

## MSSG を用いた年間のマイクロスケール風況予測の最適化

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\*<sup>1</sup>, 種本 純\*<sup>1</sup>, 植田 祐子\*<sup>1</sup>, 今村 博\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> 株式会社風力エネルギー研究所

世界の累積風力発電量は 2018 年に 590GW を超え、風力開発は世界各国に普及しつつある[1]。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、風況アセスメントにおいて期待される技術の一つとして、Virtual Met Mast (VMM) が挙げられる。VMM は数値気象モデルを用いた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り、VMM により風況観測に係る時間的・経済的コストを削減できる可能性がある。著者らは、前年度特別推進課題（イノベーション推進）「MSSG を用いた年間のマイクロスケール風況予測」において、海洋研究開発機構で開発されているMulti-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG) を用いて水平解像度 50m の気象計算を行い、観測データを用いて MSSG の風況予測精度を評価した[2]。本課題では、前年度課題に見られた予測風速のバイアス低減に主眼を置き、計算設定の最適化を検討した。また、最適な設定を用いて年間の風況予測計算を行い、観測値による検証を行った。その結果、年平均風速の平均誤差は前年度課題の 25.6%から17%に減少した。本課題では、さらに、統計的手法を用いた平均誤差の低減について検討した。

キーワード：風力エネルギー，風況シミュレーション，MSSG，数値気象予測

### 1. はじめに

近年、数値気象モデルの高精度化と計算機性能の向上に伴い、数値気象モデルを活用したウィンドファーム計画サイトにおける風況推定に可能になってきている。英国気象局で開発されているVirtual Met Mast (VMM) tool は数値気象モデルを活用した風況推定方法の一つであり、風況観測期間の短縮やコスト低減の点から期待されている。

広域の風況推定にはメソスケール（数 km～数千 km）の気象を対象とした 0(1km) 解像度の数値気象モデルが用いられるが、ウィンドファーム規模の局所的な風況予測では、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することが重要であり、メソスケールの解像度ではこれらを十分に表現できず、複雑地形では風速が過度に弱まることが指摘されている。メソスケールの数値気象予測データをマイクロスケール（0(10m) 解像度）へダウンスケーリング (DS) するための方法として、統計的手法、CFD によるネスティング、また、本課題が対象とする数値気象モデルを用いたネスティングが挙げられる。数値気象モデルを用いたダウンスケーリングにより、対流や放射を考慮した風況予測が期待できるが、多くの計算資源を必要とするため、検証例は少ない。

著者らは前年度の特別推進課題（イノベーション推進）「MSSG による年間のマイクロスケール風況予測」（以下、前年度課題）において、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 Geoenvironment<sup>1</sup> (MSSG) [3] 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 ; 水平格子幅 5km）を水平格子幅 50m まで DS 計算を実施した。前年度課題では、1 年の約 7 割について計算を終え、予測風速と観測値を比較した結果、予測値は観測値に比べて 25.6% 過大であることが分かった。本課題では、この風速の誤差の低減を焦点に当てて MSSG の最適化を行い、年間の風況計算を行った。

### 2. MSSG による気象シミュレーション

MSSG はナビエ-ストークス方程式に基づき、熱力学の式と気体の状態方程式を考慮した大気モデルと水・塩分の式を考慮した海洋モデルによって構成された非静力学大気海洋結合モデルである。MSSG は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、マルチスケールの大気海洋シミュレーションに活用されている。

本課題の計算領域は、風況観測地点を領域の中心とし、3 段階の双方向ネスティングにより最小の水平格子幅を 50m とした。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 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。鉛直格子間隔については、次節で述べるテスト計算のため、2 種類用意した。1 つは、前年度課題と同様に、最下層の厚さを 29m、鉛直層数を 35 とした。もう 1 つは、最下層の厚さを 10m、鉛直層数を 32 とし、地表付近の鉛直解像度を高めた。

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[4]。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[5] を使用した。

初期値は、MANAL から算出した運動量や大気密度等を 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、国土地理院の 10m DEM (Digital Elevation Model ; 水平格子幅 10m) 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 (水平格子幅 100m) を用いた。国土数値情報土地利用メッシュの土地利用分類は United States Geological Survey (USGS) の土地利用分類に対応させて使用した。

計算中、3 時間ごとにネスト領域 0 と 1 に対して最適内挿法を用いて MANAL 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 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。

