

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・風向データの評価式の提案

Formulas for evaluation of wind speed and direction data compensated by MCP method considering data availability of onsite measurement

榎木 康太^{*1}

Kota ENOKI

石原 孟^{*2}

Takeshi ISHIHARA

^{*1} Research Engineer, Obayashi Corporation, 4-640 Shimokiyoto, Kiyose, Tokyo, 204-8558, Japan
Fax: +81-42-495-1261, E-mail: enoki.kota@obayashi.co.jp

^{*2} Professor, The Univ. of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan

Abstract

In wind energy projects, onsite measurements are conducted to evaluate the amount of resource or to ensure the conformity of site conditions for wind turbines. The missing of observation is sometime compensated using the MCP method. The uncertainty of the MCP method can be examined using the prediction model. However, it is not clear how to estimate the accuracy of final dataset consisting of observed data and data compensated by the MCP method. In this study, formulas to estimate the accuracy of this final dataset considering data availability are proposed and its applicability is validated by onsite measurements.

キーワード：MCP 法，データ有効率，欠測，補完，決定係数

Key Words：MCP method, Data availability, Missing, Compensation, Coefficient of determination

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。風力発電事業の資源量評価や風車のサイト適合性評価のため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。昨今の風車の大型化に伴い、風車の設置地点の離岸距離も大きくなり、沖合・高高度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 (Table 1)。1つは、海域に着床式のステージを据え、鉄塔と鉛直ライダーを設置する方法である。鉄塔と鉛直ライダーによる観測は、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、海域に浮体ライダー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、鉛直ライダー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、上記の二手法は、洋上に設備を設置するため、機器トラブルの際に荒天時のアクセスが困難⁵⁾であり、ダウンタイムの長期化に伴

うデータ取得率低下が懸念される。3つ目の観測方法として、陸上からのスキニングライダー (水平ライダー) による遠隔観測が挙げられる。1台のみを用いるシングル計測⁶⁾や離れた地点に配置した2台から同一の洋上計測点を同時に計測するデュアル計測⁷⁾がある。シングル計測は、乱流強度の計測ができない問題がある⁸⁾。両計測方式とも、水平ライダーの機器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という問題がある。また、デュアル計測では2台の同時計測データにより風向風速を算出する必要があるが、一定の割合で他方のデータがない状況が生じ、シングル観測に比べ、データ取得率が下がる点が問題となる。

Table 1 Wind measurement for offshore wind energy

Type of platform	Bottom fixed	Floating	Onshore	
Type of LiDAR	VL	VL	SL×1	SL×2
Accuracy	Wind speed	○	○	○
	Turbulence	○	△	○
Reliability	Availability*	> 95 %	> 85~90 %	> 90 %
Measurement campaigns	Ishihara et al. ¹⁾	Yamaguchi and Ishihara ²⁾	Mano et al. ⁶⁾	Watanabe et al. ⁷⁾

[Abbreviations] VL: Vertical LiDAR. SL: Scanning LiDAR.

[Symbols] ○: Applicable. △: Applicable with motion compensations. ×: Inapplicable.

* Post-processed Data Availability

^{*1} (株)大林組 副主任研究員 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640) E-mail: enoki.kota@obayashi.co.jp

^{*2} 東京大学 教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

(原稿受付: 2023 年 2 月 27 日)

データの取得率の低下要因は、計測距離が長くなること、他、降雨・降雪・霧等による視程不良や低エアロゾル濃度等の気象要因もあり、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、水平ライダー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。

風況観測の欠測データの補完には、近傍の風況観測との相関関係により構築される MCP (Measure - Correlate-Predict) 法が一般的に用いられる。MCP 法の予測の不確かさは、MCP 法の構築で用いる風況観測データを利用し、MCP 法による予測値と実際の観測値の比較により評価可能である。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、実測により検証を行う。

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

鉛直ライダーによる風速・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⁹⁾がある。評価対象の風況観測システム (浮体ライダー) の観測結果 (10 分間平均値等) を、事前に校正された風速計や風向計等の測器による同時観測データと散布図上で比較する。その回帰直線の傾き、切片、決定係数等は校正済み測器との完全一致からのずれを表し、これらの評価指標 KPI (Key Performance Indicator) により鉛直ライダーの精度を評価することが求められる (例 Fig. 3)。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 Data Availability) 等の KPI により評価される。Table 2 に計測精度に関する KPI を、Table 3 に信頼性に関する KPI の例を示す。“Minimum”

Table 2 Example of KPIs for accuracy of LiDAR system.⁹⁾

Acceptance Criteria	Wind speed		Wind direction		
	Slope	R ²	Slope	Offset	R ²
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 3 Example of KPIs for reliability of LiDAR system.⁹⁾

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

は商用化前段階 (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、信頼性に関するデータ有効率が 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が必要である。

2.2 データ有効率を考慮した平均値と標準偏差

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。以降では、その各種指標の評価式を導出する。

Fig. 1 に本研究で用いる変数、記号、期間の定義を示す。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 (必要に応じ変数に欠測期間は σ (プライム)、有効期間は σ' (ダブルプライム) を付記する)。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 P から補完する。この補完期間の決定係数、傾き、切片等の指標は、回帰式の構築に用いるデータセット (p_i, y_i) ($i=1 \dots n$) の評価指標で代表されたとする。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。

欠測補完用参照データの有効率が 100 % の時、対象観測の有効率と平均値・標準偏差の関係を求める。平均値については次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \sum_{j=1}^M y_j / M \\ &= \frac{M-m}{M} \sum_{j=m+1}^M y_j / (M-m) + \frac{m}{M} \sum_{j=1}^m y_j / m \end{aligned} \quad (1)$$

