

吹送流の鉛直分布を考慮した流速と風速の関係式の提案*

A study of relationship of current and wind considering vertical profile of wind-driven current

石原 孟** 君塚 貴之** 川竹 拓也*** 荒川 洋***
Takeshi ISHIHARA Takayuki KIMIZUKA Takuya KAWATAKE Hiroshi ARAKAWA

1. はじめに

洋上風力発電設備の設計に関する国際基準 IEC 61400-3-1¹⁾では、疲労荷重の照査のための気象海象条件を、風速、波高及び波周期の結合確率分布を用いて評価することが定められている。また、係留システムの疲労設計においては、ISO 19901-7 により、風速、波高、波周期に加え、流速の階級別発生頻度も用いて評価することが定められている。さらに、IEC 61400-3-1 において、観測値や気象・海象シミュレーションの予測値から出現頻度を算出することになっている。

流速については、IEC61400-3-1¹⁾および DNV-ST 0437²⁾において、海潮流の流速と風による吹送流の流速の和で表されている。海潮流の流速は水深の 1/7 乗のべき則で表し、吹送流はその影響範囲において海面から直線的に減少すると仮定している。さらに、海面における吹送流は海面から 10m の高さの風速に比例して、線形に増大するとされている。一方、Yamaguchi と Ishihara³⁾は福島県沖における気象・海象予測の再計算から、波は風だけではなく、太平洋からのうねりの影響を強く受けることを示した。従って、日本沿岸の吹送流はうねりの影響を受けることが考えられる。

また、石原ら⁴⁾は、国立研究開発法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC) が開発した海洋変動予測システム JCOPE-T⁵⁾を用いて、福島県沖の流れ場を予測し、水深 10m における観測値と概ね一致する結果が得られたが、吹送流の鉛直分布は IEC61400-3-1¹⁾に示されている直線分布と異なり、海面から曲線的に減少している分布を示した。このことから、IEC61400-3-1¹⁾における予測式は吹送流の鉛直分布を過大に評価する可能性があることを示唆した。

そこで、本研究では、福島沖における流れの数値予測結果に基づき、うねりの影響を考慮した吹送流と海上風速の新しい関係式を提案するとともに、吹送流の鉛直分布に関する新しいモデルを提案し、数値予測を

現地観測データ⁶⁾と比較することにより、その予測精度を検証する。

2. 数値予測モデルの概要

第2章では、まず流れの数値予測モデルの概要を紹介し、次に海潮流と吹送流に関する新しいモデルを提案する。

2.1 流れの数値予測モデル

流れの数値予測は JCOPE-T を用いた。JCOPE-T の解析領域は東経 125~148°、北緯 24~48° の範囲であり、水深方向は 46 層である。格子間隔は 1/36 度 (約 3 km) であり、解析結果の出力は福島県沖の観測地点に最も近い格子である。

JCOPE-T では、POMgcs⁷⁾をベースに、非圧縮性粘性流体の運動方程式に対して、静水圧近似、ブシネスク近似を施したプリミティブ方程式を用いる。主要な予測変数は、2 次元変数の水位と、3 次元変数の水平方向の流れ場と水温、塩分であり、自由表面を持つ σ 座標系で記述する。 σ 座標系で記述された方程式⁸⁾を以下に示し、方程式で用いられている記号の意味は Table 1 に示す。

流速の連続式および運動方程式は式 (1) ~ 式 (3) により表す。

$$\frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UVD}{\partial y} + \frac{\partial U\omega}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \\ \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left(\frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right) d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) + F_x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial UVD}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V\omega}{\partial \sigma} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \\ \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left(\frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right) d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) + F_y \end{aligned} \quad (3)$$

また、ポテンシャル水温および塩分の輸送方程式は式 (4) と式 (5) により表す。

*令和 5 年 12 月 1 日 第 45 回風力エネルギー利用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
***団体会員 株式会社水城ネットワーク

$$\frac{\partial TD}{\partial t} + \frac{\partial TUD}{\partial x} + \frac{\partial TVD}{\partial y} + \frac{\partial T\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) + F_T - \frac{\partial R}{\partial z} \quad (4)$$

$$\frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial SUD}{\partial x} + \frac{\partial SVD}{\partial y} + \frac{\partial S\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) + F_S \quad (5)$$

JCOPE-T では乱流モデルについてサブグリッドスケール乱流エネルギーおよび乱流エネルギーと乱流の長さスケールの積の輸送方程式を用い、式(6)と式(7)により表す。

$$\frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial Uq^2 D}{\partial x} + \frac{\partial Vq^2 D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right) + \frac{2K_M}{D} \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right\} + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \sigma} - \frac{2Dq^3}{B_1 l} + F_q \quad (6)$$

$$\frac{\partial q^2 l D}{\partial t} + \frac{\partial Uq^2 l D}{\partial x} + \frac{\partial Vq^2 l D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2 l}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2 l}{\partial \sigma} \right) + E_l \left[\frac{K_M}{D} \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right\} + E_3 \frac{g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \sigma} \right] \bar{W} - \frac{Dq^3}{B_1} + F_l \quad (7)$$

