3, Aug. 2010, Samsung Corporation

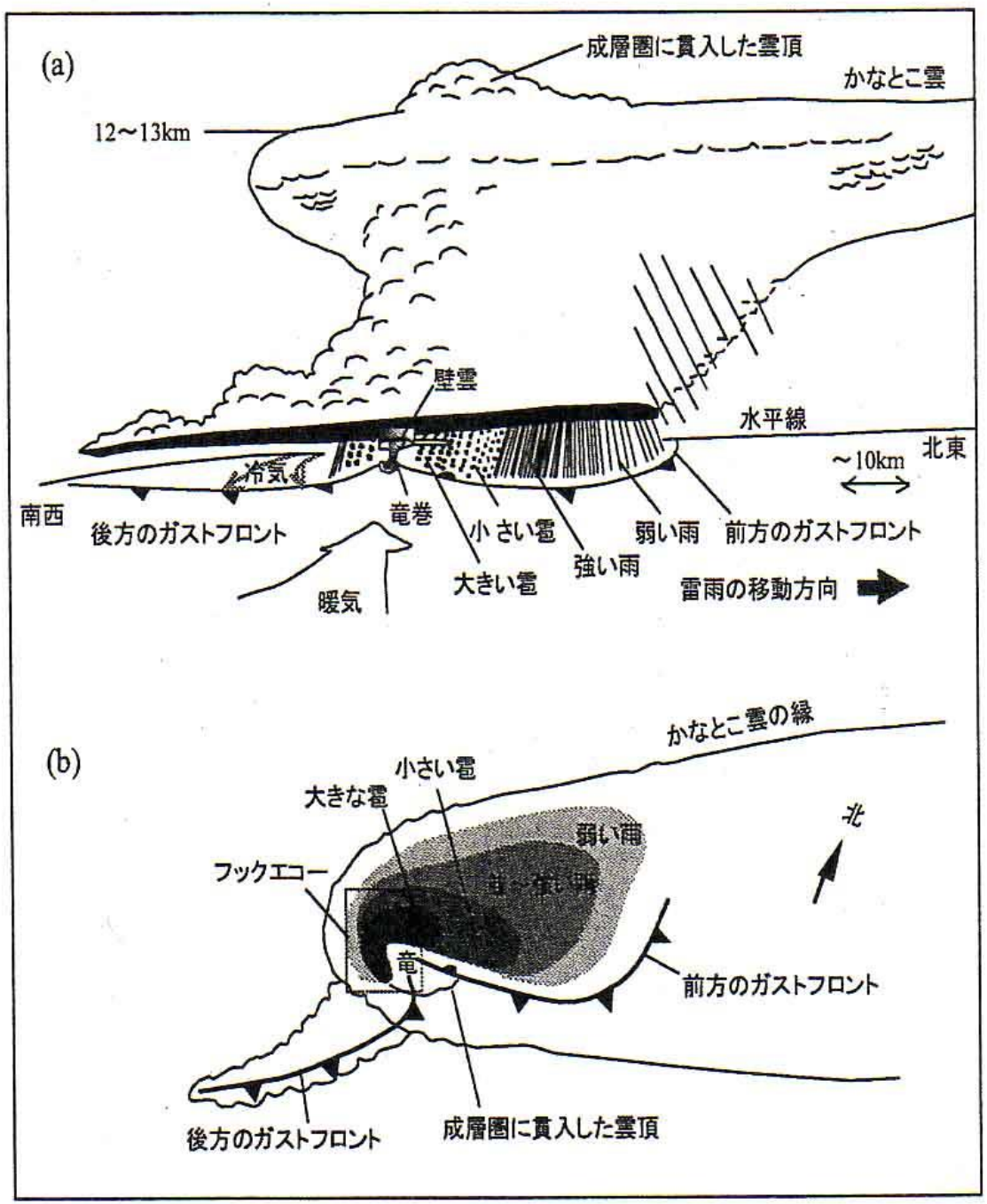
竜巻・突風による構造物の風荷重

Wind loading on structures due to tornadoes and gusts

竜巻　Tornadoes

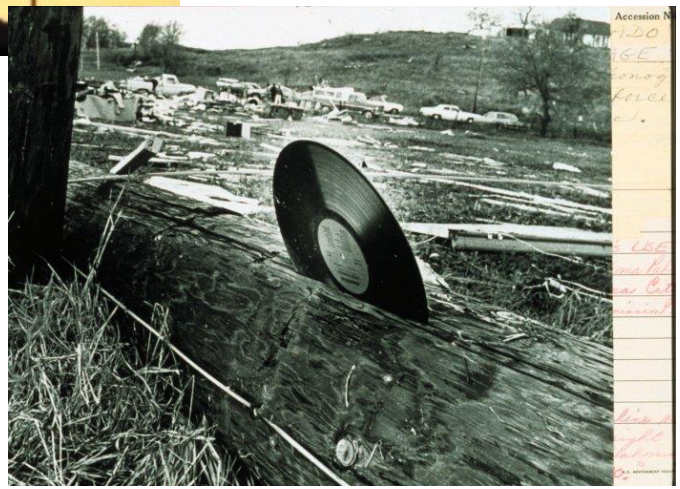
- スーパーセル（積乱雲）
- 前線性

スーパーセル


(a)
成層圏に貫入した雲頂
かなとこ雲
12～13km
壁雲
水平線
北東
～10km
冷気
南西
後方のガストフロント
竜巻
小さい雹
弱い雨
前方のガストフロント
強い雨
大きい雹
雷雨の移動方向
暖気
(b)
かなとこ雲の縁
小さい雹
大きな雹
弱い雨
北
フックエコー
強い雨
竜
前方のガストフロント
後方のガストフロント
成層圏に貫入した雲頂

