

浮体式ドップラーライダーを用いた

洋上風況観測手法の提案と検証*

A new motion compensation algorithm of floating doppler lidar

山口 敦**

Atsushi YAMAGUCHI

石原 孟**

Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

洋上における新しい風況観測手法として、浮体上に設置したドップラーライダーによるリモートセンシングが期待されているが、この手法による計測には浮体動揺に起因する計測誤差が含まれるため補正をする必要がある。動揺補正手法としては機械的な動揺補正手法¹⁾やソフトウェアを用いた補正手法が提案されている^{2,3)}。Tiana-Alsia et al.¹⁾は機械的な動揺補正手法を提案し、平均風速について補正を行わない場合より補正を行った方がよいことを示した。ソフトウェアを用いる補正手法は浮体の動揺計測装置以外には新たなハードウェアが不要であるという利点がある。Wolken-Möhlmann and Lange²⁾は提案した動揺補正アルゴリズムを人工的に発生させた3次元風速場に適用し、補正手法が平均風速を高精度に再現できることを示した。若林ら³⁾も動揺補正手法を提案し、異なる浮体運動を用いて平均風速の検証を行った。

これら従来の研究は平均風速に着目したものであり、乱流強度の精度の検証は行われていない。ライダーによる風速計測のサンプリング周期は通常の3杯風速計あるいは超音波風速計と比較して長いため、ライダーによる乱流計測には不確実性が多く含まれていると考えられる。実際、若林らの方法に基づきシミュレーションを行うと乱流強度を常に過大評価する。

本研究では、従来のドップラーライダーの動揺補正手法の問題点を明らかにするとともに、ドップラーライダーの計測原理に基づき、平均風速と乱流強度の両方の計測に適用可能な動揺補正手法を提案し、数値シミュレーションを用いて検証する。

2. 3次元風速場の発生と仮想的な視線風速の算定

本研究ではまず、石原ら⁴⁾の方法を用いて人工的な3次元乱流風速場を発生させた。この方法ではまず、y-z平面、すなわち風速に垂直な平面内の3次元風速場の仮想的な時刻歴を乱流のパワースペクトルおよび変動成分の空間相関を考慮して発生させる。パワースペクトルおよび空間相関はIEC61400-1[6]に規定されているカイマルスペクトルおよび指数減衰モデルを用いた。また、風方向・風直角方向・鉛直方向の乱流強度の比もIEC61400-1[6]に規定されている値を用いた。ここで発生した3次元風速場 $\tilde{\mathbf{u}}'(y, z, t) = (\tilde{u}'(y, z, t), \tilde{v}'(y, z, t), \tilde{w}'(y, z, t))$ は平均風速場 $\bar{\mathbf{u}}(y, z, t)$ が0であり、風方向の風速の標準偏差 σ_u が1となるように無次元化されていることに注意されたい。次に、ターゲットとする平均風速 $\bar{u}(z)$ と乱流強度 σ_u を用いて、y-z平面内の次元を持つ乱流風速場 $\hat{\mathbf{u}}(y, z, t)$ を(1)式によって求める。

$$\hat{\mathbf{u}}(y, z, t) = \sigma_u \times \tilde{\mathbf{u}}'(y, z, t) + \bar{\mathbf{u}}(z) \quad (1)$$

本研究では平均風速の鉛直プロファイルとしては、べき指数0.1を持つべき則を採用した。乱流強度は8%~15%の値を持つ複数の乱流風速場を発生させた。最後に、このy-z面内の風速場を(2)式に示すように、テイラーの凍結乱流仮説を仮定してx-y-z空間内の風速場に変換する。

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \hat{\mathbf{u}}\left(y, z, t - \frac{x}{\bar{u}(z)}\right) \quad (2)$$

本研究ではパルス式ライダーを例として採用した。パルス式ライダーは4あるいは5方向にレーザー光を射出し、空気中のエアロゾルに反射した際のドップラーシフトを計測することにより、風速のレーザー光射出方向成分(視線風速)を計測する。