ω は、 σ 面に対しての垂直ベクトルである。 U 、 V は σ 面で定義されているが、水深 z における水平ベクトルである。 ω から鉛直流速成分 W への変換は次式による。

$$W = \omega + U \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + V \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \sigma \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (8)$$

Table 1 JCOPE-T の基礎方程式に用いられる記号

記号	意味
U, V, W	デカルト座標の速度
ω	σ 面に直交方向の速度
η, H, σ	海水面高, 海底高, $\sigma = (z - \eta) / (H + \eta)$
D	水深
f	コリオリパラメータ
ρ, g	密度, 重力加速度
K_M, K_H	鉛直と水平方向の乱流拡散係数
T, S	ポテンシャル温度, 塩分
$F_x, F_y, F_T, F_S, F_q, F_l$	各方程式における外力項

2.2 海潮流と吹送流のモデル化

IEC61400-3-1¹⁾では、流速 $C(z)$ を海面付近に存在する吹送流 $C_w(z)$ と海潮流 $C_{ss}(z)$ の和でモデル化し、次式により表す。

$$C(z) = C_w(z) + C_{ss}(z) \quad (9)$$

ここで、 z は水深である。

本研究における海潮流 $C_{ss}(z)$ はIEC61400-3-1¹⁾と同じ式を用い、次式により表す。

$$C_{ss}(z) = C_{ss}(z_r) \times \left(\frac{h-z}{h-z_r} \right)^{1/7} \quad (10)$$

ここで、 h は海底の深さである。また z_r は吹送流が存在する深さを表し、IEC61400-3-1¹⁾では20m、DNV-ST-0437²⁾では50mとしている。

一方、吹送流 $C_w(z)$ の鉛直分布については本研究で次式を提案した。

$$C_w(z) = C_w(0) \left\{ 1 - \left(\frac{z}{z_r} \right)^\gamma \right\}, \quad 0 \leq z \leq z_r \quad (11)$$

ここで、 γ は吹送流の鉛直分布のべき指数、 z_r は吹送流が存在する最も深い水深を表す。 $\gamma=1$ とした時には、式(11)はIEC61400-3-1¹⁾の式となり、吹送流の流速は水深に対して線形的に減少することを表す。 γ の値はサイトの海況によって変化し、現地観測または数値解析のデータにより同定する。福島沖では $\gamma=0.36$ とした。本研究では福島県沖の海況に基づき、DNV-ST-0437²⁾と同じ値とし、 $z_r=50$ mとした。

海面における吹送流の流速 $C_w(0)$ を、IEC61400-3-1¹⁾では海面高さ10mでの平均風速 U_{10} に比例すると仮定しているが、福島県沖の海況での吹送流成分は、風が弱い時にうねりの影響を強く受け一定値になり、風が強くなると風速に比例して大きくなるため、本研究では、海面における吹送流の流速 $C_w(0)$ を風速に駆動される成分 $C_{w,w}$ とうねりにより駆動される成分 $C_{w,s}$ の重み付きの和で表す次式を提案した。

$$C_w(0) = w \cdot C_{w,w} + (1-w) \cdot C_{w,s} \quad (12)$$

$$C_{w,w} = 0.01 U_{10}^\alpha, \quad C_{w,s} = \beta, \quad w = \frac{a U_{10}^{12}}{1 + a U_{10}^{12}}$$

$$\alpha = 1.1, \quad \beta = 0.065 \text{ m/s}, \quad a = 10^{-15}$$

本研究では吹送流のうち風速に駆動される成分 $C_{w,w}$ は、IEC61400-3-1¹⁾の式を修正し、風速の α 乗に比例する関数で表す。 $\alpha=1$ の場合にはIEC61400-3-1¹⁾の式になる。一方、 $C_{w,s}$ はうねりにより駆動される成分であり、風速に依存しない定数とした。 U_{10} は海面から10m高さでの1時間平均風速である。重み関数 w の式にある比例係数 a はうねりの影響範囲を表すための係数である。 a および β は福島沖の流速の数値予測データにより同定し、それぞれ1.0E-15と0.065m/sとした。

3. 提案モデルの検証と考察

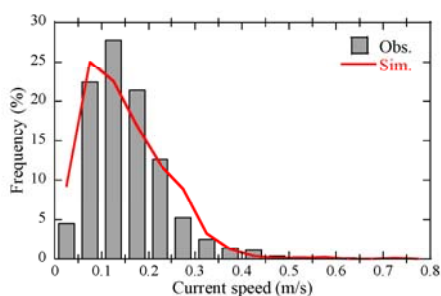
第3章では、まず流れの現地観測データを用いて、流れの数値予測の精度を検証し、次に吹送流に関する提案した新しいモデルの精度を検証する。

