

## 付属書 A (参考)

### IEC 規格による風力発電機の設計条件

#### 概 要

荷重条件については、IEC 61400-1(2005)及び GL ガイドライン(2003)における設計荷重ケース(DLC)と国内基準における条件とは必ずしも一致するものではない。建築基準法や建築物荷重指針・同解説と照合しても暴風時や地震時の安全性の確認には結びつくが極値風速、故障状態における運転を考慮した条件など差異がある。

本ガイドラインでは IEC 61400-1(2005)の風車クラス区分に基づいた風車選定を行うための外部条件を検討できるようにして、条件に適合した風力発電設備の導入を図ることができるようにするものである。

#### A 1 既存の国際規格

現在の商用風車の多くは、国際的な技術規格である IEC 規格などに基づき設計・製造されたものが多く、この中で特に風に関する要件が設定されているのが、IEC 61400-1(ed.3) Wind turbines - Part 1: Design requirements (2005)である。日本では日本工業規格の「JIS C1400-1:2001」がこれに相当するが、JIS 規格の改訂に時間を要するため、必ずしも最新の IEC 規格に対応しているとは限らないことに注意を要する。

また、この他にもドイツの認証機関である GL Wind 社 (GL: Germanischer Lloyd) によるガイドライン「GL Guideline 2003」が存在する。

## A 2 設計手順と IEC 規格による風条件

### A 2.1 耐風設計の流れ

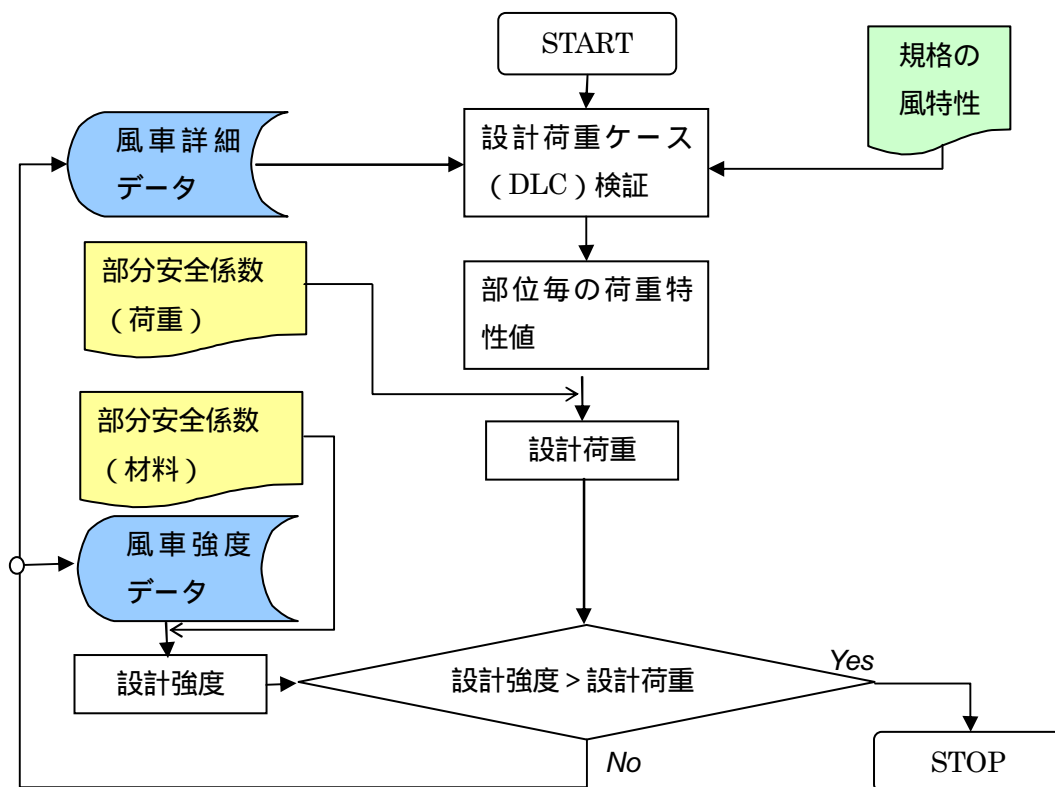
現在の風車の国際規格における設計においては、図A 2.1 に示す解析評価で安全率を設定する。

終局強度解析

疲労強度解析

安定解析（座屈など）

限界変形解析（ブレードのタワー・ストライクなど）



図A 2.1 風車耐風設計の流れ

## A 2.2 規格における風条件

国際規格における風況は、風力発電が盛んな欧州での観測値をもとに表A 2.1 に示すパラメータが基準となり、規格化されている（例えば「風車クラス B」などと用いる）。

表A 2.1 風車規格の風条件、IEC 61400-1(2005)

Wind turbine class		I	II	III	S
$V_{ref}$	(m/s)	50	42,5	37,5	Values specified by the designer
A	$I_{ref}$ (-)	0,16			
B	$I_{ref}$ (-)	0,14			
C	$I_{ref}$ (-)	0,12			

基準風速（ハブ高さにおける 10 分間平均風速の 50 年再現期待値）

10 分間平均風速の再現期間 50 年の極値を基準風速 ( $V_{ref}$ ) と呼び、IEC 規格において風車設計の基礎となっている。

IEC 61400-1(2005)では、風車の設計に用いた基準風速によって、風車を、の3クラスに分けており、さらにこれらの標準的なクラスに入らないものを「クラスS」としている。なお、クラスSは、設計に用いた基準風速が高い風車を指すだけでなく、それが低いものや、乱流強度、風速頻度分布、運転温度、空気密度その他の設計条件が、標準とは異なる風車全てを指す可能性があることに留意しなければならない。

風速頻度分布（ハブ高さにおける風速の発生頻度の分布）

年間発電量にとって重要なパラメータである年間平均風速およびその確率分布に関しては、年間平均風速  $V_{ave}$  から下式を用いて換算する。

- ・年間平均風速：

$$V_{ave} = 0.2 V_{ref} \quad (A.1)$$

- ・風速の累積頻度分布：

$$P(V_{hub}) = 1 - \exp\left[-\pi(V_{hub} / 2V_{ave})^2\right] \quad (A.2)$$

乱流強度（風速の標準偏差）

ハブ高さの乱流強度を表すパラメータで、風速の関数として用いられる。

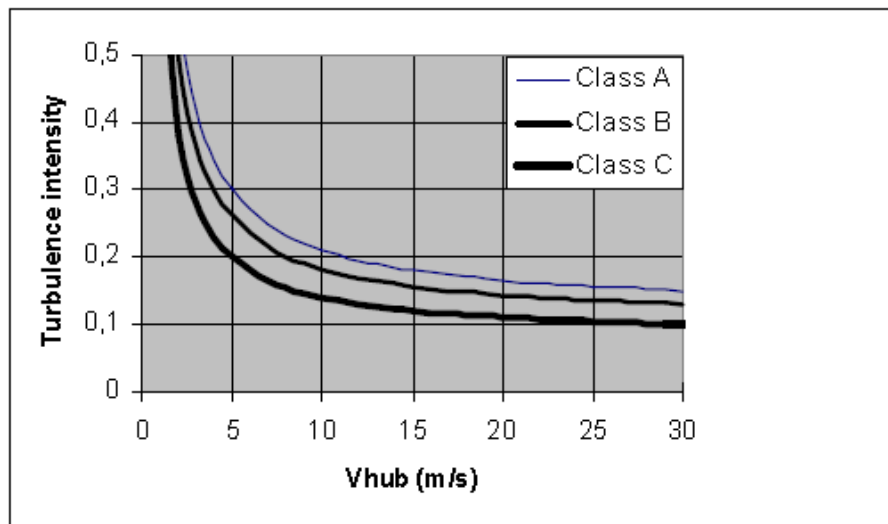
図A 2.2 に IEC 61400-1(2005)で定められている乱流強度のモデルを示す。

$$I = \frac{\sigma_1}{V_{hub}} = I_{ref} \left( 0.75 + \frac{5.6}{V_{hub}} \right) \quad (A.3)$$

$$\sigma_2 \geq 0.7\sigma_1 \quad (A.4)$$

$$\sigma_3 \geq 0.5\sigma_1 \quad (A.5)$$

また、複数台の風車が設置される場合には、近接する風車後流の影響を考慮して、乱流強度を補正しなければならない。



図A 2.2 乱流強度の風速依存モデル

- A: 高い乱流強度のカテゴリ
- B: 中程度の乱流強度のカテゴリ
- C: 低い乱流強度のカテゴリ

風の流入角：8°を考慮する。

風速の勾配：通常運転時は‘べき指数’ =0.2、暴風時は =0.11を考慮する。

空気密度：通常は、 =1.225 kg/m<sup>3</sup>を用いる。

これらの規格が適用できない場合には、クラスSとして設計者が値を提示することとなっている。



### A 3 荷重特性値

#### A 3.1 設計荷重ケース (Design Load Case)

風車の設計においては、通常の構造物で想定する暴風時のほか、表A 3.1に示すような種々の状態を想定し、空力弾性モデルを用いた時刻歴シミュレーションによる荷重計算を実施する。

表A 3.1 風車規格における設計荷重ケース (DLC) ~ IEC 61400-1(2005)

Design Situation	DLC	風条件	他の条件	解析種類	部分安全係数
1) 発電時	1.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	For extrapolation of extreme events	U	N
	1.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	*
	1.3	ETM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		U	N
	1.4	ECD $V_{hub} = V_r - 2m/s$ 、 $V_r$ 、 $V_r + 2m/s$		U	N
	1.5	EWS $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		U	N
2) 発電時の故障	2.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	制御システムの故障あるいは停電	U	N
	2.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	保護システムあるいは内部の電機故障	U	A
	2.3	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ and $V_{out}$	停電を含めた外的・内的な電機故障	U	A
	2.4	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	停電を含めた制御・安全保護あるいは電気システムの故障	F	*
3) 起動時	3.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	*
	3.2	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ and $V_{out}$		U	N
	3.3	EDC $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ and $V_{out}$		U	N
4) 正常停止時	4.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	*
	4.2	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ and $V_{out}$		U	N
5) 緊急停止時	5.1	NTM $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ and $V_{out}$		U	N
6) 休止時 (静止 or 遊転)	6.1	EWM 50年再現期待値		U	N
	6.2	EWM 50年再現期待値	電力系統の喪失による停電	U	A
	6.3	EWM 1年再現期待値	極端な風向偏差	U	N
	6.4	NTM $V_{hub} < 0.7 V_{ref}$		F	*
7) 休止時の故障	7.1	EWM 1年再現期待値		U	A
8) 輸送、建設、メンテナンス、補修	8.1	NTM $V_{maint}$ : 風車メーカーによる		U	T
	8.2	EWM 1年再現期待値		U	A

注1)  $V_{in}$  : カットイン風速、 $V_r$  : 定格風速、 $V_{out}$  : カットアウト風速

注2) 解析方法の記号は以下のとおり。

U: 終局強度解析

F: 疲労強度解析

注3) 部分安全係数の記号は以下のとおり。詳細に関しては後述

N: Normal (1.35)

A: Abnormal(1.1)

T: Transport and erection(1.5)

注4) NTMなどの風モデルの詳細に関しては、IEC 61400-1(2005)規格を参照

NTM: Normal turbulence model

ETM: Extreme turbulence model

ECD: Extreme coherent gust with direction change

EWS: Extreme wind shear

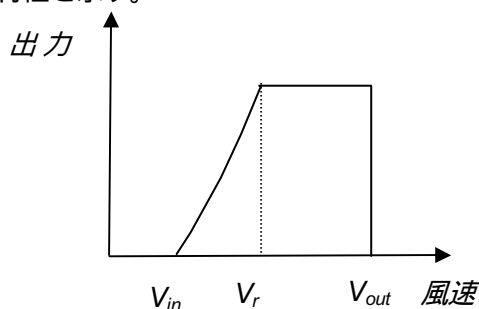
EOG: Extreme operating gust

NWP: Normal wind profile

EDC: Extreme direction change

EWM: Extreme wind speed model

図A 3.1に風車の出力特性を示す。



図A 3.1 風車の出力特性

### A 3.2 終局荷重(Ultimate Load)

表A 3.1において‘U’で表されているケースでは、独立して荷重の設定が可能である。このときに、前章における  $V_{ref}$ 、 $I_{ref}$  の影響が大きい。

以下に一例として、一般的な暴風時の風荷重に相当する DLC6.1 に関して述べる。

#### (1) 風速

この状態では、風車の発電は停止している状態に再現期間 50 年の風速が作用した場合であり、ヨー制御などは正常に機能している。(停電などにより、機能しない場合には DLC6.2 に該当する。)

#### (2) 風力係数

風力係数は風車の姿勢(ピッチ角、ヨー角)によって異なり、暴風時の姿勢は以下に示す風車の出力制御方式によって様々である。

##### ピッチ制御機

ブレードの角度を制御して、風速変化に応じて出力を制御する。一般的にカットアウト風速以上で抵抗が少ない角度(フェザーと呼ばれる)に固定して、ヨー角を風に対して正対するように風向に応じて変化させる。

あるいはフリーヨーなどで反対向きになるように、停電時を含めて荷重低減を実施している機種もある。

##### ストール制御機

ブレードの角度は発電状態によらず固定して、カットアウト風速以上においてはヨー角を風に対して 90 度方向に制御する。

この他にも、アクティブストール等の制御方式もあるが、詳細はメーカーに確認されたい。

#### (3) 解析法

これらの風車が暴風を受けたときの風荷重に関しては、表A 3.1における EWM(Extreme Wind Speed Model)として、以下の二通りの解析法が用いられている。

等価静的モデル(Steady extreme wind speed model)

風向偏差として $\pm 15^\circ$ を考慮する、いわゆる等価静的な荷重算定法である。

IEC 61400-1(2005)では以下の条件が示されている。

$$V_{e50}(z) = 1.4V_{ref}(z/z_{hub})^{0.11} \quad (A.6)$$

$$V_{e1}(z) = 0.8V_{e50}(z) \quad (A.7)$$

乱流モデル(Turbulent extreme wind speed model)

本手法では風向偏差として $\pm 8^\circ$ を考慮し、平均風速・風の乱れを想定した算定法である。

$$V_{50}(z) = V_{ref}(z/z_{hub})^{0.11} \quad (A.8)$$

$$V_1(z) = 0.8V_{50} \quad (A.9)$$

$$\sigma_1 = 0.11V_{hub} \quad (A.10)$$

### A 3.3 疲労荷重(Fatigue Load)

表A 3.1において‘F’で表されているケースでは、各設計荷重ケースで算出される荷重変動を耐用年数にわたって積分し、疲労荷重として評価することとなり、 $V_{ave}$ 、 $I_{ref}$ の影響が大きい。

また、通常発電などの風速の頻度分布他、以下の特殊状況を想定した疲労解析を実施する。

- ・ 停電の発生：20回/年間
- ・ 制御故障の発生：10回/年間
- ・ 起動及び正常停止：1,000回/年間(カットイン)、50回/年間(定格、カットアウト)

回転機械である風車においては、以下の原因による荷重変動を考慮する必要がある。

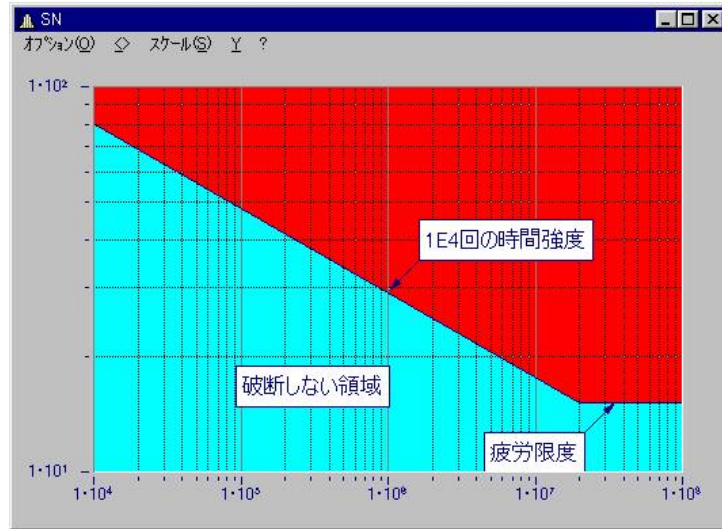
翼の回転成分による荷重変動

自然風の乱れによる荷重変動

近傍の風車後流による荷重変動

これらの確率分布と、翼の回転・近隣の風車の後流による影響を加味して、以下の方法で評価する。

疲労の評価として一般的に知られているマイナー則によるS-N線図の例を図A 3.2に示す。



図A 3. 2 S-N 線図の例

$$S = kN^{-\frac{1}{m}} \quad (\text{A.11})$$

両辺の対数をとると、下式のように変形できる。

$$\log(S) = -\frac{1}{m} \log(N) + \log(k) \quad (\text{A.12})$$

ここに、 $S$ は応力振幅、 $N$ は繰り返し回数、 $m$ 及び $k$ は材料に応じた定数である。

これにならい、荷重に関する下式の疲労等価荷重 (DEFL: Damage Equivalent Fatigue Load) による等価置換法が用いられる。

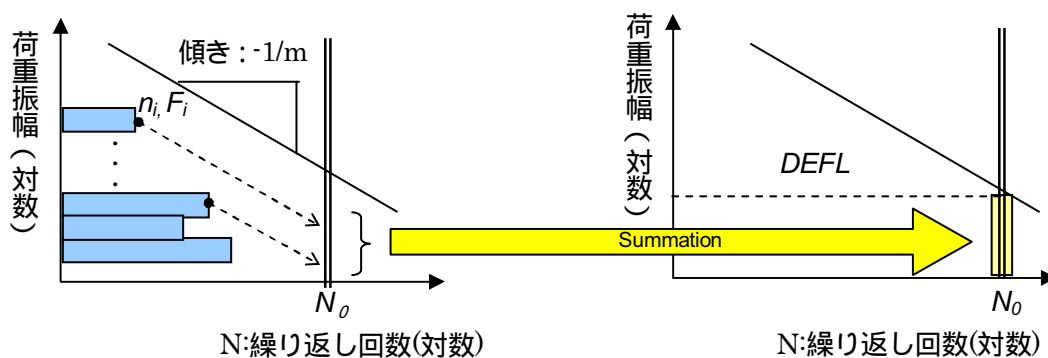
$$DEFL = \sqrt[m]{\frac{\sum_i F_i^m n_i}{N_0}} \quad (\text{A.13})$$

ここに、 $F_i$ は荷重レンジ $i$ における荷重振幅、 $n_i$ は $F_i$ のサイクル数、 $N_0$ は例えば耐用年数の総回転数 (例:  $20 \text{年} \times 365.25 \text{日} \times 24 \text{時間} \times 60 \text{分} \times 20 \text{rpm} = 2.1 \times 10^8$ ) を表す。

この式は以下のように変形すると、物理的な意味付けが明確になる。

$$DEFL^m \cdot N_0 = \sum_i F_i^m n_i \quad (\text{A.14})$$

概念的には図A 3. 3に示すように、各々の荷重変動を、 $N_0$ 回に相当する荷重変動に換算して加えたものがDEFLである。



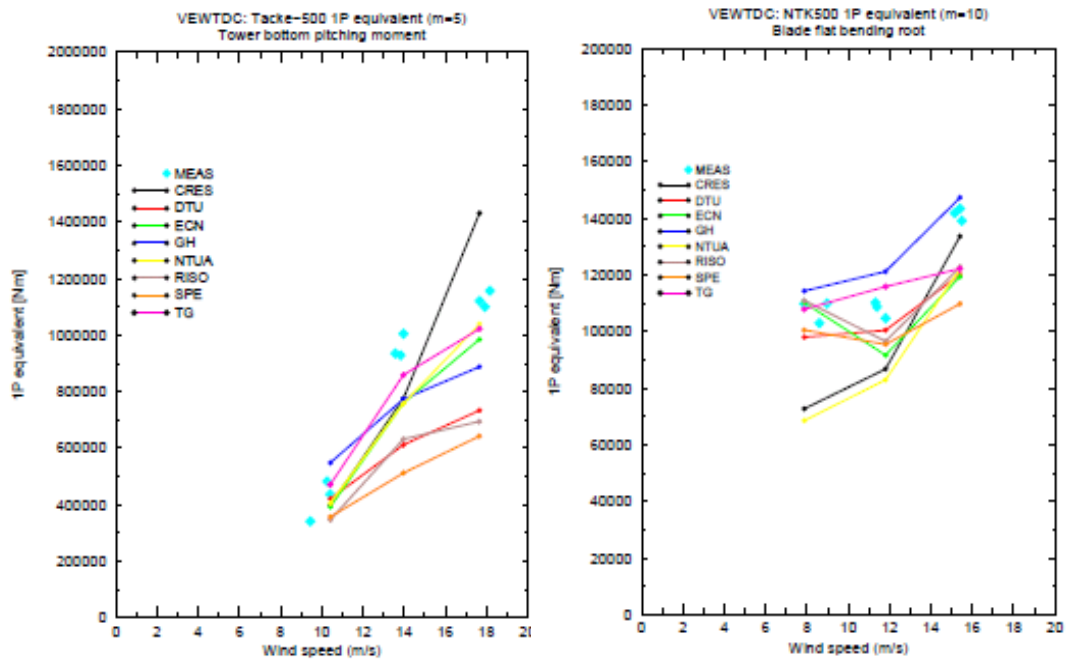
図A3.3 DEFLの概念

#### A3.4 空力弾性モデルによる荷重解析

風車の場合には種々の制御が関係するために、周波数軸の応答計算ではなく、空力弾性モデルによる時刻歴シミュレーションを行うのが一般的である。著名な空力弾性解析ソフトウェアを表A3.2に、シミュレーション及びその結果比較例を図A3.4に示す。

表A3.2 代表的な空力弾性解析ソフトウェア

開発者	ソフトウェアの名称
Netherlands Energy Research Foundation、ECN、NL	PHATAS
Center for Renewable Energy Source、CRES、Gr National Technical University of Athens、NTUA、Gr	Alcyone
Risoe、DK	HAWC
Garrad Hassan and Partners、GH、UK	Bladed
Danish Technical University、DTU、DK	Flex4
Stork Product Engineering、SPE、NL	Flexlast
Teknikgruppen AB、TA、S	Vidyn



図A3.4 実測値と空力弾性シミュレーション結果の比較例<sup>1)</sup>

以上に示すように、空力弾性シミュレーション手法によってもバラツキが見られ、後述する荷重に乗じる部分安全係数の意味合いが読み取れる。

<sup>1</sup> J.G. Schepers, J. Heijdra, K. Thomsen, T. Larsen, D. Foussekis, R. Rawlinson Smith, I. Kraan, B. Visser, S. Oye, H. Ganander, I. Carlen S. Voutsinas, M. Belessis, L. Drost, 'VERIFICATION OF EUROPEAN WIND TURBINE DESIGN CODES', ECN rx01059

#### A 4 部分安全係数

設計を行うには、荷重・材料強度などの確率分布を考慮する必要があり、これらの評価に際しては以下の部分安全係数を用いた限界状態設計法が採用されている。

荷重への部分安全係数： $\gamma_f$  (Partial Safety Factor for Loads)

$$F_d = \gamma_f F_k \quad (\text{A.15})$$

ここに、 $F_d$  は設計荷重、 $\gamma_f$  は荷重に乗じる部分安全係数、 $F_k$  は荷重の特性値

材料特性への部分安全係数： $\gamma_m$  (Partial Safety Factor for Materials)

$$f_d = \frac{1}{\gamma_m} f_k \quad (\text{A.16})$$

ここに、 $f_d$  は材料の設計値、 $\gamma_m$  は材料に乗じる部分安全係数、 $f_k$  は材料特性値

部位の重要度に応じた部分安全係数： $\gamma_n$  (Partial Safety Factor for Consequence of Failure)

Component 1: フェールセーフの有効な部材

Component 2: フェールセーフが有効でない構造部材

Component 3: フェールセーフが有効でない機械部品

これらの部分安全係数をもとに、下式で風車の安全性を判定している。

$$\gamma_f F_k \leq \frac{1}{\gamma_m \gamma_n} f_k \quad (\text{A.17})$$

具体的な安全係数の数値をまとめて表A 4.1に示す。

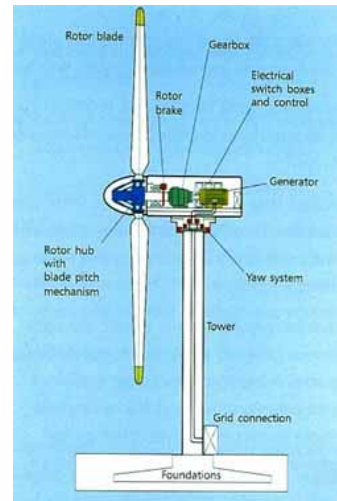
表A 4.1 部分安全係数 (IEC 61400-1(2005))

	$\gamma_f$	$\gamma_m$	$\gamma_n$
終局強度 安定性	Normal 1.35	$\geq 1.1$	Component class 1 0.9
	Abnormal 1.1	座屈 1.2	Component class 2 1.0
	Transportation 1.5	破断 1.3	Component class 3 1.3
疲労強度	1.0	$1.5 \sim 1.7$	Component class 1 1.0
		溶接鋼構造 $1.1 \sim 0.9$	Component class 2 1.15
		FRP 1.2	Component class 3 1.3
限界変形	Normal 1.35	1.1	Component class 1 1.0
	Abnormal 1.1		Component class 2 1.0
	Transportation 1.5		Component class 3 1.3

また、特に荷重に関する部分安全係数に関しては、観測あるいは解析による予測の精度が高いと認められる場合には、低減することが認められることが規格に述べられている。

## A 5 設計荷重

以上の結果を、右図に示すような風車の部位毎に整理し、最大/最小となる荷重値を用いて設計することとなる。(表A5.1、表A5.2参照。部位によって、最大となる荷重ケースが異なる場合もある。)



表A5.1 終局荷重の計算結果集計表(部位毎)例

		Load Case	F	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>	F <sub>res</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	M <sub>z</sub>	M <sub>res</sub>
F <sub>x</sub>	Max										
	Min										
F <sub>y</sub>	Max										
	Min										
F <sub>z</sub>	Max										
	Min										
F <sub>res</sub>	Max										
	Min										
M <sub>x</sub>	Max										
	Min										
M <sub>y</sub>	Max										
	Min										
M <sub>z</sub>	Max										
	Min										
M <sub>res</sub>	Max										
	Min										

表A5.2 疲労荷重の計算結果集計表(部位毎)例

		F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	M <sub>z</sub>
S-N 線図 の勾配	m <sub>1</sub>						
	m <sub>2</sub>						
	m <sub>3</sub>						
	m <sub>4</sub>						



## 付属書B (参考)

### 極値風速マップ及び極値風速データベースについて

#### B 1 極値風速マップ/データベース作成の目的

風車の選定にあたっては、風車ハブ高さにおける再現期間 50 年の風速が重要な指標となっている (IEC 規格など)。一方で、風車設置場所における風速の 50 年再現期待値を把握するための資料としては、建築基準法の基準風速および建築物荷重指針・同解説 (2004)<sup>1)</sup> (以下、建築物荷重指針 (2004) という) の基本風速マップがある (図 B 1.1) が、風車向けに特化されたものではなく、風車の立地が多い山間部の地形影響は別途考慮する必要がある。また、台風の襲来が多い我が国では、1~数年程度の現地観測から信頼できる 50 年再現期待値を直接求めるのは困難である。

こうした現状を踏まえ、極値風速マップ/データベースは、風車を対象としたハブ高さにおける極値風速  $V_{ref}$  を簡易に評価するための支援資料として、日本における 10 分間平均風速の 50 年再現期待値の分布を示すものである。

ハブ高さにおける極値風速  $V_{ref}$  は、建築物荷重指針 (2004) に定める基本風速  $U_0$  (地表面粗度区分の場合の地上 10m における 10 分間平均風速の再現期間 100 年に対する値) に、再現期間換算係数  $k_{rW}$ 、地形による風速の割増係数  $E_{tV}$ 、平坦と見なせる地点におけるハブ高さでの高度補正係数  $E_{pV}(P)$  を乗じたものとして算定することを基本的な考え方としている。ただし、 $P$  は粗度区分である。

$$V_{ref} = U_0 \cdot k_{rW} \cdot E_{tV} \cdot E_{pV}(P) \quad (B.1)$$

$$k_{rW} = 0.63 (U - 1) \ln(r) - 2.9 \quad U \geq 3.9$$

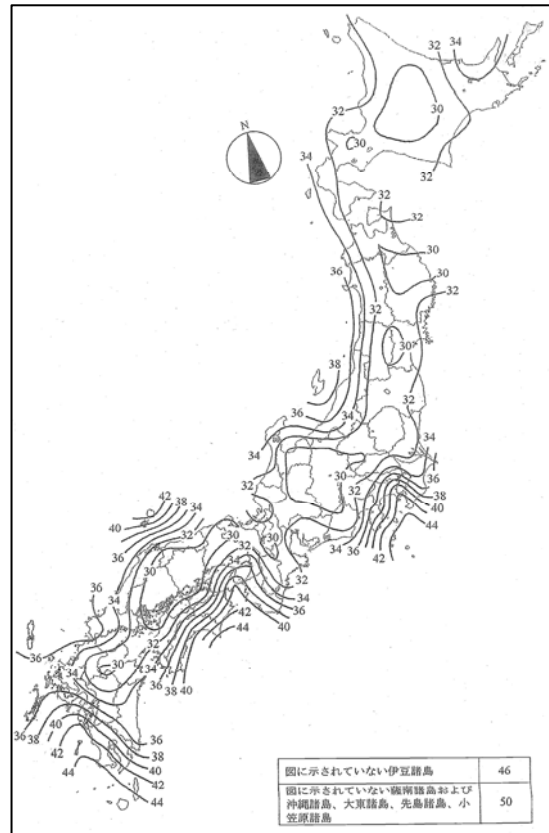
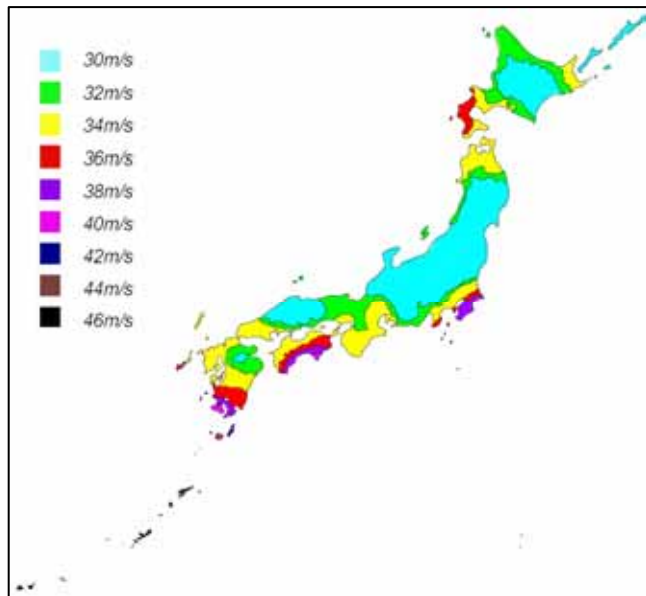
$$U = U_{500} / U_0$$

ここで、

$r$  : 再現期間=50(年)

$U_{500}$  : 建築物荷重指針 (2004) に定める地表面粗度区分の場合の地上 10m における 10 分間平均風速の再現期間 500 年に対する値

極値風速マップ/データベースの作成にあたっては、基本風速  $U_0$ 、再現期間換算係数  $k_{rW}$  は建築物荷重指針 (2004) に定められた値および式を用い、地形による風速の割増係数  $E_{tV}$ 、高度補正係数  $E_{pV}(P)$ 、粗度区分  $P$  は、気象モデルによる気流解析結果にもとづいて設定 (鉛直分布、内挿関数) している。



図B 1.1 既存の基準・指針で示されている極値風速分布

左図：建築基準法（再現期間50年） 右図：建築物荷重指針（2004）（再現期間100年）

## B 2 既存の作成例

極値風速の地域的な分布を示した例としては、建築基準法の基準風速、建築物荷重指針（2004）の基本風速マップ、（財）電力中央研究所の送電鉄塔の耐風設計向けの風向別基本風速マップが挙げられる（表B 2.1）。

長期観測データによって得られる極値風速は、気象官署における点のデータであるため、分布図のような面のデータを作成するにあたっては、各気象官署間の領域に対して値の内挿が必要となる。建築物荷重指針（2004）および送電鉄塔の耐風設計向け風向別基本風速マップは、そのような値の内挿で作成されており、前者は気象官署の極値風速を単純内挿したマップ、後者は大規模地形の影響を考慮した数値流体シミュレーション結果を気象官署間の内挿に用いてマップ化したものである。

極値風速マップ/データベースの作成にあたっては、後者の知見をもとに気象モデルによる気流解析結果を内挿関数として利用した。

表 B 2.1 地域性を考慮した極値風速の設定基準・指針の例と極値風速マップ/データベースとの比較

	極値風速の形式	台風シミュレーション	風向の考慮	データの形式	任意高度の風速算出法	小地形への対応
建築物荷重指針 (2004)	地表面粗度区分の地上 10m における 100 年および 500 年再現期待値	あり 台風時・非台風時の極値分布を合成	気象官署近傍では官署ごとに定めた 8 方位の風向係数から風向別の基本風速を算出可能	分布図	基本風速に以下の値を乗ずる。 $1.7 \times (Z/Z_0)$ Z: 基準高さ Z <sub>0</sub> : 粗度区分により決定	地形形状に応じて割り増し係数を設定
送電鉄塔の耐風設計向け風向別基本風速マップ	地表面粗度区分の地上 10m における風向別 150 年再現期待値 ただし全風向の 50 年再現期待値が上限	あり 高温季(4~11 月)に対して台風シミュレーション結果を利用	8 風向についてマップを作成	2km メッシュ値	同上	地形形状に応じて割り増し係数を設定 局地風による割り増しもあり
建築基準法	地表面粗度区分の地上 10m における再現期間が概ね 50 年である 10 分間平均値	なし	なし	郡、市町村単位	同上 ただし粗度区分は 4 区分	なし
極値風速マップ	地上高 30、50、70m における 50 年再現期待値		なし	1km メッシュ分布図	マップ各高度の値から内挿(粗度影響は考慮済み)	別途考慮
極値風速データベース	地上高 250m における 50 年再現期待値	荷重指針値を採用	8 風向についてマップを作成	1km メッシュ値 (特に図化しない)	以下から利用者が選択 ・CFD の結果を利用 ・既存指針等(荷重指針、IS04354 etc.)の算定式に従って算出。	別途考慮

### B 3 極値風速マップ/データベースの内容

#### B 3.1 極値風速マップ/データベースの概要

風車の立地を鑑みると、極値風速マップ/データベースは主に山間部のような風が地形の影響を大きく受ける地域で利用されることが想定されることから、地形による影響が考慮されていることが望ましい。よって、送電鉄塔の耐風設計向け風向別基本風速マップの考え方<sup>2)</sup>を採用し、作成する資料は地形の影響を考慮した極値風速分布とした。

また、利便性を考慮すると、提供する資料はわかりやすく容易に扱えることが望ましい。一方で、極値風速マップ/データベースでは表せない局所的な起伏を考慮する場合など、二次的な解析に利用されることも考えられる。よって、本ガイドラインでは極値風速を示す資料として、極値風速分布の概略が把握できる「極値風速マップ」と詳細な検討を加える利用者向けの「極値風速データベース」の2種類のデータを提供する。このデータは、いずれも全国を平面的に1kmメッシュで網羅したものであり、1kmメッシュの平均標高データで表現されるような地形の影響と国土数値情報の土地利用区分に基づく地表面粗度の影響を考慮したものである。より小スケールの地形の影響については、必要に応じて利用者が別途検討するものとする。

以上を踏まえ、作成する極値風速マップ/データベースが備えるべき条件は以下のとおりである。

気象官署位置においては、建築物荷重指針（2004）に定める基本風速  $U_0$  を基礎データとして利用すること。

気象官署間の任意地点においては、風上側の数 km スケール以上の大きな地形による増速・減速等の効果が適切に反映されていること。

「極値風速マップ」は、全風向で最大の極値風速をプロットしたものの、「極値風速データベース」は、8 風向についての極値風速が用意されていること。

#### B 3.2 極値風速マップ

##### 1) 仕様

- ・ 10 分間平均風速の再現期間 50 年に対する極値
- ・ 1km メッシュの平均標高データに基づく地形影響を考慮
- ・ 地上高 30m、50m、70m の 3 高度（気流解析による風速鉛直分布から算出）
- ・ 国土数値情報の土地利用区分に基づく地表面粗度の影響を考慮
- ・ 分布が把握できるよう分布図の形で提示

##### 2) 用途

- ・ 極値風速分布の概略が把握できるマップ

##### 3) 設定期由

極値風速マップを地上高 30、50、70m の 3 高度、地表面粗度の影響を考慮したマップとした理由は以下のとおりである。

極値風速マップは概略把握用のマップであることから、利便性やわかりやすさが重要であり、利用者による補正ができるだけ必要ないようなマップが望ましい。

日本における風車の立地は、山間部のような比較的複雑な地形上が多く、風速の鉛直分布が必ずしもべき乗則に従うとは限らないため、簡易式による高度補正でハブ高さの風速を求める方法ではなく、ハブ高さ付近の風速を直接示す方法を採用する。

粗度分布を考慮した気流解析は、風況調査では一般的に用いられる手法であり、風上側の粗度分布の影響を客観的に取り入れることができる。

### B 3.3 極値風速データベース

#### 1) 仕様

- ・ 風向別の 10 分間平均風速の再現期間 50 年に対する極値
- ・ 1km メッシュの平均標高データに基づく地形影響を考慮
- ・ 地上高 250m の値
- ・ 国土数値情報の土地利用区分に基づく地表面粗度の影響を考慮
- ・ 1km メッシュマップ
- ・ データベースとして数値情報の形で提供

#### 2) 用途

- ・ 詳細な検討を加える利用者向けの極値風速データベース

#### 3) 設定理由

極値風速データベースを風向別極値風速および上空風の形で提供する理由は以下のとおりである。

ある地点における地形影響は、風上側の地形や粗度分布に大きく左右される。よってその評価には風向ごとの検討が必要となるため、風向別の極値風速を提供する。

CFD 等で現地の粗度分布を考慮した詳細な解析を実施する場合を想定し、提供する極値風速はできる限り粗度の影響を排した上空の極値風速を提供する。

極値風速値を上空風で与えることにより、利用者が自由に風速の鉛直分布を設定できるものとする。

#### B 4 作成方針

極値風速マップ/データベースは、以下の方針で作成した。

送電鉄塔の耐風設計向け風向別基本風速マップの考え方<sup>2)</sup>を採用し、気象官署間の内挿に地形を考慮した風向別の数値シミュレーションによる気流解析結果を内挿関数として利用する。

極値風速マップ/データベースは、気象官署での観測値を統計処理して求めた極値風速をベースとするが、気象官署における極値風速は建築物荷重指針(2004)で詳細に解析されている<sup>2)</sup>ことから、気象官署位置の値は建築物荷重指針に定める基本風速  $U_0$  を利用する。

建築物荷重指針(2004)による気象官署の極値風速は、地上高 10m 粗度区分 相当の風速として示されている。高度補正においては、気流解析結果の風速鉛直分布から算出したべき指数・粗度区分を用いて、地上高 10m の値である基本風速マップ値を建築物荷重指針(2004)に示されている方法で地上高 250m の風速に換算し、マップへの内挿を行う。