*平成28年12月2日第38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

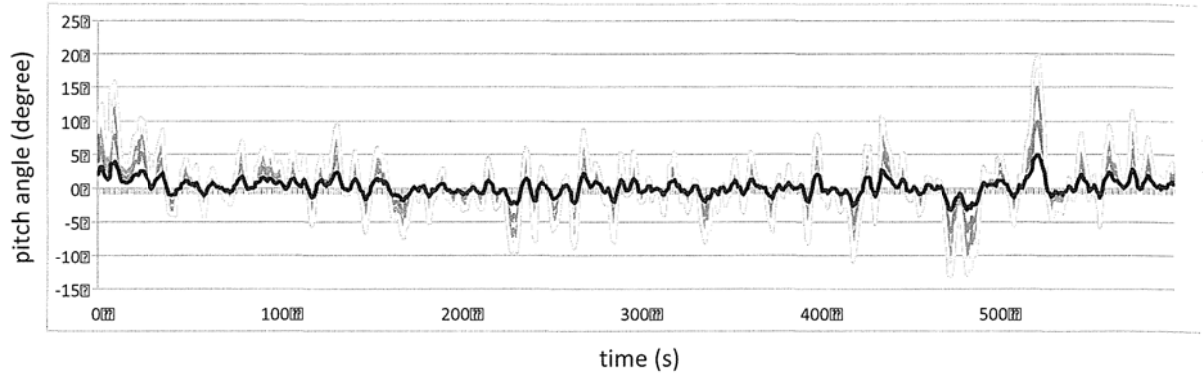


図1 本研究で用いた浮体動揺のピッチ角の一例

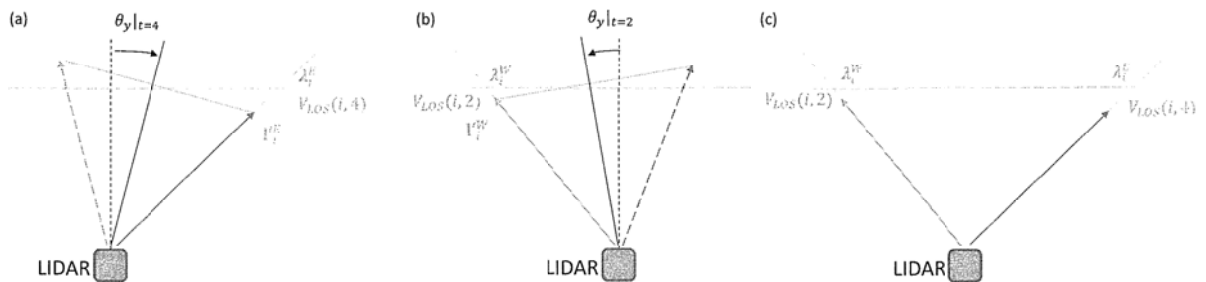


図2 $\mathbf{o} - \lambda_i^E - \lambda_i^W$ 面内の水平風速算定

(a) $t = 4$ における視線風速, (b) at $t = 2$, (c) 水平風速が推定される平面

本研究では発生させた3次元風速場の中で仮想的に計測したのパルス式ライダーの視線風速を、浮体動揺を考慮して算定した。時刻 t における高さレベル i の視線風速は(3)式によって計算できる。

$$V_{LoS}(i, t) = \left(\mathbf{u}[\mathbf{l}_i(t), t] - \frac{d}{dt} \xi[\mathbf{l}_i(t), t] \right) \cdot \frac{\mathbf{l}_i(t)}{|\mathbf{l}_i(t)|} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{l}_i(t)$ は視線風速が計測された位置の位置ベクトル、 $\xi[\mathbf{l}_i(t), t]$ は視線風速計測位置の浮体動揺による変位であり、(4)式によって計算できる。

$$\xi[\mathbf{l}_i(t), t] = \begin{pmatrix} \xi_x \\ \xi_y \\ \xi_z \end{pmatrix} + \mathbf{R}(\theta_x, \theta_y, \theta_z)(\mathbf{l}_i(t) - \mathbf{g}) \quad (4)$$

