

メソスケールモデルを用いた洋上風況予測と不確かさの評価*

Offshore wind climate assessment by using mesoscale model and uncertainty evaluation

福島 雅人** 山口 敦*** 石原 孟***

Masato FUKUSHIMA Atsushi YAMAGUCHI Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

福島第1原子力発電所事故以降、再生可能エネルギーの飛躍的な導入拡大が期待されており、中でも約16億kWの導入可能性を有する洋上風力発電が注目されている。洋上風力発電量を正確に評価するためには風況予測が重要である。ドイツ沖50kmに位置する観測タワーFINO1を対象にメソスケールモデルWRFを用いた風況予測が行われ、年平均風速の予測誤差1%であることが報告されている¹⁾。しかし、日本は欧州と異なり遠浅の海岸が少ないため、洋上風力発電の開発は地表面の状態が複雑な沿岸部となり、沿岸地形、地表面粗度、海面水温の影響が重要である。

既往研究では、各種物理モデルの選択やナッジングの有無が気象シミュレーションの予測精度に与える影響が検証されている^{2,3)}が、地表面粗度および海面水温が洋上の風速頻度分布や風配などに与える影響を検討した例が少なく、不明点が残されている。また、風力発電プロジェクトを計画する際に、風況予測の不確かさは事業リスクとみなされ、内部収益率を左右する重要な因子となる⁴⁾が、日本においては風況予測の不確かさを定量的に評価した例がない。

そこで、本研究では、千葉県銚子沖を対象に、メソスケール気象モデルWRFを用いて通年の気象シミュレーションを実施し、ドップラーライダーにより観測された風向・風速データを年間・季節・日のスケールで比較することにより、土地利用および海面水温が洋上風況の予測精度に与える影響を明らかにするとともに、気象予測に含まれる不確かさを定量的に評価する。

2. 気象モデルと観測の概要

2.1 気象モデル

洋上風況予測を行うためにメソスケール気象モデルWRF (Weather Research and Forecasting) version 3.4.1を用いた。計算期間は2013年2月から2014年1月までの1年間とした。計算はスピンアップ期間を1日とし、

1ヶ月単位で行った。WRFの計算条件の概要を表-1に、計算領域を図-1に示す。各計算領域の水平解像度は18km, 6km, 2kmとし、100×100の格子を用いた。200m以下の鉛直層はドップラーライダーの計測高に合わせて設定した。また、気象データとしてNCEP (National Center for Environmental Prediction)の全球解析データ、地形データとして国土地理院50mメッシュ標高データおよび国土数値情報100mメッシュ土地利用(以下、GSIと表記)、海面水温データとして英国気象庁のOSTIA (Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis)を用いた。図-2(a), (b)にはUSGS (United States Geological Survey)と国土数値情報による土地利用の分類を示す。USGSで水田となっていた市街地が国土数値情報GSIによって再現されている。図-3(a), (b)にNCEPとOSTIAによる海面水温分布を示す。NCEPで再現できなかった黒潮の房総半島への接岸や親潮の流れ込みなどがOSTIAにより再現されている。

表-1 WRFの計算条件の概要

水平解像度	18km, 6km, 2km
水平格子数	100×100
鉛直層数	45層 (200mまでに11層)
気象データ	NCEP-FNL 1°×1° 6-hourly
海面水温データ	OSTIA 0.05°×0.05° 6-hourly
地形データ	標高: 国土地理院 50m メッシュ 土地利用: 国土数値情報 100m メッシュ
大気境界層	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE level2.5
接地境界層	Monin-Obukhov (Janjic Eta) scheme
地表面過程	unified Noah land surface model
4DDA	グリッドナッジング(domain3を除く)

