

## IEC61400-1 の標準乱流モデルに関する研究

### A Study of the Normal Turbulence Model in IEC61400-1

石原 孟<sup>\*1</sup>      山口 敦<sup>\*2</sup>      老川 進<sup>\*3</sup>      ムハマド ワヒード サーワー<sup>\*3</sup>

Takeshi ISHIHARA    Atsushi YAMAGUCHI    Susumu OIKAWA    Muhammad Waheed SARWAR

<sup>\*1</sup>Professor, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo Tokyo, 113-8656 Japan Fax:+81-3-5841-1147, E-mail: ishihara@bridge.tu-tokyo.ac.jp

<sup>\*2</sup>Research Associate, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo

<sup>\*3</sup>Research Fellow, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo

#### Abstract

This study examines the suitability of Normal Turbulence Model (NTM) in IEC61400-1 for offshore conditions using wind records obtained in Japanese waters. The model parameters for estimation of the standard deviation of along-wind fluctuating velocity,  $\sigma_1$ , in NTM are presented. The identified model parameters for the averaged value of  $\sigma_1$  agreed well with those of IEC Normal Turbulence Model, but the parameters for the standard deviation of  $\sigma_1$  were found larger than those in IEC. As a result, IEC Normal Turbulence Model parameters led to rather small standard deviation of  $\sigma_1$  compared to the observation data. However, predicted standard deviation of  $\sigma_1$  based on the proposed model parameters shows a good agreement with the observed one.

**キーワード:** IEC61400-1, 標準乱流モデル, モデルパラメータ, 乱流強度

**Key Words:** IEC61400-1, Normal Turbulence Model, Model parameters, Turbulence intensity

#### 1. はじめに

風の乱れは、風力発電設備に作用する疲労荷重に大きな影響を与えるため、変動風速の標準偏差に関するモデルが重要である。一般に洋上風の乱流強度は、陸上のそれに比べ小さいが、風向によって大きく変化することが報告されている<sup>1)</sup>。また、洋上風の乱流強度は海岸線からの距離によっても変化し、洋上に適用できる変動風速標準偏差のモデルが必要である。

国際基準 IEC61400-1 の第3版<sup>2)</sup> (以下 IEC と呼ぶ) では、標準乱流モデルが提示されている。谷垣ら<sup>3)</sup> は、日本における陸上の風況観測データを対象に IEC の標準乱流モデルのパラメータを調べ、IEC の標準乱流モデルに用いられているパラメータは日本における風況観測データから同定された値と一致しないことを報告した。特に、変動風速標準偏差の標準偏差に関するモデルパラメータの値は、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を示した。これまでに IEC の標準乱流モデルに関する研究が少なく、また洋上風況観測データを用いて IEC の標準乱流モデルの適用可能性を調べた研究例がほとんどない。従って、IEC の標準乱流モデルの洋上風への適用可能性を明らかにするとともに、洋上に適用できるモデルパラメータの提案が必要である。

本研究では、まず日本近海における洋上風況観測データを用いて洋上風の標準偏差の特性を調べるとともに、IEC の標準乱流モデルの問題点を明らかにする。そして洋上風況観測データを用いて同定されたモデルパラメータを基に、洋上に適用できるモデルパラメータを提案する。最後に洋上風況観測から得られた乱流強度の比較により、本研究で提案したモデルパラメータの推定精度を検証する。

#### 2. 洋上風況観測

##### 2.1 洋上風況観測の概要

本研究では、福島県楡葉町の沖合 37km の磐城沖ガス田における天然ガス掘削用櫓の頂部に設置した風向・風速計により測定された洋上風況観測データ<sup>4)</sup> を用いた。観測地点の東側から南側の方向は太平洋に面している。また北西側から南西側は日本列島に面しており、西側 40km～90km の位置には標高 1000m 程度の高地がそびえている。図 1 に観測地点の位置(北緯 37° 18'00", 東経 141° 27'35")を示し、図 2 に風況観測の状況を示す。風向・風速計は海面から 95m の高さに設置し、また安全のためにその周囲に 4 本の避雷針を設けた。避雷針と風速計の水平距離(最短)は 1832mm、避雷針の直径は 61mm であり、避雷針から風速計までの距離と避雷針直径との比は 30 である。JIS C 1400-12-1<sup>4)</sup>(発電用風車の性能試験方法)に記載されている支持物直径の 8.2 倍以上離れるという要件を十分に満たしているため、避雷針の風速計への影響はないと思われる。

