

ブイの動揺を考慮した GPS 波浪計による洋上風観測

OFFSHORE WIND OBSERVATION TAKING ACCOUNT OF GPS BUOY MOTION

永井紀彦¹・清水勝義²・李在炯³・藤田孝⁴・久高将信⁵・額田恭史⁶
Toshihiko NAGAI¹, Katsuyoshi SHIMIZU², Jae Hyeng LEE³, Takashi FUJITA⁴,
Masanobu KUDAKA⁵ and Kyoushi NUKADA⁶

¹フェロー 工博 (独)港空研 海洋・水工部長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 (独)港空研 海洋・水工部海象情報研究室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 工博 (財)沿岸技術研究センター主任研究員 (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

⁴正会員 工修 日立造船(株)技術研究所主任研究員 (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

⁵正会員 (株)エコー沿岸デザイン本部海象解析部部長 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

⁶非会員 (株)エコー沿岸デザイン本部海象解析部課長 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

Newly developed GPS buoy system, applying the RTK-GPS techniques to measure the exact movement of the offshore floating buoy, is supposed to be the future principal offshore wave and tsunami observation equipment for Japanese NOWPHAS (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS). By installing a wind gauge at the top of the buoy, offshore wind information is also applicable, which is important for various offshore economical activities such as fishery, clean energy development etc., with proper correction of the observed data with consideration of the buoy motion effects. This paper introduces results of study on buoy motion correcting methods by using proto-type data obtained off-Muroto-Misaki.

Key Words : GPS buoy, Offshore wind, Wind observation, Wind energy

1. はじめに

沿岸域洋上は大規模風力エネルギー開発が可能なフロンティアであるが、洋上風は観測が困難であるためデータの蓄積が不十分であり、統計的出現特性も十分に解明されていない。沖合津波波形の直接観測を可能としたGPS波浪・津波計測システムの全国沿岸への具体的な展開が始まった中で^{1), 2), 3)}, 洋上ブイ観測網が、津波・波浪監視に加え、洋上風の観測にも活用できれば、海運・漁業等の洋上における経済活動の支援に一層貢献するばかりでなく、沿岸の洋上風力発電の推進に大きな貢献を果たす情報社会資本となることが期待される。本稿は、室戸岬沖GPSブイによる長期洋上風観測値⁴⁾に基づき、波浪観測にあたって検討されたブイ動揺補正⁵⁾を、風観測にも新たに考慮し、気象庁室戸岬測候所の風観測値との比較によって洋上風の出現特性を考察するものである。

2. 室戸沖における観測条件

2004年に室戸岬沖13km、水深100m地点に設置されたGPSブイに取り付けられた、毎秒の連続した風向風速計による観測値とGPSブイ水平座標をもとに、ブイ動揺補正の検証を実証的に試みた。

図-1は、高知県室津港周辺の観測点位置を示したものである。図には、等深線によって海底地形形状を示すとともに、既設GPSブイやナウファス波浪計(水深27m)および気象庁検潮所の位置をあわせて示している。図-2は、GPSブイの構造を示す。ブイの正確な位置検出を行い、毎秒の水平2方向(XY)および鉛直方向(Z)の3成分の位置検出を行うGPSアンテナは、ブイの頂部水面上7mの位置に取り付けられているが、プロペラ式風向風速計とほぼ同じ高さとなっている。このため、ここでは、ブイ上のGPSアンテナの動きと風向風速計の動きは一致するものと仮定して、以下の考察を行った。なお、GPSブイシステムでは、3成分のGPS座標値および風向風速のサンプリング間隔は1sであり、切れ目なく連続的な観測が継続して行われていた。

3. 洋上風の観測状況

検討対象期間中のジャイロ方位計と風向風速計によるデータの測得状況を、縦軸を10分間平均観測風速（ブイ動揺補正前）として図-3に示す。10分間平均風の測得率は5か月間を通じて98.8%と高く、台風0410号（7月30日）、0416号（8月30日）、0418号（9月7日）、0421号（9月29日）および0423号（10月20日）が来襲した、それぞれの強風・高波浪期間中⁶⁾におけるデータも、取得されていた。ただし、ここでは、10分間平均風速算定にあたっては正味3分以上の、10分間内の瞬時風速変動を考察する際には正味9分以上の、瞬時風向風速データが得られた条件を、それぞれ測得とみなした。ブイ動揺補正に必要なGPSセンサーによる毎秒の水平2成分座標データの測得状況は、5か月間を通じて99.4%と高かった。

