

現地観測データに基づく沿岸域洋上の 風力と流況の検討事例

A MARINE CONDITIONAL STUDY BASED
ON FIELD OBSERVATION FOR OFFSHORE WIND FARM DESIGN

永井紀彦¹・藤平欣司²・山村和弘³・清宮 理⁴・井上雄介⁵・久高将信⁶
Toshihiko NAGAI, Kinji FUJIHARA, Kazuhiro YAMAMURA, Osamu KIYOMIYA,
Yusuke INOUE and Masanobu KUDAKA

¹フェロー 工博 (独法) 港湾空港技術研究所理事 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²非会員 工修 パシフィックコンサルタンツ(株) (〒206-8550 東京都多摩市関戸1-7-5)

³正会員 工修 東亜建設工業(株) (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

⁴フェロー 工博 早稲田大学教授 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

⁵非会員 理修 (財)日本気象協会 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1)

⁶正会員 エコー(株)参与 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

This paper introduces an example of a marine conditional feasibility study for offshore wind farm design. In order to obtain reliable expected electric power potential and design wind force, numerical wind simulation using the LAWEPS model based on k-e method was conducted, calibrated with long-term coastal wind observation data at two stations. Long-term seabed installed coastal wave gauge records were used for not only obtaining design wave condition but also getting offshore currents. Characteristics of offshore currents were clarified with harmonic tide components study.

Key Words: Offshore Winds, Wind Power Estimation, LAWEPS, NOWPHAS, Coastal Currents

1. はじめに

温室効果ガスを排出しない風力などの自然エネルギーの活用は喫緊の課題である。我が国は広大な排他的経済水域を有することから、洋上風力をエネルギー資源として捉え、洋上風力発電の推進が望まれている^{1),2)}。洋上風は陸上風に比べ風速が大きく相対的に安定していることは、近年になって実測データをもとに定量的に明らかにされつつある³⁾⁻⁷⁾。

しかし、沿岸域洋上のエネルギー資源開発にあたっては、洋上サイトにおいて期待される発電量の予測値や、海域における流況への影響の把握などに不確定要因が多く、今日に至るまで期待される開発が進んでいないのが現状である。

本研究は、将来の洋上風力発電事業化の推進に貢献することをめざしたものであり、比較的、自然条件に関する基礎データが整備されている太平洋沿岸に面した港湾海域を事例とし、洋上風力発電の可能性の海象条件検討手法を提案・紹介するものである。

2. 検討対象海域と気象海象データ

ここでは、我が国の太平洋沿岸に面するK港周辺沿岸海域を事例として検討を行った。図-1に検討対象海域を示す。検討対象域では、全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)の一環として水深24m地点で、海底設置式波高計と波向計による長期間の波高・周期・波向などの波浪観測データが蓄積されている。2006年以降はナウファス波浪観測データ収集システムが、切れ目のない連続観測に高度化されたことに伴い、沿岸波浪計(波向計)記録に基づく定常的な沿岸域における流況解析が可能になった⁸⁾。

また、港湾では定常的な沿岸風況観測が実施されており、さらに2002年11月から2003年10月にかけての1年間にわたって検討対象海域に最も近い海岸における沿岸風況観測も実施された。本稿では、これらの観測データをもとに検討を行った。

