

# 洋上風況観測におけるシングルスキャニングライダーの有効データ率と観測精度に関する研究

## A study of data availability and measurement accuracy of single scanning LiDAR for offshore wind assessment

間野 晶子<sup>\*1</sup>      上野 晃世<sup>\*2</sup>      糸崎 俊介<sup>\*3</sup>      石原 孟<sup>\*4</sup>  
Akiko MANO      Akiyo UENO      Shunsuke ITOZAKI      Takeshi ISHIHARA

<sup>\*1</sup> Senior Engineer, RENOVA, Inc., Dept. of Eng., 2-2-1 Kyobashi, Chuo-ku, Tokyo 104-0031, Japan

Fax: 03-3516-6261, E-mail: a\_mano@renovainc.com

<sup>\*2</sup> General Manager, RENOVA, Inc., Dept. of Eng.

<sup>\*3</sup> Deputy General Manager, RENOVA, Inc., Dept. of Eng.

<sup>\*4</sup> Professor, The Univ. of Tokyo, Dept. of Civil Eng., 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

### Abstract

In this study, data availability and measurement accuracy for offshore wind assessment using a single Doppler scanning Lidar are investigated. Firstly, the effect of measurement distance as well as rainfall and snowfall on data availability of the Doppler scanning Lidar are examined. The accuracy of measurement for offshore wind speed and direction using a single Doppler scanning Lidar is evaluated, by comparing with those from a met mast. In addition, one year offshore wind measurements are conducted using two single Doppler scanning Lidars to investigate wind climate in a coastal region in Northerly Japan. It is found that the accuracy of 15-second mean wind speed by PPI scan depends on the sector size, and the 10-minute mean wind speed and wind direction are accurate enough when the sector size in each scan sequence is larger than 30 degrees and the number of data acquisition is more than 10%. The vertical and horizontal distributions of offshore wind speed in each wind direction are also analyzed and the effects of onshore topography on offshore wind climate are clarified.

**キーワード** : シングルスキャニングライダー, 有効データ率, 観測精度, 洋上風況観測  
**Key Words** : Single scanning LiDAR, data availability, measurement accuracy, offshore wind observation

### 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。洋上風況を観測するための観測手法は、洋上風況観測タワー、浮体ライダー、スキャニングライダーが挙げられる。洋上風況観測タワーによる観測は、年平均風速、シア、乱流強度など重要な風条件がいずれも高精度で取得できるが、多大なコストが掛かることが課題である。浮体ライダーは、離岸距離に依らず、洋上の任意の場所に設置可能であるが、動揺補正や乱流強度を過大評価する問題があり[1, 2, 3, 4]、また台風などで係留が切れブイが漂流し、数週間から数か月に亘り欠測するリスクがある。スキャニングライダーは、陸上

に設置するため浮体ライダーよりもデータ取得の点でリスクが低い。観測可能範囲は、レーザー到達距離に依り設置場所から数km～十数kmの範囲に限定されるが日本の着床式サイトのような岸に近いサイトでは適用可能な場合が多いと考えられる。

スキャニングライダーによる洋上風況観測は、1台で観測を行うシングルスキャニングライダー（以下、シングルライダー）と、2台で観測を行うデュアルスキャニングライダー（以下、デュアルライダー）の大きく2つに分けられる。シングルライダーでは空間を円弧状に連続的にスキャンすることにより風速・風向を観測する。レーザー視線上の複数箇所を同時に計測できるため、離岸距離 200m 程度からレーザー到達距離までの広い範囲の風況を一度に計測できるという利点がある。しかしながら1回スキャン（スキャンの始まりから終わりまで）の範囲と経過時間に対して時空間一様の風況を仮定する必要がある。また、空間のある1点における乱流強度を観測することは原理的に不可能である。デュアルライダーでは、2台のスキャニ

<sup>\*1</sup> (株)レノバ シニアエンジニア (〒104-0031 東京都中央区京橋 2-2-1 京橋 エドグラン 18F )  
E-mail: a\_mano@renovainc.com

<sup>\*2</sup> (株)レノバ 室長

<sup>\*3</sup> (株)レノバ 副部長

<sup>\*4</sup> 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 5 月 1 日)

シングライダーそれぞれの視線風速の合成ベクトルとして風速・風向を観測する。時空間一様を仮定する必要がなく、カップ風速計と同等のサンプル周期で計測できるため、乱流強度を精度よく観測することが可能である[5]。しかしながらシングライダーと比較してコストが倍となり、また2台の機器がどちらも稼働している必要があるため、シングライダーよりもシステム稼働率や有効データ率が低くなる点に注意が必要である。

そこで、本研究では、シングライダーによる観測に着目し、まずは、レーザー照射における計測距離と降水が有効データ率に与える影響について調べる。次に、1回スキャンにおける水平風速・風向の算出方法を検証し、観測精度と有効データ率の双方からの要求を満足する適切なデータフィルタリングの判定基準を提案する。また、海岸近傍に設置した風況観測タワーによる風速・風向の観測値と比較することにより、シングライダーの精度検証を行うと共に、スキャン範囲の風況の一様性の風向依存性を数値解析を用いて調べる。最後に、2台のシングライダーを用いて、陸上地形が異なる2地点において1年間の洋上風況観測を実施し、本研究で提案した観測手法のシステム稼働率および有効データ率を評価する。また洋上における風速の鉛直と水平方向の分布を調べ、陸上地形が沿岸洋上風況に与える影響を明らかにする。

## 2. シングライダー計測に影響を与える要因の分析

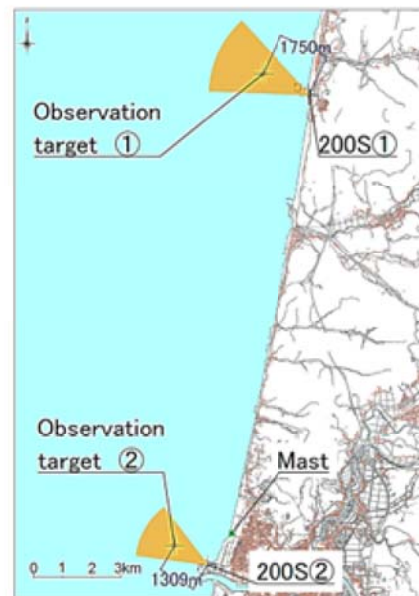
2.1 節では、スキャニングライダーの設置方法、2.2 節では、レーザー照射における計測距離と降水が有効データ率に与える影響を調べる。

