

メソスケール気象モデルを用いた高解像度風況シミュレーション

—野間岬風力発電サイトを対象として—

弓本 桂也*・吉田 保衡**・鵜野 伊津志***
内田 孝紀***・大屋 裕二***

要旨

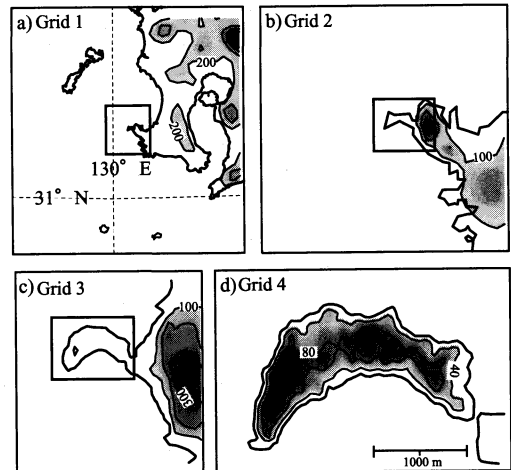
鹿児島県笠沙町の野間岬に設置された風力発電サイトを対象に、メソスケール気象モデル RAMS を用いて水平解像度 50 m と 250 m の高解像度風況シミュレーションを行い、風車で観測された風速・風向との比較を行った。計算結果は観測値に見られる変動の傾向を概ね捉えた。水平解像度を 250 m から 50 m へ向上することによって、地形効果の表現が向上し、平均風速や強風の出現頻度、空間的な風速のばらつきなどが改善した。しかし、岬に特徴的な風向の表現は十分ではなく、今後課題を残した。

1. はじめに

近年、自然の力を利用したクリーンなエネルギーとして風力発電が注目され、その導入が盛んに行われている。風力発電所の導入や発電能力の評価には、設置地点における風況特性の推定が必要となるため、観測や数値シミュレーションを用いた発電能力の算出や風況予測が行われている。しかしながら、風力発電所に用いられる風車の代表的なハブ高さは 30~70 m であり、数値シミュレーションにおいては詳細な地形の影響を考慮に入れた水平分解能数十 m 程度の数値モデルの適応が必要となる。このような高分解能モデルによる風況予測は村上ほか (2003) などの CFD (Computational Fluid Dynamics) を用いた研究に見られ、その再現性が論じられている。本研究ではメソスケール気象モデルに対しては従来行われていない高解像度シミュレーション (水平分解能 50 m, 250 m) への応用を試み、風力発電所において連続して観測された風速・風向との比較を行った。

2. モデルの概要および観測データ

本研究ではシミュレーションに圧縮性非静力学モデルである RAMS (Regional Atmospheric Modeling System, Ver. 4.3) を用いた。このモデルの概要については Pielke *et al.* (1992) を参照されたい。



第1図 計算領域。(a) Grid 1, (b) Grid 2, (c) Grid 3, (d) Grid 4。(d)の●は風力発電所の位置を表す(▲は第3発電所)。風力発電所の番号は西から順に付けられている。

* 九州大学大学院総合理工学府.
yumimoto@riam.kyushu-u.ac.jp
** 九州大学大学院総合理工学府.
*** 九州大学応用力学研究所.

—2004年8月16日受領—
—2005年9月15日受理—

第1表 計算格子の設定.

	Grid 1	Grid 2	Grid 3	Grid 4
計算領域の中心位置	31.4°N 130.1°E	31.4°N 130.1°E	31.4°N 130.13°E	31.413°N 130.12°E
水平格子サイズ (m)	5000	1000	250	50
水平格子数	30×30	32×32	30×30	62×42
鉛直格子サイズ (m)	100-1000	100-1000	100-1000	22.8, 23.9, 25.0, 26.2, 26.5-1000
鉛直格子数	23	23	23	32
時間刻み (sec)	15	3	0.5	0.25

