

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

A study of offshore wind assessment using dual-Doppler scanning lidars

渡邊 慶一郎^{*1}

高桑 晋^{*2}

邊見 力^{*2}

石原 孟^{*3}

Keiichiro WATANABE Susumu TAKAKUWA Chikara HEMMI Takeshi ISHIHARA

^{*1} Japan Renewable Energy Co.,Ltd., 6-2-31 Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106-0032, Japan
Fax:+81-3-6455-4897, E-mail: kwatanabe@jre.co.jp

^{*2} Japan Renewable Energy Co.,Ltd., 6-2-31 Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106-0032, Japan

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

Abstract

In this study, wind climate assessment for offshore wind is conducted using dual-Doppler scanning lidars and validated by a met mast mounted on a break water. The data filtering for dual-Doppler scanning lidars are proposed and overestimation of the standard deviation is improved by removing abnormal data with 3 σ filter. It is also found that the measurement accuracy is not affected if 60 or more 1-second data are used to calculate 10 minutes statistical values. A method is then proposed to measure wind speeds and directions at multiple altitudes by switching the target height at 20-second intervals. It is indicated that the measured wind speed, wind direction and turbulent intensity in this way show good agreement with those calculated using 600 seconds data. Finally, the dual-Doppler scanning lidar measurements are validated by a cup anemometer and a wind vane mounted on the met mast. The coefficients of determination for wind speed and direction are larger than 0.98 and the slopes for wind speed and wind direction is 1. The 90 percentile values of turbulence intensity for each wind speed bin show favorable agreement with those obtained from the cup anemometer and the relative error in standard deviation is 3.3%. It is obvious that dual-Doppler scanning lidars can accurately measure wind speed, wind direction and turbulence intensity at multiple altitudes for offshore wind.

キーワード：デュアルスキャニングドップラーライダー，風況観測，乱流強度評価

Key Words：Dual-Doppler scanning lidars, Wind climate assessment, Turbulence intensity measurement

1. はじめに

近年、日本では洋上風力発電の導入に向けて期待が寄せられている。風力発電所を建設する際には年間発電量と疲労荷重を評価するために、正確な風況観測が必要である。発電量の予測では、対象海域の複数高度の風速・風向の観測が必要であり、また風力発電機の疲労評価では、風速・風向に加えて乱流強度を観測する必要がある。

洋上の風況観測方法としては、現在3つの方法がある。洋上風況観測塔による観測¹⁾は、複数高度の風速・風向・乱流強度を正確に計測できる反面、設置には時間とコストがかかる課題がある。次に、浮体式ライダーによる観測は、洋上風況観測塔に比べて設置時間が短く、洋上風況観測塔より安価である反面、浮体動揺による補正²⁾が必要であり、また鉛直ライダーによる乱流強度を過大評価する問題がある³⁾。最後に、スキャニングドップラーライダー（以下、スキャニングラ

イダー）による観測では、洋上風況観測塔と比較して安価であり、風速と風向を高い精度で観測できること^{4,5)}が示されている。

Smithら⁶⁾は、スキャニングライダーの計測結果と風況観測塔に設置された三杯風速計（高さ40~100mまで20m刻み）の24時間分のデータとの比較を行い、各観測高度での風速の決定係数が0.96-0.98であり、良い相関を示した。OWA Report⁷⁾では、2機種のスキャニングライダーを用いてそれぞれPPI観測（Planned-Position Indicator）⁸⁾を行い、10km以上距離が離れた洋上の鉛直ライダーとシングルおよびデュアルスキャニングライダーによる計測との比較を行った。その結果、デュアルスキャニングライダーにより計測された風速の決定係数は0.99であり、シングルスキャニングライダーにより計測された風速の決定係数0.90と比べ、高い相関が示され、平均風速の絶対誤差も最大1.1%低減することも確認された。SimonとCourtney⁹⁾は、スキャニングライダーを用いて、デュアルスキャニングライダーによるFIXEDモード観測（定点観測）とシングルスキャニングライダーによるPPI観測を行い、1~1.5km程度離れた風況観測塔に設置された三杯式風速計（高さ116.5m）と矢羽根式風向計（高さ100m）により計測

*1 ジャパン・リニューアブル・エナジー(株)事業開発本部（〒106-0032 東京都港区六本木6丁目2番31号 六本木ヒルズノースタワー15階）E-mail: kwatanabe@jre.co.jp

*2 ジャパン・リニューアブル・エナジー(株)事業開発本部

*3 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授

（原稿受付：2021年5月6日）

された風速と風向と比較を行った。シングルとデュアルスキャニングライダー計測では、風速・風向とも決定係数 0.99 であり、十分な精度が得られたが、シングルスキャニングライダー計測に比べ、デュアルスキャニングライダーにより計測された風速の時系列が風況観測塔の観測結果との一致性が高いことが示されている。以上から、スキャニングライダーにより風速・風向を高い精度で観測でき、またシングルスキャニングライダー計測よりデュアルスキャニングライダー計測の方が風速・風向の観測精度が高いことが分かる。しかし、シングルスキャニングライダーによる計測では乱流強度の計測結果を示した研究がなく、デュアルスキャニングライダーを用いた Newsom ら¹⁰⁾の研究では平均風速と風向のみを示した。また乱流強度の計測を行った Pena と Mann の論文¹¹⁾では、複数高度の乱流強度の計測を行っておらず、風況観測塔から得られた乱流強度との比較により、デュアルスキャニングライダーにより計測された乱流強度の評価方法を提案していない。

