

# メソ気象モデルWRF-ARWを用いた 複雑地形上の数値風況予測

内田 孝紀\* 辰己 賢一\*\* 川島 泰史\*\*\* 荒屋 亮\*\*\*\*

(2013年1月31日受理)

## NUMERICAL SIMULATION OF AIRFLOW OVER COMPEX TERRAIN BY USING THE MESO-SCALE MODEL WRF-ARW

Takanori UCHIDA, Kenichi TATSUMI, Yasushi KAWASHIMA and Ryo ARAYA

E-mail of corresponding author: [takanori@riam.kyushu-u.ac.jp](mailto:takanori@riam.kyushu-u.ac.jp)

### Abstract

The WRF model was developed as a collaborative project by the National Center for Atmospheric Research (NCAR), the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), the National Centers for Environmental Prediction, the Air Force Weather Agency, the Naval Research Laboratory, the University of Oklahoma and the Federal Aviation Administration in the United States. It is a regional- to global-scale model intended for both research applications and operational weather-forecast systems. In the present study, the numerical simulation of airflow over complex terrain with a steep slope was performed by using the WRF-ARW model. The wind speed obtained by the WRF-ARW was in a good agreement with the observed data.

**Key words :** *Meso-scale model, WRF-ARW, Complex terrain*

## 1. 緒言

風工学分野の数値流体力学CFD(Computational Fluid Dynamics)は、コンピュータの演算速度の飛躍的な向上や、記憶容量の増大などに伴い、風洞実験や野外観測に並ぶ有力な研究手法として確立されてきた<sup>1)</sup>。我々の研究グループでは、風力発電分野へのCFD技術の適用を進めている。

特に、数(十)km以下の局所域(マイクロスケール)に的を絞り、流れの衝突、剥離、再付着、逆流などの風に対する地形効果を高精度に再現可能な風況診断技術RIAM-COMPACT®(Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, COMputational Prediction of Airflow over Complex Terrain; 流体力学CFDモデル)を開発し、種々の解析を実施してきた<sup>2)</sup>。CFDモデルでは、風に対する地形効果を高精度に予測することは可能であるものの、圧力に関するPoisson方程式の緩和計算を伴うため、日変化、すなわち、現実的な時間スケールの数値シミュレーション(時間積分)は現在でも困難である。

その一方で、気象分野における広域(メソスケール)を対象にした気象力学モデル(メソ気象モデル)では、現実的な時間スケールの時間積分が比較的容易に行える。我々の研究グループでも、過去に地域気象モデルCSU-RAMS (Colorado State University, Regional Atmospheric Modeling System)を用いた数値シミュレーションを行い、CFDモデルとメソ気象モデルの特徴を示すとともに、両モデルの融合・接

続の可能性を探ってきた<sup>3)</sup>。

近年、風力発電分野では、CFD技術を用いた風車の正確な立地点(地形乱流や発電量など)の評価から、メソ気象モデルを用いた数時間から数日先の風況場・発電量の予報(Forecasting)まで、幅広い要求がある。

本報では、最新のメソ気象モデルWRF-ARWを用いた複雑地形上の風車サイトの気流場シミュレーションの現状を報告する。

## 2. メソ気象モデルWRF-ARWの概要

メソ気象モデルWRF-ARW(Weather Research and Forecasting - Advanced Research WRF)は、NCAR(National Center for Atmospheric Research)、オクラホマ大学(University of Central Oklahoma)、NCEP(US National Center for Environment Prediction)、NOAA(Forecast System Laboratory of the National Oceanic and Atmospheric Administration)、AFWA(Air Force Weather Agency)などで共同開発され、現業・研究両用のメソ気象モデルとして世界中で利用されている3次元完全圧縮非静力学モデルである<sup>4)</sup>。NCARを中心に開発されてきた非静力学モデルMM5の次世代モデルと言われている。