竜巻による飛散物

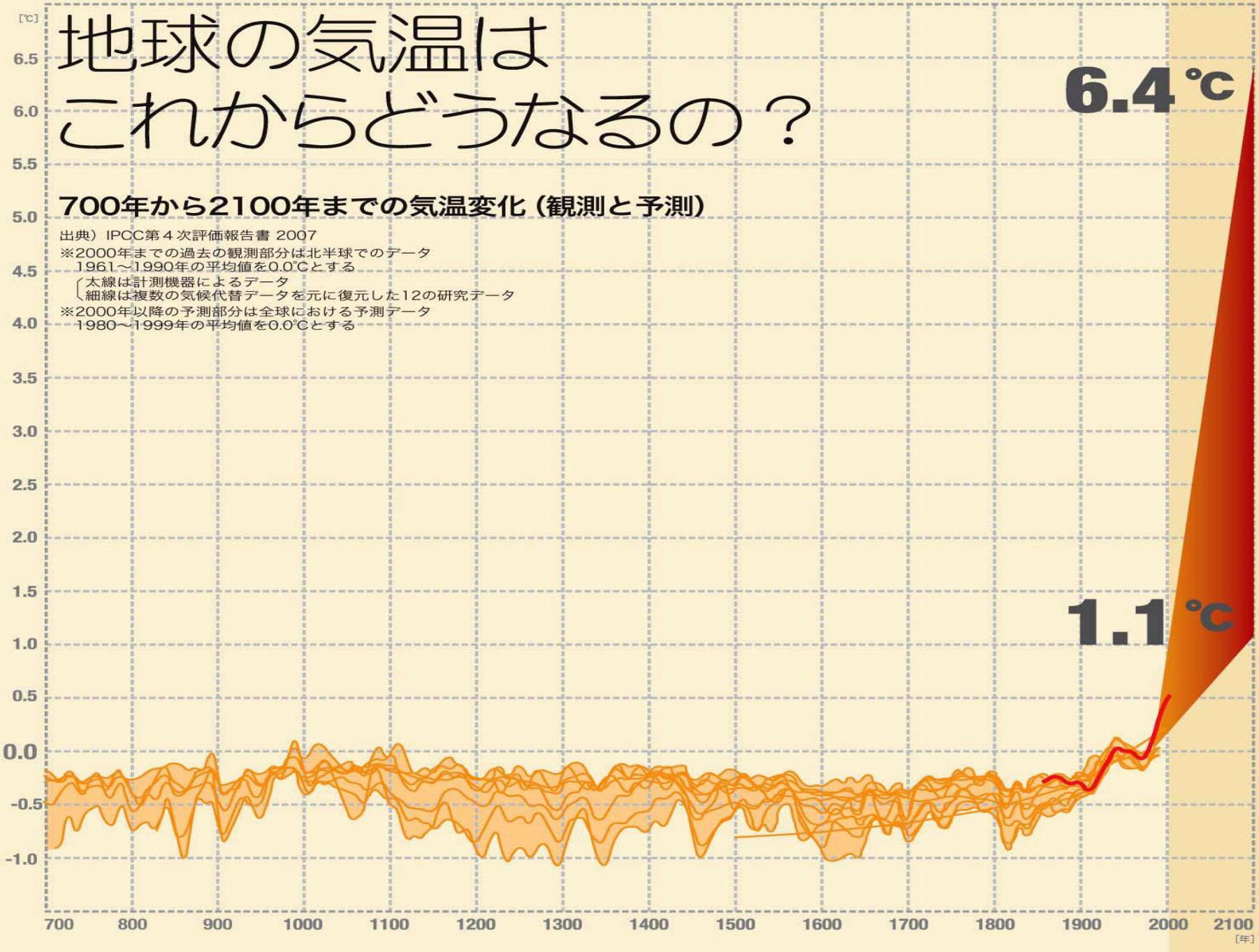
Tornado sketch (1869)



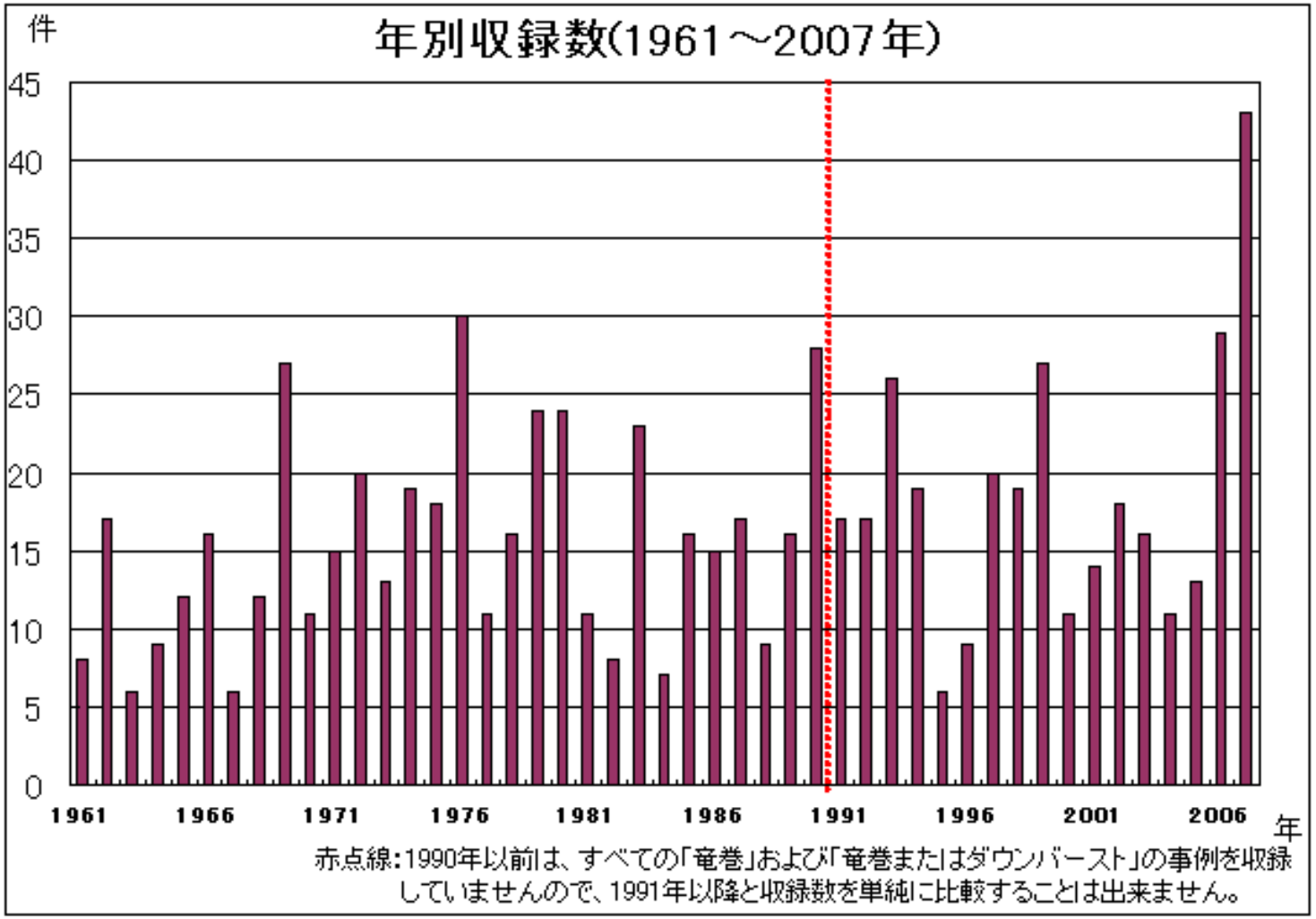
地球の気温は
これからどうなるの？

700年から2100年までの気温変化（観測と予測）

出典）IPCC第４次評価報告書 2007
※2000年までの過去の観測部分は北半球でのデータ
　1961～1990年の平均値を0.0℃とする
　太線は計測機器によるデータ
　細線は複数の気候代替データを元に復元した12の研究データ
※2000年以降の予測部分は全球における予測データ
　1980～1999年の平均値を0.0℃とする

