機冷却海水系）を防護するため，当該設備が設置されている循環水ポンプ建屋内の取水ピットポンプ室及び原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室の上部開口部に，すり抜け防止用鋼材，架台及びネットで構成した竜巻防護ネットを設置することで，設計飛来物（鋼製材）の侵入を防止する。

竜巻防護ネットは設計飛来物（鋼製材）の運動エネルギーを吸収可能な設計にする。

（２）竜巻防護鋼板等による防護

原子炉補機冷却水サージタンク（配管及び弁含む），主蒸気系配管他，制御用空気系配管，蓄熱室加熱器，ディーゼル発電機燃料油移送配管，新燃料ラックを防護するため，竜巻防護鋼板，竜巻防護壁（板）又は竜巻防護扉を設置することで，設計飛来物（鋼製材）が当該設備に衝突することを防止する。竜巻防護鋼板等は設計飛来物（鋼製材）の貫通を防止できる設計にする。

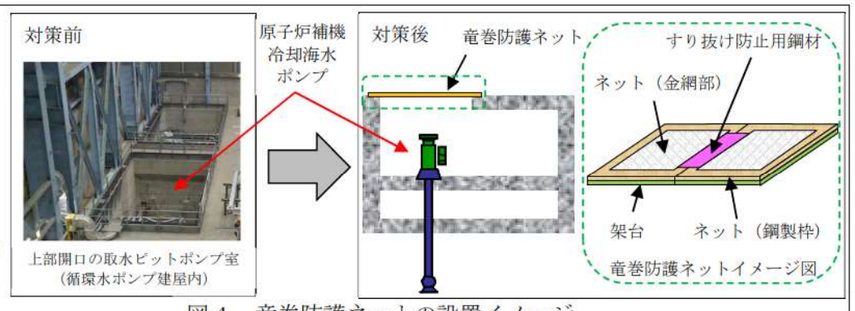
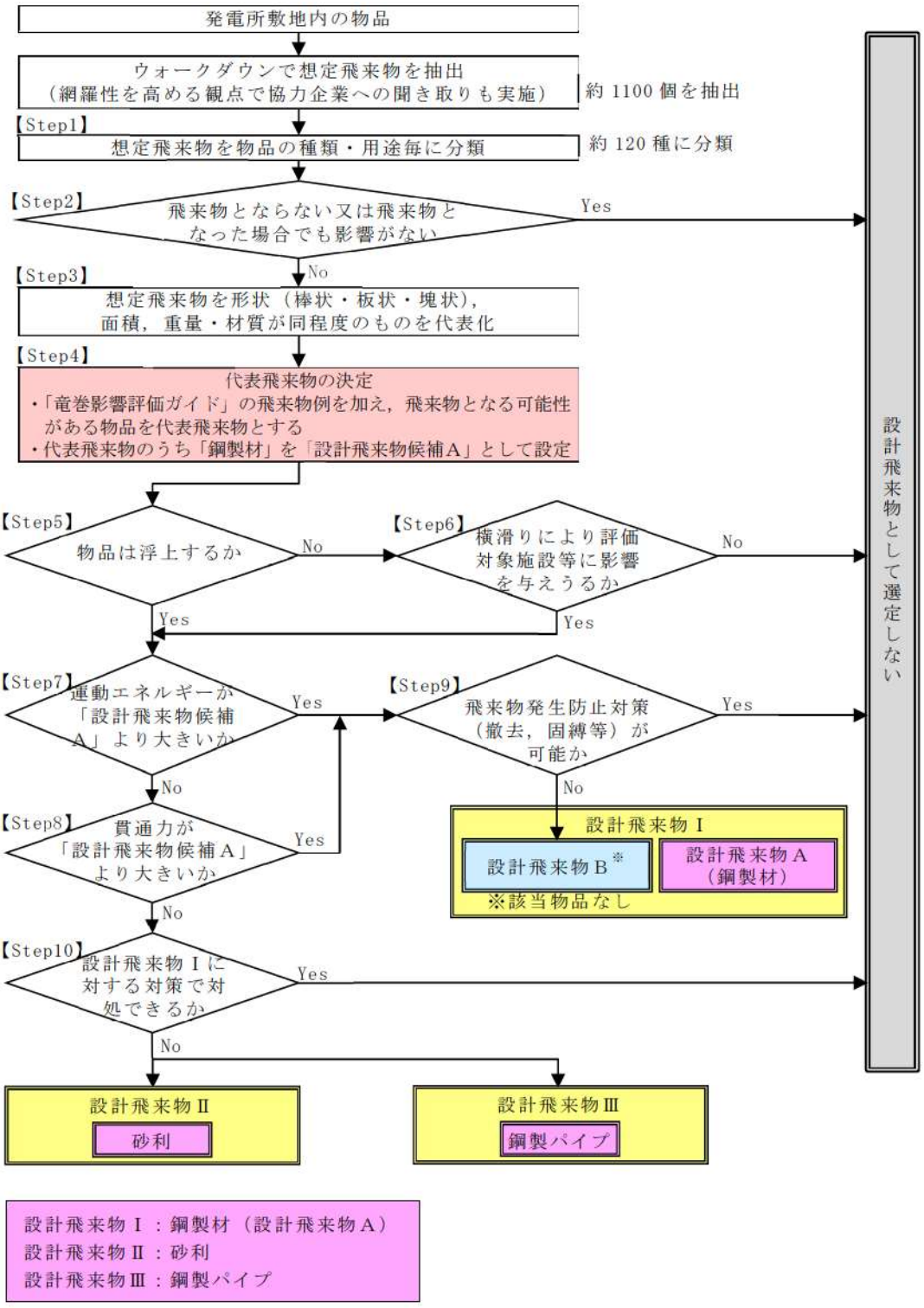


図４　竜巻防護ネットの設置イメージ

設計飛来物の選定について

発電所構内における竜巻飛来物となり得る物品を網羅的に調査し，それらの中から代表性をもたせた設計飛来物を，第 3.3.1 図のフローに基づき選定した。



第 3.3.1 図 設計飛来物の選定フロー

１．飛来物調査

泊発電所における飛来物に関す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 7 月 15 日～8 月 4 日に実施した。調査では，常設物，仮設物のうち飛来物となりうる物品，及び二次飛来物となりうる物品（設置状況等から風圧や飛散による被害を受けて飛来物となり得る物）を抽出した（詳細は別紙１「飛来物及び固定状況に係る調査結果について」）。

また，持ち込み資機材等（夏場や冬場に屋外作業の準備のために使用する休憩所（仮設小屋）や定期検査中に使用する仮設足場材等）の仮設物について，ウォークダウンにて確認した結果の網羅性を高めることを目的に協力企業への聞き取りも実施しウォークダウンで確認した飛来物源と大きな相違がないことを確認している。飛来物調査結果を踏まえ，抽出された飛来物を種類，用途毎に分類した。

２．固定状況等を踏まえた抽出

上記１．で抽出した結果を踏まえ，過去の被害事例等（別紙２「分解し小型軽量となる物品及び倒壊するが飛来物とはならない物品等について」）を参考に，以下の観点のいずれにも当てはまらない物品を抽出した。

①飛来物化しない（風の影響を受けにくい形状（網状），または頑健に固定されている）
（詳細は別紙１「飛来物及び固定状況に係る調査結果について」）

②分解し小型軽量となる物品

③竜巻の影響により倒壊するが，飛来物とはならない物品

３．飛来物の形状等による分類

上記２．で抽出した物品に対して，形状（棒状，板状，塊状），サイズ（大，中，小）及び柔※1，剛※2などの特徴から同程度のものを代表化し，竜巻影響評価ガイドに示される飛来物例を追加した結果を第 3.3.1 表に示す。また，第 3.3.2 図～第 3.3.4 図に調査で確認した代表位置を示す。

※１：柔（木製又は中空状，複数の材からなる）

※２：剛（コンクリート又は鋼製で密実，単体からなる）

第3.3.1表　代表的な飛来物の抽出結果

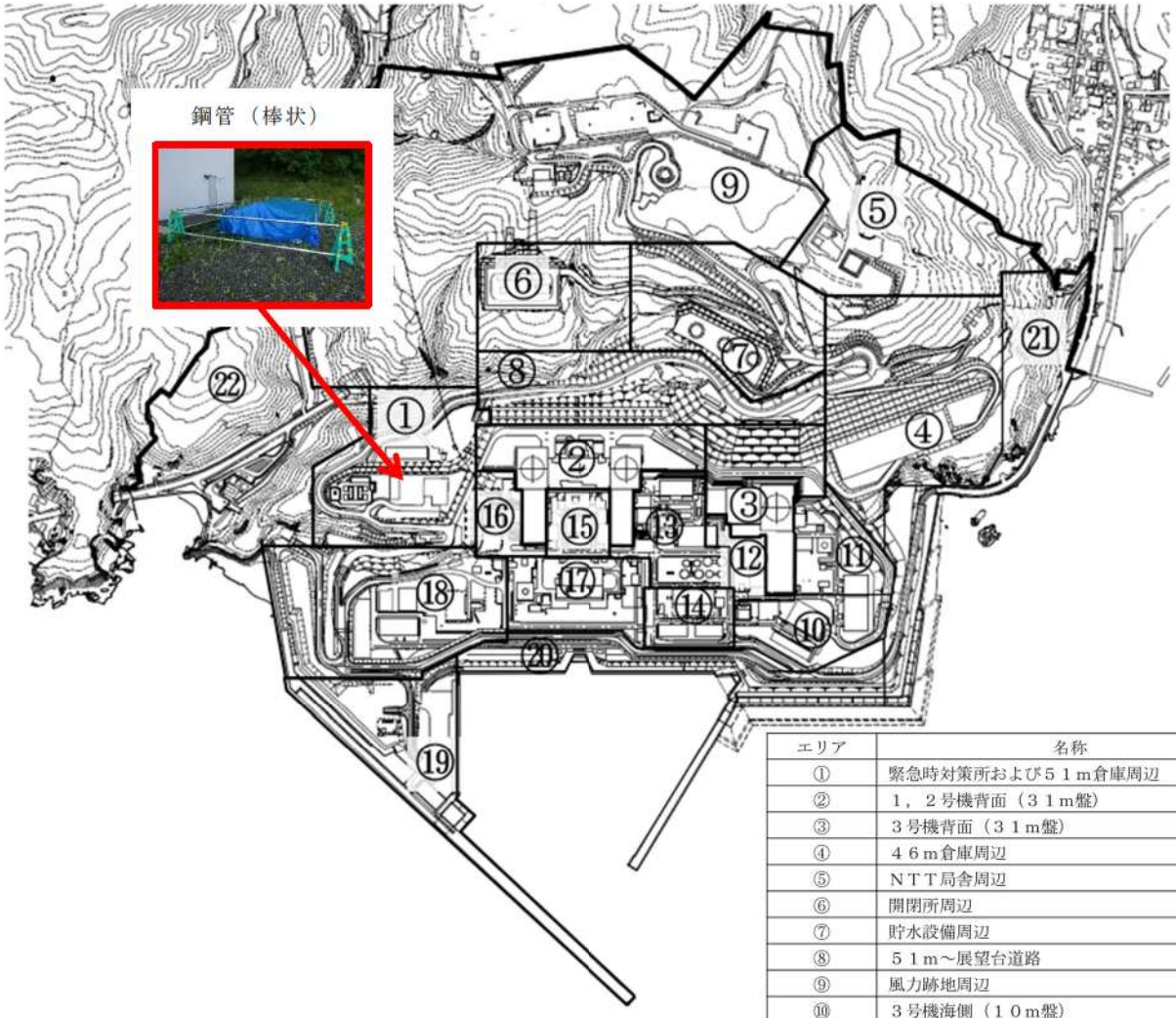
(代表飛来物)

		棒状			板状			塊状			
		大	中	小	大	中	小	大	中	小	極小
常設物	剛	－	－	－	－	－	・マンホール蓋	－	－	－	－
	柔	－	－	－	－	－	－	－	・空調室外機	－	－
仮設物	剛	－	・(ガイド)鋼製材※ ・鋼管	・(ガイド)鋼製パイプ※	－	・鋼材 ・鋼板 ・コンクリート板 ・(ガイド)コンクリート板※	－	・除塵設備予備品	・コンクリートブロック ・発電機 ・カードル	－	・砂利
	柔	－	－	－	－	－	－	・コンテナ ・(ガイド)コンテナ※	・ドラム缶 ・プレハブ小屋 ・自動販売機	－	－
	柔(一部剛)	－	－	－	－	－	－	・発電機車 ・トラック ・重機 ・ポンプ車 ・放水砲 ・タンクローリー ・乗用車 ・バス ・(ガイド)トラック※	－	－	－

(二次飛来物)

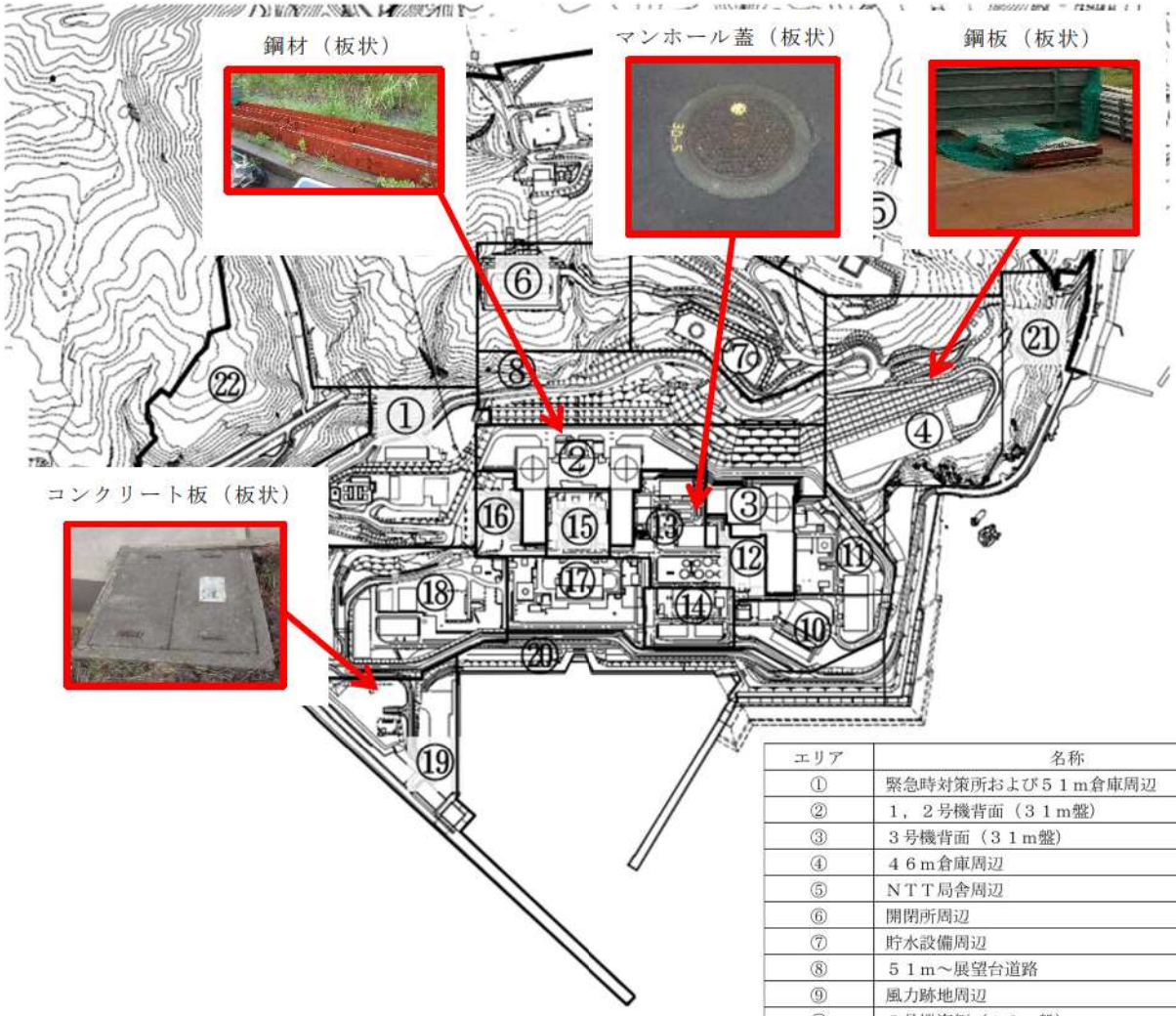
		棒状			板状			塊状		
		大	中	小	大	中	小	大	中	小
二次飛来物	剛	－	・配管	－	・外壁	・扉 ・ガラス窓	－	・鋼製階段	－	－
	柔	－	・雨どい	－	・屋根(鋼板) ・シャッター	・手すり	－	－	－	・照明器具 ・アンテナ

※：竜巻影響評価ガイドにおいてサイズ及び質量が記載されている物品



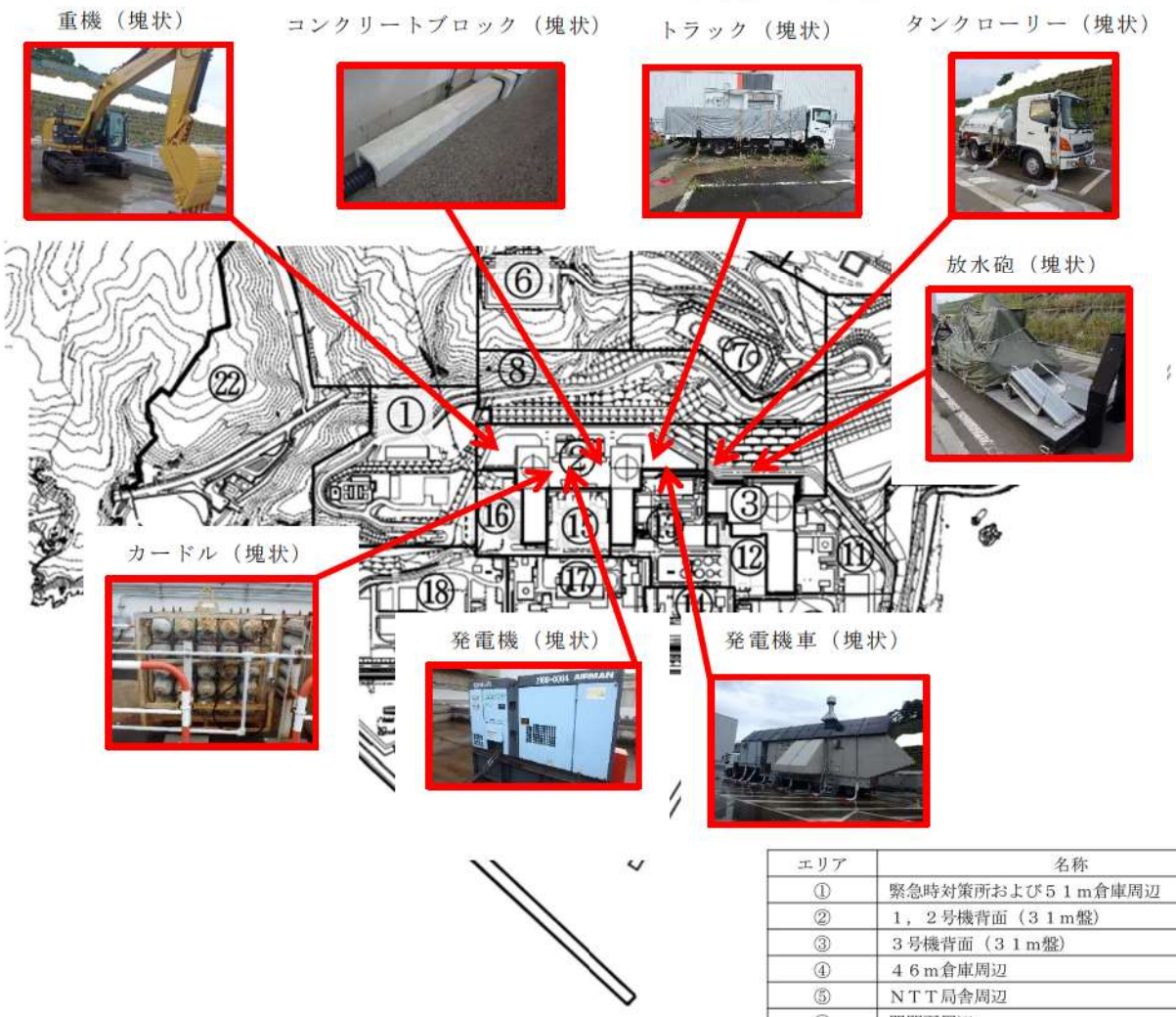
エリア	名称
①	緊急時対策所および５１ｍ倉庫周辺
②	１，２号機背面（３１ｍ盤）
③	３号機背面（３１ｍ盤）
④	４６ｍ倉庫周辺
⑤	ＮＴＴ局舎周辺
⑥	開閉所周辺
⑦	貯水設備周辺
⑧	５１ｍ～展望台道路
⑨	風力跡地周辺
⑩	３号機海側（１０ｍ盤）
⑪	３号機東側（１０ｍ盤）
⑫	３号機西側（１０ｍ盤）
⑬	総合管理事務所周辺（１０ｍ盤）
⑭	総合管理事務所海側（１０ｍ盤）
⑮	管理事務所正面（１０ｍ盤）
⑯	１号機西側（１０ｍ盤）
⑰	１，２号機海側（１０ｍ盤）
⑱	保修事務所周辺（１０ｍ盤）
⑲	防潮堤外西側（１０ｍ盤）
⑳	防潮堤外正面（１０ｍ盤）
㉑	防潮堤外堀株側（１０ｍ盤）
㉒	茶津守衛所周辺

第 3.3.2 図　代表飛来物（棒状）



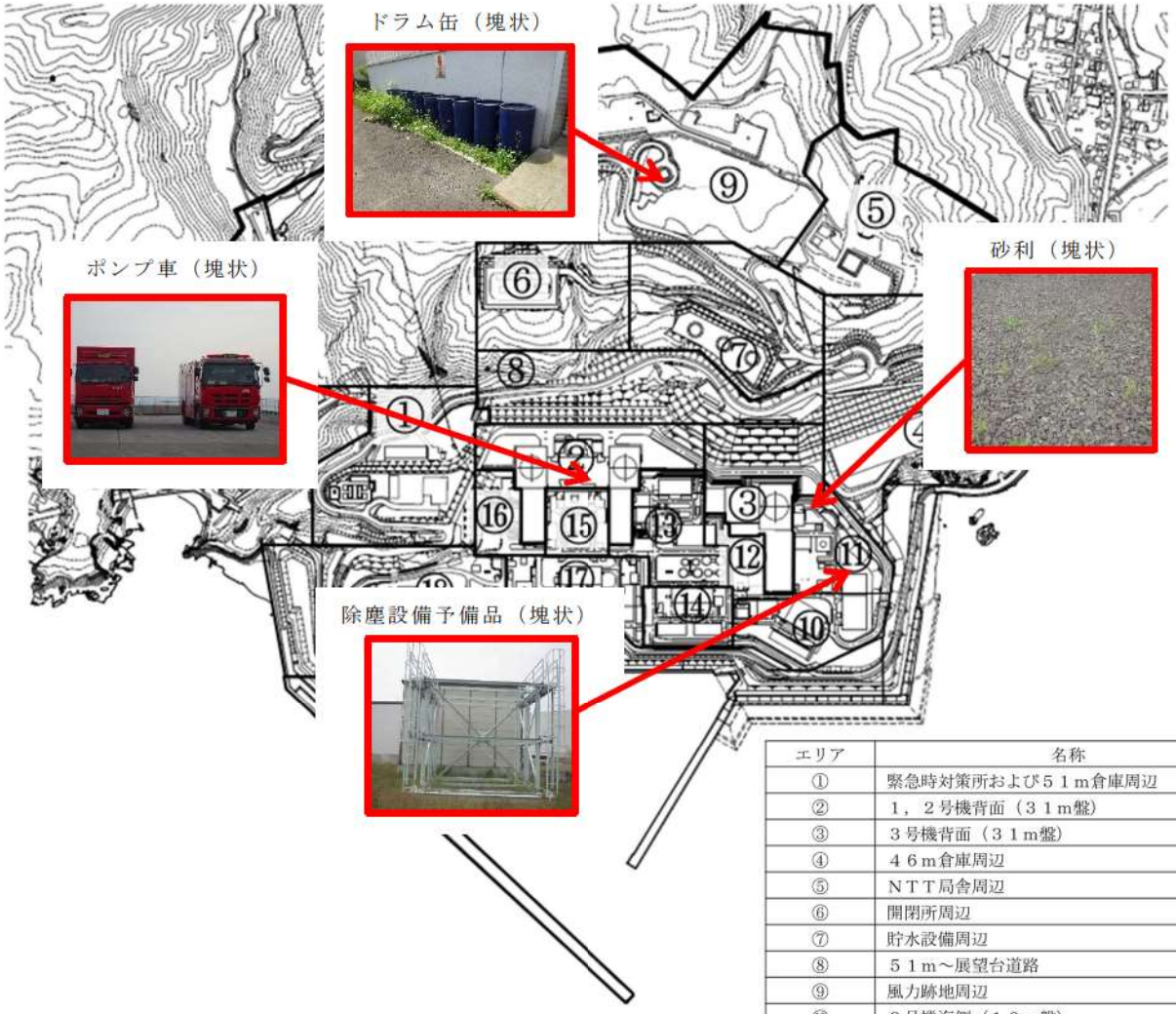
エリア	名称
①	緊急時対策所および５１m倉庫周辺
②	１，２号機背面（３１m盤）
③	３号機背面（３１m盤）
④	４６m倉庫周辺
⑤	ＮＴＴ局舎周辺
⑥	開閉所周辺
⑦	貯水設備周辺
⑧	５１m～展望台道路
⑨	風力跡地周辺
⑩	３号機海側（１０m盤）
⑪	３号機東側（１０m盤）
⑫	３号機西側（１０m盤）
⑬	総合管理事務所周辺（１０m盤）
⑭	総合管理事務所海側（１０m盤）
⑮	管理事務所正面（１０m盤）
⑯	１号機西側（１０m盤）
⑰	１，２号機海側（１０m盤）
⑱	保修事務所周辺（１０m盤）
⑲	防潮堤外西側（１０m盤）
⑳	防潮堤外正面（１０m盤）
㉑	防潮堤外堀株側（１０m盤）
㉒	茶津守衛所周辺