### 2.1 設置方法

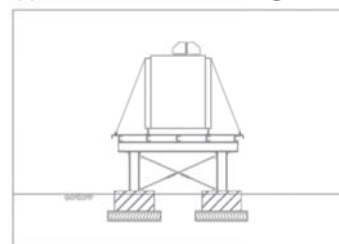
本研究では、2台の Leosphere 社のスキャニングライダー (WINDCUBE 200S) を用いた。それぞれの機器を 200S①、200S②とする。Fig. 1(a)に示すように、2台のスキャニングライダーはいずれも港湾区域内に設置した。スキャニングライダーを設置した後に位置がずれると、レーザー照射の向きが変化し、計測結果に影響を与えるため、強固な架台上に設置する必要がある。本研究においては、Fig. 1(b)に示すようにコンクリート基礎の上に H 鋼および鋼板を取付け、その上にスキャニングライダーを設置した。

Table 1 にはスキャニングライダーによる洋上風況観測を行う際の設定を示す。PPI モード (仰角を固定し方位角を変えながら水平方向に扇形スキャンを行う方法) [6]のスキャンの範囲は 45 度、スキャンの速度

は 3 度/s であり、1 回スキャンで 15 個の視線風速 (LOS) データが得られる。洋上風況観測の対象地点はライダー 200S①の場合に海岸線から 1750m、観測高度は 60、110、160m であり、ライダー 200S②の場合に海岸線から 1309m、観測高度は 62、110、158m である。観測期間は 1 年である。



(a) Locations of two scanning Lidars



(b) Lidar mount

Fig. 1 Locations of Lidars and Lidar mount

Table 1 Description of 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 target (Elevation angle) | Scan A : 60 m (1.8°)  | Scan A : 62 m (2.5°)  |
|                                                | Scan B : 110 m (3.4°) | Scan B : 110 m (4.6°) |
|                                                | Scan C : 160 m (5.0°) | Scan C : 158 m (6.7°) |
|                                                |                       |                       |
| Observation period                             | 1 year                |                       |

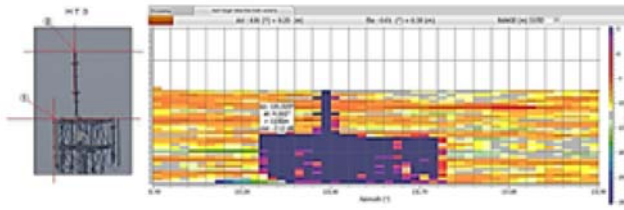


Fig. 2 Laser adjustment with hard targets

また、レーザーの仰角および方位角は、スキャニングライダーのスキャニングヘッドのギアのバックラッシュおよび光学コンポーネントの組付け公差に起因する光路の変化による誤差が生じる。このため、数 cm の精度で測量した 3 点以上のハードターゲットを用いて方位角と仰角の誤差関数(サインカーブ)を同定し、スキャン範囲の方位における誤差が小さくなるようオフセット値を設定した。Fig. 2 にはハードターゲットを用いたレーザー調整の例(操作画面)を示す。

本研究では PPI モードを用いてスキャン範囲 $\pm 22.5$ 度で観測し、洋上観測対象点 110m 高度(水平距離 1750m および 1309m)の観測において最大想定誤差が方位角 0.11 度、仰角 0.03 度以下である。すなわち、観測対象地点における誤差は、水平方向 3m、鉛直方向 1m 以下である。これらの誤差は観測対象点の観測高度および PPI モードにおけるスキャンする円弧範囲に対して非常に小さい。

## 2.2 計測距離と有効データ率の関係

スキャニングライダーは、ある周波数のレーザーを空間に照射し、大気中のエアロゾルによる反射光を受信し、ドップラーシフトから視線風速値を計測するが、スキャニングライダーにより取得したデータのうち、ノイズを除去する必要がある。このため CNR (信号対雑音比)、Mean Error (受信したドップラースペクトルと機器側処理にて再構築されたスペクトル間の平均誤差)、および $\sigma V_r$  (計測中の風速の揺れを反映した分散)により、データフィルタリングを実施した。Fig. 3 には、データフィルタリングを実施した場合としない場合の 24 時間の視線風速値を示し、データフィルタリングの有効性を確認した。

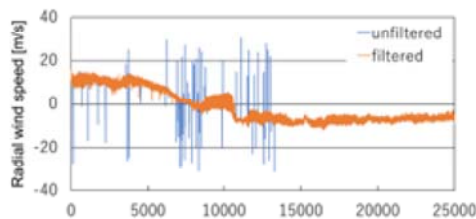
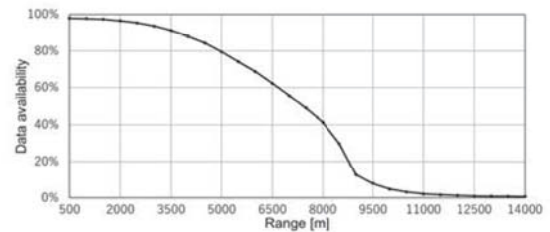


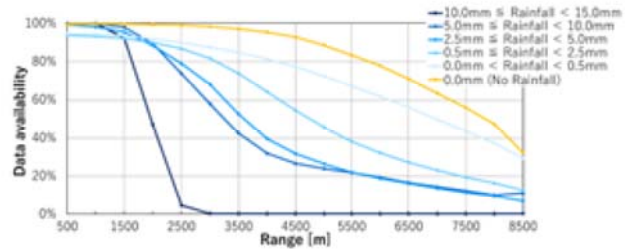
Fig. 3 Example of CNR filtering

Table 2 Scan settings for evaluating data availability

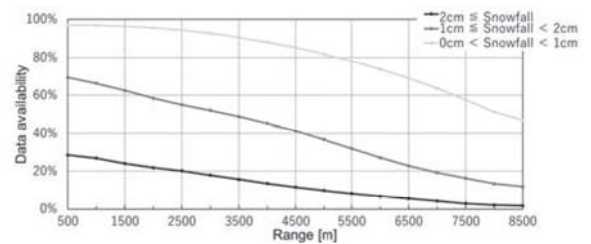
| Period | Days | Scan type | Elevation angle [deg.] | Approx. range [m] |
|--------|------|-----------|------------------------|-------------------|
| 1      | 20   | FIXED     | 2                      | 200~14000         |
| 2      | 2    | FIXED     | 2                      | 200~14000         |
|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



(a) Data availability for all data



(b) Data availability for different amount of rainfall



(c) Data availability for different amount of snowfall

Fig. 4 Variation of data availability with measurement distance and precipitation

