

# 九州大学伊都キャンパスにおける風観測

## —第二報 乱流強度分布と風力発電量の試算について—

内田 孝紀\* 杉谷 賢一郎\* 大屋 裕二\*

(2006年7月27日受理)

### Wind Observation in the Ito Campus of Kyushu University —Part 2. About the distribution of turbulence intensity and the trial calculation of the amount of wind power generation—

Takanori UCHIDA, Kenichirou SUGITANI and Yuji OHYA

E-mail of corresponding author: *takanori@riam.kyushu-u.ac.jp*

#### Abstract

Wind observation by the “20 Meter NRG-NOW System” was conducted from 2003 to 2004 in the Motooka campus of Kyushu University. It is possible to acquire the data of a wind speed, a standard deviation of the wind speed, and a wind direction in height (20m and 10m) in this system. This report describes the distribution of turbulence intensities. In addition, the trial calculation of the amount of wind power generation is done.

**Key words :** Ito campus, Kyushu University, Turbulence intensity, Wind power generation

## 1. 緒言

我々は九州大学伊都キャンパスにて風観測<sup>1)</sup>を実施してきた(Fig.1を参照). 本報では, 第二報として2003年7月~2004年6月における1年間の観測データ(地上高20m)に基づいて, 乱流強度分布と風力発電施設を導入した際の年間発電量の試算結果を報告する.

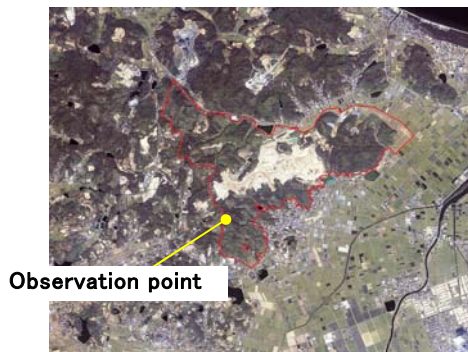


Fig.1 Location of the Ito campus

## 2. 風観測システム

ここでは, 本研究で使用した風観測システムについて記述する. 風観測システムは“20 Meter NRG-NOW System”を使用した. Fig.2に示すように, 20mの観測タワーを立て, 10mと20mの位置にFig.3に示す風速計と風向計を設置した. 機械式の風速計には, 一般に「風杯

型(カップ式)風速計」と「風車型(プロペラ式)風速計」があるが, 本研究では3杯型風速計を用いた. 風向計にはベーン型風向計を用いた. データの取得には, Fig.4に示すNRGロガー9200プラス(自動記録器)を用いた.

データの記録間隔は10分(600秒), サンプリング間隔は0.5Hz(2秒)で, 風速の平均値と標準偏差および風向の平均値が格納される. すなわち, 300個のデータに基づいた統計処理の結果である. 平均風速は0~97.4(m/s)まで取得可能であり, その精度は0.022(m/s)である. 風向には補正值があり, 10mは330度, 20mは

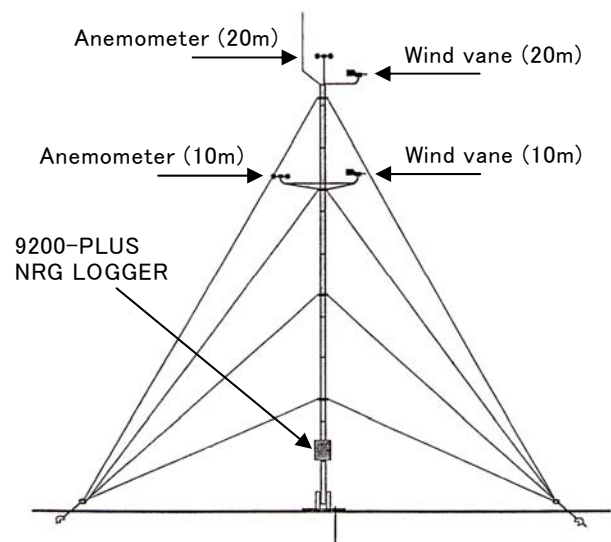


Fig.2 Typical figure of the wind observation system  
(20 Meter NRG-NOW System)

\* 九州大学応用力学研究所



Fig.3 Measurement equipment

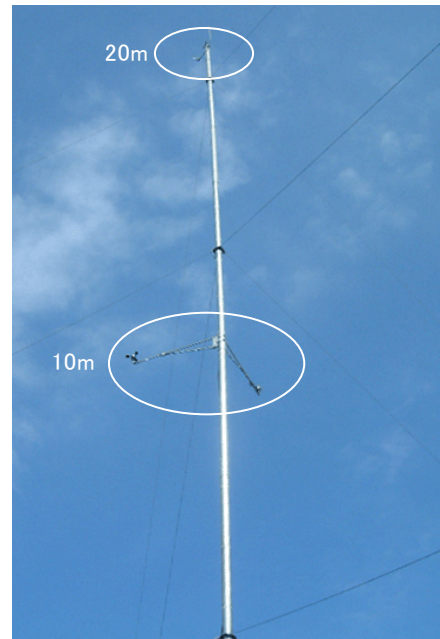


Photo.1 Situation of the observation tower

ることが可能である. Photo.1には計測システムを設置した実際の様子を示す.

- ✓ 現在風速風向
- ✓ 現在記録間隔の平均風速風向
- ✓ 現在記録間隔の最大風速とその風向
- ✓ 現在アナログ入力値
- ✓ 現在年月日, 時刻
- ✓ 記録間隔
- ✓ 記録モード
- ✓ 地点番号(ユーザーが入力)
- ✓ データチップ番号(ユーザーが入力)
- ✓ 電池電圧
- ✓ データチップの記録可能残存日数

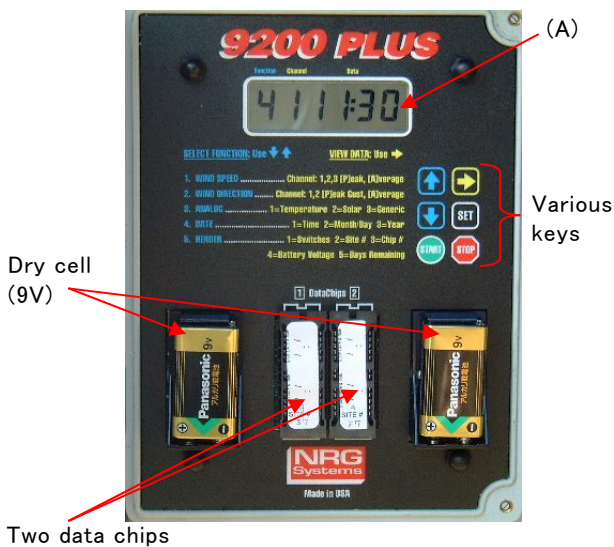


Fig.4 Automatic data recorder (9200-PLUS NRG LOGGER)

350度である. 自動記録器には32kBのチップを2個搭載しており, 9Vの乾電池2個で56日間のデータ記録が可能である(Fig.4)に矢印で表示). 同図に矢印で示す各種キーを操作することにより, (A)には以下の情報を表示す

### 3. 観測結果

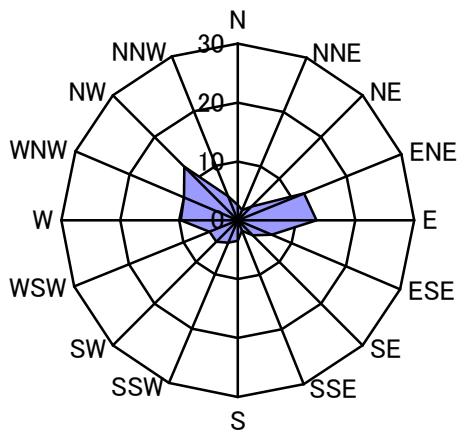
#### 3.1 年間の風況特性(2003年7月~2004年6月)

最初に, 地上高20mの観測データに基づいて評価した, 2003年7月~2004年6月における1年間の風況特性を整理しておく.

