

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*

Formulas for evaluation of coefficient of determination, slope and offset of wind speed and direction compensated by MCP method considering data availability of onsite measurement

榎木 康太**
Kota ENOKI

石原 孟***
Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

洋上風力発電が持続可能な社会の実現の観点から大きな注目を集めている。風力発電事業の風資源量評価やサイト適合性評価のために風車設置海域において精度の高い風況観測の実施は不可欠である。近年、風車が大型化しており、より沖合への風車の設置が想定される傾向にあり、これまでと比較し、さらに陸から離れた海域において、より高い高度までの洋上風況の把握が求められる。

洋上風況観測には、大きく3つの方法がある。1つは、海域に観測鉄塔を設置する方法であり、主に陸上風力分野で長年にわたり計測精度と信頼性が証明されてきたが、洋上では設置に時間とコストがかかることや塔体により流れ場が影響¹⁾を受けることが問題となる。2つ目として、海域に浮体ライダを設置する方法が挙げられる。浮体の設置は、比較的容易かつ安価であるが、浮体による動揺の補正が必要であること²⁾や、鉛直ライダの計測高度が高くなると取得率が低くなる傾向³⁾や乱流強度の過大評価⁴⁾が問題となる。また、上記の2つの手法は、洋上に設備を設置するため、機器トラブル時の容易なアクセスが困難⁵⁾であり、ダウンタイム長期化に伴うデータ取得率低下や対応コストの増大も問題となる。最後に、3つ目の洋上風況方法として、陸上からのスキヤニングライダによるリモート観測が挙げられる。これには、ライダ1台を用いるシングル計測⁶⁾や離れた地点に配置した2台から洋上計測ポイントを同時に計測するデュアル計測⁷⁾がある。これらでは機器の特性として計測距離が大きくなるとデータ取得率が低下する問題がある。また、デュアル計測は2台の同時データがそろっていないと算出できないため、シングル観測に比べ、データの取得率が下がる点が問題となる。

データの取得率の低下は、計測距離が長くなることによる要因の他、降雨・降雪・霧等による視程不良時や低エアロゾル濃度の気象条件による要因もあり、リモート機器による洋上風況観測で避けられない問題である。従

って、スキヤニングライダによる洋上風況観測の欠測データの補完および精度評価が重要になる。洋上風況観測の欠測データを陸上の風況観測データから補完できるMCP (Measure - Correlate - Predict) 法は一般的に用いられ、MCP 法における予測の不確かさは、MCP 法により求めた風況観測データについて評価可能である。しかしながら、MCP 法を適用し欠測部分を補完した後の風況観測データに対する精度を評価する手法は明らかではない。

そこで、本研究では、欠測期間にMCP 法を適用した欠測補完後の風況データに対し、データ有効率を考慮した評価指標としての回帰直線の決定係数、傾き、切片を求める式を提案すると共に、実測データによる検証を行う。

2. 評価式の提案

2. 1 リモート機器による風速・風向観測の評価指標

鉛直ライダによる風速・風向観測の確からしさを評価する指標としてCarbon Trust によるもの⁸⁾があり、評価対象の風況観測システム(浮体ライダ)の観測結果について、事前に校正された風速計と風向計の観測データと比較し、10 分平均値同士の散布図において回帰直線の傾き、切片、決定係数を評価指標 KPI (Key Performance Indicator) として鉛直ライダの計測精度を評価することが求められている。また、観測システムの信頼性は、後処理前のシステム稼働率 (System Availability) や後処理後のデータ有効率 (Post-processed Availability) といった

Table 1 Example of KPIs for Accuracy of LiDAR System.⁸⁾

Acceptance Criteria	風速		風向		
	傾き	決定係数	傾き	切片	決定係数
Minimum	0.97-1.03	>0.97	0.95-1.05	±10°	>0.95
Best Practice	0.98-1.02	>0.98	0.97-1.03	±5°	>0.97

Table 2 Example of KPIs for Reliability of LiDAR System.⁸⁾

Stage	System Data Availability		Post - processed Data Availability	
	Monthly	Overall	Monthly	Overall
Pre commercial	≥90%	≥95%	≥80%	≥85%
Commercial	≥95%	≥97%	≥85%	≥90%

