洋上風の乱れと波浪との同時生起性に関する 実証的検討

STUDY ON OFFSHORE WIND CHARACTERISTICS IN JAPANESE COASTAL REGION BASED ON FIELD OBSERVATION DATA

永井紀彦¹・川口浩二²・吉村豊³・吉岡健⁴
・谷川亮一⁵・青木功⁶

Toshihiko NAGAI, Koji KAWAGUCHI, Yutaka YOSHIMURA, Takeshi YOSHIOKA,
Ryoichi TANAKAWA and Isao AOKI

¹フェロー 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所 客員研究官 (〒239-0826横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所 海洋情報研究領域海象情報研究チームリーダー (同上)

³非会員 工修 電源開発(株) 環境エネルギー事業部風力事業室長代理 (〒104-8165中央区銀座6-15-1)

⁴正会員 工修 電源開発(株) 大間現地本部 大間原子力建設所 土木G
(〒039-4602青森県下北郡大間町大字奥戸字小奥戸281)

⁵非会員 修(環境科学) 伊藤忠テクノソリューションズ(株) 科学システム事業部
新エネルギー・インフラ事業推進部新エネルギー課長 (〒100-6080千代田区霞が関3-2-5霞が関ビル)
⁶非会員 修(環境科学) 伊藤忠テクノソリューションズ(株) 同事業部同部 新エネルギー課 (同上)

Offshore wind farms have not yet been realized in Japan except for some plants near shore although they are desirable to promote the economy's sustainable growth with less CO₂ emission. This paper introduces an example of a marine conditional study for offshore wind farm design, using NOWPHAS (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbors) data and newly developed numerical simulation system which is able to obtain meteorological and oceanographic phenomena at one time. The study aims to adapting the setting method of external condition in Japanese sea area to the design standard for offshore wind turbines of IEC 61400-3. Especially, statistical correlativity of the offshore waves and winds is important to estimate the external force acting on support structure.

Key Words : NOWPHAS, GPS Buoy, Wind Turbulence, Wave-Wind Joint Statistics, Wind Power

1. はじめに

広大なEEZを有する日本にとっては海洋エネルギーの活用が重要であるが、これまで沿岸海域(特に外洋)における風・波・流れなどの海象データは十分とはいえず難しかった。したがって、洋上構造物の設計条件に不確実性が大きく、洋上風力エネルギーのポテンシャルの把握が困難となり、その重要性は認められつつも、海洋エネルギーの活用面で日本は西欧諸国に遅れをとっているのが現状である。

本稿では、国土交通省港湾局関係機関の相互協力によって開発・展開されたGPS波浪計などのNOWPHAS(全国港湾海洋波浪情報網)海象観測の現状を述べ¹⁾、洋上風力発電実用化に向けたNOWPHAS海象観測情報の活用の検討事例を示す。すなわち、これまで観測データが少なかった洋上での風観測データに注目し、海洋構造物への外力条件として重

要となる洋上風の乱れ、および、海洋構造物の設計条件設定の上で重要となる洋上風と波浪との同時生起性²⁾についての、実証的検討結果を紹介する。

2. 検討対象とした海象観測データ

図-1にNOWPHAS観測網を示す。NOWPHASでは、海象計に代表される海底設置式波浪計、および、GPS波浪計によって、沖合および沿岸の波浪の常時連続観測を実施している。また、GPS波浪計では洋上風の観測も実施している³⁾⁻⁶⁾。これらの波浪観測機器に加えて、NOWPHASでは沿岸潮位や沿岸域での風観測も実施されている。NOWPHASの風観測は、沿岸域陸上の港湾事務所等の近傍で実施されているものが多いが、波浪観測拠点と一体的に洋上の観測塔・島・岩礁の上で洋上風を直接観測している観測点も存在

している．ここでは，外洋沖合で波浪と洋上風を一体的に観測しているGPS波浪計と，洋上の観測塔・島・岩礁の上で洋上風を直接観測している観測点を検討対象観測点として選んだ^{7),8)}．表-1に，検討対象とした波浪観測点の水深と風観測点の高さを示す．なお，GPS波浪計に取り付けられた風向風速計は，海面高7mである．

図-1 全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS)

表-1 検討対象としたNOWPHAS 洋上風測地点の観測条件

固定点洋上風観測点				GPS波浪計	
地点名	機種	標高(m)	地上高(m)	地点名	水深(m)
藍島	超音波	22.0	10.0	青森県東岸沖	87
玄界灘	超音波	95.0	24.6	三重県沖	210
小松島	風車型	0.0	15.4	和歌山県沖	201
				高知県西部沖	309

