

銚子沖洋上観測タワーを用いた デュアルスキャニングライダーによる風況観測の精度検証*

Validation of Dual-Doppler LiDAR wind assessment using the met-mast at Choshi offshore site

佐々木 亘** 福本 幸成*** 猪俣 海斗*** 日東寺 美知夫** 石原 孟****
Wataru SASAKI Yukinari FUKUMOTO Kaito INOMATA Michio NITTOUJI Takeshi ISHIHARA

1 はじめに

風力発電所の事業計画の検討、評価、また、風車設計には精度の高い風況データを取得することが重要である。しかしながら、特に洋上における風況観測マストの設置は地元との調整から許認可の手続き、さらに、施工に多大な時間的・経済的コストを要する。そのため、近年ではリモートセンシング技術を活用したドップラーライダーによる風況観測が行なわれている。

これまでにドップラーライダーによる風速及び風向の精度検証研究が多く行われ（例えば、[1,2,3]）、ドップラーライダーによる風速・風向が高精度であることが報告されているが、乱流強度の観測精度についての研究は少ない。

本研究では、デュアルスキャニングライダー（DSL）による洋上風況観測の精度検証を目的とし、銚子沖洋上風況観測タワー（以下、観測タワー）における三杯式風速計及び矢羽根式風向計による計測値を用いて、DSLによる風速、風向、風速標準偏差の精度検証を行った。本論文では風況観測の概要と精度検証の結果を報告し、また、DSLによる風速標準偏差の補正についての提案を行う。

2 風況観測とデータ整理の概要

2.1 DSLによる観測

Leosphere社のWINDCUBE 400Sを2台用いて銚子沖洋上の風況観測を行った。ライダーの計測位置は、双方のライダーの視線を観測タワーの北東側に位置する40m（平均海面上）の風速計から反時計回りに 0.05° 回転させて交差した位置とし、60m高及び90m高の計測位置についても観測高以外は40m高と同様とした。図1にライダー、観測タワー及び計測位置の位置関係を示す。

ライダーの観測モードはFIXEDとし、[1]を参考に3高度の観測を20秒の切り替え時間間隔で行った。本観測では観測開始当初はレンジゲート長を75mに設定していたが、ライダー2の計測距離が長く、視線風速の異常値が多かったため150mに変更した。本論文ではレンジゲート長が150mの場合の風況データを用いて解析を行った。表1にライダーの設定概要を示す。

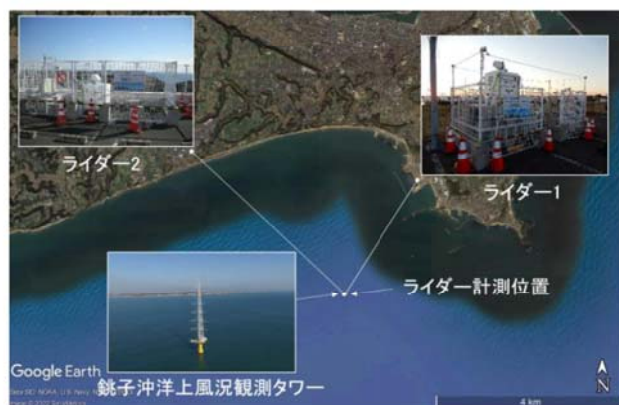


図1 ライダー設置位置と観測地点。

表1 ライダーの設定。

観測期間		2022/2/12~6/24	
計測位置		銚子沖洋上風況観測タワー (北東側の40m高風速計から反時計回りに 0.05° の位置)	
観測モード		FIXED	
サンプリングレート		1Hz	
観測高		40m, 60m, 90m (平均海面上)	
観測高切り替え時間間隔		20s	
レンジゲート長		75m (2022/2/12~4/12) 150m (2022/4/12~6/24)	
		ライダー1	ライダー2
方位角		213.09°	132.84°
仰角	40m高	0.68°	-0.16°
	60m高	1.08°	0.09°
	90m高	1.65°	0.47°
平面距離		2903m	4451m

*令和4年12月2日第44回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

**会員 東電設計株式会社 (〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12 KDX 豊洲グランドスクエア 9F)

***会員 東京電力リニューアブルパワー株式会社

****会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻

2.2 銚子沖洋上風況観測タワーによる観測

検証用の参照データとして、銚子沖 3.1km に設置された銚子沖洋上風況観測タワーにより観測された風況データを用いた。検証に用いた風速、風向、風速標準偏差は、各観測高（40m、60m、90m）に取り付けられた 3 台の三杯式風速計及び矢羽根式風向計を用いて観測タワーの影響を極力排除した風況データである[4]。なお、観測タワーにおける 90m 高の風向データは異常値が多かったため、95m 高の風向データを用いた。