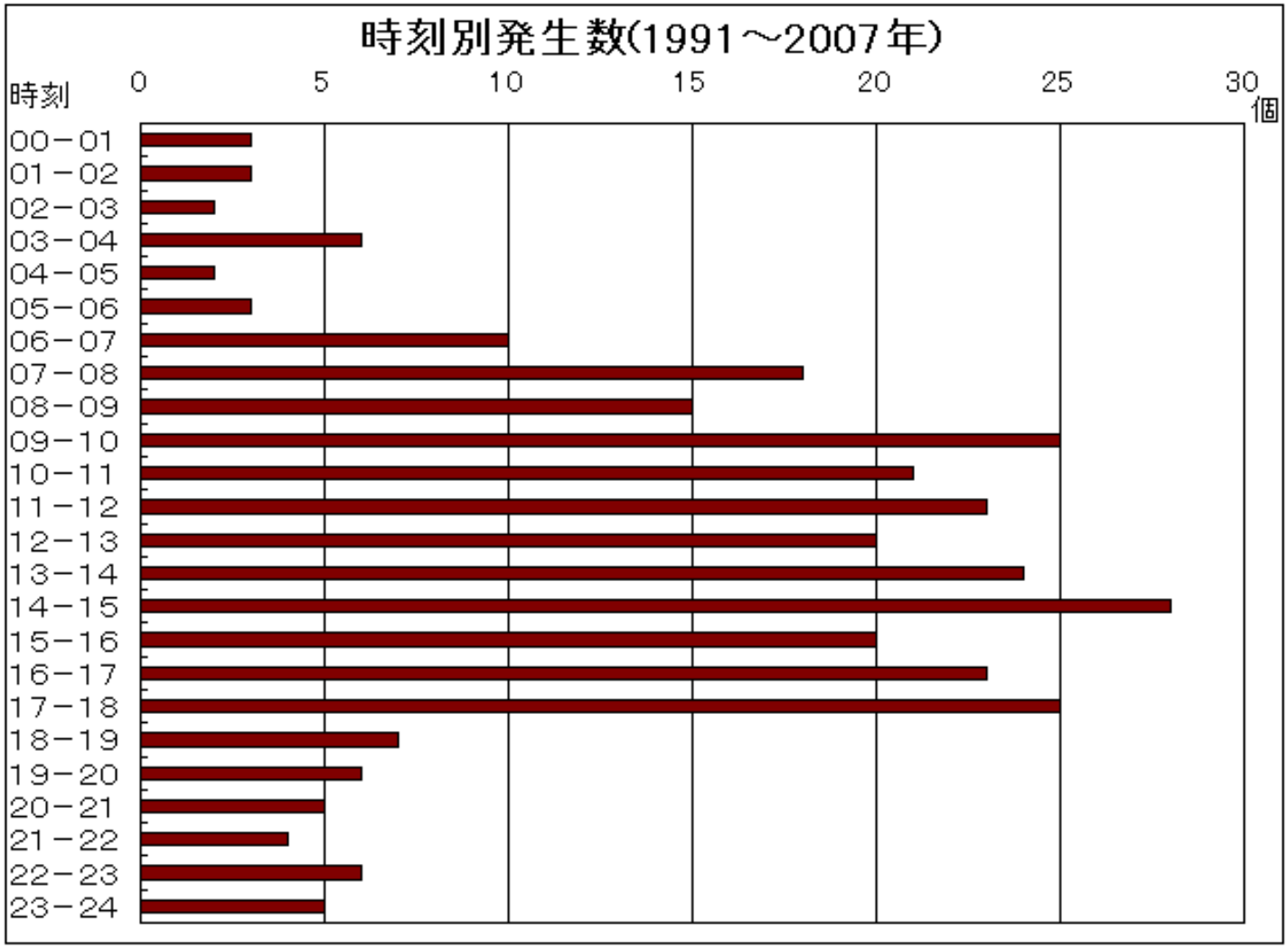


年度別竜巻発生（確認）数


件
年別収録数(1961～2007年)
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
1961
1966
1971
1976
1981
1986
1991
1996
2001
2006
年
赤点線:1990年以前は、すべての「竜巻」および「竜巻またはダウンバースト」の事例を収録していませんので、1991年以降と収録数を単純に比較することは出来ません。