*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

** 団体会員 (株)大林組 〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640

*** 会員 東京大学 大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授

KPI により評価される。Table 1 には計測精度に関する KPI を、Table 2 には信頼性に関する KPI の例を示す。"Minimum" は商用化前の段階 (Pre-commercial stage) のシステムに対する最低要件である。一方、商用化段階 (Commercial stage) の観測システムは、"Best Practice" を満たすことが求められる。これらの指標は浮体ライダー以外のリモート計測システムの事前検証で、一般に用いられている^{6,7)}。しかし、ライダー、特に、デュアルスキャニングライダーによるリモート観測では、データ有効率が信頼性に関する KPI を下回る場合があり、MCP 法による欠測データの補完が行われ、補完後の風速と風向データセットの計測精度の評価方法の提案が必要である。

2. 2 データ有効率を考慮した決定係数の評価式

まず、本研究の対象とする決定係数について述べる。データセット (x_i, y_i) ($i = 1, \dots, n$) の回帰式の決定係数 R^2 は次式で定義される。

$$R^2 \equiv ESS / TSS = 1 - RSS / TSS \quad (1)$$

ここで、総平方和 $TSS = \sum_i (y_i - \bar{y})^2$ は、回帰式で説明可能な平方和 $ESS = \sum_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ と説明不能な残差平方和 $RSS = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2$ に分けられる。なお、 $\bar{y}, \hat{y}$ はそれぞれ y の平均値及び回帰式による予測値を表す。

一般に、測定地点における風観測データが一定の欠測期間を有する場合、その欠測期間は近傍の風観測から MCP 法により補完される。最終的に得られる風観測データは、「観測が有効な場合、その実測値を用いる。欠測期間は、同じ時刻の近傍観測から MCP 法による補完値を採用する」という最終データセットになる。以下では、その決定係数の評価式を導出する。

今、対象観測 Y の期間を表すインデックス j の最大値を M とする。そのうち $1, \dots, m$ を欠測値、 $m+1, \dots, M$ を有効値とする。そこで $1, \dots, m$ までの欠測について回帰式を用い近傍観測 X から補完する。この補完期間の決定係数 R_{MCP}^2 は、回帰式の構築に用いるデータセット (x_i, y_i) ($i = 1, \dots, n$) の決定係数 R^2 で代表されとする。なお、通常は $M - m = n$ (Y の有効期間のデータで MCP 法の回帰モデルを構築する) である。

期間 M のうち、観測 Y が有効な期間の y_j ($j = m+1, \dots, M$) の回帰式は $y = x$ であり、次式が成り立つ。

$$\sum_{j=m+1}^M (y_j - \hat{y}_j)^2 = 0 \quad (2)$$

ここで、予測期間 M に渡る平均値及び分散は、MCP 補完式構築期間 n に渡るものと不変であると仮定する。

$$\frac{1}{M-m} \sum_{j=m+1}^M (y_j - \bar{y})^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (y_j - \bar{y})^2 \quad (3)$$

最終データセットの決定係数 R_{Avail}^2 は次式になる。

$$\begin{aligned} R_{Avail}^2 &= 1 - \frac{\sum_{j=1}^M (y_j - \hat{y}_j)^2}{\sum_{j=1}^M (y_j - \bar{y})^2} = 1 - \frac{m}{M} \left(\frac{\sum_{j=1}^m (y_j - \hat{y}_j)^2}{\sum_{j=1}^m (y_j - \bar{y})^2} \right) \\ &= 1 - \frac{m}{M} (1 - R_{MCP}^2) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、1 行目において式 (2) と (3) を適用し、2 行目において、MCP 法の構築期間 n と予測期間 M の RSS/TSS が等しいという仮定を用いた。MCP 法による補完後の最終データセットの決定係数は、予測期間中に MCP 法を用いる補完期間 (欠損期間) の割合 m/M と MCP 法による補完データの決定係数に依存することが分かる。さらに、データ有効率 ζ ($m/M = 1 - \zeta$) を用い整理し、次式を得る。

$$R_{Avail}^2 = 1 - (1 - \zeta)(1 - R_{MCP}^2) \quad (5)$$

2. 3 データ有効率を考慮した傾き、切片の評価式

次に、データ有効率を考慮した傾き及び切片の評価式について述べる。風速と風向の評価では、直線回帰式の傾き、切片が KPI として用いられている。これらを MCP による補完後の最終データセットに関して導出する。