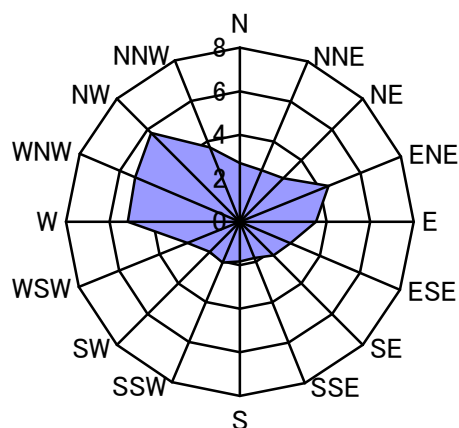
Fig.5には, 16風向別の発生頻度とそれに対応した平均風速を示す. 伊都キャンパスでは, 北西, 東北東, 東からの風が卓越しているのが分かる.

Fig.6には, 月別平均風速の比較を示す. 縦軸が平均風速を示し, 横軸は月である. 冬期の12月~2月には, 平均風速で5.0(m/s)程度の風が吹いているのが分かる (Table.1も参照).

Table.1には、Fig.5およびFig.6の数値データの一覧を示す。地上高20mにおいて、年間平均風速は3.8(m/s)であった。



(a)発生頻度(%)



(b)平均風速(m/s)

Fig.5 Flow characteristics during year (2003.7-2004.6)

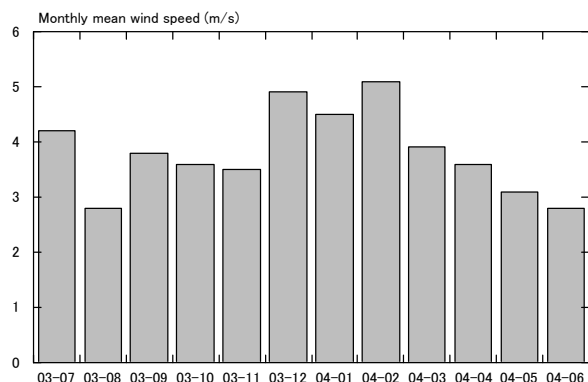


Fig.6 Comparison of monthly mean wind speed (2003.7-2004.6)

風向	平均風速(m/s)	出現頻度(%)
N	2.7	2.6
NNE	2.6	1.9
NE	2.8	3.3
ENE	4.4	12.2
E	3.5	13.4
ESE	2.5	6.3
SE	2.2	3.6
SSE	1.8	1.9
S	1.8	3.5
SSW	2.0	4.1
SW	2.0	5.2
WSW	2.6	5.2
W	5.2	9.7
WNW	5.2	9.9
NW	5.8	12.8
NNW	3.9	4.4
地上高20m		

年-月	平均風速(m/s)
2003年7月	4.2
2003年8月	2.8
2003年9月	3.8
2003年10月	3.6
2003年11月	3.5
2003年12月	4.9
2004年1月	4.5
2004年2月	5.1
2004年3月	3.9
2004年4月	3.6
2004年5月	3.1
2004年6月	2.8
年平均風速	3.8
地上高20m	

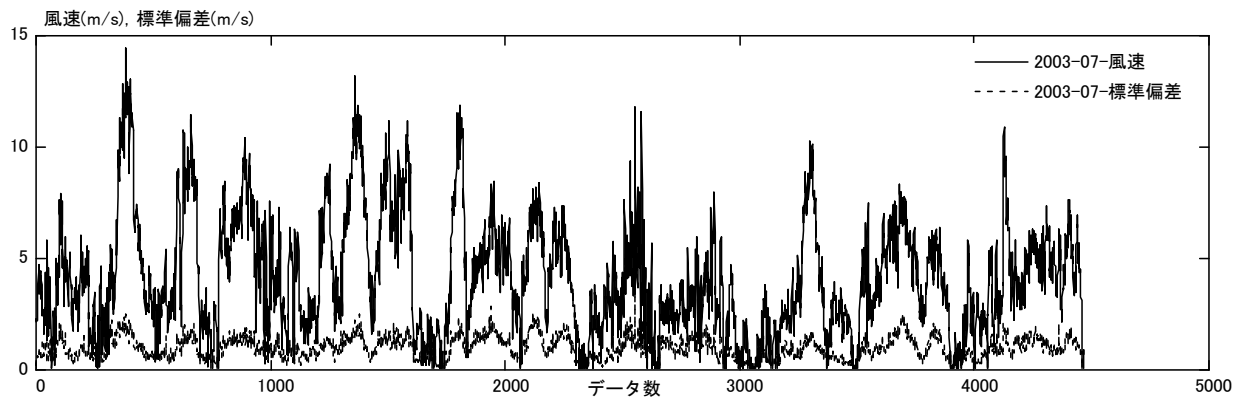
Table.1 Summary of flow characteristics during year (2003.7-2004.6)

### 3.2 風の乱れの分布

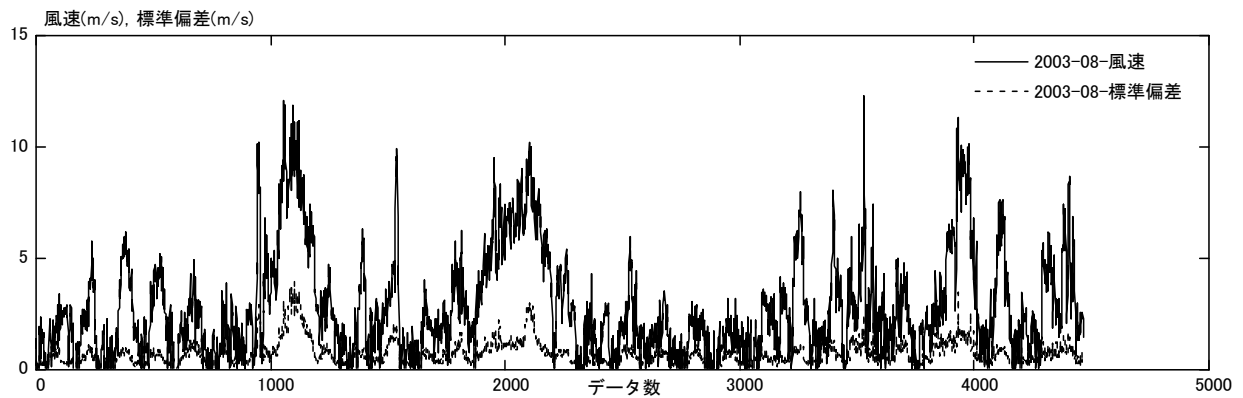
ここでは、風速の標準偏差と乱流強度の分布(=風速の標準偏差÷平均風速)について示す。

Fig.7には、月別風速とその標準偏差の時間変化を示す。縦軸が風速と標準偏差を示し、横軸がデータ数(時間)である。各月ともに、風速と標準偏差の変化は強い相関が見られる。各月ともに風速は激しく変動している様子が分かる。

