

風力発電のための地域気象モデルと非線形風況予測モデルを用いた風況予測

Wind Climate Prediction for Wind Energy Assessment

Based on Regional Atmospheric Analysis Model and Nonlinear Wind Prediction Model

嶋田 健司¹⁾

藤永 崇志²⁾

石原 孟³⁾

Kenji SHIMADA ¹⁾, Takashi FUJINAGA ²⁾ and Takeshi ISHIHARA ³⁾

ABSTRACT

Wind climate of a wind farm which locates along a crest of a peninsula is assessed by numerical wind prediction model. Usually annual mean wind speed at the hub-height is predicted based on a wind observation data. However, the data is influenced by the surface mounted obstacles such as trees. In order to avoid such unfavorable effects, in this study wind speed at the hub-height is estimated from a wind speed at high altitude. In order to do this, meso-scale meteorological model is used. Also, topographical effect near the ground is taken into account by the nonlinear wind prediction model. Numerical results are validated by comparing with the observation. On vertical profile of wind speed, a good agreement was obtained between the numerical results and the observations. It is also demonstrated that effect of vegetation canopy can be corrected by incorporating the zero-displacement plane. Gradient of wind speed profile at the site is highly steep compared with the standard wind profile due to topographical effect, that the linear wind prediction model can not predict well.

Key Words: Wind climate, Meso-scale meteorological model, Wind farm

1. はじめに

我が国におけるウィンドファームは欧米のように比較的なだらかな場所に建設されるのとは異なり、山岳地や半島のような急峻な地形であることが少なくない。このような場合、風車はその尾根に沿って線状に配置されることが多いため、数十基規模の大規模なウィンドファームになると、正確な風況予測のために複数の観測ポイントで統計データ取得のための観測が行われることがある。一方、近年ではメソスケールの気象モデルが進歩し、これらを風力発電の風況解析に取り込む手法が可能になってきている。本論文では半島状の尾根上にあるウィンドファームを対象とし、複数の地上観測データから予測される風速値の整合性に関する問題点とそれを解決する方法として、石原らによって開発された力学統計的局所化手法 (DSD : Dynamical Statistical Down scaling) ¹⁾を適用し、予測の改善を行った例について報告する。

2. 対象としたウィンドファームと風の特徴

検討の対象としたウィンドファームは愛媛県伊方町に建設中の三崎ウィンドパークである。図1に同ウィンドファームの地形図と風車の配置を示す。同ウィンドファームは佐田岬のほぼ突端に位置し周囲を海 (伊予灘, 宇和海, 速水瀬

1)清水建設(株)技術研究所, 主任研究員 (〒135-8530 江東区越中島 3-4-17)

2)丸紅株式会社, 新技術再生可能エネルギー部, 再生可能エネルギーチーム, チーム長 (〒100-8088 千代田区大手町1-4-2)

3)東京大学大学院工学系研究科総合研究機構, 助教授 (〒113-8656 文京区弥生 2-11-16)

戸)で囲まれている。同ウィンドファームには半島の尾根上に沿って 1000kw 級の風車が 20 基建設予定となっている。半島の幅が 700~800m と狭いわりに、標高は 160m~300m と高く、斜面勾配が急な典型的な急峻地形となっている。地上観測点は3地点(以下 K, Y および A 観測点で示す)が設けられており、地上 10~30m の高さで 2001 年 4 月~2002 年 3 月の 1 年間にわたるデータが得られている。しかし高さ 10m と 30m の観測データは落雷等により風向データが不完全である。したがって以下の風況解析では高さ 20m のデータを用い、欠測部分を除いた連続 320 日間にわたる 10 分間平均データを用いた。なお、以下本文中では 320 日間の期間平均風速を「平均風速」と呼ぶことにする。図 2 に 3 地点の風配を示す。若干の差異は認められるものの卓越風向は概ね NW~NNW と SE~SSE である。