Table 2 にはデータ取得率を求めるために実施した洋上風況観測の計測期間とスキャンの種類を示す。計測方位は約 270 度から 320 度であり、スキャニングライダー 200S①を用いた。ここで、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、期間中に近隣のアメダスが示す雨および雪の時間はそれぞれ 1345 時間と 35 時間である。また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。

Fig. 4(a)には、全データのデータ取得率と計測距離の関係を示す。計測距離が長くなると、データ取得率が

減少し、計測距離が 4.5km より短ければ、データ取得率が 80%を超える。データ取得率を与える降雨量の影響を Fig. 4(b)に示す。降雨量が多ければ、データ取得率は低下する。データ取得率が 80%以上となる計測距離は、時間あたり 10~15mm の場合に 1.5km 程度までと低下した。データ取得率を与える降雪量の影響を Fig. 4(c)に示す。降雪時にはデータ取得率が著しく低下し、時間あたり 1~2cm の降雪の場合に、計測距離 500m においてもデータ取得率が 70%を下回った。

### 3. 有効データの判定基準の提案と精度検証

3.1 節では風況観測の概要を説明し、3.2 節では 1 回 PPI スキャンから得られた視線風速により風速・風向の算出方法を示す。また 3.3 節では観測精度と有効データ率の両方を満足する適切な有効データの判定基準を提案し、3.4 節では風況観測タワーを用いた精度検証を行う。

#### 3.1 風況観測の概要

シングライダー観測精度を検証するため、風況観測タワーから 1340m 離れたスキャニングライダー 200S②を用いた。57.5m 高さ付近を照射し、風況観測タワーから得られた風速・風向と比較する。Table 3 にはシングライダーの設定値を示す。ここでは、1 回スキャンは、15 秒間で 15 個の視線風速の値を得られる。計測データレコード LOS ID (Line-Of-Sight ID) は 0 から 14 までの番号を持ち、Azimuth separation の角度分を Accumulation time の時間でスキャンされた範囲を以って 1 データレコードが出力される。データレコードのタイムスタンプと方位角は、計測の終わりの瞬間における時刻とレーザー方位である。

Table 3 Scan settings for validation at the met mast

|                              |                       |
|------------------------------|-----------------------|
| Scan type (Sector size)      | PPI (45° )            |
| Elevation angle              | 2.5°                  |
| Starting/Final azimuth angle | 14.3° (A) / 59.3° (B) |
| Accumulation time            | 1 s                   |
| Horizontal distance          | 1340 m                |
| Scanning speed               | 3° /sec               |
| Azimuth separation           | 3° per LOS (15 LOS)   |

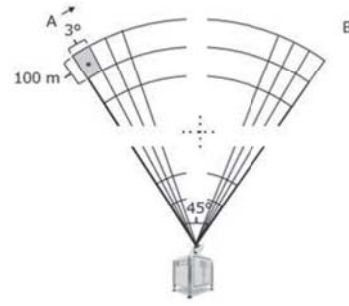


Fig. 5 Schematic of measured area in one scan

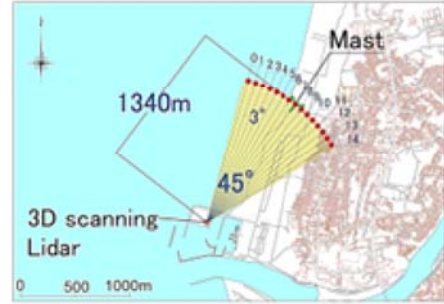


Fig. 6 PPI scan area of Lidar and location of met mast

Fig. 5 には 1 データレコードの受光範囲を示す。Fig. 6 にはスキャニングライダーおよび風況観測タワーの設置位置ならびに Fig. 5 に示した受光範囲の中心と LOS ID を示す。

#### 3.2 視線風速から風速・風向の算出

シングライダーは 1 回スキャンの空間範囲と経過時間に対して風況一様を仮定することができれば、1 回スキャンから得られた視線風速から時空間平均の風速・風向の算出方法は Simon ら[7]により提案され、最小二乗法により風速成分( $u, v$ )を式(1)と式(2)により算出する。ここで、 $\theta$ は各視線の方位角である。Fig. 7 には方位角と視線風速から求めた風速・風向および風況観測タワーから得られた風速・風向の時系列データを示す。ライダーからマストを望む方向と直交する風向においても観測された風速は風況観測タワーの風速と概ね一致し、風速成分から逆三角関数を用いて求めた風向も風況観測タワーで観測された風向と概ね一致している。なお、不一致がみられる方位については 3.4 節にて詳しく検討を行った。

$$\bar{u} = \frac{(\sum_{\theta_{start}}^{\theta_{stop}} (\hat{u}_r * \cos \theta) * \sum_{\theta_{start}}^{\theta_{stop}} (\sin^2 \theta)) - (\sum_{\theta_{start}}^{\theta_{stop}} (\hat{u}_r * \sin \theta) * \sum_{\theta_{start}}^{\theta_{stop}} (\cos \theta * \sin \theta))}{(\sum_{\theta_{start}}^{\theta_{stop}} (\cos^2 \theta) * \sum_{\theta_{start}}^{\theta_{stop}} (\sin^2 \theta)) - (\sum_{\theta_{start}}^{\theta_{stop}} (\cos \theta * \sin \theta)^2)} \quad (1)$$

$$\bar{v} = \frac{(\sum_{\theta_{start}}^{\theta_{stop}} (\hat{u}_r * \sin \theta) * \sum_{\theta_{start}}^{\theta_{stop}} (\cos^2 \theta)) - (\sum_{\theta_{start}}^{\theta_{stop}} (\hat{u}_r * \cos \theta) * \sum_{\theta_{start}}^{\theta_{stop}} (\cos \theta * \sin \theta))}{(\sum_{\theta_{start}}^{\theta_{stop}} (\cos^2 \theta) * \sum_{\theta_{start}}^{\theta_{stop}} (\sin^2 \theta)) - (\sum_{\theta_{start}}^{\theta_{stop}} (\cos \theta * \sin \theta)^2)} \quad (2)$$

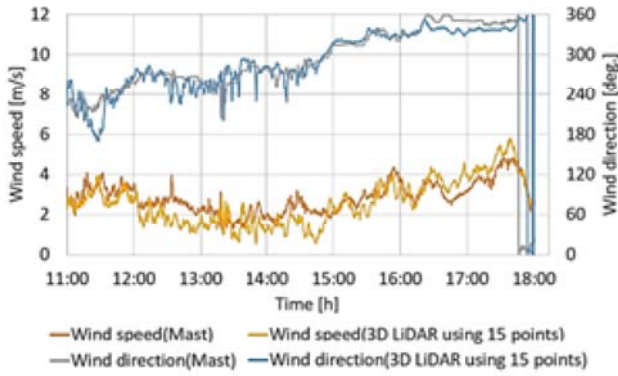


Fig. 7 Time series of 15-second-averaged wind speed and wind direction converted from 15 LOS data

