

浮体式ライダーを利用した乱流計測と模擬自然風による精度検証

東京大学 正会員 ○山口 敦
 東京大学 正会員 京増 顕文
 東京大学 正会員 石原 孟

1. はじめに

洋上風力発電所の設計のために、浮体式ドップラーライダーを利用した高高度の風速の観測が着目されている。平均風速については従来の風速計と同等の結果が得られるが、乱流強度については、浮体動揺による計測誤差があることが指摘されている¹⁾。これに加え、ドップラーライダーでは一般的に乱流強度の鉛直成分が大きい場合に水平の乱流強度が大きくなることが指摘されている²⁾。乱流の鉛直成分による誤差をなくすために、ライダーで計測した視線風速の標準偏差から水平風速の標準偏差を直接推定する手法も提案されている³⁾が、この手法は浮体式ライダーには適用できないという問題がある。

そこで、本研究では、乱流統計量を満足する3次元模擬風速場を用い、浮体式ライダーによる乱流強度の計測誤差の原因について分析を行うとともに、計測誤差の補正手法を提案し、模擬風速場による精度検証を行う。最後に、提案した水平風速の標準偏差の補正手法を、洋上に設置したドップラーライダーに適用し、検証を行う。

2. 模擬風速場を利用した浮体式ライダーのシミュレーション

本研究では、石原ら(2008)⁴⁾の提案した手法を用いてスペクトルやコヒーレンスなどの乱流統計量を満足する3次元模擬乱流風速場を発生させ、発生させた乱流風速場内に浮体式ドップラーライダーを仮想的に設置し、浮体動揺を仮定してドップラーライダーの視線風速をシミュレーションにより求めた。本研究で想定したパルス式ドップラーライダーでは、鉛直から1秒毎に約30度の角度で東西南北方向と、鉛直方向に順番にレーザー光を照射して風速のレーザー光照射方向(視線方向)成分を測定し、 $V_1, V_2, \dots, V_5$ とする。

本研究ではこのようにして仮想的に測定した視線風速 $V_1, V_2, \dots, V_5$ と浮体動揺の情報から、Yamaguchi and Ishihara¹⁾によって提案された手法を用いて水平風速の乱流強度を推定した。このようにして求めた乱流強度と実際の乱流強度の比を、変動風速の鉛直成分と水平成分の比、すなわち σ_w/σ_u の関数としてプロットしたものを図1に示す。

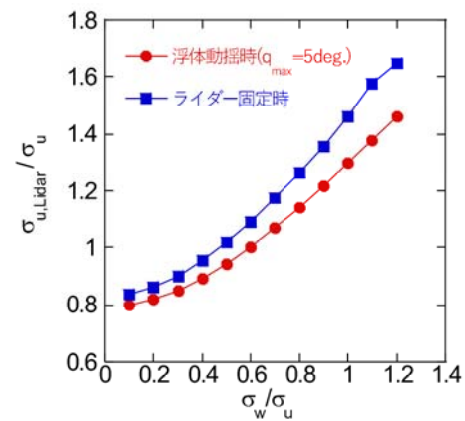


図1 浮体ライダーにおける乱流の鉛直成分が水平風速の標準偏差に与える影響

乱れの鉛直成分が増大するにつれ、ライダーで計測した変動成分が過大評価することが分かる。また、浮体固定時に比べ浮体動揺時の方が過大評価の程度が小さいことがわかる。

3. 補正手法の提案と検証

前節で述べた鉛直成分による誤差を補正するため、本研究では図1に示す比の逆数、すなわち視線風速から推定した標準偏差 $\hat{\sigma}_u$ の比を、 σ_w/σ_u の関数として(1)式によりモデル化し、(2)式に示すように固定ライダーの補正前の標準偏差に乘じることで、計測誤差を補正する手法を提案した。

$$C_s \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_u}, \theta_{\text{pitch}} \right) = \frac{\hat{\sigma}_u(\sigma_w/\sigma_u)}{\hat{\sigma}_{u, \text{Lidar}}(\sigma_w/\sigma_u, \theta_{\text{pitch}})} \quad (1)$$

$$\sigma_u^s = C_s \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_u}, \theta_{\text{pitch}} \right) \cdot \sigma_{u,\text{Lidar}} \quad (2)$$