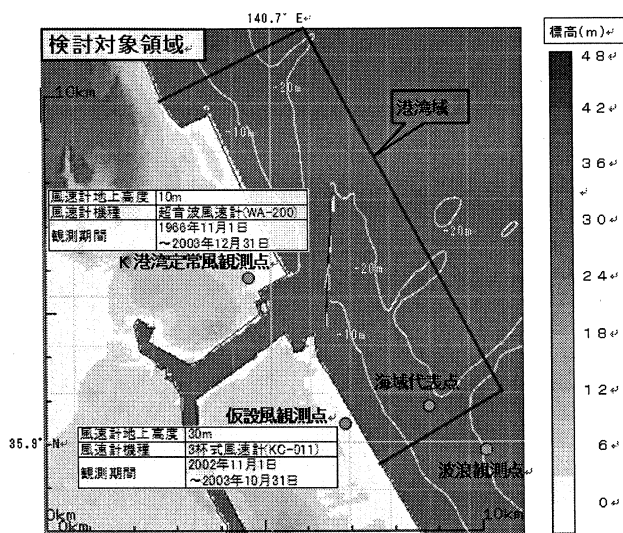


図-1 K 港周辺の検討対象海域と風と波の観測点

3. 洋上風の出現特性

洋上風況の推定にあたっては、長期間の風観測データを蓄積している港湾域沿岸風定常観測点と、検討対象海域直近沿岸の仮設観測点の実測データをもとに、LAWEPS モデル^{9),10)}による 3 次元風況シミュレーションを用いて実施した。表-1 にシミュレーションの実施条件の概略を示す。また、図-2 に 3 次元数値格子の設定の概要を表示する。

シミュレーションにあたっては、第 1 ステップとして、32 方位別の LAWEPS4 次領域計算結果を観測データで補正することで、2002 年 11 月 1 日～2003 年 10 月 31 日の 1 年間の風向・風速 3 次元的分布を算出した。その上で、4. で後述する 2MW 級の洋上風車を設置することを考え、ナセル高さに相当する海面高 80m における風速をもとに、想定される洋上風車のパワーカーブを乗じて、季節別および通年の期待発電量を算出した。

表-1 LAWEPS モデルによる風況シミュレーション

風況予測モデル	LAWEPS (2次領域気象モデル, 4次領域工学モデル)	
ネスティング	風向32方位別の気象モデル定常場から工学モデルへネスティング	
観測値による補正	工学モデル計算結果を鹿児島石油観風観測値で補正(風速の比による補正)	
LAWEPS 2次領域 気象モデル	計算領域	100km(X)×100km(Y)×9km(Z)
	水平格子間隔	1000m
	鉛直格子間隔	可変格子→最小20m, 最大400m
	安定度	全層で中立の温位勾配
	風速の鉛直分布	2000mで8m/sの地衡風を仮定し1/7乗分布で地上まで降ろした分布
LAWEPS 4次領域 工学モデル	計算領域	10.9km(X)×11.6km(Y)×5.0km(Z)
	水平格子間隔	可変格子→(DX)最小102m, 最大122m (DY)最小99m, 最大129m
	鉛直格子間隔	可変格子→最小1m, 最大477m
	使用乱流モデル	高Re型S-Ωモデル
	風速分布&安定度	気象モデルの結果からネスティング

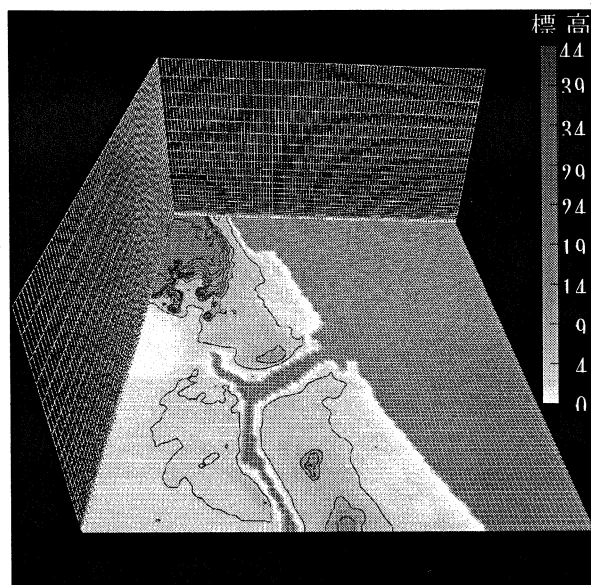


図-2 3 次元数値格子の設定

ここでは、K 港港湾区域内水深 15-50m 程度の数 km^2 ほどの範囲を検討海域と考えたが、シミュレーション結果では海域内での風況の相違は小さかったため、図-1 に示す海域代表点における風況として洋上風の出現特性をとりまとめた。

まず風向 32 方位別のシミュレーションを行い仮設観測点での観測値との風速比を算出する。その比で 3 次元シミュレーション結果を補正することで、2002 年 11 月から 2003 年 10 月までの 1 年間通年の海域代表点における風速経時変化を推定した。同様にして推定された定常観測点における推定結果と実測データを比較することによって、推定結果の妥当性の検証を行った。