第 3.3.3 図　代表飛来物（板状）



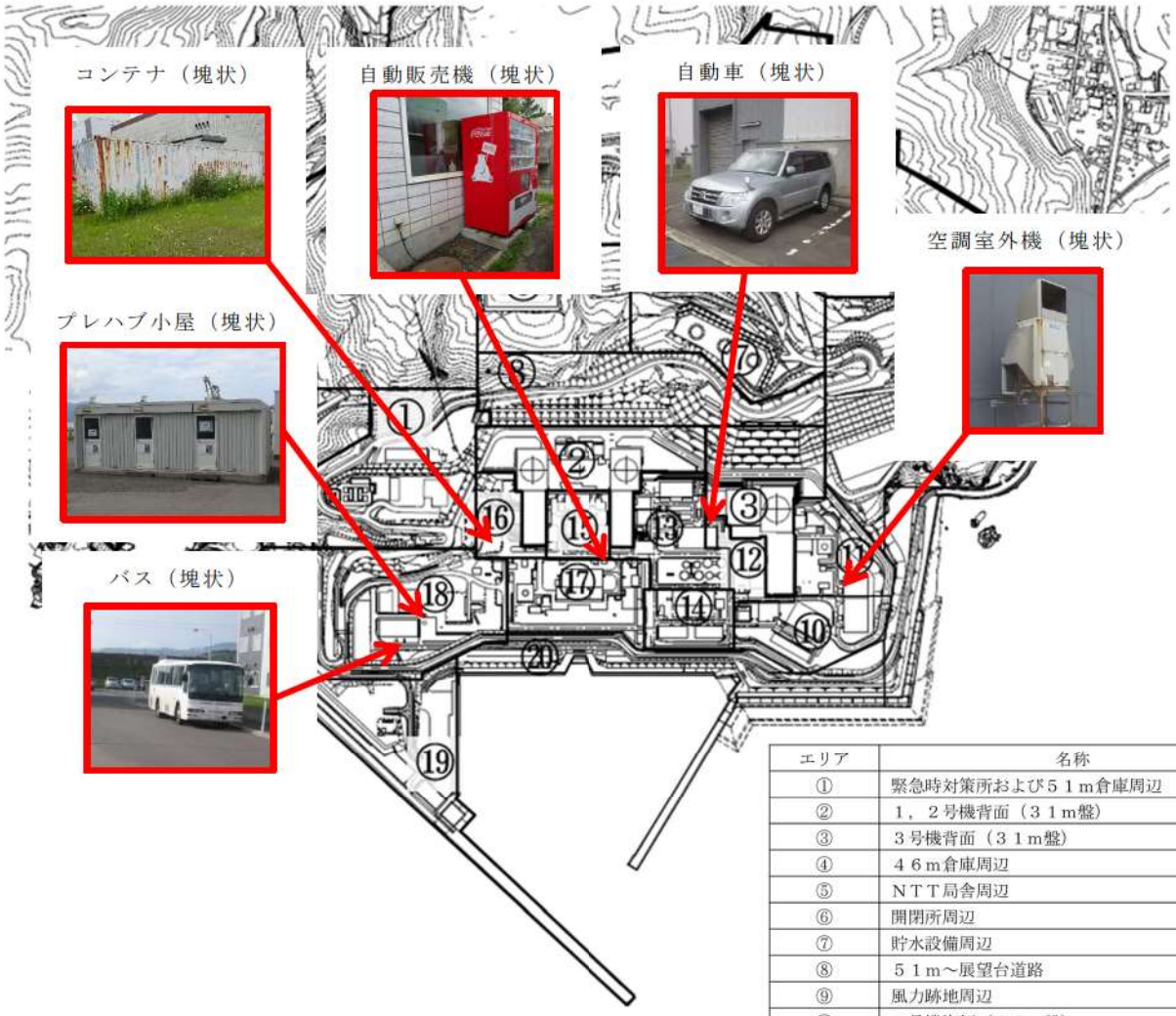
エリア	名称
①	緊急時対策所および５１ｍ倉庫周辺
②	１，２号機背面（３１ｍ盤）
③	３号機背面（３１ｍ盤）
④	４６ｍ倉庫周辺
⑤	ＮＴＴ局舎周辺
⑥	開閉所周辺
⑦	貯水設備周辺
⑧	５１ｍ～展望台道路
⑨	風力跡地周辺
⑩	３号機海側（１０ｍ盤）
⑪	３号機東側（１０ｍ盤）
⑫	３号機西側（１０ｍ盤）
⑬	総合管理事務所周辺（１０ｍ盤）
⑭	総合管理事務所海側（１０ｍ盤）
⑮	管理事務所正面（１０ｍ盤）
⑯	１号機西側（１０ｍ盤）
⑰	１，２号機海側（１０ｍ盤）
⑱	保修事務所周辺（１０ｍ盤）
⑲	防潮堤外西側（１０ｍ盤）
⑳	防潮堤外正面（１０ｍ盤）
㉑	防潮堤外堀株側（１０ｍ盤）
㉒	茶津守衛所周辺

第 3.3.4 図　代表飛来物（塊状）（1/3）



エリア	名称
①	緊急時対策所および５１ｍ倉庫周辺
②	１，２号機背面（３１ｍ盤）
③	３号機背面（３１ｍ盤）
④	４６ｍ倉庫周辺
⑤	ＮＴＴ局舎周辺
⑥	開閉所周辺
⑦	貯水設備周辺
⑧	５１ｍ～展望台道路
⑨	風力跡地周辺
⑩	３号機海側（１０ｍ盤）
⑪	３号機東側（１０ｍ盤）
⑫	３号機西側（１０ｍ盤）
⑬	総合管理事務所周辺（１０ｍ盤）
⑭	総合管理事務所海側（１０ｍ盤）
⑮	管理事務所正面（１０ｍ盤）
⑯	１号機西側（１０ｍ盤）
⑰	１，２号機海側（１０ｍ盤）
⑱	保修事務所周辺（１０ｍ盤）
⑲	防潮堤外西側（１０ｍ盤）
⑳	防潮堤外正面（１０ｍ盤）
㉑	防潮堤外堀株側（１０ｍ盤）
㉒	茶津守衛所周辺

第 3.3.4 図　代表飛来物（塊状）（2/3）



エリア	名称
①	緊急時対策所および５１ｍ倉庫周辺
②	１，２号機背面（３１ｍ盤）
③	３号機背面（３１ｍ盤）
④	４６ｍ倉庫周辺
⑤	ＮＴＴ局舎周辺
⑥	開閉所周辺
⑦	貯水設備周辺
⑧	５１ｍ～展望台道路
⑨	風力跡地周辺
⑩	３号機海側（１０ｍ盤）
⑪	３号機東側（１０ｍ盤）
⑫	３号機西側（１０ｍ盤）
⑬	総合管理事務所周辺（１０ｍ盤）
⑭	総合管理事務所海側（１０ｍ盤）
⑮	管理事務所正面（１０ｍ盤）
⑯	１号機西側（１０ｍ盤）
⑰	１，２号機海側（１０ｍ盤）
⑱	保修事務所周辺（１０ｍ盤）
⑲	防潮堤外西側（１０ｍ盤）
⑳	防潮堤外正面（１０ｍ盤）
㉑	防潮堤外堀株側（１０ｍ盤）
㉒	茶津守衛所周辺

第 3.3.4 図　代表飛来物（塊状）（3/3）

４．代表的な飛来物の飛散評価

上記３．で抽出した代表的な飛来物に対し，寸法，重量，形状により空力パラメータを算出し，ランキン渦モデルの風速場（設計竜巻風速 100m/s）を適用した場合における飛散評価を実施し，飛来物の浮上の有無について確認を行った。飛散評価結果を第 3.3.2 表に示す。

５．飛来物発生防止対策の可否を踏まえた抽出

上記４．で抽出した結果を踏まえ，固縛，撤去等の飛来物発生防止対策が可能かどうかを考慮し，設計飛来物を抽出した。

第3.3.2表　代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果（1/3）

（常設・仮設物）

分類		名称	長さ［m］	幅［m］	高さ［m］	質量［kg］	空力パラメータ［m^2/kg］	最大水平速度［m/s］	最大鉛直速度［m/s］	運動エネルギー［kJ］（水平）	運動エネルギー［kJ］（鉛直）	最大飛距離［m］	最大飛散高さ［m］	コンクリートの貫通限界厚さ※2［cm］		コンクリートの裏面剥離限界厚さ※2［cm］		鉄板の貫通限界厚さ※3［mm］		浮き上がりの有無	以下の点で飛来物とならないか※4 ・飛来物発生防止対策（撤去，固縛等）が可能か ・他の飛来物に包絡されるか
														水平	鉛直	水平	鉛直	水平	鉛直		
														t_{p_h}	t_{p_v}	t_{s_h}	t_{s_v}	T_h	T_v		
柔（一部剛）	塊状	重機	9.53	2.8	3.16	20800	0.0021	38.1	25.5	15123	6784	119.9	0.0	95.7	67.1	167.1	127.8	14.3	8.4	×	浮上しないが，外部事象防護対象施設等との離隔をとる，又は，固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。
柔（一部剛）	塊状	（ガイド）トラック※1	5	1.9	1.3	4750	0.0026	39.9	25.3	3776	1524	163.5	0.0	61.2	41.0	108.4	80.0	10.7	5.9	×	
剛	塊状	発電機	0.98	2.09	1.55	1690	0.0027	40.2	25.3	1368	541.5	171.5	0.0	40.7	27.0	75.7	55.5	6.9	3.7	×	
剛	塊状	カードル	1.01	1.39	1.41	1500	0.0021	38.2	25.5	1095	488.4	122.0	0.0	37.2	26.0	70.3	53.6	6.2	3.6	×	
剛	板状	（ガイド）コンクリート板※1	1.5	1	0.15	540	0.0021	38.2	25.5	394.2	175.8	122.0	0.0	33.8	23.9	58.4	44.6	9.6	5.6	×	
剛	板状	コンクリート板	1.35	0.66	0.2	410	0.0021	38.1	25.5	298.0	133.7	119.9	0.0	30.2	21.4	52.9	40.5	8.5	5.0	×	
剛	板状	鋼材	2.5	0.25	0.25	250	0.0022	38.3	25.5	183.6	81.1	126.1	0.0	27.1	19.1	46.9	35.7	9.0	5.2	×	
柔（一部剛）	塊状	発電機車	20.1	7.5	8.25	58120	0.0043	44.6	24.6	57815	17606	256.1	8.3	126.0	74.1	230.5	154.8	13.2	6.0	○	外部事象防護対象施設等との離隔をとる，又は，固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。
柔（一部剛）	塊状	除塵設備予備品	6	5	5.6	14000	0.0043	44.6	24.6	13952	4236	257.0	8.5	72.6	42.6	141.3	94.8	7.6	3.4	○	
柔（一部剛）	塊状	ポンプ車	8.79	2.49	3.16	13050	0.0029	40.9	25.1	10910	4123	189.7	0.1	82.8	53.8	147.1	106.1	12.2	6.4	○	
柔（一部剛）	塊状	バス（大型）	11.1	2.48	3.07	9890	0.0046	45.4	24.7	10173	3025	268.7	11.9	79.7	46.5	141.6	94.3	11.8	5.3	○	
柔（一部剛）	塊状	バス（中型）	8.99	2.34	3.03	7410	0.0049	46.0	25.2	7834	2353	277.1	14.9	70.9	41.5	128.2	85.7	10.3	4.6	○	
柔（一部剛）	塊状	トラック	8.21	2.5	2.46	7410	0.0042	44.3	24.7	7285	2260	251.9	7.0	70.5	41.9	126.9	85.7	10.5	4.8	○	
柔	塊状	コンテナ	12.2	2.6	2.44	5500	0.0052	46.5	25.6	5957	1798	282.6	17.4	63.2	37.1	116.0	77.6	9.1	4.1	○	

※1：竜巻影響評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品
※2：修正NDRC式，Ｄｅｇｅｎ式及びＣｈａｎｇ式を用いて算出
※3：原子炉施設のタービンミサイルの評価に用いられているＢＲＬ式にて算出
※4：評価対象施設に想定される損傷モードにより，評価パラメータを設定

第3.3.2表　代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果（2/3）

（常設・仮設物）

分類		名称	長さ［m］	幅［m］	高さ［m］	質量［kg］	空力パラメータ［m^2/kg］	最大水平速度［m/s］	最大鉛直速度［m/s］	運動エネルギー［kJ］（水平）	運動エネルギー［kJ］（鉛直）	最大飛距離［m］	最大飛散高さ［m］	コンクリートの貫通限界厚さ※2［cm］		コンクリートの裏面剥離限界厚さ※2［cm］		鉄板の貫通限界厚さ※3［mm］		浮き上がりの有無	以下の点で飛来物とならないか※4 ・飛来物発生防止対策（撤去，固縛等）が可能か ・他の飛来物に包絡されるか
														水平	鉛直	水平	鉛直	水平	鉛直		
														t_{p_h}	t_{p_v}	t_{s_h}	t_{s_v}	T_h	T_v		
柔（一部剛）	塊状	タンクローリー	6.28	2.2	2.41	4380	0.0052	46.5	25.5	4734	1429	282.2	17.2	58.4	34.3	107.7	72.1	8.5	3.8	○	外部事象防護対象施設等との離隔をとる，又は，固縛等を実施することから設計飛来物として選定しない。
柔	塊状	（ガイド）コンテナ※1	2.4	2.6	6	2300	0.0105	54.5	25.5	3416	748.4	340.3	55.1	47.4	24.1	91.1	54.8	6.3	2.3	○	
柔	塊状	プレハブ小屋※3	6	3.06	2.08	2000	0.0123	56.5	24.0	3194	575.2	346.7	64.2	45.5	21.2	88.1	49.6	6.0	1.9	○	
柔（一部剛）	塊状	放水砲	2	4.7	1	3000	0.0036	42.8	24.8	2742	924.3	226.3	1.3	54.1	33.4	96.5	67.0	9.6	4.7	○	
柔（一部剛）	塊状	乗用車(セダン)	4.89	1.8	1.47	1760	0.0070	49.8	26.7	2182	629.3	313.5	33.1	45.2	26.0	84.0	55.4	7.2	3.1	○	
剛	板状	鋼板	6.1	1.54	0.021	1900	0.0033	42.1	25.1	1683	597.1	212.3	0.5	72.3	50.3	120.2	84.9	54.7	27.4	○	
柔（一部剛）	塊状	乗用車（軽）	3.39	1.47	1.51	720	0.0113	55.5	24.8	1107	222.0	343.6	59.7	33.1	16.2	64.2	37.5	5.0	1.7	○	
柔	塊状	空調室外機	0.77	0.86	1.33	220	0.0085	51.9	26.6	296.7	77.7	327.6	44.0	21.9	12.1	43.2	27.6	3.8	1.6	○	
柔	塊状	自動販売機	0.85	1.4	1.9	450	0.0080	51.3	26.7	593.2	160.5	324.9	40.8	27.6	15.4	53.8	34.7	4.5	1.9	○	
柔	塊状	ドラム缶	0.6	0.6	0.9	245	0.0039	43.5	24.8	232.1	75.3	241.4	3.7	22.1	13.5	42.6	29.2	4.4	2.1	○	
剛	棒状	（ガイド）鋼製材※1	4.2	0.3	0.2	135	0.0089	57※5	38※5	219.3	97.5	331.5	46.6	28.5	20.2	48.4	36.9	36.1	21.0	○	設計飛来物に選定する
剛	塊状	コンクリートブロック	1	0.25	0.22	55	0.0041	44.0	24.7	53.3	16.8	247.7	5.6	15.2	9.2	28.5	19.4	4.2	1.9	○	エネルギー，貫通力が設計飛来物（鋼製材）に包含される。
剛	板状	マンホール蓋	0.65	0.65	0.01	32	0.0089	52.5	26.4	44.1	11.2	331.2	46.4	18.4	10.7	31.9	20.2	10.8	4.3	○	

※1：竜巻影響評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品
※2：修正NDRC式，Degen式及びChang式を用いて算出
※3：原子炉施設のタービンミサイルの評価に用いられているBRL式にて算出
※4：評価対象施設に想定される損傷モードにより，評価パラメータを設定
※5：最大水平速度及び最大鉛直速度については，衝撃荷重による影響を保守的に評価するため，竜巻影響評価ガイドに示される竜巻の最大風速（V_D）＝100m/s の場合と同じ値とする。また，鋼製材の最大水平速度及び最大鉛直速度については，竜巻影響評価ガイド改正前の値とする。

第 3.3.2 表　代表的な飛来物の飛散評価結果及び飛散防止対策・固定状況等を踏まえた選定結果（3/3）

（常設・仮設物）

分類		名称	長さ［m］	幅［m］	高さ［m］	質量［kg］	空力パラメータ［m^2/kg］	最大水平速度［m/s］	最大鉛直速度［m/s］	運動エネルギー［kJ］（水平）	運動エネルギー［kJ］（鉛直）	最大飛距離［m］	最大飛散高さ［m］	コンクリートの貫通限界厚さ※2［cm］		コンクリートの裏面剥離限界厚さ※2［cm］		鉄板の貫通限界厚さ※3［mm］		浮き上がりの有無	以下の点で飛来物とならないか※4 ・飛来物発生防止対策（撤去，固縛等）が可能か ・他の飛来物に包絡されるか
														水平	鉛直	水平	鉛直	水平	鉛直		
														t_{p_h}	t_{p_v}	t_{s_h}	t_{s_v}	$T_{_h}$	$T_{_v}$		
剛	棒状	（ガイド）鋼製パイプ※1	2	0.05	0.05	8.4	0.0057	49※5	33※5	10.1	4.6	293.3	21.8	11.0	8.2	20.3	15.6	17.1	10.1	○	設計飛来物に選定する
剛	棒状	鋼管	2.5	0.05	0.05	6.825	0.0087	52.1	26.5	9.3	2.4	329.2	45.0	10.6	6.3	19.3	12.3	6.9	2.8	○	エネルギー，貫通力が設計飛来物（鋼製材及び鋼製パイプ）に包含される。
剛	塊状	砂利	0.04	0.04	0.04	0.18	0.0185	62	42※6	0.3	0.2	397.7	87.3	2.3	1.7	5.1	3.9	0.8	0.5	○	設計飛来物に選定する

※1：竜巻影響評価ガイドにおいてサイズ及び重量が記載されている物品
※2：修正ＮＤＲＣ式，Ｄｅｇｅｎ式及びＣｈａｎｇ式を用いて算出
※3：原子炉施設のタービンミサイルの評価に用いられているＢＲＬ式にて算出
※4：評価対象施設に想定される損傷モードにより，評価パラメータを設定
※5：最大水平速度及び最大鉛直速度については，衝撃荷重による影響を保守的に評価するため，竜巻影響評価ガイドに示される竜巻の最大風速（V_D）＝100m/s の場合と同じ値とする。また，鋼製材の最大水平速度及び最大鉛直速度については，竜巻影響評価ガイド改正前の値とする。
※6：竜巻影響評価ガイドに基づき最大水平速度の 2/3 として算出

6．設計飛来物の選定結果

上記１．から５．より，泊発電所における設計飛来物は，第 3.3.3 表及び第 3.3.5 図に示す。

鋼製材については，設計飛来物候補の中で，運動エネルギー，コンクリート・鋼板に対する貫通力が最大である。

また，砂利については，原子炉補機冷却海水ポンプ等への防護対策として設置する竜巻防護ネットを通過する可能性があること，鋼製パイプについては，使用済燃料ピット及び新燃料貯蔵庫に侵入した場合に燃料集合体に直接落下する可能性があることから，飛来物の影響を鋼製材にて包含できないため，設計飛来物として選定した。

第 3.3.3 表　泊発電所における設計飛来物

項　目	飛来物の種類		
	砂利	鋼製パイプ	鋼製材
サイズ[m]	長さ×幅×奥行 0.04×0.04×0.04※1	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2
質量[kg]	0.18	8.4	135
最大水平速度[m/s]	62※2	49※4	57※4
最大鉛直速度[m/s]	42※3	33※4	38※4
浮き上がり高さ[m]※2	87.3	21.8	46.6
飛散距離[m]※2	397.7	293.3	331.5

※1 砂利のサイズは，竜巻防護ネットの金網が目開き 5cm×5cm を 2 枚重ね，4cm×4cm を 1 枚重ねの構造，又は 4 cm×4 cm を 3 枚重ねの構造となっていることを考慮して選定

※2 設計竜巻風速 100m/s，当社が実施するランキン渦モデルの風速場を用いた飛散評価手法による結果

※3 竜巻影響評価ガイドに基づき最大水平速度の 2/3 として算出

※4 衝撃荷重による影響を保守的に評価するため，竜巻影響評価ガイドに示される竜巻の最大風速（V_D）＝100m/s の場合と同じ値とする。また，鋼製材については，竜巻影響評価ガイド改正前の値とする。

（砂利）

（鋼製パイプ）

（鋼製材）

第 3.3.5 図　選定した設計飛来物の形状（イメージ）

別紙 1

飛来物及び固定状況に係る調査結果について

泊発電所における飛来物及び固定状況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 7 月 15 日～8 月 4 日に実施した。調査では，常設物，仮設物のうち飛来物となりうる物品（以下「想定飛来物」という。），二次飛来物となりうる物品（設置状況等から風圧や飛散による被害を受けて飛来物となり得る物）及び常設物の設置状況の確認を行った。

1．調査範囲

調査範囲は，竜巻影響評価ガイドを参考にするとともに，前述の代表的な飛来物の飛散評価結果において，代表的な飛来物の飛散距離は最大でも 400m 程度であることを踏まえ，原子炉建屋から約 550m（最短距離）～約 1100m（最長距離）の範囲（図 1）とした。

2．調査方法

(1)飛来物に対する調査

調査範囲を図 1 に示す区画に分割して，想定飛来物の寸法，設置場所及び設置状況を網羅的に確認した。具体的な内容については以下のとおり。

(a)設置場所

想定飛来物が確認された設置場所を，各エリアの区画図毎に記録した。

(b)設置状況

目視にて想定飛来物の設置状況を確認し，写真により記録した。

(c)寸法測定

想定飛来物の平面寸法，高さを計測器を用いて測定した。

なお，同一区画にて同類の対象物があった場合は，寸法の大きなものを代表として測定した。

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。

(2) 常設物の固定状況に対する調査

調査範囲内のうち，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常設物については，固定状況を確認した。

具体的な内容については以下のとおり。

(a) 設置場所

常設物が確認された設置場所を記録した。

(b) 固定状況確認

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常設物に対し，目視にて以下の観点で固定状況等の確認を行った。別添 1 に固定状況確認フロー及び確認結果を示す。

・ボルト固定により固定されているか
・溶接により固定されているか
・コンクリート一体構造により固定されているか
・ストッパ及びクランプ等により固定されているか

3．調査結果

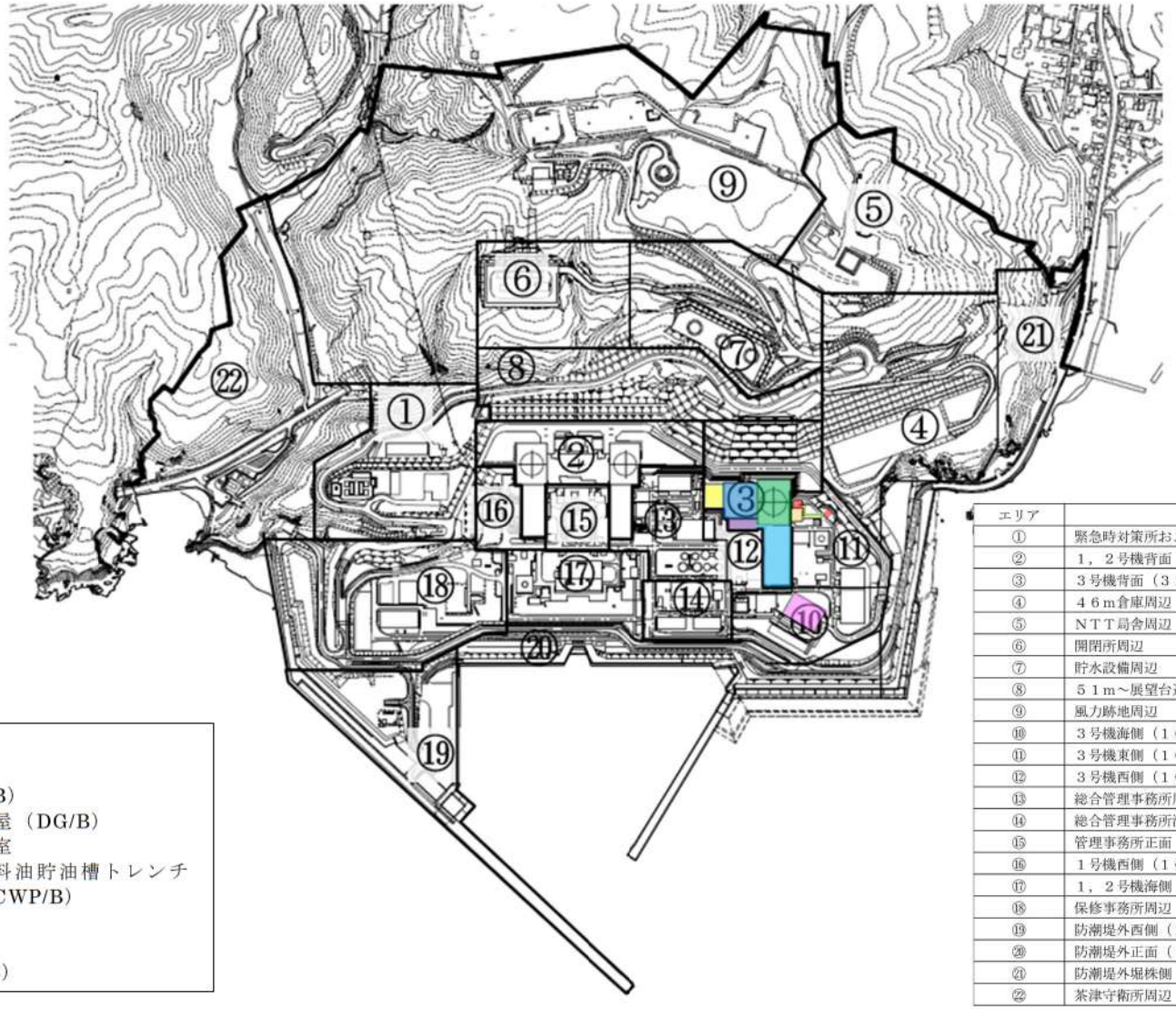
(1) 飛来物に対する調査

各エリアの区画図毎の飛来物(想定飛来物及び二次飛来物)調査結果を図 2 に示す。

(2) 常設物の固定状況に対する調査

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常設物に対する固定状況について確認した結果を別添 1 に示す。

抽出された常設物はいずれも頑健に固定されていることを確認した。



エリア	名称
①	緊急時対策所および５１ｍ倉庫周辺
②	１，２号機背面（３１ｍ盤）
③	３号機背面（３１ｍ盤）
④	４６ｍ倉庫周辺
⑤	ＮＴＴ局舎周辺
⑥	開閉所周辺
⑦	貯水設備周辺
⑧	５１ｍ～展望台道路
⑨	風力跡地周辺
⑩	３号機海側（１０ｍ盤）
⑪	３号機東側（１０ｍ盤）
⑫	３号機西側（１０ｍ盤）
⑬	総合管理事務所周辺（１０ｍ盤）
⑭	総合管理事務所海側（１０ｍ盤）
⑮	管理事務所正面（１０ｍ盤）
⑯	１号機西側（１０ｍ盤）
⑰	１，２号機海側（１０ｍ盤）
⑱	保修事務所周辺（１０ｍ盤）
⑲	防潮堤外西側（１０ｍ盤）
⑳	防潮堤外正面（１０ｍ盤）
㉑	防潮堤外堀株側（１０ｍ盤）
㉒	茶津守衛所周辺

