

デュアルスキャンングライダー計測における 複数のパラメータによる計測不確かさ推定の感度実験の試み

日本気象株式会社/神戸大学大学院 圓尾 太郎
日本気象株式会社 荒木 龍蔵
日本気象株式会社/神戸大学大学院 新谷 達哉
日本気象株式会社 坂田 啓朗
日本気象株式会社 高祖 研一

1. はじめに

沿岸海域におけるデュアルスキャンングライダー(DSL)計測による洋上計測が盛んになってきており、実計測に基づく測定精度に関する研究が数多く進められている^{例えば、1-3)}。DSLの計測値は、風車設計に用いるとともにエネルギー収量評価にも使われることから、この不確かさ算定手法の確立が必要である。

デュアルスキャンングライダーの不確かさに関する要素として、挟角(2機の視線のなす角)と仰角が挙げられる。事前検証計測と本計測で、挟角と仰角を同一にすることで、事前検証計測の不確かさを直接推定することも考えられるが、実務上では設置地点の制約等から現実的ではない。また、事前検証計測では、検証マストの高度の制約から仰角の高い設定での検証を実施するのはかなり難しい。こうした観点から、数値上において挟角と仰角の設定の違いによる不確かさの違いについて定量化することが求められる。

挟角と仰角に関する不確かさは、①視線風速の計測誤差の伝播による影響と②鉛直流の影響、などがある。ここで、一般に、計測における不確かさは推定値であるが、これらの影響は、コンバージェント計算上の系統的な誤差であり、定量化が不可能ではない。そこで、本研究では、2つの視線風速に対する水平風速変換(以降、「水平風速変換」と呼ぶ)の式^{4,5)}に基づいて、挟角と仰角による計算上の誤差について検討し、計算設定による瞬時値に対する水平風速の誤差と10分値への影響について検討した。

ところで、NEDO「洋上風況観測ガイドブック」⁶⁾には、挟角は、「30°から150°の間が望ましく、90°が理想的である。」、また、仰角は、「5°以内が望ましい」と記載されている。前者は、挟角が90°から離れることで、挟角の二等分線方向の視線風速の計測精度が低減すること、後者は水平風速変換の際に、仰角の正弦値が増大することに基づく記述である。本研究では、この挟角と仰角の制約に関しても、得られた結果から、議論を進めた。

2. DSL計測の水平風速算出手法と不確かさの要因

2.1 DSL計測の水平風速算出手法

任意のスキャンングライダーによって計測される視線風速 V_r の風速の3成分(水平成分の東西成分 u と南北成分 v と鉛直成分 w)への変換は以下の式による。

$$V_r = u \sin \varphi \cos \theta + v \cos \varphi \cos \theta + w \sin \theta \quad (1)$$

ここで、 φ はビーム照射の方位角、 θ は仰角である。

DSL計測では、2本の視線風速 V_{r1}, V_{r2} しか得られない。しかしながら、沿岸からの沖合に向けて風況を計測するDSL計測においては、多くの場合、仰角が小さく、さらに、鉛直流は水平風速のスケールと比較すると小さいため、鉛直流と仰角の正弦値の積である右辺の第3項は0として省略される。この省略によって、2つの視線風速からの水平成分の風速(水平風速)が算出が可能となる。第3項を省略した式(1)と2本の視線風速 V_{r1}, V_{r2} から風速の水平成分 u, v は以下の式(2), (3)により、算出される。

$$u = \frac{V_{r1} \cos \varphi_2 \cos \theta_2 - V_{r2} \cos \varphi_1 \cos \theta_1}{\cos \theta_1 \cos \theta_2 (\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 - \cos \varphi_1 \sin \varphi_2)} \quad (2)$$

$$v = \frac{V_{r2} \sin \varphi_1 \cos \theta_1 - V_{r1} \sin \varphi_2 \cos \theta_2}{\cos \theta_1 \cos \theta_2 (\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 - \cos \varphi_1 \sin \varphi_2)} \quad (3)$$

なお、上式中の分母は、三角関数の加法定理より、

$$\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 - \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 = \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (4)$$