図-3 に、検討結果の一例を時系列データとして表示する。また、図-4 に風速階級別出現頻度図の、図-5 に風配図の比較結果をあわせて表示する。

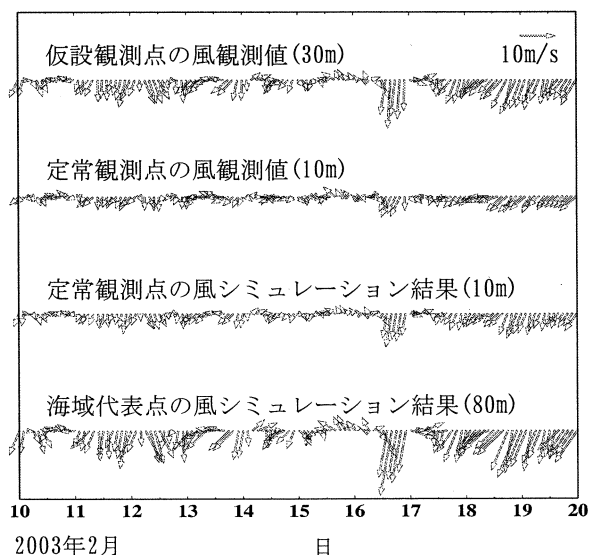


図-3 風況経時変化算定例

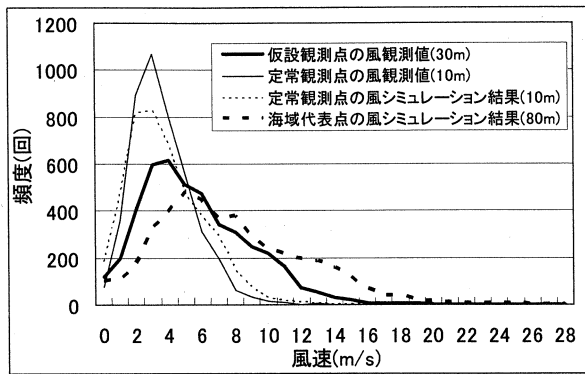


図-4 風速階級別出現頻度図の比較

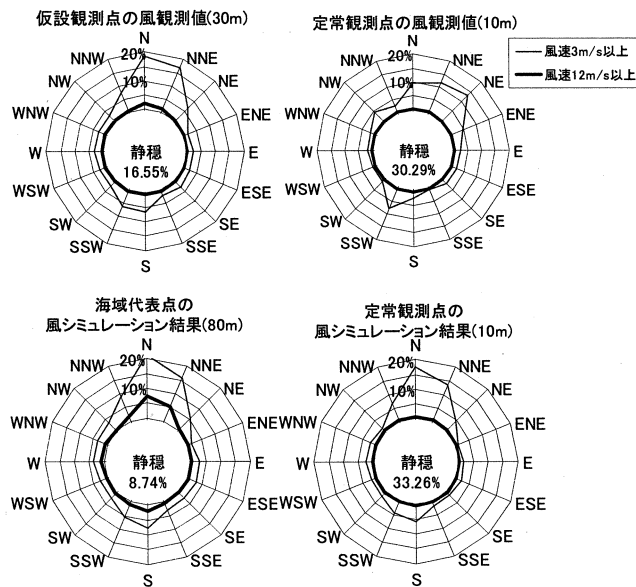


図-5 風配図の比較

図-6 は、定常風観測点における実測値と上記のシミュレーション結果を比較することによって得られた、再現性の検証結果を示す。シミュレーション結果は実測値と良好な相関を示している。回帰直線の傾きがほぼ 1.0 となっていることは、シミュレーション結果に偏りが少ないことを意味し、空間的な風況推定の信頼性が高いことを示唆している。