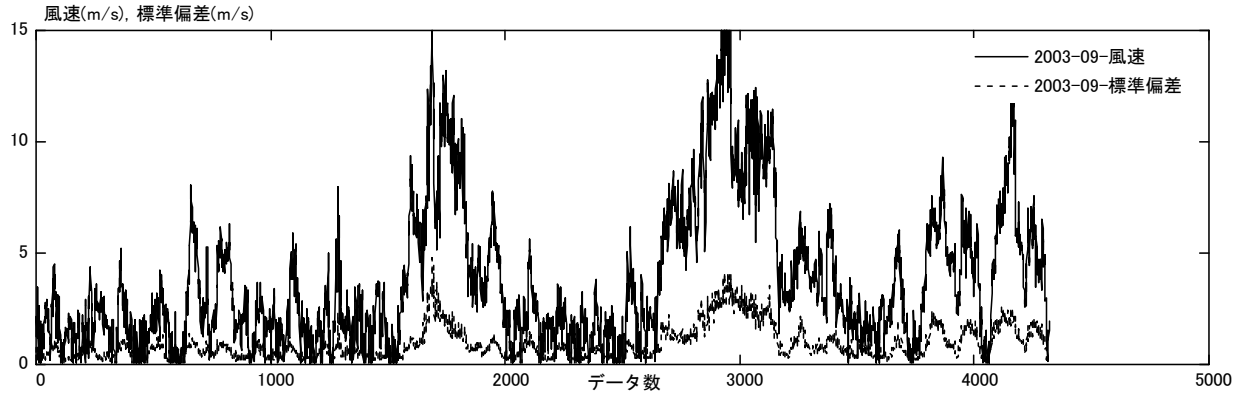
さて、以下では風力発電の導入に着目して議論を進める。日本各地で風力発電施設の建設が進むにつれて、欧州とは異なった日本特有の厳しい環境条件の影響が明らかになってきている<sup>2, 3)</sup>。具体的には、台風、落雷(特に冬季の雷)、風の乱れの存在が大きい。ここでは、風の乱れ(乱流強度)に注目することとする。風力発電機(WTG, Wind Turbine Generator)の設計および製造は国際基準IEC61400-1(「風力発電システムの安全要



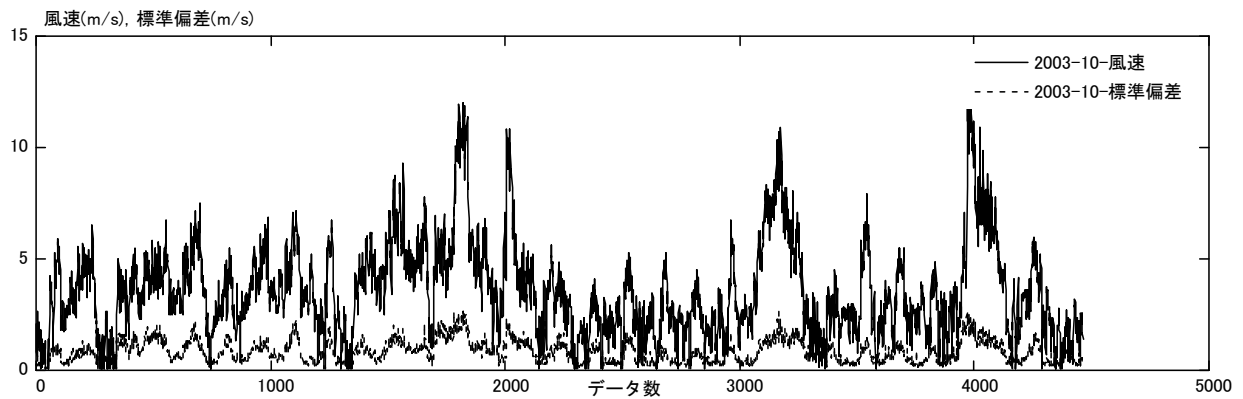
(a)2003年7月



(b)2003年8月

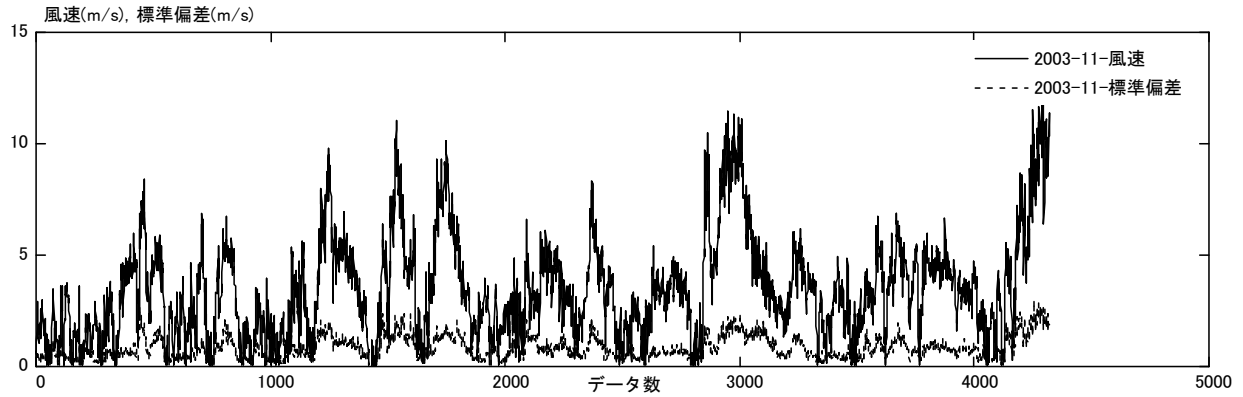


(c)2003年9月

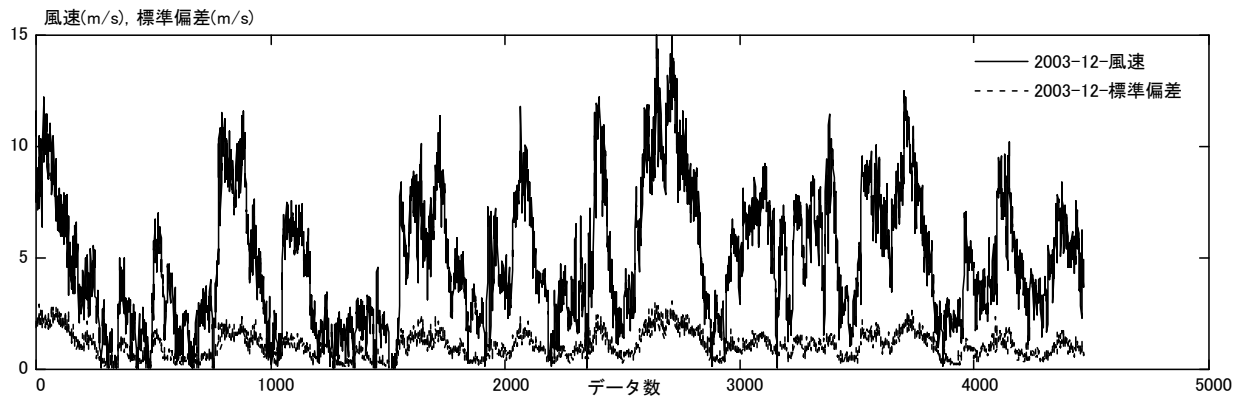


(d)2003年10月

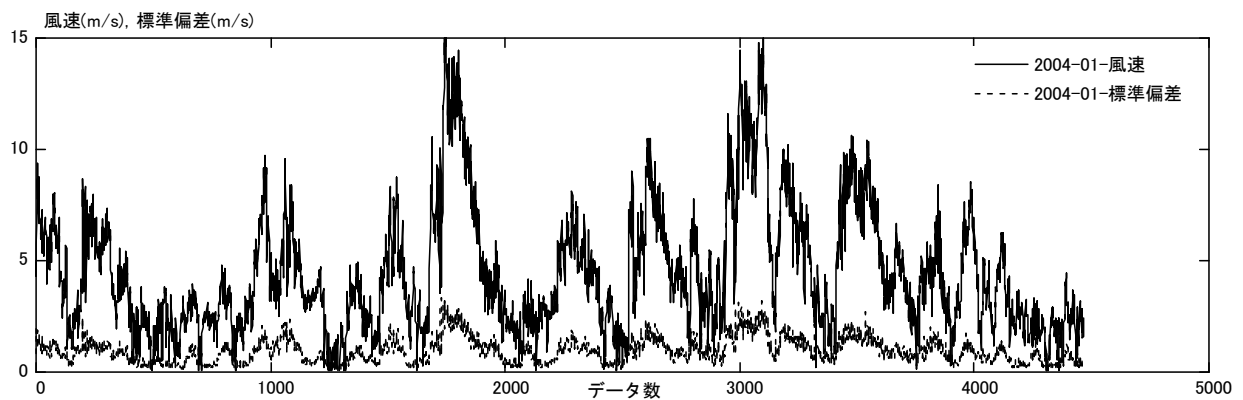
Fig.7 Time variation of wind speed and standard deviation