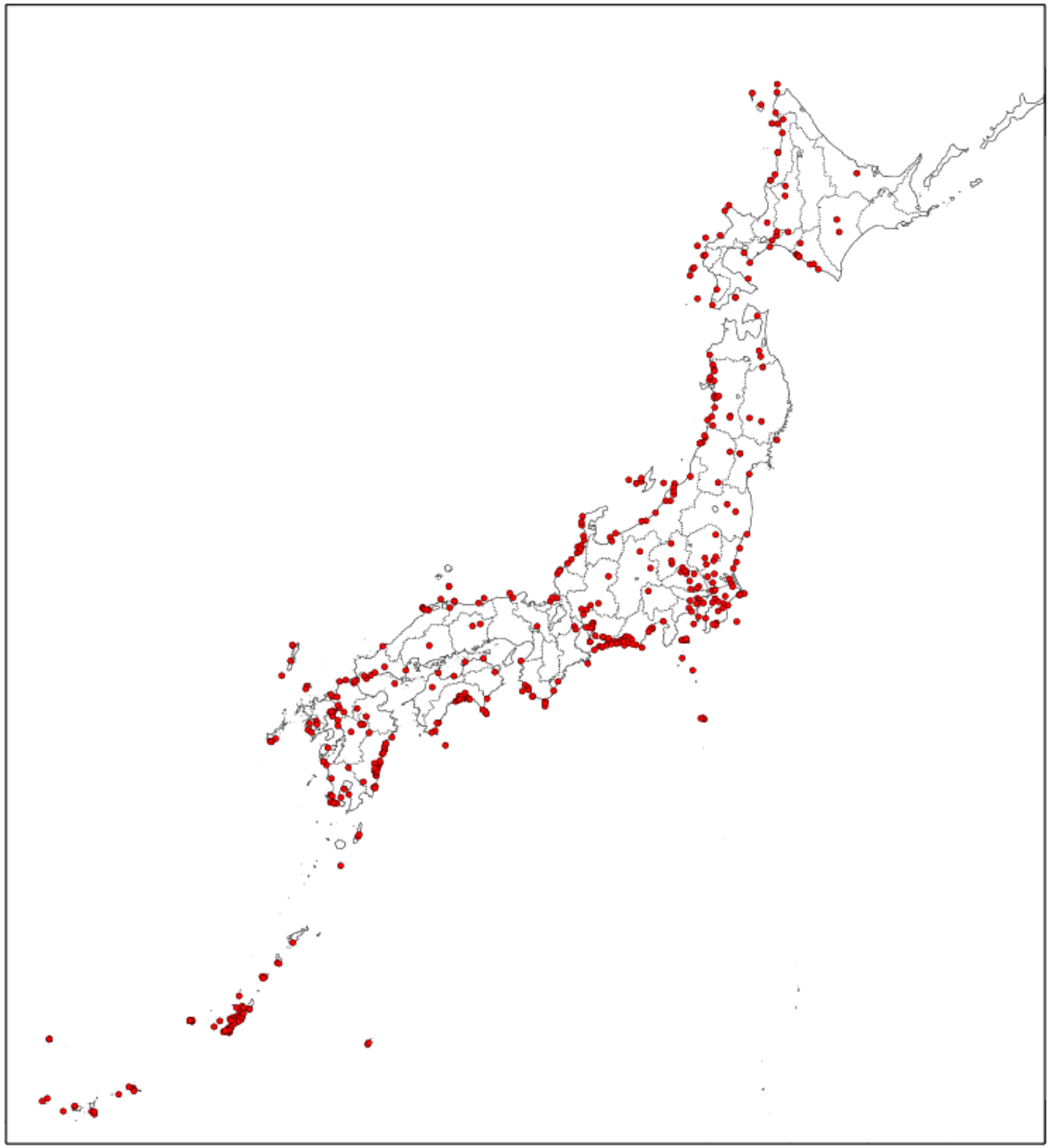
時刻別竜巻発生(確認)数

竜巻は日中に発生

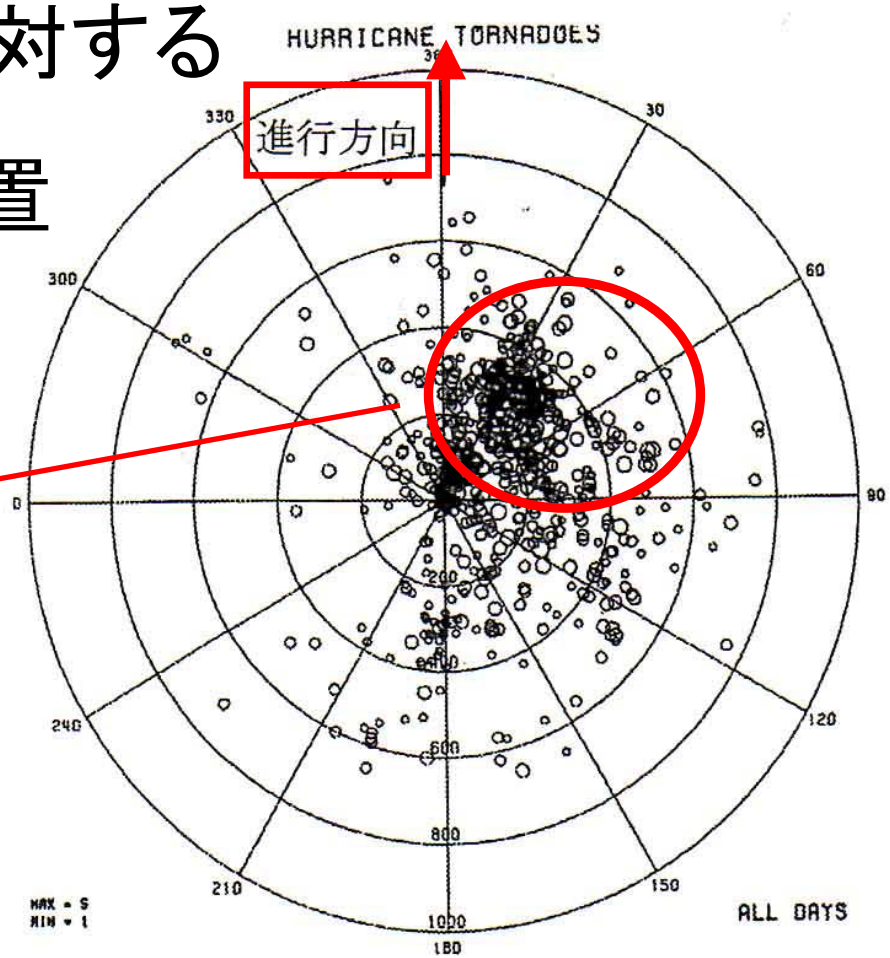


竜巻発生分布

- 海岸
- 平野部



ハリケーン進行方向に対する
トルネード発生相対位置



北東域に多い

図 1.3：ハリケーンの進行方向を 0 度の方向にとったときの竜巻の発生位置。同心円は 200km 毎に描かれている (McCaul, 1991)。

竜巻の数値シミュレーション

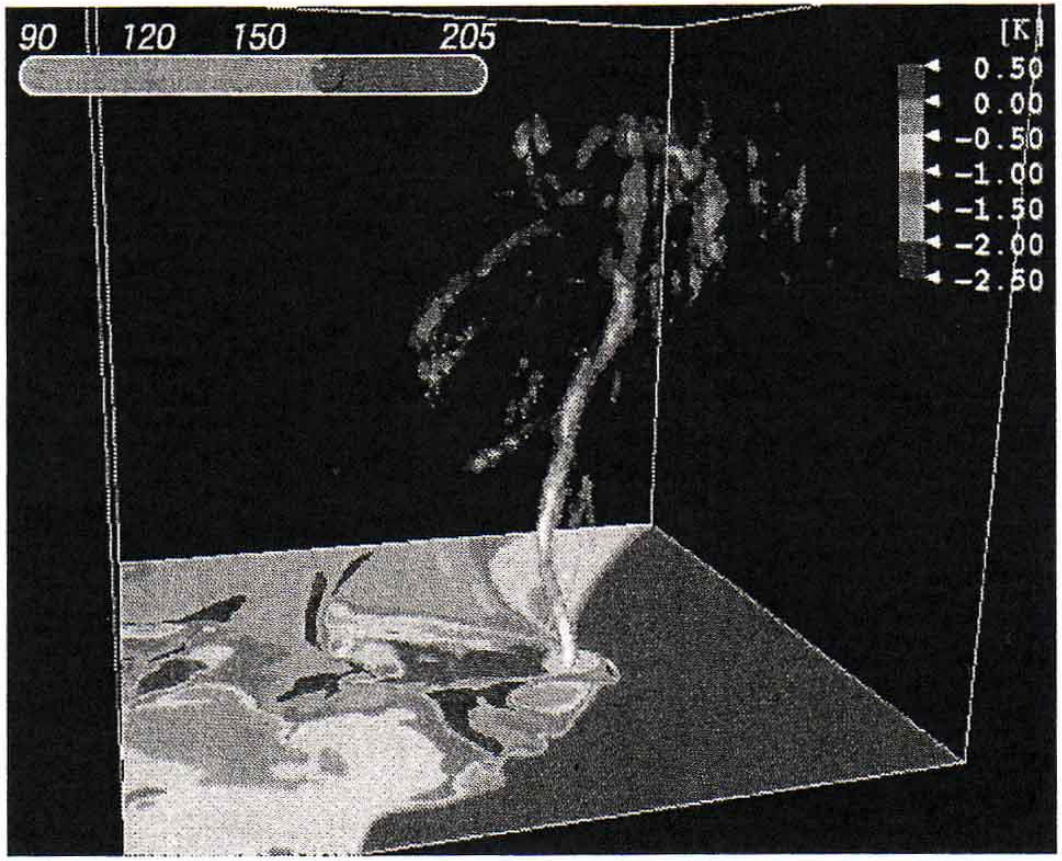


図 5.2：スーパーセル内に発生した竜巻を 3 次元的に表現したもの。煙状に見えるのが渦度を可視化したもので、竜巻に対応している。下面のカラーは地上の温度偏差。温度偏差の先端（ガストフロント)のところで、竜巻が発生していることが分かる。

竜巻の解析モデル

$$
\begin{cases}
v(r) = V_C \dfrac{r}{R_C} & \text{for} \quad \dfrac{r}{R_C} \leq 1 \quad \text{角速度一定} \\[2ex]
v(r) = V_C \dfrac{R_C}{r} & \text{for} \quad \dfrac{r}{R_C} > 1 \quad \text{循環一定}
\end{cases}
$$

高さ方向の風速変化，鉛直風速成分は考慮せず

突風による被害発生数

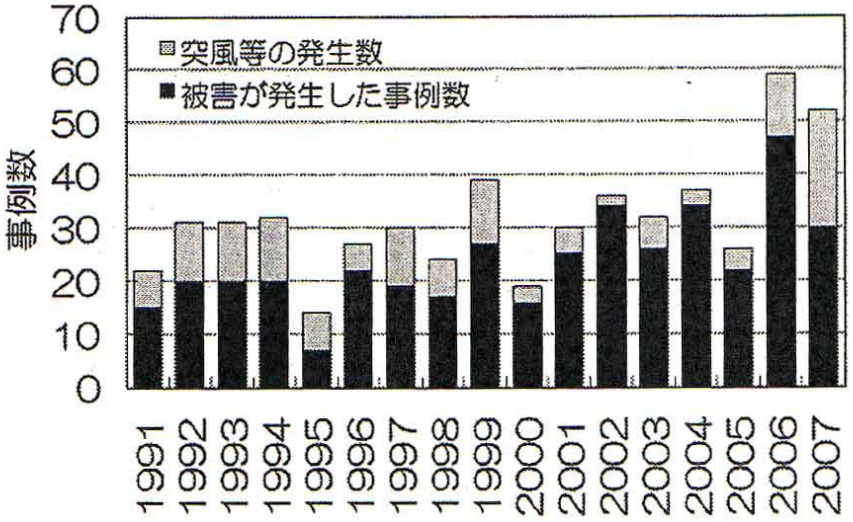


図１　突風被害発生数の経年変化
(1991～2007)

