

デュアルスキャニングライダー観測における 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*

Estimation of Measurement Uncertainty on Several Parameters in Dual Scanning Lidar Systems

圓尾 太郎^{**,**}

Taro MARUO

新谷 達哉^{**,**}

Tatsuya SHINTANI

坂田 啓朗^{**}

Hiroaki SAKATA

荒木 龍蔵^{**}

Ryuzo ARAKI

高祖 研一^{**}

Kenichi KOUSO

1. はじめに

沿岸海域におけるデュアルスキャニングライダー観測(DSL)による洋上観測が盛んになってきており、実観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、1-3}。DSLの観測値は、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、この不確かさの算定手法の確立が必要である。

DSLの不確かさに関する要素として、挟角(2機から照射されるビームの成す角)と仰角が挙げられる。事前検証観測と本観測で、挟角と仰角を同一にすることで、事前検証観測の不確かさを直接適用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、事前検証観測では、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計測機器の視線風速の観測精度の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、水平風ベクトルへの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、コンバージェント計算の式^{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、水平風速の計測精度が低減することが、後者はコンバージェント時の仰角の正弦値が増大することが要因として挙げられる。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。

* 令和5年12月1日 第45回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演
** 会員 日本気象株式会社 環境・エネルギー事業部
〒540-6017 大阪府大阪市北区大深町4-20 グランフロント大阪タワーA29F
*** 学生会員 神戸大学大学院 海事科学研究科

2. DSL観測の水平風速算出手法と不確かさの要因

2.1 DSL観測の水平風速算出手法

任意のスキャニングライダーによって観測される視線風速 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観測では、2本の視線風速 V_{r1}, V_{r2} しか得られないが、一般に地形的に開けた洋上では、鉛直風速は平均的に0となる傾向があり、また、式(1)の仰角 θ は0~5°程度に設定されることが多い。こうしたことから、式(1)右辺第3項は他の項に比較し十分に小さくなり、水平成分の風速(水平風速)は、この項を0として算出される。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、観測誤差が含まれる。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. 瞬時値に対する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 に示す計算フローを以下の設定にし、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視線風速の観測誤差 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}

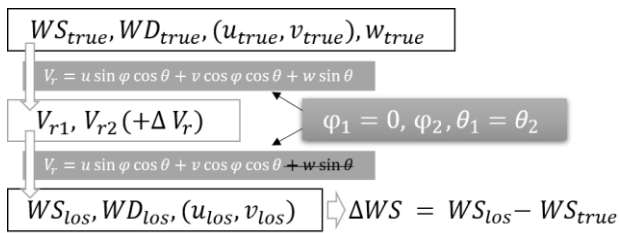


Fig. 1 計算のフロー

3.2 結果

(a) 挟角を変数とする場合

Fig. 2 に、水平風速 4 m/s 時の①視線風速の観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最大値、色が風向を表す。挟角 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。

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、挟角を大きく取ることは避けるべきであることを示唆している。結果の表示の仕方を変え、挟角別の風向に対する水平風速の誤差を Fig. 4 に示す。この図から、誤差が最大値をとるのは挟角の二等分線方向であることがわかる。

なお、これらの検証では、誤差の大きさは、風速によらず、一定のようであった (結果省略)。

(b) 仰角を変数とする場合

Fig. 5 に①視線風速の観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

Table 1 変数設定

(i) 風況の設定	
水平風速 WS_{true} (m/s)	0, 4, 8, 12, 16
水平風向 WD_{true} (deg)	0, 5, 10, ... 355

(ii) 挟角・仰角の設定		
	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) 検証内容の設定		
検証内容	鉛直流 w_{true} (m/s)	視線風速の観測精度 ΔV_r (m/s)
①	0 又は 1	-0.1, 0, 0.1 の組み合わせ
②	-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3	0