評価のための回帰式を $\hat{Y} = \alpha_{Avail} Y + \beta_{Avail}$ (傾き α_{Avail} 、切片 β_{Avail}) とする。補完後の最終データセット y_j と真値のデータセット Y_j に対する回帰直線の総平方和 TSS は、

$$TSS = \sum_{j=1}^M (Y_j - \hat{Y}_j)^2 = \sum_{j=1}^M (Y_j - \alpha_{Avail} x - \beta_{Avail})^2 \quad (6)$$

であり、TSS 最小となる $\alpha_{Avail}, \beta_{Avail}$ は次式で与えられる⁹⁾。

$$\alpha_{Avail} = \sum_{j=1}^M (x_j - \bar{x})(y_j - \bar{y}) / \sum_{j=1}^M (x_j - \bar{x})^2, \quad (7)$$

$$\beta_{Avail} = \bar{y} - \alpha_{Avail} \bar{x} \quad (8)$$

ここで、近傍観測 X のデータセットの分散が $1.m$ (欠測期間) と $m+1, \dots, M$ (有効期間) で不変という仮定した。

$$\sum_{j=1}^m (x_j - \bar{x})^2 / m = \sum_{j=m+1}^M (x_j - \bar{x})^2 / (M - m) \quad (9)$$

式(9)に基づき、 α_{Avail} を以下のように整理できる。

$$\begin{aligned} \alpha_{Avail} &= \frac{\sum_{j=1}^M (x_j - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{\sum_{j=1}^M (x_j - \bar{x})^2} \\ &= \frac{m}{M} \frac{\sum_{j=1}^m (x_j - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{\sum_{j=1}^m (x_j - \bar{x})^2} + \frac{M-m}{m} \frac{\sum_{j=m+1}^M (x_j - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{\sum_{j=m+1}^M (x_j - \bar{x})^2} \end{aligned} \quad (10)$$

第 1 項の Σ 記号部分は、欠測期間における Y と近傍観測 X の回帰直線の傾きであるが、 Y は観測されていないため、直接求めることができないので、MCP 法による回帰直線の傾き α_{MCP} を適用する。また、第 2 項の Σ 記号部分は、 Y が観測され、その回帰直線は $y = x$ であるため 1 となり、 α_{Avail} の評価式は次式になる。

$$\alpha_{Avail} = \frac{m}{M} \alpha_{MCP} + \frac{M-m}{m} = 1 + \frac{m}{M} (\alpha_{MCP} - 1) \quad (11)$$

次に、 β_{Avail} は β_{MCP} を用い、以下のように導出できる。

$$\begin{aligned} \beta_{Avail} &= \frac{m}{M} \left(\bar{y} - \alpha_{MCP} \bar{x} + \frac{M-m}{m} (\bar{y} - \bar{x}) \right) \\ &= \frac{m}{M} \left(\beta_{MCP} + \frac{M-m}{M} \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_j - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_j \right) \right) \quad (12) \\ &= \frac{m}{M} \left(\beta_{MCP} + \frac{M-m}{M} (\bar{y} - \bar{x}) \right) \end{aligned}$$

ここで、1 行目から 2 行目において有効期間 ($m+1, \dots, M$) で $\bar{y} = \bar{x}$ の関係を、また 2 行目から 3 行目では平均値が欠測期間と有効期間で不変という仮定を用いた。データ有効率 ζ で整理し、 $\alpha_{Avail}, \beta_{Avail}$ に関する以下の 2 式を得る。

$$\alpha_{Avail} = 1 - (1 - \zeta)(1 - \alpha_{MCP}) \quad (13)$$

$$\beta_{Avail} = (1 - \zeta)(\beta_{MCP} + \zeta(\bar{y} - \bar{x})) \quad (14)$$