「極値風速マップ」は、地上高 30、50、70m の各高度における 8 風向の極値風速のうち、最大値をプロットして作成する。

「極値風速データベース」は地上高 250m の風向別極値風速として作成する。

B 5 作成手順

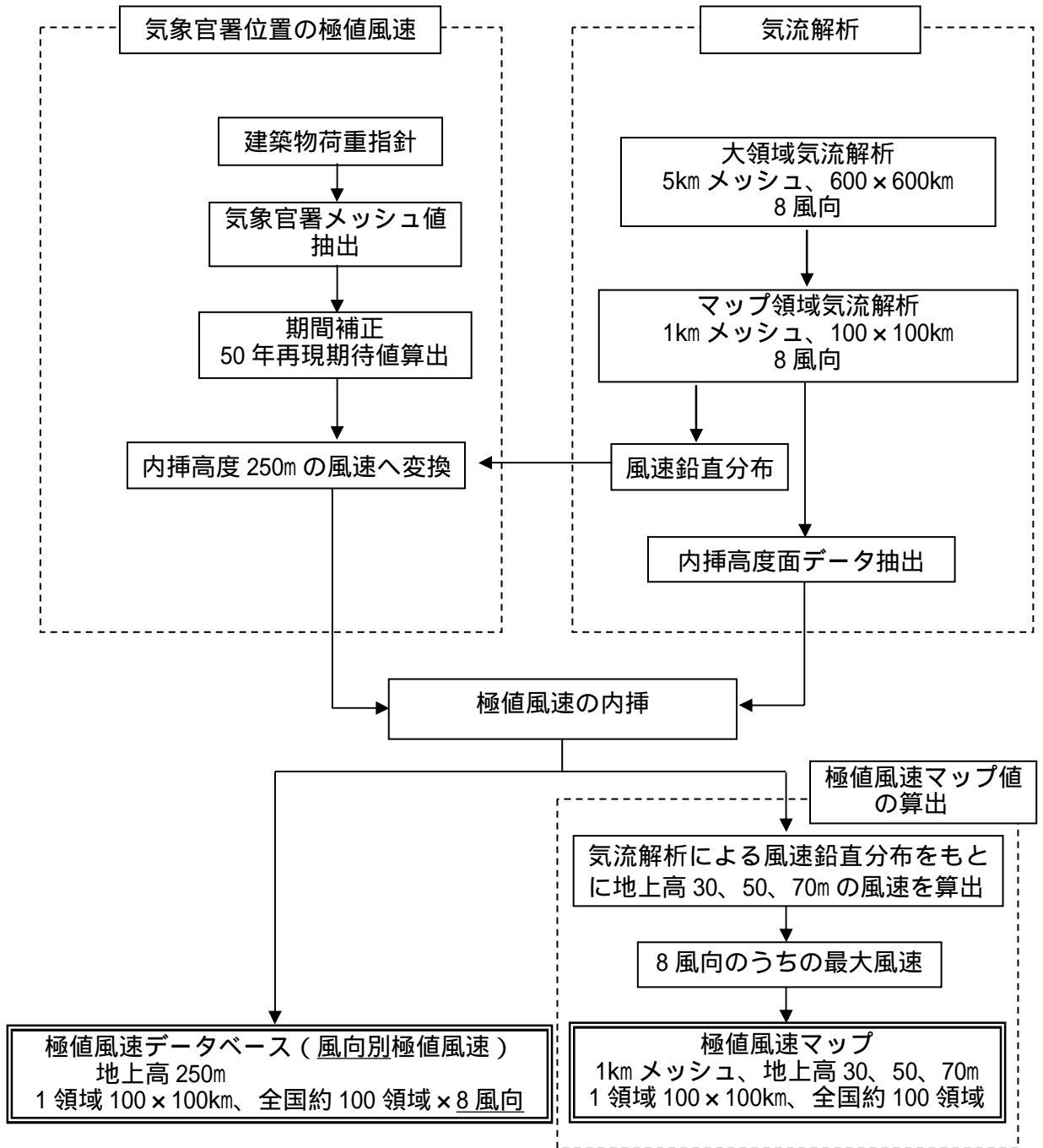
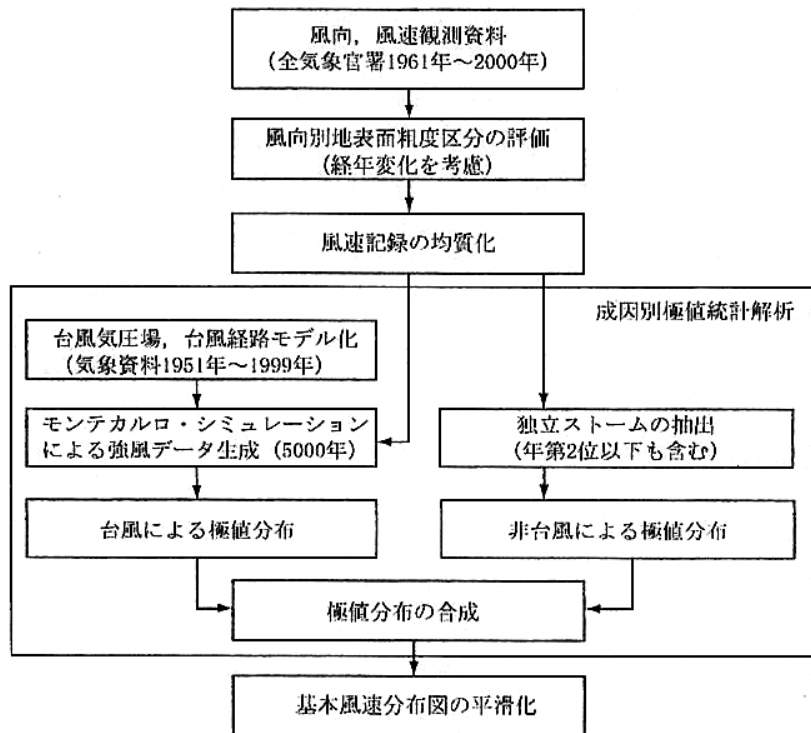


図 B 5.1 極値風速マップ/データベース作成の流れ



### B 5.1 気象官署位置の極値風速

建築物荷重指針(2004)では1961~2000年の全気象官署における長期観測データをもとに詳細な極値解析が行われている。よって、建築物荷重指針(2004)で解析された気象官署位置の極値風速を利用してマップ化を行った。建築物荷重指針(2004)における極値風速の解析方法の詳細は「建築物荷重指針・同解説(2004)」を参照されたい。建築物荷重指針(2004)で示されている基本風速分布図の概要は図B 5.2のとおりである。



図B 5.2 基本風速分布図の作成フロー

出典：建築学会「建築物荷重指針・同解説(2004)」

- ・ 地表面粗度区分 の地上10mの10分間平均の極値風速分布
- ・ 基本は再現期間100年(再現期間補正用に再現期間500年のデータあり)
- ・ 気象官署間は線形内挿

極値風速マップ/データベース作成においては、建築物荷重指針(2004)の基本風速マップから気象官署位置における風速の50年再現期待値を得るため、建築物荷重指針(2004)に示された方法に従って、次に示す処理を行った。

(1) 気象官署メッシュ値抽出

建築物荷重指針(2004)の500年及び100年再現期待値の基本風速マップから気象官署位置の値を抽出する。

(2) 期間補正(50年再現期待値算出)

500年再現期待値( $U_{500}$ )及び100年再現期待値( $U_{100}$ )から50年再現期待値( $U_{50}$ )を算出する。

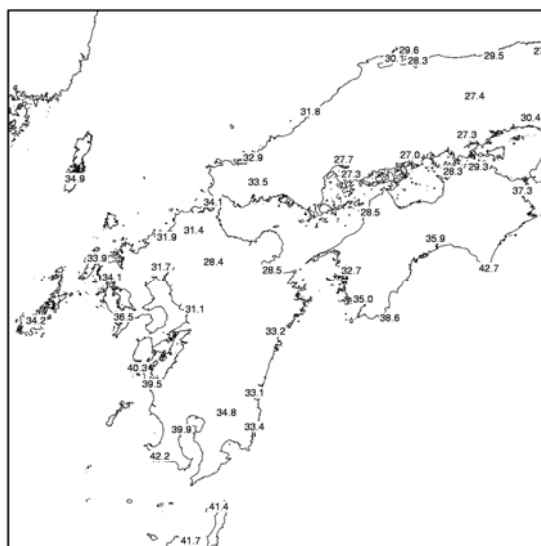
$$U_{50} = k_{rw} \cdot U_{100}$$

$$k_{rw} = 0.63 (U_{100} - 1) \ln(r) - 2.9 U_{100} + 3.9$$

$$U_{100} = U_{500} / U_{100}$$

$k_{rw}$ : 再現期間換算係数  $r$ : 求める再現期間=50(年)

もとなる地上高10mの100年再現期待値は下限を30m/sとして扱うことになっているが、ここでは下限を設けずそのまま使用している。50年再現期待値の最小値は27m/s。図B5.3に気象官署位置での50年再現期待値を算出した例を示す。



図B5.3 極値風速マップ/データベースに使用する気象官署位置の極値風速の例  
地表面粗度区分 の地上10m

(3) 上空の内挿高度の風速へ変換

建築物荷重指針(2004)に示されている基本風速は地表面粗度区分の地上高10mの風速に均質化された値であるため、気流解析結果を用いて内挿する場合、内挿高度での風速に変換する必要がある。

基本風速から内挿高度の風速への変換方法として、図B5.4に示すように官署位置に相当するメッシュ(以下、官署メッシュと略す)の気流解析結果プロファイルから、べき指数を最小二乗法で算出(高度35m~1000m)対応する現地粗度区分及び $Z_0$ を連続量として算出し、建築物荷重指針(2004)の式に準拠して、内挿高度の風速へ変換した。ここで、内挿高度を250mを超えて設定すると粗度区分に応じて建築物荷重指針(2004)の式の範囲外となる(粗度区分の場合250m、の場合350m、の場合450mを超えると建築物荷重指針(2004)の考え方の範囲外)ことから、内挿高度は250mに設定した。

$$U_z = 1.7U_{10} \cdot (Z/Z_0)^n$$

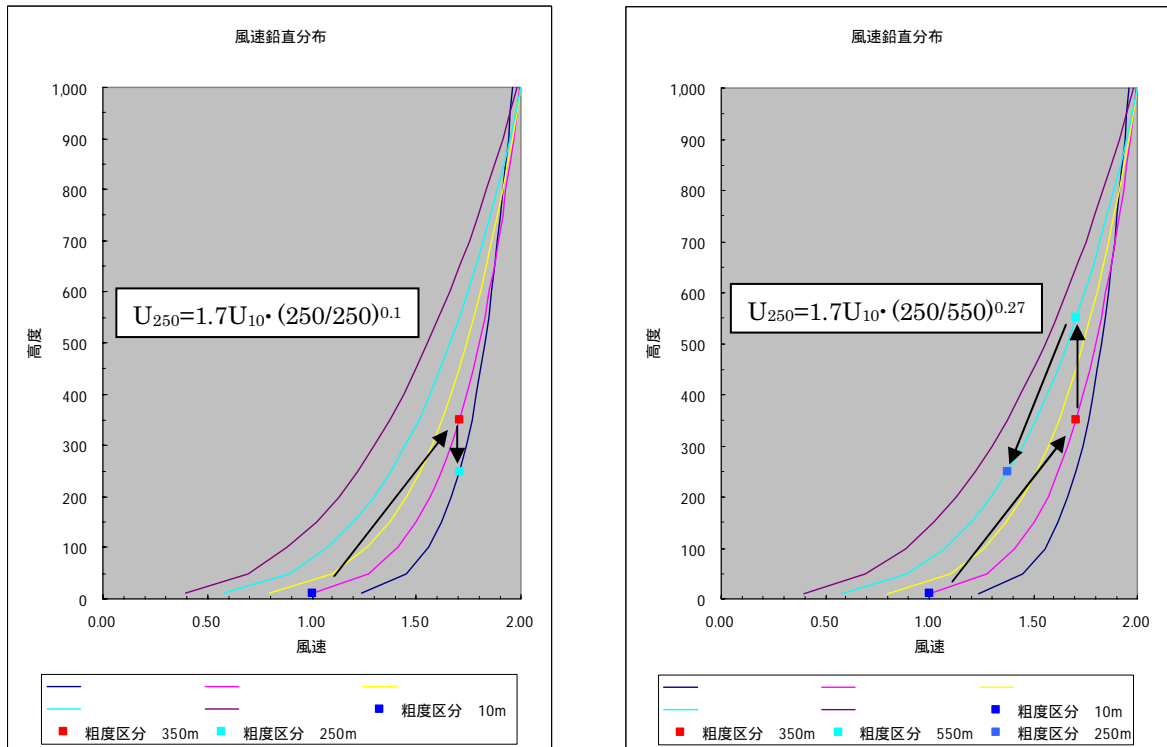
ここで、 $U_z$  : 高度Zmにおける風速

$U_{10}$  : 粗度区分 地上高10mの風速

Z : 内挿高度(250mに設定)

n : 気流解析結果プロファイルから算出したべき指数

$Z_0$  : 上記nから算出した粗度区分に対応する上空風高度



図B5.4 気象官署位置の極値風速を内挿高度の風速へ変換する方法の概念図

(左:現地粗度区分 相当(内挿高度250m) 右:現地粗度区分 相当(内挿高度250m))

## B 5.2 気流解析

気象官署位置の極値風速を内挿するための分布(内挿関数)を作成するため、気象モデルによる気流解析を実施した。気流解析方法の概要を表B 5.1に示す。気流解析の計算領域は、極値風速マップの仕様にあわせて1kmメッシュ、100×100kmの範囲とし、約100領域で一部の島嶼(小笠原諸島など)を除く日本全国をカバーする(図B 5.5(1))。各領域で8風向について気流解析を行うが、流入させる風の鉛直分布は領域の上流側の状況に依存するため、5kmメッシュ600×600kmの大領域気流解析による予備計算を実施し、その結果をネスティングすることでマップ領域の気流解析を行った(図B 5.5(2))。なお、気流解析は強風時を想定したものであることから、大気の成層状態は中立としている。

また、利便性や山間部の複雑地形上では簡易に風速の鉛直分布を求めることができないことを考慮し、粗度区分による補正の必要がないよう国土数値情報による土地利用データに基づく粗度長分布を取り入れた気流解析を行った。

表B 5.1 気流解析方法の概要

項目	大領域	マップ領域
方程式系	非圧縮・静水圧	
鉛直座標系	Z*座標系 10、35、75、140、240、400、650、1000m、1000mより上400m間隔	
乱流過程	レベル2.5乱流クロージャーモデル	
水平格子間隔	5km	1km
計算領域	水平：600×600km 鉛直：5200m(18層)	水平：100×100km 鉛直：5200m(18層)
地表面粗度	国土数値情報の土地利用データをもとに粗度長設定	
入力風速	高度10mで約26m/s (高度3500mで地衡風速60m/s) 鉛直分布は1/7乗則	大領域からネスティング

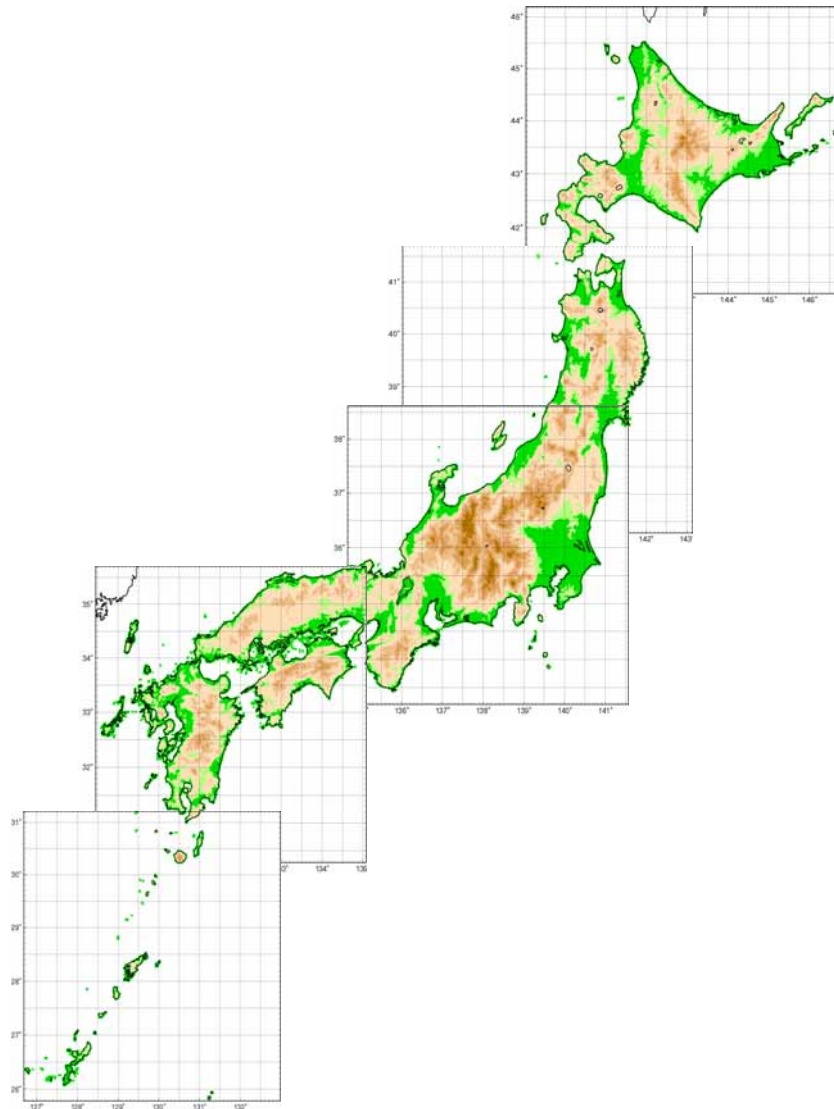


図 B 5 . 5 (1) 極値風速マップ・データベース計算領域の地形

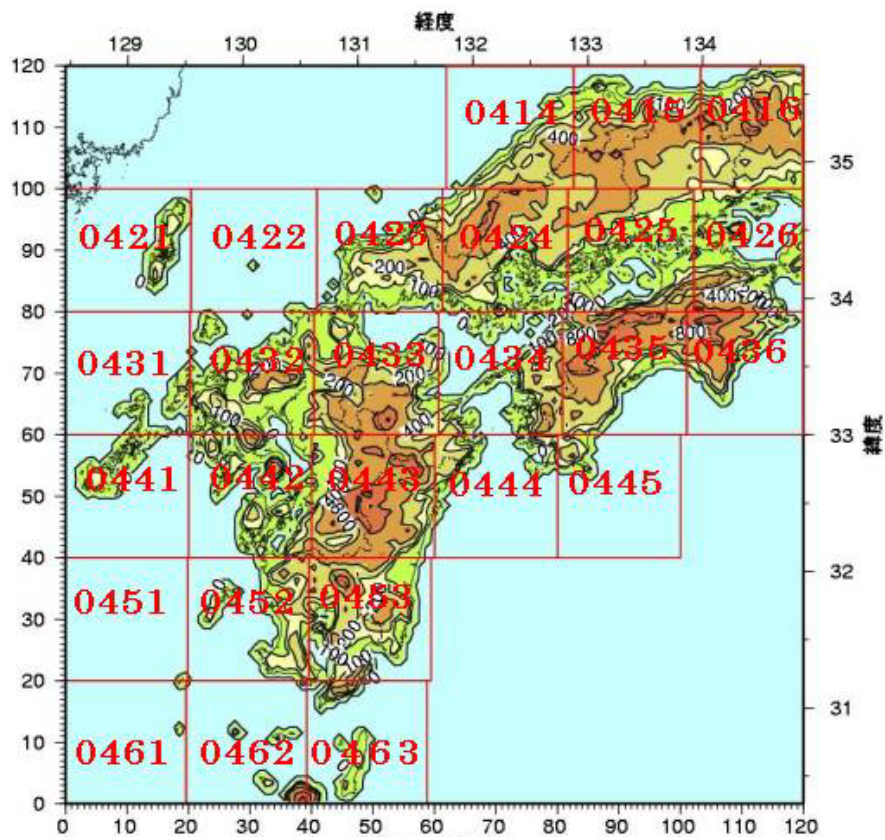


図 B 5 . 5 (2) 気流解析における大領域とマップ領域の例  
 図の外枠が大領域、赤枠がマップ領域を表す。

### B 5.3 極値風速の内挿

気流解析結果による風速分布を内挿関数として利用し、各気象官署の極値風速をマップに内挿した。内挿にあたっては、以下の方針で実施した。

- ・気流解析結果は気象官署間の風速分布の形状を示すものであって、その絶対値をそのまま使用するものではない。
- ・官署メッシュの値はB 5.1 節で求めた気象官署における極値風速と同じ値とする。
- ・送電鉄塔の耐風設計向け風向別基本風速マップと同様に、気流解析値の分布を官署メッシュの極値風速に合わせるように調整する。具体的な手法は気象庁のレーダアメダス合成図作成における考え方<sup>3)</sup>を採用し、官署メッシュの気流解析値と真値とする極値風速との風速比を気流解析値に対する補正係数とみなし、その補正係数を官署メッシュ以外のメッシュに内挿する手法とする（図B 5.6、図B 5.7 参照）。

極値風速の内挿手順は以下のとおり。

官署メッシュについて、内挿高度における気流解析値と極値風速の風速比をとり、そのメッシュにおける補正係数  $r_i$  とする。

$$r_i = \frac{V_i}{V_{simi}}$$

$V_i$ ：ある官署メッシュにおける極値風速

$V_{simi}$ ：ある官署メッシュにおける気流解析値

官署メッシュ以外のメッシュについては、ある半径（以下、影響半径）以内にある官署メッシュの補正係数を距離重み付き平均で算出する。あるメッシュにおける補正係数  $r_{(x,y)}$  を以下の式で求める。

$$r_{(x,y)} = \frac{\sum \left\{ r_i / (1 + d_i^2) \right\}}{\sum \left\{ 1 / (1 + d_i^2) \right\}}$$

$r_i$ ：影響半径内にある  $i$  番目の官署メッシュにおける補正係数

$d_i$ ：影響半径内にある  $i$  番目の官署メッシュと当該メッシュとの距離 (km)

各メッシュで算出された補正係数を気流解析値に乘じる。官署メッシュでは、（極値風速）/（気流解析値）が補正係数となるので、算出された値は極値風速と同じ値となる。

風の局地性を考えると、影響半径はできるだけ小さい方が望ましい。しかし、影響半径を狭くしすぎると影響半径内に入る気象官署がないメッシュが生じてしまう。一部地域を対象とした試行の結果、そのようなケースが生じないようにするために、影響半径として 90km としている。なお、影響半径内に気象官署が 1 ヶ所以下しかない場合は、影響半径にかかわらず最も近い 2 ヶ所の気象官署の値を用いて内挿している。

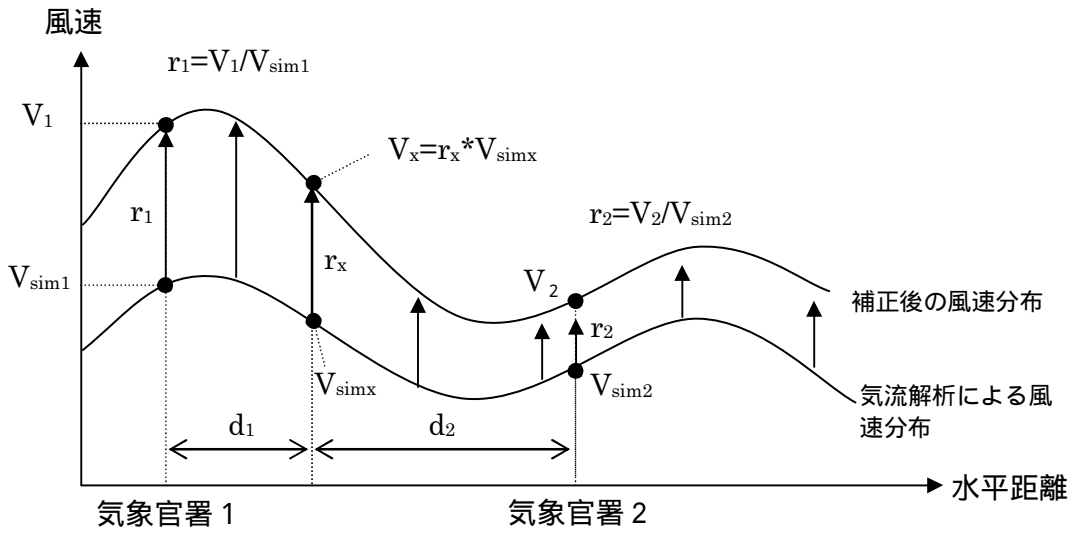


図 B 5.6 気流解析結果を用いた極値風速の内挿方法の概念図

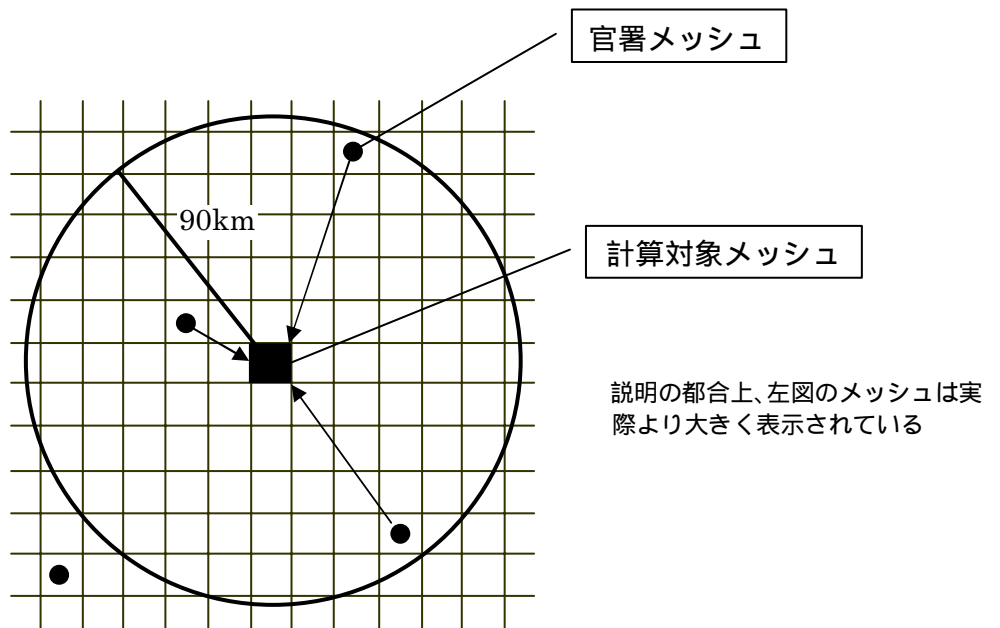


図 B 5.7 気象官署位置における極値風速のマップへの内挿方法

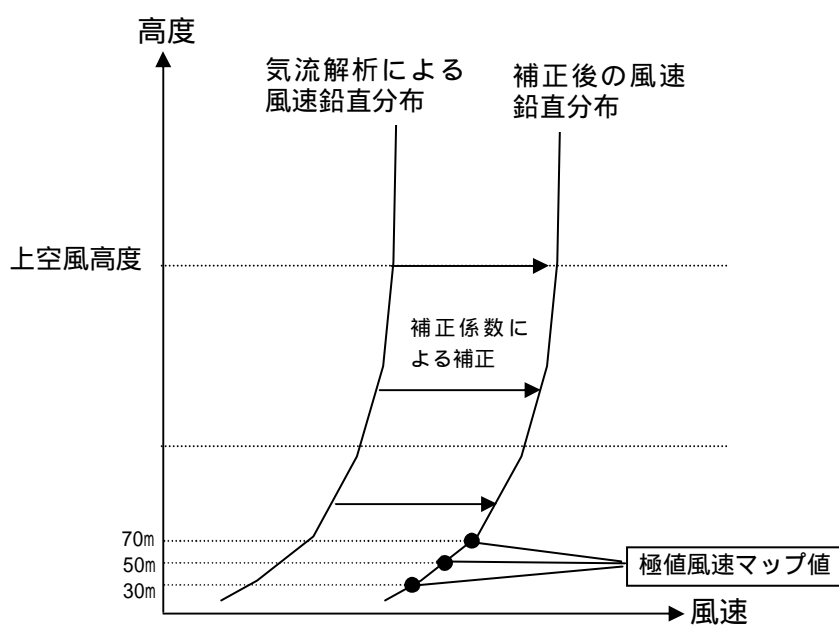
(注) 各気象官署位置における極値風速と気流解析値の比を距離重み付き平均で内挿し、求められた各メッシュ上の補正係数を気流解析値に乗じて、各メッシュの極値風速とする。



#### B 5 . 4 極値風速マップ値の算出

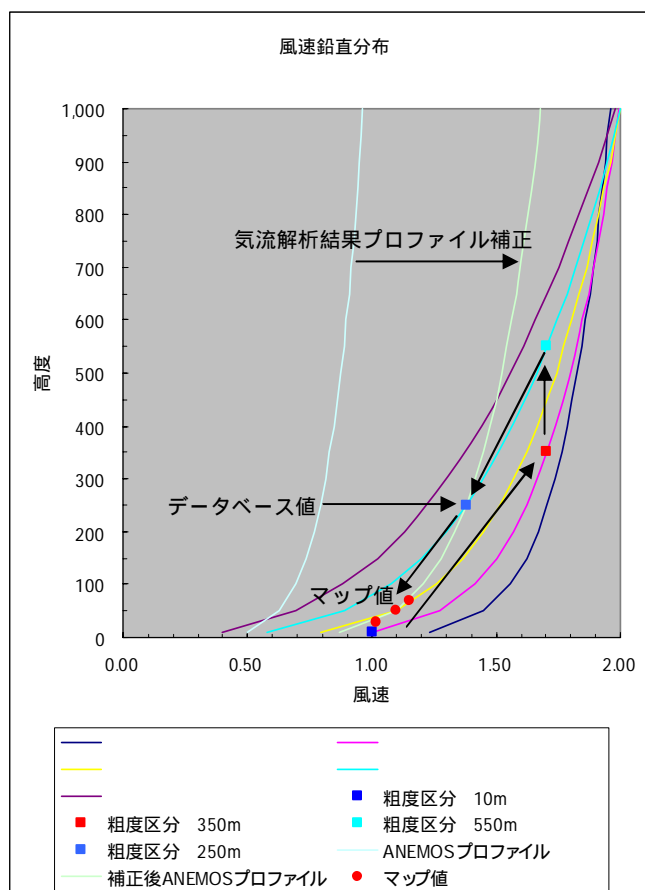
内挿高度面で内挿された値をもとに、極値風速マップ値を算出した。なお、極値風速データベース値はB 5 . 3 節で得られた値そのものである。

極値風速マップ値は、図B 5 . 8 に示すとおりB 5 . 3 節の内挿で使した補正係数により気流解析値を補正した風速鉛直分布に基づいて算出し、さらに各風向の最大値をとったものを極値風速マップ値とした。



図B 5 . 8 極値風速マップ値算出の概念図  
(注) 極値風速マップ値は、全風向の最大値をとる。

官署メッシュの気流解析結果プロファイルから、べき指数を最小二乗法で算出（高度 35m ~ 1000m）、対応する現地粗度区分及び ZG を連続量として算出し、建築物荷重指針（2004）の式に準拠して、内挿高度の風速へ変換した場合の気象官署位置における極値風速マップ値 / データベース値の算出過程の概念図は、**図 B 5 . 9** に示すとおりである。

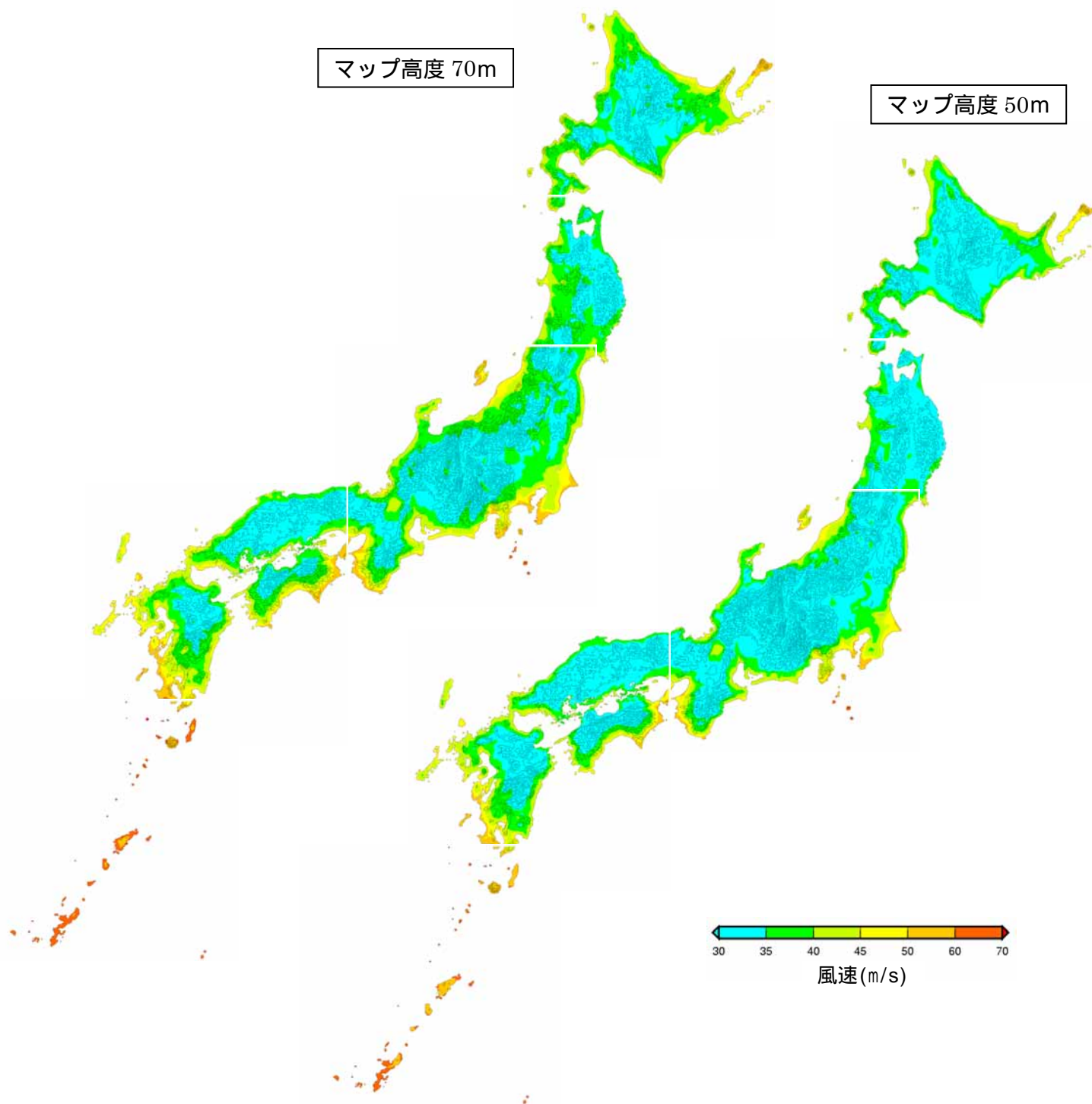


**図 B 5 . 9** 官署位置における極値風速マップ値 / データベース値の算出過程の概念図

## B 6 極値風速マップ

### B 6.1 極値風速マップ

極値風速マップを図B 6.1 (1)～(2)に示す。



図B 6.1 (1) 極値風速マップ

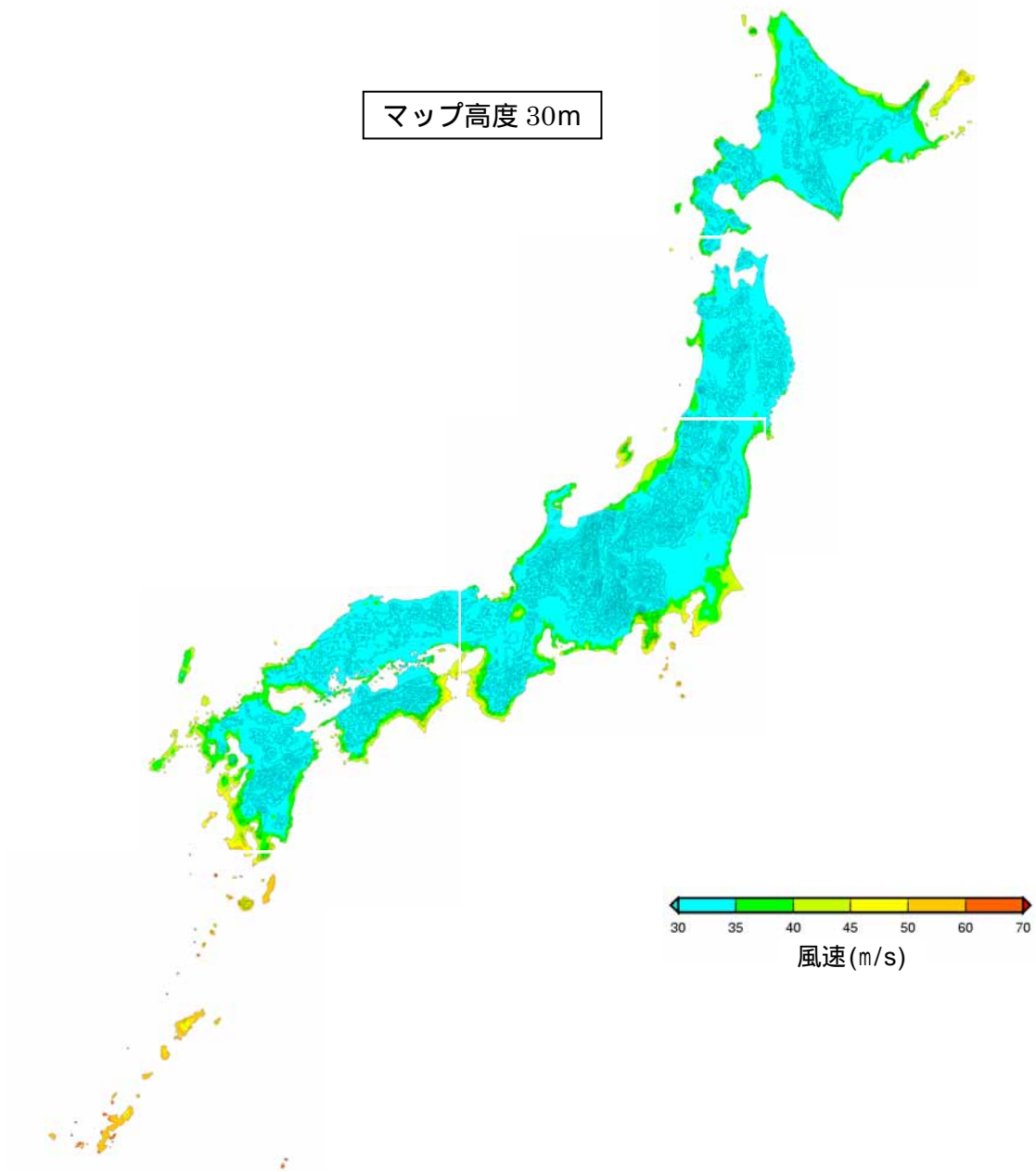


図 B 6 . 1 ( 2 ) 極値風速マップ

## B 6.2 建築物荷重指針 (2004) との比較

極値風速マップ (高度 70m) と建築物荷重指針 (2004) の  $U_0$  の値を地上高 70m に高度補正したとの比較を図 B 6.2 に示す。

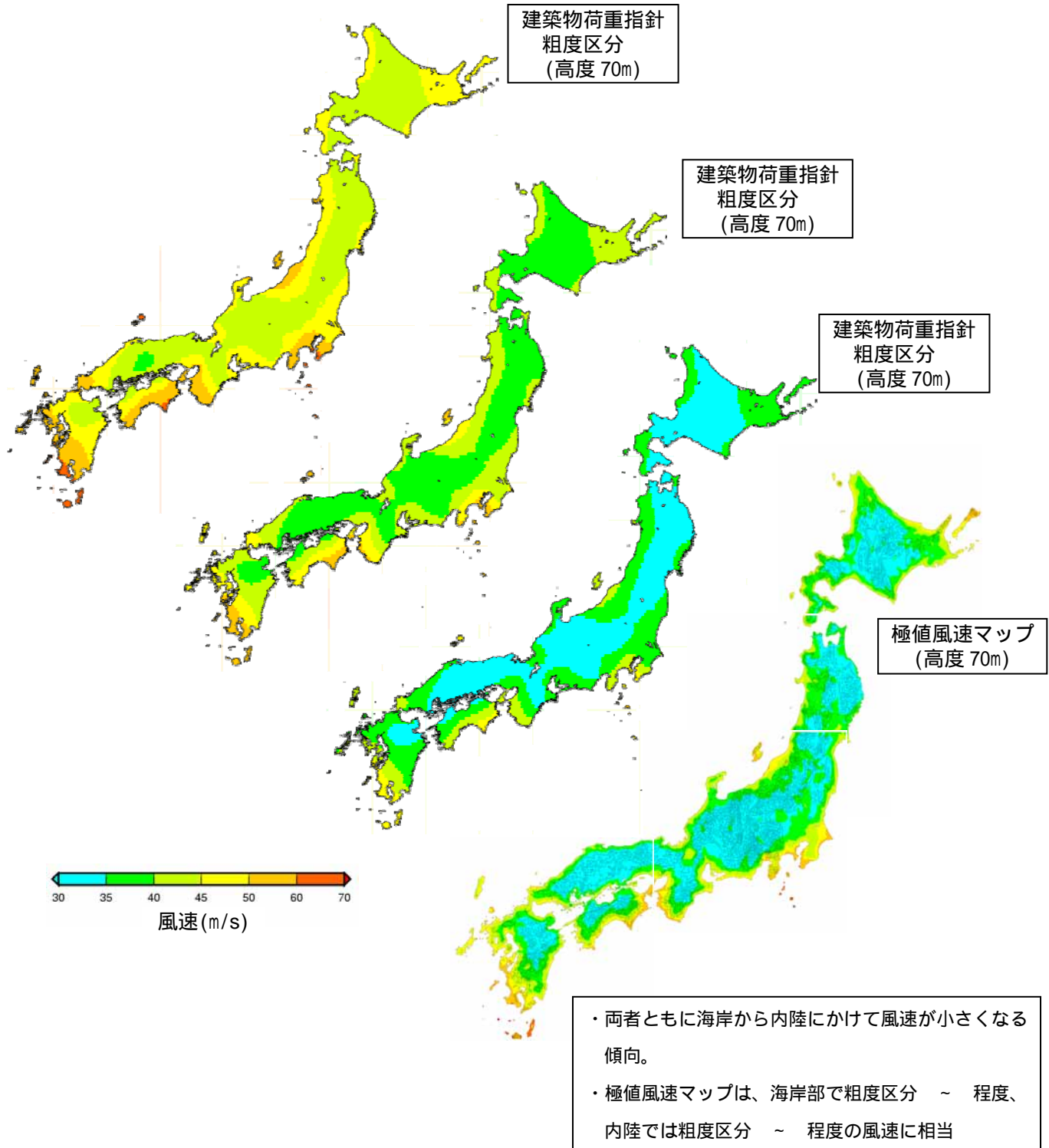


図 B 6.2 地上高 70m に高度補正した建築物荷重指針値との比較

## B 7 極値風速マップの検証

### B 7.1 風況観測地点における検証

極値風速マップについて、気象官署風速の極値統計解析値および気象官署と風況観測地点の相関解析結果から得られた極値風速と比較した結果は表B 7.1に示すとおりである。なお、表中の極値風速マップ内挿値は、風況観測タワー高さに応じてマップ値を高さ方向に内挿して算出した。

地形の複雑度が大きい風況観測地点(室戸、鳥取、東伊豆)では、極値風速マップ値は相関解析値と比較して小さくなっており、地形の複雑度が中および平坦の風況観測地点(佐敷、中種子、室蘭)では、極値風速マップ値は相関解析値と比較して大きくなっている。

表B 7.1 気象官署との相関関係を用いて推定した50年再現期待値との比較

風況観測地点	佐敷	室戸	鳥取	東伊豆	室蘭	中種子
地形の複雑度	中	大	大	大	平坦	中
近傍気象官署	沖縄	室戸岬	鳥取	網代	室蘭	種子島
気象官署 極値風速	39.5 m/s	62.0 m/s	25.2 m/s	31.6 m/s	28.1 m/s	39.8 m/s
相関係数	0.78	0.91	0.68	0.65	0.81	0.72
回帰係数	1.435	0.969	1.799	1.862	1.257	0.961
観測地点 相関解析値	57 m/s	60 m/s	45 m/s	59 m/s	35 m/s	38 m/s
極値風速マップ 内挿値	66 m/s	49 m/s	35 m/s	47 m/s	42 m/s	55 m/s

注：気象官署データの極値統計解析期間は、1961年～2006年である。

地形の複雑度が中および平坦の地点について、相関解析値と建築物荷重指針（2004）の  $U_0$  の値を現地粗度区分に応じて風況観測タワー高さに変換した極値風速および極値風速マップ値と比較した結果は、表 B 7. 2 に示すとおりである。