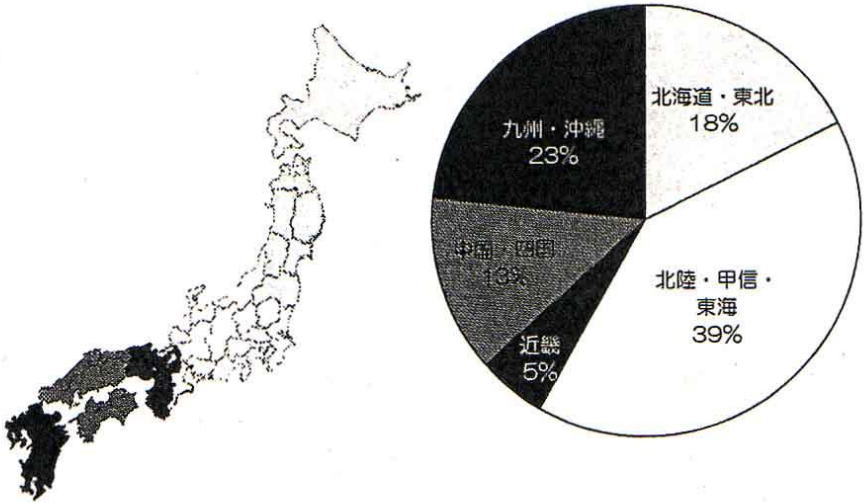


図２　地区別突風被害発生数
(1991～2007)

藤田(F)スケール

最大瞬間風速

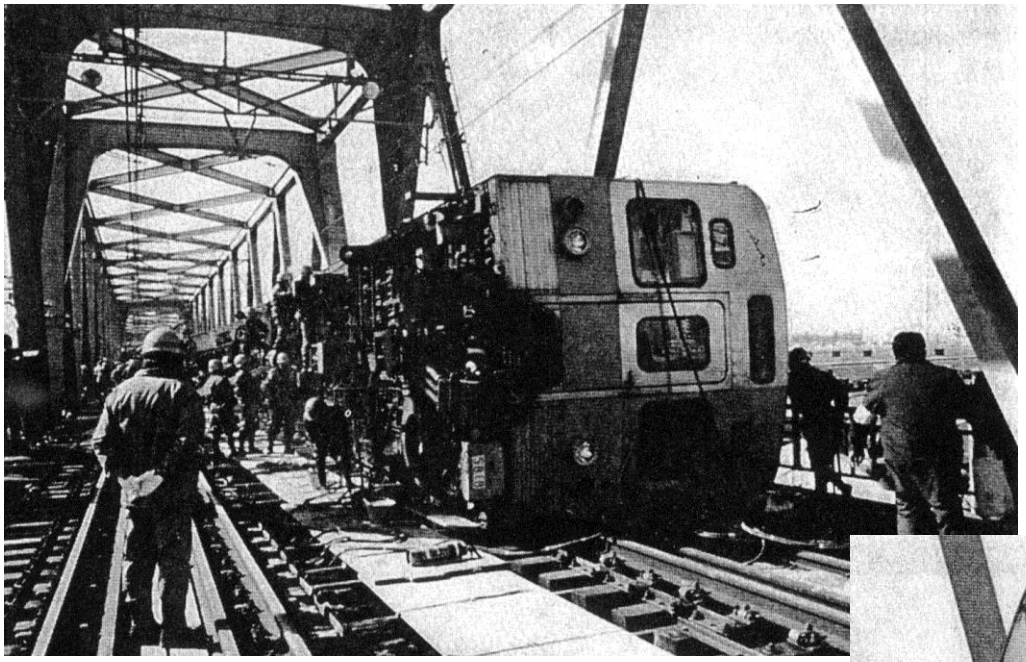
Ｆスケール	呼び方	風速(m/s)	平均時間（秒）	木造家屋の被害の様子
0	微弱な	17～32	約15	軽微な被害
1	弱い	33～49	約10	瓦が飛ぶ
2	強い	50～69	約７	屋根をはぎ取る
3	強烈な	70～92	約５	倒壊する
4	激烈な	93～116	約４	分解してバラバラになる
5	想像を絶する	117～142	約３	跡形もなく吹き飛ぶ

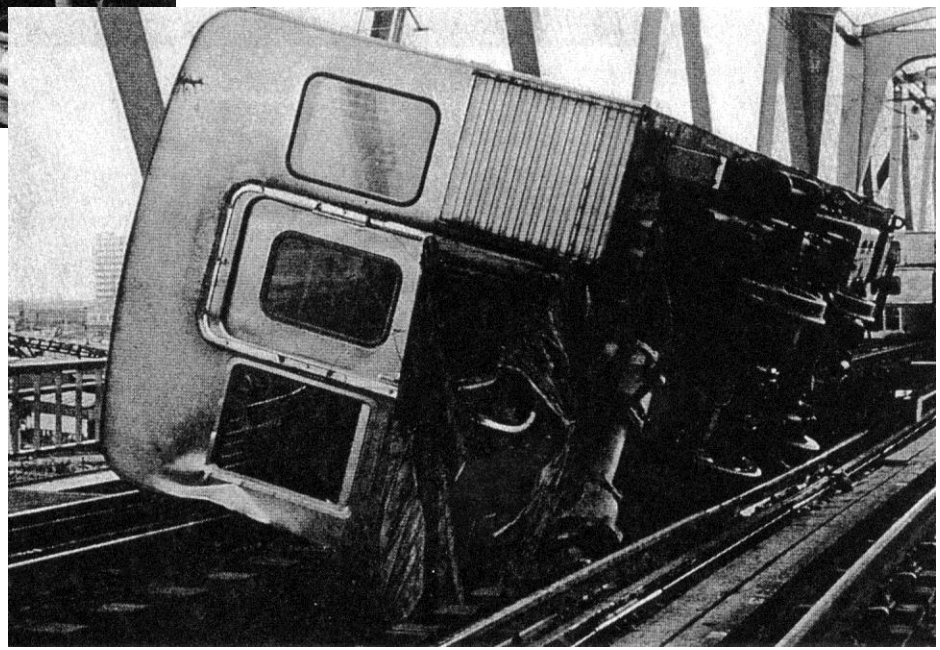
最近の竜巻被害の代表例

表 11　　FPP で整理した主な竜巻の比較

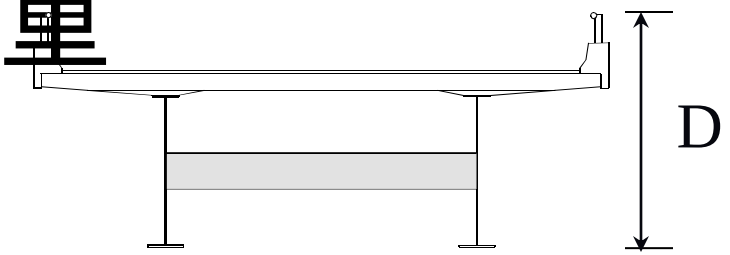
竜巻	茂原 1990.12.11	豊橋 1999.09.24	佐賀 2004.06.27	延岡 2006.09.17	佐呂間 2006.11.07
Life time (min)	7	25	7	5	3?
F scale	F3	F3	F2	F2	F3
P scale (length)	P2 6.5km	P3 19 km	P2 8 km	P2 7.5 km	P1? 1.5 km
P scale (width)	P3 500 m	P3 550 m	P2 200 m	P2 250 m	P2? 300 m

