

シングルと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*

Offshore Wind Assessment Using Single and Dual Scanning Lidars

間野 晶子** 上野 晃世** 糸崎 俊介** 石原 孟***

Akiko MANO Akiyo UENO Shunsuke ITOZAKI Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

近年、国を挙げて洋上風力発電に期待が寄せられている。風力発電所を洋上に建設するためには安全性および経済性の観点から正確な風況観測が不可欠である。

しかし、洋上風況を観測するには幾つかの課題がある。洋上風況塔については、設計から許可取得、施工まで長期の工期に加えて、多大なコストが掛かる。フローティングライダーを用いる方法は、任意の場所に設置可能であるが、波による浮体揺動の影響を受け、現在揺動成分を補正する手法の開発が進められている[1]。レーザーの照射方向を任意に変化させることのできるスキャニングライダーを用いる方法は、レーザーの到達距離の制約があるものの、離岸距離が数kmの範囲での適用が可能であり、様々な研究機関や組織において検証が進められている。間野ら[2, 3]は、シングルスキャニングライダー(以下、シングルライダー)を用いた観測手法および観測精度とデータ有効率の双方からの要求を満足する適切な判定基準を提案した。観測精度については風況塔による風速、風向の観測値との比較により検証した。渡辺ら[4]はデュアルスキャニングライダー(以下、デュアルライダー)を用いて乱流強度を高精度に計測できることを示した。観測精度については風況塔による風速、風向、乱流強度の観測値との比較により検証した。

シングルライダーでは風速、風向を精度よく観測可能であると同時に、1点だけではなく、レーザーが到達する範囲において同時にデータを取得でき、風速の空間分布を得ることができる点が挙げられるが、風況を時間空間平均値として観測するため、ある1点における乱流強度を計測することが原理的に不可能である。一方、デュアルライダーでは乱流強度を精度よく計測することが可能である[4]。

本研究では、シングル・デュアルライダーの双方を用いて、洋上風況観測を実施し、海岸から洋上まで風況を調べる。シングルライダーを用いて、風速の鉛直

と水平方向の分布を方位別に明らかにし、またデュアルライダーを用いて、洋上と陸上の乱流強度の違いを明らかにする。さらに観測手法がシステム稼働率およびデータ有効率に与える影響を定量的に評価する。

2. スキャニングの設置と計測条件

本研究では、Leosphere社のスキャニングライダー(WINDCUBE 200S)を2台用いて洋上風況観測を行い、沿岸近傍に設置した風況観測塔1塔、鉛直ライダー1台を用いて陸上風況観測を行った。シングルライダーによる観測を2箇所で1年間実施した後に、片方の機器を移設し、同じ機器を用いてデュアルライダーによる観測を5か月間実施した。

2.1 シングルライダー計測の概要

Fig.1にはシングルライダー観測時のスキャンの高度と観測対象点の概略図を示す(ライダー設置は間野ら[3]を参照)。観測期間、スキャン条件はTable 1に示す。200S①、②は2台のライダーそれぞれを表し、いずれもスキャンA, B, Cの3高度観測を実施した。

間野ら[3]の手法に倣い、以下の①から④に示すデータフィルタを設けた。

- ① メーカー推奨Statusは1である。
- ② 1高度にて15秒スキャンを行い、3高度を順にスキャンする。
- ③ スキャニングライダーの視線風速データより15秒間観測値を求める際には、①を満たす1秒データが3個以上含まれ、かつ、それらがカバーした角度(セクターサイズ)は30度以上である。
- ④ 10分間観測値を求める際には①、③を満たす15秒間観測値が4個(合計60秒)以上含まれる。

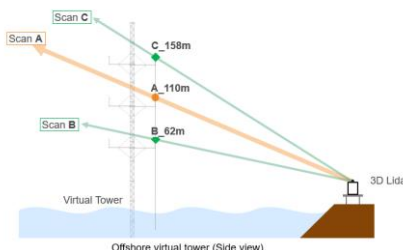


Fig. 1 Diagram of Single LiDAR observation (200S②)

* 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 株式会社レノバ エンジニアリング本部

*** 会員 東京大学大学院 工学系研究科

Table 1 Description of each scanning LiDAR

	200S①	200S②
Scan type (Scan sector)	PPI (45°)	
Range resolution	100 m	
Accumulation time	1 s	
Azimuth angle	294.2°	299.7°
Scan speed	3° /s	
Angle between each azimuth angle	3° /LOS (15 LOS)	
Horizontal distance	1750 m	1309 m
Installed elevation	4.7 m	2.7 m
Height of observation point (Elevation angle)	Scan A : 110 m (3.4°)	Scan A : 110 m (4.6°)
	Scan B : 60 m (1.8°)	Scan B : 62 m (2.5°)
	Scan C : 160 m (5.0°)	Scan C : 158 m (6.7°)
Observation period	1 year	