建築物荷重指針（2004）の  $U_0$  の値から算出した極値風速と極値風速マップ内挿値は概ね同程度の風速であり、ともに相関解析値よりも大きめの推定値となっている。

**表 B 7. 2 建築物荷重指針の基本風速マップから算定した 50 年再現期待値との比較**

風況観測地点	佐敷	室蘭	中種子
地形の複雑度	中	平坦	中
粗度区分	・		
相関解析値	57 m/s	35 m/s	38 m/s
建築物荷重指針（2004）から算出した極値風速 （小地形影響考慮せず）	69・61 m/s	39 m/s	58 m/s
極値風速マップ内挿値	66 m/s	42 m/s	55 m/s

## B 7.2 気象官署位置における比較

官署メッシュでは、極値風速マップ値（高度 70m）は、建築物荷重指針（2004）に基づく 50 年再現期待値を疑似突風率から算出されたべき指数・粗度区分を用いて地上高 70m の風速に換算した値と比較して（図 B 7.1）、疑似突風率から求めた粗度区分が（1~1.49）の場合は 0~-10m/s 程度、（1.5~2.49）の場合は -10~+10m/s 程度、（2.5~3.49）の場合は -5~+10m/s 程度、（3.5~）の場合は 0~+10m/s 程度の差が生じている。

この差は、極値風速マップ/データベース作成時において、高度補正係数  $E_{pv}(P)$  を気流解析結果の風速鉛直分布から算出していることによる手法の差の結果であって、誤差を示すものではない。

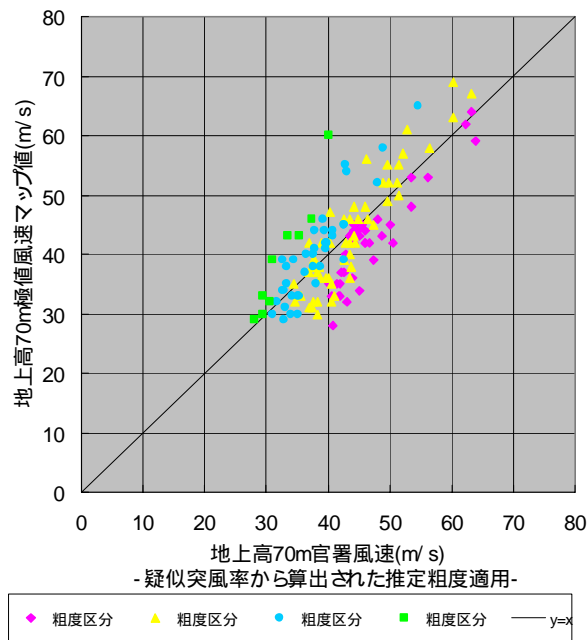


図 B 7.1 気象官署位置における比較



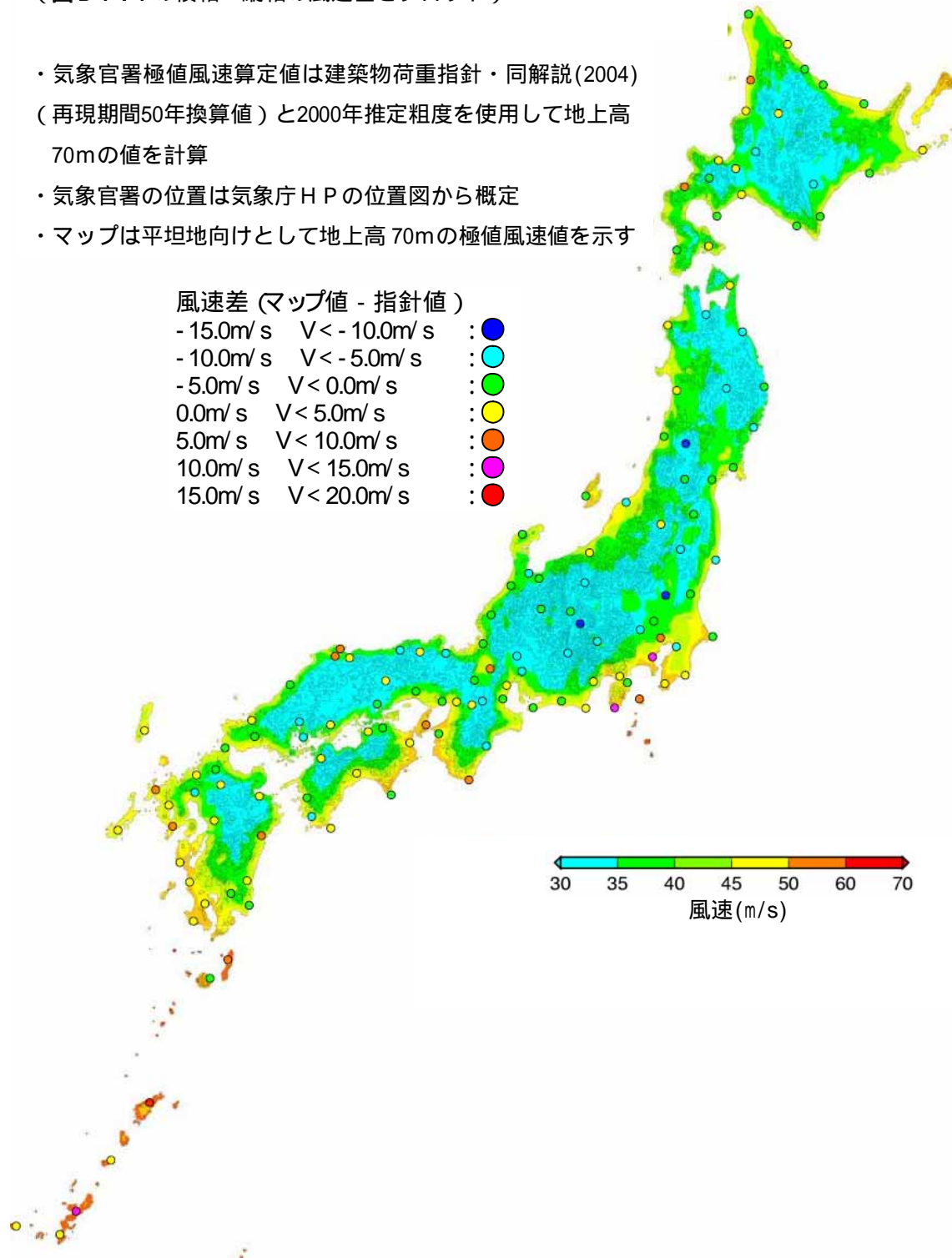
地上高70mにおける気象官署における極値風速マップ値と気象官署極値風速算定値との差異を図B7.2に示す。

(図B7.1の横軸・縦軸の風速差をプロット)

- ・気象官署極値風速算定値は建築物荷重指針・同解説(2004)(再現期間50年換算値)と2000年推定粗度を使用して地上高70mの値を計算
- ・気象官署の位置は気象庁HPの位置図から概定
- ・マップは平坦地向けとして地上高70mの極値風速値を示す

風速差 (マップ値 - 指針値)

-15.0m/s	$V < -10.0\text{m/s}$	: ●
-10.0m/s	$V < -5.0\text{m/s}$	: ○
-5.0m/s	$V < 0.0\text{m/s}$	: ●
0.0m/s	$V < 5.0\text{m/s}$	: ○
5.0m/s	$V < 10.0\text{m/s}$	: ●
10.0m/s	$V < 15.0\text{m/s}$	: ○
15.0m/s	$V < 20.0\text{m/s}$	: ●



図B7.2 気象官署位置における比較

## B 8 風況観測地点における極値風速算定例

### B 8.1 極値風速データベースおよびCFDによる地形影響評価

#### (1) CFDの計算条件

地形の複雑度が大きい風況観測地点(室戸、鳥取、東伊豆)について、極値風速データベースとCFDにより、地形影響評価を行った。

CFDの計算条件概要は、表B 8.1および図B 8.1(1)~(3)に示すとおりである。

表B 8.1 CFDの主な計算条件

項目	計算条件	
LAWEPS 気象モデル (3次領域)	計算領域(水平)	100km × 100km
	計算高度	9.6km
	計算格子数	100 × 100 × 29
	格子間隔	水平格子: 1km
	モデルの種類	局地気象モデル(ANEMOS)
	風速の鉛直分布	高度3500mにおける地衡風を設定。
LAWEPS 4次領域モデル	計算領域(水平)	約20km × 約20km
	計算高度	5km
	計算格子数	101 × 101 × 31
	格子間隔	水平格子: 200m程度となるように設定
	モデルの種類	LAWEPS 4次領域モデル
	風速分布	気象モデルの結果からネスティング
LAWEPS 5次領域モデル	計算領域(水平)	約5km × 約5km
	計算高度	2km
	計算格子数	101 × 101 × 31
	格子間隔	水平格子: 50m程度となるように設定。
	モデルの種類	LAWEPS 5次領域モデル
	風速分布	LAWEPS 4次領域計算結果からネスティング

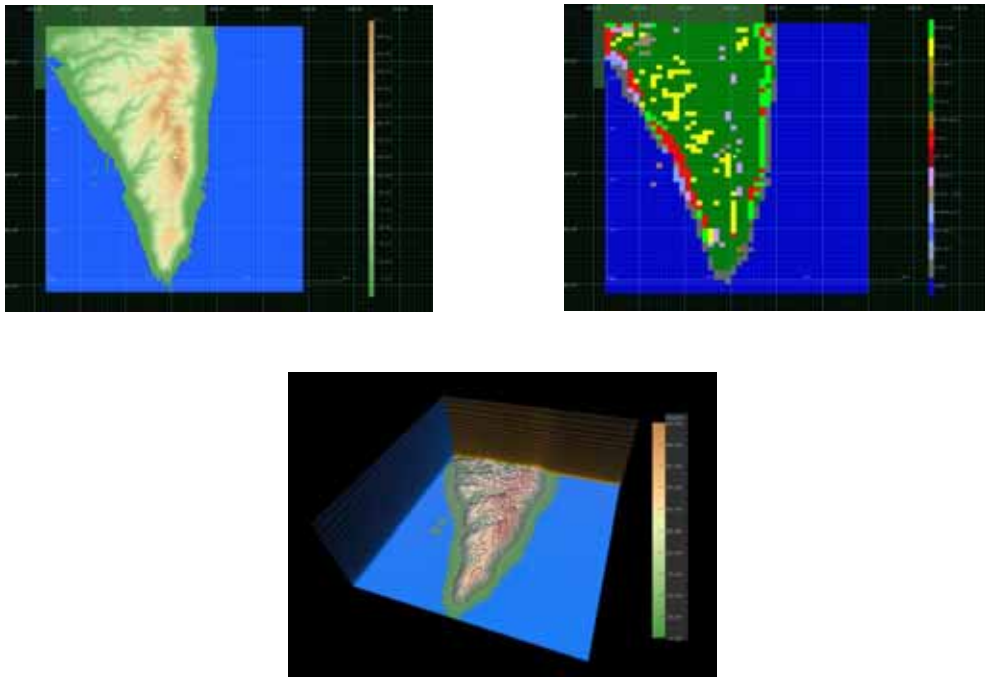


図 B 8 . 1 (1) CFD の計算設定例 (室戸 5 次領域)  
 左上 : 地形 右上 : 土地利用 下 : 計算格子

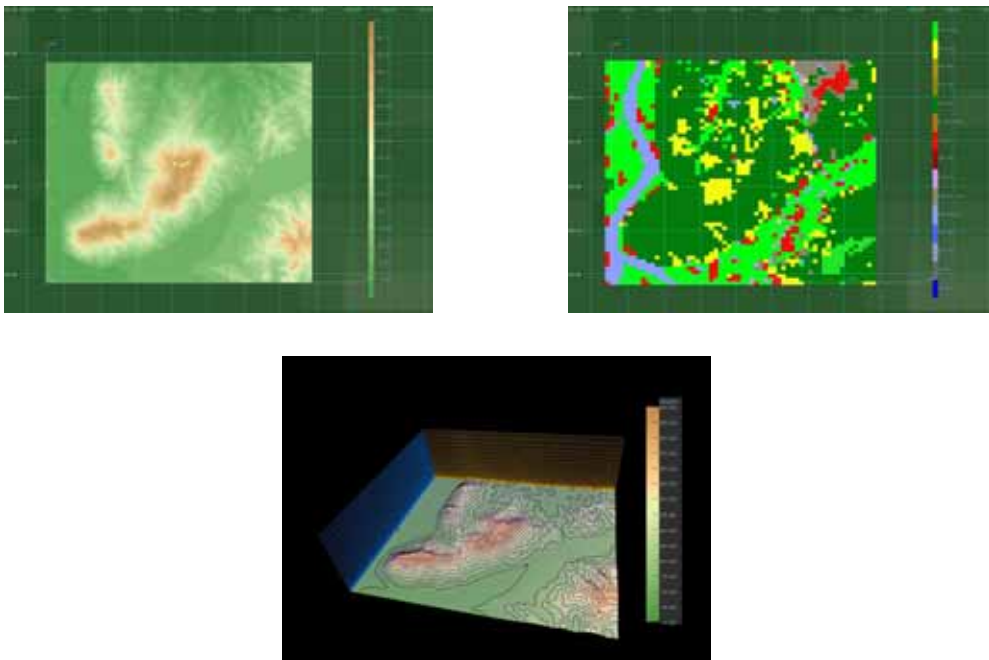
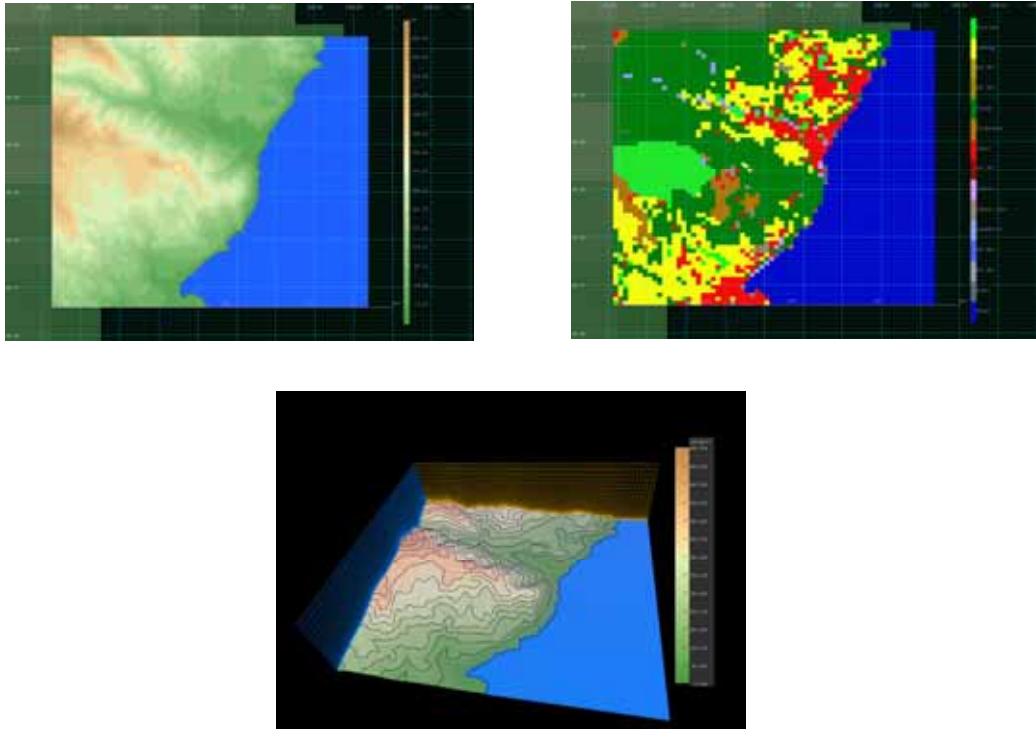


図 B 8 . 1 (2) CFD の計算設定例 (鳥取 5 次領域)  
 左上 : 地形 右上 : 土地利用 下 : 計算格子



図B 8 . 1 (3) CFD の計算設定例 (東伊豆 5 次領域)  
左上 : 地形 右上 : 土地利用 下 : 計算格子

( 2 ) 極値風速データベース値の CFD 計算結果への適用方法

極値風速データベースの CFD 計算結果への適用においては、極値風速データベース値(高度 250m) に、CFD から求めた風況タワー位置での風速比(5次領域ハブ高/3次領域 250m 風速) を乗じることにより、ハブ高さの風速を推計している(図 B 8.2)。この方法は、極値風速データベース値が 1km メッシュで計算された気流解析結果を内挿に用いて作成されたことを考慮して、1km メッシュで計算された LAWEPS 気象モデル(3次領域)の計算結果に適用するものである。

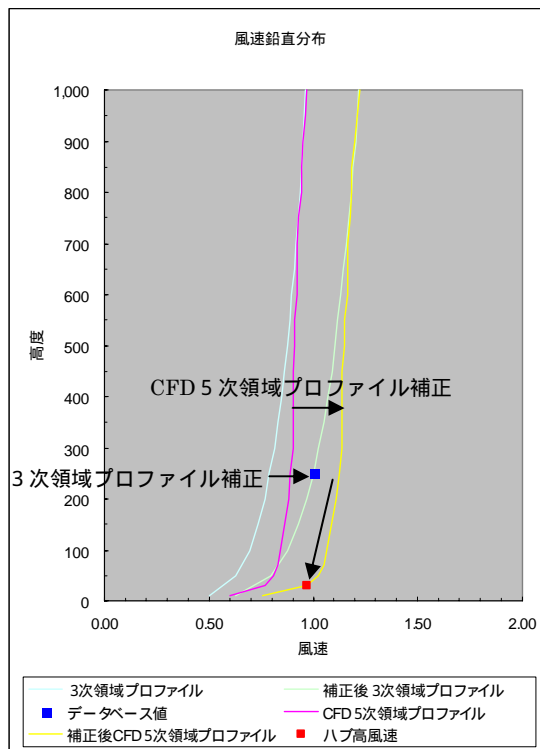


図 B 8.2 極値風速データベース値の CFD 計算結果への適用の概念図  
( LAWEPS 気象モデル(3次領域)の計算結果へ適用 )

(3) 算定結果

極値風速データベースとCFDにより小地形影響評価を行った結果は、表B8.2に示すとおりである。

表B8.2 極値風速データベースとCFDによる小地形影響評価結果  
(LAWEPS気象モデル(3次領域)の計算結果へ適用)

室戸		高度	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N	最大値
極値風速DB		250	64	69	71	70	70	70	67	62	71
CFD結果	ハブ高	30.5	5.96	6.35	4.87	4.16	5.96	6.90	5.82	4.29	6.90
	250m	250	6.45	6.59	5.72	5.24	5.70	6.13	5.58	5.32	6.59
	風速比	-	0.92	0.96	0.85	0.79	1.05	1.13	1.04	0.81	1.13
	極値風速	30.5	59	66	60	56	73	79	70	50	79
鳥取		高度	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N	最大値
極値風速DB		250	41	40	39	41	40	44	43	45	45
CFD結果	ハブ高	68	5.23	5.52	6.35	5.65	5.25	5.23	6.19	6.06	6.35
	250m	250	計算中	4.26	4.76	5.85	5.72	5.35	6.05	6.26	6.26
	風速比	-	-	1.30	1.33	0.97	0.92	0.98	1.02	0.97	1.33
	極値風速	68	-	52	52	40	37	43	44	44	52
東伊豆		高度	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N	最大値
極値風速DB		250	57	62	62	63	60	58	56	55	63
CFD結果	ハブ高	37	7.49	5.11	4.05	5.64	6.60	6.30	5.24	6.81	7.49
	250m	250	計算中	5.63	5.04	6.52	7.42	6.37	4.97	5.15	7.42
	風速比	-	-	0.91	0.80	0.87	0.89	0.99	1.05	1.32	1.32
	極値風速	37	-	56	50	55	53	57	59	73	73

( 4 ) 風況観測地点における相関解析値との比較

風況観測地点における相関解析値( 気象官署風速の極値統計解析値および気象官署と風況観測地点の相関解析結果から得られた極値風速 )、極値風速データベース / CFD 推計値 ( 極値風速データベースおよび CFD により推計した極値風速 )、荷重指針推計値 ( 建築物荷重指針 ( 2004 ) の値を 50 年再現期待値に変換のうえ粗度区分およびハブ高さにより換算し、建築物荷重指針 ( 2004 ) の方法により求めた小地形による風速の割り増し係数を乗じる方法( 以下、簡易手法と略す ) により算出した値 ) の比較は、表 B 8 . 3 に示すとおりである。

データベース値を 3 次領域 250m に適用した場合の CFD 推計値は、荷重指針推計値の粗度が小さい場合の推計値と同程度であるが、相関解析値と比較してかなり過大推定となる。

**表 B 8 . 3 相関解析値、極値風速データベース / CFD 推計値、荷重指針推計値との比較**

風況観測地点	室戸			鳥取	東伊豆		
地形の複雑度	大			大	大		
観測地点 相関解析値	60 m/s			45 m/s	59 m/s		
極値風速データベース / CFD 推計値 ( DB 値を 5 次領域 250m に適用 )	70 m/s			43 m/s	58 m/s		
極値風速データベース / CFD 推計値 ( DB 値を 3 次領域 250m に適用 )	79 m/s			52 m/s	73 m/s		
荷重指針推計値 ( 小地形影響を簡易手法 で評価 )	粗度 77 m/s	粗度 66 m/s	粗度 55 m/s	粗度 50 m/s	粗度 72 m/s	粗度 65 m/s	粗度 59 m/s

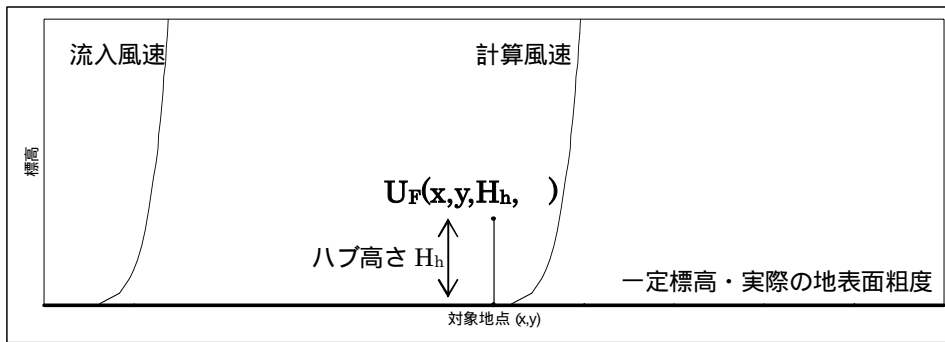
( 5 ) 地形による風速の割増係数の算出方法

前述の( 2 )極値風速データベース値のCFD 計算結果への適用方法で記載した方法は、必ずしも一般的な方法ではないことから、一般的な方法としては、以下の方法が考えられる。

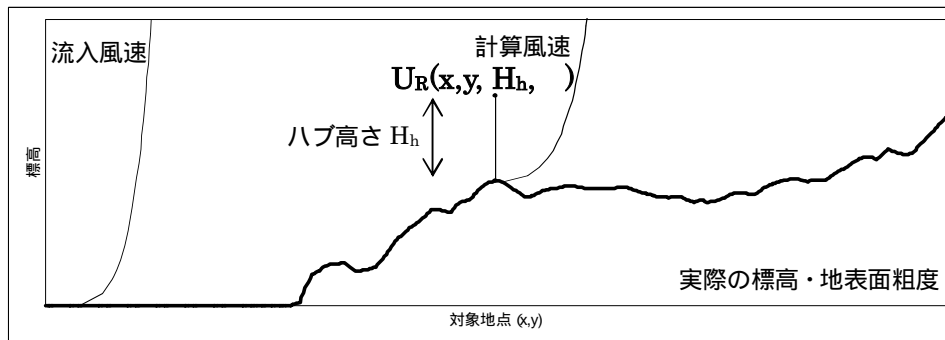
地形による風向別の風速の割増係数  $E_{tV}(\ )$  は、CFD モデルの結果である  $U_R(x,y,H_h, \ )$  および  $U_F(x,y,H_h, \ )$  を用いて式(8.1)により求める。

$$E_{tV}(\ ) = U_R(x,y,H_h, \ ) / U_F(x,y,H_h, \ ) \quad (8.1)$$

$U_R(x,y,H_h, \ )$  は実地形(実際の標高と地表面粗度を持つ地形)上の流入風向での風車設置地点(x,y)、ハブ高さ  $H_h$  における風速であり、 $U_F(x,y,H_h, \ )$  は仮想的な平坦地形(一定標高と実際の地表面粗度を持つ地形)上の流入風向での風車設置地点(x,y)、ハブ高さ  $H_h$  における風速である。( 図 B 8 . 3 )



(a) 仮想的な平坦地形



(b) 実地形

図 B 8 . 3 地形による風速の割増係数の概念図



( 6 ) CFD による風速の高さ補正

風況観測地点のうち、地形の複雑度が大きい地点として室戸、平坦地地形して室蘭を対象に、CFD による風速の高さ補正の可能性について検討した。

観測地点の風向別の鉛直分布と CFD の風向別の鉛直分布を比較した結果は、**図 B 8 . 4 (1) ~ (2)**に示すとおりである。ここでは、観測タワーの中段風速計の観測結果に CFD プロファイルをフィッティングさせている。室戸では中段風速計の高さは 22.4m、上段風速計の高さは 30m、室蘭では中段風速計の高さは 65m、上段風速計の高さは 80m である。

**図 B 8 . 4 (1) ~ (2)**をみると、この程度の高さの違いであれば、風速の高さ補正に CFD の計算結果を用いることの可能性が示唆されたと考えられる。

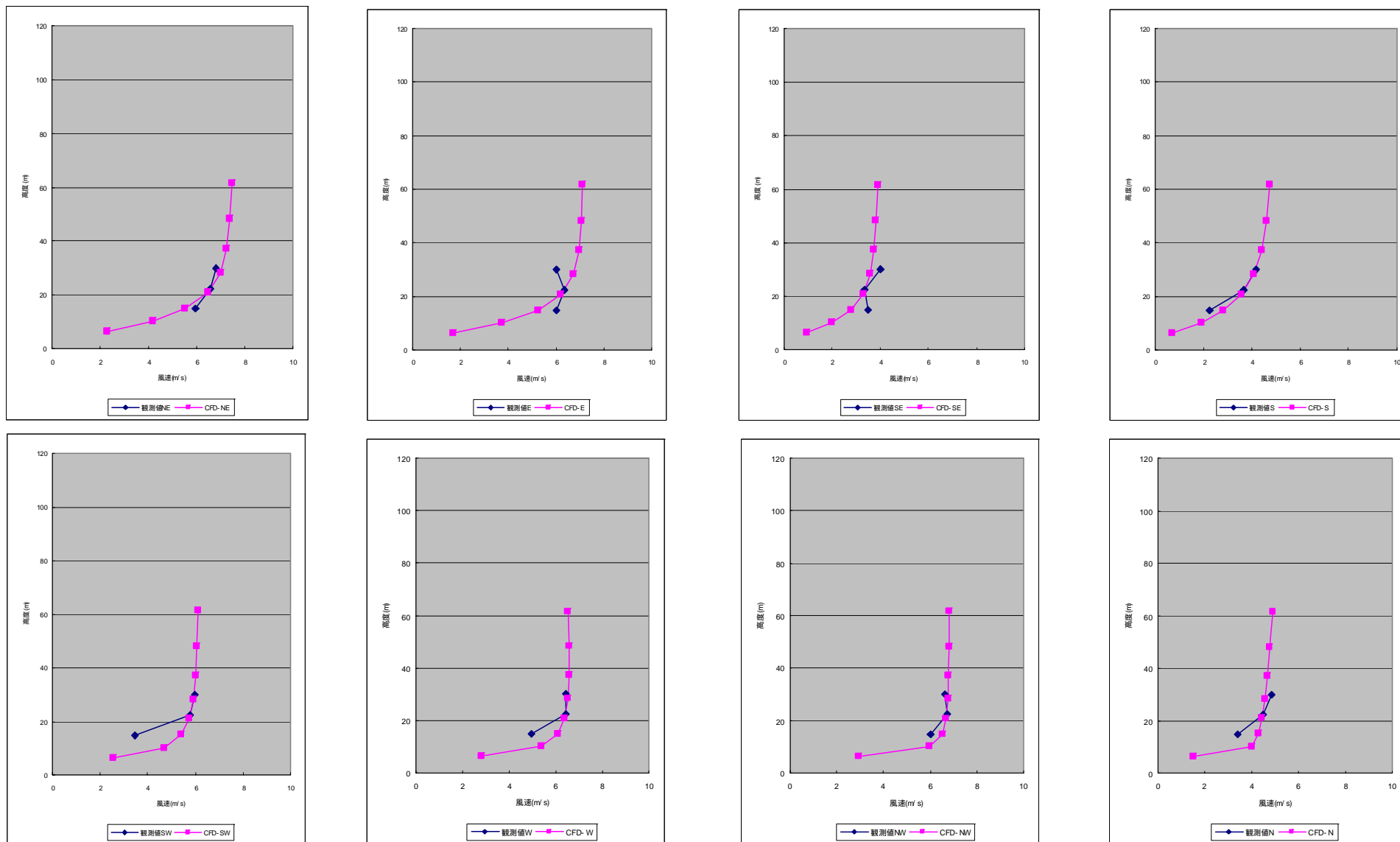


図 B 8 . 4 (1) 観測データ ( ± 1 方位平均 ) プロファイルと CFD プロファイルの比較 ( 室戸 )

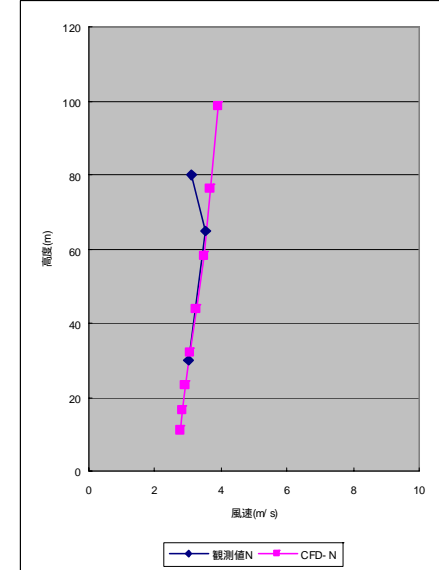
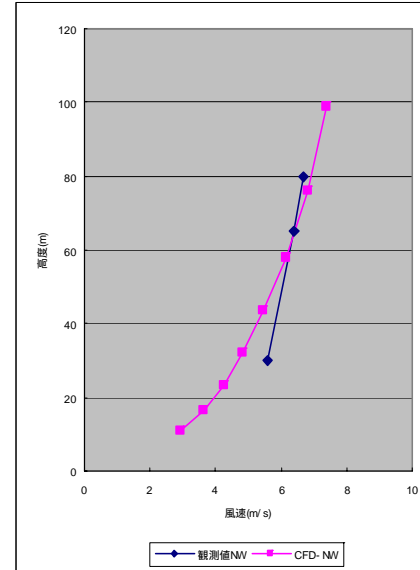
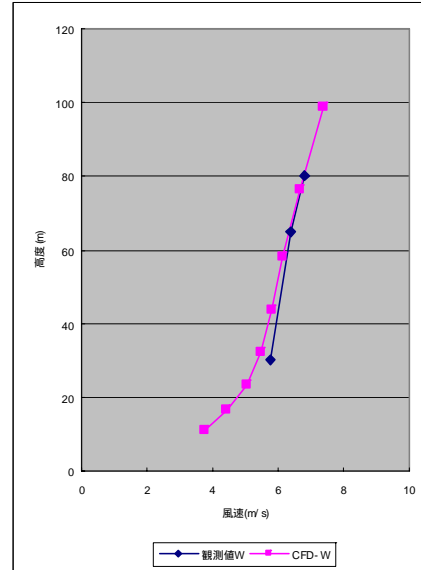
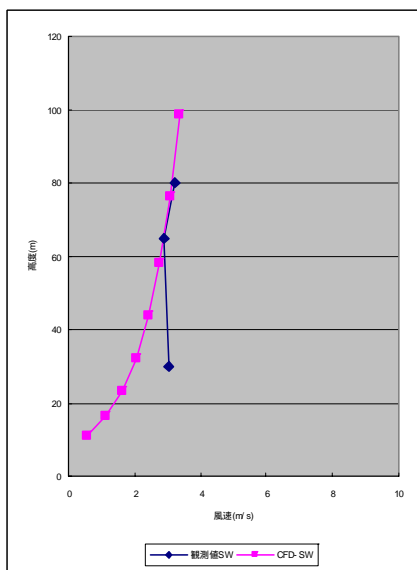
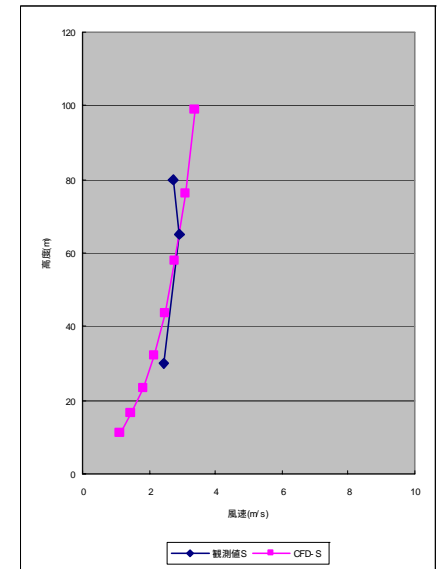
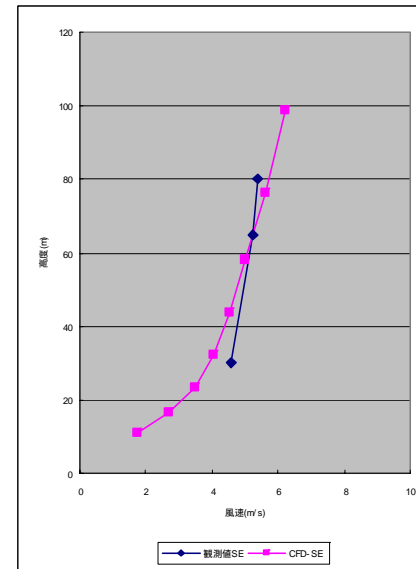
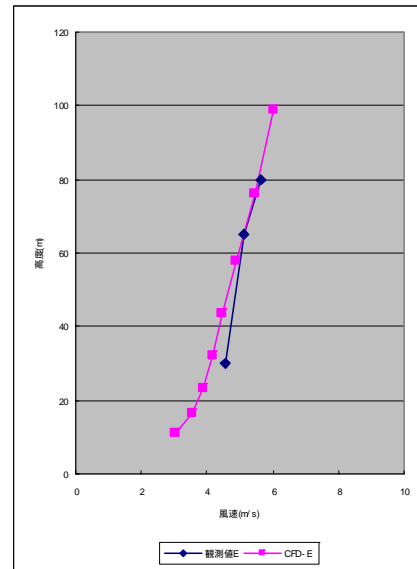
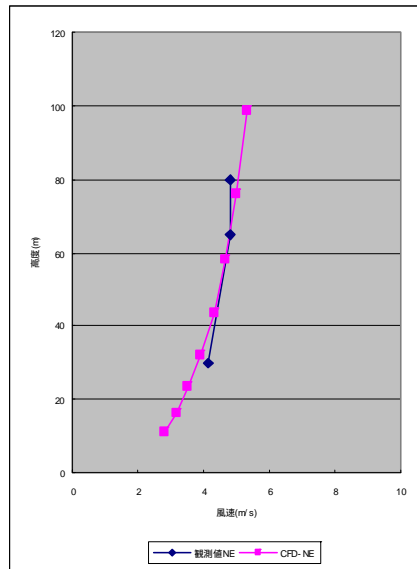
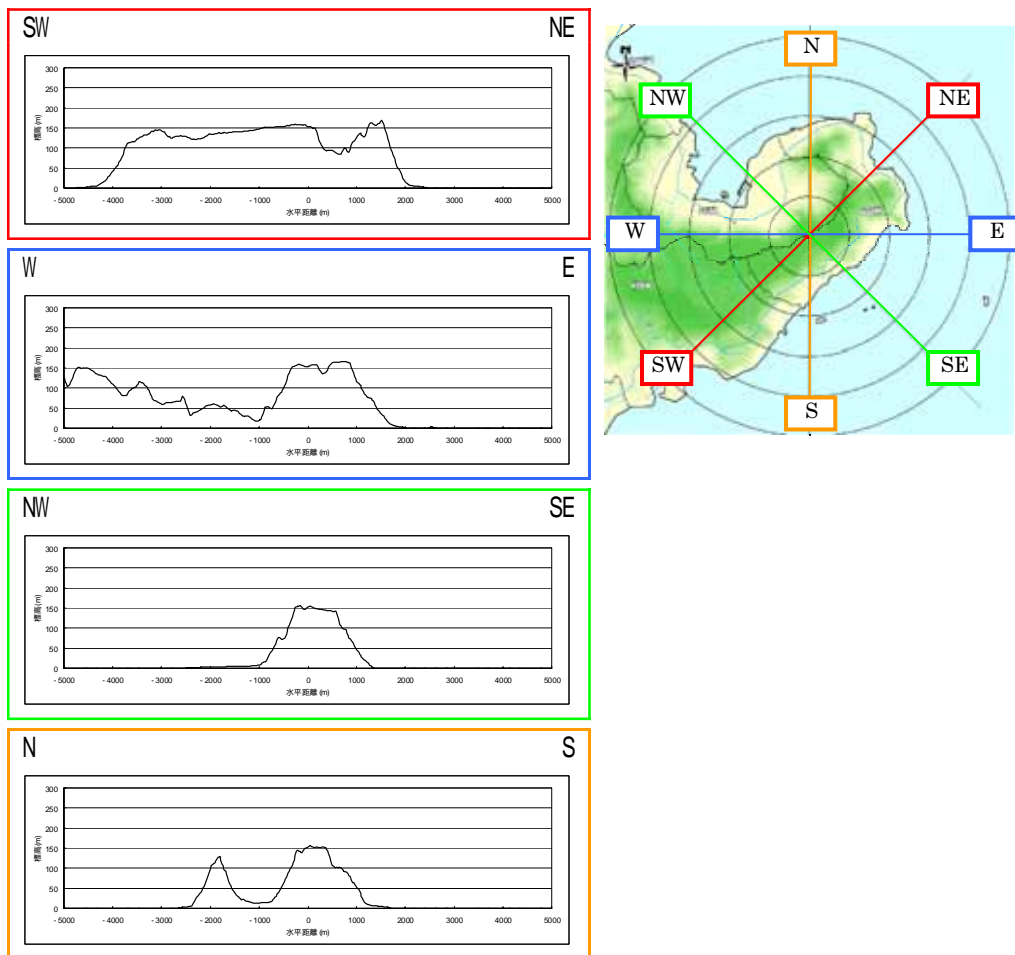


図 B 8 . 4 (2) 観測データ ( ± 1 方位平均 ) プロファイルと CFD プロファイルの比較 ( 室蘭 )

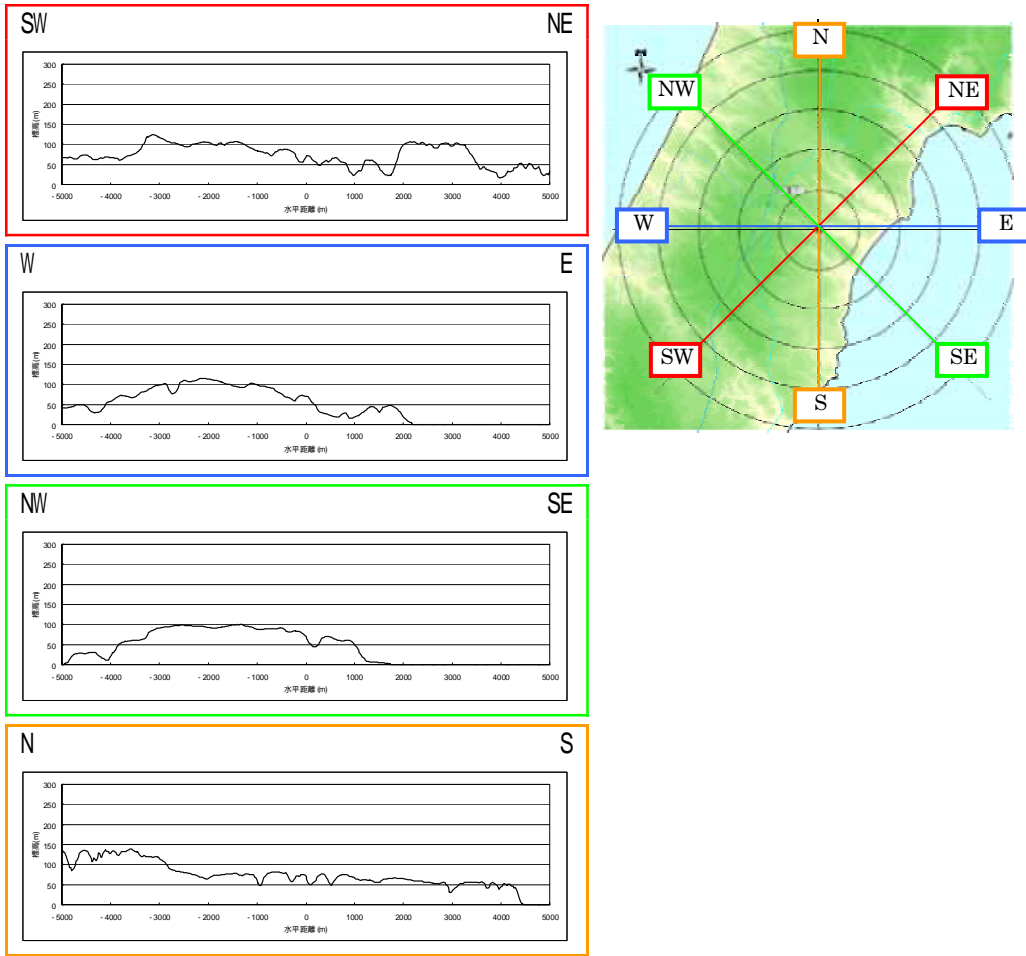
## B 8.2 極値風速データベースおよび簡易手法による地形影響評価

地形の複雑度が中程度の風況観測地点（佐敷、中種子）について、極値風速データベースの値をもとに簡易手法により、地形影響評価を行った。

地形条件は、図B 8.5 (1)～(2)に示すとおりである。



図B 8.5 (1) 地形条件（佐敷）



図B 8.5 (2) 地形条件(中種子)

