



## 特集



最近の風力発電の進歩

# 洋上風力発電導入に向けた洋上風況観測とそれに基づく標準乱流モデルの提案

## The Wind Observation for Offshore Wind Farm and A New Normal Turbulence Model

土谷 学\*1

石原 孟\*2

福本幸成\*3

Manabu TSUCHIYA, Takeshi ISHIHARA, Yukinari FUKUMOTO

### 1. まえがき

二酸化炭素排出量の25%削減に向けて、風況の良い洋上風力発電の導入がその1つの方策として期待されている。(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下NEDO)では、平成18年度から洋上風力発電の導入に向けての基礎調査やF/S先行調査が実施され、更に平成22年度には、洋上風力発電システム実証研究が開始された。

現在のこのような状況に先駆け、東京大学、東京電力および鹿島建設による共同研究として、6年前から福島県の東沖合約40kmの太平洋上にある磐城沖天然ガス田プラットフォームを利用して、十分に高い高度での風況を2年間にわたって連続観測し、洋上の風況特性を実測によって確認した<sup>1)</sup>。さらに、その結果を基にした新しい標準乱流モデルの提案を行った<sup>2)</sup>。以下では、観測結果および標準乱流モデルについて、その概要を紹介する。

### 2. 洋上風況の観測方法

洋上の風況観測は、福島県楢葉町の東沖合約40kmの太平洋上にある天然ガス田プラットフォームで実施した。観測位置を図1に示す。また、ガス田プラットフォームと風向風速計の写真を図2に示す。掘削やぐらの最頂部に、風向風速計を設置している。風向風速計の海面からの高さは94mである。

観測場所が天然ガス田プラットフォームであることから、風向風速計には、光ファイバーによる信号伝達方式による防爆型を採用した。観測システムの仕様を表1に示す。

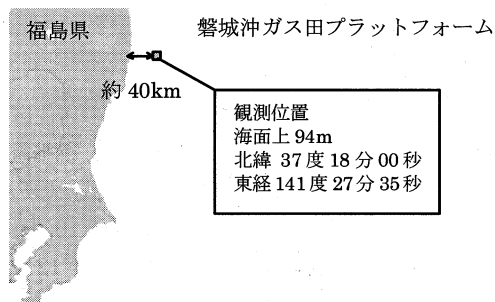


図1 洋上風況観測の位置

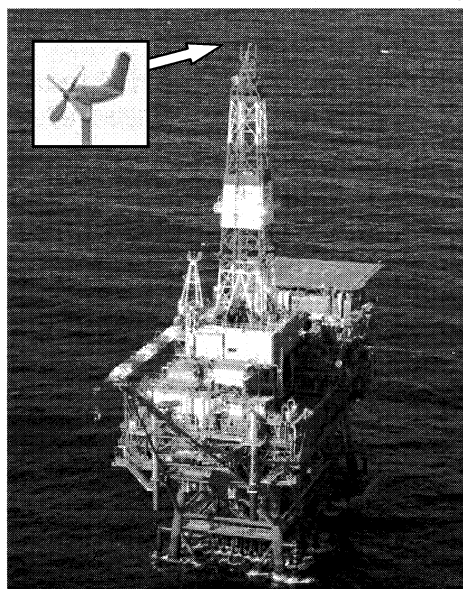


図2 ガス田プラットフォームと風向風速計

\*1 鹿島建設株式会社 環境本部 次長

Deputy General Manager, Environmental Engineering Division, Kajima Corporation

\*2 東京大学大学院 工学研究科 社会基盤学専攻 教授

Professor, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo

\*3 東京電力株式会社 技術開発研究所 洋上風力発電技術グループ マネージャー

Manager, Offshore Wind Power Generation Technology Group, Research & Development Center, Tokyo Electric Power Company

