

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

Turbulence Measurement by Using Doppler Lidar and its verification by using synthetic turbulent wind field

山口 敦**

Atsushi YAMAGUCHI

京増顕文***

Akifumi KYOMASU

石原 孟**

Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

風況観測マストを用いない風況観測手法として鉛直ドップラーライダーによる風況観測が広く行われており、平均風速に関しては従来の三杯風速計と同等の結果が得られることが知られているが、ウィンドファーム認証のために必須となる乱流計測についてはまだ課題が残されており¹⁾、ライダーにより求めた乱流強度が実際の乱流強度を過大評価または過小評価するメカニズムが明らかにされていない。また、ライダーによる乱流計測については、ライダーにより求めた水平風速に基づくのではなく、視線風速の標準偏差から直接水平風速の標準偏差を求める手法も提案されている²⁾が、この手法の適用可能性も明らかにされていない。

本研究では地形の影響を受けない洋上を対象として、乱流風速場を模擬的に発生させ、鉛直ライダーによる計測を模擬し、模擬的に計測された視線風速から水平風速の乱流強度を推定する手法の検証を行い、ライダーにより計測された乱流強度と実際の乱流強度が異なるメカニズムを明らかにし、補正手法を提案するとともに、ライダーの視線風速の標準偏差から水平風速の標準偏差を求める手法の適用可能性を明らかにする。

2. 鉛直ライダーによる水平風速の変動成分の計測

本研究では岩谷³⁾の手法に基づき指定したパワースペクトルとクロススペクトルを持つ模擬乱流場を発生させた。乱流のパワースペクトルは von Kalman のモデルを用い、コヒーレンスは指数コヒーレンスモデルを用いた。また、平均風速は洋上を想定して、ベキ指数 0.1 のベキ則に従うとした。以下、座標系は水平の風方向が x 軸、 x 軸から反時計周りの風直角方向が y

軸、鉛直方向が z となるように定め、 x 軸が東向き、 y 軸が北向きとする。また、発生させた瞬間風速 $\mathbf{u}$ の x 成分を u 、 y 成分を v 、 z 成分を w とする。

鉛直ライダーとしてはパルス式ドップラーライダーの Leosphere 社の Windcube v2 を模擬し、1 秒毎に北東南西と鉛直方向にレーザー光を照射し、時刻 i 秒における D_i 方向の視線風速 $V_{\text{LOS},D_i}(i,z)$ を計測した。

$$V_{\text{LOS},D_i}(i,z) = \mathbf{u}_{\mathbf{x}_i(z)}(i) \cdot \frac{\mathbf{x}_i(z)}{|\mathbf{x}_i(z)|} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{u}_{\mathbf{x}_i(z)}(i) = (u_{\mathbf{x}_i(z)}(i), v_{\mathbf{x}_i(z)}(i), w_{\mathbf{x}_i(z)}(i))$ は時刻 i 、位置 $\mathbf{x}_i(z)$ における瞬間風速の三成分である。また、 D_i はライダー視線方向のインデックス、 $\mathbf{x}_i(z)$ は高度 z におけるライダー風速計測位置であり、それぞれ表 1 に示される。

表 1 ライダー視線方向のインデックス

i	視線方向	D_i	$\mathbf{x}_i(z)$
$5i = 1$	北方向	N	$(0, z \tan(\theta_0), z)$
$\text{mod}(i, 5) = 2$	東方向	E	$(z \tan(\theta_0), 0, z)$
$\text{mod}(i, 5) = 3$	南方向	S	$(0, -z \tan(\theta_0), z)$
$\text{mod}(i, 5) = 4$	西方向	W	$(-z \tan(\theta_0), 0, z)$
$\text{mod}(i, 5) = 0$	鉛直方向	V	$(0, 0, z)$