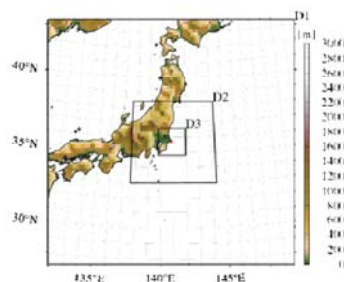


図-1 WRFの計算領域

*平成26年11月28日第36回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

** 学生会員 東京大学大学院工学系研究科

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

*** 会員 東京大学大学院工学系研究科 同上

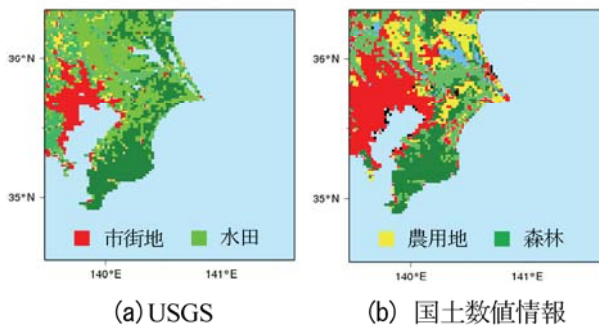


図-2 各データベースの土地利用分類の比較

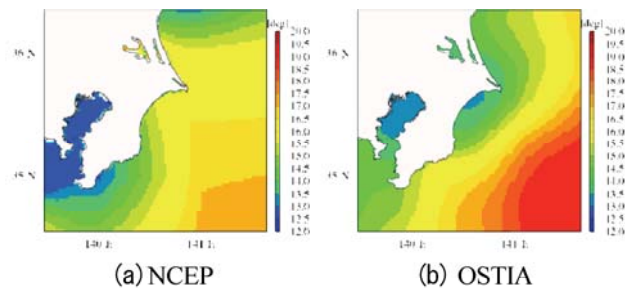


図-3 各データベースの海面水温分布の差異

2.2 洋上風況観測の概要

本研究では、千葉県銚子沖約3.1kmにおける風況観測タワーで計測された風向・風速データを検証データとして用いた。図-4(a)、(b)には、観測地点の位置（北緯35°68'16"，東経140°82'33"）と風況観測タワーの概観を示す。風況観測タワーは風車の東側約285m地点に位置しており、水深は約11.9mである。本研究では、検証用データとしてプラットフォームに設置されたドップラーライダーにより計測した8高度（60m~200m, 20m間隔）における10分間の風速・風向を用いた。なお、風車の後流の影響を受ける西風（258.75°~281.25°）データは検証用データから除外した。

また、水温に関しては観測タワーに水温計が平均水位、平均水位下1mおよび2mの計3高度に設置されている。3つの水温計間に著しい差異が生じた場合は欠損とみなした上、水温計が大気中に露出する可能性の低い平均水位下2mの水温を検証用データとして使用した。

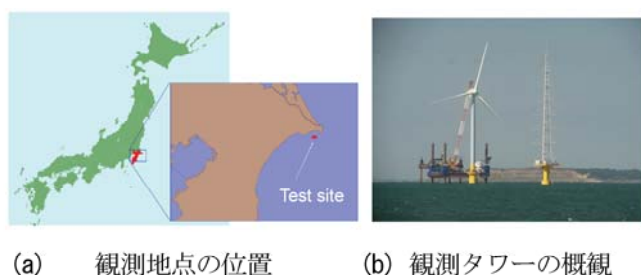


図-4 洋上風況観測の概要

2.3 計算ケースと評価方法

地形、土地利用および海面水温が洋上の風況に与える影響を調べるために、表-2に示す4ケースについて計算を行った。Case1は既存のUSGSデータベースを用いた場合、Case2は国土院の標高データおよび国土数値情報の土地利用データを用いた場合、Case3は海面水温データとして英国気象庁のOSTIAを用いた場合、Case4はOSTIAに対して観測された海面水温データを用いてバイアス補正を行った場合である。

