

着床式の鉛直ライダー洋上観測による日本海沿岸海域の風況特性把握

榎木 康太 大塚 清敏

松岡 義博 伊藤 政人
(生産技術本部) (生産技術本部)

Near-Shore Wind Climate Assessment in Japan Sea through the Bottom Fixed Vertical LiDAR Measurement Campaign

Kota Enoki Kiyotoshi Otsuka

Yoshihiro Matsuoka Masato Ito

Abstract

A one-year offshore wind climate observation campaign in the Japan Sea was accomplished using a vertical LiDAR on the bottom fixed stage. Because the weather window for the maintenance of operational instruments is narrow, on-site observations in the sea area often suffer from missing data, and it tends to be difficult to obtain reliable data to reduce the uncertainty of the wind-energy projects. Here, we present comprehensive post-processing procedures for offshore wind data, including quality controls focusing on the continuous wave LiDAR (which is a gap filling technique using consistent onshore measurement), and its evaluation. By comparing data acquired simultaneously at the offshore and onshore sites, the coastal wind climate of the Japan Sea along the Tohoku district was analyzed and described briefly from the perspective of the offshore wind energy project.

概要

大林組では、離岸距離約 1.7km の一般海域において、施工・撤去が容易な着床式のスカートサクシオン®基礎を用いた観測ステージを設置し、波浪による動揺影響を受けない状態で 1 年間の長期にわたり風況観測を実施した。本報告では、風況観測用鉛直ライダーの事前検証結果及び洋上で得られた本観測データの補完を含む後処理の検討結果を示すと共に、その精度評価を行い、強風や波浪等の洋上の厳しい計測環境下でも、一連の手続きにより信頼性の高いデータが取得できることを示した。また、洋上風力発電用風車の設置という観点から東北地方の日本海沿岸海域における風況特性（風速・風向、乱流強度の高さ分布等）について、同時に実施された沿岸陸上観測との比較により得られた知見を整理した。この実証実験を通じ培われた洋上風況観測技術は今後の我が国における洋上風力発電事業の確実性向上に資するものと期待される。

1. はじめに

持続可能な社会の構築に向け、地球温暖化抑止のためのカーボンニュートラルへの動きが世界的に加速している。国内でも官民間わず様々なセクターで脱炭素社会に向けた取り組みが進みつつあり、大きな柱として洋上風力発電に注目が集まっている。洋上風力発電分野の着実な成長のためには、個別案件を支える足元の技術開発に対する継続的な取り組みが不可欠である。日本では、着床式風車に適した水深 30m 以浅の一般海域から段階的な導入が検討され¹⁾、多くは海岸線から離岸距離 5km 程度の範囲内に位置している。洋上の沿岸域は陸域の影響を強く受けるため、海と陸双方の物理過程や相互作用を把握しつつ、風資源量推定や風車およびその支持構造物の安全性照査を始めとした風力発電事業の確実性に関する項目を精査することが求められている。

このような背景のもと、大林組では、沿岸海域におい

て、着床式のスカートサクシオン基礎²⁾（以下、SS）を据え、そのステージ上に鉛直ライダーを設置し、1 年間にわたる長期の風況計測を実施した。鉛直ライダー（以下、ライダー）は、直上の複数高度の風速を遠隔で計測する装置で、風力発電分野で一般的に用いられている。日本海沿岸において、防波堤付近に風況観測用のマストやライダーを設置し、上空 200m 程度までの風況観測を行った事例はこれまで数例ある^{3,4)}等が、既存構造物のない一般海域において、波の動揺影響を受けない状態で、1 年の長期にわたる日本海上の風況観測を行った事例は国内で類を見ない。設置海域では晩秋から冬を経て春先まで、日本海特有の冬季季節風による悪天候・高波浪が長期間継続するため、設置される観測装置の耐久性や観測システムの安定運用の実証と観測精度の確保が求められる。

本報告では、一般海域に設置された着床式 SS 上で得られた観測データの評価を行いその信頼性を示すとともに

に、沿岸の陸上観測との比較を通じ、風力発電事業の観点から沿岸域の風況特性を把握することを目的とする。構成を以下に示す。まず、観測の評価方法について述べる。次に、着床式 SS 上観測に用いられる風況観測装置の陸上における事前の精度検証について述べる。そして、着床式 SS 上観測で得られたデータの後処理と年間観測の分析結果について述べ、最後に、内容を総括する。

2. 観測評価方法と陸上における事前検証

2.1 観測システムの評価指標

本研究で採用する観測の評価規準について述べる。

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) 等の KPI (Key Performance Indicator) で評価される。Table 1 に評価指標の例⁵⁾を示す。商用化前段階 (Pre-commercial Stage) と、商用化段階 (Commercial Stage) で要求水準が異なっており、商用化段階ではシステム単独による安定運用が求められる。

「システム稼働率」は、計測システムが、その仕様に従い正常に機能し、データを取得できる状態にある時間割合である。定義式を式(1)に示す。取得されたデータは、NaN や 9999 といった一般的な欠測値でもよい。なお、断りない限り、データ数は観測時間 10 分を単位とした値 (10 分値) の数とする。

$$\text{システム稼働率} = \frac{\text{取得データ数 (欠測値を含む)}}{\text{最大取得可能データ数}} \quad (1)$$

「データ有効率」は、計測システムで取得されたデータの中、欠測値 (NaN 等) の除去に加え、機器メーカーのガイドライン等に基づき設定・推奨されたシステム特有の品質管理処理 (例えば、ライダーの信号ノイズ比等の時々の観測品質情報による有効性の判断等)、さらにデータの連続性やデータ同士の相関性のチェックによる外れ値の除去等の一般的な品質管理手法の適用後に残ったデータの数の割合となる。定義式は次式である。

$$\text{データ有効率} = \frac{\text{取得データ数 (品質管理処理後)}}{\text{最大取得可能データ数}} \quad (2)$$

後処理後のデータ有効率については、MEASNET (欧米の風力発電に関する関係機関が共同設立した業界団体) による風車のサイト適合性評価に関する技術基準⁶⁾にも記述があり、欠測がある場合は、補完を適用し、データ有効率を 95% 以上とすることが推奨されている。

Table 2 には精度評価指標の例⁵⁾を示す。事前校正された測器のデータ (ここでは 10 分値) に対して、検証対象の観測システムによるデータをプロットし、その回帰直線のフィッティング精度により観測システムの精度が評価される。“Minimum” は商用化前段階に対する最低要件である。一方、商用化段階の観測システムは、“Best Practice” を満たすことが求められる。

本研究では主に Carbon Trust⁵⁾による評価基準 (Table 1, 2) に加え、MEASNET⁶⁾のデータ有効率評価も考慮する。

2.2 測器の陸上における事前検証

2.2.1 検証方法 洋上ステージ設置前に、近傍の沿岸において、洋上ライダー観測 (以下、洋上観測) で用いるパルス波方式ライダー (以下、PW) および連続波方式ライダー (以下、CW) 両機の事前検証を実施する。風力発電分野において広く利用されている両機の差異を同時観測により確認するとともに、風況マストに設置された風速計・風向計の観測値と各ライダーの計測値を比較し、計測精度を確認する。マスト観測の概要を Table 3 に、マストとライダーの設置状況を Photo 1 に示す。マスト観測の仕様に準じ、各ライダーで、高度 59m (風速比較) と 50m (風向比較) を測定する。

2.2.2 検証結果 観測期間は 16m/s 程度の高風速まで十分なサンプル数が取得できるよう⁵⁾ 2020 年 4 月 22 日から約 3 週間とした。観測期間中、いずれの計測システムの稼働状況は良好で、データ有効率も 99% 以上であった。精度評価は Table 2 の指標に従い実施する。