表1 洋上風況観測システムの仕様

風向風速計	メーカー	小笠原計器製作所
	形式	風車型風向風速計 WS-7671
	検出方式	7心光ファイバー方式
	風向	16 方位方式
	風速	0~60 m/s
ロガーA	メーカー	NRG Systems
	形式	SYMPHONIE / 2000-J
	測定間隔	2 秒
	取得データ	10 分間平均風速, 10 分間平均風向
		10 分間最大風速, 10 分間最小風速
10 分間風速標準偏差		
観測期間	2004 年 9 月~2006 年 9 月	
ロガーB	メーカー	omron
	形式	ZR-MDR10
	測定間隔	1 秒
	取得データ	風速及び風向の時刻歴データ
	観測期間	2005 年 12 月~2006 年 9 月

観測データは、天然ガス田プラットフォームの居住区画に設置したデータロガーに記録し、毎日 1 回、携帯電話回線を用いて 10 分間統計値を自動送信した(ロガー-A)。サンプリング間隔は 2 秒、観測期間は 2004 年 10 月から 2006 年 9 月までの 2 年間である。また、2005 年 12 月から 2006 年 9 月までは、1 秒サンプリング時刻歴データの取得(ロガー-B)も同時に行った。

### 3. 洋上風況の観測結果

観測データの一例として、2005 年 1 月の 1 ヶ月間における 10 分間平均風速、乱れ強さ、平均風向の推移を図 3 に、2004 年 10 月~2005 年 9 月までの月平均風速と風力エネルギー密度の変化を図 4 に示す。また図 5 には、年間の風向出現頻度、年間の風向別平均風力エネルギー密度、寒候期および暖候期の風向頻度分布を示す。

#### 3.1 平均風速

2 年間の観測期間中における平均風速は 7.4m/s であった。大型風車のハブ高さ 70m~80m に換算(べき指数  $\alpha=0.1$ )した場合の平均風速は、7.2m/s~7.3m/s が見込まれる。一般的に陸上における風力発電の適地条件としては、風車のハブ高さにおける年平均風速 6m/s 以上が目安とされている<sup>3)</sup>。風力エネルギーは、風速の 3 乗に比例するため、本観測地点の風力エネルギーは陸上における適地条件の目安の 1.7 倍~1.8 倍の風力エネルギーが存在することになる。月平均風速は、冬季から春季に高く、夏季から秋季に低い傾向を示しており、1 月が最も高く 8.5m/s、7 月が最も低く 5.4m/s であった。

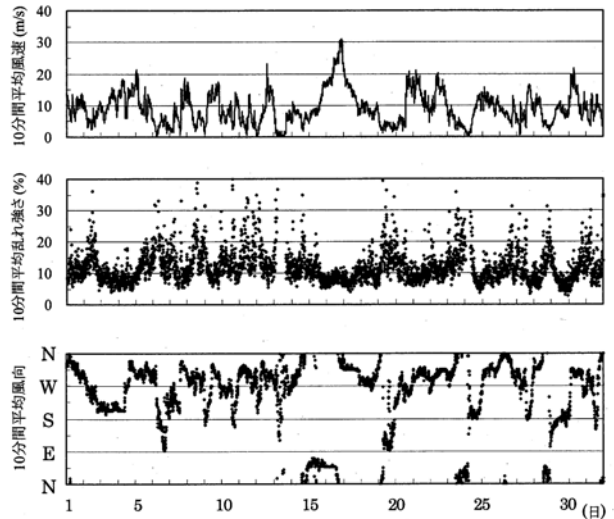


図3 時刻歴波形の一例(2005年1月)