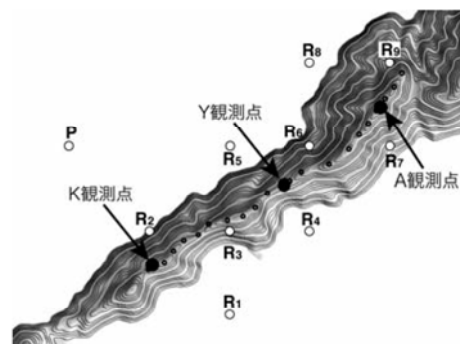


図 1 解析の対象としたウィンドファーム

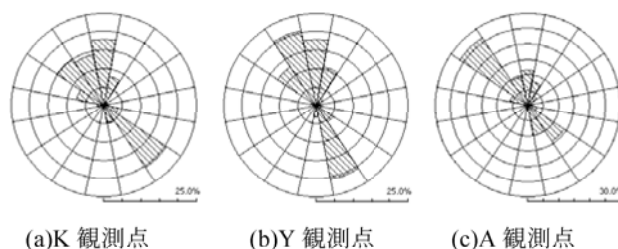


図 2 観測点の風配図(地上 20m 高さ)

3. 解析方法

風況解析は通常の地上観測データを用いた手法(解析法 I)および、力学統計的局所化手法を用いた手法(解析法 II)により行った。以下に解析法 II の概要について述べる。

(1)地域気象モデル RAMS の概要

地域気象モデル RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) は、風速、仮温位、エクスター関数、混合比を従属変数とする質量保存則、運動量保存則、熱力学方程式、水分の保存則を数値的に解き、初期条件、境界条件の下で従属変数の時間変化を求める。RAMS では熱力学方程式の変数として、Tripoli and Cotton²⁾によって提案された水の相変化に関わらず保存される物理量である液相・固相の相当温位(ice-liquid potential temperature)を用いる。

この他にサブモデルとして、大気放射モデル、積雲モデル、地表面過程モデル、乱流モデルが組み込まれている。本研究では乱流モデルとして乱流エネルギー、乱流長さスケールは移流方程式を解き、応力方程式に境界層近似を適用する Mellor-Yamada のレベル 2.5³⁾を用いた。また、計算領域として解像度と範囲の異なる 2 つ以上の格子をネスティングさせ、双方向ネスティング⁴⁾により、互いに計算結果を反映させながら、解析を行った。

本研究では、メソスケールの現象を忠実に再現するため、図 3 に示す 4 段ネスティングを採用した。表-1 に本研究で用いた各グリッドの解析領域を示す。グリッド 1 は西日本全域を含む 800km×800km の領域で、格子間隔 8km である。その内側のグリッド 2 は周防灘から豊後水道を含む格子間隔 4km の 200km×200km の領域、グリッド 3 は佐田岬周辺の 40km×40km の領域であり、格子間隔 2km となっている。最も細かい格子間隔 1km のグリッドは三崎ウィンドパーク近傍の 12km×12km の領域である。前節で述べたように、RAMS はサブモデルとして非常に多くのモデルが選択可能であるが、本研究では風の予測を対象とするため、雲の物理過程の詳細モデル化を省略し、水蒸気のみを

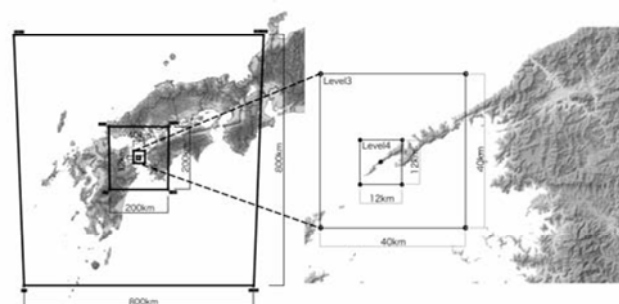


図 3 地域気象モデルの解析領域

表-1 計算格子の設定

	グリッド 1	グリッド 2	グリッド 3	グリッド 4
解析領域中心	33.379°N 132.077° E			
水平格子間隔	8km×8km	4km×4km	2km×2km	1km×1km
水平格子数	100×100	50×50	20×20	12×12
鉛直格子間隔	20m ~1000m			
鉛直格子数	35			