2.3 データ整理

DSL による 1 秒毎の視線風速からフィルタリングを行い、風速、風向、風速標準偏差の 10 分値を算出した。フィルタリング及び視線風速から風速ベクトルの変換は既往研究の方法に従った[1,5,6]。

DSL の 1 秒値から 10 分平均値を作成するに当たり、フィルタリングにより視線風速の異常値を除去したが、作成した 10 分平均値に異常値が含まれる可能性があるため、異常値の除去を行った。除去の方法については、異なる観測高同士で風速及び風向について散布図を作成し、線形の関係から大きく外れている場合は異常値とみなした。また、風速及び風向の時系列を目視で確認し、同じ値が長時間継続している場合も異常値とみなした。タワーの観測値についても同様に異常値を除去した。

2.4 システム稼働率及び有効データ率

観測期間中の DSL のシステム稼働率と有効データ率を表 2 に示す。システム稼働率はシステムが稼働していた 10 分間のデータ数を観測期間中の 10 分間の総数で割った値とし、有効データ率はフィルタリング及び異常値の除去を適用した後の 10 分間のデータ数を観測期間中の 10 分間の総数で割った値とした[6]。

表 2 DSL のシステム稼働率と有効データ率

レンジゲート長	観測高	システム稼働率 [%]	有効データ率 [%]
150m	40m	97.7	82.4
	60m	97.7	82.0
	90m	97.7	81.4
75m	40m	99.9	69.7
	60m	99.9	73.6
	90m	99.9	71.0

3 精度検証

3.1 解析条件

精度検証は観測タワーの観測値を真値とし、NEDO 洋上風況観測ガイドブック（中間報告）[6]による KPI（Key Performance Indicator; 重要評価指標）に基づいて評価を行った。

3.2 解析結果

3.2.1 風速・風向の精度評価

図 2 に 60m 高における風速及び風向の散布図を、また、表 3 に KPI による精度評価の結果を示す。風速の KPI はすべての観測高においてベストプラクティスの評価であった。風向の KPI は 40m 高及び 60m 高についてはベストプラクティスの評価であったが、90m 高については切片が大きく、ミニマムの評価であった。

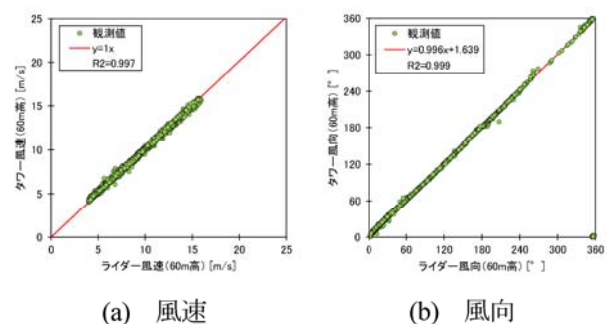


図 2 DSL と観測タワーによる風速・風向の散布図（60m 高）。

表 3 KPI による精度評価

観測高	KPI			精度評価
40m	風速	傾き	1.01	Best Practice
		決定係数	0.99	Best Practice
	風向	傾き	1.00	Best Practice
		切片	0.30	Best Practice
60m	風速	傾き	1.00	Best Practice
		決定係数	0.99	Best Practice
	風向	傾き	0.99	Best Practice
		切片	1.63	Best Practice
90m	風速	傾き	0.98	Best Practice
		決定係数	0.99	Best Practice
	風向	傾き	0.97	Best Practice
		切片	7.21	Minimum

3.2.2 風速標準偏差の精度評価と補正

DSL による風速標準偏差の精度はビン加重平均誤差 [6]を用いて評価した。ビン加重平均誤差は次式で定義される。

$$\sum_{k=1}^N f_k (\sigma_{90,DSL,k} - \sigma_{90,Tower,k}) \quad (1)$$

ここで、 N は風速ビンの個数を表し、 $k=1, 2, \dots, N$ である。 f_k はタワーの風速計の k 番目の風速ビンの頻度割合を表す。 $\sigma_{90,DSL,k}$ と $\sigma_{90,Tower,k}$ はそれぞれ DSL と観測タワーによる風速階級別の風速標準偏差の 90%分位値 ($\sigma_{90,k}$) を表す。 $\sigma_{90,k}$ は次式より算出した。

$$\sigma_{90,k} = \bar{\sigma}_k + 1.28 \sigma_{\sigma_k} \quad (2)$$

ここで、 $\bar{\sigma}_k$ は k 番目の風速ビンにおける風速標準偏差の平均値、 σ_{σ_k} は k 番目の風速ビンにおける風速標準偏差の標準偏差を表す。ビン加重平均誤差の算出には 4m/s 以上 16m/s 未満の風速データを用い、ビン幅は 1m/s とした。

