淡路島西岸におけるスキャニングドップラーライダーと 気象マストとの風の比較観測

日本気象株式会社 荒木龍蔵

1. はじめに

ドップラーライダーは従来の気象マストに比べ、設置や 測定点の変更が容易、高高度での測定が可能である等 の利点があり、風力発電開発プロジェクトの風況観測ツー ルとして注目されている1,2。中でも、全天スキャンの可能 なドップラーライダー (以下「スキャニングライダー」という) は、ドップラーライダー本体から水平に離れた地点の上 空の風を観測することが可能となるため、これを使用する ことによって従来の洋上気象マストに比べ大幅なコスト削 減が見込める。これらの理由から、スキャニングライダー による風況観測は、特に洋上風力発電開発において期 待が高まっている。一方で、ドップラーライダーの測定原 理は従来の装置 (風杯式風速計等) とは完全に異なるた め、その測定精度に対する不安も多い。そのため、スキャ ニングライダーを洋上風況観測に使用する場合、スキャ ニングライダーの測定精度を予め確認しておくことが重要 となる^{2),3)}。本稿では、環境省による「平成 28 年度風力・ 地熱発電に係る地域主導型の戦略的適地抽出手法の構 築事業」(兵庫県洲本市)における洋上風況調査の一環 として実施されたスキャニングライダーと気象マストとの比 較観測結果を報告する。この比較観測は、スキャニングラ イダーの測定精度の検証のため、洋上風況観測の前に 行われたものである。

2. Galion ライダー・観測サイト・データ

2.1. Galion ライダー

観測に用いたスキャニングライダーは Galion ライダー G4000 (以下「Galion ライダー」という) (英国製) である。 Galion ライダーは全天スキャン可能なパルス型ドップラー ライダーである。表 2.1 に Galion ライダーの仕様を、図 2.1 に Galion ライダーの設置状況の写真を示す。比較観測で は、2 台の Galion ライダーを使用した。Galion ライダーに よる測定では、ライダーのスキャナの仰角を固定し、方位 角のみを変えて測定する Plan-position Indicator (PPI) ス キャン 4を用いた。Galion ライダーの測定値から水平風ベ クトルへの算出には VAD 法 5^{5,6} を用いた。

| 表 2.1 | Galion ライダーの仕様 |
|-------|----------------------|
| | Galion Lidar (G4000) |

| 機種 | Galion Lidar (G4000) | | |
|----------|-------------------------------|--|--|
| メーカー | Wood Group (UK) | | |
| 測定レンジ*1 | 80 m ~ 4000 m | | |
| レンジ幅 | 30 m | | |
| 測定レンジ数 | 130 | | |
| 風速測定精度*2 | ±0.1 m/s 未満 | | |
| 電源 | 24 V DC (100 V AC 接続可能) | | |
| 当時一 | 130 W (通常時) | | |
| 府員电力 | 300 W (拡張温度オプション時) | | |
| 寸法*3 | $84 \times 66 \times 66 (cm)$ | | |
| 重量*3 | 85 kg | | |

*1: 測定は 4000m まで可能だが、測定精度の良い解析に使用 可能なデータの取得距離は大気の状況によって異なる

*2: ライダーのレーザー光線に沿った速度 (視線速度)

*3: 脚部を除いた値



図 2.1 Galion ライダー写真

2.2. 観測サイト

観測サイトは淡路島西岸 (兵庫県洲本市五色町)の海 岸域である。図 2.2 (上図) に Galion ライダーと気象マスト の位置を示す。観測サイトの西側には播磨灘が広がって いる。観測サイトの周囲は平坦であり、観測サイトへ影響 を及ぼすような構造物は見られない。観測サイトの北側で は東から西へ流れる鳥飼川の河口が見られ、鳥飼川の両 岸には標高 50 ~ 60 m の丘が分布している。また、観 測サイトから東へ 7 ~ 8 km の島中央部には標高 200 ~ 450 m の山が分布している (図略)。図 2.2 (下図) に Galion ライダーによる測定点の概略図を示す。Galion ライ ダーから気象マストまでの水平距離は約 160 m 、測定点 の高度は 60 m である。



図 2.2 Galion ライダーと気象マスト位置図(上)及び Galion ライダー測定点の概略図(下)

2.3. データ

解析に使用したデータの期間は 2016年11月12日~2016年12月13日の約1か月間である。解析には Galion ライダーの測定値から算出した水平風速・風向の10分平均値、及び気象マストで測定された水平風速・風向の10分平均値を使用した。水平風速の解析では、気象マストによって測定された10分平均風速が4~16 m/sの時刻を抽出した。また、気象マストに設置された風速計に対する、気象マストの影響を避けるため、気象マストの10分平均風向が90度~150度以外の時刻の水平風速データを抽出した。水平風向の解析では、真北を0度とすることによる影響を避けるため気象マストの水平風向が352.5~7.5度以外の時刻の水平風向データを抽出した。

