

全国沿岸の洋上風解析のための予備的検討 —— 実測データに基づく三杯式風速計の応答特性について ——

(独法) 港湾空港技術研究所 客員研究官 フェロー ○永井紀彦
 (独法) 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域 混相流体研究チームリーダー 正会員 藤田勇
 (独法) 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域 混相流体研究チーム 正会員 松崎義孝
 電源開発(株) 環境エネルギー事業部 風力事業室長代理 吉村豊
 伊藤忠テクノソリューションズ(株) 科学システム事業部 新エネルギー課長 谷川亮一
 (株) エコー 防災・水工部 部長 正会員 仲井圭二

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言い難かった。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、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。特に、洋上風の変動特性の把握は、着底式や浮体式の洋上風力発電施設の耐疲労設計などを行う際、重要な外力条件となるが、洋上風の観測データが不足しているため、洋上風力発電システムの耐疲労設計法の確立は、今後の重要な技術開発課題となっている。

このため、著者らは、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から補助を頂き、北九州市の沖合に洋上風況観測塔を建設し、さまざまな海面高度における各種風速計による洋上風況観測に取り組みつつある。しかし、たとえ北九州市沖における洋上風の変動特性が把握されたとしても、それはあくまでも特定地点における観測記録であり、我が国の沿岸全域の洋上風の出現特性を明らかに示すことができるものではない。洋上風況観測塔の建設は多くの費用を要するため、北九州市沖以外の海域の洋上風の出現特性を明らかにするためには、GPS 波浪計など既存の洋上風況観測情報を有効に活用する必要がある。

本稿は、海洋構造物への外力条件として重要な洋上風の乱れについての、実証的な予備的検討結果を紹介するものである。

キーワード 洋上風, 三杯式風速計, 比較観測

〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1 港湾空港技術研究所

TEL 046-844-5010 E-mail nagai@pari.go.jp

2. GPS 波浪計による洋上風観測データの特徴

洋上の波浪・津波および風を観測する GPS 波浪計は、国土交通省港湾局関係機関によって構築・運営されているナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)の一環として、2011年3月現在、全国沿岸の沖合約 20km の大水深海域に 11 基配備されており、さらなる観測点数の増強が検討されている。GPS 波浪計に取り付けられた風速計は、電源等の制約によってこれまでのところ超音波式を用いることができず、プロペラ式となっているが、海面高約 7m という比較的海面に近い低高度の洋上風を連続的に観測している。

洋上風の出現特性の、特に乱れの検討にあたっての GPS 波浪計による風況観測の課題として、筆者らは以下の 3 項目を取り上げた¹⁾。a) 上下動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) プロペラ式の風速計であるため周期の短い風速変動に応答できないこと、である。

これらのうち a) と b) については、既に定量的な検討を行い¹⁾、洋上風の変動の大部分を占める周波数が周期 10s 以上の比較的周期の長い変動成分であることを示したうえで、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ことによって、変動量の標準偏差を平均風速で除した値として定義される乱れ強度というパラメータを用いた評価を行った。

本稿では残る c) の問題を検討するため、港湾空港技術研究所(港空研)構内の久里浜湾護岸近くに設置された超音波式および三杯式の風速計による比較を通じた実証的な検討結果を述べる。

言うまでもなく、プロペラ式と三杯式とでは風

速計の応答特性が異なっていることが、既往の文献^{2), 3)}でも紹介されている。しかし、プロペラ式と三杯式は、ともにプロペラや風杯の機械的な回転運動から風速を推定する回転機械式の風速計測という観点で共通している。そして、回転機械式の風速計は、回転体の慣性の影響を受けるため、超音波式とは異なり、変化の早い風速変動には必ずしも十分に応答することはできない。こうした回転機械式風速計の応答特性について、これまで平均風速についての比較検証は行われてきたものの、回転体の慣性を周波数応答関数として整理し、周波数毎の応答特性を示した報告例は、ほとんど紹介されていなかった。

3. 港空研構内の風況観測

港空研では、2010年から写真-1に示すような、風速計および小型風車(1kW)の性能を検討・検証する実証試験施設を有している。ここでは、東京湾口に位置する久里浜湾沿岸の護岸近くの地盤高5.2mの位置に、水平距離で1m離れた位置に設置された超音波式と三杯式の風速計の観測データの比較検討結果を紹介する。それぞれの風速計のデータサンプリング間隔は1sであり、連続観測を実施している⁴⁾。三杯式と超音波式の風速計は、ブリード034SA型とYoung CYG-81000型である。