### 3.3 有効データの判定基準

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。しかし、除外対象とする判定基準を厳しくすると有効データ率が低くなるため、観測精度と有効データ率の両方を満たす基準が必要である。

10 分平均値を求めるためには、3.2 節で述べた 1 回スキャンに相当する 15 秒平均値を得た後に 10 分平均値を求める。ここで、まずそれぞれの段階で有効なデータと判定する基準を検討した。その後、6 か月間の洋上観測データを用いて、提案した判定基準を適用した場合の有効データ率を調べた。

Fig. 8 には、15 秒平均値のタイムスタンプおよび、10 分平均値に含まれる 15 秒平均値の定義を示した。15 秒平均値のタイムスタンプの定義は、15 個の視線風速値のタイムスタンプの平均時刻とした。なお、各視線風速値のタイムスタンプは計測の終わりの瞬間であるため、厳密にはスキャンした正味時間の中央時刻よりも、Accumulation time 設定値の半分である 0.5 秒だけ遅い時間が 15 秒平均値のタイムスタンプとして適用されている。このことにより、10 分平均値を算出する時には、ある 15 秒平均値がどの 10 分平均値に含まれるかが変化する可能性があるが、該当する視線風速の個数は全体の個数に対して小さいことから、本研究ではその影響を無視した。

10 分平均値に含まれる 15 秒平均値は、対象の 10 分間の 0 分 0.000 秒以上から次の 10 分 0.000 秒未満の間にタイムスタンプがある 15 秒平均値とした。なお、各回のスキャンの間にはスキャンヘッド移動時間として 2 秒程度の欠測期間が生じるが、それ以外はタイミングの待ち時間などを設けていない。

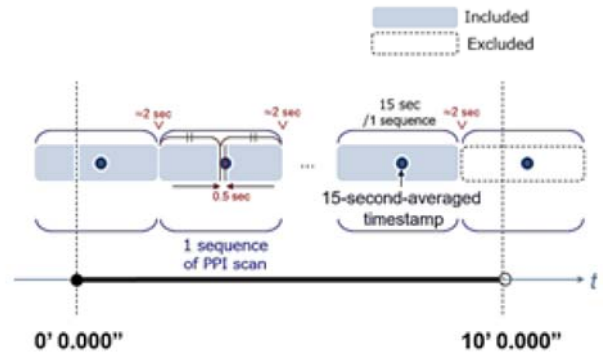


Fig. 8 Description of 10-minute measurement

#### (a) セクターサイズの影響

有効なデータがカバーした角度をセクターサイズとし、観測精度に与える影響を調べた。Fig. 9 にはセクターサイズの定義を示す。この例では、有効なデータの左右端が左から 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。セクターサイズが観測精度に与える影響を調べるため、15 個の視線風速値からデータを間引いた度合いをデータ取得率 $\eta_x$ で表し、式(3)により計算した。

$$\eta_x = \frac{\text{有効データ数}}{\text{全データ数}} \times 100 \quad (3)$$

Fig. 10 には、データ取得率 $\eta_{100}$ の 15 秒平均風速に対するデータ取得率 $\eta_x$ のそれとの相関を取り、 $\eta_{20}$ 、 $\eta_{40}$ 、 $\eta_{60}$ の場合におけるセクターサイズ毎の決定係数  $R^2$  と傾き Slope を示す。 $\eta_{20}$ の場合でもセクターサイズが大きいときに精度の高い  $R^2$  と Slope が得られた。このことから、観測精度はセクターサイズに強く依存することが分かる。セクターサイズが小さいほど Slope が大きくなり、風速が過大評価となる理由は以下の通りである。風速はベクトルではなくスカラーで評価しているため、過小評価となる場合は 0m/s までの下限値があるのに対し、過大評価となる場合は上限値がないため、結果的に過大評価側に偏った。Fig. 10 から、セクターサイズ 39 度以上の場合 Carbon Trust により提唱された KPI [8]である  $R^2$  が 0.97 以上を満たす。本研究では、Simon ら[7]が最小セクターサイズ 30 度としていることを考慮し、15 秒平均値を有効なデータとみなすための判定基準は、最小二乗法を用いる場合の最小データ個数である 3 個以上かつセクターサイズ 30 度以上を満たす場合と提案した。なお、セクターサイズ 30 度から 39 度までのデータが実際には少ないため、 $R^2$  と Slope に与える影響が少ない。

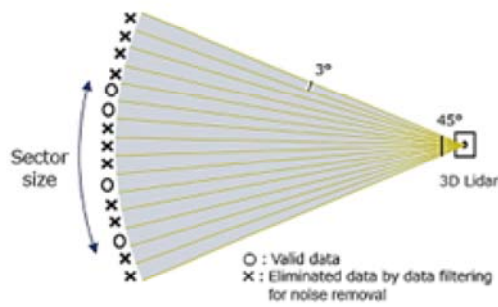
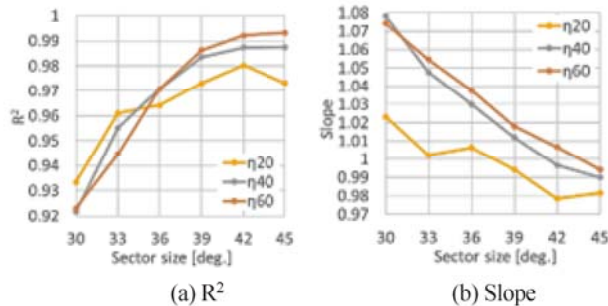


Fig. 9 Definition of sector size


 Fig. 10 Variation of  $R^2$  and slope with sector size

提案した判定基準が有効データ率に与える影響を調べるため、冬から初夏にかけての6か月間の洋上観測におけるシステム稼働率および有効データ率との関係を調べた。Table 4にはセクターサイズ毎の出現頻度を示す。セクターサイズが30度未満の出現頻度は0.4%であり、除いても有効データ率に与える影響は小さい。

