

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*

Effects of data availability and sector size on the accuracy of 3D scanning LiDAR measurements

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3D スキャニングライダー(以下、3D 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～十数kmの範囲での適用が可能性であり、様々な研究機関や組織において観測精度の検証がなされている。正確な風況観測のためにはこのような観測精度の検証が不可欠である。また観測精度を向上させるためには計測精度の低いデータを除外する必要がある。この場合、観測精度とデータ取得率の双方からの要求を満足する適切な判定基準を設定することが重要である。

そこで、本研究では、3D ライダーのデータ取得率に与える諸要因を調べると共に、スキャニングのセクターサイズが3D ライダーの観測精度に与える影響を明らかにする。

2. 3D ライダーによる計測

2.1 データフィルタリング

本研究では、Leosphere社の3Dライダー(WINDCUBE 200S)を用いて、風況観測を行った。Fig.1に示すように3Dライダーは港湾区域内に設置している。精度検証のため、風況観測塔(高さ 約60m)は、3Dライダーから北西に1340m離れた海岸付近の地点に位置した。データフィルタリングは間野ら[2]に示す方法に基づき、行った。

* 令和2年11月27日第42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

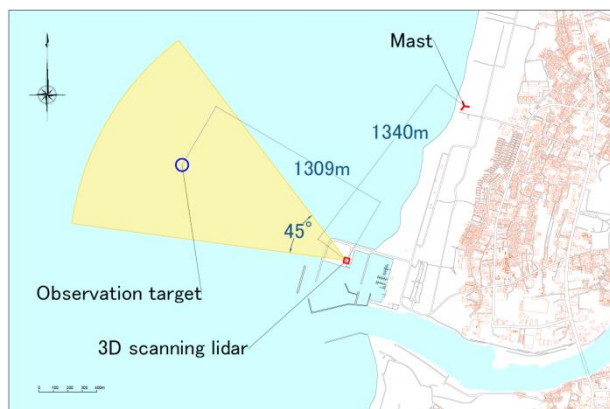


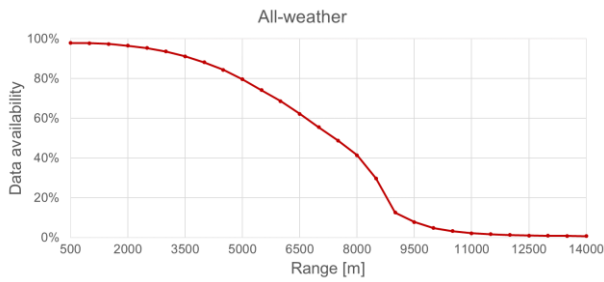
Fig.1 Location of the 3D lidar and the met mast

2.2 データ取得率

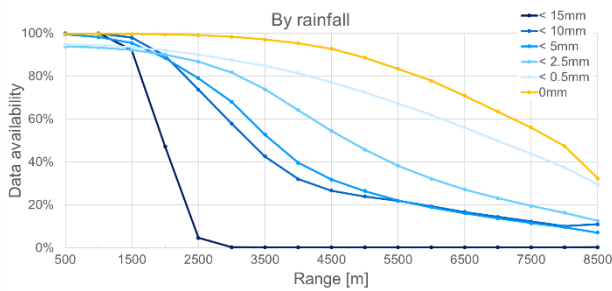
データ取得率を求めるため、本研究で使用した機器と同型のWINDCUBE 200Sを用いて、Table1に示す計測設定(FIXEDモード)にて洋上の風を観測した。データ取得率は、全ての計測データ数に対する、データフィルタリング後の計測データ数の割合を表す。計測期間は150日間(3600時間程度)であり、この期間には近隣の气象台アメダスによると、雨および雪の時間帯はそれぞれ1345時間および35時間含まれる。仰角は計測距離によるエアロゾル濃度の違いがデータ取得率に与える影響を除外するため、14000m先でも計測高度が500mに達しないように設定した。スキャン設定をTable1に示す。

Table1 Scan settings for investigating data availability. Azimuth angle is set toward the sea from 270 to 320 deg. approximately

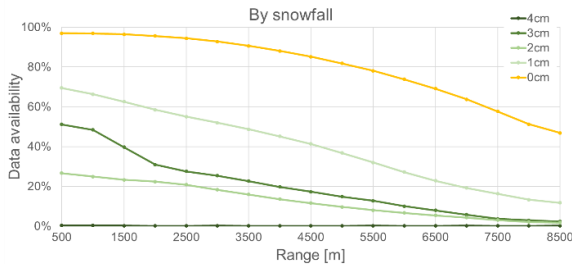
Period number	Days	Scan type	Elevation angle [deg.]	Approx. range [m]
1	20	FIXED	2	200~14000
2	2	FIXED	2	200~14000
3	128	PPI	1.75	200~8000