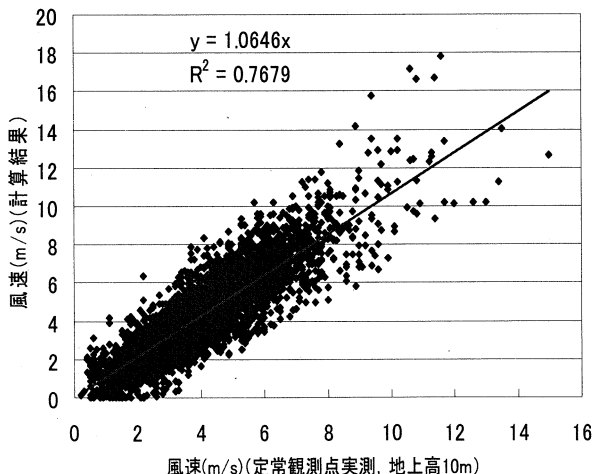


図-6 シミュレーション結果の検証結果

風圧力は、風車設計における外力条件としても重要である。定常観測点における既往最大の瞬間風速は 55.5m/s であったが、これをもとに極値統計解析を行った結果、海域代表点における 50 年確率瞬間風速は、海面高度 10m では 53.8m/s、2MW 級風車のナセル高さとして想定される海面高度 80m では、1/7 乗則を仮定し 72.7m/s と推定された。

4. 発電量予測

図-7 に海域設置を検討する 2MW 級風車の諸元を示し、図-8 にそのパワーカーブを示す。3. で得られた通年の時系列風とパワーカーブを用い、文献 11) と 12) に示す手法で推定される発電量の時系列変動を推定し、通年総発電量とその季節変動を推定した。図-9 に、海域代表点と沿岸陸域（定常風観測点）との月別・年間の発電総量の比較結果を示す。

図-5 に示されるように、陸上観測点では風速 12m/s を超える定格発電状態となる風況の出現頻度は極めて小さいのに対して、洋上では全方位をあわせると 10%を超える頻度で定格発電状態となるため、洋上における期待発電量は、図-9 に示されるとおり陸上の 3 倍程度となり、洋上では陸上に比べて非常に高い設備稼働率が期待されることがわかる。

また、洋上沖合の風車休止率（カットイン風速以下の風速の出現率）8.7%は、陸上における 30.3% に比べて低く、洋上は相対的に安定した発電量が得られることも同時に示されている。すなわち、洋上における風力発電は、同タイプの風車を陸上に設置する場合よりも、はるかに有効であることが改めて確認されたことになる。なお、風車は風向を向くように制御されるため、発電量予測にあたっては風向の影響は少ないと考えられる。

