

第I部門

2024年9月6日(金) 10:40 ~ 12:00 会場 A104(川内北キャンパス講義棟A棟)

耐風・風工学(2)

座長：木村 吉郎（東京理科大学）

10:50 ~ 11:00

[I-328] 海潮流と表層流の鉛直分布モデルの提案とその検証

\*福島 雅人<sup>1</sup>、石原 孟<sup>1</sup> (1. 東京大学)

キーワード：海潮流、表層流、浮体式洋上風力発電設備

本研究では、係留索を有する浮体式洋上風力発電設備に対する疲労照査で用いるサイトの流速を精度良く評価するために、JCOPE-Tによる流速の予測値が福島沖の現地観測値と概ね一致することを示した。また、検証した予測値を用いて、風波とうねりを考慮した海面表層流の新たなモデルを提案するとともに、海潮流と表層流の鉛直分布モデルのパラメータの同定方法を提案した。IEC61400-3-1モデルによる福島沖の表層流及び銚子沖の海潮流の予測値はJCOPE-Tを過大評価し、低風速時の海面表層流の予測値は過小評価した。一方、提案モデルによる予測値はJCOPE-Tとよく一致した。

## 海潮流と表層流の鉛直分布モデルの提案とその検証

東京大学 学生会員 ○福島 雅人

東京大学 正会員 石原 孟

## 1. はじめに

洋上風力発電の主力電源化に向けて、浮体式洋上風力発電の普及が期待されている。係留索を有する浮体式洋上風力発電設備に対する疲労照査では、海流による流体力が係留索の疲労荷重に大きな影響を与えるため、サイトの流速を精度良く評価する必要がある。洋上サイトでの流速の長期観測データが得られないため、数値モデルによる流速の予測が不可欠であるが、その精度は十分検証されていない。また、IEC61400-3-1<sup>1)</sup> (IEC) 及び DNVGL-ST-0437<sup>2)</sup> (DNVGL) では、海潮流と表層流の鉛直分布モデルが提案されているが、モデルパラメータの同定方法は明らかにされておらず、海潮流及び表層流を過大評価する可能性がある。また、海面表層流は高度 10m の風速 (海上風速) の一次関数でモデル化されているが、太平洋側沿岸部のような開放性海域では、海上風以外にうねりの影響を強く受けるため、低風速時の海面表層流を過小評価する可能性がある。

そこで、本研究では、まず、1 年間の数値モデルによる流速の予測値を福島沖の観測値と比較することにより、その予測精度を検証する。次に、日本の近海に適用できる海潮流と表層流の鉛直分布モデル及びそのパラメータの同定方法を提案するとともに、風波とうねりの影響を考慮した海面表層流の新たなモデルを提案し、福島沖及び銚子沖を対象として、その妥当性を検証する。

## 2. 海潮流と表層流の鉛直分布モデルの提案

本研究では、流速の鉛直分布を海潮流と表層流との和によりモデル化し、式(1)により表す。また、海潮流と表層流の鉛直分布は、式(2)及び式(3)によりそれぞれ表す。海面表層流は、風波とうねりの影響により生じる流速の二乗和の平方根で表す式(4)を提案する。モデルパラメータの定義及び同定方法を表 1 及

び表 2 に示す。海面表層流の提案モデルは、風波とうねりを混合した有義波高の式<sup>3)</sup>と類似している。また、提案モデルは、 $\alpha=1/7$ ,  $\beta=1$ ,  $V_r=0$ ,  $U_{w,s}=0$  のとき、IEC 及び DNVGL のモデルと一致する。

$$U(z) = U_{ss}(z) + U_w(z) \quad (1)$$

$$U_{ss}(z) = U_{ss}(z_r) \cdot \left( \frac{d-z}{d-z_r} \right)^\alpha \quad (2)$$

$$U_w(z) = U_w(0) \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{z}{z_r} \right)^\beta \right\}, (0 < z < z_r) \quad (3)$$

$$U_w(0) = \sqrt{U_{w,w}^2 + U_{w,s}^2}, \quad (4)$$

$$U_{w,w} = kV_{10} \cdot \left\{ 1 + \left( \frac{V_r}{V_{10}} \right)^\gamma \right\}^{-2}$$