図１　調査範囲及び区分

泊発電所　想定飛来物

エリア①：緊急時対策所および５１ｍ倉庫周辺（１／２）

スーパーハウス

標識

看板

マンホール蓋

照明

階段（単管パイプ製）

盤

グレーチング

敷鉄板

アンテナ

盤

鋼製蓋

空調室外機

ガードレール

消火器

ケーブルドラム

仮置資機材

スーパーハウス

産廃かご

仮置資機材

仮置資機材

仮置資機材

仮置資機材

バックホウ

コンクリートブロック

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（１／36）

泊発電所　想定飛来物

エリア①：緊急時対策所および５１ｍ倉庫周辺（２／２）

消火栓

A型バリケード

コンクリート蓋

仮置資機材

仮置資機材

発電機

盤

分電盤

プレハブ車庫

コンクリートブロック

仮置資機材

表示器

カーブミラー

コンクリートブロック

砂箱

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（２／36）

泊発電所　想定飛来物

エリア②：１，２号機背面（３１ｍ盤）（１／３）

盤

コルゲートチューブ

マンホール蓋

グレーチング

踏み台

標識

盤

砂利

鋼製蓋

照明

グレーチング

グレーチング

鋼管

盤

盤

盤

スピーカー

シルトフェンス車（４ｔ車）

代替非常用発電機

可搬型代替電源車

ホイールローダ

バックホウ

ガードレール

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（３／36）

泊発電所　想定飛来物

エリア②：１，２号機背面（３１ｍ盤）（２／３）

発電機

木材

消火栓（ホース格納箱）

消火栓

標識

コンクリートブロック

鋼板

コンクリートブロック

鋼板

踏み台

階段（単管パイプ製）

発電機

カードル

手すり

スーパーハウス

柵（ポール）

可搬型タンクローリー

ブルドーザ

手すり

ユニック車

仮置資機材

鋼製箱

仮置資機材

仮置資機材

仮置資機材

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（４／36）

泊発電所　想定飛来物

エリア②：１，２号機背面（３１ｍ盤）（３／３）

仮置資機材

鋼管

投光器

鋼製材

かご

鋼板

標識

敷鉄板

鋼製蓋

鋼管

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（５／36）

泊発電所　想定飛来物

エリア③：３号機背面（３１ｍ盤）（１／２）

鋼製蓋

鋼管

コルゲートチューブ

代替非常用発電機

コンテナ

スピーカー

照明

ガードレール

盤

標識

標識

仮置資機材

鋼製箱

コーン

グレーチング

敷鉄板

階段（単管パイプ製）

コンクリート蓋

標識

A型バリケード

仮設信号機

消火器

盤

発電機

照明

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（６／36）

泊発電所　想定飛来物

エリア③：３号機背面（３１ｍ盤）（２／２）

盤

可搬型大型送水ポンプ車

柵（ベース）

空調室外機

スロープ

盤

消火器

発電機

放水砲

可搬型タンクローリー

車両進入防止バリケード

盤

コンクリート蓋

発電機

コンテナ

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（７／36）

泊発電所　想定飛来物

エリア④：４６ｍ倉庫周辺（１／２）

照明

階段（H鋼製）

木材

マンホール蓋

グレーチング

標識

コーン

盤

踏み台

ガードレール

コンクリート蓋

鋼製蓋

鋼製箱

鋼管

砂利

仮置資機材

仮置資機材

消火器

カーブミラー

コーン

仮置資機材

仮置資機材

鋼板

盤

コンクリート蓋

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（８/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア④：４６ｍ倉庫周辺（２／２）

仮置資機材

敷鉄板

コーン

鋼製材

A型バリケード

バックホウ

消火器

仮置資機材

パレット

仮置資機材

仮置資機材

空調室外機

仮設タンク

グレーチング

鋼製材

仮置資機材

仮置資機材

コルゲートチューブ

かご

プレハブ小屋

アンテナ

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（９/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑤：NTT 局舎周辺（１／１）

コンクリートブロック

盤

空調室外機

盤

マンホール蓋

A型バリケード

グレーチング

コーン

盤

ガードレール

コンクリートブロック

看板

投光器

鋼製箱

仮置資機材

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（10/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑥：開閉所周辺（１／１）

コンクリートブロック

グレーチング

カーブミラー

盤

標識

敷鉄板

砂利

スーパーハウス

仮置資機材

消火栓

仮置資機材

鋼製蓋

空調室外機

産廃かご

自動販売機

盤

ケーブルドラム

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（11/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑦：貯水設備周辺（１／１）

標識

投光器

コンクリート蓋

マンホール蓋

ガードレール

グレーチング

標識

仮置資機材

仮置資機材

グレーチング

コンクリートブロック

コンクリートブロック

コンクリートブロック

仮置資機材

A型バリケード

盤

盤

仮置資機材

階段（単管パイプ製）

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（12/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑧：５１ｍ～展望台道路（１／１）

コンクリートブロック

柵（木）

ガードレール

マンホール蓋

鋼板

ユニック車

可搬型タンクローリー

トラック

大規模損壊対応用変圧器車

コンテナ

コンテナ式運搬車

コーン

標識

階段（単管パイプ製）

盤

クッションドラム

スーパーハウス

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（13/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑨：風力跡地周辺（１／２）

プレハブ小屋

マンホール蓋

ドラム缶

コーン

グレーチング

グレーチング

プレハブ小屋

標識

コンクリートブロック

カーブミラー

手すり

盤

盤

盤

A型バリケード

ガードレール

発電機

スーパーハウス

投光器

仮置資機材

可搬型大容量海水送水ポンプ車

コンテナ式運搬車

重機

ホース延長・回収車（送水車用）

可搬型大型送水ポンプ車

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（14/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑨：風力跡地周辺（２／２）

発電機

物置

可搬型大容量海水送水ポンプ車

ガードレール

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（15/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑩：３号機海側（１０ｍ盤）（１／２）

グレーチング

仮置資機材

標識

盤

消火栓（ホース格納箱）

標識

消火栓

マンホール蓋

コンクリート蓋

鋼管

鋼製かご

仮置資機材

手すり

盤

踏み台

コンクリートブロック

鋼製蓋

踏み台

階段（単管パイプ製）

スーパーハウス

空調室外機

発電機

コルゲートチューブ

盤

プレハブ小屋

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（16/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑩：３号機海側（１０ｍ盤）（２／２）

パレット

かご

鋼管

盤

鋼製蓋

盤

標識

コンクリートブロック

空調室外機

盤

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（17/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑪：３号機東側（１０ｍ盤）（１／２）

グレーチング

消火栓（ホース格納箱）

看板

階段（H鋼製）

鋼製蓋

盤

盤

鋼製蓋

階段（H鋼製）

消火栓（ホース格納箱）

砂利

グレーチング

マンホール蓋

コンクリート蓋

消火器

盤

鋼製蓋

鋼製蓋

コーン

空調室外機

消火器

スピーカー

盤

除塵設備予備品

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（18/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑪：３号機東側（１０ｍ盤）（２／２）

A型バリケード

コンクリート蓋

鋼管

仮置資機材

プレハブ車庫

空調室外機

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（19/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑫：３号機西側（１０ｍ盤）（１／２）

グレーチング

グレーチング

マンホール蓋

標識

標識

コンクリートブロック

鋼製蓋

鋼製蓋

自動車

コーン

カーポート

消火栓

標識

コンクリート蓋

照明

ガラリ

空調室外機

敷鉄板

消火器

A型バリケード

盤

コーン

砂利

盤

盤

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（20/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑫：３号機西側（１０ｍ盤）（２／２）

マット

照明

コンクリートブロック

盤

コーン

発電機

かご

空調室外機

鋼製蓋

階段（単管パイプ製）

コンクリートブロック

仮置資機材

仮置資機材

仮置資機材

マット

発電機

看板

盤

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（21/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑬：総合管理事務所周辺（１０ｍ盤）（１／２）

標識

鋼製蓋

マンホール蓋

グレーチング

標識

消火栓（ホース格納箱）

盤

鋼製蓋

コンクリート蓋

マンホール蓋

グレーチング

鋼製蓋

コンクリートブロック

盤

スーパーハウス

発電機

敷鉄板

空調室外機

コーン

発電機

クッションドラム

アーケード屋根

レンガ

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（22/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑬：総合管理事務所周辺（１０ｍ盤）（２／２）

鋼製蓋

照明

標識

コンクリート蓋

スーパーハウス

仮置資機材

アンテナ

アンテナ

空調室外機

盤

スピーカー

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（23/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑭：総合管理事務所海側（１０ｍ盤）（１／１）

標識

クッションドラム

コーン

空調室外機

看板

仮置資機材

敷鉄板

仮置資機材

仮置資機材

鋼製蓋

産廃庫

空調室外機

アーケード屋根

発電機

標識

スーパーハウス

マンホール蓋

鋼製蓋

消火栓

Ｈ鋼

仮置資機材

砂利

グレーチング

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（24/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑮：管理事務所正面（１０ｍ盤）（１／１）

アーケード屋根

標識

消火栓

A型バリケード

鋼管

柵（木）

マンホール蓋

コンクリートブロック

コンクリートブロック

コーン

空調室外機

コンクリート蓋

砂利

盤

看板

標識

グレーチング

鋼製蓋

プレハブ車庫

標識

スロープ

スーパーハウス

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（25/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑯：１号機西側（１０ｍ盤）（１／１）

鋼製蓋

空調室外機

架台

標識

看板

アーケード屋根

グレーチング

コンテナ

砂利

消火栓

盤

看板

コンクリート板

階段（H鋼製）

標識

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（26/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑰：１，２号機海側（１０ｍ盤）（１／２）

A型バリケード

産廃かご

発電機

砂利

スーパーハウス

階段（H鋼製）

標識

グレーチング

鋼製蓋

空調室外機

ガードレール

消火栓

看板

鋼製箱

看板

盤

盤

自動販売機

プレハブ小屋

空調室外機

クッションドラム

標識

階段（単管パイプ製）

アーケード屋根

看板

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（27/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑰：１，２号機海側（１０ｍ盤）（２／２）

鋼製蓋

盤

踏み台

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（28/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑱：保修事務所周辺（１０ｍ盤）（１／３）

標識

グレーチング

看板

標識

階段（単管パイプ製）

照明

手すり

鋼管

照明

ガードレール

マンホール蓋

コンクリート蓋

消火栓

スピーカー

プレハブ小屋

踏み台

プレハブ小屋

標識

スーパーハウス

空調室外機

鋼製蓋

アーケード屋根

スーパーハウス

空調室外機

柵（ポール）

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（29/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑱：保修事務所周辺（１０ｍ盤）（２／３）

コーン

踏み台

産廃かご

鋼管

標識

空調室外機

消火栓（ホース格納箱）

標識

消火栓

盤

ホイールローダ

バックホウ

かご

標識

空調室外機

仮置資機材

敷鉄板

盤

かご

コンクリート蓋

靴泥落とし

仮置資機材

角ふた

梯子

仮置資機材

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（30/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑱：保修事務所周辺（１０ｍ盤）（３／３）

仮置資機材

ポリタンク

標識

靴泥落とし

カーブミラー

照明

スピーカー

消火器

コンクリートブロック

アンテナ

踏み台

踏み台

木材

仮置資機材

標識

盤

消火器

足場（階段）

コンクリート蓋

コンクリート蓋

標識

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（31/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑲：防潮堤外西側（１０ｍ盤）（１／１）

コンクリート蓋

仮置資機材

鋼製箱

コンクリートブロック

発電機

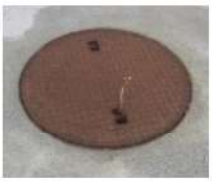
消火器

A型バリケード

グレーチング

盤

梯子



マンホール蓋

手すり

盤

手すり

グレーチング

支柱

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（32/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア⑳：防潮堤外正面（１０ｍ盤）（１／１）

仮置資機材

仮置資機材

梯子

手すり

グレーチング

マンホール蓋

鋼製箱

かご

標識

階段

マンホール蓋

盤

鋼製材

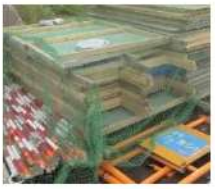
グレーチング

コンクリートブロック

鋼製蓋

コンクリート蓋

仮置資機材



仮置資機材

仮置資機材

グレーチング

コンクリートブロック

鋼製パイプ

ガードレール

コーン

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（33/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア㉑：防潮堤堀株側（１０ｍ盤）（１／１）

鋼管

A型バリケード

鋼材

マンホール蓋

仮置資機材

仮置資機材

ポリタンク

スーパーハウス

産廃かご

仮置資機材

仮置資機材

階段

仮設信号機

グレーチング

標識

看板

マンホール蓋

標識

盤

アンテナ

階段（単管パイプ製）

車両進入防止バリケード

空調室外機

スロープ

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（34/36）

泊発電所　想定飛来物

エリア㉒：茶津守衛所周辺（１／１）

手すり

マンホール蓋

コーン

A型バリケード

コンクリート蓋

空調室外機

コンクリートブロック

踏み台

標識

アーケード屋根

標識

グレーチング

標識

標識

標識

クッションドラム

ガードパイプ

表示器

電話ボックス

看板

鋼板

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（35/36）

泊発電所　二次飛来物

扉，屋根

扉，手すり

扉，屋根

扉

シャッター，屋根

シャッター

シャッター，扉

屋根

屋根

ガラス窓

雪庇止め

ガラス窓

ガラス窓

ガラス窓

雨どい

雨どい

外壁，屋根

外壁，屋根

ポリカーボネート窓，屋根

照明器具

鋼製階段

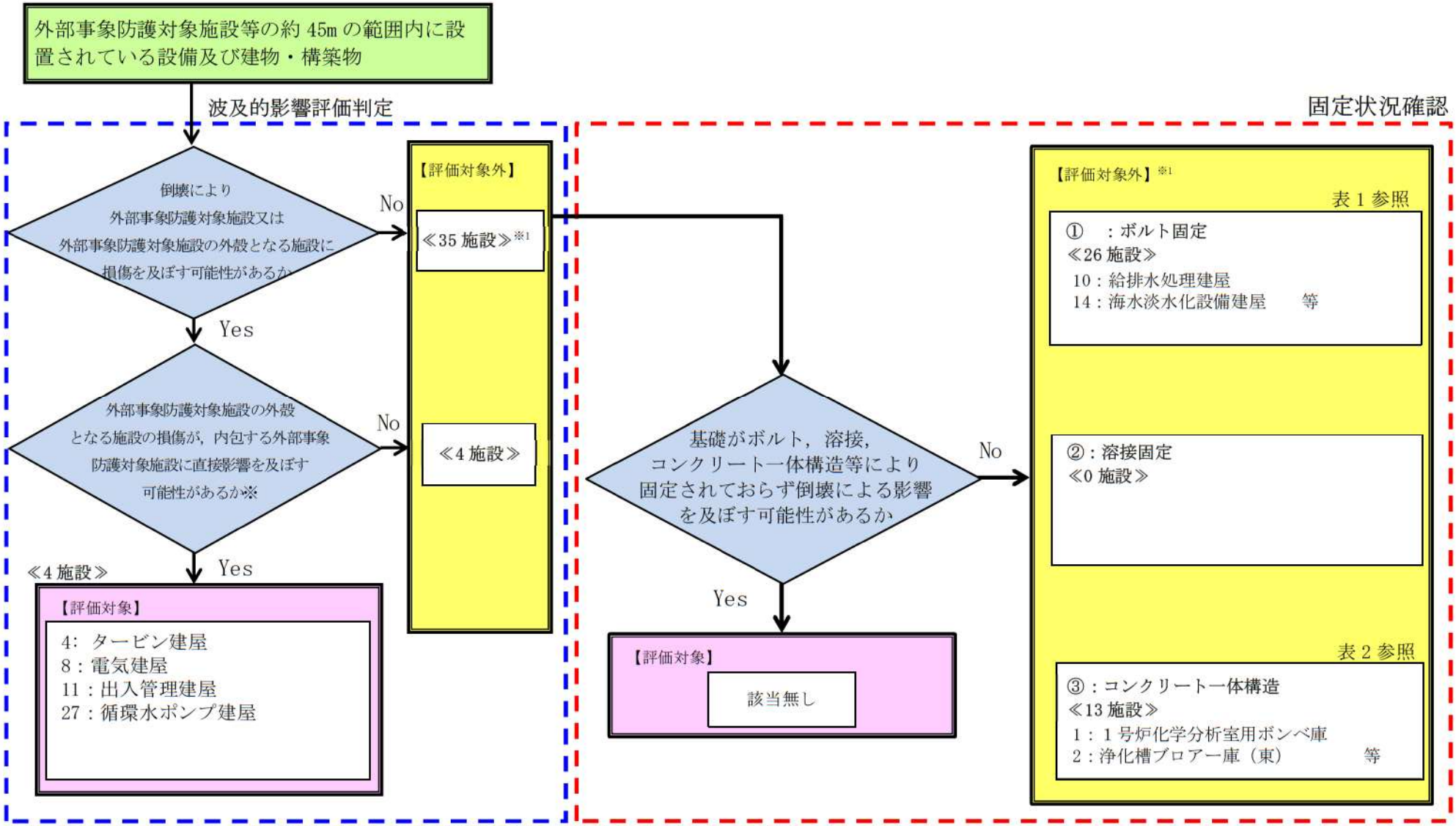
鋼製階段

配管

アンテナ

外壁（セメント板）

図２　飛来物（想定飛来物及び二次飛来物）の写真記録（36/36）



※1 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の重要性を鑑み，自主的に機能維持のための配慮を行う

表１　固定状況確認による評価対象一覧表（ボルト固定）【26 施設】

No.	施設名	No.	施設名	No.	施設名
3	電気防食装置	23	油計量タンク（避雷針含む）	35	副制御盤（ＰＰＡ２５６）
10	給排水処理建屋	24	副制御盤（ＰＰＡ２１７）	36	副制御盤（ＰＰＡ２５３）
14	海水淡水化設備建屋	25	連絡装置収納盤（ＳＴ２２２）	37	中継盤（ＰＰＪ２０１）
17	電気防食装置	26	小屋	39	Ｈダクト排気塔（タービン建屋南）
18	３号機発電機ガスボンベ貯蔵庫	30	３－スクリーン室橋形クレーン電源盤	42	電気盤
19	電気防食装置	31	代替給電用接続盤３(1)(2)	43	タービン建屋避雷針
20	３号機補助ボイラー燃料タンク	32	代替給電用接続盤３(3)(4)	44	循環水ポンプ建屋避雷針
21	補助ボイラー煙突	33	３－代替非常用発電機保守分電盤(1)	45	原子炉建屋避雷針
22	補助ボイラー建屋	34	３号機移動用発電機車用保守分電盤		

表２　固定状況確認による評価対象一覧表（コンクリート一体構造）【13 施設】

No.	施設名	No.	施設名	No.	施設名
1	Ａダクト給気塔	9	Ｆダクト給気塔	38	Ｈダクト給気塔（タービン建屋南）
2	浄化槽ブロアー庫（東）	12	洞道冷却ファン建屋	40	Ｆダクト排気塔（出入管理建屋南）
5	Ｄダクト排気塔	13	Ｅダクト給気塔	41	旧３号出入管理建屋
6	Ａダクト排気塔	15	Ｇダクト排気塔		
7	ＣＶケーブルダクト排気塔	16	Ｇダクト給気塔		

分解し小型軽量となる物品及び倒壊するが飛来物とはならない物品等について

設計飛来物の抽出において，「分解し小型軽量となる物品」は設計飛来物のうち鋼製材に包絡されること，また「倒壊するが飛来物とはならない物品」は飛散しないことから，設計飛来物として選定しないこととしている。

これは，過去の主な竜巻の被害概要の調査結果等から，このような物品の状況について検討を行った結果より判断している。

以下に平成２年以降の主な竜巻による被害概要を調査した文献から検討を行った結果を示す。「分解し小型軽量となる物品」，「倒壊するが飛来物とはならない物品」は泊発電所におけるウォークダウン結果を念頭に状況を示す。

１．分解し小型軽量となる物品（確認対象：屋外屋根，シャッター，ガラス窓，仮設足場）

泊発電所におけるウォークダウンの結果，過去の竜巻の被害概要調査結果において，分解し小型軽量となり得た物品に類似するものとして，屋外屋根，シャッター，ガラス窓，仮設足場を確認した。過去の実績における屋外屋根，シャッター，ガラス窓，仮設足場の被害状況は以下のとおり。

(1)屋外屋根の被害状況

図１～５に屋外屋根の被害状況を示す。これらより，屋外屋根については，F0～F3 の被害状況において形を保ったままではなく，分解された状態で飛来していることが分かる。また，厚みが薄く，受風面積が大きいため風の影響を受けやすいことから形状が変形（柔飛来物）しており，剛飛来物に比べ，貫通等の影響が小さくなると考えられる。

牛舎の屋根東方向，柱・トタン板は西方向に飛散している

図１　平成 16 年 6 月 27 日 佐賀県で発生した F2 竜巻による野外屋根の被害状況[(1)]

カーポート屋根の飛散及び骨組の損傷

カーポート屋根の破損

屋外トイレ屋根の損傷

図２　平成 18 年 9 月 17 日 宮崎県延岡市で発生した F2 竜巻による屋外屋根の被害状況[2]

折板の損傷

カーポートの被害

図３　平成 21 年 10 月 8 日 茨城県土浦市で発生した F1 竜巻による屋外屋根の被害状況[3]

周囲の田に散乱した屋根ふき材

図４　平成 24 年２月１日 島根県出雲市で発生した F0 竜巻による屋外屋根の被害状況[4]

飛散した鋼板製屋根材

飛散した折板屋根の状況

電線等に引っ掛かった飛来物（鋼板製屋根材）

図５　平成 24 年５月６日 茨城県つくば市で発生した F3 竜巻による屋外屋根の被害状況[5]

(2) シャッターの被害状況

図６～１０にシャッターの被害状況を示す。これらより，シャッターについては，F1～F3，EF5※1 の竜巻において形状は変形しているが，固定部が外れていないことが確認できる。

※1 改良藤田スケール（Enhanced Fujita scale)。EF5 は風速 90m/s 以上。

シャッターの被害

図６　平成 20 年 5 月 25 日 米国アイオワ州で発生した EF5 竜巻によるシャッター被害状況[6]

シャッターの破損

図７　平成 21 年 10 月 8 日 茨城県土浦市で発生した F1 竜巻によるシャッターの被害状況[3]

シャッターの外れ

図８　平成21年7月27日 群馬県館林市で発生したF1(F2)竜巻によるシャッターの被害状況[7]

消防団施設のシャッターの被害状況

図９　平成24年5月6日 茨城県つくば市で発生したF3竜巻によるシャッターの被害状況[5]

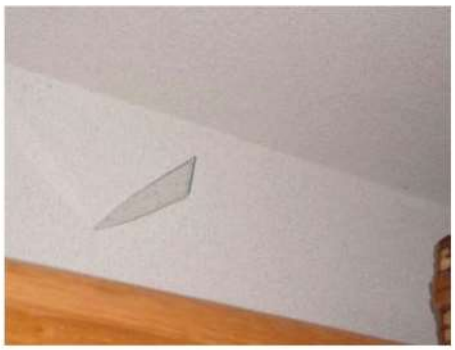
シャッターの被害

図１０　平成25年9月2日 埼玉県で発生したF2竜巻によるシャッターの被害状況[8]

(3) ガラス窓の被害状況

図１１～１６にガラス窓の被害状況を示す。これらより，ガラス窓については，F0～F3，EF5 の竜巻において損壊し，分解されていることが確認できる。分解された状態では，小型軽量となっており，設計飛来物である鋼製材，鋼製パイプ又は砂利に包含されると考えられる。

エントランスの窓ガラスの破損



破損した窓ガラス片の屋内
（壁面への突き刺さり）

図１１　平成 18 年 9 月 17 日 宮崎県延岡市で発生した F2 竜巻によるガラス窓の被害状況[2]

バスの窓ガラス破損

図１２　平成 20 年 5 月 25 日 米国アイオワ州で発生した EF5 竜巻によるガラス窓の被害状況[6]

窓ガラスの損壊

窓ガラスの飛来物衝突痕

図１３　平成21年7月27日 群馬県館林市で発生したF1(F2)竜巻によるガラス窓の被害状況[7]

エントランスのガラス破損

倉庫の窓ガラスと屋根の被害状況

窓ガラスの破損

図１４　平成21年10月8日 茨城県土浦市で発生したF1竜巻によるガラス窓の被害状況[3]

体育館窓ガラスの破損

（1）教室　　（2）廊下　　（3）屋外に面した窓ガラス

本館 4 階の廊下と教室内のガラス破片の散乱状況

図１５　平成 24 年 2 月 1 日 島根県出雲市で発生した F0 竜巻によるガラス窓の被害状況[4]

店舗の窓ガラスの被害状況

ガラスへの飛来物の衝突痕

図１６　平成 24 年 5 月 6 日 茨城県つくば市で発生した F3 竜巻によるガラス窓の被害状況[5]

(4) 仮設足場の被害状況

図１７に仮設足場の被害状況を示す。これらより，仮設足場については，F2 の竜巻において倒壊していることが確認できる。各足場パイプはクランプで固定されているため，足場パイプは容易に分解せず，仮設足場はほぼ組まれた状態で倒壊している。

仮設足場の倒壊

図１７　平成 18 年 9 月 17 日 宮崎県延岡市で発生した F2 竜巻による仮設足場の被害状況[9]

２．泊発電所の屋外屋根，シャッター，ガラス窓，仮設足場の状況

泊発電所における屋外屋根の状況を図１８，シャッターの状況を図１９，ガラス窓の状況を図２０，仮設足場の状況を図２１に示す。泊発電所におけるこれらの物品の構造については，上記１．の被害にあった物品の構造と大きく変わらないことから，竜巻通過時には，同様の被害状況になると考えられる。

そのため，上記１．の被害状況からこれらの物品については，飛散をしていないシャッターを除き，二次飛来物となる可能性があるが，ガラス窓は設計飛来物である鋼製材，鋼製パイプ又は砂利に包含される。仮設足場はほぼ組まれた状態で倒壊していることを踏まえ，仮設足場の各部材が容易に飛散しないよう，足場材の緊結等の適切な飛散防止対策を行う運用とする。屋外屋根については，現場調査の結果等において，容易に飛散する状況でないことを確認している。屋外屋根は飛散したとしても変形し柔飛来物となるため，貫通等の影響は小さいと考えられる。

図１８　泊発電所における屋外屋根の状況

図１９　泊発電所におけるシャッターの状況

図２０　泊発電所におけるガラス窓の状況

図２１　泊発電所における仮設足場の状況

３．倒壊するが飛来物とならない物品（確認対象：樹木，フェンス）

泊発電所におけるウォークダウンの結果，過去の竜巻の被害概要調査結果において，倒壊するが飛来物とならない物品に類似するものとして，樹木，フェンスを確認した。過去の実績における樹木，フェンスの被害状況は以下のとおり。

(1)樹木

図２２～２８に樹木の被害状況を示す。これらより，樹木については，F1～F3 及び EF5 の被害状況において幹の折損，根の引き抜き等が見られるが折れた場合，引き抜かれた場合どちらにおいてもその場で横倒れしているのみである。

倒木（南から見る）

倒木（北西から見る）

倒れなかった樹木も点在している。

図２２　平成 14 年 7 月 26 日 群馬県境町で発生した F2 竜巻による樹木被害状況[10]

樹木の転倒

樹木の転倒（緑ヶ丘）

図２３　平成 18 年 9 月 17 日 宮崎県延岡市で発生した F2 竜巻による樹木被害状況[2]

樹木の折損

図２４　平成 20 年 5 月 25 日 米国アイオワ州で発生した EF5 竜巻による樹木被害状況[6]

倒木（火打谷地区）

図２５　平成 21 年 7 月 19 日 岡山県美作市で発生した F2 竜巻による樹木被害状況[11]

倒木の被害

図２６　平成 21 年 10 月 8 日 茨城県土浦市にて発生した F1 竜巻による樹木被害状況[3]

倒木の折損

倒木の折損と鳥居の被害

樹木の倒木

倒木による社の倒壊

図２７　平成 24 年 5 月 6 日 茨城県つくば市で発生した F3 竜巻による樹木被害状況[5]

樹木の倒壊

樹木の倒壊による小屋組の被害

樹木の被害

樹木の被害

樹木の被害

樹木の被害

樹木の被害

図２８　平成 25 年 9 月 2 日 埼玉県で発生した F2 竜巻による樹木被害状況[8] [12]

(2) フェンス

図２９～３１にフェンスの被害状況を示す。これらよりフェンスについては，F1～F3 の被害状況において傾き，倒壊等が見られるが，樹木と同様にその場で倒壊しているのみである。

フェンスの著しい変形

フェンスの変形

図２９　平成 21 年 7 月 27 日　群馬県館林市で発生した F1(F2)竜巻によるフェンスの被害状況 [7]