そこで、本研究では、洋上の風速・風向・乱流強度を高精度に観測するために、スキャニングライダー観測のデータフィルタリングおよび複数高度の風速・風向・乱流強度の計測方法を提案する。そして、デュアルスキャニングライダーを利用した計測を行い、風況観測塔（以下、マスト）により計測された風速・風向・乱流強度の観測値を比較することにより、その精度検証を行う。

2. 風況観測と計測方法の概要

第2章では、まずマストおよび2台のスキャニングライダーを用いた風速、風向と乱流強度計測の概要、スキャニングライダーによる各種観測モードの概要を2.1節で示す。次に、視線風速から水平風ベクトルへの変換方法およびライダーのデータフィルタリングを2.2節で説明する。

2.1 風況観測の概要

本研究は、離岸距離約1kmの防波堤上に設置したマストに向けて、2台のスキャニングライダーのレーザービームを照射して、デュアルスキャニングライダーによる風況観測を行った。スキャニングライダーは Leosphere 社の WINDCUBE200S を用いた⁸⁾。

Fig.1 にはマストとスキャニングライダーの設置位置を示し、Fig.2 には2台のスキャニングライダーの設置状況を示す。風に起因する振動による観測時の照射角度のズレを防ぐために、200S②) を建物屋上、200S

①) をコンクリートで作成した架台の上に設置した。2台のスキャニングライダーをマストに向かって照射する際に、マストの風速計を対象に測量を行い、また、スキャニングライダーが照射点（マストの風速計）から誤差 2m 以内に照射できるように、ハードターゲットに対して、スキャニングライダーの方位角と仰角のオフセットの調整を行った。

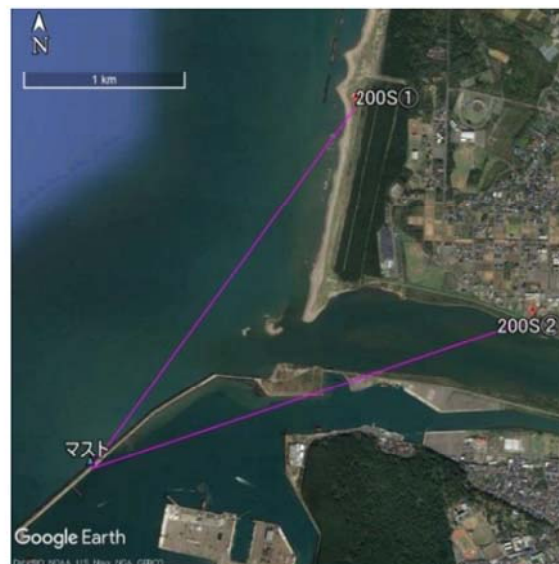


Fig.1 Locations of met mast and two scanning Doppler lidars



(a) 200S① (b) 200S②

Fig.2 Overview of two scanning Doppler lidars

デュアルスキャニングライダーによる乱流強度の計測精度を検証するため、三杯式風速計のサンプリングレート 1Hz と同じように設定し、FIXED モード観測（定点観測）を行った。観測期間は2020年2月17日から2020年3月12日の約1か月間とした。Table 1 にはマストに設置した三杯式風速計矢羽根式風向計の仕様および設置高度およびサンプリングレートを示し、Table 2 にはスキャニングライダー観測時の設定値（ゲート長、積分時間、レーザー照射角度・距離等）を示す。

Table 1 Description of met mast

Instrument	Cup anemometer (Theis)
	Wind vane (NRG)
Measurement height above mean sea level	Cup anemometer : 50m
	Wind vane : 48.5m
Sampling rate	1Hz

Table 2 Description of dual-Doppler scanning lidars

Scan type	FIXED
Range resolution	50m
Accumulation time	1000ms
Sampling rate	1Hz
Azimuth angle	200S① : $\theta_1 = 215.82^\circ$
	200S② : $\theta_2 = 251.41^\circ$
Elevation angle	200S① : $\varphi_1 = 0.77^\circ$
	200S② : $\varphi_2 = 0.84^\circ$
Angle between azimuth angle of 200S① and ②	35.59°
Horizontal distance	200S① : 2810m
	200S② : 2894m

風力発電機の疲労評価では、風速と乱流強度の鉛直分布が必要であり、複数高度の風速を観測する必要がある。スキャニングライダーを用いた観測方法としては、上空の風速を観測する Doppler Beam Swinging (DBS) モード、鉛直断面の風を観測する Range-Height Indicator (RHI) モード、水平断面の風を観測する PPI モード、1 点の射線上を定点観測する FIXED モードがある (Fig.3) ⁸⁾。

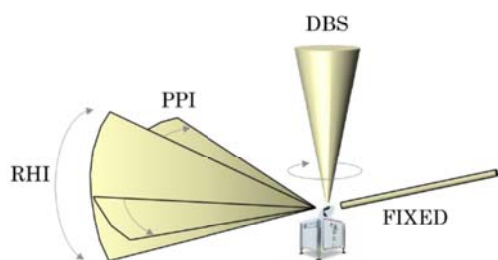


Fig.3 Schematic of scanning Doppler lidar measurement

通常、ウィンドシアの観測は RHI モード、1 高度の乱流強度の観測は FIXED モードを用いるが、本研究では、Fig.4 に示すように 10 分の間に観測高度を最適な時間間隔で切り替えながら、FIXED モードで観測することにより、発電量の予測と疲労荷重の評価に必要な複数高度における風速・風向・乱流強度の計測を可能にすると共に、最適な切り替え時間間隔 (3.2 節) を提案し、マストの観測データを比較することによりその

