

6 自由度の動揺を考慮した 浮体式ドップラーライダーの計測に関する研究*

Floating LIDAR measurements considering 6 degree freedom of platform motion

若林 蘭*** 川東 龍則** 山口 敦** 石原 孟**
Ran WAKABAYASHI Tatsunori KAWAHIGASHI
Atsushi YAMAGUCHI Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

洋上風況観測のコストを削減するために浮体に搭載したドップラーライダー(以下、ライダー)により風速を測定する研究が進められている^{1),2)}。しかし、その検証はシミュレーションによっており、実測を用いた検証は行われていない。また、川東ら³⁾は陸上で静的に傾斜させたドップラーライダーを用いて風速の補正効果を検証したが、この研究で用いられた手法は、動揺として1自由度のみを考慮していたため、実際の浮体のように6自由度の動揺が同時に作用する場合には適用できない。

そこで本研究では、6自由度の動揺を考慮したライダー補正手法を定式化し、シミュレーションと福島県沖浮体式洋上ウィンドファーム実証実験における観測値を用いて検証を行った。

2. ライダーの計測原理と補正方法の定式化

2. 1 ライダーの計測原理

ライダーは上空に向けてレーザー光を照射し、空気中のエアロゾルに反射して返ってくる光のドップラーシフト成分から風速を計測する装置である。本研究で使用したライダーの主要な性能を表1に示す。

表1 使用したライダーの主要な性能

Windcube V2 Offshore		
照射方式	パルス式	
ビーム数	5	
光学系駆動	非駆動	
測定高度	40~200m	
風速範囲	0~55m/s	
風速精度	0.1m/s	
測定間隔	1秒以内	

*平成26年11月28日第36回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

** 会員 東京大学大学院工学系研究科

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

*** 学生会員 東京大学大学院工学系研究科 同上

本ライダーはパルス式と呼ばれるタイプで北方向、東方向、南方向、西方向、鉛直の順に計5方向にレーザー光を照射する。レーザー光の照射間隔は約1秒で、約5秒間で照射方向が一周する。東西南北方向の照射方向は鉛直からの角度が28°である。図1に静止状態のレーザー照射方向の平面図と東西方向側面図を示す。

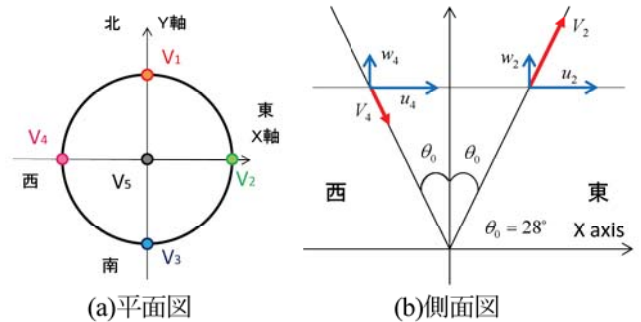


図1 静止状態のレーザー照射状況

この照射により風速の各照射方向成分(視線風速)を計測し、風速の水平・鉛直成分を同定する。その方法を以下に示す。東方向の視線風速を V_1 、西方向の視線風速を V_3 とする。また、 V_1 、 V_3 を計測した位置での風速の東西方向成分と鉛直方向成分をそれぞれ、 u_1, w_1, u_3, w_3 とする。照射角を θ_0 とすると、 V_1, V_3 は式(1)(2)により表わされる。

$$V_1 = -u_1 \sin \theta_0 + w_1 \cos \theta_0 \quad (1)$$

$$V_3 = u_3 \sin \theta_0 + w_3 \cos \theta_0 \quad (2)$$

ここで、 $u_1 = u_3 = u$ 、 $w_1 = w_3 = w$ と仮定すると u, w が次式のように求まる。

$$u = \frac{-V_1 + V_3}{2 \sin \theta_0} \quad (3)$$

$$w = \frac{V_1 + V_3}{2 \cos \theta_0} \quad (4)$$

ここでは、各レーザー照射時間内における風速は定常であり、空間的にも同様であると仮定している。このため、ライダーの計測結果は時間空間方向の平均的な値となる。

2. 2 補正手法

2. 2. 1 高度補正

ピッチ方向，ロール方向にライダーが傾斜すると図2(a)のようになる．この時，各ビームの計測高度が目標高度からずれることにより，誤差が生じる．本研究では，目標高度を挟む2点の計測高度から，線形内挿により目標高度の視線風速を求めた．高度補正後の視線風速計測地点の位置ベクトルを $\mathbf{p}_i$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) とする (図2(b))．

