

領域気象モデルRAMSを用いた九州地域の風況特性と 風力エネルギーの評価

吉田, 保衡
九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻

弓本, 桂也
九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻

鵜野, 伊津志
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/16710>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 25 (3), pp.387-394, 2003-12. 九州大学大学院総合理工学
府
バージョン :
権利関係 :

領域気象モデル RAMS を用いた 九州地域の風況特性と風力エネルギーの評価

吉田 保衡*1†・弓本桂也*1・鶴野 伊津志*2

(平成15年10月31日 受理)

Evaluation of Wind Characteristics and Wind Energy with the Regional Meteorological Model RAMS over the Kyushu Region

Yasuhiro YOSHIDA, Keiya YUMIMOTO and Itsushi UNO

†E-mail of corresponding author: yasuhiro@riam.kyushu-u.ac.jp

A high-resolution regional meteorological model RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) is used for evaluating the wind energy availability over the Kyushu region. The simulated wind speed and direction are in good agreement with observational data acquired by the Japan Meteorological Agency including seasonal variations. The frequency distribution of the wind speed is similar to the Rayleigh distribution. The available wind power energy has high values in winter due to the strong monsoon. The ability of power production is good in remote islands, along the coasts of the Sea of Japan and East China Sea, and mountain regions through the year. Especially the annual power production, true availability, and capacity factor indicate high values all in three kinds of wind turbine systems at Hirado where the annual mean wind speed is high.

Key words: meteorological model、Kyushu range、wind energy、wind power

1. はじめに

20世紀から21世紀にかけての急激な気温上昇による「地球温暖化」がクローズアップされて以来、地球温暖化は世界的に取り組まなければならない環境問題の1つである。地球温暖化防止対策には省エネルギー、CO₂の削減などが上げられるがその中の1つとしてCO₂の発生がほとんどない自然エネルギー（太陽エネルギー、地熱、風力、潮力）の導入が考えられる。その中で近年、風力発電システムの進歩によりコストの減少と発電取得量の大容量化が可能になり、より多くのCO₂を発生させる他の発電システムより注目度が非常に高くなっている。それに伴って世界各地の風力発電機の数が増加し、日本でもここ10年で急速な増加傾向にあり、現在500以上の風力発電機が稼働している。Archer and Jacobson (2003)¹⁾は観測データから発電能を見積もっているが、風力発電の設置には風速や風向などの風況特性を実地調査する必要があり、それには多大な労力と時間を必要とする。

吉田ら(2003)²⁾はメソスケール気象モデルRAMS (Regional Atmospheric Modeling System; Pielke *et al.*, 1992)³⁾を用いて九州地域を対象に水平分解能2km、鉛直方向に16kmとり、出力時間間隔を1時間とし2001年1月1日から12月31日までの連続的な通年計算を行い、モデルの再現性の統計的評価を報告した。ここではシミュレーション結果から九州地域における風況特性及び風力エネルギーなどの評価を行い、その結果を報告する。

2. 領域気象モデル RAMS の概要

圧縮性非静力学方程式をベースに開発された地域気象モデルRAMS(Regional Atmospheric Modeling System)を使用し、九州地域を2km格子で解像できるように領域を設定している。総観場の影響を局所場に反映させるために、多重ネスティング手法を用いた。本研究におけるネスティング計算領域をFig.1に示す。

1年間の長期計算のために、側方境界条件および初期条件には4次元データ同化手法を用いた。ヨーロッパ中期予報センターECMWF (European Center for Medium range Weather Forecasts)のAdvanced Operational Analysis

*1 大気海洋環境システム学専攻博士課程

*2 応用力学研究所、大気海洋環境システム学専攻

Upper Air Data (水平解像度 1 度、鉛直指定面気圧1000, 925, 850, 700, 500, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 10 hPa) のジオポテンシャル高度、温度、相対湿度、水平風速成分のデータから、計算期間・計算領域内の 6 時間毎の境界条件データを作成し、初期及び境界における同化データとして連続的に計算に取り込んだ。RAMSの土壌モデルに与える植生分類はUGSG(U.S Geographical Survey)の植生データを利用した。また、海面温度(SST)はNCAR(National Center for Atmospheric Research)が提供している全球 1 度メッシュの2001年の月平均値を用いた。計算領域における標高・土地利用情報は、国土地理院の数値地図情報を元にデータベースを作成した。詳細は吉田ら(2003)を参照していただきたい。