計測精度の検証を行う。

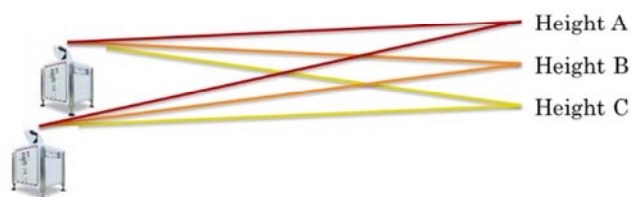


Fig.4 Schematic of multiple altitude measurement using scanning Doppler lidar

2.2 水平風速の算定とデータフィルタリング

デュアルスキャニングライダーの視線風速から風速ベクトルへの変換 ⁸⁾ は式(1)に示す。ここでは、レーザービーム照射の仰角がいずれのスキャニングライダーでも 0° に近いいため、鉛直速度成分を無視した。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\theta_1 \cos\varphi_1 & \cos\theta_1 \cos\varphi_1 \\ \sin\theta_2 \cos\varphi_2 & \cos\theta_2 \cos\varphi_2 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} U_{r1} \\ U_{r2} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 u は水平風速の東西成分、 v は水平風速の南北成分、 U_{r1} は 200S① の視線風速、 U_{r2} は 200S② の視線風速である。

データ取得率 η_{10} はフィルタリング後の 10 分間の有効データ数を 10 分間の総数で除した値で定義する。

$$\eta_{10} = \frac{\text{Number of Filtered 10-min data}}{\text{Number of 10-min data}} \quad (2)$$

稼働率はスキャニングライダーが稼働していた時間を示す。フィルタリングの適用がない時の 10 分間のデータ数を 10 分間の総数で除した値で定義する。

本研究では、以下の①から④に示すデュアルスキャニングライダーの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 1 秒風速データを除外する (以下、 3σ フィルタ)。
- ③ 2 台のスキャニングライダーのデータ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。

① はメーカーの機器校正に基づくデータ信頼性のフィルタであり、スキャニングライダー計測時のノイズの影響を有効に除去するために、メーカーの推奨値を採用した。② の 3σ フィルタは、製造業などの品質管理における異常値の除去方法として一般的であり、スキャニングライダーデータフィルタとして適用した。 3σ フィルタの影響については後述する。③ はデュアルスキャニングライダーのみに適用するフィルタである。④ については、10 分間に含有される 1 秒データの数が

60 個以上含まれていれば、計測精度に影響を与えないことを 3.2 節に示す。

Fig.5 に 3σ フィルタによる異常値の除去例を示す。Table 3 には、デュアルスキャニングライダーとマストの 10 分値の取得率を示す。マストのデータ取得率は 98% である。一方、シングルスキャニングライダーのデータ取得率は 92% であり、マストのデータ取得率より低い。これは冬季では水温と気温の温度差による霧の発生や降雪の影響によるものである。またデュアルスキャニングライダーのデータ取得率は 86% である。これはデュアルスキャニングライダーでは 2 台で同時刻のデータが存在する必要があるためである。

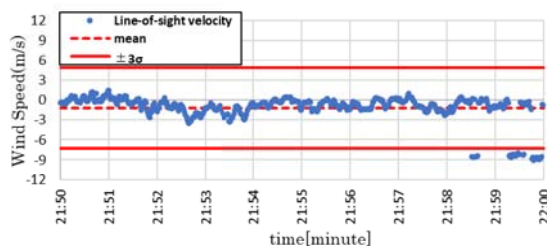


Fig.5 Example of abnormal values removed by 3σ filter

Table 3 Comparison of post-processed data availabilities between Dual SL and met mast

Instrument	System availability(%)	Post-processed data availability η_{10} (%)	Number of 10min data
Met mast	100	98	3459/3546
Dual SL	97	86	3065/3546

観測データに含まれる異常値を除去する 3σ フィルタを適用する場合としない場合の結果の影響を調べ、Table 4 と Table 5 に示す。 3σ フィルタ適用前後のデータ取得率を低下させることなく、標準偏差の過大評価を大きく改善されていることが分かる。

Table 4 Post-processed data availabilities with and without 3σ filter

Filtering	Post-processed data availability η_{10} (%)	Number of 10min data
w/o 3σ filter	86	3065/3546
with 3σ filter	86	3063/3546

Table 5 Reduction of error in standard deviation by 3σ filter

Instrument	Wind speeds in the range of 3 to 25 m/s	
	Standard Deviation (m/s)	Relative error (%)
Cup anemometer	0.90	—
Dual SL w/o 3σ filter	0.96	7.6
Dual SL with 3σ filter	0.93	3.3

本研究では 10 分間の平均値を用いた 3σ フィルタを採用しているが、観測の環境によっては中央値を用いる場合も考えられ、平均値を用いるか中央値を用いるかは、観測環境によって決定が必要である。

