



## 特集



風工学諸分野におけるドップラーライダー等風速の鉛直分布の観測事例と諸課題

### ドップラーライダーを利用した洋上風況観測とその検証

## Offshore Wind Measurement by Doppler Lidars and its Validation

石原 孟<sup>\*1</sup>

Takeshi ISHIHARA

大塚 清敏<sup>\*2</sup>

Kiyotoshi OTSUKA

#### 1. はじめに

持続可能な社会の実現の観点から、洋上風力発電が大きな注目を集めている。風力発電事業の資源量評価や風車の疲労寿命評価のため設置海域における精度の高い風況観測（風速・風向・乱流強度）の実施は不可欠である。風車の大型化に伴い、風車の設置地点の離岸距離も大きくなり、沖合高高度での洋上風況の把握が求められる<sup>1)</sup>。

洋上風況観測には大きく3つの方法がある。1つ目の観測方法は、海底にステージを据え、風況観測タワーと鉛直ドップラーライダー（以下、鉛直ライダーと呼ぶ）を設置する方法である<sup>2)</sup>。風況観測タワーと鉛直ライダーによる観測は、主に陸上風力分野で長年にわたり計測精度と信頼性が証明されてきたが、洋上では高い風況観測タワーの設置に時間とコストがかかるため、鉛直ライダーと併用することが多い<sup>2)</sup>。2つ目の観測方法として、海域にフローティングライダーを設置する方法が挙げられる。浮体の設置は比較的容易であるが、浮体による動揺の補正<sup>3)</sup>が必要であり、また鉛直ライダーによる乱流強度の過大評価を補正する必要がある<sup>4)</sup>。3つ目の観測方法として、陸上からのスキヤニングドップラーライダー（以下、スキヤニングライダーと呼ぶ）による遠隔観測が挙げられる<sup>5)~9)</sup>。1台のスキヤニングドップラーライダー（以下、シングルライダーと呼ぶ）を用いる計測<sup>5)~7)</sup>と離れた地点に配置した2台のスキヤニングドップラーライダー（以下、デュアルライダーと呼ぶ）から洋上同一地点を対象に

同時計測する方法がある<sup>8)~9)</sup>。シングルライダーは乱流強度の計測ができないが、鉛直と水平断面内の平均風速の分布を計測できる利点がある<sup>5)~7)</sup>。一方、デュアルライダーは平均風速と風向の計測に加え、乱流強度も計測できる<sup>8)</sup>。2台のスキヤニングライダーの同時計測データにより風向・風速を算出するため、一定の割合で他方のデータがない状況が生じ、シングルライダー観測に比べ、データ取得率が下がり、欠測データの補正が必要となる<sup>9)</sup>。

本稿では、著者らが実施したドップラーライダーを活用した風力エネルギーの分野における風況観測の事例を報告する。第2節にはスキヤニングライダーを用いた洋上風況観測の実例を紹介するとともに、各種計測方法の原理、注意点および評価基準を説明する。第3節には簡易浮体上の鉛直ライダー観測の実例および精度検証を述べる。第4節には本稿の結論を示す。

#### 2. スキヤニングライダーを用いた洋上風況観測

第2.1節と第2.2節にはスキヤニングライダーの計測方法、注意点および評価基準を説明し、第2.3節と第2.4節にはシングルライダーとデュアルライダーによる観測例を紹介する。

##### 2.1 スキヤニングライダーの計測方法と評価基準

シングルライダーの視線風速  $V_r$  から風速の水平成分  $u$ ,  $v$  の算出は PPI モード (Plan Position Indication, すなわち、仰角を固定し、方位角を変えながら水平方向に扇形スキ

\* 1 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 教授 ishihara@bridge.t.u-tokyo.ac.jp  
Professor, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo

\* 2 (株)大林組技術研究所 上級主席技師  
Senior Research Engineer, Technology Research Institute, Obayashi Corporation

ヤンを行う方法) により求める。図 1 には視線風速と風速の水平成分及び鉛直成分の関係を示す。

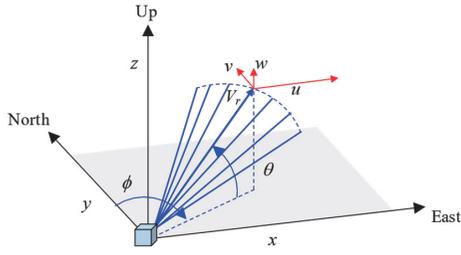


図 1 視線風速と風速の水平成分及び鉛直成分の関係<sup>1)</sup>

視線風速と風速の水平成分及び鉛直成分の関係は、方位角  $\phi$  及び仰角  $\theta$  を用いて式 (1) により表せる。

$$V_r = u \sin \phi \cos \theta + v \cos \phi \cos \theta + w \sin \theta \quad (1)$$

