

浮体式ドップラーライダーの動揺補正に関する研究*

A study of motion effects and their correction with floating lidars

川東 龍則** 石原 孟** 若林 蘭***
Tatsunori KAWAHIGASHI Takeshi ISHIHARA Ran WAKABAYASHI

1. はじめに

我が国では、本年度から福島沖に浮体式ウィンドファームを建設するプロジェクトが進行中である。一般に風力発電の計画や運用にあたっては風況観測が欠かせないが、洋上の大水深域に風況マストを建設するには多額の費用が必要となり、その解決策として浮体に搭載したドップラーライダー(以下、ライダー)の適用が検討されている^{1), 2)}。ライダーを動揺する浮体に設置する場合、浮体動揺による計測結果への影響が懸念される。動揺によるライダー計測への影響は、動揺の種類により傾向が異なること、また傾斜角による影響が顕著であることが既往の研究¹⁾により、明らかにされている。

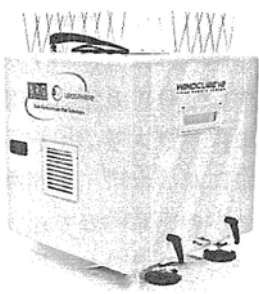
そこで本研究では、静的傾斜および水平移動速度に対する補正方法を提案し、検証試験を実施して補正効果の確認を行った。

2. ライダーの計測原理と補正方法

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	

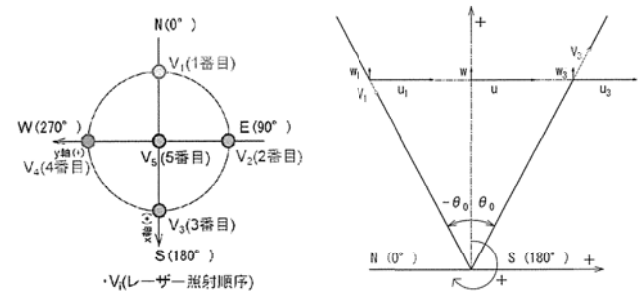
*平成25年11月13日第35回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

** 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

*** 非会員 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のものであり、約1秒間隔で東西南北4方向に 28° の角度をもって順次レーザを照射し、最後に鉛直方向に照射する。図1(a)にレーザー照射の方向と順序を示す。出力として、各照射方向の風速ベクトル(以下、視線風速)が予め設定した高度別に得られ、これらの値を組み合わせることにより風速の3軸成分を算出する。



(a)平面図

(b)側面図

図1 静止状態のレーザー照射状況

図1(b)に静止固定状態におけるN-S面内の視線風速、水平と鉛直風速成分を示す。視線風速 V_1 、 V_3 は、水平風速成分 u_1 、 u_3 と、鉛直風速成分 w_1 、 w_3 および照射角 $\theta_0 = 28^\circ$ から式(1)により表わされる。

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

$$V_3 = u_3 \sin \theta_0 + w_3 \cos \theta_0 \quad (1b)$$

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。

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

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

ここで、各レーザー照射時間内における風速は定常であると仮定している。また、各ビームの参照点は実際には数10m離れているが、空間的な差異が無いものと仮定している。表2に各照射方向の視線風速と算出される風速成分 u 、 w との関係を示す。風速は過去約5秒間の視線風速を用いて算出したものである。従って、ライダーの計測結果は時間と空間において平均的な値となる。

表2 視線風速と算出される水平風速

時刻	視線風速計測					算出項目		
	V1	V2	V3	V4	V5	u成分	v成分	水平風速U
	N(0°)	E(90°)	S(180°)	W(270°)	鉛直	(N-S成分)	(E-W成分)	
1	○							-
2		○						-
3			○			○+○		-
4				○			○+○	○○○○
5	-	-	-	-	○	-	-	-
6	△					○+△		○○○△
7		△					○+△	○○△△
8			△			△+△		△△△△
9				△			△+△	△△△△
10	-	-	-	-	△	-	-	-

2. 2 静的傾斜と移動速度に対する補正

式(2)の導出から分かるように、ライダー傾斜時に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。本研究ではその補正方法を提案する。図2に静的傾斜時における計測高度を示し、図2中の○印は傾斜後の計測高度を示す。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。