3. 比較観測結果

3.1. 解析期間全体での比較結果

図 3.1 に Galion ライダーと気象マストによって観測され た水平風速・風向の時間変動を、図 3.2、図 3.3 に散布図 を示す。また、表 3.1 に、Galion ライダー風速の気象マス ト風速に対するバイアス (期間平均値の差)、RMSE (Root Mean Square Error)、及び相関係数を示す。図 3.1 の時系 列では、2 台の Galion ライダーの内の、1 台の結果を示し ている。表 3.1 のバイアスと RMSE では、各々気象マスト 風速の平均値で除した比 (相対バイアス及び相対誤差) も示している。Galion ライダーの水平風速・風向の時間変 動では、気象マストの水平風速・風向の時間変動と同様 の変動が見られる。水平風速の散布図 (図 3.2) では、線 形回帰直線の決定係数 (R²) は両ライダーで 0.980 以上 (Galion1 で 0.982、Galion2 で 0.980) である。 Galion ライ ダー風速の期間平均値のバイアスは両ライダーで2%以 下 (Galion1 で 0.13 m/s (1.82 %)、Galion2 で 0.03 m/s (0.46%))、RMSE は両ライダーで5%以下 (Galion1 で 0.36 m/s (4.93 %)、Galion2 で 0.35 (4.85 %))、相関係数は 両ライダーで 0.990 以上 (Galion1 で 0.991、Galion2 で 0.990) である。Galion ライダー風向と気象マスト風向との 比較では、散布図 (図 3.3) に示された線形回帰直線の 切片は 6 度~7 度と大きいが、決定係数 (R²) は、 Galion1、Galion2 共に 0.999 以上である。



図 3.1 Galion ライダーと気象マストにおける水平風速 (上)と水平風向(下)の時系列



図 3.2 水平風速の散布図



表 3.1 水平風速の期間平均、バイアス、RMSE (Root Mean Square Error)、相関係数

| Galion 1 vs 気象マスト (水平風速) | | | | | |
|---------------------------|--------------|--------------|--|--|--|
| 期間亚均 (m/s) | Galion | 7.48 | | | |
| 知间十圴 (11/5) | 気象マスト | 7.35 | | | |
| バイアス (m/s) | 0.13 (1.82%) | | | | |
| RMSE (m/s) | 0.36 (4.93%) | | | | |
| 相関係数 | 0.991 | | | | |
| Galion 2 vs MetMast (HWS) | | | | | |
| 期間亚均 (m/s) | Galion | 7.38 | | | |
| 知间十圴 (11/5) | 気象マスト | 7.34 | | | |
| バイアス (m/s) | 0.03 (0.46%) | | | | |
| | | | | | |
| RMSE (m/s) | | 0.35 (4.82%) | | | |

水平風速について、気象マスト風速の 4 m/s ~ 16 m/s の風速領域を 0.5 m/s 間隔の風速領域 (ビン) に分け、 各ビンの平均風速を比較した。各ビンの風速範囲は、例 えば、4.0 m/s のビンは 3.75 m/s 以上 4.25 m/s 未満の風 速範囲となる。図 3.3 は風速ビン毎の期間平均値相対バ イアスを示している。相対バイアスは、Galion1 では 4.0 m/s、14.5 m/s、15.0 m/s のビンを除いて 0~3%、Galion2 では全てのビンで -2~2% である。



図 3.4 風速ビン毎の期間平均値相対バイアス (破線は期間平均値の標準偏差の範囲)

図 3.3 水平風向の散布図

3.2. 海風・陸風時における水平風速比較結果

水平風速の相関について、海風時と陸風時の違いを 調べた。図 3.5 に海風と陸風の定義を示す。海風と陸風 は、海岸線の向きや気象マストの影響を考慮し定義した。 海風は気象マストの風向が 222.5°~357.5°の風、陸風 は気象マストの風向が 42.5°~90.0°、及び 150.0°~ 177.5°の風と定義した。図 3.6 は海風時及び陸風時の散 布図を示している。表 3.2 は水平風速の期間平均、バイア ス、RMSE、相関係数を示している。散布図 (図 3.6)では、 線形回帰直線の決定係数 (R²) は、海風で 0.984~0.985、 陸風で 0.945~0.960と、海風の方が大きい。Galion ライダ 一の相対バイアスは、Galion1 では海風よりも陸風の方が 小さいが、Galion2 では海風の方が陸風よりも小さい。 Galion ライダーの RMSE の相対誤差は、両ライダーで海 風の方が陸風よりも小さく、相関係数は、両ライダーで海 風の方が陸風よりも大きい。



図 3.5 海風と陸風の定義



図 3.6 海風時および陸風時における水平風速の散布図 (左図:海風時、右図:陸風時)