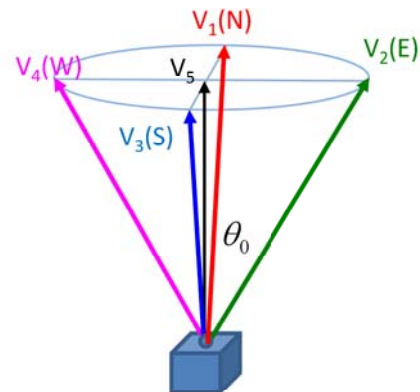


図 1 鉛直ライダーの DBS モード

*第 43 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

以下、単純化するため、時刻 1 秒から 5 秒までの間で高さ 80m における水平風速を計測することを考え、時刻1における北方向の視線風速 $V_{\text{LOS,E}}(1)$ を V_1 、時刻2における東方向の視線風速 $V_{\text{LOS,S}}(2)$ を V_2 、時刻 3 における南方向の視線風速 $V_{\text{LOS,W}}(3)$ を V_3 、時刻4における西方向の視線風速 $V_{\text{LOS,N}}(4)$ を V_4 とおく。また、高さ 80m におけるライダー計測位置 $\mathbf{x}_i(z)$ における風速 $\mathbf{u}_{\mathbf{x}_i(z)}(i)$ を $\mathbf{u}_i = (u_i, v_i, w_i)$ とおく。

鉛直ドップラーライダーの DBS モード(図 1)では、通常下記の方法で水平風速を推定する。

$$V_2 = u_2 \sin \theta_0 + w_2 \cos \theta_0 \quad (2)$$

$$V_4 = -u_4 \sin \theta_0 + w_4 \cos \theta_0 \quad (3)$$

この 2 秒間の間、風速場が定常であると仮定すると、ライダーによって計測された水平風速の東西成分 u_{Lidar} は下記のように計算できる。

$$u_{\text{Lidar}} = \frac{V_2 - V_4}{2 \sin \theta_0} \quad (4)$$

式(2)と式(3)を式(4)に代入し、 $u_j = \bar{u}_j + u'_j$, $w_j = \bar{w}_j + w'_j$ とおき、平均風速は水平方向に一様である($\bar{u}_2 = \bar{u}_4 = \bar{u}$)と仮定すると、ライダーによって計測された水平風速 u_{Lidar} は式(5)により表せる。

$$u_{\text{Lidar}} = \bar{u} + \frac{1}{2}(u'_2 + u'_4) + \frac{\cos \theta_0}{\sin \theta_0}(w'_2 - w'_4) \quad (5)$$

したがって、ライダーによって計測された水平風速の分散 σ_{Lidar}^2 は式(6)のようになる。

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{Lidar}}^2 &= \left\langle \left(\frac{1}{2}(u'_2 + u'_4) + \frac{\cos \theta_0}{\sin \theta_0}(w'_2 - w'_4) \right)^2 \right\rangle \\ &= \left\langle \frac{1}{4}(u'^2_2 + 2u'_2 u'_4 + u'^2_4) \right. \\ &\quad + \frac{\cos^2 \theta_0}{4 \sin^2 \theta_0}(w'^2_2 - 2w'_2 w'_4 + w'^2_4) \\ &\quad + \frac{\cos \theta_0}{2 \sin \theta_0}(u'_2 w'_2 - u'_2 w'_4 \\ &\quad \left. + u'_4 w'_2 - u'_4 w'_4) \right\rangle \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、水平風速の標準偏差と鉛直風速の標準偏差は式(7)に示すように水平に一様であると仮定する。

$$\begin{aligned} \sigma_{u_2} &= \sigma_{u_4} = \sigma_u \\ \sigma_{w_2} &= \sigma_{w_4} = \sigma_w \end{aligned} \quad (7)$$

また、水平風速の変動成分の空間相関を式(8)のよう

に定義する。

$$\begin{aligned} \rho_{uu} &= \frac{\overline{u'_2 u'_4}}{\sigma_u^2} \\ \rho_{ww} &= \frac{\overline{w'_2 w'_4}}{\sigma_w^2} \end{aligned} \quad (8)$$