極値風速データベースと簡易手法により地形影響評価を行った結果は、表B8.4に示すとおりである。ここでは、極値風速DB(高度250m)から粗度区分に対応するべき指数を用いてハブ高さの風速を推計し、風速の割り増し係数を乗じることにより極値風速を推計している。

表B8.4 極値風速データベースと簡易手法による地形影響評価結果

佐敷		高度	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N	最大値
極値風速DB		250	75	77	78	79	77	75	74	73	79
建築確認	粗度	60	65	67	68	68	67	65	64	63	68
GL評価時	粗度	60	61	62	63	64	62	61	60	59	64
割り増し係数	Eg	-	(1)	1.13	1.14	1.17	1.00	1.18	1.20	1.22	1.22
小地形の効果	粗度	60	(65)	75	77	80	67	77	77	77	80
	粗度	60	(61)	70	72	75	62	71	72	72	75
適用した地形			Xs/Hs範囲外	傾斜地	傾斜地	傾斜地	Xs/Hs範囲外	傾斜地	傾斜地	傾斜地	
中種子		高度	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N	最大値
極値風速DB		250	68	71	70	72	67	70	71	69	72
建築確認	粗度	35.3	56	58	58	59	55	58	58	57	59
割り増し係数	Eg		(1)	1.24	1.00	1.00	(1)	1.00	1.00	1.00	1.24
小地形の効果	粗度	35.3	(56)	72	58	59	(55)	58	58	57	72
適用した地形			適用外	傾斜地	Xs/Hs範囲外	Xs/Hs範囲外	適用外	Xs/Hs範囲外	Xs/Hs範囲外	適用外	

風況観測地点における相関解析値(気象官署風速の極値統計解析値および気象官署と風況観測地点の相関解析結果から得られた極値風速)、極値風速データベース/簡易手法推計値(極値風速データベースおよび簡易手法により推計した極値風速)、荷重指針推計値(建築物荷重指針(2004)の値を50年再現期待値に変換のうえ粗度区分およびハブ高さにより換算し、建築物荷重指針の方法により求めた小地形による風速の割り増し係数を乗じた値)の比較は、表B8.5に示すとおりである。

佐敷では、極値風速データベース/簡易手法推計値は相関解析値よりも32~40%、中種子では89%大きくなっているが、荷重指針推計値と同程度の風速となっている。

表B8.5 相関解析値、極値風速データベース/簡易手法推計値、荷重指針推計値の比較

風況観測地点	佐敷		中種子
地形の複雑度	中		中
観測地点 相関解析値	57 m/s		38 m/s
極値風速データベース/ 簡易手法推計値	粗度	粗度	粗度
	80 m/s	75 m/s	72 m/s
荷重指針推計値	粗度	粗度	粗度
	84 m/s	74 m/s	72 m/s

### B 8.3 平坦地における算定例

地形が平坦の風況観測地点（室蘭）について、相関解析値、極値風速マップ内挿値（風況観測タワー高さに応じてマップ値を高さ方向に内挿して算出）荷重指針値の比較結果は、表B 8.6に示すとおりである。なお、建築物荷重指針（2004）の方法により求めた小地形による風速の割り増し係数は、適用外または範囲外であった。

極値風速マップ値は相関解析値と比較してやや大きくなっているが、荷重指針値と概ね同レベルとなっている。

表B 8.6 相関解析値、極値風速マップ内挿値、荷重指針値の比較

風況観測地点	室蘭
地形の複雑度	平坦
粗度区分	
観測地点 相関解析値	35 m/s
極値風速マップ 内挿値	42 m/s
荷重指針値 (べき乗則を適用)	39 m/s

#### B 8.4 地形影響評価のまとめ

地形の複雑度が大きい風況観測地点（室戸、鳥取、東伊豆）では、データベース値を3次領域250mに適用した場合のCFD推計値は、荷重指針推計値の粗度が小さい場合の推計値と同程度であるが、相関解析値と比較してかなり過大推定となる。

地形の複雑度が中程度の風況観測地点（佐敷、中種子）では、極値風速データベース/簡易手法推計値は、建築物荷重指針（2004）による推計値と同程度であるが、ともに相関解析値と比較してかなり過大推定となっている。

地形が平坦の風況観測地点（室蘭）では、極値風速マップ値は相関解析値と比較してやや大きくなっているが、荷重指針値と概ね同レベルとなっている。



## B 9 「建築物荷重指針・同解説(2004)」の概要

### B 9.1 日本型風力発電ガイドラインにおける「建築物荷重指針・同解説」の位置付け

本ガイドラインに示されている極値風速マップ/データベースは、風車を対象としたハブ高さにおける極値風速  $V_{ref}$  を簡易に評価するための支援資料として、日本における 10 分間平均風速の 50 年再現期間値の分布を示すものである。

ここで、極値風速マップ/データベースにおいては、ハブ高さにおける極値風速  $V_{ref}$  は、建築物荷重指針(2004)に定める基本風速  $U_0$  (地表面粗度区分 の場合の地上 10m における 10 分間平均風速の再現期間 100 年に対する値 (図 B 9.1)) に、再現期間換算係数  $k_{rw}$ 、地形による風速の割増係数  $E_{tv}$ 、平坦と見なせる地点におけるハブ高さでの高度補正係数  $E_{pv}(P)$  を乗じたものとして算定することを基本的な考え方としている。ただし、 $P$  は粗度区分である。

$$V_{ref} = U_0 \cdot k_{rw} \cdot E_{tv} \cdot E_{pv}(P)$$
$$k_{rw} = 0.63 (U - 1) \ln(r) - 2.9 U + 3.9$$
$$U = U_{500} / U_0$$

ここで、

$r$  : 再現期間=50(年)

$U_{500}$  : 建築物荷重指針(2004)に定める地表面粗度区分 の場合の地上 10m における 10 分間平均風速の再現期間 500 年に対する値

極値風速マップ/データベースの作成にあたっては、気象官署における基本風速  $U_0$ 、再現期間換算係数  $k_{rw}$  は建築物荷重指針(2004)に定められた値および式を用い、地形による風速の割増係数  $E_{tv}$ 、高度補正係数  $E_{pv}(P)$ 、粗度区分  $P$  は、気象モデルによる気流解析結果にもとづいて設定(鉛直プロファイル、内挿関数)している。

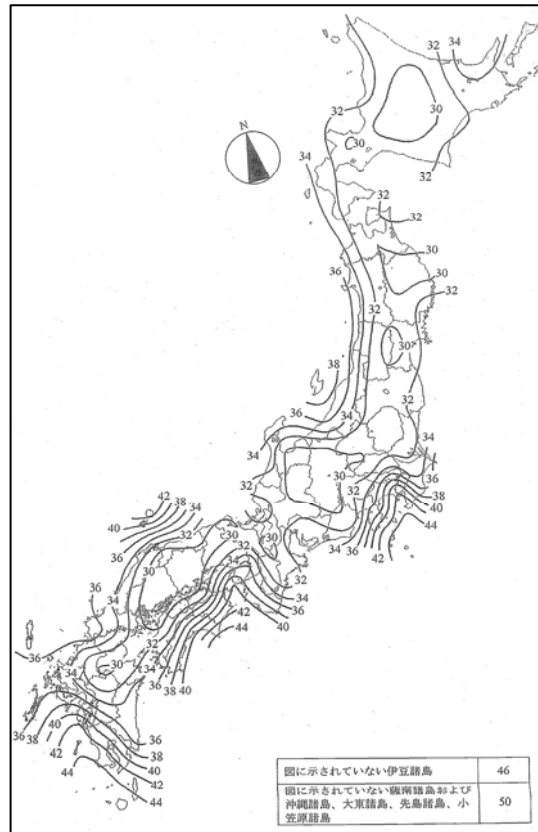


図 B 9.1 建築物荷重指針（2004）に示されている基本風速分布図

### B 9.2 建築物荷重指針（2004）の概要

建築物荷重指針（2004）の概要は表 B 9.1 に示すとおりである。

長期観測データによって得られる極値風速は、気象官署における点のデータであるため、分布図のような面のデータを作成するにあたっては、各気象官署間の領域に対して値の内挿が必要となる。建築物荷重指針（2004）の基本風速分布図は、そのような値の内挿で作成されており、気象官署の極値風速を線形内挿したマップである。

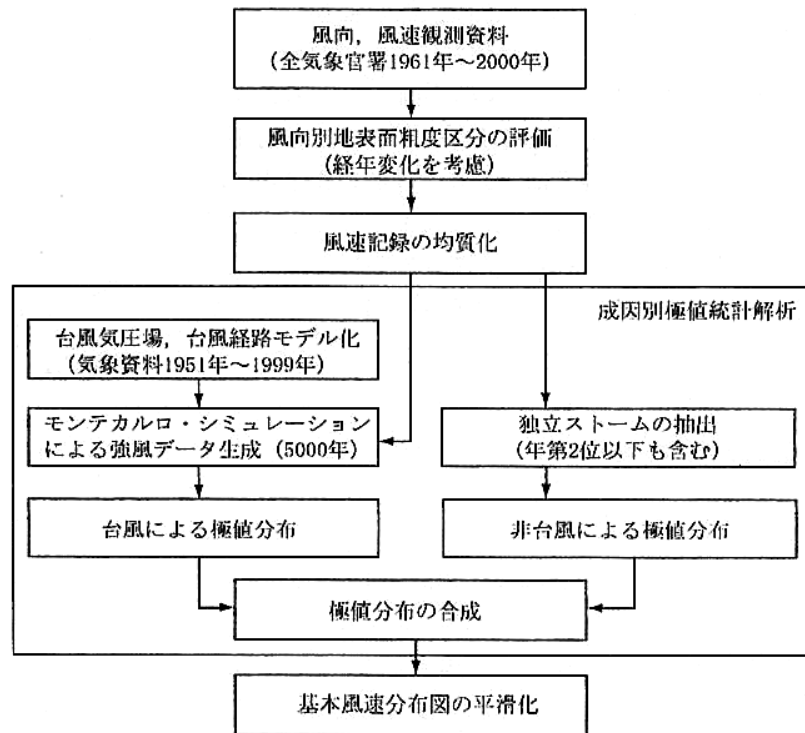
表 B 9.1 建築物荷重指針（2004）の概要

主要な項目	概要
極値風速の形式	地表面粗度区分 の地上 10m における 100 年および 500 年再現期間値
台風シミュレーション	あり。台風時・非台風時の極値分布を合成
風向の考慮	気象官署近傍では官署ごとに定めた 8 方位の風向係数から風向別の基本風速を算出可能
データの形式	分布図
任意高度の風速算出法	基本風速に以下の値を乗ずる。 $1.7 \times (Z / Z_0)$ Z : 基準高さ $Z_0$ : 粗度区分により決定
小地形への対応	地形形状に応じて割り増し係数を設定

### B 9.3 建築物荷重指針（2004）における基本風速分布図の作成方法

#### （1）作成フロー

建築物荷重指針（2004）では1961～2000年の全気象官署における長期観測データをもとに詳細な極値解析が行われている。建築物荷重指針（2004）で示されている基本風速分布図の作成フローは図B 9.2に示すとおりである。



図B 9.2 基本風速分布図の作成フロー

出典：「建築物荷重指針・同解説（2004）」

- ・ 地表面粗度区分 の地上10mの10分間平均の極値風速分布
- ・ 基本は再現期間100年（再現期間補正用に再現期間500年のデータあり）
- ・ 気象官署間は線形内挿

なお、建築物荷重指針（2004）に直接記載はないが、その成り立ちについての工学的な背景の概要について、参考となるものを以下の（2）～（6）に整理した。

## (2) 風速記録の均質化

### 1) 使用データ

解析に用いられたデータは、(財)気象業務支援センター発行の資料(地上気象観測時日別編集データ[1961~1990]、地上気象観測原簿データ[1991~2000]、気象官署観測履歴)中の風向・風速および風速計設置高さである。

### 2) 測器補正

測器の均質化にあたっては、1975年に3杯風速計から風車型風速計へと計測器の変更が行われた気象官署に対して、3杯風速計による観測記録を風車型風速計による値に換算している<sup>4)</sup>。補正係数は1975年の測器変更前の平均風速に対して0.90である。建築物荷重指針(2004)では、官署建屋の影響は考慮されていないようであるが、気象官署庁舎の上に設置された風速計に対する建屋の影響については加藤ら<sup>5)6)</sup>が指摘している。

### 3) 風向別地表面粗度区分の評価と風速記録の均質化

気象官署における風速記録は、疑似突風率(日最大瞬間風速/日最大風速)と観測高さから客観的に風向別地表面粗度を推定する方法<sup>7)</sup>を用いて、地表面粗度区分、地上10mにおける風速値に均質化している。文献<sup>8)</sup>に、この手法の考え方の詳細が記載されている。文献<sup>9)</sup>は、建築物荷重指針(1993)のもととなった論文と考えられるが、同論文では、現在の建築物荷重指針(2004)とは異なる粗度区分・べき指数・境界層高さの関係が示されている。

## (3) 台風シミュレーション

台風時の観測記録の統計的不安定性(サンプリング誤差)を補うため、台風シミュレーション手法を採用している。台風シミュレーションは文献<sup>10)</sup>に示された手法を用いている。

## (4) 基本風速分布図の平滑化

気象官署周辺の局所的な地形、地物による影響、均質化に用いたモデルの精度等に起因する局所的な特異性を取り除くために、空間的平滑化を行っている。

## (5) 風向係数

台風時の風については台風シミュレーションを、非台風時の風については気象庁から公開されている観測値を用いて風向係数を算定している。風向係数を用いて風荷重を求めた場合に、その荷重の再現期間が100年となる値として風向係数は規定されている<sup>10)</sup>。

## (6) 期間補正

再現期間換算係数 $k_{rw}$ は、次式により算定されている。

$$k_{rw}=0.63(\mu-1)\ln(r)-2.9\mu+3.9$$

$$u = U_{500} / U_0$$

$U_{500}$  : 建築物荷重指針(2004)に定める地表面粗度区分の場合の地上10mにおける10分間平均風速の再現期間500年に対する値

$U_0$  : 建築物荷重指針(2004)に定める地表面粗度区分の場合の地上10mにおける10分間平均風速の再現期間100年に対する値

$r$  : 設計用再現期間(年)

建築物荷重指針(2004)では、年最大風速の漸近極値分布としてGumbel分布を仮定しており、最終的に再現期間500年の年最大風速 $U_{500}$ の基本風速 $U_0$ に対する比 $u$ を用いて上式で近似している。

上式による推定誤差は再現期間50年で最大5%程度としている。

## 参考文献

- 1)日本建築学会、2004: 建築物荷重指針・同解説(2004)
- 2)中村秀治、石川智己、大熊武司、田村幸雄、田中伸和、北嶋知樹: 風向別基本風速マップ作成の試み、日本風工学会論文集、97、pp.121-136 (2005)
- 3)気象庁予報部予報課 1995: レーダー・アメダス解析雨量の解析手法と精度、測候時報、62、pp.279-339
- 4)石原孟、日比一喜、加藤央之、大竹和夫、松井正宏: 特集、日本各地の年最大風速データベースの構築と測器補正、日本風工学会誌、第92号、pp.5-54 (2002.7)
- 5)加藤真規子、斉藤三行、新津美晴: 風観測の基準化にかかわる気象官署庁舎の形状調査とそれに基づく建屋屋上における風速分布の風洞実験、気象研究所研究時報、Vol.41、No.1、pp.1-13、1989
- 6)加藤真規子: 基本的な形状の建屋屋上における風観測に関する風洞実験、気象研究所研究時報、Vol.44、No.1、pp.1-13、1992
- 7)大竹和夫、田村幸雄: 風向別地表面粗度区分の評価方法に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.119-120(2002)
- 8)田村幸雄、大竹和夫、中村修、鈴木雅靖: 風速の鉛直分布の年変化を考慮した再現期待値、第12回風工学シンポジウム論文集、pp.43-48 (2002)
- 9)中原満雄、田村幸雄、浅見豊、新堀喜則、吉川祐三: 日本における建築物設計用の基準風速分布図、日本建築学会論文報告集 No.336(1984) pp.11-20
- 10)松井正宏、田村幸雄、田中俊輔: 風向特性を考慮した矩形高層建物の風荷重評価、第17回風工学シンポジウム論文集、pp.499-504(2002)
- 11)石原孟、由田秀俊、久保悠也、藤野陽三: 設計基本風速の新しい評価手法の提案と測器補正、第17回風工学シンポジウム論文集、pp.7-12 (2002)
- 12)Gomes, L., Vickery, B. J: Extreme wind speeds in mixed climates, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics、Vol.2、pp.331-334、1978
- 13)Cook, N. J: Improving the Gumbel analysis by using M-th highest extremes, Revision of ANSI/ASCE 7-95、2000

## 参考 URL

<http://www.arch.t-kougei.ac.jp/matsui/publication/index.html>

<http://www.aij.or.jp/jpn/symposium/2006/loads/loads.htm>

<http://wwwsoc.nii.ac.jp/jawe/>

<http://ja-tec.com/K/K40/content64139.html>

## 付属書C

(参考)

### 現地観測・実験結果

#### 概要

国内で台風の影響が大きいと考えられる地点と風の乱れが大きいと考えられる地点を選定し、風況観測及び風力発電設備に作用する応力の観測を行った。風力発電設備の導入に際して風況観測を行うことは一般的であるが、今回は台風と風の乱れの高速サンプリングによる観測と風力発電設備に作用する応力との同時計測という本格的な調査である。

これらの自然風による観測とは別に、風応答解析による風力発電設備への作用荷重の確認を行うため、風車の模型風洞実験を行った。

また、これらの内容は台風地域、風の乱れが大きい地域での風条件と風車の挙動との関係を知ることはもちろんであるが、風況シミュレーション手法の適用性・妥当性を明らかにすることや風車解析コードの適用性を明らかにする検証用データとしても利用されることになる。

## C 1 現地観測

現地観測の風況観測と風車応力観測において計測する項目は以下のとおりである。

( 1 ) 風況観測項目

最大瞬間風速，平均風速，瞬間風向，平均風向，最多風向

( 2 ) 風車応力観測項目

歪み（ブレード基部，タワー頂部・基部，主軸）

( 3 ) その他

超音波風向風速計で観測できる項目，風車信号で観測できる項目

### C 1.1 観測地点

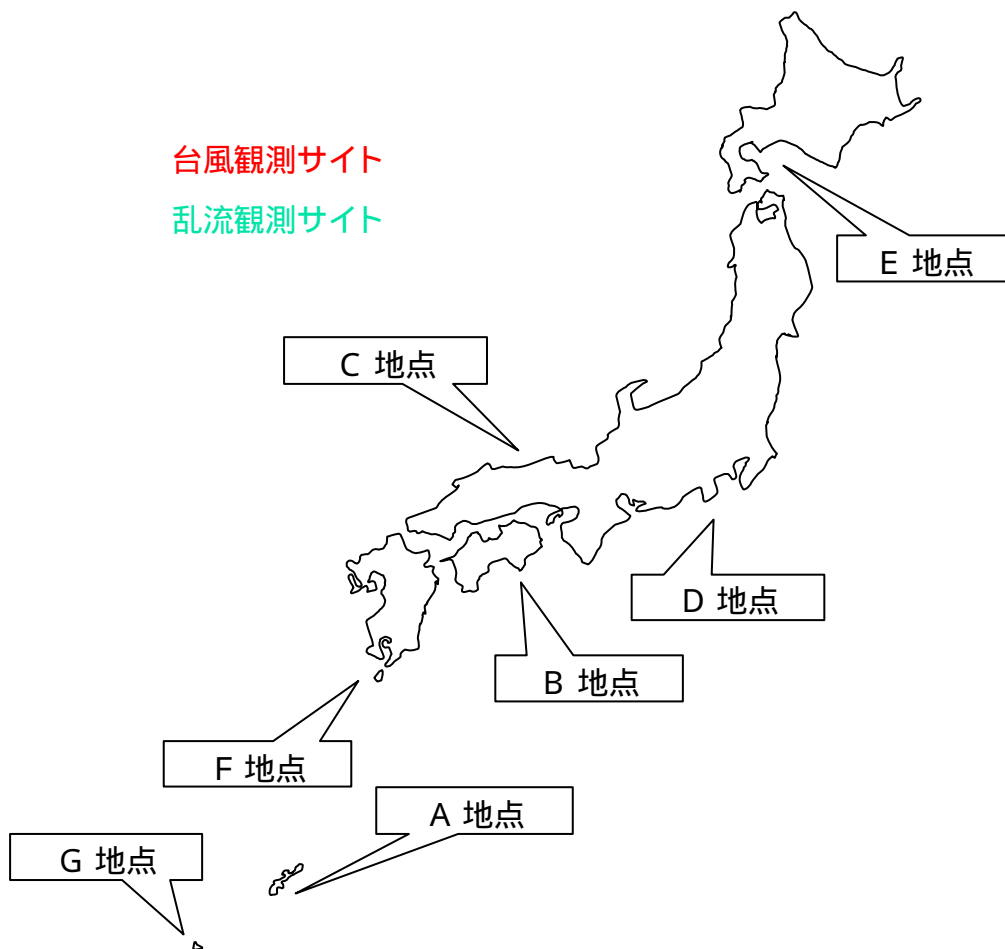
観測地点は、風況データと風車に作用する応力の同時観測が可能な、台風（強風）のデータ観測を主目的とした4地点および風の乱れのデータ観測を主目的とした3地点の計7地点とした。

観測地点の概要を、表C 1.1および図C 1.1～図C 1.8に示す。

表C 1.1 観測地点概要

地点名	A	B	C	D	E	F	G	
区 分	台風	台風	風の乱れ	風の乱れ	風の乱れ	台風	台風	
設置場所	沖縄県	高知県	鳥取県	静岡県	北海道	鹿児島県	沖縄県	
	佐敷町	室戸市	鳥取市	東伊豆町	室蘭市	中種子町	宮古島市	
出 力 (kW)	990	300	1,000	600	2,000	660	600	
ハブ高さ (m)	60	30.5	68	37	65	35.3	35	
ロータ径 (m)	57	29	61.4	45	70	47	47	
風車メーカー	三菱重工業	三菱重工業	三菱重工業	三菱重工業	日本製鋼所	Vestas	Vestas	
観測 期間	風況	2006.6 - 2007.12	2006.6 - 2007.12	2006.6 - 2007.12	2006.6 - 2007.12	2006.12 - 2008.2	2006.10 - 2007.12	2006.11 - 2007.12
	風車	2006.6 - 2007.12	2006.6 - 2007.12	2006.6 - 2007.12	2006.6 - 2007.12	2006.12 - 2008.2	2006.11 - 2007.12	2007.2 - 2007.12





図C 1.1 観測地点位置図



図C1.2 観測地点地形概要図（A地点）



図C1.3 観測地点地形概要図（B地点）









図C 1.5 観測地点地形概要図 (D地点)



図C1.6 観測地点地形概要図（E地点）





図C1.7 観測地点地形概要図（F地点）



図C1.8 観測地点地形概要図(G地点)



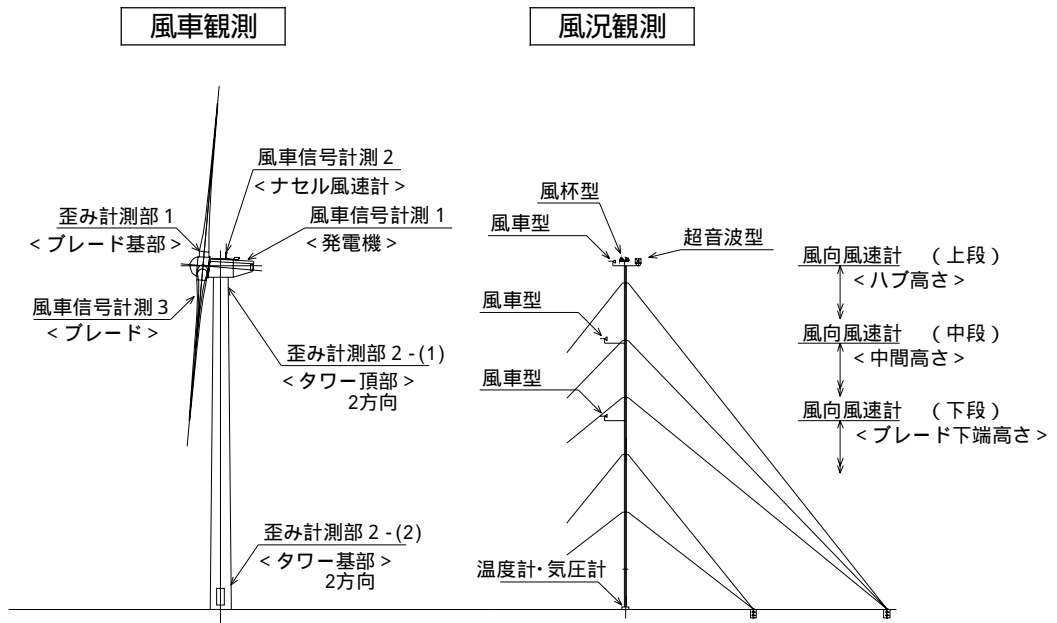
## C 1.2 観測仕様、観測項目

### (1) 台風観測サイト

風況観測については、風の鉛直分布を把握するためハブ高さを上段とする3高度で風のデータを取得する。60m/s を超える最大瞬間風速が記録されることが十分に考えられるため、測定範囲・耐風速の大きい風車型風向風速計による観測を主体とし、風力発電設備の応力測定との同期観測を基本とする。

風力発電設備に作用する応力計測については、ブレード基部及びタワーに歪みゲージを設置して、観測断面に発生する断面力の測定を行う。

図C 1.9 に風況観測及び風車応力計測の観測機器配置図を示す。



図C 1.9 観測機器配置図 - 台風(強風) -

表C1.2に風況観測の仕様を示す。

表C1.2 風況観測仕様 - 台風(強風) -

観測地点		A地点	B地点
測定範囲・耐風速		~90m/s、耐風速90m/s以上	
風速計種別 ・サンプリング 間隔	(上段) ハブ高付近	(高度57.8m) 超音波型・風杯型(4Hz) 風車型(1Hz)	(高度29.8m) 超音波型・風杯型(4Hz) 風車型(1Hz)
	(中段)	(高度46.9m) 風車型(1Hz)	(高度22.3m) 風車型(1Hz)
	(下段)	(高度33.6m) 風車型(1Hz)	(高度14.8m) 風車型(1Hz)
気温・気圧		地上(高度1.5m)において測定(10分値)	

観測地点		F地点	G地点
測定範囲・耐風速		~90m/s、耐風速90m/s以上	
風速計種別 ・サンプリング 間隔	(上段) ハブ高付近	(高度35.0m) 超音波型・風杯型(4Hz) 風車型(1Hz)	(高度35.0m) 超音波型・風杯型(4Hz) 風車型(1Hz)
	(中段)	(高度27.5m) 風車型(1Hz)	(高度27.5m) 風車型(1Hz)
	(下段)	(高度20.0m) 風車型(1Hz)	(高度20.0m) 風車型(1Hz)
気温・気圧		地上(高度1.5m)において測定(10分値)	

表C1.3に各測器（風速計）による観測項目の一覧を示す。

表C1.3 風況観測項目

種別	観測項目	概要	備考
超音波型風向風速計	X成分（東西成分）	0.25秒瞬間値	瞬間値
	Y成分（南北成分）	0.25秒瞬間値	
	W成分（垂直成分）	0.25秒瞬間値	
	最大瞬間風速	10分間内の最大風速（起時、風向）	10分間 平均値
	平均風速	10分平均値	
	風速標準偏差	10分間内の風速標準偏差	
	瞬間風向	上記最大瞬間風速時の風向	
	平均風向	10分平均値	
	最多風向	10分間中の最多風向	
	風向標準偏差	10分間内の風向標準偏差	
	瞬間垂直風速	10分間内の最大垂直風速（起時）	
	平均垂直風速	10分間内の平均垂直風速	
	垂直風速標準偏差	10分間内の垂直風速標準偏差	
風杯型および 風車型風向風速計	最大瞬間風速	10分間内の最大風速（起時、風向）	10分間 統計値
	平均風速	10分平均値	
	瞬間風向	上記最大瞬間風速時の風向	
	平均風向	10分平均値	
	最多風向	10分間中の最多風向	

表C1.4に風況観測データの統計処理項目の一覧を示す。

表C1.4 風況観測データの統計処理項目

項目	内容
風速	日最大瞬間風速（起時・風向）、日最大風速（起時・風向）、日平均風速
風向	日最多風向
垂直風速	日最大瞬間垂直風速、日最大垂直風速
風速標準偏差	日最大風速標準偏差、日平均風速標準偏差
風向標準偏差	日最大風向標準偏差、日平均風向標準偏差
垂直風標準偏差	日最大垂直風標準偏差、日平均垂直風標準偏差
水平成分	日最大突風率、日平均突風率、日最大乱流、日平均乱流
垂直成分	日最大傾斜角、日平均傾斜角

表C 1.5 に風車応力計測仕様の一覧を示す。

表C 1.5 風車観測仕様 - 台風(強風) -

観測地点		A 地点	B 地点
風 車		MWT-1000	MWT-300
出 力 (kW)		1,000	300
ハブ高 (m)		60	30.5
ロータ径 (m)		57	29
歪み計測位置 ・サンプリング間隔	(計測部1) ブレード基部	1本×ブレード基部2方向(20Hz)	
	(計測部2) タワー頂部・基部	タワー2方向(20Hz)	
風車信号	発電機	発電機回転数(ロータ)、発電機出力	
	ナセル風速計	ナセル風速、ナセル方位、風向偏差	
	ブレード	回転パルス <sup>1</sup> 、ピッチ指令角、ピッチ実角(20Hz)	

観測地点		F 地点	G 地点
風 車		Vestas - V47	Vestas-V47
出 力 (kW)		660	600
ハブ高 (m)		35.3	35.0
ロータ径 (m)		47	47
歪み計測位置 ・サンプリング間隔	(計測部1) ブレード基部	3本×ブレード基部2方向(20Hz)	
	(計測部2) タワー頂部・基部	タワー2方向(20Hz)	
風車信号	発電機	発電機回転数(ロータ)、発電機出力	
	ナセル風速計	ナセル風速、ナセル方位、風向偏差、	
	ブレード	回転パルス <sup>1</sup> 、ピッチ指令角、ピッチ実角(20Hz)	

<sup>1</sup>ポスト処理時アジマス角へ変換

上記の他、風況観測との同期を図る為の信号を受け入れる。

表C 1.6 に風車応力計測項目の一覧を示す。

表C 1.6 風車観測項目 - 台風(強風) -

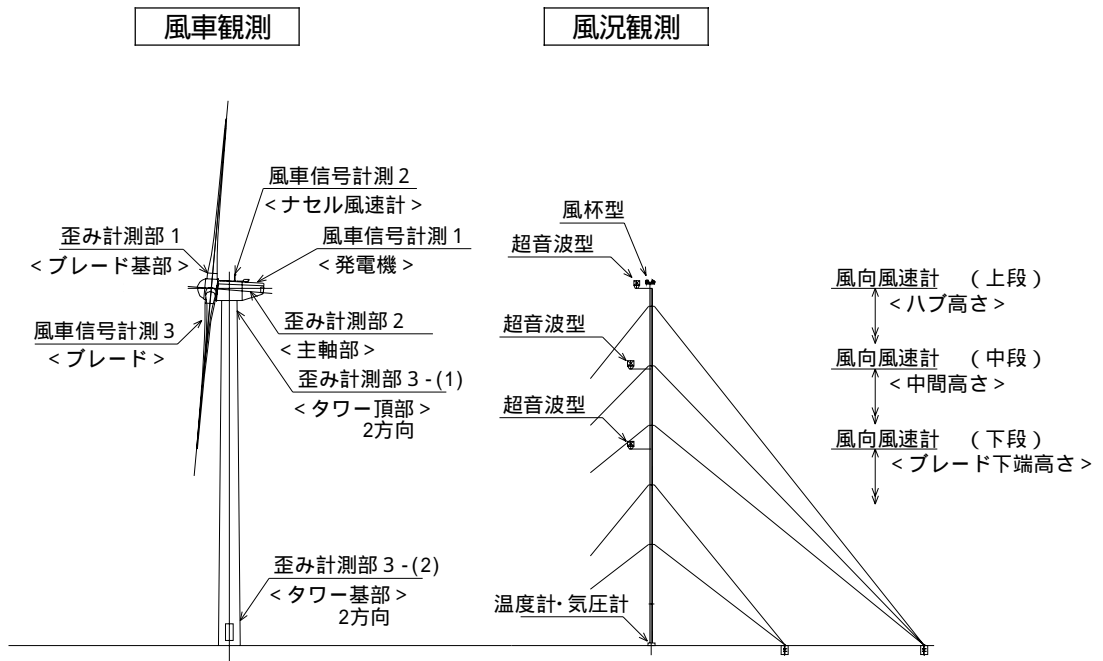
観測項目		概 要	備 考
歪み	ブレード基部	エッジ方向モーメント フラップ方向モーメント	
	タワー頂部 ・基部	東西成分モーメント 南北成分モーメント	
	主軸	モーメント、トルク	
風車信号	発電機	回転数(ロータ)、出力	
	ナセル風速計	風速、風向	
	ブレード	ピッチ角、アジマス角	
	ロータ	回転数	

(2) 風の乱れ観測サイト

風況観測については、風の鉛直分布を把握するためにハブ高さ等の3高度において、乱れと風力発電設備の応力との関係を求める際に必要となる周波数帯での変動を捉えられるように、主に高感度の超音波風速計を用いて4Hzでの瞬時風速の3成分値を計測する。

風力発電設備に作用する応力観測については、ブレード基部、主軸及びタワーに歪みゲージを設置して、観測断面に発生する断面力の測定を行う。

図C1.10に風況観測および風車観測の観測機器配置図を示す。



図C1.10 観測機器配置図 - 風の乱れ -

表C1.7に風況観測の仕様を示す。

表C1.7 風況観測仕様 - 風の乱れ -

観測地点		C地点	D地点	E地点
測定範囲・耐風速		~60m/s、耐風速60m/s以上		
風速計種別 ・サンプリング 間隔	(上段) ハブ高付近	(高度68m) 超音波型(4Hz) 風杯型(4Hz)	(高度35m) 超音波型(4Hz) 風杯型(4Hz)	(高度65m) 超音波型(4Hz) 風杯型(4Hz)
	(中段) ブレード中間付近	(高度53m) 超音波型(4Hz)	(高度25m) 超音波型(4Hz)	(高度48m) 超音波型(4Hz)
	(下段) ブレード下端付近	(高度38m) 超音波型(4Hz)	(高度15m) 超音波型(4Hz)	(高度30m) 超音波型(4Hz)
気温・気圧		地上(高度1.5m)において測定 (10分値)		

表C1.8に風車観測の仕様を示す。

表C1.8 風車観測仕様 - 風の乱れ -

観測地点		C地点	D地点	E地点
風車		MWT-1000A	MWT-600	JSW Z70-2000
出力(kW)		1,000	600	2,000
ハブ高(m)		68	37	65
ロータ径(m)		61.4	42	70.65
歪み計測位置 ・サンプリング 間隔	(計測部1) ブレード基部	1本×ブレード基部2方向(20Hz)		
	(計測部2) 主軸	主軸トルク・曲げ(20Hz)		
	(計測部3) タワー頂部・基部	タワー2方向(20Hz)		
風車信号	発電機	発電機回転数(ロータ)、発電機出力		
	ナセル風速計	ナセル風速、ナセル方位、風向偏差、		
	ブレード	回転パルス <sup>1</sup> 、ピッチ指令角、ピッチ実角(20Hz)		

<sup>1</sup>ポスト処理時アジマス角へ変換

上記の他、風観測との同期を図る為の信号を受け入れる。

### C 1.3 風況観測の整理

#### (1) 通年風況

##### 1) 最大風速

観測期間中の最大風速の発生状況を把握するために、地点別の月別最大風速を表C 1.9に示す。表は月ごとの最大瞬間風速(瞬時値)と、その時の10分平均風速を最大平均風速として示している。いずれの風速も、観測マスト頂部に設置された3杯型風速計の値である。風速とあわせて、最大瞬間風速の起日と、最大風速の要因と判断される気象条件も記載した。サイトごとに、上位5位までのケースは塗りつぶしにより強調して示した。また、上位5位までの風速風向時系列波形を表C 1.10および表C 1.11に示す

A地点においては、2007年7月13日に最大瞬間風速73 m/s(最大平均風速は52 m/s)が観測され、全地点中最大であった。これはIEC Class を超過するレベルにあり、台風0704号によるものである。2番目、3番目および4番目となる最大瞬間風速46 m/s、43 m/sおよび41 m/sも台風によるもので、台風襲来地域にあるA地点サイトの特性が現れている。

B地点においては、当初の計画に反し、観測期間中、台風による強風はなかった。台風の規模に至らない低気圧の影響により、2007年1月6日に最大瞬間風速47 m/sを記録するに留まった。

C地点においては、2006年9月18日に最大瞬間風速として48 m/sが観測された。これは台風0613号によるものである。

D地点においては、2007年10月27日に台風0720号により最大瞬間風速58 m/s、2006年10月6日に台風0616号により最大瞬間風速56 m/sが観測された。

E地点においては、2007年9月7日に最大瞬間風速34 m/sが観測された。これは台風0709号によるものである。

F地点においては、2007年7月14日に最大瞬間風速48 m/sが観測された。これは台風0704号によるものである。

G地点においては、2007年9月18日に台風0720号により最大瞬間風速46 m/sが観測された。上位5位までが台風によるもので、台風襲来地域にあるG地点サイトの特性が現れている。

2006年、2007年の台風の発生数は23個および24個であり、平年(平年値26.7個)に比べて少なく、比較的少ない傾向が続いている。日本へ接近した台風は、2006年が10個、2007年が12個である。日本に上陸した台風は、2006年が0610号、0613号の2個、2007年が0704号、0705号、0709号の3個である。2006年、2007年の台風による最大瞬間風速としては、0613号により西表島で69.9 m/s、0704号により宮崎県日南市で55.9 m/sの気象官署の記録がある。

表C1.9 風況観測データ(月別最大風速値)

年 月	地点	A	B	C	D	E	F	G
	所在地	沖縄県	高知県	鳥取県	静岡県	北海道	鹿児島県	沖縄県
	地点名	佐敷	室戸	鳥取	東伊豆	室蘭	中種子	宮古島
地上高(標高)	152.0 m	236.5 m	331.5 m	431.0 m	1.8 m	77.5 m	70.5 m	
八ツ高	60.0 m	30.5 m	68.0 m	37.0 m	65.0 m	35.3 m	35.0 m	
2006年	6月	生起日	6月10日	6月4日	6月15日	6月17日		
		最大瞬間風速	29 m/s	19 m/s	44 m/s	31 m/s		
		最大風速	17 m/s	16 m/s	27 m/s	18 m/s		
	7月	生起日	7月8日		7月10日	7月19日		
		最大瞬間風速	43 m/s		26 m/s	39 m/s		
		最大風速	31 m/s		19 m/s	24 m/s		
	8月	生起日	8月9日	8月16日	8月19日	8月15日		
		最大瞬間風速	30 m/s	31 m/s	24 m/s	32 m/s		
		最大風速	13 m/s	25 m/s	14 m/s	20 m/s		
	9月	生起日	9月16日	9月6日	9月18日	9月25日		
		最大瞬間風速	41 m/s	20 m/s	48 m/s	33 m/s		
		最大風速	29 m/s	11 m/s	25 m/s	22 m/s		
10月	生起日	10月5日	10月13日	10月6日	10月6日		10月30日	
	最大瞬間風速	22 m/s	23 m/s	30 m/s	56 m/s		27 m/s	
	最大風速	15 m/s	17 m/s	21 m/s	36 m/s		10 m/s	
11月	生起日	11月22日	11月7日	11月11日	11月20日		11月7日	
	最大瞬間風速	41 m/s	39 m/s	24 m/s	40 m/s		30 m/s	
	最大風速	20 m/s	21 m/s	16 m/s	24 m/s		16 m/s	
12月	生起日	12月16日	12月17日	12月2日	12月28日	12月23日	12月29日	
	最大瞬間風速	27 m/s	35 m/s	24 m/s	36 m/s	23 m/s	36 m/s	
	最大風速	18 m/s	20 m/s	13 m/s	17 m/s	15 m/s	18 m/s	
2007年	1月	生起日	1月7日	1月6日	1月26日	1月7日	1月7日	1月7日
		最大瞬間風速	24 m/s	47 m/s	20 m/s	47 m/s	31 m/s	43 m/s
		最大風速	15 m/s	26 m/s	13 m/s	28 m/s	23 m/s	20 m/s
	2月	生起日	2月1日	2月14日	2月14日	2月14日	2月14日	2月15日
		最大瞬間風速	24 m/s	37 m/s	31 m/s	47 m/s	33 m/s	32 m/s
		最大風速	18 m/s	24 m/s	19 m/s	25 m/s	21 m/s	18 m/s
	3月	生起日	3月6日	3月25日	3月5日	3月5日	3月12日	3月6日
		最大瞬間風速	23 m/s	34 m/s	42 m/s	41 m/s	27 m/s	40 m/s
		最大風速	14 m/s	22 m/s	28 m/s	22 m/s	18 m/s	23 m/s
	4月	生起日	4月18日	4月13日	4月20日	4月1日	4月26日	4月18日
		最大瞬間風速	28 m/s	39 m/s	29 m/s	49 m/s	25 m/s	36 m/s
		最大風速	19 m/s	21 m/s	19 m/s	25 m/s	17 m/s	18 m/s
5月	生起日	5月6日	5月10日	5月17日	5月18日	5月26日	5月10日	
	最大瞬間風速	20 m/s	38 m/s	44 m/s	34 m/s	30 m/s	30 m/s	
	最大風速	13 m/s	21 m/s	23 m/s	17 m/s	20 m/s	15 m/s	
6月	生起日	6月12日	6月3日	6月13日	6月22日	6月6日	6月14日	
	最大瞬間風速	26 m/s	26 m/s	25 m/s	35 m/s	15 m/s	30 m/s	
	最大風速	19 m/s	21 m/s	17 m/s	20 m/s	11 m/s	12 m/s	
7月	生起日	7月13日	7月15日	7月10日	7月4日	7月11日	7月14日	
	最大瞬間風速	73 m/s	32 m/s	23 m/s	35 m/s	18 m/s	48 m/s	
	最大風速	52 m/s	16 m/s	15 m/s	20 m/s	13 m/s	28 m/s	
8月	生起日	8月11日	8月2日	8月3日	8月22日	8月16日	8月2日	
	最大瞬間風速	36 m/s	35 m/s	26 m/s	26 m/s	15 m/s	44 m/s	
	最大風速	24 m/s	26 m/s	20 m/s	16 m/s	11 m/s	26 m/s	
9月	生起日	9月14日	9月11日	9月15日	9月6日	9月7日	9月19日	
	最大瞬間風速	46 m/s	21 m/s	29 m/s	52 m/s	34 m/s	30 m/s	
	最大風速	25 m/s	16 m/s	18 m/s	32 m/s	21 m/s	9 m/s	
10月	生起日	10月7日	10月10日	10月27日	10月27日	10月9日	10月27日	
	最大瞬間風速	26 m/s	27 m/s	23 m/s	58 m/s	26 m/s	30 m/s	
	最大風速	18 m/s	20 m/s	16	40 m/s	16 m/s	10 m/s	
11月	生起日	11月27日	11月18日	11月12日	11月18日	11月20日	11月5日	
	最大瞬間風速	27 m/s	26 m/s	26 m/s	38 m/s	29 m/s	33 m/s	
	最大風速	13 m/s	13 m/s	20 m/s	21 m/s	18 m/s	17 m/s	
12月	生起日	12月21日	12月22日	12月7日	12月7日	12月29日		
	最大瞬間風速	28 m/s	40 m/s	19 m/s	40 m/s	32 m/s		
	最大風速	12 m/s	26 m/s	10 m/s	21 m/s	21 m/s		
2008年	1月	生起日					1月30日	
		最大瞬間風速					17 m/s	
2月	生起日					2月13日		
	最大瞬間風速					27 m/s		