3 観測結果との比較

ここではモデルの風況特性を知るために風向、風速出現率などを九州地域に19ヶ所ある気象官署の観測データとモデルの結果との比較を行う。

3.1 16方位別風向出現率と平均風速

16方位別風向出現率と平均風速の再現はその地域における卓越風の風向を明らかにし、風力エネルギーの利用可能性の把握に重要である。ここでは2001年の1月、4月、7月、10月における福岡(33.48°N、130.22°E)、平戸(33.21°N、129.33°E)の風向出現率と16方位別平均風速について観測とモデルの結果との比較をFig.2に示す。



Fig.1 Model domain of the nest grid region in this study. Dots indicate the location of wind power stations. Contour lines show the 200, 500 and 1000 m in elevation

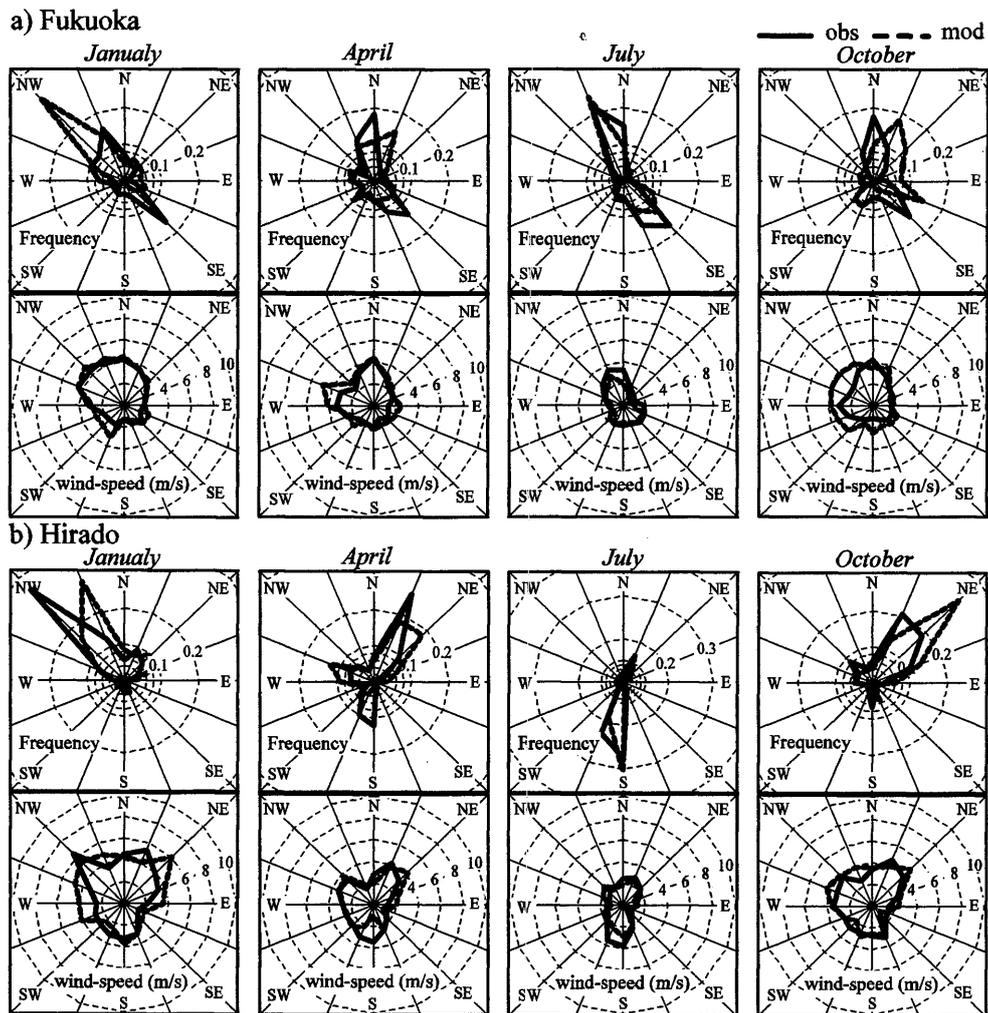


Fig.2 Frequency distribution of the wind direction and average wind speed for the model (solid line) and observations (dashed line) in January, April, July and October 2001 at (a) Fukuoka and (b) Hirado.