Fig. 1 には、横軸をライダー観測、縦軸をマスト観測とした散布図を示す。まず、Fig. 1 (a) PW, (b) CW は 10 分間平均風速の比較である。マストと各ライダーの観測値の対応を示す回帰直線の傾き、決定係数は 1 に近く、両

Table 1 観測システムの信頼性評価指標⁵⁾
The KPIs and Acceptance Criteria for System Reliability

Stage	System Data Availability (システム稼働率)		Post-processed Data Availability (データ有効率)	
	Monthly	Overall	Monthly	Overall
Pre-commercial	≥90%	≥95%	≥80%	≥85%
Commercial	≥95%	≥97%	≥85%	≥90%

Table 2 観測システムの精度評価指標⁵⁾

The KPIs and Acceptance Criteria relating to Accuracy

Acceptance criteria	風速		風向		
	回帰直線傾き	回帰直線決定係数	回帰直線傾き	回帰直線切片	回帰直線決定係数
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 3 事前検証対象の風況マスト観測の概要
The Metmast Measurement for the Validation of LiDARs

観測高度	計測装置	観測項目
風速 59m	三杯式風速計	10 分間平均値・標準偏差
風向 50m	矢羽根式風向計	



Photo 1 事前検証における計測装置設置状況
The Installed LiDARs in the In-situ Validation Site

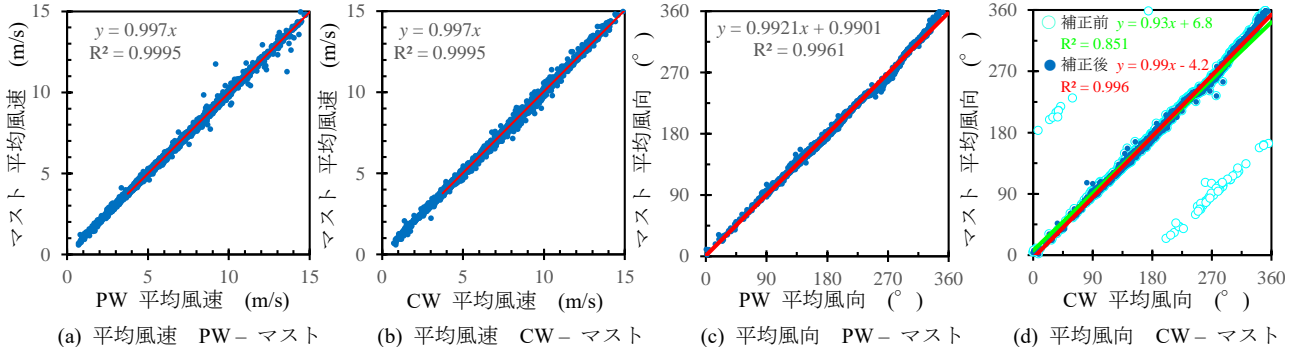


Fig. 1 マスト観測とライダー観測の比較

The Wind Speed and Direction Comparisons between LiDAR and Metmast Data

ライダーとも良い精度で計測可能であることが分かる。

次に、10 分間の風向の平均値について述べる。Fig. 1 (c) に示す通り PW とマストの対応は良好であった。一方、Fig. 1 (d) CW に関し、時折 180 度反転した値が記録される事象が確認された (Fig. 1 (d) 「補正前」の $y=x \pm 180^\circ$ 付近に分布する白抜きシンボル群)。これはレーザーの視線方向風速の正負を判別しない Homodyne 型の検波方式を採用する CW(Continuous Wave)ライダーに固有の特性⁷⁾である。この対策として当機種は、本体に備えた簡易風向・風速計を参照し、レーザーによる上空の風向値を補正している。しかし、実際の大気の成層状態や簡易風向計の設置状態により、地上付近の風向と上空の風向の対応が低い場合、補正機能が正常に働かない模様であった。そこで、本研究では、事前検証において風向補正の方法の基礎検討 (同様な検討を本観測でも実施したので具体的な検討内容は 3.3.2 項を参照されたい。)を行った。その結果、現地の風向観測と対応が良く、独立した同時刻の風向観測との比較により 180° の反転事象を検知し、風向を反転させる補正が必要であることが分かった。Fig. 1 (d) の「補正前」は 180° 反転事象の影響で、回帰直線の傾き 0.93、切片 6.8°、決定係数 0.851 と切片を除き Table 2 の “Minimum” を満たさない水準であった。しかし独立観測 (PW の風向観測値を用いた。)による 180° 反転事象の補正を適用することで傾き 0.99、切片 -4.2°、決定係数 0.996 と、“Best Practice” を満足した。

最後に、10 分間の乱流強度 (風速の標準偏差) について述べる。Fig. 2 に、0.5m/s 幅の風速階級区分内の乱流強度の平均値 (太実線) と標準偏差 (細実線)、90%分位値 (破線) を比較した図を示す。色の違いでマスト、CW、PW を区別する。90%分位値は、設置予定風車の型式認証に対するサイト条件の適合性を判断する目安となるもので、次式により求めた。

$$TI_{90,i} = \overline{TI_{i,j}} + 1.28\sigma(TI_{i,j}) \quad (3)$$

ここで、 $TI_{i,j}$ は風速階級区分 i に該当する j 番目の 10 分間の乱流強度であり、記号 $\overline{\quad}$ (バー) および σ は、 j に関する平均及び標準偏差を表す。Fig. 2 には、90%分位値の比較として IEC61400-1⁸⁾の乱流強度のモデル式 (A~C)

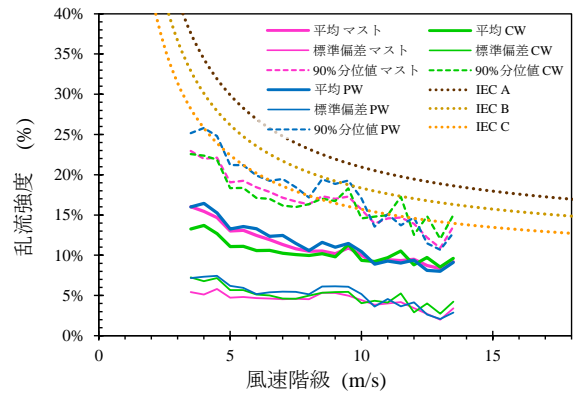


Fig. 2 風速階級 (幅 0.5m/s) 別乱流強度 (高度 59m) Turbulence Intensity Statistics in Wind Speed Bins (0.5m/s Bin Width) at 59m Height

を点線で示した。平均値はライダーにより異なる傾向が確認されており、マスト観測と比較し、CW は小さく、PW は対応が良い。一方、標準偏差は、CW・PW 共、マスト風速に比べて過大評価の傾向を示すが、PW のその度合いは CW に比べ若干高い。90%分位値は、CW の平均値の過小評価と標準偏差の過大評価がキャンセルアウトし、マスト風速との対応がよい。一方、PW では標準偏差の過大評価が要因で 90%分位値も過大評価となった。CW と PW の差については、洋上における本観測でも検討する。

3. 洋上における本観測と品質管理

事前検証で妥当性を確認したライダーを洋上のステージ上に設置し、波による動揺の影響を受けない状態で一般海域において 1 年の長期観測を行った。着床式洋上風車等の海洋構造物の基礎としての SS の優位性は文献²⁾を参照されたい。

本章では、洋上の長期観測を通じて観測方式の異なるライダーにより得られた風況観測の相互の差異の程度を確認するとともに、CW ライダーによる風向観測の補正に関する検討結果を示す。なお、PW ライダーについては途中で運用を取りやめたため、年間の風況は CW ライダーのデータを元に算定した。