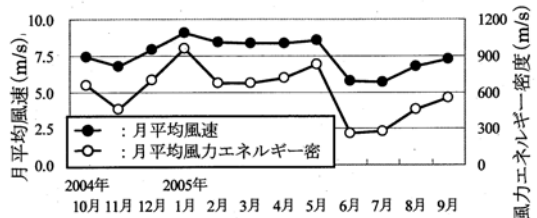


図4 月平均風速と風力エネルギー密度

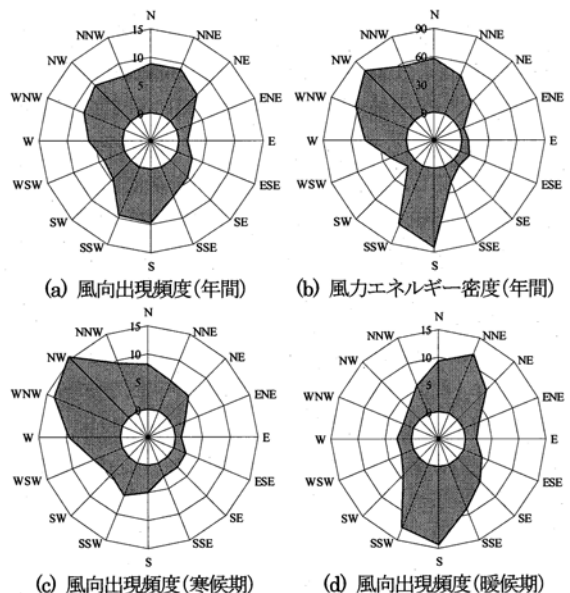


図5 風向出現頻度分布と風力エネルギー密度分布

#### 3.2 風力エネルギー密度

2 年間の観測期間中における風力エネルギー密度は 562W/m<sup>2</sup> であった。また、月別風力エネルギー密度の

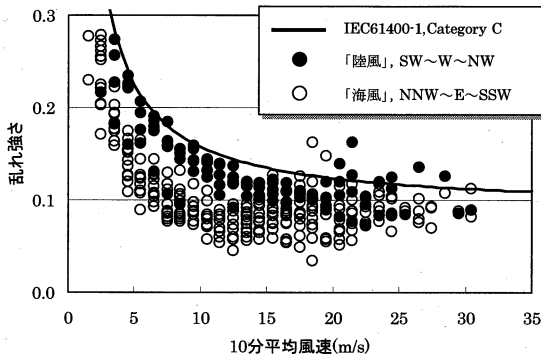


図6 乱れ強さ(非超過確率90%値)

最大値は1月の957W/m<sup>2</sup>であり、最小値は6月の258W/m<sup>2</sup>であった。

### 3.3 風向出現頻度

年間の最多出現風向は南(S)風の9.7%であった。ただし、北西(NW)風から北北東(NNE)の出現頻度も7.5%~9.2%観測されており、概ね南北方向の出現頻度が高いと言えるが、定まった卓越風向は見出し難い。寒候期(10月~3月)と暖候期(4月~9月)における風向出現頻度を、図5(c)と(d)に示す。これらにおいては、寒候期には北西(NW)寄り風が多く出現しており、暖候期には、南北方向の風の出現頻度が高いことがわかる。

### 3.4 乱れ強さ

乱れ強さの年平均値は、10.5%であった。

風力発電システムの国際規格 IEC61400-1<sup>(4)</sup> (以下 IEC) では、風力発電システムの安全性能を確認するための種々の風速・風向特性が規定されている。この中で、乱れ強さについては、乱れ強さの大きい地域に適用される Category-A、洋上を含む乱れ強さの小さい地域に適用される Category-C およびその中間の Category-B の3つに分類される。本観測値と乱れ強さの小さい Category-C との比較を図6に示す。図6は、観測で得られた風向別風速階級別の乱れ強さの頻度分布を、対数正規分布に近似し、その非超過確率90%の乱れ強さを示したものである。また観測値は、南西~西~北西の風向「陸風」とその他の風向「海風」に分類した。

図6より、観測で得られた乱れ強さは、陸風、海風とも、概ね IEC 規格の Category-C を下回っていることがわかる。また、海風は陸風と比較して、乱れ強さが更に小さい特性を示している。なお、平均風速が20m/s以上の高風速域において、一部に IEC 規格の Category-C を上回る乱れ強さが見られるが、これは、風の乱れそのものではなく、平均化時間内における風速の変化(単純増加ある