3. GPS波浪計による風観測記録の課題

図-2は，GPS波浪計の上下揺と横揺の波浪応答特性を示したものであるが，周期5s程度以下で共振による応答増加が顕著に見られることがわかる⁹⁾．

図-2 GPS波浪計の波浪応答特性

図-3は，ブイ動揺補正法の比較（単純差分補正と5次ラグランジェの内挿公式適用の比較）を検討し

たものであり，周期4sの規則的なブイ変位を仮定したときの，位相差および動揺振幅について，単純差分法および5次ラグランジェの内挿公式法を比較したものである．ここに5次ラグランジェの内挿公式法とは，式(1)の単純差分法で生ずる $\Delta t/2$ の位相差を避ける手法であり，式(2)で示されるその点の前後を含んだ5点の値からI時刻の微分値を求める手法である¹⁰⁾．しかし，図からわかるように，たとえ5次ラグランジェの内挿公式法を用いても，周期4sの正弦動揺を1s間隔のデータサンプリングで変位計測し速度を推定すると，真値よりも変動振幅を過小評価する．すなわち，GPS波浪計搭載の風向風速計で得られる周期の短い風速変動については，1s間隔の位置座標データを用いても，補正が困難である．

$$(dX_{i+0.5}/dt) = (X_{i+1} - X_i) / \Delta t \quad (1)$$

$$(dX/dt)_i = (X_{i-2} - 8X_{i-1} + 8X_{i+1} - X_{i+2}) / (12\Delta t) \quad (2)$$

図-3 1sサンプルデータからの変動風速推定精度

さらに，GPS波浪計に搭載されている風向風速計はプロペラ型であり，プロペラの慣性によってあまり周期の短い変動には風向風速計は追従できない問題も忘れてはならない．

こうした，洋上風の乱れの検討にあたってのGPS波浪計の風観測の課題，すなわち，a) 上下揺と横揺の固有周期に対応する周期5s以下のブイの動揺が大きいこと，b) データサンプリング間隔が1sであるため周期4s以下の短周期変動の観測が困難であること，c) プロペラ型の風向風速計であるため周期の短い風変動に応答できないこと，などをふまえた工夫が必要である．このため，本稿では，風観測波形記録を再編集し周期10s以上の変動成分だけを抽出した．これよりも短周期の変動の定量的評価については，超音波式固定点での洋上風観測が行われている観測点のデータでそのエネルギー比率を評価し，洋上風の乱れ特性を評価した．大水深洋上における波浪と風との相関性は，有義波-10分間平均風速レベルと個別波-ピーク3秒間平均風レベルとの，2段階でとりまとめた．相関性は，波高と風速との回帰式を求め，その相関の強さ（相関係数 r ）等のパラメータで整理した．

4. 観測された洋上風の変動特性

典型的な高波浪時における洋上風速の時間変動を図-4に示す。高波浪時であってもうねり等の影響により平均風速はさまざまである。風速の変動周期も多様であることがわかるが、波周期よりは若干長めの周期20-30s程度の変動が支配的となっているように見える。また、10分間の中で風速は変動するものの、その変動幅は波高に比べれば小さく、10分間の中で無風状態が生じたり、平均風速の2倍以上の瞬間風速が生じたりするような極端な風速変動は見られなかった。なお、図-4に示す4事例は、後述する表-2に対応する高波浪時の観測事例である。

図-4 GPS波浪計による洋上風の変動解析例

洋上固定点で超音波式風向風速計による観測記録のスペクトル解析の結果を図-5に示す。横軸は、10分間平均風速を示し、2008年を通じた各20分毎に取得された10分間風観測結果毎にプロットを示している。プロットに対応する左縦軸は、各観測における風速変動の標準偏差を示し、太い直線は観測点毎の標準偏差の平均値を意味している。また、右縦軸は、風速変動の標準偏差に対応する平均風速で除した値、すなわち風の乱れ強度を意味しており、図中の太い曲線は右縦軸に対応した、平均風速毎の風の乱れ強度の平均値を示している。図から、風速変動の標準偏差は風速が大きいほど大きくなる弱い正の相関関係が見られるのと同時に、乱れ強度は風速によってあまり大きくは変動せず観測点毎にほぼ一定の平均値を示している。すなわち、洋上の観測塔上の小松島で0.1程度、離島観測点で若干の周辺地形の影響を受ける玄界灘と藍島で0.2程度の値であり、既往の検討結果^{6),7)}とよく対応している。

図-6は、図-5に示す各観測毎に周波数スペクトル解析を行い、洋上に固定された風観測点における、全風速変動の中の周期10s以上の長周期変動成分の風速変動が占めるエネルギー比を、左縦軸に示した

ものである。また、プロットは2008年を通じた各20分毎に取得された10分間風観測結果毎の値であり、太直線はその平均値を意味している。なお、右縦軸および太曲線は図-5と同じであるが、後述する図-7との対比のため敢えて再掲した。いずれの洋上風固定観測点でも、変動成分の95%程度が周期10s以上の長周期成分となっており、また、その割合は風速階級によってもあまり変わらないことがわかる。