4. ブイ動揺補正法の検討

ここでは、ブイ動揺補正について、下記の2ケースについて比較検討することとした。すなわち、①ブイ動揺補正をせずに水平2成分風速観測値から求まる毎秒の風向風速、②毎秒のブイ水平2成分座標の差分として求まるブイの水平運動速度を毎秒補正して得られる風向風速、の両者を、5か月間の長期観測データに基づき比較検討するとともに、室戸岬測候所における風観測値とも比較を行った。

図-4に、ブイ動揺補正の有無による風向風速観測結果の瞬時比較例を示す。図中の実線は①のブイ動揺補正をしない観測値を、プロットは②の補正値を、それぞれ意味している。2分間の瞬間最大風速は、実線の観測値では12.7m/s、プロットの補正値では13.8m/sとなっており、瞬時値としては、ブイの動揺補正の有無によって風速が10%程度異なっている。このように、瞬時の風況を算定するには、ブイ動揺補正が不可欠であることが、他の観測時のデータからも示された。しかし、図-4における実線とプロットの相違は、5s弱程度の一定の周期性を持って出現しており、平均風速としての両者の差は小さい。この周期5s弱程度の周期は、GPSブイの回転運動（ローリングおよびピッチング）固有周期に対応するものである⁵⁾。

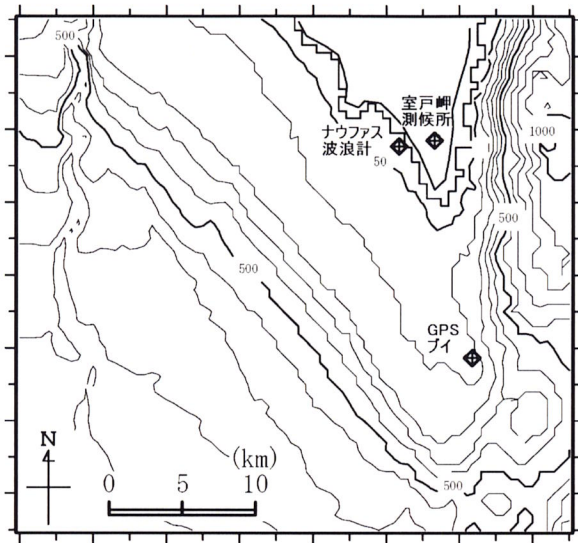


図-1 観測点位置図