いは単純減少など)によるものであると推察される。

以上のことから、観測地点における乱れ強さは、IEC規格が対象としている洋上の風況特性を十分に下回っており、乱れ強さの観点から風車にとって耐久性への悪影響が少ない良好な環境であることを示している。

## 4. 標準乱流モデルの提案

### 4.1 IECの標準乱流モデル

IECにおける標準乱流モデルをより詳細に調べるため、ここでは、谷垣ら<sup>(5)</sup>の研究に従い、変動風速の標準偏差 $\sigma_1$ の平均値および標準偏差を次式により表す。

$$\sigma_{ave} = I_{ref}(aU + b) \quad (1)$$

$$\sigma_{\sigma} = I_{ref}(\alpha U + \beta) \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{ave}$  は風方向の風速成分の標準偏差 $\sigma_1$ の平均値、 $\sigma_{\sigma}$  は標準偏差 $\sigma_1$ の標準偏差である。また、 $U$  は10分間平均風速、 $I_{ref}$  は平均風速15m/sにおける乱流強度の期待値、 $a, b$  および  $\alpha, \beta$  は、 $\sigma_1$ の平均値およびその標準偏差を表わすモデルのパラメータである。

IECでは、 $I_{ref}$ は風車設置場所の乱流強度の大きさに応じて変化する値であるが、モデルパラメータ $a$ と $b$ および $\alpha$ と $\beta$ の値は一定値として、それぞれ0.75と3.8および0と1.4と定められている。これらのパラメータの値が洋上風に適用できるかどうかは不明である。

本観測結果を基に、風車の発電風速に対応する3~25m/sの範囲において、風速1.0m/s毎(1つのビンと呼ぶ)に風向別風速階級別の変動風速標準偏差 $\sigma_1$ の平均値 $\sigma_{ave}$ と標準偏差 $\sigma_{\sigma}$ を求めた。高風速域においては、一つのビン内のデータ個数が30個未満の場合は解析の対象からはずした。観測地点における乱流強度は風向によって変化するため、式(1)と式(2)に示すモデルパラメータを同定する際には、 $I_{ref}$ がほぼ一定となるように、図7に示す16方位における乱流強度 $I_{ref}$ を、ここでは3つの区分に分けた。風向WDIは日本列島から吹く風であり、

