

デュアルスキャニングライダーを用いた洋上風況観測と MCP 法による欠損データの補完*

Offshore wind assessment using dual scanning lidar and missing data complement
using MCP method

渡邊 慶一郎**

高桑 晋**

邊見 力**

石原 孟***

Keiichiro WATANABE Susumu TAKAKUWA Chikara HEMMI Takeshi ISHIHARA

1 はじめに

近年、日本では洋上風力発電の導入に向けて期待が寄せられている。風力発電所の建設には経済性と安全性の観点から正確な風況観測が重要である。経済性の観点から、対象とする海域の風速・風向及び風速シアの観測が必要であり、また風力発電機の安全性の観点から、乱流強度の観測は不可欠である。そのために、洋上の風況観測方法として、平均風速・風向および乱流強度を精度よく観測できるデュアルスキャニングライダーが用いられている。

陸上から洋上風況を計測できるスキャニングライダー等のリモートセンシング機器による観測では、気象条件等の影響により、データ取得率が低くなることがあり、特にデュアルスキャニングライダーでは2台のライダーを同時に観測する必要があるため、1台でのスキャニングライダー観測による有効データ率の2乗となり、有効データ率が低くなる。そのため、デュアルスキャニングライダーを用いた洋上観測においては、陸上に設置したマストの風況観測データを用いて、洋上風況観測の欠測データを補完する必要がある²⁾。

風況観測の欠測データを補完するために、MCP (Measure - Correlate - Predict)法が用いられているが、観測位置と高度の異なる地点で観測されたデータを用いて MCP 法により補完されたデータセットの計測精度の評価についてはこれまで行われた例がない。

そこで、本研究では、デュアルスキャニングライダーを用いた1年間の洋上風況観測を実施し、陸に近い防波堤上に設置したマストの風況観測データと共に分析し、風況観測のシステム稼働率と有効データ率を評価する。また MCP 法による洋上風況観測の欠測データの補完を行い、風速・風向および乱流強度の最終データセットの計測精度の評価を行う。

2 観測概要と検証内容

第2章では、まずマストおよび2台のスキャニングライダーを用いた風速、風向と乱流強度計測の概要を2.1節で示す。次に、視線風速から水平風ベクトルへの変換方法およびライダーのデータフィルタリングを2.2節で説明する。最後に、風速、標準偏差、風向のMCP法と補完後のデータセットの風速と風向の評価

式について説明する。

2.1 観測概要

離岸距離約3kmの洋上に向けて2台のスキャニングライダーのレーザーを照射してデュアルスキャニングライダー観測を行った。スキャニングライダーはLeosphere社のWINDCUBE200Sを用いた。図1にマストとスキャニングライダーの設置位置を示す。

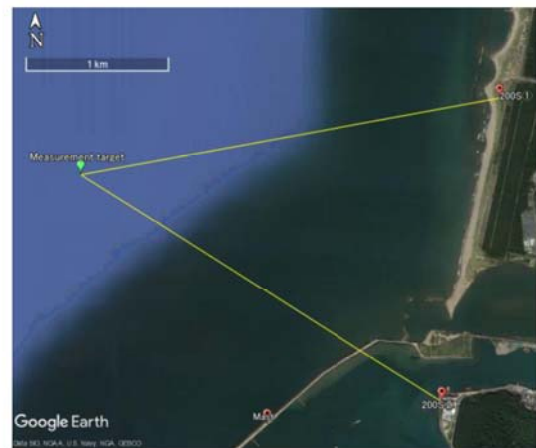


図1 マストとスキャニングライダーの位置
200S①、200S②：各スキャニングライダー

スキャニングライダーは、図2に示すように、金属の熱膨張や風に起因する振動により観測時の照射角度にズレが発生しないように、コンクリートで作成した架台の上に設置した。



図2 スキャニングライダー設置状況
左:200S①、右:200S②

デュアルスキャニングライダーの観測は、サンプリングレート1Hzで観測可能なFIXEDモード(定点観測)を用いて、3高度で観測を行うため1サイクル約20秒

*令和3年11月19日第43回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

** 会員 ジャパン・リニューアブル・エナジー株式会社

*** 会員 東京大学大学院 工学系研究科

で観測高度切り替えて洋上観測を行った。図3にデュアルスキャンングライダーを用いた3高度観測の概念図を示す。

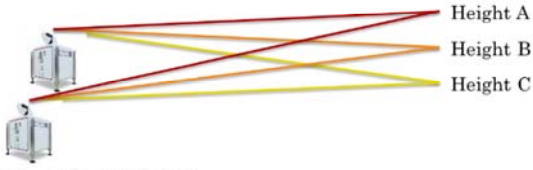


図3 デュアルスキャンングライダーによる3高度観測の概念図

MCP法の対象観測であるマストの観測内容とデュアルスキャンングライダーの観測時の設定値を表1と表2に示す。

表1 マストの観測内容

観測機器	風速計：三杯式風速計 (Theis 社製)
	風向計：矢羽根式風向計 (NRG 社製)
平均海面を基準とした 観測高度	風速計：50m
	風向計：48.5m
サンプリングレート	1Hz