Fig.2の福岡及び平戸においてモデルの結果は各季節における卓越風、各風向に対する風速について観測結果と良い一致を示す。長崎県平戸では一年間の平均風速が福岡に比べ高く観測されており福岡で2.7m、平戸で3.5mであった。季節的な傾向として、冬期(1月)は福岡、平戸共に北西、北北西方向の風が卓越している。また南からの風に比べ風速が強くなっており、季節風による影響が強いと考えられる。夏季(7月)に関しては福岡と平戸の卓越風向がまったく異なる。福岡では都市化の影響もあり陸上と海上の温度差から生じる海陸風により北西及び南東方向の風が卓越している。それに対して平戸では南風だけが特に多くなっている事が判る。これは周りが海で囲まれていることと平戸は海陸風の発生よりも南からの季節風が卓越しているためと考えられる。福岡の春期(4月)と秋季(10月)では同方向に卓越風が発生し、風速の強さも非常に似た分布を示している。平戸でも同様の傾向が見られた。

3.2 風速頻度分布

各風速に対する風速出現率を示す風速頻度分布は風速の出現特性を評価するのに用いられ、ワイブル分布

がよく利用される。ワイブル分布の確率密度関数は以下のように定義される。

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

ここで k : 形状定数、 c : 尺度定数、 V : 風速である。またワイブル分布の $k=2$ に対応する分布をレイリー分布と呼ぶ。ワイブル分布は二つのパラメータを要するのに対しレイリー分布は一つのパラメータのみに依存する。レイリー確率密度関数は以下のように定義される。

$$f(V) = \frac{\pi}{2} \frac{V}{\bar{V}^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{\bar{V}}\right)^2\right] \quad (2)$$

ここで \bar{V} は年平均風速である。風速頻度分布をレイリー分布で表すことができると風力発電量の評価に使える利点がある。しかしレイリー分布における風速0m/sの風速出現率は0であることに注意しなければならない。

阿蘇、鹿児島、阿久根、佐賀、福岡、大分、熊本、人吉における観測、モデルの年間風速出現率(1m/s単位)とレイリー分布との比較をFig.3に示す。レイリー分布のフィットには年平均風速の観測値を用いた。