日射量・大気放射量を計算する放射モデル、乱流混合層を表現する乱流モデル、水蒸気・雲水・雨水・雪・雹などを考慮した雲物理モデル、地表面温度・土壌温度・土中水

\*九州大学応用力学研究所, \*\*東京農工大学, \*\*\*西日本技術開発(株), \*\*\*\*(株)環境GIS研究所

分量・積雪量・地表面フラックスを算出する地表面モデルなどの物理モデルが導入されている。また、最新の物理モデルやデータ同化システムが利用可能であり、局地的豪雨や突風などの予測および再現に適したモデルである。PCクラスタを利用した大規模並列計算も可能である。本研究で利用したWRF-ARWのバージョンは3.3.1である。

### 3. 計算対象と計算条件など

本研究で対象とした風力発電所(総出力50,400kW)は、鹿児島県の最北端、薩摩半島北西部の長島町に位置する。四方を東シナ海、八代海、長島海峡に囲まれており、行人岳(394m)、大中岳(403m)、矢岳(402m)などの山々が点在するなど、平坦な地形が少ない場所である。

本発電所の21基の風車(ブレード直径92m、ハブ高さ70m、出力2.4MW)は、長島町中央部の標高250mから400mの山地尾根上および斜面に設置されている。風車が位置する周辺は、東西に伸びる陵線と谷地形が連続している特に複雑な地形である(図1を参照)。

計算領域を図2に示す。本研究では、3重ネストシステムを使った。風力発電所を含む最も狭い領域(D03)の空間解像度は1,000mである。鉛直方向の最小メッシュ幅は約8mである。図3と図4には、各領域における地形標高データと土地利用・植生データを示す。本研究では、地形データセットにUSGS(United States Geological Survey, 略称USGS)の緯度・経度30秒間隔の全球数値標高モデルデータGTOPO30と、より空間分解能の高い国土地理院(Geographical Survey Institute, 略称GSI)の数値地図50m標高データ(GSI50は南北方向1.5秒、東西方向2.25秒、略称GSI50)を用いた。土地

利用・植生データセットには、WRF-ARWにプレインストールされているUSGSのデータ(空間解像度1°)を用いた。

本研究の境界条件に用いた気象GPV(Grid Point Value)データは、全球客観解析データのNCEP Final Analysis(NCEP-FNL)である(空間解像度0.5°、時間解像度6時間)。これを6時間おきに与えた(ナッジング機能は無し)。海面水温SST(Sea Surface Temperature)データには、NCEP-FNLのSkinTemperatureを用いた。本研究の気流場シミュレーションは、雲物理や降水過程も考慮されている。図5には、本研究で使用した計算機環境を示す。計算期間は2010.12.01.00 UTC(Coordinated Universal Time)～2010.12.30.06 UTCの約1ヶ月間である。3重ネストシステムを用いた約1ヶ月の計算には、実時間で約35日の時間を要した。

図6には、WRF-ARWの計算結果の一例(領域D03)を示す。これは、モデル標高に風車ハブ高さ(70m)をプラスした位置(風車ナセル位置)での風速分布である。WRF-ARWでの地形の再現が粗いため、実際の標高と比べて70mほど低くなっている。計算領域の中で複雑な気流場が形成されている様子が見て取れる。

図7には、4号機風車のナセル位置での風速を、実測値とWRF-ARW(計算値)の結果を比較して示す。両者の時間解像度は1時間である。表1には、時系列データから算出した統計的指標を示す。これら結果を吟味すると、WRF-ARW(計算値)は実測値に対して全体的にやや大きめに評価している。しかしながら、日変化の挙動や、強風が発生する時間帯(ピーク位置)などは良好に再現しているのが分かる。