表2 デュアルスキャンングライダーの設定値

観測モード	FIXED
ゲート長	50m
積分時間	1000ms
サンプリングレート	1Hz
レーザー照射傾角	42.3°
1 サイクルの観測時間	19.7-20.4sec
レーザー照射距離	200S①：3000m
	200S②：3000m

2.2 水平風速の算定とデータフィルタリング

デュアルスキャンングライダー観測での風速ベクトルへの変換式を以下に示す。レーザー照射の仰角がいずれのスキャンングライダーも0°に近い場合、鉛直速度成分は無視している。

$$\begin{pmatrix} u_i \\ v_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\theta_{1,i}\cos\varphi_{1,i} & \cos\theta_{1,i}\cos\varphi_{1,i} \\ \sin\theta_{2,i}\cos\varphi_{2,i} & \cos\theta_{2,i}\cos\varphi_{2,i} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} U_{r1,i} \\ U_{r2,i} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 u_i は東西の水平風速成分、 v_i は南北の水平風速成分、 $U_{r1,i}$ は200S①の視線風速、 $U_{r2,i}$ は200S②の視線風速、 $\theta_{1,i}$ は200S①の照射方位角、 $\varphi_{1,i}$ は200S①の照射仰角、 $\theta_{2,i}$ は200S②の照射方位角、 $\varphi_{2,i}$ は200S②の照射仰角、添え字 i は観測高度を示す。

本研究では、以下の①から④に示すデュアルスキャンングライダーのデータフィルタを設けた。

- ① メーカー推奨値であることを示す「Status」=1
- ② 2台のスキャンングライダーのデータが存在する。
- ③ 各スキャンングライダーの視線風速データより10分間の平均値から3 σ を超える1秒データの風

速を除外し、3 σ 以内のデータを採用する。

- ④ 10分値データに1秒値データが60個以上含まれる。

有効データ率 η_{10} はフィルタリング後の10分間の有効データ数を1年間の10分間の総個数で除した値で定義する。

$$\eta_{10} = \frac{\text{Number of Filtered 10min data}}{\text{Number of 10min data}} \cdot 100 \quad (2)$$

システム稼働率はスキャンングライダーが稼働していた時間を示す。フィルタリングの適用がない時の10分間のデータ数を1年間の10分間の総数で除した値で定義する。

2.3 MCP法と補完後のデータセットの評価式

デュアルスキャンングライダーが欠測した場合、文献2に示すMCP法により近傍のマストからデュアルスキャンングライダーの洋上観測点における風速・標準偏差・風向を推定し、欠測データを補完できる。本研究では風速、標準偏差、風向の変換式を以下に示す。

(1) 風速

デュアルスキャンングライダーの風速 $U_{DSL}(\theta_n)$ と三杯式風速計の風速 $U_m(\theta_n)$ から、相関関係は以下のように表される。 $\alpha_u(\theta_n)$ と $\beta_u(\theta_n)$ は、矢羽根式風向計により計測された風向 θ_n における線形回帰の傾きと切片であり、方位別に係数を求める。

$$U_{DSL}(\theta_n) = \alpha_u(\theta_n) \cdot U_m(\theta_n) + \beta_u(\theta_n) \quad (3)$$

ここで、 n は風向ビンを表す。

デュアルスキャンングライダーの欠測時における風速 $U_{DSL}(\theta, t)$ は式(4)により求め、補完する。 $U_{DSL}(\theta, t)$ がマイナスになった場合は0とした。

$$U_{DSL}(\theta, t) = \alpha_u(\theta, t) \cdot U_m(\theta, t) + \beta_u(\theta, t) \quad (4)$$

ここで、 θ は時刻 t の矢羽根式風向計における風向を表し、風向 θ に対する $\alpha_u(\theta, t)$ と $\beta_u(\theta, t)$ は式(3)から得られた値の内挿により求める。