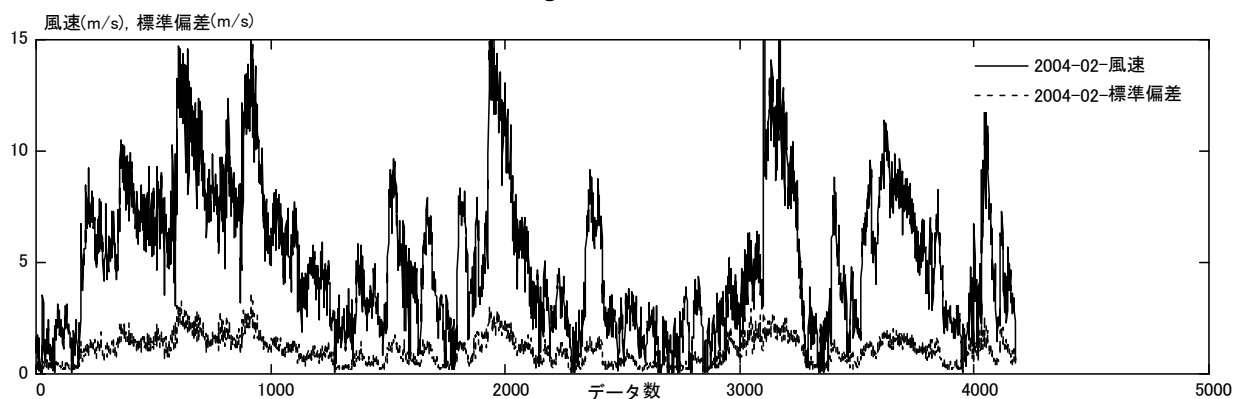
(e)2003年11月



(f)2003年12月

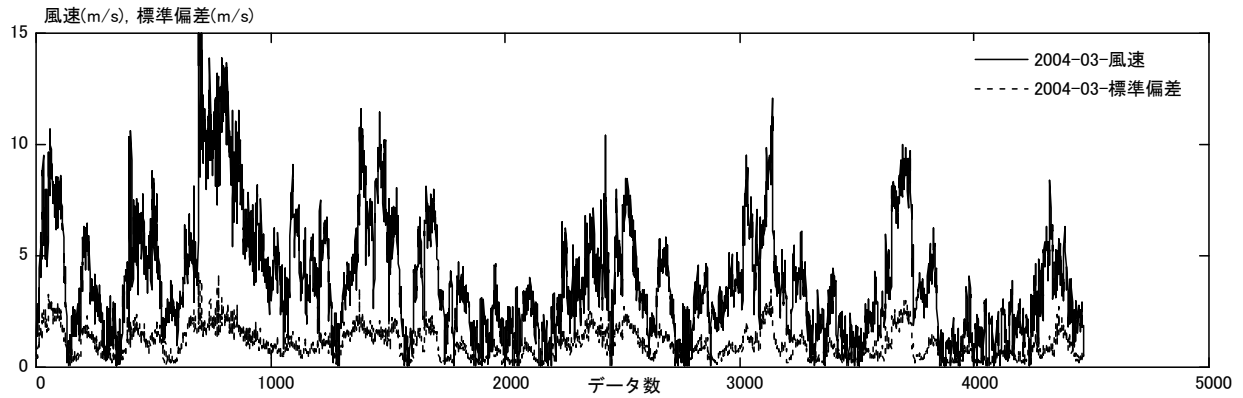


(g)2004年1月

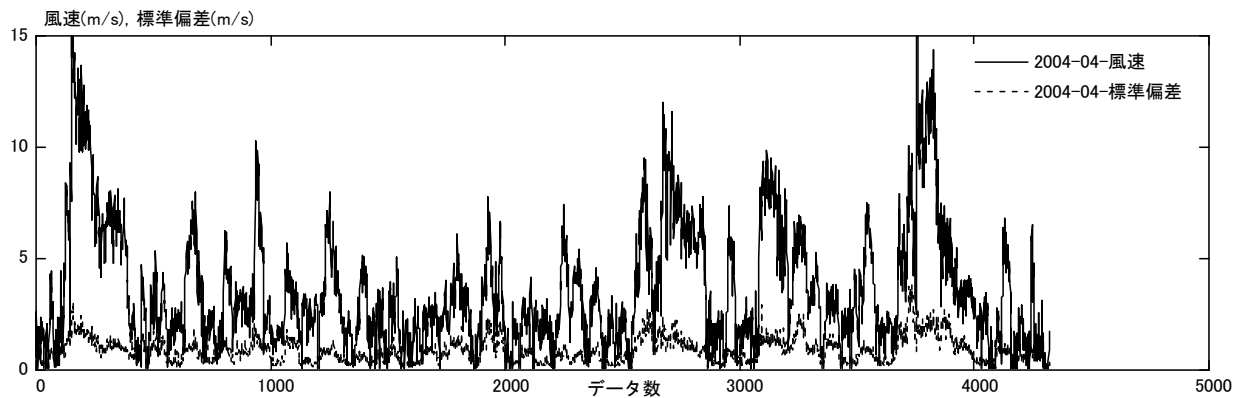


(h)2004年2月

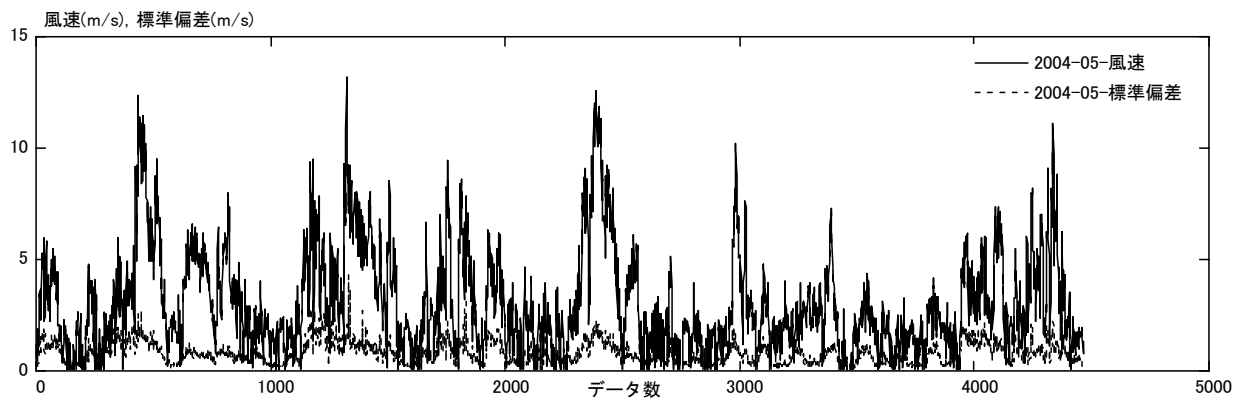
Fig.7 Time variation of wind speed and standard deviation  
(Continuation on previous page)