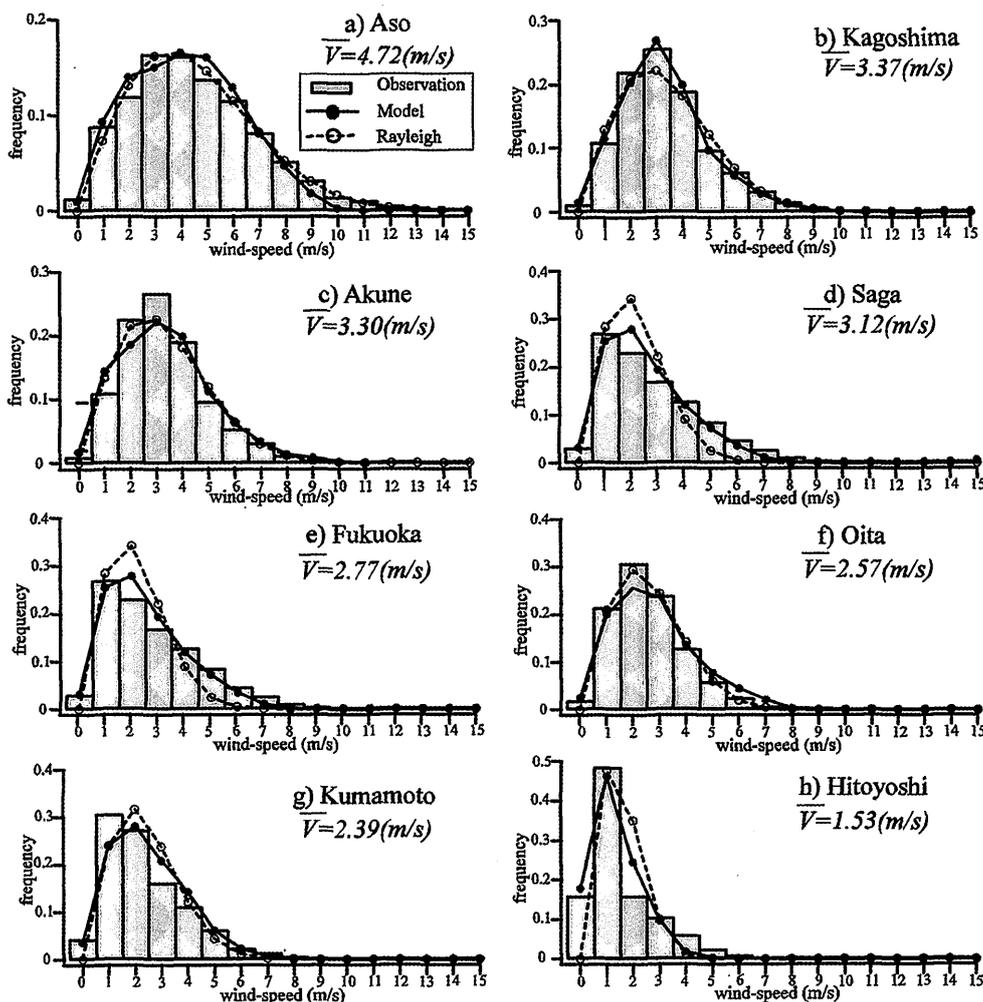


Fig.3 Frequency distribution of wind speed for observations (column), the model (solid line) and the Rayleigh distribution (dashed line) at (a) Aso, (b) Kagoshima, (c) Akune, (d) Saga, (e) Fukuoka, (f) Oita, (g) Kumamoto and (h) Hitoyoshi. Annual mean wind speed \bar{V} is observational data.

Fig.3から、レイリー分布は各地点での観測及びモデルの年間風速出現率を非常に良く表している。特に阿蘇や鹿児島といった年間平均風速の高い地点は風速頻度分布に強風速側へのなだらかな広がりが見られ再現性が非常に高いのが判る。年間平均風速が低くなるとモデルに比べ観測は低風速側の出現率が多少高くなる傾向が見られるもののモデルは観測結果を良く示している。これらの特徴は他の11地点でも同様の傾向が見られた。またモデルの年間風速出現率をレイリー分布で良く表すことができているのが明らかになった。しかしさきほど述べたようにレイリー分布の風速0m/sの風速出現率が0であるのに対して年間平均風速の低い人吉などでは0m/sの風向出現率が増加するため差が生じやすくなっている。また福岡、熊本などでは都市化の影響で低風速側の分布に差が生じる可能性があると考えられる。

4 風力発電ポテンシャルの評価

前章においてモデルの再現性の高さ及び年間風速出現率がレイリー分布で良く再現できることがわかった。ここでは九州地域を対象に1台の風力発電機を1つのグリッドに設置した場合の発電ポテンシャルの具体的な評価を行う。

4.1 平均風速と発電取得量の季節変化

発電取得量の見積もりには風車の性能曲線と風車タワー高さにおける風速出現率を表すレイリー分布を用いて算定される。しかし平均風速が低くなると観測との差が生じやすくなる。そのため、一時間間隔のモデルの結果を用いてタワー高さの風速と風車の性能曲線から発電取得量の評価を行った。風力発電機の発生電力はプロペラの受風面積、空気密度そして風速の3乗に比例し、それに基づいて風車の性能曲線が決定される。性能曲線の空気密度 ρ は日本の平地における空気密度 ρ の年平均値 1.225kg/m^3 を仮定し使用されている。しかし高度差、季節による気温や水蒸気圧の変化によって空気密度が年平均値 1.225 に比べ十数%の誤差を生じる可能性がある。そこでモデルの結果の気温、水蒸気圧を使用し空気密度 ρ の変化を加味した発電取得量の値を見積もった。また本研究で発電取得量の評価に仮定した風力発電機の特性をTable1に示す。

Table 1 Wind turbine properties.

	A 1500kW	B 1000kW	C 600kW
Cut-in wind speed	3m/s	3.5m/s	2.5m/s
Cut-out wind speed	25m/s	25m/s	25m/s
Rated wind speed	11.6m/s	13m/s	13.5m/s
Hub height	65m	50m	38m

カットイン風速とは風車が発電開始する時の風速であり、カットアウト風速は風車の安全を確保するために停止する風速である。定格風速とは定格出力（最大出力）が得られる風速であり、ハブ高さは羽根の中心高さである⁴⁾。