\*1 東京大学大学院工学系研究科教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1) E-mail: ishihara@bridge.tu-tokyo.ac.jp

\*2 東京大学大学院工学系研究科特任助教

\*3 東京大学大学院工学系研究科特任研究員  
(原稿受付: 2010 年 8 月 20 日)

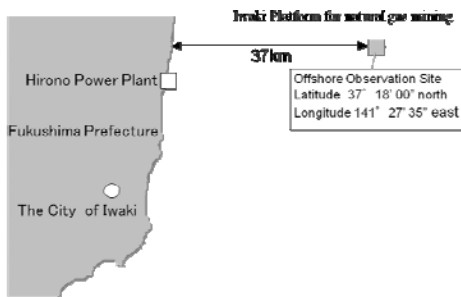


Fig. 1 Offshore observation site



(a) A drilling derrick (b) Propeller-vane anemometer

Fig. 2 View of offshore observation system

Table 1 Details of offshore observation system

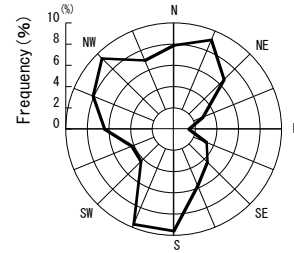
Anemometer	Manufacturer	Ogasawara Keiki Seisakusho Co., LTD
	Type	Propeller-vane anemometer
	Detection method	7-optical fibers type
	Wind direction	16 directions
	Wind speed	0~60m/s
Logger	Manufacturer	NRG System
	Type	SYMPHONIE/2000-J
	Sampling interval	2 seconds
	Observed data	10-minutes average wind speed and wind direction 10-minutes wind speed standard deviation
	Observation period	Oct. 2004~Sept. 2006

表1には洋上観測システムの仕様を示す。天然ガス掘削施設上では、防爆型機器の使用が義務付けられているため、風向やプロペラの回転数を光ファイバーで検出する風車型風向風速計を採用した。観測データは、現地に設置したデータロガーに記録し、毎日1回統計データを陸上に送信した。観測期間は、2004年10月から2006年9月までの2年間であり、本研究では、2004年12月から2005年11月までの1年間(観測期間Iと呼ぶ)の10分間平均風速とその標準偏差並びに10分間平均風向のデータを使用した。また、検証用データとして残りの12カ月(観測期間IIと呼ぶ)のデータを用いた。

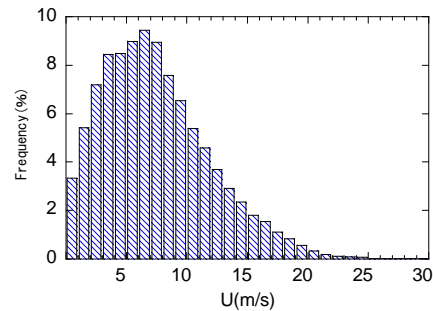
## 2.2 洋上風況観測の結果

図3には観測期間Iの1年間に観測された平均風速から

求めた風配図および風速階級別出現頻度を示す。同期間における全データに対する観測期間の有効データ数は96.9%である。観測地点の主風向は冬の北西方向と春から秋にかけての南北方向となっており、東風はほとんど観測されない。風速階級別の出現頻度については、10m/sを超える風速が32%と頻繁に観測されており、平均風速が高いことが分かる。



(a) Wind rose



(b) Frequency distribution of wind speed

Fig. 3 Characteristics of offshore wind conditions

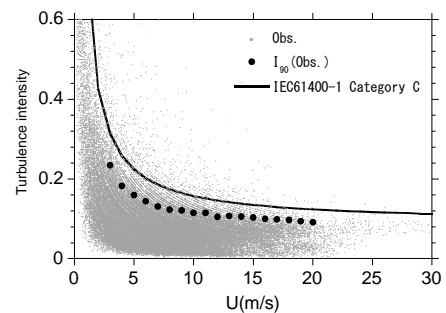


Fig. 4 Variation of turbulence intensity with wind speed

図4には観測期間Iにおける風速階級別乱流強度を示す。この図には、次節に示す式(4)により表わされる風速階級ごとの乱流強度の非超過確率90%の値と乱流強度の小さい地域に適用される国際基準IECのカテゴリーCの乱流強度をそれぞれ大きい黒丸と実線で示した。国際基準IECの標準乱流モデルにおけるパラメータ $I_{ref}$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ の値は、それぞれ0.12、0.75、3.8、0、1.4である。図4から、国際基準IECのカテゴリーCの乱流強度は、本観測地点で得られた乱流強度をカバーできることが分かる。