であるため、直接的に挟角を含んでいる。

2.2 不確かさの要因

本研究では、挟角と仰角を設定し、視線風速に関する誤差要因を2つ検討する。

① 計測機器の視線風速の誤差の伝播

一般に計測機器(ライダー)の視線風速には、計測誤差が含まれる。式(2), (3)では、それら2本の視線風速 V_{r1}, V_{r2} に含まれる。

② 鉛直流

開けた洋上では、平均的に 0 となるといわれるが、瞬時値では一定の散らばりがあると考えられる。

3. 瞬間値への影響の定量化に向けた感度実験

3.1 手法

前章で挙げた不確かさの要因について定量化するために、Fig. 1 に示す計算フローに従い、以下の設定で数値上の感度実験を実施した。

(i) 風況の設定

Table 1 (i) に示した、水平風速 WS_{true} ・風向 WD_{true} のすべての組み合わせを対象とする。

(ii) 挟角・仰角の設定

Table 1 (ii) に示した、挟角・仰角のそれぞれを変数とする場合の挟角 φ_1, φ_2 ・仰角 θ_1, θ_2 を設定する。

(iii) 検証内容の設定

Table 1 (iii) に示した、本研究で扱う計測不確かさの要因の 2 つに関する設定をする。

① 視線風速の計測誤差 ΔV_r (± 0.1 m/s)

② 水平風速算出時の式(1)の第 3 項の鉛直流 w_{true}

Fig. 1 計算のフロー

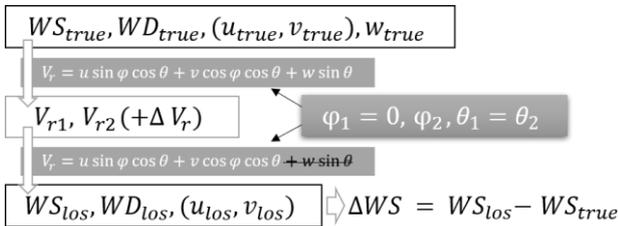


Table 1 変数設定

(i) 風況

水平風速 WS_{true} (m/s)	0, 8, 16, 24
水平風向 WD_{true} (deg)	0, 5, 10, ..., 355

(ii) 挟角・仰角

	方位角 φ_1, φ_2 (挟角)	仰角 θ_1, θ_2
挟角が 変数の場合	$\varphi_1 = 0^\circ,$ $\varphi_2 = 10 \sim 170^\circ$ (10, 20, 30, ... 170°)	$\theta_1 = \theta_2 = 5^\circ$
仰角が 変数の場合	$\varphi_1 = 0^\circ,$ $\varphi_2 = 90^\circ$ (90°)	$\theta_1 = \theta_2 =$ 1, 2, ... 10°

(iii) 鉛直流・視線風速に含まれる誤差

検証内容	鉛直流 w_{true} (m/s)	視線風速の計測精度 ΔV_r (m/s)
①	0 又は 0.5	-0.1, 0, 0.1 の組み合わせ
②	-1, -0.5, 0, 0.5, 1	0

3.2 結果

(a) 挟角を変数とする場合

Fig. 2 に、水平風速ごとに①視線風速の計測誤差に関する結果を示す。横軸が挟角、縦軸が水平風速の誤差の絶対値の最大値、色が風向を表す。挟角が 90° で誤差が最も小さく、 90° から離れるほど誤差が大きくなる。また、誤差の大きさは風速によらず一定である。

続いて、Fig. 3 に②水平風速算出時の式(1)の第 3 項の鉛直流の影響の検証の結果を示す。横軸が挟角、縦軸が水平風速の誤差の最大値、色が風向を示す。挟角が大きいくほど、水平風速の誤差が大きくなる傾向が確認された。このことは、挟角を大きく取るとは避けるべきであることを示唆している。また、誤差の大きさは、風速によらず、一定である。結果の表示の仕方を変え、水平風速別の風向に対する水平風速の誤差を Fig. 4 に示す。誤差が最大値をとるのは $45^\circ, 215^\circ$ であった。挟角の検証設定が 90° であることを踏まえると、誤差の最大値をとるのは挟角の二等分線方向であることを示している。また、鉛直流に比例して、誤差が大きくなることも確認できる。

(b) 仰角を変数とする場合

Fig. 5 に①視線風速の計測精度を検証した結果を示す。横軸が仰角、縦軸が水平風速の誤差の絶対値の最大値、色が風向を表す。仰角が大きいくほど水平風速の誤差は大きくなる。その増加量は、鉛直流が 0 の時は極めて小さいが、鉛直流が 0.5 の時、ある程度の量がみられる。また、誤差の大きさは、風速によらず、一定である。