再現した。標高データとしては国土地理院発行の「数値地図 50m メッシュ」を、土地利用データとしては国土交通省発行の国土数値情報を用いた。また初期条件としては、水平解像度 0.5 度、鉛直 15 層(1000, 925, 850, 700, 500, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 10hPa の各気圧面)、時間間隔 6 時間の分解能を持つヨーロッパ中期気象予報センター(ECMWF)の全球モデルの 2001 年 5 月～2002 年 3 月の客観解析データ(Operational Archive Pressure Level Analysis Data)を用いた。さらに側面および上面の境界条件としては、解析期間における 6 時間毎の客観解析データから境界条件データを作成し、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 による解析の結果は、10 分平均値として保存し、以下の解析に用いた。

(2)非線形モデル MASCOT の概要

微細な地形の効果を考慮するために、本研究では非線形局所風況予測モデル MASCOT⁵⁾を用いた。MASCOT はレイノルズ平均非圧縮ナビエーストックス方程式に基づく非線形モデルで、風速、圧力、乱流統計量を従属変数とする質量保存則、運動量保存則、乱流統計量の保存則を数値的に解くことにより、風向別の風速の増減、風向変化を求める。単純地形上の流れ解析においては様々な乱流モデルが検討されてきたが、実地形上の流れは単純地形上とは異なり複雑であるため、乱流モデルの違いによる予測精度の違いは顕著ではない。このため本研究では最も実績のある標準 $k-\varepsilon$ モデルを用いた。方程式の離散化に際しては任意傾斜角を持つ地形に対応可能な一般座標系を採用し、質量及び運動量の保存則を満足する有限体積法が用いられている。また数値解法には安定性の高い半陰解法 SIMPLE 法を、大規模連立方程式の解法には残差切除法を用いた。また、連綿と連なる実際の地形の一部を取り出して数値解析を行うために上流に付加領域を、周囲に体積を保存する緩衝領域を設けることにより、これらの影響を最小限にしている。地表面の境界条件としては粗度長により対数則を用いて求めた剪断力を地表面第1セルに与えた。本手法では熱的影響を無視できると仮定し風速比・風向が地形・地表面粗度のみ依存するとしている。

(3)解析法 II の流れ

図 4 に解析法 II の流れを示す。まず、全球モデルの客観解析値を初期・境界条件とし、メソスケール気象モデル RAMS を用い、320 日間にわたり時系列解析を行うことにより、水平 1km 程度の解像度を持つ 320 日分の時系列風速データを得る。この風速データには海陸風、山谷風などの局地循環、大気成層による局地風、水平スケール 1km 以上の地形や地表面粗度変化による影響が含まれている。また 320 日分の 10 分ごとのデータが求められているため、風況の月変化も再現されている。このように得られた風には 1km 以下のスケールの詳細地形の影響は含まれていない。次にメソスケール気象モデルにより求めた 320 日間の風速・風向の時系列データを統計処理することにより、風速・風向別の出現頻度、すなわち風況を求める。本研究ではメソスケール気象モデルによって求めた風況を地域風況と呼ぶ。最後に水平解像度 1km 以下のスケールの微細地形の影響を取り入れるため、マイクロスケールモデルとして非線形風況予測モデル MASCOT を用い、地域風況を微細地形の効果を考慮に入れた局所風況に変換する。この際、微細地形の効果は風向のみに依存すると仮定し、MASCOT を用いた定常解析により微細地形の影響を風向別に評価する。本手法における解析ケースは 16 風向に対応する 16 ケースのみとなり、マイクロスケールモデルを条件付ネスティングする Hayashi et al.⁶⁾の