### 2.3 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、本研究では、谷垣ら<sup>3)</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 の時における乱流強度の期待値、 $a, b$  および  $\alpha, \beta$  はそれぞれ  $\sigma_1$  の平均値およびその標準偏差を表すモデルのパラメータを表す。

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は洋上風に適用できるかどうかは不明である。

本研究では、風車のカットインとカットアウトの風速に対応する 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 100 個未満の場合は解析の対象からはずした。

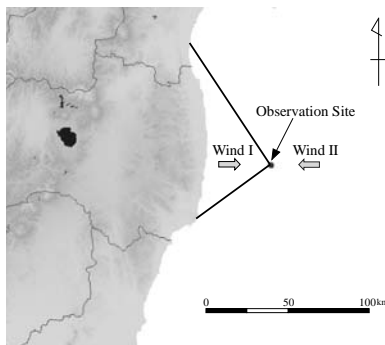


Fig. 5 Classification of wind direction.

観測地点における乱流強度は陸地の影響を受け風向によって変化するため<sup>1)</sup>、式(1)と式(2)に示すモデルパラメータを同定する際には、表 2 に示す 2つの風向区分に分けた。図 5 に示すように、風向区分 WDI は、観測点の南西(陸まで 60km)から北西(陸まで 90km)の陸地の影響を受ける風を対象とし、風向区分 WDII は海から吹く風を対象とした。

Table 2 Relationship between classified turbulence intensity and the wind direction

	Wind Direction
WDI	WSW, W, WNW, NW
WDII	N, NNE, NE, ENE, SW, NNW, E, ESE, SE, SSE, S, SSW

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  $\sigma_{90}$  は正規分布を仮定し次式により表わした。

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

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。

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

### 3. 標準乱流モデルのパラメータの同定

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

図 6 には観測期間 I における各風向区分の  $I_{ref}$  で基準化した  $\sigma_{ave} / I_{ref}$  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。各風向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。

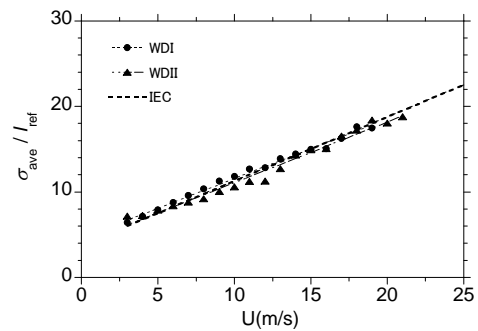


Fig. 6 Variation of  $\sigma_{ave} / I_{ref}$  with wind speed

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。表 3 には同定したパラメータの一覧を示す。ここで用いた  $I_{ref}$  は、各風向区分内の全データから求めた風速 15m/s の時の乱流強度である。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。パラメータ  $a$  は、0.69~0.71 の範囲にあり、その平均値は 0.70 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 5.6% である。また、パラメータ  $b$  は、4.0~4.6 の範囲にあり、その平均値は 4.3 であり、IEC の標準乱流モデルにあるパラメータ 3.8 との差は 13.2% である。

Table 3 Identified parameters for  $\sigma_{ave}$  and  $\sigma_{\sigma}$

	$I_{ref}$	$a$	$b$	$\alpha$	$\beta$
WDI	0.08	0.69	4.6	0.09	3.37
WDII	0.05	0.71	4.0	0.35	2.71

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

図 7 には、観測期間 I における各風向区分の  $I_{ref}$  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、表3に示した。パラメータ $\alpha$ は0.09~0.35、 $\beta$ は2.71~3.37の範囲にある。図7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>3)</sup>。