(2) 標準偏差

デュアルスキャンングライダーの標準偏差 $\sigma_{DSL}(\theta_n)$ と三杯式風速計の標準偏差 $\sigma_m(\theta_n)$ から相関関係は以下のように表される。 $\alpha_\sigma(\theta_n)$ と $\beta_\sigma(\theta_n)$ は、ダブルバイアス修正(DBC)³⁾より方位別に係数を求める。

$$\sigma_{DSL}(\theta_n) = \alpha_\sigma(\theta_n) \cdot \sigma_m(\theta_n) + \beta_\sigma(\theta_n) \quad (5)$$

デュアルスキャンングライダーの欠測時における標準偏差 $\sigma_{DSL}(\theta, t)$ は式(6)により求め、補完する。 $\sigma_{DSL}(\theta, t)$ がマイナスになった場合は0とした。

$$\sigma_{DSL}(\theta, t) = \alpha_\sigma(\theta, t) \cdot \sigma_m(\theta, t) + \beta_\sigma(\theta, t) \quad (6)$$

風向 θ に対応する $\alpha_\sigma(\theta, t)$ と $\beta_\sigma(\theta, t)$ は式(5)から得られた値の内挿により求める。

(3) 風向

デュアルスキャンングライダーの風向の時刻歴データと、矢羽根式風向計の風向の時刻歴データから求めた風向偏角を、風向ビンごとに平均することで風向偏角 $\theta_d(\theta_n)$ を求め、方位別のデュアルスキャンングライダーの風向 $\theta_{DSL}(\theta_n)$ を式(7)より求める。なお、風向偏角は、 $\pm 180^\circ$ の範囲内である。

$$\theta_d(\theta_n) = \theta_{DSL}(\theta_n) - \theta_m(\theta_n) \quad (7)$$

デュアルスキャニングライダーのデータ欠測時における風向の時刻歴データ $\theta_{DSL}(t)$ は式 (8) により求め、補完する。

$$\theta_{DSL}(t) = \theta_m(t) + \theta_d(t) \quad (8)$$

風向 $\theta_m(t)$ に対応する風向偏角は式 (7) から得られた値の内挿により求める。

補完後のデュアルスキャニングライダーの風速、風向の精度を評価するため、榎木と石原の論文⁴⁾により提案された評価式を用いて、補完後の風速、風向のデータセットにおける決定係数 R_{Avail}^2 、傾き α_{Avail} 、切片 β_{Avail} を以下の式より求める。

$$R_{Avail}^2 = 1 - (1 - \zeta)(1 - R_{MCP}^2) \quad (9)$$

$$\alpha_{Avail} = 1 - (1 - \zeta)(1 - \alpha_{MCP}) \quad (10)$$

$$\beta_{Avail} = (1 - \zeta)(\beta_{MCP} + \zeta(\bar{y} - \bar{x})) \quad (11)$$

ここで、 ζ はデータ有効率 (MCP 法の構築期間のデータ数/対象観測のデータ数) を示し、 R_{MCP}^2 、 α_{MCP} 、 β_{MCP} は、それぞれ、MCP 法による予測データの決定係数、回帰直線の傾き、切片を示す。 $\bar{x}$ と $\bar{y}$ は、それぞれ観測データの平均値と MCP 法により予測されたデータの平均値を示す。

3 検証結果

第 3 章では、まず 3.1 節でデュアルスキャニングライダーによる 3 高度観測におけるシステム稼働率と有効データ率から Carbon Trust 社が提案した Key Performance Indicator (以下、KPI)⁵⁾を満足しているか調べた。次に、3.2 節では MCP 法による変換結果を示し、評価式より求められた補完後の最終データセットの風速、風向の決定係数、傾き、切片について調べる。

3.1 信頼性に関する KPI の評価

デュアルスキャニングライダーの信頼性に関する KPI として、1 年間のシステム稼働率 (System Availability)、有効データ率 (Post-processed Data Availability) を用いる。各観測高度におけるデュアルスキャニングライダーのシステム稼働率と有効データ率を表 3 に示す。表 3 から、システム稼働率は 95% であり、KPI における全期間のシステム稼働率 Stage2 に該当することが分かる。一方で、有効データ率は、高度 A、B、C でそれぞれ 67%、70%、73% となり、全期間の有効データ率の Stage2 の 85% 以下であり、Stage3 (90% 以上) を満足するデュアルスキャニングライダーのデータセットを構築するためには、データ取得率 98% のマストデータを用いて欠測データを補完する必要があることが分かる。

表 3 システム稼働率と有効データ率

観測高度	システム稼働率(%)	有効データ率(%)
Height A	95	67
Height B	95	70
Height C	95	73

3.2 MCP 法による予測結果と補完後データセットの評価

本節では、まず 2.3 節で示した MCP 法により、マストとデュアルスキャニングライダーの両データが存在している 1 年間のデータを用いて、マストデータとデュアルスキャニングライダーデータの関係式を求め、マストデータから予測したライダー位置のデータ (以下、予測データ) の精度を評価する。