式 (1) 右辺の第 3 項を省略すると、次式が得られる。

$$V_r = u \sin \phi \cos \theta + v \cos \phi \cos \theta \quad (2)$$

PPI スキャン 1 回分から得られる複数組の視線風速及び方位角の観測値 (例えば、毎秒 3° の 45° 水平方向スキャンの場合は 15 個の値) から、風速の水平成分  $u, v$  を最小二乗法により式(3)から算出できる。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{\sum \sin^2 \phi_i \sum \cos^2 \phi_i - (\sum \cos \phi_i \cdot \sin \phi_i)^2} \begin{bmatrix} \sum \cos^2 \phi_i & -\sum \cos \phi_i \cdot \sin \phi_i \\ -\sum \cos \phi_i \cdot \sin \phi_i & \sum \sin^2 \phi_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum \sin \phi_i \cdot V_{ri}' \\ \sum \cos \phi_i \cdot V_{ri}' \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで  $V_{ri}'$  は  $V_{ri}/\cos \theta$  であり、下付きの添え字  $i$  は視線風速の個数である。

一方、デュアルライダーの視線風速から風速の水平成分  $u, v$  は、式(2)から導出した式(4)と式(5)を用いて求める。

$$u = \frac{V_{r1} \cos \phi_2 \cos \theta_2 - V_{r2} \cos \phi_1 \cos \theta_1}{\cos \theta_1 \cos \theta_2 (\sin \phi_1 \cos \phi_2 - \sin \phi_2 \cos \phi_1)} \quad (4)$$

$$v = \frac{V_{r2} \sin \phi_1 \cos \theta_2 - V_{r1} \sin \theta_2 \cos \phi_2}{\cos \theta_1 \cos \theta_2 (\sin \phi_1 \cos \phi_2 - \sin \phi_2 \cos \phi_1)} \quad (5)$$

ここで、下付きの添え字は、それぞれ 1 台目及び 2 台目のスキャニングライダーからの出力を表す。図 2 には視線風速と風速の水平成分及び鉛直成分の関係を示す。

2 台のスキャニングライダーを複数の高度で計測する際には、RHI モード (Range Height Indicator, すなわち、方位角を固定し、仰角を変えながらスキャンを行う方法) を用いる。PPI スキャンは方位角方向の複数データの取得に、RHI スキャンは仰角方向の複数データの取得に使用できる。従って、シングルライダーを使って、複数高度の

計測を行う際には、PPI スキャンと RHI スキャンを併用する。

風速の水平成分からスカラー風速  $U$  及び風向  $\alpha$  は式 (6) 及び式 (7) から算出できる。

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (6)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{u}{v}\right) + \alpha_0 \quad (7)$$

ここで、 $\alpha_0$  は次式により求める。

$$\alpha_0 = \begin{cases} +180; & \text{for } \arctan\left(\frac{u}{v}\right) < 180 \\ -180; & \text{for } \arctan\left(\frac{u}{v}\right) > 180 \end{cases}$$

このように得られたスカラー風速及び風向の瞬時値から、水平風速、水平風向、風速標準偏差の 10 分間平均値を求めることができる。

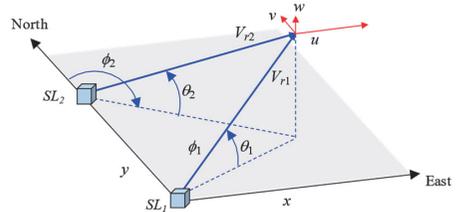


図 2 視線風速と風速の水平成分及び鉛直成分の関係<sup>1)</sup>

風力エネルギーは、風速の三乗に比例するため、洋上風況観測の精度が極めて重要である。平均風速と風向の計測精度に関する性能評価指数 KPI (Key Performance Indicator) は、表 1 に示すように Carbon Trust<sup>10)</sup> により提案され、その許容基準を満たすことが求められている。

表 1 計測精度に関する性能評価指数と許容基準

KPI	Definition	Acceptance Criteria	
		Best Practice	Minimum Stage 2, only
$X_{mws}$	Mean Wind Speed - Slope	0.98 - 1.02	0.97 - 1.03
$R^2_{mws}$	Mean Wind Speed - Coefficient of Determination	>0.98	>0.97
$M_{mwd}$	Mean Wind Direction - Slope	0.97 - 1.03	0.95 - 1.05
$OFF_{mwd}$	Mean Wind Direction - Offset	< 5°	< 10°
$R^2_{mwd}$	Mean Wind Direction - Coefficient of Determination	> 0.97	> 0.95