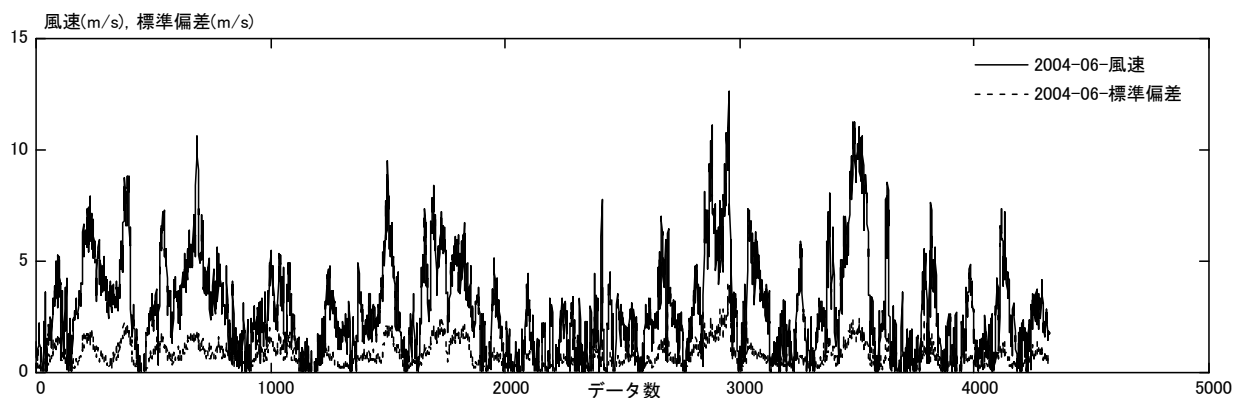
(i)2004年3月



(j)2004年4月

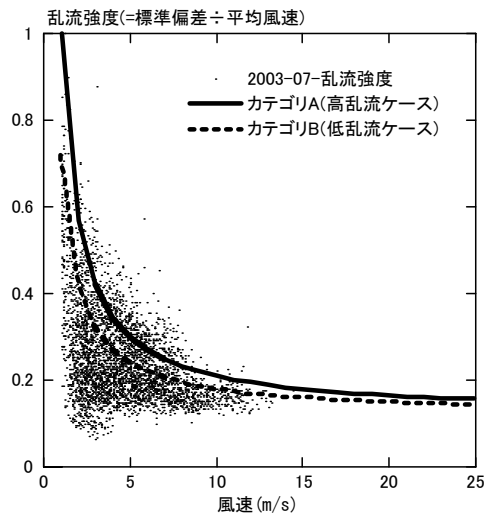


(k)2004年5月

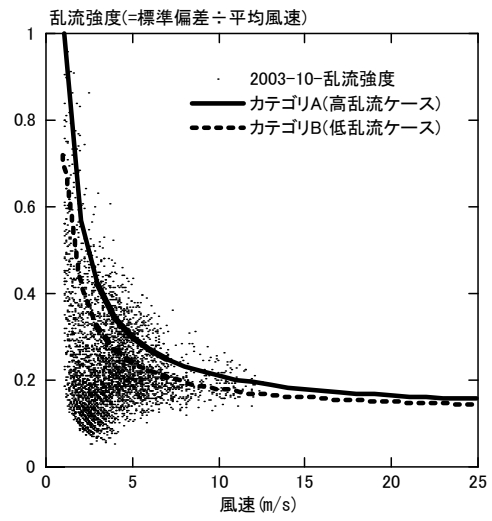


(l)2004年6月

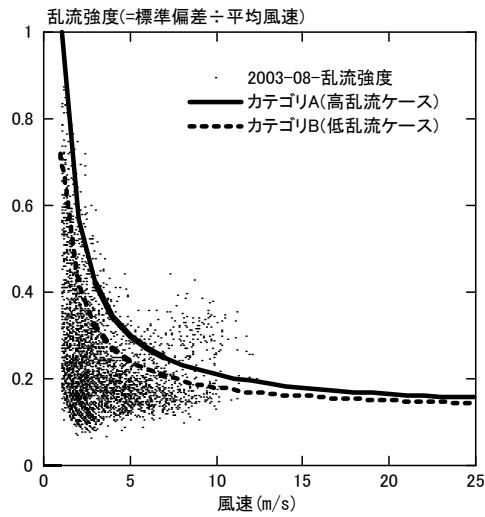
Fig.7 Time variation of wind speed and standard deviation  
(Continuation on previous page)