風速の東西及び南北成分等の計算結果は、10 分平均値を 10 分間隔で出力した。

計算結果を検証する観測値として、風力発電事業社様よりご提供頂いた 10 分平均の風速・風向データを使用した。観測高は地上 58.5m である。

MSSG の出力データから観測地点における風速を得るには、水平方向に対しては最近接 4 格子点を用いて距離を考慮した重み付きの平均値を、また、鉛直方向に対しては隣接する鉛直 2 格子点の線形内挿により算出した。

### 3. テスト計算

前年度課題では、1 年の約 7 割について風況計算を行い、観測値により検証を行った結果、MSSG による風速の平均誤差は 25.6% であった。平均誤差の低減を図るため、年間の風況計算を行う前段階として、異なるモデル設定で 5 日間 (2015 年 1 月 1 日～5 日) のテスト計算を行い、計算結果を観測値で検証することで最適な設定を検討した。

テスト計算は表 1 に示す 4 ケースについて行った。すべてのケースで最新版の MSSG を用い、CTL では前年度と同様の設定を使用した。DZ10m では鉛直最下層の厚さを CTL の設定 (29m) よりも薄い 10m とした。また、CTL では地表面物理モデルとして Grell et al. (1994) [6] を使用したが、LOUIS では Louis (1972) [7] を使用した。GFS では土壌水分量・温度の入力データとして Global Forecast System (GFS) から取得した 6 時間ごとのデー

タを使用した。テスト計算における平均誤差と相関係数を表 2 に示す。参考として、前年度課題で行った計算のうち、テスト計算の期間に該当する期間についての結果 (表 2 中の S18) を付記した。前年度の計算では、風速の平均誤差が 40% を超えていたが、CTL における平均誤差は約 14% となり、最新版の MSSG を使用することでバイアスが大きく減少した。また、DZ10m ではバイアスが 10% 以下となり、全ケース中、平均誤差は最小となった。本計算領域は複雑な地形であるため、鉛直解像度を高くすることで現実的な地形を再現でき、風況を良く再現できたと考えられる。一方、LOUIS では CTL よりも平均誤差が増大した。GFS における平均誤差は CTL と同程度であったことから、土壌水分量・温度の入力データの違いによる影響は小さいと言える。

相関係数については、どのケースの場合も 0.7 程度であり、ケース間で大きな差はなかった。

表 1 MSSG による風速と観測値の間の平均誤差及び相関係数

	CTL	DZ10m	LOUIS	GFS	S18
平均誤差 [%]	14.3	4.9	23.9	14.4	44.0
相関係数 [-]	0.68	0.66	0.71	0.68	0.69

### 4. 年間計算

テスト計算において平均誤差が最小であった DZ10m の設定を用いて年間計算を行った。計算期間は 2015 年 1 月 1 日から 12 月 31 日である。使用した計算資源量は約 35000 ノード時間であった。図 1 に観測と MSSG による風速・風向の時系列を示す。

観測値及び MSSG の出力データから 3 時間平均値を作成し、MANAL と比較した (表 3)。尚、観測地点における MANAL データは MSSG 出力と同様の空間内挿により算出した。MSSG を用いたダウンスケーリングにより、相関係数は増加し、平均誤差が減少した。平均誤差に関して言えば、MANAL では風速約 2 (年平均観測風速で無次元化) の頻度が観測値に比べて多く、風速 1 以下の頻度が少なかったが、MSSG では、低風速の頻度が増加し、風速 2 の頻度が減少していた (図 2)。しかしながら、MSSG は観測値に比較して風速 2 以上の頻度が多かった。

図 3 に方位別の年平均風速を示す。MANAL は西及び北寄りの風速を過大評価していたが、MSSG は観測値による分布を概ね再現することができた。

10 分毎のデータによる観測値と MSSG による風速の平均誤差は 17%、相関係数は 0.83 であった。

表 3 観測値と MSSG 及び MANAL による風速の間の平均誤差と相関係数。3 時間平均値より算出。

	MSSG	MANAL
平均誤差 [%]	17	23
相関係数 [-]	0.88	0.74

表 1 テスト計算の設定

ケース名	鉛直最下層の厚さ	物理モデル他
CTL	29m	前年度課題と同様
DZ10m	10m	前年度課題と同様
LOUIS	29m	地表面境界モデルとして Louis (1979) を使用
GFS	29m	GFS による土壌水分量・温度を使用