続いて、Fig. 6 に②水平風速の算出時の式(1)の第 3 項の鉛直流の検証の結果を示す。各グラフは水平風速ごとで、横軸が風向、縦軸が水平風速の誤差の最大値、色が鉛直流を示す。水平風速の大きさによらず、誤差は一定 (0 m/s は風向の定義ができないとみなす) であり、誤差の大きさは鉛直流に比例して大きくなる。結果の表示の仕方を変え、仰角別の風向に対する水平風速の誤差を Fig. 7 に示す。仰角が大きくなるにつれて、水平風速の誤差が大きくなっていることがわかる。この誤差の最大値に対する仰角の関係性を示すために、横軸に仰角、縦軸に水平風速の誤差の最大値をとった図を Fig. 8 に示す。この図から仰角の増加に伴って、水平風速の誤差が増加することがより明確となった。

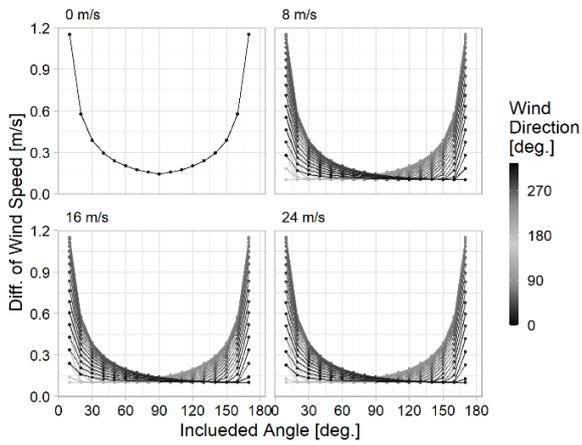


Fig. 2 $w_{true} = 0$ の時の視線風速に誤差を与える場合の水平風速別の挟角に対する最大の水平風速の誤差

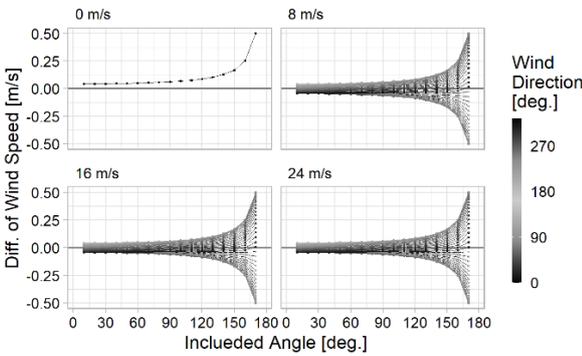


Fig. 3 $w_{true} = 0.5$ の時の水平風速別の挟角に対する水平風速の誤差

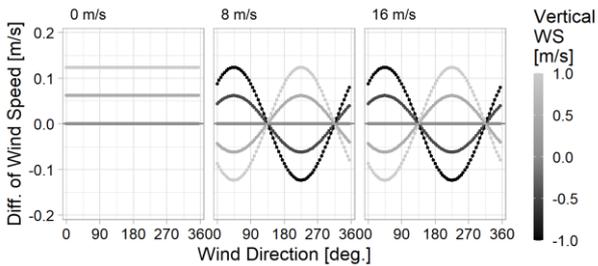


Fig. 4 水平風速別の風向に対する水平風速の誤差 (水平風速 24m/s は省略)