(a) Relationship between range and data availability. The data was taken for 150 days at 8500 m or less and 22 days at 9000 m or more



(b) Relationship between range and data availability obtained from 1345 hours of data with rainfall



(c) Relationship between range and data availability obtained from 35 hours of data with snowfall

Fig.2 Measured data availability

Fig.2(a)に、天候に依らず、平均したデータ取得率と計測距離の関係を示す。計測距離を長くするとデータ取得率が減少する傾向がみられた。データ取得率80%を超えるのは計測距離4.5 km以内であった。また、データ取得率は降水量・降雪量など天候にも影響を受ける。降水量とデータ取得率の関係はFig.2(b)に示す。降水量が多ければ多いほどデータ取得率は低下することが分かった。データ取得率は80%以上となる計測距離も降水量によって徐々に短くなり、10 mm以上15 mm未満の場合では2 km程度までであった。降雪量とデータ取得率の関係はFig.2(c)に示す。降雪時にはデータ取得率が著しく低下し、1cmの降雪の場合には、計測距離500mでデータ取得率70%を下回った。

3 計測データの判定基準の提案と精度検証

3.1 風況観測手法の概要

3D ライダー観測値の精度検証のため、1340m離れた風況塔 57.5m付近位置を観測し、風況塔観測値と比較した。計測設定値を Table2 に示す。本設定では、PPI モード1 シーケンスは、15 秒間で15 個の視線風速を取得する。これら15 個の視線風速から風速と風向を算出する手法は、最小二乗法を用いた(間野ら[2])。

Table2 Scan settings for observing the met mast

Scan type	PPI (sector scan)
Sector size	45.0 degrees
Elevation angle	2.5 degrees
Azimuth angle	36.8 degrees
Horizontal distance	1340 m
Scanning speed	3.0 degrees/sec
Azimuth separation	3 degrees per LOS (15LOS)

3.2 データ閾値とセクターサイズの検討

PPI モードにおいて、各シーケンスにおける風向風速値(15 秒値)算出時の有効データ数(ここではデータフィルタリング後の計測データの個数)の閾値を検討した。その後、各10 分平均値算出時の有効データ数(ここでは閾値適用後に有効なデータとみなした15 秒値の個数)の閾値を検討した。また、計測期間全期間におけるデータ取得率との関係を調査した。

(a) 15 秒値算出時の閾値の検討

最小二乗法によって15 個の計測データ(視線風速)から15 秒値を算出する際、机上で欠測の個数を増やしたときの算出値の変化を調査した。計測期間は夏季の約5 日間とした。まず、データフィルタリング後、1 シーケンスの間に1 つも欠測がなかった場合の計測データのみを残した。次にシーケンス毎に机上でランダムにデータを間引いて算出される15 秒値の変化を調べた。どのくらいデータを間引いたかを、式(1)によって計算される x を用いて η_x で表す。今、1 シーケンスにおける全データ数は15 個であるので、 $\eta_{20}, \eta_{40}, \eta_{60}, \eta_{80}$ のときの有効データ数はそれぞれ3, 6, 9, 12 個となる。 η_{100} と各 η_x の15 秒値の相関関係の変化を Fig.3 および Table3 に示す。観測精度は有効データ数の減少に伴い、低下した。

$$x = \frac{\text{有効データ数}}{\text{全データ数}} \times 100 \quad (1)$$

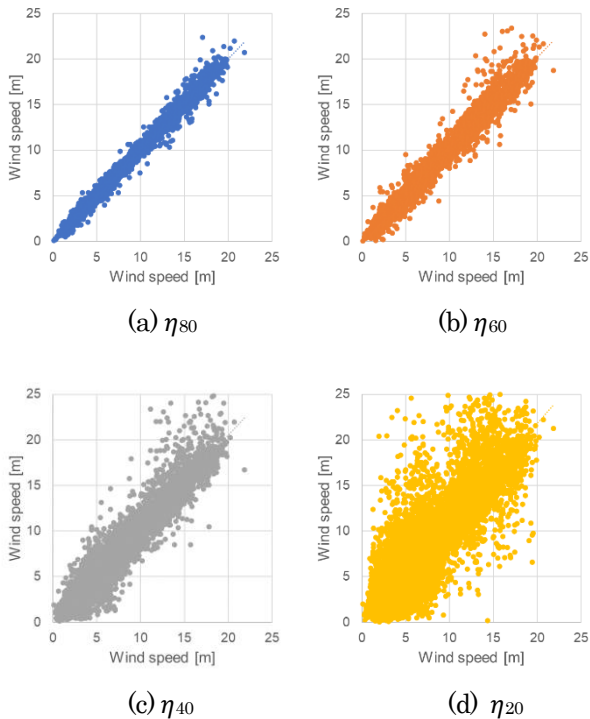


Fig.3 Correlation between η_{100} and each η_x for 15-sec-averaged wind speed

Table3 Correlation parameters between η_{100} and each η_x for 15-sec-averaged wind speed