2.1 計算対象領域

計算対象領域は鹿児島県笠沙町の野間岬とした。野間岬は鹿児島県南西部に位置する東西約2500 m, 南北約1500 mの弓状に湾曲した岬で、九州電力の10基の風力発電所が設置・運転されている。計算対象を高解像度で計算するために、2方向ネスティングの手法を用い、水平解像度250 m (3重ネスティング, Grid 3) と水平解像度50 m (4重ネスティング, Grid 4) の計算をそれぞれ独立に行った。計算領域と計算格子の設定内容をそれぞれ第1図と第1表に示す。Grid 4の計算に際しては鉛直方向の格子サイズを第1表のように変更し、地表面付近の解像度を向上させた。

2.2 計算条件

標高と土地利用のデータには、解像度がそれぞれ50 mと100 mの国土地理院発行の国土数値情報を用いた。海面温度(SST)にはNCAR (National Center for Atmospheric Research) の全球1度メッシュの1か月平均値を時間内挿して用いた。大気水象は7種類(雲, 雨, 雪, 雹, 霰, 氷晶, 凝集体)の微物理過程を考慮した。積雲のパラメタリゼーションはGrid 1, 2だけで用い、Grid 3, 4では用いなかった。乱流の取り扱いにはGrid 1, 2, 3についてはMellor and Yamada (1982) のレベル2.5の乱流クロージャスキームを用い、Grid 4についてはDeardorff (1980) の方法を用いた。これは、Grid 4では地表面付近の鉛直と水平方向の格子の形が立方体に近づき、RAMS ユーザーマニュアル (Walko and Tremback, n. d.) ではそのような場合にDeardorffのスキームの使用を推奨しているためである。気象初期条件、境界条件にはECMWF (European Centre for Medium range Weather Forecast) の水平解像度1度全球再解析データを用いた。総観規模の気象変化を取り込むためのナッジングはGrid 1の外側7格子のみで行い、Grid 2, 3, 4では行わなかった。計算条件を第2表に示す。計算期間は観測データの利用できた2003年3月1日か

第2表 計算条件.

基礎方程式	非静水圧; 圧縮
水平座標軸	ポーラーステレオ座標
鉛直座標軸	σ_z 座標
時間差分スキーム	Leapfrog と forward を組み合わせたもの
微物理過程	雲, 雨, 雪, 雹など7つの微物理過程を考慮
積雲対流	Modified Kuo (Grid 1, 2のみ)
下方境界	LEAF-2
上方・側面境界	ECMWF 1°×1°全球再解析データによるラージスケールナッジング (Grid 1)
大気放射	Chen and Cotton
乱流	Grid 1, 2, 3 水平: Smagorinsky deformation 鉛直: Mellor-Yamada level-2.5
	Grid 4 Deardorff scheme

ら4月10日までとし、計算結果の出力間隔を1時間とした。

2.3 観測データ

観測値には風力発電所で観測された風向・風速の10分平均値を用いた。野間岬には第1図dの通り10基の風車(風車は西から順に番号が付けられている)が設置されている。第5発電所, 第7発電所に関しては、風向によっては展望台や小さな起伏の陰に隠れるため、解析対象から除外した。各風車のハブ高さは第4, 第6発電所で45 m, 他の発電所では30 mとなっている。風向風速計は風車の機械室上に設置されており、本研究では風車のハブ高さを観測高度とみなした。