フェンスの被害状況

図３０　平成 24 年 5 月 6 日 茨城県つくば市で発生した F3 竜巻によるフェンスの被害状況 [5]

フェンスの倒壊

屋上フェンスの被害

フェンスの倒壊

支柱部の破断

フェンスの被害（工事中の建築物）

フェンスの被害

図３１　平成 25 年 9 月 2 日 埼玉県で発生した F2 竜巻によるフェンスの被害状況[8]

４．泊発電所の樹木，フェンスの状況

泊発電所における樹木の状況を図３２，フェンスの状況を図３３に示す。

上記３．のとおり，被害にあった樹木・フェンスと規模，構造等に大きな差はないことから，竜巻通過時には同様の被害状況になり，折損等によりその場で横倒れすると考えられる。また，被害状況からも分かるが，樹木等は竜巻により倒壊するものの，竜巻はすでに通り過ぎているため，巻き上げ等により飛来物となることは考えにくいことから，樹木及びフェンスは設計飛来物として選定しない。

図３２　泊発電所における樹木の状況

図３３　泊発電所におけるフェンスの状況

参考文献

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

屋外のアクセスルート設定に係る対策設備の評価について

重大事故等時の屋外のアクセスルート確保のために今後配備する砕石及び防雪シートが，すでに実施している竜巻の評価に影響を与えないことを確認するため，以下のとおり評価した。

（１）対策設備の抽出

屋外のアクセスルートに恒常的に設置する対策設備は以下のとおりであり，それぞれについて竜巻の評価への影響を評価する。

ａ．段差復旧用の砕石の配備

ｂ．防雪シートの設置

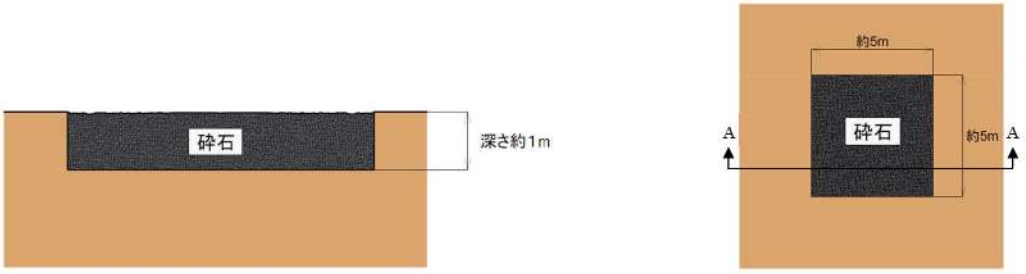
（２）影響評価

ａ．段差復旧用の砕石の配備

【竜巻の評価への影響】

アクセスルート近傍にあらかじめ配備しておく段差復旧用の砕石の仕様については，北海道開発局独自「切込砕石及びコンクリート再生骨材　呼び名 30mm」（令和５年度 道路・河川工事仕様書 国土交通省 北海道開発局）に準拠するため，最大で 4cm を想定しており，竜巻の評価にて，設計飛来物としている砂利，鋼製パイプ，鋼製材の評価に包含できることを確認した。

よって，段差復旧用の砕石を配備することによる，竜巻の評価への影響はない。



（A-A 断面図）　　（平面図）

※：縦，横，深さについては，今後の検討により変更となる可能性がある。

段差復旧用の砕石の配備イメージ

【評価概要】

以下のとおり，砕石の大きさを想定し影響評価を実施した。

○砕石（最大 4cm×4cm×4cm 重さ約 0.18kg）

飛散した場合を考慮すると，竜巻防護ネットをすり抜ける可能性がある。よって，同様に竜巻防護ネットをすり抜ける可能性がある設計飛来物の砂利（4cm×4cm×4cm，重さ 0.18kg）の評価に包含できることを確認した。

b．防雪シートの設置

【竜巻の評価への影響】

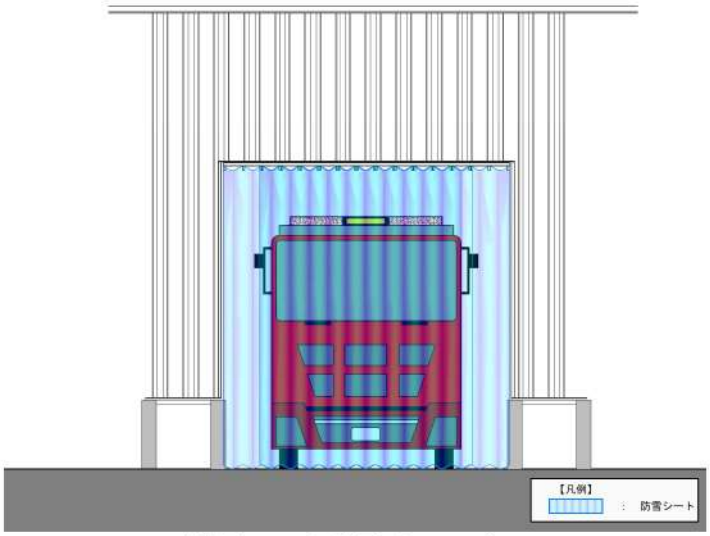
防雪シートについては，51m 倉庫・車庫の出入口に固定するものの，飛来物になりうる可能性があるため，竜巻の評価にて設計飛来物としている砂利，鋼製パイプ，鋼製材の評価に包含できることを確認した。

よって，防雪シートを設置することによる，竜巻の評価への影響はない。

【評価概要】

○防雪シート（約 4.0m×約 3.8m×約 0.53mm 重さ約 20kg）

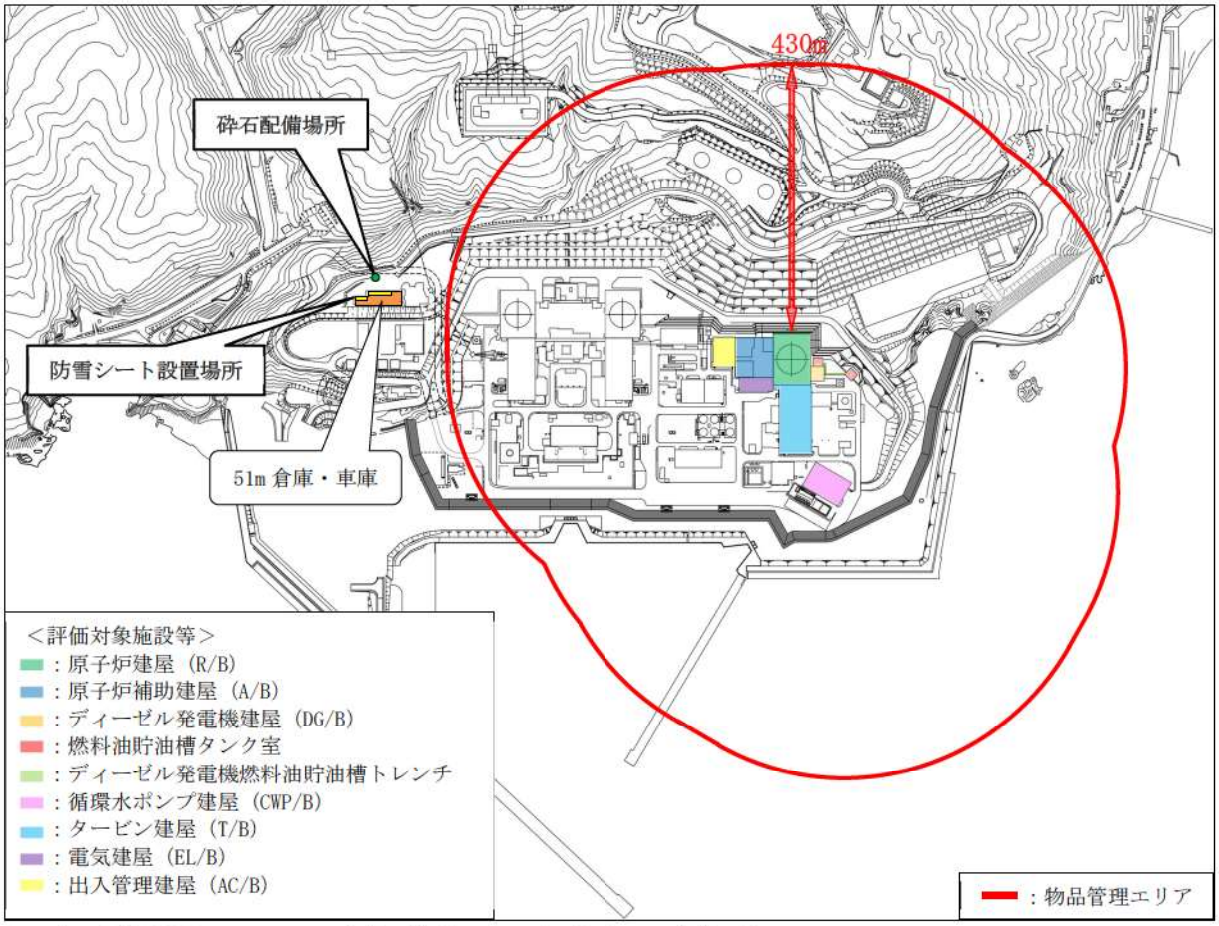
：飛散した場合を考慮し，評価対象施設の評価において最大の設計飛来物である鋼製材（4.2m×0.3m×0.2m 重さ 135kg）の評価に包含できることを確認した。



防雪シート設置イメージ

（３）対策設備の設置場所

段差復旧用の砕石の配備場所及び防雪シートの設置場所を以下に示す。



※：砕石配備場所については，今後の検討により変更となる可能性がある。

アクセスルート対策設備の設置場所

（４）評価結果

重大事故等時の屋外のアクセスルート確保のために今後配備する砕石及び防雪シートについて，以下の評価結果により，すでに実施している竜巻の評価に影響を与えないことを確認した。

表　アクセスルート対策設備の設計飛来物への包含性について

評価対象（設計飛来物）	仕様				運動エネルギー [kJ]	コンクリート(Fc24)の貫通限界厚さ[cm]	評価結果
	長さ [cm]	幅 [cm]	高さ [cm]	質量 [kg]			
砕石（砂利）	4.0 (4.0)	4.0 (4.0)	4.0 (4.0)	0.18 (0.18)	0.3 (0.3)	2.3 (2.3)	砂利の評価に包含できる。
防雪シート（鋼製材）	400 (420)	380 (30)	0.053 (20)	20 (135)	87.1 (219.3)	27.3 (28.5)	鋼製材の評価に包含できる。

（参考）

竜巻時に発生するひょうの影響について

竜巻時はひょうを伴うこともあるため，ひょうに関する文献を参考にひょうの影響について検討を行った。

ひょうはあられが大きく成長したもので，直径 0.5cm 以上の氷の粒子である。ひょうの大きさは，通常は直径が 0.5～5cm である[(1)]。このことから，直径 5cm のひょうを対象に影響評価を行う。なお，ひょうの大きさの変化に対する影響を確認するため，比較対象として，参考文献[(2)]に記載のひょうで最大である 10cm のひょうにて評価を実施した。

空気中を落下する物体は空気抵抗を受けるので，時間が経てば空気抵抗と重力が釣り合い等速運動となり，一定の速度（終端速度）となる。空気中を落下するひょうもこの終端速度で落下する。ひょうの粒径毎の終端速度を表 1 に示す。

表 1 ひょうの粒径毎の終端速度[(2)]

粒径（cm）	終端速度（m/s）
1	9
2	16
5	33
10	59

ひょうの大きさの変化に対する影響を確認するため，粒径 5 cm及び 10 cmのひょう並びに設計飛来物（鋼製材）について，運動エネルギー，貫通力（貫通限界厚さ）の評価を行った。結果を表 2 に示す。

ひょうの影響は設計飛来物（鋼製材）と比較し十分小さく，包含できると言える。

表 2 粒径 5cm 及び 10cm ひょう並びに設計飛来物（鋼製材）の影響評価

		粒径 5cm ひょう	粒径 10cm ひょう	設計飛来物（鋼製材）※
運動エネルギー		0.04kJ	0.91kJ	97.5kJ
貫通限界厚さ	コンクリート Fc=24N/mm^2	0.8cm	2.9cm	20.2cm
	鋼板	0.2mm	0.7mm	21.0mm

※ 衝撃荷重による影響を保守的に評価するため，改正前の竜巻影響評価ガイドに示される最大鉛直速度を適用して計算した結果

〔参考文献〕

(1)：白木正規，百万人の天気教室，成山堂書店
(2)：小倉義光，　一般気象学，東京大学出版会

竜巻随伴事象の抽出について

過去の竜巻被害を参考に竜巻の随伴事象を検討し，泊発電所のプラント配置から考慮する必要がある事象として，火災，溢水及び外部電源喪失事象を抽出した。

1．過去の竜巻被害について

過去の竜巻被害について，1990 年以降の主な竜巻による被害概要を調査した文献から検討を行った。竜巻の被害の状況写真から日本国内での竜巻被害では，風圧力及び飛来物の衝突により発生している建築物，電柱及び電線等の損傷がみられ，竜巻の随伴事象としては，電柱や電線の損傷による停電事象が発生している。（第 3.4.1 図，第 3.4.2 図）

（建物の被害）

（ガラスへの飛来物衝突痕）

（電柱の折損，傾斜）

第 3.4.1 図　2012 年茨城県つくば市で発生した F3 竜巻による被害状況[(1)]

（電柱の折損，傾斜）

（建築物への飛来物の衝突痕）

（電柱，道路標識の折損）

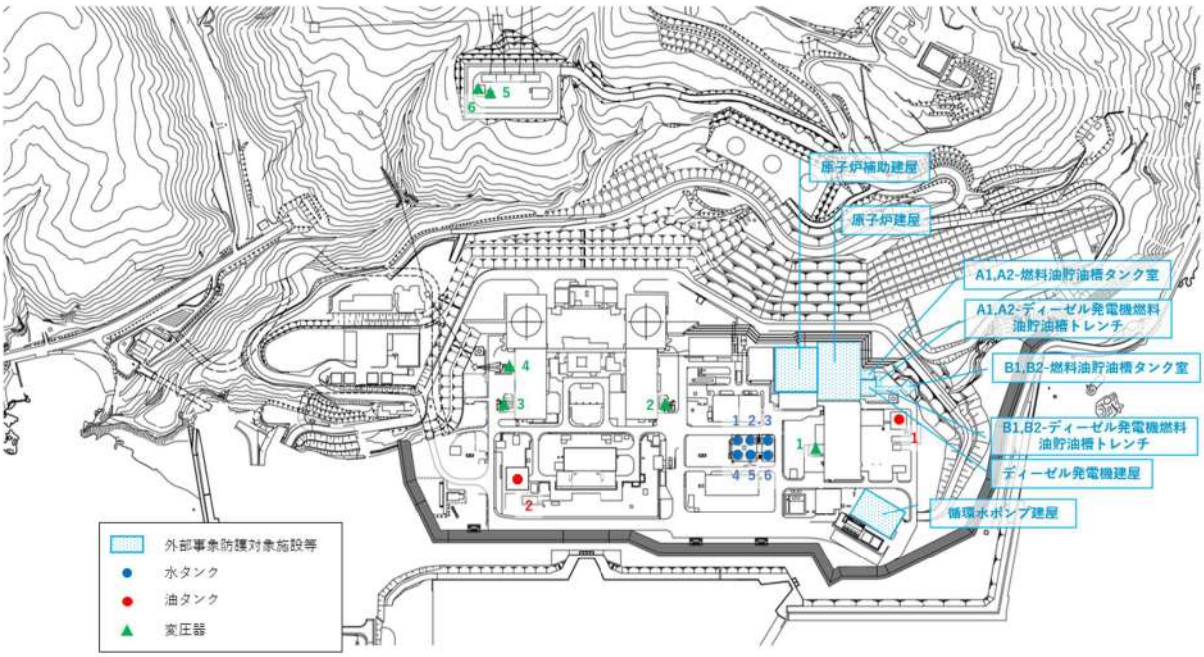
第 3.4.2 図　2006 年に北海道佐呂間町で発生した F3 竜巻による被害状況[(2)(3)]

２．泊発電所のプラント配置を踏まえた竜巻随伴事象について

上記１．の過去の竜巻被害の状況から，泊発電所においても送電線等が竜巻により被害を受け，外部電源喪失事象が発生することが考えられる。

また，泊発電所に設置している屋外水タンク等及び軽油タンク・変圧器等についても，飛来物の衝突影響を受けることで，溢水事象及び火災事象が発生することが考えられる。（第 3.4.3 図）

このため，竜巻随伴事象として外部電源喪失，火災事象，溢水事象を抽出する。



水タンク	1：Ａ－２次系純水タンク	2：３Ａ－ろ過水タンク
	3：３Ｂ－ろ過水タンク	4：Ａ－ろ過水タンク
	5：Ｂ－ろ過水タンク	6：Ｂ－２次系純水タンク
油タンク	1：３－補助ボイラー燃料タンク	2：補助ボイラー燃料タンク
変圧器	1：３号主変圧器・所内変圧器	2：２号主変圧器，２号起動変圧器，２号所内変圧器
	3：１号主変圧器，１号起動変圧器，１号所内変圧器	4：予備変圧器
	5：３号予備変圧器	6：後備変圧器（設置予定）

第 3.4.3 図　泊発電所の屋外タンク等の配置図

参考文献

(1)「平成 24 年（2012）5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した建築物等の竜巻被害状況調査報告」(ISSN1346-7328 国総研資料　第 703 号　ISSN0286-4630 建築研究資料　第 141 号　平成 25 年 1 月)

(2)2006 年佐呂間町竜巻被害調査報告（2006 年 11 月 21 日）

(3)佐呂間竜巻災害の記録―若佐地区―（平成 19 年 10 月佐呂間町）

飛来物化する可能性がある物品等の管理について

1. 概要

発電所内の飛来物となる可能性があるものについては，設計飛来物である鋼製材又は鋼製パイプが設計竜巻により飛来した場合の運動エネルギー及び貫通力を基準として，鋼製材又は鋼製パイプより運動エネルギー又は貫通力が大きい場合は固縛対策（運用管理）を実施する。

2. 運用管理方針

2.1 運用管理の基準

気象庁が発表する竜巻関連の気象情報を踏まえ，運用管理の基準（竜巻警戒レベル）を定める。

竜巻警戒レベル	発令条件	運用対策
竜巻監視対応 （STEP1）	・ 後志西部地方のうち岩内町，共和町，泊村，神恵内村の４町村のうち，いずれかに「雷注意報（竜巻）」又は「雷注意報（ひょう）」が発表された場合 又は ・ 「竜巻注意情報（石狩・空知・後志地方）」が発表された場合	・ レーダーナウキャストによる監視（監視範囲は下図Ａ）
竜巻退避準備対応 （STEP2）	・ レーダーナウキャストにより，発電所上空（下図Ｂ）に「竜巻発生確度２」が発生したことを確認した場合，又は予測値からその恐れがある場合 又は ・ レーダーナウキャストにより，発電所上空（下図Ｂ）に「雷活動度２以上」が発生したことを確認した場合，又は予測値からその恐れがある場合	・ 車両，人の退避準備 等
竜巻退避対応 （STEP3）	・ レーダーナウキャストにより，発電所上空（下図Ｂ）に「竜巻発生確度２」かつ「雷活動度３以上」が発生したことを確認した場合，又は予測値からその恐れがある場合	・ 車両，人の退避 ・ 燃料取扱作業中止 等

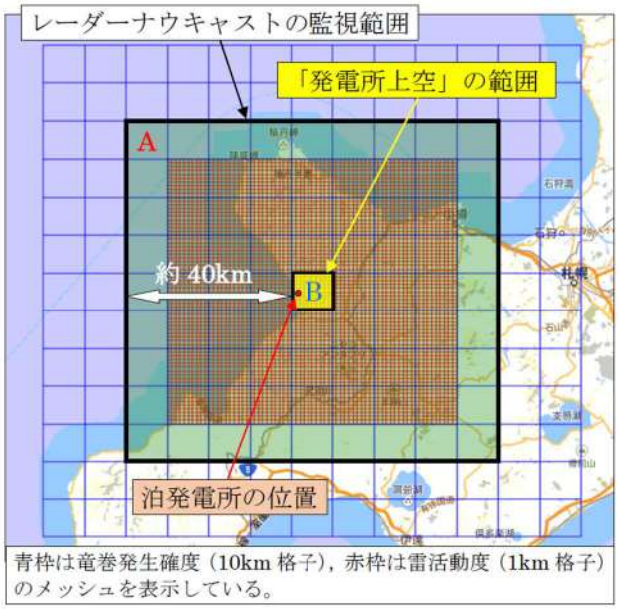


図１　竜巻運用対策の実施基準（イメージ）

2.2 運用管理の対象

運用管理の対象は，「車両」及び「車両以外の物品」に分けて管理を行う。

2.2.1 車両の管理

2.2.1.1 車両の管理に際し考慮する事項

車両については，速やかに固縛・固定することが難しい場合も想定されるため，以下の管理を行う。

・発電所構内での作業に関係のない車両については，原則として入構を禁止する

・発電所へ入構する車両については，以下のとおり，車両の飛散の可能性，車両が置かれている場所，車両の状態及び竜巻警戒レベルの発令の有無に応じて対策を行う

(1)車両の飛散の可能性

発電所に入構する予定のある車両については，原則として事前に車両サイズ，重量から空力パラメータを算出し飛散評価を行い，飛散の可能性の有無を評価・通知する。事前の確認がなされていない場合は，確認が完了するまでは飛散するものとして取り扱う。

(2)車両が置かれている場所

車両が飛散することによって評価対象施設等に衝突する可能性があるエリアを「車両管理エリア」と定め，車両が車両管理エリア内にある場合には，「2.2.2 管理方針」に示す管理を行う。

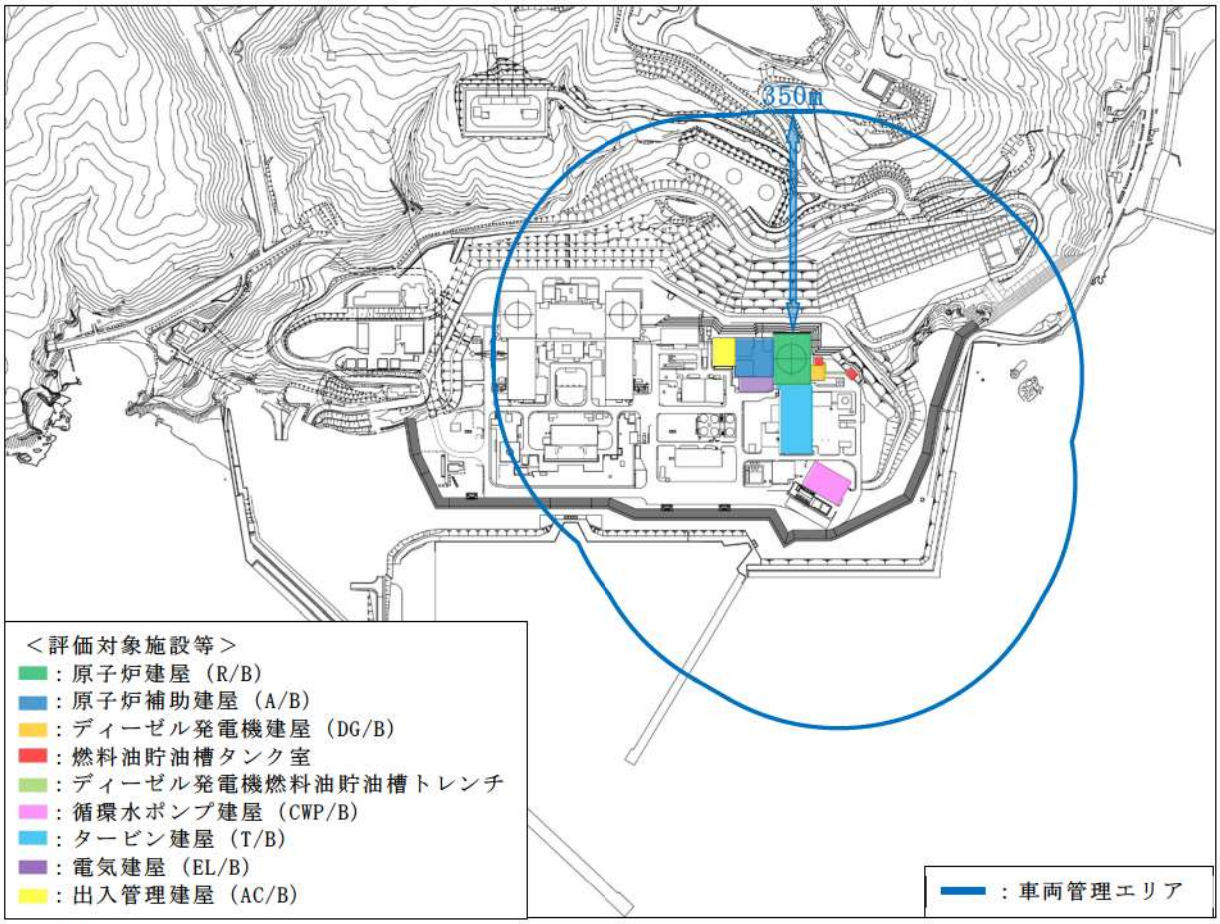
＜車両管理エリアの考え方（具体的なエリアは図２参照）＞

車両管理エリアの範囲設定は，車両が飛散し，評価対象施設等に影響の与える範囲を保守的に設定する必要がある。そのため，各々の評価対象施設等に対する飛散影響を考慮して設定する。

車両の形状によって，飛散距離が異なることから，以下の観点で車両管理エリアを設定する。

① ウォークダウンで確認された車両の形状を踏まえて，設計飛来物より運動エネルギーが大きく，最も飛散距離が大きい車両である「軽乗用車」を飛来物として選定する。

② 最も飛散距離が大きい車両である「軽乗用車」をランキン渦モデルで飛散させた場合，最大飛距離は約 350m と算出されることから，評価対象施設等から 350m の範囲を車両管理エリアと設定する。



＜条件＞
・ランキン渦モデル
・設計竜巻風速：100m/s
・飛来物：軽乗用車

最大速度（水平）［m/s］	最大速度（鉛直）［m/s］	最大飛散距離［m］
55.5	24.8	343.6

図２　車両管理エリア

飛散しない車両であっても横滑りの検討が必要であるが，フェンス等の障害物により横滑りを防止できない範囲を横滑り対策の検討対象とする。

(3)車両の状態

停車：運転手が車両に乗っている（走行中含む），または緊急時に車両に即座に駆けつけることができる状態。

駐車：停車時以外の状態。

(4)竜巻襲来に対する体制の状態

「2.1　竜巻運用対策の実施基準」のとおり。

2.2.1.2 車両の管理方針

上記の考慮事項に基づき，車両の管理方針を以下のとおり定める。また，発電所への入構車両の管理方針を表１，管理イメージを図３に示す。

(1)飛散しない車両の場合

ａ．飛散も横滑りもしない車両

飛散も横滑りもしない車両は，車両管理エリアでの駐車時または停車時の対策は不要とする。

ｂ．飛散はしないが横滑りする車両

横滑りによる悪影響を考慮し，以下のとおりとする。

・駐車状態の車両は，平時，竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」～「竜巻退避対応」時のいずれにおいても固縛する。ただし，評価対象施設等に影響を及ぼす可能性がないとされた場所（下記の①）に駐車する車両の固縛は不要とする。

・停車状態の車両は，平時及び竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時では対策不要だが，竜巻警戒レベル「竜巻退避準備対応」又は「竜巻退避対応」時には固縛する，若しくは車両退避エリアに退避する。ただし，駐車時と同様に，評価対象施設等に影響を及ぼす可能性がないと指定された場所（下記の①）に竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時以前より入域している場合は退避不要とする。

・上記の退避又は固縛を速やかに開始するため，車両管理エリア内の車両については，竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時の段階で，運転者が近くに待機する。