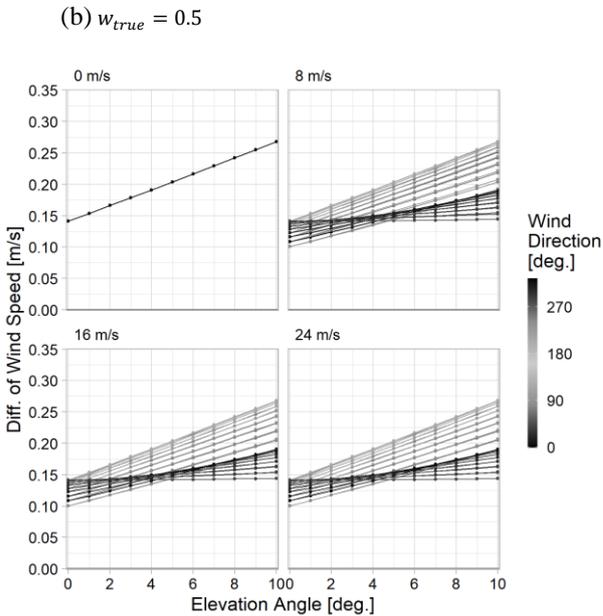
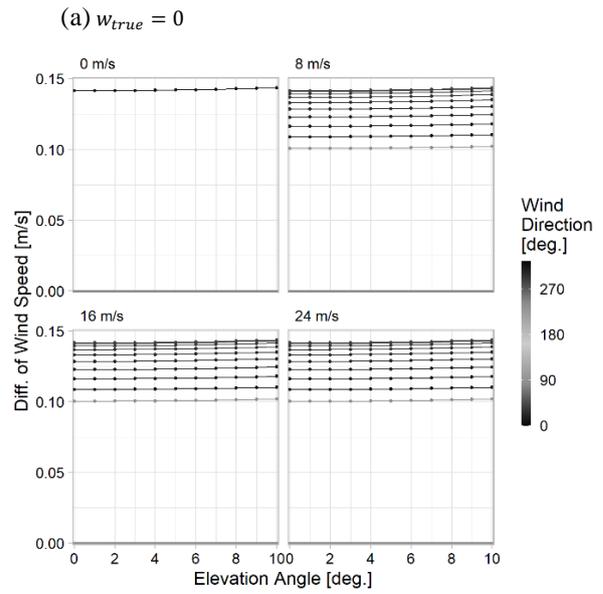


Fig. 5 視線風速に誤差を与える場合の水平風速別の仰角に対する最大の水平風速の誤差

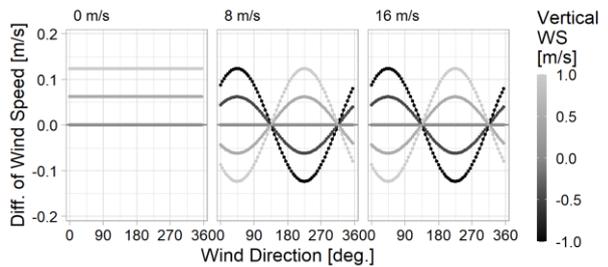


Fig. 6 $\theta = 5^\circ$ の時の水平風速別の風向に対する水平風速の誤差 (水平風速 24m/s は省略)

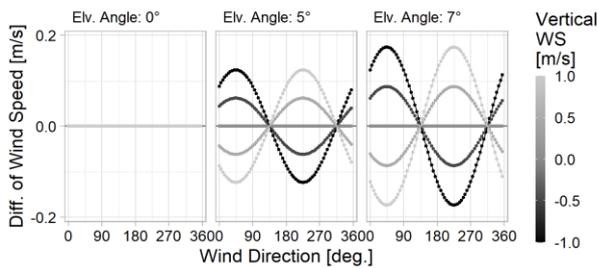


Fig. 7 $WS_{true} = 8$ の時の仰角別の風向に対する水平風速の誤差

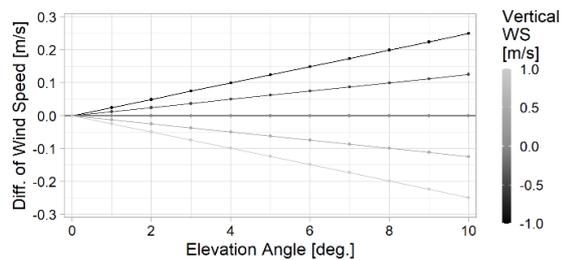


Fig. 8 $WS_{true} = 8, WD_{true} = 45$ の時の仰角に対する水平風速の誤差

3.3 考察

挟角を変数とした場合の①の検証結果は、小さな挟角と大きな挟角を制限する理由となる。挟角を変数とした場合の②の検証結果は、鉛直流が大きい場合に、大きな挟角を制限する必要があることを示している。従って、誤差が大きくなる、挟角が 30° 以下や 150° 以上を避け、洋上風況観測ガイドブックに示される事項に則った計測設定とすることが重要であるといえる。

仰角を変数とする場合、検証①、検証②の結果は共に、仰角を大きくすると、水平風速変換の式 (式 (2), (3)) は、鉛直流の影響を受けることを示しており、大きな仰角を制限する理由となる。瞬間値ではこれらの傾向がみられたが、鉛直流による影響は、10 分値であれば、上昇流、下降流の影響が相殺されることも考えられる。相殺の状況によっては、十分小さい誤差になることが考えられるため、さらなる検討が必要である。