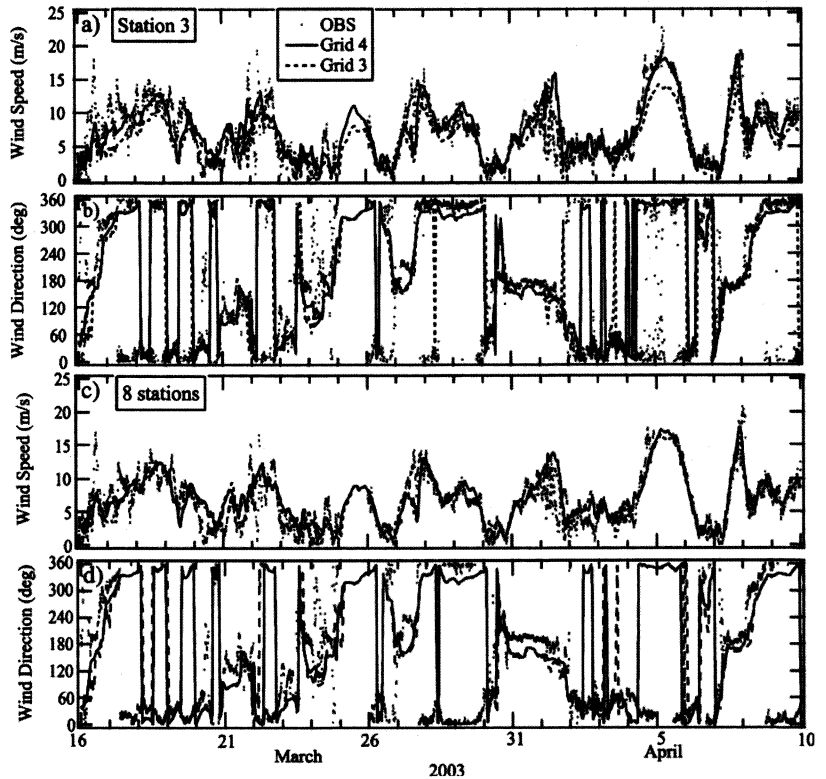
3. 結果および考察

計算結果と観測値の比較に際して、Grid 4において

は最下層（地上11.5 m）と第2層（35.4 m）または第3層（60.3 m）の風速，風速の南北成分および東西成分それぞれに対して風車のハブ高さに合わせて線形内挿したものを用いた。Grid 3の結果に関しては，モン・オブコフの相似則を用いた Louis (1979) の式を使用し，最下層（47.2 m）の風速から地上30 m の風速を推測した。ハブ高さ45 m の風車については，最下層と求めた地上30 m の風速を線形内挿した。以下に結果を示す。

第2図に第3発電所 (Station 3, 第1図dの▲) および8つの発電所で平均した風向・風速の計算結果 (Grid 4 (実線) および Grid 3 (破線)) と観測値 (ドット) の比較を示す。第2図 a, c は風速, b, d は風向である。計算期間の中から3月16日～4月10日の時系列を示す。3月25日や4月5日付近では観測の欠落した発電所が多かったため，観測値の平均は欠損とした。Grid 3に関しては，その解像度の粗さから同一グリッド内に複数の風車が存在するため，風車の存在する5つのグリッドの平均値を使用した。計算結果 (Grid 4) は観測値に見られる変動の傾向をよく捉えており，短時間の突出した変動もよく表現している。Grid 3の計算結果は観測値よりも風速が小さくなる傾向にあり，Grid 4の導入によって風速が増加していることがわかる。特に第3発電所では，風向が大きく変動する期間 (例えば，4月6～9日) においてGrid 3の結果とGrid 4の結果の間で風速の差が大きくなっている。これはGrid 4を導入する

ことにより，丘陵による風の収束，発散などの地形の影響が考慮され，風向の変動に伴う風速変動が捉えられるようになったためと考えられる。また，風向が安定していても，Grid 4で風速が大きく改善されている期間 (例えば，4月5日) がある。この期間の風向は北寄りで，岬の尾根方向に垂直に吹き込み岬を越えようとする風況である。このような丘陵を越える気流の特性を表現するには，岬の標高と傾斜をモデル内で正しく記述する必要がある。Grid 3ではその水平・鉛



第2図 風速と風向の計算結果と観測値の比較。Grid 4 (実線)，Grid 3 (破線)，観測値 (ドット)。(a)，(b) は第3発電所，(c)，(d) は8つの発電所の平均。

第3表 平均風速，平均二乗誤差 (RMSE)，風速の空間標準偏差の時系列標準偏差 ($\sigma_{space,time}$)。

	第3発電所		8地点の平均		$\sigma_{space,time}/\bar{V}$ $\times 100$ (%)
	\bar{V} (m/s)	RMSE (m/s)	\bar{V} (m/s)	RMSE (m/s)	
観測値	7.93	—	7.30	—	9.37
Grid 4	7.97	2.83	7.66	2.94	7.30
Grid 3	6.34	3.49	6.80	3.08	4.99