表 4 に高度別のビン加重平均誤差を示す。ただし、式 (1) を $\sum_{k=1}^N f_k \sigma_{90,Tower,k}$ で除すことにより、相対誤差として表した。また、風速標準偏差の平均値 ($\bar{\sigma}$) についても σ_{90} の場合と同様にビン加重平均誤差を算出した。 $\bar{\sigma}$ 、 σ_{90} いずれの場合も全高度においてビン加重平均誤差が -5% を超え、 σ_{90} では観測高が高いほど誤差が大きい傾向が見られた。また、風速が高いほど DSL の風速標準偏差が観測タワーの風速標準偏差よりも小さい傾向が見られた (図 3)。

DSL の風速標準偏差の精度に関して、ビン加重平均誤差が 5% 以内であることが求められている [6]。本研究では先に述べたようにレンジゲート長を 75m にして観測を開始したところ、レンジゲート長が 75m の場合のビン加重平均誤差は 60m 高において約 2% であったのに対し、レンジゲート長を 150m に変更することにより誤差は約 -12% と大きくなった。そこで、本研究では DSL による風速標準偏差の補正について検討を行った。

観測高	ビン加重平均誤差 [%]	
	90%分位値	平均値
40m	-7.3	-19.8
60m	-11.8	-19.2
90m	-17.9	-22.0

表 4 高度別のビン加重平均誤差。

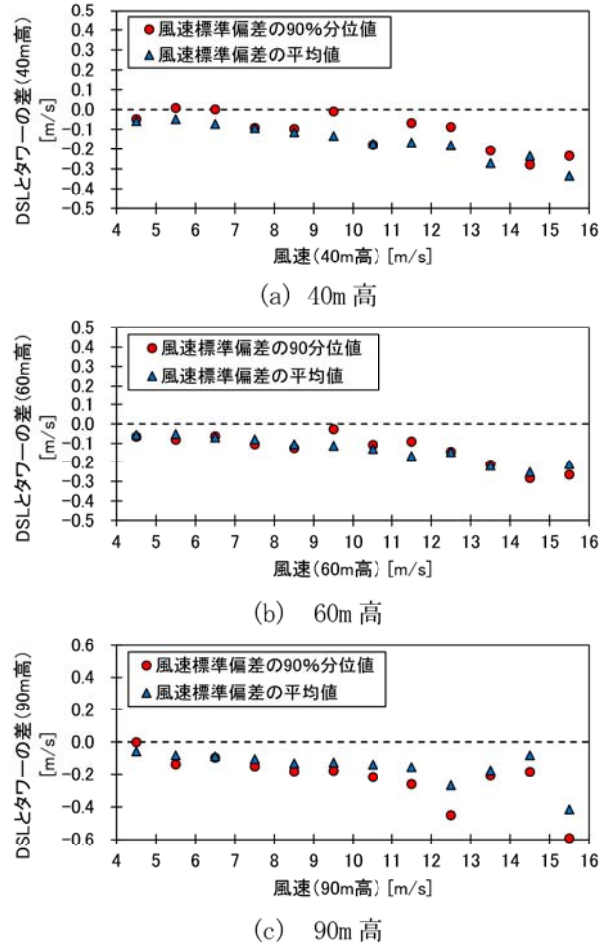


図 3 DSL と観測タワーの風速標準偏差の差 (DSL - 観測タワー)。

本論文ではビン加重平均誤差が 0 になるように DSL の風速標準偏差に定数を乗じる方法と定数を加える方法の 2 通りについて検討を行った。ビン加重平均誤差が 0 となる定数は式 (1) より導かれる。

定数 (α) を乗じる場合：

$$\alpha = \sum_{k=1}^N f_k \sigma_{Tower,k} / \sum_{k=1}^N f_k \sigma_{DSL,k} \quad (3)$$

定数 (β) を加える場合：

$$\beta = \sum_{k=1}^N f_k (\sigma_{Tower,k} - \sigma_{DSL,k}) / \sum_{k=1}^N f_k \quad (4)$$

図 4 に補正前後の DSL による σ_{90} と観測タワーによる σ_{90} の差を示す。ビン加重平均誤差は 0 となるが、風速 4~12m/s のビンでは補正により DSL と観測タワーの σ_{90} の差は概ね 0 となる一方、風速 13m/s 以上のビンでは誤差が依然残った。

