簡易浮体に搭載したドップラーライダーによる洋上風況観測とその検証

 後藤 暁 大塚清敏
林 秀郎 (本社土木本部)

Validation of Offshore Wind Observation by a Doppler LIDAR Mounted on a Simple Float

Satoru Goto Kiyotoshi Otsuka

Hidero Hayashi

Abstract

A low cost, floating offshore wind measuring system is developed, which is composed of a simple rectangular moored float and a Doppler LIDAR (Light Detection And Ranging) with motion compensation function. Wind measurements using this system were carried out at Noshiro port, Akita prefecture. Comparisons between the 10 min mean LIDAR and wind observation tower winds show good agreement with each other, irrespective of acquisition rates or magnitudes of rolling and pitching motions of the float, which are not higher than 10°. The exponents of the power-law wind profiles take slightly lower values than that of the roughness category I surface as recommended by Architectural Institute of Japan (AIJ) for the winds blowing from the ocean, while these are a relatively higher than AIJ category I for the wind blowing the land.

概 要

簡易浮体とドップラーライダー観測装置を組み合わせた,安価で設置可能な洋上風観測システムを構築した。 システムの観測精度検証のため,秋田県能代港内の水域において1年間の風観測を実施した。10分間平均風速お よび風向について,浮体ライダーによる観測結果を隣接する防波堤上に設置した海面高さ50mの風況観測鉄塔で の観測記録と比較した結果,両者は良好な一致を示した。また,データの取得率・浮体の動揺量によるライダ ー観測結果への顕著な影響は見られず,観測装置の妥当性が確認された。また,ライダー観測に基づき10分間 平均風速の鉛直分布について検討した。洋上における風速の鉛直分布の勾配は、日本建築学会「建築物荷重指 針・同解説(2015)」に示される海面に相当する区分と比べてやや小さい値となった。ただし、陸地からの風向 では、建築物荷重指針と同程度あるいはやや大きめの値となり、地表面粗度の影響が認められた。

1. はじめに

我国での風力発電事業の普及においては、洋上での風力 発電サイトの開発が必須であり、今後、急速に普及する と思われる。風力発電事業に際しては、設置予定海域の 風況を正確に把握して事業性を評価する必要があるが、 従来のように現地(洋上)に風況観測鉄塔を建てるには多 くの時間と費用が必要である。今後、洋上風力発電が普 及するためには、簡易に精度良く洋上の風況を観測でき る低コストの風況観測技術が必要となる。そこで簡易浮 体とドップラーライダー観測装置を組み合わせた、安価 で設置可能な洋上風観測システムを構築した。風観測シ ステムの精度検証のため、秋田県能代港内の水域におい て1年間の風観測を実施した。ドップラーライダーによる 観測結果と隣接する防波堤上に設置した海面高さ50mの 風況観測鉄塔での観測記録とを比較して浮体ライダー観 測の検証を行った。 観測は、2014年7月8日~2015年7月18日までの約1年間の期間で実施した。観測場所は秋田県能代港の北防波堤 (東経139°59′05″, 北緯 40°12′45″, 世界測地系)



※国土地理院の電子地形図(タイル)に観測地点を追記して掲載

Fig. 1 風観測地点 Site of Wind Obsevation

2. 観測概要

および近接する港内の水域である。観測地点位置をFig.1 に示す。

簡易な鋼製浮体上に動揺補正機能付きのドップラーラ イダー装置を搭載し、独立電源で稼働する観測システム を構築した。使用した測器は、耐環境型小型ドップラー ライダー(以降ライダーと呼ぶ)である。ライダーの仕様 をTable 1 に示す。ライダーは、天頂方向および天頂か ら30°傾いた4方向の計5方向に近赤外レーザー光を照射 し、大気中エアロゾルからの散乱光のドップラー変位か ら風速を求める。装置にはGPSアンテナ、ジャイロコン パスが装備されており、回転3自由度の回転角、角速度お よび並進方向3自由度(水平2方向および鉛直方向)の速度 を計測し、動揺の影響を補正する。今回の観測では、約2 秒間隔の風向風速データを10分ごとの平均値として出力 した。観測高さはライダーのレンジオーバーラップ機能 を使用して、海面上40m~135mまで5m刻みに設定した。 検証のため三杯型風速計、矢羽根式風向計を防波堤上に 観測鉄塔を建てて設置した。設置高さは海面上40m, 45m, 50mの3高度とした。浮体の動揺方向をFig.2 に、設置状 況をPhoto1に示す。