凡例	凡例	第1位	第2位	第3位	第4位	第5位
----	----	-----	-----	-----	-----	-----



表C 1.10 観測地点における強風の発生状況(1)

	A地点	B地点	C地点	D地点
強風ベスト5 特定時系列	2007/7/13 (台風0704:南風) 73m/s 52m/s 1.40	2007/01/06 (前線・低気圧:西風) 47m/s 26m/s 1.81	2006/09/18 (台風0613:南風) 48m/s 25m/s 1.92	2007/10/27 (台風0720:北東風) 58m/s 40m/s 1.45
METハブ高度3杯型風速計記録 発生日(気象要因、風向) 最大瞬間風速 最大風速(10分間平均)	2007/9/14 (台風0711:南風) 46m/s 25m/s 1.84	2007/12/22 (前線・低気圧:北東風) 40m/s 26m/s 1.54	2007/05/17 (前線・低気圧:南風) 44m/s 23m/s 1.91	2006/10/06 (台風0616:北東風) 56m/s 36m/s 1.56
突風率 A地点のみプロペラ風速計記録	2006/7/8 (台風0603:南風) 43m/s 31m/s 1.39	2007/4/13 (西風) 39m/s 21m/s 1.86	2006/06/15 (前線・低気圧:南風) 44m/s 27m/s 1.63	2007/9/6 (台風0709:北東風) 52m/s 32m/s 1.63
	2006/11/22 (竜巻?南風) 41m/s 20m/s 2.05	2006/11/7 (前線・低気圧:西風) 39m/s 21m/s 1.89	2007/3/5 (前線・低気圧:南南東風) 42m/s 28m/s 1.5	2007/04/01 (前線・低気圧:南西風) 49m/s 25m/s 1.96
	2006/09/16 (台風0613:南風) 41m/s 29m/s 1.41	2007/5/10 (前線・低気圧:西風) 38m/s 21m/s 1.81	2007/8/3 (台風0705:南風) 39m/s 20m/s 1.95	2007/02/14 (前線・低気圧:南西風) 47m/s 25m/s 1.89

表C 1.11 観測地点における強風の発生状況(2)

	E地点	F地点	G地点
強風ベスト5 特定時系列	2007/09/07 (台風0709: 東風) 34m/s 21m/s 1.60	2007/07/14 (台風0704: 南南東風) 48m/s 28m/s 1.69	2007/09/18 (台風0712: 東南東風) 46m/s 32m/s 1.54
MET ハブ高度3杯型風速計記録			
発生日(気象要因、風向)			
最大瞬間風速			
最大風速(10分間平均)			
突風率			
	2007/02/14 (前線・低気圧: 東南東風) 33m/s 21m/s 1.50	2007/08/02 (台風0705: 西風) 44m/s 26m/s 1.82	2007/10/06 (台風0715: 南東風) 45m/s 28m/s 1.58
	2007/12/29 (前線・低気圧: 東南東風) 32m/s 21m/s 1.55	2007/01/07 (前線・低気圧: 西北西風) 43m/s 20m/s 1.76	2007/11/27 (台風0723: 東北東風) 41m/s 22m/s 1.72
	2007/01/07 (前線・低気圧: 北北西風) 31m/s 23m/s 1.49	2007/03/06 (西北西風) 40m/s 23m/s 1.64	2007/07/12 (台風0704: 北東風) 38m/s 19m/s 1.71
	2007/05/26 (前線・低気圧: 南東風) 30m/s 20m/s 1.57	2006/12/29 (西北西風) 36m/s 18m/s 1.63	2007/08/08 (台風0706: 東南東風) 36m/s 20m/s 1.52

## 2) その他風況

1年間の風況を、下記の期間にわたる10分値データに基づき整理した。有効データ数を十分確保するため、地点により整理対象データ期間をずらした。E地点は、観測期間途中で風車が増設されたため、観測開始から風車増設までの期間とした。

- ・ A地点： 2006年12月～2007年11月
- ・ B地点： 2007年1月～2007年12月
- ・ C地点： 2006年12月～2007年11月
- ・ D地点： 2006年12月～2007年11月
- ・ E地点： 2006年12月～2007年7月
- ・ F地点： 2006年12月～2007年11月
- ・ G地点： 2006年12月～2007年11月

以下の各種項目につき整理した。必要に応じて、IEC規格との比較を行った。

- ・ 風向頻度分布
- ・ 風速頻度分布
- ・ 風速鉛直分布
- ・ 吹上角分布
- ・ 乱れ度分布





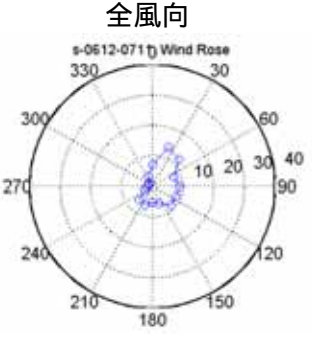
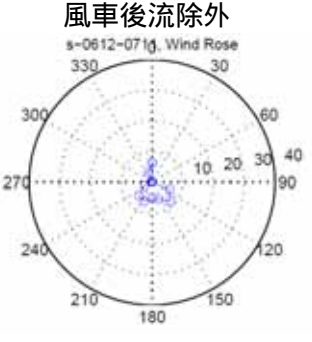
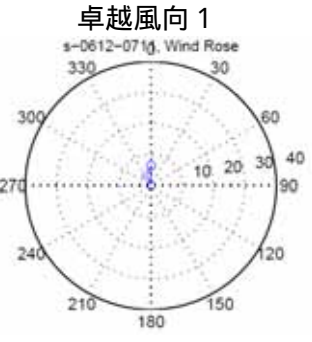
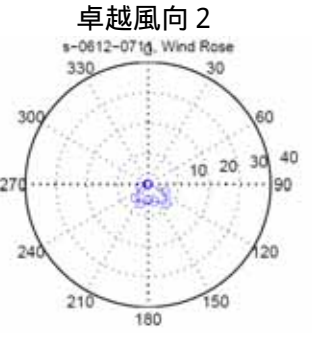
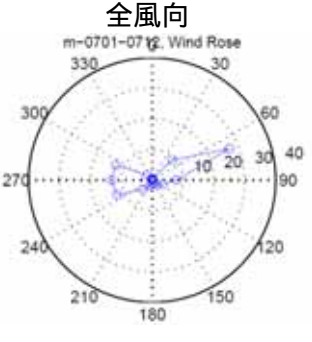
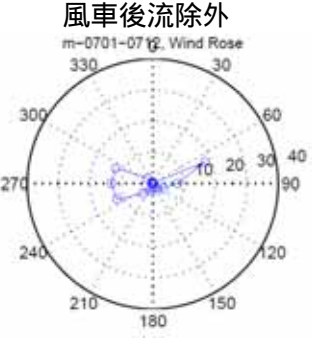
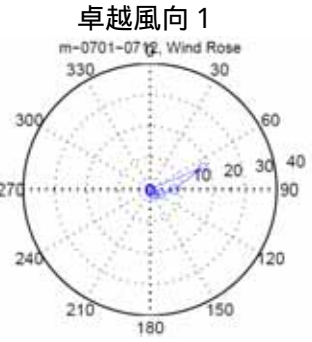
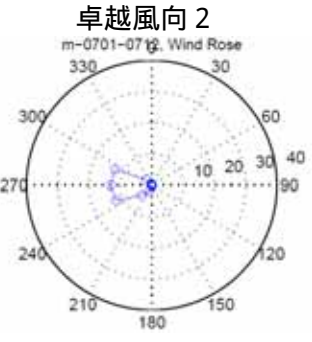
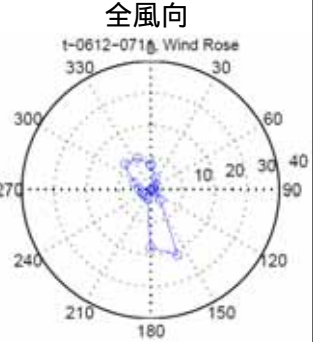
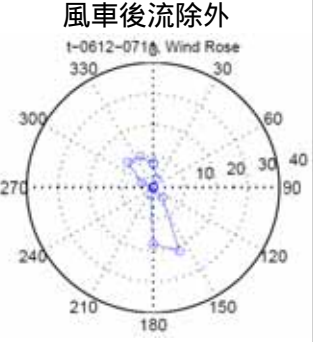
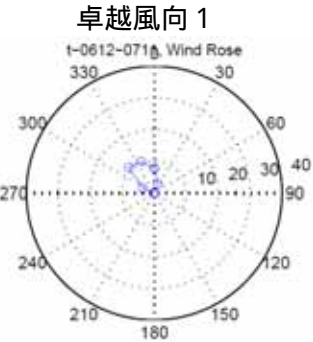
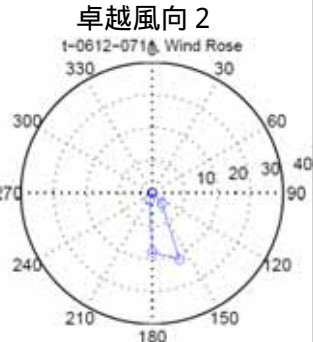
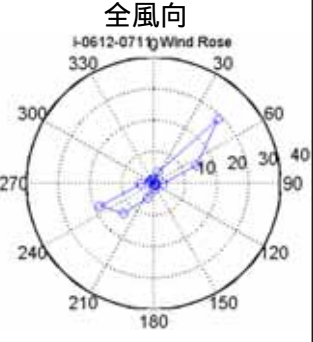
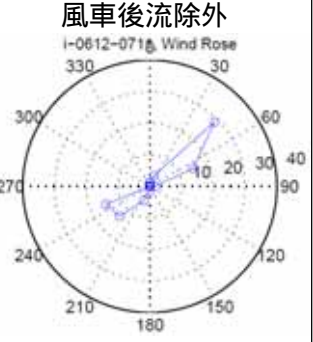
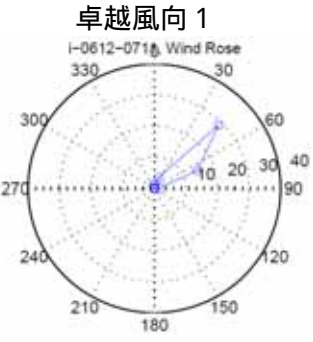
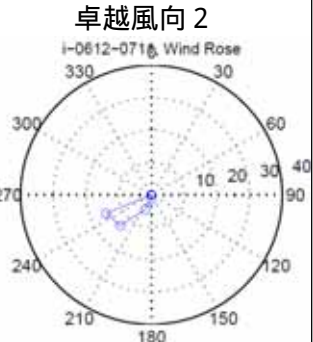
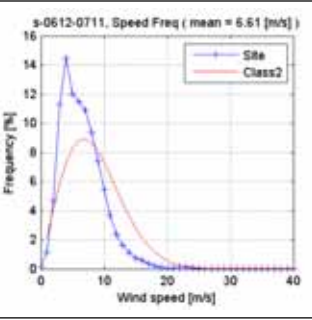
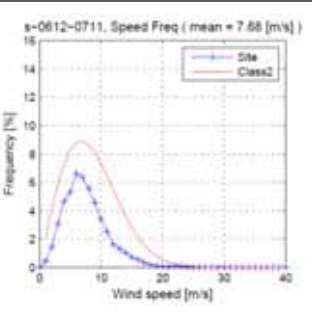
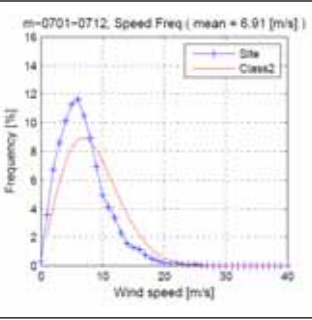
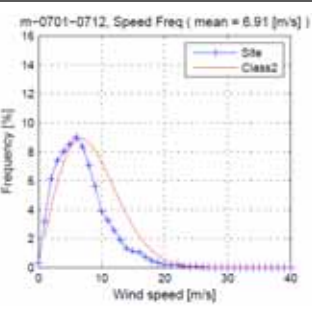
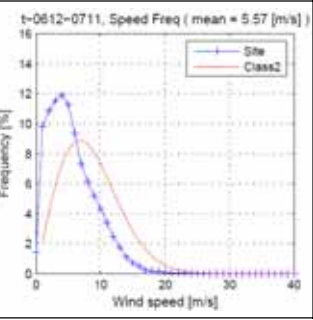
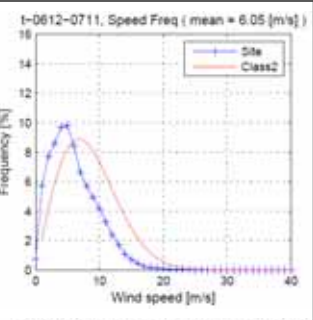
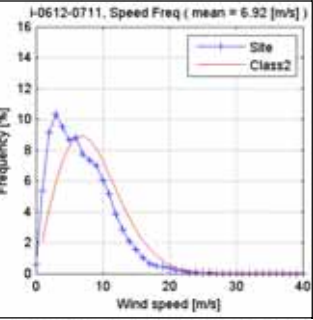
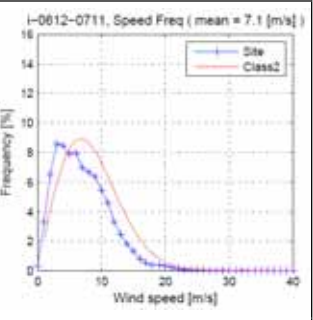
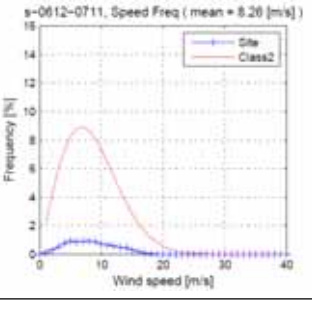
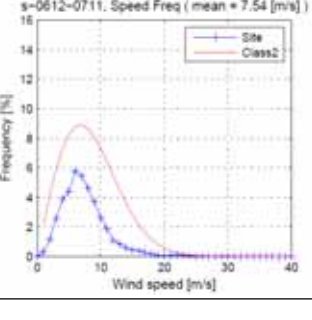
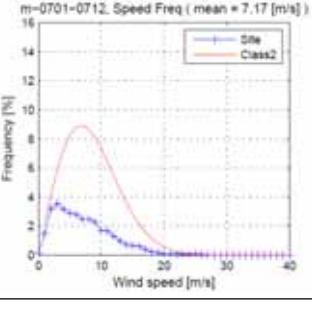
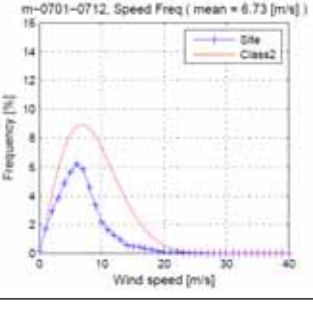
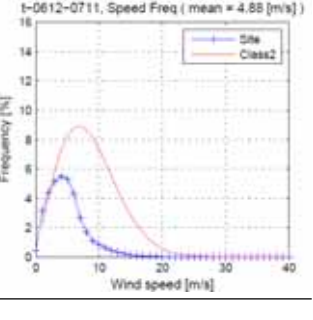
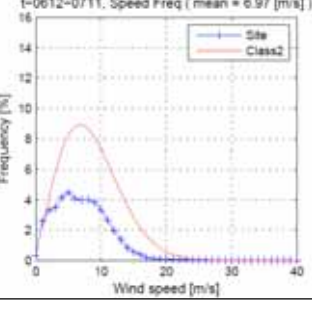
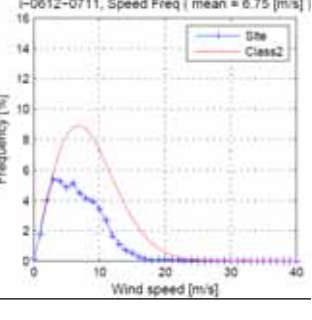
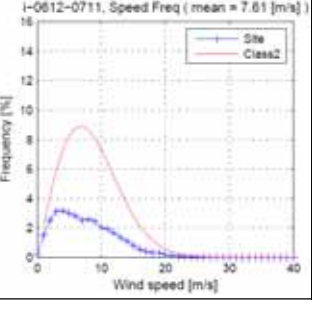
基準とした風向計・風速計は観測マスト最頂部の3杯型風速計および矢羽型風向計とし、水平風速の鉛直分布は各高さの超音波風速計あるいはプロペラ型風速計を、吹上角はマスト最頂部の超音波風速計から求めた。なお乱れ度については平均値と特性値を示した。特性値の算出方法はIEC 61400-1 Ed.3(2005)に準拠し、乱れ度の平均値に、乱れ度の標準偏差の1.28倍の値を加えることで算出した。

整理においては、4種類の風向区分を設けた。一つ目は、0～360度にわたる全方位として、“全風向”を設定した。二つ目は、観測値に含まれる風車後流(ウェイク)の影響を除外するため、IEC 61400-12(風車性能計測)に基づき、“風車後流除外”風向として、観測マストが風車による影響を受けない風向を設定した。この場合、計測対象風車だけでなく、サイト内の他風車による影響も除外されている。風向頻度にピークが二つ見られるケースが4サイト中3サイト存在したため、“卓越風向1”と“卓越風向2”とした。これらの風向は、それぞれのピークを含んだ180度範囲の方位を設定し、その方位から風車後流の影響を受ける風向を除外して設定した。

上記項目に関する整理結果の一覧を表C1.12～表C1.15に示す。各項目についての詳細は後述する。

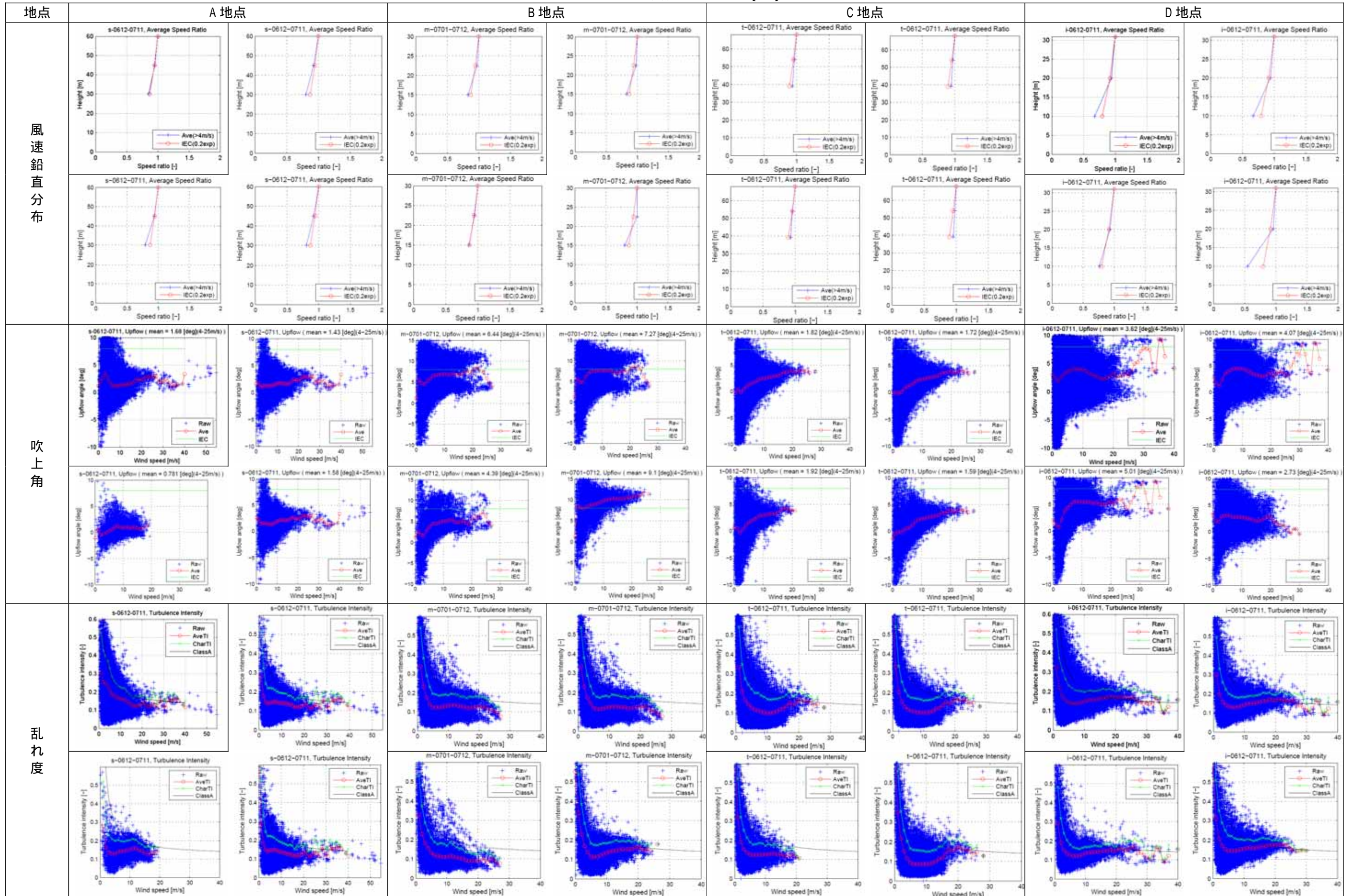


表C 1.1 2 風況データ整理(1)

地点	A 地点		B 地点		C 地点		D 地点	
周辺状況								
風向頻度分布	<p>全風向</p>  <p>風車後流除外</p>  <p>卓越風向 1</p>  <p>卓越風向 2</p> 		<p>全風向</p>  <p>風車後流除外</p>  <p>卓越風向 1</p>  <p>卓越風向 2</p> 		<p>全風向</p>  <p>風車後流除外</p>  <p>卓越風向 1</p>  <p>卓越風向 2</p> 		<p>全風向</p>  <p>風車後流除外</p>  <p>卓越風向 1</p>  <p>卓越風向 2</p> 	
風速頻度分布	<p>s-0612-0711, Speed Freq ( mean = 6.51 [m/s] )</p>  <p>s-0612-0711, Speed Freq ( mean = 7.68 [m/s] )</p> 		<p>m-0701-0712, Speed Freq ( mean = 6.91 [m/s] )</p>  <p>m-0701-0712, Speed Freq ( mean = 6.91 [m/s] )</p> 		<p>t-0612-0711, Speed Freq ( mean = 5.57 [m/s] )</p>  <p>t-0612-0711, Speed Freq ( mean = 6.05 [m/s] )</p> 		<p>i-0612-0711, Speed Freq ( mean = 6.92 [m/s] )</p>  <p>i-0612-0711, Speed Freq ( mean = 7.1 [m/s] )</p> 	
	<p>s-0612-0711, Speed Freq ( mean = 8.20 [m/s] )</p>  <p>s-0612-0711, Speed Freq ( mean = 7.54 [m/s] )</p> 		<p>m-0701-0712, Speed Freq ( mean = 7.17 [m/s] )</p>  <p>m-0701-0712, Speed Freq ( mean = 6.73 [m/s] )</p> 		<p>t-0612-0711, Speed Freq ( mean = 4.88 [m/s] )</p>  <p>t-0612-0711, Speed Freq ( mean = 6.97 [m/s] )</p> 		<p>i-0612-0711, Speed Freq ( mean = 6.75 [m/s] )</p>  <p>i-0612-0711, Speed Freq ( mean = 7.61 [m/s] )</p> 	



表C 1.13 風況データ整理 (2)

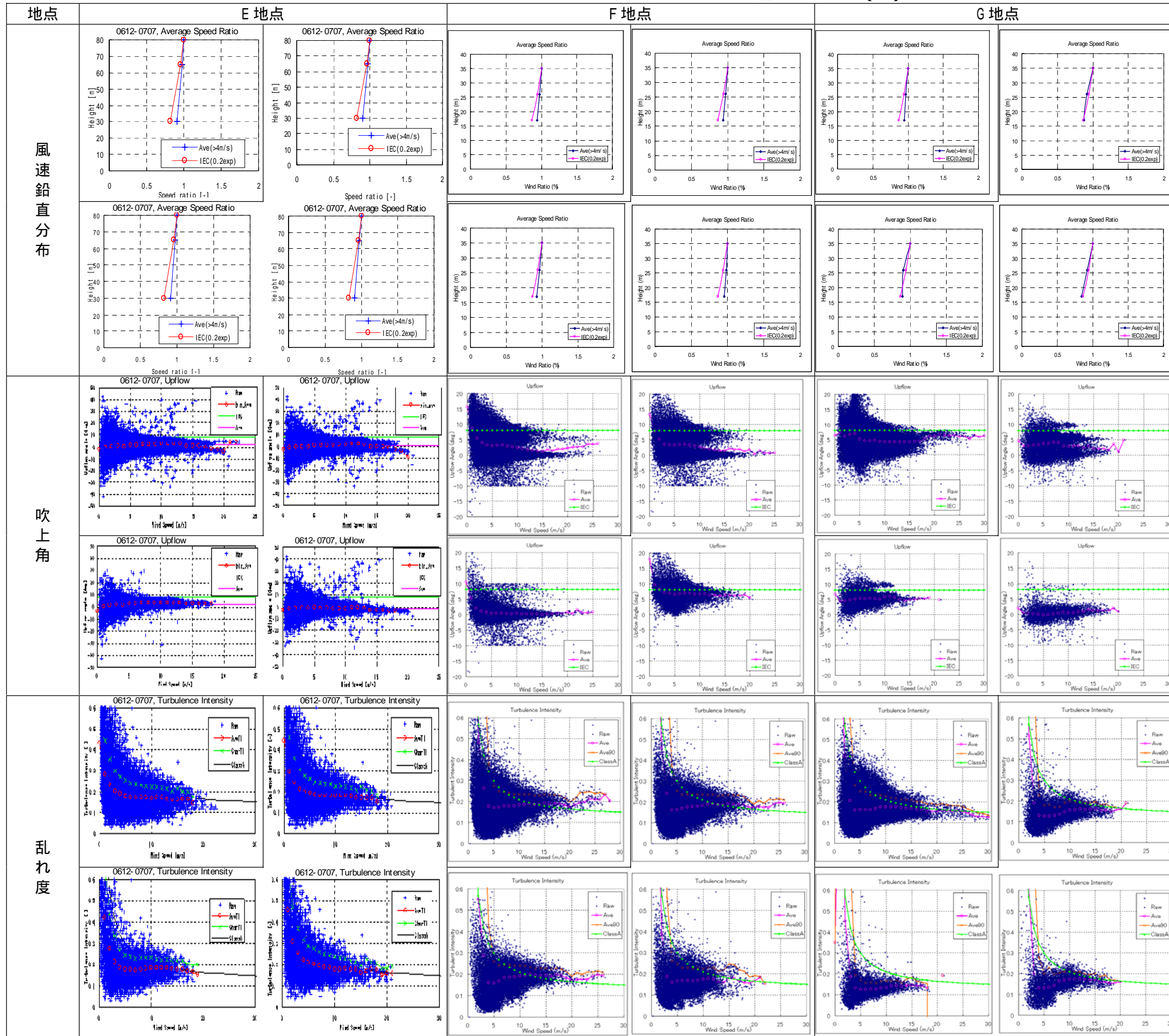




表C 1.1 4 風況データ整理 ( 3 )

地点	E 地点		F 地点		G 地点	
周辺状況						
	風向頻度分布	<p>全風向 0612-0707, Wnd Rose</p>	<p>風車後流除外 0612-0707, Wnd Rose</p>	<p>全風向</p>	<p>風車後流除外</p>	<p>全風向</p>
<p>卓越風向 1 0612-0707, Wnd Rose</p>		<p>卓越風向 2 0612-0707, Wnd Rose</p>	<p>卓越風向 1</p>	<p>卓越風向 2</p>	<p>卓越風向 1</p>	<p>卓越風向 2</p>
風速頻度分布	<p>0612-0707, Speed Freq (mean=5.59[m/s])</p>	<p>0612-0707, Speed Freq (mean=5.61[m/s])</p>	<p>Speed Freq, mean=6.83 (m/s)</p>	<p>Speed Freq, mean=6.53 (m/s)</p>	<p>Speed Freq, mean=6.83 (m/s)</p>	<p>Speed Freq, mean=6.65 (m/s)</p>
	<p>0612-0707, Speed Freq (mean=5.63[m/s])</p>	<p>0612-0707, Speed Freq (mean=4.68[m/s])</p>	<p>Speed Freq, mean=6.88 (m/s)</p>	<p>Speed Freq, mean=6.10 (m/s)</p>	<p>Speed Freq, mean=6.33 (m/s)</p>	<p>Speed Freq, mean=7.44 (m/s)</p>

表C 1.15 風況データ整理(4)



(a) 風向頻度分布

16 方位による風向頻度分布を図に示す。

A 地点においては、風車後流の影響により北から東の方位は大幅に除外すると、明確に卓越した風向は確認されず、出現風向頻度は北北西から南東にかけてほぼ一様に分布する。

B 地点においては、太平洋に南に突き出た岬に位置するため、南北に伸びた尾根に直交して二つの卓越風向が存在し、それぞれ東と西である。

C 地点においては、北風および南風が卓越する。北風は海寄りの風であり、南風は山寄りの風である。

D 地点においては、B 地点と同様に尾根に直交して卓越風向が存在し、それぞれ北東と南西である。

E 地点においては、西北西風および東南東風が卓越する。西北西風は海寄りの風であり、東南東風は山寄りの風である。

F 地点においては、尾根に直交して卓越風向が存在し、それぞれ北西と北東である。

G 地点においては、車後流の影響により北東から東の方位を除外すると、二つの卓越風向が存在し、それぞれ北北東と南西である。

(b) 風速頻度分布

風速頻度分布と平均風速を図に示す。頻度の算出においては、中央値を風速の整数値とし、風速幅を 1 m/s としてビン法を用いた。比較の目安として、IEC Class (平均風速 8.5 m/s、レイリー分布) を示した。サイトでの各風向における平均風速を表 C 1.16 に示す。

全体的な傾向として、平均風速はいずれのサイトにおいても 6~7m/s 程度であり、例えば IEC Class (8.5m/s) を下回る。観測マストが風車の後流に入る風向を除外した風向では、全風向に比べて、平均風速が増加する。これは風車ウェイクによる風速減少分が除外されたことが主要因である。風車後流を除外した場合、平均風速は高いところで 7.68 m/s となり、IEC Class (7.5 m/s) レベルにある。卓越する風向により平均風速は 1m/s 前後異なり、風速頻度分布形状も異なる。

表 C 1.16 各サイトの平均風速

地点	全風向	風車後流除外	卓越風向 1	卓越風向 2
A	6.61 m/s	7.68 m/s	8.26 m/s	7.54 m/s
B	6.91 m/s	6.91 m/s	7.17 m/s	6.73 m/s
C	5.57 m/s	6.05 m/s	4.88 m/s	6.97 m/s
D	6.92 m/s	7.10 m/s	6.75 m/s	7.61 m/s
E	5.59 m/s	5.61 m/s	5.63 m/s	4.68 m/s
F	6.83 m/s	6.53 m/s	6.88 m/s	6.10 m/s
G	6.83 m/s	6.65 m/s	6.33 m/s	7.44 m/s



### (c) 風速鉛直分布

風速の鉛直方向分布（ウインドシア）を調べるため、各観測高さで得られた平均風速（水平成分）の、観測マスト頂部での風速に対する比率を図に示す。比率が小さくなるほど、すなわち、折れ線の勾配が小さくなるほど（寝てくるほど）、ウインドシアは大きい。

風速の平均化においては、カットイン風速以上を考慮して風速ビン 4m/s 以上の風速とした。図中には、IEC 61400-1 Ed.3(2005)におけるべき指数 0.2 に対応する風速分布をあわせて示した。ここで用いた平均風速は、3つの観測高さで共通して設置されている風速計による値である。すなわち、A地点、B地点、F地点およびG地点においては風車型風速計を、C地点、D地点およびE地点においては超音波型風速計を用いた。

A地点においては、風向依存性が小さく、いずれの風向においても、IEC規格のウインドシアを僅かに超過する。

B地点においては、風向依存性があり風向によって変化し、東風（卓越風向1）ではIEC規格と同等であるが、西風（卓越風向2）ではIEC規格に比べて厳しい。平均的にはIEC規格を僅かに超過する。

C地点においては、風向依存性が小さく、いずれの風向においてもIEC規格より低下するレベルにある。

D地点においては、風向依存性があり風向によって変化し、南西風（卓越風向2）では観測高さの最下点で風速減少が著しく、IEC規格と比較して厳しい。

E地点においては、風向依存性が小さく、いずれの風向においてもIEC規格より低下するレベルにある。

F地点においては、風向依存性が小さく、いずれの風向においてもIEC規格より低下するレベルにある。

G地点においては、風向依存性が小さく、いずれの風向においても、IEC規格のウインドシアを僅かに超過する。

### (d) 吹上角分布

吹上角の散布図と風速ビンごとのピン平均値を図に示す。吹上角は観測マスト頂部に設置された超音波風速計から得られた10分平均値である。図中にはあわせてIEC規格値8度のラインを示した。

A地点では、いずれの風向においても吹上角は小さく、風向間の差も小さい。

B地点においては風向により吹上角の大きな差が見られる。東風（卓越風向1）ではIEC規格に満たない一方で、西風において平均値は9°でIEC規格を超過するとともに、風速増加とともに吹上角も増大し、風速24m/sでは11度を超える。全風向平均では7°で、IEC規格と同レベルにある。

C地点、D地点ともに、カットインからカットアウト風速においては、IEC規格を下回る。D地点では、風速30m/sを超える高風速域において、IEC規格を超過する場合がある。これは台風

等の強風時における現象と推測される。

E地点では、いずれの風向においても吹上角は小さく、風向間の差も小さい。

F地点、G地点ともに、カットインからカットアウト風速においては、IEC規格を下回る。F地点では、カットイン以下の低風速域において、IEC規格を超過する場合がある。

#### (e) 乱れ度分布

乱れ度の分布を図に示す。乱れ度は観測マスト頂部の3杯型風速計によるもので、風速ビンごとに平均値と特性値を示した。特性値はIEC 61400-1 Ed.3 2005に基づき、以下の式で求めた。IEC規格では、乱れ度の特性値は90%値に相当するとされている。特性値とIEC Class Aを比較した。

$$(\text{乱れ度特性値}) = (\text{乱れ度の平均値}) + 1.28 \times (\text{乱れ度の標準偏差})$$

A地点では風速20m/s以下ではClass A並み、風速20m/sを超えるとClass Aを超過する場合がある。これは台風時によるものと考えられる。

B地点では全風向においては高風速で僅かにClass Aを超過する。風向によって様相は異なり、東風(卓越風向1)ではClass Aを下回る一方で、西風(卓越風向2)ではClass Aを超過する。

C地点においては、風速15m/sを境に変化が見られ、15m/s以下ではClass A未滿、15m/s以上ではClass A超過となる。

D地点においてもC地点と同様に、風速15m/s以下でClass Aを下回る一方で、15m/s以上ではClass Aを超過する。

E地点においては、西北西風(卓越風向1)では風速8 m/s以下で、東南東風(卓越風向2)では風速6 m/s以下でClass Aを下回るが、それ以上の風速ではClass Aを超過する。

F地点においては、全風向においてClass Aを超過する。

G地点においては、南南東風(卓越風向1)では風速4 m/s以下でClass Aを超えるが、それ以上の風速ではClass Aを下回る。北北東風(卓越風向2)では風速4 m/s以下と風速10 m/s以上でClass Aを僅かに超過する。

#### (f) ワイブルパラメータ(形状係数)の算出

風速頻度分布形状を定量的に評価するために、風速頻度分布をワイブル分布で近似した。近似においては最小二乗法を用いた。近似結果を図C 1.1 1 ~ 図C 1.1 4に示す。形状係数kおよび尺度係数Cの値は図中に示した。形状係数については、表C 1.1 7に纏めた。なお、IEC 61400-1 Ed.3(2005)においては風速頻度分布形状としてレイリー分布(ワイブル分布において形状係数kを2としたもの)を仮定している。そのため、レイリー分布でも同様に近似した。

ヨーロッパの研究では、地形状況と形状係数は以下の関係にあるとされている<sup>1</sup>。

- ・ 海上 : 2.1
- ・ 海岸 : 1.9
- ・ 内陸 : 1.65 ~ 1.9
- ・ 複雑地形 : 1.5 以下

地形の状況を厳密に判断する基準がない（例えば、複雑地形の定義）ことを考えると、上記の地形状況に対する形状係数の値はあくまでも目安と考えるべきであるが、定性的に、地形の起伏が大きくなるにつれて形状係数の値は減少する傾向にあるといえる。また、繰り返しになるが、IEC 規格では形状係数 2 を仮定しており、上記区分で言えば内陸に相当する。

A 地点ではいずれの風向においても形状係数は 2 を超過する。サイトが海岸近くにあり、特に複雑な地形が周囲に存在していないサイト地形の特性を反映している。レイリー分布と比較しても大きく外れることはない。

B 地点においては、全体的な風向では形状係数は 2 を下回る。特徴的な点として、形状係数は卓越風向により大きく変化し、東風（卓越風向 1）では形状係数は 1.57 と小さくレイリー分布から外れる一方で、西風（卓越風向 2）ではレイリー分布とほぼ等しい 2.05 となった。

C 地点や D 地点ではさらに形状係数は減少し、それぞれ風車後流除外風向で 1.68、1.75 の値を取りレイリー分布と比べてやや乖離する方向にある。

定性的ではあるが地形図から判断される地形の複雑度の順番は、C 地点あるいは D 地点、B 地点、A 地点であることを考慮すれば、今回の計測で得られた形状係数と地形複雑度の関係はヨーロッパでの研究と整合する結果となった。

表 C 1.17 ワイブルパラメータ k (形状係数)

地点	全風向	風車後流除外	卓越風向 1	卓越風向 2
A	2.13	2.34	2.25	2.43
B	1.89	1.81	1.57	2.05
C	1.54	1.68	1.79	1.85
D	1.63	1.75	1.85	1.67
E				
F				
G				

<sup>1</sup> European Wind Turbine Standards II, Part1: Load Spectra and Extreme Wind Conditions, Sub C: Extreme Wind Climate Events, ECN-C-99-073, 1998

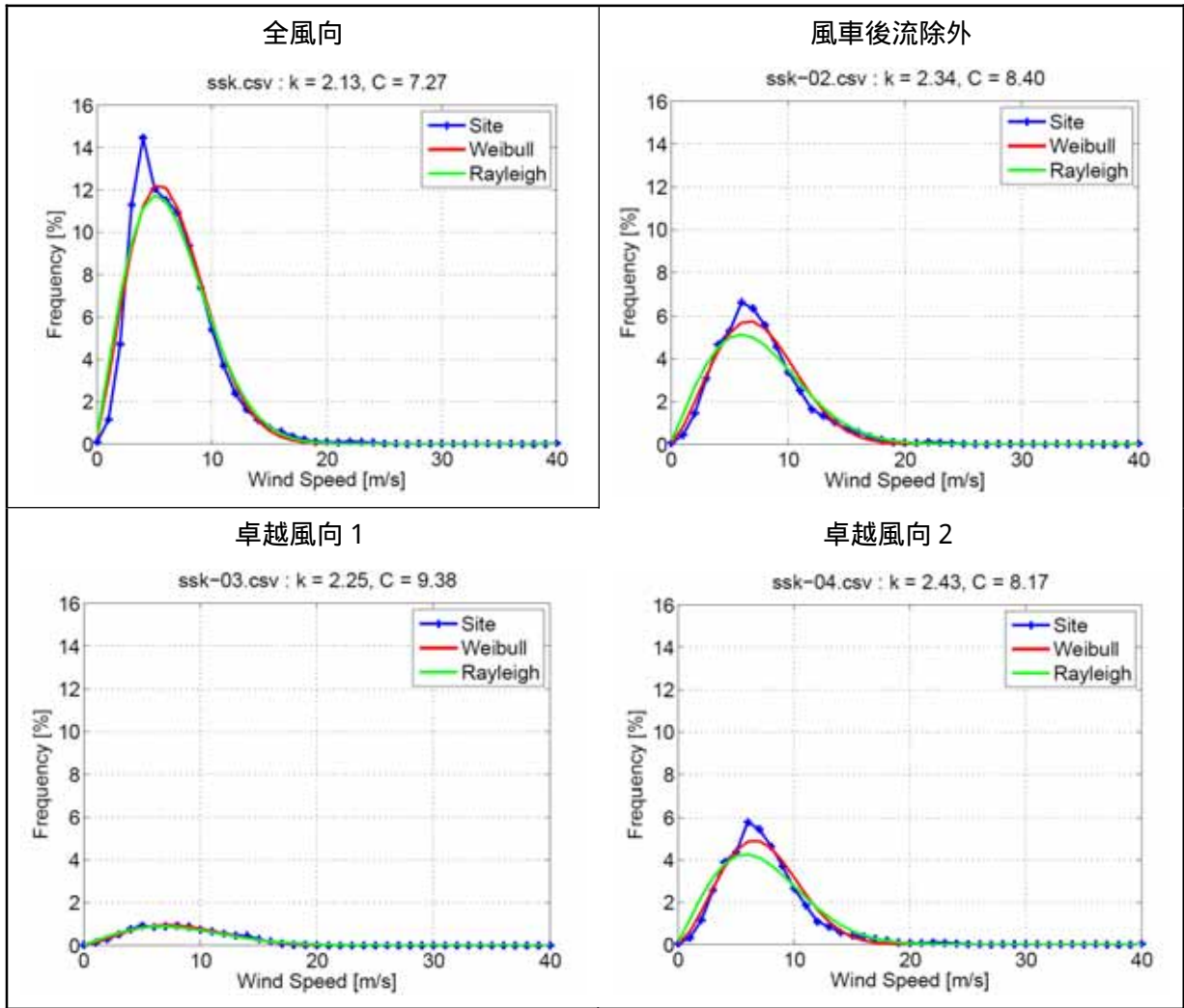


図 C 1.11 風速頻度分布の近似 (A地点)