その結果、ライダーによって計測された水平風速の分散 σ_{Lidar}^2 は式(9)のようになる。

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{Lidar}}^2 &= \frac{1}{2}\sigma_u^2 + \frac{1}{2}\rho_{uu}\sigma_u^2 \\ &\quad + \frac{\cos^2 \theta_0}{2 \sin^2 \theta_0}\sigma_w^2(1 - \rho_{ww}\sigma_w^2) \\ &\quad + \frac{\cos \theta_0}{2 \sin \theta_0}(\overline{u'_2 w'_2} - \overline{u'_2 w'_4} \\ &\quad + \overline{u'_4 w'_2} - \overline{u'_4 w'_4}) \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)から、ライダーによって計測された水平風速から標準偏差を求めても、実際の水平風速の標準偏差とは一般的に一致しないことがわかる。なお、 $\rho_{uu} = \rho_{ww} = 1$ であり、レイノルズ応力項が無視できる場合には両者は完全に一致する。本研究では次の 2 通りの方法で水平風速の変動成分を推定した。

(1) 変動風速の相関を用いる方法

式(9)の右辺第 4 項は変動風速の水平成分と鉛直成分との相関、すなわち、レイノルズ応力であるが、本研究の模擬風発生においてはレイノルズ応力は考慮に入れていないため 0 とすることとした。式(9)の右辺第 4 項を 0 とし、変形すると式(10)が得られる。

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{2}{1 + \rho_{uu}} \left\{ \sigma_{u_{\text{Lidar}}}^2 - \frac{\cos^2 \theta}{2 \sin^2 \theta} (1 - \rho_{ww}) \sigma_w^2 \right\}} \quad (10)$$

この式を用いて、ライダーの水平風速から求めた標準偏差から、真の水平風速の標準偏差を推定した。なお、変動風速の相関 ρ_{uu} と ρ_{ww} については、発生させた乱流場から計算し、 $\rho_{uu} = 0.74$, $\rho_{ww} = 0.16$ とした。

(2) ライダー視線風速の標準偏差を用いる手法²⁾

式(2)および式(3)からライダー視線風速の分散 $\sigma_{V_2}^2$ および $\sigma_{V_4}^2$ を計算すると、式(11)のようになる。

$$\begin{aligned} \sigma_{V_2}^2 &= \sigma_{u_2}^2 \sin^2 \theta_0 + \sigma_{w_2}^2 \cos^2 \theta_0 \\ &\quad + 2 \overline{u'_2 w'_2} \sin \theta_0 \cos \theta_0 \\ \sigma_{V_4}^2 &= \sigma_{u_4}^2 \sin^2 \theta_0 + \sigma_{w_4}^2 \cos^2 \theta_0 \\ &\quad - 2 \overline{u'_4 w'_4} \sin \theta_0 \cos \theta_0 \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、風速場が5秒間にわたり一様であると仮定する($\sigma_{u_2}^2 = \sigma_{u_4}^2 = \sigma_u^2$, $\sigma_{w_2}^2 = \sigma_{w_4}^2 = \sigma_w^2$, $\overline{u_2'w_2'} = \overline{u_4'w_4'}$)と、式(11)から式(12)が導ける。

$$\sigma_{v_2}^2 + \sigma_{v_4}^2 = 2\sigma_u^2 \sin^2 \theta_0 + 2\sigma_w^2 \cos^2 \theta_0 \quad (12)$$

すなわち、

$$\sigma_u^2 = \frac{1}{2 \sin^2 \theta_0} (\sigma_{v_2}^2 + \sigma_{v_4}^2 - 2\sigma_w^2 \cos^2 \theta_0) \quad (13)$$

この式を用いて、視線風速の標準偏差から、水平風速の標準偏差を求めることができる。

3. 水平風速の変動成分の評価

前節で説明した手法により、水平風速の変動成分を求め、元々の発生させた水平風速の変動成分と比較することにより、それぞれの手法を検証した。検証にあたっては、高さ $z = 80\text{m}$ とし、高さ 80m での平均風速を 4m/s , 6m/s , 8m/s , 10m/s , 12m/s , 14m/s , 16m/s の7通りに変化させ、風方向の乱れ強度を平均風速 V の関数として次式により設定した。

$$I_1 = \frac{I_{\text{ref}}(0.75V + 3.75)}{V} \quad (14)$$

ここで、 I_{ref} の値は洋上での観測値に基づき7%とした⁴⁾。風直角方向の乱れ強度 I_1 と鉛直方向の乱れ強度 I_3 はIEC61400-1に従い次式で設定した。