## 2. 2 スキャニングライダー計測の注意点

まず、スキャニングライダーを用いて、数キロ先の洋上風速・風向を計測する際には、僅かなレーザーの仰角のズレが観測高度の大きなズレをもたらすため、装置を設置する架台は観測期間中、水平が維持されるよう設計を行う必要がある。スキャニングライダーをコンクリート基礎の上に設置する必要がある<sup>6)</sup>。

次に、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は文献 6 に示す通りである<sup>6)</sup>。図 3 にはハードターゲットを用いたレーザー調整の例<sup>6)</sup>を示す。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。本報告では 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 モードにおいてスキャンする円弧範囲に対して非常に小さい。

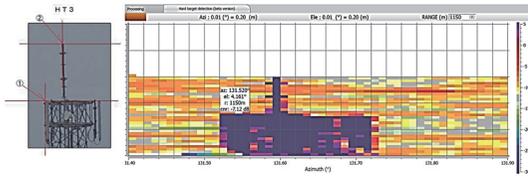
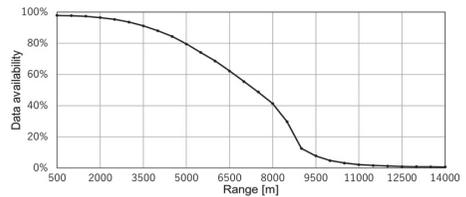


図 3 ハードターゲット調整の例<sup>6)</sup>

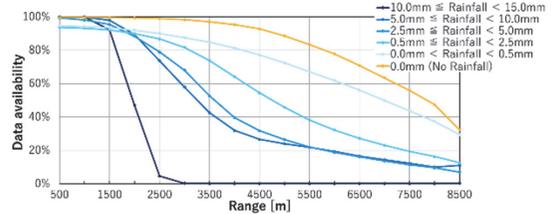
さらに、スキャニングライダーは、ある周波数のレーザーを空間に照射し、大気中のエアロゾルによる反射光を受信し、ドップラーシフトから視線風速値を計測するが、スキャニングライダーにより取得したデータのうち、ノイズを除去する必要がある。このため CNR（信号対雑音比）、Mean Error（受信したドップラースペクトルと機器側処理にて再構築されたスペクトル間の平均誤差）および $\sigma V_r$ （計測中の風速の揺れを反映した分散）により、データフィルタリングを実施する必要がある。

最後に、スキャニングライダーの計測は、雨および雪の影響を受け、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も受ける。エアロゾル濃度の影響を除外するため、14,000m 先でも計測高度が

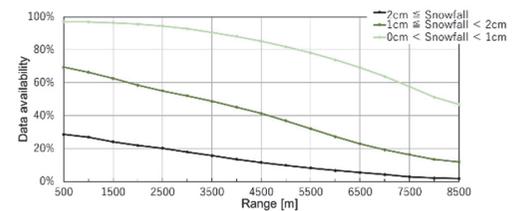
500m に達しないように設定した<sup>6)</sup>。図 4(a)には、全データのデータ取得率と計測距離の関係を示す<sup>6)</sup>。計測距離が長くなると、データ取得率が減少し、計測距離が 4.5km より短ければ、データ取得率が 80% を超える。図 4(b)にはデータ取得率に与える降雨量の影響を示す。降雨量が多ければ、データ取得率は低下する。データ取得率が 80% 以上となる計測距離は、時間あたり 10~15mm の場合に 1.5km 程度まで低下した。図 4(c)にはデータ取得率に与える降雪量の影響を示す。降雪時にはデータ取得率が著しく低下し、時間あたり 1~2cm の降雪の場合に、計測距離 500m においてもデータ取得率が 70% を下回った。以上結果から、200S を使用する際の計測距離を 2km 以内に設定することとした。



(a) データ取得率の計測距離による変化（全データ対象）



(b) データ取得率の計測距離と降水量による変化



(c) データ取得率の測定距離と降雪量による変化

図 4 データ取得率の測定距離と気象条件による変化<sup>6)</sup>

## 2. 3 シングルライダーによる洋上風況観測例

図 5 にはシングルライダーによる 3 高度の洋上風況観測の概略図を示し、図 6 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。

