

MSSG を用いた年間のマイクロスケール風況予測

課題責任者

今村 博 株式会社 風力エネルギー研究所

著者

佐々木 亘^{*1}, 種本 純^{*1}, 植田 祐子^{*1}, 今村 博^{*1}

*1 株式会社 風力エネルギー研究所

風力は温室効果ガスの排出量削減や国産エネルギーによる自立などに重要な役割を果たすと期待され、Global Wind Energy Council の報告 [1] によれば、世界の累積風力発電量は 2016 年に 480GW を超え、風力開発は世界各国に普及しつつある。風力開発の更なる拡大には一層の技術革新が必要とされ、プロジェクト計画において有望と期待される技術の一つとして Virtual Met Mast が挙げられる。これは数値気象モデルを用いた気象計算と統計的ダウンスケーリングにより、ウィンドファーム計画サイトの風況精査を行う手法である。現在、ウィンドファームの風況推定では、最低でも 1 年間の現地観測を行い、その風況データと風況シミュレーションソフトウェアを使用するのが主流である。しかしながら、観測にかかるコストや欠測などの点に制約があり、Virtual Met Mast は風況観測の代替手段としてこれらの問題を解決すると期待されている。本課題では海洋研究開発機構で開発されている数値モデル Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG) を用いてウィンドファーム相当の領域について水平格子間隔 50m で気象計算を行い、風況観測値と比較することで風況予測の精度について検証を行った。

キーワード：風力エネルギー, 風況予測, 数値気象予測, MSSG

1. はじめに

近年、数値気象予測 (NWP ; Numerical Weather Prediction) モデルの高精度化と計算機性能の向上に伴い、NWP データからウィンドファーム計画サイトにおける仮想の風況観測値を推定する Virtual Met. Mast (VMM) tool が開発され、コスト低減の点から風況観測の代替手段として期待されている (例えば、UK Met Office VMM)。数十 km 規模の気象を対象とする NWP は、O (1km) 解像度の気象モデルを用いて行われるため、局所的な風況予測に重要とされる急峻な山岳や、複雑な海岸地形、土地利用の詳細な情報を十分に表現できず、NWP を直接利用した場合、複雑地形で風速が過度に弱まることが指摘されている。そのため、VMM では、複雑地形の場合に、NWP データをメソスケールからマイクロスケール (O (10m) 解像度) へとダウンスケーリング (DS) する。DS 手法の一つは、高分解能の土地利用情報と標高データを用いた風速の補正である。もう一つは、本報告書が対象とする、NWP モデルを用いたネスティングによるマイクロスケールへの力学的 DS である。力学的 DS は気象に関する物理法則に立脚し、対流や放射を考慮した予測が期待できるが、マイクロスケールの NWP は多くの計算資源を必要とするため、検証例は少ない。本課題では、NWP モデルを用いたウィンドファーム計画サイトの任意の位置及び高度における高精度風況予測の実現を目的とし、海洋研究開発機構にて開発されている大気海洋結合モデル Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment1 (MSSG) [2] を使用して、地球シミュレータ上で気象庁メソ客観解析値 (JMA Meso ANALysis ; MANAL) を水平格子幅 50m まで DS 計