直解像度の粗さから岬の傾斜をほとんど表現することができなかったが、Grid 4によってこのような地形の効果を考慮できるようになったと考えられる。

第3表に平均風速 (\bar{V}) と平均二乗誤差 (RMSE) の比較を示す。第3発電所と8つの発電所の平均値を掲載した。平均風速は、Grid 3で小さく、Grid 4で若干であるが大きな値となった。Grid 4における平均風速の予報誤差(バイアス)は約5%で、Grid 3(約9%)よりも小さくなっている。一方、RMSEは第3発電所では大きく改善されているが、8地点の平均では改善性はそれほど大きくない。

風速の空間的なばらつきを表す $\sigma_{space,time}$ を定義し、計算した。 $\sigma_{space,time}$ は風速の各時点における空間的なばらつきの時間変動を表すもので、地形効果の影響に大きく左右される。はじめに各時点における風速の観測地点間の標準偏差 ($\sigma_{space,j}$) を求め、次にその値の解析期間における標準偏差を計算したものである。具体的な計算方法は、

$$\sigma_{space,j} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_i^m (V_{i,j} - \bar{V}_j)^2} \quad (1)$$

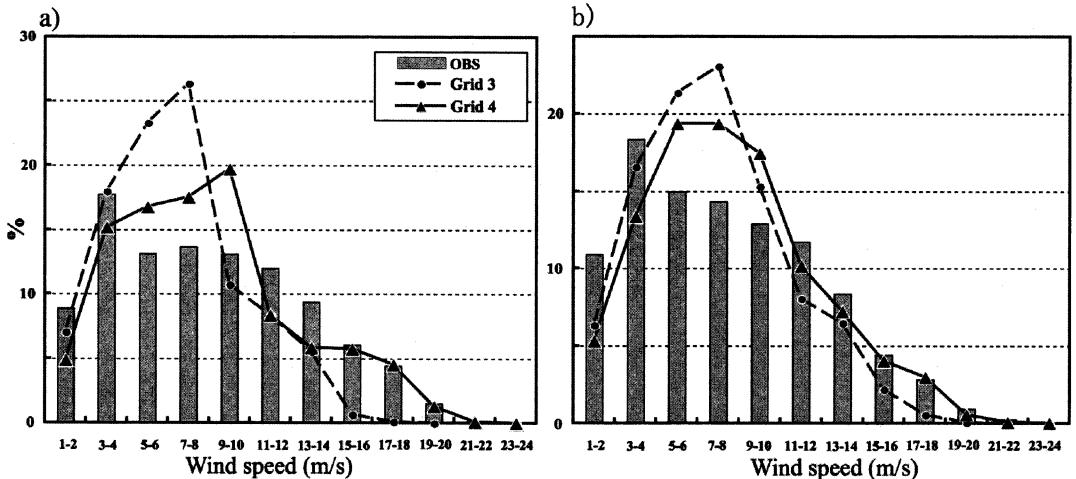
$$\sigma_{space,time} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_j^n (\sigma_{space,j} - \bar{\sigma}_{space})^2} \quad (2)$$

である。ここで $V_{i,j}$ は観測点 i の時点 j における風速、

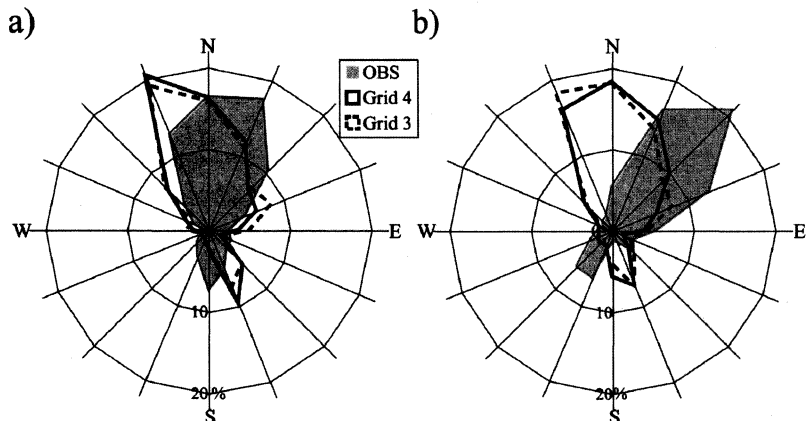
\bar{V}_j は時点 j の風速の空間平均、 m は観測地点数、 $\sigma_{space,j}$ は時点 j における風速の空間的な標準偏差、 $\bar{\sigma}_{space}$ は $\sigma_{space,j}$ の解析期間における平均値、 n はデータ数である。ただし、Grid 3に関しては同一グリッドを重複しないようにしたため、観測地点数 m は実際の観測地点数8より少ない。 $\sigma_{space,time}$ は風速の空間標準偏差の時系列標準偏差である。第3表に平均風速に対する割合 ($\sigma_{space,time}/\bar{V} \times 100(\%)$) で示す。観測値の9.37%に対してGrid 4では7.30%、Grid 3では4.99%となり、風速の空間的なばらつき具合がGrid 4によって観測値により近いものとなっている。

