

洋上風況マップ NeoWins の高精度化に向けた外洋における風況推定手法の検討

Investigation of Offshore Wind Condition Estimation Methods for Improving the NeoWins Offshore Wind Resource Map

赤井 玲那^{*1}

Reina AKAI

^{*1} Graduate Student, Kobe Univ.

Abstract

This study reexamines offshore wind estimation methods and WRF model settings used in the NeoWins offshore wind map. To simulate satellite observations, surface wind measurements from floating lidar with reduced temporal resolution were combined with WRF vertical profiles. The results indicate that using WRF alone yields higher accuracy than the combined approach when the temporal resolution of the surface wind measurements exceeds 3 hours. The WRF planetary boundary layer schemes were also reexamined by comparing the MYJ scheme used in NeoWins with its successor, MYNN. Evaluations based on wind speed accuracy, vertical shear, and wind speed frequency distributions show that MYJ is more accurate than MYNN. MYNN performs better under stable conditions, whereas MYJ shows higher accuracy under unstable conditions. Because stable conditions are more common in Europe and unstable conditions dominate along the Japanese coast, MYNN performed better in European studies, while MYJ performed better in this study.

キーワード：洋上風況マップ, NeoWins, WRF, PBL スキーム, 大気安定度
Key Words : Offshore Wind Resource Map, NeoWins, WRF, PBL scheme, atmospheric stability

1. はじめに

洋上風況マップ NeoWins (NEDO Offshore Wind Information System) は2017年の公開以来、洋上風力発電の事業化や計画策定に広く活用されてきた。しかし、EEZにおける詳細な風況情報の整備や、近年の風車大型化に伴い、同マップで提供される風況データの高度が十分ではないなど、最新の開発動向に対応しきれていない点が指摘されている。これらの課題を踏まえ、NeoWinsの改定に向けた検討が進行中である。2024年には「洋上風況マップ改定に向けた仕様策定のための調査」事業¹⁾が実施され、改定版マップに求められる仕様・要件が整理された。

NeoWinsにおける風況推定精度を改善していくための1つの課題は、外洋におけるハブ高度風況推定において、(1) WRF (Weather Research and Forecasting model)²⁾によるハブ高度風況をそのまま利用する手法と、(2) NeoWinsのように人工衛星による表層風(10m高)観測値をWRFの鉛直プロファイルを用いてハブ高度へ持ち上げる手法³⁾のいずれが適切であるか、明らかにすることである。そこで本研究では、まず、上記課題の検討を行う。次いで、WRFの計算条件についても検討を加えることで、NeoWinsにおける洋上風況推定精度の向上に資する知見を得ることを目的とする。

2. 衛星の観測頻度が風況推定精度に与える影響

2.1 検証の概要

赤井ほか⁴⁾では、衛星観測値を模擬した低高度観測値を、WRF鉛直プロファイルを用いてハブ高度まで持ち上げる手法の検討を行った。上記検証には、低高度観測値として、FLS (Floating LiDAR System)⁵⁾による10分毎の高度12m観測値を使用した。衛星観測値はFLS観測値よりも明らかに時間解像度が低い。したがって、外洋における風況推定手法を高度化するためには、衛星観測値の時間解像度に起因した誤差の観点から、さらなる検証が重要となる。そこで、本章では衛星の観測頻度が推定精度に与える影響について、FLSによる低高度観測値を間引くことにより検証を行った。

2.2 データと手法

本章における検証には、青森県六ヶ所村むつ小川原港と新潟県胎内市沖、それぞれ海岸から1.5kmと3.8kmに設置されたFLS観測値を用いた。FLSは両地点共に、Fugro社SEAWATCHで、検証に使用した高度は12mと120mである。本章では外洋海域での状況を想定して、FLSの全観測高度が海からの風(以降、海風)となる時のデータのみを用いた。

WRFの計算条件をTable 1に示す。計算結果は第2領域のものを使用し、出力時間解像度は1時間、空間解像度は500mである。

^{*1} 神戸大学大学院 海事科学研究科 大学院生
(原稿受付： 年 月 日)