算を実施した。本報告書では、MSSG による風況予測データを風況観測データと比較した結果を報告する。

2. MSSG による気象シミュレーション

気象計算には MSSG を使用する。MSSG は大気モデルと海洋モデルによって構成され、大気モデルはナビエストークス方程式、熱力学の式、気体の状態方程式を基本方程式とし、一方、海洋モデルはナビエストークス方程式と水温・塩分の式を基本方程式とする非静力学大気海洋結合モデルである。MSSG はマルチスケールの大気海洋シミュレーションを行うことが可能であり、全球スケールの大気海洋現象、台風の予測、東京湾のシミュレーション、街区の暑熱環境予測などに活用されている。本課題における風況予測は、風力発電事業者殿により風況観測が実施された地点を対象とした。地形の複雑さは複雑地形に分類される。計算領域は、風況観測地点を領域の中心とし、3 段階の単方向ネスティングにより水平格子幅 50m まで分解するように設定した。最も外側のネスト領域 0 は、96km 四方、水平格子幅を 1000m とした。その内側のネスト領域 1 は 19.2km 四方、水平格子幅 200m とし、最も内側のネスト領域 2 は 4800m 四方、水平格子幅 50m とした。鉛直層の分割数はすべてのネスト領域で 32 とした。モデル最下層の鉛直格子幅を約 30m とし、上層ほど粗くなるようにして、モデル上端の 30km では鉛直格子幅を約 7000m とした。

本計算に使用する MSSG の物理モデル (雲微物理、境界層、放射など) は既往研究と同様の設定を適用した [3]。例えば、境界層モデルには Mellor and Yamada (1982) をベー

スにした MYNN モデルのレベル 2.5[4] を使用した。その他については参考文献 [3] を参照されたい。

全ネスト領域の初期値は、MANAL から算定した運動量などを MSSG の格子に線形内挿した値を用いた。また、ネスト領域 0 の境界値も MANAL を使用した。その際、MANAL は 3 時間毎のデータであるため、時間に関して線形内挿した値を境界値として使用した。

標高データには、我が国の急峻な地形を反映させるため、国土地理院の 10m DEM (Digital Elevation Model) を用いた。また、地表面属性には国土数値情報土地利用メッシュを用いた。MSSG は国土数値情報土地利用メッシュの土地利用分類には対応していないため、United States Geological Survey (USGS) の土地利用分類に対応させた。

本課題では、ネスト領域 0 と 1 に対して最適内挿法を用いて 3 時間毎に MANAL 解析値を同化した。なお、領域 2 に対しては、MSSG の水平格子幅よりも粗い格子幅の MANAL 解析値を同化することにより、小スケールの現象が薄められる可能性を考慮して、データ同化を行わなかった。

気象計算の結果を検証する観測値として、風力発電事業社殿よりご提供頂いた 10 分平均の風速および風向データを使用した。観測高は地上 58.5m である。これらの観測値は風力発電事業社殿の機密情報であるため、以下では、風速については年平均風速で除して得られる無次元値を用いた。また、風向は年平均風向を基準とした値を用いた。尚、風向の平均値は、時々刻々の風速及び風向から風速ベクトルの東西成分及び南北方向成分を算定し、それらを年平均した後に風向に直した値とした。

3. 計算結果の検証

表 1 は年間のシミュレーションの有効データ率を示す。ここでは、観測値及びシミュレーションデータが同時刻に存在する場合、データが有効であるとした。年間計算のうち、8 月の有効データ率は 100% であったが、それ以外はスケジュール通りに計算が進まなかったため、完全な年間計算はできなかった。

有効データを用いて観測風速と MSSG による風速を定量的に比較した結果、月別の相関係数は 0.7 以上であり、

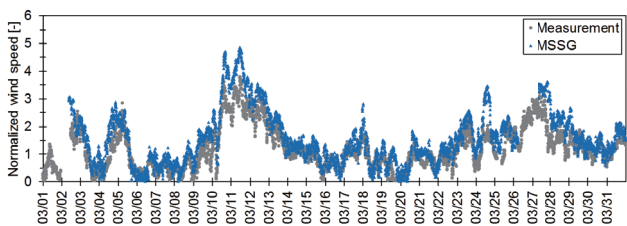
風速の時間変化を概ね再現できたが、夏季は他の季節に比較してやや相関係数が小さい傾向が見られた。一方、月別の相対誤差は最大で 31% となり、MSSG は観測に比べて風速を過大に評価することが分かった。