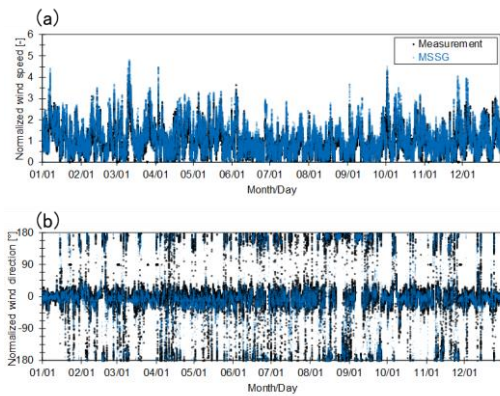


図1 年間計算による10分間隔の観測及びMSSGによる風速・風向時系列。(a) 風速。(b) 風向。

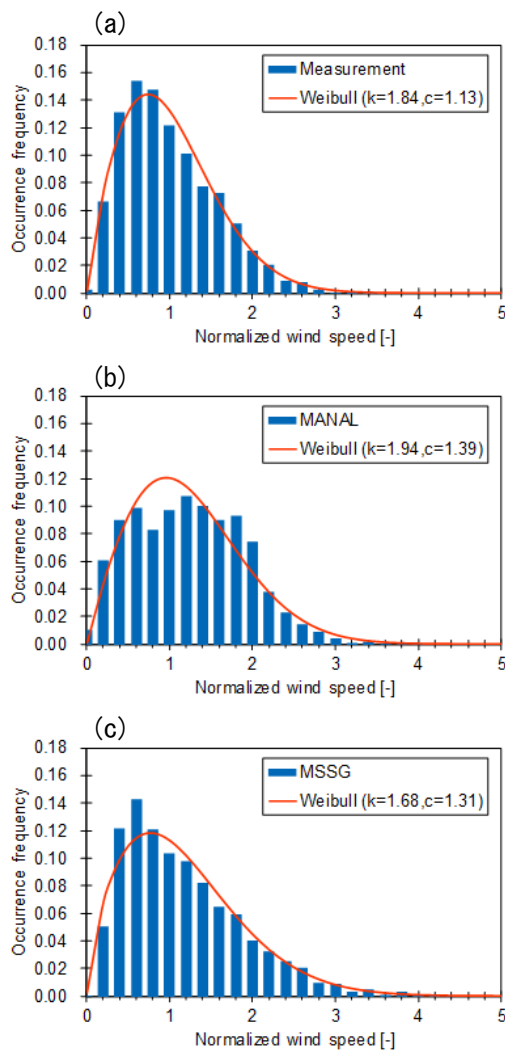


図2 風速の頻度分布。風速は年平均観測風速で無次元化した。赤線はワイブル分布によるフィッティングを表す。ワイブル係数は図の右上枠内に記した。3時間平均値より算出。(a) 観測値、(b) MANAL、(c) MSSG。

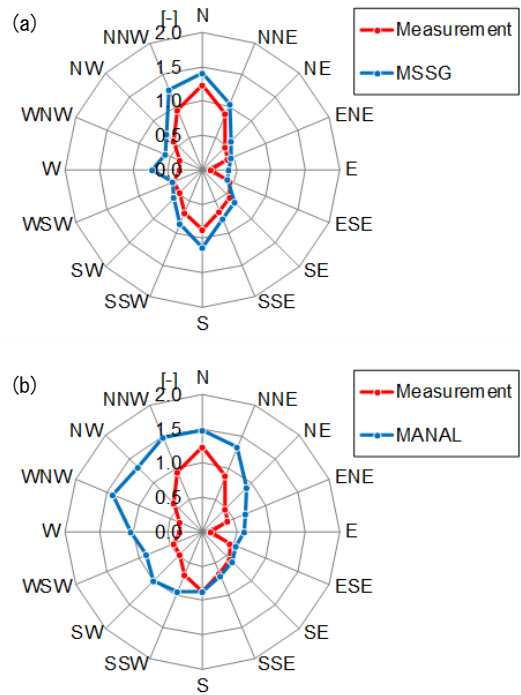


図3 観測値、MSSG 及び MANAL から算出した方位別年平均風速。風速は年平均観測風速で無次元化した。風向は年平均風向からの差とした。3時間平均値より算出。(a) 観測値とMSSGの比較。(b) 観測値とMANALの比較。