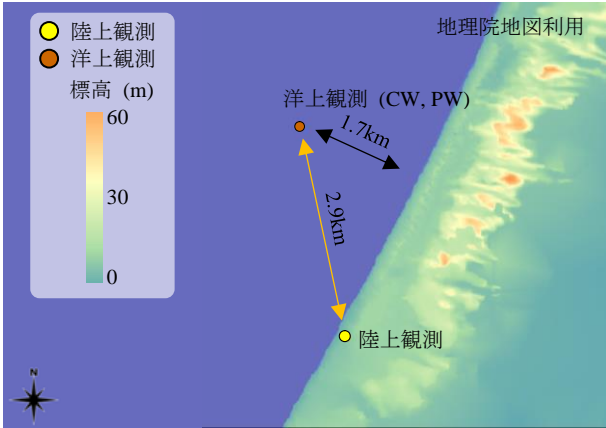


Fig. 3 観測地点の配置 (秋田県男鹿市)
Locations of Measurement Sites

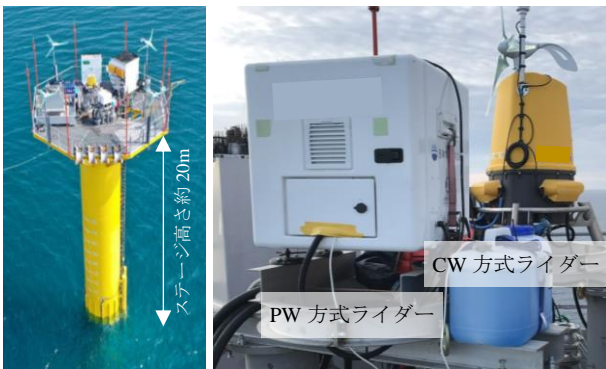


Photo 2 洋上風況観測システムの概要
The Overview of the Offshore Stage and Installed Instruments

3.1 観測地点の配置

洋上観測の概要について述べる。観測地点の配置を Fig. 3 に、観測システムの設置状況を Photo 2 に示す。洋上観測を実施した場所は、Fig. 3 中の「洋上観測」地点であり、海岸線からの離岸距離は約 1.7km である。同時期に、沿岸の「陸上観測」地点において、風況マストとライダーにより高度 190m までの風況観測が実施された。以上の観測の概要について Table 4 に示す。

3.2 本観測システムの信頼性評価

Table 5 に、各月と年間のシステム稼働率を示す。なお、データ集計に用いた観測月と実際の暦の月とは 4 から 5 日程度のずれがある。赤字箇所は、システム稼働率の KPI の許容下限値である月 90%、年 95% を下回ったものになる。陸上観測については、安定したシステム稼働率が達成されている。洋上観測施設は 2021 年 5 月 17 日をもって撤去されたため、最終の 2021 年 5 月期 (4 月 26 日 ~ 5 月 26 日) の稼働率は約 70% に留まった。また、2021 年 2 月 16 日から 3 月 13 日まで電源系統 (蓄電池システム) の不具合により観測が停止したため、2~3 月のシステム稼働率は低く、月別の KPI 許容値を下回る結果となった。これらの影響を受け、年間のシステム稼働率の KPI

Table 4 各観測概要

Descriptions about Measurements			
観測名	陸上観測	洋上観測 (PW)	洋上観測 (CW)
観測期間	2018/9/30-2021/5/31	2020/5/27-2020/11/21	2020/5/27-2021/5/17
観測設備	鉛直ライダー 59m 高風況マスト	鉛直ライダー	鉛直ライダー
水平風速ベクトル算出方法	パルス波 (PW: Pulsed Wave) による DBS* 方式	パルス波 (PW: Pulsed Wave) による DBS* 方式	連続波 (CW: Continuous Wave) による VAD** 方式
仰角	62°	62°	60°
標高	8m, レンズ面 10m	0m, レンズ面 19.4m	0m, レンズ面 19.8m
観測高度	12 高度 (41-190m)	11 高度 (30-220m)	12 高度 (30-320m)
ライダー事前検証	常時併設マストと比較を以て検証	沿岸でマストと比較 (2020/4/22-5/15)	沿岸でマストと比較 (2020/4/22-5/15)

* DBS: Doppler Beam Swinging。4~5 ビームを用い、仰角一定で 4 方位をスキャンし (5 ビームでは天頂も計測) 解析的に水平速度を算出。
** VAD: Velocity Azimuth Display。ビーム仰角一定で、方位角を連続変化させ円錐状面内風速分布を得る。水平風速は観測値への理論式の回帰により算出。

Table 5 観測ごとの月別および年間システム稼働率 (%)
Monthly and Annual System Availability

年	2020						2021					Total	
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4		5
陸上観測	100	100	100	100	100	99.98	100	95.05	100	100	100	99.96	99.59
洋上観測	100	100	100	100	99.98	100	99.98	100	76.06	85.53	100	70.16	94.31

Table 6 観測ごとの月別および年間データ有効率 (%)
Monthly and Annual Data Availability

観測高 (m)	2020						2021					Total	
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4		5
190	97.41	94.26	96.93	90.28	94.91	99.93	98.66	89.95	97.29	99.89	99.17	98.5	96.45
170	98.96	96.06	97.8	93.1	96.57	99.98	99.01	91.18	98.31	99.96	99.42	99.62	97.51
130	99.75	99.61	100	97.13	99.91	99.98	99.89	92.66	99.21	100	99.68	99.71	98.97
陸上観測	113	99.95	99.93	100	98.7	100	99.98	99.98	93.47	99.61	100	99.86	99.8
90	100	100	100	100	99.33	100	99.98	100	94.26	99.88	100	99.91	99.91
70	100	99.86	100	98.33	100	99.98	100	94.49	99.93	100	99.79	99.96	99.37
57	100	99.14	99.73	97.45	99.91	99.98	99.98	94.7	99.91	100	99.68	99.93	99.21
40	100	98.01	99.15	96.37	99.51	99.98	99.91	94.86	99.93	100	99.58	99.93	98.95
320	87.84	64.79	80.71	86.88	95.47	95.51	81.65	75.16	61.46	78.88	93.82	60.91	80.25
250	92.41	78.56	90.7	91.2	96.42	97.13	87.86	80.51	63.96	81.79	96.64	64.9	85.16
196	95.79	86.55	95.09	93.45	97.56	98.08	89.83	82.87	65.32	83.22	97.71	66.67	87.66
洋上観測	170	97.15	90.3	96.59	94.07	97.65	98.17	90.43	84	65.88	83.58	98.15	67.45
130	97.59	93.82	97.65	95.88	98.28	98.38	91.15	85.44	66.48	83.8	98.63	68.01	89.57
113	98.03	95.12	97.98	96.5	98.41	98.61	95.95	95.97	73.89	84.54	98.91	68.71	91.85
100	98.08	95.72	98.34	97.2	98.48	98.77	95.77	96.09	73.82	84.68	98.77	68.84	92.01
CW	80	98.26	96.41	98.86	98.22	98.75	98.8	94.98	94.81	73.29	84.72	98.7	68.97
58	98.73	96.71	98.68	98.61	98.86	98.75	89.81	79.63	67.73	84.09	98.38	69.47	89.93
30	99.31	97.87	99.57	98.61	98.79	99.33	97.13	92.64	73.15	85.51	99.24	69.27	92.5
21	100	100	99.98	100	100	100	100	100	99.4	100	100	69.40	97.35

許容値 95% は、陸上観測を除き、達成されていない。

次に、後処理後のデータ有効率について Table 6 に示す。観測高度別に品質管理 (計測システムの欠測値、観測間や近傍高度間の偏差が大きい計測値の除去) を実施した後の有効データ数に基づき算出した。赤字箇所は、データ有効率の KPI の許容下限値である月 80%、年 85% を下回ったものを示す。陸上観測では、有効率も高く安定して観測が実施されたことが分かる。また、高度が上がるにつれ、有効率が若干低下する傾向も確認される。一方、洋上観測の CW による観測は、システム稼働率の傾向と対応し、2021 年 1 月以降の数回の機器トラブルによる観測停止がデータ有効率にも影響する結果となった。

