

浮体式ドップラーライダーの動揺補正に関する研究

川東 龍則* 石原 孟* 若林 蘭*

*東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻

目的

2013年、世界初の浮体式洋上風力発電所の実証試験が福島沖で開始した。大水深域における風速観測手法として、従来の風況マストによる観測は建設に多額の費用が必要となる。そこで、浮体式サブステーションに搭載したドップラーライダーにより、上空における風向風速を計測する手法が提案されている^{[1],[2]}。



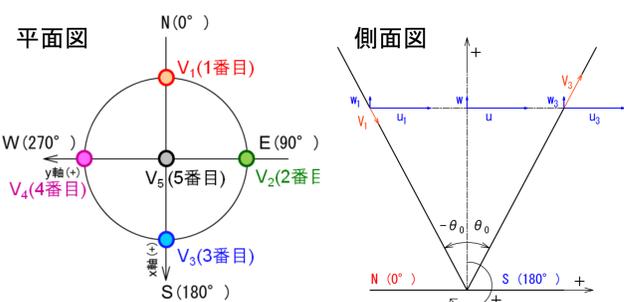
このとき浮体の動揺によるライダーの傾斜および水平移動が観測値に影響を与えることが問題となる^[1]。そこで、本研究では、静的傾斜および水平移動速度に対する補正方法を提案するとともに、観測値との比較により提案手法の検証を行う。

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、約1秒間隔で東西南北4方向に照射角 θ_0 で順次レーザを照射し、風速の各照射方向の成分を予め設定した高度別に測定する。この風速のことを、以下、視線風速と呼ぶ。視線風速を組み合わせることにより風速の3成分を算出する。

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

北方向と南方向の視線風速をそれぞれ V_1, V_3 とする。各レーザ照射時間内における風速は定常であると仮定し、各レーザの照射点は空間的なずれを無視すると、水平風速の南北成分 u と鉛直風速 w はそれぞれ以下のように求まる。

$$u = \frac{-V_1 + V_3}{2 \sin \theta_0} \quad w = \frac{V_1 + V_3}{2 \cos \theta_0}$$

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

検証試験サイト

提案した補正手法の検証のために茨城県神栖市波崎町において実試験を行ない、風況マストにおける観測値と比較した。風況マストには高度60mに3成分超音波風速計が設置されており、1秒間隔で連続的にデータを取得している。ただし、鉛直方向の風速データは機器の故障により得られなかったため、ライダーの静止固定時から計測した。



傾斜補正

傾斜補正手法として、水平固定時と同様に南北の照射方向の視線風速を使う方法と、ライダー垂直方向の風速を利用する手法を提案し、ライダーを南方向に15度傾斜させた試験結果を行うことにより、提案した手法を検証した。

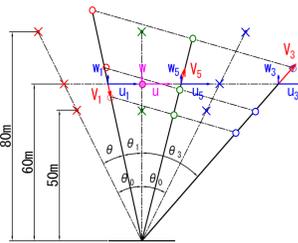


■ 南北方向の視線風速を用いる手法(傾斜補正)

ライダー本体の傾斜角 θ に対して、北と南のレーザ照射角はそれぞれ $\theta_1 = \theta_0 - \theta, \theta_3 = \theta_0 + \theta$ となる。このとき、それぞれの視線風速を V_1, V_3 とすると、水平風速の南北成分 u と鉛直風速 w はそれぞれ次式のように求まる。

$$u = \frac{-V_1 \cos \theta_3 + V_3 \cos \theta_1}{\sin \theta_1 \cos \theta_3 + \sin \theta_3 \cos \theta_1}$$

$$w = \frac{V_1 \sin \theta_3 + V_3 \sin \theta_1}{\sin \theta_1 \cos \theta_3 + \sin \theta_3 \cos \theta_1}$$



■ 垂直方向の視線風速を用いる手法(改良補正)

V_1 と V_3 の2本の視線風速において、水平および鉛直風速の寄与率が異なることを考慮し、視線風速 V_3 の代わりに、ライダー垂直方向の視線風速 V_5 を用いて、風速の鉛直成分を次式により推定する。

$$w = \frac{V_1 \sin \theta + V_5 \sin \theta_1}{\sin \theta_1 \cos \theta + \sin \theta \cos \theta_1}$$

このようにして求めた風速の鉛直成分 w を用い、視線風速 V_1, V_3 から、水平風速成分 u_1 と u_3 をそれぞれ求める。

$$u_1 = \frac{-V_1 + w \cos \theta_1}{\sin \theta_1} \quad u_3 = \frac{V_3 - w \cos \theta_3}{\sin \theta_3}$$