$$\begin{aligned} I_2 &= 0.8I_1 \\ I_3 &= 0.5I_1 \end{aligned} \quad (15)$$

ただし、平均風速が 8m/s のケースでは、鉛直方向の乱流強度がライダーによって計測された乱流強度の影響に与える影響を調べるために、 $I_3 = 0$, $I_3 = 0.25I_1$, $I_3 = 0.75I_1$, $I_3 = I_1$ の4ケースも追加した。平均風速 8m/s を除くそれぞれのケースについて、乱流発生時の乱数シードを5通りに変化させ、平均風速 8m/s のそれぞれのケースでは乱数シードを10通りに変化させ、計80ケースの乱流場を発生させた。

まず、鉛直の乱流強度がライダーによって計測される水平風速の変動成分に与える影響をみるために、風速 8m/s のケースで $I_3/I_1 = \sigma_3/\sigma_1$ を変化させたケースについて、ライダーによって計測された水平風速の変動成分と実際の水平風速の変動成分の比 $\sigma_{u,\text{LIDAR}}/\sigma_u$ を図2に示す。

この図から、鉛直風速の変動成分が大きい場合には

ライダーによって計測された水平風速の標準偏差は実際の風速の標準偏差を過大評価することがわかる。一方、鉛直風速の標準偏差が小さい場合には、反対にライダーによって計測された水平風速の標準偏差は実際の風速の標準偏差を若干過小評価する。このことをもう少し詳しく見るために、式(9)に示すライダーによって計測された水平風速の分散の各成因を鉛直風速の変動成分別にプロットしたものを図3に示す。

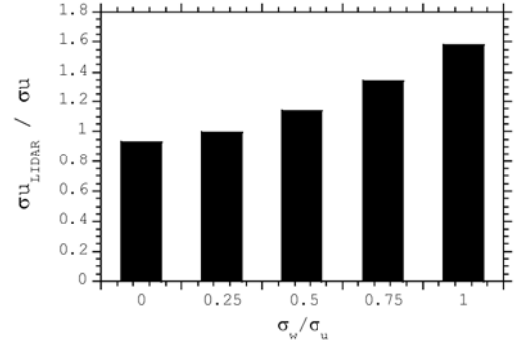


図2 ライダーによって計測された水平風速の変動成分の鉛直の乱れによる変化

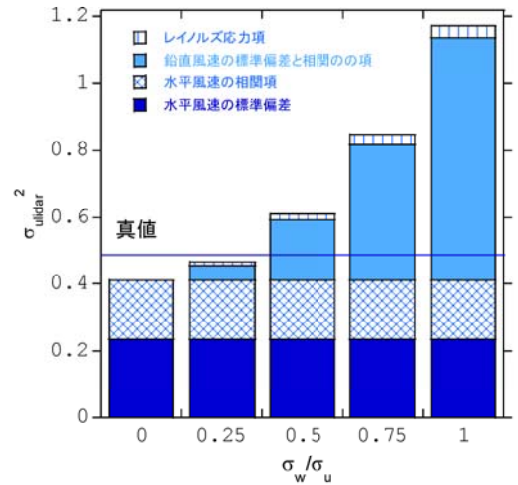


図3 ライダーによって計測された水平風速の変動成分の分散の成因別割合

式(9)右辺の最初の2項は鉛直の乱流強度には関係なく、水平方向の乱流強度にのみ関係する項であるため、鉛直方向の変動風速成分の大きさに関わらず同じであるが、第3項以降は鉛直方向の変動成分に関する項であり、鉛直風速の変動成分が大きくなるにつれ、大きくなっており、このことが鉛直風速の変動成分が大きい場合にライダーによって計測された乱流強度が実際の乱流強度を過大評価することにつながることをわかる。

次に、第2節で説明したライダーにより求めた水平

風速を補正する手法や、視線風速の標準偏差から水平風速の標準偏差を求める手法を用いた場合の結果を図4に示す。相関を用いる手法、視線風速の標準偏差を用いる手法とも、鉛直の変動成分が大きい場合の過大評価が改善されていることがわかる。