ここで、 $\xi_x, \xi_y, \xi_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ はそれぞれ浮体動揺の、サージ、スウェイ、ヒープ、ロール、ピッチ、ヨー成分であり、 $\mathbf{R}(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ は浮体動揺の回転行列、 $\mathbf{g}$ は浮体重心の位置ベクトルである。

浮体運動は福島洋上風力発電所のサブステーションにおける観測値⁵⁾を用い、同一の位相情報を用い、最大振幅が5度、10度、15度、20度となるように4つの異なる振幅を設定した。図1にそのような浮体動揺の一例を示す。

3. 新しい動揺補正手法の提案

従来の動揺補正手法の問題を解決するために、本研究では新しい動揺補正手法を提案した。新しい動揺補正手法は下記のステップからなる。

- 1) 視線風速のターゲット高度への内挿
このステップは、従来の手法と全く同じである。
- 2) $\mathbf{o} - \lambda_i^E - \lambda_i^W$ 面と $\mathbf{o} - \lambda_i^N - \lambda_i^S$ 面内の水平風速の推定

本研究で提案する手法では、視線風速を計測した際の浮体動揺角を用いる。図2は本研究で提案した手法での $\mathbf{o} - \lambda_i^E - \lambda_i^W$ 面内の水平風速の推定を示す。時刻 $t = 4$ における λ_i^E での視線風速 $V_{LoS}(i,4)$ (図2(a))と時刻 $t = 2$ における λ_i^W での視線風速 $V_{LoS}(i,2)$ (図2(b))を図2(c)に示すように組み合わせ、 $\mathbf{o} - \lambda_i^E - \lambda_i^W$ 面内の水平風速を推定する。この時に、各時刻における浮体動揺による速度成分を考慮する。

- 3) 水平風速の推定
水平風速の推定は従来の手法と同様に、 $\mathbf{o} - \lambda_i^E - \lambda_i^W$ 面と $\mathbf{o} - \lambda_i^N - \lambda_i^S$ 面内の水平風速を用いて行う。

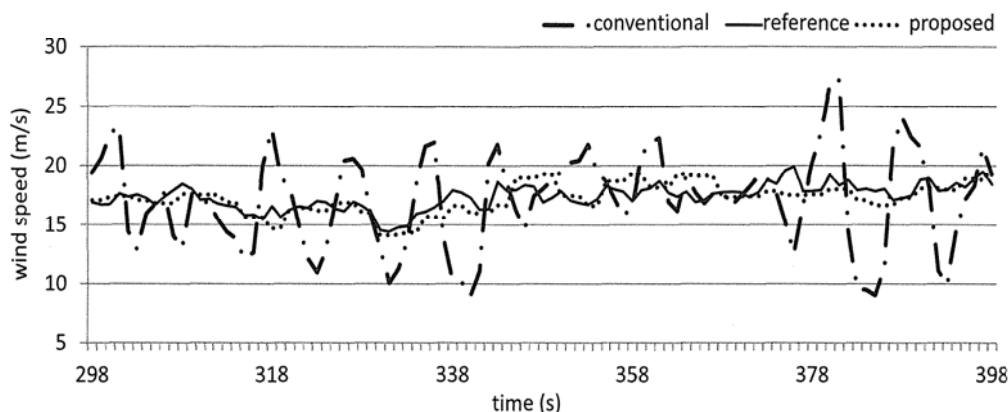


図3 瞬間風速の時刻歴

表1は提案した補正手法で使われるデータの一覧を示す。従来の手法と比較してライダーの動揺角および移動速度が全ての時間ステップで用いられていることがわかる。

表1 提案した手法において、 $t = 3$ において水平風速算定するために用いたデータ(x: 計測かつ使用, +: 計測されているが使用せず, -: 計測なし)

t	I_t^N	I_t^W	I_t^S	I_t^E	I_t^C	LIDAR angle	LIDAR velocity
1	x	-	-	-	-	x	x
2	-	x	-	-	-	x	x
3	-	-	x	-	-	x	x
4	-	-	-	x	-	x	x
5	-	-	-	-	+	+	+
6	+	-	-	-	-	+	+