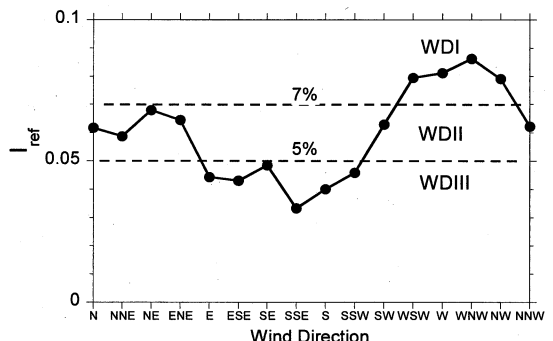


図7 乱流強度 $I_{ref}$ の風向変化

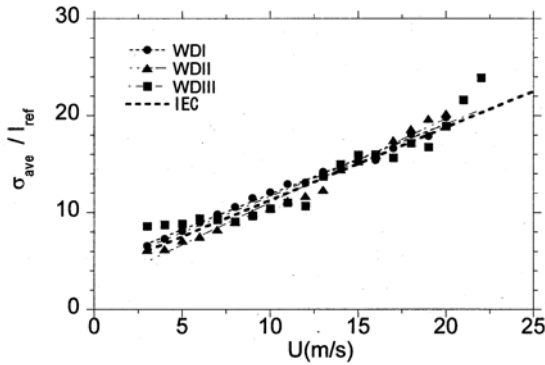


図8  $\sigma_{ave}/I_{ref}$  の風速変化

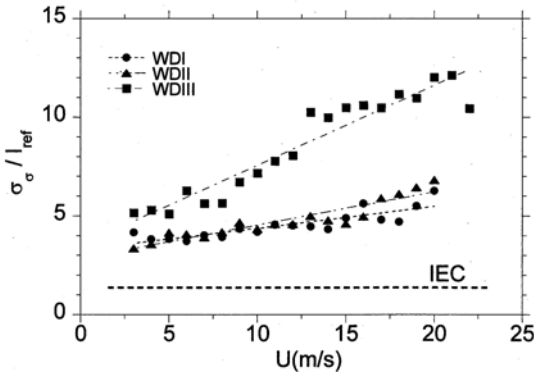


図9  $\sigma_{\sigma}/I_{ref}$  の風速変化

WDIIIは太平洋から吹く風である。日本列島から吹く風の $I_{ref}$ は太平洋から吹く風の $I_{ref}$ より大きくなっている。また $I_{ref}$ は、3.4節にも示すとおり、全ての風向においてIECのCategory-Cの乱流強度12%を下回る。

本研究では、同定したモデルパラメータの精度を検証するために、標準偏差 $\sigma_1$ の90%タイル値 $\sigma_{90}$ は正規分布であると仮定し、次式により表した。

$$\sigma_{90} = \sigma_{ave} + 1.28 \times \sigma_{\sigma} \quad (3)$$

また乱流強度の90%タイル値 $I_{90}$ は式(1)、式(2)、式(3)を用いて導出した次式により求めた。

$$I_{90} = \sigma_{90}/U = I_{ref} (a + 1.28\alpha + (b + 1.28\beta)/U) \quad (4)$$

## 4.2 標準乱流モデルのパラメータの同定

### 4.2.1 標準偏差 $\sigma_1$ の平均値に関するパラメータの同定

図8には各乱流強度区分の $I_{ref}$ で基準化した $\sigma_{ave}$ と風速との関係を示した。 $\sigma_{ave}/I_{ref}$ は風速とともに増大する。各乱流強度区分によるばらつきは小さく、IECのモデルパラメータを用いて算出した値と同様な傾向を示す。パラメータ $a$ と $b$ は、 $\sigma_{ave}/I_{ref}$ と風速データをもとに最小二乗法により近似直線の勾配と切片から同定した。パラメータ $a$ は、0.73~0.87の範囲にあり、その平均値は0.78であ

り、IECの標準乱流モデルにあるパラメータ0.75との差は4%である。また、パラメータ $b$ は、2.3~4.6の範囲にあり、その平均値は3.7、IECの標準乱流モデルにあるパラメータ3.8との差は2.6%である。

### 4.2.2 標準偏差 $\sigma_1$ の標準偏差に関するパラメータの同定

図9には、各乱流強度区分の $I_{ref}$ で基準化した $\sigma_{\sigma}$ と風速との関係を示す。 $\sigma_{\sigma}/I_{ref}$ は風速とともに増大し、乱流強度 $I_{ref}$ によって勾配が大きく異なる。パラメータ $\alpha$ と $\beta$ は、 $\sigma_{\sigma}/I_{ref}$ と風速データをもとに最小二乗法により近似直線の勾配と切片から同定した。パラメータ $\alpha$ は0.1~0.4、 $\beta$ は2.8~3.5の範囲にある。図9から、観測から得られた $\sigma_{\sigma}/I_{ref}$ は、IECの標準乱流モデルにより求めた値よりかなり大きいことが分かる。このような差は陸上においても確認されている<sup>5)</sup>。

## 4.3 IECの標準乱流モデルにおけるパラメータの提案

4.2節から分かるように、パラメータ $\alpha$ と $\beta$ の観測値はIECに示されている値と大きく異なる。ここではパラメータ $\alpha$ と $\beta$ に関する評価式を提案するとともに、観測データと比較することにより、その予測精度を検証する。また標準偏差モデルにおけるパラメータを乱流強度 $I_{ref}$ の関数としてモデル化することにより、洋上と陸上の両方に適用することを可能にする。