間野ら[3]は、このデータフィルタ手法を用いることにより観測精度と処理後データ取得率（本研究ではデータ有効率と呼ぶ）の双方において The Carbon trust[5]の KPI の要求を満足することを示したが、観測期間は6か月間と短かったため、本研究では降雪の影響を含む観測期間1年間におけるシステム稼働率およびデータ有効率を同様に The Carbon trust[5]に従いシステム信頼性の KPI を評価した。200S①の結果を Table 2 に示す。10か月目の月は月間システム稼働率が低くなったが、これは落雷の影響でスキャニングライダーへの電源供給が停止したためであり、ライダー自体が原因ではない。この月を除くと、1年間の観測において Stage 3 を満たし、200S②ではいずれの KPI も Stage 3 を満たした。

Table 2 System Availability(SA, hereafter) and Post-processed Data Availability(PDA, hereafter) of single LiDAR (200S①)

	SA [%]	PDA [%]		
		60 m	110 m	160 m
Month 1	100.0	97.2	97.4	97.0
Month 2	99.9	97.6	97.5	97.5
Month 3	100.0	89.2	89.2	88.8
Month 4	100.0	98.1	98.3	98.2
Month 5	100.0	99.5	99.4	99.0
Month 6	100.0	99.5	98.5	97.3
Month 7	96.4	95.4	94.8	94.3
Month 8	100.0	97.4	97.5	97.1
Month 9	100.0	99.6	99.5	99.4
Month 10	89.4	88.0	88.0	88.0
Month 11	99.1	98.3	98.3	98.4
Month 12	100.0	99.7	99.8	99.8
Overall	98.8	96.7	96.6	96.3

2.2 デュアルライダー計測の概要

200S①と200S②(シングルライダー観測後に200S②'に移設)を用いて、デュアルライダーとして洋

上位置において118m 高度の観測を実施した。観測期間とスキャン条件は Table 3 に示す。渡辺ら[4]の手法に倣い、以下の①から④に示すデータフィルタを設けた。

- ① メーカー推奨Statusは1である。
- ② スキャニ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3σを超える風速データを除外する(3σフィルタ)。
- ③ 2台のライダーが同時に有効である。
- ④ 10分間観測値を求める際に①~③を満たす1秒データが60個以上含まれる。

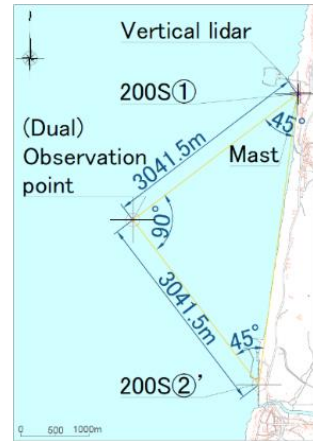


Fig.2 Location of dual scanning lidars, vertical lidar and met mast

Table 3 Description of dual scanning LiDAR observation

Scan type	FIXED
Range resolution	100 m
Accumulation time	1 s
Sampling rate	1 Hz
Azimuth angle	200S① 232.1° 200S② 322.1°
Elevation angle	200S① 2.1° 200S② 2.1°
Angle between azimuth angle of 200S① and 200S②	90°
Horizontal distance	3041.5 m
Installed elevation	200S① 4.7 m 200S② 5.3 m
Height of observation point	118 m
Observation period	5 months

デュアルライダー観測点におけるシステム稼働率およびデータ有効率を The Carbon Trust に従い、KPI を評価した。その結果を Table 4 に示す。

デュアルライダーでは、200S①および200S②の2台が同時に有効なデータを取得していなければならないため、1台のみを使用する場合と比較してデータ有効率が低くなる。データ有効率は200S①単独では観測期間全体で94.9%、200S②単独では98.1%であるが、デュ

アルライダーとして計測する際には 94.3%と低くなった。単純に単機のデータ有効率を乗算すると 93.1%であり、それに近い値になっていることが分かる。観測した5か月間については Stage 3 を満たした。

Table 4 System Availability and Post-processed Data Availability of dual scanning LiDAR observation

	SA [%]		PDA [%]		
	200S①	200S②	200S①	200S②	Dual
Month 1	100.0	100.0	98.0	99.0	97.6
Month 2	99.3	99.3	95.4	97.6	93.7
Month 3	100.0	100.0	93.5	96.8	93.0
Month 4	99.0	99.8	96.5	98.3	95.8
Month 5	96.6	100.0	91.3	99.0	91.2
Overall	99.0	99.8	94.9	98.1	94.3