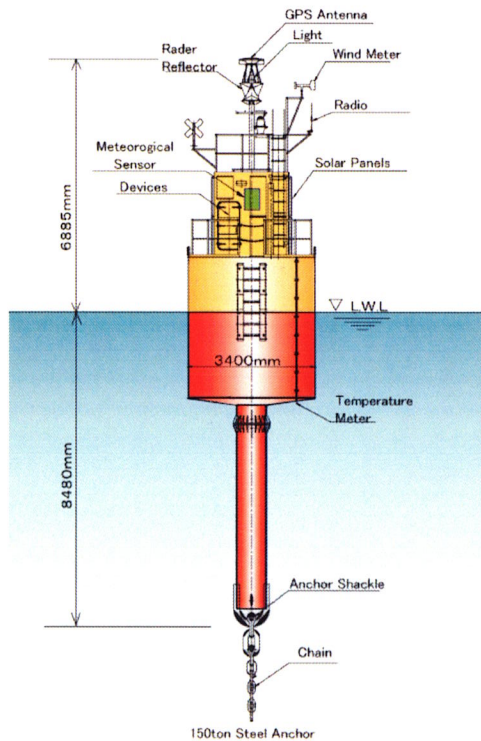


図-2 GPSブイの構造

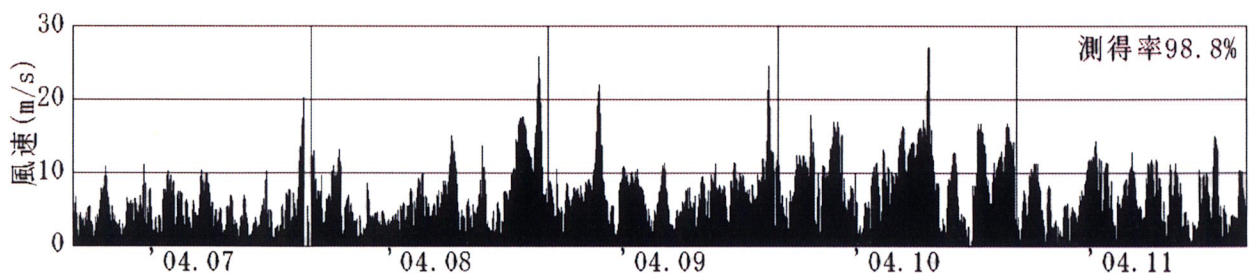
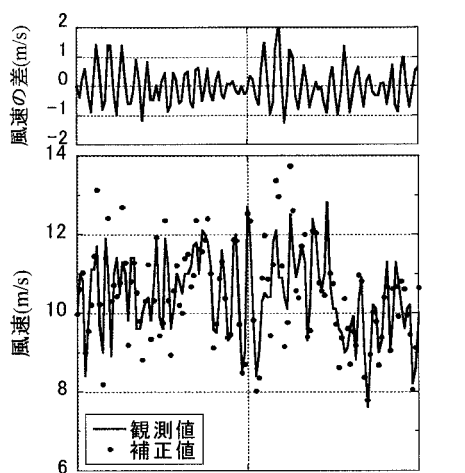
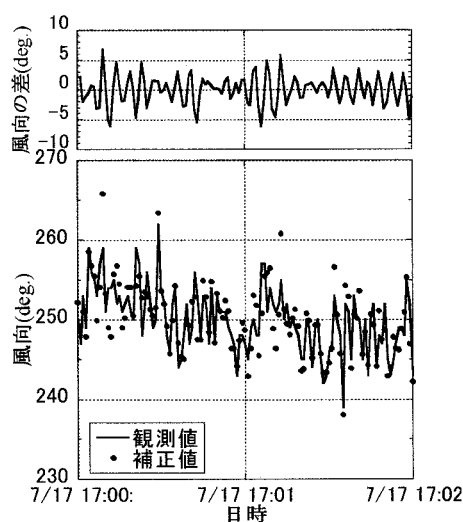


図-3 検討対象期間中の10分間平均風速の経時変化



(1) 風速の比較

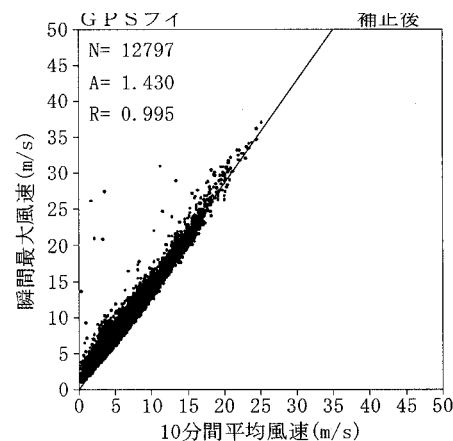
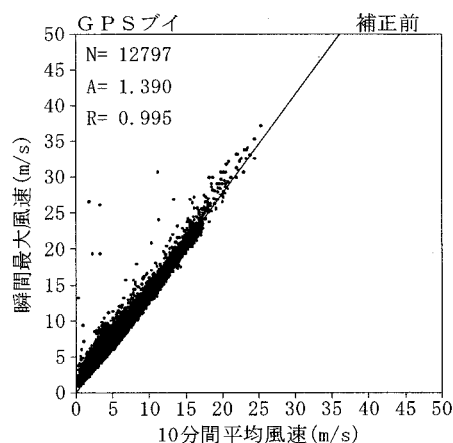


(2) 風向の比較

図-4 ブイ動揺補正の有無による風向風速観測結果の変動例 (2004. 7. 17, 17:00-17:02)

図-5は、ブイ動揺補正の有無によるガスト係数（瞬間最大風速と平均風速の比）の相違を検討したものである。横軸には10分間平均風速を、縦軸には対応する10分間内の瞬間最大風速を示し、ブイ動揺補正の有無による相違を2枚の図で比較した。図中には原点を通過する回帰直線を引き、パラメータとして、データ数N、回帰直線の傾きA、および相関係数Rのそれぞれの値を表示している。回帰直線の傾きAは、代表的なガスト係数を意味することになる。