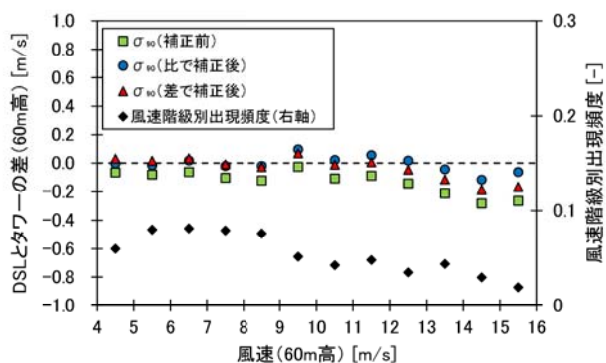
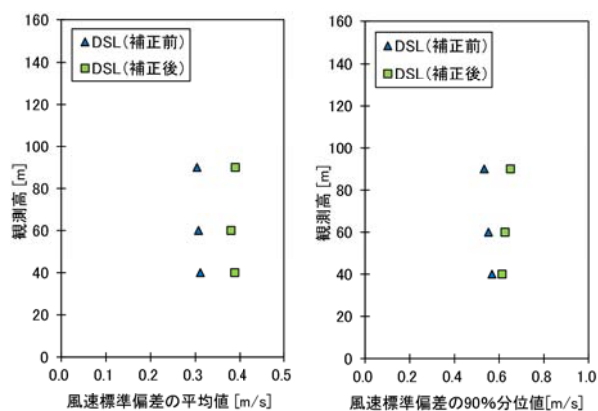


図 4 補正前後の風速階級別の σ_{90} の差（DSL—タワー）と DSL の風速階級別出現頻度分布（60m 高）。

図 5 に補正前後の DSL の高度別の風速標準偏差を示すが、ビン加重平均誤差が 0 となるように補正を行ったため補正後の DSL の風速標準偏差と観測タワーの風速標準偏差と一致する。そのため、図 5 では観測タワーの風速標準偏差は省略した。補正前の DSL の $\bar{\sigma}$ は高さ方向に概ね一様であり、補正後の DSL の $\bar{\sigma}$ も高さ方向に概ね一様となった。一方、補正前の DSL の σ_{90} は観測高が高いほど小さい傾向が見られたが、補正後は観測高が高いほど σ_{90} が大きい傾向となった。

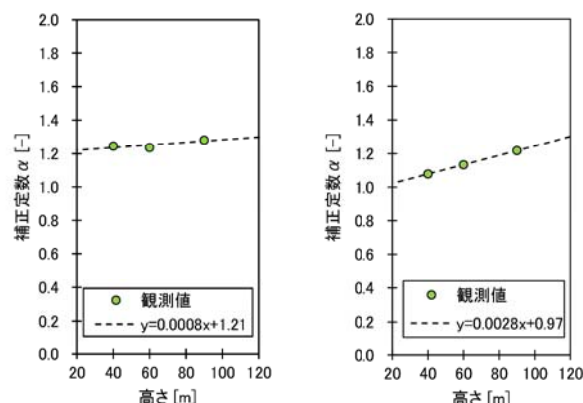


(a) $\bar{\sigma}$ (b) σ_{90}
図 5 補正前後の DSL の風速標準偏差

本観測では 40m, 60m, 90m の 3 高度を観測したが、一般的にはハブ高における補正定数が望まれる。そこで、3 高度で得られた補正定数を高さ方向に外挿することにより任意の高さにおける補正定数を算出した。

図 6 に補正定数 α と観測高の関係を示す（ β の場合については紙面の都合上省略）。補正定数と観測高の間に概ね線形の関係が見られたため、線形回帰式を用いて任意の高度における補正定数を求めることが可能となる。 $\bar{\sigma}$ の場合は、補正定数は概ね高さによらない値とな

った。一方、 σ_{90} の場合は高さが増すほど補正定数も大きくなり、例えば 120m 高では $\alpha = 1.30$ であった。



(a) $\bar{\sigma}$ (b) σ_{90}

図 6 補正定数と観測高の関係（比を用いた補正）

5 まとめ

DSL による 3 高度同時風況観測を行い、銚子沖洋上風況観測タワーの観測値を用いて KPI に基づく精度検証を行った。風速・風向については 90m 高の風向がミニマムの評価となった以外は全てベストプラクティスの評価であった。

DSL による風速標準偏差は観測タワーの値に比較して過小であり、また、観測高が高いほど DSL の風速標準偏差は過小であった。本論文ではビン加重平均誤差が 0 となる補正方法を提案し、また、高度別の補正定数についての線形回帰式を用いた任意の高度における補正定数の算出方法を示した。

参考文献

1. 渡邊慶一郎, 高桑晋, 遠見力, 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, Journal of JWEA, Vol.45, No.2, 2021.
2. 嶋田進ら, 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 2 デュアル観測の精度検証, 第 43 回風力エネルギー利用シンポジウム予稿集, pp112-115, 2021.
3. 大畑静佳ら, 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, 第 43 回風力エネルギー利用シンポジウム予稿集, pp120-123, 2021.
4. 福本幸成, 大窪一正, 山中徹, 石原孟, 銚子沖における洋上風況観測結果, 第 36 回風力エネルギー利用シンポジウム予稿集, pp.225-228, 2014.
5. Simon, E. and M. Courtney, 2016, 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 Vol. 0112.
6. NEDO, 洋上風況観測ガイドブック中間報告, 2022.