

現地観測データの有効性を考慮した MCP 法による風況予測の決定係数の評価式の提案

A Formula for Evaluation of Coefficient of Determination on Wind Climate Assessment by MCP Methods Considering Data Availability of Onsite Measurement

○榎木 康太¹⁾ 石原 孟²⁾
Kota ENOKI¹⁾ Takeshi ISHIHARA²⁾

1. はじめに

風力発電分野では、風資源量評価やサイト適合性評価のために風車の建設予定地点の風況観測を行うことが求められる。近年の風車は大型化しており、ブレード最高高さまでの風観測は、鉛直ライダーやスキャニングライダー等による遠隔観測が用いられている。一方、これらの遠隔観測装置は、タワー観測と比べて気象条件等の影響を受け、得られるデータの有効率が低くなることもある。観測データの欠測を補うために、MCP (Measure - Correlate - Predict) 法がしばしば用いられる。MCP 法における予測の不確かさは、評価可能であるが、部分的に MCP 法を適用した場合の風観測の精度を評価する手法は明らかにされていない。

そこで、本研究では、現地観測結果を使用し、欠測期間に MCP 法を適用した場合の風観測期間における決定係数を求める手法を提案する。

2. 評価式の提案

2. 1 既存の風観測の評価指標

風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¹⁾があり、風観測システム (浮体ライダー) に対し、事前に校正された風速計と風向計による観測との回帰直線の傾き、切片、決定係数といった指標 KPI (Key Performance Indicator) を用い、計測精度を評価することが求められている。これらの指標の妥当性は浮体ライダー以外の遠隔計測でも、一般に用いられている²⁾。Table 1 に KPI の最低要件 (Minimum Requirement) を示す。ここで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 $(x_i, y_i) (i = 1, \dots,$

Table 1 Example of KPIs for Floating LiDARs (Minimum)

KPI	風速	風向
回帰直線の傾き	0.97-1.03	0.95-1.05
回帰直線の切片	-	$\pm 10^\circ$
決定係数	> 0.97	> 0.95

¹⁾ 研究員 大林組 技術本部技術研究所
Researcher, Research Institute of Obayashi Co. Ltd

²⁾ 教授 東京大学工学系研究科社会基盤学専攻
Professor, The University of Tokyo

$n)$ 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 $TSS = \sum_i^n (y_i - \bar{y})^2$ は、回帰式で説明可能な平方和 $ESS = \sum_i^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ と説明不能な残差平方和 $RSS = \sum_i^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ 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。

2. 2 データ有効性を考慮した決定係数の評価式

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、その決定係数の推定手法を導出する。

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 で代表されるとする。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。

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

$$= 1 - \frac{m}{M} (1 - R_{MCP}^2)$$

ここで、1 行目において式(2)と (3)を適用した。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 を用いて $m/M = 1 - \zeta$ と表せるので、次式を得る。

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

3. 実測データを用いた検証

風観測マストに設置されたカップ風速計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) 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 2 に観測の概略を示す。マスト風速が対象観測 Y、ライダー観測が近傍観測 X とする。散布図を Figure 1 に示す。これらの観測は Table 1 の要件を満たしている。

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。なお、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 等を評価し、提案式による推定値 R_{Avail}^2 と比較する。なお、X と Y は同地点の観測のため、MCP 法には風向を考慮しない切片 0 の直線回帰式を用いた。

期間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、それらの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一方、低い場合に、予測精度は抽出方法に依存し、大きくばらつくことが確認される。

Y の予測値の決定係数 R^2 と、式(5)により推定した決定係数 R_{Avail}^2 の比較を Figure 4 に示す。個々の予測値の決定係数 R^2 をシンボルでプロットする。また、評価式による推定値 R_{Avail}^2 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

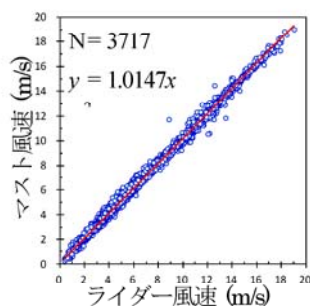


Figure 1 Scatters of timeseries used in validity tests.

Table 2 Description of observation

観測データ	計測高度	平均風速	標準偏差
マスト風速計 (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

$\pm 1\sigma$ 、最小・最大値を結んだ線で範囲を示す。推定値 R_{Avail}^2 が有効率の低い場合の大きなばらつきは、MCP 法構築の決定係数 R_{MCP}^2 のばらつきに対応する。有効率が 60% より高い場合には、 R^2 と R_{MCP}^2 は一致し、提案式により精度よく評価可能であることが示された。

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 法による風況予測の決定係数の評価式を提案し、風観測データを用い、その妥当性を検証した。

謝辞：日本気象株式会社荒木氏にはライダー観測の取りまとめにご協力頂いた。深く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) Carbon Trust, Offshore Wind Accelerator roadmap for the commercial acceptance of floating lidar technology, Version 2. (2018)
- 2) 渡邊, 高桑, 邊見, 石原, デュアルスキャニングライダーを利用した洋上風況観測の精度検証, 第 42 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.109-110. (2020)

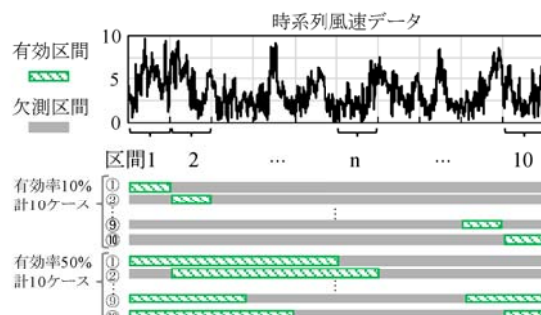


Figure 2 Examples of data segmentation for validation

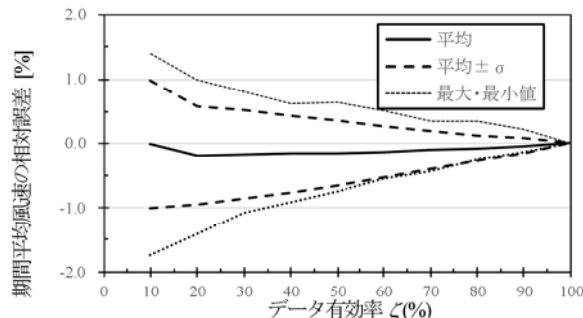


Figure 3 The relative mean error of wind speed predicted by combination of MCP method and onsite measurement.

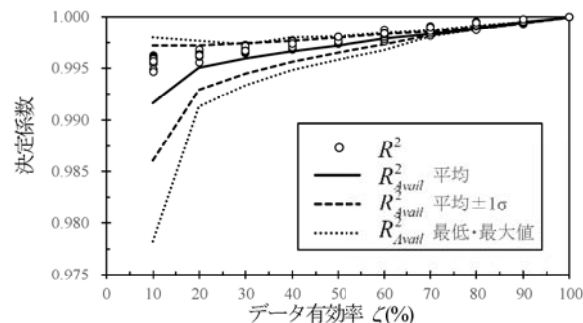


Figure 4 The coefficient of determination and its estimations by proposed formula.