3. 観測結果と精度検証

第 3 章では、まず取得率の高いマストデータを用いて、複数高度の計測を行う際の切り替え時間間隔を調べる (3.1 節)。複数高度を計測する場合、1 高度あたりのデータ数は減少するため、有効データ数による計測精度の影響を調べる (3.2 節)。3.3 節では、実際、デュアルスキャニングライダーを用いて計測された風速、風向・乱流強度はマストの観測結果と比較することにより、本研究で提案したデータフィルタリングおよび切り替え時間間隔の有効性を示す。

3.1 切り替え時間間隔の影響

本節では取得率の高いマストデータを用いて、3 つの高度の計測を行う際の切り替え時間間隔の影響を調べた。Fig.4 に示す 3 つの高度 A、B、C (例えば、ブレード上端、ハブ高さ、ブレード下端) の風況を観測するために、10 分の間に FIXED モードを適切な時間間隔で切り替えして各高度での計測を行う必要がある。その際には切り替え時間間隔を最適化する必要がある。

Fig.6 には、データ取得率の高いマストの観測値を任意の時間間隔で分割することにより、複数高度の計測を模擬した。切り替え時間間隔を模擬するために、Fig.6 に示すように、600 秒の連続データを 10 秒、20 秒、50 秒、200 秒の間隔で分割し、切り替え時間間隔の影響を調べた。その際には切り替え時間間隔にはスキャニングライダーのスキャナヘッドの回転時間を考慮していない。

しかし、実際スキャナヘッドが回転して観測高度を切り替える際にレーザーを照射しない時間があり、その時間は 0.7 秒である。3 高度観測 1 サイクルで合計すると、2.1 秒間は観測できない。さらに、デュアルスキャニングライダーでは 2 台で同時刻かつ同じ観測高度を計測する必要があり、機差によって発生する観測高度のズレを防止するため、照射しない時間を約 3 サイクルに 1 回、0.7 秒追加することで調整している。そのため、3 高度観測 1 サイクルあたり、最短 2.1 秒間、各サイクルに 1 回調整する場合に最大 2.8 秒間は観測していない時間が発生する。Table 6 に、切り替え時間間隔ごとの 3 高度観測 1 サイクルあたりのシステム稼働率を示す。なお、観測していない時間が 2.8 秒間の時を最小、2.1 秒間の時を最大としてシステム稼働率を示

す。Table 6 に示すように、1 秒、3 秒、5 秒での切り替え時間間隔ではシステム稼働率が 90%以下であり、Carbon Trust 社が浮体式ライダーの評価基準として提案した Key Performance Indicator (以下、KPI)¹²⁾における月平均システム稼働率の Stage2 以下であり、最低限 Stage2 以上、すなわち 90%以上のシステム稼働率を確保するためには、10 秒以上の切り替え時間間隔が必要であることが分かる。そのため、本節では 10 秒、20 秒、50 秒、200 秒の間隔で分割して検証を行った。

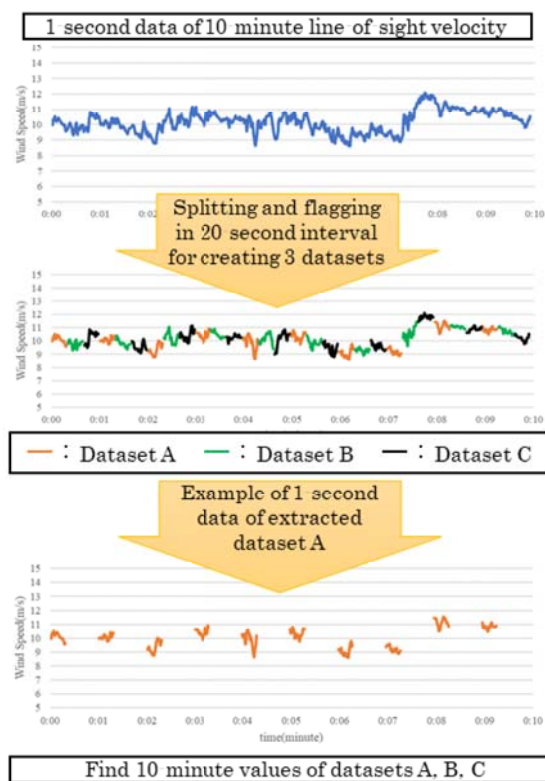


Fig.6 Schematic of splitting and extracting of data

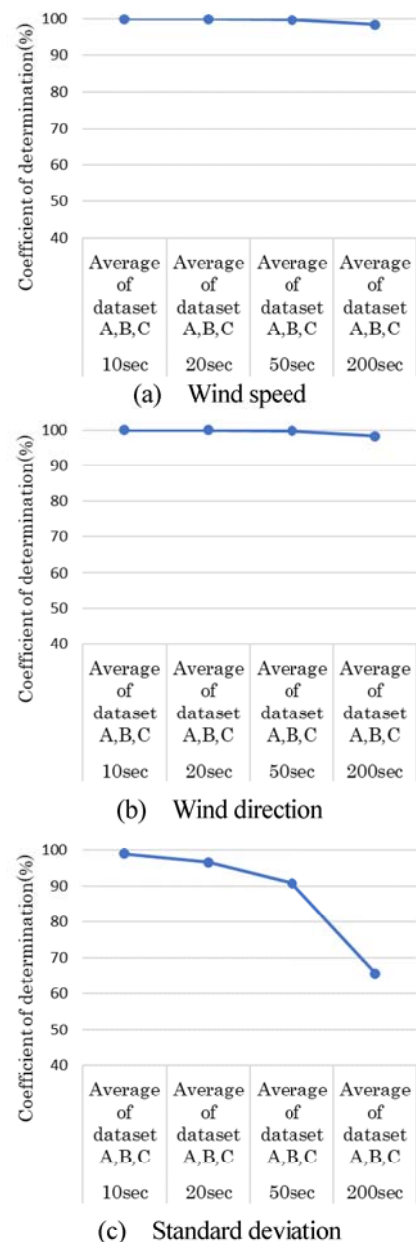
Table 6 System availability of three height measurements