Table1 WRF model configuration

Model	Mutsu-Ogawara: WRF(ARW) ver4.1.2 Tainai: WRF(ARW) ver4.3.3
Period	Mutsu-Ogawara: 2020/12/1~2021/7/31(8months) Tainai: 2022/5/1~2023/4/30(1year)
Input Data	Met data: JMA LFM-GPV (1-hourly, 0.020°×0.025°) Soil data: NCEP FNL (6-hourly, 1°×1°) SST data: Met office OSTIA (daily, 0.05°×0.05°)
Terrain data	Elevation: METI·NASA ASTER-GDEM Land use: MLIT land use subdivision mesh
Grids	Domain1: 2.5km×2.5km (100×100 grids) Domain2: 0.5km×0.5km (100×100 grids)
Vertical levels	40 levels (Surface to 100hPa)
Physics options	Longwave process: Dudhia scheme
	Shortwave process: Rapid Radiative Transfer Model scheme
	Cloud microphysics process: Ferrier (new Eta) scheme
	PBL process: Mellor-Yamada-Janic (Eta operational) scheme
	Surface layer process: Monin-Obukhov (Janic Eta) scheme
FDDA	Land-surface process: Noah Land Surface Model scheme
	Cumulus parameterization: Kain-Fritsch (new Eta) scheme (only domain1)
	Domain1: Enabled (u, v, θ, q) Domain2: Enabled (u, v, θ, q) above the thirteenth layer (approximately 2km)
Roughness Table	Based on JMA

2.3 ハブ高度風速の推定手法

本章では風車ハブ高度を 120m と想定する。推定手法の 1 つ目は、WRF で計算された 120m 高度の風況をそのまま推定値として使う方法である。以降、この手法を「WRF 単体 (WRF only)」と表記する。2 つ目は、FLS による 12m 高度観測値を、WRF 鉛直プロファイルによりハブ高度まで持ち上げる方法である。マイクロ波散乱計を搭載した極軌道衛星は約 2 回/日の頻度で同じ海域を観測するため、NeoWins のように 2 基の衛星を使用する場合、4 回/日のデータ得られる。そこで、本研究では、10 分間隔の 12m 高度観測値から、時間解像度が 1 時間、3 時間、6 時間となるように 3 種類のデータセットを作成し、それぞれ手法①、手法①-a、手法①-b として検証を行なった。手法①-a、手法①-b については、WRF 単体の 1 時間値と比較するために、それぞれにスプライン補間による時間内挿を施すことで 1 時間値を得た後、ハブ高度まで持ち上げた。持ち上げ手法は、既往研究⁴⁾で高精度であったベクトル補正手法とする。ベクトル補正手法は WRF から得

Table2 Details of the methods used for the analysis

Method	Temporal Resolution	Details
WRFonly	-	Uses 1-hour WRF outputs directly
Method①	1-hourly (24 data/day)	Lifts 1-hour low-altitude observations using the vector-correction method
Method①-a	3-hourly (8 data/day)	Applies spline interpolation to 3-hour observations, then lifts them using the vector-correction method
Method①-b	6-hourly (4 data/day)	Applies spline interpolation to 6-hour observations, then lifts them using the vector-correction method

られる 2 高度間の水平風ベクトルの差 $\Delta\vec{V}$ を用いて、式(1)により 120m 高度の風速 $\vec{V}_{120,VEC}$ を推定する手法である。手法の詳細と概念図を Table2 と Fig.1 に示す。

$$\vec{V}_{120,VEC} = \vec{V}_{12,OBS} + \Delta\vec{V} \quad (1)$$

但し、 $\Delta\vec{V} = \vec{V}_{120,WRF} - \vec{V}_{12,WRF}$

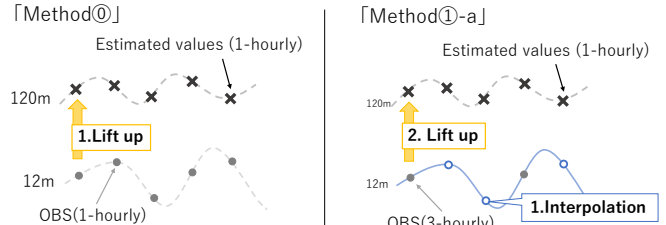


Fig. 1 Conceptual diagram of Method① and Method①-a

2.4 結果

むつ小川原港と胎内市沖における風速推定精度に関する統計値を Table3 に示す。以下、統計値は Bias (平均誤差)、RMSE (平方根二乗平均誤差)、R (相関係数) を使用し、Bias と RMSE は検証データの平均値で除したものを百分率で示した相対値を用いる。Table3 より、手法①と手法①-a の 2 手法は、海域に関わらず、概ね WRF 単体よりも精度良くハブ高度の風速を推定できることがわかった。一方で、手法①-b に関しては WRF 単体と同程度の精度となることがわかった。