## 5. 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で年間の気象計算を行った。前年度課題に見られた風速の平均誤差(25.6%)を低減するため、鉛直解像度や物理モデルを変えた5日間のテスト計算を4ケース行い、平均誤差が最小のケース(鉛直最下層の解像度が10m)の設定を用いて年間の計算を行った。年間計算の結果と観測値及び風況計算の境界値として使用したMANALを比較し、MSSGの風況予測精度を検証した。その結果、MSSGを用いたダウンスケーリングによりMANALよりも観測風速に対する平均誤差と相関係数が改善し、また、方位別の年平均風速をよく再現できた。また、観測値とMSSG出力を比較した結果、年平均風速の平均誤差は前年度課題の25.6%から17%に減少したものの、依然、風速バイアスの低減が課題と言える。

実務的な風況予測では5%以下の誤差を期待されている。そこで、観測値とMSSG風況計算を併用した風況推定を検討した。具体的には、4月から6月の3か月間の観測データ及びMSSGの予測値を用いて1m/sの風速ビンごとに線形回帰式でMSSG予測値の補正式を算出し、残りの9か月間のMSSG予測値に対して算出した補正式で予測値の補正を行った。その結果、補正後の風速頻度分

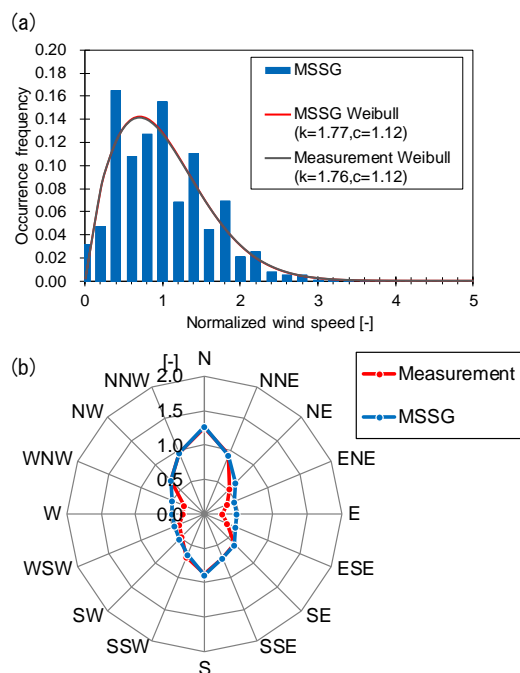


図4 観測値及びMSSG計算結果を3ヶ月の観測で補正した値による統計値の比較。風速は年平均観測風速で無次元化した。風向は年平均風向からの差。(a) 風速の頻度分布。(b) 方位別年平均風速。

布及び方位別年平均風速は観測値のそれに近づいた(図4)。このように、本課題のMSSGによる風況予測は、限られた観測データを併用することで、観測地点における風況を推定する手法として有効と考えられる。また、この補正により、計算領域全域の年間風況時系列データを50m解像度で得ることが可能となる。ただし、計算領域全体の補正については今後さらに検討が必要である。

本課題で行った風況予測は、計画ウィンドファームにおける適切な観測地点の選定や、地形の起伏が大きい地点や洋上における観測が困難な地点における風況予測での使用、また、前述したように、観測期間が不足する中での風況の早期評価における使用が期待される。

統計的手法による補正以外にも、MSSGの予測システムの高精度化の検討も必要である。前年度課題及び本課題では、MSSGの初期値・境界値としてMANALを使用した。MANALは水平解像度5km、鉛直15層、時間間隔3時間の日本域に関して解像度の高い客観解析データであるが、先端的な再解析データ、例えば欧州中期予報センターが開発したERA5(水平解像度0.25°、鉛直37層、時間間隔1時間)に比較して、水平解像度は高いものの、鉛直層数が少なく、また、時間解像度が粗いため、ERA5よりも時空間的に平滑化された境界値が使用されると考えられ、特に複雑地形では影響が大きい可能性がある。今後、入力境界データの鉛直解像度と時間解像度が風況予測精度に及ぼす影響の調査が必要であろう。