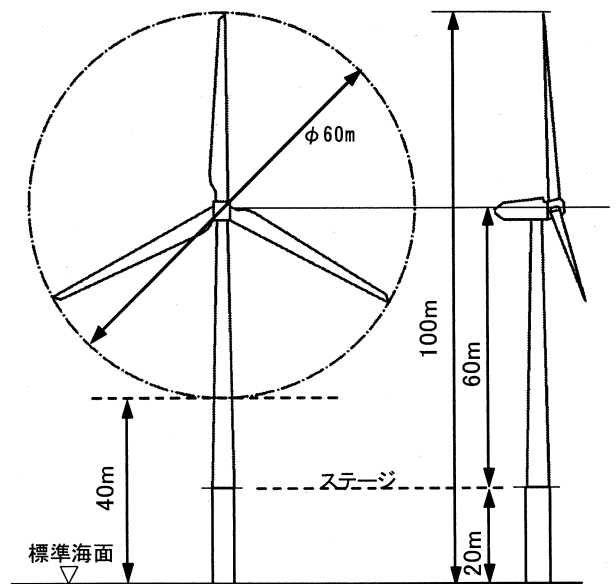


図-7 海域設置を検討する 2MW 級風車の諸元

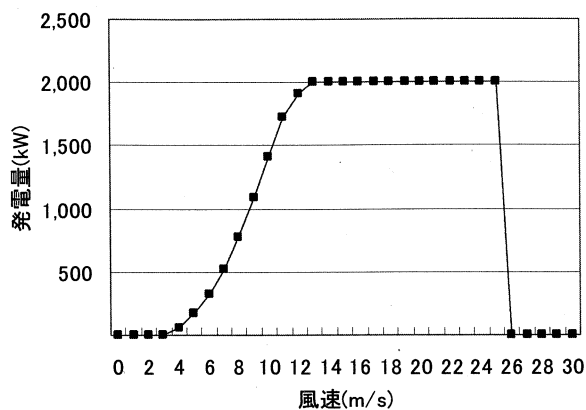


図-8 想定される風車のパワーカーブ

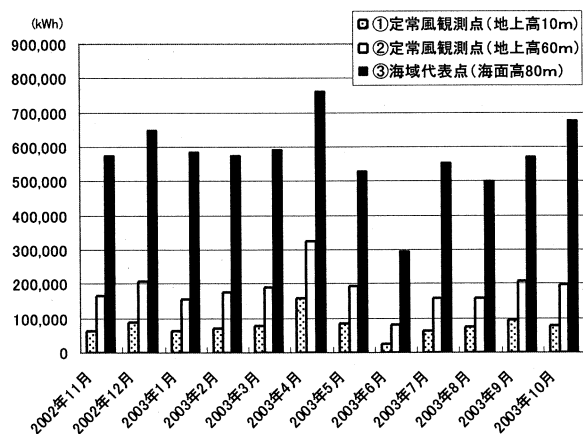


図-9 洋上と陸上の想定発電量の比較

表-2 カットイン風速以下の出現率と年平均風速

地点	3m/s未満の 風速出現率	年間発電量
①定常風観測点 (地盤高10m)	30.3(%)	942,762(kWh)
②定常風観測点 (地盤高60m)	16.6(%)	2,216,390(kWh)
③海域代表点 (海面高80m)	8.7(%)	6,869,339(kWh)

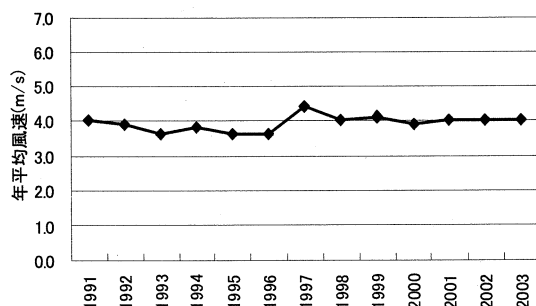


図-10 定常風観測点における平均風速の経年変動

図-10に、定常風観測点における年平均風速の長期経年変動を示す。上記の風況および発電量予測の検討対象とした2002-2003年の間は、特異な風況ではなく、平均的な1年間であったことが理解できる。

5. 波浪条件の検討

洋上風車などの海域構造物の設計外力としては、波浪条件の設定が重要となるが、K港およびその約50km北のH港沖合では、それぞれ、水深23mおよび30m地点でのナウファス海底設置式波浪計による長期間の波浪観測情報が蓄積されている^{13),14)}。このため、ここでは、実測波浪観測情報をもとに波浪条件の検討を行うことができた。

図-11に、K港沖における月別平均有義波を示す。この海域では、6-8月の夏場の月平均有義波高が約1.0mと比較的低く、台風に伴ううねりが来襲する10月には約1.7mと比較的高いが、これは、太平洋に面する我が国沿岸域における一般的な波浪特性として見られる特徴である。

表-2に、1984年から2007年までの24年間に観測された上位5ケースの高波の観測事例を示す。K港沖合の既往最大観測有義波高は、2005年1月16日12:00の観測(11:50-12:10)における7.50mであり、冬季の二つ玉低気圧によるものであった。しかし、K港に近いH港沖ではK港沖の波浪計が欠測であった2006年10月6日22:00の観測で台風崩れの低気圧によって既往最大有義波7.59mを観測しており、この時の高波によってK港周辺海域でもこれまでになかった高波災害を蒙っているため¹⁵⁾、既往最大波はこの時発生したと考えられる。

このため、ここでは、図-12に示すK港沖とH港沖の高波浪時におけるピーク有義波高の相関式をもとに、K港沖の既往最大有義波高を推定した。すなわち、H港における7.59mをもとに図中の相関式から得られる8.2mをK港沖の既往最大有義波高として考え、表-2に示す高波順位をずらした上で、極値統計解析によって50年確率波を算定した結果、有義波高8.7m、有義波周期14.0sを得た。

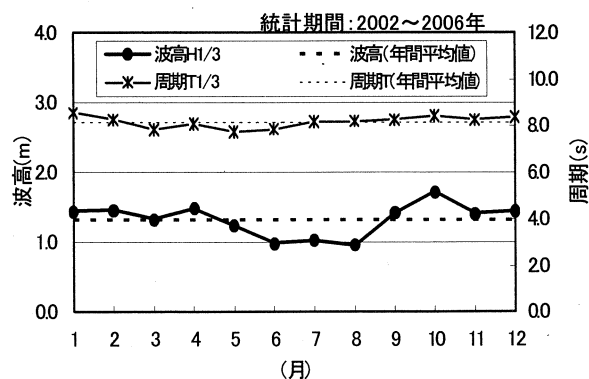


図-11 月別平均有義波 (2002~2006年)