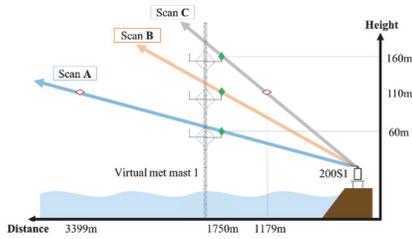


図5 3高度の洋上風況観測の概略図<sup>6)</sup>

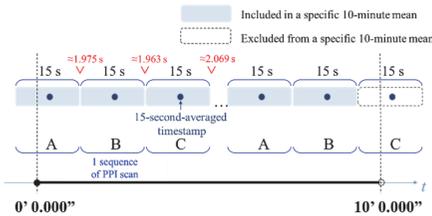


図6 スキャンA, B, Cの測定手順<sup>6)</sup>

本計測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回のスキャンで15個の視線風速データが得られ、以下に示す①から③のフィルタを適用した。

- 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。

本計測では2台のシングルライダー(Vaisala WINDCUBE 200S)を使用した。図7にはシングルライダーの設置地点を示す。観測期間は1年である。

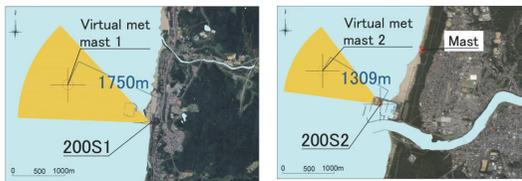


図7 シングルライダーの設置地点<sup>6)</sup>

200S1は道川地区に設置され、陸側は標高100~200mの山に面している。200S2は本庄平野に南南東方向に流れる子吉川の河口付近に設置され、陸側は平坦な市街地となっている。本計測による陸側の地形による洋上風況に与える影響を明らかにすることができる。200S1の対象地点は海岸線から1750m、観測高度は60, 110, 160mであり、200S2の対象地点は海岸線から1309m、観測高度は

62, 110, 158mである。

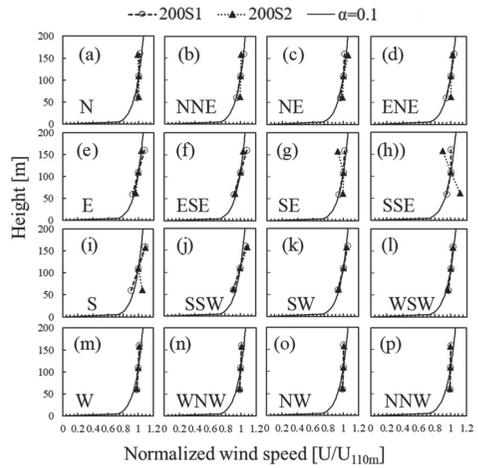


図8 16方位における平均風速の鉛直分布の比較<sup>7)</sup>

図8には、各洋上風況観測位置における200S1および200S2により得られた16方位の平均風速の鉛直分布を示す。風速は、各風向のハブ高さ110mで測定した風速により正規化されている。比較のために、 $\alpha$ が0.1のべき則の鉛直分布も図中に示した。海風の場合には、南南西から北北西における両地点の風速の鉛直分布がよく似ている。一方、陸風の場合には、南東から南における両地点の風速の鉛直分布が近隣地形の違いにより大きく異なる。

また図8(g), (h), (i)に示すように、200S2地点では負勾配が見られる。図7(b)に示すように、200S2付近に南東方向の子吉川が流れており、川からの風により低層ジェットが発生している。また図8(o)と(k)から分かるように、同じ海風でも北西風と南西風のべき指数は異なる。北西風の場合にはべき指数がゼロに近いが、南西風の場合にはべき指数が大きくなる。これは季節により大気安定度が違うからである。冬には主に北西から、夏には南西から吹く。北日本の冬は、海面水温が気温よりも高くなり、大気不安定であるため、空気の鉛直混合が促進され、べき指数が増大する。

#### 2.4 デュアルライダーによる洋上風況観測例

デュアルライダーによる風況観測の精度検証を行うため、離岸距離約1kmの防波堤上に設置した観測タワーに向けて、2台のスキャングライダーのレーザービームを照射し、デュアルライダーによる風況観測を行った。

図9には観測タワーとスキャングライダーの設置位

置を示し、2台のスキヤニングライダーを観測タワーに向かって照射する際に、観測タワーの風速計を対象に測量を行い、またスキヤニングライダーが照射点(観測タワーの風速計)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、スキヤニングライダーの方位角と仰角のオフセット調整を行った。