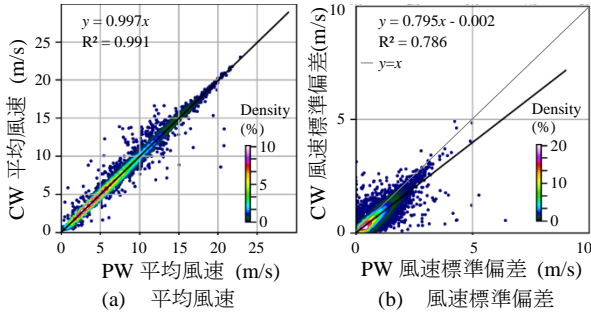


Fig. 4 ライダー観測同士の10分間平均風速・標準偏差の比較 (2020/5/27~11/21, 113m 高)

Comparison of Wind Speed and its Standard Deviation between LiDARs (2020/5/27~11/21, 113m Height)

3.3 観測システムの計測精度評価

3.3.1 PWとCWの相互比較 洋上観測において、PW稼働期間5月21日~11月21日のPWとCWによる観測の比較を行った。Fig. 4に(a)10分間平均風速、(b)風速標準偏差の散布図を示す。各図、横軸がPWの計測値、縦軸がCWの計測値であり、各ポイントは、概ね0.5m/s区切り(各軸60分割程度)のビン内に位置するデータの数を全データ数(23978)で除した割合(データ密度)で色分けされている。図には、散布図に対する線形回帰直線のフィッティング精度も示している。平均風速の決定係数R²は0.99と両観測でよく一致した値を示すことがわかる。また、PWの標準偏差がCWに比べて大きな値となる傾向が確認される。一般的に風速の標準偏差は平均風速に比例して大きくなる。PWとCWの標準偏差の分布より標準偏差が大きくなる高風速時に双方の値は近くなる(y=xの線に近づく)ものの、依然PWの方が大きい値を示す。これは、事前検証時に確認されたPWの方が大きい乱流強度の値を示す傾向と整合する。

Fig. 5に、2020年11月21日までの洋上観測113m高さにおけるPWとCWの10分間平均風向の比較を示す。PWの113m高さ風速値(a)2m/s以上、(b)2m/s未満で区別し、Fig. 4と同様な散布図を作成している。Fig. 5(a)(b)とも、y=x±180°の直線付近に点の集合が確認される。事前検証においても確認されたCWライダー特有の現象であるが、Fig. 5の(a)2m/s以上の時に比べて(b)低風速時に顕著であるように、主に強風を対象とする風力発電分野では大きい問題とはならない可能性もある。一方で、当該海域では大気安定度が高い状況で陸よりの風が吹く場合に、海面付近と上空の風向・風速が異なる事例が確認されることや、日々の海陸風循環の入れ替わりのタイミングが高度間で異なることも想定されるため、正確な風向分布把握には、別観測により補正することが望ましいと考えられる。そこで、本研究では、PWの観測が利用できない場合のCWライダーの補正方法についてPWライダーの風向を真値として検討した。

3.3.2 CW風向補正検討 CWの風向値の補正では、10分値ごとに風向が180°逆転しているかどうか的確に

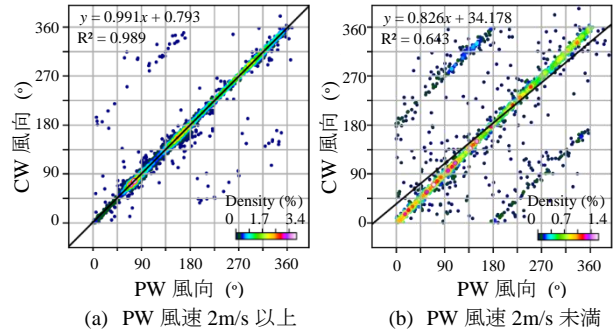


Fig. 5 ライダー観測同士の10分間平均風向の風速帯別比較 (2020/5/27~11/21, 113m 高)

Comparison of Wind Direction between LiDARs for Different Wind Speed Ranges (2020/5/27~11/21, 113m Height)

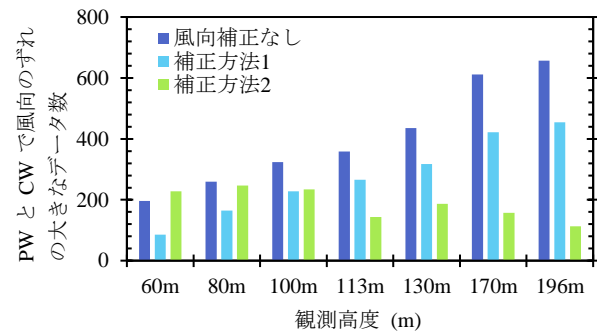


Fig. 6 補正による風向ずれの大きなデータ数の変化
Counts of Data Remaining Large Directional Difference between LiDARs after 180 Offset Correction Applied for CW

判断するための根拠となる参照データの選定が重要となる。本観測では、次の2つの補正方法について検討した。

(1) 方法1 CW本体搭載の簡易風向計を参照風向とし、簡易風向計に近い計測高度から1高度ずつ、CWの180°ずれの有無を参照風向との比較により検知し、ずれが確認された場合、CW風向値に180°加え補正する。方法1では、第1層(海面上30m)の参照風向データは、簡易風向計の観測値(海面上20m)とする。さらに第2層(海面上50m)の参照風向データとして、補正後の第1層の値を用いる。簡易風向計に近い層から連続的に補正の要否を判断する方法となる。CW一台で取得されたデータのみで補正まで完結しており、他の参照観測が不要というメリットがある。

(2) 方法2 水平距離で約2.9km程度離れているが、鉛直方向の距離が近い高度の陸上観測の風向データを参照風向として用い、補正する。

PWの観測値が有効な2020年5月27日~11月21日の期間に関して、PWの風向値を真値とし、方法1および方法2によるCWライダーの風向値の補正値を比較することで、補正方法の妥当性を検討する。比較はPWとCWで共通した計測高度について実施した。Fig. 6に、その結果を示す。PWとCWの風向の差が90°以上、270°未満のものを「風向のずれの大きなデータ」と定義し、補正方法の適用によるその数の増減を、高度ごとに調べ

た。補正がない場合に、CW は高度が上がるにつれ、180°ずれて記録された風向のデータ数が多くなる傾向にある。方法1について、特に観測高度が低い場合に、補正は有効に働くが、観測高度の上昇とともに、効果的に機能していないことがわかる。手法1は異なる高度間の風向に連続性がある仮定をおいているが、上空と地上付近の風向が不連続な状況で、補正が有効に働いていないものとみられる。このことから実務で想定されるCW 単独運用では、比較参照可能な風向観測がない場合、一定の割合でずれの判別が不能で風向計測精度の確保が難しい状況が発生し得ることが示唆される。方法2については、高度60~100mの範囲で方法1に対して大きな優位性は認められないものの、100mより高い高度で、方法1に比べ安定して正しい値に風向が補正されていることがわかる。水平距離がある程度離れていても、同一高度(鉛直方向の距離が近い)の観測同士の類似性が高いという本沿岸域の特徴により、方法2が安定的に機能したものと考えられる。以上の検討から、方法2をCW 風向値の補正に採用する。