ブイ動揺補正を行わない場合の回帰直線の傾きは1.390であるが、補正後の傾きは1.430であり、ブイ動揺補正を行った場合の方が、行わない場合よりもガスト係数が大きい。すなわち、ブイ動揺補正を行わなければ、瞬間最大風速を過小に評価することが多いことを意味している。これは、瞬間最大風速時には、ブイに大きな水平風力がかかるため、ブイが風上から風下に動くことによって、動揺補正しない風速は、実際よりも低く計測されることが多いためであろう。



(2) ブイ動揺補正あり

図-5 ブイ動揺補正の有無による平均風速と瞬間最大風

5. 長期統計量としての洋上風の観測結果

表-1は、室戸岬測候所と洋上GPSブイとの5か月間の月平均風速の比較を行ったものである。ここで、ブイ動揺補正については、2通りの考え方で整理を試みた。すなわち、①GPSブイ（海面高7m）の動揺補正をせずに水平2成分毎の各風速観測値を10分間平均し、それぞれの成分に関する平均風速を算出した後に、2成分を合成して風向風速を求めた結果（観測値と表示）、および、②瞬時毎にブイ動揺補正を行って風向風速を求めた結果（補正值と表示）を、それぞれ整理した。

表-1 室戸岬測候所と洋上GPSブイとの5か月間の平均風速の比較

観測月	平均風速(m/s)			月平均風速比 (測候所／ ブイ補正值)
	室戸岬 測候所	GPSブイ (観測値)	GPSブイ (補正值)	
2004.07	6.03	3.96	3.96	1.52
2004.08	8.59	5.97	5.97	1.44
2004.09	8.24	6.59	6.60	1.25
2004.10	9.51	8.30	8.30	1.14
2004.11	5.99	5.28	5.28	1.13

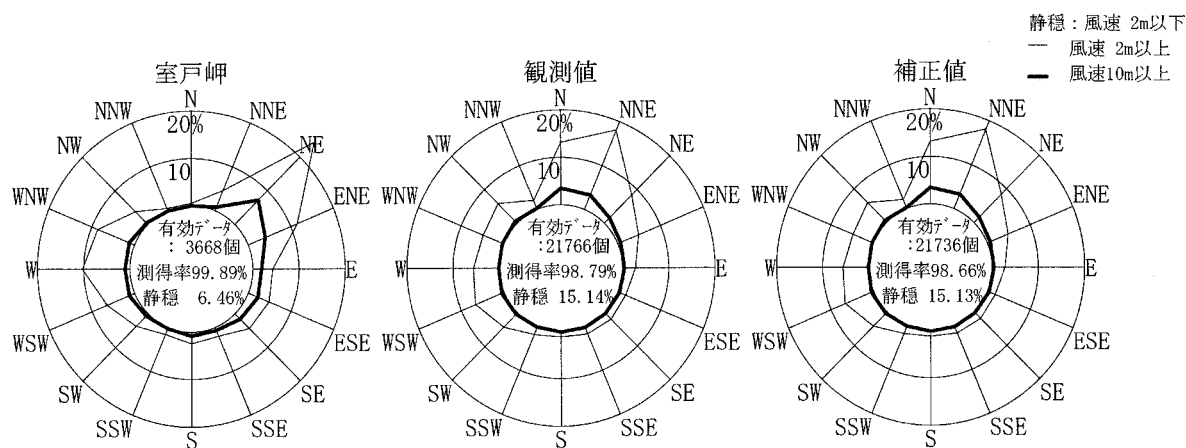


図-6 各種補正法による10分間平均風配図の室戸岬測候所との比較

(太線)の条件で、10分平均風向風速をとりまとめた風配図であり、左から順に、a)室戸岬測候所(海面高225m)における毎時の同期間中の観測値、b)GPSブイ(海面高7m)の動揺補正をせずに水平2成分の各風速観測値を10分間平均し風向風速を求めた結果、および、c)瞬時にブイ動揺補正を行って風向風速を求めた結果を、それぞれ示す。各図には、観測データ数、データ測得率および風速2m/s以下(静穏風況)の出現率を表記した。

表-1および図-6から、以下のことがわかる。

(1) ブイ動揺補正法の相違

表-1および図-6において、観測値と補正值は、きわめて良好な一致を示しており、図-4で見られたような瞬時に見られる風向風速の①と②との相違は、平均的な風速にはほとんど見られない。これは、図-4で見られたように、①と②との風速算出結果の相違は、GPSブイのローリングの固有周期に対応する5s程度の周期でプラスマイナスの両方に交互に見られるため、10分間平均風速として整理する上では、ブイ動揺の影響は平準化され、両者の相違はほとんど現れなかったためである。