1月、4月、7月、10月の地上47.7mの月平均風速と風向、そして1500kWの風力発電機による月発生発電取得量の見積もりをFig.4に示す。冬季は平均風速が強く発電取得量もそれに伴って非常に高い。特に離島や日本海に接している福岡、佐賀、長崎、熊本の沿岸地域や東シナ海に接している鹿児島県の沿岸地域で平均風速が強く発電取得量も多くなっている。内陸地では大分県の久住連山、熊本県の国見岳、鹿児島県、宮崎県境の霧島連山などの山岳地域でその傾向が見られる。また日本海や東シナ海の沿岸地域に比べ太平洋側の沿岸地域は平均風速が弱くなっているが、大分の佐賀関半島や国東半島では平均風速が強く、より多くの発電取得量を得る可能性がある。春季と秋季では海上を除いて非常に似た分布を示している。年間を通して高い発電取得量の可能性がある福岡、佐賀、長崎、熊本などの日本海側では秋季でより多くの発電取得量の可能性がある。それに対して春季の内陸地では秋季よりも平均風速が強くより多くの発電取得量の可能性があることが判った。

4.2 風力発電機による年間風力エネルギーの評価

この節ではTable 1に示した3種類の風力発電機を利用した場合の年間風力エネルギーの評価を行う。風力エネルギーを評価するには発電取得量、時間稼働率（True availability）、設備利用率（Capacity factor）などがある。時間稼働率は風車が稼働して発電を行う時間的割合である。つまりカットイン風速以上、カットアウト風速以下の風速の割合であり

$$\text{時間稼働率(\%)} = \frac{\text{発電時間}(h)}{\text{評価期間暦時間}(h)} \times 100 \quad (3)$$

で定義できる。設備利用率は定格出力に対する利用率であり

$$\text{設備利用率(\%)} = \frac{\text{評価期間発電取得量}(kWh)}{\text{定格出力}(kW) \times \text{評価期間暦時間}(h)} \times 100 \quad (4)$$

で定義できる。

3種類の風力発電機を設置仮定した場合の年間発電取得量、設備利用率そして時間稼働率をFig.5に示す。それぞれの風力発電機について発電取得量は沿岸地域や山岳地域で多く、内陸部で小さくなっているのが特徴である。Fig.1に示した既設の風力発電地域では平均風速も強く発電取得量の多い地域にほぼ一致している。特に鹿児島県の大隈半島や長崎県の平戸島ではどの規模の風力発電機を用いても高い発電取得量が見込める。