さらに、10分平均値の取得率については、The Carbon Trustにより提唱された KPI [8]により評価した。システム稼働率 (System Availability, 以下、SA) および有効データ率 (Post-processed Data Availability, 以下、PDA) に関して、全期間では SA と PDA はそれぞれ 99.5%と 96.4%、月毎では 98.0%以上、90.0%以上であり、KPI の最高評価に相当する。このことから本研究で提案した判定基準は観測精度と有効データ率の両方の要求を満足することが分かる。

Table 4 Frequency of sector size

| Sector size (deg.) | 9-27 | 30-42 | 45   | Total |
|--------------------|------|-------|------|-------|
| Frequency (%)      | 0.4  | 0.7   | 98.9 | 100   |

#### (b) 10分平均値算出時の閾値の影響

10分平均値を算出する時における閾値の感度を評価するために、15秒平均値の個数を間引いた時の10分平均風速と全データを使った時の値との関係を調べた。10分平均値を求めるデータセットの総数は465である。10分平均風速と風向は、15秒平均の風速成分から求めた値であり、データを間引いた割合はデータ

取得率 $\eta_x$ により表し、式(3)により求めた。

Table 5にはデータ取得率 $\eta_{100}$ の10分平均風速に対するデータ取得率 $\eta_{2.5} \sim \eta_{80}$ のそれとの相関を示す。データ取得率の減少に伴い、相関が減少し、RMSE (Root Mean Square Error)は増大する。本研究ではCarbon Trustにより提唱された KPI [8]を参考にし、 $R^2 > 0.98$ である $\eta_{10}$ を採用した。また、式(3)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、 $\eta_{10}$ 以上のときに、15秒平均の有効データ数は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、有効な15秒平均値が4個以上を10分平均値の有効なデータ数の判定基準とした。

 Table 5  $R^2$  and RMSE for 10 min mean wind speed at  $\eta_{2.5} \sim \eta_{80}$  to that at  $\eta_{100}$ 

|              | $R^2$ | RMSE  |
|--------------|-------|-------|
| $\eta_{80}$  | 1.000 | 0.054 |
| $\eta_{60}$  | 0.999 | 0.110 |
| $\eta_{40}$  | 0.995 | 0.219 |
| $\eta_{20}$  | 0.995 | 0.236 |
| $\eta_{10}$  | 0.989 | 0.339 |
| $\eta_5$     | 0.979 | 0.464 |
| $\eta_{2.5}$ | 0.959 | 0.663 |

#### 3.4 風況観測タワーを用いた精度検証

本節では、提案した有効データの判定基準と同じ判定基準を実際の計測値に適用した場合に、観測精度と有効データ率の両方の要求を満足する観測値を取得できるか検証する。夏季および冬季の約39日間において風況観測タワーの57.5m高さ付近でシングライダーによる計測を行い、提案した判定基準でデータフィルタリングを実施し、風況観測タワーから得られた10分平均風速と風向との相関を調べた。

3.2節で述べたように最小二乗法により平均風速成分を求める際にはスキャン範囲の風況が一様であることを仮定しているが、本研究ではシングライダーの精度検証を用いた風況観測タワーは海岸線付近に設置されているため、Fig. 6に示すようにスキャン範囲内に洋上と陸上が含まれており、風向によって風速分布が一様でない状況が考えられる。

このことを確認するため、MASCOT [9]による3次元気流解析を実施し、Fig. 6に示したシングライダーによる15個の計測対象地点の風況を予測し、その一様性を調べた。Fig. 11には計算領域とメッシュを示し、最小メッシュ幅は10mとした。図のカラーコンターは地表粗度の大きさを表す。流入風は上空で風速10m/sとした。

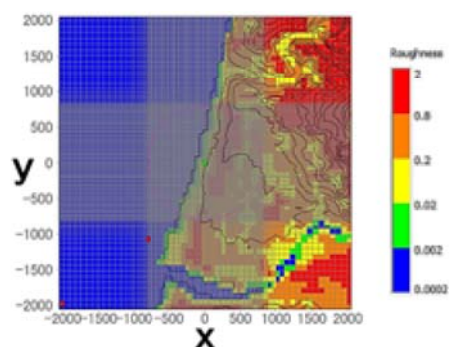
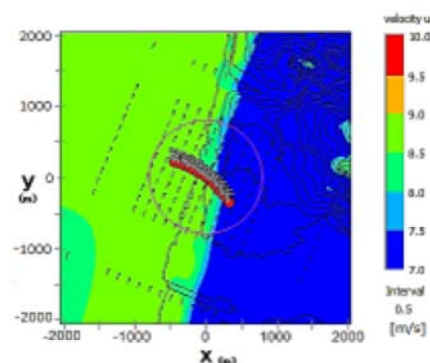


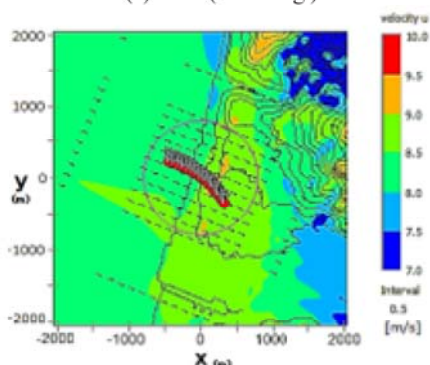
Fig. 11 Computational domain and horizontal mesh

Fig. 12(a)と(b)および(c)にはそれぞれ風向が海岸線と平行に近い202.5度と海岸線と直交に近い292.5度および112.5度における平均風速のコンターを示す。Fig. 12(a)に示すように、流入風の風向が海岸線と平行に近い202.5度の場合には洋上と陸上の粗度の違いにより、洋上の風速が高く、陸上の風速が低い。スキャン範囲は風速が大きく異なる二つの領域に分割されていることが分かる。一方、Fig. 12(b)と(c)では、流入風の風向が海岸線と直交に近い292.5度(海風)と112.5度(陸風)の場合に、スキャン範囲内の風速の変化は小さい。これは流れの移流効果により洋上の風速が陸上に、または陸上の風速が洋上に運ばれたことによるものである。なお、風況観測タワーから得られた10分平均風速と風向との相関を調べた際、精度低下がみられた風向範囲は0~50度、125~260度および320~360度であった。この風向範囲は海岸線と平行に近く、風速の一樣性が確保されていなかったと考えられる。また、精度が高い風向範囲は50~125度および260~320度であった。この風向範囲は海岸線と直交に近く、風速の一樣性が確保されていたと考えられる。

