

# ラージエディシミュレーションを用いたスキャニングドップラーライダーによる風況計測技術の高精度化

近畿大学 工学部 機械工学科

Goit Jay Prakash

## 1. はじめに

風力発電開発の初期段階において、開発場所の発電量予測や乱流強度の評価には長期間の風況観測が必要である。この風況観測では、観測タワーを用いて計測を行うことが主流であるが、近年の風力発電機の大型化（ロータ直径 150~200 m）により、観測タワーでは風車ハブ高さ相当の風況計測が高コストとなる。そこで、比較的低コストのドップラーライダーを利用した風況計測が注目されている。スキャニングドップラーライダーは設置場所から離れた任意の地点・高度における風況計測が可能であり、洋上風力発電開発での利用が期待されている。しかしながら、ライダーは風速の視線風速方向成分（ライダーから照射されるレーザービームの照射方向）しか計測することができないため、視線風速から速度ベクトルを求める必要がある。これまでに単体のスキャニングライダーで速度ベクトルを算出するための様々な手法が提案されており、Easterbrook<sup>1)</sup>が提案した VVP（Velocity Volume Processing）法が主に利用されている。VVP 法では風速場の瞬時風速変動が均質であると仮定しており、その精度は明らかとなっていない。

スキャニングドップラーライダー及び鉛直ライダーによる実証試験を行った研究は国内外で多く存在する。これらの研究では、ライダー計測の精度検証ように観測タワーと比較を行うのが一般的である（Goit ら<sup>2)</sup>, Sathe ら<sup>3)</sup>など）。更に洋上サイトや風車後流の評価にも用いられている<sup>4,5)</sup>。ライダーが視線風速のみ計測すると言う重大な課題を回避するため、2台または3台のライダーを使用し、同時計測も近年注目をあつめている<sup>6,7)</sup>。しかし、複数台のライダーの計測コストと適切な設置場所の選定が課題である。特に日本のような沿岸域が複雑な地形が多い地域で複数台のライダーによる計測に制限がある。そのため、本研究で着目している単体のスキャニングドップラーライダーによる計測技術の開発が重要である。しかしながら、既存の研究のような実証試験ですと、ライダー計測の検証には主に一台の観測タワーのデータを使用するが、ライダーによって計測された風速場の検証は難しい。そこで本研究では、ラージエディシミュレーション（LES: Large Eddy simulation）によって模擬された大気境界層に対してスキャニングドップラーライダーによる既存の計測手法の精度検証を行い、ライダーによって計測される視線風速場から乱流場を算出する新たに解析手法を開発する。

## 2. 計算手法及びライダー計測の再現

LES による風速場の模擬には OpenFOAM を用いる。その支配方程式は、連続の式とナビエストークス方程式である。

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここで、 $\tilde{u}_i = [\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_3]$ はそれぞれ流れ方向、スパン方向と垂直方向の瞬時風速成分、 $\tilde{p}$ は瞬時圧力、 $\rho$ は空気密度、 $\nu$ は動粘度、 $\tau_{ij}$ はサブグリッドスケール(SGS)応力である。本研究では、SGSにWall-Adapting Local Eddy-Viscosity (WALE) モデルを使用する。下面は壁面応力モデルを用いて再現し、表面粗度は洋上の場合、 $z_0 = 0.0002\text{m}$  に設定した。流入境界条件には、別の前駆解析から生成された時空間的に変動する瞬時風速場が適用された。なお、本研究では洋上のみと、陸から洋上へ遷移した場合の二つの大気境界層を模擬したが、本稿では洋上のみ解析結果を紹介する。

LES データからライダーによって計測される視線風速 ( $u_r$ )を抽出する際、 $u_r$ と速度ベクトル  $V = [u_1, u_2, u_3]$ の以下の関係を用いる。

$$u_r = V \cdot \mathbf{a}_r \quad (3)$$

$$\mathbf{a}_r = \sin \theta \cos \phi \mathbf{i} + \cos \theta \cos \phi \mathbf{j} + \cos \phi \mathbf{k} \quad (4)$$

