北九州市沖海域における 高波浪時の流況特性の解明

吉岡 健¹・志水 伸二²・川口 浩二³・小野 信幸⁴・
仲井 圭二⁵・永井 紀彦⁶

¹ 正会員 電源開発株式会社 (〒104-8165 東京都中央区銀座 6-15-1)

E-mail: takeshi_yoshioka@jpower.co.jp

² 電源開発株式会社 (〒808-0111 福岡県北九州市若松区柳崎町 1)

E-mail: shinji_shimizu@jpower.co.jp

³ 正会員 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1) E-mail: kawaguchi@pari.go.jp

⁴ 正会員 株式会社エコー (〒110-0014 東京都台東区北上野 2-6-4)

E-mail: n-ono@ecoh.co.jp

⁵ 正会員 株式会社エコー (〒110-0014 東京都台東区北上野 2-6-4)

E-mail: nakai@ecoh.co.jp

⁶ フェロー会員 株式会社エコー 名古屋大学環境学研究科客員教授兼務
(〒110-0014 東京都台東区北上野 2-6-4) E-mail: t-nagai@ecoh.co.jp

北九州市沖海域では、洋上風力発電設備の合理的な計画・設計に資することを目的とした実証研究が進められている。同海域の洋上風況観測塔においては、風況、波浪、流況の連続観測が2012年より実施され、様々な海象条件でのデータが蓄積されてきた。対象海域周辺は小島や浅瀬が点在する複雑な地形条件にあり、高波浪時には強風による吹送流や波による海浜流、関門海峡へ出入りする強い潮流等が合成した複雑な流れが形成されている。本研究では、複数要因が混在した流れ場の全体像を把握するため、強風・高波浪時の流況の再現計算モデルを構築し、外力要因をそれぞれゼロとした場合の数値実験から、潮流・波浪流と吹送流成分の寄与について検討した。

Key Words : offshore wind turbine, wind-driven current, tidal current, wave induced current

1. はじめに

北九州市沖海域では現在、洋上風力発電設備の合理的な計画・設計に資することを目的とした実証研究が進められている。同サイトの洋上風況観測塔においては、風況、波浪、流況の連続観測が2012年より実施され、様々な海象条件でのデータが蓄積されてきた。そのうち、流況特性の解明は、洋上風力発電設備の建設に伴う環境影響評価、同支持構造物に作用する流体力評価、基礎の洗掘対策を検討する上で、重要な課題である。

対象海域周辺は小島や浅瀬が点在する複雑な地形条件下にあり、高波浪時には強風による吹送流や波による海浜流、関門海峡へ出入りする強い潮流が合成された複雑な流れが形成されている。こうした複数要因が混在した流れ場の全体像を把握するには、地形条件、外力条件を反映した流況シミュレーションが有効である。

本研究では、強風・高波浪時の流況の再現計算モデルを構築し、外力要因をそれぞれゼロとした場合の数値実験から、潮流・波浪流と吹送流成分の寄与について検討した。

また、洋上風車の設計要求を定める国際規格(IEC61400-3¹⁾、以下、IEC基準)に記載されている吹送流プロファイルとの整合性について検討した。

2. 観測データと対象擾乱の抽出

(1) 洋上風況観測塔

洋上風力発電設備の実証研究のため、北九州市沖では、図-1に示す地点(水深15m)に海面高80mの洋上風車(1,980kW)及び洋上風況観測塔が建設された。洋上風況観測塔では、2012年10月から2017年3月まで、さまざまな

高度に設置された風向風速計やライダーによる風況の連続観測記録(10分間隔の観測)とともに、近傍の海底に設置された海象計による波浪・流況の観測記録が蓄積されている。流況観測は、鉛直3層(D.L.-2.7m, -5.7m, -8.7m)で10分間隔の連続観測データとして記録されている。

(2) 対象擾乱の抽出

本研究は、高波浪時かつ強風時の風況観測塔付近の流れの特性解明を目的とする。そのため、高波浪時の風況観測塔の観測結果より、高波発生時の条件を抽出した。

表-1に2012年10月から2017年3月までに発生した高波浪について、波高順位4位までの波高と風速データ(観測高度80m)の一覧を示す。

高波順位1～4位の波浪条件について、第1位は波向が欠測であったため、データが全て揃っており、風向が異なる高波順位2位と4位の条件を再現対象の擾乱として抽出した。なお、本報告では、高波順位4位のデータを対象とした解析結果を示す。

図-1 北九州市沖の洋上風況観測塔

表-1 高波発生起時の波高と風速データ

高波順位	発生起時	最大有義波			観測塔(海面上80m)	
		波高(m)	周期(s)	波向(°)	風速(m/s)	風向(°)
1	2015/8/25 8:00	3.6	4.9	-	30.0	64
2	2014/3/13 12:40	3.45	9.1	344	20.1	360
3	2015/12/11 10:20	3.2	8.5	323	16.9	10
4	2015/1/1 10:00	3.13	7.6	315	18.7	305