1978.2.28　川崎，東京（地下鉄東西線脱線事故）　F3





風荷重



$$p = \frac{1}{2}\rho V^2 C_D \boxed{G}$$

・気流の乱れ，構造物の応答による荷重の最大値を考慮するための補正係数

・構造物の断面形状

・気流の乱れ度

p　風荷重　[N/m^2]

ρ　空気密度　[kg/m^3]

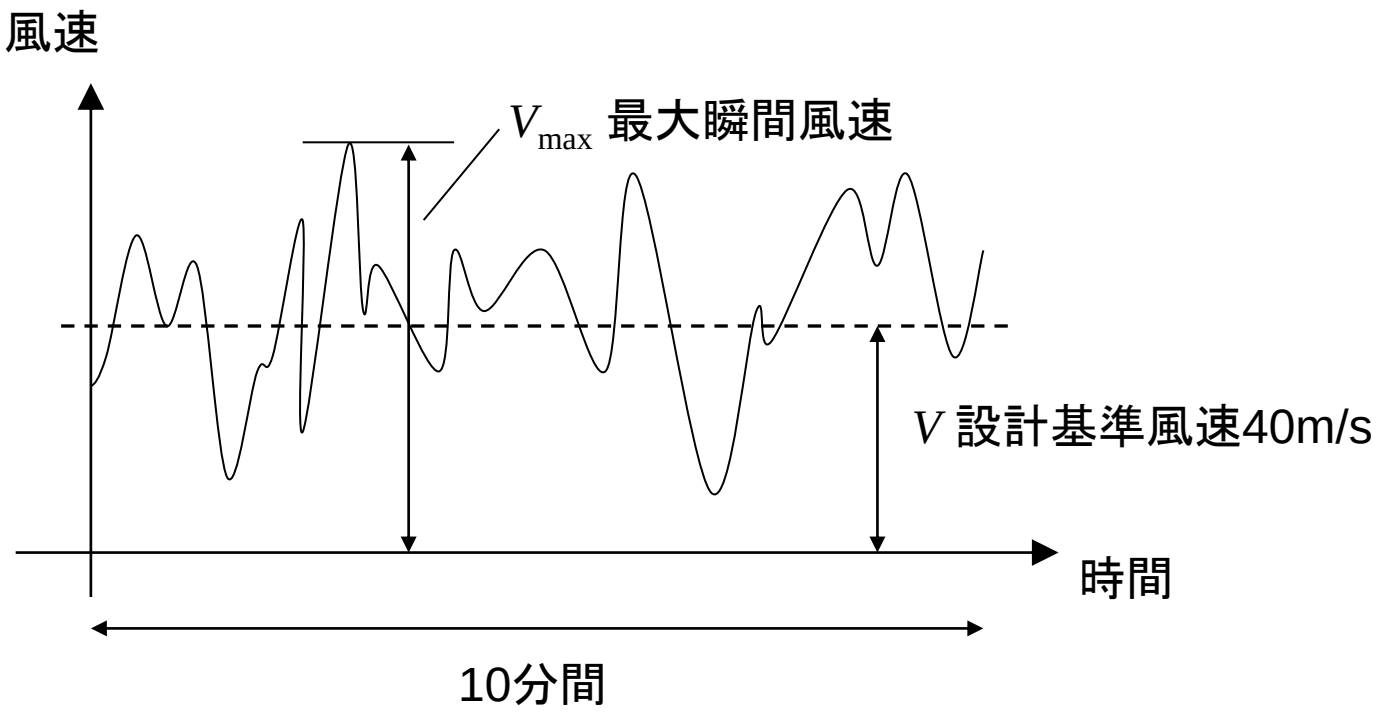
V　設計基準風速（V=40[m/s]）

C_D　抗力係数

G　ガスト応答係数（G=1.9)

ガスト応答係数 G: 風速変動の影響を補正する係数

最大瞬間風速発生時の風荷重評価



道路橋示方書

$$V_{\max} = \sqrt{G}V \qquad \sqrt{1.9} = 1.378$$

$$V_{\max} = V + 3\sigma_V$$

$$\frac{V_{\max}}{V} = 1 + 3\frac{\sigma_V}{V} = \sqrt{G}$$

$$I_V = \frac{\sigma_V}{V} = 0.126 \quad \longleftarrow$$

約13%程度の風速変動を想定

本州四国連絡橋

補正係数μ_2, μ_3:

静的にかかる風荷重にガスト応答による変動荷重を考慮して割り増すための補正係数

（本州四国連絡橋耐風設計基準(2001)・同解説）

静的設計においては，設計風荷重として空気力のうち抗力成分のみを考慮する。

吊橋ケーブル・吊橋ハンガーロープ・斜張橋ケーブル・吊構造部に作用する風荷重

$$P_D = \mu_2 \frac{\rho \overline{U_Z}^2}{2} C_D A_n \qquad (4.1.1)$$

塔に作用する風荷重

$$P_D = \mu_3 \frac{\rho \overline{U_Z}^2}{2} C_D A_n \qquad (4.1.2)$$

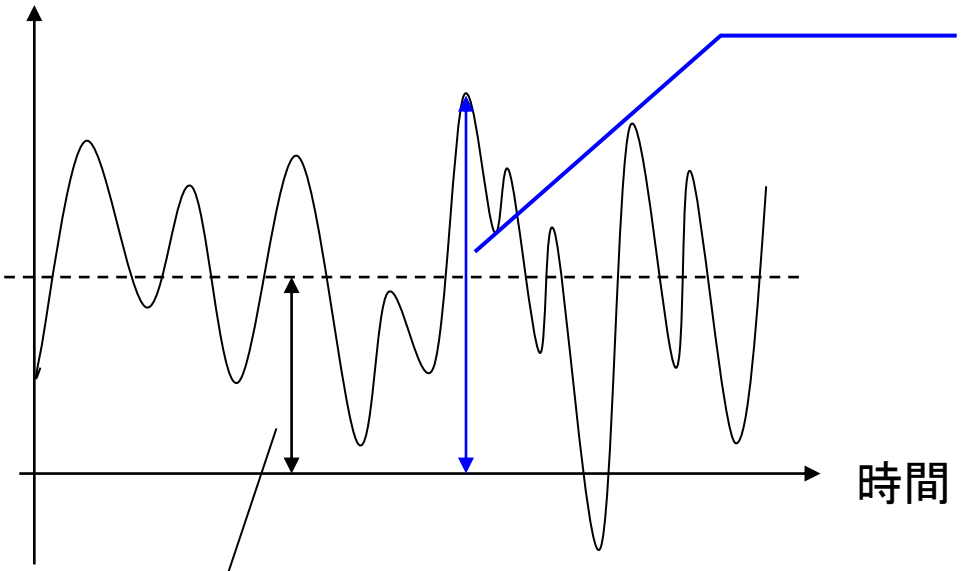
ここに，補正係数μ_2，μ_3 は表-4.1.1に示す値をとるものとする。また，空気密度ρは0.12 kgf・sec^2・m^{-4} (1.18kg/m^3) とし，設計基準風速$\overline{U_Z}$は，3.2の規定によるものとし，抗力係数C_Dおよび投影面積A_nは，それぞれ表-4.1.2および表-4.1.3により定めるものとする。

なお，桁の抗力係数については風洞試験によって検証するものとし，橋軸直角方向の気流に対する抗力係数の測定値が，設計に用いた迎角0°における値と5%以上異なった場合には測定値を考慮して再設計を行うものとする。