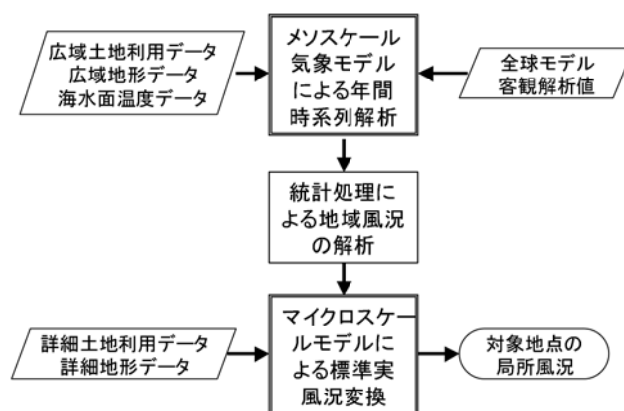


図 4 力学統計的局所化手法の流れ¹⁾

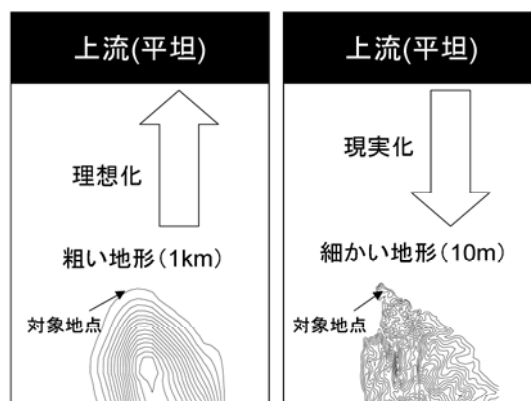


図 5 標準実風況変換の概念図¹⁾

手法に比べ、解析時間は大幅に短縮される。

地域風況にはメソスケール気象モデルによって解像可能な 1km 程度の水平解像度を有する粗い地形の効果が含まれている。この粗い地形の効果を取り除き、さらに実際の微細地形の効果を反映させるために本研究では標準実風況変換手法¹⁾を用いる。

図 5 はその概念図である。まず、メソスケール気象モデルで用いた 1km 程度の水平解像度を持つ粗い地形と地表面粗度を用いて非線形風況予測モデル MASCOT による気流解析を行うことにより、地域風況から 1km 程度のスケールの地形や地表面粗度の影響を取り除くことにより粗度一様・地形平坦な上流領域での風況を求める。このようにして求めた仮想的な上流領域での風況を標準風況と呼ぶ。標準風況には海陸風、山谷風などの局所循環の効果は含まれているが、微細地形の効果は含まれていない。次に 10m～50m 程度の水平解像度を持つ地形と地表面粗度を用いて MASCOT による解析を行い、標準風況を微細地形の効果を含む局所風況へと変換する。このようにして求められた局所風況には海陸風、山谷風などの局地循環の影響が含まれると同時に、流れの剥離、地形による風向の変化なども考慮されたものとなっている。また、計算時間は従来のネスティングに比べて大幅に短縮されると同時に時間的に間欠的なサンプリングを行わないことで、月別の局所風況に対しても精度の高い予測が可能である。以上、紙面の都合により解析方法の概要のみ述べたが、詳細については文献¹⁾を参照されたい。

4. 解析結果

図 6 には3ヶ所の観測点における統計データを用いて解析法 I (MASCOT : Microclimate Analysis System for Complex Terrain) により相互に風速の観測値がどの程度再現できるかを調べた結果を示す。K 観測点および Y 観測点の統計データを用いた場合それぞれの観測点の実測値はよく再現できるものの、A 観測点の予測値は実測値を大きく下回った。一方、A 観測点の統計データを用いると K 観測点、Y 観測点の予測値は実測値を大きく上回る結果となった。つまり、発電量の予測結果が用いる観測点データに依存する結果となった。このことから発電量の算定にあたってはどの観測点データを用いるべきか判断が難しい結果となった。地上の観測データには周囲の地物の影響が含まれている可能性があるため、地上の観測データを用いずに上空の気象予測データから地上観測データの検証を行った(解析法 II)。図 7 には地域気象モデルの解析