図9 観測タワーとスキヤニングライダーの設置位置<sup>8)</sup>

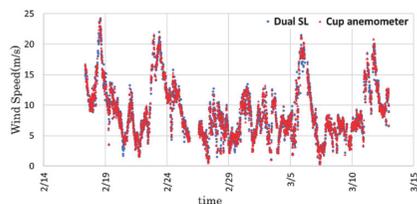
デュアルライダーによる乱流強度の計測精度を検証するため、三杯式風速計のサンプリングレートを1Hzと同じになるように設定し、FIXEDモード観測(定点観測)を行った。観測期間は2020年2月17日から2020年3月12日の約1か月間とした。風況観測タワー(マスト)には三杯式風速計と矢羽根式風向計を設置した。スキヤニングライダー観測時の設定値(ゲート長、積分時間、レーザー照射角度・距離)について文献8を参照されたい。

本計測では、以下の①から④に示すデュアルスキヤニングライダーのデータフィルタを設けた。

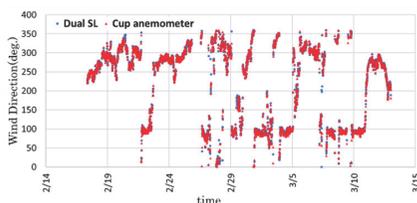
- ① メーカー推奨 Status は1である。
- ② スキヤニングライダーの視線風速データの10分間平均値から $3\sigma$ を超える1秒風速データを除外する(以下、 $3\sigma$ フィルタ)。
- ③ 2台のスキヤニングライダーのデータが同時に有効である。
- ④ 10分間観測値を求める際に①～③を満たす1秒データが60個以上含まれる。

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、スキヤ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 $3\sigma$ 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、スキヤニングライダーデータフィルタとして適用した。 $3\sigma$ フィルタの影響については文献8を参照されたい。③はデュアルスキヤ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分間に含まれる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。

図10には、デュアルライダーにより観測された風速・風向の時系列データを示す。風速・風向とも三杯式風速計と矢羽根式風向計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1.00である。これらの値は、性能評価指数KPIのBest Practiceに相当する。



(a) Wind Speed



(b) Wind Direction

図10 風速・風向の時系列データの比較<sup>8)</sup>

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%タイル値を用いる。図11には風速ビンごとにおける乱流強度の90%タイル値を示す。風速は4m/s以下の低風速範囲を除き、デュアルライダーにより計測された乱流強度の90%タイル値は風況観測タワーの値とよく一致することが分かる。

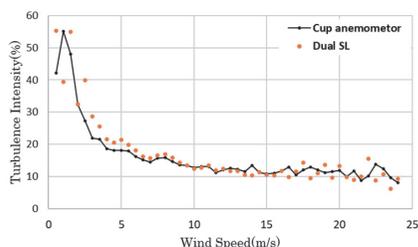


図11 乱流強度の90%タイル値の比較<sup>8)</sup>

このように、デュアルライダーは平均風速と平均風向のみならず、乱流強度も精度よく計測できる。ただし、2台のスキヤニングライダーの同時計測データにより風向・風速を算出するため、一定の割合で他方のデータがない状況が生じ、データ取得率が下がる。1年間のデータ取得率95%の要件を満たすために、欠測データの補正が必要であり、その方法については文献9を参照されたい。

### 3. 簡易浮体上の鉛直ライダー観測と検証

浮体搭載の鉛直ドップラーライダー(以下ライダーと略)の洋上風況観測への適用可能性を見るため、ライダー洋上観測の精度検証を主目的として、秋田県能代港において、浮体上でのライダー、防波堤上での風況観測タワー(以下風況タワーと略)による風観測を行った<sup>11)</sup>。風況タワー観測を真とすることで、タワー高さ以下の高度に対するライダー観測が検証されることになる。一方で、ライダーはタワーよりも高い高度の風も観測できるため、そうした高度範囲についても検証したく、気象モデルWRF<sup>12)</sup>を用いた検証を試みた。その結果について報告する。なお、本論ではライダー観測結果は全て動揺補正後である。

#### 3. 1 観測概要

観測は秋田県能代港の防波堤の内側、海岸から約1kmの距離にある水面上で、2014年8月～2015年7月の1年間行った。検証の対象としたドップラーライダーは、パルス式の三菱電機社製耐環境動揺補正付きv2(LR-E1S51A:DIABREZZA)であり、観測高度は40m～135mで5m間隔である。ライダーの性能仕様を表2に、観測レイアウトを図12にそれぞれ示す。浮体はユニフロートを4台結合させた係留式簡易浮体(長さ11.0m,幅5.35m,厚さ1.22mの直方体)であり、中央部に波除を兼ねた高さ50cmの架台を設け、燃料電池(110W×4)とライダーとを設置した。