銚子観測点の海域は水深が浅く、また開放的であるため、水温は黒潮および親潮の影響、そして陸水の影響などを強く受ける⁵⁾。図-5には、各データベースの海面水温および水温観測値の季節変化を示す。水温の観測に比べ、NCEPは一年を通じて水温を過大評価となっているが、OSTIAはこの過大評価を大きく改善している。ただし、冬季における水温の差は依然として発生している。これは、内部潮汐や沿岸湧昇といった沿岸部で生じるマイクロスケールの現象が再現できていないことや親潮の流れ込みの再現性が不十分であることが原因と考えられる。本研究では、この誤差の影響を検証するために、水温の観測データを用いてバイアス補正を行い、海面水温データを作成した。本研究で得られる水温の観測値が1点のみであるため、OSTIAの水温分布が保存されていると仮定し、OSTIAの水温と観測水温とのバイアスを一律に補正した。

表-2 土地利用と海面水温による影響

	土地利用	海面水温	現地観測データ
Case1	USGS	NCEP	-
Case2	GSI	NCEP	-
Case3	GSI	OSTIA	-
Case4	GSI	OSTIA	銚子の水温データ

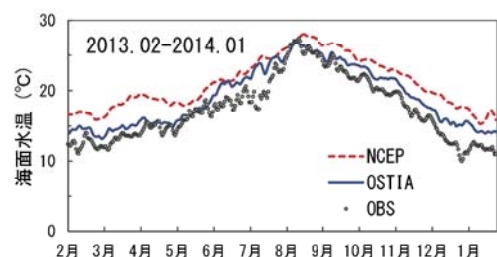


図-5 各データベースの海面水温の季節変化

WRFの計算結果と観測値との差を定量的に評価するために、年平均風速の相対誤差を計算した。また、予測の不確かさはハブ高さ（80m）における月平均風速のバイアスの標準偏差および36方位別風速比のバイアスの標準偏差として定義し、計算した。

3. 風況予測と観測による検証

3.1 風況の通年予測

図-6 には、ハブ高さにおける風速階級別頻度分布を示す。いずれの結果も 10m/s を超える高風速域では観測結果を良く再現している。Case1 では 5m/s 以下の低風速域を過小評価し、中風速域を過大評価しているが、地表面粗度および海面水温の再現性を高めることにより、予測精度が向上していることが分かる。

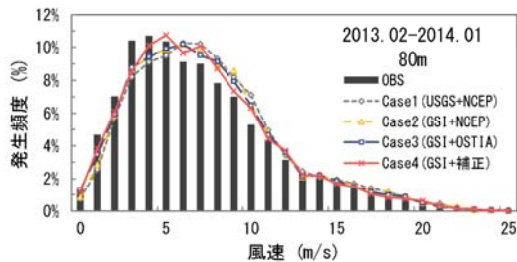


図-6 ハブ高さにおける風速階級別発生頻度分布

図-7 には、ハブ高さにおける風配図を示す。南側の風配は概ね一致しているが、北西方向の風の出現頻度が過大評価され、北北西の風の出現頻度が過小評価されている。海面水温の精度を高めることにより、北西方向の風の出現頻度の予測精度が大きく改善され、330°~340°における出現頻度のバイアスは 2.6%から 0.7%に減少した。これは陸海間の局所循環が精度良く再現されたことによるものであり、海面水温は風向の予測精度に大きな影響を与えていることが分かる。

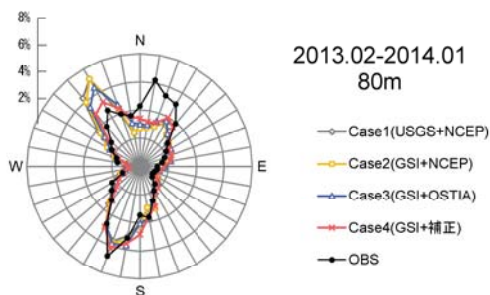


図-7 ハブ高さにおける風配図

図-8(a), (b) には、年平均風速の鉛直分布と相対誤差を示す。いずれの予測結果も、高度 160m 以上の相対誤差は 1%以下であり、観測値とよく一致している。一方、100m 以下の高度では 5%以上の大きな誤差が発生している。地形、土地利用および海面水温は海面に近い接地境界層内の大気運動に与える影響が大きいと言える。Case4 では、全ての高度の予測誤差は 4%以内となり、ハブ高さでの年平均風速の相対誤差は 7.7%から 2.8%に減少した。