ここで欠測期間の y_j の近似として MCP 法による予測値 $y' = \bar{y}' = f_{MCP}''(p')$ を代入し、データ有効率 ζ ($m/M = 1-\zeta$) を用い整理すると次式を得る。

$$\bar{y} \approx \bar{y}' = \zeta \bar{y}'' + (1-\zeta) \bar{y}' \quad (2)$$

$\bar{y}''$ は y の有効期間に渡る平均値、 $\bar{y}'$ は y の欠測期間にわたる MCP 法の予測値の平均値である。

次に、標準偏差 σ_y の評価式について述べる。本研究

		Missing period (Noted by □')	Available period (Noted by □'')
Index	$j: 1, \dots, m, m+1, \dots, M$		
① True value Y	y_j	y'	y''
② Final predicted dataset	$\hat{y}_j$	$\hat{y}'$	$\hat{y}''$
③ Prediction	$\tilde{y}_j$	$\tilde{y}'$	$\tilde{y}''$
		$\tilde{y}' = f_{MCP}'(p')$	$\tilde{y}'' = f_{MCP}''(p'')$
④ Reference observation	P	p'	p''

f_{MCP}' : MCP prediction function constructed by available data.
 $R_{Avail}^2, \alpha_{Avail}, \beta_{Avail}$: R^2 , slope, offset of dataset ② against ①.
 $R_{MCP}^2, \alpha_{MCP}, \beta_{MCP}$: R^2 , slope, offset of dataset $\tilde{y}''$ against y'' .

Fig. 1 Definition of variables and periods

では分散 σ_y^2 の平方根を標準偏差とし、定義を

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

とする。平均値 $\bar{y}$ として式 (2) を代入する。

$$\begin{aligned} \sigma_y^2 &= M^{-1} \sum_{j=1}^m ((y_j - \bar{y}') + \zeta(\bar{y}' - \bar{y}''))^2 \\ &\quad + M^{-1} \sum_{j=m+1}^M ((y_j - \bar{y}'') + (1-\zeta)(\bar{y}' - \bar{y}''))^2 \\ &= (1-\zeta)(\bar{y}'^2 - 2\bar{y}'\bar{y}'' + \bar{y}''^2) - \\ &\quad (1-\zeta)\zeta(2\bar{y}'\bar{y}'' - 2\bar{y}'\bar{y}'' + \bar{y}'^2 - \bar{y}''^2) + \zeta\sigma_{y'}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、欠測期間の y_i は未知であるため近似値として予測値 ($\bar{y}' = \bar{y}'$, $\bar{y}'' = \bar{y}''$, $\sigma_{y'}^2 = \sigma_{y''}^2$) を適用する。

$$\sigma_y^2 = \sigma_{\tilde{y}}^2 = (1-\zeta)\sigma_{\tilde{y}'}^2 + \zeta(1-\zeta)(\bar{y}' - \bar{y}'')^2 + \zeta\sigma_{y'}^2 \quad (5)$$

有効率が低い時は、予測の重みが大きく、有効率が1に近づくとも有効な観測の重みが増すことが分かる。

2.3 データ有効率を考慮した決定係数の評価式

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、

$$R^2 \equiv ESS / TSS = 1 - RSS / TSS \quad (6)$$

で定義される。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 の平均値及び予測値を表す。

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

$$\sum_{j=m+1}^M (y_j - \hat{y}_j)^2 = 0 \quad (7)$$

有効期間の観測 Y とその予測値の決定係数 R_{MCP}^2 は、

$$R_{MCP}^2 = 1 - \sum_{j=m+1}^M (y_j - \tilde{y}_j)^2 / \sum_{j=m+1}^M (y_j - \bar{y}'')^2 \quad (8)$$

である。ここで、MCP法の構築期間 $M-m$ と予測期間 m の RSS/TSS が等しいと仮定する。

$$\begin{aligned} &\sum_{j=m+1}^M (y_j - \tilde{y}_j)^2 / \sum_{j=m+1}^M (y_j - \bar{y}'')^2 \\ &= \sum_{j=1}^m (y_j - \tilde{y}_j)^2 / \sum_{j=1}^m (y_j - \bar{y}')^2 \end{aligned} \quad (9)$$

式 (7) と (9) を適用し最終データセットの決定係数 R_{Avail}^2 は次のように変形できる。

$$\begin{aligned} R_{Avail}^2 &= 1 - \sum_{j=1}^M (y_j - \hat{y}_j)^2 / \sum_{j=1}^M (y_j - \bar{y})^2 \\ &= 1 - \frac{m \sum_{j=1}^m (y_j - \bar{y}')^2}{M \sum_{j=1}^M (y_j - \bar{y})^2} \frac{m^{-1} \sum_{j=m+1}^M (y_j - \tilde{y}_j)^2}{M^{-1} \sum_{j=m+1}^M (y_j - \bar{y}'')^2} \end{aligned} \quad (10)$$

式 (8)、データ有効率 ζ で整理し、次式を得る。

$$R_{Avail}^2 = 1 - (1-\zeta)\sigma_{\tilde{y}}^2 / \sigma_y^2 (1 - R_{MCP}^2) \quad (11)$$