浮体から約80m離れた位置にある、ほぼ北東—南西の走向を持ち平均海水面に対する堤高5mの防波堤上に、高さ45mの風況タワー(円形断面の支柱)を設置した。風観測には米国NRG社製3杯風速計(#40C)と矢羽根式風向計(#200P)とを用いた。観測高さは平均海面上40m,45m,50mの3高度とし、10分間平均の水平風速、水平風速標準偏差、風向を計測した。測器を取付ける水平ブームの方位は、現地の卓越風向<sup>13)</sup>から、支柱後流の影響が少ない方位とし、張出し長さ、測器と間の垂直離隔等の配置仕様はIEC61400-12-1<sup>14)</sup>を満足するようにした。さらに、浮体慣性長軸周りの回転角(ロール)、同短軸周りの回転角(ピッチ)も計測間隔1秒で取得した。

#### 3. 2 風況観測タワーによる検証

まず、ある特定日の浮体での観測状況を見る。2014年10月3日の風況および浮体動揺のピッチ角の時系列を図13に示す。図にはライダー、風況タワーそれぞれの10分間平均風速、同風向に加え、浮体動揺も示す。この日は10時40分頃に風向急変と風速急増があり、浮体動揺も急速に振幅を増しているが、風速、風向ともにライダーと風況タワーとの対応はよい。図示しないがロール角の振幅は

ピッチ角の半分程度であった。

観測期間全体を通じたライダーと風況タワーとの比較について述べる。ライダーは、維持管理や新製品の初期調整などもあり、設置期間のうち時間にして約60%程度のデータ取得率であった。観測目的が発電事業ではなく機器の検証であるため問題はなかった。風況タワーは、10分間平均値1データのみ欠測で、ほぼ100%取得できた。図14に、水平風の風速・風向の10分間平均値の、ライダーと風況タワーとの比較を高度50mについて示す。相関係数はともに0.99以上であるが、風速は回帰係数(切片0の回帰直線の勾配)が0.966であり、目視で明らかにライダー観測の方が低いといった体系的な誤差が認められる。図示しないが、高度40m,45mも同様であった。

表2 ドップラーライダー性能仕様

項目	諸元
レーザー波長	1.55 μm帯(アイセーフ帯波長) IEC 60825-1で規定されるレーザークラス1M相当
観測距離	40m～250m
レンジ数	20レンジ/40レンジより選択
高度分解能	20m/25m/30mより選択 レンジオーバーラップ機能により、高度分解能の1/5～1/2刻みで観測データ取得が可能
走査方向	5方向(天頂および、天頂から30度傾いた4方向)
ドップラー速度測定範囲	-30m/s～+30m/s(向かい風がマイナス方向)
風向範囲	0.0～359.9°
風向・風速更新レート	最速2秒以内(レンジ数20、データレート4Hz時)
ドップラー速度精度	±0.1m/s
データ記録容量	約200GB
出力データ	① 水平風向風速 ② 10分平均風向風速 ③ 視線方向ドップラー速度、速度幅、SNR ④ 動揺データ(オプション)

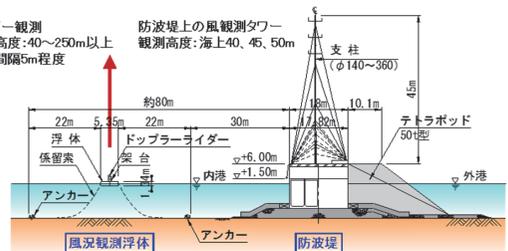


図12 観測レイアウト

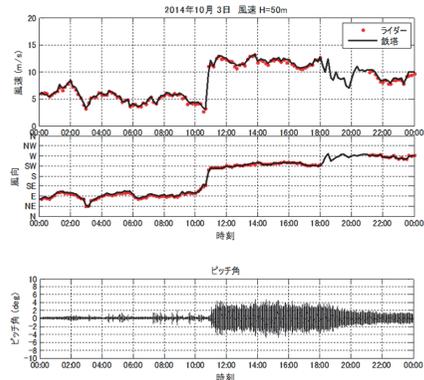


図13 観測時系列の例(2014年10月3日)