図1 本研究で対象とした風力発電所の航空写真

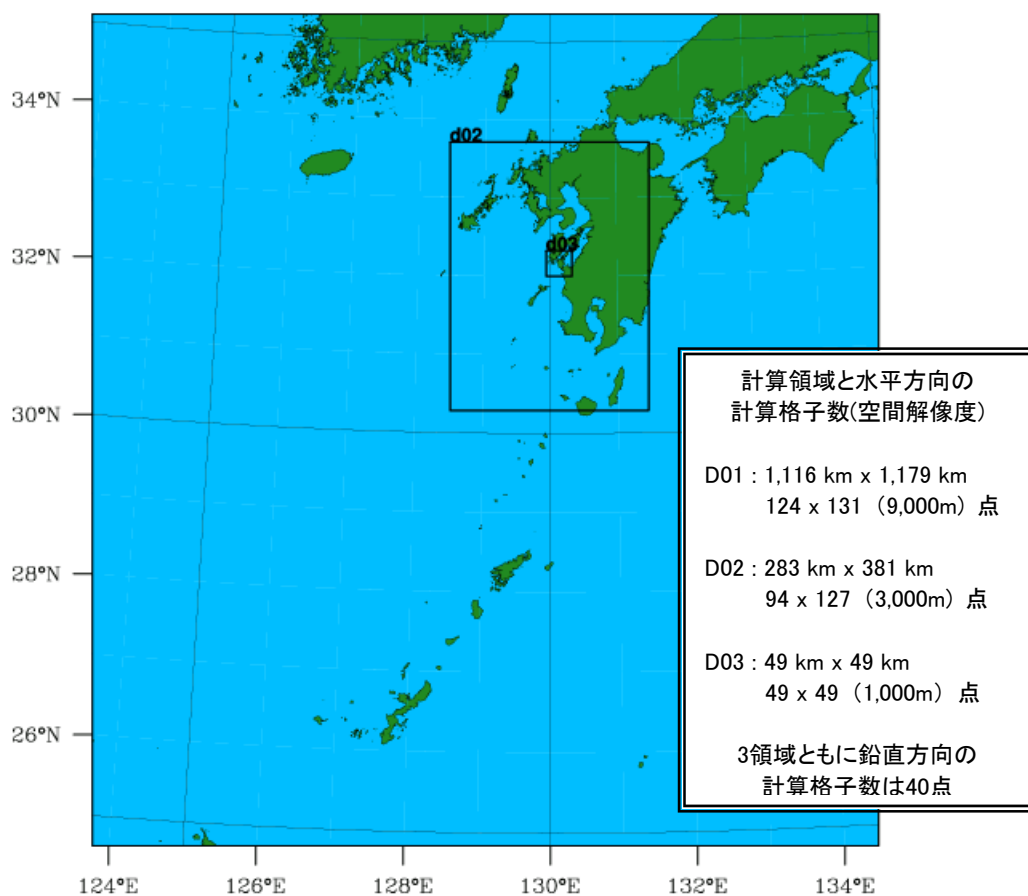