Table3 Statistical comparison of estimated 120 m wind speed (Values outperforming the WRF-only are highlighted)

Mutsu-Ogawara	WRFonly	Method①	Method①-a	Method①-b
		1-hourly	3-hourly	6-hourly
Bias[%]	-0.6	1.6	1.1	-0.5
RMSE[%]	23.2	15.4	18.1	22.0
R[-]	0.89	0.95	0.93	0.90

Tainai	WRFonly	Method①	Method①-a	Method①-b
		1-hourly	3-hourly	6-hourly
Bias[%]	-3.6	-0.3	-1.3	-2.6
RMSE[%]	21.3	12.5	19.9	25.1
R[-]	0.89	0.96	0.90	0.85

以上より、低高度観測値の時間解像度が 3 時間よりも高い場合、衛星観測値を用いて推定する方が、WRF 単体手法よりも精度が良いことが示唆された。ただし、実海域での適用においては、衛星観測値自体が誤差を持つことや、現在、3 時間以上の時間解像度で衛星観測値を入手することが困難である等の課題が存在する。このような課題を考慮すると、現状、外洋におけるハブ高度風速の推定には、WRF 単体手法が最適であると考えられる。

3. WRF PBLスキームの検討

3.1 検証の概要

衛星観測値とWRF計算値を組み合わせる風車ハブ高度の風況を推定する手法においては、WRFによる風速鉛直プロファイルの再現性も風況推定精度に大きく影響する。特に、風速鉛直プロファイルを決定付ける大気境界層（以下、PBL）スキームの選定は重要であるため、先行研究⁶⁾においても欧州の風況マップ NEWA (New European Wind Atlas) 作成に際して、最適なPBLスキームを決定するために包括的な感度実験が行われた。そこで、本研究では、日本沿岸の洋上における最適なWRF PBLスキームの再検討を目的とする。具体的には、現在NeoWinsで採用されているMYJスキームと、同じMellor-Yamada型の乱流クロージャーモデルであり、NEWAで使用実績のあるMYNNスキームの2つのPBLスキームについて、風況推定精度の比較を行った。

3.2 データと手法

検証には、洋上3地点、陸上8地点に設置された鉛直ライダー（以下、VL）観測値と、8地点に設置され、洋上を観測したスキャニングライダー（以下、SL）観測値、計19地点の観測値を用いた。観測概要をTable 4に示す。検証に使用した観測高度は、VLが100m, 160m, 200m（能代のみ43m, 108m, 195m）、SLが40m, 100m, 160mである。本章においても、洋上を想定して、全観測高度が海からの風（以降、海風）となる時のデータのみを用いた。

Table 4 Overview of observations

Site	Observation Method	Instrument	Period
Mutsu-Ogawara	VL on breakwater (1.5 km offshore)	WindCube V2.1	2021/01-2021/12
Noshiro	VL on breakwater (1.0 km offshore)	ZX300M	2020/08-2021/07
Tainai	FLS (3.8 km offshore) Fugro SEAWATCH	ZX300M	2022/05-2023/04
Setana	VL on the coast + SL (SL: 1.6-4.5 km offshore observations)	VL: WindCube V2.1 SL: WindCubeScan	2022/07-2023/06
Yakumo			2022/07-2023/06
Kaminokuni			2022/07-2023/06
Matsumae			2022/10-2023/09
Katagami			2022/01-2022/12
Yuza			2022/07-2023/06
Kujukuri			2023/07-2024/06
Isumi			2022/07-2023/06

WRFは、v4.3.3を使用した。PBLスキームは、Mellor-Yamada-Janjić (Eta operational) scheme と、Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino Level 3 scheme を使用し、それぞれでWRF計算を実施した。接地層過程のスキームは、それぞれのPBLスキームと組み合わせることが推奨されている Monin-Obukhov (Janjić Eta) scheme と Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino surface layer scheme を使用した。解析は第2領域の結果を使用し、出力時間