表-4.1.1 補正係数

設計対象			桁		塔	
着目方向			橋軸直角	橋軸方向	橋軸直角	橋軸方向
明石海峡大橋	吊橋ケーブル	μ_2	1.55	—	1.35	—
	吊橋ハンガーロープ 補剛桁	μ_2	1.55	1.25	1.35	1.25
	塔	μ_3	—	—	1.55	1.50(上端固定) 1.75(上端自由)
来島海峡大橋	吊橋ケーブル 吊橋ハンガーロープ 補剛桁	μ_2	2.0	1.3	1.7	1.3
	塔	μ_3	—	—	1.4	1.55(上端固定) 1.7（上端自由）
多々羅大橋	斜張橋ケーブル 主桁	μ_2	1.9	1.35	1.65	1.35
	塔	μ_3	1.9	1.5	1.65	1.5（上端固定） 1.8（上端自由）

ガスト応答（例：桁の水平曲げモーメント）



風速変動**＋構造物の振動特性**により決定される不規則振動応答の最大値 M_{max}

平均風速（設計風速）による平均水平曲げモーメントM

補正係数 $\mu_{2,3} = M_{max}/M$

橋梁の風荷重はどれくらいの最大瞬間荷重（竜巻の瞬間風速）に相当する？

$$V_{max}^2 = GV^2 = 1.9 \times 40^2$$

$$V_{max} = 55.6[\mathrm{m/s}] \leftarrow \text{F2 classに相当}$$

・風荷重は瞬間風速55.6m/sを想定

藤田(F)スケール

最大瞬間風速

Ｆスケール	呼び方	風速(m/s)	平均時間（秒）	木造家屋の被害の様子
0	微弱な	17～32	約15	軽微な被害
1	弱い	33～49	約10	瓦が飛ぶ
2	強い	50～69	約７	屋根をはぎ取る
3	強烈な	70～92	約５	倒壊する
4	激烈な	93～116	約４	分解してバラバラになる
5	想像を絶する	117～142	約３	跡形もなく吹き飛ぶ

降伏応力を生じさせる瞬間風速はどれくらいの竜巻に相当する？

＃風荷重による発生応力は（許容応力）×（許容応力割増率）に等しいと仮定

＃降伏応力は許容応力の1.7倍

＃許容応力割増率1.2

$$V_{pmax}^2 = (1.7/1.2) \times 55.6^2$$

$$V_{pmax} = 66.2\text{m/s}$$

ほぼF2 classをカバー↑

F2 classの竜巻により，最大で，ほぼ降伏応力レベルが発生する

建築物，鉄道構造物，送電線などほとんどの構造物はほぼ同程度の設計荷重レベルを想定

竜巻等による突風被害に遭う確率

- 日本のある地点が竜巻等による突風被害に遭う確率・・・8.6×10^{-6}（日本全国平均）（12万年に1回） (Niino et al., 1997)

- すべての竜巻が可住地（総面積の約1/3）で発生したと仮定．１個の住宅が竜巻等による突風被害に遭う確率・・・2.8×10^{-5}（3.8万年に1回） (Tamura et al., 2008)

竜巻等による突風被害に遭う確率

- 東京の住宅・・・3.96×10^{-4}（2500年に1回）（全国1位）

- ２位　千葉県，３位　沖縄県，４位　宮崎県，５位　神奈川県，・・・・，和歌山県　１７位，・・・・，京都府　２８位，・・・・　(Tamura et al., 2008)

竜巻等による突風被害に遭う確率

- １市町村あたり年間の突風被害遭遇確率･･･0.011（90年に1回）

- 鉄道･･･年平均8個が全国のどこかで線路を横切る

※海岸線に沿う路線や大都市圏など路線密度が高い地域では頻度増加

危険度分類指針(Stevenson & Zhao, 1996)

使用分類	定義事項
通常	特別な目的を有さない施設（行政施設，カフェ，倉庫，整備工場など）
重要もしくは低危険度	特別な目的を有する施設（研究施設，コンピュータセンターなど）もしくは緊急性を有する施設（病院や消防署など）
中危険度（危険度分類2）	従業員の人命や環境保全のため，扱っている物質の漏洩防止が必要な施設（ウラニウム濃縮施設，大量燃料長期保管庫，放射性物質や有害物質の長期保管施設）
高危険度（危険度分類1）	従業員の安全確保や環境保護上，建築物内で扱っている物質の漏洩防止が必要な施設（ウラニウム濃縮工場，使用済み核燃料長期保管施設，人命に関わる有害物質を保管もしくは取り扱う施設）
高危険度（危険度分類1S）	公衆及び環境保全上扱っている物質の漏洩防止が最も重要になる施設（1000MW以上の核反応炉，1000m^{3}以上の液化天然ガスタンクなど）

中危険度（危険度分類2），高危険度（危険度分類1，1S）に要求される耐風性

- 一般の構造物（通常，重要もしくは低危険度）の設計風速（年超過確率0.01）

- 中，高危険度施設の風荷重レベルは一般構造物の15倍（cf.年超過確率10^{-7} Wen et al., 1975）

飛散物による災害

- タンクローリー　→　衝撃力
- 自動車　→　衝撃力
- 建材（角材）　→　壁面貫通
- 看板，瓦（平板）　→　壁面貫通
- 石　→　ガラス，外装材の破損

Tornadoに対する

米国内の原子力発電施設の荷重レベル

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION

March 2007
Revision 1

REGULATORY GUIDE

OFFICE OF NUCLEAR REGULATORY RESEARCH

REGULATORY GUIDE 1.76

(Draft was issued as DG-1143, dated January 2006)

DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS

Meteorological and topographic conditions, which vary significantly within the continental United States, influence the frequency of occurrence and intensity of tornadoes. The NRC staff has determined that the design-basis tornado wind speeds for new reactors should correspond to the exceedance frequency of 10^{-7} per year (calculated as a best estimate), thus using the same exceedance frequency as the original version of this regulatory guide. The results of the analysis indicated that a maximum wind speed of 103 meters per second (m/s) [230 miles per hour (mph)] is appropriate for tornadoes for the central portion of the United States; a maximum wind speed of 89 m/s (200 mph) is appropriate for a large region of the United States along the east coast, the northern border, and western Great Plains; and a maximum wind speed of 72 m/s (160 mph) is appropriate for the western United States. These geographic wind speed regions are defined by observed tornado occurrences within the two-degree latitude and longitude boxes in the contiguous United States. Figure 1 shows the three tornado intensity regions for the contiguous United States at the 10^{-7} per year probability level, in which the abscissa is the longitude (degrees west) and the ordinate is the latitude (degrees north).