3 観測結果と考察

3.1 シングルライダーによる洋上風況観測の結果

シングルライダー観測ではレーザーが届く範囲において同時に複数の観測点の結果を得られるため、3 仰角スキャンを実施することにより、鉛直水平方向の風況を複数地点で取得することが可能である。

シングルライダー観測値を用いて、それぞれの観測点位置における風速の鉛直方向の風況変化および高度 110m における水平方向の風況変化を、方位別に分析した。シングルライダー観測値はどの観測点でもデータ有効率 90%を上回ったため、十分高いデータ有効率であると判断し、データ補完をしなかった。このためデータ有効率はそれぞれの観測点で 91.7~97.8%の範囲で異なっている。

各観測点でデータ数が異なるため、比較のために、データ有効率がもっとも低い観測点でのデータが有効である時刻のときのみのデータを抽出した。いずれのケースにおいてもデータ有効率の差は 0.14%未満であり、十分小さいことが分かる。

200S①は陸側に凡そ 10km の距離に高度 200m 程度の山がある。200S②は陸側が河川域で高度 20m 程度の市街地が広がっている。それぞれの観測点の鉛直方向の風況変化および 110m 高さにおける水平方向の風況変化を方位別に調べた。

(1) 鉛直方向の風況変化

200S①および 200S②のそれぞれの観測点において、3 高度の風向別出現頻度を Fig. 4 に示す。200S①と 200S②では、似た傾向を示す。共通の特徴として、まず 112.5 度からの風および 292.5 度、315 度からの風は卓越風である。また、高度が低いほど、陸風がより卓越していることが分かる。

Fig. 5 には各観測点における方位別の年平均風速を示す。200S①と②では、似た傾向を示す。共通の特徴として、まず 112.5 度の陸風、225 度、292.5 度で年平均風速が大きい。また、112.5~135 度の陸風でシアが大きく、247.5~337.5 度の海風ではシアが小さいことが分かる。さらに風速のべき数 α については、陸風の 112.5 度において 0.167(200S①)、0.115(200S②)であり、海風の 292.5 度において 0.025(200S①)、0.027(200S②)である。

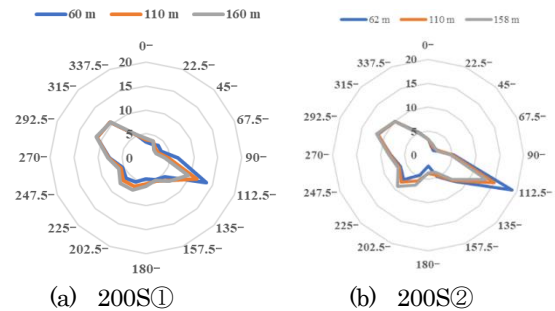


Fig. 4 Wind rose at three observation heights. The unit of axis is [%].

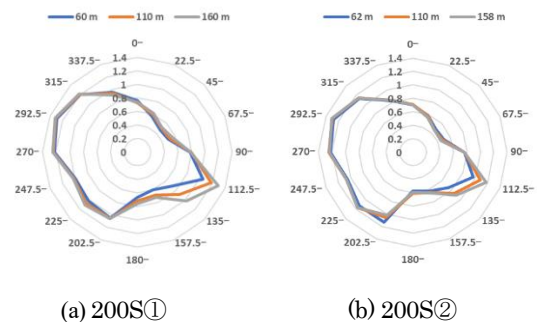


Fig. 5 Mean wind speed in each wind direction at three observation heights. The axis is normalized.

(2) 水平方向の風況変化

200S①および 200S②の観測において、110m 高における風向別出現頻度を Fig. 6 に示す。

200S①と 200S②では、似た傾向を示す。共通の特徴として、まず 112.5 度、292.5 度および 315 度からの卓越風が観測された。また、陸に近いほど陸風の卓越が顕著である。これは日射による温度変化で駆動される陸風が、高度が低いほど、また陸に近いほど、その影響を大きく受けていると考えられる。

Fig. 7 には高度 110m における方位別の年平均風速を示す。200S①においては、洋上 3 地点の風況に注目すると、90~157.5 度の陸風において、沖の方が陸側の観測点よりも 6%程度、低風速になっている。一方、200S②ではどの方位においても沖の方が陸に近い観測点よ

りも高風速になっている。この理由として、200S①では陸側に 100~200m 高の山があり、200S②では陸側は平坦な市街地が広がっているためであると考えられるが、今後より詳細な解析が必要である。