すなわち、瞬時風速算出のためにはブイ動揺補正が必要であるが、10分間平均風の算定は、水平2成分の各風速観測値を合成することによってブイ動揺補正は必ずしも必要でないことがわかる。

(2) 陸上風と洋上風の風向の相違

図-6で、太線で示す風速10m/s以上の強風の出現方向について、室戸岬測候所と洋上ブイ(観測値および補正值)を比較すると、洋上ブイでは、NとNNEからの頻度が最も多く、これにNEを加えた方向からの強風の来襲がほとんどであり、この3方位以外からの強風はほとんど見られない。これに対して、測候所では、NNEおよびNEからの強風はやはり多いものの、Nからの強風はほとんど見られない。そのかわりに、WSWからWNWにかけて、およびENEからSEにかけての、東西それぞれの方向からも、強風の出現が見られるのが特徴となっている。

陸地(山地)となっているため、本来N方向から来襲する風も、背後の山地の影響を受け、EあるいはW方向から風を受けるようになっていたことが想像される。すなわち、測候所観測風は、陸上地形の影響を受け、洋上とは異なる方向特性を示していることが理解できる。

(3) 陸上風と洋上風の風速の相違

一般的に、洋上風は陸上風に比べて、風速(風力エネルギー)が大きい。しかし、同時に、底面の粗度の影響が及ぶ範囲の高度では、風速は高度が高いほど大きくなることが知られており、1/7乗則によって高度換算されることが多い^{7)~10)}。1/7乗則を仮定すれば、海面高225mの測候所の風速と海面高7mのブイ上風速は、 $(225/7)^{1/7}$ 倍、すなわち約1.64倍と推定される。

表-1に示されるGPSブイによって得られた月平均風速と、室戸岬測候所で得られた月平均風速とを比較すると、海面高225mに位置する測候所の風速が、海面高7mのブイ上の洋上風より各月とも大きくなっているが、その比は季節によって異なっている。ブイ上の洋上風を基準とした測候所の月平均風速比は、7月には1.52であったが、その後次第に小さくなり、11月には1.13となっている。これらの風速比は、1/7乗則から推定される風速比1.64よりも、いずれも小さい。しかし、夏季には比較的1.64に近い値となっており、冬季に近づくほど、陸上測候所の風速比は小さくなっている。冬季に近づくほど風速比が小さくなるのは、冬季は夏季に比べてN方向から来襲する風の頻度が大きくなるため、図-6で示されたような地形による遮蔽効果が現れているためであると推定される。すなわち、風速に関しても、測候所観測風は、陸上地形の影響を受けていることが示唆される。

6. 洋上風の時空間変動性

台風通過時における風向風速の経時変化を、図-7(0418号)および図-8(0423号)について示す。

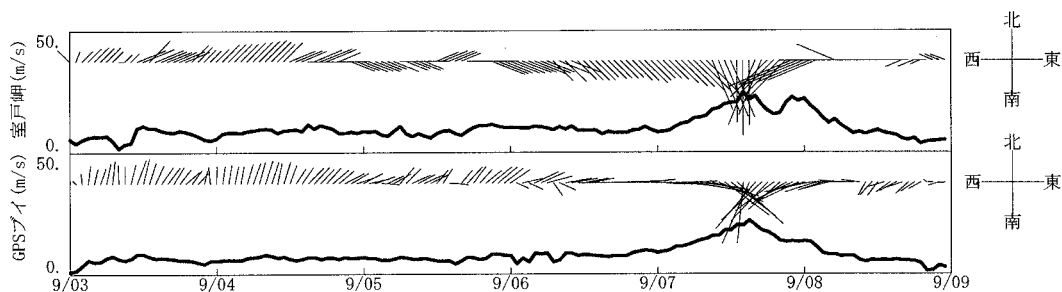


図-7 台風通過時の風向風速の経時変化図 (0418号)

