

# 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

若林 蘭\* 川東 龍則\* 山口 敦\* 石原 孟\*  
\*東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻



## 目的

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[3]が、この研究で用いられた手法は、1自由度のみの動揺を考慮していたため、実際のように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。一方、浮体に搭載した超音波風速計に対しては座標変換による補正式がFujitaniにより定式化されている[4]が、計測原理の異なるライダーへの適用可能性は不明である。

そこで本研究では、6自由度の動揺を考慮したライダーの計測原理に基づく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イ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。

## 福島県沖浮体式洋上ウインドファーム実証実験

この実証実験では、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。

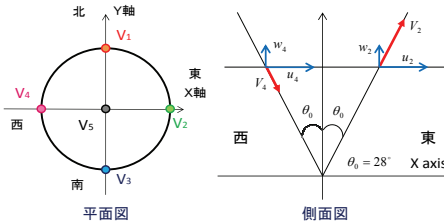


## ライダーの計測原理

本研究ではパルス式のWindcube V2 Offshoreを用いた。この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。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。

Windcube V2 Offshore の概要

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



## 水平静止固定時の風速推定手法

東方向の視線風速を $V_2$ 、西方向の視線風速を $V_4$ とする。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すると、水平風速の東西成分 $u$ と鉛直成分 $w$ はそれぞれ以下のように求まる。

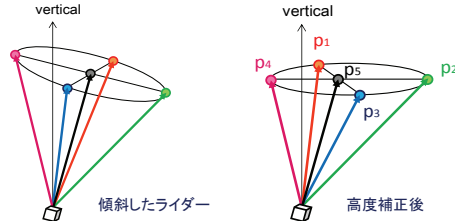
$$u = \frac{V_2 - V_4}{2 \sin \theta_0} \quad w = \frac{V_2 + V_4}{2 \cos \theta_0}$$

Windcube V2 Offshoreでは、 $\theta_0 = 28^\circ$ である。

## 補正手法

### ■ 高度補正

6自由度の動揺が生じると、各ビームの計測高度が目標高度からずれる。そのため、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る。



### ■ 傾斜補正

$p_2-p_4$  平面内と、 $p_1-p_3$  平面内の水平風速算出

ライダーのピッチ角を $\beta$ とすると、水平面から見た視線風速の角度は

$$\varphi_2 = 90^\circ - \theta_0 - \beta$$

$$\varphi_4 = 90^\circ + \theta_0 - \beta$$

である。この時、視線風速( $V_2, V_4$ )は面内水平風速 $u_{2,4}$ と、 $p_2-p_4$ 平面内でこれに直交する風速 $w_{2,4}$ を用いて次式のように表される。

$$\begin{aligned} V_2 &= |u_{2,4}| \cos(\varphi_2) + |w_{2,4}| \sin(\varphi_2) \\ V_4 &= |u_{2,4}| \cos(\varphi_4) + |w_{2,4}| \sin(\varphi_4) \end{aligned}$$

この式を連立して解くと、 $|u_{2,4}|$ が求まる。

$$|u_{2,4}| = \frac{V_2 \cdot \sin \varphi_4 - V_4 \cdot \sin \varphi_2}{\sin \varphi_4 \cdot \cos \varphi_2 - \sin \varphi_2 \cdot \cos \varphi_4}$$

$p_1-p_3$ 平面でも同様にして、 $|u_{1,3}|$ を求める。

### 水平風速の大きさと風向

$u_{2,4}$ の向きを $\hat{u}_{2,4}$ 、 $u_{1,3}$ の向きを $\hat{u}_{1,3}$ とすると、次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \hat{u}_{2,4} &= \frac{u_{2,4}}{|u_{2,4}|} = \frac{p_2 - p_4}{|p_2 - p_4|} \\ \hat{u}_{1,3} &= \frac{u_{1,3}}{|u_{1,3}|} = \frac{p_1 - p_3}{|p_1 - p_3|} \end{aligned}$$