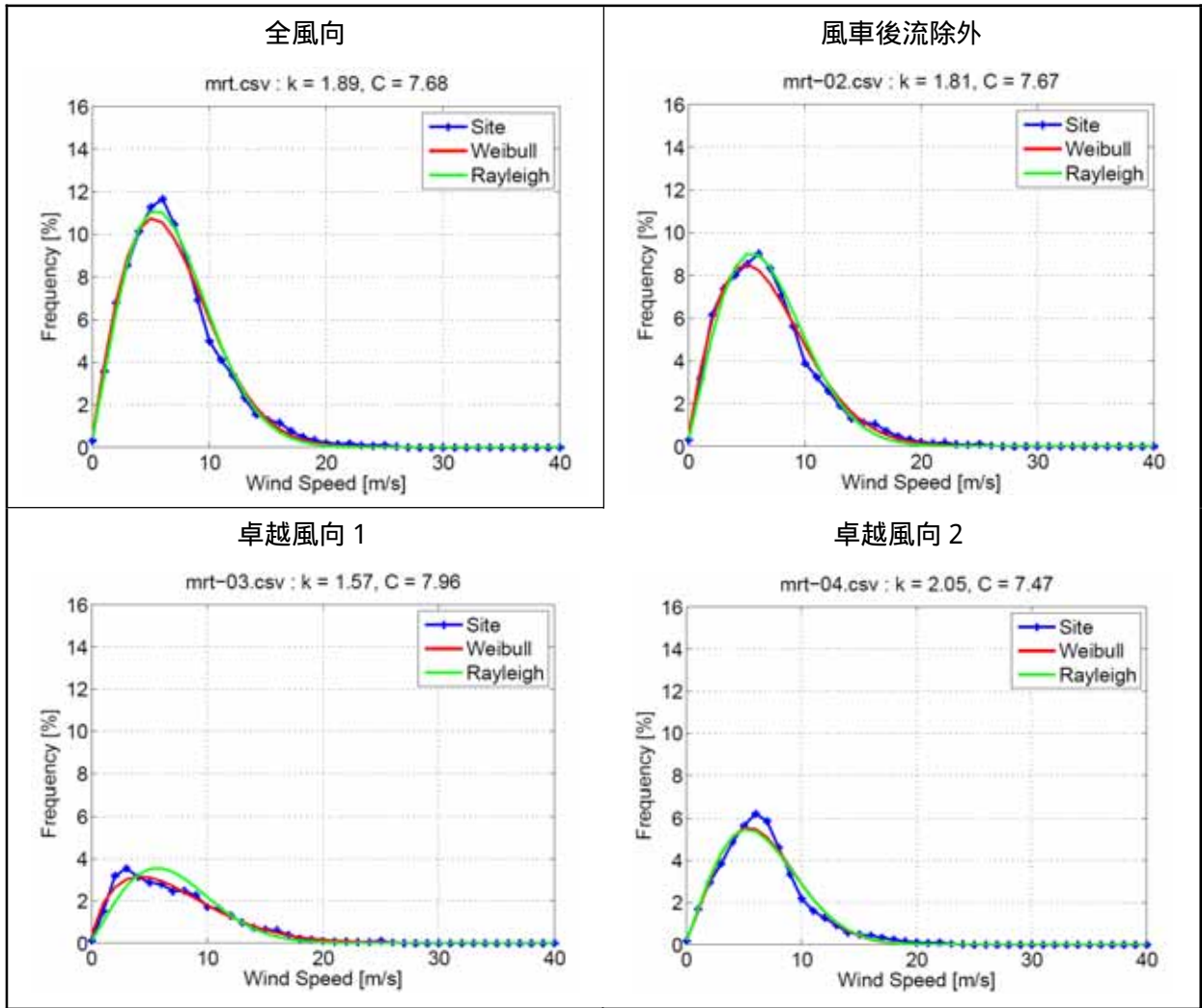


図 C 1.1 2 風速頻度分布の近似 ( B 地点 )

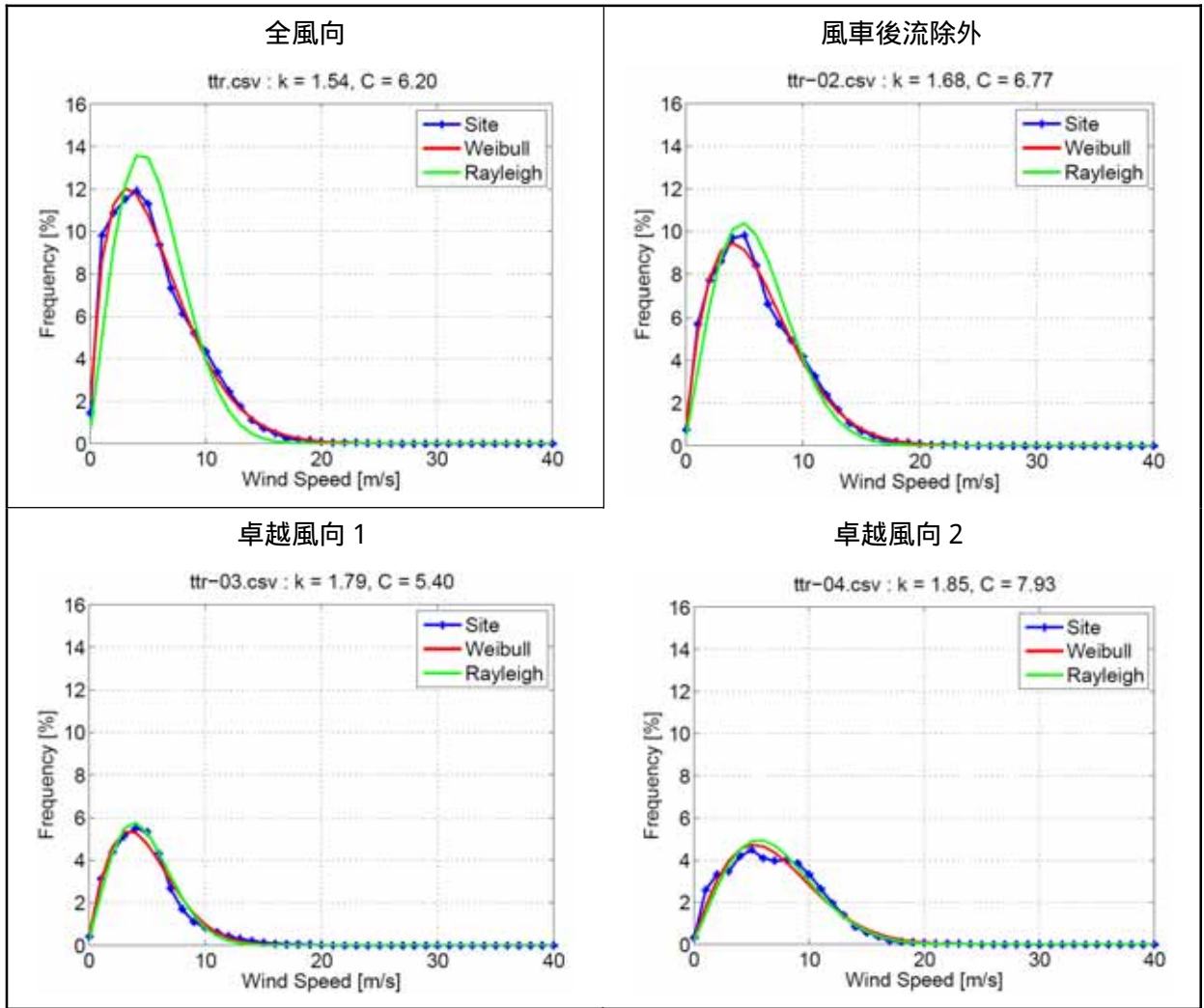


図 C 1.13 風速頻度分布の近似 (C地点)

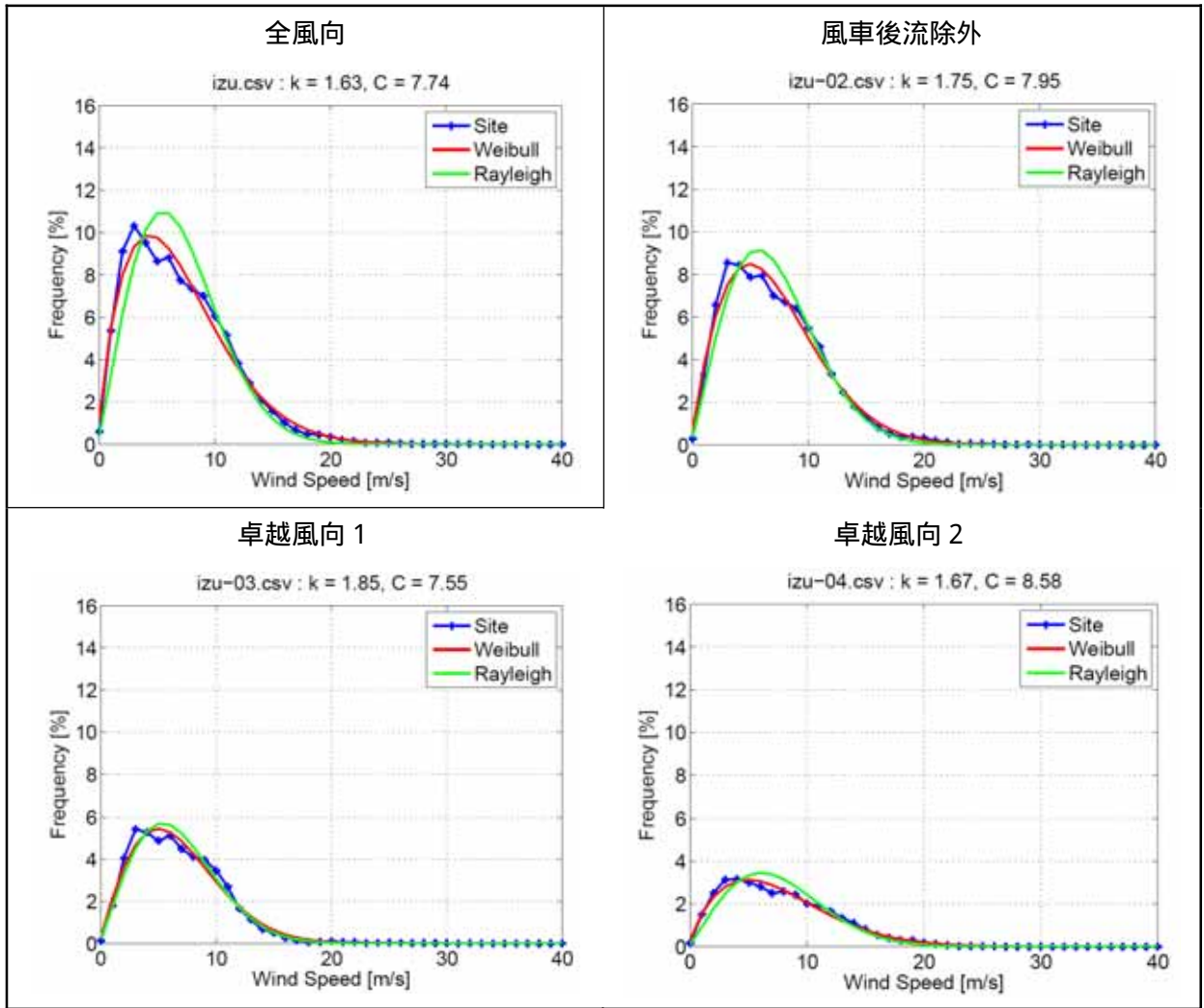


図 C 1.14 風速頻度分布の近似 (D地点)

### 3) 通年風況のまとめ

以上の整理結果から、各サイトの風況を IEC Class A と比較した結果を表C 1.18に示す。ここでは、風車後流による影響を除外した風向における風況を評価した。これまで見てきたように、卓越風向1・2それぞれについて風況が異なる場合が存在しても、同表はそれぞれを評価したものではない。

全体的に見ると、各サイトとも程度の大小は存在するものの、いずれかのパラメータが IEC 規格を超過していることがわかる。

表C 1.18 通年風況のまとめ (IEC Class A との比較)

	A地点	B地点	C地点	D地点	E地点	F地点	G地点
平均風速	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下
ウインドシア	僅かに 超過	僅かに 超過	以下	超過	超過	超過	超過
吹上角	以下	同等	以下	以下	以下	以下	以下
乱れ度分布	部分的に 超過	部分的に 超過	部分的に 超過	部分的に 超過	部分的に 超過	部分的に 超過	部分的に 超過



## (2) 特殊風況

急激な風速変化（ガスト）の整理を行い、IEC 規格との比較を実施した。国内のガストに関する評価は小垣ら<sup>2</sup>による例があり、今回の整理方法は同文献に拠った。

小垣らによるガスト評価の方法は、次のようである。風速の 10 分間時系列データについてある一定の時間枠  $T_G$  を有する窓を移動させる（“Moving Window”）。アップガスト  $+V_G$  は、Moving Window 内の風速最大値と Moving Window 左端の風速との差、ダウンガスト  $-V_G$  は風速最小値と左端風速との差として定義される。時間枠  $T_G$  は 5 [sec] とされている。

本解析では、上記の手法に基づき、通年の 10 分データに対して風向の区別なくガスト評価をした。ガスト評価においては観測マスト頂部の 3 杯型風速計を用いた。

評価結果は、IEC 規格により定められる極値運転中ガスト（Extreme Operating Gust）から求められるアップガスト・ダウンガストと比較した。EOG の変動振幅を決定するパラメータは、ロータ直径、ハブ高さ、乱れ度である。計測結果との比較を簡易的に行うために、各サイトで設置されている風車のロータ直径、ハブ高さ、乱れ度として Class A を設定して IEC 規格における EOG 変動を求め、計測結果と同様な処理を行うことで、IEC 規格に従った場合のアップガストとダウンガストを算出した。

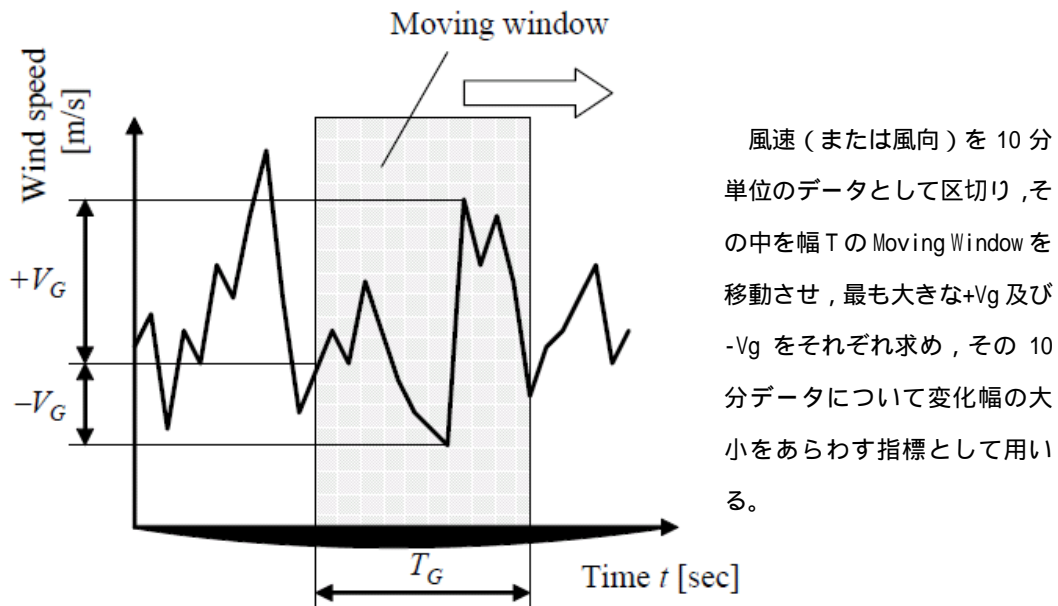


Fig. 4 Upgust and downgust defined by the IEA annex XVII.

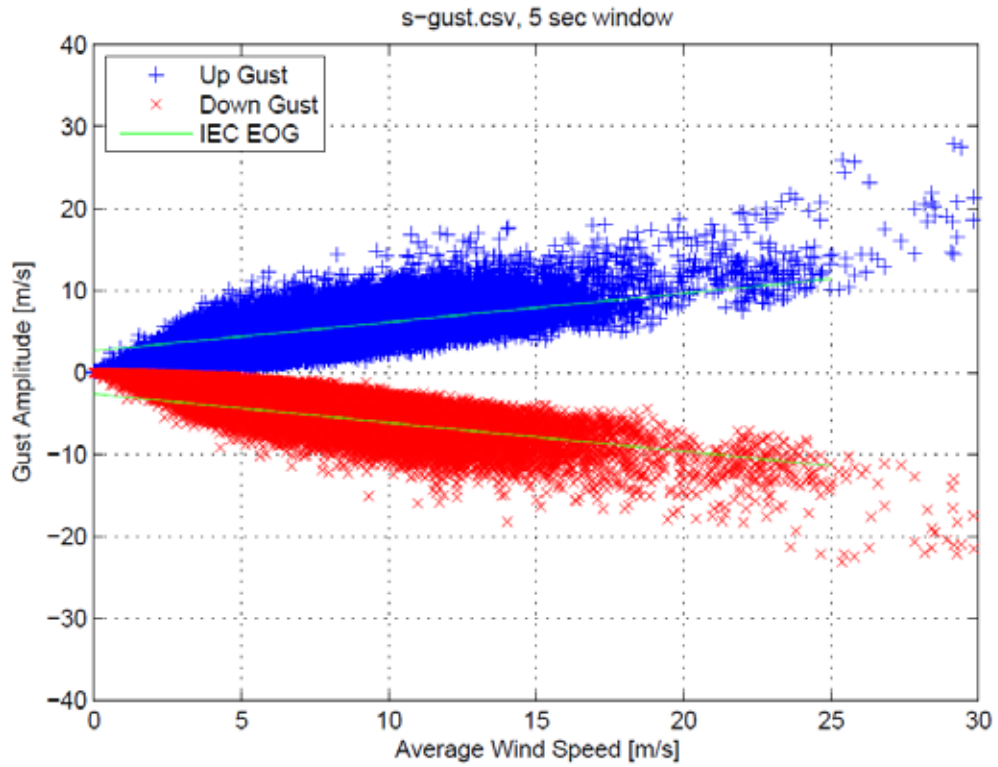
図 C 1.15 アップガストとダウンガストの評価手法（小垣氏文献より引用）

<sup>2</sup> 小垣, 松宮, 阿部, 小川, “日本における風特性と風力タービン設計のための風モデル(第2報, 超音波式風向風速計等を使用した実測計測データの解析)”, 日本機械学会論文集(B編) 73巻733号, 2007.

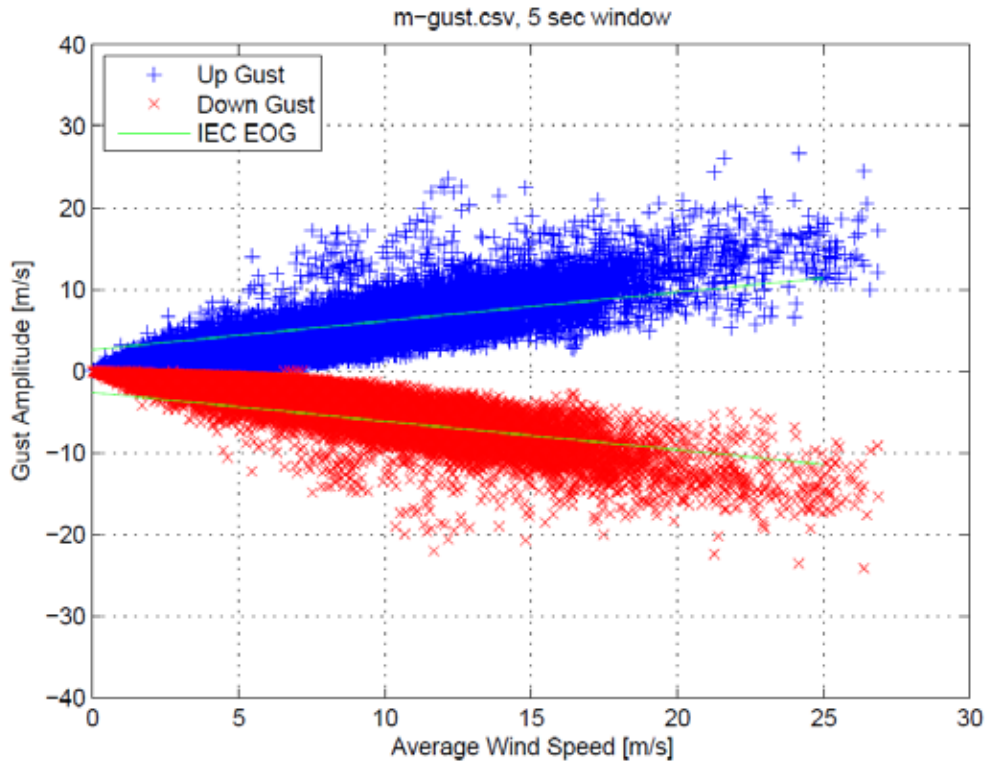
計測結果によるアップガストとダウンガストの IEC 規格との比較を、**図 C 1.16 ~ 図 C 1.19** に示す。横軸は 10 分間平均風速、縦軸はアップガストとダウンガストを示す。IEC 規格での EOG は風車ロータ全体に一样に生じる風速変動を規定したものであることは、同モデルによる荷重計算時の取り扱いから推測される。今回の計測で得られたのはハブ高さでの“点”における風速変動によるガストであり、IEC 規格で規定されるガストは空間的に一样であることが前提であるため、現状の手法では両者を直接的に比較できない。したがい、この手法による比較は、今回の計測によって IEC 規格による EOG を超過するようなロータ面内で一样的ガストが得られたかどうかを判断するものではないことに留意する。

各プロットを平均的に眺めると、A 地点および B 地点では IEC 規格とほぼ同等である。C 地点では風速 15m/s を境に様相が異なり、15 m/s 以下では IEC 規格を下回る一方で、15 m/s 以上では超過する。D 地点では風速 10 m/s 以下では IEC 規格と同程度、10 m/s 以上では IEC 規格を上回る。

一方で、個々のプロットと IEC 規格のラインを比較すると、IEC 規格における EOG によるアップガスト・ダウンガストより大きなガストが実測で多数表れていることがわかる。この点について、A 地点を例にとって詳細に検討する。



図C 1.16 アップガストとダウンガスト (A地点)



図C 1.17 アップガストとダウンガスト (B地点)

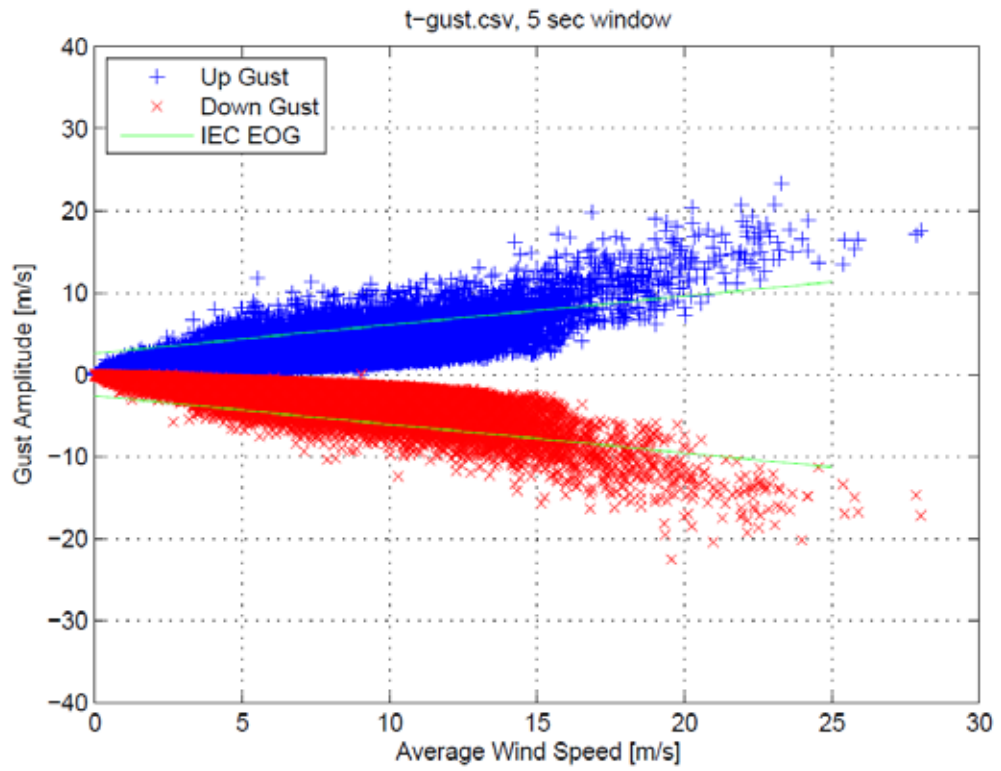


図 C 1.18 アップガストとダウンガスト (C地点)

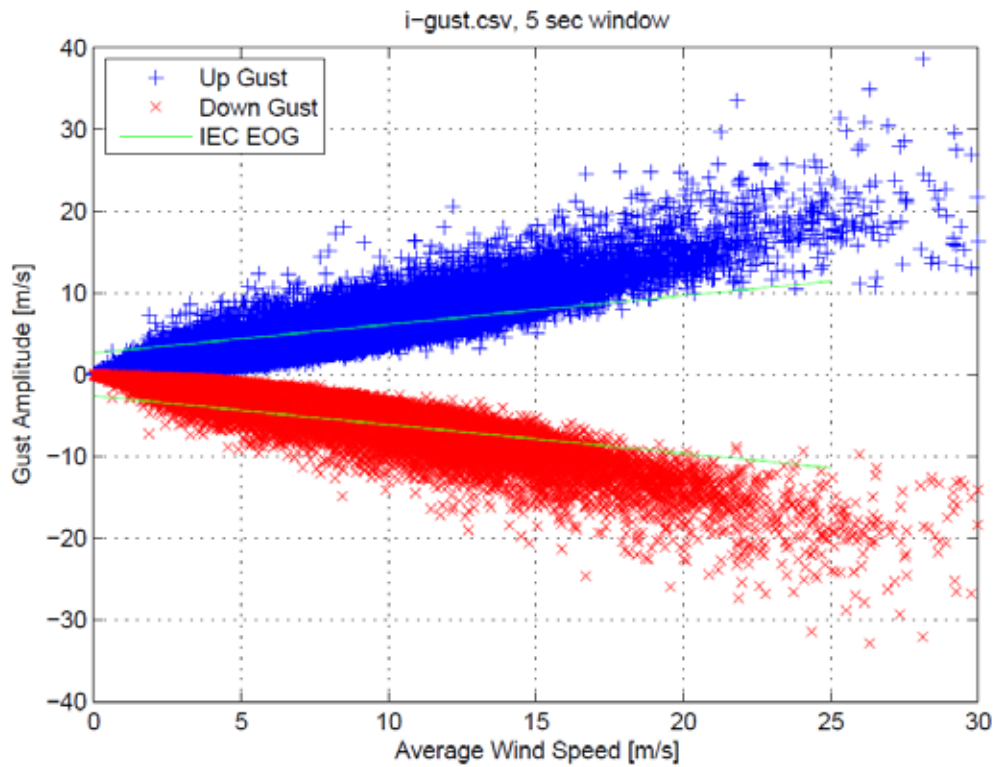
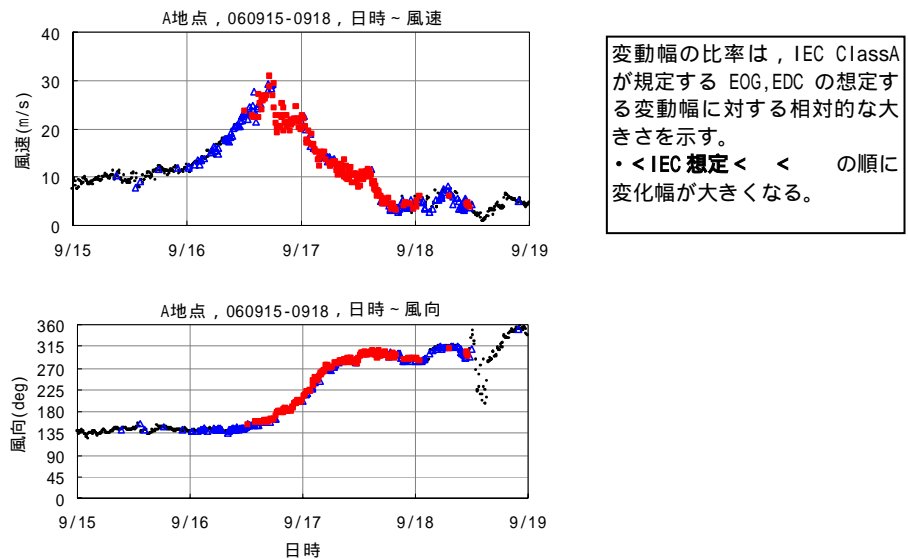


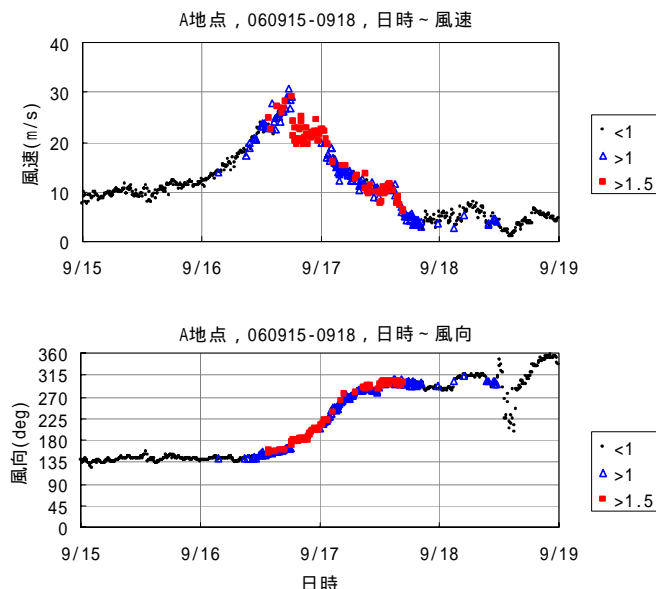
図 C 1.19 アップガストとダウンガスト (D地点)

A地点において10分単位の風速と風向の変化幅の大小が数日間の期間でどう変わるか、その発生状況を調べた例を図C 1.20及び図C 1.21に示す(図の凡例の違いが変化幅の大小を示す<sup>3)</sup>。風向変化幅はアップガスト・ダウンガストと同様な定義を風向に行ったものである。これによれば、以下の傾向が見られる。

- ・ IEC 61400-1 Ed.3(2005)が想定する変動幅を超える変動が発生するのは特に珍しくない。
- ・ 風速の変化幅の大小は、風向のそれと相関が極めて高い。
- ・ 変化幅の大小はランダムに起きるものではなく、風向や時間帯による偏りがある。



図C 1.20 風速変化幅(Vgust)の発生状況



図C 1.21 風向変化幅( e)の発生状況

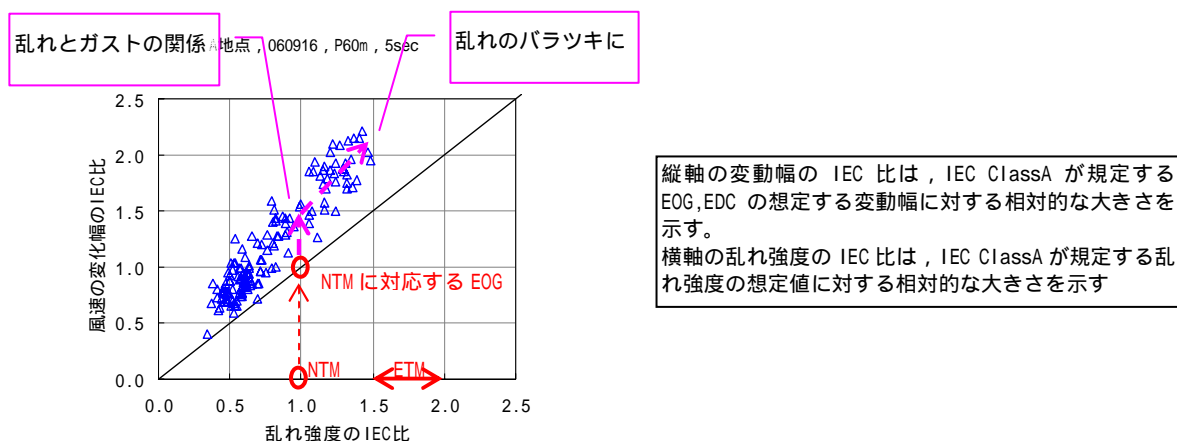
<sup>3)</sup> ここでは、風速の変動幅 Vgust の値のみに着目し、アップガストとダウンガストを IEC 規格で定義された値と相対比較し、その大小を凡例の違いとして示している。そのため、変動の形状(波形の形)の違いは含んでいない。

次に、上記の風速あるいは風向の変化幅について、統計的な変動の指標である乱流強度との相関をみた結果を図C 1.2 2と図C 1.2 3に示す。IEC 61400-1 Ed.3(2005)で想定される風速と風向の変動幅は、乱流強度に比例する形で与えられ、絶対値は乱流強度の特性値で決めることとしている。一方、乱流強度にはバラツキが見られるが、このバラツキの効果は特性値を90%タイル値として定義してNTMなるケースとし、さらに別にETMと呼ばれる乱れ強度が特大(特性値の1.5~2倍程度)とするケースを別に想定することで対処している。

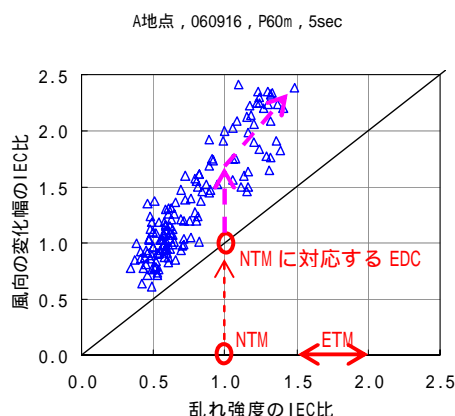
今回みられた風速と風向の変動幅を乱流強度の関係からみると、以下のことが言える。

- a) 風速あるいは風向の変動幅は、乱流強度とほぼ比例する関係にある
- b) ただし、その変動幅の絶対値は IEC 規格が想定する関係よりは大きめである
- c) 乱流強度のばらつきにより特性値より大きな乱れ強度が作用し、そのときの変動幅は大きくなる。

大きな風速あるいは風向の変動は、上記の b) 及び c) が理由で生じているものである。特に c) からすると、IEC 規格の EOG や EDC で定める変動幅は必ずしもその極値をカバーするものではないものと考えられる。



図C 1.2 2 風速変化幅と乱れ強度の関係



図C 1.2 3 風向変化幅と乱れ強度の関係

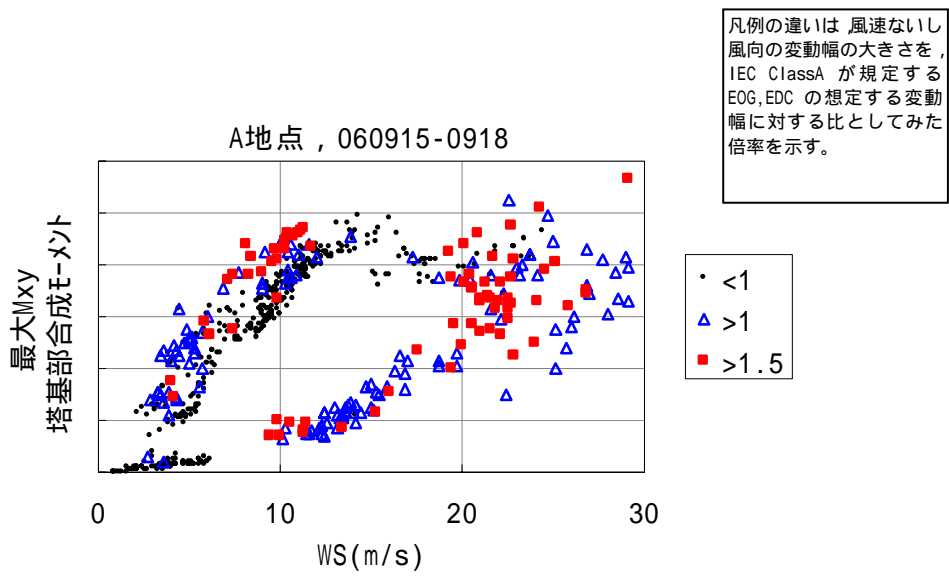
さらに、風速あるいは風向の変化幅と荷重の関係をみた結果を図C 1.2 4に示す。これらの図は、風速に対するタワー基部において発生した最大モーメントを示したものであり、風速あるいは風向変動幅の大小がどの程度寄与しているかをみたものである。凡例で区別した変動幅の差異が最大荷重に及ぼす影響としては、発電時に多少の依存性がみられるが、高風速の停止時には影響が明確ではなくなる。

このことから、規格で想定された風向・風速の変動の影響については、実際の風の観測値に対して過小評価に見えることがあるが、風車を受ける荷重としてはその影響が必ずしも大きくないことが考えられる。この理由として考えられるのは、

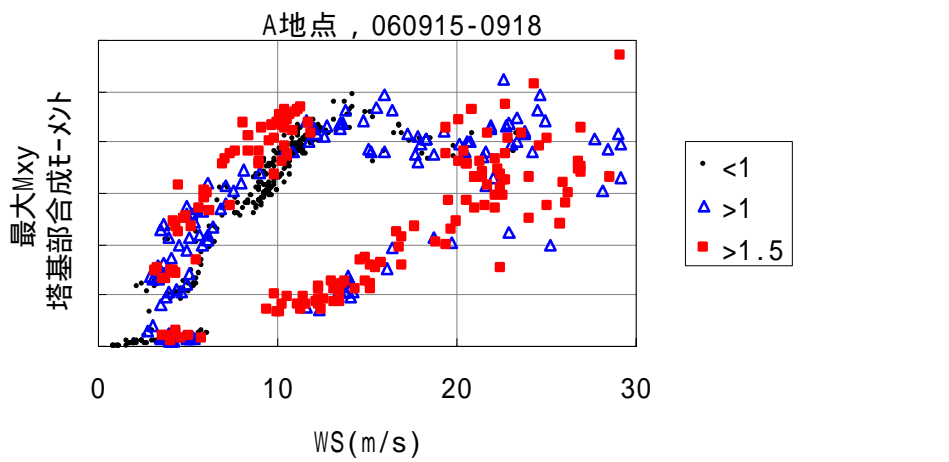
- ・ IEC 規格ではロータ全面にわたって一様な風速・風向の変化を想定しているが、実際の風はある相関のもとで変動しており、1点で評価される変動は逆にロータ面全体の評価には過大になっている。
- ・ IEC 規格では風速や風向の変動を想定するケースは、通常発電時（DLC1.\*）ではなく、発電中の故障発生（DLC2.\*）や起動停止時（DLC3.\*、4.\*）と主に関係づけられている。これらの動作では、荷重は外的な条件の時間的变化とそれに伴う風車の制御（状態変化）の組み合わせで決まる。従って、大きな荷重を発生させるのに風は必要条件ではあるが、十分条件にはなっていない

以上のことからすると、現在の規格で想定されている風向・風速の変動は上記の実態を加味して、観測される極値ではなく、低めに設定されていると考えるのが適当である。

すなわち、ロータ面内のある一点において計測された極端な風速変動の波形と IEC 規格の EOG による波形を直接比較することで、今回計測された風速変動の IEC 規格の EOG に対する大小を論じることは現段階では困難である。議論を深めるためには、IEC 規格の EOG のそもそもの成立思想と成立過程を確認し、それに見合うようなデータ計測とデータ解析の手法を確立することが必要である。



風速の変動幅による差異 ( • < IEC 想定 < △ の順に変動幅が大きくなる )



風向の変動幅による差異 ( • < IEC 想定 < △ の順に変動幅が大きくなる )