表 1 モデルパラメータの定義

| 記号                        | 定義                  |
|---------------------------|---------------------|
| $U(z), U_{ss}(z), U_w(z)$ | 流速, 海潮流, 表層流の鉛直分布   |
| $z, z_r, d$               | 水深, 基底水深, 海底面の水深    |
| $\alpha, \beta, \gamma$   | 海潮流, 表層流, 風波のべき指数   |
| $V_{10}, k, V_r$          | 海上風速, 海上風速の係数, 基底風速 |
| $U_{w,w}, U_{w,s}$        | 風波, うねりの影響により生じる流速  |

表 2 モデルパラメータの同定方法

| 記号        | 値域                    | 同定方法                                                              |
|-----------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------|
| $z_r$     | 20-50m<br>(10m 間隔)    | $z_r$ 以深の流速の鉛直分布に対して、1/7 乗のべき則との平均絶対誤差の変化率の符号が正から負に反転する水深とする。     |
| $\alpha$  | 1/7                   | 1/7 と仮定する。                                                        |
| $\beta$   | 0.1-1.0<br>(0.1 間隔)   | $z_r$ 以浅の流速の鉛直分布に対して、 $\beta$ 乗のべき則との平均絶対誤差が最小となる値に 0.1 を加えた値とする。 |
| $\gamma$  | 4                     | 4 と仮定する。                                                          |
| $k$       | 0.01-0.033            | 海上風速の 50 年再現期待値と海面表層流速の 50 年再現期待値との比とする。                          |
| $V_r$     | 10-15m/s<br>(1m/s 間隔) | 海面表層流に対して、平均絶対誤差が最小となる値とする。                                       |
| $U_{w,s}$ | —                     | 海上風速 10m/s 未満における海面表層流速の平均値とする。                                   |

## 3. 結果と考察

流速の予測精度及び提案モデルの妥当性を検証するために、福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業において、浮体式洋上変電所に設置された海象計及び ADCP 流速計のデータを用いた。

海上風速及び流速・流向の予測には、メソスケール

キーワード 海潮流, 表層流, 浮体式洋上風力発電設備

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7 丁目 3-1

東京大学大学院 工学系研究科 TEL03-5841-1146

モデル WRF 及び海洋変動予測システム JCOPE-T をそれぞれ用いた。

2017 年における JCOPE-T による流速の予測値を、福島沖の観測値と比較した。図 1 に流速及び流向の予測値と観測値の発生頻度分布を示す。JCOPE-T による流速及び流向の予測値の発生頻度は、観測値の発生頻度と概ね一致している。

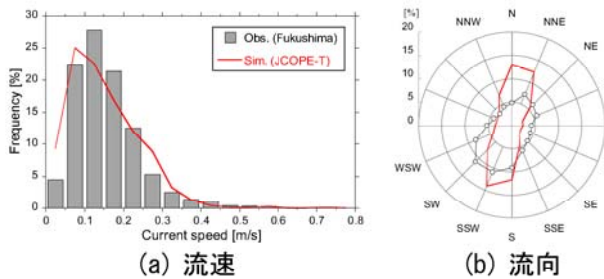


図 1 予測値と観測値の発生頻度分布の比較

2006～2015 年における WRF による海上風速及び JCOPE-T による流速の予測値を用いて、モデルパラメータを同定した。表 3 に同定結果の一覧を示す。 $z_r$  は、福島沖・銚子沖ともに 50m と同定され、IEC の 20m よりも大きく、DNVGL の 50m と一致した。

表 3 モデルパラメータの同定結果の一覧

|     | $z_r$ [m] | $\beta$ | $k$   | $V_r$ [m/s] | $U_{WS}$ [m/s] |
|-----|-----------|---------|-------|-------------|----------------|
| 福島沖 | 50        | 0.5     | 0.014 | 15          | 0.057          |
| 銚子沖 | 50        | 1.0     | 0.016 | 11          | 0.123          |

図 2 に海上風速と海面表層流速の関係を示す。線形モデルでは、低風速域で海面表層流が過小評価となり、それ以外の風速域で過大評価となる。提案モデルでは、 $U_{WS}$  によりうねりの影響を、 $V_r$  及び  $\gamma$  により風波の影響を考慮したことで、全ての風速域において、JCOPE-T とよく一致した。