ここで、 $\theta$ は方位角および $\phi$ は仰角であり、これらはレーザービームの照射方向を与える角度である。方位角とは  $y$  軸方向を  $0^\circ$ とした  $xy$ 平面 (水平面)内における時計回りの角度で、仰角とは  $x$  軸方向を  $0^\circ$ とした  $xz$ 面内における反時計回りの角度である。本研究では、仰角を固定し、方位角を変えながら扇型にスキャンする方法を再現した。図 1 に瞬間風速場とライダーによる計測の概要を示す。

視線風速から速度ベクトル成分を算出する際、方位角幅 (扇形にスキャンする方位角の範囲)内の瞬間風速が変化しないと仮定する。スキャンして得られた視線風速と方位角の関係に対して式 (3) を最小二乗法でフィッティングすることにより速度ベクトルの成分が算出される。なお、鉛直方向 ( $z$ ) の風速成分 ( $u_3$ )は今回無視された。

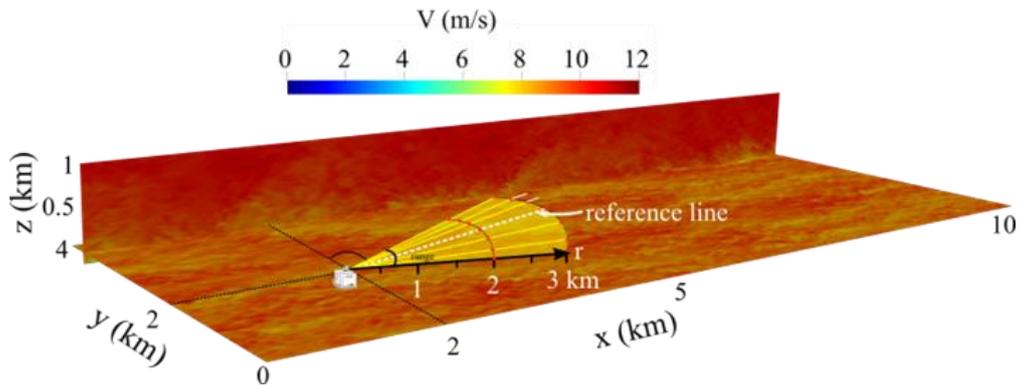


図 1. 瞬間風速場及びスキャンングドップラーライダーによる計測の概要。

### 3. ライダー計測手法の精度検証

図 2 は、方位角幅 ( $\theta_{\text{range}}$ )を  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ と  $60^\circ$ のしたときに LES から抽出された瞬間視線風速場を示す。計測レンジ ( $r$ )は 100 から 3000 m を 50 m 間隔で変化させた。取得された  $u_r$ は、実

際のライダー観測結果を良く再現している.  $u_r$ の値は $\theta = \pi/2$ で大きく, そこから離れた方位角で小さくなる.