第3図に風速の頻度分布の比較を示す。風速24 m/sまでを2 m/s 間隔で12の階級に分け、出現頻度を%で表した。第3表同様、第3発電所と8つの発電所の平均を示す。棒グラフが観測、実線がGrid 4、破線がGrid 3である。Grid 3では5-10 m/s の頻度が実況よりも多く、4 m/s 以下の弱風と11 m/s 以上の強風の頻度が実況よりも少ない傾向にあるが、Grid 4では5-8 m/s の頻度が減少する一方で11 m/s 以上の強風の頻度が増加し、観測値により近い頻度分布に改善されている。但し、4 m/s 以下の弱風が少ない傾向については改善されていない。

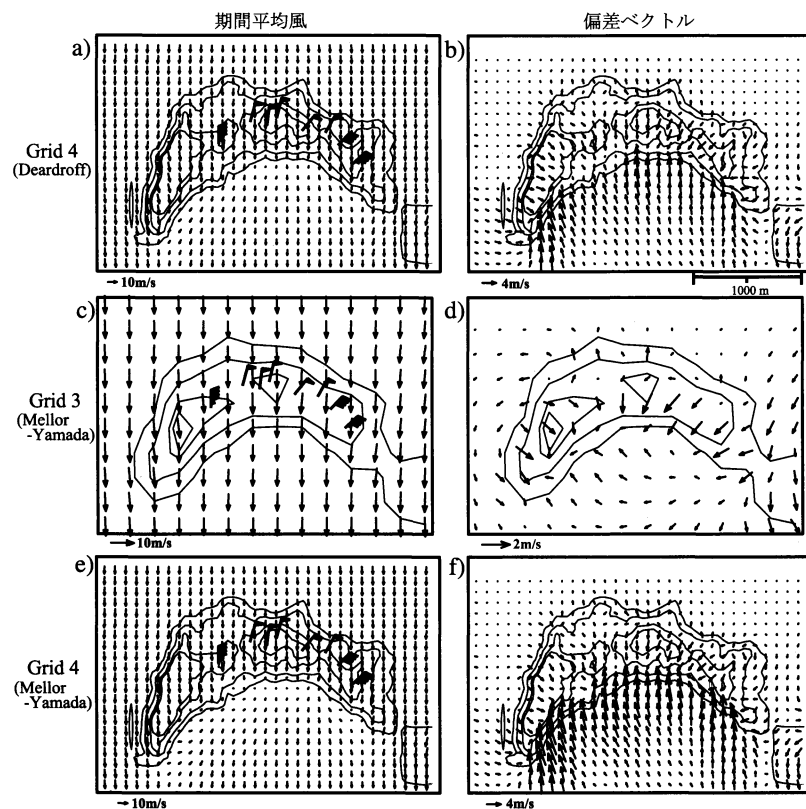
次に風向の出現頻度を比較した結果を第4図に示す。ここでは、第4図 a は岬の西側に位置する発電所(すなわち、第1, 2, 3, 4 発電所)の平均、 b は東側に位置する発電所(第6, 8, 9, 10 発電所)の平均を示す。陰影が観測、実線がGrid 4、破線がGrid 3



第3図 風速の頻度分布図 (%). (a) 第3発電所, (b) 8つの発電所の平均. 棒グラフは観測を, 実線はGrid 4を, 破線はGrid 3を表す.



第4図 風配図(%). (a) 岬の西側に位置する発電所(すなわち, 第1, 2, 3, 4 発電所)の平均, (b) 東側に位置する発電所(第6, 8, 9, 10 発電所)の平均. 陰影は観測を, 実線は Grid 4 を, 破線は Grid 3 を表す.