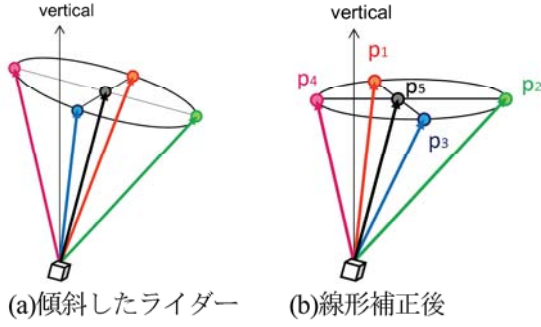


図2 傾斜したライダーとその視線風速

2. 2. 2 傾斜補正

まず， p_2 - p_4 平面内と， p_1 - p_3 平面内の水平風速を算出する．ここでは p_2 - p_4 平面について示す．

ライダーのピッチ角を β とすると，水平面から見た視線風速の角度を $\varphi_2 = 90^\circ - \theta_0 - \beta$ ， $\varphi_4 = 90^\circ + \theta_0 - \beta$ となる (図3b)．視線風速 V_2, V_4 は，面内水平風速 $\mathbf{u}_{2,4}$ と p_2 - p_4 平面内で水平風速に直交する風速 $\mathbf{w}_{2,4}$ を用いて式(5) (6)により表わせる．

$$V_2 = |\mathbf{u}_{2,4}| \cos(\varphi_2) + |\mathbf{w}_{2,4}| \sin(\varphi_2) \quad (5)$$

$$V_4 = |\mathbf{u}_{2,4}| \cos(\varphi_4) + |\mathbf{w}_{2,4}| \sin(\varphi_4) \quad (6)$$

この式を連立して解くと， $|\mathbf{u}_{2,4}|$ が求まる．

$$|\mathbf{u}_{2,4}| = \frac{V_2 \cdot \sin \varphi_4 - V_4 \cdot \sin \varphi_2}{\sin \varphi_4 \cdot \cos \varphi_2 - \sin \varphi_2 \cdot \cos \varphi_4} \quad (7)$$

p_1 - p_3 平面でも同様にして， $|\mathbf{u}_{1,3}|$ を求める．

次に，水平風速 $\mathbf{u}$ とその方向 $\hat{\mathbf{u}}$ をそれぞれ求める．視線風速計測地点の位置ベクトル $\mathbf{p}$ を用いて， $\mathbf{u}_{2,4}$ と $\mathbf{u}_{1,3}$ の方向 $\hat{\mathbf{u}}_{2,4}$ と $\hat{\mathbf{u}}_{1,3}$ は，式(5a)と式(5b)のように表すことができる．

$$\hat{\mathbf{u}}_{2,4} = \frac{\mathbf{u}_{2,4}}{|\mathbf{u}_{2,4}|} = \frac{\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_4}{|\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_4|} \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{u}}_{1,3} = \frac{\mathbf{u}_{1,3}}{|\mathbf{u}_{1,3}|} = \frac{\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_3}{|\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_3|} \quad (9)$$

$\mathbf{u}_{2,4}$ と $\mathbf{u}_{1,3}$ との間の角度を ψ ， $\mathbf{u}_{2,4}$ と $\mathbf{u}$ との間の角度を ψ_u とすると， ψ と ψ_u は次式のように表すことができる．

$$\psi = \arccos(\hat{\mathbf{u}}_{2,4} \cdot \hat{\mathbf{u}}_{1,3}) \quad (10)$$

$$\psi_u = \arctan\left(\frac{|\mathbf{u}_{1,3}| - |\mathbf{u}_{2,4}| \cos \psi}{|\mathbf{u}_{2,4}| \sin \psi}\right) \quad (11)$$