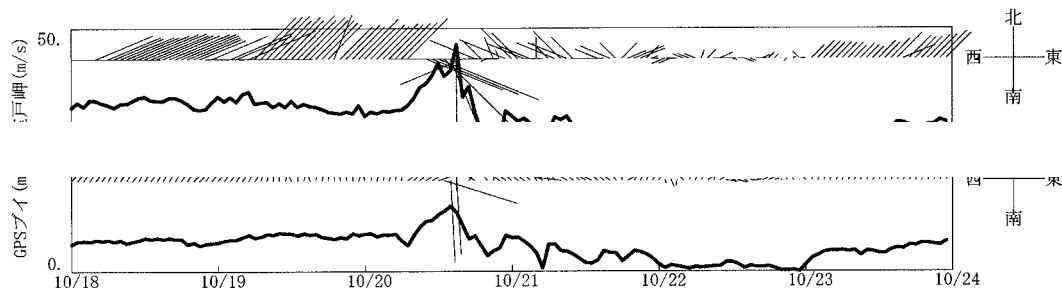


図-8 台風通過時の風向風速の経時変化図 (0423号)

洋上GPSブイでは、切れ目のない連続観測を実施していたため、10分間ごとに10分間平均風速を得ているが、ここでは測候所における観測結果と比較するため、1時間毎にデータを間引いて表示を行った。それぞれの図中には、室戸岬測候所および洋上GPSブイの風向風速をベクトル線の向きと長さで表現すると共に、風速の経時変化を太実線で表記している。いずれの図においても、台風が最近接した9月7日および10月20日には、風速が最大となると共に、風向の大きな変化が見られる。こうした風況の経時変化特性は、両観測点できわめてよく一致しているので、洋上ブイにおける台風通過時のような強風時の風観測結果は、信頼性が高いものであると考えられる。ただし、風速の絶対値に関しては、5. (3)で述べたように高度の相違のためと思量されるが、測候所の風速が洋上ブイの風速より若干大きくなっている。

長期間のナウファスによって得られた沿岸域の洋上風と陸上風の比較から、一般に、洋上風は陸上風に比べて、風速が大きく、風速変動が小さく風況が安定している特性が確認されている¹⁰⁾。図-9は、文献10)に倣って、洋上ブイで観測された風況の短時間変動性を示したものである。横軸には10分間平均風速を示し、縦軸には当該観測時間中の風速変動の標準偏差を示し、プロットを行ったものである。左の図は風の主軸方向の変動を示し、右の図は主軸直角方向の変動を示している。図中には原点を通過する回帰直線を引き、パラメータとして、データ数N、回帰直線の傾きA、および相関係数Rのそれぞれの値を表示している。

回帰直線の傾きAは、風況の短時間変動の大きさを示すものと考えられる。文献10)によると、関西空港沖MT局を含む洋上風観測塔では主軸方向および主軸直角方向とも通年値で0.09-0.15の範囲に分布するのに

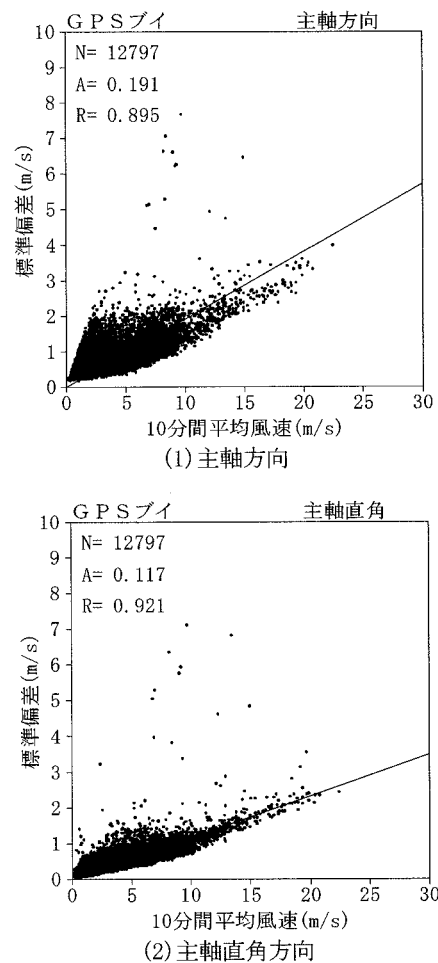


図-9 洋上風の短時間変動特性 (ブイ動揺補正後)