Switching interval	System availability (%)	
	Minimum	Maximum
1sec	51.7	58.8
3sec	76.3	81.1
5sec	84.3	87.7
10sec	91.5	93.5
20sec	95.5	96.6
50sec	98.2	98.6
200sec	99.5	99.7

切り替え時間間隔の最適値は、計測精度を基準にして評価した。マストの観測データを用いて最適な切り替え時間間隔、すなわち、最適な分割長を選定した後

に、スキヤニングライダーの観測データにも適用して、マストの観測値と比較することにより、3.3 節でその精度検証を行う。

Fig.7 には各分割長における風速、風向、標準偏差、乱流強度の 10 分値と、600 秒の連続データにより求めた 10 分値との間の決定係数および取得率を示す。なお、決定係数と取得率は、データセット A,B,C からそれぞれ求めた決定係数を平均した。風速・風向については、いずれの分割長でも大きな差は見られず、決定係数が 1 に近い。一方、標準偏差と乱流強度については、分割長 10 秒、20 秒の場合に決定係数が 0.9 以上であるが、分割長、すなわち、切り替え時間間隔が長くなると、決定係数が低下することが分かる。



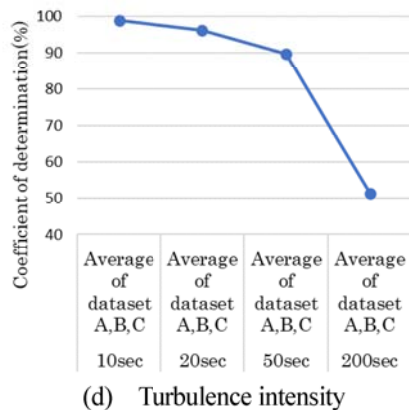


Fig.7 Coefficients of determination of wind speed, wind direction, standard deviation and turbulence intensity for each switching interval

Fig.8には、風速ビン毎の乱流強度の分割長による変化を示す。10秒、20秒分割の場合には、風速ビン毎の乱流強度が600秒の連続データから求めた乱流強度とよく一致するが、一方、200秒分割の場合には、風速ビン毎の乱流強度が過小評価されていることが分かる。以上のことから、本研究では、最適な分割長、すなわち、最適な切り替え時間間隔として10～20秒を提案した。

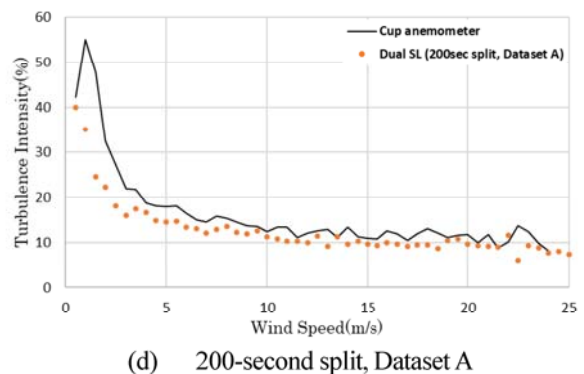
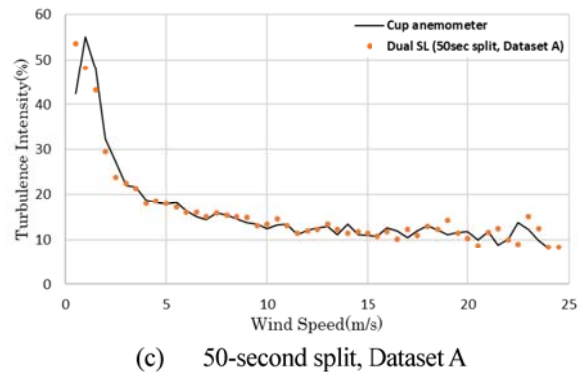