＜横滑りへの対策が不要となる場所＞

①車両管理エリア内で，竜巻の風荷重に対し構造健全性を維持することが確認された建屋，構築物の内部（竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時以前に，作業等で既に入域している車両が対象）

(2)飛散する車両の場合

・駐車状態の車両については，固縛する

・停車状態の車両については，平時及び竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時では対策不要だが，竜巻警戒レベル「竜巻退避準備対応」又は「竜巻退避対応」時には固縛する，若しくは車両退避エリアに退避する。ただし，飛散しない車両と同様に，評価対象施設等に影響を及ぼす可能性がないと指定された場所に竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時以前より入域している場合は退避不要とする

・停車状態で作業を行っている工事車両の場合，竜巻警戒レベル「竜巻退避準備対応」又は「竜巻退避対応」時には，速やかに作業を中止し，車両，物品の固縛，離隔等の飛散防止対策を実施する。なお，作業中止及び車両，物品の固縛，離隔等行うために時間を要する作業（クレーン車等による大型重量物の吊り上げ作業

等）を実施する場合には，事前の気象予報等を踏まえて，作業可否の判断を行う運用を行う

・上記の退避又は固縛を速やかに開始するため，車両管理エリア内の車両については，竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時の段階で，運転者が近くに待機する

表１　発電所への入構車両の管理方針

<table>
<tr><th rowspan="3">飛散の有無</th><th rowspan="3">配置場所</th><th rowspan="3">車両の状態</th><th colspan="4">管理方法</th></tr>
<tr><th rowspan="2">平時</th><th colspan="3">竜巻警戒レベル</th></tr>
<tr><th>竜巻監視対応時</th><th>竜巻退避準備対応時</th><th>竜巻退避対応時</th></tr>
<tr><td rowspan="2">飛散も横滑りもしない車両</td><td rowspan="2">車両管理エリア内外</td><td>駐車</td><td colspan="4" rowspan="2">対策不要</td></tr>
<tr><td>停車</td></tr>
<tr><td rowspan="4">飛散はしないが横滑りする車両</td><td rowspan="2">車両管理エリア内</td><td>駐車</td><td colspan="4">固縛※1</td></tr>
<tr><td>停車</td><td colspan="2">固縛又は退避の準備が出来ていること</td><td colspan="2">固縛又は退避※1</td></tr>
<tr><td rowspan="2">車両管理エリア外</td><td>駐車</td><td colspan="4" rowspan="2">対策不要</td></tr>
<tr><td>停車</td></tr>
<tr><td rowspan="4">飛散する車両</td><td rowspan="2">車両管理エリア内</td><td>駐車</td><td colspan="4">固縛</td></tr>
<tr><td>停車</td><td colspan="2">固縛又は退避の準備が出来ていること</td><td colspan="2">固縛又は退避※1</td></tr>
<tr><td rowspan="2">車両管理エリア外</td><td>駐車</td><td colspan="4" rowspan="2">対策不要</td></tr>
<tr><td>停車</td></tr>
</table>

※１　竜巻の風荷重に対し構造健全性を維持することが確認された建屋，構築物の内部に竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時以前に入域している車両は対象外

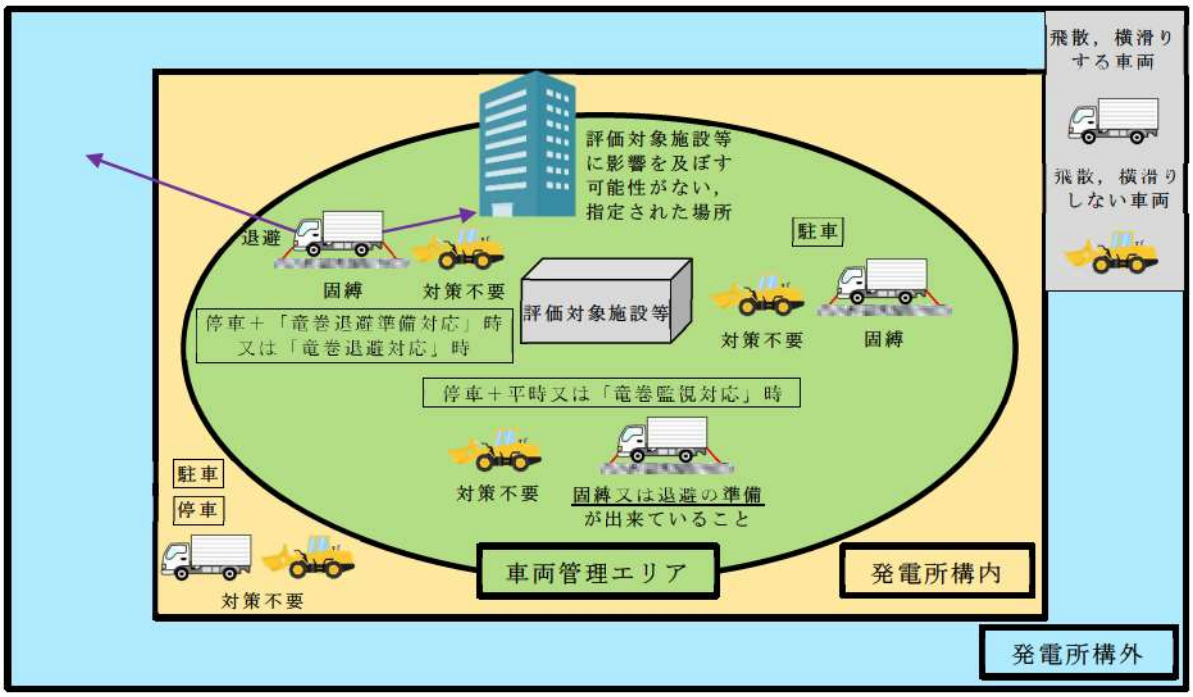


図３　発電所への入構車両の管理イメージ

2.2.1.3 車両の退避場所

車両の退避について，発電所構外の退避エリア候補地①～④へ退避する場合の退避ルートを図４で例示する。

構内へ入域する車両のうち，原子炉建屋等の外部事象防護対象施設を内包する建屋周りに駐停車する車両は，工事用車両が多く，固縛対策を行う，若しくは車両退避エリアに退避することから，評価対象施設の近辺で最も退避エリア候補地までの距離が遠くなる原子炉補助建屋屋上を基点として考える。

退避エリア候補地①～④への車両の避難に要する時間については表２のとおりであり，竜巻襲来までの時間余裕として見込んでいる 60 分の中で，退避は可能と判断している。今後，構内の道路状況や関連設備の整備状況を踏まえて運用面の具体的な手順化を行っていく。

表２　退避に要する所要時間

退避エリア候補地	原子炉補助建屋屋上からの距離			想定時間※1		
	構内退避ルート	構外退避ルート	合計	構内退避ルート	構外退避ルート	合計
①	約 2.4km	約 2.5km	約 4.9km	約 30 分	約 15 分	約 45 分
②		約 3.2km	約 5.6km		約 20 分	約 50 分
③		約 3.7km	約 6.1km		約 23 分	約 53 分
④		約 1.2km	約 3.6km		約 8 分	約 38 分

※１　発電所構内退避ルート（図４の紫線）については，退避時の車両渋滞の可能性も考慮し，保守的に車両の移動速度を徒歩（80m／分）程度として算出した。又，発電所構外退避ルート（図４の緑線）については，車両渋滞の可能性は考え難いものの，公益財団法人　日本道路交通情報センターＨＰより，一般道の渋滞速度 10km／h を採用して算出した。

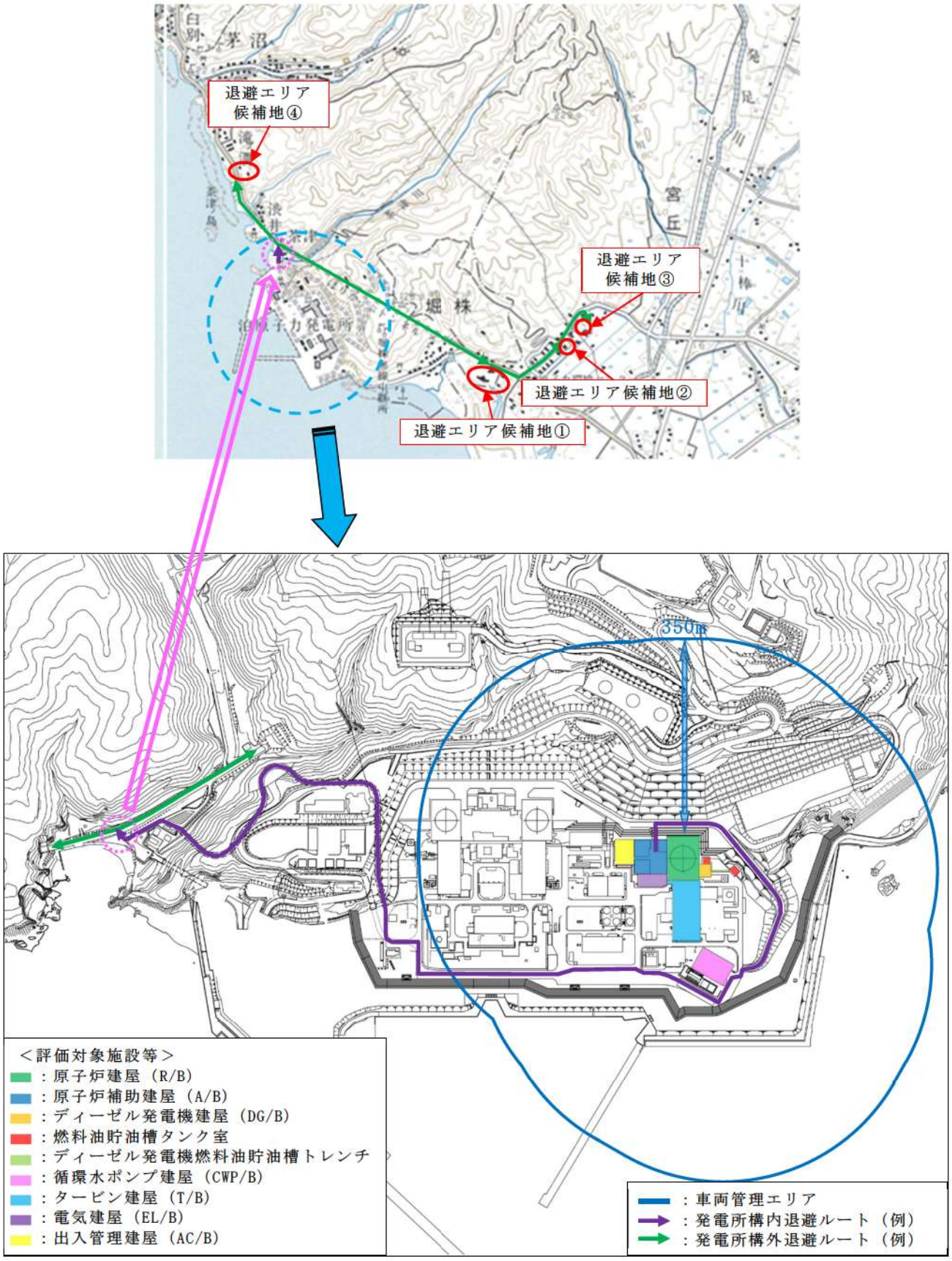


図４　車両管理エリア及び車両退避エリア

2.2.2 車両以外の物品の管理

2.2.2.1 管理に際し考慮する事項

発電所構内に持ち込まれる車両以外の物品については，以下のとおり，物品の飛散の可能性，物品の置かれている場所，竜巻襲来に対する体制の状態に応じて対策を行う。

(1)物品の飛散の可能性

発電所に持ち込まれる予定のある物品については，原則として事前にサイズ，重量から空力パラメータを算出し飛散評価を行い，飛散の可能性の有無を評価する。事前の確認がなされていない場合は，確認が完了するまでは飛散するものとして取り扱う。

(2)物品が置かれている場所

物品が飛散することによって評価対象施設等に衝突する可能性があるエリアを「物品管理エリア」と定め，物品が物品管理エリア内にある場合には，「2.3.2 管理方針」に示す管理を行う。

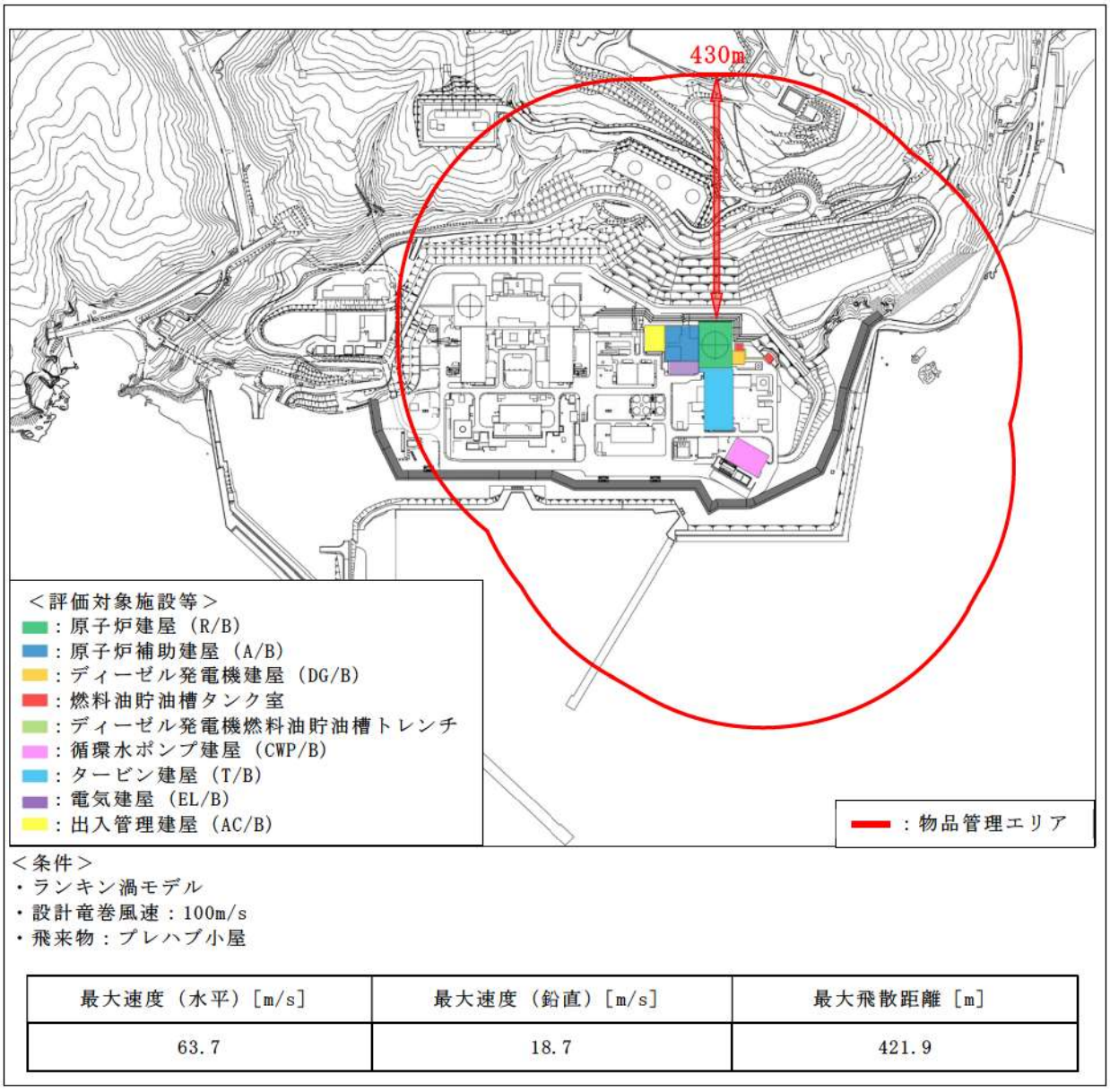
＜物品管理エリアの考え方（具体的なエリアは図５参照）＞

物品管理エリアの範囲設定は，物品が飛散し，評価対象施設等に影響の与える範囲を保守的に設定する必要がある。そのため，各々の評価対象施設等に対する飛散影響を考慮して設定する。

物品の形状によって，飛散距離が異なることから，以下の観点で物品管理エリアを設定する。

① ウォークダウンで確認された物品の種類を踏まえて，設計飛来物より運動エネルギーが大きく，最も飛散距離が大きい物品である「プレハブ小屋」を飛来物として選定する

② 最も飛散距離が大きい物品である「プレハブ小屋」をランキン渦モデルで飛散させた場合，最大飛距離は約 430ｍと算出されることから，評価対象施設等から430m の範囲を物品管理エリアと設定する



最大速度（水平）［m/s］	最大速度（鉛直）［m/s］	最大飛散距離［m］
63.7	18.7	421.9

図５　物品管理エリア

飛散しない物品であっても横滑りの検討が必要であるが，フェンス等の障害物により横滑りを防止できない範囲を横滑り対策の検討対象とする。

(3)竜巻襲来に対する体制の状態

「2.1 運用管理の基準」のとおり。

2.2.2.2 車両以外の物品の管理方針

上記の条件に基づき，車両以外の物品の管理方針を以下のとおり定める。

また，管理方針のまとめを表３に示す。

(1) 飛散しない物品の場合

ａ．飛散も横滑りもしない物品

飛散も横滑りもしない物品は，物品管理エリアでの対策は不要とする。

ｂ．飛散はしないが横滑りする物品

横滑りによる悪影響を考慮し以下のとおりとする。

・平時及び竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」～「竜巻退避対応」時のいずれにおいても原則として固定・固縛しておくが，作業等で一時的に固定・固縛を解除している物品は，竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時に移行した場合には速やかに再固定・再固縛が可能なよう，作業者が物品から離れないようにする

・評価対象施設等との間に障害物がある場所（下記の①），評価対象施設等に影響を及ぼす可能性がないと指定された場所（下記の②）に置かれている物品については，固定・固縛は不要とする

＜横滑りへの対策が不要となる場所＞

①評価対象施設等との間に，物品に対し一定の高さを有する障害物（地形，建屋・構築物等）が存在する場所又は，物品が評価対象施設等よりも低所にあり，横滑りにより上ることのできない急峻な上り勾配が認められる場所（図６参照）

②物品管理エリア内で，竜巻の風荷重に対し構造健全性を維持することが確認された建屋，構築物の内部

ただし，竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時以前に，作業等で既に搬入している物品を対象とする。

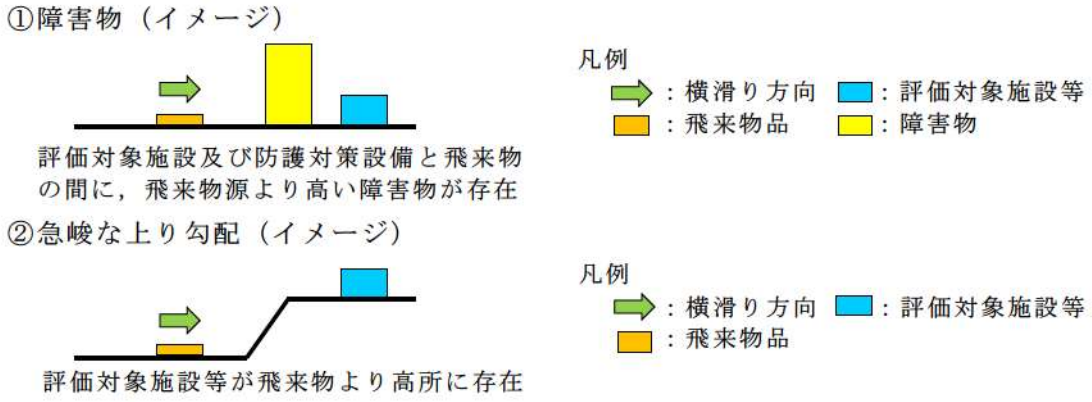


図６　横滑り対策不要の場所のイメージ図

(2)飛散する物品の場合

平時及び竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」～「竜巻退避対応」時のいずれにおいても原則として固定・固縛しておくが，作業等で一時的に固定・固縛を解除している物品は，竜巻警戒レベル「竜巻退避準備対応」時に移行した場合には速やかに再固定・再固縛が可能なように，作業者が物品から離れないようにする。

ただし，飛散しない物品と同様に，評価対象施設等に影響を及ぼす可能性がないと指定された場所に，竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時以前より搬入している場合は，固縛・固定は不要とする。

表３　車両以外の物品の管理方針

<table>
<tr><th rowspan="3">飛散の有無</th><th rowspan="3">配置場所</th><th colspan="4">管理方法</th></tr>
<tr><th rowspan="2">平時</th><th colspan="3">竜巻警戒レベル</th></tr>
<tr><th>竜巻監視対応時</th><th>竜巻退避準備対応時</th><th>竜巻退避対応時</th></tr>
<tr><td>飛散も横滑りもしない物品</td><td>物品管理エリア内外</td><td colspan="4">対策不要</td></tr>
<tr><td rowspan="2">飛散はしないが横滑りする物品</td><td>物品管理エリア内</td><td colspan="2">固定・固縛※1，2</td><td colspan="2">固定・固縛※2</td></tr>
<tr><td>物品管理エリア外</td><td colspan="4">対策不要</td></tr>
<tr><td rowspan="2">飛散する物品</td><td>物品管理エリア内</td><td colspan="2">固定・固縛※1，3</td><td colspan="2">固定・固縛※3</td></tr>
<tr><td>物品管理エリア外</td><td colspan="4">対策不要</td></tr>
</table>

※１　作業等で必要な場合は解除可能とするが，速やかに再固定・再固縛が可能なよう，作業者が物品から離れないようにする

※２　評価対象施設等との間に障害物がある場所，竜巻の風荷重に対し構造健全性を維持することが確認された建屋，構築物の内部に竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時以前に入域している物品は，不要とする

※３　竜巻の風荷重に対し構造健全性を維持することが確認された建屋，構築物の内部に竜巻警戒レベル「竜巻監視対応」時以前に入域している物品は，不要とする

3．飛来物発生防止対策の方法

評価対象施設等に悪影響を及ぼす可能性のある飛来物源に対して，飛来物発生防止対策を実施する。

飛来物発生防止対策の実施条件は，以下の①～③を全て満たす飛来物源に対して適用する。

① 飛散（浮き上がり，横滑り）する

② 設計飛来物（鋼製材又は鋼製パイプ）の運動エネルギー又は貫通力を上回る

③ 評価対象施設等に到達する

これらの飛来物発生防止対策の実施フローを図７に示す。

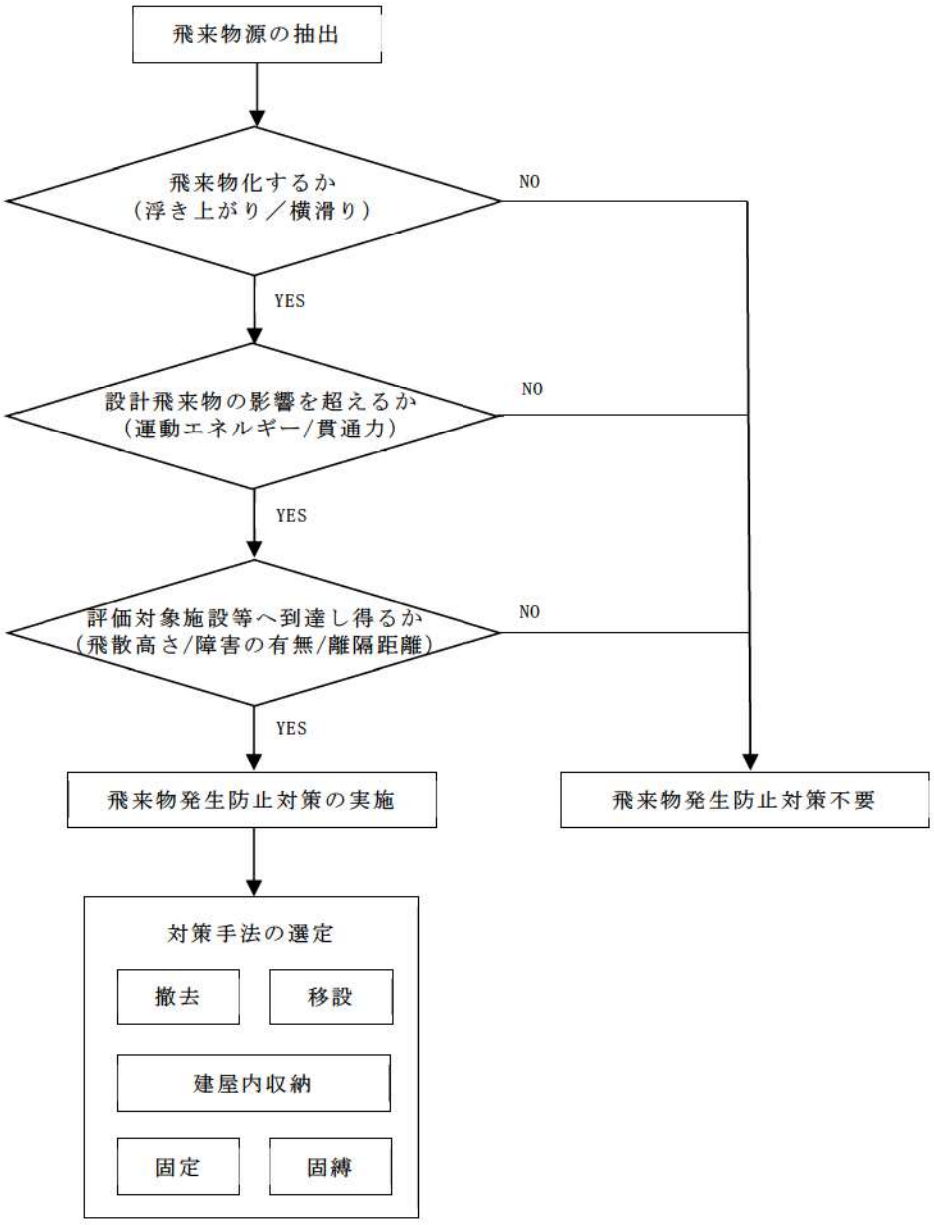


図７　飛来物発生防止対策実施フロー

3.1 竜巻の飛来物発生防止対策としての固縛の設計方針

竜巻の飛来物発生防止対策手法としては，撤去，移設，建屋内収納，固定，固縛が挙げられる。これらの対策の選定については，図８に示すフローにて判断を行うものとする。飛来物発生防止対策のうち，固縛を実施する代表的なものとして，可搬型重大事故等対処設備（発電機，車両）を例として示す。