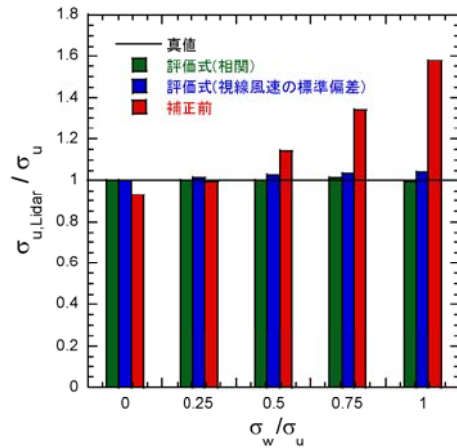


図4 各手法により推定した水平風速の標準偏差

最後に、発生させた全ての乱流風速場を対象として、2節で説明した2種類の手法を用いて求めた水平風速の乱流強度と、実際の乱流強度の比較を図5に示す。

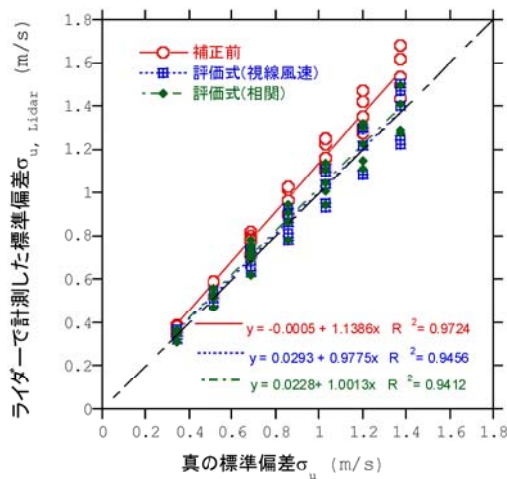


図5 ライダーによって計測された水平風速の標準偏差と実際の標準偏差の比較

提案した手法により、変動風速の過大評価が解消され、回帰直線の傾きは補正前の1.13から1.00および0.97に改善した。しかし、両方の手法ともばらつきが若干増加し、決定係数は補正前の0.99から0.97に低下した。

4. まとめ

本研究では、洋上を対象として模擬乱流場を発生させ、鉛直ライダーを模擬したシミュレーションにより水平風速の乱流強度を求め、真の水平風速の乱流強度により検証し、以下の結論が得られた。

1. 鉛直風速の変動成分が小さい場合には、ライダーによって計測された水平風速から求めた標準偏差は実際の標準偏差を過小評価する。一方、鉛直風速の標準偏差が大きい場合には、ライダーによって計測された水平風速から求めた標準偏差は実際の標準偏差を過大評価する。これは、ライダーによって求めた水平風速の標準偏差には、鉛直風速の標準偏差による項が含まれるためである。
2. ライダーによって計測された水平風速および乱流の相関から水平風速の標準偏差を求める手法を提案した。この手法により求めた水平風速の標準偏差は実際の標準偏差とよく一致した。しかし、この手法ではライダーにより視線風速を計測する場所における、乱流の風方向の相関および鉛直方向の相関を求める必要がある。
3. ライダーの視線風速の標準偏差を利用し、水平風速の標準偏差を求める手法を適用した。この手法により求めた水平風速の標準偏差は実際の標準偏差とよく一致したが、ばらつきが若干増加した。

謝辞

本研究は「次世代エネルギーインフラの創成社会連携講座」の成果であり、ここで、関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Mann, J., Sathe, A., Gottschall J., Courtney, M., Lidar Turbulence Measurement for Wind Energy, Progress in Turbulence and Wind Energy IV, SPPHY141, pp.263–270. 2017.
- 2) Thiébaud, M., Cathelain I, M., Yahiaoui, S., Esmail, A., Deriving atmospheric turbulence intensity from profiling pulsed lidar measurements, *Wind Energ. Sci. Discuss.* [preprint], 2022.
- 3) 岩谷祥美：任意のパワースペクトルとクロススペクトルをもつ多次元の風速変動のシミュレーション，日本風工学会誌，No.11，pp.5-18，1982.
- 4) Yamaguchi, A., Sarli, P. W., Ishihara, T., Extreme load estimation of the wind turbine tower during power production, *Wind Engineering*, pp.1-14, 2019.