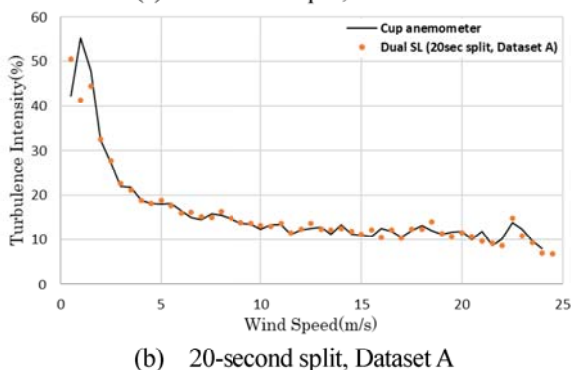
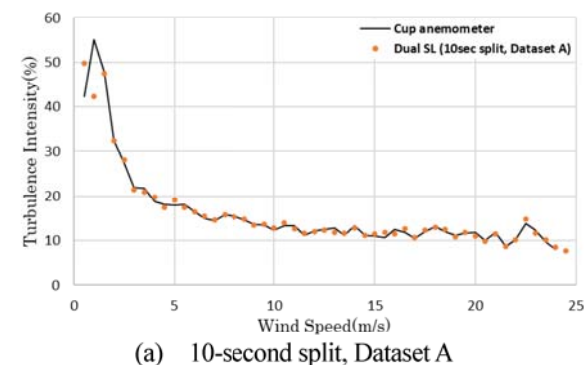
Fig.8 Variation of turbulent intensity with wind speed for each switching interval

3.2 有効データ数の影響

本節では取得率の高いマストデータを用いて、有効データ数の影響を調べた。シアを計測するため、スキヤニングライダーを用いて10分間で複数高度を計測する場合、1高度あたりのデータ数が減少し、加えてエアロゾルの影響とスキャナヘッドの移動時間を考慮すると1高度あたりの10分間に含まれる1秒データの数は減少する。そのため、有効データの数計測精度に影響を与える。その影響を定量的に調べるために、データ取得率の高いマスト観測値を用いた。マストデータの1秒データを $30 \cdot 42 \cdot 60 \cdot 120 \cdot 180$ 個になるように再サンプリングし、元の600秒の10分値の相関を求め、比較した。3高度の計測を考慮し、評価するデータ数は180個までとした。

Table 7に示すように、風速と風向の決定係数についてはいずれのサンプリングレートでも98%以上であることが分かる。一方、標準偏差と乱流強度の決定係数については、Table 8に示すように、サンプリングレートが10秒以下、すなわち、データ数が60秒以上であれば、決定係数97%以上であることが分かる。

スキヤニングライダーを用いた観測では、気象要因によって、有効データ数は少なくなることがある。高い観測精度を保ちつつ、取得率の低減を防ぐため、本研究では、1秒の有効データ数が60個以上、すなわち、



60 秒以上のデータがあれば、10 分間統計値を求めることとした。

Table 7 Slope, offset and R^2 of wind speed and wind direction for each number of 1-sec data

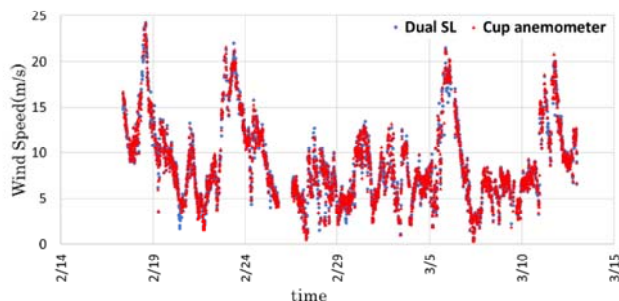
Number of 1-sec data	Wind Speed		Wind Direction		
	Slope	R^2	Slope	Offset	R^2
30	1.00	1.00	0.99	3.07	0.98
42	1.00	1.00	1.00	0.66	1.00
60	1.00	1.00	0.99	1.75	0.99
120	1.00	1.00	1.00	0.56	1.00
180	1.00	1.00	1.00	0.58	1.00

Table 8 Slope, offset and R^2 of standard deviation and turbulence intensity for each number of 1-sec data

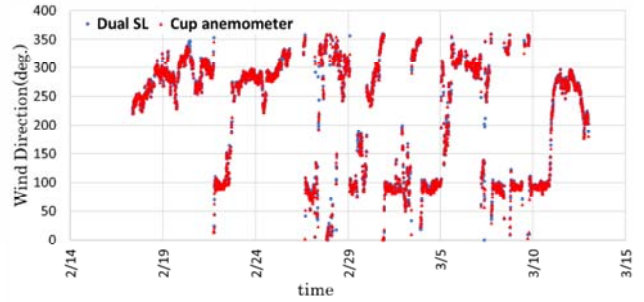
Number of 1-sec data	Standard Deviation			Turbulence Intensity		
	Slope	Offset	R^2	Slope	Offset	R^2
30	0.95	0.05	0.94	0.95	0.01	0.93
42	0.96	0.04	0.96	0.96	0.01	0.96
60	0.97	0.03	0.97	0.98	0.00	0.97
120	0.99	0.01	0.99	0.99	0.00	0.99
180	0.99	0.01	0.99	1.00	0.00	0.99

3.3 デュアルスキャニングライダーの計測精度の検証

本節ではデュアルスキャニングライダーの観測データを用いて、マストの観測データと比較することにより、デュアルスキャニングライダーの計測精度を評価する。Fig.9 と Fig.10 には、デュアルスキャニングライダーにより観測された風速・風向の時系列データとマストの観測データとの相関図を示す。風速・風向ともマストの観測値とよく一致し、風速・風向の決定係数はそれぞれ 0.99 と 0.98 であり、傾きは 1 である。これらの値は、KPI の Best Practice に相当する。