### 4.3.1 平均値 $\sigma_{ave}$ のモデルパラメータの提案

図10には観測データから同定されたパラメータ $a$ と $b$ の $I_{ref}$ による変化を示す。パラメータ $a$ の値が大きくなるとパラメータ $b$ の値が小さくなる。実際 $\sigma_{ave}$ の値はパラメータ $a$ と $b$ の両方に依存するため、 $\sigma_{ave}$ の予測値と観測値と比較することにより、パラメータ $a$ と $b$ の妥当性を判断すべきである。

図11には、 $\sigma_{ave}$ の予測値と観測値との比較を示し、 $\sigma_{ave}$ の予測値の算定にはIECの標準乱流モデルのパラメータ $a=0.75$ と $b=3.8$ を用いた。図11から、IECのモデルパラメータを用いて求められた予測値は観測値とよく一致しており、IECの標準乱流モデルのパラメータは妥当であることが分かる。なお、式(1)から $b=15(1-a)$ が導出され、 $a$ の値が決まれば、 $b$ の値が一義的に決まるので、本提案では $b=3.75$ とした。

### 4.3.2 標準偏差 $\sigma_{\sigma}$ のモデルパラメータの提案

図12には、観測データから同定されたパラメータ $\alpha$ と $\beta$ の $I_{ref}$ による変化を示す。図中の破線は本研究で提案したパラメータ $\alpha$ と $\beta$ に関する評価式を表わし、 $I_{ref}$ の関数として、次式のように表す。

$$\alpha = -0.11 \tan^{-1}(150I_{ref} - 8) + 0.27 \quad (5)$$

$$\beta = -0.42 \tan^{-1}(100I_{ref} - 10) + 2.60 \quad (6)$$

ここで、タンジェントの単位はラジアンである。

図12(a)から分かるように、提案式により求めたパラメータ  $\alpha$  は、 $I_{ref}$  の減少に伴い 0.43 に漸近し、 $I_{ref}$  の増加とともに 0.10 に漸近する。図中の実線は谷垣ら<sup>5)</sup>が陸上の風況観測データから求めた値 ( $\alpha = 0.12$ ) を示す。また図12(b)から、提案式により求めたパラメータ  $\beta$  は、 $I_{ref}$  の減少に伴い 3.2 に漸近し、 $I_{ref}$  の増加とともに 1.94 に漸近

することが分かる。同様に図中の実線は谷垣ら<sup>5)</sup>が陸上の風況観測データから求めた値 ( $\beta = 1.95$ ) を示す。

図13には、本研究で提案したパラメータとIECの標準乱流モデルのパラメータを用いて求められた  $\sigma_\sigma$  予測値と観測値との比較を示す。

IECの標準乱流モデルのパラメータを用いて求めた値は観測に比べかなり過小評価されるが、本研究で提案したパラメータを用いて求めた値は観測値とよく一致する。図13から、IECの標準乱流モデルにおける  $\sigma_\sigma$  の評価式のパラメータは適切ではないことが分かる。

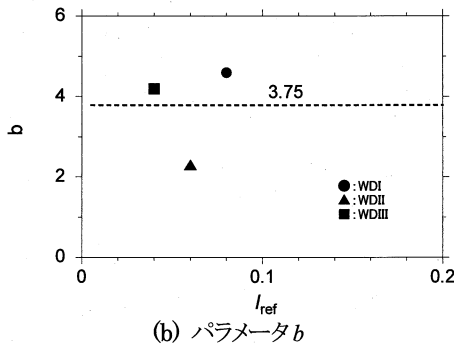
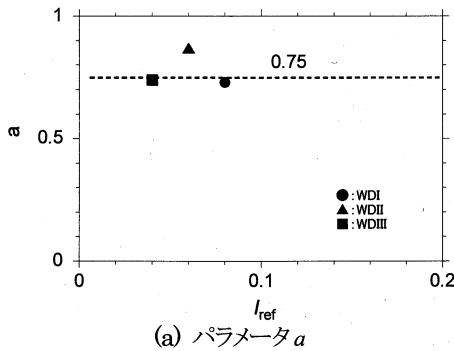