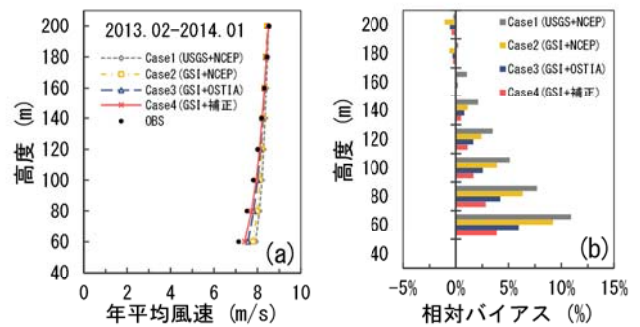


図-8 年平均風速の鉛直分布と相対誤差

図-9 には、ハブ高さにおける 36 方位別風速比を示す。W 方向の値は風車の後流の影響をうけるため、欠損とみなし、図に示していない。Case1 では北側における過大評価は標高および土地利用の精度の高いデータベース GSI を用いることにより改善された。また、海からの風は海面水温の高精度化により予測精度が向上した。しかし、最も過大評価となっている 330°方位付近および 30°~120°の範囲において、海面水温の高精度化により、風速比の予測精度の改善は不十分であり、その原因についてさらに調べる予定である。

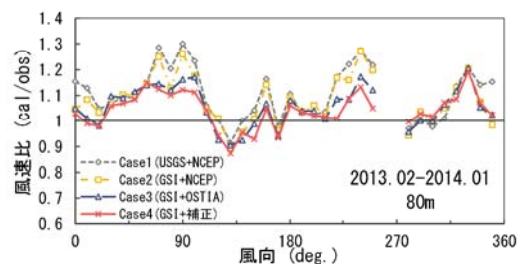


図-9 ハブ高さにおける 36 方位別年風速比

3.2 季節変化と日変化の予測

図-10(a), (b) には、ハブ高さにおける月平均風速と相対誤差を示す。月平均風速の誤差は主に冬季において生じており、海面水温の誤差が風速の予測誤差とよく対応している。Case1 の場合では最大 15.4%の誤差が生じるのに対して、Case4 の場合では 1 年を通じて誤差が 6%以内に収まる。Case1 と Case2 を比較すると、特に北風が卓越する冬季において誤差が低減している。これは土地利用分類が水田から市街地へ変更されたことにより粗度長が正しく再現された結果である。冬季において風速が過大評価となった原因は、海面水温の過大評価により大気の状態が不安定になり、過度に対流が生じたためである。一方、南風が卓越する夏季において大きな差異はみられないが、バイアス補正を行った Case4 の誤差が若干大きくなっている。これは沿岸部での海面水温のバイアスを沖合に対して一律に適用したことにより、海風の予測精度が低下したと思わ

れ、今後水温補正の方法をさらに検討する予定である。

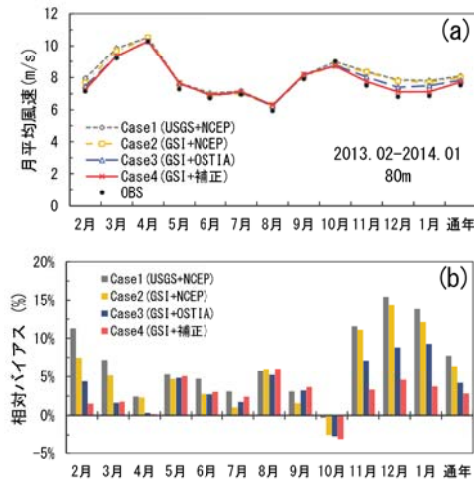


図-10 ハブ高さにおける月平均風速と相対誤差

図-11(a), (b)には、夏季(6・7・8月)と冬季(2・12・1月)における平均風速の日変化を示す。夏季では海風が卓越する日中に若干過大評価となるが、それ以外の時間帯では観測結果を良く再現している。冬季では土地利用分類と水温補正により、予測精度が向上したが、陸風が卓越する夜間に若干過大評価となり、その理由については今後さらに調べる予定である。