3.1 流れの数値予測の精度検証

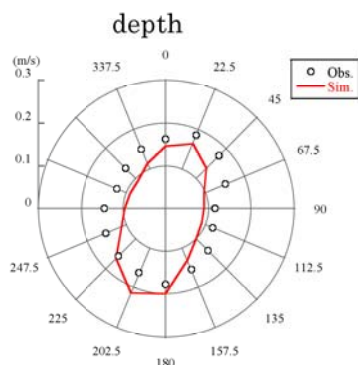
石原ら⁴⁾は福島沖で2014年7月1日から2015年6

月 30 日までの 1 年間の観測記録について JCOPE-T による数値予測結果と比較し、よい一致を示した。本研究では、98.4%のデータ取得率が得られた 2017 年の 1 年間の現地観測結果を用いて、JCOPE-T の予測精度の検証を行った。

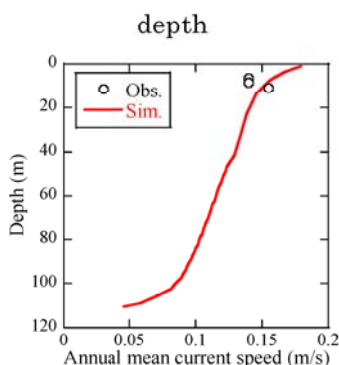
Fig. 1(a)と(b)には流速階級別発生頻度と方位別年平均流速を示し、数値予測結果は観測値と一致している。また Fig. 1(c)には年平均流速の鉛直分布を示し、深度 6.5m, 8.5m, 11m の観測値と概ね一致することが分かる。平均流速の予測値と観測値の差は年によって異なり、今後長期観測による予測精度の検証が期待される。



(a) Frequency distribution of current speed at 11m



(b) Directional annual mean current speed at 11m



(c) Vertical profile of annual mean current speed

Fig. 1 Comparison of predicted and measured frequency distributions,

3.2 流れのモデルの検証

2006 年～2015 年の 10 年間における気象予測から

得られた海面高さ 10m の風速および JCOPE-T から得られた流速の予測を用いて、本研究で提案した海面での吹送流の流速と風速の関係を表す式(12)と流速の鉛直分布を表す式(11)を検証する。

Fig.2 には、海面における流速の吹送流成分の予測値と提案式(12)および IEC 61400-3-1 の式との比較を示す。吹送流の成分 $C_w(z)$ は、流速 $C(z)$ の予測値から水深 50m での流速を式(10)に代入して求めた海潮流の流速 $C_{ss}(z)$ を引いて算出した。JCOPE-T の出力には海面での値が無いので、海面での吹送流の流速 $C_w(0)$ は、水深 1m の値から式(11)により海面での流速を外挿した。このように求めた吹送流の流速は 2m/s 幅の風速ビンごとに平均して用いた。

本研究で提案した水面での吹送流のモデルは、低風速時には一定であり、高風速時には風速の 1.1 乗に比例して大きくなり、吹送流の流速をよく再現している。一方、IEC61400-3-1 の式は、風速 5m/s 以下では吹送流の流速を過小評価し、風速 9m/s から 17m/s までの範囲において過大評価していることが分かる。

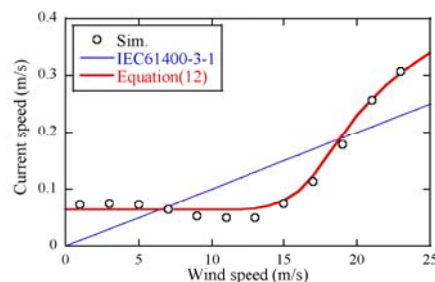


Fig. 2 Variation of wind-driven current speed at sea surface with U_{10}

各水深における平均流速の値は水深 50m の流速をもとに式(10)により海潮流成分の鉛直分布を求めた。吹送流成分は式(12)から求まる海面での吹送流成分から式(11)により鉛直分布を計算し、海潮流成分の鉛直分布を加算して流速の鉛直分布を求めた。

Fig.3 には、風速が小さい 0～2m/s と風速が大きい 22～24m/s の結果を例示した。IEC61400-3-1 はうねりによる流速成分を考慮しないため、低風速時 (Fig.3(a)) には水深 20m まで流速を過小評価しているが、20m 以深の流速が過大に評価されている。一方、高風速時 (Fig.3(b)) には、IEC61400-3-1 は海面から水深 20m まで流速が直線に変化すると仮定したため、流速が過大に評価されている。また 20m 以深の流速も低風速時と同様に過大に評価されている。本研究で提案するモデルは、IEC61400-3-1 の予測結果と比較して、低風速時も高風速時も JCOPE-T により予測された流速の鉛直分布とよく一致していることが分かる。