データ有効率が低い場合、 $\sigma_{\tilde{y}}^2 \approx \sigma_y^2$ であり、有効率が高い場合でも $\sigma_{\tilde{y}}^2 \sigma_y^{-2} \sim O(1)$ であるので他の変数に比べて変化による決定係数 R_{Avail}^2 への寄与が小さく、その推定においては $\sigma_{\tilde{y}}^2 \sigma_y^{-2} = 1$ と省略可能であると考えられる。最終的な決定係数の推定式は以下となる。

$$R_{Avail}^2 = 1 - (1-\zeta)(1 - R_{MCP}^2) \quad (12)$$

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) の割合と MCP 法による決定係数に依存することが分かる。

2.4 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。風速の評価では、直線回帰式の傾きが、また、風向評価では加えて切片が KPI として用いられる。これらの評価式を MCP 法による補完後の最終データセットに関して導出する。

KPI 評価のための回帰式を $y = \alpha_{Avail} \hat{y} + \beta_{Avail}$ (傾き α_{Avail} , 切片 β_{Avail}) とする。補完後の最終データセット $\hat{y}_j$ と真値のデータセット y_j に対する回帰直線の残差平方和 RSS は、次式となる。

$$RSS = \sum_{j=1}^M (y_j - \alpha_{Avail} \hat{y}_j - \beta_{Avail})^2 \quad (13)$$

RSS 最小となる $\alpha_{Avail}, \beta_{Avail}$ は次式で与えられる¹⁰⁾.

$$\alpha_{Avail} = \frac{\sum_{j=1}^M (\hat{y}_j - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_{j=1}^M (\hat{y}_j - \bar{y})^2} \quad (14)$$

$$\beta_{Avail} = \bar{y} - \alpha_{Avail} \bar{\hat{y}} \quad (15)$$

α_{Avail} は $\sigma_y^2 = \sigma_{\hat{y}}^2 = \sum_{j=1}^M (\hat{y}_j - \bar{y})^2 M^{-1}$, 式 (2) 及び $\bar{y}' = \bar{\hat{y}}'$ の関係より以下のように整理できる.

$$\begin{aligned} \alpha_{Avail} \sigma_{\hat{y}}^2 &= M^{-1} \sum_{j=1}^m [(\hat{y}_j - \bar{y}')(y_j - \bar{y}') + \zeta^2 (\bar{y}'' - \bar{y}')^2] \\ &+ M^{-1} \sum_{j=m+1}^M [(\hat{y}_j - \bar{y}'')(y_j - \bar{y}'') + (1-\zeta)^2 (\bar{y}'' - \bar{y}')^2] \\ &= (1-\zeta) \alpha'_{y,\hat{y}} \sigma_y'^2 + (1-\zeta) \zeta^2 (\bar{y}'' - \bar{y}')^2 \\ &\quad + \zeta \alpha''_{y,\hat{y}} \sigma_y''^2 + (1-\zeta) \zeta^2 (\bar{y}'' - \bar{y}')^2 \\ &= (1-\zeta) \alpha'_{y,\hat{y}} \sigma_y'^2 + \zeta \alpha''_{y,\hat{y}} \sigma_y''^2 + (1-\zeta) \zeta^2 (\bar{y}'' - \bar{y}')^2 \quad (16) \end{aligned}$$

第 1 項の $\alpha'_{y,\hat{y}}$ は欠測期間における Y と近傍観測 P から求めた予測値の回帰直線の傾きであるが, Y は観測されず直接求めることができないので, MCP 法による予測値の評価結果である回帰直線の傾き α_{MCP} を適用する. また, 有効期間は Y が観測され, その回帰直線は $y = \hat{y}$ であり第 2 項の $\alpha''_{y,\hat{y}}$ は 1 となる. 従って

$$\alpha_{Avail} = 1 - (1-\zeta)(1-\alpha_{MCP}) \sigma_y'^2 \sigma_y'^{-2} \quad (17)$$

となる. 式 (12) 導出時同様 $\sigma_y'^2 \sigma_y'^{-2} \sim 1$ として次を得る.

$$\alpha_{Avail} = 1 - (1-\zeta)(1-\alpha_{MCP}) \quad (18)$$

次に, β_{Avail} は以下のように変形可能である.

$$\begin{aligned} \beta_{Avail} &= \bar{y} - \alpha_{Avail} \bar{\hat{y}} \\ &= (1-\alpha_{Avail}) \bar{\hat{y}} = \sigma_y'^2 \sigma_y'^{-2} (1-\zeta)(1-\alpha_{MCP}) \bar{\hat{y}} \\ &= \sigma_y'^2 \sigma_y'^{-2} \bar{\hat{y}} \bar{y}''^{-1} (1-\zeta)(\bar{y}'' - \alpha_{MCP} \bar{y}'') \quad (19) \end{aligned}$$

ここで, 1 行目から 2 行目において $\bar{y} = \bar{\hat{y}}$ の関係を, また 2 行目では式 (17) を適用した. $\beta_{MCP} = \bar{y}'' - \alpha_{MCP} \bar{y}''$ であり, また $\bar{y}'' \sim \bar{\hat{y}}''$ という近似が成り立つので, 以下のような式が導出できる.

$$\beta_{Avail} = \sigma_y'^2 \sigma_y'^{-2} \bar{\hat{y}} \bar{y}''^{-1} (1-\zeta) \beta_{MCP} \quad (20)$$

ここでも式 (12) 導出同様 $\sigma_y'^2 \sigma_y'^{-2} \sim 1$ とし, また有効率が高い場合は, $\bar{\hat{y}} \sim \bar{y}''$ であるので, 次式を得る.

$$\beta_{Avail} = (1-\zeta) \beta_{MCP} \quad (21)$$

式 (18) および式 (21) により $\alpha_{Avail}, \beta_{Avail}$ を評価する. なお, 切片を 0 とする評価を行う場合には, 式 (18) のみ適用する.