解像度は10分、空間解像度は500m (NeoWinsと同じ) である。その他の設定は、Table 1と同様である。

3.3 検証結果

Fig. 2に海風時の高度160mにおける、年平均風速Biasを示す。ここでは、VL観測点11地点の結果だけを示している。Fig. 2より、11地点中8地点においてMYJの方がBiasが小さく、MYJの方が高精度であることが示唆された。なお、全19地点を対象とした解析においても、12地点でMYJの方がBiasが小さいことが確認できた。また、WRFはスキームに関わらず風速を過小評価する傾向が認められた。

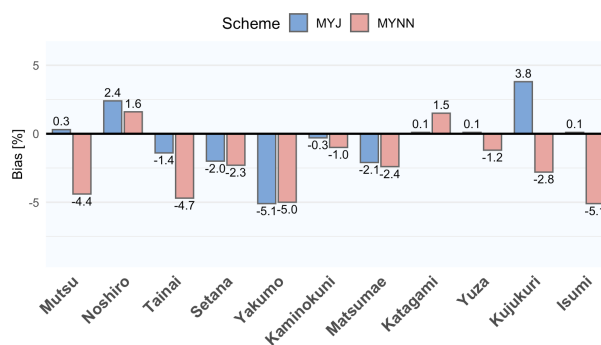


Fig. 2 Bias in annual mean wind speed at 11 VL measurement sites

鉛直シアについては、風速の高さ依存性を定量的に表すため、べき指数 α を用いて評価を行った。 α は、3高度の観測値を用いて、最小二乗法により算出した。Fig. 3にはべき指数 α の観測値に対する差異について、VL観測点11地点での結果を示す。Fig. 3より、11地点中では7地点でMYJの方が観測値に近い値をとっていることが分かった。なお、全19地点を対象とした解析においても、13地点で同様の傾向が確認された。

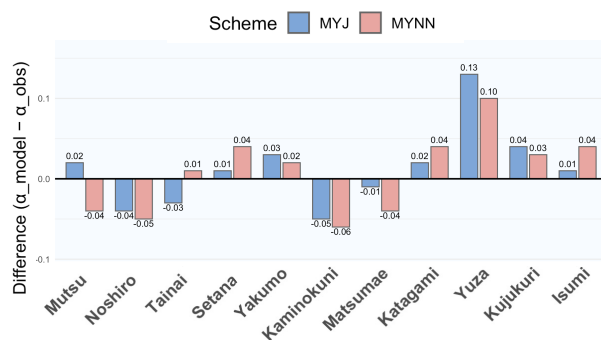


Fig. 3 Difference in wind shear (power-law exponent α) between WRF estimates and VL measurements

続いて、Earth Mover's Distance (EMD)を用いて、WRFによる風速頻度分布の再現性評価を行なった。EMDは、2つの確率分布の形状の違いを「移動させる作業量」で定量化する指標であり、値が小さいほど観測値

の分布に近いことを示す。この指標は、先行研究⁶⁾においても、モデル設定の選定基準の一つとして採用されていたため、本研究においても検証での使用を試みた。紙面の都合上、図は省略するが、EMD は 19 地点中 13 地点において MYJ の方が小さい値を示した。以上より、MYJ スキームの方が観測値の分布形状をより良く再現する傾向にあると考えられた。

4. 大気安定度に応じた PBL スキームの計算特性

4.1 検証の概要

前章から、日本沿岸における本研究の検証結果では、MYJ スキームの方が高精度となり、欧州で得られた知見⁶⁾と必ずしも一致しない事が確認された。この相違の要因として、大気安定度の出現頻度による違いが影響している可能性が考えられる。そこで本章では、大気安定度別に風況推定精度を検証することで、PBL スキームの特性がどのような安定度条件下で顕著に現れるのかを明らかにすることを目的とする。

現場観測値、WRF 計算条件は 3 章と同様である。大気安定度の判別には、WRF から出力されるパラメータ RMOL (モニン・オブコフ長 L の逆数) を使用し、 $0 < L < 200$ を安定、 $|L| \geq 200$ を中立、 $-200 < L < 0$ を不安定と区分した。