写真-1 風向風速計の設置状況

本稿では、強風時および弱風時を含む、2011年6月5日、9日、18日および24日の合計4日間の観測データを対象とした。データのとりまとめは1時間毎に行い、毎時0分0秒から始まる2078データ(約34.6分)をもとに平均風速と風速変動の標準偏差を算定した。その上で、標準偏差を平

均風速で除した乱れ強度を毎時算定した。さらに、毎時0分15秒から始まる2048データ(約34.1分)を対象にFFT法による周波数スペクトル計算を行い、風速変動の周波数スペクトル形状を求めた。

周波数スペクトルの平滑化にあたっては、ナウファス波浪データ解析に倣い、移動幅を8データとする中心を含む片側8個の三角フィルターを施すこととした⁵⁾。とりまとめにあたっては、超音波式による周波数スペクトルを真値と仮定し、三杯式による周波数スペクトルの応答を周波数応答関数として求めた。なお、周波数応答関数の算定における異常値を排除するため、一定の閾値を設け、両者のスペクトル密度が閾値を超える有為な値を示す場合に限り、周波数応答関数を算定することとした。

4. 平均風速および標準偏差(乱れ強度)の特性

図-1は、平均風速の比較を示したものであり、▲は絶対値の比較、●は風速比を示している。

平均風速が5m/sを超える強風時においては、縦軸の値が1.0よりわずかに大きくなっているが、これは回転する風杯の慣性によると考えられる。しかし、その差はわずかであるので、2m/sを超える条件下では、両者の観測結果は概ねよく一致しているといえる。

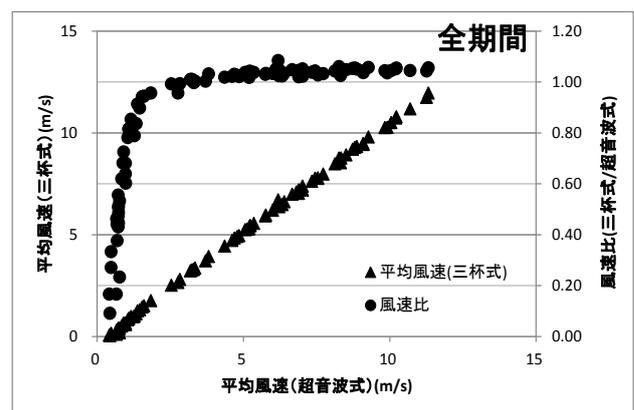


図-1 平均風速の比較

平均風速が2m/s以下の弱風時においては、三杯式の回転体等の慣性の影響が現れるため、三杯式風速計による平均風速観測結果は十分に風に応答しないことから、超音波式に比べて過小な平均風

速を示すものと考えられる。もっとも通常の風力発電システムでは、発電限界となるいわゆるカットイン風速は3m/s-5m/sであるため、このような弱風時における三杯式の観測記録の問題は、洋上風車の発電量予測や、ましてや洋上風車の設計外力設定にあたっては、ほとんど影響しないと考えられる。

図-2は、平均風速と風速の変動標準偏差の関係を示したものである。平均風速と風速の変動標準偏差は、良好な比例関係を示している。ここで、原点を通る縦軸と横軸の回帰直線の傾きが、当該観測点における当該測器で求められた風の代表的な乱れ強度となる。港空研構内の観測点では、超音波式の代表的な乱れ強度は概ね0.267、三杯式では0.211となった。

すなわち、三杯式は超音波式に比べて風の時間変動を過小評価していることになる。ただし、風速2m/s以下の弱風条件では、逆に、三杯式によって得られる乱れ強度は大きく出ている。これらの相違は、三杯式の回転体等の慣性によるものであると考えられるため、三杯式風速計によって得られる観測データから洋上風の変動特性を論ずる際には、十分な注意が必要であることを意味している。