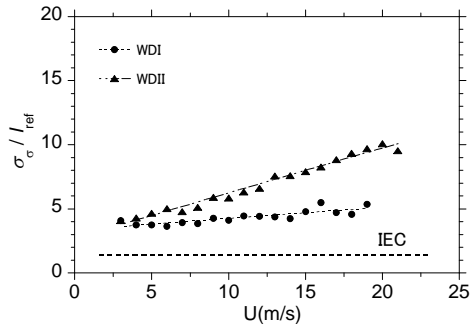


Fig. 7 Variation of  $\sigma_\sigma / I_{ref}$  with wind speed

### 3.3 モデルパラメータの感度分析

モデルパラメータ $a$ と $b$ および $\alpha$ と $\beta$ が乱流強度 $I_{90}$ の推定精度に与える影響を調べるために、風向WDIIを例に、観測から得られた乱流強度 $I_{90}$ と式(4)により推定された乱流強度 $I_{90}$ との比較を図8に示す。ここで、乱流強度 $I_{90}$ の推定値は観測から得たパラメータの値とIECの標準乱流モデルのパラメータを用いて算出した。図中のObs.は観測値のパラメータ、modelはIECの標準乱流モデルのパラメータを示す。パラメータ $a$ と $b$ の観測値は0.71と4.0、IECの標準乱流モデルのパラメータは0.75と3.8を用いた。また $\alpha$ と $\beta$ の観測値は0.35と2.71、IECの標準乱流モデルのパラメータは0と0.14を用いた。 $I_{ref}$ はすべてのケースについて表3に示す観測値を用いた。

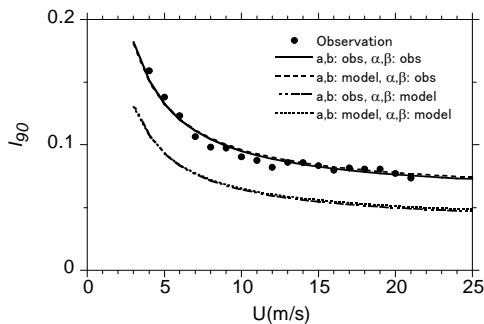


Fig. 8 Dependence of  $I_{90}$  on model parameters

図8から分かるように、パラメータ $a$ と $b$ は観測から得られた値を用いても、IECの標準乱流モデルのパラメータを用いても、求められた乱流強度 $I_{90}$ には大きな差がない。

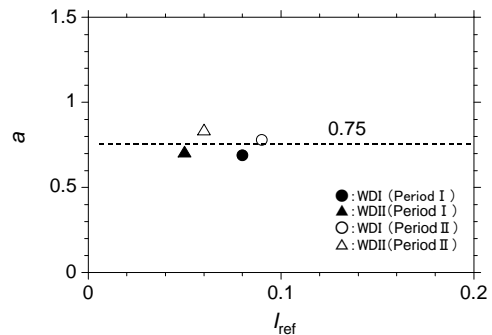
一方、パラメータ $\alpha$ と $\beta$ は、観測から得られた値を用いて求めた $I_{90}$ は観測値とよく一致するが、IECの標準乱流モデルのパラメータを用いて求めた $I_{90}$ は観測値に比べ過小評価されている。このことから、IECの標準乱流モデルの推定精度を高めるためには、パラメータ $\alpha$ と $\beta$ の値を再検討する必要があることが分かる。

## 4. IECの標準乱流モデルにおけるパラメータの提案

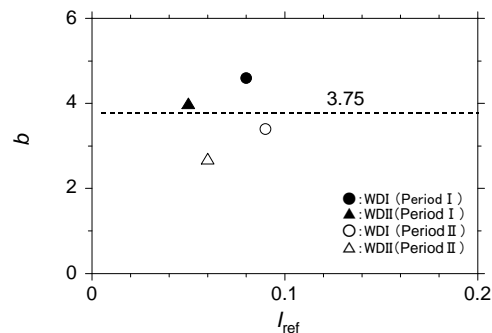
第3章から分かるように、パラメータ $\alpha$ と $\beta$ の観測値はIECに示されている値と大きく異なる。その結果、IECの標準乱流モデルのパラメータを用いて求められた変動風速標準偏差の標準偏差は、観測値に比べ過小評価されることが分かった。本章ではパラメータ $\alpha$ と $\beta$ に関して洋上に適用できる評価式を提案するとともに、観測データと比較することにより、その推定精度を検証する。

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

図9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。図中には観測期間IIのデータから同定されたパラメータを併せて示した。



(a) Parameter  $a$



(b) Parameter  $b$

Fig. 9 Variation of parameters  $a$  and  $b$  with turbulence intensity  $I_{ref}$