図-7は、図-6と同じ整理をGPS波浪計による風観測記録に対して行ったものである。GPS波浪計は、図-2で前述したとおり、横揺と上下揺の固有周期が周期5s程度以下であるため、結果として周期10s以下の長周期変動成分の割合は洋上風固定観測点の図-6よりも若干小さく、85-90%程度となっている。しかしながら、大部分の風速変動は周期10s以上の長周期成分であることには変わりなく、風観測波形記録を再編集し周期10s以上の変動成分だけを抽出する整理法によっても、洋上風の乱れ強度を、ほぼ正確に把握できることが明らかにされた。

図-7の右縦軸に対応する太曲線は、GPS波浪計によって観測された洋上風の乱れ強度を風速の関数として示した結果であるが、10分間平均風速が5m/sを超える条件では、乱れ強度は風速にはよらず、0.12程度のほぼ一定値を示していることが分かる。このことは、GPS波浪計の風観測高度が海面上わずか7mであることを考えあわせると、洋上風は陸上に比べて非常に乱れ強度が小さい値となることを示唆しているものである。

5. 風と波の同時生起性の検討

(1) 有義波を用いた検討

図-8 GPS波浪計による有義波高と平均風速相関解析例

図-5 平均風速と風速変動量（洋上固定点）

図-6 スペクトル解析に基づく風速変動比（洋上固定点）

図-7 スペクトル解析に基づく風速変動比（GPS波浪計）

図-8は、有義波レベルでの波浪と平均風との相関解析の結果の一例であり、和歌山県沖における解析結果を示したものである。上の図は北風の条件に絞りとりまとめたものであり、下の図は全風向について整理したものである。波浪には、遠方海域より伝播してくるうねり成分も含まれているため、風速と波高は必ずしも1対1には対応しない。このため、波浪と風の相関を考察するためには、うねりと風波とを区分する何らかの条件付けが必要であるが、波向き別の整理により相関性は向上することが、改めて明らかにされた。

(2) 個別波を用いた検討

表-2に、個別波を用いた波と瞬間風の関係検討対象事例を、20分単位の観測時分とともに示す。

図-9は、個別波レベルでの洋上風と波浪の相関解析の一例であり、表-2に示す高知県沖の強風時における20分間における159波の個別波高と個別波中のピーク3s平均風速をプロットしたものである。波群中の個別波高と瞬間風速との相関は極めて低く、ほとんど無相関と言ってもよいことがわかる。

図-9 GPS波浪計による個別波高と瞬間風速の相関例

高波浪時における他の観測事例でも、個別波レベルでの波高と瞬間風速との相関性は、図-9に示すように $r=0.2$ 程度以下の極めて低い値であった。

図-10は、相関係数 r が有義波高や平均風速によってどう変化するかを検討したものであり、図-7で示したGPS波浪計による観測データに関して、各年間上位500観測の有義波高を記録した高波浪時における、個別波高と、個別波中のピーク3s平均風速および平均風速との、各相関係数を示したものである。縦軸に20分の観測から得られる有義波高を、横軸に当該20分間中の前半10分間の平均風速を示し、各観測時点毎に凡例に示すプロットの大きさで相関係数 r の大きさを表示した。図からわかるように、両者の相関関係が認められると考えられる r が0.5以上となるプロットは極めて少なく、個別波高とその個別波に対応する風速との相関性は極めて低いことが示された。個別波に対応する代表風速としては、IEC基準が定める3s間平均極大風速¹¹⁾の他に、当該個別波周期中の平均風速に対する相関性の検討も下の図で行ったが、相関性はさらに低いことが確認された。このことは、最大風速と最高波高が同時に生起する可能性は極めて低く、IECの基準で定められているように洋上風車の支持構造物の設計においては、どちらか一方の荷重を低減することが可能であるこ

とを意味する¹¹⁾。なお、瞬間風速と個別波高の出現頻度分布（確率密度関数）は、個別事例ごとには理論的分布（波高はレーリー分布、風速は正規分布）と若干異なる分布形状も見られたものの、平均的に見れば、ともに理論的分布と実際の分布はよく一致していた。今後は、こうした知見を活かし、信頼性理論に基づく同時生起確率により、最適な風作用と波作用の組合せ方法を検討する予定である。

6. まとめと今後の課題

以上、現在のNOWPHASデータをもとに、洋上風の乱れと波浪との同時生起性についての検討を行い、以下の結果を得ることができた。

①洋上風の乱れ強度として現れる時間変動は周期10s以上の長周期変動成分のエネルギーが大部分を占めるため、ブイの動揺特性、データサンプリング間隔、風速計の性質などによって短周期風速変動の把握が困難であると考えられるGPS波浪計によっても、風観測記録を再編集し周期10s以上の変動成分だけを抽出することによって、洋上風の乱れ強度が概ね適切に得ることができると考えられる。