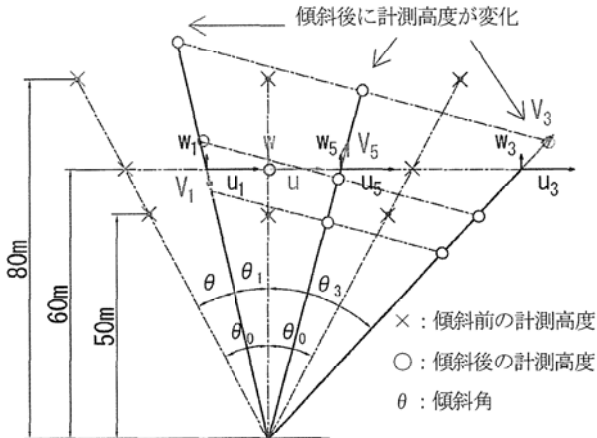


図2 静的傾斜時における計測高度

静的傾斜時におけるレーザー照射角は傾斜角 θ を考慮し、それぞれ $\theta_0 - \theta$ と $\theta_0 + \theta$ となる。ここで、 $\theta_0 - \theta = \theta_1$ 、 $\theta_0 + \theta = \theta_3$ とした。目標高度に内挿された視線風速と、そこでの風速成分の関係は、式(3a)と式(3b)により表わせる。

$$V_1 = -u_1 \sin \theta_1 + w_1 \cos \theta_1 \quad (3a)$$

$$V_3 = u_3 \sin \theta_3 + w_3 \cos \theta_3 \quad (3b)$$

ここで式(2)と同様に、 $u_1 = u_3 = u$ 、 $w_1 = w_3 = w$ と仮定すると、 u 、 w が次式のように求まる。

$$u = \frac{-V_1 \cdot \cos \theta_3 + V_3 \cdot \cos \theta_1}{\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_3 + \sin \theta_3 \cdot \cos \theta_1} \quad (4a)$$

$$w = \frac{V_1 \cdot \sin \theta_3 + V_3 \cdot \sin \theta_1}{\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_3 + \sin \theta_3 \cdot \cos \theta_1} \quad (4b)$$

図2中に示す V_1 と V_3 の2本の視線風速が、水平および鉛直風速からの寄与の割合が異なることを考慮し、視線風速 V_1 と V_3 の代わりに、鉛直風速への寄与が大きいと考えられる2本の視線風速 V_1 と V_5 (鉛直方向)から鉛直風速成分を求める。 V_5 は次式により表わせる。

$$V_5 = u_5 \cdot \sin \theta + w_5 \cdot \cos \theta \quad (5)$$

ここで、 $u_1 = u_5 = u$ 、 $w_1 = w_5 = w$ と仮定すると、鉛直成分が式(6)により求まる。

$$w = \frac{V_1 \cdot \sin \theta + V_5 \cdot \sin \theta_1}{\sin \theta_1 \cdot \cos \theta + \sin \theta \cdot \cos \theta_1} \quad (6)$$

式(6)から求めた鉛直風速成分 w を視線風速 V_1 、 V_3 の式(3a)、式(3b)に代入すると、水平風速成分 u_1 と u_3 は以下のように求まる。

$$u_1 = \frac{-V_1 + w \cdot \cos \theta_1}{\sin \theta_1} \quad (7a)$$

$$u_3 = \frac{V_3 - w \cdot \cos \theta_3}{\sin \theta_3} \quad (7b)$$

最終的に水平風速成分 u は、 u_1 と u_3 に傾斜角に対する重み γ を付けて、式(8)により求まる。

$$u = \gamma \cdot u_1 + (1 - \gamma) \cdot u_3 \quad (8)$$

重み γ は傾斜角 θ の関数とし、式(9)により表す。

$$\gamma = 0.5 \cdot \left(\frac{\sin(28^\circ - \theta)}{\sin(28^\circ + \theta)} \right) \quad (9)$$

本研究では移動物体上に設置したライダーにより求めた風速には水平移動速度成分が含まれているため、この水平移動速度を差し引き、式(10)により水平風速成分を求めた³⁾。

$$u = u' - u_v \quad (10)$$

ここで、 u は水平風速成分、 u' は水平移動時のライダーの計測値、 u_v は水平移動速度である。

3. 検証試験と結果

3. 1 試験方法

試験は図3に示す茨城県神栖市波崎町の海岸において、2013年2月25日～3月8日に行った。ここには東京大学の風況観測マストがあり、補正方法の検証に必要なデータが得られる。ライダーは風況観測マストの南東約60mの位置に設置した。風況観測マストには、60m高度に3軸超音波式風速計が設置されており1秒間隔で連続的にデータ収集が行われている。ただし、鉛直速度成分のデータは機器の故障により得られていない。