図 4 に各観測高度における観測データ (ライダー) と予測データ (マストからの変換値) の風速・風向の相関図を示した。風向の相関を求める際には、一般に風速 2m/s より小さい風向データの除去⁵⁾や 352.5° ~ 7.5° の風向データの除去⁶⁾といったデータ処理が行われる。本研究においても、風向の相関を求める際に、風力発電しない風速 4m/s より小さい風向データを除去し、7.5° 以下の 0° 付近の風向データに対して 360° を加算するという条件により処理された風向データを用いて観測データと予測データの相関を求めた。風速に関しては、図 4 の (a) から、決定係数と傾きは 0.97 であり、風速の KPI における Minimum をクリアしていることが分かる。また、図 4 の (c)、(e) から決定係数と傾きが 0.98 以上であり、風速の KPI における Best Practice をクリアしていることが分かる。一方、風向に関しては、図 4 の (b) から、傾きと切片はそれぞれ 0.95、8.26° であり、風向の KPI における Minimum を

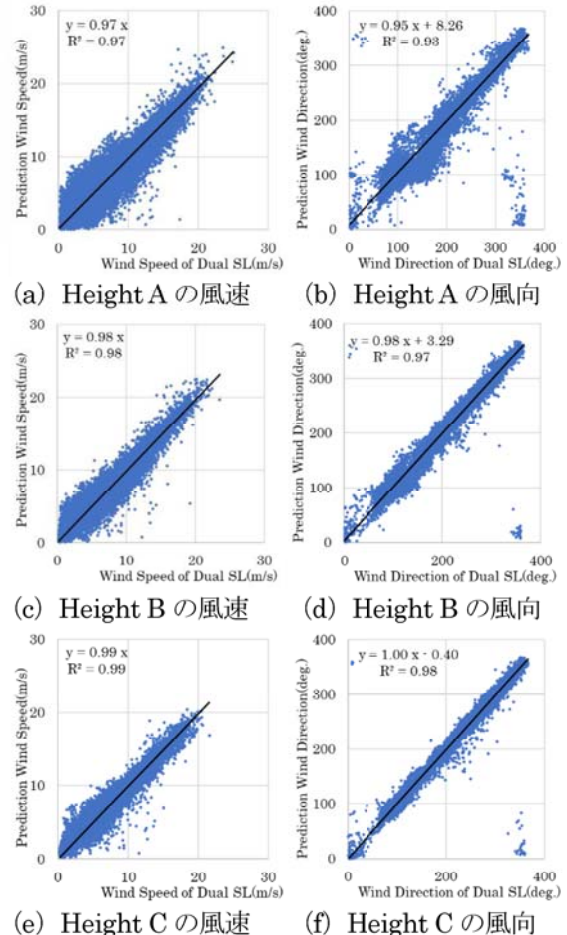


図 4 観測データと予測データの風速、風向の相関

クリアしているが、決定係数は0.93であり、Minimum以下であることが分かる。また、図4の(d)、(f)から、決定係数と傾きは0.97以上、切片は5°以下であり、風向のKPIにおけるBest Practiceをクリアしていることが分かる。従って、高度B、Cでは風速と風向のKPIのBest Practiceを満足しているが、高度AではKPIのMinimumを満足していないことが分かる。

標準偏差に関しては、決定係数、傾き、切片を評価する代わりに、文献1に示すように風速ビンごとの乱流強度の値により精度評価を行う手法を用いる。本研究においても標準偏差については、風速ビンごとの乱流強度の90%タイル値を用いて観測データと予測データを比較して精度検証を行った。図5には、各観測高度における観測データと予測データの風速ビンごとの乱流強度の90%タイル値を示す。図5から、風速ビンごとの乱流強度の90%タイル値において観測データと予測データは、高度Cではよく一致しており、高度A、Bでは風速6m/s以上ではば一致していることが分かる。ハブ高さに対応する高度Bでは、風速5m/s以上の乱流強度の90%タイル値をビンごとに加重平均して求めた予測値は、観測値に比べ、相対誤差が-3.3%であり、式(5)の傾き α_σ と切片 β_σ に線形回帰を適用したときの相対誤差-13.1%に比べ、大きく低下したことが分かる。