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、 $\sigma_{ave}$  の推定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 10 には、 $\sigma_{ave}$  の推定値と観測値との比較を示し、 $\sigma_{ave}$  の推定値の算定には 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 10 から、IEC のモデルパラメータを用いて求められた推定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。

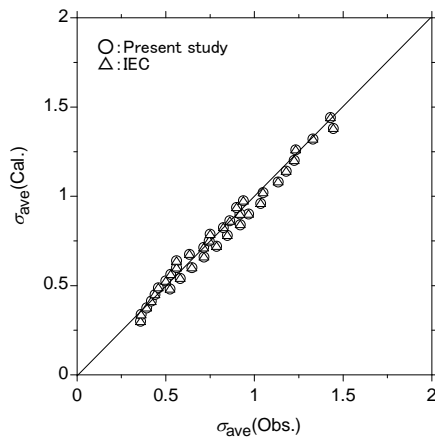


Fig. 10 Comparison of observed and calculated  $\sigma_{ave}$

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

図 11 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。図中には観測期間 II のデータから同定されたパラメータを併せて示した。

本研究で提案したパラメータ  $\alpha$  と  $\beta$  に関する評価式を次のように表し、図 11 に破線で示した。

$$\alpha = \begin{cases} 0.1, & \text{wind from the Japanese islands} \\ 0.3, & \text{wind from the Pacific Ocean} \end{cases} \quad (5)$$

$$\beta = \begin{cases} 3.0, & \text{wind from the Japanese islands} \\ 3.0, & \text{wind from the Pacific Ocean} \end{cases} \quad (6)$$

図 11(a)から、パラメータ  $\alpha$  は、海側から吹く風の時は 0.3 に近く、陸側から吹く風の時は 0.1 に近い。また、図 11(b)から、パラメータ  $\beta$  は、海側と陸側から吹く風とも 3.0 に近い値を示す。このように、洋上風のパラメータ  $\alpha$  と  $\beta$  の値は、海側と陸側ともに、IEC の標準乱流モデルに示すパラメータの値  $\alpha = 0$  と  $\beta = 1.4$  より大きい。谷垣ら<sup>3)</sup>は陸上の風況観測データに基づき、 $\alpha = 0.15$  と  $\beta = 2.0$  および  $\alpha = 0$  と  $\beta = 3.0$  の二つの組み合わせを提案した。本研究で提案したパラメータは谷垣らが提案したパラメータと同様な傾向を示す。

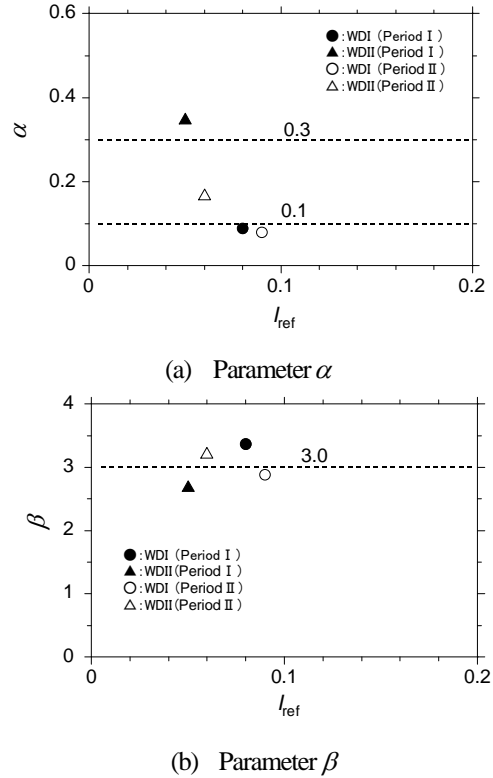


Fig. 11 Variation of parameters  $\alpha$  and  $\beta$  with turbulence intensity  $I_{ref}$

図 12 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  $\sigma_\sigma$  の推定値と観測値(観測期間 I)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 12 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。