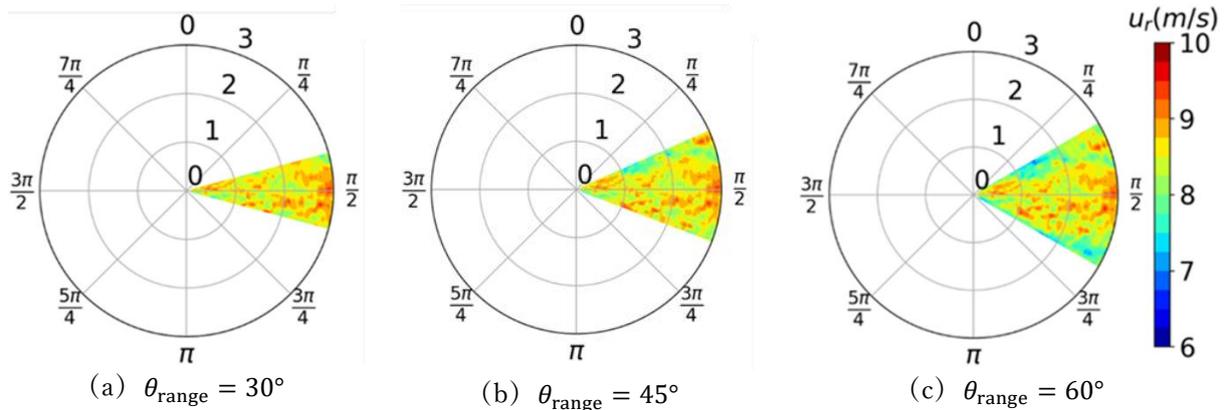


図 2. LES から抽出した視線風速

図 3 には模擬したライダー計測から得られた 10 分平均風速と LES から直接得られた平均風速との比較を示す. 図には計測レンジ 3000m と方位角幅( $\theta_{range}$ )は $30^\circ$ ,  $45^\circ$ と $60^\circ$ の結果を示す. ライダー計測から抽出された平均風速は, LES 結果と良く一致している. 相対誤差 ( $\varepsilon$ )

$$\varepsilon = \frac{\bar{u}_{LES} - \bar{u}_{LIDAR}}{\bar{u}_{LES}} \times 100\% \quad (5)$$

を用いて精度評価を行った結果, ライダーから離れた遠方の位置 (レンジが大きい位置) では誤差が大きい. その理由は, レンジが大きいとスキャンアークも大きくなり, VVP の風速が均質である仮定が成り立たないためである. また, 小さい $\theta_{range}$ でも誤差が大きい. これは,  $u_r$ の方向感度が劣化するためである. 加えて, フィッティングに用いられるデータ数も少なくなることも影響したと考えられる. しかし, 相対誤差は 0.17~2.68%で小さいため, VVP 法で平均風速は精度良く算出可能と言える.

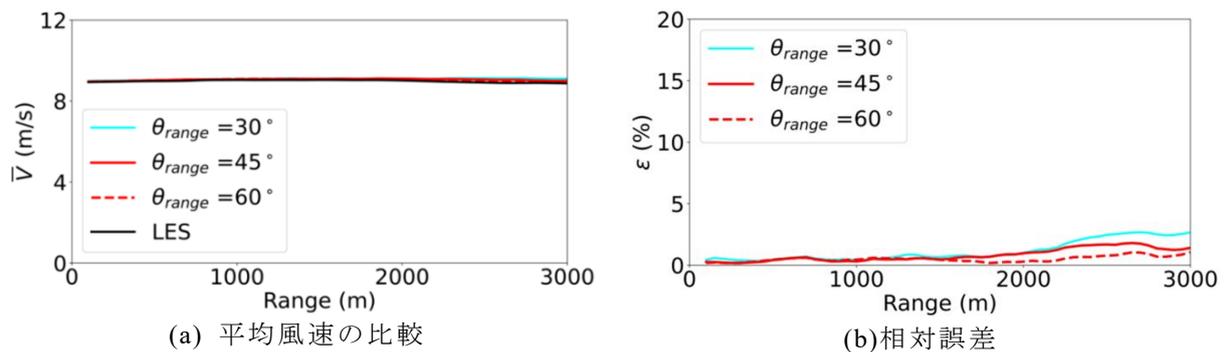


図 3. VVP 手法によって算出した 10 分平均風速の元の LES から算出した 10 分平均風速の比較.

図 4 は従来の VVP 法と元の LES データから算出された乱流強度を示す. VVP 法による結果は, LES の結果に比べ過小評価され, 計測レンジが長くなるにつれて両者に大きな誤差が生じる. 相対誤差は 40~76%で非常に大きい. RMSE 値は $\theta_{range} = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ で 0.025, 0.028, 0.030 になり, 方位角レンジが大きいほど差が大きくなる結果となった. これは, VVP 法では風速場の瞬時風速変動が均質であると仮定しており, 計測範囲が拡大するほどその影響

が大きくなるためだと考えられる．沿岸に設置したライダーを用いて洋上風況の計測を行う際、離岸距離 3000 から 5000 m を目標にするが、図 4 の結果から、乱流強度は正確に求められない．