表-3 K港沖波浪計による高波観測記録

順位	起 時	有 義 波		気 象 要 因
		H1/3(m)	T1/3(s)	
1	2005年 1月16日 12時	7.50	10.5	二つ玉低気圧
2	2001年 1月27日 20時	7.33	8.9	東方海上低気圧
3	2006年10月24日 20時	7.00	11.2	南岸低気圧
4	1993年 3月 9日 4時	6.70	13.7	東方海上低気圧からのうねり
5	1992年11月 8日 16時	6.69	12.6	台風9228号崩れの低気圧

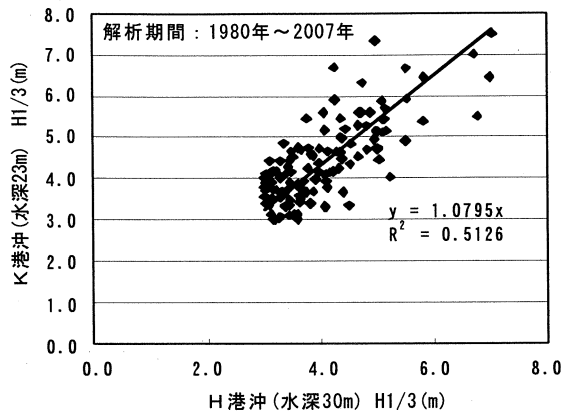


図-12 欠測既往最大波の推定

6. 流況条件の検討

海域の流況特性は、洋上風車の設計外力の設定や周辺海域環境への影響評価にあたって重要であるが、特に沿岸域沖合の流況については、これまで定常的な観測データの蓄積が少なく、十分な説明がなされていなかった。しかし、2006 年以降、全国港湾海洋波浪情報網における波浪観測データ収集システムが、切れ目のない連続観測に高度化されたことに伴い、沿岸波浪計（波向計）記録から定常的な沿岸域における流況解析が得られるようになったため、近年、波浪観測データをもとに沿岸域沖合における流況の解析が行われるようになった¹⁶⁾。ここでは、実測データをもとにした沿岸流況解析を試み、潮汐流成分と、それ以外の偏差成分との分離を行い、流れの時間変動を検討した結果¹⁷⁾、2 年間（2006-2007 年）の沿岸における 20 分間平均流の観測結果を調和分解し、観測結果を天文潮汐流とそれ以外の偏差流に分離した結果、偏差流は有義波高と関連が深く、気象擾乱時に大きな値となることが示された。

図-13 に 1 年間の連続実測流況観測結果（海面下 10m）から求めた主要 4 分潮成分と年周期（Sa）・半年周期（SSa）成分の潮流楕円図を示す。天文潮汐に対応すると考えられるいずれの分潮成分の潮流楕円は、皆、海岸線平行方向である NW-SE 方向に長軸を有しており、解析結果の妥当性を間接的に示していると考えられる。これらの分潮流速成分の片振幅は、いずれの分潮でも 1-3cm/s と小さく、天文潮汐に伴う流れ（いわゆる潮流）は数 cm/s オーダと小さいことが理解される。

図-14 は、有義波、東西方向成分流速 u および南北方向成分流速 v の経時変化の一例を示したものであるが、低波浪時には天文潮汐流（計算値）と実測値は比較的近い値であり、ここでも、調和分解計算に基づく天文潮汐に伴う流れの予測の妥当性を間接的に示している。しかし、高波浪時には、20 分間平均流速は、調和分解計算結果から予測される流速よりもオーダが大きい強い流れが観測されており、高波浪時の流れは、偏差流成分が支配的となっている。