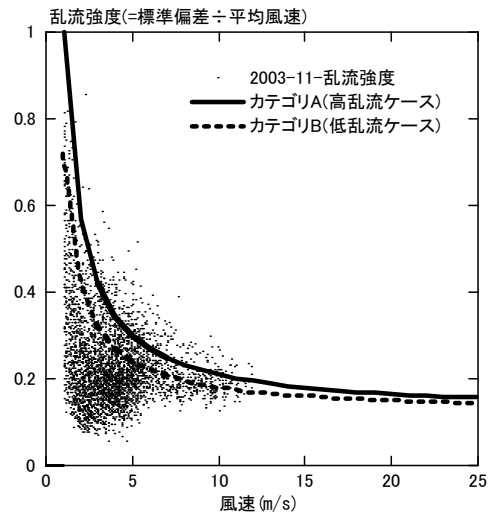
(a)2003年7月



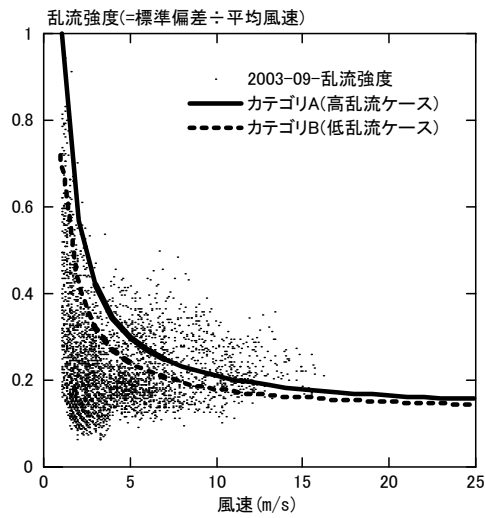
(d)2003年10月



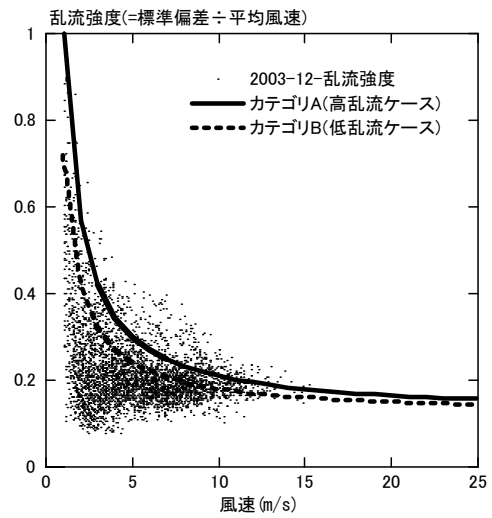
(b)2003年8月



(e)2003年11月

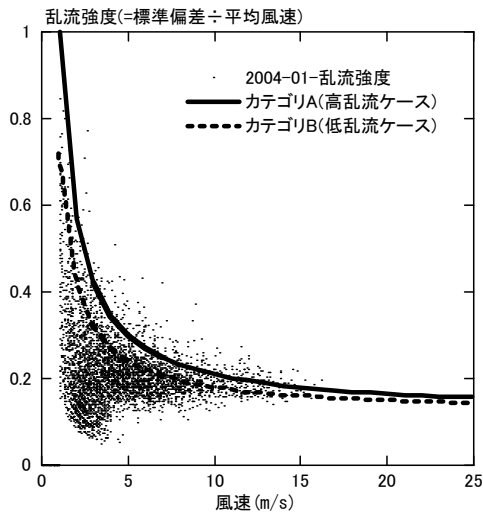


(c)2003年9月

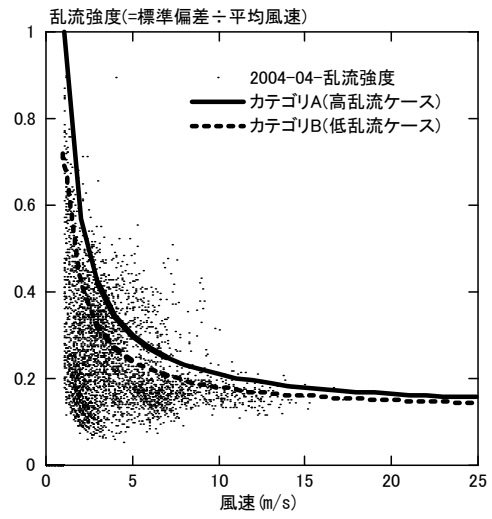


(f)2003年12月

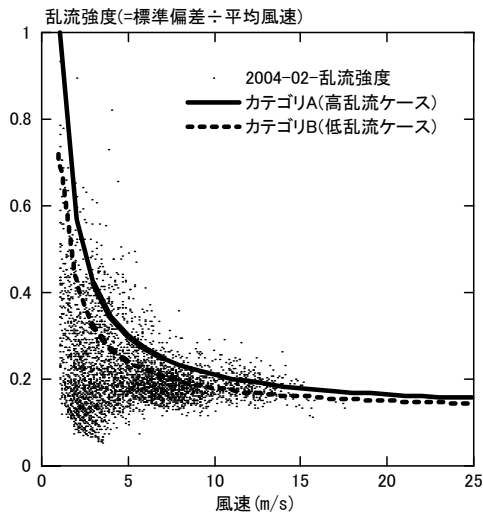
Fig.8 Distribution of turbulence intensities



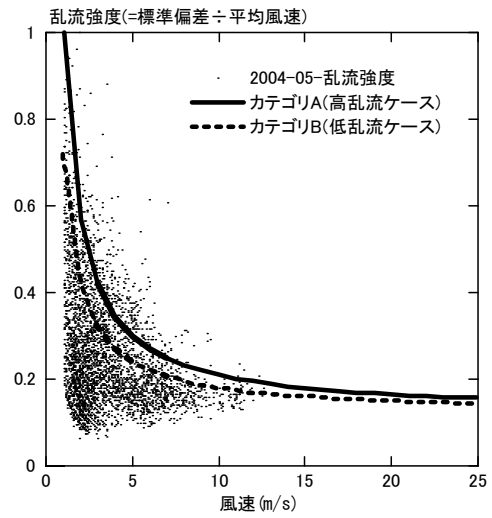
(g)2004年1月



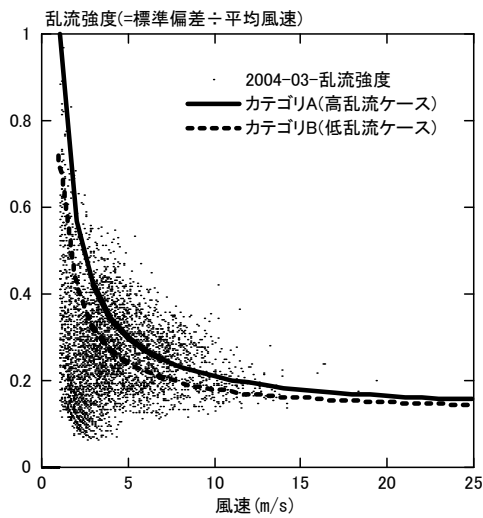
(j)2004年4月



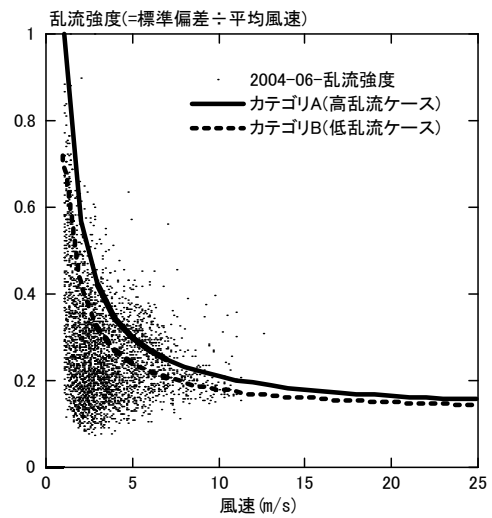
(h)2004年2月



(k)2004年5月



(i)2004年3月



(l)2004年6月

Fig.8 Distribution of turbulence intensities  
(Continuation on previous page)



WTGクラス	I	II	III	IV	S
$V_{ref}(m/s)$	50	42.5	37.5	30	設計者が規定
$V_{ave}(m/s)$	10	8.5	7.5	6	
カテゴリA (高乱流ケース)	$TI_{15}$	0.18			
	a	2			
カテゴリB (低乱流ケース)	$TI_{15}$	0.16			
	a	3			
極値風速(m/s)	70	59.5	52.5	42	

$V_{ref}(m/s)$ : 10分平均の基準風速

$V_{ave}(m/s)$ : ハブ高さにおける年平均風速

$TI_{15}$ : 10分平均風速15(m/s)でのハブ高さ乱流強度

a: 乱流強度モデル(下記に示す風速Uの関数)における傾斜パラメータ

乱流強度モデル:  $TI=TI_{15} \times (15/U+a)/(1+a)$

Table.2 Summary of IEC61400-1(Ed.2, 1999)

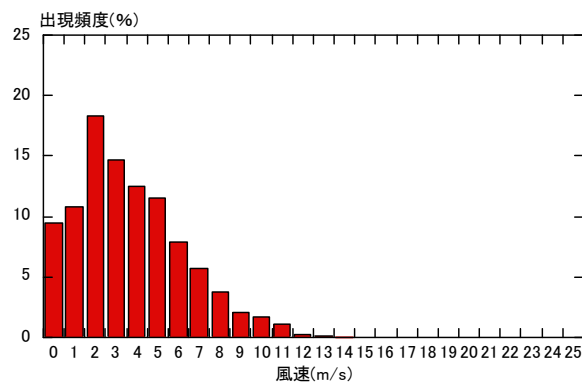
求」, Wind turbine generator systems Part1 : Safety requirements)で乱流強度や極値風速などの種々の風条件が規定されている(Table.2を参照). すなわち, WTGが安全に耐え得る条件(WTGが遭遇する条件)が基準化されているわけである. ここでIECとは, International Electrotechnical Commission(国際電気標準会議, 加盟国64カ国)の略称である. この風況の条件は一般的に「風モデル」と呼ばれる. この「風モデル」は, 平坦地が支配的なデンマークやドイツなどの欧州の風観測結果に基づいて規定されている. 日本のように山岳性の地形が大半である地域の風況特性を十分に反映していないとの指摘を受け, 日本独自の「Jクラス風モデル」の確立が進められている.

Fig.8には, 乱流強度の分布を示す. 先にも述べたが, ここで言う乱流強度は, 10分間の風速変動データの標準偏差をその区間の平均風速で割った値である. 縦軸に乱流強度を示し, 横軸が風速である. データ解析の際, 風速が1(m/s)以下の場合には乱流強度をゼロとした. 同図には, IECの乱流強度モデル(カテゴリA, カテゴリB)も併せて示している. IECでは, WTGを設置するサイトの乱流強度は, この曲線を下回る範囲を推奨している. 伊都キャンパスのデータでは, 全ての月において, 現行のIEC基準(カテゴリA: 高乱流ケース)を上回る値が出現していることが明らかになった.