$\mathbf{u}_{2,4}$ と $\mathbf{u}$ の関係から，水平風速 $|\mathbf{u}|$ とその方向 $\hat{\mathbf{u}}$ は式(12)と式(13)のように表すことができる．

$$\mathbf{u} = \frac{|\mathbf{u}_{2,4}|}{\cos \psi_u} \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{u}} = \begin{pmatrix} \cos \psi_u & -\sin \psi_u & 0 \\ \sin \psi_u & \cos \psi_u & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{u}_{2,4} \quad (13)$$

最後に，鉛直風速を算出する．鉛直風速は，各視線風速から算出される鉛直風速の平均値として計算され，式(14)のように表される．

$$w = \sum_{i=1}^5 \frac{V_i - u_x \hat{p}_{ix} - u_y \hat{p}_{iy}}{\hat{p}_{iz}} \quad (14)$$

ここで， (u_x, u_y) と $(\hat{p}_{ix}, \hat{p}_{iy}, \hat{p}_{iz})$ は式(15)と式(16)のように表すことができる．

$$(u_x, u_y) = \mathbf{u} \quad (15)$$

$$(\hat{p}_{ix}, \hat{p}_{iy}, \hat{p}_{iz}) = \hat{\mathbf{p}}_i = \frac{\mathbf{p}_i}{|\mathbf{p}_i|} \quad (16)$$

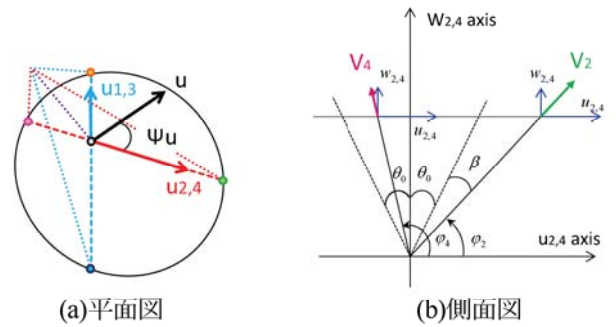


図3 傾斜時のレーザー照射状況

2. 2. 3 動揺速度補正

移動物体上に設置したライダーにより求めた風速には移動速度成分が含まれているため，この移動速度を差し引き，式(17)により風速成分を求めた⁴⁾．

$$\mathbf{u}_{\text{true}} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_t \quad (17)$$

ここで， $\mathbf{u}_{\text{true}}$ は風速成分， $\mathbf{u}$ は傾斜補正後のライダー算出風速， $\mathbf{u}_t$ は移動速度である．

3. 検証方法と結果

福島県沖浮体式洋上ウィンドファーム実証研究での観測結果に基づき、本研究で提案した補正手法をシミュレーションと観測値により検証した。

図4に、福島県沖のサブステーションを示す。このサブステーションでは、マストに取り付けられた三杯式風速計と超音波式風速計による風速計測と、RTK-GPS、加速度計、ジャイロによる動揺計測が行われている。ライダーはヘリデッキ上に設置されている。