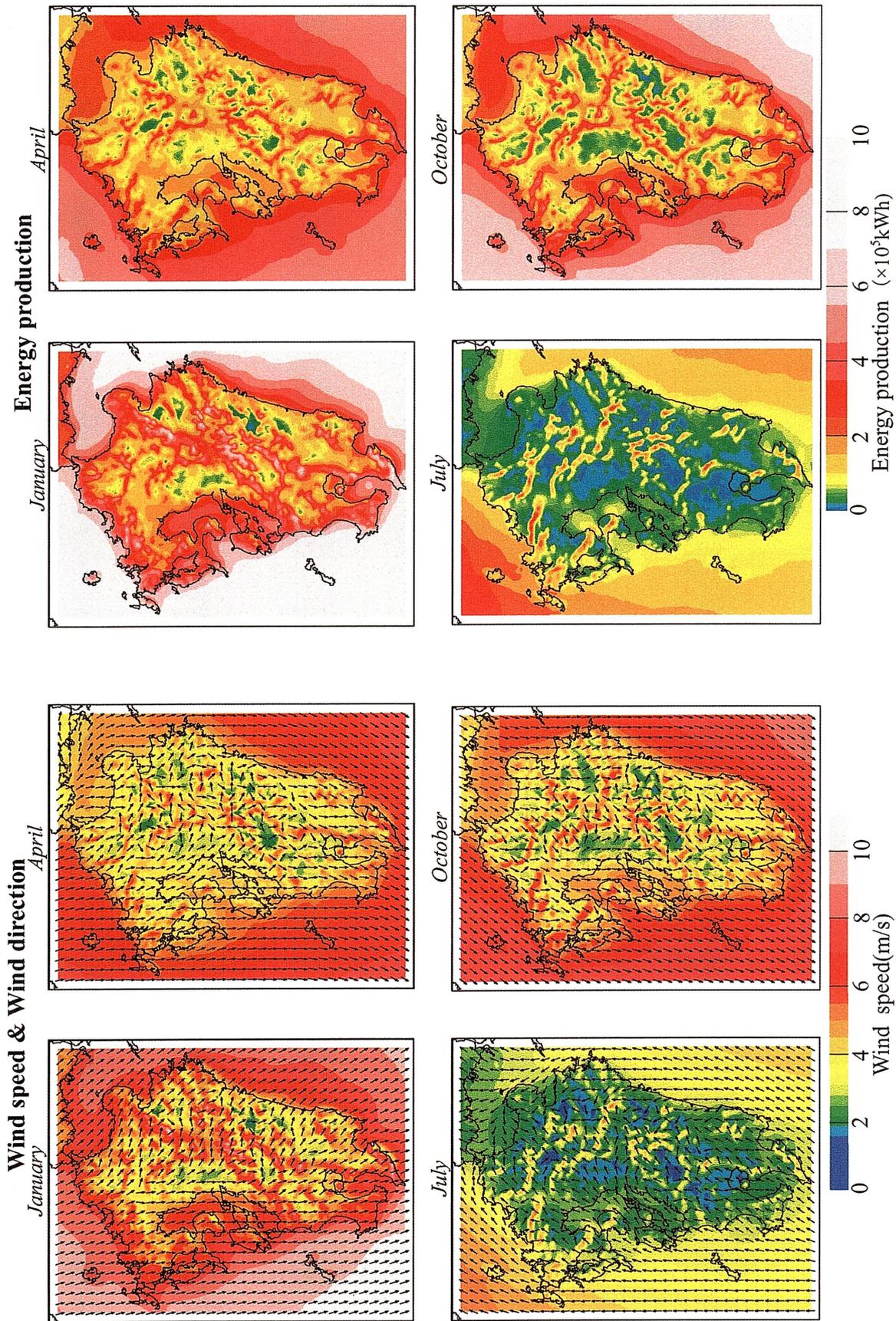


Fig.4 Monthly mean wind speed and direction at a height of 47.7m (left figures) and the amount of monthly total energy production (right four figures) in January, April, July and October 2001.