図10 乱流強度  $I_{ref}$  とパラメータ  $a, b$

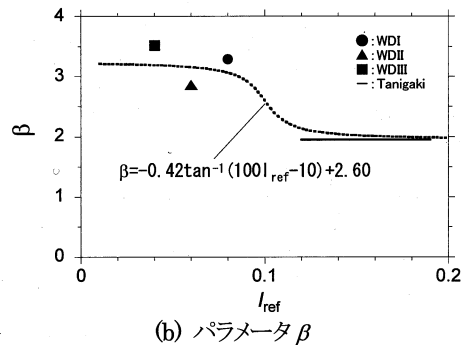
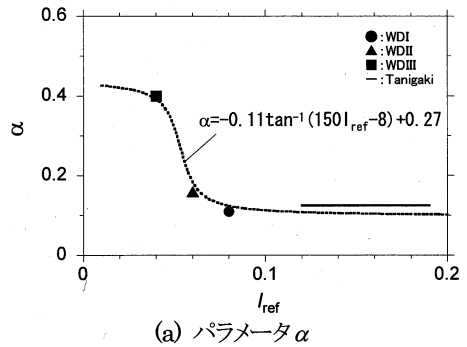


図12 乱流強度  $I_{ref}$  とパラメータ  $\alpha, \beta$

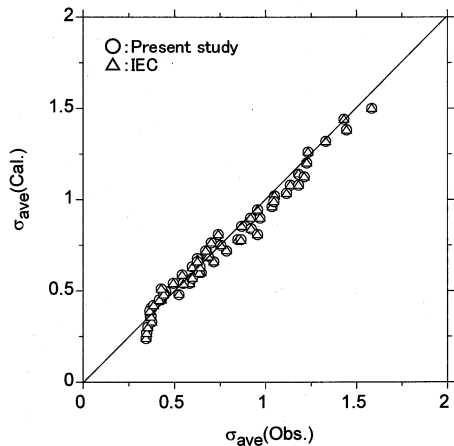


図11  $\sigma_{ave}$  の観測と解析の比較

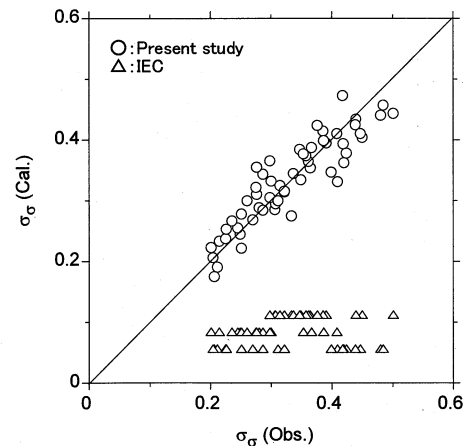


図13  $\sigma_\sigma$  の観測と解析の比較

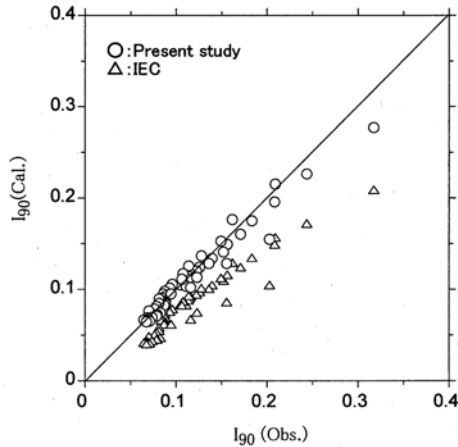


図 14 乱流強度  $I_{90}$  の観測と解析の比較

#### 4.3.3 モデルパラメータの精度評価

モデルパラメータ  $a$  と  $b$  および  $\alpha$  と  $\beta$  が乱流強度  $I_{90}$  の予測精度に与える影響を評価するために、観測から得られた全ての乱流強度  $I_{90}$  のデータと式(4)により予測された乱流強度  $I_{90}$  との比較を、図 14 に示す。パラメータ  $a$  と  $b$  および  $\alpha$  と  $\beta$  は表 2 に示す値を用い、 $I_{ref}$  は各乱流強度区分における値を用いた。本研究で提案したパラメータにより求めた  $I_{90}$  は観測値とよく一致するが、IEC の標準乱流モデルのパラメータを用いて求めた  $I_{90}$  は、観測値に比べて過小評価されていることが分かる。

予測精度を評価するために、ここでは予測誤差の自乗和の平方根 *RMSE* (Root Mean Square Error) と決定係数  $R^2$  (Coefficient of determination) を用いた。 $I_{90}$  の *RMSE* は、IEC の標準乱流モデルの 32.8% から、本提案式の 9.9% に大きく減少した(表 3)。また決定係数  $R^2$  は、IEC の標準乱流モデルの 0.41 から、本提案式の 0.95 に大きく増大した。

#### 5. まとめ

日本近海における洋上風況観測を行い洋上における風の特徴を調べるとともに、IEC の標準乱流モデルと比較することにより、以下の結論を得た。

- (1) 観測地点における年平均風速は 7.4m/s、年平均風力エネルギー密度は 562W/m<sup>2</sup>、年平均乱れ強さは 10.5% であり、風力発電の適地条件として良好な風況であることを確認した。