図 1 に 2015 年 3 月の観測による風速・風向と MSSG による風速・風向の時系列の比較を示す。風速の時間変化については、相関係数が 0.9 であることから分かるように (表 1)、観測値の時系列変化をよく再現できている。しかしながら、強風時の頻度を過大、弱風時の頻度を過小評価した (図 2)。風向についても観測値の時間変化を概ね再現できている。ただし、風配図 (図 3) から分かるように、北北西の風向における出現頻度が観測に比べてやや過大となった。

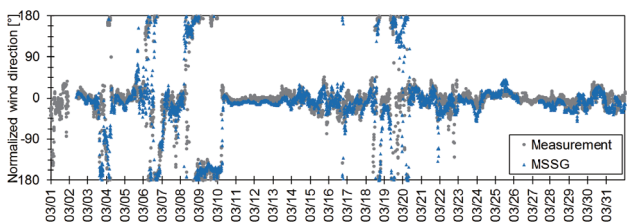
表 1 月別の風速の有効データ率、風速に関する MSSG と観測値の相関係数と相対誤差

年	2015											
月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
有効データ率* [%]	79.0	90.2	90.9	57.6	70.6	17.4	92.3	100.0	42.5	90.3	75.0	30.2
相関係数** [-]	0.80	0.84	0.90	0.86	0.82	0.76	0.78	0.77	0.84	0.88	0.77	0.84
相対誤差** [%]	19.8	28.8	30.5	23.9	27.6	23.9	28.3	28.0	31.0	24.3	22.1	18.4