によって得られた地表面(海上では海面)から 133m の高さの風速場を示す。夏場は豊後水道からの南東寄りの風が半島を越えており、半島北西側の伊予灘上で風速値が大きい。一方、冬場では周防灘を抜けてくる北西寄りの風が強く、半島西側の速水瀬戸から豊後水道全域にわたって風速値が大きく、季節による特徴が再現されていることがわかる。次に、ウィンドファーム領域内には数点の地域気象モデルの解析点(図 1 中 R₁～R₉ で示す)が存在するが、どの位置のどの高さの結果を統計処理し非線形風況モデルで用いることがよいかについて検討を行った。図 8 には R₃ 点の結果を用いて3つの観測点の風速を予測したときの予測値の高さ方向変化(予測値/観測値)を示す。K および Y 観測点の予測誤差が A 観測点の予測誤差に比較して大きい。この点については後述する。A 観測点の予測値では、最下層格子点(高さ 14m)の気象モデル解析結果を用いた場合が観測値に最も近い値を示している。一方、地上高さが 100m より高い気象モデル解析結果を用いると誤

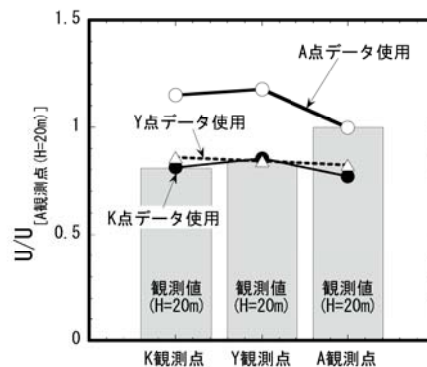


図 6 解析法 I による各観測点の平均風速予測

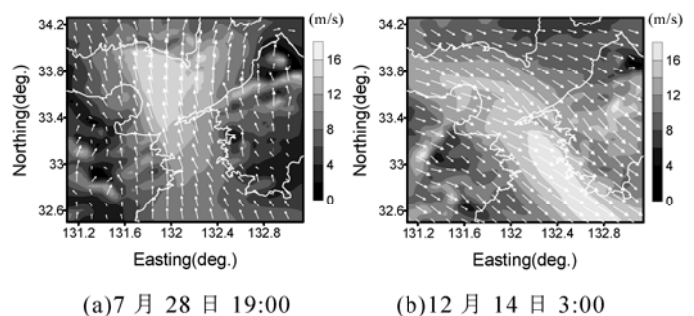


図 7 地域気象モデルによる風速場の解析結果(z=133m)

差は一定になる傾向が見られる。この傾向はKおよびY観測点についても同じである。以上のことより、解析法IIでの詳細地形の考慮過程では高さ133mでの気象モデルの結果を用いることとした。図9には水平面内での変化としてR₁～R₉点の地域気象モデルの解析結果を用いたときのA観測点の予測誤差([予測値-観測値]/観測値)を示すが、概ねどのポイントでも同じ結果を与えていることがわかる。以上のことから解析法IIの詳細地形の考慮過程ではR₃点の地上高さ133mでの地域気象解析値からの統計値を用いることとした。

図10にはK観測点およびA観測点の状況を示す。A観測点では樹高はK観測点よりは低く、卓越風向方向に樹木がなく開けた状態になっているのに対し、K観測点周囲は8～10mの原生林で囲まれており植生キャノピーとなっている。背丈の高い草地、森林のように幾何学的粗度が大きい場合には風に対する地表面の基準面が不明瞭となる。ここでは、以下のようにゼロ面変位補正を解析結果に適用することによって植生キャノピーの効果を考慮した。

[補正後の予測点の高さ]=[補正前の予測点高さ]-[樹高]×[ゼロ面変位補正係数]

(1)