3.4 データ補完および観測システムの精度評価結果

洋上観測においてCW 観測の年間データ有効率は90%前後であり Table 1 の KPI 下限値 85~90%と同等の値となっている。月別にみると有効率の KPI を満足していないことや年間の風況データの有効率としてはデータの欠測補完により 95%以上とすることが望ましい⁶⁾とされていることから、風力発電事業等で有用な年間データとするには本観測の欠測値の補完を行う必要がある。そこで、MCP(Measure-Correlate-Predict)法を適用し補完を行う。MCP 法は、目的の観測が欠測を含む際に、その観測と相関がよく、また、有効率も高い別観測に基づき欠測時の目的観測の値を予測し、補完するものである。本件の補完元としては、洋上観測と相関が良好で有効率の高い陸上観測が適当である。MCP 法における予測の式は、風速、風向、標準偏差について、それぞれ、切片ありの直線回帰、風向偏角補正、ダブルバイアス補正法(Variance-Ratio 法とも呼ばれる)を採用し⁴⁾、16 方位別に予測式を構築した。また、予測にあたっては、方位別の区分による不

連続性を抑制するよう方位別予測式から得られる値を補完元データの風向に応じ線形内挿した。

Fig. 7 に高度 113m の 10 分間の平均風速、標準偏差、平均風向に関して、MCP 法構築データによる散布図を示す。散布図の横軸は、MCP 法による予測値、縦軸は、同時刻の観測値である。散布図を見ると、データ密度の高い箇所は対一(y = x)の直線上と対応しており、方位別の MCP 法で、平均的には観測値とよく対応した値が予測されていることがわかる。

MCP 法による予測値と観測値の比較により、MCP 法の精度を確認した結果を Table 7 「(a) MCP 法評価」の項目に示す。KPI は Table 2 の Carbon Trust Offshore Wind Accelerator による指標⁵⁾に基づく。Table 7 (a) の平均風速の KPI について、傾きは ”Best Practice (0.98-1.02)” を満足するが、決定係数は ”Minimum (>0.97)” を満足していない。MCP 法による予測は、双方の同時刻の風速のばらつきを考慮していないことが理由であると考えられる。一方、風向については、”Best Practice” を満足している。MCP 法の補完元、補完対象の観測地点に共通して比較的

Table 7 観測項目ごとの MCP 法の評価結果と欠測補完後のデータセット評価

Evaluations of MCP Methods and the Complemented Dataset

項目	観測高度 (m)	(a) MCP 法評価						(b) 補完後データ評価				
		データ数	KPI			平均誤差(%)		補完前有効率	補完後有効率	精度推定		
			R ² _{MCP}	α _{MCP}	β _{MCP}	平均値	標準偏差			R ² _{Avail}	α _{Avail}	β _{Avail}
平均風速	320	40953	0.931	1.012	-	1.14	4.98	92.58	99.91	0.995	1.001	-
	250	43335	0.954	1.005	-	0.35	3.24	91.79	99.89	0.996	1.000	-
	196	44515	0.962	0.998	-	-0.38	2.50	90.05	99.86	0.996	1.000	-
	170	45457	0.960	0.998	-	-0.45	2.50	92.03	99.99	0.997	1.000	-
	130	46617	0.956	0.997	-	-0.51	2.80	92.03	99.98	0.996	1.000	-
	113	47909	0.956	0.998	-	-0.47	2.78	91.87	99.97	0.996	1.000	-
	100	48075	0.952	1.000	-	-0.31	3.26	89.70	99.85	0.995	1.000	-
	80	48042	0.949	0.998	-	-0.38	3.18	88.93	99.63	0.994	1.000	-
	60	46920	0.943	0.996	-	-0.63	3.29	88.18	99.41	0.993	1.000	-
	30	48108	0.944	0.991	-	-1.06	2.59	81.24	98.77	0.989	0.998	-
平均風向	320	37524	0.973	1.011	-1.652	-	-	92.58	99.91	0.998	1.001	-0.079
	250	39764	0.984	1.004	-0.436	-	-	91.79	99.89	0.999	1.000	-0.004
	196	40903	0.987	1.001	-0.055	-	-	90.05	99.86	0.999	1.000	0.007
	170	41764	0.989	1.002	-0.404	-	-	92.03	99.99	0.999	1.000	-0.027
	130	42871	0.989	1.003	-0.556	-	-	92.03	99.98	0.999	1.000	-0.038
	113	44123	0.987	1.003	-0.578	-	-	91.87	99.97	0.999	1.000	-0.041
	100	44281	0.988	1.005	-0.874	-	-	89.70	99.85	0.999	1.000	-0.082
	80	44220	0.987	1.004	-0.752	-	-	88.93	99.63	0.999	1.000	-0.077
	60	43099	0.986	1.002	-0.499	-	-	88.18	99.41	0.998	1.000	-0.059
	30	44012	0.981	1.002	-0.531	-	-	81.24	98.77	0.996	1.000	-0.125

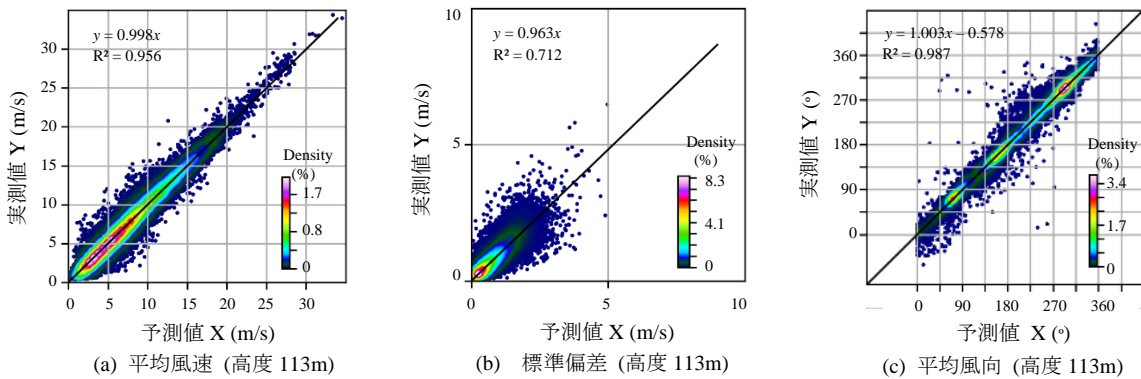


Fig. 7 MCP 法構築データによる評価結果例
The Examples of The Evaluation of MPC Methods

風向が一樣な時間帯が多いことが理由として考えられる。

以上の MCP 法の検討に基づき、対象観測の欠測値の補完を行い、年間のデータセットを作成した。年間のデータセットの作成にあたっては、対象観測が有効な場合は、対象観測を用い、対象観測が欠測の場合、MCP 法による補完値を採用する。このことを考慮し、最終的な年間のデータセットの評価を行った。Table 7 (b)「補完後データ評価」にその結果を示す。データ有効率 ζ を考慮した決定係数 R_{Avail}^2 、傾き α_{Avail} 、切片 β_{Avail} の評価は、それぞれ以下の式により求めた⁹⁾。

$$R_{Avail}^2 = 1 - (1 - \zeta)(1 - R_{MCP}^2) \quad (4)$$

$$\alpha_{Avail} = 1 - (1 - \zeta)(1 - \alpha_{MCP}) \quad (5)$$

$$\beta_{Avail} = (1 - \zeta)(\beta_{MCP} + \zeta(\bar{y} - \bar{\hat{y}})) \quad (6)$$

ここで、 R_{MCP}^2 、 α_{MCP} 、 β_{MCP} は、MCP 法の評価結果の決定係数、傾き、切片であり、 \bar{y} はデータの有効期間にわたる観測値の平均、 $\bar{\hat{y}}$ は同期間の予測値の平均である。

欠測補完後のデータセットの評価結果について、補完前、90%前後のデータ有効率であったが、安定的にデータが取得された陸上観測を補完元データとして使用したことにより、補完後 98%以上となり、MEASNET⁶⁾の推奨する有効率 95%が達成されている。有効率を考慮した精度推定結果の KPI により、すべて Carbon Trust の提唱する評価指標⁹⁾の "Best Practice" が達成されている。これは、元々の洋上観測のデータ有効率が 90%と高く補完すべき欠測期間が 10%程度と短いことと、本観測における MCP 法の精度が高いことによると考えられる。着床方式により安定して長期計測が可能な本観測システムの高い信頼性を示している。