*観測値とモデルの値の両方が存在するときデータは有効であるとした。
**相関係数と相対誤差は有効データを用いて算出した。

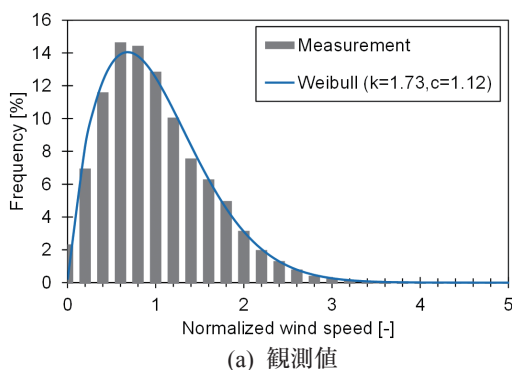


(a) 風速

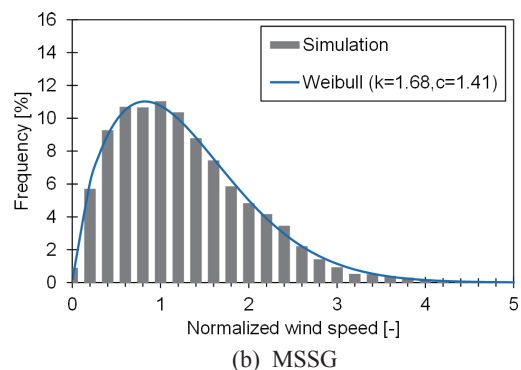


(b) 風向

図 1 観測風速と MSSG による風速及び風向の比較



(a) 観測値



(b) MSSG

図 2 観測値及び MSSG による風速予測値の風速階級別出現頻度

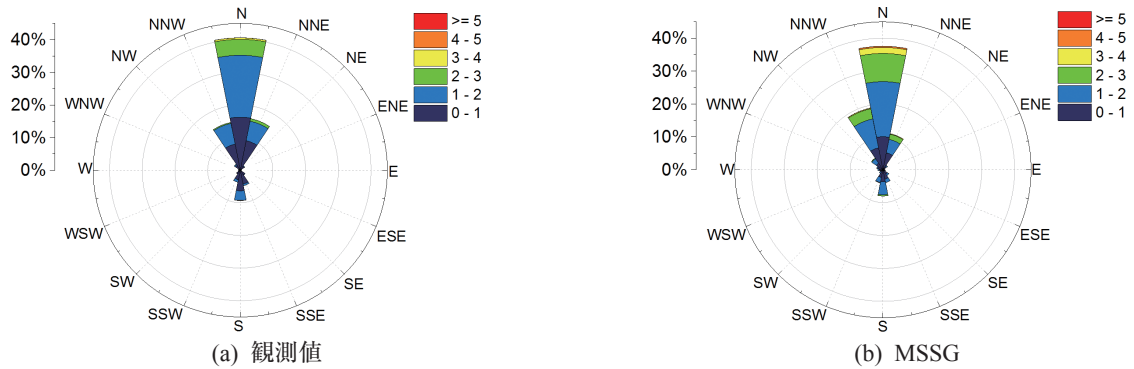


図3 観測値及びMSSG予測値による風配図

4. まとめと議論

本課題では、ウィンドファーム規模の領域についてMSSGを用いて水平格子幅50mで年間気象計算を試みた。完全な年間計算はできなかったが、1年の約70%に相当する計算出力と観測データを比較して、MSSGの風況予測精度を検証した。その結果、MSSGは風速・風向の時間変化をよく再現できることが分かった。しかしながら、MSSGは年間を通じて風速を過大に評価する傾向があることも分かった。したがって、風況予測サービスとしてMSSGを利用するためには、風速バイアスの低減が今後の課題と言える。

モデルの風速バイアスを低減するための一方策として、大気境界層における鉛直混合を適切にシミュレーションすることが挙げられる。現在のモデル設定では、土地利用に応じた一定の蒸発効率を与えているが、このモデルは、土壌水分量から蒸発効率を算定するモデルに比べて、特に山地などで蒸発量が少なくなることが懸念される。したがって、仮に土壌水分量から蒸発効率を算定するモデルを使用した場合、蒸発量の増加とそれに伴う地表面温度の低下が期待される。地表面温度の低下は、大気安定度の増加と鉛直混合の弱化をもたらし、それにより、大気下層における風速が低減する。本報告書では示さなかったが、MSSGによる風速の鉛直シアは観測値に比較して小さい。この事実もまた、現在のモデル設定に基づくシミュレーションでは、下層の強い鉛直混合が、大気上層の強い風を下層にもたらしていることを示唆している。鉛直混合を調整する方法として、大気境界層モデルであるMYNNモデルのパラメータ調整により、風況シミュレーションの精度が改善されることが報告されている[5]。今後、これらに取り組むことでさらなる風況シミュレーションの改善が期待される。

謝辞

本課題を実施するにあたり、MSSGを貸与して頂いた海洋研究開発機構に感謝します。また、風況観測データをご提供頂いた風力発電事業者殿に感謝します。

文献

- [1] Global Wind Energy Council, GLOBAL WIND MARKET REPORT, 2016.
- [2] K. Takahashi, X. Peng, R. Onishi, M. Ohdaira, K. Gotom, H. Fuchigami and T. Sugimura, “Impact of coupled nonhydrostatic atmosphere-ocean-land model with high resolution”, in *High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean*, edited by K. Hamilton and W. Ohfuchi, pp. 261–274, Springer, New York, 2008.
- [3] M. Nakano, A. Wada, M. Sawada, H. Yoshimura, R. Onishi, S. Kawahara, W. Sasaki, T. Nasuno, M. Yamaguchi, T. Iriguchi, M. Sugi and Y. Takeuchi, “Global 7km mesh nonhydrostatic Model Intercomparison Project for improving TYphoon forecast (TYMIP-G7): Experimental design and preliminary results”, *Geoscientific Model Development*, 10(3), 1368–1381, 2007.
- [4] M. Nakanishi, and H. Niino, “Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer”, *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 87, 895–912, 2009.
- [5] B. Yang, Y. Qian, L. K. Berg, P.-L. Ma, S. Wharton, Vera Bulaevskaya, H. Yan and Z. Hou, “Sensitivity of Turbine-Height Wind Speeds to Parameters in Planetary Boundary-Layer and Surface-Layer Schemes in the Weather Research and Forecasting Model”, *Boundary-Layer Meteorology*, 162(1), 117–142, 2016.