図2 WRF-ARWの計算領域

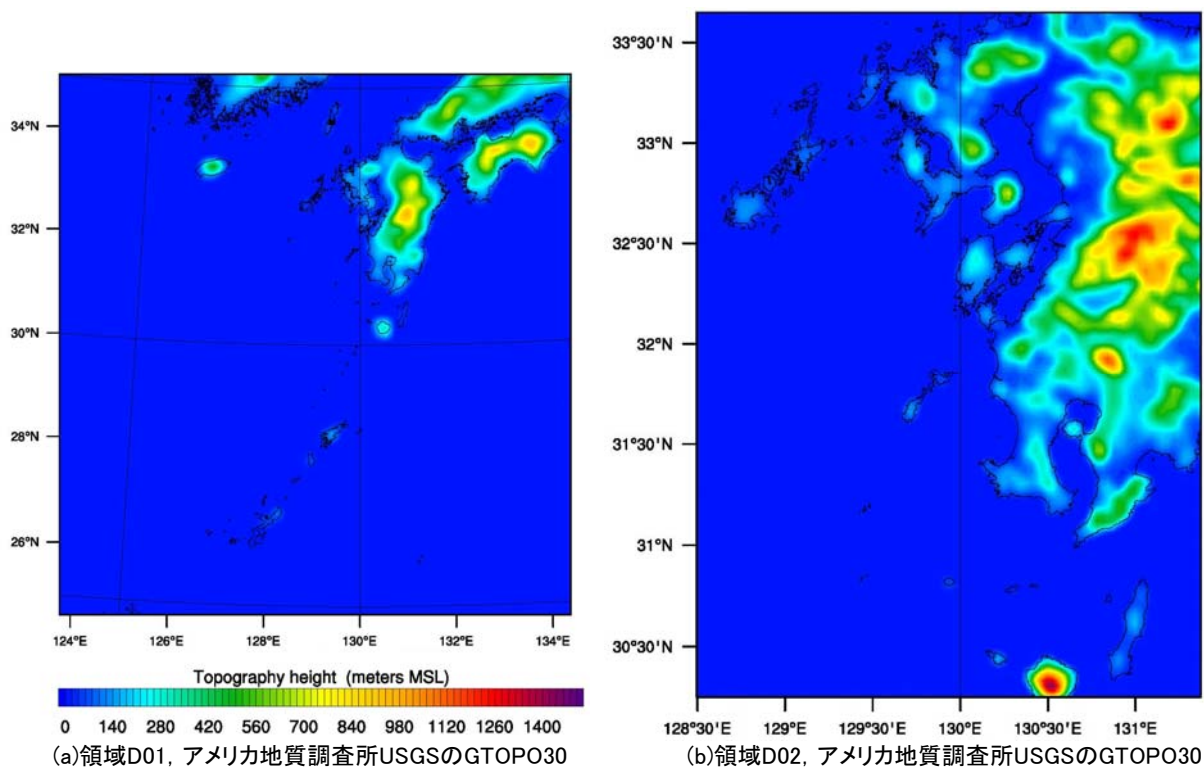