4. 観測結果に基づく沿岸風況分析

これまで、洋上観測のうち、CW ライダーによる観測結果について、風向 180° ずれの補正や欠測値の補完を

検討した。その結果、一連の手続きの結果として "Best Practice" を満足する洋上観測データセットが構築された。以降で、そのデータセットと同時に取得された陸上観測結果との比較を通じ、当該地域における風況を分析する。

4.1 平均風向及び平均風速の出現頻度

4.1.1 風向の出現頻度分布 高度 113m における 16 方位別の出現頻度分布を Fig. 8 に示す。(a) は洋上観測結果、(b) は陸上観測結果であり、風速階級区分で色分けされている。赤線が、風向別の平均風速 (単位 m/s) に対応し、軸と数値は出現頻度 (単位%) と共通しているが数値の単位は異なる。洋上と陸上の明確な差異はこの図からは読み取れず、約 2.9km の距離があるものの 2 地点を含む当海域の空間一様性は比較的高いものとみられる。

4.1.2 風速の出現頻度分布 Fig. 9 (a) に、高度 190m 付近における風速階級ごとの出現頻度 (風況曲線) を示す。点線は陸上観測における風況曲線を示し、実線は洋上観測を示す。各風況曲線は、風向範囲 N~E, ESE~SSW, SW~NNW の 3 つの風向区分に色分け表示されている。Fig. 9 (b) は、その高度 30m 付近におけるものである。

Fig. 9 (a) 高度 190m において、洋上観測地点における N~E 風向の出現頻度は、陸上地点と比べ大きな違いが見られない。ESE~SSW 風向になると陸上観測で、主に 5m/s 未満の頻度が減少し、5m/s 以上の風速範囲の出現頻度が増加している。すなわち、ESE~SSW の陸側風向範囲で、陸上観測地点の風速は、洋上観測地点に比べて高い傾向を示している。これが主要因となり、年平均風速は陸上観測地点が 1.2%程度高い結果であった。

一方、Fig. 9 (b) の高度 30m は、高度 190m と異なる傾向を示している。陸側風向範囲 (ESE~SSW) で、5m/s 程度の頻度が洋上と比較して大きく、7m/s 以上の頻度が陸上で洋上に比べて少ない。N~E の範囲の風向は、陸上の方が全体的に高風速側に 1m/s 程度ずれた分布となっているが 7m/s 以上は差がない。海側の風向範囲 SW~NNW は、陸上観測の風況曲線が高風速側に広く分布しており、

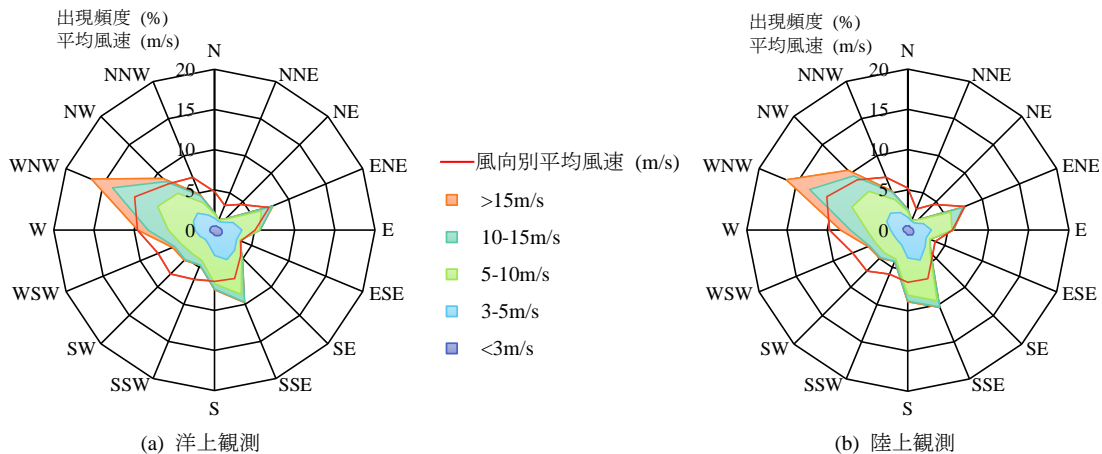


Fig. 8 高度 113m における方位別の出現頻度分布
Windrose and Directional Annual Mean Wind Speed at 113m Height

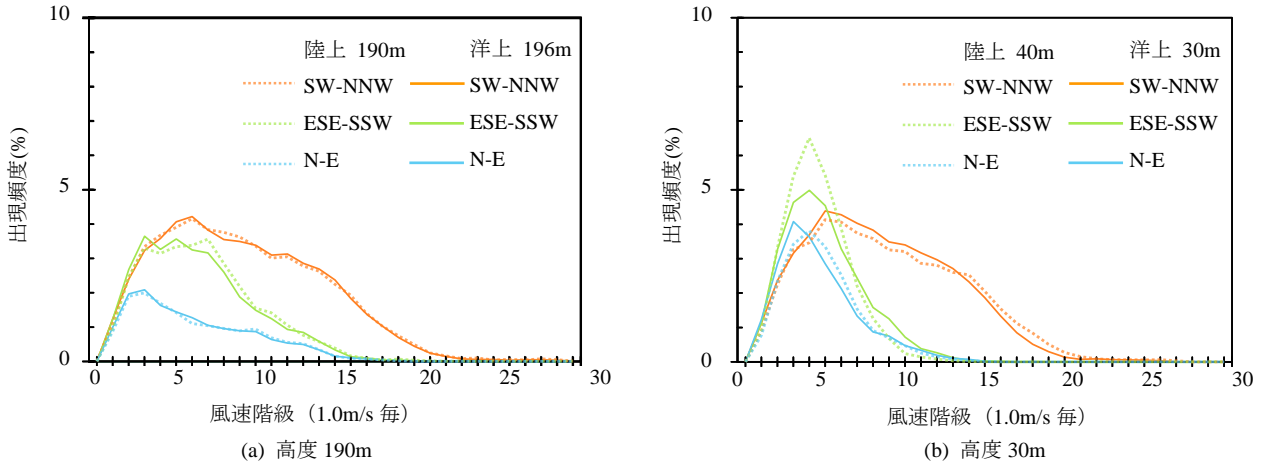


Fig. 9 高度別の陸上観測・洋上観測による風速の風向別出現頻度分布の比較

Comparisons of Directional Frequency Distributions of Wind Speed between Offshore and Onshore for Different Heights

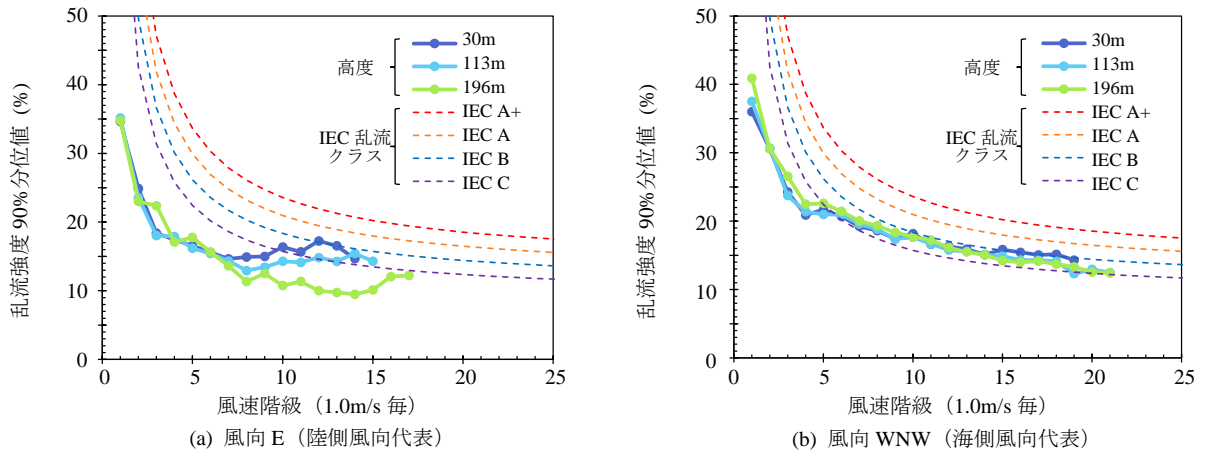


Fig. 10 洋上観測による風速階級別の乱流強度の90%分位値

The 90% Quantile Values of The Turbulence Intensity in Wind Speed Bins of 1m/s Bin Width for the CW LiDAR at Offshore.