	Slope	Offset	R ²	RMSE	Data record
η_{80}	1.002	-0.009	0.996	0.266	20336
η_{60}	1.009	-0.039	0.986	0.477	20336
η_{40}	1.031	-0.126	0.940	1.043	20336
η_{20}	1.093	-0.079	0.672	3.120	20336

(b) セクターサイズの検討

次に、有効なデータがカバーした角度(セクターサイズ)が観測精度に与える影響を調べる。Fig.4 の場合では、有効なデータの左右端(3D ライダーから見て)が左から3番目と11番目に当たるため、セクターサイズは27度となる。このセクターサイズが精度に与える影響を調査した。 $\eta_{20} \sim \eta_{60}$ においてセクターサイズ毎にデータを抽出し、R²および Slope のセクターサイズによる変化を調査した結果をFig.5に示す。この結果から、観測精度は有効データ数よりもむしろセクターサイズに強く依存することが分かる。

The Carbon Trust [3]に提案された KPI である R² が 0.97 以上を満たすのは、セクターサイズ 39 度以上の場合であるが、Simon ら [4]によると、セクターサイズ 30 度でも観測精度に問題がない。本研究では、風速・風向の算出に用いる 15 秒値を有効なデータとみなすための判定基準は、有効な計測データ数 3 個以上(最小二乗法を用いる場合の最小データ個数)かつセクターサイズ 30 度以上を満たす場合と提案した。

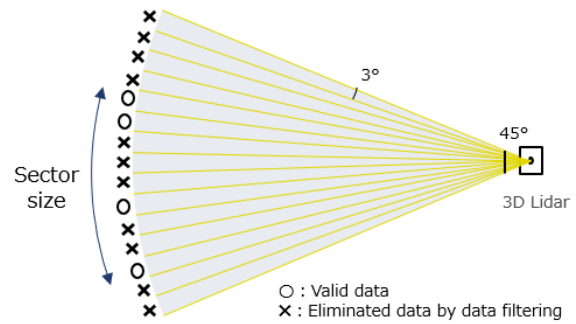


Fig.4 Schematic of sector size (top view)

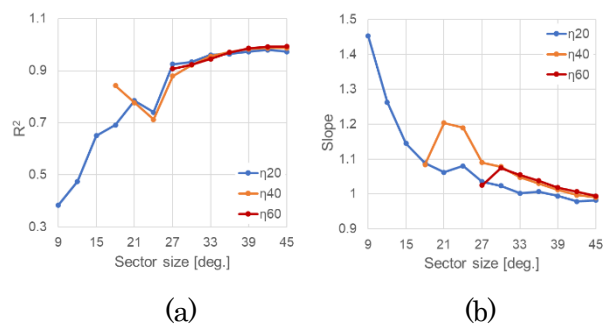


Fig.5 Relationship between sector size and (a) R² and (b) slope

また、この判定基準がデータ取得率への影響を調べるため、冬から初夏にかけての6か月間の計測値におけるセクターサイズ毎の出現頻度(降水量別、降雪量別)を調査した。その結果、セクターサイズ30度以上のときのデータ取得率が99.64%であり、データ取得率に与える影響が小さいことを確認した。

(c) 10分値算出時の閾値の検討

更に、10分値算出時に、有効なデータとみなした15秒値の個数を机上で間引いて算出される10分平均値の変化を調査した。どのくらいのデータを間引いたかを15秒値の閾値検討時と同様に η_x で表す。 $\eta_{2.5} \sim \eta_{80}$ までの観測精度の変化をTable4に示す。The Carbon Trust [3]の Best practice である Slope 0.98~1.02、R²>0.98 (Table6 参照)を満たすのは η_{10} 以上のときであった。今、式(1)における全データ数はタイミングにより34~36個であるので、 η_{10} 以上のときの有効データ数は4個以上に当たり、時間に換算すると1分以上となる。本研究では、算出される10分値を有効なデータとみなす判定基準は、有効な15秒値が4個以上ある場合と提案した。

Table 4 Correlation parameters between η_{100} and $\eta_{2.5} \sim \eta_{80}$ for 10-min-averaged wind speed