4. 結果と検証

発生させた風速場中で求めた仮想的な視線風速から、従来の手法と提案した手法を用いて毎秒の水平風速を構築した結果を、元の発生させた風速場の風速値(参照値)とともに図3に示す。平均風速に大きな違いはないが、従来の手法は変動風速を大幅に過大評価していることがわかる。従来の手法は水平風速の瞬間値を過大あるいは過少評価しており、このことが変動風速および乱れ強度の過大評価につながっている。

図4はそれぞれの手法を用いて算定した水平風速の10分平均値と乱れ強度を参照値と比べたものである。平均風速については従来の手法と提案した手法の間にほとんど差がないにも関わらず、乱れ強度

については大きく異なる。特に浮体動揺の最大角度が大きい場合には、従来の手法によって算定された乱流強度が参照値を大幅に過大評価となっている。一方、本研究で提案した手法を用いた場合には浮体の最大動揺角に関わらず、参照値と比較してよく一致している。しかしながら、本手法を用いた場合でもバイアスが約-1.1%あり、わずかながら参照値を過小評価していることがわかる。

ドップラーライダーによる風速の測定が数秒単位で行われるため、それよりもスケールの小さな渦を計測することができず、このバイアスが生じたと考えることができる。この小さなスケールの渦による乱れ強度を補正するためには、さらなる研究が必要である。

5. 結論

本研究では、浮体式ドップラーライダーの新しい動揺補正手法を提案するとともに、数値解析を用いて水平風速の平均値と乱流強度の測定精度の検証を行った。以下の結論が得られた。

1. 従来の動揺補正手法を用いて算定された水平風速は、浮体の動揺角に関わらず参照値とよく一致した。しかしながら、乱流強度は常に過大評価となっていた。この過大評価は浮体の動揺が大きくなるにつれ顕著になる。これは瞬間風速の過大評価あるいは過少評価のためである。
2. 本研究で提案した手法が使われた場合、乱れ強度の過大評価は改善され、算定した乱流強度の値は参照値と近い値を示した。しかし、予測結果には約-1.1%のバイアスが含まれる。このバイアスはドップラーライダーにより計測する