3. 実測データを用いた検証

鉛直ライダー観測により, 提案式の検証を行う. Fig. 2, Table 4 に鉛直ライダーと観測マストによる観測概要を示す. 観測位置は秋田県男鹿市野石の日本海沿岸 (海岸線から内陸側約 150 m の地点) である. 観測期間は 1 年間で, その間のライダー観測は水平離隔距離 15 m で併設されたマスト観測とよく一致することが確認されている. その相関図を Fig. 3 に示す. 本ライダー観測は “Best Practice” に相当する.

提案式の検証方法について述べる. 鉛直ライダーの高度 58 m の観測を真値とし, 他の 3 高度の観測 (90, 150, 190 m) を補完用の参照データとする. 高度 58 m の観測に対し様々な欠測パターンを設定し, その欠測期間に他の 1 高度の観測を参照データとした MCP 法による補完を適用する. 1 つの欠測パターンにつき, 補完元の参照データを変えた 3 つの最終データセットを作成し, 真値 (高度 58 m) とそれぞれ比較する. Table 5 に, 観測高度別の年間データ有効率 (母数 52560) と, 真値に対する鉛直ライダーの高度別の風速の平均誤差 (Bias), 風速・風向・風速標準偏差の決定係数および回帰係数 (Regression) を示す. 補完元の観測高度が比較対象高度 58 m から離れるにつれ, 決定係数が小さくなり, 回帰直線も $y=x$ から離れることが分かる. 以降では, 参照高度を変え, 対象観測に対する参照データの精度が提案式の適用可能性に与える影響を分析する.

具体的に, 最終データセットの作成方法について述べる. 高度 58 m の時系列データを 10 区間に区分する (Fig. 4). 1 区間は有効率 10 % に対応する. 検証対象の有効率を $N \times 10\%$, $N=1 \dots 10$ とし, 連続した N 個の区間を有効区間 (図中網掛部) とする. 異なる有効率の間で, 検証ケース数を 10 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. Fig. 4 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 区間は有効期間に対応するので, 同時期の参照元となる別高度のデータ P と高度 58 m 観測 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る. 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. 10 分間平均風速の MCP 法には 16 方位別の直線回帰式 (22) を, 標準偏差にはダブルバイアス修正式 (23) を, 風向には,

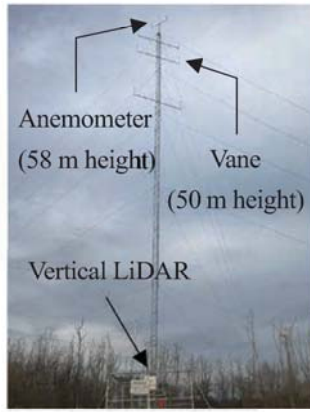


Fig.2 Met mast and vertical LiDAR.

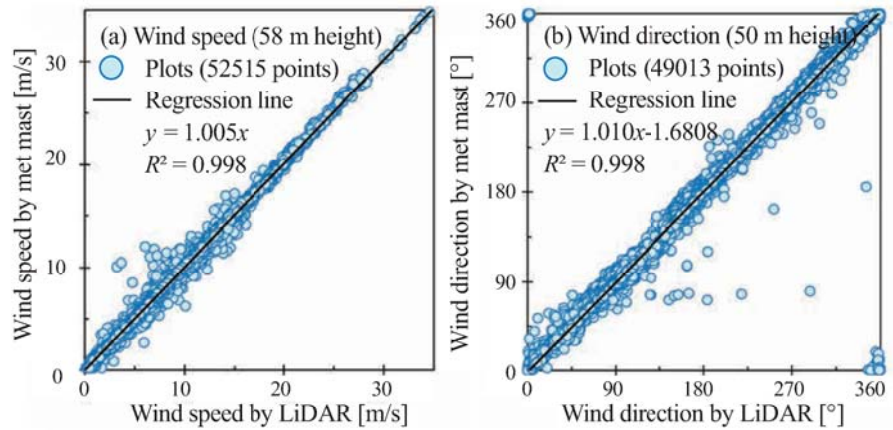


Fig.3 Comparison of 10 min. mean wind speed and wind direction between the met mast and the vertical LiDAR.

Table 4 Summary of onsite measurements

Observation	Met mast	Vertical LiDAR
Location	N 40.05025 °, E 139.93232 °	
Measured items	Mean and standard deviation of wind speed and mean direction in 10 minutes	
Instruments	Cup anemometers (NRG Class1) • Vane (NRG 200M)	Vertical LiDAR (Leosphere Wind Cube V2)
Measured heights	58 m (Wind speed) 50 m (Direction)	40, 50, 58, 70, 90, 110, 130, 140, 150, 170, 190 m

Table 5 Detailed statistics of wind data obtained at different heights against the target height (58 m) for validation.