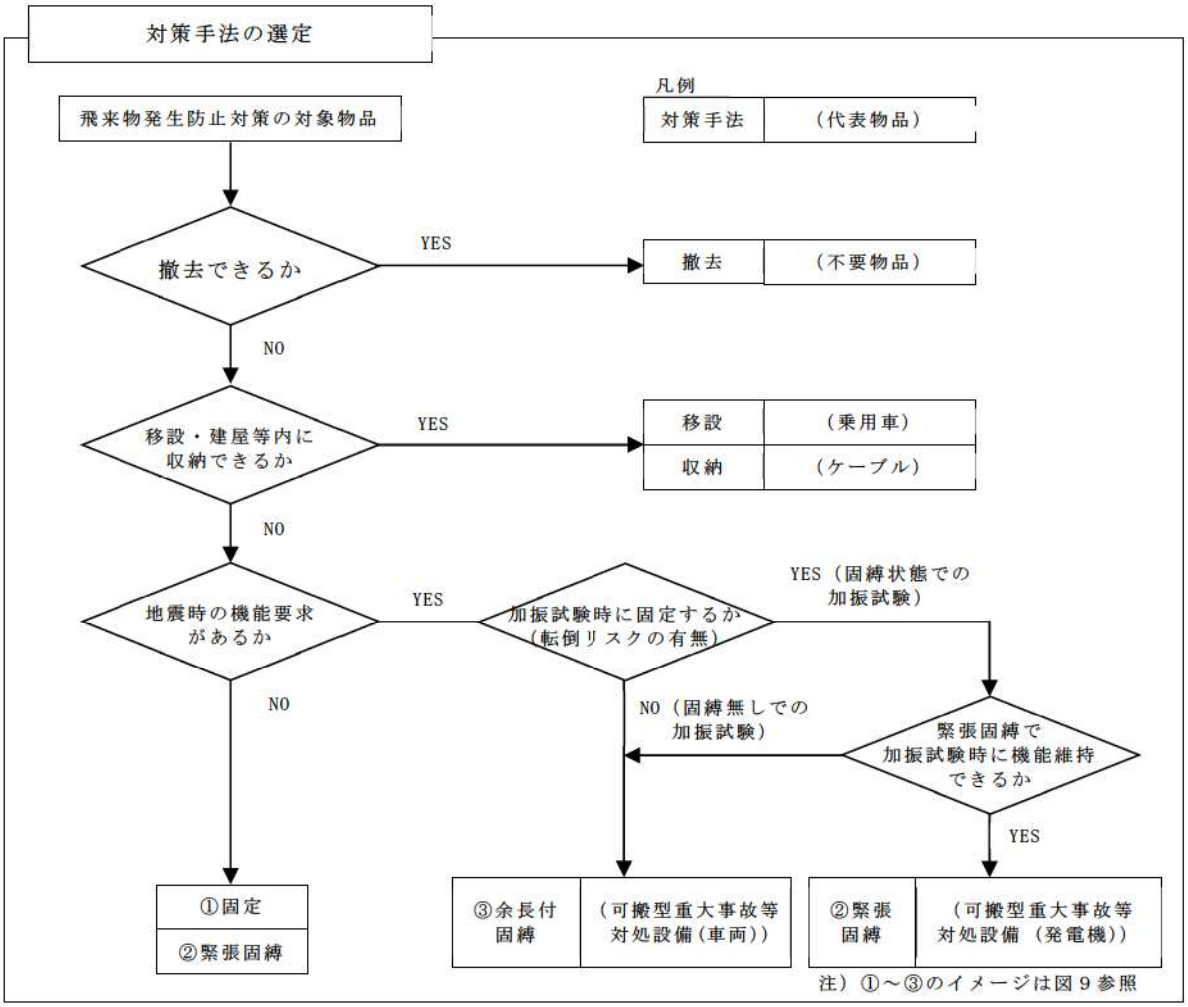


図８　飛来物発生防止対策選定フロー

＜設計方針＞

可搬型重大事故等対処設備は，安全施設に対する離隔の確保，固縛による飛散防止対策を施すことにより，安全施設の安全機能を損なわない設計としている。具体的な配慮としては以下のとおり。

①要求されるタイムラインに基づき，機動性を確保する必要があるため，固縛の解除時間を短くするために固縛装置の数や解除方法の配慮を行う。

（例えば，固縛装置の数を減少させることや，緊急時には固縛の連結材を切断して速やかに解除できるように，一般工具（カッター等）で切断できるような部材（高強度繊維ロープ等）の採用）

②車両の固縛は耐震設計に影響を与えることがないように，地震時の車両の移動変移を考慮し，余長付固縛を採用する。

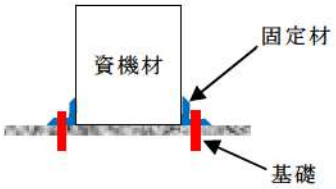
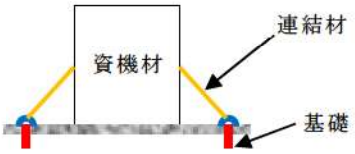
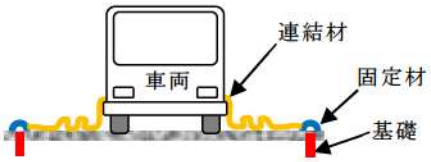
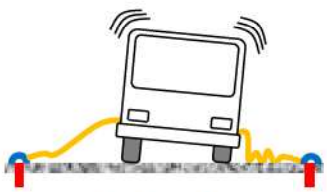
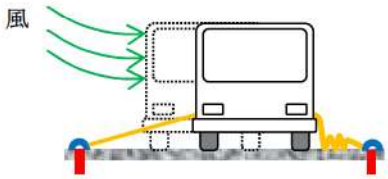
3.2 固縛設計の概要

固定装置や固縛装置は，以下の構成要素を組み合わせて設計する。

① 連結材（高強度繊維ロープ，シャックル等）

② 固定材（固定ピース，固定金具等）

③ 基礎（アンカーボルト等）

<table>
<tr><th>手法</th><th>対策の概要図</th></tr>
<tr><td>①固定</td><td>飛来物源に固定金具を取り付けて固定
 
</td></tr>
<tr><td>②緊張固縛</td><td>飛来物源を連結材（高強度繊維ロープ等）を用いて固縛
 
</td></tr>
<tr><td rowspan="2">③余長付固縛</td><td>【通常時】
飛来物源を連結材（高強度繊維ロープ等）を用いて固縛（動き代がある）
 
</td></tr>
<tr><td>【地震時（イメージ）】
 
飛来物源が地震の揺れを受け，連結材の余長範囲内で動く（揺れる）
【竜巻時（イメージ）】
 

飛来物源が竜巻の風を受け，連結材の余長範囲内で動く</td></tr>
</table>

図９　飛来物発生防止対策（固定及び固縛）の例

3.3 荷重設定

固縛対象の物品には，風圧力により浮き上がり荷重と横滑り荷重が発生する。これらの設計荷重は，荷重の方向や設置状況を踏まえて，適切に考慮して設定する。

3.4 設計上の裕度

各部材ごとに設定する許容限界に対して裕度（約２倍）を確保することとし，安全性を確保する設計とする。

3.5 固縛状況（例）

固定装置や固縛装置については，現在設計中であるが，固縛装置のイメージを以下に示す。

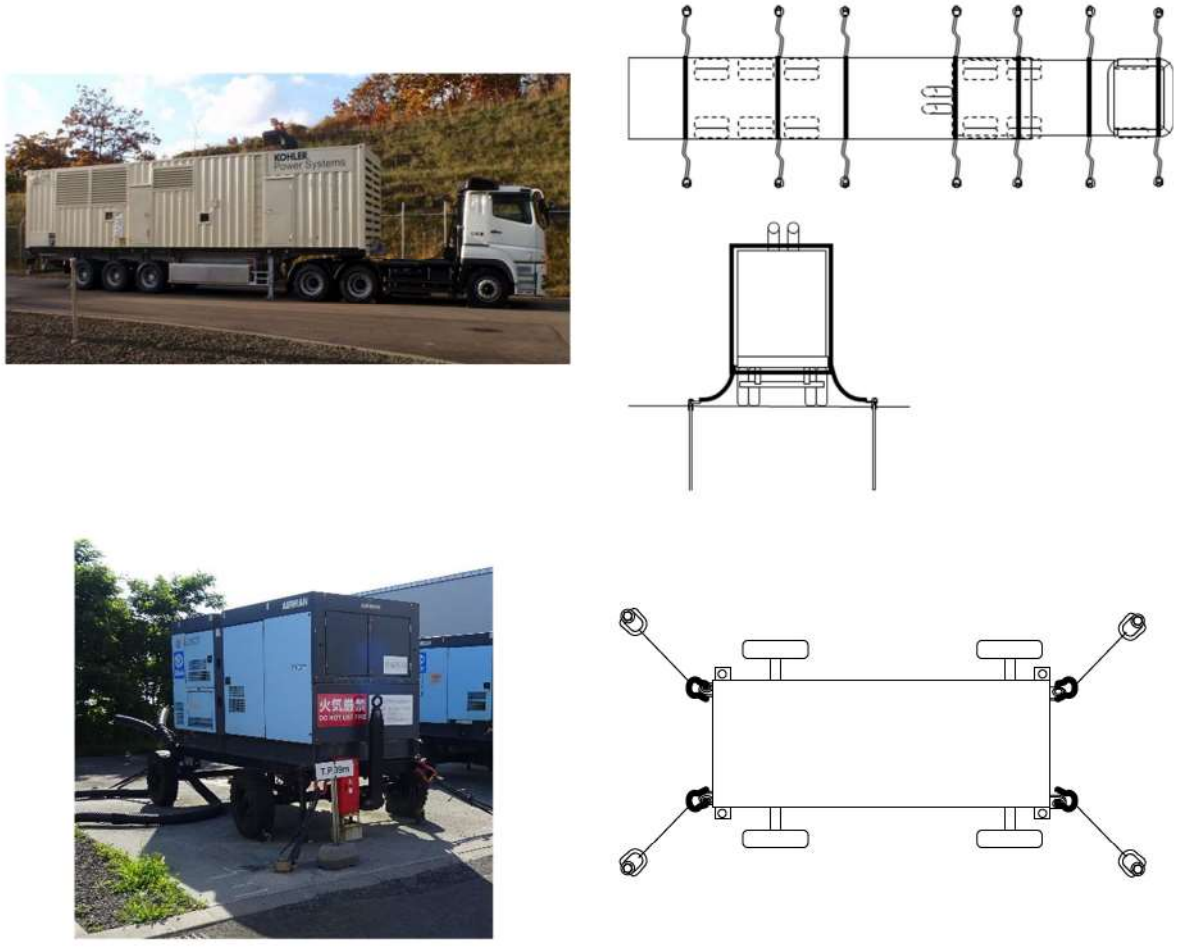


図 10　固縛装置のイメージ

車両の退避手順について（暫定案）

停車車両については，竜巻の襲来が予想される場合に速やかに退避することとしており，竜巻防護施設の安全機能維持に影響を与えないためには，竜巻襲来の恐れを早期に検知し，事前に準備を行うことが重要である。

強い竜巻は，メソサイクロン（小規模な低気圧性の循環構造）を伴う発達した積乱雲の下で発生するため，積乱雲の移動に伴って竜巻が発生しやすい状況も移動すると考えられる。そのため，レーダーナウキャストにより積乱雲の移動方向を確認することで，竜巻が発生しやすい状況の移動方向が予測できると考えられることから，レーダーナウキャストによる「竜巻発生確度」及び「雷活動度」の実況値及び予測値を指標として用いる。

気象庁による監視体制も強化※され，さらに研究も進んでいることから，今後更なる予測精度の向上が見込まれる。後述の判断基準等については，今後もデータ・知見等の収集に努め，より信頼度の高い判断基準となるよう検討を継続し，改善を図っていくものとする。

※：2013 年 3 月に気象レーダーのドップラーレーダー化が完了

（１）竜巻監視対応（STEP1）

発電課長（当直）は，以下の条件のうち，いずれかに該当した場合は，運営課長（夜間・休日は当番者）に連絡するとともに，竜巻襲来の恐れを検知するため，適宜レーダーナウキャストの監視（60 分後までの予測値含む）を行う。また，竜巻が発生する可能性があることを所内一斉放送により，発電所員，協力会社員へ周知する。

＜監視開始条件＞

・ 後志西部地方のうち岩内町，共和町，泊村，神恵内村の４町村のうち，いずれかに「雷注意報（竜巻）」又は「雷注意報（ひょう）」が発表された場合

・ 「竜巻注意情報（石狩・空知・後志地方）」が発表された場合

＜監視範囲＞

監視範囲は図１のとおり，泊発電所を含むメッシュを中心とした１辺 90km の正方形の範囲とする。

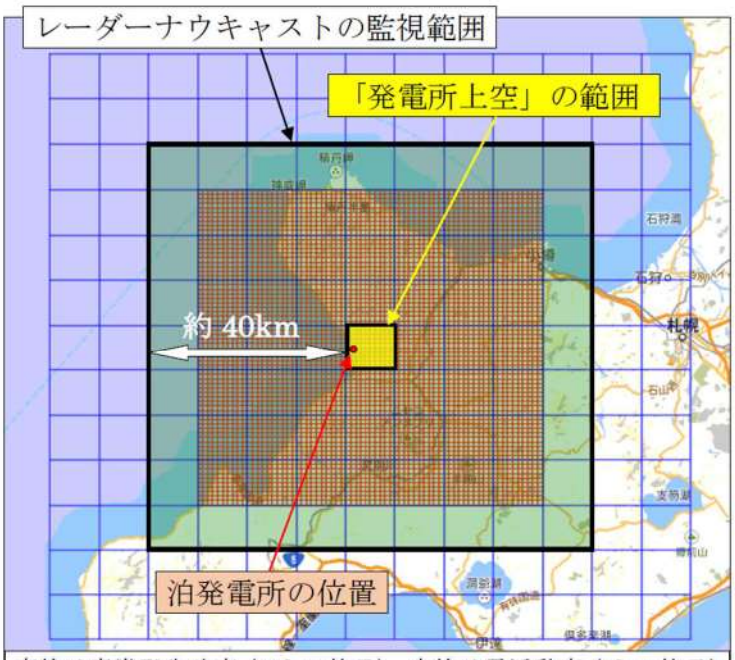


図１　レーダーナウキャスト監視範囲

（２）竜巻退避準備対応（STEP2）

発電課長（当直）は，STEP1 で監視を開始したレーダーナウキャストにおいて，以下の条件のうち，いずれかに該当した場合は，運営課長（夜間・休日は当番者）に連絡するとともに，竜巻の襲来が予想されるため，竜巻退避準備対応を開始することを館内放送等により，発電所員，協力会社員へ周知する。

＜準備開始条件＞

・ レーダーナウキャストにより，発電所上空に「竜巻発生確度２」が発生したことを確認した場合，又は予測値からその恐れがある場合

・ レーダーナウキャストにより，発電所上空に「雷活動度２以上」が発生したことを確認した場合，又は予測値からその恐れがある場合

運営課長（夜間・休日は当番者）は，各課（室・センター）長へ，竜巻退避準備対応として，作業中（固縛を解放している）資機材の固縛等を実施するよう指示する。

各課（室・センター）長は，各対応の完了について，運営課長（夜間・休日は当番者）に報告する。

（３）竜巻退避対応（STEP3）

発電課長（当直）は，以下の条件に該当した場合は，運営課長（夜間・休日は当

番者）に連絡するとともに，竜巻の襲来が予想されるため，竜巻退避対応を開始することを館内放送等により，発電所員，協力会社員へ周知する。また，運営課長（夜間・休日は当番者）は，発電所長に報告するとともに，自然災害等対策本部を設置する。

＜避難開始条件＞

・ レーダーナウキャストにより，発電所上空に「竜巻発生確度２」かつ「雷活動度３以上」が発生したことを確認した場合，又は予測値からその恐れがある場合

運営課長（夜間・休日は当番者）は，各課（室・センター）長へ，竜巻退避対応として，停車車両の発電所構外への退避，屋外作業の中止，作業者の屋内退避等を実施するよう指示する。

各課（室・センター）長は，各対応の完了について，自然災害等対策本部に報告する。（自然災害対策本部は，設備被害を受け復旧長期化等が発生した場合，原子力災害対策本部となる。）

（４）竜巻対応終了

運営課長は，以下の条件に該当した場合は，竜巻監視対応，竜巻退避準備対応および竜巻退避対応の終了を関係箇所へ連絡する。

＜終了条件＞

・ 各 STEP 毎に定める開始条件を満たさなくなった場合

物品等飛散防止対策・車両退避フローを図２に示す。

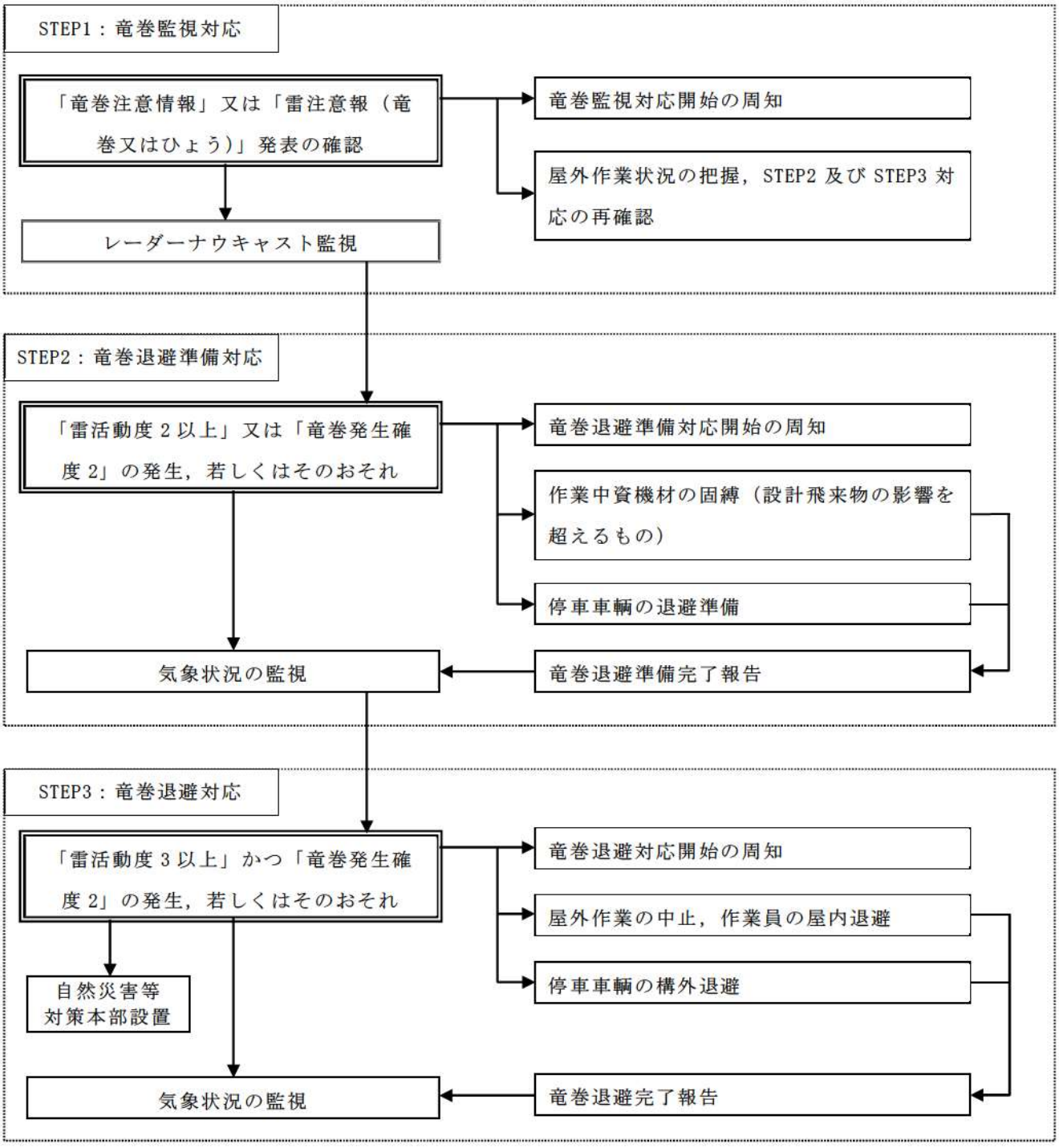


図 2　物品等飛散防止対策・車両退避フロー

別紙２

竜巻に関する気象情報についての考察

（１）竜巻対応準備開始判断基準の捕捉性

日本版改良藤田スケール（JEFスケール）１以上の竜巻に対し，判断基準である「竜巻注意情報」又は「雷注意報（竜巻又はひょう）」が竜巻を捕捉した確率を調査（気象庁ＨＰ「竜巻注意情報の発表状況」より，２０１６～２０２１年の６年間のデータにて調査）

表１　竜巻発生と注意情報等発令時間

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	6年間合計
発令なし・遅れ	1	0	1	1	0	0	3
30分以内	1	0	0	3	1	0	5
1時間以内	1	0	1	1	1	2	6
1時間超	11	11	10	4	6	5	47
合計	14	11	12	9	8	7	61

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	6年間合計
全捕捉率	92.9%	100%	91.7%	88.9%	100%	100%	95.1%
猶予30分超えでの捕捉率	85.7%	0	91.7%	55.6%	87.5%	100%	86.9%
猶予60分超えでの捕捉率	78.6%	100%	83.3%	44.4%	75%	71.4%	77.0%

・捕捉率９５．１％（６１回の竜巻発生回数に対し，捕捉出来なかったのは３回のみ）で，ほぼ１００％であり，「竜巻注意情報」又は「雷注意報（竜巻又はひょう）」発令による監視強化開始は妥当であると考える。

（２）竜巻対応準備，避難開始判断の妥当性

ａ．判断基準：

竜巻退避準備対応　：レーダーナウキャスト「竜巻発生確度２」又は「雷活動度２以上」

竜巻退避対応　：レーダーナウキャスト「竜巻発生確度２」及び「雷活動度３以

上」

上記の状況が発電所上空に発生，又は，発生の恐れがある場合

（監視範囲は泊発電所を含むメッシュを中心とした１辺９０ｋｍの正方形の範囲）

ｂ．レーダーナウキャストについて

①竜巻発生確度について※1

○「発生確度１」は，下記の条件１，２のＯＲ条件によって判定される。

条件１：周辺１００ｋｍ範囲において，

・気象ドップラーレーダーにより，メソサイクロンを検出した場合

・数値シミュレーションと気象レーダー観測値から得られる「突風危険指数」の基準値を超えた場合

・上記のＯＲ条件

条件２：気象レーダー観測による降水強度２０ｍｍ／ｈ

○「発生確度２」は，下記の条件１，２のＡＮＤ条件によって判定される。

条件１：周辺４０ｋｍ範囲において，

・気象ドップラーレーダーにより，メソサイクロンを検出した場合

・数値シミュレーションと気象レーダー観測値から得られる「突風危険指数」の基準値を超えた場合

・上記のＡＮＤ条件

条件２：気象レーダー観測による降水強度２０ｍｍ／ｈ

○竜巻発生確度は１０ｋｍメッシュで１０分ごとに６０分先まで予測される。

②雷活動度について※2

・「放電の検知から発雷密度を解析」，「レーダー３次元データから落雷を解析」，「レーダー観測から雨雲を解析」から解析される。

・雷活動度は１ｋｍメッシュで１０分ごとに６０分先まで予測される。

ｃ．判断基準の妥当性について

①「竜巻発生確度２」と「雷活動度２」との重ね合わせについて

・強い竜巻は，スーパーセルと呼ばれる発達した積乱雲の下で発生する※1。

竜巻発生確度２では，メソサイクロン（スーパーセル中にある水平規模数ｋｍの小さな低気圧）の検出が条件となっている。

これはメソサイクロン付近で竜巻などの激しい突風の可能性があると判断される※1ためである。

更に降水強度を低めに見積もることによって，発達中の積乱雲から発生する突風を

見逃さないようにしている。

・積乱雲は３０分から６０分のライフサイクル（成長期，成熟期，衰退期による３段階）で形成，消滅する※1。このライフサイクル中，竜巻及び雷が発生するのは積乱雲が最も発達した成熟期であり，この成熟期の初期段階，又は，発達した成熟期の積乱雲の接近を把握する方法として，雷活動度を利用する。レーダーナウキャストの雷活動度２は，上空の放電状態や，近接する雷雲の周辺，気象レーダーによる雷雲の立体的特徴などから，落雷が間近に迫っている雷雲の状態を表している。

つまり，発達しつつある積乱雲や，発達した積乱雲の周辺を表しており，竜巻が発生する可能性が高い発達した積乱雲の発生，又は接近を予告する指標として活用できると考える。

また，ナウキャストにおいては，予測だけでなく，直近の観測データの変化傾向を把握することができるため，経時変化を見ることが可能である。つまり，監視強化後にナウキャストを確認することにより，発電所周辺の積乱雲の状況を確認することが可能である

・以上より，「竜巻発生確度２」と「雷活動度２以上」を竜巻発生の指標とすることは，妥当であると判断した。

②「竜巻発生確度２」と「雷活動度３以上」との組み合わせについて

・雷は積乱雲内の上昇気流によって発生する※3。つまり，落雷が発生している場所（雷活動度３以上の地域）は，強い上昇気流場であると言える。

・レーダーナウキャストの雷活動度の解析には，雷放電時に発生する電磁波を全国３０ヶ所の検知局にある計測装置により，雷の位置，電界強度を計測した結果を用いている。実況値において雷活動度３以上の場所は，その時間において，既に対地放電が起きている強い放電密度を持った場所を表しており，強い雷雲の位置を示していることになる。

・雷活動度の予測には，盛衰傾向による補正が加えられており，現時点では成長期や成熟期初期にある積乱雲に対して継続時間を考慮した予測がなされている。すなわち，単純な積乱雲の移動による雷の発生の予測ではなく，積乱雲の発達も考慮に加えられている※1。

・前述の通り，竜巻発生確度２はメソサイクロンの検出が条件であり，強い竜巻の発生する可能性が高いことを示唆している。

・メソサイクロンと雷活動度による積乱雲中の上昇気流場の検知を組み合わせることにより，強い竜巻の発生する可能性が高い条件の場所を推定する。

・以上より，「竜巻発生確度２」と「雷活動度３以上」を強い竜巻の発生の指標とすることは，妥当であると判断した。

なお，判断基準とする情報については，今後もデータ・知見等の収集に努め，より信頼度の高い判断基準となるよう検討を継続し，改善を図っていくものとする。

③監視範囲について

・泊発電所のレーダーナウキャストの監視範囲は図１に示すとおり，泊発電所を含むメッシュを中心とした１辺９０ｋｍの正方形とする。
・泊発電所からメッシュ境界線までの最短距離は西方約４０ｋｍであり，十分な監視範囲を確保。
・積乱雲の移動速度データ（１７ｋｍ／１０分※４）より，２３分程度の裕度を確保。
・前述①の通り，積乱雲の成長期は１０分から３０分程度※３であり，竜巻が発生する積乱雲の成熟期になるまでに最短で１０分程度と想定※５

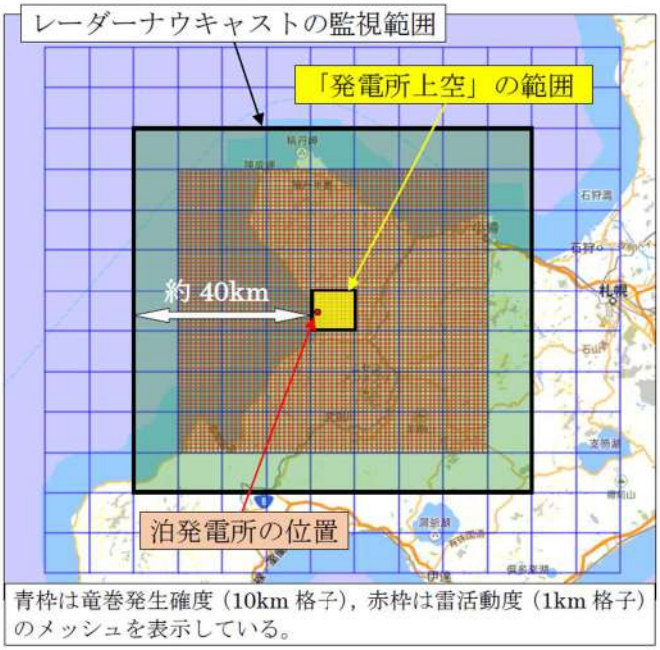


図１　レーダーナウキャスト監視範囲

・安全側に上記の移動速度２３分と成熟期になる最短時間１０分を組み合わせた３３分を最短接近時間と考えた場合でも，レーダーナウキャストによる予測は６０分後まで行っており，急速に発達・接近してくる積乱雲に対しても，本監視範囲で十分な監視が可能であると考えられる。
・また，泊発電所周辺における竜巻の移動方向は西から東が卓越しており，西側に約４０ｋｍの監視範囲を持つ本監視範囲は十分であると考える。
・判断基準については，発電所上空に達した場合に加え，実況値及び予測値による雷雲等の移動方向から，発電所上空に達する恐れがある場合とする。