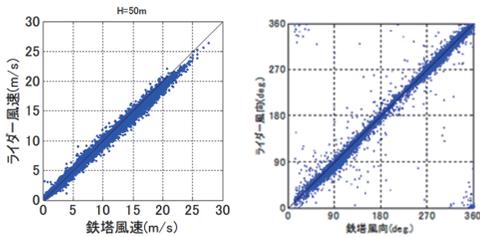


図 14 風況観測タワーとライダー観測との比較

体系的誤差の要因として、風況タワーの観測値に対する防波堤の影響、支柱周りの風速増減や後流の影響、ライダーに対する風況タワー後流の影響、が有力な候補として挙げられた。防波堤の堤高 5m は、最高観測高度 50m に対し 1/10 もあることから、防波堤による風速増加の影響を免れられないと考えられたからである。

防波堤影響については、ライダーが風況タワーの風上、風下に位置する場合に対する RANS 気流計算を行い、同高度の風況タワー、ライダー観測間の風速比を求め、影響を除去した。3 杯風速計に対する円柱支柱の影響については、IEC 61400-12-1<sup>14)</sup>の方法に倣い、16 風向それぞれに関し観測値を補正した。ライダーへのタワー後流影響は、Lubitz<sup>15)</sup>による円柱後流域風下距離による風速変化のモデル化式に従って、ライダーが風況タワーの風下に当たる風向に対し、ライダー風速を補正した。

補正後のライダー、風況タワーの水平風速の 10 分間平均値を比較したものを高度 40m, 50m について図 15 に示す。上述の体系的な誤差の改善が認められる。例えば高度 50m では回帰係数は 0.966 から 0.988 に改善した。観測への影響因子の作用機構に整合した合理的な誤差除去によって改善が見られたが、これによりライダー観測は検証されたといえる。図示しないが、短期間であるものの北九州響灘で海上 80m の風況タワーとの比較も行い、相関係数 0.987、回帰係数 1.006 を得ており、能代港での観測と合わせ、高度 80m までのライダー観測の妥当性が示されたといえる。

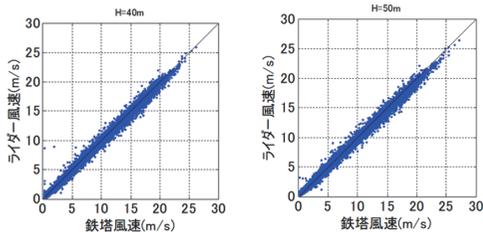


図 15 風況タワーとライダー観測との比較

### 3. 3 WRF による高々度のライダー観測検証の試み

高度 80m までライダー観測の検証ができたことを述べたが、ここではさらに、図 16 (左) の領域設定に対する WRF 計算を用いて、より高い高度でのライダー観測の検証を試みた。検証の考え方を図 16 (右) に示す。風況タワー観測値に対する高い精度での予測を与えるよう最適化された WRF 計算は、風況タワーで検証されたと見なすことができる。こうした WRF 計算に対し、同じく風況タワーで検証されたライダー観測が、タワーより高い高度でも相互により対応を示すならば、ライダーの観測はその高度範囲でも妥当と見なせると考えられる。

WRF の最適化は、台風や低気圧、前線の通過といった観測地点での代表的な 21 の天候パターン (延べ 54 日) について、物理モデルや海面温度、データ同化等の異なる組合せで予測を行い、最も予測精度のよい組合せを選ぶことを行った。最適化検討に用いた例として、図 17 に境界層モデル (YSU, MYJ, MYNN)<sup>12)</sup>による予測、風況タワー、およびライダー観測の鉛直分布を示す (3 時間毎、横軸の 3 時間の幅が 10m/s である)。図 18 は 8 月 29 日の日平均である。

最適化された WRF 予測および風況タワーそれぞれの年平均風速の鉛直分布を比較したものを図 19 に示す。WRF と風況タワーとの対応はかなりよい。高度 50m の予測誤差 ((予測値-真値)/真値×100%) は 1.13% である (風況タワー : 7.57m/s, WRF : 7.68m/s)。図 20 に、欠測無しで相互の比較可能な全データについての風速出現率を高度 50m, 90m, 130m について示す。多少のずれはあるものの、WRF 計算、ライダー観測の対応はいずれの高度でもかなりよいように思える。風況タワーより高い高度で WRF 計算に対するライダー観測の相対誤差は、高度 90m, 130m でそれぞれ 4.5%、4.6% であるが、これは、ライダー観測値の一定水準の合理性を示すものと考えられる。

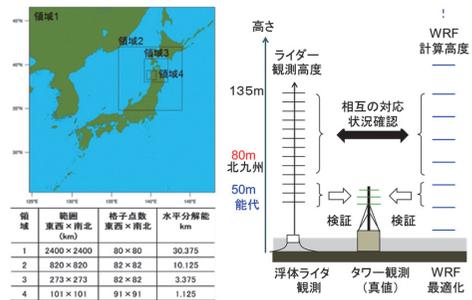


図 16 WRF 計算領域 (左) と検証の考え方 (右)