	Slope	Offset	R ²	RMSE	Data record
η_{80}	1.000	0.003	1.000	0.054	465
η_{60}	1.000	0.002	0.999	0.110	465
η_{40}	1.000	0.003	0.995	0.219	465
η_{20}	1.007	-0.045	0.995	0.236	465
η_{10}	1.006	-0.057	0.989	0.339	465
η_5	1.012	-0.088	0.979	0.464	465
$\eta_{2.5}$	1.012	-0.116	0.959	0.663	465

(d) システム稼働率および処理後データの取得率

最後に、本研究により提案した有効データとみなす判定基準を適用して取得した 10 分値において、The Carbon Trust による KPI の例[3]に倣って、システム稼働率および処理後データ取得率を Table5 に示す。全期間ではそれぞれ 99.50%、96.39%であり、月毎ではそれぞれ 98.03%以上、90.04%以上であり、いずれの KPI でも Stage 3 の基準を満たした。

Table5 System Availability and Post-processed Data Availability

Overall	
OSA _{CA}	99.50%
OPDA _{CA}	96.39%
Month 1	
MSA _{1M}	100.00%
MPDA _{1M}	96.86%
Month 2	
MSA _{1M}	98.03%
MPDA _{1M}	96.19%
Month 3	
MSA _{1M}	100.00%
MPDA _{1M}	90.04%
Month 4	
MSA _{1M}	98.99%
MPDA _{1M}	96.91%
Month 5	
MSA _{1M}	100.00%
MPDA _{1M}	99.49%
Month 6	
MSA _{1M}	100.00%
MPDA _{1M}	98.57%

3.3 風況塔観測値を用いた精度検証

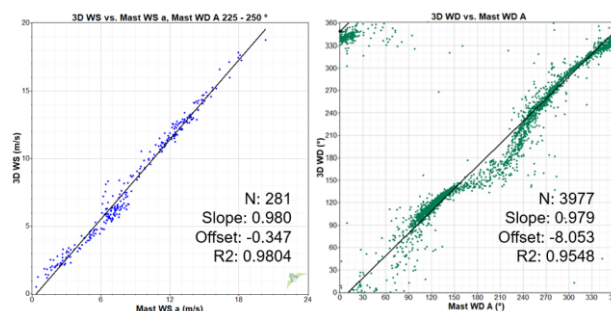
Fig.6 に本研究により提案した有効データとみなす判定基準を適用して取得した 10 分値と風況塔観測値の 10 分平均風速と風向の相関図を示す。風速の相関においては、3D ライダー計測範囲において海風を仮定できる 225~250 度からの風向のみを対象とした。風速では Slope は 0.980、R² は 0.980 であり、Table6 に示す Best practice を満たした。風向では Slope は 0.979、R² は 0.9548 であり、最低要件 Minimum を満たした。

尚、セクターサイズおよびデータ個数の閾値を適用せずに 10 分平均値を算出した場合では精度が低下し、風速では Slope は 0.967、R² は 0.9599、風向では Slope は 0.963、R² は 0.939 であり、いずれも最低要件 Minimum も満たさなかった。

4. 結論

本研究では、洋上風況を精度よく計測するために、データ取得率とセクターサイズが 3D スキャニングライダーの観測精度に与える影響を調べた。スキャン毎におけるセクターサイズが 30 度以上かつデータ取得数が

10%以上の場合、10 分平均風速と風向に対する高い観測精度を有することを明らかにした。



(a) Wind speed (b) Wind direction

Fig.6 Comparison of wind conditions between 3D LiDAR and met mast with criteria

Table6 KPI related to accuracy verification [3]

KPI	Definition	Acceptance Criteria	
		Best Practice	Minimum Stage 2, only
Xmws	Mean Wind Speed – Slope	0.98 – 1.02	0.97 – 1.03
R2mws	Mean Wind Speed – Coefficient of Determination	>0.98	>0.97
Mmwd	Mean Wind Direction – Slope	0.97 – 1.03	0.95 – 1.05
OFFmwd	Mean Wind Direction – Offset	< 5°	< 10°
R2mwd	Mean Wind Direction – Coefficient of Determination	> 0.97	> 0.95

謝辞

本研究にあたり、調査実施近隣地区の各自治会および関係者の皆様にご協力をお願いした。ここに記して心から謝意を表す。

参考文献

[1] A. Yamaguchi and T. Ishihara, A new motion compensation algorithm of floating lidar system for the assessment of turbulence intensity, *J. Phys.: Conf. Ser.* 753 072034, 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] The Carbon Trust, “OWA Roadmap for the Commercial Acceptance of Floating LiDAR Technology, Version 2.0”, 2018

[4] E. Simon, M. Courtney, (2016). A Comparison of sector-scan and dual Doppler wind measurements at Høvsøre Test Station – one lidar or two? DTU Wind Energy. DTU Wind Energy E, Vol.. 0112