図4 福島県沖実証実験

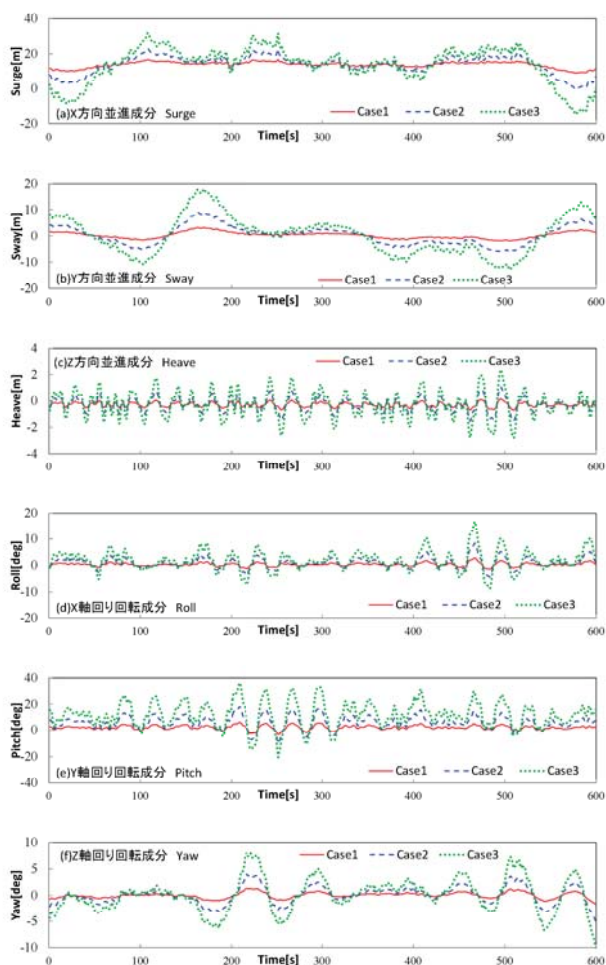


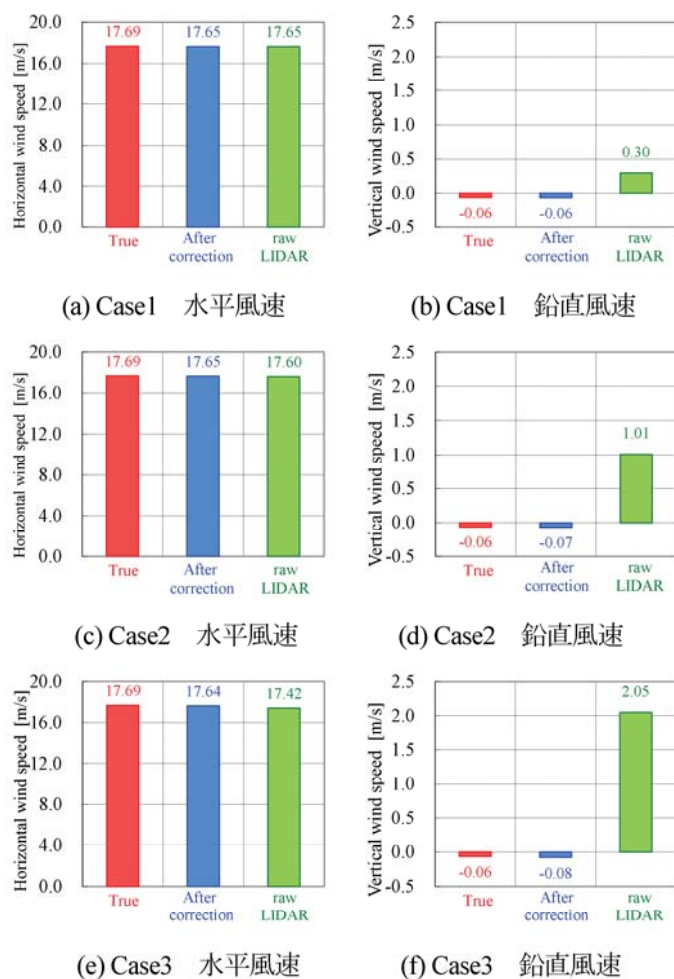
図5 シミュレーションに用いた動揺

図5の実線は3台のRTK-GPSにより求めた2014年10月6日13:30-13:40の10分間(台風時)の6自由度動揺成分である。

3.1 シミュレーションによる検証

ライダー補正手法を検証するために、仮想的な風速場を発生させ、ライダーが動揺していると想定してライダーによって計測される視線風速を算定した。つぎにこの視線風速に提案した手法を適用し、実際の風速を推定した。この結果を発生させた風速と比較することにより、提案した手法の検証を行った。ライダーの動揺としては、図5の実線に示す台風時の6自由度動揺成分をCase1とし、Case1の各動揺成分を3倍したCase2、6倍にしたCase3の計3ケースを用いた。それぞれのケースを図5の鎖線に示す。

図6にそれぞれのケースについて、真値と補正を行った場合、行わない場合の水平風速・鉛直風速の10分間平均値を各々示す。



(e) Case3 水平風速 (f) Case3 鉛直風速

図6 シミュレーション結果 10分間平均風速

動揺が大きくなるほどライダー観測値の誤差が大きくなる。例えば、最大傾斜角が36度のCase3では、水平風速の誤差が1.5%になる。補正を行うことで、誤差を0.3%まで低減することが出来る。また、鉛直風速については、ライダーが傾斜することにより、風速の水平成分を鉛直成分として計測してしまうため、不自然に大きな値となってしまう。提案した手法によりこの誤差を低減させることが出来るようになった。