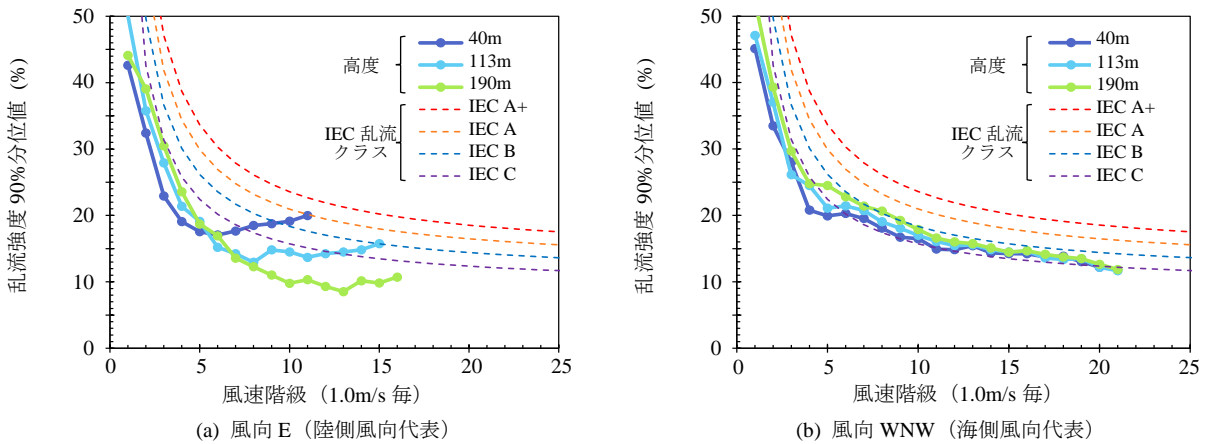


Fig. 11 沿岸の陸上観測による風速階級別の乱流強度の90%分位値

The 90% Quantile Values of The Turbulence Intensity in Wind Speed Bins of 1m/s Bin Width for the LiDAR at Onshore.

陸上の方が平均的に高い風速を示す傾向が確認される。高度 190m ではこのような傾向は確認されず、洋上と陸上の風況曲線も一致しているので、陸上の地表面付近において高風速範囲でも増速をもたらす何等かの影響によると考えられる。

その可能性の高いものに、陸上観測点の周辺の微地形

や地表面被覆による局所的な増速がある。当該地域は、海岸線に沿って標高 20m~30m の海岸段丘が発達しており (Fig. 3 参照)、その地形の周辺では沖合から吹いてきた風が増速されることは、当該地域を対象とした流体解析でも予想されている。実際、海側風向の観測からもその影響が示唆される結果となった。

陸域の沿岸では周辺の地形や粗度の影響で、海からの風の時に、部分的に洋上よりも高い風速となる地点があることがわかる。風力発電の事業的な側面から考えると沿岸の陸域には、離岸距離の近い洋上の沿岸海域よりも風況面で優位なサイトが存在する可能性があることがうかがえる。一方で、その高さ方向の範囲には注意が必要である。風車のロータ面全体に渡り増速効果があれば、優位なサイトといえる。しかしながら、本サイトで190m高さになると明確な増速効果が確認されなかったように、増速域の高さ方向の範囲は陸域の地形などの高さや規模に依存すると考えられる。例えば、沿岸既存風力発電所のリプレースなどで従来よりも大型風車を用いる場合などでは、増速効果範囲の評価に注意が必要といえる。

4.2 その他の風況特性

4.2.1 風速の標準偏差 (乱流強度) Fig. 10 に、1m/s

毎の風速階級別で算出された洋上観測の乱流強度の90%分位値の比較を示す。Fig. 11 は陸上観測によるものである。両図 (a) は陸側で代表的な風向 E であり、(b) は海側風向で代表的な風向 WNW である。両図とも、下層、中層、上層の3高度の観測について求めたものをシンボル付きの実線で示している。乱流強度の90%分位値は、式 (3) により求めた。また、参考として風車型認証の設計条件となる IEC61400-1⁸⁾で規定された乱流強度モデル式 (クラス A+, A, B, C) を破線で示す。

Fig. 10 (a) 洋上観測の陸側風向では、風速7m/s以上において、上空ほど乱流強度が減少する傾向が確認される。一方、(b) 海側風向では、乱流強度の高度による変化が顕著でない。Fig. 11 の陸上観測 (a) と (b) でも同様な傾向が確認される。両図 (a) については、陸側風向の風の主な乱流成分が、陸面の地表面摩擦により生成されることから、地表面付近で乱流強度が大きく、上空ほど減少すると解釈される。一方、両図 (b) については、当該海域において海からの風向時は、大気境界層の安定度が中立～不安定であり、乱流混合の鉛直方向の長さスケールが大きいため、観測高度の範囲において、乱流強度 (の90%分位値) の鉛直方向分布がほぼ一様になっていると考えられる。一般的に陸域の境界層では粗度による摩擦効果が大きく、乱流強度は上空程小さくなる傾向が顕著である。しかしながら、日本海沿岸で主に海側から吹く冬季季節風に伴う対流雲の影響により、風車定格風速以上の運転風速範囲 (10~30m/s程度)、かつ、洋上大型風車のハブ高以上のロータ面範囲 (高さ100~250m範囲) において、乱流強度が上空で低下しないことは、終局荷重や疲労荷重に対する構造物の設計において注意を要する。

4.2.2 風速の鉛直分布 (べき指数) 水平風速の鉛直分布は、風車のサイト適合性や支持構造物設計の重要な照査項目の一つで、定義は次式となる。

$$U_{z2} / U_{z1} = (z_2 / z_1)^\alpha \quad (7)$$

ここでべき指数 α 、観測高 z_1, z_2 における水平風速 U_{z1}, U_{z2}

Table 8 各観測を中心とした16方位別の地表面性状変化 Directional Transition of the Surface Roughness Characteristics (Land Usage) for Distance Ranges from Each Observation

範囲	陸上観測															
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
0.5k	海岸	海岸	畑	畑	畑	畑	畑	畑	畑	畑	海岸	海岸	海岸	海岸	海岸	
1.5k	海	海岸	畑	丘	丘	丘	丘	畑	町	海岸	海	海	海	海	海	
3.0k	海	海岸	丘	畑	畑	畑	町	町	畑	丘	海岸	海	海	海	海	
5.0k	海	海岸	丘	畑	畑	畑	畑	畑	畑	丘	海岸	海	海	海	海	
10k	海	海岸	畑	畑	畑	畑	畑	畑	畑	丘	海岸	海	海	海	海	
30k	海	海岸	平野丘陵	丘陵	丘陵	丘陵	平野丘陵	平野	海	山地	山地	海	海	海	海	