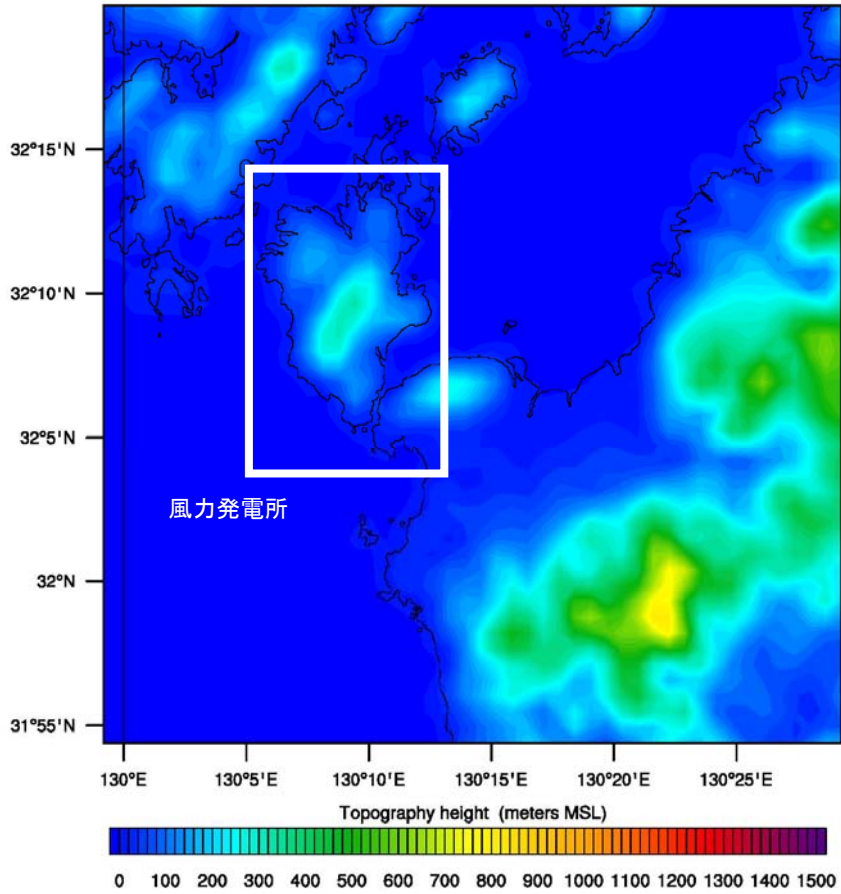
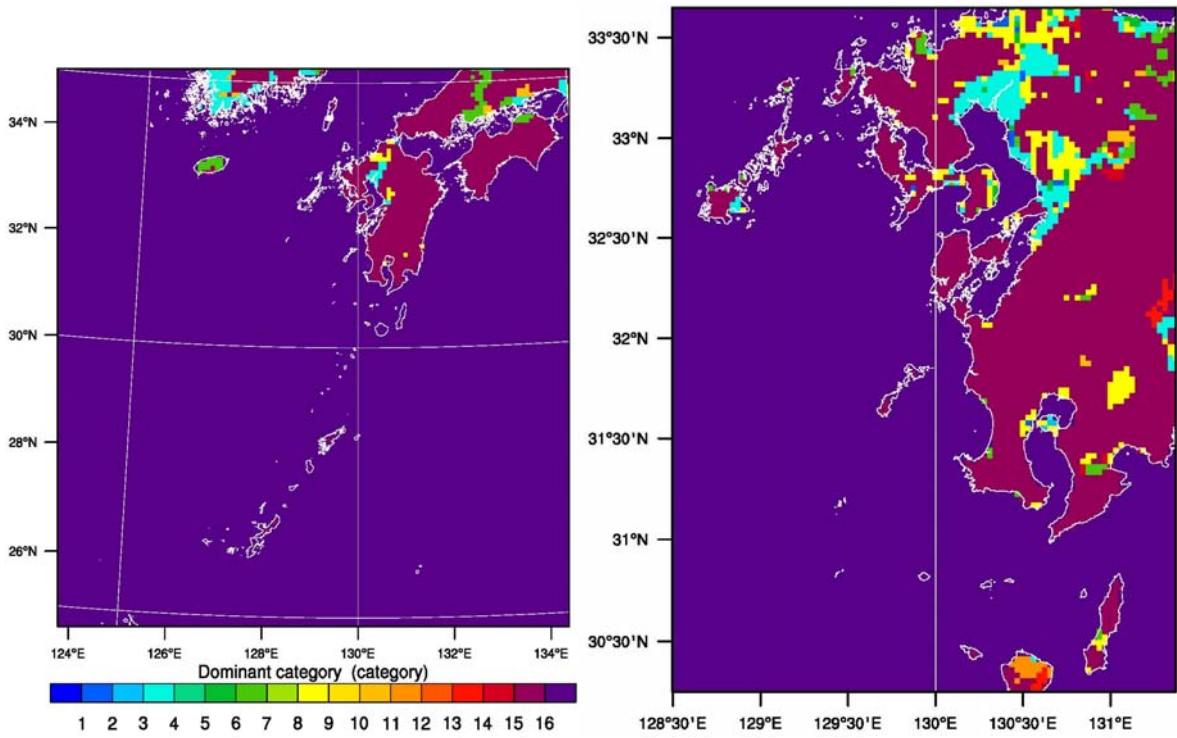