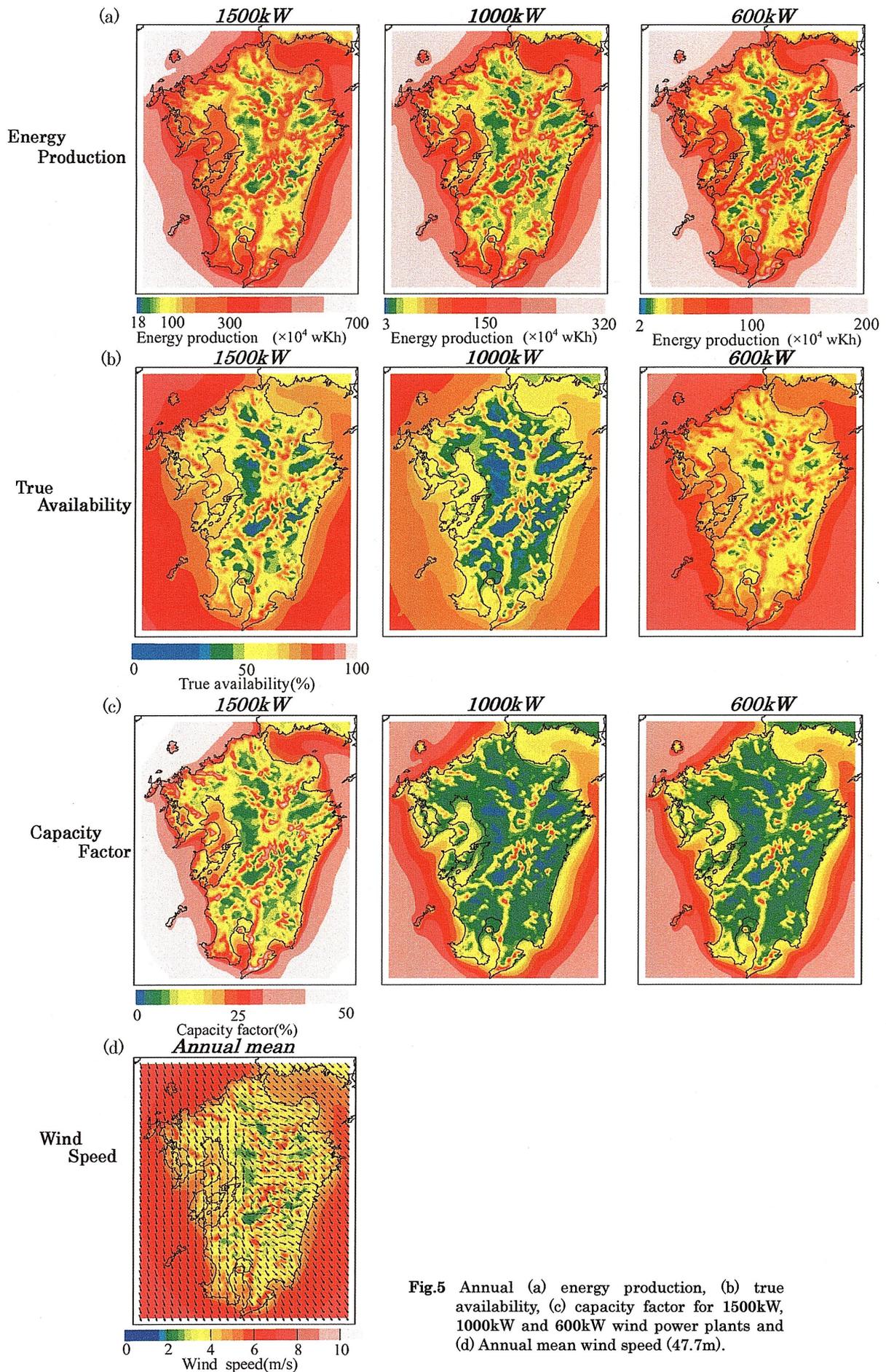


Fig.5 Annual (a) energy production, (b) true availability, (c) capacity factor for 1500kW, 1000kW and 600kW wind power plants and (d) Annual mean wind speed (47.7m).

Table2 Monthly and annual total energy production averaged capacity factor and averaged true availability for each wind power system.

	1500kW			1000kW			600kW		
	Power ($\times 10^4$ kWh)	Availability (%)	Capacity (%)	Power ($\times 10^4$ kWh)	Availability (%)	Capacity (%)	Power ($\times 10^4$ kWh)	Availability (%)	Capacity (%)
Jan	65.1	89.4	58.3	28.3	85.8	38.0	17.0	91.9	38.0
Feb	43.2	85.6	42.9	17.7	80.9	26.3	10.6	88.9	26.4
Mar	49.4	86.2	44.3	20.5	81.7	27.6	12.3	89.3	27.6
Apr	36.1	81.0	33.5	13.5	75.0	18.8	7.95	85.2	18.4
May	26.0	74.8	23.3	8.51	67.3	11.4	5.06	80.3	11.4
Jun	29.7	77.6	27.5	10.3	70.9	14.3	6.14	82.5	14.2
Jul	16.8	68.0	15.1	4.39	59.1	5.9	2.69	74.6	6.1
Aug	31.3	77.4	28.0	11.1	70.5	14.9	6.51	82.3	14.6
Sep	42.3	83.4	39.2	17.3	78.1	24.0	10.2	87.2	23.7
Oct	46.2	84.9	41.4	18.1	80.3	24.4	10.8	88.3	24.2
Nov	36.6	81.9	33.9	13.8	76.1	19.2	8.08	86.0	18.7
Dec	55.2	83.2	49.5	23.2	83.2	31.2	13.7	90.3	30.8
Annual	477.9	81.1	32.0	186.6	76.7	21.3	110.9	85.5	21.2

Fig.5の600kWの風力発電機による時間稼働率は九州全域で比較的高い稼働率を示していた。全グリッドの約98%が時間稼働率の設置基準値45%を超えており1500kWの風力発電機の約92%、1000kWの約88%と比べても高い値を示していることが判る。

Fig.5において、1500kWの風力発電機の年間発電取得量は最大約680万kW、最少約18万kWであり、設備利用率は全グリッドの約65%が設備利用率の設置基準値17%⁵⁾を超えていた。1000kWと600kWの風力発電機の年間発電取得量はそれぞれ最大約320万kW、約200万kWであり、設備利用率はそれぞれ全グリッドの約43%、約45%が設置基準値を超えた。これらのことから1500kWの設備利用率が1000kW、600kWの風力発電機に比べ非常に高い値を示していることが判る。