Height [m]	Availability [%]	Accuracy index against 58 m							
		Mean speed		Mean direction		Std. dev.			
		Bias [%]	Regression		Regression	Regression		Regression	Regression
			Slope	R²		Slope	Offset		
190	96.44	12.84	1.094	0.866	0.927	21.65	0.937	1.013	0.786
150	98.33	10.36	1.077	0.913	0.953	14.11	0.965	1.002	0.849
90	99.16	4.86	1.038	0.981	0.983	5.30	0.994	1.003	0.942
58	99.21	0.00	1.000	1.000	1.000	0.00	1.000	1.000	1.000

風向偏角による補正式 (24) を用いる^{1),7)}.

$$U_{\hat{y}} = a(\theta_p)U_p + b(\theta_p) \quad (22)$$

$$\sigma_{\hat{y}} = c(\theta_p)\sigma_p + d(\theta_p) \quad (23)$$

$$\theta_{\hat{y}} = \theta_p + \Delta\theta(\theta_p) \quad (24)$$

ここで、 U, θ, σ は平均風速・風向、風速標準偏差を、添え字 $\hat{y}$ 、 P は予測値、近傍観測値を示す。 a, b は P, Y の有効期間において 16 方位別に最小二乗法により求めた傾きと切片であり、 $\Delta\theta$ は風向偏角の 16 方位別の平均値である。 c, d は 16 方位別にダブルバイアス修正法により求める。各方位間は、これらの係数を参照元風向 θ_p により線形内挿し、予測式の係数とする。なお、本検討では対象としないが実務では補完参

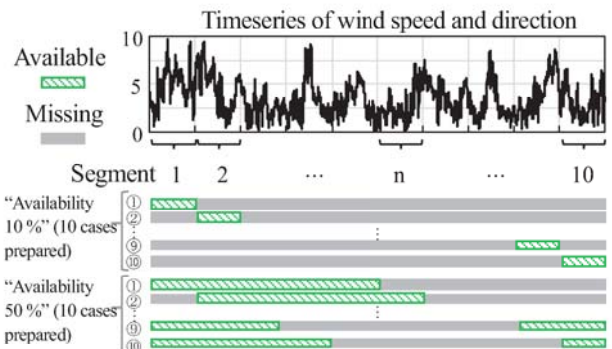


Fig.4 Examples of data segmentation for validation.

照データが複数存在する場合は想定される。方位別の MCP 法を適用する場合と同様に時間の重複を避け単一データセットとして有効期間における MCP 法の補完精度を評価することで本提案式の適用が可能である。

風速の 10 分間平均値・標準偏差に関し、ケースごとに予測値と真値の年間の平均と標準偏差を比較し、相対誤差を求めた。有効率による変化を Fig. 5 及び 6 に示す。有効率 10 %ごとに 10 ケースの予測があり、58 m 風速に対する相対誤差の中央値と、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、欠測期間の設定パターンにより最終データセットの精度が大きくばらつくことが確認される。また、有効率が一定の場合、参照高度が検証対象高度に近いほど相互の相関が高いため、データセットの精度が高くなる。

Fig. 5 及び 6 の元になった最終データセットの年間の平均値及び標準偏差は 10 分値の時系列データから統計量を直接算出した結果であるが、式 (2), (5) の妥当性を確認するため、これらの直接算出値と式 (2), (5) による有効率を考慮した平均値及び標準偏差の算定値を比較した。算定方法の違いによる標準偏差の比較を Fig. 7 に示す (直接算出した平均値と式 (2) が一致す

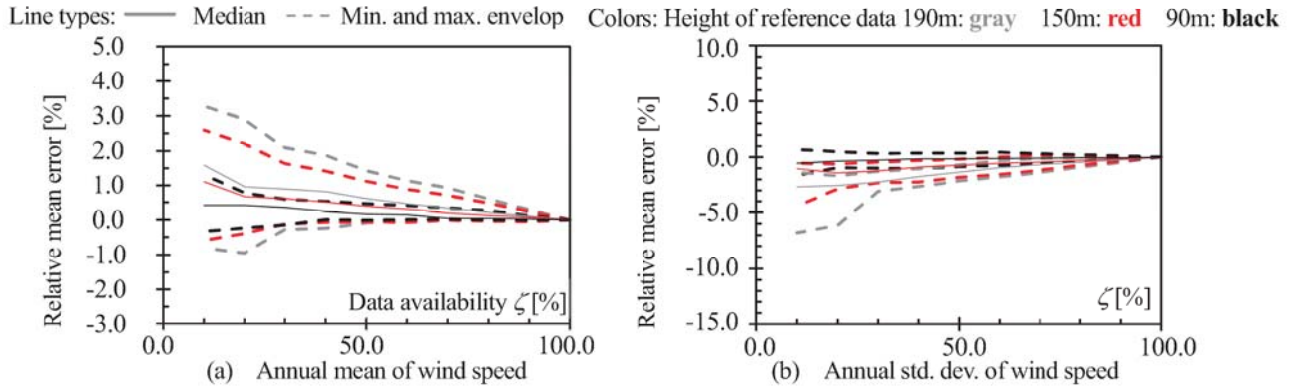


Fig.5 The relative mean errors of (a) annual mean and (b) standard deviation of 10 min. mean wind speed predicted by combination of MCP method and onsite measurement.