3. 観測結果

3.1 年間の風向・風速の性質

観測鉄塔上の三杯風速計(海上50m高さ)における1年 間(2014年8月~2015年7月)の観測記録に基づいて現地の 風の性質について示す。風向別出現頻度をFig.3 に示す。 主風向は東西2方向に大別され,陸地から吹く東北東 (11.7%),東(18%)および日本海側から吹く西南西~西北 西(3風向で32%)であった。年間の風向別の平均風速を Fig.4 に示す。東北東および東の風では約6m/s強,西よ りの3風向では10~11m/sであった。東よりと西よりで, 発生頻度は同程度なものの,平均風速は西よりの風が東 よりの1.6~1.8倍程度となっている。

16風向別の10分間平均風速の風速階級別出現頻度を Fig.5 に示す。図中に示すCとKはワイブル分布で近似し たときの尺度係数および形状係数,黒線は近似曲線であ る。全体的には出現頻度はワイブル分布で良好に近似で きている。ただし,西よりの風(西南西~西北西)につい ては10m/s付近での発生頻度が低くなり,5m/s付近と 15m/s付近でピークを2つ持つような分布となっており,

Table	1 ライダー装置仕様	Ŕ
Specification	of Doppler LIDAR	System

1	11 5
レーザー波長	1.55 μm帯 (アイセーフ帯波長) IEC 60825-1で規定される レーザークラス1M相当
走查方式	スイッチ切り替え
走查方向数	5方向
ドップラー速度測定範囲	-30m/s~30m/s
ドップラー速度精度	±0.1m/s以内
風向範囲	0∼359.9°
風向風速更新レート	最速2秒以内



Fig. 2 浮体の動揺方向 Direction of Oscillation



Photo 1 観測状況 Situation of Observation



Fig. 3 年間風向出現頻度(海上50m) Wind Rose at 50m Height above Sea Level



Fig. 4 風向別平均風速(海上50m) Annual Average Wind Each Direction at 50m Height above Sea Level



Relationship between Maximum Value and RMS in 10miuutes of Motion Angle

ワイブル分布とずれが生じている。西風の要因が,海陸 風など比較的弱い局地循環と、日本海上の低気圧,冬季 季節風による強風の場合にはっきり分かれているためな のではないかと推測される。

3.2 浮体の動揺の状況

観測期間中の浮体の動揺角について、10分毎の動揺角 の標準偏差と最大および最小瞬間値との関係をFig. 6 に示す。観測期間におけるロール角の最大、最小は、そ れぞれ+7.6°, -9.5°, 同様にピッチ角は、+8.7°, -8. 6°であった。ロール、ピッチともばらつきは大きいもの の、概ね最大・最小瞬間値と標準偏差は比例関係にあっ た。瞬間最大・最小値は、ロール角の場合、標準偏差が1 を超える程度になるとおよそ3倍、ピッチ角は標準偏差の 広い範囲にわたって3~4倍であった。

3.3 ライダー観測の取得状況・取得率

観測期間中の月別のライダーの稼働率(装置が正常に

作動し観測を行っていた時間の比率)をFig. 7 に示す。 稼働ができなかった主たる要因は、ドップラーライダー の点検や、悪天候により浮体に接近できなかったことに よる燃料切れや冬季の低温に起因する故障等、観測機器



の維持管理に関するものが多くを占める。観測実施期間 を通じた稼働率は55.87%であった。また、ライダー正常 稼働時のデータ取得率の出現頻度をFig. 8 に示す。ここ でいうデータ取得率は、ライダー機器が正常に動作して いる状況下での、10分間の送信信号数に対する受信信号 数の割合である。取得率の変動は、実質的には空気の清 浄さの度合いや天候(強い降水の有無)によっている。強 い降雨ではライダーから送信されたレーザー光が雨滴に 吸収され、反射光を十分に受信できなくなり取得率が低 下する。Fig. 8 によると、取得率100%の頻度が突出して 高く、ライダーが正常作動している時間は、非常に高い 割合でデータが取得できていた。取得率が低い場合の気 象状況は強い降雨時であり、少々の降雨であればデータ の取得が可能であった。