（３）竜巻襲来までの時間余裕

竜巻襲来までの時間について最も保守的な条件は，発電所上空に「竜巻発生確度２」かつ「雷活動度３以上」が発生した場合（ＳＴＥＰ３：竜巻退避対応開始）である。

この場合における時間余裕は

・レーダーナウキャストが６０分後の予測をしていること

・レーダーナウキャストは１０分毎に更新すること

から，以下の通りとなる。

レーダーナウキャストの予測時間－レーダーナウキャストの更新時間

＝６０分－１０分＝５０分

※１：雷ナウキャストにおける雷の解析・予測技術と利用方法（測候時報78.3 2011）

※２：気象庁ＨＰ：竜巻などの激しい突風に関する気象情報の利活用について（平成22 年3 月）

※３：大野久雄：雷雨とメソ気象（２００１，東京堂出版）

※４:加藤亘、保野聡裕:気象レーダの列車運転規制への活用に関する研究(2009 年 JR WEST Technical Review No26)

※５：実際には竜巻を伴うような大型の積乱雲に発達する時間は３０分程度と見込まれるが、保守的に文献記載の最小値を採用した

別紙３

主な想定飛来物の飛来物発生防止対策例について

泊発電所構内には，屋外に保管されている各種資機材，車両等，飛来物になりうる物品（以下「想定飛来物」という。）が存在している。

主な想定飛来物の飛来物発生防止対策例を表１に示す。

表１　主な想定飛来物の飛来物発生防止対策例

想定飛来物	対策方法
プレハブ小屋	・ 十分な重さのウエイトを取付ける。 ・ ウエイトの重量については，プレハブ小屋の自重＋ウエイトの重量により空力パラメータが0.0026以下となる重量とする。 対策例
鋼管	・ 単品で置かず複数本を束にして固縛する。 ・ 束にする本数については，空力パラメータが0.0026以下となる本数とする。 対策例
鋼材	・ 単品で置かず複数本を重ねて固縛する，または十分な重さのウエイトを取付ける。 ・ 重ねる本数については，空力パラメータが 0.0026 以下となる本数とする。 ・ ウエイトの重量については，鋼製材の自重＋ウエイトの重量により空力パラメータが0.0026以下となる重量とする。
鋼板	・ 単品で置かず複数枚を重ねて固縛する。 ・ 重ねる枚数については，空力パラメータが 0.0026 以下となる枚数とする。

想定飛来物	対策方法
マンホール蓋	・ 容易に飛散しないよう高さ方向への飛散防止対策を行う（マンホール蓋上面からの固定，マンホール蓋へのチェーン接続など）。 対策例
車両（重大事故等対処設備含む）	車両管理エリア（評価対象施設等から 350m の範囲）内について下記の対策を実施する。 ＜飛散する車両＞ ・ アンカーにより地面へ固縛する，または十分な重さのウエイトを取付ける。 ・ ウエイトの重量については，車両の自重＋ウエイトの重量により空力パラメータが 0.0026 以下となる重量とする。 対策例 ・ 停車車両については，竜巻襲来が予想される場合に速やかに車両退避エリア（評価対象施設等から 350m の範囲外）に退避できる体制を取る旨マニュアルに反映することとしており固縛不要とする。 ・ 業務車両以外の車両については，構内への入構を禁止する。 ＜飛散はしないが横滑りする車両＞ ・ アンカーにより地面へ固縛する。

別添１

飛散防止対策における対策耐力の考え方

１．浮上りに対する評価方法

空力パラメータを用いて浮き上がるときに受ける全体浮力を算出し，自重より大きい場合「浮き上がり発生」と判断する。このときの正味の上向きの力（＝（空力パラメータから算出される全体浮力）－（自重））」を「浮き上がり力」とし，基本設計用荷重として算出し，飛散防止対策の検討を行う。

想定飛来物の空力パラメータ値が 0.0026 となる時の質量を $m\sim$ とすると，浮き上がり力 Q_V は以下の（１）式のとおり算出される。なお，空力パラメータの算出については，添付資料 3.8 のとおり。

$$Q_V = (m\sim - m) \times g[N] \cdots (1)$$

ここで，

$m\sim$：想定飛来物の空力パラメータが 0.0026 となる時の質量[kg]

m：想定飛来物の自重[kg]

g：重力加速度（＝9.80665m/s^2）

２．横滑りを考慮する物品に対する評価方法

横滑りを考慮する物品については，浮上り及び横滑りに対する検討を行う。

建築物荷重指針・同解説等に準拠して求められる「水平方向の風荷重」にて横滑りを評価するものとし，浮き上がらない場合でも摩擦抵抗は考慮しない。

「水平方向の風荷重」と「浮き上がり力」のうちいずれか大きい値を基本設計用荷重として算出し，飛散防止対策の検討を行う。以下の図１に概念図を示す。

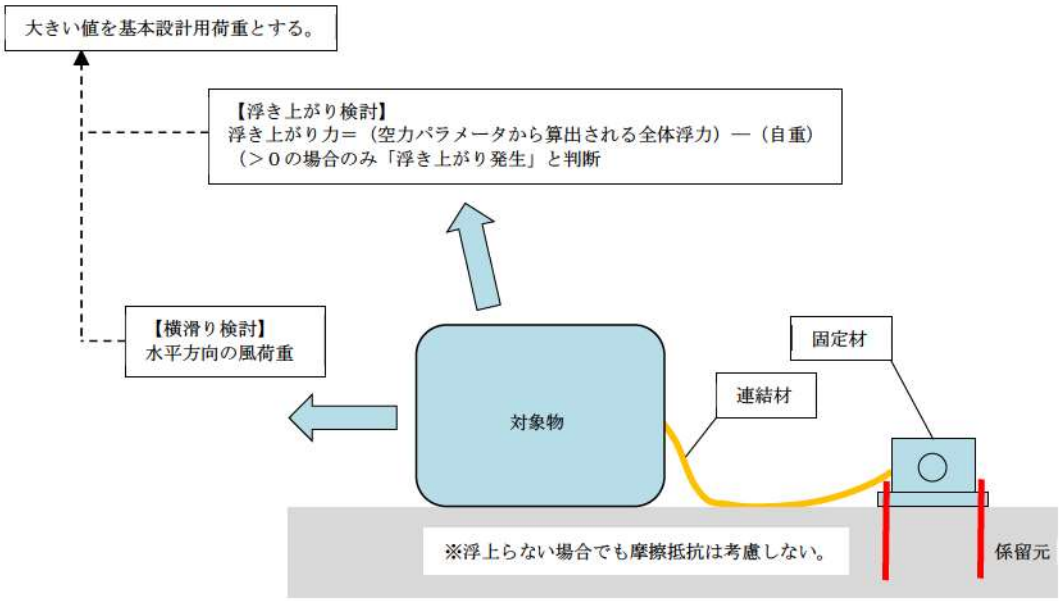


図１　横滑りを考慮する物品に対する基本設計用荷重の考え方の概念図

①浮き上がり力の算出

（１）式のとおり。

②水平方向の風荷重 W_D の算出

建築物荷重指針・同解説に準拠し，以下の（２）のとおりとする。なお，風力係数の設定は，建築基準法施行令に準拠する。

$$W_D = q_H \times C_D \times G_D \times A[N] \cdots (2)$$

ここで，

q_H：速度圧（＝ $\rho \times V^2/2$，ρ ：（＝空気密度）1.22 kg/m^3））

C_D：風力係数

G_D：風方向ガスト影響係数（＝1.00）

A：受風面積（機器・物品を直方体とした場合は，側面の最大値）［m^2］

３．各部材の評価方法

連結材（ワイヤー類）を経由して作用する基礎（アンカーボルト等）への荷重は，図２のとおり，引き抜き方向とせん断方向にそれぞれ基本設計用荷重が作用するものする。なお，部材の設計で用いる許容荷重は，許容値としてメーカが提示する値又は破断（終局）強度や基準強度に対して適切に安全率を配慮した値とする。

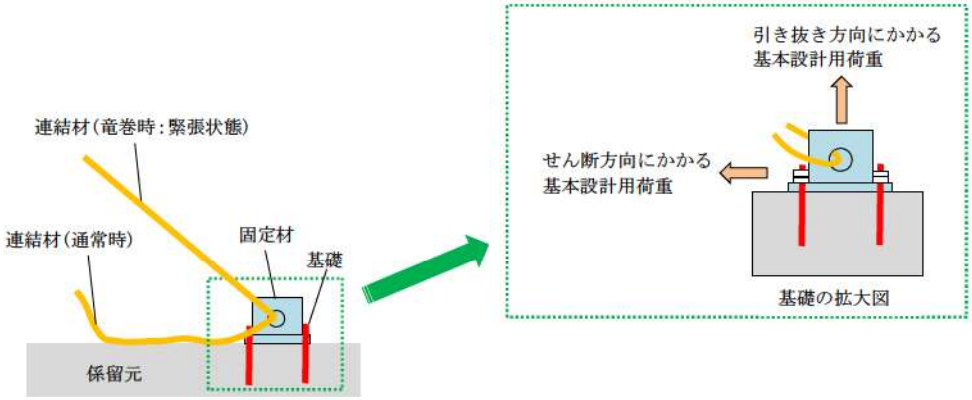


図２　アンカーボルト等に関する検討荷重（概念図）

設計竜巻荷重と積雪荷重との組み合わせについて

設置許可基準規則第６条のうち「外部事象の考慮」において，竜巻と積雪は荷重により安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象として抽出しており，組合せの要否の検討を実施している。

また，積雪事象は気象情報によって予測可能であることも踏まえて，積雪が確認された場合には除雪等に必要な資機材を確保するとともに手順等を整備することによって，雪を長期間堆積状態にしない方針としている。

一方，「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」では設計竜巻荷重と組み合わせる荷重として，竜巻以外の自然現象による荷重を挙げており，竜巻との同時発生が想定され得る雪等の発生頻度を参照し，設計対象施設に常時作用する荷重，運転時荷重等と組み合わせることの適切性や設定する荷重の大きさ等を判断するとしている。

これらの方針を踏まえて，設計竜巻荷重と積雪荷重の組合せの考え方について以下のとおり整理する。

１．設計竜巻荷重と設計積雪荷重の組合せの考え方

竜巻及び積雪による堆積荷重は，同時に発生する場合を考慮し，設計上考慮すべき荷重評価における自然現象の組合せとして，竜巻による荷重及び積雪による荷重の組合せを設定している。荷重の組合せは，主たる作用（主事象）の最大値と，従たる作用（副事象）の任意時点の値（平均値）の和として作用の組合せを考慮する Turkstra の法則[※1]の考え方に基づき設定している。この考え方は，日本建築学会「建築物荷重指針・同解説」や建築基準法，土木学会「性能設計における土木構造物に対する作用の指針」，国土交通省「土木・建築にかかる設計の基本」，EN1990（ユーロコード），ASCE 7-02（米国土木学会），ANSI（米国国家規格協会），ISO 等でも採用されている。

竜巻は発生頻度が低い偶発荷重であるが，発生すると荷重が大きく，安全機能への影響が大きいと考えられることから，設計上の主荷重として扱う。一方，積雪は発生頻度が主荷重と比べて相対的に高いが，荷重は主荷重に比べて小さく，安全機能への影響も主荷重に比べて小さいため，従荷重として扱う。

竜巻と積雪の発生頻度，影響の程度を表１に示す。また，主荷重と従荷重の組合せを表２に示す。（表１，表２は「別添資料１　外部事象の考慮について」より抜粋）

表１　竜巻及び積雪荷重の性質

荷重の種類		荷重の大きさ	最大荷重の継続時間	発生頻度（/年）
主荷重	竜巻	大	短（数十秒）	2.5×10^{-7}
従荷重	積雪	中	長（約２週間）*1	1.0×10^{-2} *2

＊1　積雪は冬季の限定した期間のみ発生する。除雪を行うことで，継続期間は短縮することが可能

＊2　垂直積雪量が冬季の最大積雪の 100 年再現期待値に相当する値

表２　竜巻（主荷重）と積雪（従荷重）の組合せ

	竜巻（主荷重）	
積雪（従荷重）	建築基準法	記載なし
	継続時間	短（竜巻）×長（積雪）
	荷重の大きさ	大（竜巻）＋中（積雪）

上記のとおり，竜巻の作用時間は極めて短時間であること，積雪の荷重は冬季の限定された期間に発生し，積雪荷重の大きさや継続時間は除雪を行うことで低減できることから，発生頻度が極めて小さい設計竜巻の風荷重と積雪による荷重が同時に発生し，設備に影響を与えることは考えにくいため，組合せを考慮しない。また，雪が堆積した状態における竜巻の影響については，除雪により雪を長期間堆積状態にしない方針であることから，組合せを考慮しない。

２．竜巻との同時発生が想定される雪との組合せの考え方

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」で設計竜巻荷重に組み合わせる荷重として考慮することが要求される竜巻と同時発生が想定される雪は，冬期に竜巻が襲来する場合に考慮すべき事象である。

竜巻通過前後の気象条件において降雪を伴う可能性はあるが，上昇流の竜巻本体周辺では，竜巻通過時に雪は降らない。また，下降流の竜巻通過時は，竜巻通過前に積もった雪の大部分は竜巻の風により吹き飛ばされ，雪による荷重は十分小さく設計竜巻荷重に包絡される。よって，「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」で考慮することが要求される竜巻と同時発生が想定される雪は荷重として影響を及ぼさないことから，組合せを考慮しない。

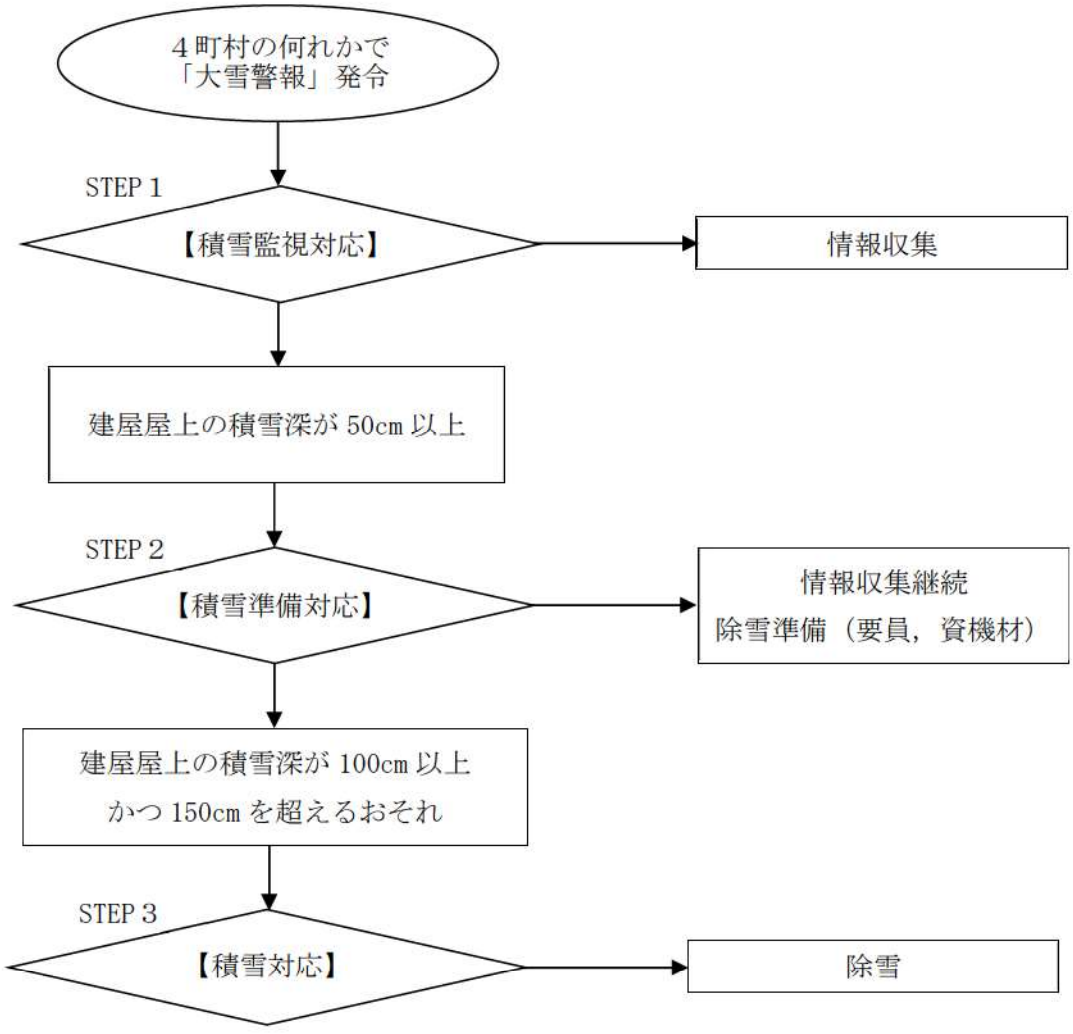
［参考文献］

※1：建築物荷重指針・同解説（2015）（2 章 荷重の種類と組合せ，付 5.5　許容応力度設計に用いる組合せ荷重のための荷重係数）

別紙１

原子炉建屋等の屋上の除雪運用について

外部事象防護対象施設を内包する建屋（原子炉建屋等）を含む建屋屋上の除雪については，発電所周辺４町村（岩内町，共和町，泊村，神恵内村）のうち，いずれかに「大雪警報」が発令された場合，建屋屋上の積雪深を監視し，100 ㎝以上かつ 150 ㎝を超えるおそれがある場合は，150 ㎝を超えないように除雪を実施することとしている。（図１参照）



※１　情報収集は，建屋屋上の積雪深測定，気象情報の監視を行う。
※２　継続監視，除雪実施の運用については，継続的に改善していく。

図１　原子炉建屋等の屋上除雪フロー

本運用において，建屋屋上の積雪深が 50 ㎝以上となった実績はないが，150 ㎝を超えな

いよう除雪を実施する運用としていることを踏まえ，評価対象の建屋については，設計竜巻荷重等に積雪量 150 cmの荷重を組合せた荷重に対して構造健全性が維持されること又は倒壊しないことを確認している。

２次飛来物の抽出について

２次飛来物の選定においては，以下の観点及び選定フローにより，抽出を行った。また，抽出された２次飛来物について設計飛来物に包含されるかどうか確認を行った。

① 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼす可能性がある建屋，構築物，設備の損壊等により主要部材（壁，屋根等）が２次飛来物となるか。

② 竜巻による過去の建築物の被害事例より竜巻による風荷重の影響を受けやすいと考えられる部位であるか。

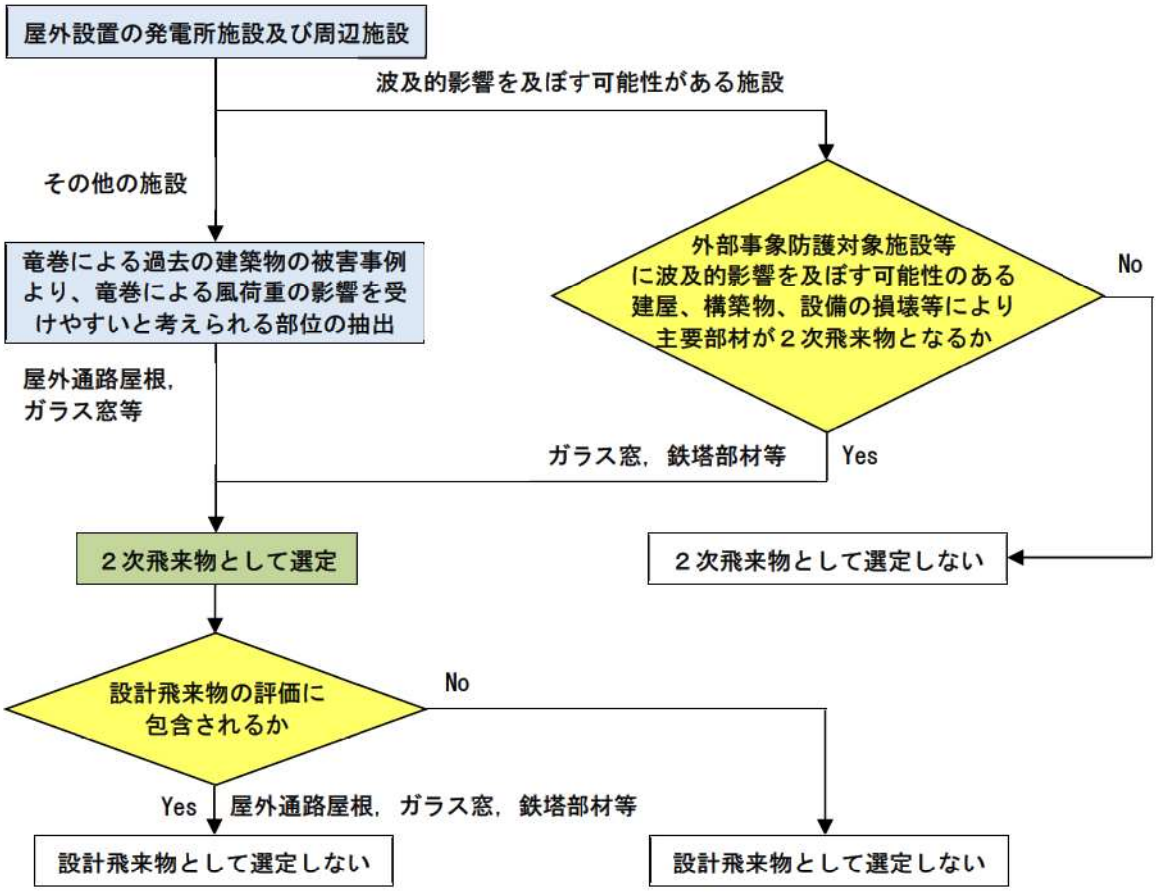


図１　２次飛来物選定フロー

以上より，まず，①外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼす可能性がある建屋，構築物，設備であり，損壊等により部材（壁，屋根等）が２次飛来物となる可能性が考えられるかについて，鉄骨造である循環水ポンプ建屋，タービン建屋，原子炉建屋（燃料取扱棟），送電鉄塔について確認を行った。その結果を以下の表１に示す。

また，②の竜巻による風荷重の影響を受けやすいと考えられる部位については，過去に発生した竜巻による建築物の被害状況等により，飛散をしていないシャッターを除き，屋外通路屋根，ガラス窓，給気用ガラリについて，２次飛来物となる可能性が否定できないが，これらについては，飛来物となったとしても設計飛来物である鋼製材に包含されること確認した。検討結果を別紙１に示す。

表１　２次飛来物評価結果

	施設の倒壊有無	部材の飛散有無	部材の設計飛来物への包含性
循環水ポンプ建屋	無※1	無※1	ガラス窓等の飛散可能性は否定できないものの，設計飛来物に包絡されることを確認した。
タービン建屋	無※1	無※1	
原子炉建屋（燃料取扱棟）	無※1	無※1	
送電鉄塔	強度検討の結果，鉄塔下部の部材（腹材）の余裕度が 1.00 を下回る結果となった。万一，鉄塔が損壊した場合においても，架渉線の径間長が長く高張力側である No.6 鉄塔方向に倒壊し，外部事象防護対象施設を内包する建屋側に倒壊するリスクは極めて低い。また，鉄塔の高さ（約 29m）に対して，鉄塔から外部事象防護対象施設を内包する建屋までの距離は約 400m 確保されているため，鉄塔が倒壊したとしても外部事象防護対象施設を内包する建屋に衝突することはない。さらに当該部材が破断したとしても，当該部材を主柱材に連結しているボルトの余裕度が 1.00 以上確保されており，少なくとも部材の片端は他の部材と連結されていると考えられるため，飛散することは考え難いことから，送電鉄塔への竜巻襲来時における影響はないことを確認した。※2	（余裕度が 1.00 を下回る部材は，設計飛来物に包含されることを確認した。）

※１：評価結果は設工認にて説明
※２：評価結果は別紙２に記載

以上より，屋外通路屋根，ガラス窓，給気用ガラリ，鉄塔部材については，２次飛来物となる可能性を否定できないが，これらについては，設計飛来物である鋼製材に包含できることを確認した。

主な竜巻による被害概要を調査した文献より，竜巻による被害を受けやすい建築物の部位として以下が挙げられる。

屋根材　　ガラス窓

図１　平成 24 年 5 月 6 日 茨城県つくば市で発生した F3 竜巻による建築物の被害状況※1

屋根材　　ガラス窓　　給気ガラリ

図２　泊発電所において竜巻による風荷重や飛来物の影響を受けやすいと考えられる部位

以上より，泊発電所においても竜巻により被害を受けた建築物の部位と同様な箇所については，２次飛来物として抽出し，設計飛来物に包含されることを確認した。以下の表１に比較結果を示す。

表１　２次飛来物の設計飛来物への包含性について

	仕様				運動エネルギー［kJ］	コンクリート(Fc24)の貫通限界厚さ［cm］
	長さ［m］	幅［m］	高さ［m］	質量［kg］		
鋼製材	4.2	0.3	0.2	135	220	28.6
屋根材※2	2.4	2.91	0.0008	20	84※3	27.1
ガラス窓	0.8	1.0	0.005	10	29	15.5
給気用ガラリ	1.0	2.0	0.12	20	64	13.6

※１：「平成 24 年(2012 年)5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した建築物等の竜巻被害調査報告」（ISSN1346-7328　国総研　第 703 号　ISSN0286-4630　建築研究資料　第 141 号　平成 25 年 1 月）

※２：被害状況から分解したと仮定

※３：柔構造であるため，衝突した際に伝わる運動エネルギーは，さらに低いと考えられる。

送電鉄塔への竜巻襲来時における影響について

１．検討対象

送電鉄塔への最大風速 100m/s の竜巻襲来時における 3 号機の外部事象防護対象施設を内包する建屋（原子炉建屋等）への影響を確認するため，当該建屋に最も近い鉄塔（66kV 泊支線 No. 7）の強度検討を実施した。