Annual Micro-Scale Wind Field Simulation with MSSG

Project Representative

Hiroshi Imamura Wind Energy Institute of Tokyo Inc.

Authors

Wataru Sasaki^{*1}, Jun Tanemoto^{*1}, Yuko Ueda^{*1} and Hiroshi Imamura^{*1}

*1 Wind Energy Institute of Tokyo Inc.

Wind power is expected to play an important role in addressing global warming and to secure national energy independence. Global Wind Energy Council reported that global cumulative installed wind capacity exceeded 480 GW in 2016 [1], suggesting that wind power is developing worldwide. Further increase in wind power generation needs additional improvement and development in wind power technology. One of the promising technology is the Virtual Met Mast (VMM) tool, in which numerical weather prediction (NWP) models and statistical technique are used for wind resource assessment. The VMM tool is expected to overcome the constraints associated with minimum 1-year wind measurement campaign, excessive costs, and data quality/availability. The VMM also would be an alternative technology for offshore wind measurements taking enormous costs. This study aims to validate the performances of an NWP model with respect to micro-scale wind simulation.

Keywords: wind energy, wind prediction, numerical weather prediction, MSSG

1. Introduction

Current operational wind resource assessment utilizes wind measurements recorded locally with a minimum duration of 1 year as an input for CFD models. However, wind measurements have some constraints of their excessive costs and data quality/availability in some situations. Virtual Met Mast (VMM) tool, which utilizes numerical weather prediction (NWP) model and statistical technique for wind resource assessment, is a promising technology to overcome the above issues. The VMM also would be expected as an alternative technology for offshore wind measurements taking enormous costs. This study aims to validate the performances of an NWP model with respect to micro-scale wind field simulation.

2. Meteorological simulation with MSSG

We used an ocean-atmosphere coupled nonhydrostatic model, Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG) [2] developed at the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC). The MSSG is aimed at seamless simulations from global to local scales. The MSSG consists of an atmosphere component (MSSG-A) and an ocean component (MSSG-O), and the former was used for our experiments. The dynamical core of the MSSG-A is based on the nonhydrostatic equations, and it predicts the three wind components, as well as air density, pressure and temperature. In this experiment we followed the previous study [3] with respect to the selection of the physical schemes such as turbulent diffusion and radiation. For example, we employed a turbulent diffusion model of the Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino level-2.5 model [4].

In this study, an annual wind field simulation in complex

terrain is conducted by using the MSSG. The MSSG was configured with a triple-nesting with the horizontal resolution at 1000 m, 200 m, and 50 m grid. The nested domains were 96km×96km, 19.2km×19.2km and 4.8km×4.8km. The MSSG has 32 vertical layers with a top height of 30 km, and the lowermost layer is about 30 m for all nested domains.

Initial and boundary conditions were derived from the Meso Analysis (MANAL) developed by the Japan Meteorological Agency. The MANAL data has a horizontal resolution of 5km with 15 pressure levels at 3-h interval. The MANAL data was assimilated into the two outer nested domains at 3-h intervals by means of the optimum interpolation method, while the assimilation was not applied to the most inner domain to avoid the artificial damping caused by coarse resolution of the MANAL data.

The model terrain was derived from the 10m DEM data developed by the Geospatial Information Authority of Japan, and the land-use data was derived from 100m-mesh developed by the National Land Numerical Information. The model output is at 10-min interval (10-min. average).

The simulation period is from January 1 to December 31, 2015. The simulated wind speed and directions were validated with the measured wind data during the period. Wind farm developers approved us to use measured wind speed and direction data under the condition that their name and the site place would remain hidden. The measurement height is 58.5m above ground level. Because the wind data are confidential for the companies, the wind speed (direction) is normalized by dividing (subtracting) the mean.