最後に水平風速成分 u を、 u_1 と u_3 の傾斜角に対する重み γ 付きの和として求める。

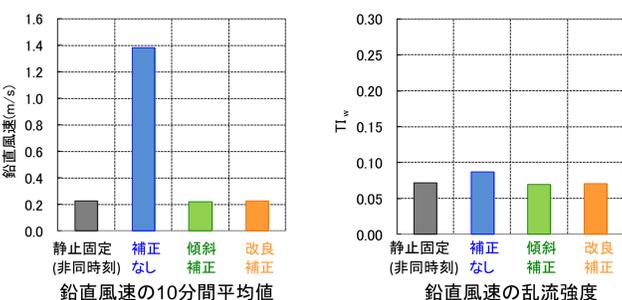
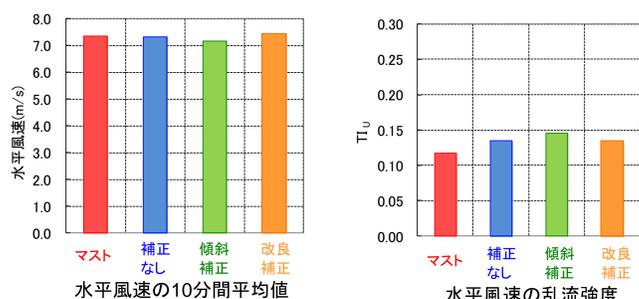
$$u = \gamma \cdot u_1 + (1 - \gamma) \cdot u_3$$

ここで重み γ は傾斜角 θ の関数である。

$$\gamma = 0.5 \cdot \left(\frac{\sin(\theta_0 - \theta)}{\sin(\theta_0 + \theta)} \right)$$

■ 検証結果

ライダー垂直風速を用い、傾斜角度の重み付きの和として求めた水平風速は、南北方向の視線風速のみを用いて求めた水平風速より実測値に近い結果を示した。また、鉛直風速は補正なしの場合に過大評価をしているのに対し、提案した手法により補正した風速は実測値とよく一致し、手法の有効性が示された。



移動速度補正

移動速度の補正手法を提案し、荷台に搭載したライダーにより風速を計測しながら、軽トラックを時速20~30kmで運転することにより、提案した手法を検証した。

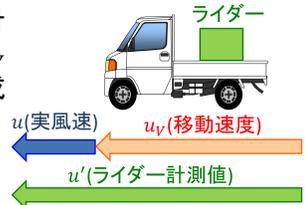


また、軽トラックの移動速度を高精度に求めるために、RTK GPSによる計測を同時に行った。

■ 移動速度に対する補正手法

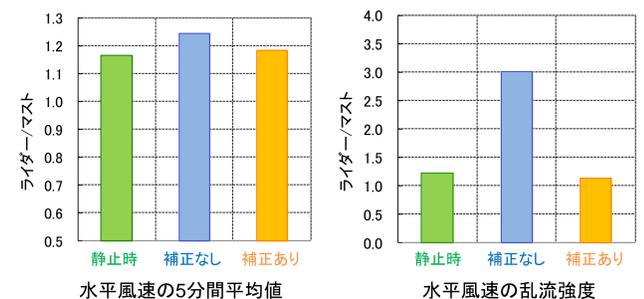
水平移動時のライダーの計測値 u' から水平移動速度 u_V を差し引くことで水平風速成分 u を求める^[3]。

$$u = u' - u_V$$



■ 検証結果

走行試験路とマストは約200m離れており風速が異なるため、マストデータとの比による比較を行った。観測値(静止固定時)に対して補正ありの評価値は補正なしに比べて平均値、乱流強度ともに評価精度が向上し、提案した手法の有効性が示された。



まとめ

本研究では静的傾斜および水平移動速度に対する風速補正方法を提案した。風況観測マストの観測データを用いて検証を行い、以下の知見が得られた。

- 1) 静的傾斜に対しては、傾斜補正手法を用いることで鉛直風速の評価精度が大幅に改善した。傾斜角度の重み関数を用いることにより、水平風速の平均値の評価精度が向上した。
- 2) 水平移動速度に対しては、実測値から移動速度を差し引くことにより、評価精度が向上した。

今後、浮体動揺の特性(振幅、周期、自由度)を考慮した3次元風速場を用いて、数値解析により補正手法の有効性を検証する。

謝辞

本研究は、経済産業省の浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業の一環として実施された。また、試験実施に際して、東京大学大学院工学系研究科の荒川忠一教授、飯田誠特任准教授、波崎ウインドファーム(株)安武国昭所長にはご協力をいただいた。ここに記して関係者の皆様に感謝の意を表する。

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] 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