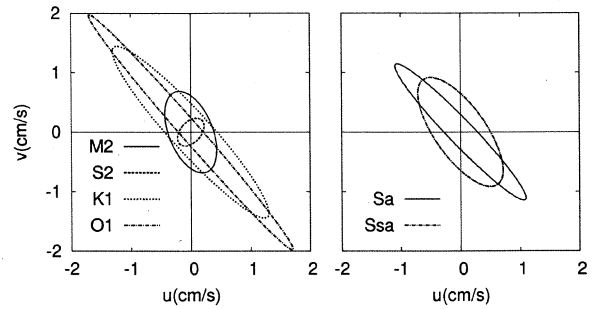


図-13 主要分潮の潮流楕円

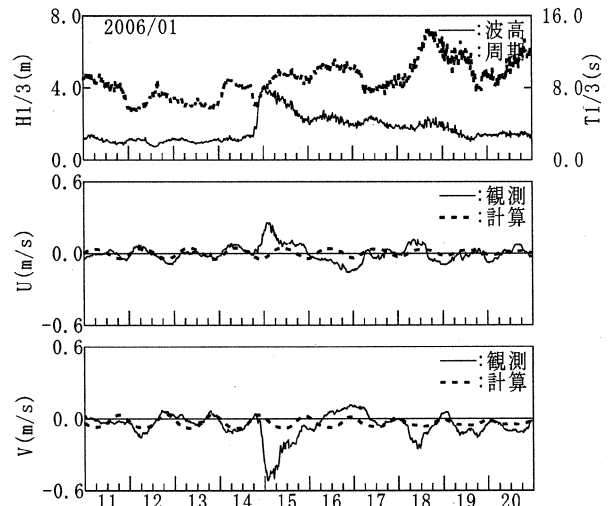


図-14 天文潮汐流計算値と実測流の比較

図-15 に有義波高 2.5m 以上の高波浪ピーク時における有義波高と偏差流速との関係を示す。両者は良好な相関を示しており、偏差成分流速は波高によってある程度推定可能であることがわかる。図中の相関式に、5. で算定した 50 年確率有義波高 8.7m をあてはめると、50 年確率偏差流速は 1.46m/s となるが、この値は、実測の 20 分間最大流速である 1.28m/s（2006 年 10 月 24 日 12:30-12:50）と比較しても矛盾のない値である。こうした波浪計による連続的な流況観測結果の整理法は、今後の海象環境解析に有益な手法となることが期待される。

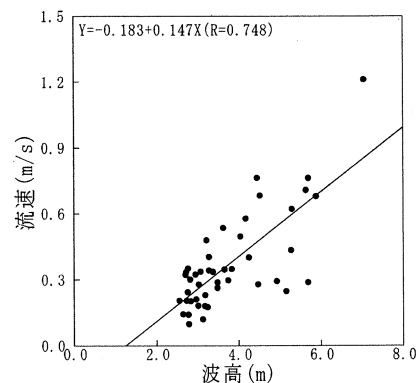


図-15 有義波高と偏差流速

7. まとめ

以上、本稿では、将来のクリーンエネルギーとして注目される洋上風力発電のF/Sにおける自然条件検討事例として、風況、風況から導かれる予測発電量、波浪、流況のそれぞれの推定・予測方法について、現地観測データをもとに紹介した。特に、通年実測データに基づく沖合流れの偏差成分を定量的に評価する手法は、ナウファスの改良に基づく新しい解析法であり、今後の汎用的な活用が期待される。

洋上風力発電は、次世代のクリーンエネルギー供給源として、さまざまな沿岸域でそのF/Sが行われるようになりつつある¹⁸⁾。しかし、沿岸域や海洋には、生態系や漁業資源の保全、船舶航行の安全、海水面の合理的な利用計画などの観点から、さまざまな利害関係者が存在し、こうした多くの関係者の合意形成がなければ洋上ウィンドファームの実現は困難である。また、事業者計画者側から見ると、施設の安全性や経済性を確認するためには、信頼性の高い期待発電量や設計条件の設定がなされなければ、事業化に着手することは困難であろう。

こうした合意形成や事業性の確認のためには、信頼性の高い現地実測データに基づく風・波・流れといった基礎的な海象環境情報に基づく精緻な検討が要請されることは、言うまでもない。本稿が、今後、さまざまな沿岸海域における洋上風力発電のF/S調査の参考となり、洋上風力発電の推進に資することができれば、著者および関係者一同にとって何よりの幸せである。