第5図 北風期間(3月18日12時~19日12時)における平均風速分布および偏差ベクトル. 偏差ベクトルは, 南向きのベクトルは北風が南向きに加速していることを, 北向きのベクトルは減速していることを表す. (a), (b) は Grid 4, (c), (d) は Grid 3, (e), (f) は Grid 3 と同一の乱流過程を用いて計算した Grid 4 のそれぞれ期間平均風, 偏差ベクトルを表す. 矢羽は観測された期間平均風. 短矢羽は 1 m/s, 長矢羽は 2 m/s, ベナントは 10 m/s を表す.

である. 岬の西側では南北方向の風向の高頻度が比較的よく捉えられている. しかしながら, 岬の東側では観測に見られる北東方向の主要な風向を再現することができず, Grid 4 においても改善されなかった. この原因としては岬の北東側に位置する野間岳(標高591 m)から野間岬を迂回する風系の再現性に問題があると考えられるが, 詳しくは解明できていない.

地形の風況への影響を調べるために, 計算期間の中から安定して北風の吹いた期間(3月18日12時~19日12時)に着目し, その期間で平均を取った風速に対して, 計算領域の各グリッドセルと岬の風上側(ここでは北側)に位置するグリッドセルとの間で風速成分の偏差を計算した. 計算には, Grid 4 では地上から2層目(地上35.4 m)の水平風を, Grid 3 ではモニン・オブコフの相似則を用いて最下層(47.7 m)の水平風速から推測した地上30 mの水平風を用いた. 結果を第5図に示す. a, b は Grid 4 における, c, d は Grid 3 におけるそれぞれ期間平均風分布, 偏差ベクトルである. また, 乱流過程の変更による影響を調べるため, Grid 3 と同じ乱流過程すなわち Mellor-Yamada の乱流モデルを用いて Grid 4 を計算し, 比較した(e, f). Grid 4 では, 岬に吹き込んだ北風(水平風速約7.5 m/s)が地

形の影響を受けて風向・風速が変化していることがわかる。岬の風下側では、地形の影響を受けて後流域を形成しており最大6 m/s 減速している。一方、岬の尾根や第1発電所と第2発電所の間に位置する鞍部では地形による収束作用で加速しており、最大約3 m/s の加速が見られる。Grid 3でも同様の減速と加速が見られるがその幅は小さく、最大で約0.5 m/s の減速、約1.3 m/s の加速であった。特に岬の尾根、鞍部における加速作用は、風力発電で必要とされる風速に大きな影響を与える。しかしながら、岬の東側ではGrid 3, Grid 4ともに、観測値に見られた北東の風向を再現することができなかった。また、乱流過程の変更によって、岬の風下側の後流域の大きさや減速の幅に変化が生じたが(b, f), 岬の尾根を含むそれ以外では大きな違いは見られなかった。今回のシミュレーションでは、風速の精度の向上は乱流モデルの変更よりも解像度の向上に伴った地形効果の表現の向上によるものが大きかったと考えられる。

今回の計算結果は観測された風況を概ね捉えていたが、RAMS の用いている σ_z 座標系では、急峻な地形を対象に計算した場合に誤差が大きくなるのが Satomura (1989) によって指摘されている。また、RAMS では差分スキームに風上差分を用いているため、表現できる現象は50 m の2倍以上の大きさになる可能性がある。更に、モデルでは表現できないサブグリッドスケールの影響が大きな誤差を生むことがある。本研究でも第5, 7発電所はグリッド内の展望台などの影響が大きいと考えられ、解析から除外した。今回見られた風向表現の不十分さがメソスケールモデルとしてのRAMSの限界に起因するものか、実験設定を変えることによりさらに改善する余地があるのかは今後の課題である。

4. まとめ

メソスケール気象モデルRAMSを用いて、風力発電サイトを対象に4重ネストの高分解能(水平分解能50 m)シミュレーションを行い、風力発電所において連続して観測された風速・風向とを比較し、その妥当性および問題点の検討を行った。