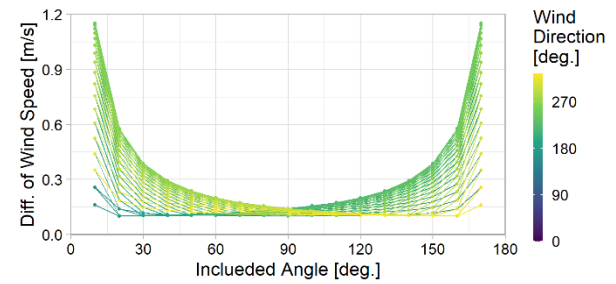


Fig. 2 $WS_{true} = 4$ m/s、 $w_{true} = 0$ 時の視線風速に不確かさ ΔV_r (± 0.1 m/s ないし 0.0 m/s の組み合わせ) を与える場合の風速による挟角に対する水平風速誤差の絶対値の最大値

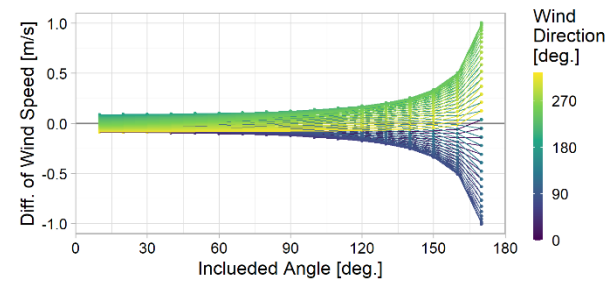


Fig. 3 $WS_{true} = 4$ m/s、 $w_{true} = 1$ の時の風速による挟角に対する水平風速の誤差

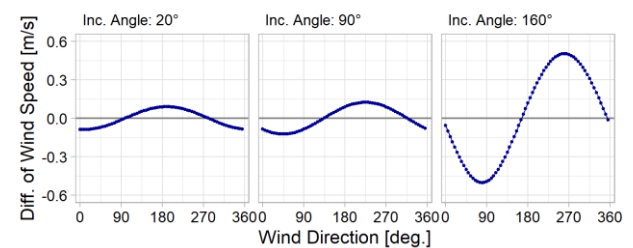


Fig. 4 $WS_{true} = 4$ m/s、 $w_{true} = 1$ の時の挟角別 ($\varphi_1 = 0^\circ, \varphi_2 = 20, 90, 160^\circ$) の風向に対する水平風速の誤差

きくなるがその増加量は極めて小さい。なお、この検証では、誤差の大きさは、風速によらず、一定のようであった（結果省略）。

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。この誤差の最大量の仰角に対する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。

3.3 考察

挟角の①の検証では、小さな挟角と大きな挟角を制限する理由となる。挟角の②の検証では、仰角が大きくなると、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観測が重要であるといえる。

仰角の①の検証では、大きな仰角にしても影響がないことを示している。仰角の②の検証は、大きな仰角を制限する理由となる。瞬時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 TurbSim 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、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

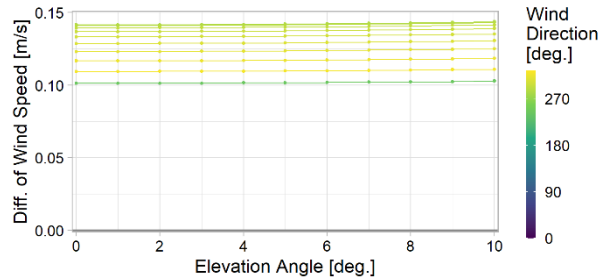


Fig. 5 $WS_{true} = 4$ m/s, $w_{true} = 1$ の時の視線風速に誤差を与える場合の仰角に対する水平風速の誤差の絶対値の最大値