3. 高波浪・強風時の流況の計算

(1) 計算モデルの概要

流況計算モデルは、鉛直3層で計測された流況観測データと比較するため、以下の連続式と運動方程式を基礎式とする鉛直6層の多層レベルモデルとした。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} - fv = & -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) + R_x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} + fu = & -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) + R_y \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 t は時間、 x, y は水平座標、 z は鉛直座標、 u, v は x 方向及び y 方向の流速、 w は鉛直流速、 f はコリオリパラメータ、 ρ_0 は海水密度、 p は圧力、 A_x, A_y は水平渦動粘性係数、 A_z は鉛直渦動粘性係数、 R_x, R_y は波によるラディエーション応力である。

図-2に計算モデルの構成図を示す。流況シミュレーションは、図-2に示すように抽出した擾乱ケースの潮位、風向・風速、波浪条件(波高、周期、波向)の時系列データを入力条件とする。波浪場はエネルギー平衡方程式に基づく波浪変形計算により計算し、(2)、(3)式中のラディエーション応力項を評価するものである。また、風による応力は、海面では境界条件として、次式で与える。

図-2 計算モデルの構成

$$A_z \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=\eta} = \frac{\tau_{wx}}{\rho_0} = \frac{\rho_a}{\rho_0} C_d W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (4)$$

$$A_z \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=\eta} = \frac{\tau_{wy}}{\rho_0} = \frac{\rho_a}{\rho_0} C_d W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (5)$$

ここで、 η は水位、 τ_{wx} 、 τ_{wy} は風による応力の x 、 y 方向成分、 ρ_a は空気密度、 W_x 、 W_y は風速の x 、 y 方向成分、 C_d は抵抗係数であり、本多・光易(1980)²⁾より評価した。

$$C_d = \begin{cases} (1.29 - 0.024|W_{10}|) \times 10^{-3} & W_{10} < 8 \text{ m/s} \\ (0.581 - 0.063|W_{10}|) \times 10^{-3} & W_{10} \geq 8 \text{ m/s} \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 W_{10} は海上10mにおける風速である。

流況計算モデルでは、以上のようにして波浪と風の影響を含む流れ場を計算する。計算は鉛直方向6層の多層レベルモデルで行い、計算結果は鉛直3層の流況観測データと比較する。

(2) 計算領域と境界条件

計算領域を図-3に示す。計算格子は、東西方向20km、南北方向17.4kmの範囲を100m正方格子で近似した。計算領域は、洋上風況観測塔周辺の流れ場に対し、風、波浪、潮流による影響を反映できるように設定した。

波浪に対しては、NOWPHAS 藍島を含み、藍島や六連島による波の遮蔽効果を考慮できるようにした。また、関門海峡は響灘と周防灘の潮位差により非常に強い潮流が生じる場所である。風況観測施設周辺にも関門海峡を出入りする強い流れの影響があると想定されることから、境界条件の設定でその影響を考慮した。

境界条件は、図-3に示す開境界A-B-Cにおける境界上の潮位変動を境界条件として与え、D-Eの境界では関

図-3 計算領域の地形と境界条件の設定位置

門海峡を流れる流量の時間変動を境界条件とした。境界D-Eにおける流量変化は、関門海峡を含む響灘～周防灘の広領域での潮流計算を別途行い、境界条件としての流量データを得るものとし、関門海峡より生じる強い流れの出入りを再現した。

(3) 再現計算

図-4に、高波順位4位が出現したときの2014年12月31日～2015年1月2日の風速、潮位、有義波高、及び風況観測塔における3層の流況観測値（流速の絶対値）と計算結果の水深平均流速値を示す。

流況シミュレーションは、潮位変動と観測塔における風向・風速（観測高度80m）、入射波の波高、周期、波向（NOWPHAS 藍島の観測値）の時系列データを入力条件とし、波浪と風の影響を含む流れ場を計算した。計算層数は6層で、層厚は2mとした。

図-4の最下段に、観測データの流速と計算結果（全層平均）を示す。また、図-5は、図-3中の①と②の時刻の波高・波向分布であり、図-6はこれと対応する時刻の表層（第1層）の流速の空間分布である。

図-5の波高分布については、対象海域に点在する小島による波の遮蔽の影響が表現されている。図-6の流れのパターンでは、対象海域において、関門航路からの強い潮流が特徴的である。時刻①と②では、主に風向と波向が異なっており、時刻①では風向、波向ともにWNWであり、時刻②では風向はNWで、波向はNNWとなっている。洋上風況観測塔の周辺の流れでは、西よりの風と

図-4 洋上風況観測塔の流況と流速の計算結果

図-5 時刻①と②の波高・波向分布

図-6 流れの空間分布 (第1層: 水面~2m)

図-7 流速鉛直分布の比較

になっている時刻①では全体として東向きの流れとなり、北九州市沖の海岸に平行な方向の流れとなる。やや北よりの風となる時刻②では流速や流向のパターンがやや複雑になっており、北九州港沖の航路に沿った北向きの流れが生じているなど、風向や地形の影響を受けた流れとなっている。