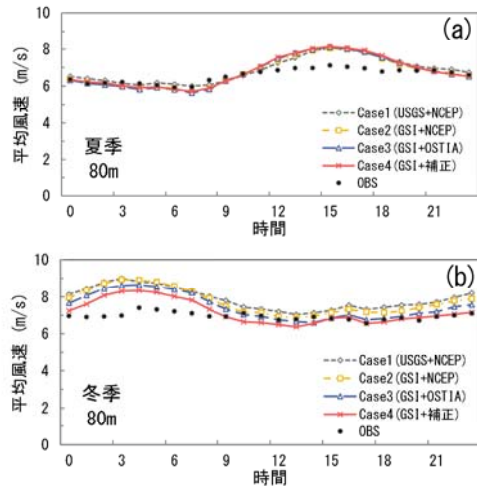


図-11 夏季と冬季における平均風速の日変化

3.3 不確かさの評価

表-3 には、ハブ高さにおける相対誤差と不確かさを示す。高解像度の地形、土地利用および海面水温データにより、月平均風速の不確かさは5.0%から2.5%に、風速比の不確かさは10.0%から6.9%に低減される。月平均風速の不確かさは風速がもつ不確かさを、風速比の不確かさは風速および風向の不確かさを表している。粗度は年平均風速の相対誤差の低減に対して寄与するものの、不確かさへの影響は小さい。一方、海面水温は風速・風向に大きな影響を及ぼすため、不確かさへ

の影響が大きい。

表-3 ハブ高さにおける相対誤差と不確かさ

項目	Case1	Case2	Case3	Case4
年平均風速の相対誤差	7.7%	6.3%	4.2%	2.8%
月平均風速の不確かさ	5.0%	5.0%	3.5%	2.5%
風速比の不確かさ	10.0%	9.3%	7.8%	6.9%

4. 結論

本研究では、メソスケールモデル WRF を用いて通年の洋上風況予測を行い、洋上風況観測タワーの観測結果と比較することにより、以下の結論を得た。

- 1) 年平均風速は、高解像度の地形、土地利用データを用いることと水温のバイアス補正を施すことにより、高度200mまで予測精度が向上した。ハブ高さでの年平均風速の相対誤差が7.7%から2.8%に低減し、また北西における風向の出現頻度のバイアスが2.6%から0.7%に低下した。
- 2) 風速の季節変化では、既存のデータベースを用いる場合に、冬季に10%以上の誤差が生じたが、粗度および海面水温の精度を高めることで、1年を通じて誤差が6%以内になった。また風速の日変化には、夏季の日中および冬季の夜間に予測風速は若干過大評価となったが、海面水温の精度を高めたことにより、冬季の風速予測精度が向上した。
- 3) 地表面粗度および海面水温の精度を高めることにより、月平均風速の不確かさは5%から2.5%に、風速比の不確かさは10%から6.9%に低下した。

謝辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務「洋上風況観測システム技術の開発」で得られた研究成果である。ここに記して関係者の皆様に感謝の意を表す。

参考文献

1) Berge E et al.: Modelling of offshore wind resources. Comparison of a meso-scale model and measurements from FINO 1 and North Sea oil rigs. Proceedings of EWEC, pp8-15, 2009.

2) 義江龍一郎, 三浦翔: 領域気象モデル WRF に基づく風環境評価のための標準上空風データの整備. 日本風工学会誌, Vol. 39, pp154-159, 2014.

3) Changhai Wang and Shuanglong Jin: Error features and their possible causes in simulated low level winds by WRF at a wind farm. Wind Energy, pp1315-1325, 2014.

4) Andrew T: Financing wind farms and the impacts of P90 and P50 yields. EWEA Wind Resource Assessment Workshop, 2011

5) 八木宏ら: 開放性海岸における夏季の水温変動特性. 海岸工学論文集, Vol. 43, pp. 1201-1205, 1996.