図3 地形標高データ



(c)領域D03, 国土地理院のGSI50

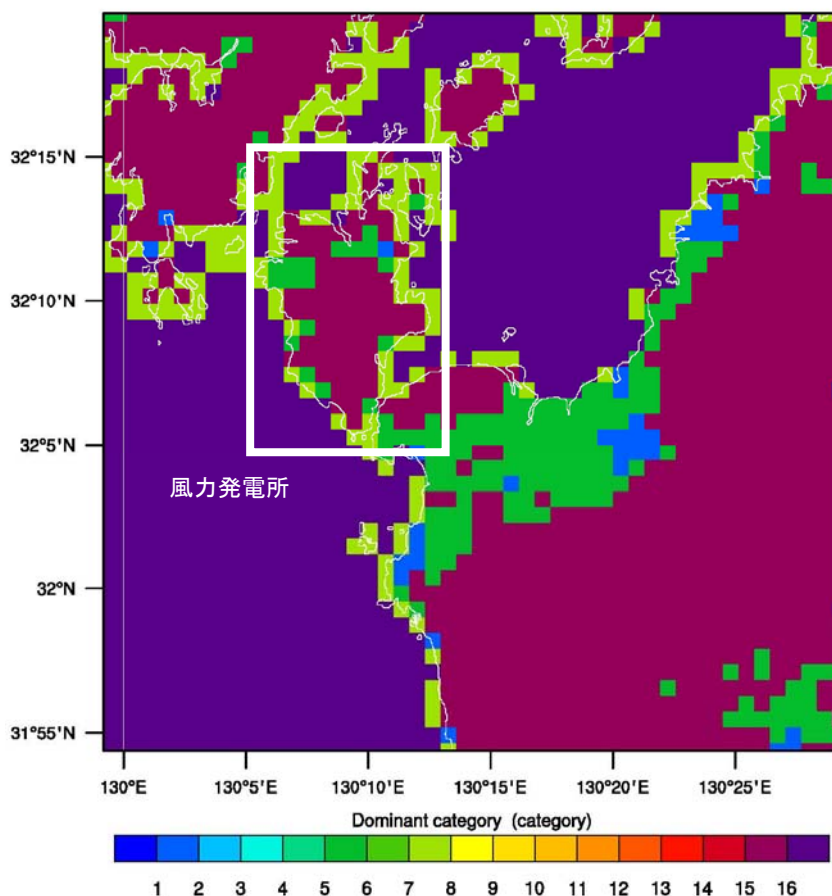
図3 地形標高データの続き



(a)領域D01, アメリカ地質調査所USGS

(b)領域D02, アメリカ地質調査所USGS

図4 土地利用・植生データ



(c) 領域D03, 国土数値情報カテゴリをUSGSカテゴリに再分類したデータ

図4 土地利用・植生データの続き



図5 計算機環境, システムワークス(株)製WS

- OS :  
CentOS Linux 5.6
- コンパイラ  
gcc (v.4.1.2)  
f77 (v.3.4.6)
- CPU  
Xeon E5607 2.26GHz  
8コア
- Memory  
12GB

#### ■ 平均誤差 (ME: Mean Error)

- ・ 個々の予報値(計算値)の誤差を, そのまま期間内で平均したものを平均誤差 (ME) と呼ぶ。またバイアス(偏り)とも呼ばれる。
- ・ 平均誤差は予報の系統的な偏りを示す指数である。平

均誤差がゼロのとき, 平均的に見て予報は正にも負にも偏っていないことを示している。また, 平均誤差が正(負)になるときは, 期間平均では予報値が実況値(実測値)よりも高かった(低かった)ことを意味する。

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - A_i)}{N}$$

( $F_i$ は予報値,  $A_i$ は実況値,  $N$ はデータ個数)

#### ■ 2乗平均平方根誤差 (RMSE: Root Mean Square Error)

- ・ 個々の予報の誤差を, 2乗して期間内で平均し, 平方根を取ったものを2乗平均平方根誤差 (RMSE) と呼ぶ。
- ・ 2乗平均平方根誤差は常に正の値を示し, 予報誤差の標準的な大きさを示す指数として利用される。値が小さくゼロに近いほど予報精度が高いことを意味し, 個々の予報の誤差の60%~70%は,  $\pm$  (2乗平均平方根誤差) の間に収まる。