3. 実測データを用いた検証

観測マストの風向・風速計位置と同じ地点を遠隔からライダーで計測した結果 (10 分間平均風速・風向) を用いて検証する。観測期間は 42 日で、そのうち両観測ともに有効と判断された約 36 日分を使用した。Table 3 に観測の概略を示す。マスト風速を対象観測 Y、ライダー観測を近傍観測 X とする。散布図を Figure 1 に示す。

検証方法について述べる。まず、時系列風速データを 10 区間に区分する (Figure 2)。1 区間は有効率 10% に対応する。検証対象のデータ有効率を $N \times 10\%$ 、 $N=1, \dots, 10$ とし、連続した N 個の区間を有効区間 (図中網掛部) とする。異なるデータ有効率の間で、検証ケース数を 10 ケースに統一するため、区間 10 の終端と区間 1 の始端は連続

Table 3 Description of observation.

観測データ	計測高度	平均風速	標準偏差
マスト観測 (Y)	50 m	6.81 m/s	3.77 m/s
ライダー観測 (X)	50 m	6.68 m/s	3.76 m/s

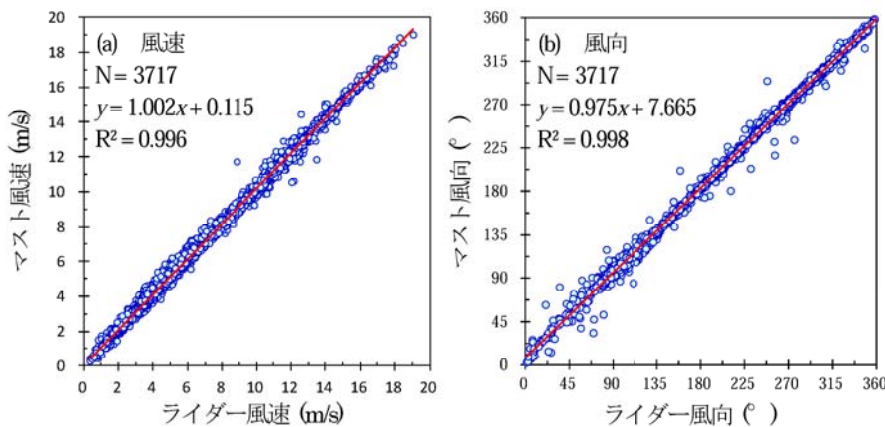


Figure 1 Scatters of windspeed and direction used in validity tests.

として扱った。Figure 2 に有効率 10% と 50% の区間の設定方法を模式的に示す。次に、抽出された N 区間の X と Y により MCP 法の式を構築する。そして、 $10-N$ 個の欠測区間は MCP 法による補完値を用い、 N 個の有効区間は Y の観測値をそのまま用い、 Y の予測値とする。最後に、予測値の決定係数 R^2 等を算出し、提案式による評価値 R_{Avail}^2 等と比較する。なお、 X と Y は同地点の観測のため、風速の MCP 法には風向を考慮しない直線回帰式 (15) を用い、風向には、風向偏角による補正式 (16) を用いる。

$$U_{\hat{Y}} = aU_X + b \quad (15)$$

$$\theta_{\hat{Y}} = \theta_X + \Delta\theta \quad (16)$$

ここで、 U 、 θ は風速、風向を示し、変数の添え字 $\hat{Y}$ 、 X はそれぞれ予測値、近傍観測値である。 a 、 b は X 、 Y の両データ有効期間において最小二乗法により求めた傾き及び切片であり、 $\Delta\theta$ は風向偏角である。長期風観測データが得られた場合には、16 方位に対して、式 (15)、式 (16) を適用し、データ補完を行うことも可能である⁹⁾。