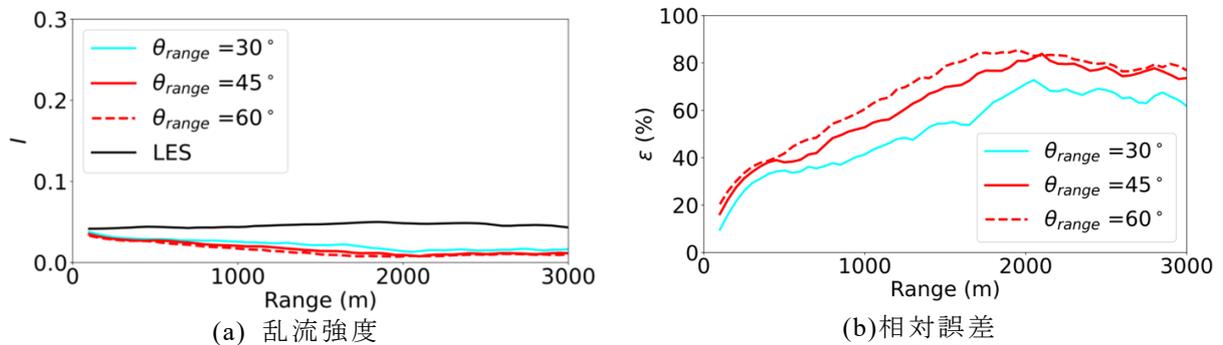


図 4. VVP 手法によって算出した乱流強度と元の LES から算出した乱流強度の比較．

#### 4. レイノルズ分解による手法の提案

本研究では、従来の VVP 手法の改善として、レイノルズ分解による手法を提案する．視線風速と速度ベクトルの関係式(3)をレイノルズ分解すると

$$(\bar{u}_r + u'_r) = (\bar{u}_1 + \bar{u}'_1) \sin \theta \cos \phi + (\bar{u}_2 + \bar{u}'_2) \cos \theta \cos \phi \quad (6)$$

なり、二乗平均後の変動成分は、

$$\overline{u_r'^2} = \overline{u_1'^2} \sin^2 \theta + 2\overline{u_1' u_2'} \sin \theta \cos \theta + \overline{u_2'^2} \cos^2 \theta \quad (7)$$

となる．式(7)のフィッティングから  $\overline{u_1'^2}$  と  $\overline{u_2'^2}$  を算出し、最終的に乱流強度を求めた．

図 5 に  $u_r$  のレイノルズ分解を用いて導いた新しい VVP 法の式から算出された結果を示す．この手法では乱流強度のバラツキが大きいですが、図 4 に比べて精度が改善された．特に、 $\theta_{range}$  が大きくなるとバラツキと誤差が小さくなる傾向を示す． $\theta_{range}$  が大きくなると RMSE 値も小さくなっている．今後レイノルズ分解による VVP 手法の詳細な評価を行うため、陸地形での適用及び、別の風向時の算出を行う必要がある．