4. 10 分値への影響の定量化

4.1 手法

本章では、仰角に対する鉛直流の影響について、10 分値への影響を検討する。ここでは、理想的な風況を再現するために、NREL により開発された TurboSim モジュール⁷⁾により Kaimal スペクトルモデルに基づく風況場を再現し、同じく InflowWind モ

ジュール⁸⁾によって、150 m 高周辺の 1 m 格子間隔の 3 次元乱流場を生成した。計算条件を Table 2 に示す。解析には、実際のスキニングライダーの計測にできるだけ近いものとするために、レンジゲート 50 m の視線風速を模し、この 1 m 格子の中心の格子とその前後の ± 25 m の値を平均した 600 秒間分の時系列風況データ ($u_{true}, v_{true}, w_{true}$) を用いた。時系列風況データ ($u_{true}, v_{true}, w_{true}$) を Fig. 1 に示す計算フローにより、水平風ベクトル (u_{los}, v_{los}) を算出して 10 分値に変換した。その後、元の時系列データを 10 分値に変換したデータと比較し、その水平風速と、その標準偏差の差を求めた。

Table 2 風況場再現条件

(A) TurboSim	
格子数 (Y×Z 方向)	61 (-150 ~ 150 m) × 61 (5 ~ 305 m)
空間解像度	5 m
時間解像度	1 sec
解析時間	1200 sec
乱流モデル	IEC Kaimal
IEC	Version 3
乱流特性	Class B
乱流タイプ	平常
鉛直プロファイル	べき ($\alpha = 0.1$)
平均風速	10.0 m (高度 155 m)
(B) InflowWind	
格子数 (X×Y×Z 方向)	101 (-50 ~ 50 m) × 101 (-50 ~ 50) × 32 (140 ~ 160 m)
空間解像度	1 m
時間解像度	1 sec
解析時間	600 sec (TurboSim: 601~1200 sec)

4.2 結果と考察

Table 3 に風況場再現結果の概略を示す。主流方向の平均風速は空間平均で、10.32 m/s、鉛直流は -0.058 m/s と負の値であった。空間平均により、水平風速にはほとんど変化がないものの、標準偏差の値が小さくなっていることが確認できる。主流方向の風速 u に対しては、-8.6% 小さくなっている。

この風況再現結果をもとにした、仰角に対する平均(水平)風速とその標準偏差の誤差を Fig. 9 に黒色で示す。平均風速は、仰角が 10° であっても約 10 m/s の風速に対して十分小さい誤差となった。標準偏差の誤差の相対値は、仰角が 7° で -0.78%、 10° の場合 -1.04% と、過小評価であった。この過小評価は鉛直流の平均が負の値であることが要因であると考えられる。

鉛直流が負の値であることが過小評価の要因であることを確認するため、風況場の鉛直流 w に -1 を乗じた場合の結果を Fig. 9 に灰色で示した。先述の通り、過大評価となることが確認された。なお、相対値であることから、絶対量が大きくなっている点

には注意が必要である。この結果から、標準偏差の相対誤差が過大評価となるか、過小評価となるかは鉛直流の特性により定まることが示唆される。一般に、地形のない洋上では鉛直流は平均的に 0 となる傾向にあるが、本結果は、仰角の大きい DSL 計測では鉛直流の特性について注意する必要があることを示唆している。一方で、本結果は、この特性を考慮することによって、標準偏差の誤差に対する、有効な補正手法の可能性を示唆している。

本研究ではレンジゲート長の影響は、検証対象ではない。しかしながら、DSL 計測においては、レンジゲート長の設定により、空間平均の影響を受ける。本節の冒頭においても、主流方向の標準偏差の差が-8.6% 変化するという結果を得ている。この差は仰角の影響による誤差(10° の場合でも-1.04%)と比べると比較的大きいため、レンジゲート長の影響に議論することが重要となる。

ただし、実計測の設定を踏まえると、三杯式風速計の検査体積とスキャニングライダーの 2 機の交差した部分の検査体積を比較する必要があるため、-8.6% という値がデュアルスキャニングライダー計測におけるレンジゲートによる空間平均の誤差量を直接的に示すものではないことに注意が必要である。

今後、標準偏差の誤差量について議論する際には、①本研究で対象とした仰角の影響と②ここで述べたレンジゲート長による検査体積の影響を少なくとも検討する必要がある。また、③スキャニングライダー計測のフィルタリング手法による異常値の残存や正常値の過剰な除去の影響も受けることにも注意が必要である。