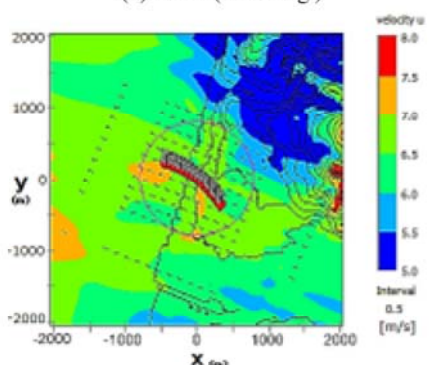
本研究ではシングルライダーにより観測された風速・風向と風況観測タワーから得られた値とを比較する際に、風速の一樣性が確保された風向のみを対象とし、50~125度および260~320度範囲内の風速・風向データのみを用いて精度検証を行った。また、低風速時の風速・風向のデータはばらつきが大きいため、本研究では2m/sを下回るデータを除外した。Fig. 13にはシングルライダーと風況観測タワーにより観測された10分平均風速と風向の比較を示す。風速のSlopeとR<sup>2</sup>はそれぞれ1.023と0.977、風向のSlope、Offset、R<sup>2</sup>はそれぞれ1.001、2.47、0.994であり、Carbon Trustにより提唱されたKPI [8]のMinimumに相当する。



(a) SSW (202.5 deg.)

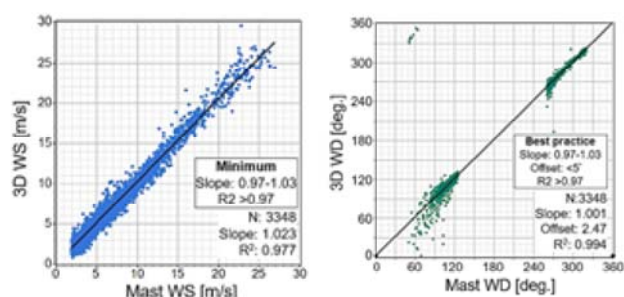


(b) WNW (292.5 deg.)



(c) ESE (112.5 deg.)

Fig. 12 Wind speed contour for different wind directions



(a) Wind speed

(b) Wind direction

Fig. 13 Comparison between wind speeds and directions measured by single lidar and met mast

#### 4. 洋上風況観測

本章では、2 台のシングルのライダーを用いて、陸上地形が異なる2 地点において1 年間の洋上風況観測を実施し、本研究で提案した観測手法のシステム稼働率および有効データ率を評価する。4.1 節では風況観測の概要を説明し、4.2 節では洋上における風速の鉛直と水平方向の分布を調べ、陸上地形が沿岸洋上風況に与える影響を明らかにする。

##### 4.1 観測概要

Fig. 14にはシングルのライダーによる洋上風況観測時の概略図を示す。スキャンの条件、観測高度および観測期間はTable 1に示すとおりである。いずれのライダーもスキャンA, B, C により3高度の風況観測を実施した。Fig. 15には3つのスキャン (A, B, C) の順番、スキャンの長さ (15秒) およびレーザー視線の移動時間を示す。3高度の観測を順に行うため、10分平均値に含まれる15秒平均値の数は1高度のみ観測を行う時の約3分の1となるが、10分間に4個以上の有効データが得られれば、判定基準を満たすため観測精度が担保される。

第3章に検討した手順に基づき、本研究では以下の①から③に示すデータフィルタを設けた。

- ① ノイズ除去のために、メーカー推奨のStatusが1であるデータを用いる。
- ② スキャンングライダーの視線風速より15秒平均風速成分を求める際には、①を満たす計測データが3個以上含まれ、かつ、セクターサイズは30度以上である。
- ③ 10分平均値を求める際には①と②を満たす15秒平均値が4個 (合計60秒) 以上含まれる。

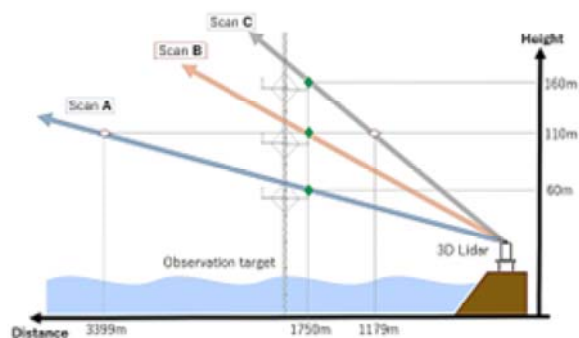


Fig. 14 Schematic diagram of single Lidar observation covering three heights at 1750m offshore from Scanning Lidar No. 1

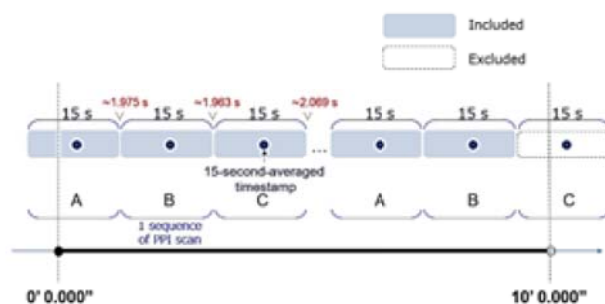


Fig. 15 Procedure of measurements for scans A, B and C

##### 4.2 観測結果に関する考察

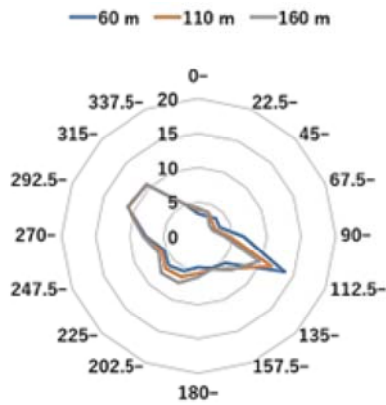
Table 6 と 7 には1 年間の観測におけるシングルのライダーのシステム稼働率SA および有効データ率PDA を示す。200S①では10 か月目の月間SA が低くなったが、これは落雷の影響によりライダーへの電源供給が停止したためであり、機器自体が原因ではない。この月を除くと、1 年間の観測において200S①、200S②いずれも Carbon trust の KPI [8] の Stage 3 を満たしている。

Table 6 Summary of SA and PDA of single Lidar No. 1

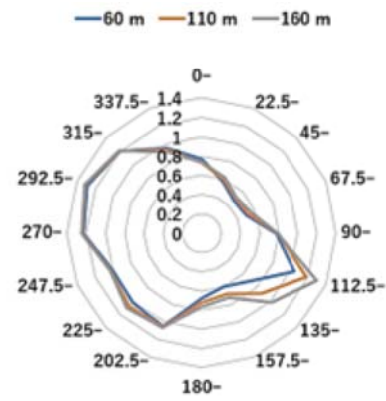
|          | SA [%] | PDA [%] |       |       |
|----------|--------|---------|-------|-------|
|          |        | 60 m    | 110 m | 160 m |
| Month 1  | 100.0  | 97.2    | 97.4  | 97.0  |
| Month 2  | 99.9   | 97.6    | 97.5  | 97.5  |
| Month 3  | 100.0  | 89.2    | 89.2  | 88.8  |
| Month 4  | 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  |