(a) Wind Speed



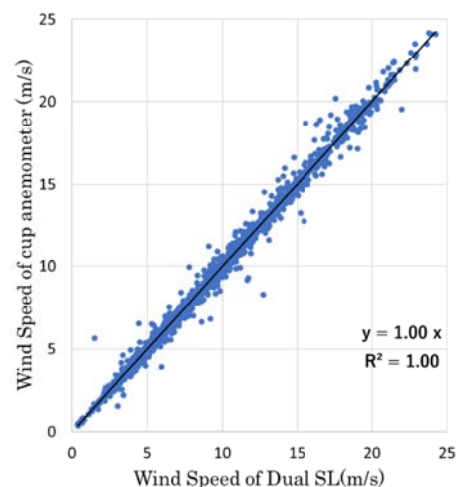
(b) Wind Direction

Fig.9 Comparison of time series of wind speeds and wind directions measured by Dual SL, cup anemometer and wind vane

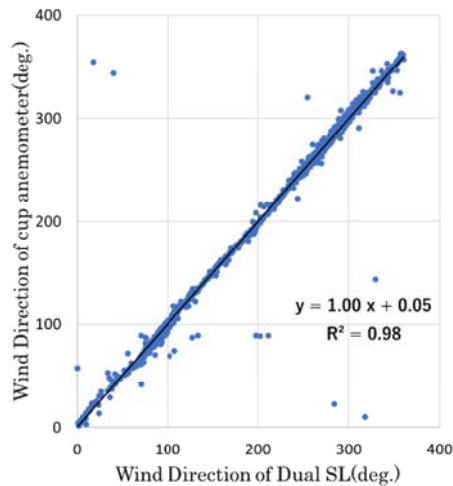
Table 9 には平均風速と標準偏差およびその相対誤差を示す。デュアルスキャニングライダーにより計測された平均風速はマストの値とよく一致し、その相対誤差は 0.1% である。また、デュアルスキャニングライダーにより計測された標準偏差は、風車稼働範囲(風速 3–25m/s)において、マストの値と一致し、相対誤差は 3.3% である。デュアルスキャニングライダーにより計測された平均風速の相対誤差は 0.1% であることを考えると、デュアルスキャニングライダーにより計測された乱流強度は、標準偏差と同じように高い計測精度を有することが分かる。

Table 9 Mean wind speed, standard deviation and their relative errors measured by Dual SL and cup anemometer

Instrument	Wind speeds in the range of 3 to 25 m/s			
	Wind speed (m/s)	Relative error (%)	Standard deviation (m/s)	Relative error (%)
Cup anemometer	9.0	—	0.90	—
Dual SL	9.0	0.1	0.93	3.3



(a) Wind Speed



(b) Wind Direction

Fig.10 Comparison of 10-minute average wind speeds and directions measured by Dual SL, cup anemometer and wind vane

風力発電機の疲労荷重評価では、風速ビン毎の乱流強度の90%タイル値が利用されている。本研究では風速ビンごとにおける乱流強度の90%タイル値を Fig.11 に示した。風速は3m/s以下の低風速範囲を除き、デュアルスキャニングライダーにより計測された乱流強度の90%タイル値はマストの値とよく一致することが分かる。

以上から、FIXED モードを用いた1高度におけるデュアルスキャニングライダー計測は、風速・風向については、マストの観測と同程度の精度を有し、評価指数 KPI は Best Practice に相当する。また標準偏差および乱流強度については、風速ビン毎におけるデュアルスキャニングライダーの観測値もマストの観測値とよく一致し、高い計測精度を有することが分かる。

最後に、デュアルスキャニングライダーにより3つの高度を計測する際の精度を明らかにするために、本研究で提案した20秒間隔切り替え（すなわち、20秒分割）をデュアルスキャニングライダーデータに適用し、マストから得られた連続データとの比較を行った。

Table 10 には、3つの高度 A、B、C の計測を模擬した20秒分割のデュアルスキャニングライダーデータ (Dataset A, B, C) から得られた風速・風向とマストの600秒連続データから得られた風速・風向との傾き、オフセット（度）、決定係数を示す。全ての評価指数 KPI は Best Practice に相当することが分かる。

Fig. 12 には、3つの高度 A、B、C の計測を模擬した20秒分割のデュアルスキャニングライダーデータから得られた乱流強度の90%タイル値とマストの600秒連続データから得られた乱流強度の90%タイル値の比較を示す。3つのデータセットにおける乱流強度の90%タイル値は、マストの連続データから求めた値とよく一致することが分かる。

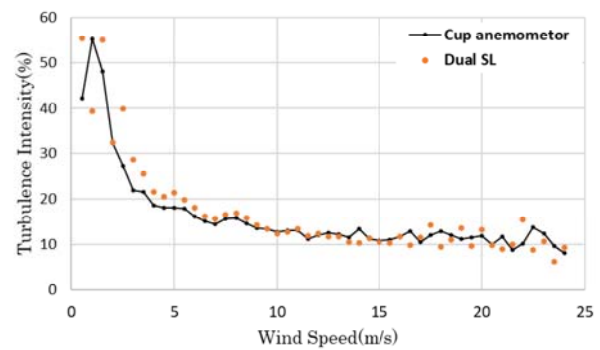


Fig.11 Comparison of 90 percentile values of turbulence intensity measured by Dual SL and cup anemometer

このことから、20秒間隔で切り替えながら、デュアルスキャニングライダーにより計測された3つのデータセットにおける風速・風向・乱流強度は、マストの観測値とよく一致し、3つの高度を模擬した計測においても、デュアルスキャニングライダーは高い計測精度を有することが分かる。