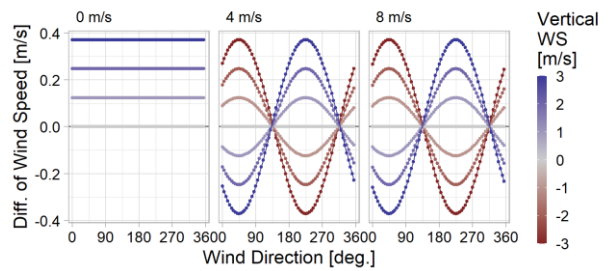


Fig. 6 $\theta = 5^\circ$ の時の風速別風向に対する水平風速の誤差

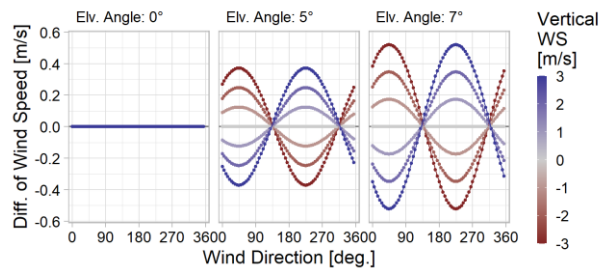


Fig. 7 $WS_{true} = 4$ の時の仰角別風向に対する水平風速の誤差

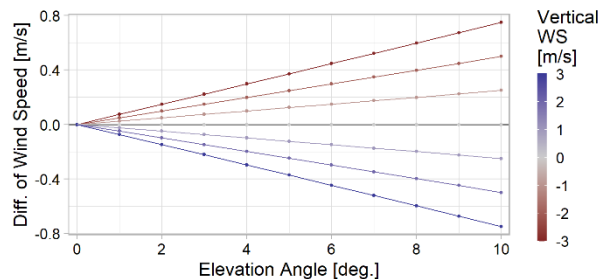


Fig. 8 $WS_{true} = 4$, $WD_{true} = 45$ の時の仰角に対する水平風速の誤差

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。

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。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 に青色で示す。平均風速は、仰角が 10° であっ

でも約 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と考えられる。

鉛直流の影響が負の値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 に赤色で示した。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、過小評価か過大評価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 となる傾向があるが、仰角の大きい DSL 観測では、鉛直流の特性について注意する必要がある一方で、この特性を踏まえることのできる補正手法が有効である可能性が示唆される。

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 m) × 32 (140 ~ 160 m)
空間解像度	1 m
時間解像度	1 sec
解析時間	600 sec (TurbSim: 601~1200 sec)

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

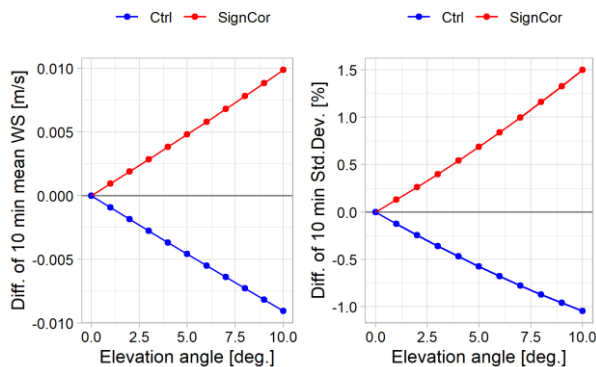


Fig. 9 仰角に対するスペクトルモデルを用いた風況場の 10 分値の誤差 (左)平均風速 (右)標準偏差 (色)鉛直流の符号

5. 結語

本研究では、DSL 観測における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。結論を以下に示す。

- 挟角に対しては、瞬時値に対しての検証により、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、誤差が抑えられることが示された。
- 仰角に対しては、視線風速の観測精度の伝播の影響は、瞬時値に対しての検証により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、観測サイトの鉛直流の特性に十分注意することが必要な一方で、この特性を踏まえた補正手法が有効である可能性が示唆された。

今後、実観測を用いた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¹⁰⁾の構築に向けた取り組みを計画している。

謝辞

研究に関係した全ての皆様に感謝の意を表します。

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) 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, 43, 2022.
- 10) 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).