5. 結語

本研究では、DSL 計測における挟角と仰角の設定の、水平風速変換の計算によって算出される水平風速への影響を感度実験によって検討した。また、水平風速変換の計算によって生じる、水平風速の瞬時値に対する誤差と、水平風速の 10 分値への影響についても検討した。結論を以下に示す。

- ・ 挟角については、水平風速の瞬時値に対する検証によって、NEDO「洋上風況観測ガイドブック」に則り、挟角を 30~150° に設定することで、誤差を抑制できることが示された。
- ・ 仰角については、水平風速の瞬時値に対する検証により、鉛直流が小さい時は視線風速の計測精度の伝播による影響が極めて小さいことが示された。また、鉛直流の影響は、仰角に比例するような形で増大するため、比較的大きな仰角設定では、計測サイトの鉛直流の特性に十分注

Table 3 風況場再現結果の概略

	平均値			標準偏差		
	u	v	w	u	v	w
中心点	10.33	0.19	-0.057	1.51	1.35	0.75
空間平均	10.32	0.19	-0.058	1.38	1.18	0.53

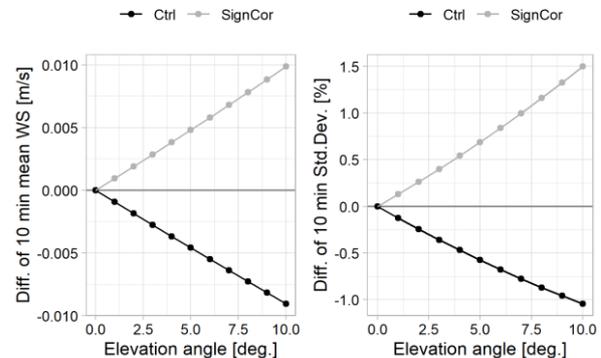


Fig. 9 仰角に対するスペクトルモデルを用いた風況場の 10 分値の誤差(左)平均風速(右)標準偏差(色)鉛直流の符号(Ctrl: 生値を使用する場合、SignCor: w に-1 を乗じた場合)

意することが必要な一方で、この特性を考慮することによって、有効な誤差の補正手法の可能性が示唆された。

今後、実計測による本結果の検証やレンジゲート長に関する検証を踏まえた不確かさ算出手法⁹⁾の構築に向けた取り組みを計画している。

参考文献

- 1) 渡邊 慶一郎, 高桑 晋, 邊見 力, 石原 孟, デュアルスキャニングライダーを用いた洋上風況観測に関する研究, 風力エネルギー学会 論文集, 45 (2), 40-48, 2021.
- 2) Susumu Shimada, Tetsuya Kogaki, Mizuki Konagaya, Toshinari Mito, Ryuzo Araki, Yuko Ueda, Teruo Ohsawa, Validation of near-shore wind measurements using a dual scanning light detection and ranging system, Wind energy, 25 (9), 1555-1572, 2022.
- 3) 大畑 静佳, 荒木 龍蔵, 嶋田 進, 小長谷 瑞木, 大澤 輝夫, 小垣 哲也, 植田 祐子, むつ小川原サイトにおけるスキャニングライダー実験 その4 デュアルスキャン観測パラメータ設定と計測精度評価, 風力エネルギー利用シンポジウム 予稿集, 43, 120-123, 2021.
- 4) E. Simon, M. Courtney: A Comparison of sector-scan and dual Doppler wind measurements at

Høvsøre Test Station - one lidar or two? DTU Wind Energy. DTU Wind Energy E, 0112, 2016.

5) A. Peña, J. Mann, Turbulence Measurements with Dual-Doppler Scanning Lidars, Remote Sens, 11 (20), 2444, 2019.

6) NEDO, 洋上風況観測ガイドブック, p.p.55, 2023.

7) B. J. Jonkman, TurbSim User's Guide v2.00.00, Draft Version, 2016.

8) A. Platt, B. Jonkman, J. Jonkman, InflowWind model User Guide, 2016.

9) N. Vasiljevic, M. Courtney, A. Tegtmeier Pedersen: Uncertainty model for dual-Doppler retrievals of wind speed and wind direction. Atmos. Meas. Tech. Discuss., 2020 (Preprint, withdrawn).

10) 種本 純, 林 岑蔚, 高橋 和也, 隅田 耕二, 白枝 哲次, デュアルスキャニングライダーによる乱流強度観測値の補正に関する検討, 風力エネルギー利用シンポジウム 予稿集, 44, 156-159, 2022