対し、陸上における沿岸風観測点では0.15-0.30の範囲に分布し、洋上風は陸上風に比べて、短時間内の風向風速変動が小さいことが定量的に示されている。

図-9においても、主軸方向のAは0.191、主軸直角方向のAは0.117となっており、他のナウファス洋上風観測塔による観測結果よりも若干Aは大きい値となっている。これは、洋上GPSブイに設置された風向風速計の高度は7mであり、他のナウファス洋上風観測塔の高度よりもかなり低いためであろう。しかし、他のナウファス陸上風観測点に比較すればAはかなり小さい値となっており、改めて、洋上風の短時間変動が小さい特徴が示されたと考えられる。

7. まとめ

本稿では、室戸岬沖GPSブイによる長期洋上風観測

の結果について、以下の結果を得た。

- ①洋上GPSブイによる10分間平均風の測得率は5か月間を通じて98.8%と高く、台風による強風・高波浪期間中におけるデータの測得状況も良好であった。ブイ動揺補正に必要なGPSセンサーによる毎秒の水平2成分座標データの測得状況も、5か月間を通じて99.4%と高かった。
- ②毎秒のブイ水平2成分座標の差分によるブイの水平運動速度補正は、瞬時風速を求めるためには必要であり、補正の有無によって瞬間最大風速やガスト係数が異なる値となることが確認された。
- ③しかし、10分間平均風速の算定結果には、補正の有無による相違はほとんど見られなかった。これは、瞬時値の相違は、ブイのローリングの固有周期に対応する5s弱程度の周期でプラスマイナスの両方に交互に見られるため、10分間平均風速として整理する上では、ブイ動揺の影響は平準化されるためである。
- ④室戸岬測候所における観測風は、陸上地形の影響を受け、洋上ブイとは異なる方向特性を示す。この結果、両観測点の月平均風速の比は、季節や風向によって、異なる値となったものと推定される。
- ⑤台風通過時における風向風速の経時変化を見ると、台風最近接前後における両観測点の風況の経時変化特性はよく一致しているため、洋上ブイにおける台風通過時のような強風時の風観測結果は、信頼性が高いと推定された。
- ⑥洋上ブイで観測された風況の短時間変動性を検討した結果、他のナウファス陸上風観測点に比較して短時間変動は小さく、改めて、洋上風の短時間変動が小さい特徴が示された。

8. おわりに

今後とも、GPS波浪計の全国沿岸域へのネットワーク配置が進む中、波浪・津波観測情報の高度化に加えて、沿岸域の洋上風の出現特性に関しても観測データの蓄積を進め、洋上における経済活動や洋上風力発電の推進に貢献を果たす情報社会資本整備をめざす所存

であり、関係各位のご支援を切にお願いしたい。最後に、GPS波浪計の全国展開を含むナウファスの開発・改良・運営は数多くの国土交通省港湾局関係機関によって実施されていること、室戸岬測候所における測風データを気象庁からご提供いただいたこと、室戸岬沖GPSブイは、文部科学省の補助を受け、東京大学地震研究所・(財)人と防災未来センター・日立造船(株)および港湾空港技術研究所の4者共同研究の一環として設置されたものであること、を述べ、これら多数の関係の方々に謝意を表する。

参考文献

- 土木学会，海洋開発論文集第20巻，pp.173-178，2004。
- 2) 永井紀彦・加藤照之・額田恭史・泉裕明・寺田幸博・三井正雄：沖合・沿岸・オンサイト観測を組み合わせた津波観測網に関する提言，土木学会，海洋開発論文集第21巻，pp.61-66，2005。
- 3) 永井紀彦：波浪観測網の強化による海の安全の確保，－GPS波浪計 2006年度より配備開始！－，土木学会誌第91巻第9号（2006.9.号），土木学会，pp.78-79，2006。
- 4) 永井紀彦・里見茂・李在炯・乙津孝之・藤田孝・額田恭史：室戸沖GPSブイによる洋上風の観測結果，第17回研究成果発表会講演要旨集，海洋調査技術学会，pp.36-37，2005。
- 5) 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。
- 6) 永井紀彦・里見茂：2004年台風による高波の観測結果（NOWPHAS2004特別号），港湾空港技術研究所資料No.1100，65p.，2005。
- 7) 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，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。
- 8) 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，港湾技術資料 No.999，59P.，2001。
- 9) 永井紀彦・勝海務・岡島伸行・隅田耕二・久高将信：我が国沿岸の風観測結果に基づく風力エネルギー，海洋開発論文集第17巻，土木学会，pp.19-24，2001。
- 10) 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。
- 11) 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，海岸工学論文集第50巻，土木学会，pp.1306-1310，2003。