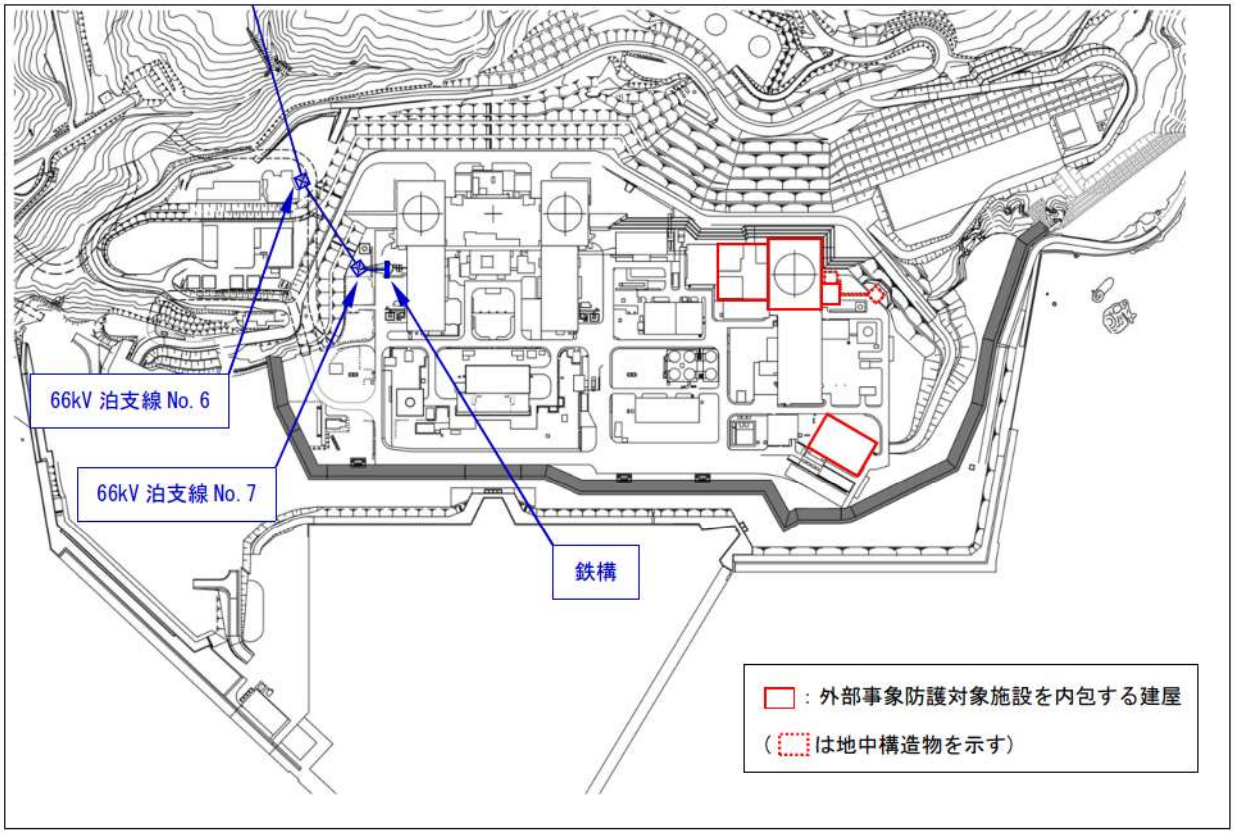


図 1 検討対象平面図

２．検討方法

送電鉄塔の設計は，経済産業省の「電気設備に関する技術基準を定める省令」に基づき，平均風速 40m/s（10 分間平均風速）に耐えうるよう設計している。

強度検討における竜巻の想定については，ランキン渦モデルにて風速を想定し，送電鉄塔位置が最大風速となる最大接線風速半径 30m の位置として，送電鉄塔及び架渉線（電力線及び架空地線）に作用する風荷重を以下のとおり設定した。

（１） 鉄塔に対して

送電鉄塔における風圧は一般に $P=1/2\rho V^2C$ の理論式によって求められ，風速の 2 乗に比例する。

よって，V=100m/s の場合における風圧荷重は表 1 の設計風圧値を用いて算出し，この竜巻を想定した設計風圧値については，表 2 の設計等価風圧値（風速 40m/s 時）に対する設計用速度圧の比である 6.25（$100^2/40^2$）を乗じて算出した。

表 1 最大風速 100m/s の竜巻を想定した設計風圧値

	鉄塔風圧値（Pa）
塔高 40m 以下 普通鉄塔	17,750

表 2 鉄塔における設計等価風圧値

	鉄塔風圧値（Pa）
塔高 40m 以下 普通鉄塔	2,840

（２）架渉線に対して

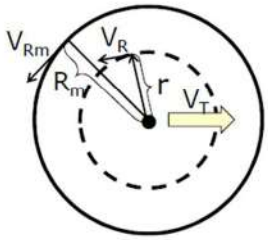
架渉線については，風速 40m/s 時の電線 1m 当りの電線風圧値（Hc）を設定し，この風圧値が作用した際に耐えられるよう送電鉄塔の設計を行っている。

最大風速 100m/s の竜巻襲来時に架渉線へ作用する風圧値を算定するにあたっては，40m/s 時の風圧値 Hc との比較による換算係数と架渉線の作用範囲について，次項に述べる計算方法に基づき算定した。

＜架渉線に作用する風荷重の算出方法＞

① 竜巻の中心距離からの風速分布

原子力発電所の竜巻影響評価ガイドに記載されている風速 100m/s の竜巻特性値より，風速分布を作成した。以下の図 2 ランキン渦モデルにおける風速分布の考え方に基づき，竜巻風速 100m/s 時の風速分布を図 3 のとおり作成した。



V_T：竜巻の移動速度
V_R：接線風速、r：竜巻渦中心からの半径
V_{Rm}：最大接線風速、R_m：最大接線風速が生じる位置での半径
$V_R = V_{Rm} \cdot (r/R_m)$ （$r \leqq R_m$の範囲）
$V_R = V_{Rm} \cdot (R_m/r)$ （$r \geqq R_m$の範囲）

最大竜巻風速	移動速度V_T	最大接線風速V_{Rm}	最大接線風速半径R_m
100m/s	15m/s	85m/s	30m

図 2 ランキン渦モデルによる風速分布の考え方

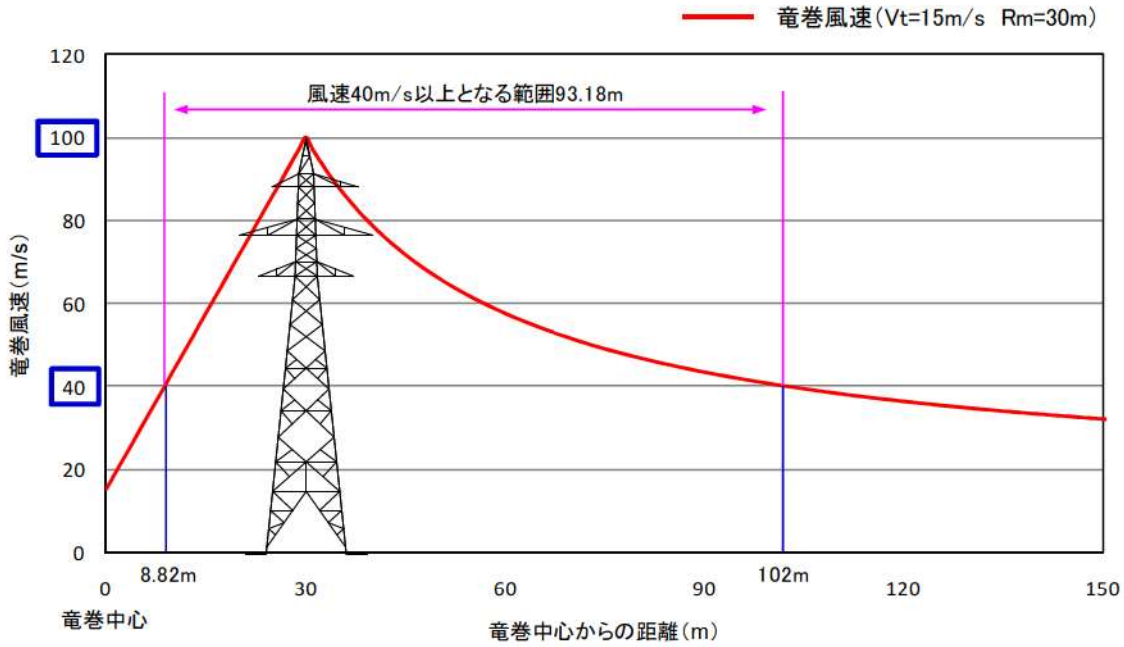


図 3 竜巻風速 100m/s 時の風速分布

② 竜巻影響範囲の決定

架渉線に作用する竜巻影響範囲は，風荷重が架渉線の設計風速である 40m/s に相当する風圧値を超える範囲とした。風圧値が 40m/s 以上となる範囲は，竜巻渦中心からの距離 8.82m から 102m までの 93.18m となる。

③ 架渉線における風圧値の比較

架渉線に作用する風圧荷重は以下の関係で表される。

Ｈｃ ＝ Ｐ×Ａ

Ｈｃ：架渉線風圧荷重（kN）

Ｐ　：架渉線風圧（Pa）

Ａ　：受風面積（㎡）

ここで，架渉線の太さは一様であるため，架渉線風圧荷重は風圧Ｐの架渉線長さ方向の積分値に比例することとなる。

図３から算出した竜巻影響範囲において，次式のとおり，竜巻風圧値と 40m/s 風圧値の積分による面積比較を行った結果，竜巻風圧値は 40m/s 風圧値の 2.5 倍と計算される。

$$\frac{\int_{8.82}^{30}\{V_{Rm}\cdot(r/R_m)+V_T\}^2\,dr+\int_{30}^{102}\{V_{Rm}\cdot(R_m/r)+V_T\}^2\,dr}{40^2\times(102-8.82)}\fallingdotseq 2.5$$

したがって，竜巻の影響を受ける範囲の架渉線には，風速 40m/s 時の架渉線 1m 当りの架渉線風圧を Hc とした場合，Hc×2.5 倍の風圧が作用するものとした。

④ 竜巻襲来時の架渉線に作用する風荷重

以上の①～③から，93.18m の範囲には風速 40m/s における風圧値の 2.5 倍が作用し，それ以外の範囲には，風速 40m/s の風圧値が作用することとなり，架渉線に作用する風荷重は図４のとおりとなる。

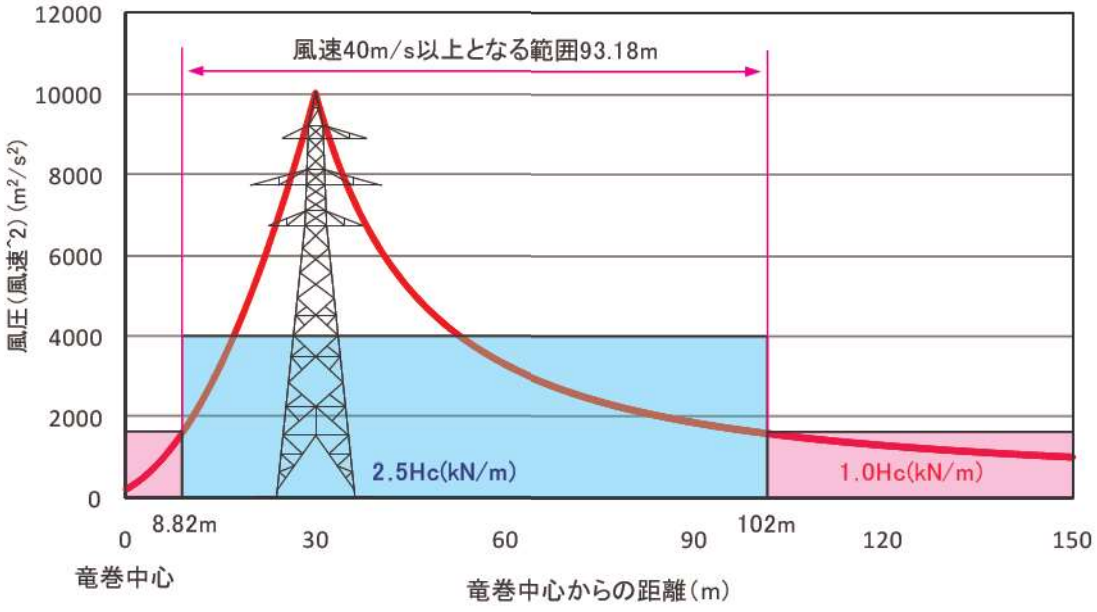


図４ 架渉線に作用する風荷重の算定結果

⑤ 泊支線 No.7 鉄塔の前後径間における架渉線風荷重分布

④にて算出した架渉線に作用する風荷重を泊支線 No.7 鉄塔の前後径間に適用した場合の風荷重分布を表すと図 5 のとおりとなる。

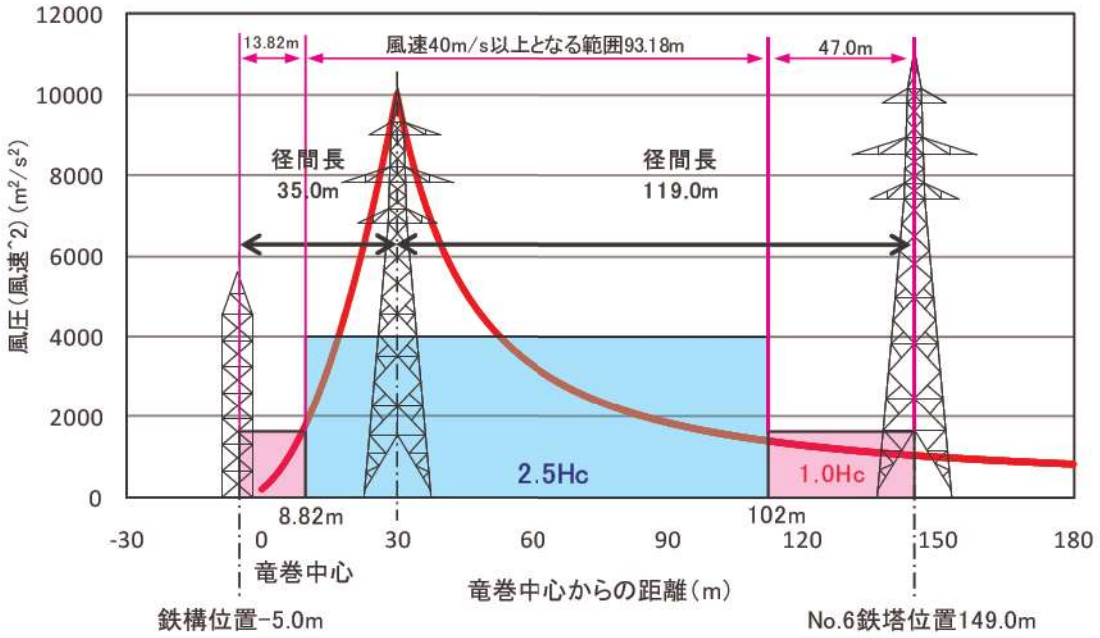


図 5 泊支線 No.7 鉄塔前後の架渉線に作用する風荷重

⑥ 本検討における架渉線風圧荷重分布について

鉄塔の強度計算を行うにあたり，66kV 泊支線 No.7 鉄塔が架渉線風圧荷重を分担する径間長は前後径間の 1/2 径間ずつであり，図 6 のとおり，竜巻影響範囲に包含される。

本検討においては，架渉線の径間長が短いことを勘案し，図 6 のとおり前後径間すべての架渉線風圧を 2.5 倍として検討した。

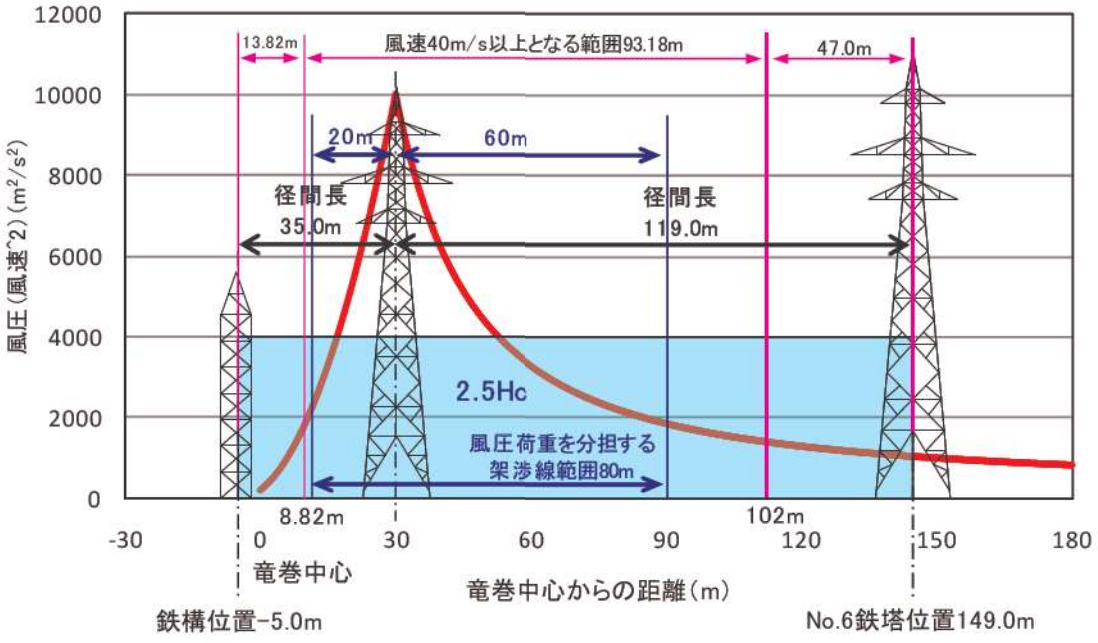


図 6 本検討における架渉線風荷重分布

３．使用材料および許容応力度

送電鉄塔の材質および強度区分別の許容応力度は，表３のとおりである。

なお，終局時の検討であることから，鋼材は平成 12 年建設省告示第 2464 号の第３に基づきＦ値を 1.1 倍した。

表３ 鋼材の許容応力度

種別	材質	板厚ｔ・径 (mm)	降伏点または耐力 σ_y (N/mm^2)	引張強さ σ_B (N/mm^2)
山形鋼	SS400	t≦16	245	400
		16＜t≦40	235	400
	SS540	t≦16	400(378)	540
		16＜t≦40	390(378)	540
ボルト	SS400	φ=16	420(364)	520
	SS540	φ=20	480(420)	600
		φ=22	720(630)	900

（ ）内は σ_B を示す。

４．強度検討結果

強度検討の結果，鉄塔下部の部材（腹材）の余裕度が 1.00 を下回る結果となった。

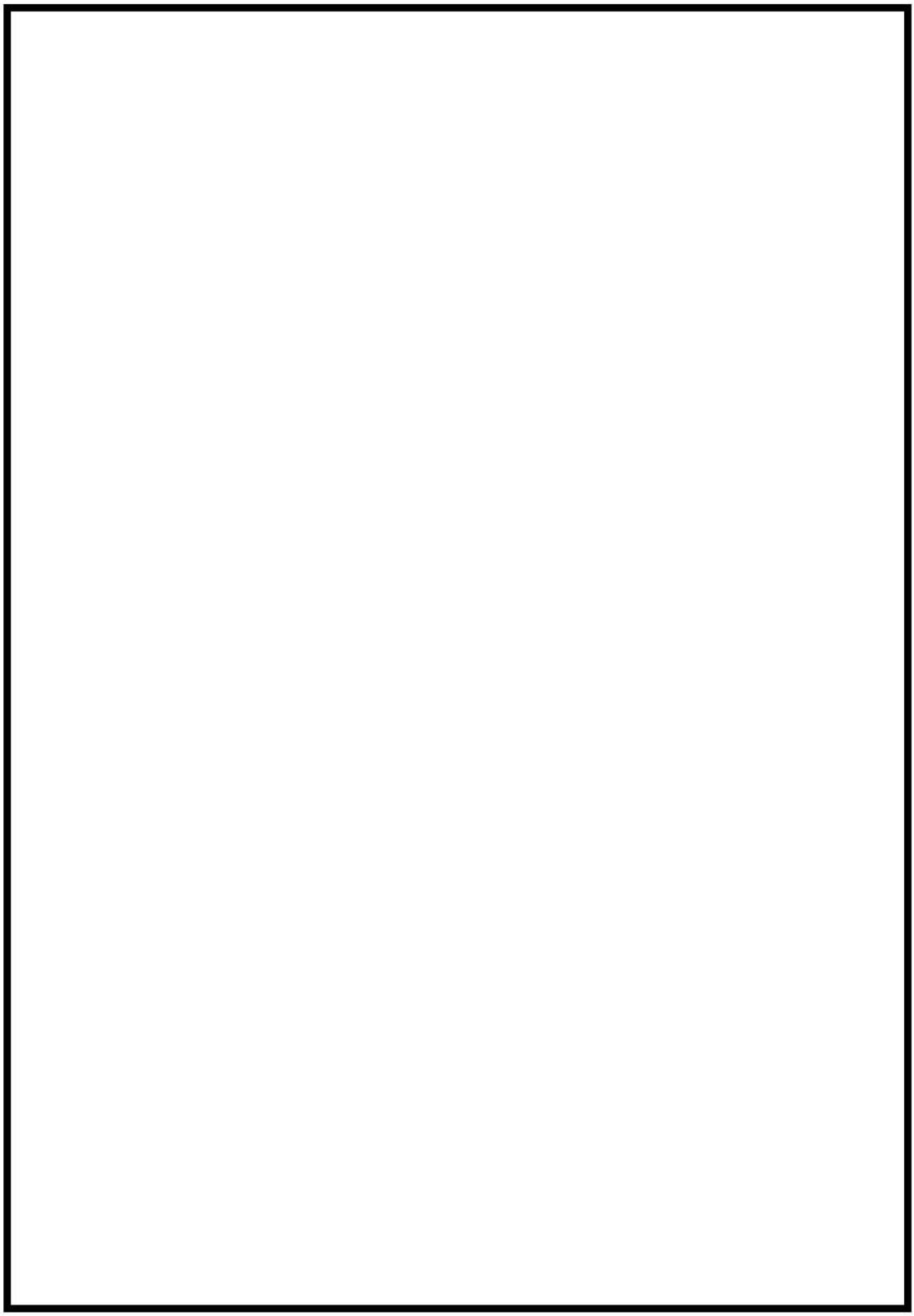
万一，鉄塔が損壊した場合においても，架渉線の径間長が長く高張力側である No.6 鉄塔方向に倒壊し，外部事象防護対象施設を内包する建屋側に倒壊するリスクは極めて低い。また，鉄塔の高さ（約 29m）に対して，鉄塔から外部事象防護対象施設を内包する建屋までの距離は約 400m 確保されているため，鉄塔が倒壊したとしても外部事象防護対象施設を内包する建屋に衝突することはない。

さらに当該部材が破断したとしても，当該部材を主柱材に連結しているボルトの余裕度が 1.00 以上確保されており，少なくとも部材の片端は他の部材と連結されていると考えられるため，飛散することは考え難いことから，送電鉄塔への竜巻襲来時における影響はないことを確認した。

以　上

＜参考資料＞

【塔体部の余裕度が 1.00 を下回る箇所】



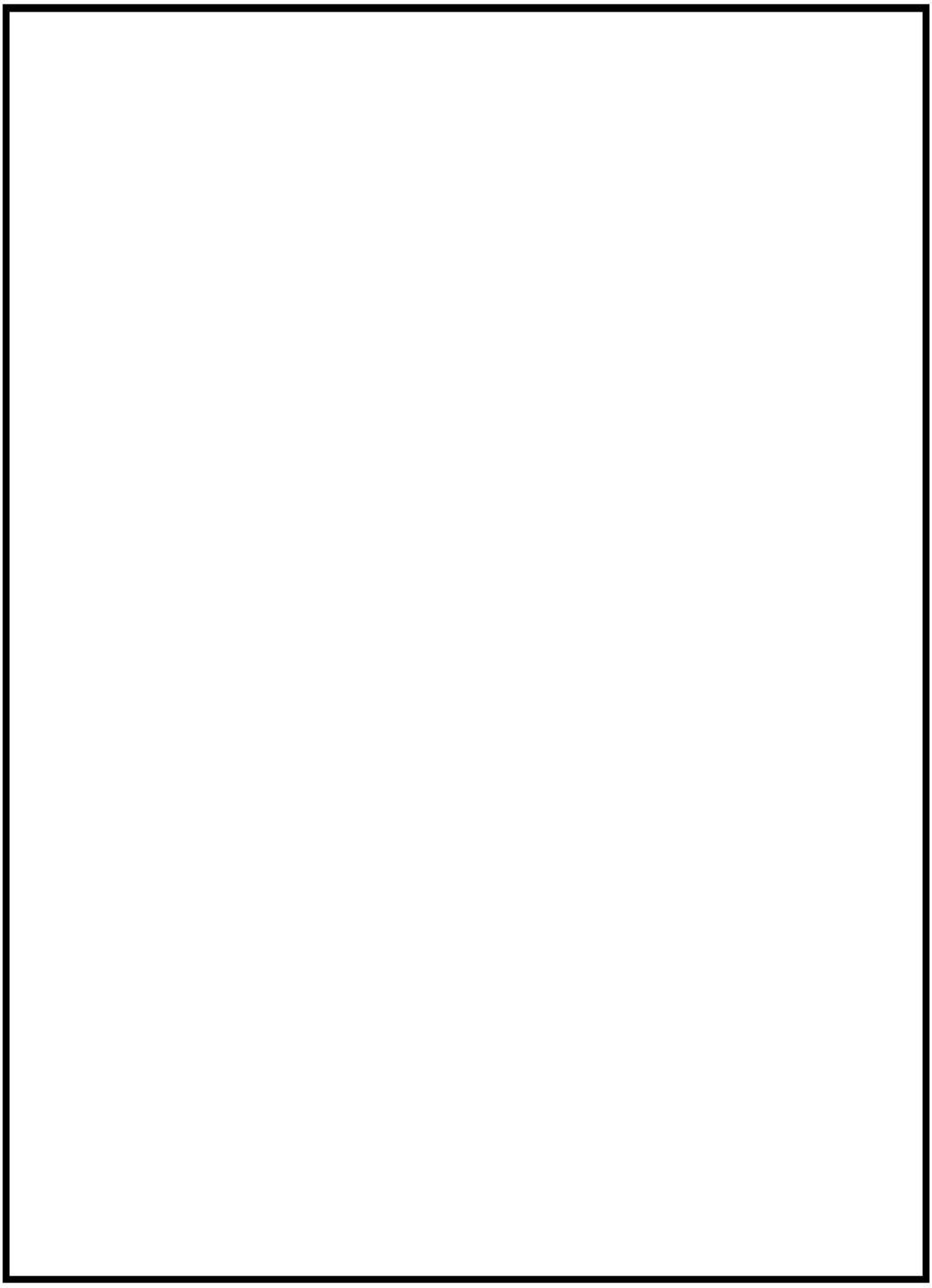
□ 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

【鉄塔部材の強度検討結果】

※使用鋼材・ボルト：L45×4～L100×10（SS400），　L120×8 以上（SS540），M16（SS400），M20・M22（SS540）

□ 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

【余裕度が 1.00 を下回る部材と設計飛来物の比較】



□ 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

飛来物の飛散有無の判断方法，飛散距離および高さの算定の仕方について

地上にあるものに対する竜巻による浮き上がりの有無に関する知見は少ない。一方，浮き上がったものについては，飛来物のサイズ，質量，形状から算出した空力パラメータにより，飛散の程度を算出することができる。

このため，飛来物となる可能性があるものは全て浮き上がるとして，浮き上がったものがそれ以上浮遊し継続して上昇するか否かについて，空力パラメータを用いて判断することにより，飛散有無を判断した。

以下に飛来物の飛散有無の判断方法，飛散距離及び飛散高さの算定の仕方について示す。

１．竜巻の風速場

飛来物の軌跡評価は竜巻の風速場に地上 40m[※1] 地点に飛来物を置き，これを起点として軌跡評価を実施する。

ランキン渦としてモデル化した竜巻について，※２の文献より周方向，半径方向，鉛直方向の速度を以下のように表せる。

$$V_r = \frac{1}{\sqrt{5}} V_{rot}$$

$$V_\theta = \frac{2}{\sqrt{5}} V_{rot}$$

$$V_Z = \frac{4}{3\sqrt{5}} V_{rot}$$

$$V_r = \begin{cases} \frac{r}{R_m} V_m & if \quad 0 \le r \le R_m \\ \frac{r}{R_m} V_m & if \quad R_m \le r \end{cases}$$

※２の文献において，以下の関係が示されている。

$V_r = \frac{1}{2} V_\theta$，$V_Z = \frac{2}{3} V_\theta$

したがって，

$V_{rot} = \sqrt{{V_r}^2 + {V_\theta}^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} V_\theta\right)^2 + {V_\theta}^2} = \frac{\sqrt{5}}{2} V_\theta$ より，

$V_\theta = \frac{2}{\sqrt{5}} V_{rot}$

よって，

$V_Z = \frac{2}{3} V_\theta = \frac{4}{3\sqrt{5}} V_{rot}$