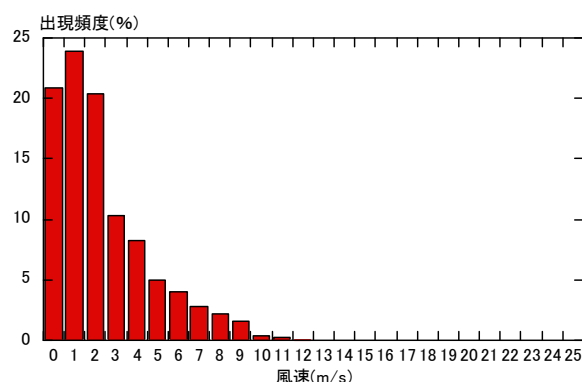
### 3.3 風力発電電力量の試算結果

ここでは, 風速の度数分布とWTGを導入した際の年間発電電力量の試算結果について示す.

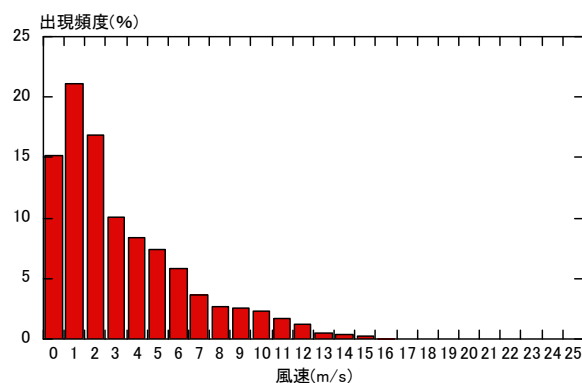
Fig.9には, 風速の度数分布(月別および年間)を示す. ここでは, Fig.9(m)に示す年間(2003年7月~2004年6月)の度数分布に注目する. 同図にはレイリー(Rayleigh)



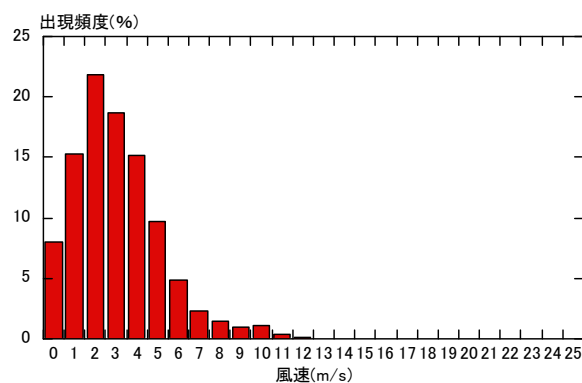
(a)2003年7月



(b)2003年8月

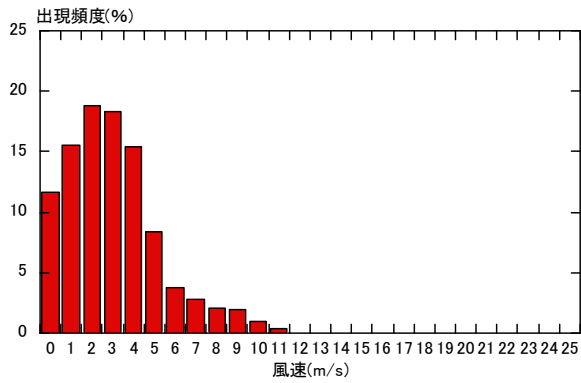


(c)2003年9月

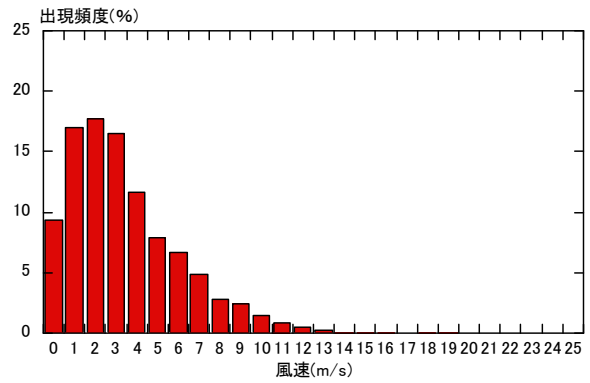


(d)2003年10月

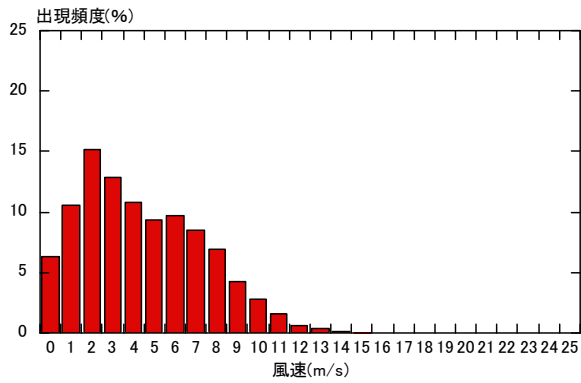
Fig.9 Frequency distribution of wind speed