範囲	洋上観測															
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
0.5k	海	海	海	海	海	海	海	海	海	海	海	海	海	海	海	
1.5k	海	海	海	海	海	海	海	海	海	海	海	海	海	海	海	
3.0k	海	海	海	海岸	海岸	海岸	海岸	海岸	海岸	海	海	海	海	海	海	
5.0k	海	海	海岸	丘	畑	畑	畑	畑	畑	丘	海岸	海	海	海	海	
10k	海	海	丘	畑	畑	畑	畑	畑	丘	丘	海	海	海	海	海	
30k	海	海岸	平野丘陵	丘陵	丘陵	丘陵	平野丘陵	平野	海	山地	山地	海	海	海	海	

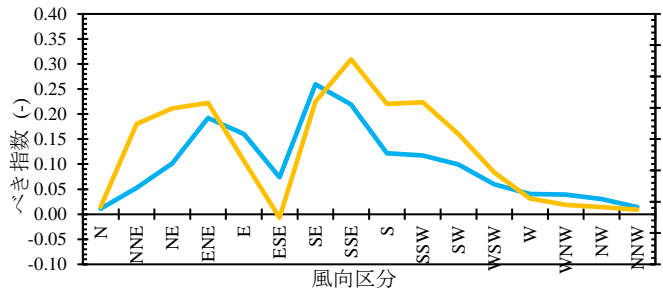


Fig. 12 洋上観測と陸上観測による風向別べき指数比較 Directional Wind Shear Comparison between the Onshore and the Offshore Measurement

である。べき指数は最低2高度の観測から求められるが、ここでは両観測に共通の観測範囲 (高さ50~170m) の平均水平風速の鉛直分布に関し、最小二乗法により求めた。Fig. 12 に風向別の算出結果を示す。また、Table 8 は各観測地点について上流側の地表面性状の概況を、16方位別、観測点からの水平距離 (単位 km) ごとに要約したものである。「範囲」の項目は距離の中央値を表す。一般的に地表面の凹凸の度合いとべき指数は相関があり、Fig. 12 の陸上、洋上観測の分布は、ESEを除き、Table 8 の上流地表面性状分布と概ね対応している。両地点とも上流が海の方位 (N, WSW~NNW) では、0.0~0.05 と大気安定度が中立状態の海域の目安0.1よりも非常に小さいべき指数をとる。当該海域は日本海沿岸に沿って北上する暖流の影響により年間を通じ海水温が気温と同程度が高く、沿岸域の洋上の大気安定度としては中立から不安定状態が支配的であるためである。一方、陸側風向 (主にENE, SSE) では陸上観測0.2~0.3、洋上観測0.2程度と、平野~海域に位置するサイトとしては大きな値をとる。大気安定度が中立状態のべき指数の目安として海域0.1、平野0.14~住宅地0.2程度であることやこれらの値が距離の離れた両地点に共通し夜間に確認される傾向があること等を考慮すると、これらは夜間の陸域における大気安定度の高い状況下で生じる広範囲の斜面風の海域への移流 (重力流) によるものと考えられる。また、これら

の風向において陸上と比較し、洋上のべき指数が小さくなる要因として、陸風の海域での摩擦低下による海面近傍での速度回復や海面温度による不安定化等が挙げられる。なお、ESE では、観測高度範囲の平均風速が高さによらずほぼ 4m/s 程度と一樣なためべき指数は小さく、上流の粗度性状との対応は見られない。平均風速が低く、上流の粗度影響が観測高さまで及んでいないことが主な要因と考えられる。

以上から、当該海域の風況は、海側風向で不安定境界層が支配的であり、陸側風向では、粗度と高安定成層下の夜間斜面風の影響を強く受けていることが分かった。

5. まとめ

大林組では、一般海域において、施工・撤去が容易な着床式の SS による観測ステージを設置し、波浪による動揺影響を受けない状態で 1 年間にわたる長期の洋上風況観測を行い、洋上風力事業や施工に資する一連の技術を実証した。本報告では、洋上風況観測データの評価を実施するとともに、陸域との比較を通じ、長期観測による沿岸域の風況特性に関し分析し、以下のような知見を得た。

- 1) 着床式 SS 上観測に用いるライダーの事前検証を陸上で行い、計測精度を確認するとともに、特定の計測装置において確認された風向値が 180° ずれる事象への対策を検討した。本観測でも、同事象に対し参照風向データの検討を行い、本サイトでは陸上観測を参照することで一定の精度で風向のずれを判別し補正可能であることを示した。
- 2) 計測環境が厳しく、荒天時のメンテナンスが困難な洋上環境における観測では、やむを得ず欠測期間を有することがしばしばある。一方、風力発電事業では信頼性の高いデータセットが必要である。欠測を有する洋上観測の補完方法を検討し、精度評価を行った。その結果、高い信頼性と精度が達成されたデータセットが作成され、一連の風況精査手法の妥当性が示された。
- 3) 構築された洋上風況データセットを、同時に行われた陸上観測との比較を交えて分析した。高度 190m の上層では、明確な陸と海の風況差異は確認されなかった。下層（高度 30m 程度）で、陸風時に海面の滑面効果により風速が回復する様子が確認された。一方、海寄りの風では、下層でも陸上に対する洋上観測の顕著な差異は認められず、離岸距離 1.7km の洋上の風況特性が、海岸線までほぼ維持される様子がうかがえた。さらに、陸域の沿岸には、周辺地形や粗度の影響で、海寄りの風で部分的に洋上よりも風速が高く風況面から優位な陸域サイトも存在しうることが確認された。

以上のように、必ずしも、洋上であれば近傍沿岸陸上

より風況がよいという訳ではないことが実測を以て示された。また、洋上環境は海象状況次第で設備へのアクセスが難しい場合があり、陸上と比べ観測システムのトラブルが長期の欠測につながるリスクが高い。測器自体の耐久性に加え、観測計画全体の冗長化が基本となる。その上で、本研究で示した手法等を始めとした技術や知見を活用し、観測精度を担保する柔軟性が求められる。最後に、本実証実験の成果が今後の我が国の洋上風力発電分野の発展に資するものとなることを期待し結びとする。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁、国土交通省港湾局，“海洋再生可能エネルギー発電設備整備促進区域指定ガイドライン”，2021-07，https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/yojo_furyoku/dl/legal/guideline.pdf, (参照 2022-06-01)
- 2) 粕谷, 山田, 栗本, 松元, 小山, 伊藤: 着床式洋上風車に用いるスカートサクシオン基礎に関する研究, 大林組技術研究所報, No. 82, 2018
- 3) 後藤, 大塚, 林: 簡易浮体に搭載したドップラーライダーによる洋上風況観測とその検証, 第 24 回風工学シンポジウム論文集, pp. 25-30, 2016
- 4) 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, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol. 45, No. 2, 2021
- 5) Carbon Trust, “Offshore Wind Accelerator Roadmap for the Commercial Acceptance of Floating Lidar Technology”, Version 2, 2018, [https://prod-drupal-files.storage.googleapis.com/documents/resource/public/Roadmap for Commercial Acceptance of Floating LiDAR REPORT.pdf](https://prod-drupal-files.storage.googleapis.com/documents/resource/public/Roadmap%20for%20Commercial%20Acceptance%20of%20Floating%20LiDAR%20REPORT.pdf), (accessed 2022-06-01)
- 6) MEASNET, “MEASNET Procedure : Evaluation of site specific wind conditions”, Version 2, 2016, https://www.measnet.com/wp-content/uploads/2016/05/Measnet_SiteAssessment_V2.0.pdf, (accessed 2022-06-01)
- 7) Knoop, S., Bosveld, F. C., de Haij, M. J., and Apituley, A.: A 2-year intercomparison of continuous-wave focusing wind lidar and tall mast wind measurements at Cabauw, Atmos. Meas. Tech., 14, pp. 2219–2235, 2021
- 8) International Electrotechnical Commission: “IEC 61400-1:2019, Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements”, 2019
- 9) 榎木, 石原: 現地観測のデータ有効性を考慮した 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 回日本風力エネルギー利用シンポジウム, 2021