Table 7 Summary of SA and PDA of single Lidar No. 2

|          | SA [%] | PDA [%] |       |       |
|----------|--------|---------|-------|-------|
|          |        | 62 m    | 110 m | 158 m |
| Month 1  | 100.0  | 97.3    | 97.5  | 97.3  |
| Month 2  | 98.0   | 95.8    | 95.6  | 95.7  |
| Month 3  | 100.0  | 90.0    | 90.1  | 89.9  |
| Month 4  | 99.0   | 96.7    | 96.9  | 96.9  |
| Month 5  | 100.0  | 99.5    | 99.5  | 99.5  |
| Month 6  | 100.0  | 99.6    | 98.6  | 97.7  |
| Month 7  | 96.8   | 96.7    | 96.4  | 96.0  |
| Month 8  | 100.0  | 99.7    | 99.6  | 99.6  |
| Month 9  | 100.0  | 100.0   | 100.0 | 99.9  |
| Month 10 | 100.0  | 99.8    | 99.7  | 99.2  |
| Month 11 | 99.1   | 98.8    | 98.8  | 98.9  |
| Month 12 | 100.0  | 99.7    | 99.7  | 99.7  |
| Overall  | 99.4   | 97.8    | 97.7  | 97.6  |

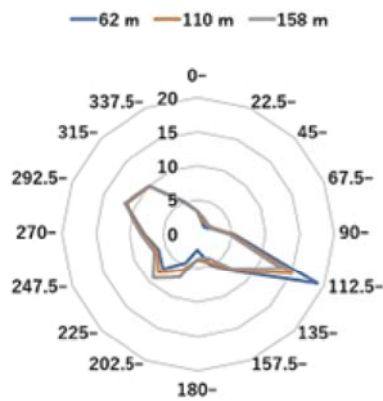


(a) Wind rose

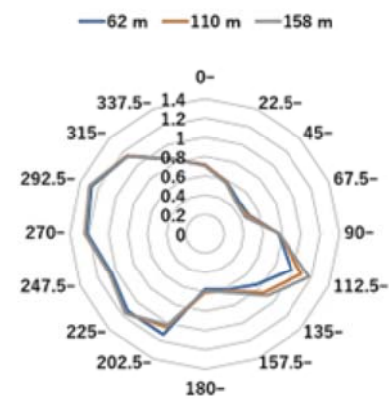


(b) Mean wind speed

Fig. 16 Wind rose and normalized mean wind speed at three observation heights measured by 200S①



(a) Wind rose



(b) Mean wind speed

Fig. 17 Wind rose and normalized mean wind speed at three observation heights measured by 200S②

シングルライダー200S①および200S②を用いて、異なる洋上観測対象点における各高度の10分平均風速の方位別出現頻度と無次元化風速を分析し、Fig. 16とFig. 17に示す。無次元化には110m高さの年平均風速を用いた。

200S①と200S②の洋上観測地点では似た傾向を示し、陸側の112.5度および海側の292.5度と315度が卓越し、高度が低いほど陸風がより卓越し、陸風および海風の年平均風速が大きい。Fig. 18には200S①と200S②に観測された洋上風の鉛直分布のべき指数 $\alpha$ を示す。112.5~135度の陸風でシアが大きく、247.5~337.5度の海風でシアが小さいことが分かる。

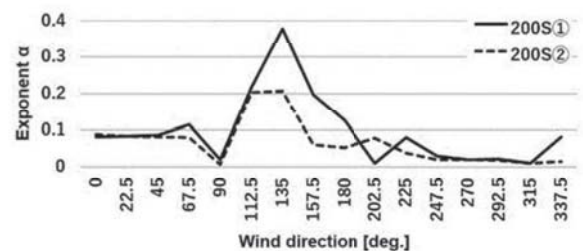


Fig. 18 Exponents of wind profiles in each wind direction measured by 200S① and 200S②

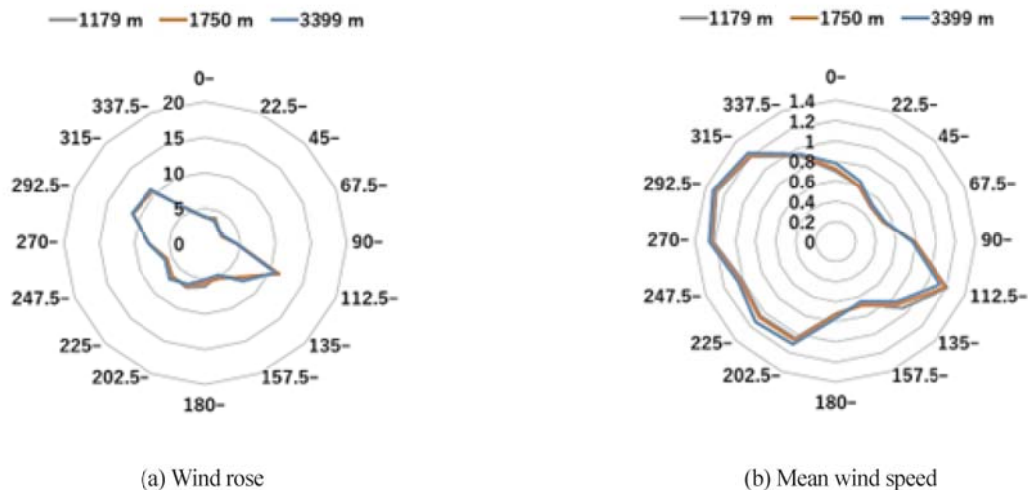


Fig. 19 Wind rose and normalized mean wind speed at 110 m height with different horizontal distance from Lidar 200S①