## 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 REPORT, 2018.
- [2] 佐々木亘, 種本純, 植田祐子, 今村博, “MSSGを用いた年間のマイクロスケール風況予測”, Annual Report of the Earth Simulator April 2017 - March 2018, pp. 371-376, 2018.
- [3] 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.
- [4] 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), pp. 1368-1381, 2007.
- [5] M. Nakanishi, and H. Niino, “Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer”, J. Meteor. Soc. Jpn., 87, pp. 895-912, 2009.
- [6] G. A. Grell, J. Dudhia, and D. R. Stauffer, “A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5) (No. NCAR/TN-398+STR)”, University Corporation for Atmospheric Research, 1994.
- [7] J.-F. Louis, “A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere”, Boundary-Layer Meteorol., 17(2), pp. 187-202, 1979.

# Optimization of Annual Micro-scale Wind Field Simulation with MSSG

Project Representative

Hiroshi Imamura Wind Energy Institute of Tokyo, Inc.

Authors

Wataru Sasaki\*<sup>1</sup>, Jun Tanemoto\*<sup>1</sup>, Yuko Ueda\*<sup>1</sup>, Hiroshi Imamura\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> Wind Energy Institute of Tokyo, Inc.

Global cumulative installed wind capacity exceeded 590GW in 2018 [1]. For further increase in wind power generation, additional improvement and development in wind power technology are needed. The Virtual Met Mast (VMM) tool based on numerical weather prediction (NWP) models and statistical technique is expected to reduce the excessive costs on wind measurements. In the previous study, we evaluated performance of micro-scale (50m mesh) wind field simulation with the Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG) with in-situ observed data [2]. This study aims to improve the performance of the MSSG with emphasis on a reduction of the mean error of the wind speed.

**Keywords** : wind energy, wind field simulation, MSSG, numerical weather prediction

## 1. Introduction

Current operational wind resource assessment utilizes wind measurements recorded locally with a minimum duration of 1 year. However, wind measurements have some constraints of their excessive costs and data quality/availability. In wind resources assessments, Virtual Met Mast (VMM) tool based on numerical weather prediction (NWP) model and statistical technique is expected as a promising technology to overcome the above problems. In the previous study, we evaluated performance of wind field simulation with the Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG) with in-situ wind measurements [2] (hereinafter S18). We found that the MSSG overestimated the annual mean wind speed by ~23%. The aim of study is to improve the performance of wind field simulation with MSSG with emphasis on a reduction of the mean error of the wind speed.

## 2. Model and Data

The model used in this study is the MSSG [3] developed by the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC). The MSSG is an atmosphere-ocean coupled model consisting of an atmosphere component (MSSG-A) and an ocean component (MSSG-O). In this study, we used the latest version of the MSSG-A as a standalone regional atmospheric model. Model physics used in this study is described in Table 1.

The computational domain was configured with a triple-nesting with the horizontal resolution of 1000m, 200m,

and 50m grid. The nested domains were 96km×96km, 19.2km×19.2km and 4.8km×4.8km.

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 intervals. The MANAL data is also used to assimilate 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 Digital Elevation Model (DEM) data developed by the Geospatial Information Authority of Japan. The model land-use data was derived from the 100m-mesh data developed by the National Land Numerical Information, Japan.

To validate modeled wind data, we used wind speed and direction data measured at 58.5m above ground level. The data includes confidential information, thus their specific information regarding the measurement site would remain hidden.

## 3. Test run

Four test runs with different model configurations were performed to evaluate the performance of MSSG (Table 2). The configuration for the CTL run is the same as that in S18 (described in Section 2), though the latest version of MSSG was used in this study. DZ10m run is the same as the CTL run, except that the thickness of the lowermost layer is 10m, which is finer than that in the CTL run (29m). LOUIS run uses a surface boundary layer model of Louis (1972) [4]. In the GFS run, soil moisture and temperature were obtained from the

Table 1 Model physics used for MSSG

Radiation	MstranX (Sekiguchi and Nakajima, 2008)
Planetary boundary layer	MYNN2.5 (Nakanishi and Niino, 2009)
Cloud physics	Reisner et al. [1998]; Thompson et al. [2004]
Surface boundary layer	Grell et al. (1995)

Table 2 Model configuration for test runs

Run name	Thickness of the lowermost layer	Physical scheme and etc.
CTL	29m	As in S18
DZ10m	10m	As in S18
LOUIS	29m	Surface boundary layer model of Louis (1979)
GFS	29m	Soil moisture and temperature obtained from the GFS

Table 3 Mean error and correlation coefficient (R) between measured and simulated wind speed for 5 days test runs.