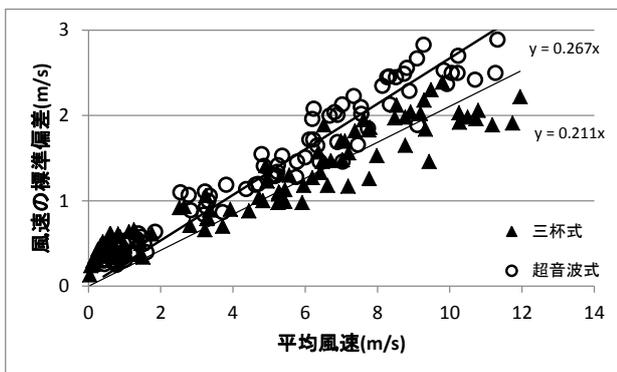


図-2 平均風速と風速の標準偏差の関係

5. 三杯式風速計の周波数応答解析

図-3は、6月24日23時の強風時（超音波式風速計による平均風速は6.0m/s、三杯式では6.2m/s）における周波数スペクトルを示したものである。縦軸には、三杯式および超音波式のそれぞれのスペクトル密度とともに、周波数毎のエネルギー比（応答関数）をあわせて表示している。ここに、エネルギー比とは、三杯式のエネルギー

密度を超音波式のエネルギー密度で除した値として定義される、いわば周波数応答関数に相当するものである。横軸がゼロでは、エネルギー比は約1.0となっているが、このことは、定常成分（すなわち平均風速）は超音波式と三杯式とで良好な一致を示した図-1と対応している。ただし、周波数が大きくなるにしたがって、エネルギー比は単調減少しており、このことは、三杯式による乱れ強度は超音波式の結果より小さめに評価されることを示した図-2に対応するものである。

図-4は、平均風速2.5m/s以下の弱風時を除く、すべての毎時毎の風観測結果について、図-3で示すスペクトル解析を実施し、その結果を1枚の図にとりまとめたものである。

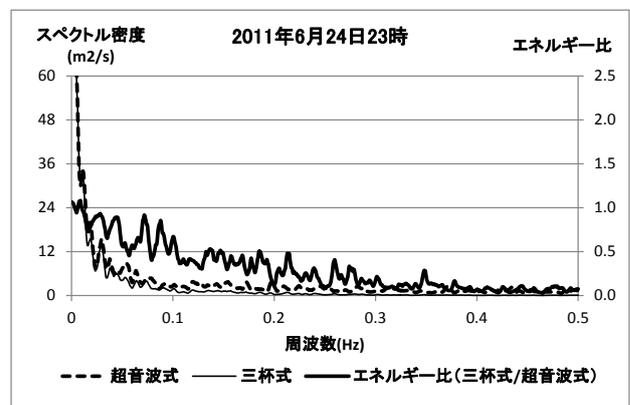


図-3 強風時における周波数スペクトル解析例

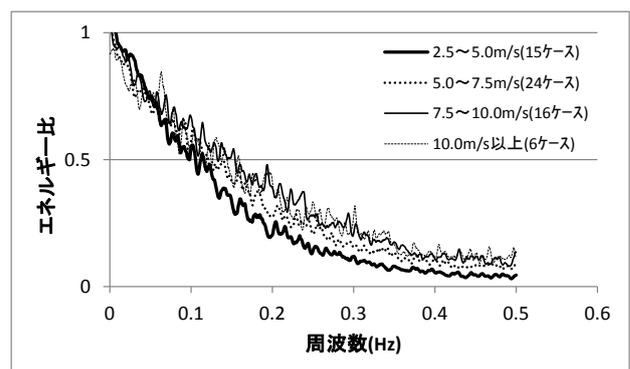


図-4 周波数とエネルギー比の関係

周波数が0.1Hz（周期10s）よりも低周波の部分のエネルギー比に注目すると、0Hzから0.1Hzの間では、横軸の増加とともに、直線的にエネルギー比が低減しており、0.1Hzにおけるエネルギー比は平均的に0.6程度の値を示していることがわかる。

文献1)で著者らが示したように、洋上風の変動の大部分を占める周波数は周期 10s 以上の比較的周期の長い変動成分であることを考えあわせると、0Hz から 0.1Hz の間でエネルギー比が直線的に 1.0 から 0.6 程度に減少する図-4 の結果は、図-2 に示す三杯式によって得られる乱れ強度 (0.211) が超音波式のそれ (0.267) より小さくなっていることと対応しているようにも考えられる。