密集した森林の場合、ゼロ面変位補正係数としては0.6～0.7の値をとる⁷⁾。ここでは0.7を用いた。

図11には3つの観測地点での平均風速と解析結果の比較を示す。解析法IIはゼロ面変位を考慮しない場合、A観測点よりもK観測点、つまり半島の先端側に近い側の風速値が大きいことを示している。一方、観測値は反対の傾向になっている。これは上述したように、観測ポイントが半島の先端側に近い側で地表面上の植生の影響を大きく受けているためと考えられる。そこでKおよびY観測点に対し、7mのゼロ面補正を行うと、解析法IIの結果は観測結果を再現するようになることがわかる。図12には3つの観測地点での風速の鉛直分布を示す。非線形風況モデルの結果では地表面近くで、地形傾斜の急激な変化に伴う圧力勾配の影響によって大きな速度勾配が現れているのに対し、線形モデル(WAsP)の結果ではそのような大きな速度勾配は見られない。同図には実測値もプロットしたが、いずれの観測点でも非線形モデルの結果とよく対応している。また実測値から求まる速度勾配についてもよく対応している。このように急峻な地形の場合、地上観測点は大きな速度勾配の領域に埋没していることになり、ハブ高さでの風速を精度よく予測するには、地形による地表面付近の速度変化を精度よくとらえられる解析モデルを用いることの重要性が解析結果から伺える。ところで、地上からの高さが50m以上の非線形モデルの解析結果を見ると、解析法IでもIIでも速度勾配はほとんど見られない。したがってハブ高さ付近の風速値の予測にはゼロ面変位補正の影響は小さいと考えられる。一方、解析法Iと解析法IIの風速値には若干の違いが見られる。地形が複雑な場合、一般に標準実風況変換¹⁾の変換過程に

