

洋上風況観測に基づく新しい標準乱流モデルの提案

A New Normal Turbulence Model using offshore observation data

石原 孟**

山口 敦**

老川 進**

ムハマド ワヒード サーワー***

Takeshi ISHIHARA Atsushi YAMAGUCHI Susumu OIKAWA Muhammad Waheed SARWAR

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¹⁾。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、洋上と陸上の両方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²⁾ (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³⁾ 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、洋上と陸上の両方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、乱流強度 I_{ref} の影響を考慮した洋上と陸上の両方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予測精度を検証する。

2. 洋上風況観測

2.1 洋上風況観測の概要

本研究では、福島県楢葉町の沖合 37km の磐城沖ガス

田における天然ガス掘削用槽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¹⁾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。観測期間は、2004 年 10 月から 2006 年 9 月までの約 2 年間であり、本論文では、2004 年 12 月から 2005 年 11 月までの 1 年間に風車型風向風速計により計測した 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。

2.2 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³⁾の研究に従い、変動風速の標準偏差 σ_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、 σ_{ave} は風方向の風速成分の標準偏差 σ_1 の平均値、 σ_{σ} は標準偏差 σ_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 α, β はそれぞれ σ_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 α と β 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 σ_1 の平均値 σ_{ave} と標準偏差 σ_{σ} 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 1 に示す 16 方位における乱流強度 I_{ref} を 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、WDIII

*平成 22 年 11 月 25 日第 32 回風力エネルギーシンポジウムにて講演

** 会員 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

*** 非会員 東京大学大学院工学系研究科

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} は全ての風向において IEC のカテゴリー C の乱流強度 12% を下回る。

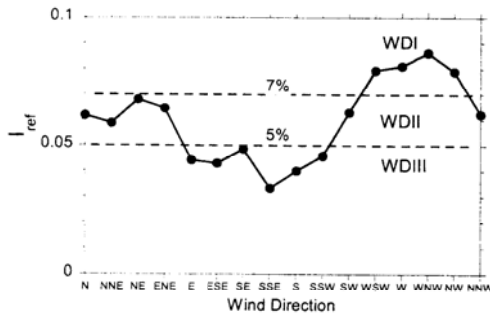


図1 乱流強度 I_{ref} の風向変化

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 σ_1 の 90%タイル値 σ_{90} は正規分布を仮定し、次式により表わした。

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

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 σ_1 の平均値に関するパラメータの同定

図2には各乱流強度区分の I_{ref} で基準化した σ_{ave} と風速との関係を示した。 σ_{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、 σ_{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 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 2.6% である。

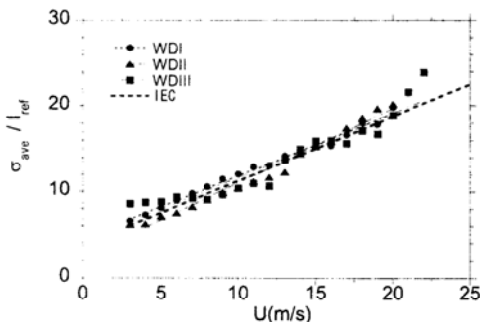


図2 σ_{ave} / I_{ref} の風速変化

3.2 標準偏差 σ_1 の標準偏差に関するパラメータの同定

図3には、各乱流強度区分の I_{ref} で基準化した σ_σ と風速との関係を示す。 σ_σ / 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 α と β は、 σ_σ / 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 α は 0.1~0.4、 β は 2.8~3.5 の範囲にある。図3から、観測から得られた σ_σ / 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³⁾。

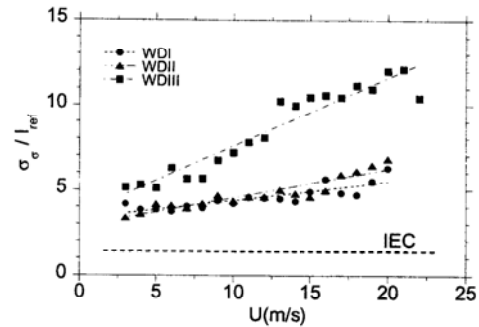


図3 σ_σ / I_{ref} の風速変化

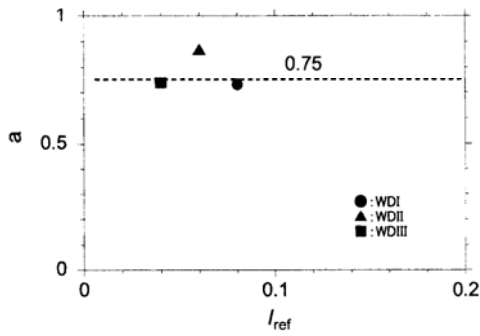
4. IEC の標準乱流モデルにおけるパラメータの提案

第3章から分かるように、パラメータ α と β の観測値は IEC に示されている値と大きく異なる。本章ではパラメータ α と β 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。

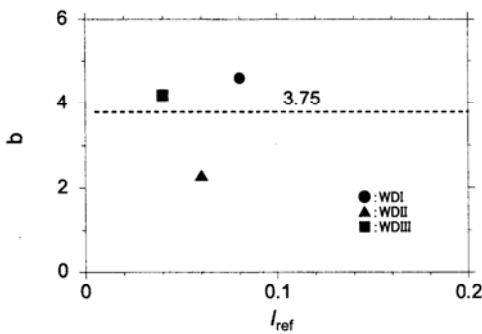
4.1 平均値 σ_{ave} のモデルパラメータの提案

図4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 σ_{ave} の値はパラメータ a と b の両方に依存するため、 σ_{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5には、 σ_{ave} の予測値と観測値との比較を示し、 σ_{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5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。