図C 1.2 4 風速あるいは風向の変動幅の大小と最大荷重の関係



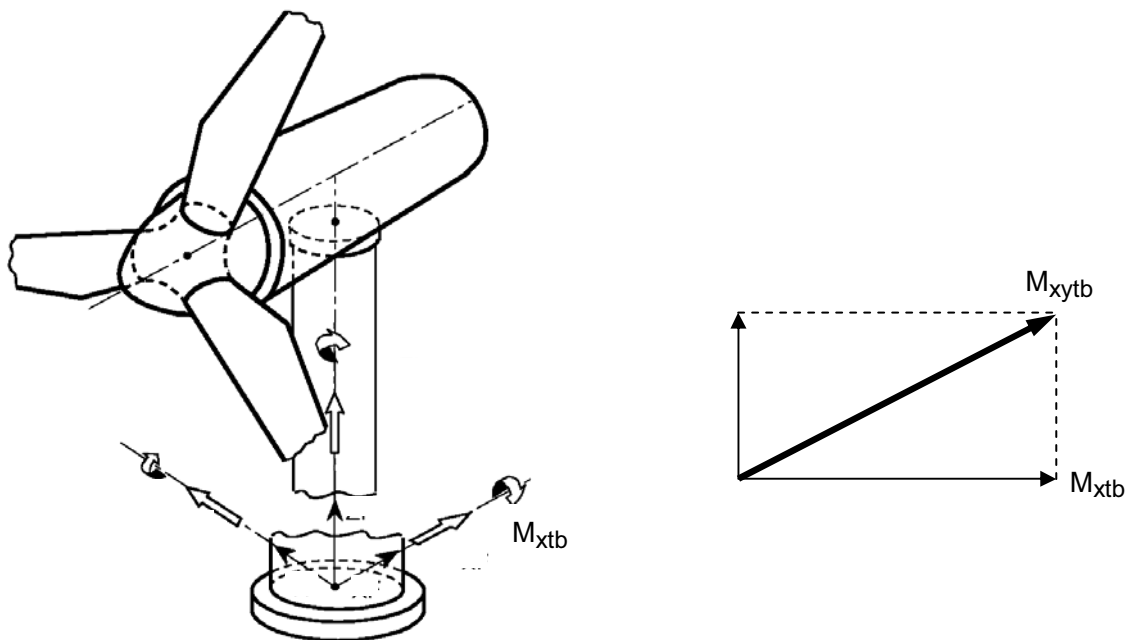
## C 1.4 風車応力観測の整理

### (1) 極値荷重

強風時を含む数日間の時系列データを複数抽出し、タワー基部荷重の10分間統計値（最大・平均・最小・標準偏差）をMET風速に対して整理した（表C 1.19、表C 1.20）。整理対象荷重は風方向モーメント  $M_{xtb}$ ・風直交方向モーメント  $M_{ytb}$ ・合成モーメント  $M_{xytb}$  とした（図C 1.25）。値は定格風速での  $M_y$  平均値 ( $M_{ytb0}$ ) を用いて無次元化した。合成モーメントに関しては、土木学会指針に基づき算出した風荷重との比較を行った。

整理結果を表C 1.19、表C 1.20に示す。通常運転時にはタワー基部荷重を支配するのは  $M_{ytb}$  であるが、カットアウト風速後の遊転時には、 $M_{xtb}$  が支配的である。また、土木学会指針との比較においては良好な一致が見られる。

遊転時フェザリングを行う風車では、暴風時のタワー基部モーメント方向は、風と直角方向が卓越すると考えられる。ここで、空気密度： $\rho$ 、平均風速： $U$  及び主流直角方向の風速変動の標準偏差： $\sigma_v$  の積に対する  $M_{xytb}$  の変動量を整理した。 $M_{xytb}$  の変動量として、10分間中の最大値と平均値の差を取り、風車ロータ面積と風車ハブ高さの積で無次元化した。整理結果を図C 1.26に示す。



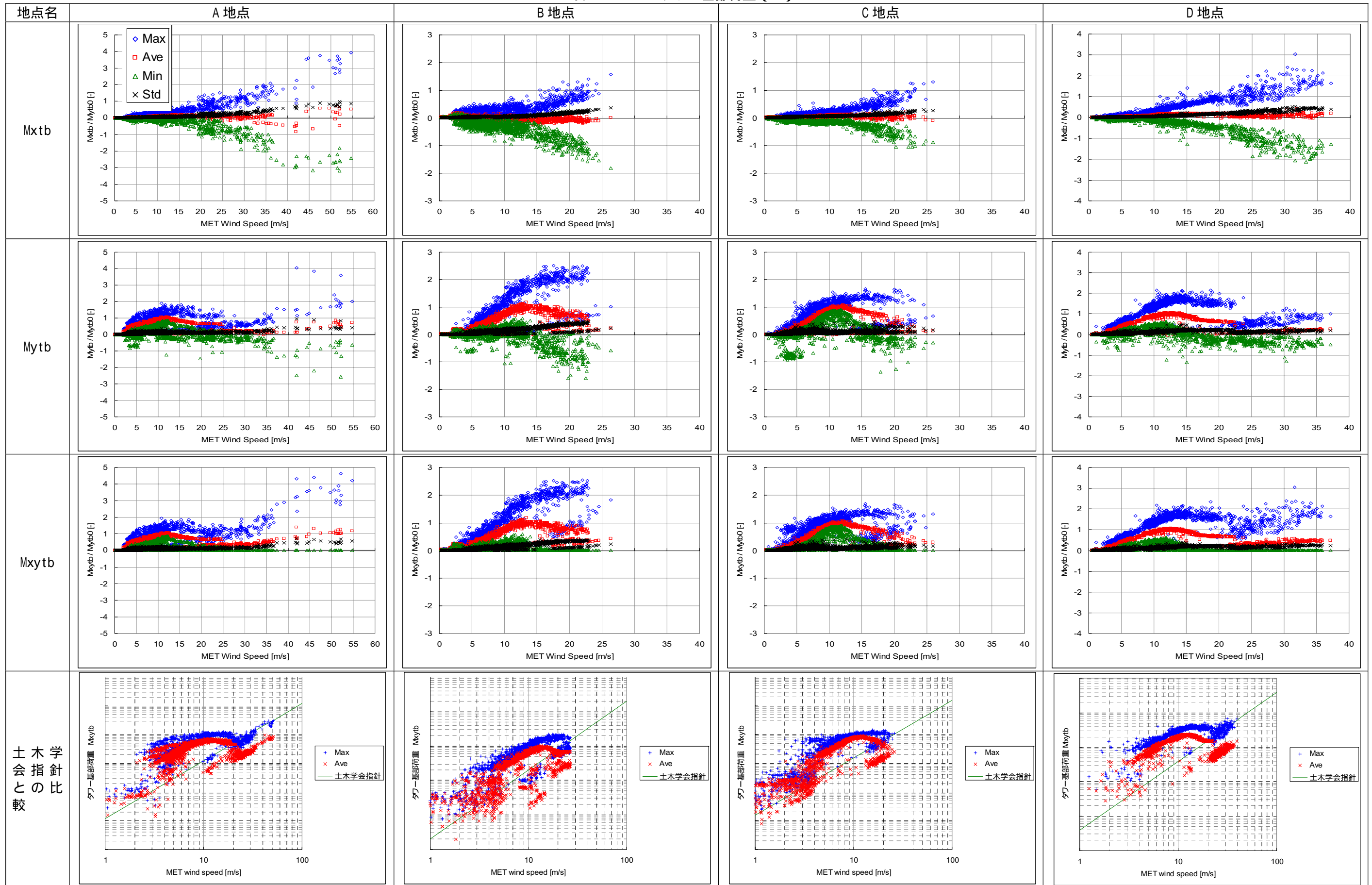
図C 1.25 タワー基部モーメント定義

<sup>1</sup> “風力発電設備支持物構造設計指針・同解説”、土木学会、2007.

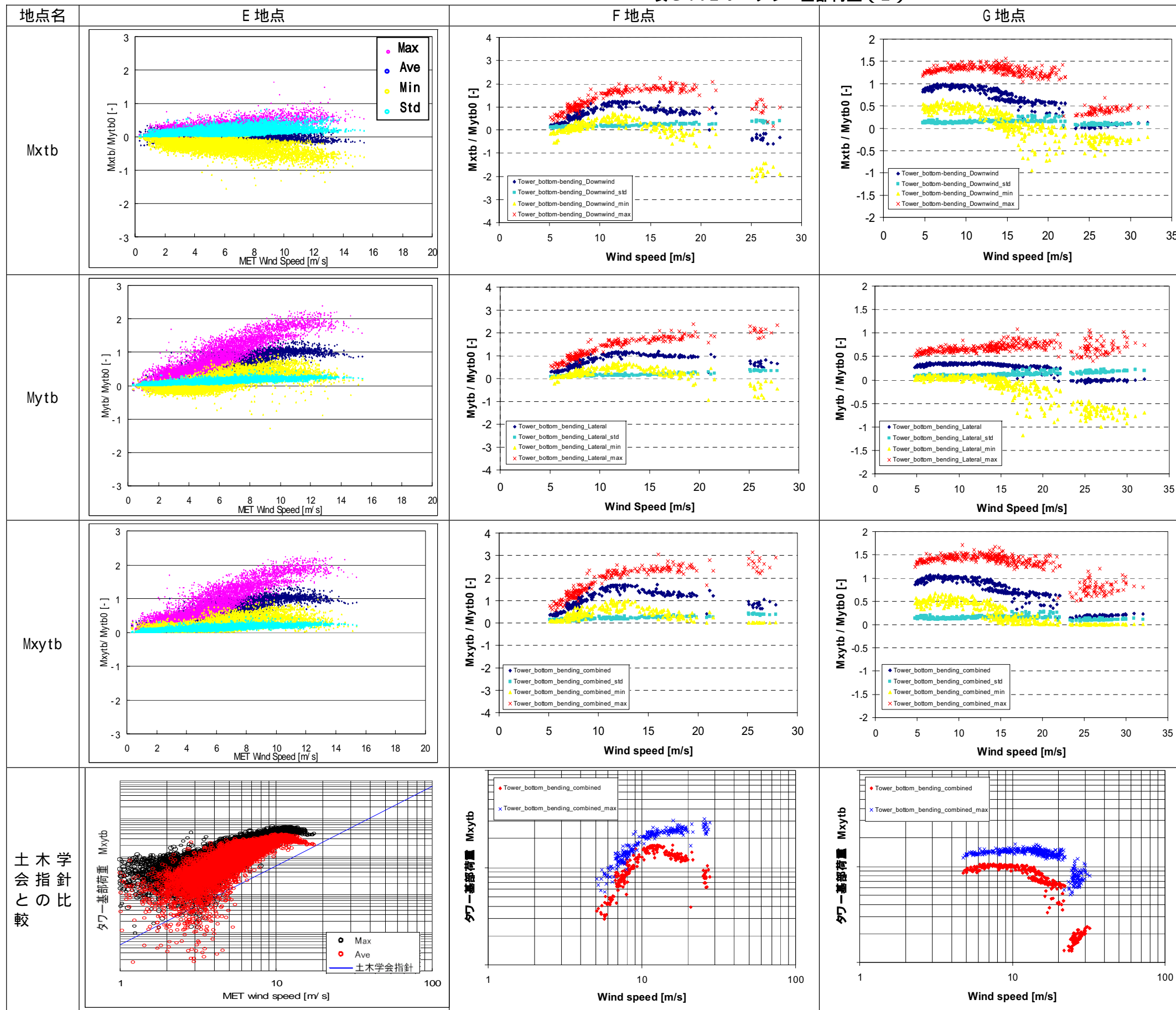
計測対象の風車は、いずれもピッチ制御であり、カットアウト風速以降は翼をフェザリングしアイドルリングする制御を行う。図 C 1.26 より、風速に応じて荷重の振る舞いに変化することがわかる。Mxtb の振幅（最大値と最小値の差）は、カットアウト風速以降において運転時に比べて増大する。これは、翼がフェザリングすることにより、翼に働く揚力の変動方向、すなわち翼荷重の変動方向が、上流から見た風車ロータの左右方向へ変化するためである。Mytb の変化点は、定格風速とカットアウト風速である。定格風速に達するまでは平均荷重は風速とともに増大するが、定格風速以降はピッチ制御による出力制限がなされるために、荷重は減少する。カットアウト風速以降では翼がフェザリングするため、荷重の振幅は運転時に比べて大幅に減少する。これはフェザリングにより翼に働く x 軸方向の荷重においては揚力ではなく抗力が支配し、抗力は揚力に比べて小さいためである。Mxytb は合成モーメントであるから、変化の様相は Mxtb と Mytb の振る舞いの変化に対応する。すなわち、Mxytb においては、カットアウト風速までは Mytb が支配的であるのに対して、カットアウト風速以降では Mxtb が支配的となる。すなわち、強風時のタワー基部荷重は Mxtb が支配的となる。ただし、これはヨー偏差が小さい場合に限られる。

運転中におけるタワー基部荷重の最大値と平均値の比率（例えば Mxytb の定格風速で）を見ると、風車によって異なることがわかり、その大きさの順は、B 地点、D 地点、A 地点、C 地点となる。この要因としては、風況の違い（乱れ度、ウインドシア）、風車体格の違い（ロータ径、ハブ高さ）、タワー固有振動数の違いが考えられる。

表C 1.19 タワー基部荷重(1)



表C 1.2 0 タワー基部荷重 ( 2 )



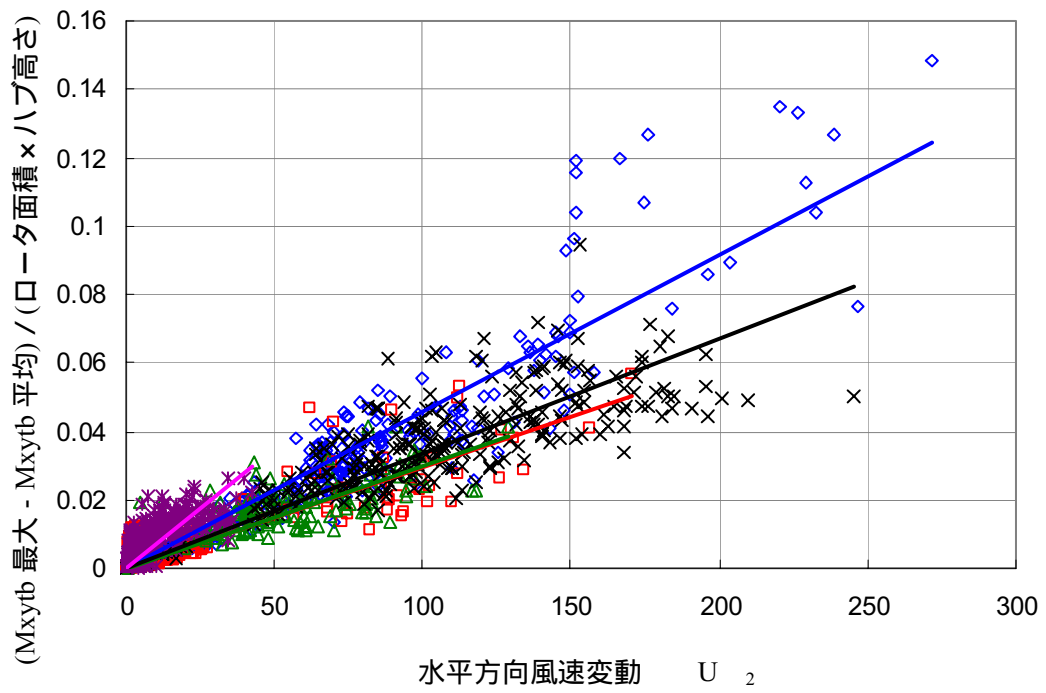


図 C 1.26 タワー基部合成モーメントと風速変動の関係

## ( 2 ) 疲労荷重 ( 発電時荷重 )

D地点を対象として、風車翼およびタワー基部に働く疲労荷重を整理した。データ期間は強風前後の下記とし、風車運転中の疲労荷重を調べるため、10分間における最小出力が10kW以上となるデータを対象とした。

- ・ 2006年10月4日～2006年10月6日
- ・ 2007年1月5日～2007年1月9日
- ・ 2007年2月12日～2007年2月14日
- ・ 2007年3月28日～2007年3月31日

発電時の荷重を疲労荷重の観点から整理するため、翼根フラップモーメントとタワー基部モーメントの疲労等価荷重 ( Damage Equivalent Load ) を算出した。疲労等価荷重を算出する際の基準化周波数は1 Hz、S-N線図傾きはそれぞれ10と4を用いた。各プロットは定格風速での値を用いて無次元化した。整理結果を図C 1.27および図C 1.28に示す。

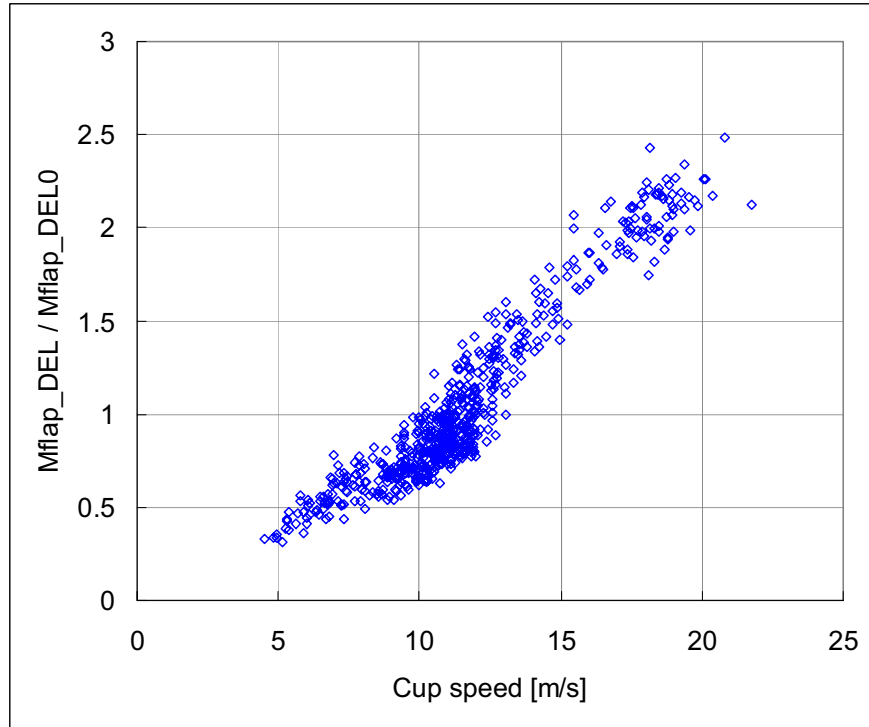


図 C 1.27 翼根フラップモーメント Mflap の疲労等価荷重

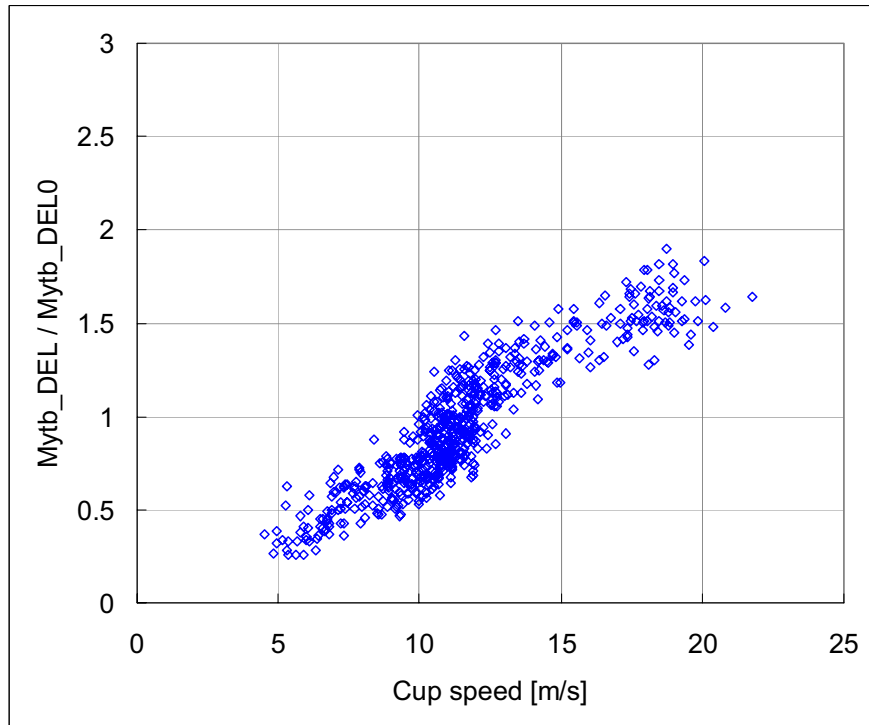


図 C 1.28 タワー基部モーメント Mytb の疲労等価荷重

疲労等価荷重に与える各種風況パラメータの影響度を調べるために、実測された風況と疲労荷重に対して、重回帰分析の手法を適用した<sup>1</sup>。重回帰分析を風車に適用した例は幾つかあり<sup>2</sup>、同文献では乱れ度から乱れスケールまで幅広いパラメータが説明変数として選択されている。しかしながら、説明変数を多く選択した場合、相互に高い相関性を持つパラメータセットを説明変数として選択することになり、結果として得られる回帰係数の解釈が困難になることが懸念される。

ここでは通常のサイト適用性検討で考慮するレベルでの風況パラメータに留めて解析を実施した。考慮した風況パラメータは以下である。

- ・  $\cdot U \cdot$  (空気密度 × 風速 × 風方向標準偏差)
- ・ 吹上角
- ・ ウインドシア

風速領域は風車の負荷状態を考慮して、5 8 m/s、9 12 m/s、13 16 m/s の3つに分けた。表C 1.2 1に解析対象とした各種風況パラメータの統計量を示す。

表C 1.2 1 解析対象風況パラメータ統計値

風速レンジ：5-8m/s

	平均	標準偏差	最大	最小
平均風速 [m/s]	6.77	0.78	7.96	5.14
$\cdot U \cdot$	7.39	2.45	13.05	2.55
吹上角 [deg]	6.01	2.45	12.74	-1.15
ベキ指数	0.22	0.07	0.40	0.06

風速レンジ：9-12m/s

	平均	標準偏差	最大	最小
平均風速 [m/s]	10.72	0.79	12.00	9.01
$\cdot U \cdot$	18.39	4.54	31.63	7.59
吹上角 [deg]	5.15	1.82	11.26	1.13
ベキ指数	0.27	0.04	0.48	0.13

風速レンジ：13-16m/s

	平均	標準偏差	最大	最小
平均風速 [m/s]	14.18	0.86	15.98	13.01
$\cdot U \cdot$	34.26	6.03	47.96	20.62
吹上角 [deg]	4.26	1.20	7.56	2.47
ベキ指数	0.30	0.03	0.37	0.21

<sup>1</sup> 例えば、多変量解析法 改訂版，奥野（共著），1981，日科技連出版社。

<sup>2</sup> “Fatigue Loading Parameter Identification of a Wind Turbine Operating in Complex Terrain,” Mouzakis, F., et al., J. Wind Eng. Ind.Aero., Vol. 82, pp. 69-88, 1999.



図C 1.29に回帰分析結果を示す。縦軸は各変数を正規化することで得られる標準偏回帰係数を表している。標準偏回帰係数は、パラメータが1標準偏差分変化した場合の疲労等価荷重の変化量（ただし正規化された変化量）を表すため、値が大きいパラメータほど疲労等価荷重への影響度が大きいこと示す。なお、回帰分析においては、変数減少法により説明変数を逐次選択する手法を取った（詳細は前出の文献を参照されたい）。図中において回帰係数が表示されていないパラメータは、説明変数として有意性を持たない、すなわち、疲労荷重を説明するのに有意ではないため統計的に棄却されたことを示す。

Mflap に関して、乱れの標準偏回帰係数はいずれの風速域においてもほぼ一定して高く、0.7以上の値を示す。この傾向はMytbにおいても同様であり、乱れに対する疲労荷重の変化率が大きいことを表している。

吹上角は、5～8 m/s の低風速域では荷重に対して正相関があるが、回帰係数は乱れに比べて小さい。風速 9m/s 以上では荷重に対する有意な影響は見られない。

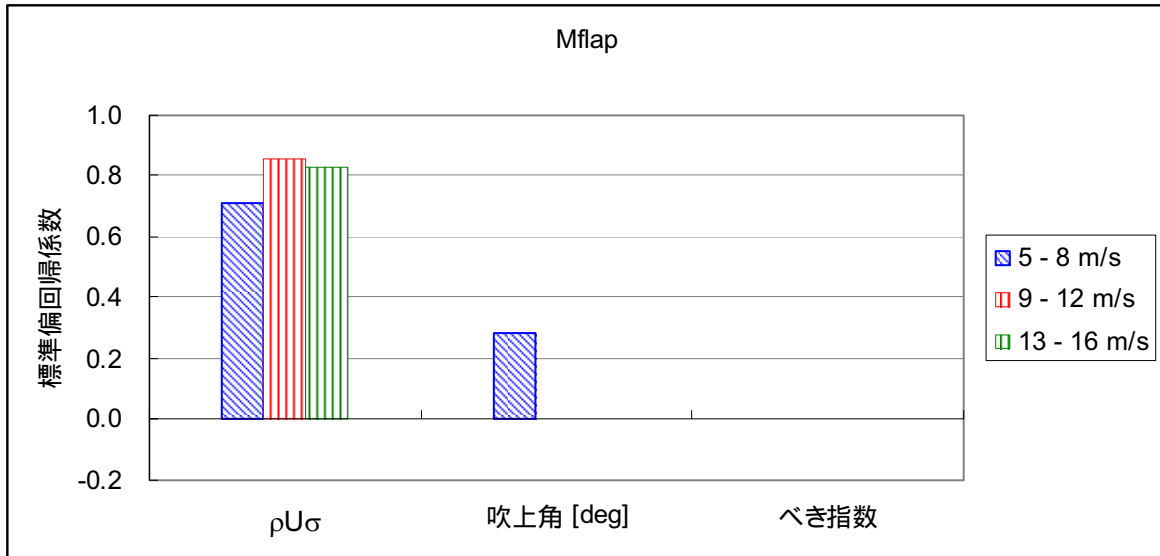
べき指数は、Mytb に対しては、一部の風速域において負相関が見受けられるものの、係数は小さい。また他の風速域においては有意な結果が得られなかった。

以上より、今回分析対象とした風況パラメータの中で最も疲労荷重への影響が大きいパラメータは、乱れであり、吹上角、べき指数は二次的な影響に留まっていることがわかる。ただし、今回の分析結果は、分析対象としたサイトや風況パラメータの値の範囲内で成立し得るものである。したがって、今回対象とした範囲外において、同様の結論が成立するかどうか別途検討が必要である。

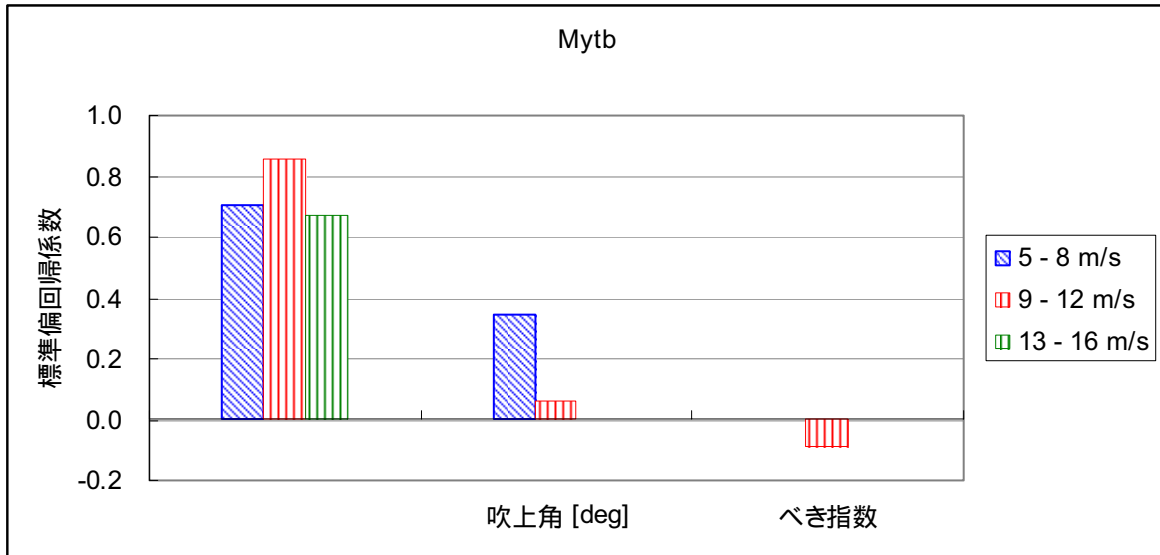
風の乱れに対する疲労荷重を散布図として図C 1.30に示す。近似曲線により、疲労荷重は乱れに略比例していることがわかる。すなわち、疲労荷重  $L$  は

$$L \propto (\rho U \sigma)^y$$

と経験的に概略表すことができる。



(a) 翼根フラップモーメント Mflap 疲労荷重



(b) タワー基部モーメント Mytb 疲労荷重

図 C 1.2 9 重回帰分析結果 (標準回帰係数)

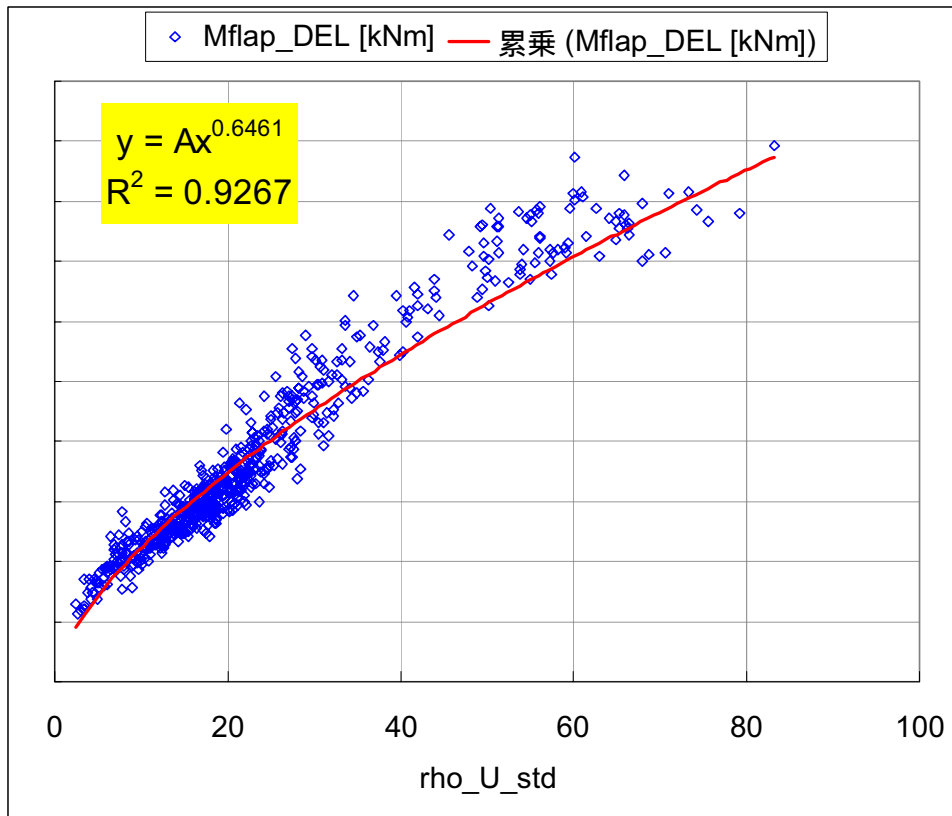


図 C 1.3 0 乱れと Mflap 疲労荷重の関係

### (3) 実測荷重と計算荷重

風車設計に用いられる空力弾性コードによる時系列応答計算を実施し、実測された荷重との比較を行った結果を相関図として図C 1.3 1～図C 1.3 4に示す。対象としたデータ期間は、各地点で最大瞬間風速となった日を含む前後2～3日間とした。比較した荷重成分は、タワー基部における各成分のモーメント(Mxtb、Mytb、Mxytb)の10分最大値と10分平均値とした。実測荷重データは、10分間最大値と10分間平均値について風速ビンごとに平均値を算出し、比較に用いた。空力弾性コードとしてGermanicher Lloydによる風車機器認証等で広く用いられている、Garrad Hassan & Partners社による“BLADED”<sup>3</sup>を使用した。計算時に入力条件として使用した風況条件は、各ケースにおける平均空気密度、平均吹上角、平均風速鉛直分布、風速ビンごとに平均した乱れ度を用いた。風車の状態は通常運転および強風時の遊転状態を含む。図中には比較の目安として、(計算荷重)×1、×1.2、×0.8、×1.35の直線をそれぞれ描いた。1.35はIEC規格で定められている空力荷重安全係数に相当する。

図より、計算結果と実測荷重の相関は良好であり、大半は±20%の範囲に収まる。今回の計算においては、例えば、実測された乱れ度3成分比率や大気乱流スペクトルの荷重計算時における入力、実機風のタワー固有振動数の計算モデルへの反映など、風況や風車計算モデルに関する詳細なチューニング等を行っていない。そのため、より計算精度を向上させるためには、それらの調整が必要である。しかしながら、今回の比較結果からは、そのような詳細なチューニングを考慮しない場合においても計算結果は妥当な精度を示したことが言える。

---

<sup>3</sup> 参考 URL : <http://www.garradhassan.com/products/ghbladed/index.php>

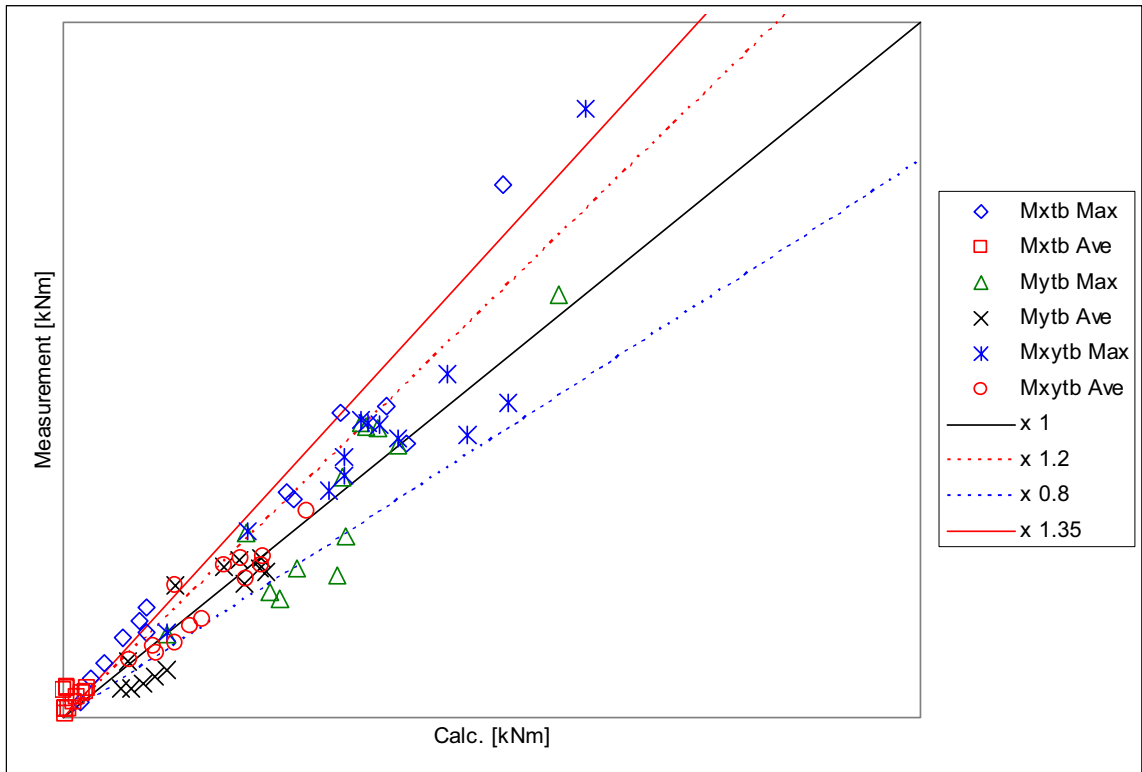


図 C 1.3 1 風車実測荷重と計算結果の相関 ( A 地点 )

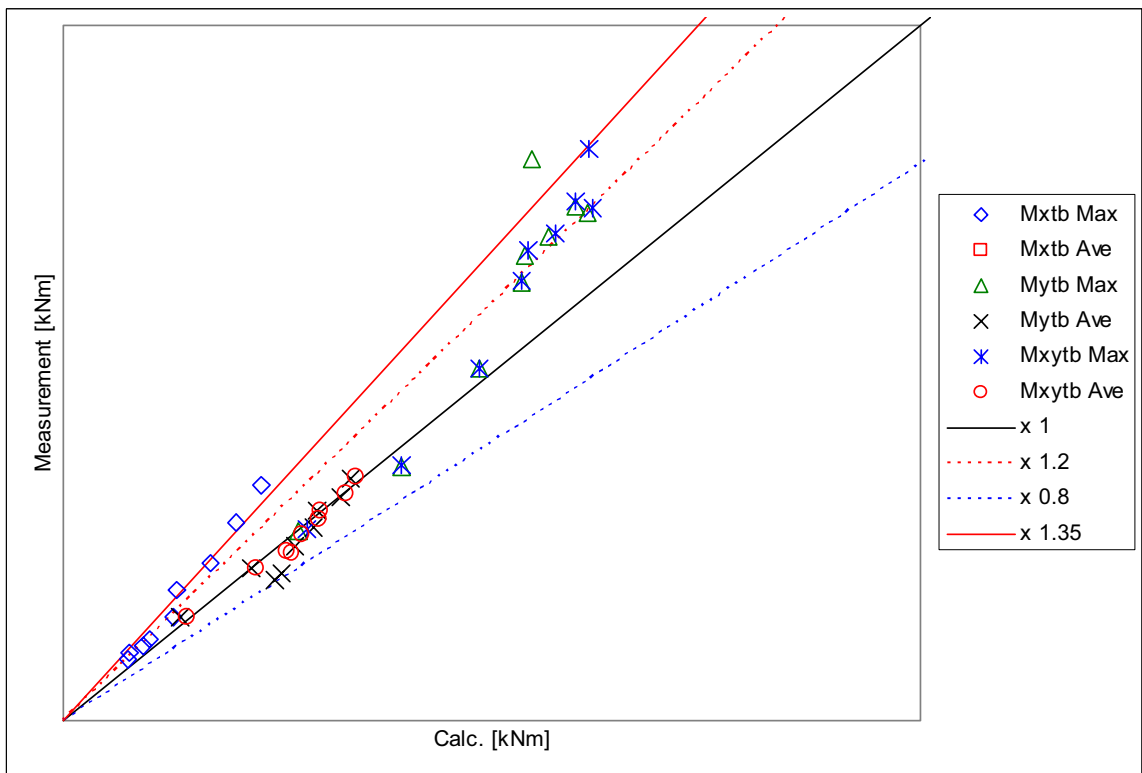


図 C 1.3 2 風車実測荷重と計算結果の相関 ( B 地点 )

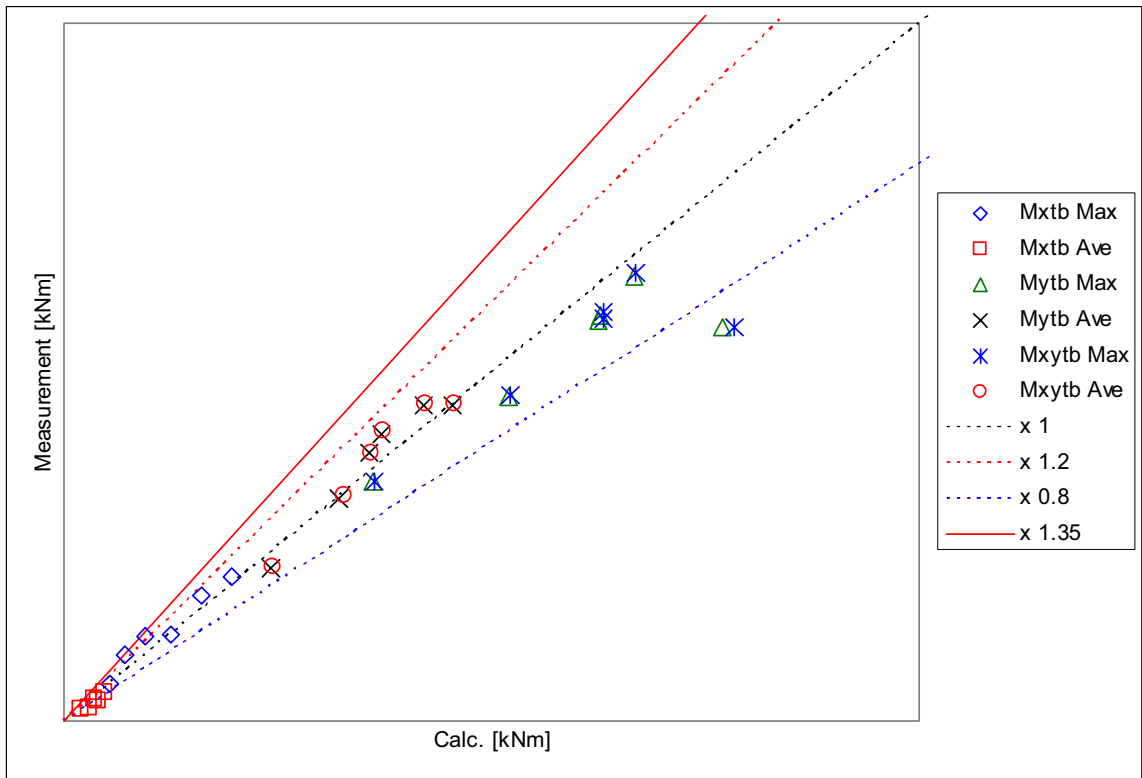


図 C 1.3 3 風車実測荷重と計算結果の相関 ( C地点)

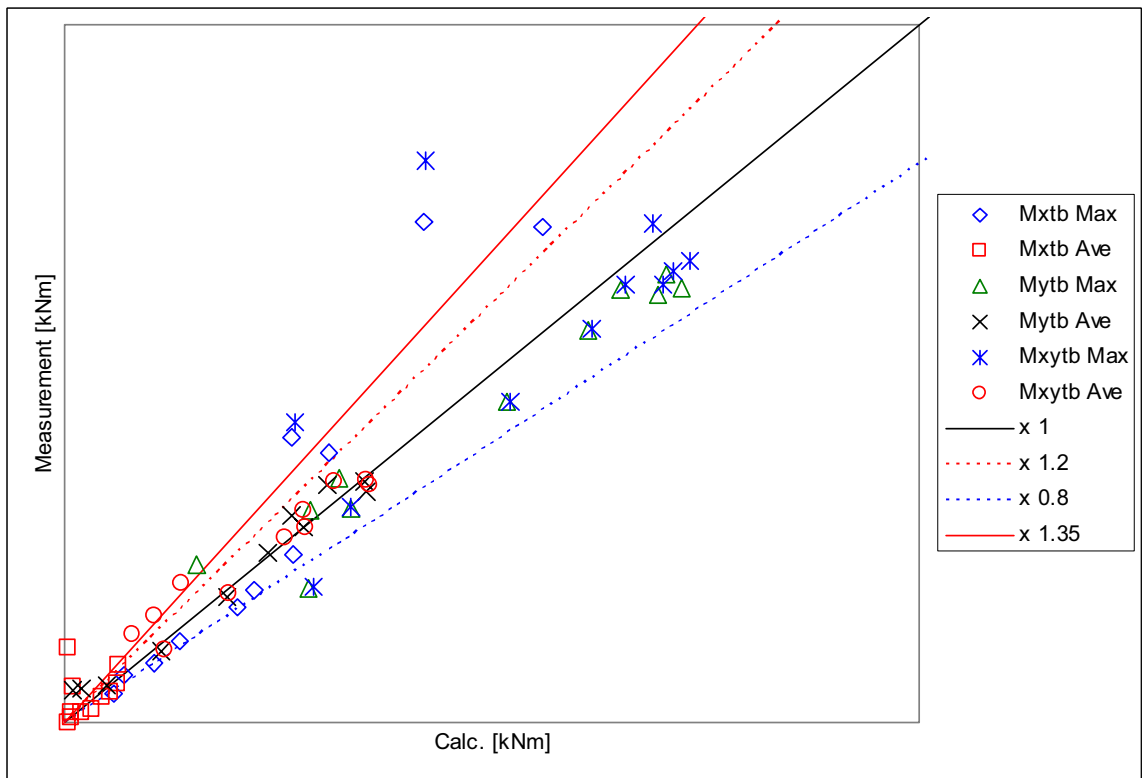


図 C 1.3 4 風車実測荷重と計算結果の相関 ( D地点)