表 3.2 水平風速の期間平均、バイアス、RMSE (Root Mean Square Error)、相関係数 (海風時と陸風時)

| Galion 1 | | 海風 | 陸風 |
|---|-------------------------|--|--|
| 期間平均 (m/s) | Galion | 8.15 | 5.46 |
| | 気象マスト | 7.97 | 5.44 |
| バイアス (m/s) | | 0.18 (2.26%) | 0.02 (0.33%) |
| RMSE (m/s) | | 0.36 (4.55%) | 0.34 (6.25%) |
| 相関係数 | | 0.993 | 0.973 |
| | Galion 2 | | |
| Galio | on 2 | 海風 | 陸風 |
| Galio 期間买均 (m/s) | on 2 Galion | 海風 8.11 | 陸風 5.27 |
| Galia 期間平均 (m/s) | on 2 Galion 気象マスト | 海風 8.11 7.97 | 陸風 5.27 5.45 |
| Galia 期間平均 (m/s) バイアス (m/s) | on 2 Galion 気象マスト | 海風 8.11 7.97 0.15 (1.85%) | 陸風 5.27 5.45 -0.18 (-3.28%) |
| Galia 期間平均 (m/s) バイアス (m/s) RMSE (m/s) | on 2 Galion 気象マスト | 海風 8.11 7.97 0.15 (1.85%) 0.35 (4.44%) | 陸風 5.27 5.45 -0.18 (-3.28%) 0.34 (6.53%) |

4. まとめ

全天スキャンが可能なスキャニングライダーである Galion ライダーを用いて、PPI スキャンによるスキャニング ライダーの測定精度を確認するため、海岸に設置された 気象マストとの比較観測を実施した。比較観測は 2 台の Galion ライダーについて実施した。Galion ライダーと気象 マストとの水平距離は 160 m である。Galion ライダーと気象 象マストとの比較解析は、気象マストの風速が 4 m/s ~ 16 m/s の範囲について行った。水平風速の比較では、 海風時と陸風時の違いについても調べた。主な結果は次 の通りである。

- Galion ライダー風速と気象マスト風速から算出した 水平風速の線形回帰直線の決定係数は 0.980 以上、 相関係数は 0.990 以上、期間平均値のバイアスは 2% 以下、RMSE は 5% 以下だった。
- 海風は陸風よりも強い傾向が見られ、Galion ライダ
 ー風速と気象マスト風速との比較では海風の方が、
 相関が良かった。
- Galion ライダー風向と気象マスト風向との比較では、
 算出した線形回帰直線の切片が 6~7 度と大きかったが、決定係数は 0.999~1.000 であり、良い相関が見られた。

今回の比較観測では、Galion ライダー風速と気象マス ト風速との期間全体平均値のバイアスは2%以下だった。 海風と陸風における比較結果の違いの主要因は、ドップ ラーライダー測定値から水平風ベクトルを算出する際に 仮定する風の空間一様性や、海面と陸面の幾何学的粗 度の違いの観点から、陸風の方が、海風に比べ乱れが大 きいことによると考える。 ドップラーライダーによる風観測では、その測定原理や 水平風ベクトルの算出過程により、風の空間一様性の仮 定による不確かさ (uncertainty) が必ず含まれる。また、 大気中のエアロゾルが少ない場合等、データの欠損も生 じることがある。これらの短所を踏まえても、スキャニングラ イダーによる洋上風の実測は洋上風況調査において重 要な役割を果たす。例えば、海岸に設置された風況マス トの風データを入力値とした数値シミュレーション結果の 検証や補正にスキャニングライダーの実測値が有用であ る [¬]。スキャニングライダーを用いた洋上風況調査は、従 来の陸上風況マスト、数値シミュレーションと組み合わせ ることにより、低コスト且つ効率的に、より推定精度の高い 調査となる。

5. 謝辞

この調査は、環境省による「平成 28 年度風力・地熱発 電に係る地域主導型の戦略的抽出手法の構築モデル事 業」(兵庫県洲本市)の一環として行われました。ここに謝 辞を申し上げます。

6. 参考文献

- 伊藤芳樹・早崎宣之・前田太佳夫,風況調査におけるリモートセンシングの利用と技術的課題,環境技術, Vol.41, No.9, 2012, pp.556-561.
- Clifton, A., Elliot, D., Courtney, M., 15. Ground-Based vertically Profiling Remote Sensing for Wind Resource Assessment, 1st ed., *Expert group study on* recommended practices, International Energy Agency (IEA) Wind, 2013, 43p.
- IEC 61400 12 -1, Wind energy generation systems Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines, *International Electrotechnical Commission (IEC)*, 2017, 558p.
- 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, 2018, pp.7-16.
- 5) 星野俊介・岩渕真海, 視線方向データを用いたドッ プラーライダーの風ベクトル算出, *高層気象台彙報*, 2013, 第71号, p.1-10.
- 6) 梶原佑介・大野洋, 気象ドップラーレーダーから算 出される VAD 風の品質管理手法の開発及びデー タ特性の調査, 測候時報, 第82 巻, 2015, pp.15-53.
- Masaki, T., Ohsawa, T., Konagaya, M., Kato, H., Mito, T., and Eguchi, S., *Investigation of WRF simulated horizontal wind speed gradient using scanning lidar*

measurement, Proceedings of Grand Renewable Energy 2018, 2018, P-Wd-1-6.