図-7は、図-4における時刻①と②の流速の鉛直分布の比較である。流れの観測値は鉛直方向にほぼ一様な分布となっている。図-4下段の時系列データは、風速や波が小さい場合も大きい場合も鉛直方向の流速値はほぼ同じ値を示しており、観測塔付近は鉛直方向にほぼ一様であった。図-4下段の流速の実測値と計算値(全層平均)の比較では、流速の再現性がよくない時刻もあるけれども、図-7に示すように、計算結果の流速の鉛直分布は、実測値と同様の变化傾向を示す結果となっており、計算において流れの特徴が再現されたものと判断した。

4. 吹送流成分の抽出

潮汐、風、及び波の影響を考慮して再現性を確認したモデルにおいて、風速のみを0にした計算を行い、再現計算の流況との差を吹送流成分として抽出した。

図-8は、風況観測塔地点における風及び潮汐と波を考慮した場合の流速の計算結果と風を考慮しない場合(潮

汐と波を考慮)の流速を比較したものである。図-7の再現計算結果で鉛直方向の流速差が小さかったことから、図-8は全層平均流速を比較したものである。図-8の赤のハッチングをかけた部分が両者の差であり、吹送流成分であると考えられる。

図-9は、吹送流成分について、時刻①と②における表層(第1層)の流速の空間分布を示したものであり、図-6から吹送流成分のみを抽出したものである。

図-8 風ありと風なしの流速計算結果

図-9 吹送流成分の抽出(表層:第1層)

図-9について、図-3の水深分布と比較すると、水深が浅い浅瀬の部分では吹送流速が大きくなっていることが確認できる。また、図-8の時刻①と②では風速は②の方が大きいけれども、吹送流速は①の方が大きくなっており、風向条件の違いで吹送流速や、全体的な吹送流パターンは大きく変化することが確認された。

5. IEC 基準との比較

IEC 基準では、吹送流を評価する場合の推定式として、(7)式を与えている。

$$U(z) = U(0)(1 - z/20) \quad (7)$$

ここで、 $U(0)$ は海面流速($=0.01W_{10}$, W_{10} は高度10mの風速)、 z は水面からの高さである。

これは、吹送流を海面流速から水面下20mの深さで流速がゼロとなる単純な鉛直分布である。表面流速についても高度10mの風速の0.01倍で与えており、風速より吹送流速の概略値が推定できるものとなっている。

そこで、北九州市沖の吹送流に関して IEC 基準式の適

図-10 吹送流速鉛直分布の IEC 基準式との比較

用性を検討した。図-10 は(7)式より風速から推定した吹送流速と流況シミュレーションから吹送流成分のみを抽出した結果である。図-10 の上段に、それぞれ流況観測点と対応した3層の吹送流成分の比較結果を示し、下段に時刻①と②における流速鉛直分布の比較図を示す。

風速から算定される IEC 基準の吹送流速は、流況シミュレーション結果より抽出した吹送流速とオーダーは良く一致しているが、流速の鉛直分布はシミュレーション結果に比べて、鉛直方向の変化が大きいといった違いが認められる。

吹送流は、図-9 のように風向や地形の影響を受けて流速や流向が変化する。そのため、風速のみを考慮する IEC 式は吹送流速の概略値を推定できると考えられるが、施設設計時の流況の評価においては、現場の状況に応じた微修正が必要である。図-10 の鉛直分布の比較でみられるように、水深が同じ場所でも、風向の違いにより吹送流の大きさが変化する。北九州市の洋上風況観測塔周辺の場合、西方向から風が作用した場合に吹送流が大きくなる傾向が認められる。

6. おわりに

波浪、風、潮流を考慮した流況シミュレーションにより北九州市沖の高波浪時の流況を再現し、主に吹送流成分について分離した。

IEC 基準の推定式は地形の影響を含まないものの、吹送流の概略値の評価は可能である。設計での詳細な吹送流成分の評価には、流動モデル等による地形条件を考慮した評価が必要なことを確認した。

謝辞：本稿は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託による洋上風況観測システム実証研究（北九州市沖）の成果の一部を紹介するものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) International Electrotechnical Commission : Wind turbines - Part 3, Design requirements for offshore wind turbines, IEC 61400-3, 2009.
- 2) 本多忠夫, 光易恒: 水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究, 海岸工学講演会論文集, 第 27 巻, pp.90-93, 1980.

(2017.2.2 受付)

INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF CURRENT UNDER HIGH WAVES IN THE OFFSHORE KITA-KYUSHU

Takeshi YOSHIOKA, Shinji SHIMIZU, Koji KAWAGUCHI, Nobuyuki ONO,
Keiji NAKAI and Toshihiko NAGAI

In the offshore area of Kita-Kyushu city, experimental study for reasonable planning/designing of the offshore wind power generation facility has been in progress. At the wind observation tower in the site, continuous observation of wind, wave, and current has been carried out since 2012 and accumulated data under various sea conditions. In the study area, complicated currents are generated under high wave condition combined with wave induced current, wind driven current, and strong tidal current passing through Kanmon Straits. In this study, numerical simulations of current under high wave have been carried out and examined the characteristics of current by extracting wind driven current.