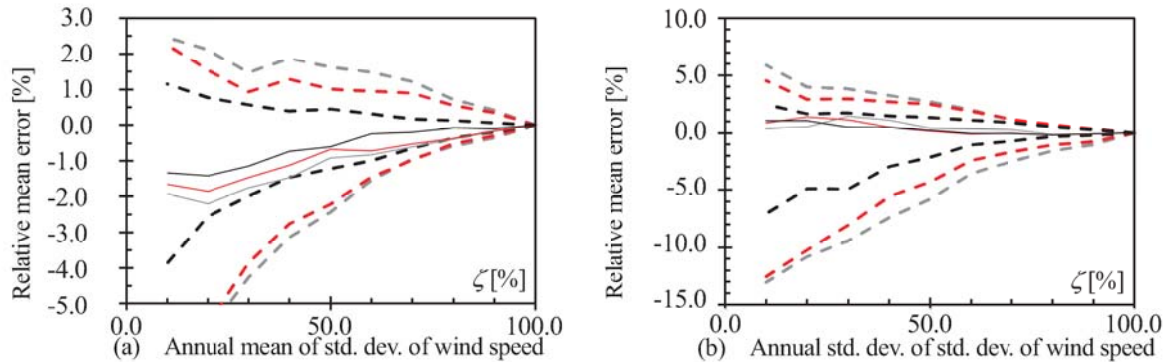
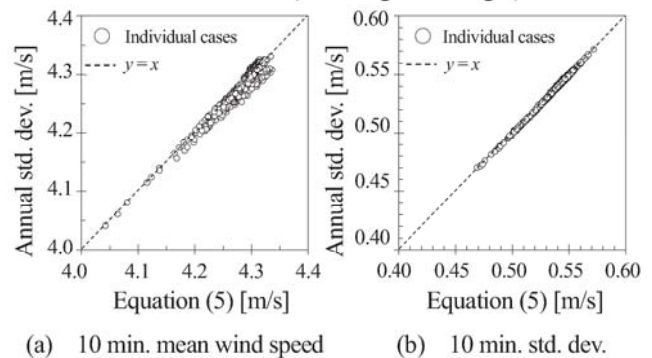


Fig. 6 The relative mean errors of (a) annual mean and (b) standard deviation of 10 min. standard deviation of wind speed predicted by combination of MCP method and onsite measurement. (Same legend as Fig.5)

ることは自明のため、これらの比較の図は省略する). (a) 10 分間平均風速の年間標準偏差, (b) 風速の 10 分間標準偏差の年間の標準偏差であり, 縦軸は各ケースの時系列データから直接求めた値, 横軸は式 (5) により求めた値である. 絶対誤差 (式 (5) 算出値-時系列算出値/時系列算出値) の最大値は (a) 0.71 %, (b) 0.39 %とよく一致し, 算定式の妥当性が示された.

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 (12), (18), (21) により評価した R^2_{Avail} , α_{Avail} , β_{Avail} の比較を 10 分間平均風速について Fig. 8 に, 平均風向について Fig. 9 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^2_{Avail} , α_{Avail} , β_{Avail} は, 視認性のため, 有効率ごとの中央値, 25%及び 75%分位値, 最小・最大値をそれぞれ結んだ線で, 分布範囲を示す. 補完元データの参照高度ごとに縦の図列を変えて区別する. まず, 平均風速 (Fig. 8 (a) ~ (c)) において実際の決定係数の分布は, 参照高度が検証対象高度 58 m から離れるにつればらつきが大きくなる. 評価式はこれに比べてより大きいばらつきで分布している. 補完元のデータと対象データの相関が高いケース (c) では実際の値とよく対応している. これらは, Fig.5 に示したように予測による



(a) 10 min. mean wind speed (b) 10 min. std. dev.
Fig. 7 Comparison of the annual standard deviation of (a) 10 min. mean speed (b) 10 min. standard deviation between calculations from timeseries and estimations by Eq. (5).

平均や標準偏差の推定値の誤差が少なく, 評価式導出の前提条件や仮定を満足しているためであると考えられる. 続いて, 平均風向 (Fig.9(a) ~ (c)) の決定係数に関し, 実際の値 R^2 と評価値 R^2_{Avail} のばらつきや分布はよく一致している. Table 5 で示した通り風向に関する参照高度と検証対象高度 58 m の決定係数が風速に比べ高いためと考えられる.

次に, 風速の傾き評価 (Fig. 8(d) ~ (f)) に関し, 最小二乗法に基づく方位別の予測式 (22) の評価により, データの有効期間における予測値 $\hat{Y}(U_{\varphi})$ は Y に対して $\alpha_{MCP}=1$ を方位別に満足するため, 評価式 (18) によ