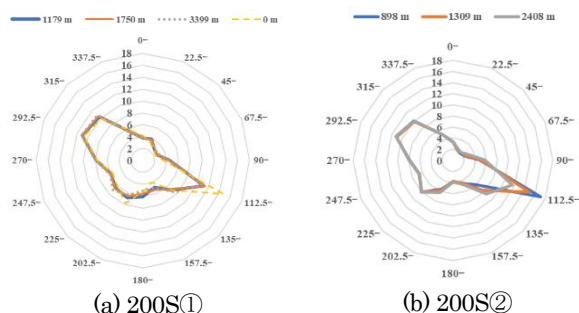


Fig. 6 Wind rose at the locations with different horizontal distance from scanning LiDAR at 110 m ASL. 0 m of (a) represents onshore vertical lidar. The unit of axis is [%].

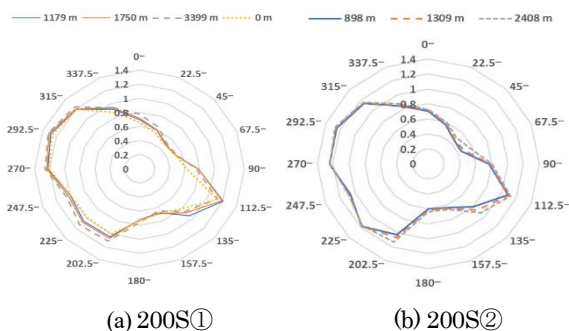


Fig. 7 Mean wind speed in each wind direction at 110m ASL. The axis was normalized.

3.2 デュアルライダーによる洋上風況観測の結果

デュアルライダー観測ではある 1 点の風速・風向の 1 秒値を取得することができるため、乱流強度を観測することが可能である。デュアルライダー観測値を用いて、洋上と陸上の乱流強度の違いを調べた。陸上の乱流強度は、鉛直ライダーのデータを用いた。デュアルライダー観測値は十分高いデータ有効率であったため、補完処理をしなかった。

Fig. 8 には乱流強度の比較を示す。デュアルライダーに計測された洋上の乱流強度が鉛直ライダーより計測された陸上の乱流強度が低く、風速 3~15 m/s、16~24 m/s の範囲では、それぞれ平均で 6.7%、2.0%も乱流強度が低くなっており、IEC Category C 基準を下回っている。鉛直ライダーは陸上沿岸に位置し、デュアルライダー観測点は沿岸から 1.6km 沖に位置する。鉛直ライダーでは陸上地形の影響を受けているため、洋上風況よりも乱流強度が大きくなっていると考えられる。

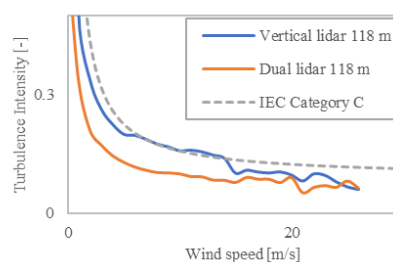


Fig. 8 Comparison of turbulence intensity obtained from onshore vertical lidar and offshore dual lidar at 118m ASL

4. まとめ

本研究では、シングルとデュアルライダー観測による洋上風況観測を実施し、観測手法がシステム稼働率およびデータ有効率に与える影響を定量的に評価し、洋上風況の特徴を明らかにした。

- (1) シングライダー観測ではレーザーが届く範囲において同時に複数の観測点の結果を得られることを利用して、鉛直水平方向の風況の変化を方位別に分析し、洋上風況の特徴と陸上地形の影響との関係を明らかにした。
- (2) デュアルライダー観測では乱流強度を観測できることを利用して、洋上と陸上の乱流強度の違いを明らかにした。

以上から、異なる種類のデータを取得できるシングライダーとデュアルライダーを組み合わせることにより、沿岸から洋上までの風況特徴を観測できることを明らかにした。

謝辞

本研究にあたり、調査実施近隣地区の各自治体および関係者の皆様にご協力を頂いた。ここに記して心から謝意を表す。

参考文献

- [1] Atsushi Yamaguchi and Takeshi Ishihara: A new motion compensation algorithm of floating lidar system for the assessment of turbulence intensity, *Journal of Physics, Conference Series* 753(7), pp.1-8, 2016
- [2] 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の精度検証と洋上風況観測への応用”, 第 41 回風力エネルギー利用シンポジウム予稿集, pp.34-37, 2019
- [3] 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予稿集, pp.17-20, 2020
- [4] 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, pp.40-48, 2021
- [5] The Carbon Trust, “OWA Roadmap for the Commercial Acceptance of Floating LiDAR Technology, Version 2.0”, 2018