表-2 GPS 波浪計による個別波高と対応瞬間風速との相関性検討例

地点名	年月日時分	波数	H1/3	T1/3	波向	平均風速	風向	感度a	相関係数r
高知県西部沖	2008/09/19 07:20	159	4.62m	8.1s	----	28.0m/s	NE	0.09	0.21
三重県沖	2008/09/19 17:00	177	4.17m	7.5s	ENE	22.1m/s	NNE	0.12	0.19
青森県東岸沖	2008/04/01 17:40	137	6.02m	12.0s	ENE	16.5m/s	NW	0.90	0.23
和歌山県沖	2008/04/24 10:20	169	4.28m	8.0s	S	11.0m/s	S	0.03	0.05

図-10 有義波高と平均風速に対応した相関係数 r の値

図-11 北九州沖に建設が予定されている洋上観測塔

②GPS波浪計によって観測された洋上風の乱れ強度は、10分間平均風速が5m/sを超える条件では、風速にはよらず0.12程度のほぼ一定値を示した。このことは、GPS波浪計の風観測高度が海面上わずか7mであることを考えあわせると、洋上風は陸上に比べて非常に乱れ強度が小さい値となることを示唆する。

③有義波レベルでの波浪と平均風との相関の考察にあたっては、うねりと風波とを区分する何らかの条件付けが必要であり、波向き別の整理によって相関性が向上することが明らかにされた。

④個別波レベルでの波高と瞬間風速との相関性は極めて低いことが確認され、IECの基準で定められているように洋上風車の支持構造物の設計においては、どちらか一方の荷重を低減する考え方が妥当なものであることが確認された。

しかし、こうした知見は、GPS波浪計による海面高度7mという極めて低い観測点の風観測データに基づくものであり、大型洋上風車のハブ高さとして想定される海面上50-100mといった高度における風況を必ずしも示すものではないことには留意が必要である。このため、現在、北九州港沖に図-11に示すような海象計による波浪観測を伴う洋上風の鉛直分布特性を明らかにするための洋上観測塔の建設が進

められつつある。こうした詳細な洋上風および波浪の観測データに基づき、特に④については、信頼性理論に基づく同時生起確率の検討を踏まえ、最適な風作用と波作用の組合せ方法を提案したいと考えている。

謝辞：本稿は、NOWPHASの波浪や洋上風の観測成果に基づく研究成果であり、日頃からNOWPHAS観測網の構築・運用・信頼性確保に従事されている国土交通省港湾局関係機関の多数の方々のご尽力の上で、とりまとめることができたものである。また、本稿は、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（北九州沖）成果の一部を紹介するものでもある。さらに、本稿のとりまとめにあたっては、(株)エコーの久高将信様および仲井圭二様のご助力をいただいた。これらの方々に、改めて謝意を表する。

参考文献

- 1) <http://www.mlitt.go.jp/kowan/nowphas/>
- 2) 長尾毅・吉岡健：性能設計における相関を有する波浪・風作用の組み合わせ方法に関する研究，構造工学論文集，Vol. 56A，pp. 217-226，2010.
- 3) 永井紀彦・清水勝義・李在炯・藤田孝・久高将信・額田恭史：ブイの動揺を考慮した GPS 波浪計による洋上風観測，海洋開発論文集，第 23 巻，pp. 1003-1008，2007.
- 4) 永井紀彦・清水勝義・佐々木誠：太平洋北東岸 GPS 波浪計観測網が捉えた大水深域における海象特性，港湾空港技術研究所報告，第 47 巻 Vol. 2，pp. 1-52，2008.
- 5) Nagai, T., Kawaguchi, K., Yoshimura, Y., Yoshioka, T., Tanikawa, R. and Aoki, I.: Study on Offshore Wind Turbines in Japan using NOWPHAS Data, Proc. Techno-Ocean 2010, CD-ROM
- 6) 永井紀彦・川口浩二・吉村豊・吉岡健・谷川亮一・青木功：日本沿岸の洋上風力発電立地に向けた NOWPHAS 海象情報の活用，海洋調査技術学会，第 22 回研究成果発表会講演要旨集，pp. 34-35，2010.
- 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・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.
- 9) 清水勝義・永井紀彦・里見茂・李在炯・久高将信・藤田孝：ブイ動揺特性を考慮した大水深波浪観測データ処理システムの構築，土木学会，海岸工学論文集 第 53 巻，pp. 1406-1410，2006.
- 10) 安田仁彦：数値解析基礎，コロナ社，208p.，2008.
- 11) International Electro-technical Commission: "Wind turbines - Part 3, Design requirements for offshore wind turbines", IEC 61400-3, 128p.，2009.