	CTL	DZ10m	LOUIS	GFS	S18
Mean Error [%]	14.3	4.9	23.9	14.4	44.0
R [-]	0.68	0.66	0.71	0.68	0.69

6-hourly Global Forecast System (GFS) produced by the National Centers for Environmental Prediction (NCEP), while the climatological monthly mean of the NCEP/NCAR reanalysis were used in the CTL run. Due to the limited computational resources and time, the integration period for the test run was 5 days from the 1<sup>st</sup> to 5<sup>th</sup> January 2015.

Table 3 shows the mean error and correlation coefficient between the simulated and observed wind speed. The mean error exceeded 40% in S18, while the CTL run is 14%, implying that a use of the latest version of MSSG successfully reduced the mean error of wind speed. The mean error is decreased to less than 10% by using a fine vertical grid (DZ10m run). In contrast, the mean error in the LOUIS run is greater than that in the CTL run. On the other hand, there is no marked difference in the mean error between the CTL and GFS runs, indicating that soil moisture and temperature less contribute less to reduce the mean error of wind speed.

Correlation coefficient between the modeled and observed wind speed was ~0.7 for all runs. As a result, the DZ10m run (finer vertical resolution) had the best performance in the test runs.

#### 4. Annual simulation

An annual simulation with configuration of the DZ10m was performed. The simulation period was from 1<sup>st</sup> January to 31<sup>st</sup> December 2015. It took about 35000 node-hour on the Earth Simulator.

It was found that the MSSG had better performance (mean error=17% and R=0.88) than the MANAL which was used for the initial and boundary data (Table 4). Furthermore, MSSG well simulated the directional annual mean wind speed as observed, when compared to the MANAL overestimating the westerly and northerly winds (Fig. 1).

#### 5. Conclusion and Discussion

An annual wind filed simulation with MSSG at horizontal resolution of 50m was performed. To reduce the mean error of the modeled wind speed, 5 days simulation with four different configurations (e.g.: vertical resolution and model physics) was carried out. Based on comparisons with wind speed observations, we configured the thickness of the lowermost level as 10 m for the annual simulation.

We have found that dynamical downscaling of MSSG

Table 4 Mean error and correlation coefficient (R) between measured and simulated annual wind speed.

	MSSG	MANAL
Mean Error [%]	17	23
R [-]	0.88	0.74

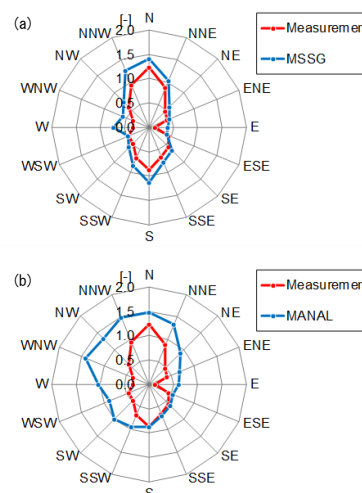


Fig. 1 Comparison of annual wind rose calculated from measurements, MSSG simulation, and MANAL data. Wind speed is normalized by the annual mean of observed wind speed. (a) measurements and MSSG simulation, (b) measurements and MANAL data.

successfully reduce the bias of wind speed in the MANAL, and well simulate the directional annual average wind speed as observed.

MSSG has an annual mean wind speed bias of 17%, while business sphere demands the bias less than 5%. Further model improvement and tuning of the model are needed. For example, a use of boundary data with high vertical/temporal resolution may enable to produce more realistic boundary conditions for complex terrain.

#### Acknowledgement

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

#### References

[1] Global Wind Energy Council, “Global wind report”, 2018.  
 [2] W. Sasaki, T. Tanemoto, Y. Ueda, and H. Imamura, “Annual Micro-Scale Wind Field Simulation with MSSG”, Annual Report of the Earth Simulator April 2017 – March 2018, pp.371-376, 2018.  
 [3] 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.  
 [4] J.-F. Louis, “A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere”, Boundary-Layer Meteorol., 17(2), 187-202, 1979.