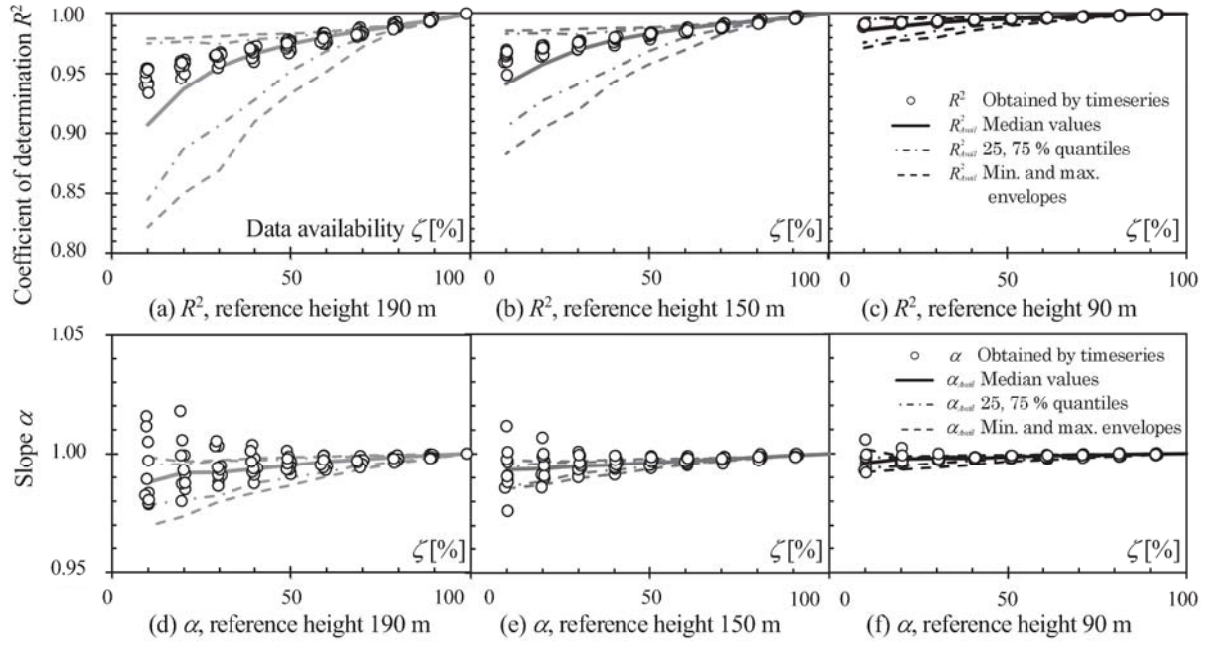


Fig. 8 The coefficient of determination, slope of a regression line of sampled series (Symbols) and spreads of estimations by the proposed formulas (Lines) for 10 minutes wind speed.

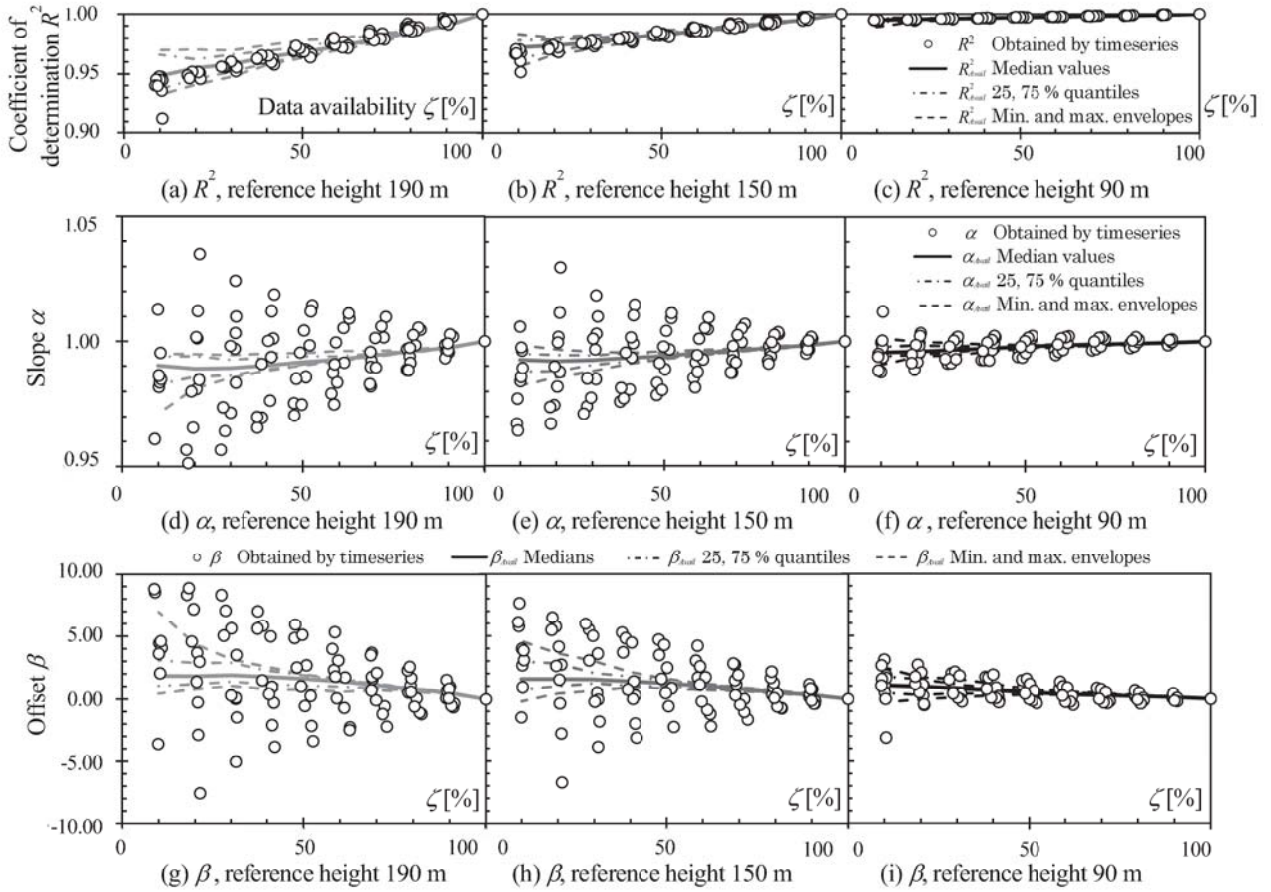


Fig. 9 The coefficient of determination, slope and offset of a regression line of sampled series (Symbols) and spreads of estimations by the proposed formulas (Lines) for 10 minutes wind direction.