Table 10 KPI of wind speeds and directions from three datasets measured by Dual SL

Dataset	Wind Speed		Wind Direction		
	Slope	R ²	Slope	Offset	R ²
Dataset A	1.00	0.99	1.00	-0.44	0.99
Dataset B	0.99	0.99	1.00	0.36	0.98
Dataset C	0.99	0.99	1.00	0.25	0.98

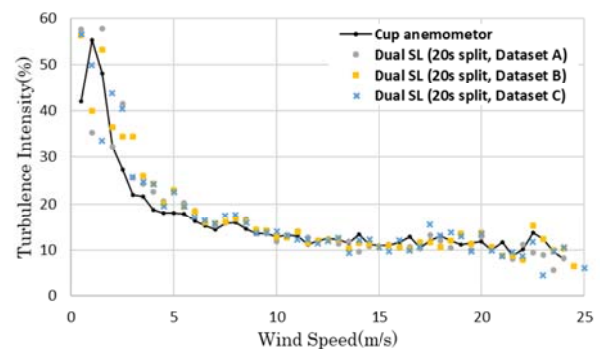


Fig.12 Comparison of 90 percentile values of turbulence intensity from three datasets measured by Dual SL and that by cup anemometer

一般に、ドップラーライダーは雨、雪等の気象要因によりデータ取得率が低下するが、既往研究よりスキャニングライダーのレーザー照射距離が4km内であれば、雨と雪による長期観測（1年）のデータ取得率への影響は少ないことが示されたため¹³⁾、本研究では雨、雪等の気象要因によるデュアルスキャニングライダーの観測精度への影響の評価を省略した。

本研究ではマストの風向・風速計に向かって照射し

た1高度のデュアルスキャニングライダー観測データを3つに分割して3高度の計測を模擬し、その観測精度を評価したが、今後、実際にデュアルスキャニングライダーによる3高度の観測を行い、マストにおける3高度の観測データと比較することにより、その精度検証を行う予定である。

4. まとめ

本研究では、デュアルスキャニングライダーを用いた洋上の風速・風向・乱流強度を高精度に計測する手法を提案し、マストにより計測された風速・風向・乱流強度の観測値を比較することにより、その計測精度を検証した。本研究から得られた結論は以下の通りである。

1. 10～20秒間隔で観測高度を切り替えることにより、複数高度の計測を行う方法を提案した。このように測定された風速、風向、乱流強度の値は、600秒のデータから求めた値とよく一致することを示した。
2. 本研究では、デュアルスキャニングライダー計測のためのデータフィルタリングを提案した。3 σ フィルタの適用により標準偏差の過大評価が大きく改善された。また、シア計測を目的に3高度観測することにより1高度あたりのデータ数の減少に対応するために、10分間統計値を求める条件として1秒データが60個以上含まれていれば、計測精度に影響を与えないことをマストデータとデュアルスキャニングライダー観測データから示した。
3. FIXEDモードを用いたデュアルスキャニングライダーにより計測された風速・風向の評価指数KPIはBest Practiceに相当し、標準偏差の相対誤差は3.3%である。また風速ビン毎の乱流強度はマスト観測値とよく一致し、高い計測精度を有することを明らかにした。

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, pp54-57, 2019.
- 2) A. Yamaguchi, T. 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.
- 3) F. Kelberlau, V. Neshaug, L. Lonseth, T. Bracchi, J. Mann, Taking the motion out of floating lidar turbulence intensity estimates with a continuous-wave wind lidar, Remote Sensing, 12, 898, 2020.
- 4) R. Wagner, M. Courtney, Comparison test of WLS200S-22 (Final), Hovsore Test Site, Denmark, DTU Wind Energy, LCI-046 (EN), 2014.
- 5) J. Goit, A. Yamaguchi, T. Ishihara, Measurement and prediction of wind fields at an offshore site by scanning Doppler LiDAR and WRF, Atmosphere 2020, 11, 442, 2020.
- 6) D.A. Smith, M. Harris, A.S. Coffey, T. Mikkelsen, H. E. Jørgensen, J. Mann, R. Danielian, Wind lidar evaluation at the Danish wind test site in Hovsore, Wind Energy, 9, 87-93, 2006.
- 7) OWA Report, Remote wind measurements offshore using scanning LiDAR systems, 2014.
- 8) Windcube, https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/WEA-GLO-ERG-cBook-Scanning%20Lidar-B212128EN-C_0.pdf
- 9) E. Simon, M. Courtney, A comparison of sector-scan and dual Doppler wind measurements at Hovsore Test Station – one lidar or two? DTU Wind Energy, DTU Wind Energy E Vol. 0112, 2016.
- 10) R.K. Newsom, L.K. Berg, W.J. Shaw, M.L. Fischer, Turbine-scale wind field measurements using dual-Doppler lidar. Wind Energy 18, 219-235. 2015.
- 11) A. Pena, J. Mann, Turbulence measurements with Dual-Doppler Scanning Lidars, Remote Sensing, 11(20), 2444, 2019.
- 12) The Carbon Trust, OWA roadmap for the commercial acceptance of floating LiDAR technology, Version 2, 2018.
- 13) 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, セッション A, A1-5, 2020.