- (2) 洋上風況観測データから同定された変動風速の標準偏差の平均値に関するパラメータの値は、IEC の標準乱流モデルに用いられているパラメータの値と

表 2 提案パラメータと IEC モデルパラメータ

	本研究	IEC
$a$	0.75	0.75
$b$	3.75	3.8
$\alpha$	$-0.11 \tan^{-1}(150I_{ref} - 8) + 0.27$	0
$\beta$	$-0.42 \tan^{-1}(100I_{ref} - 10) + 2.60$	1.4

表 3 誤差評価

		本研究	IEC
$\sigma_{ave}$	<i>RMSE</i>	7.3%	7.1%
	$R^2$	0.97	0.97
$\sigma_{\sigma}$	<i>RMSE</i>	10.2%	78.8%
	$R^2$	0.82	-9.6
$I_{90}$	<i>RMSE</i>	9.9%	32.8%
	$R^2$	0.95	0.41

ほぼ一致したが、変動風速標準偏差の標準偏差に関するパラメータの値は IEC の標準乱流モデルのパラメータの値を大きく上回ることが分かった。

- (3) IEC の標準乱流モデルのパラメータを用いて求めた標準偏差の平均値は観測値とよく一致するが、変動風速標準偏差の標準偏差は、観測値に比べ過小評価されることが分かった。一方、ここで提案した標準偏差モデルにおけるパラメータの評価式を用いて求めた変動風速標準偏差の標準偏差は、観測値とよく一致した。

#### 参考文献

- 1) 土谷学, 石原孟, 福本幸成, 助川博之, 大窪一正: 洋上風力発電導入に向けた洋上風況観測, 第 19 回風工学シンポジウム論文集, pp.121-126, 2006.
- 2) 石原孟, 山口敦, 老川進, ムハマド ワヒード サーワー: 洋上風況観測に基づく新しい標準乱流モデルの提案, 第 32 回風力エネルギー利用シンポジウム論文集, 2010.11.
- 3) (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO): 風力発電導入ガイドブック(改訂第 9 版), 2008.
- 4) IEC 61400-1: Wind turbines - Part 1 Design requirements, Ed.3, 2005.
- 5) 谷垣三之介, 小垣哲也, 松宮輝, 今村博: 我国風況の乱流特性と IEC61400-1 Ed.3 の標準乱流モデル-第 1 報-, 第 31 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.161-164, 2009.