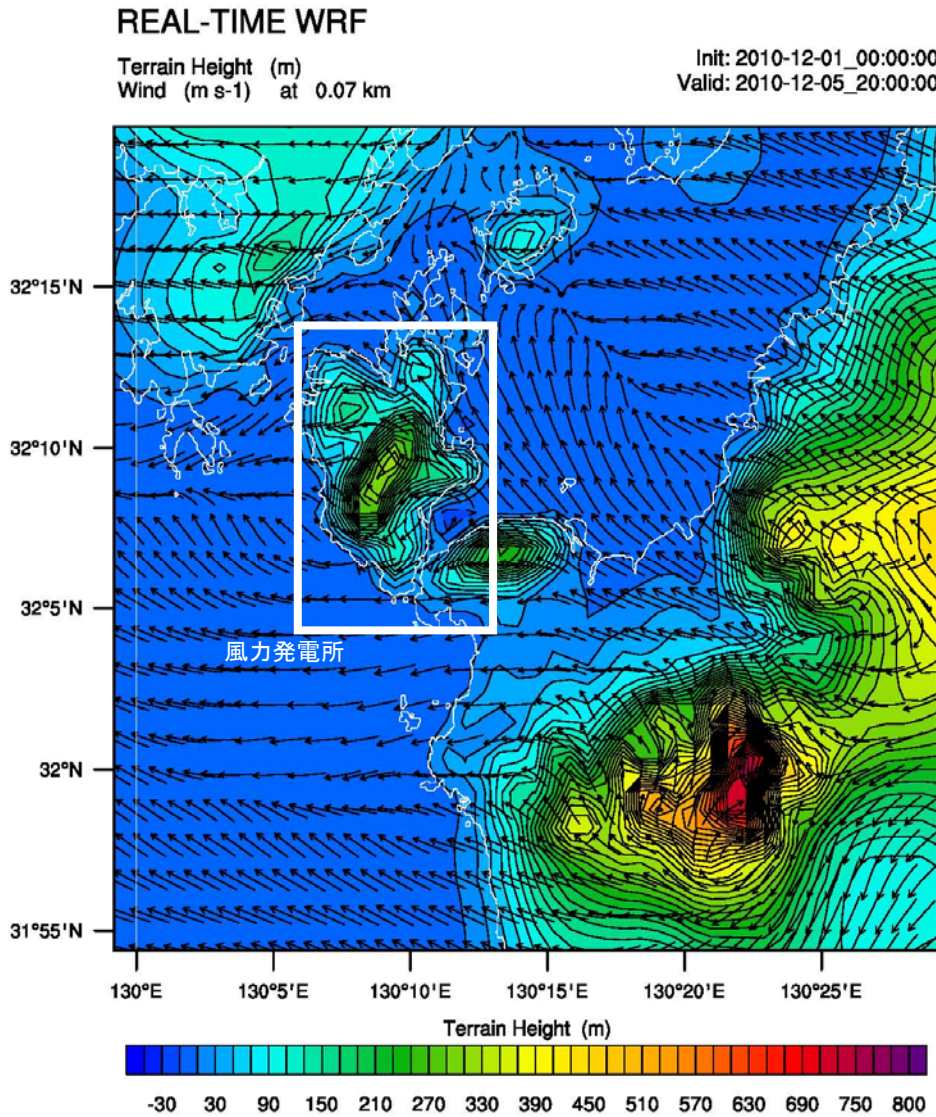


図6 WRF-ARWの計算結果の一例, モデル標高に風車ハブ高さ(70m)をプラスした位置での風速分布

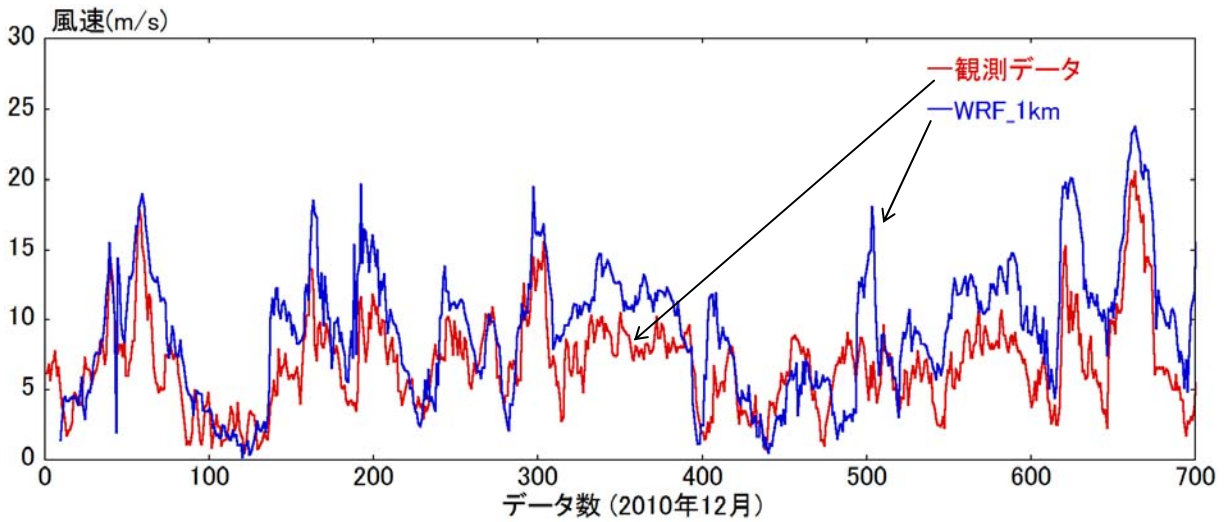


図7 風車のナセル風速(実測値)とWRF-ARW(計算値)の比較, 4号機風車(標高376.2m), 2010年12月の約1ヶ月

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (F_i - A_i)^2}{N}}$$

( $F_i$ は予報値,  $A_i$ は実況値,  $N$ はデータ個数)

上記と合わせて, MEとRMSEを実測値の平均風速で割り, 百分率で表現した相対MEと相対RMSEも評価指標として用いる. これらの物理量を表1に示す.

#### ■ 相対ME

$$\begin{aligned} \text{相対ME} &= \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - A_i) \right] \frac{1}{\bar{A}} \times 100 (\%) \\ &= \left[ \sum_{i=1}^N \left( \frac{F_i}{N} - \frac{A_i}{N} \right) \right] \frac{1}{\bar{A}} \times 100 (\%) \\ &= \left[ \bar{F} - \bar{A} \right] \frac{1}{\bar{A}} \times 100 (\%) \end{aligned}$$

#### 注意

相対MEの絶対値 = 相対誤差(Relative Error)

#### ■ 相対RMSE

$$\text{相対RMSE} = \frac{RMSE}{\bar{A}} \times 100 (\%)$$

平均風速 (実測値)	6.99 (m/s)
平均風速 (WRF-ARW)	9.47 (m/s)
ME	2.48 (m/s)
RMSE	3.91 (m/s)
相対ME	35.51 (%)
相対RMSE	55.99 (%)
相対誤差	35.51 (%)