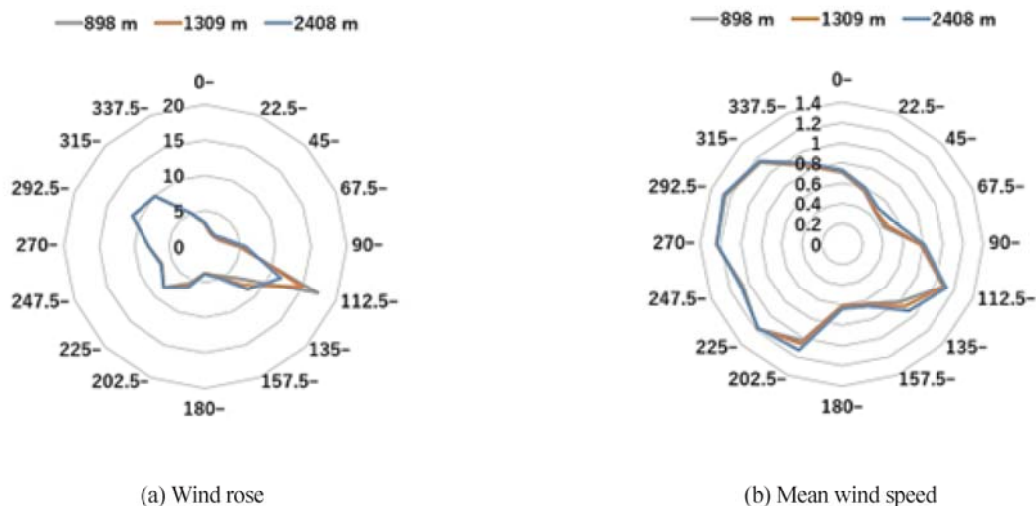


Fig. 20 Wind rose and normalized mean wind speed at 110 m height with different horizontal distance from Lidar 200S②

シングルライダーによる風況観測を行う際にはレーザー視線上の複数箇所を同時に計測できるため、離岸距離 200m 程度からレーザー到達距離までの広範囲の風況を一度に観測することができる。このため、3 高度の風況観測を実施することにより、Fig. 14 に示すように水平方向の複数地点の風況を観測できる。本研究では各スキャンによる観測値から高度 110m に当たる観測値を抽出し、各水平距離の 10 分平均風速の方位別出現頻度と無次元化風速を分析し、Fig. 19 と Fig. 20 に示す。無次元化には 110m 高さの年平均風速を用いた。ライダー 200S① から観測地点までの水平距離は、1179m、1750m、3399m であり、200S② の場合には 898m、1309m、2408m である。

200S① と 200S② における方位別出現頻度は似た傾向を示し、陸風と海風が卓越し、陸に近いほど陸風がより卓越した。方位別の年平均風速は 200S① と 200S

② では異なる傾向を示し、200S① では、陸風 (90～157.5 度) において沖側の観測点の風速が陸側の観測点の風速よりも低下した一方、200S② ではどの方位においても沖側の観測点の風速が陸側の観測点の風速よりも高くなっている。

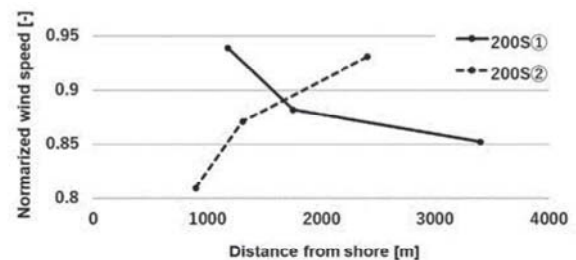


Fig. 21 Normalized wind speeds in the wind direction of 135 deg. measured by 200S① and 200S② at 110 m height

Fig. 21 には 200S①と 200S②で観測された洋上風の 135 度風向における無次元化風速の水平分布を示す。200S①地点の 135 度風向では沖側の観測点 (3399m) の風速が陸側の観測点 (1179m) の風速より 9%低い。これは、200S①の陸側には高度 100~200m 程度の山があるため、陸風が洋上にいくにつれて風が通過する断面積が大きくなることにより風速が徐々に低下したと考えられる。一方、200S②地点の 135 度風向では沖側の観測点 (2408m) の風速が陸側の観測点 (898m) の風速より 15%高い。これは 200S②の陸側は平坦な市街地が広がっており、断面積の変化がなく、陸風が洋上にいくにつれて地上面の粗度の減少に伴い、風速が増大したと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、スキャニングライダーの計測距離とデータ取得率の関係および降水の影響を調べると共に、洋上風況を高精度に観測する手法を提案し、風況観測タワーから観測された風速と風向と比較することにより、その観測精度を検証した。また 2 台のシングルライダーを用いて異なる地点の洋上風況観測を実施し、陸上の地形が沿岸洋上風況に与える影響を明らかにした。本研究から得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 降水量がスキャニングライダーのデータ取得率に大きな影響を与え、降雪時にスキャニングライダーによる計測が困難であることを明らかにした。
- (2) 1 回 PPI スキャンにおけるセクターサイズが 30 度以上かつデータ取得率が 10%以上の場合、10 分平均風速と風向において高い観測精度を有することを明らかにした。
- (3) 本研究で提案したシングルライダーの観測手法を用いて、1 年間の洋上風況観測を実施し、システム稼働率および有効データ率は Stage 3 の要件を満足することを示した。
- (4) 複数地点における沿岸風況の方位別の観測結果を分析した。陸上に高い地形がある沿岸では、陸風のときに岸に近いところほど風速が強いことを示し、陸上の地形が洋上風況の鉛直と水平方向の分布に影響を与えることを明らかにした。

## 謝辞

本研究の検討にあたり、東京大学山口敦特任准教授にご協力を頂いた。また、調査実施近隣地区の各自治会および関係者の皆様にもご協力を頂いた。ここに記して心から謝意を表す。

## 参考文献

- [1] 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
- [2] 内山将吾, 大澤輝夫, 麻生裕司, “むつ小川原サイトにおけるフローティングライダーの精度特性の把握”, 第 44 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2022
- [3] 浅倉奨之, 大澤輝夫, 麻生裕司, “フローティングライダー性能評価のための陸上動揺実験 (その 2) ”, 第 44 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2022
- [4] 山口敦, 京増顕文, 石原孟, “ドップラーライダーを利用した高高度の乱流計測と模擬自然風による精度検証”, 第 44 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2022
- [5] 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
- [6] ゴイトジェイ プラカス, 山口敦, 石原孟, “スキャニングドップラーライダーの精度検証と風況計測への応用”, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol.42, No.1, pp.7-16, 2018.
- [7] 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
- [8] The Carbon Trust, “OWA Roadmap for the Commercial Acceptance of Floating LiDAR Technology, Version 2.0”, 2018
- [9] 石原孟, 山口敦, 藤野陽三, 日比一喜, “非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその応用”, 風力エネルギー, Vol.26, No.4, pp.2-6, 2002.