- ① 計算結果は観測値に見られる変動の傾向を概ね捉えていた。解析期間40日間の平均風速のバイアスは約5%であった。
- ② Grid 4 (水平解像度50 m) の導入により計算の精度、空間的な風速のばらつきの再現性が向上した。これ

らは地形効果の表現の向上に起因すると考えられる。

- ③ Grid 4の導入によって、風速5-8 m/sの頻度が減少する一方で11 m/s以上の強風の頻度が増加し、観測値により近い頻度分布に改善された。
- ④ Grid 4では、岬の斜面や地形の影響を受け、丘陵の風下側の後流域における風速の減速や、尾根や鞍部におけるその加速がみられた。これは、解像度向上に伴う地形効果の表現の向上によるところが大きい。
- ⑤ 岬の東側において観測された北東風の表現はGrid 4の導入によっても不十分だった。その原因については今後の課題である。

謝辞

風力発電サイトの観測データを提供していただいた九州電力(株)の関係者と有益な助言をいただきました東京大学工学部の石原孟助教授に感謝いたします。また、本論文の改稿にあたりましては、査読および編集委員の方々に懇切丁寧なコメントを頂きました。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- Deardorff, J. W., 1980: Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model, *Bound.-Layer Meteor.*, **18**, 495-527.
- Louis, J.-F., 1979: A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, *Bound.-Layer Meteor.*, **17**, 187-202.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Rev. Geophys. Space. Phys.*, **20**, 851-875.
- 村上周三, 持田灯, 加藤信介, 木村敦子, 2003: 局所風況予測システムLAWEPSの開発と検証, *ながれ*, **22**, 345-385.
- Pielke, R. A., W. R. Cotton, R. L. Walko, C. J. Tremback, W. A. Lyons, L. D. Grasso, M. E. Nicholls, M. D. Moran, D. A. Wesley, T. J. Lee, and J. H. Copeland, 1992: A comprehensive meteorological modeling system-RAMS, *Meteor. Atmos. Phys.*, **49**, 69-91.
- Satomura, T., 1989: Compressible flow simulations on numerically generated grids, *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 473-482.
- Walko, R. L. and C. J. Tremback, n. d.: RAMS, Regional Atmospheric Modeling System Version

4.3/4.4, Model Input Namelist Parameters, (online), available from <<http://www.atmet.com/html/docs/documentation.shtml>>, (accessed 2005-09-07).

High Resolution Wind Flow Simulation Using a Meso-scale Meteorological Model : Application to Wind Power Generation Plant over the Noma Cape, Kagoshima

Keiya YUMIMOTO*, Yasuhiro YOSHIDA*, Itushi UNO**,
Takanori UCHIDA** and Yuji OHYA**.

* *Department of Earth System Science and Technology, Kyushu University, Kasuga Park 6-1, Kasuga, Fukuoka, 816-8580, Japan.*

** *Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University.*

(Received 16 August 2004 ; Accepted 15 September 2005)

日本気象学会英文レター誌 SOLA
(Scientific Online Letters on the Atmosphere)
<http://www.jstage.jst.go.jp/browse/sola/>

第1巻 2005年9月 目次

Masahiro HOSAKA, Daisuke NOHARA and Akio KITO: Changes in Snow Cover and Snow Water Equivalent Due to Global Warming Simulated by a 20 km-mesh Global Atmospheric Model	93-96
Kazuo KURIHARA, Koji ISHIHARA, Hidetaka SASAKI, Yukio FUKUYAMA, Hitomi SAITOU, Izuru TAKAYABU, Kazuyo MURAZAKI, Yasuo SATO, Seiji YUKIMOTO and Akira NODA : Projection of Climatic Change over Japan Due to Global Warming by High-Resolution Regional Climate Model in MRI	97-100
Kazuyo MURAZAKI, Hidetaka SASAKI, Hiroyuki TSUJINO, Izuru TAKAYABU, Yasuo SATO, Hiroshi ISHIZAKI and Kazuo KURIHARA : Climatic Change Projection for the Ocean around Japan Using a High-Resolution Coupled Atmosphere-Ocean Regional Climate Model	101-104
Masaru INATSU and Masahide KIMOTO : Difference of Boreal Summer Climate between Coupled and Atmosphere-only GCMs	105-108