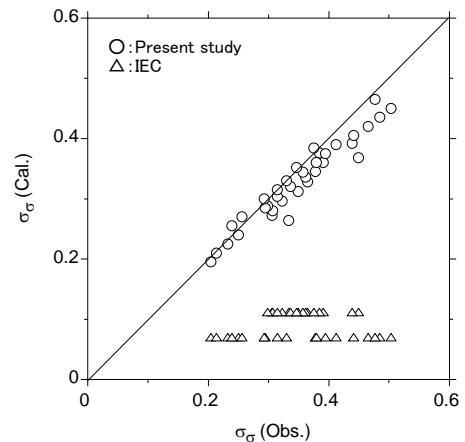


Fig. 12 Comparison of observed and calculated  $\sigma_\sigma$

#### 4.3 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

推定精度に与える影響を評価するために、観測期間 I から得られた全ての乱流強度  $I_{90}$  のデータと式(4)により推定された乱流強度  $I_{90}$  との比較を図 13 に示す。パラメータ  $a$  と  $b$  および  $\alpha$  と  $\beta$  は表 4 に示す値を用い、 $I_{ref}$  は各風向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。

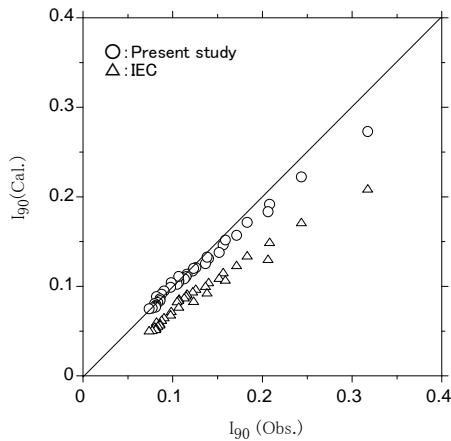


Fig. 13 Comparison of observed and calculated  $I_{90}$

Table 4 Proposed and IEC model parameters

	Present study		IEC
	Wind from the Japanese islands	Wind from the Pacific Ocean	
$a$	0.75		0.75
$b$	3.75		3.8
$\alpha$	0.1	0.3	0
$\beta$	3	3	1.4

推定精度を評価するために、本研究では次式に示す推定誤差の自乗和の平方根  $RMSE$  (Root Mean Square Error)を用いた。

$$RMSE = \sqrt{1/n \sum ((x_{cal} - x_{obs}) / X_{obs})^2} \quad (7)$$

ここで、 $x_{obs}$  と  $x_{cal}$  は、それぞれ観測値と推定値、 $X_{obs}$  は観測値の平均値を表わす。 $RMSE$  は0に近いほど、推定値と観測値との差が小さいことを表わす。

Table 5 Evaluation of prediction error

	Observation period	$RMSE$ by using parameters in the present study	$RMSE$ by using parameters in IEC model
$\sigma_{ave}$	I	5.4%	5.2%
	II	6.0%	6.0%
$\sigma_{\sigma}$	I	8.7%	77.6%
	II	22.8%	69.2%
$I_{90}$	I	8.9%	31.9%
	II	9.0%	22.2%

表5には $\sigma_{ave}$ 、 $\sigma_{\sigma}$ 、 $I_{90}$  の推定誤差の  $RMSE$  を示す。表

中には、観測期間 II の値も表した。 $\sigma_{\sigma}$  の推定誤差の  $RMSE$  は IEC の標準乱流モデルの 77.6%から本提案式の 8.7%に大きく減少した。その結果、 $I_{90}$  の  $RMSE$  も、IEC の標準乱流モデルの 31.9%から本提案式の 8.9%に大きく減少した。同様に、観測期間 II における  $\sigma_{\sigma}$  と  $I_{90}$  推定誤差の  $RMSE$  は本提案式を用いることにより大きく改善されていることが分かる。

## 5. まとめ

日本近海における洋上風況観測データを用いて洋上風の標準偏差の特性を調べるとともに、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) 国際基準 IEC のカテゴリーCを用いる場合には今回の洋上観測地点における乱流強度をカバーできる。
- 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、本研究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。

今後、NEDO の洋上風況観測実証研究のデータが得られれば、引き続きモデルの検証を行ってきたい。

## 謝辞

本研究では、国立大学法人東京大学、東京電力株式会社、鹿島建設株式会社の共同研究で取得した洋上風況観測データを用いた。また IEC 61400-1 の標準乱流モデルにおけるパラメータの提案は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務で得られた研究成果である。ここに関係者の皆様に感謝の意を表す。

## 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) IEC 61400-1: Wind turbines-Part 1 Design requirements, Ed.3、2005。
- 3) 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 ー第2報ー、第32回風力エネルギー利用シンポジウム、pp.127-130、2010。
- 4) JIS C 1400-12-1: 発電用風車の性能試験方法、2010。