謝辞

本稿では、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託をいただき実施した平成20年度洋上風力発電実証研究F/S調査(海域調査)の成果の一部を紹介させていただいた。また、本稿で紹介した沿岸風・波浪・流況の現地観測データは、関東地方整備局をはじめとするナウファスに関与される多くの担当の方々の日常からの不断のご努力によって始めて得られたものである。最後に、本稿のとりまとめにあたっては、本研究チームのアドバイザーである足利工業大学の牛山泉学長(教授)のご指導をいただいたことを述べ、これらの方々に、改めて謝意を表する。

参考文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成18年度洋上風力発電導入のための技術的課題に関する調査報告書，167p.，2007.
- 2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成19年度洋上風力発電実証研究F/Sに係わる先行調査報告書，123p.，2008.
- 3) 永井紀彦・橋本典明・横井博志・鈴木善光・魚崎耕平：観測データに基づく沿岸域および海上の風出現特性の検討，土木学会，第27回土木学会関東支部技術研究発表会講演集 pp.374-375，2000.
- 4) 永井紀彦・菅原一晃・佐藤和敏・川口浩二：我が国沿岸の風観測結果に基づく風力エネルギーの試算，港湾空港技術研究所資料 No.999，59P.，2001.
- 5) 永井紀彦・勝海務・岡島伸行・隅田耕二・久高将信：NOWPHAS データより推定した洋上沿岸域での風力発電の可能性，土木学会，海洋開発論文集 第17巻，pp.19-24，2001.
- 6) 永井紀彦・小川英明・中村篤・鈴木靖・額田恭史：観測データに基づく沿岸域風力エネルギーの出現特性，土木学会，海岸工学論文集 第50巻，pp.1306-1310，2003.
- 7) 永井紀彦：風力エネルギー活用の観点から見た沿岸域洋上風力の特性，港湾空港技術研究所資料 No.1034，34p.，2002.
- 8) 永井紀彦・小川英明・額田恭史・久高将信：波浪計ネットワークによる沖合津波観測システムの構築と運用，土木学会，海洋開発論文集 第20巻，pp.173-178，2004.
- 9) 鈴木靖・宇都宮好博・三嶋宣明・橋本典明・永井紀彦：局所的風況予測モデル LAWEPS による海上風推定，土木学会，海洋開発論文集 第19巻，pp.49-52，2003.
- 10) 大塚清敏・村上周三・持田灯・片岡浩人・加藤信介：局所風況モデル LAWEPS による複雑地形上の風のシミュレーション，日本建築学会大会学術講演概要集(東海)，pp.705-706，2003.
- 11) 永井紀彦・牛山泉・根本泰行・川西和昭・額田恭史・鈴木靖・乙津孝之：現地利用型エネルギー活用をめざした沿岸風力照明システムの検討，海洋調査技術学会，海洋調査技術 Vol.17 No.1，pp.1-12，2005.
- 12) 永井紀彦・下迫健一郎・牛山泉・根本泰行・川西和昭・塚本泰弘：沿岸風力照明システムの計画・設計に関する検討一点灯稼働率事前予測法の開発などについて，港湾空港技術研究所資料 No.1105，23p.，2005.
- 13) 永井紀彦：全国港湾海洋波浪観測30年統計(NOWPHAS 1970-1999)，港湾空港技術研究所資料 No.1035，388p.，2002.
- 14) 清水勝義・佐々木誠・永井紀彦：全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2006)，港湾空港技術研究所資料 No.1172，94p.，2007.
- 15) 清水勝義・佐々木誠・永井紀彦：2006年の台風等による高波の観測結果(NOWPHAS 2006 特別号)，港湾空港技術研究所資料 No.1160，42p.，2007.
- 16) 横田雅紀・山城賢・橋本典明・永井紀彦：海象計による流況観測結果を用いた恒流参考文献季節変動特性に関する検討，土木学会，海洋開発論文集 第23巻，pp.615-620，2007.
- 17) 田中陽二・永井紀彦・鈴木高二郎・清水勝義：海象計による流況観測データを用いた東京湾第二海保における残差流の変動特性に関する解析，港湾空港技術研究所資料，No.1168，2007.
- 18) 鈴木高二郎・永井紀彦・柳嶋慎一・久高将信・小川路加：東京湾富津岬以北における洋上風力発電の可能性について，土木学会，海洋開発論文集 Vol.24，pp.129-133，2008.