平均風速の相対誤差のデータ有効率による変化を Figure 3 に示す。有効率ごとに 10 ケースの予測があり、マスト風速に対する相対誤差のアンサンブル平均と $\pm 1\sigma$ 、最小・最大の範囲が示されている。有効率が高い場合に、実測とよく一致するが、低い場合に、予測精度は抽出データに依存し、大きくばらつくことが確認される。

予測値 $\hat{Y}$ と真値 Y から求めた決定係数 R^2 、傾き α 、切片 β と、それぞれ式 (5)、(13)、(14) により評価した R_{Avail}^2 、 α_{Avail} 、 β_{Avail} の比較を Figure 4 に示す。 Y と $\hat{Y}$ の R^2 、 α 、 β はシンボルで示す。また、評価式による R_{Avail}^2 、 α_{Avail} 、 β_{Avail} は、視認性のため、データ有効率ごとのアンサンブル平均と $\pm 1\sigma$ 、最小・最大値を結んだ線で範囲を示す。まず、決定係数について述べる。風速、風向とも、評価値 R_{Avail}^2 が有効率の低い場合に大きくばらついていく。これは MCP 法構築の決定係数 R_{MCP}^2 のばらつきに

対応する。次に、風速の傾き、切片の評価について述べる。最小二乗法に基づく予測式 (15) の評価により、データ有効期間における予測値 $\hat{Y}$ ($U_{\hat{Y}}$) は Y に対して $\alpha_{MCP} = 1$ 、 $\beta_{MCP} = 0$ 、 $\bar{y} = \bar{x}$ の関係を満たす。そのため評価式 (13)、(14) による結果は、データ有効率 ζ によらず、常に $\alpha_{Avail} = 1$ 、 $\beta_{Avail} = 0$ となり、両図 (c)、(e) に示した直線となる。一方、シンボルで示された実際の α 、 β については、

データ有効率が低い場合にばらついているが、データ有効率が高くなると評価式の値に収束することが分かる。最後に、風向の (d) 傾き、(f) 切片について述べる。風速の場合とは異なり、風向の予測式 (16) は、データ有効期間の予測値と真値の回帰直線の傾き α_{MCP} が 1, 切片 β_{MCP} が 0 となることを保証していない。そのため、評価式 (13), (14) の α_{MCP} , β_{MCP} , $\bar{x}$, $\bar{y}$ は、有効期間のデータを用いて算出する。シンボルで示された実際の α , β のデータ有効率による変化を見ると、 α に関しては、Figure 1 (b) 風向中の回帰式に示された傾き 0.98 前後から、データ有効率が高くなるにつれ 1 に漸近し、 β についても、同様に Figure 1 (b) の回帰式切片 7.7° 前後から 0° に漸近している。これらの傾きと切片のデータ有効率による変化が、評価式により、よく再現されていることが示された。

以上のように、風速・風向のいずれにおいても、有効率が 60% より高い場合には、評価結果は実際の値と一致し、提案式により、MCP 法による補完後の最終データセットの精度を評価可能であることが分かる。

4. まとめ

本研究では、風観測のデータ有効率を考慮した MCP 法による補完後のデータの決定係数、傾き、切片の評価式を提案し、その妥当性を風観測データを用いて検証した。

参考文献

- 1) 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, pp.54-57, 2019.
- 2) A. Yamaguchi, T. Ishihara: A new motion compensation algorithm of floating lidar system for the assessment of turbulence intensity. J. Phys. Conf. Ser., 753, 072034, 2016.
- 3) J. P. Goit, A. Yamaguchi, T. Ishihara: Measurement and prediction of wind fields at an offshore site by scanning Doppler LiDAR and WRF, Atmosphere, 11, 442, pp.1-20, 2020.
- 4) F. Kelberlau, V. Neshaug, L. Lønseth, T. Bracchi, J. Mann: Taking the motion out of floating lidar turbulence intensity estimates with a continuous-wave wind lidar, Remote Sensing, 12, 898, 2020.
- 5) Y. Kikuchi, T. Ishihara: Assessment of weather window for the construction of offshore power plants by using wind and wave simulations, J. Phys. Conf. Ser., 753, 092016, 2016.
- 6) 間野, 上野, 糸崎, 石原: 3D スキャニングライダーにおけるデータ取得率とセクターサイズの観測精度への影響に関する研究, 第 42 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp. 17-20, 2020.
- 7) 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誌, Vol. 45, No.2, pp.40-48, 2021.
- 8) Carbon Trust: Offshore Wind Accelerator Roadmap for the Commercial Acceptance of Floating Lidar Technology, Version 2. (2018)
- 9) 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, pp.207-209. (2012)