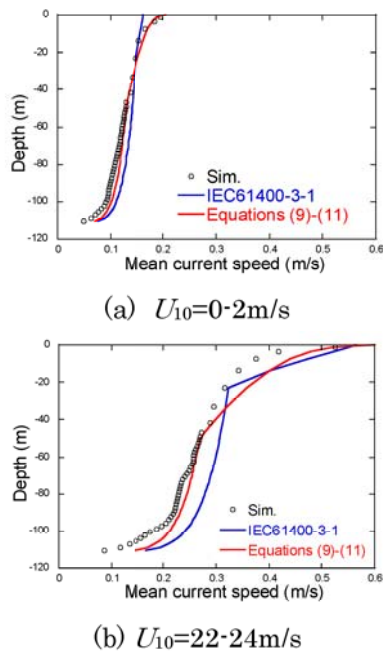


Fig. 3 Vertical distribution of current speed

Fig.4には水深1mおよび7.5mにおける流速と風速の関係を示す。流速の風速への依存性は水深によらず同じ傾向を示した。低風速時にはうねりの影響を考慮していない IEC61400-3-1 の式は流速を過小評価し、一方、高風速時には吹送流の鉛直分布が直線に変化すると仮定するため、IEC61400-3-1 の式は流速を過大評価することが分かる。本研究で提案した吹送流のモデルは、低風速時も高風速時も JCOPE-T の数値解析の結果と一致していることが分かる。

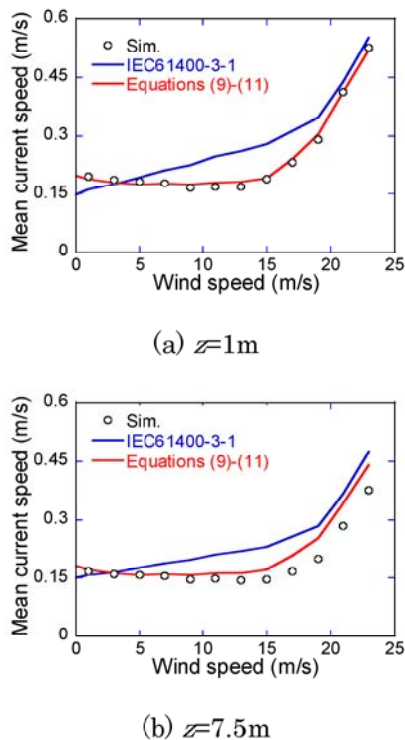


Fig. 4 Variation of current speed with U_{10}

4. まとめ

本研究では 10 年間の数値予測結果に基づき、吹送流流速と風速の関係式および鉛直分布モデルを提案し、福島沖で得られた 2017 年の 1 年間の流速の現地観測結果と比較することにより、以下の結論を得た。

- (1) JCOPE-T により予測された流速は、福島沖での現地観測値と比較し、よい一致を示した。
- (2) うねりの影響を考慮した吹送流の流速と風速の関係式を提案し、流れの数値予測結果と一致することを示した。一方、IEC61400-3-1 の式は風速によって吹送流を過小・過大評価した。
- (3) 吹送流の流速の鉛直分布を表すべき則モデルを提案し、流れの数値予測結果とよい一致を示した。一方、IEC61400-3-1 の鉛直分布の式は、低風速時を除いて、水深 50m まで流速を過大評価することを示した。

謝辞

本研究は NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）浮体式基礎製造・設置低コスト化技術開発事業（大型スパー浮体）の一環として行われた。ここに関係者各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) IEC61400-3-1, Wind energy generation systems – Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines, Edition 1.0, International Electrotechnical Commission, 2019
- 2) DNV-ST-0437, Loads and site conditions for wind turbines, 16th Edition, 2021
- 3) A. Yamaguchi, T. Ishihara, Numerical prediction of Normal and Extreme Waves at Fukushima Offshore Site, Journal of Physics: Conference Series 1037 (4), 042022, 2018
- 4) 石原孟, 種本純, 山口敦, 福島沖における通常流況と極値流速の予測に関する研究, 風力エネルギー学会論文集, Vol.40, No. 3, pp.35-42, 2016
- 5) 宮澤泰正, JCOPE 海洋変動予測システム使用の手引き 2005/05/13 2.0 版, 独立行政法人海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター, 2005.
- 6) T. Ishihara, A. Yamaguchi, S. Taki, Metocean measurement at Fukushima offshore site, Grand Renewable Energy 2018, 2018
- 7) G. L. Mellor, Users guide for a three-dimensional, primitive equation numerical ocean model, Princeton University, Princeton, NJ 08544-0710, 41, 2002