600kWの風力発電機では時間稼働率の全グリッド数に対する設置基準値を超えるグリッド数の割合が最も高かったが、設備利用率では1000kWの風力発電機とほとんど差が見られなかった。

4.3 平戸島における風力発電設置の評価

平均風速が比較的高かった長崎県平戸島における3種類の風力発電機(1500kW、1000kW、600kW)の発電取得量の評価を各月について行う。Fig.6に発電取得量の評価を行う6つのグリッド地点を示しており、その6つのグリッド地点の発電取得量、時間利用率そして設備利用率を平均して評価を行った。それぞれの風力発電機による各月及び年間発電取得量、平均時間利用率そして平均設備利用率をTable 2に示す。

Table 2よりそれぞれの風力発電機は冬季に発電取得量が最大となり夏季で最少となることが判る。また月最大発電量に対する月最少発電量の比はそれぞれ

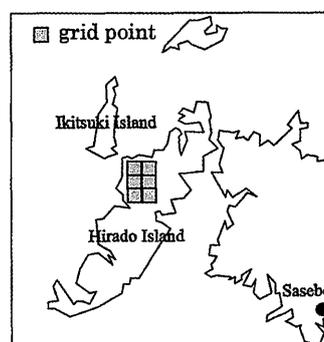


Fig.6 Six grids points using the case study on wind energy production.

1500kWの風力発電機で約26%、1000kWで約16%、600kWで約16%であった。この地域でそれぞれの風力発電機における時間稼働率は非常に高い値を示しており、時間稼働率の設置基準値45%よりも十分に高く、平均風速の低い夏季でも3種の風力発電機は基準値を下回ることがなかった。しかし夏季ですべての風力発電機の設備利用率は設置基準値17%より小さい値を示した。1000kW、600kWの風力発電機による設備利用率は夏季で6%前後と非常に低い値となっているのに対し、1500kWでは設置基準値を下回っているものの15%と比較的高い値を示している。それぞれの風力発電機の年間平均時間稼働率、年間平均設備利用率などは設置基準値を上回っており、1500kWの風力発電機が最も高い設備利用率の値を示している。

5 まとめ

本研究では領域気象モデルRAMSを用いて水平格子2kmとする九州地域を対象に2001年1月1日から12月31日までの通年計算を用いて、結果を気象官署の観

測データと比較し風況特性の再現性を評価し、さらに九州地域における風力エネルギーの評価を行った。その結果、以下のことが議論付けられた。

- 1) 風況特性を知るために重要な観測結果の16方位別風向出現率とその平均風速をモデルは季節変化ごとの卓越風や平均風速などの特徴と良く一致していた。
- 2) モデルは観測結果による風速頻度分布に対して非常に良い一致を見せ、風速頻度分布を表す関数形であるレイリー分布に良い一致を示した。平均風速が低くなるとレイリー分布と観測及びモデルの結果との間に差が生じやすくなることが判った。
- 3) 冬季は平均風速が強く発電取得量もそれに伴って非常に高い。季節変化に拘らず離島、日本海そして東シナ海に接している沿岸地域や大分県の久住連山などといった山岳地域で平均風速が強く発電取得量も高くなっていることが判った。
- 4) 3種類の風力発電機による年間設備利用率や時間稼働率から1500kWの風力発電機が特に活用性がある事が判った。600kWの風力発電機による時間稼働率は九州領域で非常に高い値を示したにもか

かわらず1500kWの風力発電機による設備利用率より低い値を示した。

- 5) 平戸島では3種類の風力発電機の年間時間稼働率、年間設備利用率が設置基準値より高い値を示し、風力発電設置に有効な地域であることを示した。

参 考 文 献

- 1) Archer, C. L. and M. Z. Jacobson, Spatial and temporal distributions of U.S. wind and wind power at 80 m derived from measurements, *J. Geophys. Res.*, 108, (D9), 4289, doi: 10.1029/2002JD002706, 2003
- 2) 吉田 保衡, 松井 聖, 鶴野 伊津志, メソスケール気象モデルを用いた九州地域の通年シミュレーションとその統計的評価, 九州大学大学院総合理工学研究報告, 25, 269-277, 2003
- 3) 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, A comprehensive meteorological modeling system -RAMS, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 49, 69-91, 1992
- 4) 牛山 泉, 風車工学入門, 森北出版, 2002
- 5) 新エネルギー・産業技術開発機構 (NEDO): 風況精査マニュアル, 1996