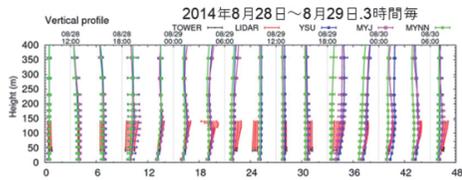


図 17 10 分間平均風速の鉛直分布 (横棒は標準偏差)

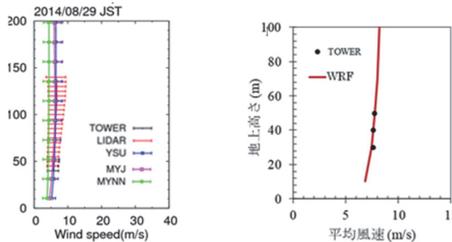


図 18 日平均風速 (8 月 29 日) 図 19 年平均風速

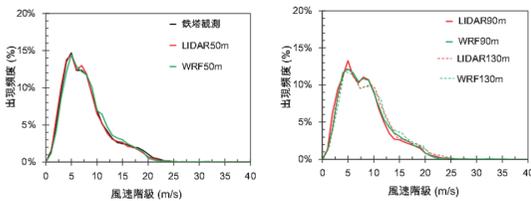


図 20 風速出現率 (比較可能な全データ対象)

#### 4. まとめ

本報では、ドップラーライダーを用いた洋上風速・風向・乱流強度を計測する手法を紹介し、以下の結論を示した。

1. 降水量がスキヤニングライダーのデータ取得率に大きな影響を与え、降雪時にスキヤニングライダーのデータ取得率が大きく低下することを示した。
2. シングルライダーにより 1 年間の洋上風況観測を実施し、大気安定度および陸上地形が洋上風況に与える影響を明らかにした。
3. デュアルライダーにより計測された風速・風向の性能評価指数 KPI は Best Practice に相当し、また風速ビン毎の乱流強度は風況観測タワーの三杯風速計の値とよく一致した。
4. 簡易浮体上の鉛直ライダーにより高高度の風速・風向を測定でき、高い計測精度を有することを示した。

#### 参考文献

- 1) NEDO, 洋上風況観測ガイドブック, <https://www.nedo.go.jp/content/100948288.pdf>, (2023)
- 2) 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, pp. 54-57, (2019)

- 3) Yamaguchi, A. and Ishihara, T., “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)
- 4) Yamaguchi, A. and Ishihara, T., “A correction method of Lidar measured turbulence and its validation by using Metmast data”, Proceeding of the ICWE16 Conference, (2024)
- 5) Goit, J. P., Yamaguchi, A. and Ishihara, T., “Measurement and prediction of wind fields at an offshore site by scanning Doppler LiDAR and WRF”, Atmosphere, 11, 442, (2020)
- 6) 間野 晶子, 上野 晃世, 糸崎 俊介, 石原 孟, 「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」, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol. 47, No. 2, pp. 44-54, (2023)
- 7) Mamo, A., Ueno, A., Itozaki, S. and Ishihara, T., “Assessment of offshore wind climate in coastal areas of Japan using single scanning Doppler LiDAR”, Journal of Physics, Conference Series, (2024)
- 8) 渡邊 慶一郎, 高桑 晋, 邊見 力, 石原 孟, 「デュアルスキヤ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, pp. 40-48, (2021)
- 9) 榎木 康太, 石原 孟, 「現地観測のデータ有効率を考慮した MCP 法により補完された風速・風向データの評価式の提案」, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol. 47, No. 2, pp. 36-43, (2023)
- 10) The Carbon Trust, “OWA Roadmap for the Commercial Acceptance of Floating LiDAR Technology, Version 2.0”, (2018)
- 11) 後藤 暁, 大塚 清敏, 林 秀郎, 「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」, 風工学シンポジウム論文集, pp. 25-30, (2016)
- 12) Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Powers, J.G. and Wang, W., “A Description of the Advanced Research WRF Version 3”. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR, DOI: 10.5065/D68S4MVH, (2008)
- 13) NEDO, 局所風況マップ, <https://approwl.infoc.nedo.go.jp/nedo/index.html>, (2014.6)
- 14) IEC 61400-12-1, Power performance measurements of electricity producing wind turbines, (2005)
- 15) Lubitz, D. W., “Effects of tower shadowing on anemometer data”, 11th ACWE, PR, U.S.A., (2009.9)