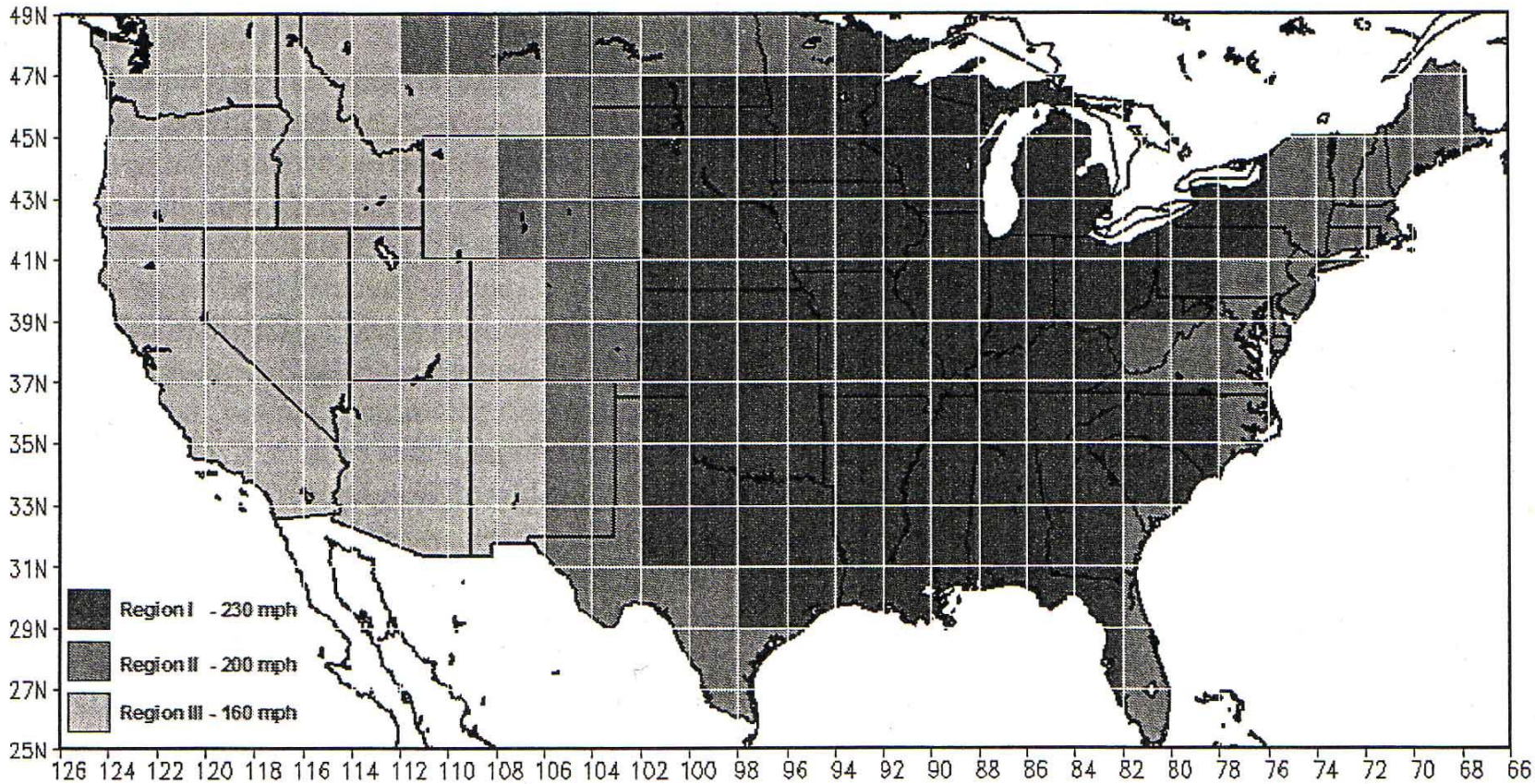


Figure 1. Tornado intensity regions for the contiguous United States for exceedance probabilities of 10^{-7} per year

Table 1. Design-Basis Tornado Characteristics

Region	Maximum wind speed m/s (mph)	Translational speed m/s (mph)	Maximum rotational speed m/s (mph)	Radius of maximum rotational speed m (ft)	Pressure drop mb (psi)	Rate of pressure drop mb/s (psi/s)
I	103 (230)	21 (46)	82 (184)	45.7 (150)	83 (1.2)	37 (0.5)
II	89 (200)	18 (40)	72 (160)	45.7 (150)	63 (0.9)	25 (0.4)
III	72 (160)	14 (32)	57 (128)	45.7 (150)	40 (0.6)	13 (0.2)

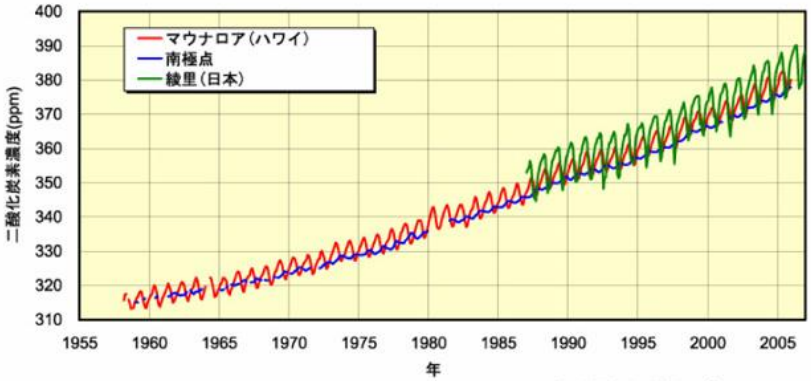
missiling

The NRC considers the missiles listed in Table 2 to be capable of striking in all directions with horizontal velocities of V_{Mh}^{max} and vertical velocities equal to 67 percent of V_{Mh}^{max}. Barrier design should be evaluated assuming a normal impact to the surface for the Schedule 40 pipe and automobile missiles. The automobile missile is considered to impact at all altitudes less than 30 feet (9.14 meters) above all grade levels within 0.5 mile (0.8 kilometer) of the plant structures. Table 2 includes a different size and weight automobile for Region III than for Regions I and II. The heavier automobile used in the calculations for Regions I and II will have a lower kinetic energy in Region III. This effect is a consequence of the low maximum horizontal speed V_{Mh}^{max} of the heavier automobile in the Region III tornado wind field.

Table 2. Design-Basis Tornado Missile Spectrum and Maximum Horizontal Speeds

Missile Type		Schedule 40 Pipe	Automobile	Solid Steel Sphere
Dimensions		0.168 m dia × 4.58 m long (6.625 in. dia × 15 ft long)	Region I and II 5 m × 2 m × 1.3 m (16.4 ft x 6.6 ft x 4.3 ft)	2.54 cm dia (1 in. dia)
			Region III 4.5 m x 1.7 m x 1.5 m (14.9 ft x 5.6 ft x 4.9 ft)	
Mass		130 kg (287 lb)	Region I and II 1810 kg (4000 lb)	0.0669 kg (0.147 lb)
			Region III 1178 kg (2595 lb)	
C_DA/m		0.0043 m^2/kg (0.0212 ft^2/lb)	Region I and II 0.0070 m^2/kg (0.0343 ft^2/lb)	0.0034 m^2/kg (0.0166 ft^2/lb)
			Region III 0.0095 m^2/kg (0.0464 ft^2/lb)	
V_{Mh}^{max}	**Region I**	41 m/s (135 ft/s)	41 m/s (135 ft/s)	8 m/s (26 ft/s)
	Region II	34 m/s (112 ft/s)	34 m/s (112 ft/s)	7 m/s (23 ft/s)
	Region III	24 m/s (79 ft/s)	24 m/s (79 ft/s)	6 m/s (20 ft/s)

大気中の二酸化炭素濃度の経年変化（過去50年）



出典）気候変動監視レポート2006

第4回気候変動に関する政府間パネル報告

（IPCC-AR4 2007 Report)

4 IPCC-AR4 PERSPECTIVE

The 2007 Fourth Assessment report [19] of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC-AR4) in their summary presents the following scenarios concerning frequency and intensity:

Frequency: On a global scale there is no clear trend in the annual numbers of tropical cyclones, however, the frequency has increased in the North Atlantic, which is a subject of debate. Despite the apparent statistical linkage between frequency increase and global warming the search for an underlying mechanism is underway.

Intensity: The report rates the probability of the link between global warming and increase in the frequency of hurricanes as "more likely than not" that there is human contribution to the observed trends of hurricane activity since 1970. It is also reported that it is likely (better than 2 to 1 odds) that future tropical storms will intensify with higher wind speeds and precipitation associated with increasing sea surface temperature.

強風の将来予測？？？