## C 2 風車模型風洞試験

### C 2.1 概要

ガイドライン策定に関し、風車の風に対する基本的な応答特性を調査するため、風車の模型を用いた風洞試験を実施し、作用する空力荷重に関する実験データを取得した。

### C 2.2 試験方法

風車試験用の模型風車の参照用実機は、観測対象風車となっている定格出力 1MW 級の風車とした。模型風車はできるだけ大型のものをを用いることが現象の再現性をよくする上で重要であるが、試験実施可能な模型の大きさは利用する風洞の大きさに依存する。そのため、変動風の発生が可能な国内最大級の風洞（風路断面積 30 平方メートル）を用いることとし、上記の実風車の約 1/30 スケールの模型を設計・製作した。模型風車諸元を実機風車と比較して表 C 2.1 及び図 C 2.1 に示す。

表 C 2.1 模型風車諸元

項目	実風車	模型風車
スケール	1	1 / 30.7
ロータ直径	61.4 m	2.0 m
ハブ高さ	68 m	2.2 m
ロータ回転数 (通常運転時)	19.8 rpm	調整可能

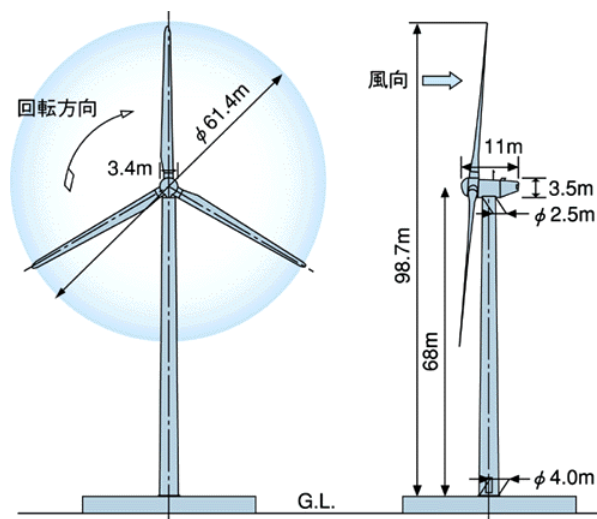
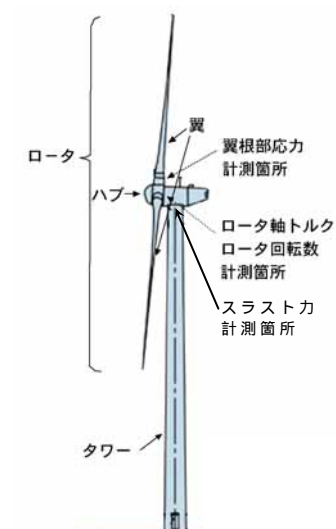


図 C 2.1 模型風車の諸元決定で参照する実風車の形状寸法概要

模型は表C 2. 2の計測項目が計測可能な模型とし、図C 2. 2に示す計測箇所で行った。模型写真を図C 2. 3に示す。

表C 2. 2 計測項目一覧

計測項目	計測装置	計測方法
ロータ軸トルク	トルクメータ	ハブ直後にトルクメータを設置し、データを取得する。
ロータ回転数	非接触式検知計	ロータ軸の回転を検知し、回転数を計測する。
翼根部応力	ひずみゲージ	翼根部2方向にひずみゲージを設置し、スリップリングを介して応力データを取得する。
スラスト力	ブロックゲージ	タワーのトップに設置し、スラスト力を計測する。



図C 2. 2 計測箇所



図C 2. 3 模型写真



計測実施時の条件を、表 C 2.3 に風車状態毎に示す。

試験条件の設定に関しては、運転時には周速比（場の風速に対する、翼先端の回転速度の比）を実機と一致させることを優先させた。これは、翼断面まわりの流れで見て場の風速と回転に伴う相対流速の比を合わせていることに相当する。ロータのピッチ角は、この条件で実機に近い特性となるようピッチ角の調整を加えている。暴風時には、計測対象翼のアジマス角（ロータ回転に伴う瞬間的な位置）に荷重が依存するため、ロータを強制的に低速で回転させることでアジマス角に対する変化を捉えられるようにした。風洞風速は、模型設計条件内におさまる 9m/s を標準とした。

レイノルズ数に関しては、縮尺模型を使用するため実物より低い値にならざるを得ず、特に翼形状を歪ませる等の加工は加えていない。「運転・定格」の条件では、周速がほぼ実機の値に一致しており、代表長の違い、すなわち縮尺の分だけ実機より低いこととなっている。

表 C 2.3 計測時の条件一覧

模擬した 風車状態	ロータ回転数 <sup>*1</sup> 模型値	周速 <sup>*1</sup> 模型値	風洞 風速 <sup>*1</sup>	周速比	レイノルズ 数 <sup>*2</sup>
運転・定格	600rpm	62.8m/s	9m/s	7.0	$2.4 \times 10^5$
運転・カットアウト	220rpm	23.0m/s	9m/s	2.6	$0.9 \times 10^5$
暴風・ファイン	(ゆっくり)	(0m/s)	9m/s	-	$0.3 \times 10^5$
暴風・フェザー	(ゆっくり)	(0m/s)	9m/s	-	$0.3 \times 10^5$

\*1：標準とした試験条件値を示す。

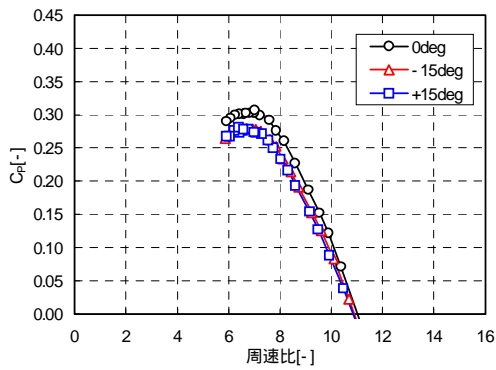
\*2：代表長は平均翼弦長（約 0.05m）とし、流速は翼先端の流入速度を用いて定義した。

## C 2.3 実験結果例

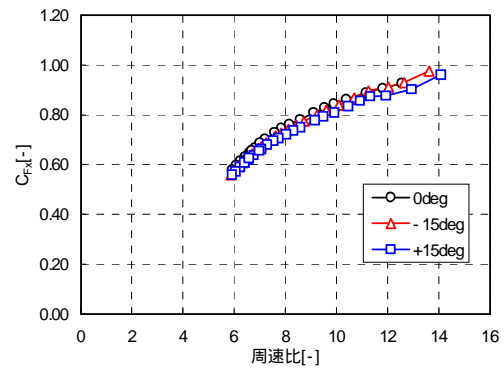
### (1) 風車基礎特性試験

一様流の条件下で風速を変化させることにより、ロータ空力特性を計測した。通常運転状態を想定した条件では、パワー係数  $C_p$  はピッチ角  $16^\circ$  において最大値 0.32 をとり、実機の 8 割程度の値となった。この差の主な要因として、レイノルズ数の差が挙げられる。本風洞風車モデルは実機の 1/30 スケールであり、ロータ回転周速を実機に等しく取っているため、レイノルズ数は実機の 1/30 である  $10^5$  台にある。そのため翼の揚抗比が減少することで、ロータ性能が実機に比べて低下している。

運転状態において、風向偏差及び周速比の影響を調べた結果を図 C 2.4 に示す。風車においては、風に対する風車の姿勢を表す風向偏差だけでなく、周速比という運転状態によっても荷重が大きく変化することがわかる。



(a) パワー係数  $C_p$

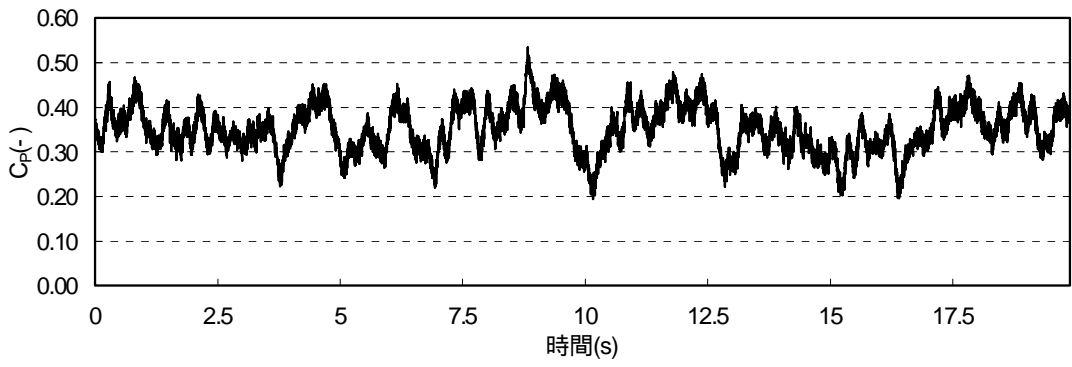


(b) スラスト係数  $C_{Fx}$

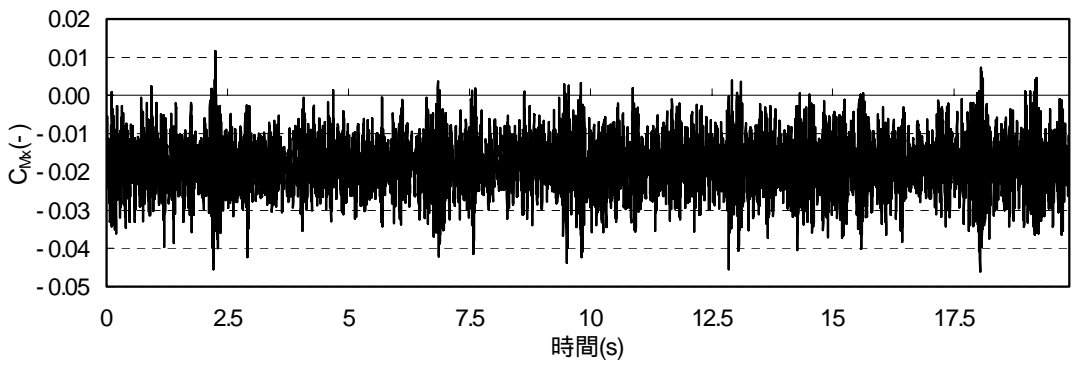
図 C 2 . 4 ロータ空力特性試験結果  
( 風向偏差の影響、「運転・定格」から周速比変化 )

( 2 ) 風車動特性試験 ( 境界層乱流試験 )

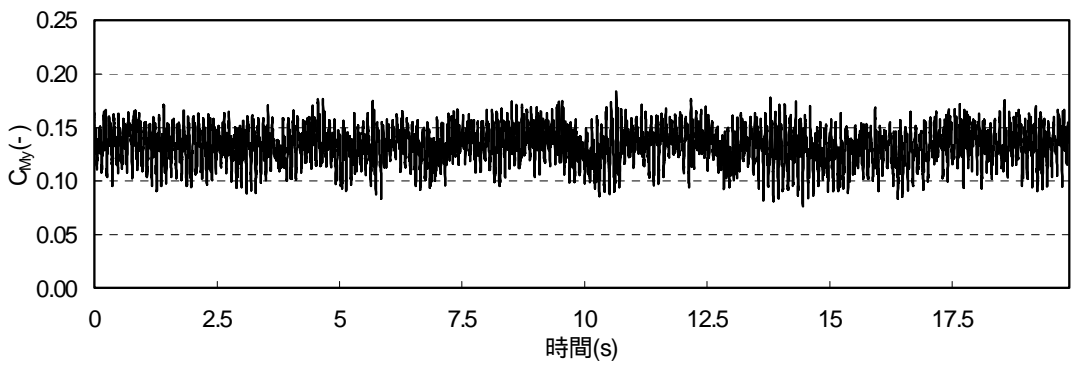
自然風を想定した境界層乱流中において、運転時における各荷重の時系列変動の例を図 C 2 . 5 に示す。時間的な変動が顕著に生じているが、これは風速の変動に起因するところが大きく、風車の荷重は自然風中では風の乱れが荷重の変動あるいは瞬間的な最大値の大きさに依存することが予想される。



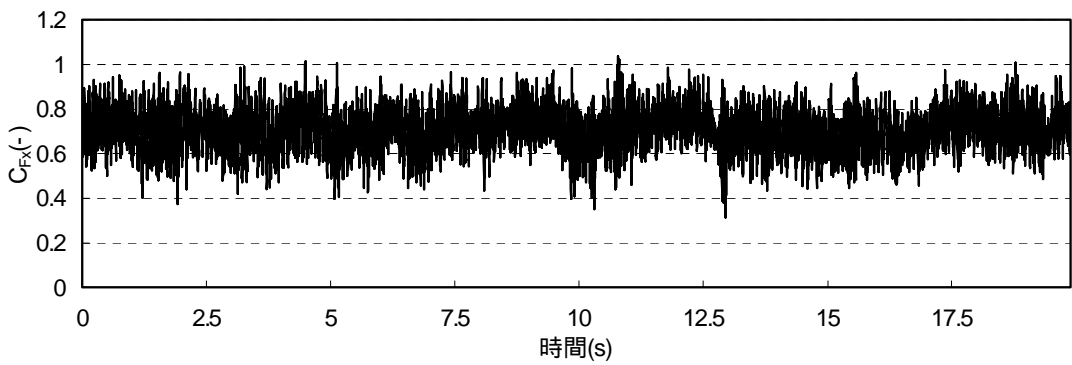
(a) パワー係数



(b) 翼根部モーメント係数 (エッジ)



(c) 翼根部モーメント係数 (フラップ)



(d) スラスト係数

図 C 2.5 境界層乱流試験結果 (「運転・定格」想定)

このような計測結果から、運転状態が定格、カットアウトのそれぞれの場合についてロータ特性がどう異なるかを調べた結果を図 C 2.6 に示す。両者で荷重の絶対値には大きく差があり、風車においては、通常の構造物における風力係数一定は成立せず、通常運転状態であっても荷重の作用状況が大きく変わりうる事が分かる。

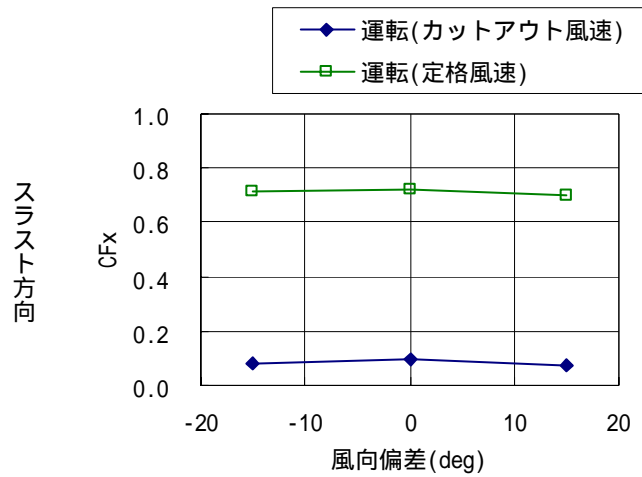
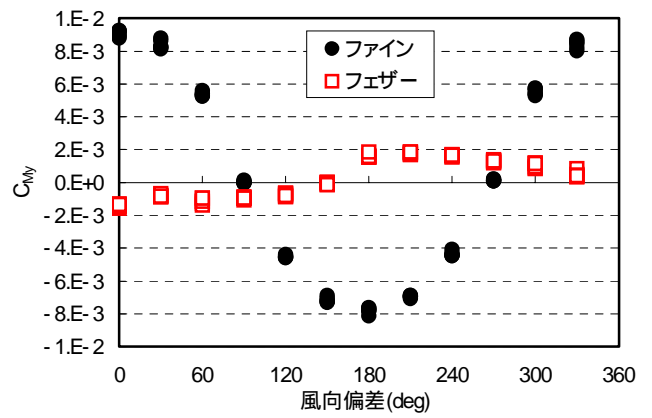
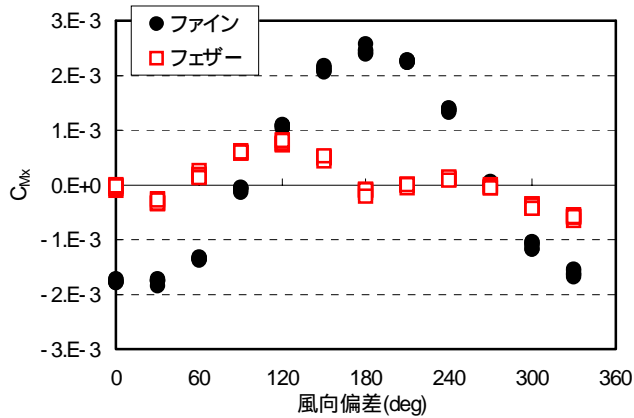


図 C 2.6 ロータ空力特性試験結果  
 (「運転・定格」、「運転・カットアウト」想定)

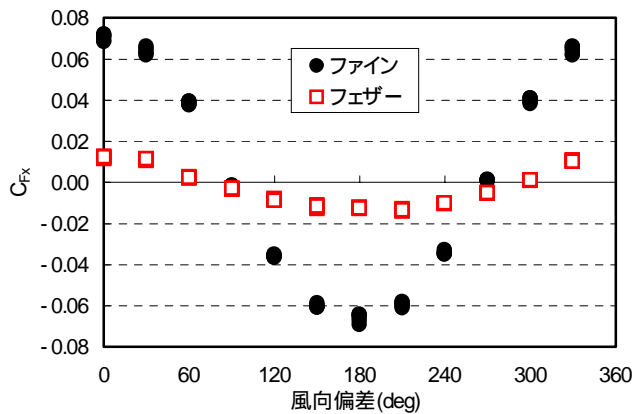
本文の図 7.18 に同じ。

さらに、暴風時を想定し、ロータ遊転時における荷重の平均値を風向偏差に対して示したのが図C 2.7である。これは、暴風状態においては、ロータに対する風向偏差と翼のピッチ角の状態に荷重が大きく依存し、これは、ピッチ制御風車とストール制御風車とでは荷重作用特性が異なることに対応する。

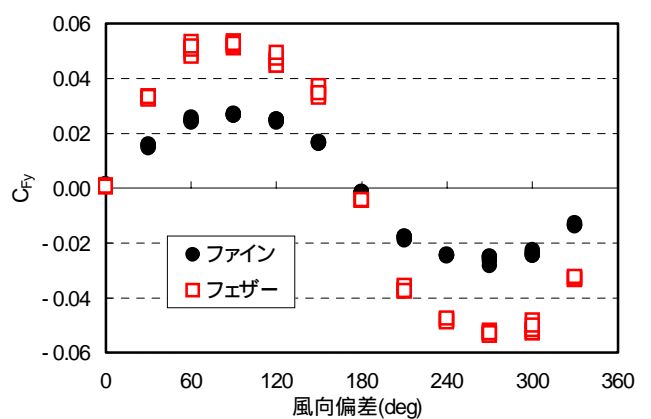


(a) 翼根部モーメント係数(エッジ)

(b) 翼根部モーメント係数(フラップ)



(c) スラスト係数



(d) 横力係数

図C 2.7 境界層乱流試験遊転時平均値(「暴風」想定)

本文の図 7.17 は上図を抜粋したもの。

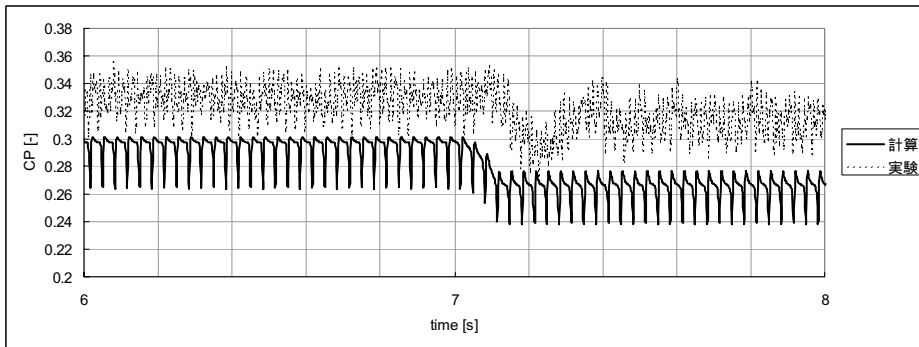
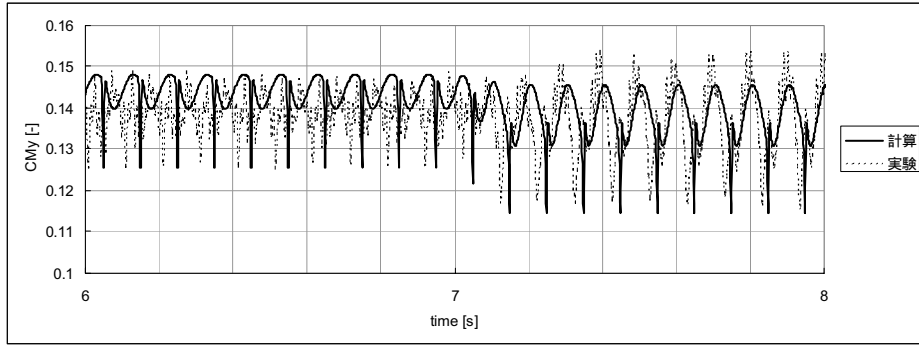
### (3) 風車動特性試験（アクティブ気流試験）

風向や風速の急変を想定し、アクティブ気流試験として風洞内で風向あるいは風速が急変させた場合の荷重の計測結果を図 C 2.8 に示す。

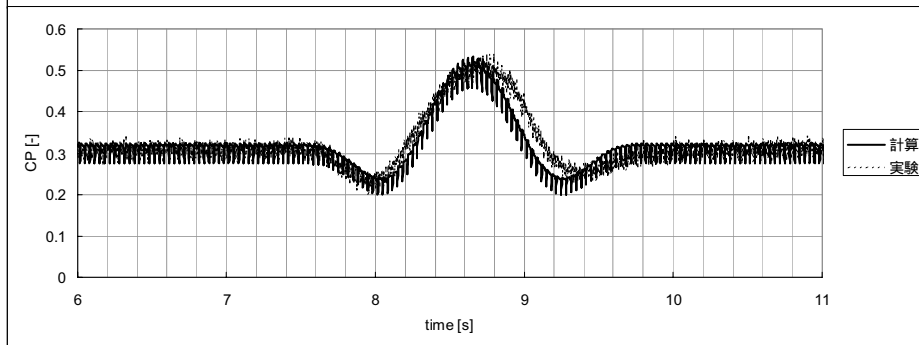
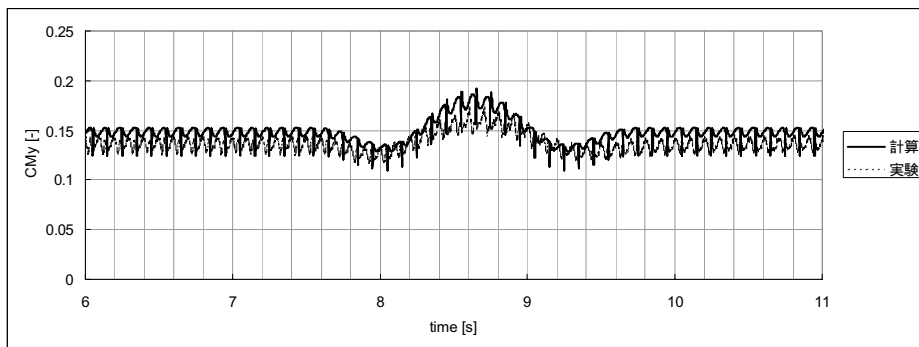
風向が急変する場合（EDC に対応）においては、風向はロータ面に正対している状態から、 $15^\circ$  の風向偏差の状態へと急激に移行する。そのため、パワー係数は風向変化後に減少する。パワー係数の減少時には過渡的な応答（オーバーシュート）が確認された。これはロータ面に流入する風速・風向が急激に変化した場合ロータ前後の流れの運動量が平衡点へ移行するまでにある程度の時間を要する、いわゆる後流渦慣性効果（Dynamic Inflow）によるものと考えられる。フラップ方向翼根部モーメントの変動振幅においても風向変化後では定常状態に移行するまで時間遅れが確認され、同様の理由によるものと考えられる。

一方、風速が急変する場合（EOG に対応）過渡応答のような非定常現象は確認されず、荷重変動は風速変動に瞬時に追従するような準定常的な様相を示している。

図中には、実験結果にあわせて風車の荷重計算用ソフトウェアで荷重のシミュレーションを実施した結果をあわせて示しているが、風向変化時にみられた過渡応答に関しては、シミュレーションでは明確ではない。しかしながら、設計上の最大値の把握に関しては、シミュレーションを上回るようなことにはなっておらず、荷重計算用ソフトウェアが実用に耐えると考えられる。



(a) 急激な風向変化時の翼根モーメントとパワー係数の変化



(b) 急激な風速変化時の翼根モーメントとパワー係数の変化

図 C 2 . 8 急激な風向や風速変化時の荷重（「運転・定格」想定）

本文の図 7.23 は上図を抜粋したもの。

## C 2.4 まとめ

本実験においては、風車模型を用いた風洞実験により、風車に作用する荷重の特性を計測した。得られた主な結果を以下に示す。

- ・ 風車においては、通常の構造物における風力係数一定は成立せず、通常運転状態であっても荷重の作用状況が大きく変わりうる。
- ・ さらに、暴風状態においては、ロータに対する風向偏差と翼のピッチ角の状態に荷重が大きく依存し、これは、ピッチ制御風車とストール制御風車とでは荷重作用特性が異なることに対応する。
- ・ 急激な風向もしくは風速の変化が生じた場合、荷重計算用ソフトウェアでは再現されない過渡応答のような非定常性が実験では認められるケースもあるが、設計上の最大値の把握に関しては荷重計算用ソフトウェアが実用に耐えると考えられる。



**付属書D**  
**(参考)**

**風車被害・実績状況**

**D 1 国内（日本における風車被害）**

**D 1.1 風車事故発生要因**

風力発電所の故障・事故情報は、「平成 18 年度 風力発電利用率向上委員会および故障・事故等調査委員会報告書」（平成 19 年 3 月、NEDO）に調査結果が公表されている。これによると風車・事故発生の要因別集計は表 D 1.1 のとおりとなっている。

**表 D 1.1 故障・事故発生要因別集計**

故障・事故要因		H16 年度	H17 年度	H18 年度	合計	構成率
自然現象	暴風*1	21	1	0	22	6.2%
	落雷	38	39	14	91	25.8%
	乱流	2	0	2	4	1.1%
	外的要因その他*2	3	4	2	9	2.5%
風車内故障	設計不良*3	49	4	0	53	15.0%
	製造不良	20	19	6	45	12.7%
	施行不良	1	7	3	11	3.1%
人的要因	メンテ不備	2	5	3	10	2.8%
系統故障	系統故障	2	0	2	4	1.1%
原因不明・その他	原因不明*4	24	29	33	86	24.4%
	経年劣化	2	1	2	5	1.4%
	その他*5	0	3	10	13	3.7%
合計		164	112	77	353	100%

\* 1：うち風向風速計のみ故障が 14 件（平成 16 年度）

\* 2：主なものは凍結、浸水、竜巻、塩害など。

\* 3：うち台風時に風向風速計のみ故障が 26 件（平成 16 年度）

\* 4：H18 年度は平成 19 年 3 月時点で原因究明中の 22 件を含む。

\* 5：主なものは同一サイトの他の風車の故障による二次被害、偶発的故障など。

## D 1.2 部位別発生状況

「平成 18 年度風力発電利用率向上委員会および故障・事故調査分科会（平成 19 年 3 月）」の報告書によると、平成 16～18 年度に調査した故障・事故の発生部位別発生状況は表 D 1.2 のように示される。

この表によると故障事故の発生部位別の状況から風向風速計、制御装置、ブレードでの発生が多く報告されている。これらは、暴風（強風）が要因とされる事例がその多くを占めていたとされている。

表 D 1.2 故障事故の部位別発生状況

故障事故部位	H16 年度	H17 年度	H18 年度	合計	構成率
ブレード	22	24	5	51	12.2%
ハブ	2	0	0	2	0.5%
空力ブレーキ	1	0	0	1	0.2%
機械式ブレーキ	3	2	2	7	1.7%
ピッチ制御装置	12	15	8	35	8.4%
主軸/ベアリング	6	0	2	8	1.9%
ギアボックス	5	3	1	9	2.2%
発電機	11	8	7	26	6.2%
ヨー装置	5	2	3	10	2.4%
風向風速計	54	7	5	66	15.8%
制御装置	22	22	13	57	13.7%
電気装置	3	18	16	37	8.9%
油圧装置	3	9	5	17	4.1%
センサ類	5	6	1	12	2.9%
基礎	1	0	0	1	0.2%
系統連系装置	3	0	1	4	1.0%
その他*1	32	29	13	74	17.7%
合計*2	190	145	82	417	100%

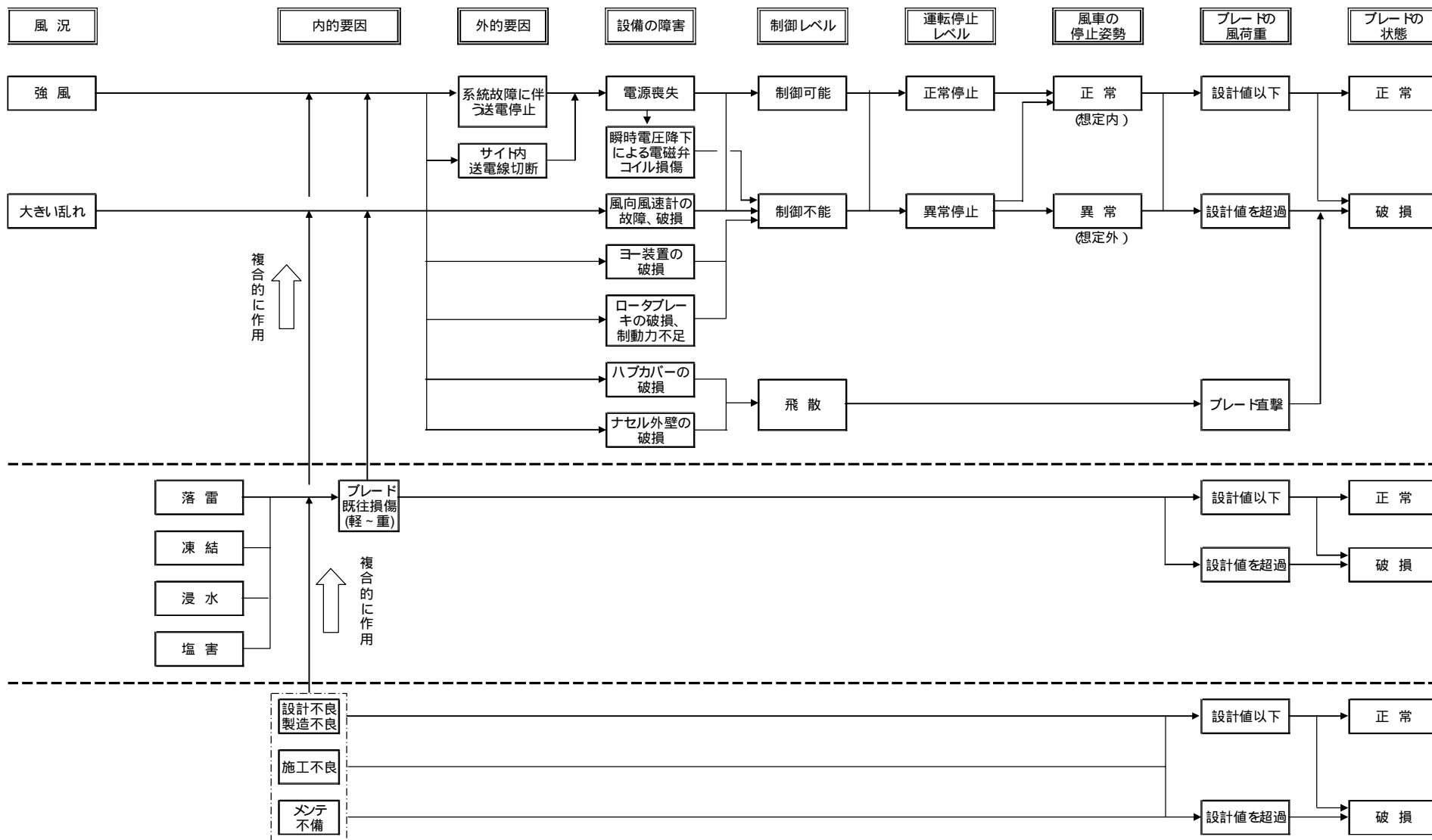
\* 1：主なものは通信装置、ハブカバー、ナセル、損傷部位無し（系統故障、原因不明の停止など）など。

\* 2：1回の故障で複数箇所が故障するケースではそれぞれをカウントしているため、合計数は故障・事故件数より多くなっている。

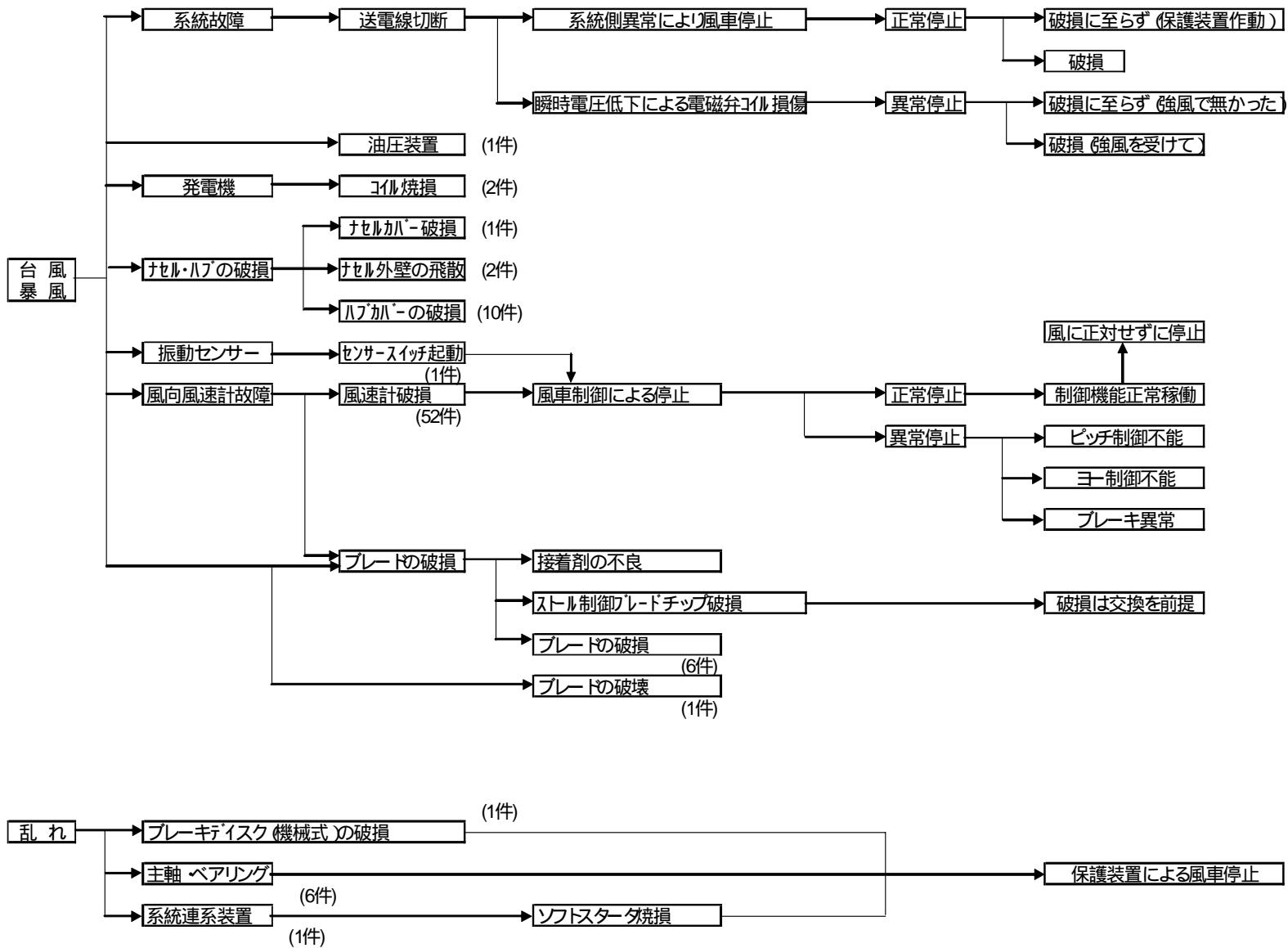
これらの損傷に関してその要因と考えられるものを抽出し、損傷にいたるまでの流れを示したのが図 D 1.1 である。

故障事故被害内容をこの要因に当てはめてフローチャート式に纏めたものを図D 1.2にフローチャートとして示す。

風に伴うブレード損傷に関する要因(条件)について (損傷の既知事例のほか、類推される要因の組合せも含む)



図D 1.1 風に伴う損傷要因



図D 1.2 風車の被害に関するフローチャート

## D 2 海外（海外における風車被害事例）

### D 2.1 風車事故発生状況

海外事例としては CWIF の資料(Wind Turbine Accident Compilation : 2006 Caithness Windfarms Information Forum) に基づく 2005 年までの主にヨーロッパにおける風車事故データよりブレード破損に関するもの、67 例を抽出すると以下の図 D 2.1 の通りとなる。

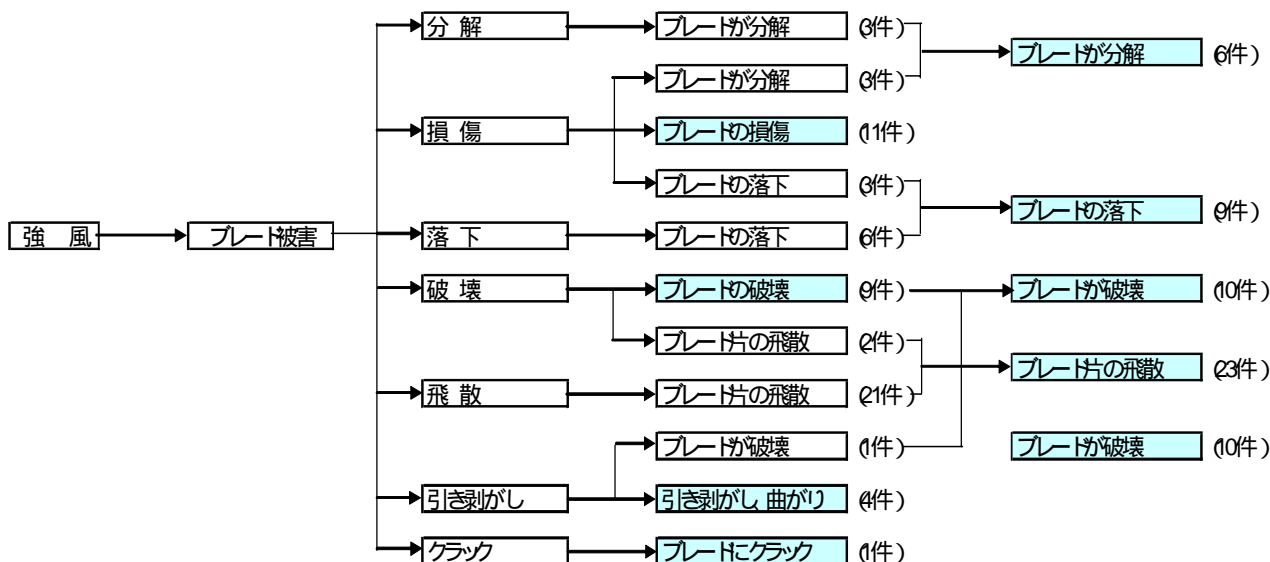


図 D 2.1 ヨーロッパにおけるブレード事故発生区分

これらの事故を年度と風車規模により分類すると以下の表 D 2.1、2.2 のとおりとなる。

表 D 2.1 ブレード事故発生区分  
事故発生区分  
ブレード被害(風他)

年	500kW	1000kW	1500kW	2000kW	不明	年合計
~	~	~	~	~	不明	年合計
	500kW	1000kW	1500kW	2000kW		
~ 1998	6	1	-	-	4	11
1999	-	2	2	3	4	11
2000	2	1	1	1	-	5
2001	-	-	1	-	1	3
2002	1	2	-	1	1	14
2003	-	2	-	-	1	4
2004	2	1	-	1	1	11
2005	-	2	1	-	2	8
2006	-	-	-	-	-	0
計	11	11	5	6	6	28

表D 2.2 ブレード事故発生区分（強風）

事故発生区分  
ブレード被害（強風）

年	500kW	1000kW	1500kW	2000kW	不明	年合計
~	~	~	~	~		
	500kW	1000kW	1500kW	2000kW		
~1998	1	-	-	-	-	1
1999	-	-	-	-	-	0
2000	1	-	-	-	-	1
2001	-	-	-	-	-	0
2002	1	2	-	1	6	10
2003	-	1	-	-	1	2
2004	-	-	-	-	1	1
2005	-	2	1	-	2	7
2006	-	-	-	-	-	0
計	3	5	1	1	3	22