3.4 ライダー観測と鉄塔風況観測の比較

2014年7月から2015年7月までの期間に取得された全デ ータについて、高度50mにおけるライダー観測と鉄塔観 測の10分間平均風速の関係をFig. 9 に示す。高風速側で ライダーのほうが観測に比べて風速値が若干低めになる 傾向がみられるが、両者は良好な一致を示しており、相 関係数は0.99を越える。また、鉄塔風速に対するライダ ー風速の回帰係数は0.97となった。鉄塔での風向とライ ダーの風向の関係をFig. 10 に示す。風向についても風速 と同様であり、鉄塔観測とライダーの両者は良い相関を 示している。なお、相関係数、回帰係数(ただし切片は0 とした)の計算方法は以下の通りである。

相関係数:
$$\frac{\sum (U_{tower} - \overline{U}_{tower})(U_{lidar} - \overline{U}_{lidar})}{\sqrt{\sum (U_{tower} - \overline{U}_{tower})^2 (U_{lidar} - \overline{U}_{lidar})^2}}$$
(1)

 $: \frac{\sum (U_{tower} \cdot U_{lidar})}{\sum (U_{tower})^2}$

回帰係数

$$U_{tower}$$
 :鉄塔観測値(m/s)
 U_{lidar} : ライダー観測値(m/s)
 $\overline{U}_{tower}, \overline{U}_{lidar}$:各標本の平均値(m/s)



Fig. 8 データ取得率の出現頻度(%) Frequency of Acquisition Rate



Fig. 9 鉄塔とライダー風速の関係 Relationship between 10minutes Mean Wind Speed of Tower and That of LIDAR



Fig. 10 鉄塔とライダー風向の関係 Relationship of Wind Direction between Tower and LIDAR



Fig. 11 取得率別の鉄塔とライダー風速の関係 Relationship of 10minutes Mean Wind Speed between Tower and LIDAR of Each Acquisition Rat

データ取得率ごとに分類した,鉄塔観測とライダー観 測の風速関係をFig. 11 に示す。取得率の違いによる差 は見られず、全般的な傾向は変わらない。取得率が低い 場合についても鉄塔の風速との相関関係は確保されてい る。この事から、取得できたデータは原則的に風況を把 握するための有効な10分間平均値データとして扱うこと ができると考えられる。

浮体動揺と風速観測値の関係 3 5

2014年8月11日の風速・風向および浮体動揺の時系列波 形をFig. 12 に示す。この日は台風11号の影響により、 降雨は観測されていないものの、風・波ともに大きかっ た。浮体動揺のピッチ角が最大瞬間値で8°強まで達して おり,観測期間中においては動揺角が大きい事例である。 このような浮体の動揺角が大きい場合においても、ライ ダー観測は鉄塔の風速・風向に良く追従している。浮体 の動揺角(ロール、ピッチ)の標準偏差の区分で分けた場 合の鉄塔観測および同時刻のライダー観測の風速の回帰 係数をTable 2 に示す。表中左列はロール角の標準偏差 で分類した場合の回帰係数を、右列はピッチ角の標準偏 差で分類した場合の回帰係数を示す。瞬間的に大きな浮 体動揺が計測される場合を避けるため、10分間ごとの動 揺の標準偏差の値を用いて分類した。北西よりの波向で は浮体が防波堤の後流側に入り、波高が抑えられる状況 となるため、風向240°~360°(北回り)~45°の範囲の データを除外した。今回の動揺の範囲では回帰係数は動 揺角にかかわらず0.97以上を示した。10分間平均風速・ 風向の観測値に対しては、鉄塔とライダーで顕著な差は 見られず、浮体上でのライダー観測結果の妥当性が確認 された。

3.6 ライダー観測に基づくべき指数

ライダーの観測結果に基づき、風速の鉛直分布(海上4 0~135m)について検討を行った。風速の鉛直分布は一般 的に以下に示すべき法則で近似できるとされている。

$U_z = U_z$	$U_G(Z/Z_G)^{\alpha}$	(3)
U_{z}	:高さZ(m)におけ	ける風速
U_{G}	:上空風高さ Z_G (m)における風速
α	: べき指数	