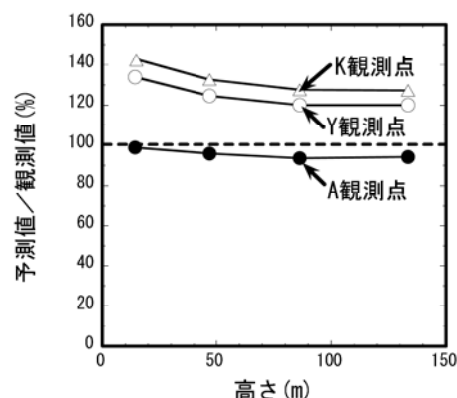


図8 解析法IIによる各観測点風速予測値の高さ方向変化

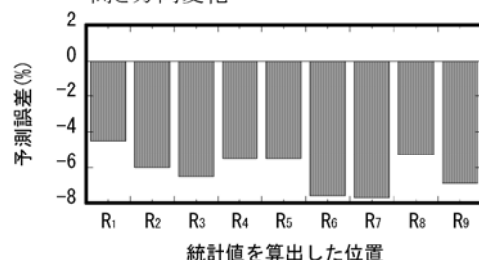


図9 解析法IIによるA観測点風速予測誤差の水平位置による違い



(a) K観測点



(b) A観測点

図10 観測点周囲の植生状況

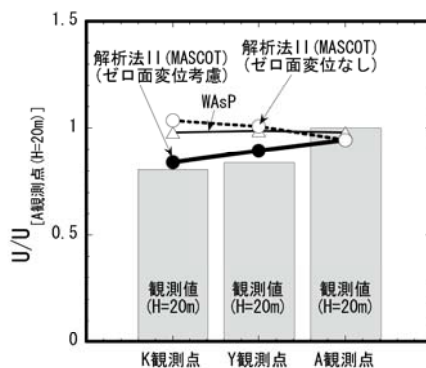


図11 解析法IIによる各観測点の平均風速予測

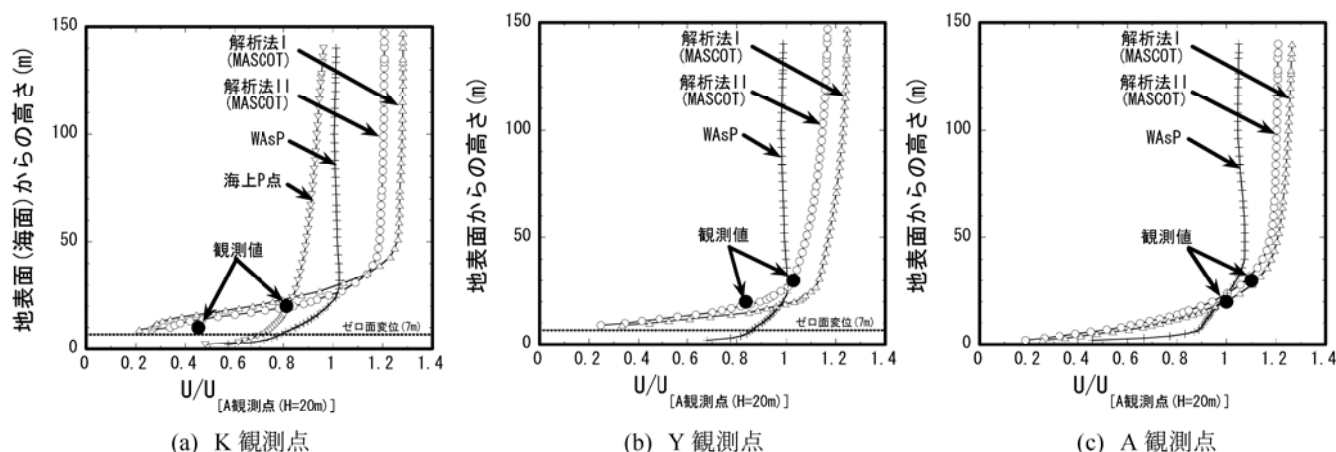


図 12 平均風速の鉛直分布の観測値と解析値の比較

において誤差を伴うが、流入風に対して風向変化が大きい地表面ほど誤差が大きい。標準実風況変換の精度の観点からは上空風を用いた解析法 II の方が有利なものと考えられる。ところで、解析の対象とした地点の北西側にあるウィンドファームでの実測値からは 40%を超える高い設備利用率の実測結果が報告されている⁸⁾。図 12a には冬場の卓越風向にあたる NNW 側の伊予灘上 P 点の風速分布 (解析法 II) を示すが、地上高さ 20m 以上では地形による増速効果により海上の風速値を上回ることが本解析結果からも予測される。

6. まとめ

地域気象モデルと非線形風況解析モデルにより、半島尾根上にあるウィンドファームの風況解析を行った。その結果は以下のようにまとめられる。

1. 風速評価点周囲の植生キャノピーの影響はゼロ面変位によって考慮する必要がある。ただし風速評価点の地表面からの高さが高くなり速度勾配が一定になる高さ領域ではその影響は小さくなる。
2. 一般に地形が複雑な場合、標準実風況変換には誤差を伴うが、変換の精度の上からは上空風を用いた解析法 II の方が有利なものと考えられる。
3. 解析の対象とした半島尾根上では地形による増速効果により海上よりも大きな風速値が得られる可能性がある。

謝辞 本論文の執筆にあたり東京大学大学院工学系研究科の山口敦助手および株式会社水域ネットワークの荒川洋氏には解析全般にわたってご指導を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 山口 敦, 石原 孟, 藤野陽三: 力学統計的局所化による新しい風況予測手法の提案と実測による検証, 土木学会論文集, No.808/I-74, pp.147-162, 2006
- 2) Tripoli, J. and Cotton, W. R.: The use of ice-liquid water potential temperature as a thermodynamic variable in deep atmospheric models, *Monthly Weather Review*, Vol. 109, pp. 1094 - 1102, 1981.
- 3) Mellor, G. L. and Yamada, T.: A Hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 31, pp. 1791-1806, 1974.
- 4) Clark, T. L. and Farley, R.D.: Severe downslope windstorm calculations in two and three spatial dimensions using anelastic interactive grid nesting: A possible mechanism for gustiness, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 41, pp. 329-350, 1984.
- 5) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三: 複雑地形における局所風況の数値予測と大型風洞実験による検証, 土木学会論文集, No. 731/I-63, pp. 195-211, 2003.
- 6) Hayashi, H., Uematsu, T., Suzuki, Y., Suzuki, S., Sasaki, R., Murakami, S., Nagano, Y., Kato, S., Mochida, A., Nakanishi, M., Kato, K., Saito, T., Kataoka, H., Otsuka, K., Nakao, T., Usui, K. and Kato, H.: A new wind energy prediction model based on the CFD theory, *Proc. World Wind Energy Conference (CD-ROM)*, 2002.
- 7) 例えば Oke, T.R.: *Boundary-Layer Climates*, second edition, Routledge
- 8) 井上厚助, 向井正行, 牧野和道, 木村雅章: 瀬戸ウィンドヒルにおける MWT-1000A の運転状況, 第26回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.345-348, 2004