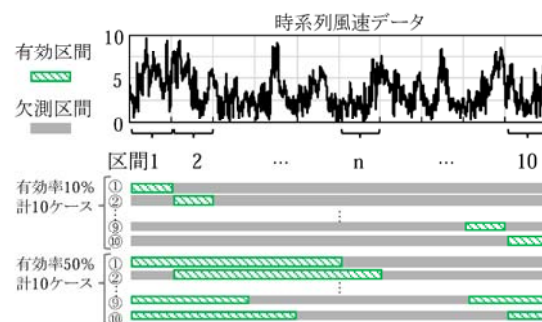


Figure 2 Examples of data segmentation for validation.

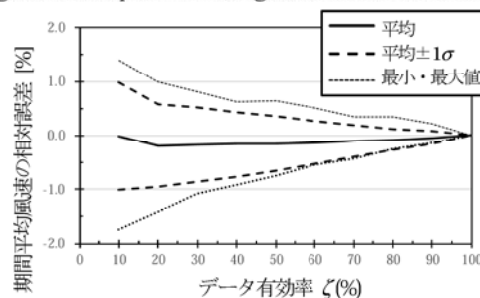


Figure 3 The relative mean error of wind speed predicted by combination of MCP method and onsite measurement.

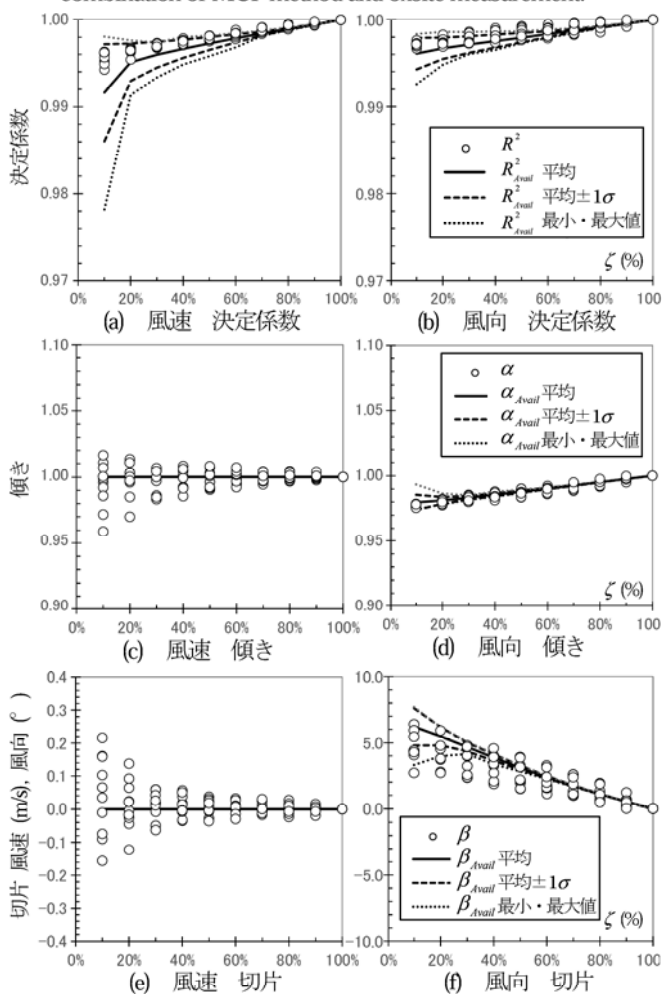


Figure 4 The coefficient of determination, slope and intercept of a regression line of sampled series (Symbols) and spreads of estimations by the proposed formulas (Lines).