3. Validation of MSSG simulation

The ratio of all available data was about 70%, since the simulation did not complete as scheduled (Table 1). By analyzing the available data, we found that MSSG well simulated the temporal variation of wind speed, as revealed by the correlation coefficient greater than 0.7 throughout the year. However, we also found that MSSG overpredicted wind speed (the relative error for the monthly mean wind speed is up to 31%).

Table 1 Monthly percentage of valid data, correlation coefficient and relative bias between measurement and MSSG

Year	2015											
Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Percentage of available data* [%]	79.0	90.2	90.9	57.6	70.6	17.4	92.3	100.0	42.5	90.3	75.0	30.2
Correlation coefficient** [-]	0.80	0.84	0.90	0.86	0.82	0.76	0.78	0.77	0.84	0.88	0.77	0.84
Relative bias** [%]	19.8	28.8	30.5	23.9	27.6	23.9	28.3	28.0	31.0	24.3	22.1	18.4

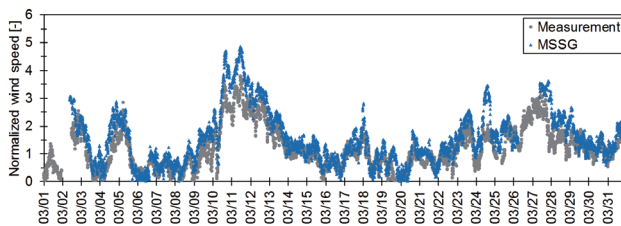
*Data is available in case that both of the modeled and observed data are available.
**Correlation coefficient and relative bias are calculated using the available data.

Figure 1 shows the time series of wind speeds and directions in March 2015 derived from observations and MSSG. MSSG well simulated the temporal variability of the observed wind speed. However It was found that MSSG overpredicted (underpredicted) the frequency of high (low) winds (Fig. 2). On the other hand, MSSG generally well simulated the wind direction as observed, except that MSSG slightly overpredicted the frequency of the north-northwesterly winds (Fig. 3).

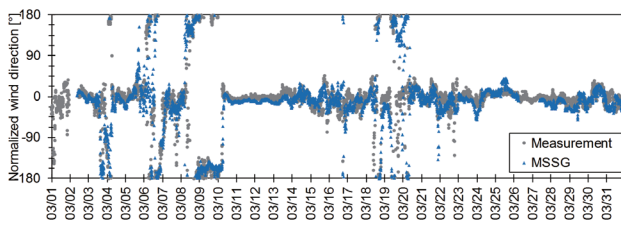
4. Conclusion and Discussion

In this study, annual wind field simulation was conducted, in which MSSG of 50m mesh was utilized. We found that the MSSG generally well simulated the temporal variabilities of measured wind speed and direction. However, the simulated wind speed is positively biased throughout the year (up to 31% in monthly average).

A key to reduce the bias of wind speeds by MSSG could be the simulation considering a vertical mixing in the boundary

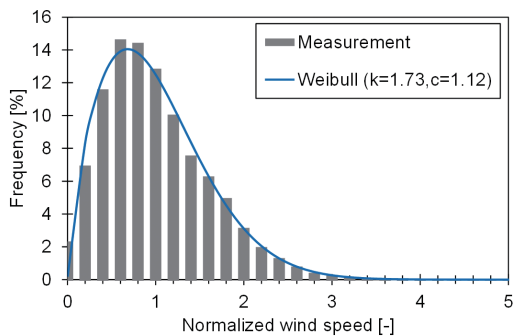


(a) Wind speed

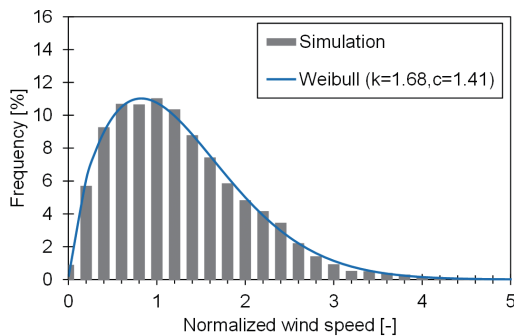


(b) Wind direction

Fig. 1 Comparisons of measured and simulated timeseries of wind speed and direction on March, 2015.