表1 図7の時系列データから算出した統計的指標の一覧

## 4. 結言

最新のメソ気象モデルWRF-ARWを用いた複雑地形上の風車サイトの数値風況予測を実施した. 本研究では, 3重ネストシステムを使い, 鹿児島県の風力発電所を計算対象とした. 含む最も狭い領域(D03)の空間解像度は1,000mであり, 鉛直方向の最小メッシュ幅は約8mである. 計算対象期間は, 2010.12.01.00 UTC ~ 2010.12.30.06 UTCの約1ヶ月間である. その結果, WRF-ARW(計算値)は実測値に対して全体的にやや大きめに評価していることが示された. その一方で, 日変化の挙動や, 強風が発生する時間帯(ピーク位置)などは良好に再現していることが明らかになった. 今後は, 格子解像度の影響や, 実測値を同化した計算を行い, それらの結果を報告する予定である.

## 謝辞

本研究の一部は, 「平成24年度 新エネルギーベンチャー技術革新事業(新設および既設風車の安全運転とメンテナンスに資する気象情報配信システムの開発)」の支援を受けました.

本研究で対象にした風力発電所の実測値は, 長島ウインドヒル(株)から提供いただきました.

ここに記して関係者に感謝の意を表します.

## 参考文献

- [1] 内田 孝紀, 地形の影響評価, 建築技術, 2012
- [2] 内田 孝紀, 大屋 裕二, 川島 泰史, 猿渡 和明, 西田 利彦, RIAM-COMPACT®によるウインドリスク(地形乱流)の数値診断—愛知県渥美風力発電所を例として—, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol.35, 通巻99, pp.14-23, 2011
- [3] 内田 孝紀, 大屋 裕二, 急峻な岬まわりの気流場シミュレーション—気象力学モデルCSU-RAMSと流体力学モデルRIAM-COMPACT®の適用性について—, 第18回風工学シンポジウム論文集, pp.35-40, 2004
- [4] 辰己 賢一, 竹見 哲也, 石川 裕彦, WRFモデルを用いた高解像度気象シミュレーションシステムの構築: 豪雨の事例解析, 京都大学防災研究所年報, 51B, pp.437-pp.448, 2008