4.2 結果

代表してむつ小川原の高度 160m における安定度別風速 Bias を Fig. 4 に示す。Fig. 4 より、安定時は MYNN が、不安定時は MYJ の方が Bias が小さくなる傾向が見て取れた。この傾向は 19 地点中 12 地点で確認することができた。

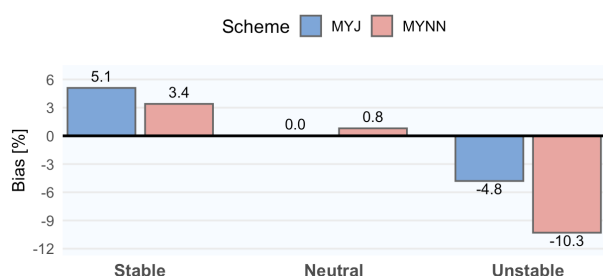


Fig. 4 Bias in annual mean wind speed at Mutsu-Ogawara by atmospheric stability

先行研究において、デンマーク Vindeby の洋上風況観測塔に基づく解析では、安定が全期間の約 4 割を占め、不安定は約 1 割にとどまることが報告されている⁷⁾。一方、むつ小川原に設置された FLS を用いて算出した安定度出現頻度は、不安定が全体の約 6.5 割を占め、安定は約 2.5 割と、Vindeby の観測とは大きく異なる特性を示した。このよう違いを踏まえると、欧州

を対象とした先行研究⁶⁾においては安定条件で相対的に高精度とされる MYNN が優位となったのに対し、不安定条件のサンプルが多い本研究では、MYJ の方が相対的に高い推定精度を示した可能性が高いと考えられる。

5. 結語

以下に本研究の主要な結果をまとめる。

1. ハブ高度風速の推定精度は、衛星観測値の時間解像度が 3 時間よりも低い場合、低高度観測値と WRF を用いて推定するよりも、WRF 単体の方が高精度である可能性が示唆された。
2. WRF PBL スキームとして MYJ と MYNN を用いて、年平均風速、鉛直シア及び風速頻度分布の精度を比較検証した結果、MYNN よりも MYJ を用いた場合の方が高精度となることが分かった。
3. 安定条件下では MYNN が、不安定条件下では MYJ が高精度となる傾向が確認された。欧州では安定、日本沿岸では不安定の出現率が高いことから、先行研究では MYNN が、本検証では MYJ が高精度となった可能性が考えられた。

参考文献

- 1) NEDO, 「洋上風況マップ改定に向けた仕様策定のための調査」事業成果報告書, 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 2024, 108 p.
- 2) Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., & Powers, J. G., A description of the advanced research WRF version 3 (NCAR/TN-475+STR). National Center for Atmospheric Research, 2008, 113 p.
- 3) Takeyama, H., Yamashita, T., Kato, K., Shimizu, T., Moriarty, P., & Guo, J., A comparison between Advanced Scatterometer and Weather Research and Forecasting wind speeds for the Japanese offshore wind resource map. *Wind Energy*, 23(11), 2020, pp.1596-1609.
- 4) 赤井玲那, 大澤輝夫, 上林将輝, 小長谷瑞木, 見崎豪之, 濱田康平, 竹山優子, 外洋におけるハブ高度風況推定技術の検討 (その 1) -WRF 鉛直プロファイルの検証-, 第 45 回風力エネルギー利用シンポジウム予稿集, 2023, pp.53-56.
- 5) 内山将吾, 大澤輝夫, 麻生裕司, 小長谷瑞木, 見崎豪之, 荒木龍蔵, 濱田康平, 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検証, 第 43 回風力エネルギー利用シンポジウム予稿集, 2021, pp.124-127.
- 6) Hahmann, A. N., Kelly, M., Brower, M., Badger, J., Peña, A., Toftegaard, H., Højstrup, J., & Courtney, M., The making of the New European Wind Atlas - Part1: Model sensitivity. *Geoscientific Model Development*, 13(10), 2020, pp.5053-5078.
- 7) Motta, M., Barthelmie, R. J., Vølund, P., The influence of non-logarithmic wind speed profiles on potential power output at Danish offshore sites. *Wind Energy*, 8(2), 2005, pp.219-236.