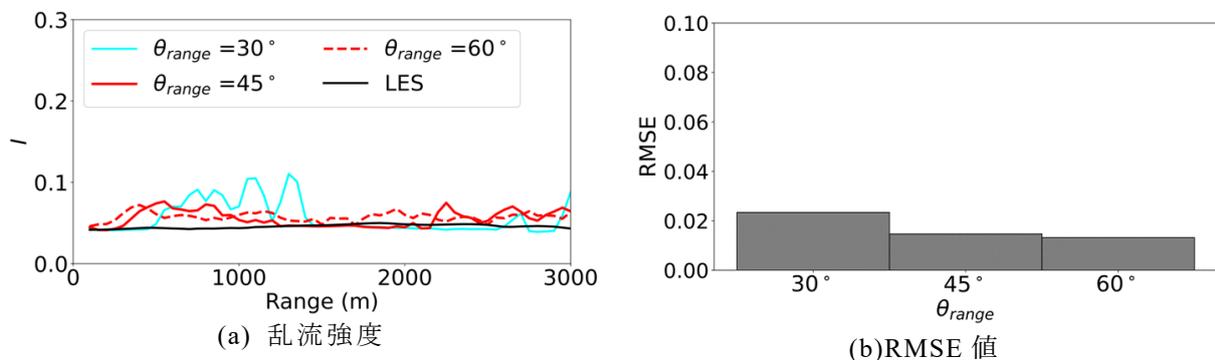


図 5. 視線風速のレイノルズ分解手法によって算出した乱流強度と元の LES から算出した乱流強度の比較．

## 5. まとめ

LESにより模擬された大気境界層の風速場にライダー計測を再現し、VVP法を適用した。ライダー計測と元のLESデータの、比較から以下の主な結果が得られた。

- 1) VVP法から算出された平均速度ベクトルの大きさに対して、方位角レンジが大きくなるほどLESから直接求められた平均速度ベクトルの大きさとの差は小さくなる。
- 2) VVP法から算出された乱流強度は、計測レンジが大きくなるほど、LESから直接求められた乱流強度との差が大きくなる。
- 3) 本研究で提案した視線風速( $u_r$ )のレイノルズ分解によるVVP手法から算出した乱流強度のバラツキが大きくなるが、精度が改善される。

## 6. 研究成果の発表

- 1) ゴイトジェイプラカス, 亀田孝嗣, “LESを用いたスキャニングドップラーライダーによる風況観測の再現及び評価”, 第33回日本流体力学会 中四国・九州支部講演会, 徳島大学 徳島, 2024年6月1-2日.
- 2) 栗本 諒太, ゴイト ジェイ プラカス, 亀田 孝嗣, “スキャニングドップラーライダーによる風速場計測の数値流体シミュレーション及び評価”, 日本機械学会 中国四国学生会 第55回学生員卒業研究発表講演会, 徳島大学, 徳島, 2025年3月6日.
- 3) J. P. Goit, T. Kameda, “Evaluation of a Scanning Doppler LiDAR-based Wind Field Observation in LES”, Japan Geoscience Union Meeting 2025, Chiba, Japan, 25-30 May, 2025.

## 謝辞

本研究は、公益財団法人天野工業技術研究所の助成を受けたものである。ラージエディシミュレーションには東京大学が運営するWisteria/BDEC-01スーパーコンピューターを使用した。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) C. C. Easterbrook, "Estimating horizontal wind fields by two-dimensional curve fitting of single doppler radar measurements", In Proceedings of the Radar Meteorology Conference, Huston, TX, USA, pp. 22-24 April 1975.
- 2) J. P. Goit, S. Shimada, T. Kogaki, "Can LiDARs Replace Meteorological Masts in Wind Energy?", *Energies*, vol. 12, no. 19, pp. 3680, 2019.
- 3) A. Sathe, J. Mann, "A review of turbulence measurements using ground-based wind lidars", *Atmos. Meas. Tech.* vol. 6, pp. 3147–3167, 2013.
- 4) Viselli, A., Filippelli, M., Pettigrew, N., Dagher, H., Faessler, N., "Validation of the first LiDAR wind resource assessment buoy system offshore the Northeast United States", vol. 22, no. 11, pp. 1548-1562.
- 5) J. P. Goit, A. Yamaguchi, T. Ishihara, "Measurement and Prediction of Wind Fields at an Offshore Site by

Scanning Doppler LiDAR and WRF”, *Atmosphere*, vol. 11, no. 5, pp. 442, 2020.

- 6) R. K. Newsom, L. K. Berg, W. J. Shaw, M. L. Fischer, "Turbine-scale wind field measurements using dual-Doppler lidar", *Wind Energy* vol. 18, pp. 219–235, 2015.
- 7) S. Shimada, T. Kogaki, M. Konagaya, T. Mito, R. Araki, Y. Ueda, T. Ohsawa, "Validation of near-shore wind measurements using a dual scanning light detection and ranging system", vol. 25, no. 9, pp. 1555-1572, 2022.