(a) パラメータ a



(b) パラメータ b

図4 乱流強度 I_{ref} とパラメータ a, b

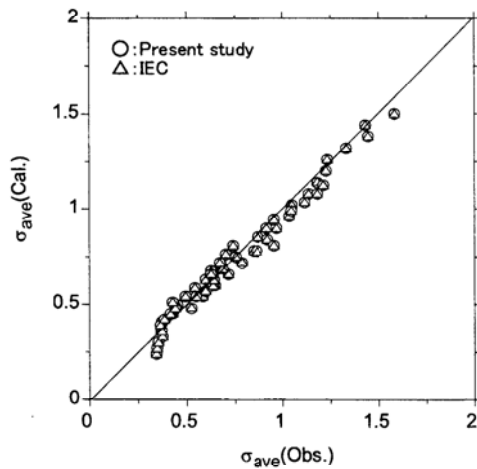


図5 σ_{ave} の観測と解析の比較

4.2 標準偏差 σ_σ のモデルパラメータの提案

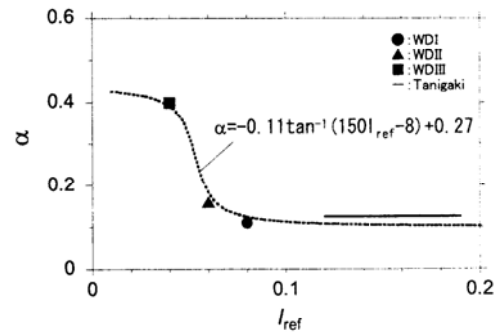
図6には、観測データから同定されたパラメータ α と β の I_{ref} による変化を示す。図中の破線は本研究で提案したパラメータ α と β に関する評価式を表わし、 I_{ref} の関数として、次式のように表す。

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

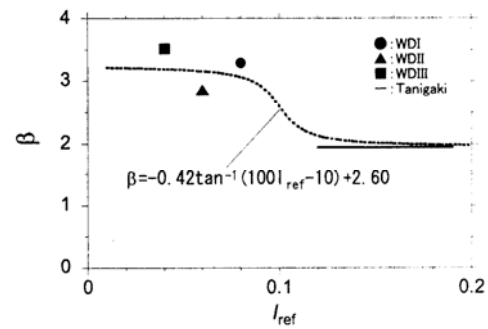
$$\beta = -0.42 \tan^{-1}(100I_{ref} - 10) + 2.60 \quad (6)$$

ここで、タンジェントの単位はラジアンである。

図6(a)から分かるように、提案式により求めたパラメータ α 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³⁾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6(b)から、提案式により求めたパラメータ β 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³⁾が陸上の風況観測データから求めた値 ($\beta = 1.95$) を示す。



(a) パラメータ α



(b) パラメータ β

図6 乱流強度 I_{ref} とパラメータ α, β

図7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 σ_σ 予測値と観測値との比較を示す。

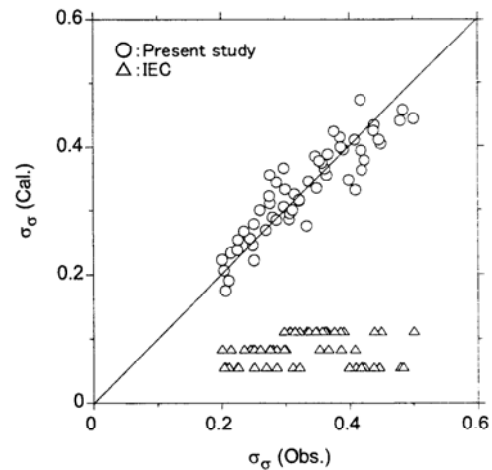


図7 σ_σ の観測と解析の比較

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7から、IEC の標準乱流モデルにおける σ_σ の評価式のパラメータは適切ではないことが分かる。

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 α と β 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8に示す。パラメータ a と b および α と β は表1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。

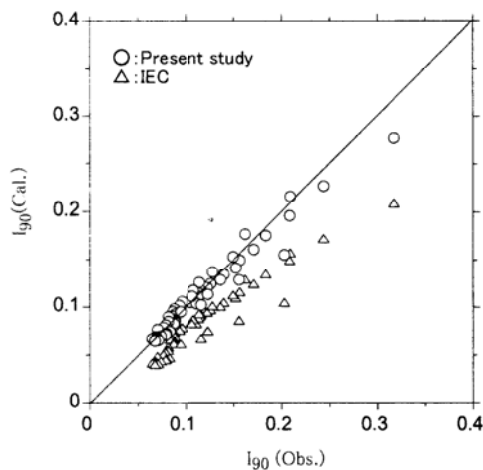


図8 乱流強度 I_{90} の観測と解析の比較

予測精度を評価するために、本研究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2)。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) 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。

- 2) 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、残りの観測期間の風況観測データも解析し、本提案モデルの精度検証を行う予定である。

表1 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
α	$-0.11 \tan^{-1}(150I_{ref} - 8) + 0.27$	0
β	$-0.42 \tan^{-1}(100I_{ref} - 10) + 2.60$	1.4

表2 誤差評価

		本研究	IEC
σ_{ave}	RMSE	7.3%	7.1%
	R^2	0.97	0.97
σ_σ	RMSE	10.2%	78.8%
	R^2	0.82	-9.6
I_{90}	RMSE	9.9%	32.8%
	R^2	0.95	0.41

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る。

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 —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.