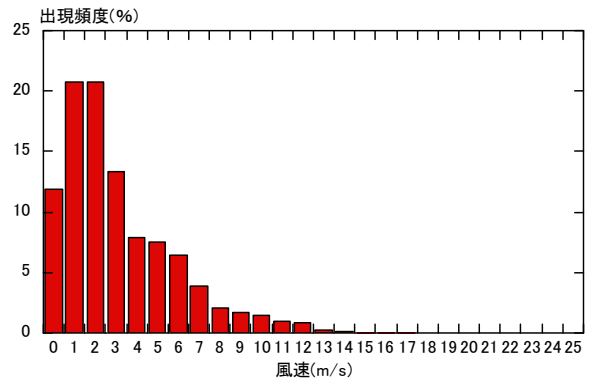
(e)2003年11月



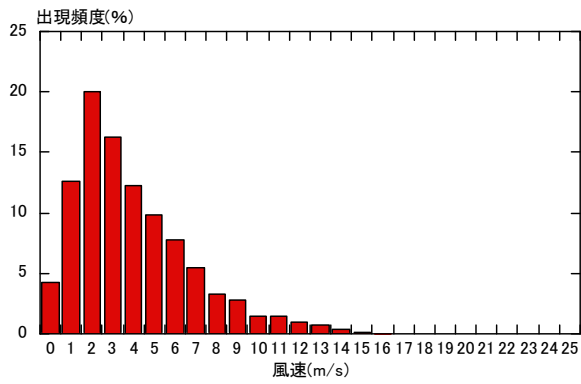
(i)2004年3月



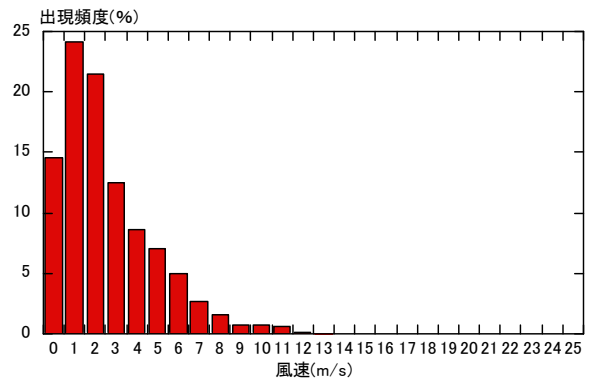
(f)2003年12月



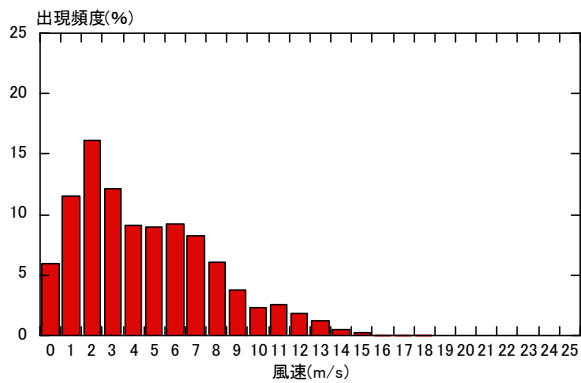
(j)2004年4月



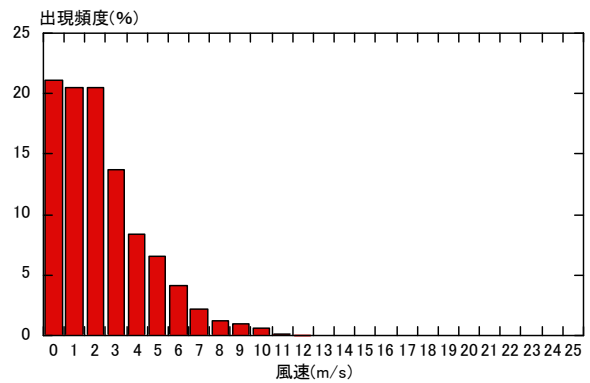
(g)2004年1月



(k)2004年5月

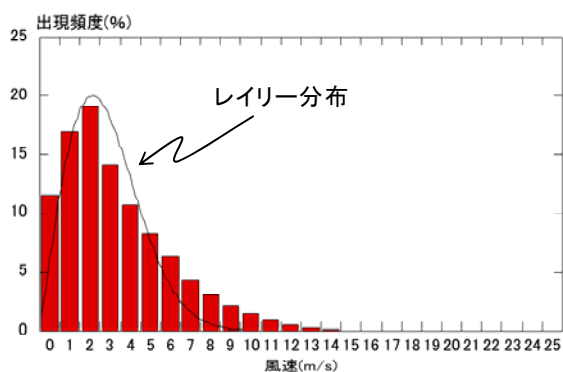


(h)2004年2月



(l)2004年6月

Fig.9 Frequency distribution of wind speed  
(Continuation on previous page)



(m)1年間(2003.7-2004.6)

Fig.9 Frequency distribution of wind speed  
(Continuation on previous page)

分布も併せて示している。レイリー分布について簡単に説明する。Fig.9(m)からも分かるように、風速の度数分布は左右非対称で、度数の最大値は左側、すなわち、弱風側に偏っている。この度数分布の関数形の研究が数多く行われており、現在ではワイブル(Weibull)分布関数が一般的に用いられる。レイリー分布は、ワイブル分布の特別なケースである。以下に示すように、レイリー分布では、(年)平均風速を設定すれば風速の度数分布を推定することができる。Fig.9(m)においても、レイリー分布は、観測データを集計した得られた風速の度数を概ね再現している。

$$f(V) = \frac{\pi}{2} \frac{V}{\bar{V}^2} \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{V}{\bar{V}} \right)^2 \right]$$

$\bar{V}$  : (年)平均風速(m/s)  
 $V$  : 風速(m/s)

次に、WTGを導入した際の年間発電電力量の試算結果について示す。ここでは、某メーカーの500kW級のWTGを想定した。Fig.10にパワーカーブを示す。カットイン風速後の曲線(発電量)は概ね風速の3乗に比例しているのが分かる。このパワーカーブとFig.9(m)に示した風速の度数分布に基づいて算出年間発電電力量などをTable.3に示す。なお、風速を発電に換算する際、風速ピンは最小値を用いた。すなわち、例えば4.9(m/s)での発電量は4(m/s)の発電量である23(kW)とした。このピンの取り方で設備利用率は数%変動する。一般的には、観測ポールの観測データ(本ケースでは地上高20m)をベキ法則に基づいてハブ高さ(例えば地上高45m)に換算して年間発電電力量を試算するが、ここでは地上高20mの観測データをそのまま使用した。年平均風速が3.8(m/s)である伊都キャンパスでは、500kW級のWTGを

想定した場合の設備利用率は、9.9(%)程度となった。

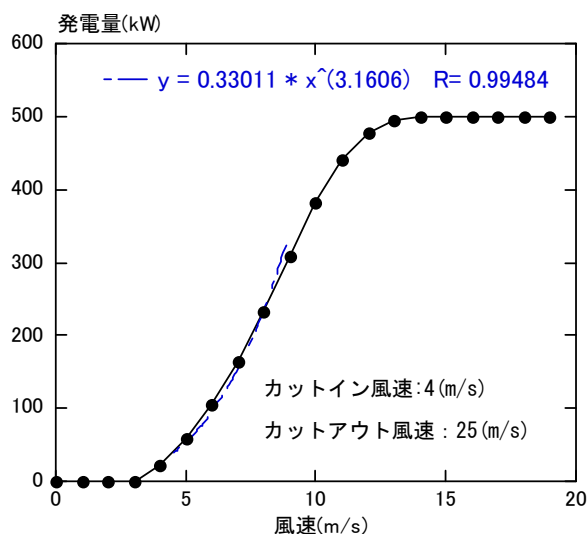


Fig.10 Power curve of 500kW class WTG

風速 (m/s)	発生時間(h)	発電量 (kW)	kWh (=発電量×時間)
0	1012.45	0	0.00
1	1488.34	0	0.00
2	1666.86	0	0.00
3	1238.34	0	0.00
4	939.81	23	21615.68
5	726.05	59	42837.08
6	548.69	105	57612.94
7	386.46	164	63379.97
8	262.46	233	61153.78
9	187.83	308	57851.47
10	126.00	381	48004.22
11	87.27	440	38396.99
12	46.38	478	22167.53
13	24.77	494	12234.84
14	11.30	499	5640.20
15	4.99	500	2493.31
16	1.00	500	498.66
17	0.50	500	249.33
18	0.33	500	166.22
19	0.17	500	83.11
備考	合計: 8760(h)	年間発電電力量(kWh) 434385.36	
		設備利用率(%) 9.9	
500kW級の風力発電機(WTG)を想定 地上高20mの風速値を利用(年平均風速3.8(m/s)) 設備利用率(%) =100×(年間発電電力量)/(定格出力×発生時間)			

Table.3 Amount of wind power generation  
during year (2003.7-2004.6)

## 4. 結言

九州大学伊都キャンパスにて実施してきた風観測データ(2003年7月～2004年6月,地上高20m)に基づき,本報では第二報として,乱流強度分布と風力発電施設を導入した際の年間発電量の試算結果を報告した.

乱流強度分布に関しては,全ての月において,現行のIEC基準(カテゴリA:高乱流ケース)を上回る値が出現していることが明らかになった.

年間発電量の試算に関しては,年平均風速が3.8(m/s)である伊都キャンパスでは,500kW級のWTGを想定した場合の設備利用率は,9.9(%)程度となった.

## 謝辞

本研究を行うに際し,(株)西島製作所風力発電技術部風力発電開発課の藤井直樹氏と小池絃司氏に多大

な協力を頂いた.また,当時研究室の大学院生であった,田鍋義博君,宮崎康伸君,阿部光一君,日置文章君にも多大な協力を頂いた.ここに記して感謝の意を表します.

## 参考文献

- [1] 内田孝紀,杉谷賢一郎,大屋裕二:九州大学元岡キャンパスにおける風観測—第一報—平均的な風況特性について—,九州大学応用力学研究所報,第128号,pp.37-51,2005
- [2] 永尾徹:実現が待たれる日本型風力発電,ターボ機械,第32巻,第11号,pp.695-700,2004
- [3] 小垣哲也,松宮輝,小川晋:Jクラス風モデルの開発と風力標準,ターボ機械,第33巻,第3号,pp.185-188,2005