建築学会指針1)では、地表面の状況により、5段階の粗 度区分が設けられており,地表面粗度区分毎に上空風高 さZ_Gとべき指数αが与えられている。べき指数が小さい ほど鉛直方向の風速勾配すなわち風速差が小さい。海面 に対しては地表面粗度区分Ιが適用され、べき指数αは0. 1である。風速鉛直分布の観測結果をFig. 13 に示す。■ はライダーによる観測値、赤線は鉛直分布分形にべき法 則(3)式を適用して最小二乗法で近似した曲線である。実 測と近似曲線は良好な対応を示している。

年間の10分間風速の時々刻々の観測記録について、ベ



Time Selies of Wind Speed, Wind Direction, Rolling Angle and Pitching Angle (August 11 2014)

Table 2 動揺量別の回帰係数

	a	- 1	0 111 1	
000000000	Contrarat	Lingh	() colletton	A 10 cm
POTESSIAI	COPLICIENT	E acru	USCHIAHON	Anor
	Coontoion	Luch	Obomunon	7 11161
- / /				4.2

Regression Coefficient Each Oscillation Angle			
	ロール	ピッチ	
$\theta_{rms} < 0.3$	0.98	0.97	
$0.3 \le \theta_{rms} < 0.5$	0.99	0.98	
$0.5 \leq \theta_{rms} < 1.0$	0.99	0.99	
$1.0 \leq \theta_{rms} < 1.5$	0.98	0.99	
$\theta_{rms} \ge 1.5$	0.98	0.98	





き指数を求めた。海上50mにおける代表的な風向での, 風速とべき指数の関係をFig. 14 に示す。図中実線は風 速階級を1m/s毎に設定して抽出した場合の平均値,点線 は平均±標準偏差である。高風速側で分布の収束傾向が 見られる。東よりの風については、高風速の記録が少な くばらつきが大きいため、他の風向と同様に高風速側で べき指数が収束するかは不明である。各風向について、 風速15m/s以上のデータを抽出して平均したものをFig. 15 に示す。■は抽出値の平均値であり、破線はばらつき の標準偏差をσとしたときの平均値±σの値である。西よ りから北よりでは平均値0.03~0.04(標準偏差0.015)であ った。建築物荷重指針¹⁾(地表面粗度区分I)と比較すると べき指数は小さく,海上高度の高低での風速差は小さい。 また比較的低風速からべき指数に収束の傾向が見られる。 一方、南よりの風では、べき指数は平均値0.1~0.14(標準) 偏差0.05)で、建築物荷重指針の地表面粗度区分Iと同程 度あるいは若干大きめの値となり、分布のばらつきも大 きい。西よりの風向の風上は海のみであるのに対して、 東より、南よりの風向は風上に陸地があり、地表面粗度 の影響が観測結果に表れていると考えられる。

4. まとめ

洋上風況を精査することを目的に簡易浮体にライダー を搭載した風観測システムを構築し,秋田県能代港にお いて,約1年間の風観測をおこなった。結果をまとめる と以下のようになる。

- 浮体ライダーの洋上観測による10分間平均の風 速・風向は、風観測鉄塔による風況観測と同程 度の精度で観測できた。相関係数は全体で0.99 以上、回帰係数は0.97であった。
- 2) 観測結果に対しては、ライダーの観測精度は、 データ取得率にほとんど依存しなかった。
- 観測期間内の浮体動揺によるライダーの傾斜は 最大で10°を下回る程度であった。少なくても1 0°以下の動揺に対しては観測精度が確保され ていることが確かめられた。
- 4) 以上により、本風観測システムによる洋上における10分間平均の風速・風向データの精度は、風況精査のための手法として妥当なものであると判断できる。
- 5) ライダー観測に基づいて評価した風速の鉛直分 布のべき指数は、海からの風に対しては建築物 荷重指針の地表面粗度区分Iよりやや小さめの 値となった。陸地からの風向ではべき指数はや や大きめの値となり、地表面粗度の影響が見ら れた。



Fig.14 風向別の風速とべき指数の関係 Relationship between 10minutes Mean Wind Speed and Power Law



Fig. 15 風向別のべき指数の平均値(風速15m/s以上) Mean Values of Power Law for Each Wind Direction

謝辞

この成果は、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)の共同研究業務の結果得られた ものである。

参考文献

 日本建築学会:建築物荷重指針・同解説, pp.321-324, 2015.2