また、実際のドップラーライダーでは、視線方向に空間平均した風速を計測している。そのため、本研究では種本ら(2022)⁵⁾によって提案された補正式(式(3))を用いて、レンジゲート長による空間平均化の効果を補正した。

$$\sigma_u^{\text{final}} = \sigma_u^s + \phi(u) \quad (3)$$

図2に(3)式に示す補正項 $\phi(u)$ を示す。

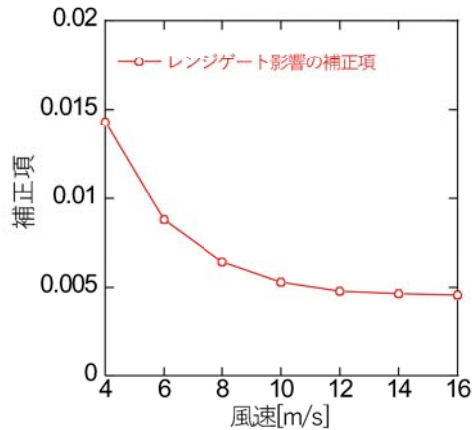


図2 補正係数 C_s と補正項 $\phi(u)$

銚子洋上プラットフォームにて計測された実測データに提案した手法を適用し検証した。図3に風速別乱流強度の90%分位値を示す。補正前には超音波風速計による観測値を過大評価しているが、(2)式による補正を行うことにより過大評価が改善し、逆に過小評価となる。さらに(3)式による補正項を加えることにより、過小評価が改善し、超音波風速計による観測値と一致することがわかる。

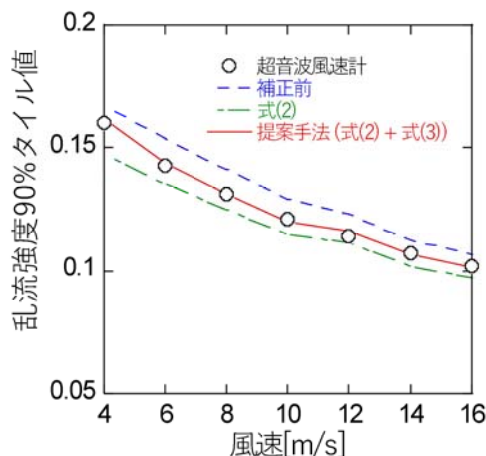


図3 風速別乱流強度の90%分位値

4. まとめ

本研究では、浮体式ライダーによる水平風速の標準偏差の計測誤差の要因を明らかにするとともに補正手法を提案し、以下の結論を得た。

- 1) 浮体式ライダーにより計測された水平風速の標準偏差には、乱れの鉛直成分が含まれることにより、乱れの鉛直成分が大きい場合に実際の値を過大評価する。また、ライダー固定時に比べ、浮体動揺時には過大評価の程度は小さい。
- 2) 提案した手法により鉛直の乱れの効果を補正することが可能であるが、この手法を実測データに適用すると、レンジゲートの影響により乱れの影響を過小評価する。
- 3) レンジゲートの影響を補正する補正式を提案し、この式を用いることにより、超音波風速計で計測した実際の乱れ強度とよく一致することを示した。

参考文献

- 1) Yamaguchi and T.Ishihara: A new motion compensation algorithm of floating lidar system for the assessment of turbulence intensity, Journal of Physics: Conference Series 753(7), pp.1-8, 2016.
- 2) 山口敦、京増顕文、石原孟：ドップラーライダーを利用した高高度の乱流計測と模擬自然風による精度検証、第44回風力エネルギー利用シンポジウム、2022。
- 3) Thiébaud, M., Cathelain I, M., Yahiaoui, S., Esmail, A., Deriving atmospheric turbulence intensity from profiling pulsed lidar measurements, *Wind Energ. Sci. Discuss.* [preprint], 2022.
- 4) 石原孟、ファムバンフック、山口敦、実測風速を組み込んだ風力発電設備支持物の風応答予測、第20回風工学シンポジウム論文集, pp.265-270, 2008.
- 5) 種本 純、林 岑蔚、高橋 和也、隅田 耕二、白枝 哲次、デュアルスキャンライダーによる乱流強度観測値の補正に関する検討、第44回風力エネルギー利用シンポジウム、2022。