$u_{2,4}$ と $u_{1,3}$ の間の角度を $\psi$ とし、 $u_{2,4}$ と $u$ の間の角度を $\psi_u$ とする。

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

$$\psi_u = \arctan\left(\frac{|u_{1,3}| - |u_{2,4}| \cos \psi}{|u_{2,4}| \sin \psi}\right)$$

$u_{2,4}$ と $u$ の関係から水平風速 $u$ とその風向 $\hat{u}$ は次式のように表される。

$$u = \frac{|u_{2,4}|}{\cos \psi_u} \quad \hat{u} = \begin{pmatrix} \cos \psi_u & -\sin \psi_u & 0 \\ \sin \psi_u & \cos \psi_u & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} u_{2,4}$$

### 鉛直風速

鉛直風速は、各視線風速から算出されつ鉛直風速の平均値として計算される。

$$w = \frac{V_i - u_x \hat{p}_{ix} - u_y \hat{p}_{iy}}{\hat{p}_{iz}}$$

ただし、

$$(u_x, u_y) = u, (\hat{p}_{ix}, \hat{p}_{iy}, \hat{p}_{iz}) = \hat{p}_i = \frac{p_i}{|p_i|}$$

### ■ 動揺速度補正

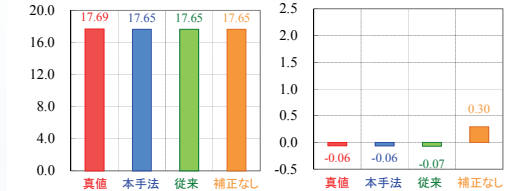
水平風速 $u_{true}$ はライダーの移動 $u_t$ を傾斜補正後のライダー算出風速 $u$ から差し引くことで得られる。[4]  
 $u_{true} = u - u_t$

## 検証方法と結果

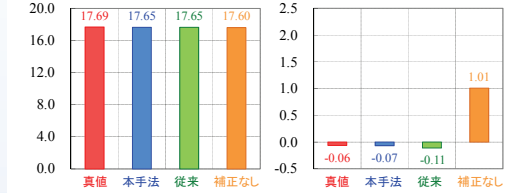
### ■ シミュレーションによる検証

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、ライダーによって計測される視線風速を算定した。次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。

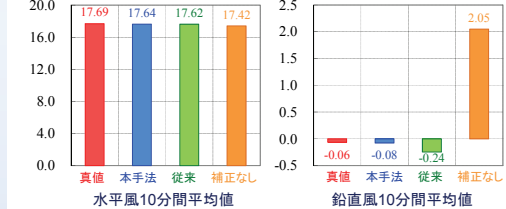
最大傾斜角5度



最大傾斜角15度



最大傾斜角30度

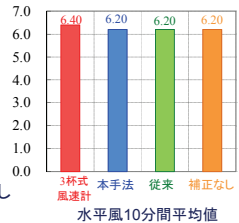


- 動揺が大きいかほど補正しない場合の誤差は大きい。
- 従来の方は最大傾斜角が小さい場合の誤差は小さいが、最大傾斜角が大きくなるにつれて誤差が大きくなる。
- 提案した補正手法は最大傾斜角に関わらず、高精度な補正が可能である。

### ■ 観測値による検証

実際に福島県沖実証実験でライダーにより観測された風速を補正し、3杯式風速計観測値と比較することにより検証した。3杯式風速計も浮体に搭載されているため、従来の補正式で補正した。

- シミュレーションと同様、提案した手法は有効である。



## 結論

本研究では、6自由度の動揺を考慮したライダー観測値の補正手法を提案し、シミュレーションと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. 動揺が大きいかほど補正しない場合の誤差は大きい。
2. 従来の方は最大傾斜角が小さい場合の誤差は小さいが、最大傾斜角が大きくなるにつれて誤差が大きくなる。
3. 提案した補正手法は最大傾斜角に関わらず、高精度な補正が可能である。最大傾斜角が30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。
4. 提案した補正手法は、実浮体に搭載したライダーの浮体動揺補正に適用することが出来る。

## 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] Fujitani, T.: Direct measurement of turbulent fluxes over the sea during AMTEX. Pap. Meteor. Geophys., 32, 119-134, 1981.