そうであるとすれば、三杯式風速計によって得られる洋上風の乱れ強度は、概ね 0.8 で除する (1.25 倍する) ことによって、超音波式で観測される真値と想定される乱れ強度に換算することが可能ではあるものの、より正確には図-4 で示すような周波数応答特性を考慮して、スペクトル解析を通じて乱れ強度を換算するべきであることを示唆していると考えられる。あわせて、GPS 波浪計上のプロペラ式風速計による洋上風況観測結果のより精緻な活用のためには、プロペラ式と超音波式の同時並行観測結果を用いた同様の検討が、将来的に重要な検討課題になると思われる。

6. 今後の取り組み

本稿では、港空研構内における超音波式と三杯式の風速計の同時風観測データをもとに、三杯式の周波数応答特性を実証的に検討し、乱れ強度の算定結果の解釈・評価について周波数スペクトル解析によって考察した。ただし、本稿の解析結果は、特定の観測点における特定の機種 of 測器で得られたものであることには注意が必要である。

著者らは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 補助研究“洋上風況観測システム実証研究 (北九州市沖)”において、図-5 に示すような多数の超音波式および三杯式の風速計による洋上風況観測を計画しており、2012 年の秋頃から観測を開始する予定である。

今後は、北九州市沖の洋上風況観測塔で得られるデータを活用して、回転機械式風速計の応答特性にも留意した検討・解析を行い、我が国沿岸域における洋上風力発電の実用化に資するため、洋上風の特性に関する汎用的な成果をめざしたい。

最後に、本研究は上記の NEDO 補助研究の中で行われた検討成果であること、および、本稿のとり

まとめにあたって (株) ソニックの伊藤芳樹専務および安立重昭技師長より有益なご助言を頂いたことを付記し、感謝申し上げます。

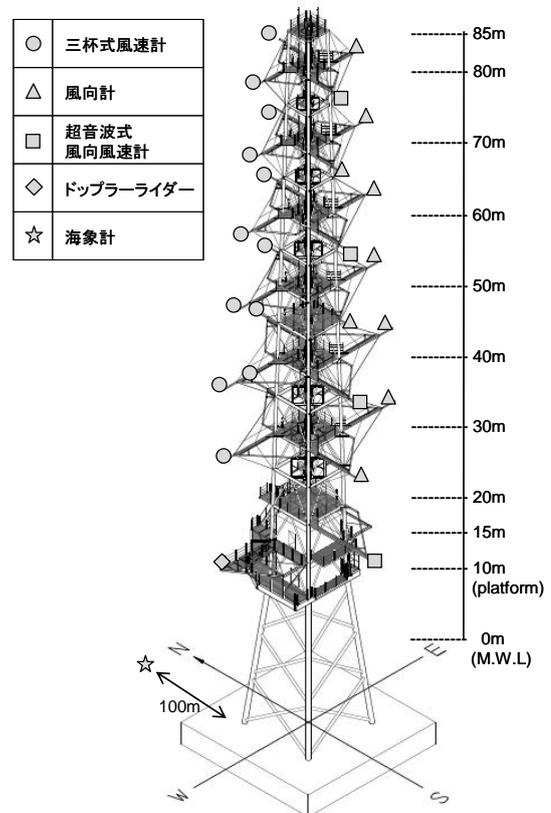


図-5 北九州沖に建設中の洋上風況観測塔の概要

参考文献

- 1) 永井紀彦・川口浩二・吉村豊・吉岡健・谷川亮一・青木功：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，土木学会論文集 B3，第 36 回海洋開発シンポジウム，講演 No. 155，2011. (CD-ROM)
- 2) 光田寧：種々の風速計の比較について，京大防災研究所年報第 13 号 A，pp. 441-448，1970.
- 3) 中尾徹・加藤秀樹・臼井健：3 種類の風向風速計の応答特性，イー・アンド・イー ソリューションズ株式会社，2003. (下記 HP で発表) . http://www.eesol.co.jp/release/report/200508report_1.html
- 4) 藤田勇・松崎義孝・永井紀彦：風杯式風速計の応答特性と線形補償，港湾空港技術研究所資料，15p. (印刷中，2012.3.刊行予定) .
- 5) (財) 沿岸技術研究センター：沿岸波浪・海象観測データの解析・活用に関する解説書，pp. 181，2000.