図 3 に年平均流速の鉛直分布を示す。提案モデルでは、 $z_r$  及び  $\beta$  が適切に同定されたため、IEC モデルによる銚子沖での海潮流及び福島沖での表層流の過大評価をそれぞれ改善し、JCOPE-T とよく一致した。

図 4 に水深 1m 及び 52m における海上風速と流速の関係を示す。IEC モデルでは、表層流の影響が大きい水深 1m で、図 2 と同様の予測誤差が生じており、海潮流の影響が大きい水深 52m で、風速に関わらず流速を過大評価した。提案モデルでは、海面表層流の新たなモデルと適切なパラメータを用いたことにより、JCOPE-T とよく一致した。

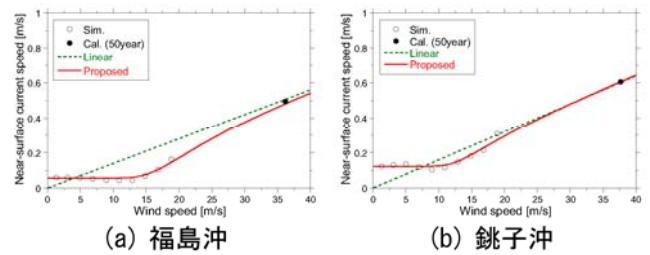


図 2 海上風速と海面表層流速の関係

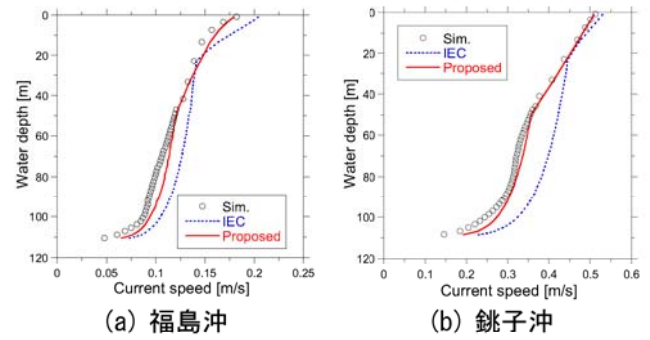


図 3 年平均流速の鉛直分布の比較

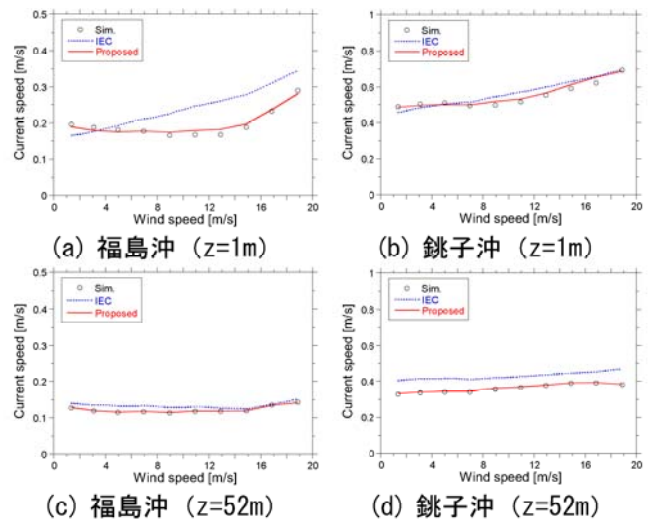


図 4 各水深における海上風速と流速の関係

#### 4. まとめ

本研究では、JCOPE-T による流速の予測値が福島沖の現地観測値と概ね一致することを示した。また、風波とうねりを考慮した海面表層流の新たなモデルを提案するとともに、海潮流と表層流の鉛直分布モデルのパラメータの同定方法を提案した。提案モデルは IEC モデルによる流速の過大評価を改善した。

#### 参考文献

- 1) IEC 61400-3-1, Wind energy generation systems –Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines, 2019.
- 2) DNV-ST-0437, Loads and site conditions for wind turbines, 2021.
- 3) A. Yamaguchi, T. Ishihara, Numerical prediction of Normal and Extreme Waves at Fukushima Offshore Site, Journal of Physics: Conference Series 1037 (4), 2018.