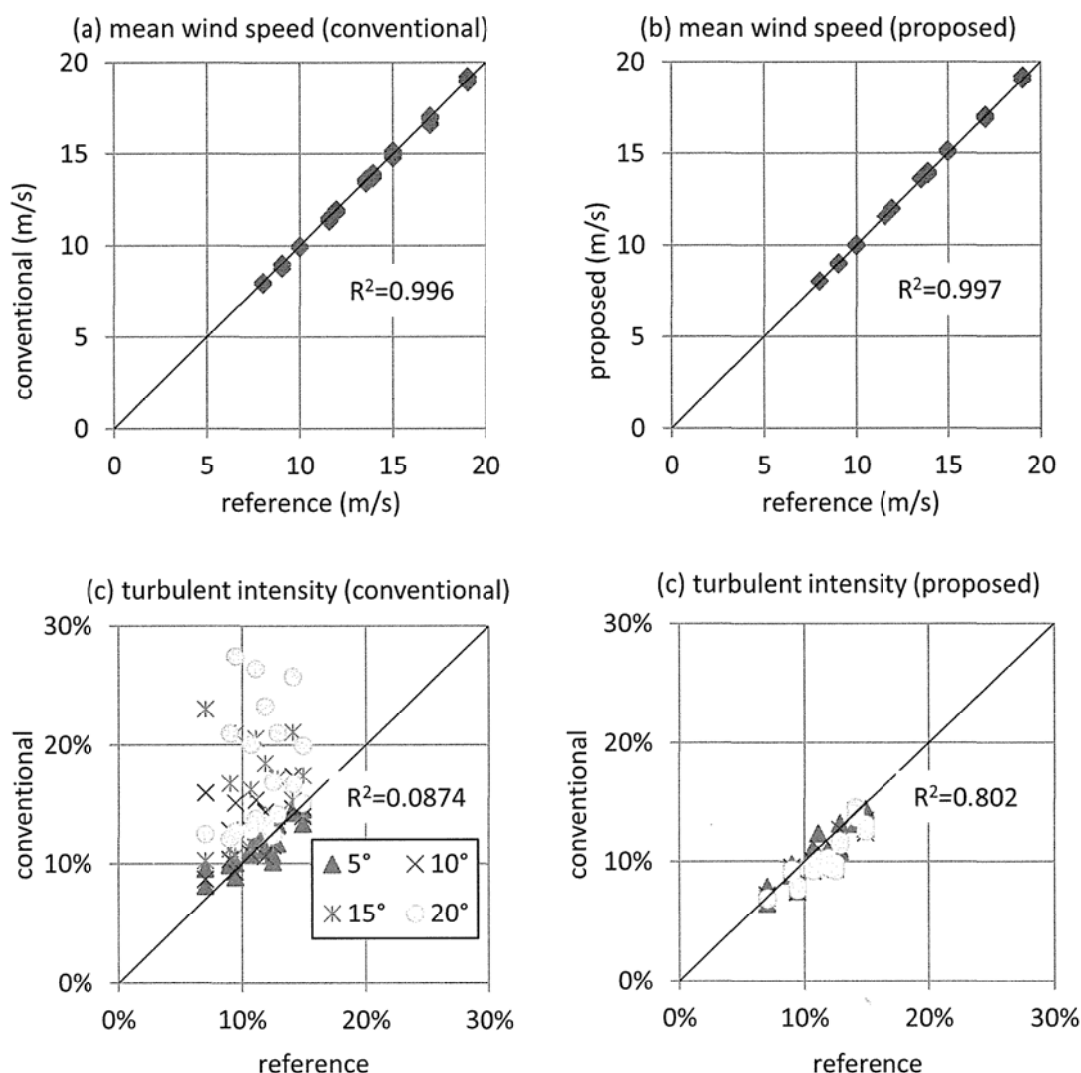


図4 平均風速と乱流強度の比較

水平風速が数秒の時間スケールを持っているためであると考えられる。

謝辞

本研究は、経済産業省の委託事業である福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業(Fukushima FORWARD)の一環として実施された。また洋上サブステーションでの観測についてはジャパンマリニュナイテッド(株)に協力を頂いた。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) J.Tiana-Alsina, M. A. Gutiérrez, I. Würth, J. Puigdefàbregas and F. Rocadenbosch, Motion compensation study for a floating Doppler wind lidar, IGARSS, Milan, Italy, 2015.
- 2) G. Wolken-Möhlmann, B. Lange. Simulation of motion-induced measurement errors for wind measurements with LIDAR on floating platforms. Proceedings of ISARS conference, Paris, 2010.
- 3) 若林蘭, 川東龍則, 山口敦, 石原孟, 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, 第36回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.329-332, 2014.
- 4) T. ISHIHARA, P. V. Phuc and A. Yamaguchi, Response analysis of wind turbine support structures using measured wind speed (in Japanese), Wind Engineering Symposium Japan, 265-270, 2008.
- 5) A. Yamaguchi and T. Ishihara, Current status of research activity on floating offshore wind turbine in Japan, OFFSHORE2013, 2013.