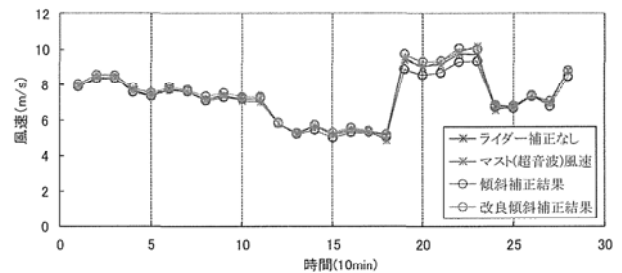
図3 試験実施場所と観測機器配置

静的傾斜に対する補正の効果を検証するために、静止固定状態(傾斜 0°)および、静的傾斜時(傾斜角 15°)のライダーの計測データと風況観測マストの観測データを収集した。また、移動速度の影響に対する補正を検証するため、ライダーをトラックに設置して、水平移動時の計測データも収集した。水平移動速度はGPS装置3台により計測した。走行は図3中に示す南南東に向かう約300mの直線道路を時速20~30kmで数回往復した。走行路はマストから約200m離れた一般舗装道路であり、マストと道路の間には防砂林と砂山が存在する。

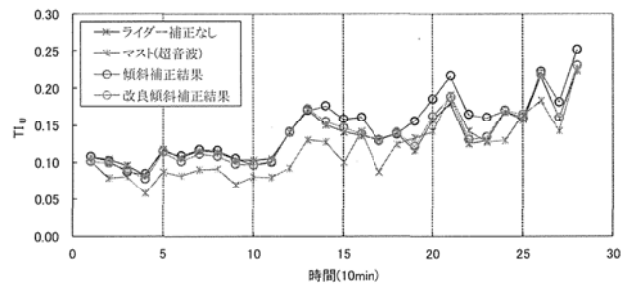
3.2 試験結果

静的傾斜時の水平風速の試験結果は、水平風速の10分間平均値および乱流強度の時系列データを図4に示し、また風況観測マストの結果と各種補正結果の比較を図5に示す。水平風速の10分間平均値は、改良した傾斜補正の結果が最もマストデータに近い。また、水平風速の乱流強度は、補正の有無によらず、マストデータと若干の違いがみられた。水平風速の乱流強度は、傾斜がない場合にも違いがみられており、傾斜による影響よりもライダーとマストの設置位置の違いによる影響が大きいと考えられる。

図6には、鉛直風速の10分間平均値および鉛直風速の乱流強度の時系列データを示す。また、静止固定時の結果と各種補正結果の比較を図7に示す。鉛直風速の10分間平均値は、補正の有無で傾向が大きく異なる。傾斜のない状態における鉛直風速がほぼ 0.2 m/s であることから、鉛直風速に対する補正は不可欠であることが分かる。

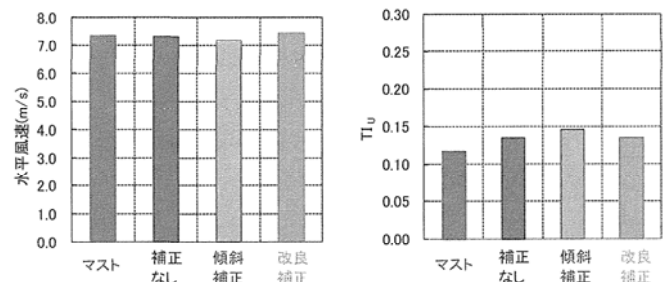


(a)水平風速の10分間平均値



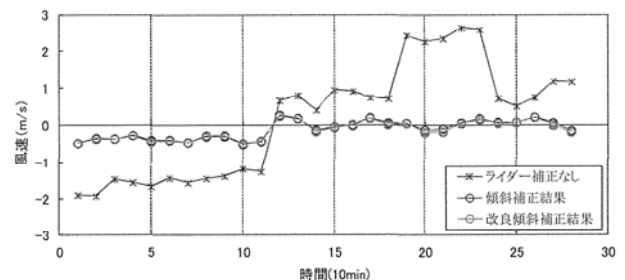
(b)水平風速の乱流強度

図4 静的傾斜に対する水平風速の補正結果の時系列データ

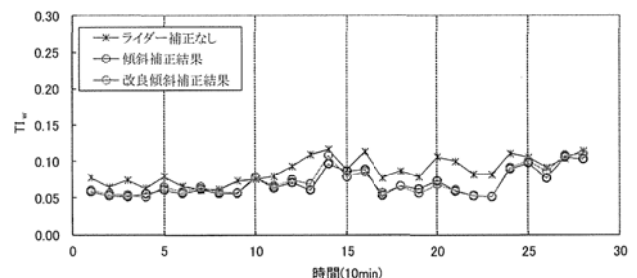


(a)水平風速の10分間平均値 (b)水平風速の乱流強度

図5 風況観測マストの結果と各種補正結果の比較(水平風速)