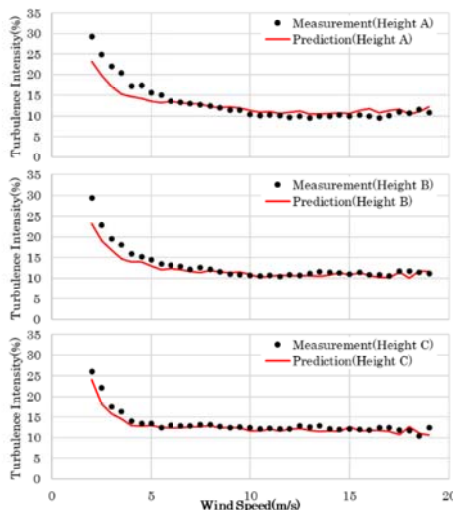


図5 風速ビンごとの乱流強度の90%タイル値
(上: Height A、中: Height B、下: Height C)

表4 有効データ率と風速、風向の補完前の評価

観測高度	項目	有効データ率 (%)	決定係数 R_{MCP}^2	傾き α_{MCP}	切片 β_{MCP}
Height A	風速	65	0.97	0.97	-
	風向	65	0.93	0.95	8.26
Height B	風速	68	0.98	0.98	-
	風向	68	0.97	0.98	3.29
Height C	風速	71	0.99	0.99	-
	風向	71	0.98	1.00	-0.40

MCP法よりデュアルスキャニングライダーの3高度観測の欠測データを補完した最終データセットを評価するために、風速の決定係数と傾きは式(9)、(10)より求め、風向の決定係数、傾き、切片は式(9)、(10)、(11)より求めた。表4には、補完前の各観測高度におけるデータセットの有効データ率および風速と風向の決定係数 R_{MCP}^2 、傾き α_{MCP} 、切片 β_{MCP} を示し、表5

には、補完後のデータセットの評価として各観測高度の有効データ率、風速と風向の決定係数 R_{Avail}^2 、傾き α_{Avail} 、切片 β_{Avail} を示す。表4、表5から、補完前後の風速と風向の決定係数、傾き、切片は、全ての高度において向上していることが分かる。また、風速の決定係数と傾きは0.99以上、風向の決定係数と傾きは0.98以上、切片は $\pm 5^\circ$ 以下となり、KPIのBest Practiceに達することが分かる。さらに、補完後の有効データ率はマストのデータ取得率に応じて98%となり、KPIにおける全期間の有効データ率のStage3をクリアしていることが分かる。以上のことから、デュアルスキャニングライダーを用いた観測とMCP法による欠測データの補完により、高い有効データ率を有する3高度の風速、風向を同時に精度よく観測できる洋上風況観測手法を確立したことを示した。

表5 有効データ率と風速、風向の補完後の評価

観測高度	項目	有効データ率 (%)	決定係数 R_{Avail}^2	傾き α_{Avail}	切片 β_{Avail}
Height A	風速	98	0.99	0.99	-
	風向	98	0.98	0.98	2.12
Height B	風速	98	1.00	1.00	-
	風向	98	0.99	0.99	0.76
Height C	風速	98	1.00	1.00	-
	風向	98	0.99	1.00	-0.37

4 まとめ

デュアルスキャニングライダーを用いて3高度における洋上風況観測を1年間行い、以下の結論を得た。

- 1) デュアルスキャニングライダーのシステム稼働率と有効データ率はそれぞれ95%と70%程度であることを明らかにした。マストの風況観測データを利用して洋上風況観測の欠測データの補完を行う必要があることを明らかにした。
- 2) デュアルスキャニングライダーを利用した3高度の風況観測データについて、MCP法により欠測データの補完を行った。MCP法により補完後の風速・風向における最終データセットの有効データ率は98%に達し、また風速と風向のKPIも全ての高度においてBest Practiceに達した。

謝辞: 本調査にご協力いただいた観測機器の関係者の皆様に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 渡邊, 高桑, 邊見, 石原: 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, Vol. 45, No.2, pp.40-48, 2021.
- 2) 石原, 川竹, 荒川, 山口: 観測タワーとライダーの併用による風況観測, 第41回風力エネルギー利用シンポジウム, pp54・57, 2019.
- 3) 石原, 山口, 嶋田, 「風力発電出力の短期予測: 電力の安定供給に向けて」, オーム社, (2012)
- 4) 榎木, 石原: 現地観測のデータ有効率を考慮したMCP法により補完された風速・風向データの決定係数, 傾き, 切片の評価式の提案, 第43回風力エネルギー利用シンポジウム, 2021.
- 5) The Carbon Trust, “OWA Roadmap for the Commercial Acceptance of Floating LiDAR Technology, Version 2.0”, 2018.
- 6) IEA Wind RP15 Ground-based vertically-profiling remote sensing for wind resource assessment, 2013.