る結果は、 $\alpha_{Avail} = 1$ に近い値をとる。シンボルで示された実際の α 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。

そして、風向の傾き (Fig. 9 (d) ~ (f)), 切片 (Fig. 9 (g) ~ (i)) の評価について述べる。実際の α, β の有効

率による変化を見ると、いずれも、有効率が高くなるにつれ傾き 1、切片 0 に漸近する傾向や有効率が低い場合にケースによってばらつく傾向、検証対象高度 58 m に近いほどばらつきが小さくなる傾向が共通して確認される。評価式による傾きの予測値 (Fig. 9 (d) ~ (f)) は、補完元の参照高度が比較対象高度 58 m と離れ補完元データの相関が低くなるほど推定精度が低くなるが、補完元データとの相関が高い場合、精度よく予測可能であることが分かる。切片評価式による予測値 (Fig. 9(g) ~ (i)) も、傾きと同様に、低い有効率で、ばらつきの程度を実際よりも小さく評価する傾向があるものの、有効率が 100 % に近づくにつれ実際の値と同様な推定値となることが分かる。

最後に、提案式による KPI 評価の確からしさについて検討した。Table 6 にその検討結果を示す。まず、有効率 ζ と MCP 法の評価値 R^2_{MCP} 等により誤差評価のための区分 (ビン) を設定する。次に、ビン毎の各最終データセットに関し、評価式と直接算出値の差を算出する。そして、ビン内の差の集合が標準正規分布に従うと仮定し (有効率 40 % 以上の場合、有意水準 99.99 % の χ^2 検定により差の出現頻度分布に関する正規性の帰無仮説の棄却を確認した。なお Table 6 中黒色で着色した標本数が 20 に満たないビンは本検討から除外した。)、差の平均・標準偏差から両側 99 % 分位値 (R^2 は下側のみ) を算定する。最後に、提案式で KPI を満足すると判定されたビンにおいて 99 % 分位値も KPI を満足する場合、KPI の予測可能性が高い (Reliable) とした。Table 6 より MCP 法の精度が高いほど、また、有効率が高いほど推定式の信頼性が高い傾向が確認される。風速・風向のいずれも、有効率が 60 % より高い場合、提案式による評価結果は、信頼区間 99 % の信頼性を有し、MCP 法による補完後の最終データセットの精度評価が可能であると考えられる。

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た。また、有効率を考慮した補完後の平均値と標準偏差の算定式についても導出した。そして、これらの提案式の妥当性を鉛直ライダーの風観測データを用いて検証した。その結果、補完対象のデータの有効率が高く、補完に用いる参照データとの相関が高い場合に、提案式による評価結果は実際の値と一致し、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を示した。

Table 6 KPI estimation performance with proposed equations.

Accuracy	Best Practice					Minimum				
KPI	$R^2 > 0.98$					$R^2 > 0.97$				
ζ [%]	40	50	60	70	80/90	40	50	60	70	80/90
R^2_{MCP}	0.965									
	0.975									
	0.985									
	0.995									
KPI	α 0.98~1.02					α 0.97~1.03				
ζ [%]	40	50	60	70	80/90	40	50	60	70	80/90
α_{MCP}	0.9875									
	0.9925									
	0.9975									
	1.0025									

Accuracy	Best Practice					Minimum				
KPI	$R^2 > 0.97$					$R^2 > 0.95$				
ζ [%]	40	50	60	70	80/90	40	50	60	70	80/90
R^2_{MCP}	0.965									
	0.975									
	0.985									
	0.995									
KPI	α 0.97~1.03					α 0.95~1.05				
ζ [%]	40	50	60	70	80/90	40	50	60	70	80/90
α_{MCP}	0.9875									
	0.9925									
	0.9975									
	1.0025									

[Annotations]										
	Reliable (> 99 % reliability)									
	Less reliable (< 99 % reliability)									
	Insufficient samples									

KPI	β -5~-+5					β -10~-+10				
ζ [%]	40	50	60	70	80/90	40	50	60	70	80/90
β_{MCP}	-1									
	1									
	3									

参考文献

- 1) 石原孟・川竹拓也・荒川洋・山口敦, 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, 2019, pp.54-57.
- 2) Yamaguchi, A., Ishihara, T., A new motion compensation algorithm of floating lidar system for the assessment of turbulence intensity, *J. Phys. Conf. Ser.*, Vol.753, No.7, 072034, 2016.
- 3) Goit, J. P., Yamaguchi, A., Ishihara, T., Measurement and prediction of wind fields at an offshore site by scanning Doppler LiDAR and WRF, *Atmosphere*, Vol.11, No.5, 442, 2020.
- 4) Kelberlau, F., Neshaug, V., Lønseth, L., Bracchi, T., Mann, J., Taking the motion out of floating lidar turbulence intensity estimates with a continuous-wave wind lidar, *Remote Sensing*, Vol.12, No.5, 898, 2020.
- 5) Kikuchi, Y., Ishihara, T., Assessment of weather window for the construction of offshore power plants by using wind and wave simulations, *J. Phys. Conf. Ser.*, Vol.753, No.9, 092016, 2016.
- 6) 間野晶子・上野晃世・糸崎俊介・石原孟, 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, 2020, pp.17-20.
- 7) 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, Vol. 45, No. 2, 2021, pp.40 - 48.
- 8) Newsom, R. K., Berg, L. K., Shaw, W. J., Fischer, M. L., Turbine-scale wind field measurements using dual-Doppler lidar, *Wind Energy*, 18, 2015, pp. 219 - 235.
- 9) Carbon Trust : Offshore Wind Accelerator Roadmap for the Commercial Acceptance of Floating Lidar Technology Version 2, <https://www.carbontrust.com>, アクセス 2022 年 3 月 1 日.
- 10) 石原孟・山口敦・嶋田健司, 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, pp.207-209.