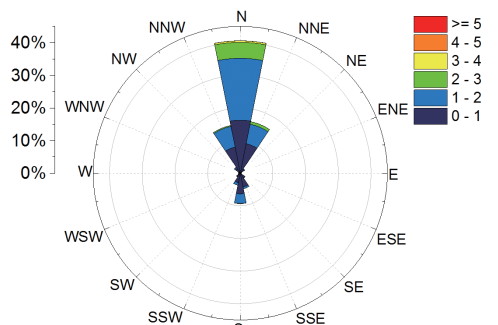


(a) Measurements

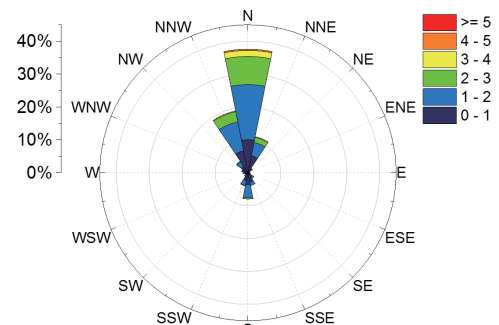


(b) MSSG

Fig. 2 Annual wind speed frequency distributions obtained from measurements and MSSG simulation.



(a) Measurement



(b) MSSG

Fig. 3 Annual wind rose calculated from measurement and MSSG simulation.

layer. Surface temperature contribute to develop mixing layer, thus accurate prediction of this variable may improve the accuracy of simulated wind speed. The configuration of the model used in this study adopts a constant evaporation rate for each land-use type. As another solution, a model parameterized by using soil moisture is also implemented in MSSG. The latter model may increase the evaporation, resulting in a reduction in surface temperature. This may bring about an increased atmospheric stability and weakening of vertical mixing, resulting in a reduced low-level wind speed. Although we did not show in this report, the vertical shear of the modeled wind speed is less than the observed value. This result also indicates that the vertical mixing in the boundary layer is predicted too strong, bringing faster high wind aloft to the near-surface in our simulation. Besides that, previous study revealed that tuning the MYNN parameters improved the prediction skill in the low-level wind speed. These will be explored in future studies.

Acknowledgement

The authors would like to thank the JAMSTEC for technical supporting and providing MSSG. We also grateful to the wind power developers which approved us to use observed wind data.

References

- [1] Global Wind Energy Council, GLOBAL WIND MARKET REPORT, 2016.
- [2] K. Takahashi, X. Peng, R. Onishi, M. Ohdaira, K. Gotom, H. Fuchigami and T. Sugimura, "Impact of coupled nonhydrostatic atmosphere-ocean-land model with high resolution", in High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean, edited by K. Hamilton and W. Ohfuchi, pp. 261–274, Springer, New York, 2008.
- [3] M. Nakano, A. Wada, M. Sawada, H. Yoshimura, R. Onishi, S. Kawahara, W. Sasaki, T. Nasuno, M. Yamaguchi, T. Iriguchi, M. Sugi and Y. Takeuchi, "Global 7km mesh nonhydrostatic Model Intercomparison Project for improving TYphoon forecast (TYMIP-G7): Experimental design and preliminary results", *Geoscientific Model Development*, 10(3), 1368–1381, 2007.
- [4] M. Nakanishi, and H. Niino, "Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer", *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 87, 895–912, 2009.
- [5] B. Yang, Y. Qian, L. K. Berg, P.-L. Ma, S. Wharton, Vera Bulaevskaya, H. Yan and Z. Hou, "Sensitivity of Turbine-Height Wind Speeds to Parameters in Planetary Boundary-Layer and Surface-Layer Schemes in the Weather Research and Forecasting Model", *Boundary-Layer Meteorology*, 162(1), 117–142, 2016.