3. 2 観測値による検証

ライダーにより観測された風速を補正し、同実証実験の三杯式風速計観測値と比較することにより検証を行った。検証に用いた10分間の動揺は2013年5月29日02:20-02:30に観測されたものであり、最大動揺角度は1度である(図7)。

図8に三杯式風速計観測結果、補正を行った場合と行わない場合のライダー観測結果の水平風速10分間平均風速値を示す。なお、三杯式風速計も浮体に搭載されているため、動揺補正を行っている⁴⁾。

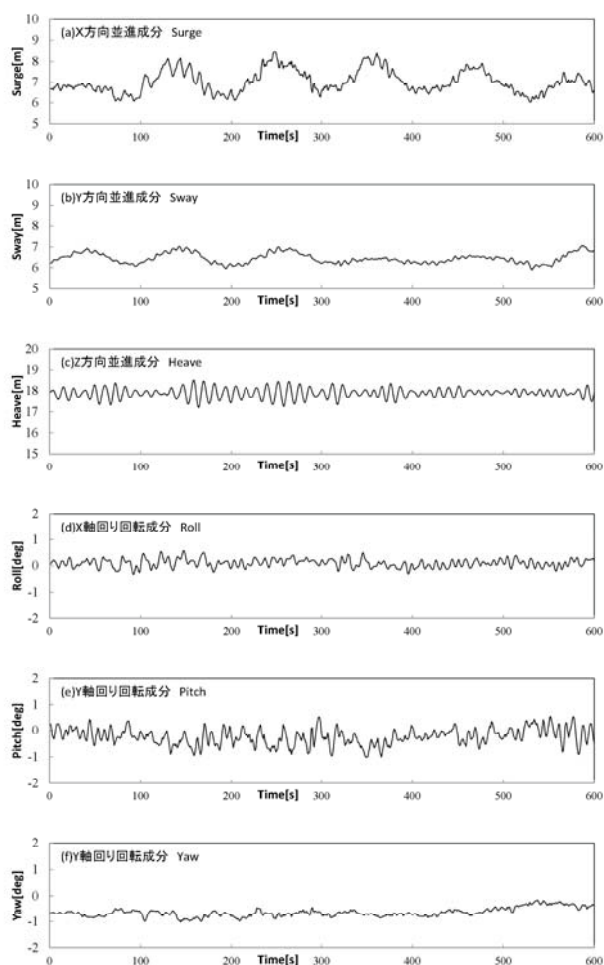


図7 動揺観測値 (2013/5/29 02:20-02:30)

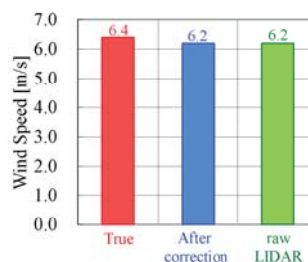


図8 観測値補正結果 水平風10分間平均風速

シミュレーションと同様の結果となり、提案した手法が実証実験のサブステーションの浮体動揺補正に適用することが分かった。

4. まとめ

本研究では、6自由度の動揺によるライダー観測値の誤差補正手法を提案し、シミュレーションと福島プロジェクトによる観測値を用いて検証を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 動揺が大きいほど、ライダー観測値の誤差が大きくなる。最大傾斜角が36度の場合、水平風速の誤差は1.5%になるが、補正により、誤差は0.3%まで低減する。
- 2) 提案した補正手法は、福島に設置してあるサブステーションの浮体動揺補正に適応することが出来る。

謝 辞

本研究は、経済産業省の浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業の一環として実施された。ここに記して関係者の皆様に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Gerrit Wolken-Möhlmann : Simulation of motion induced measurement errors for wind measurements using LIDAR on floating platforms, Fraunhofer IWES, Am Seedeich 45, 27572 Bremerhaven, Germany, 2011
- 2) Julia Gottschall, Hristo Lilov, Gerrit Wolken-Möhlmann, Bernhard Lange : Lidars on floating offshore platforms / About the correction of motion-induced lidar measurement errors (simulations and first experiments), EWEA, 2012.4
- 3) 川東龍則, 石原孟, 若林蘭 : 浮体式ドップラーライダーの動揺補正に関する研究, 第35回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.355-358, 2013
- 4) Edson J. B. et. al. : Direct Covariance Flux Estimates from Mobile Platforms at Sea, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 15, pp. 547-562, 1998