(a)10分間平均値



(b)乱流強度

図6 静的傾斜に対する鉛直風速の補正結果の時系列データ

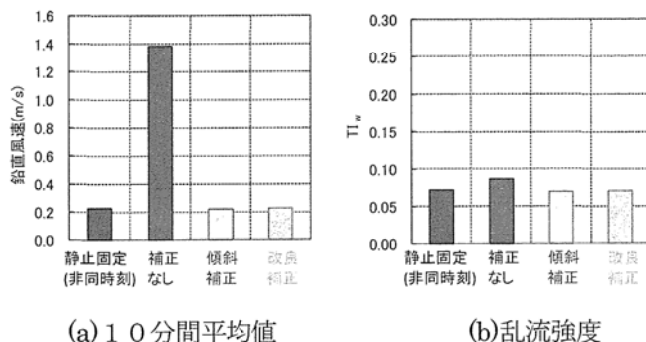


図7 静止固定時と各種補正の結果の比較(鉛直風速)

水平移動時の水平風速の瞬時値の時系列データを図8に示す。補正なしのデータは水平移動速度の影響による大きなピークが現れているが、水平速度に対する補正結果はマストデータの計測結果と良い一致を示した。また、走行試験路はマストから約200m離れており、走行路とマストでは風速が異なっているため、直接マストデータと補正結果を比較するのではなく、マストデータとの比による比較を行った。水平風速の5分間平均値と乱流強度のマストデータと補正結果の比の平均値を図9に示す。補正結果とマストデータの比は、静止固定時の計測結果とマストデータの比と良い一致を示した。

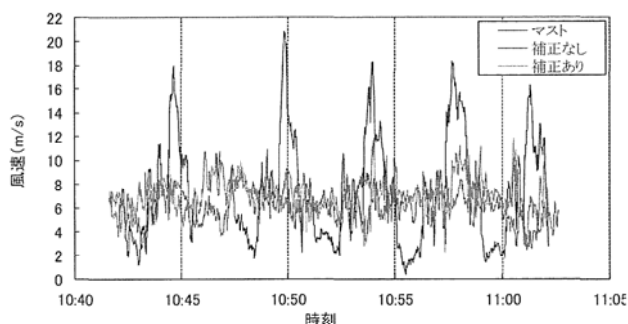


図8 風況マストとライダーによる水平風速の時系列データの比較

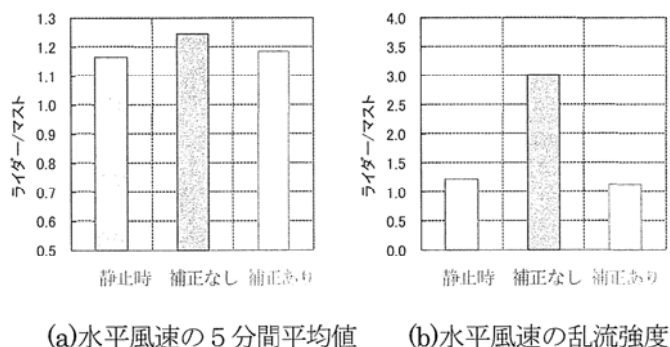


図9 風況マストの観測結果とライダーの観測結果の比較

4. まとめ

浮体上に設置したライダーの動揺補正方法の開発を目指し、静的傾斜および水平移動速度に対する補正方法を提案し、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測定精度が向上した。また、静的傾斜は鉛直風速に与える影響が水平風速より大きく、静的傾斜に対する補正が必要であることがわかった。
- 2) 水平移動速度に対しては、移動速度を差し引くことにより、風況観測マストデータとよい一致を示した。

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し、風況観測マストの観測データと比較して有用性を確認した。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方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ィ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、波崎ウィンドファーム(株)安武国昭所長にはご協力をいただきました。ここに記して関係者の皆様に感謝の意を表します。

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) 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