

新しい風況精査手法の提案と実測による検証*

A new approach for wind climate assessment and its verification

石原 孟** 山口 敦** 藤野 陽三** 鵜野 伊津志***
Takeshi ISHIHARA Atsushi YAMAGUCHI Yozo FUJINO Itsushi UNO

1. 緒論

風力開発を行う際には、建設地点の風況を事前に把握することが重要である。現在全国をカバーする風況マップは10数kmに1点の気象観測データを内挿して作られたものであるため、局所地形の影響を反映しておらず、詳細風況マップとして使うことができない。そのため、現状では最低1年間の風観測による風況精査を行う必要がある。風況精査は開発時間の半分以上を占めるため、迅速な風況精査手法の確立が急務と言える。

現在、観測を行わずに気象モデルを用いて風況精査を行うための方法が提案され、ネスティング (Nesting method) と呼ばれる手法と、統計力学的局所化 (Statistical Dynamical Downscaling) と呼ばれる手法に大別される¹⁾。

ネスティング手法では気象予測モデルの結果を境界条件として、順次高解像度の小さな領域をネスティングさせることにより、局所風況を予測する。NEDOが開発を進めている風況予測モデル LAWEPS²⁾ は地域気象モデルと工学モデルを用いて最小格子間隔10mのグリッドまで5段にネスティングさせることによって局所風況予測を行う。ネスティング手法ではネスティングされた全領域に対し、最低1年分の時系列計算を行う必要があり、計算時間が膨大となるため、現在 LAWEPS では6日おき、1日4回の計算のみを行っている。このように予測された風況は実際の風況と異なる恐れがある。谷川ら³⁾ は同様に気象モデルを最小格子間隔500mまでネスティングさせることによって風況精査を行っている。しかし、日本のような急峻地形上の流れ場を正しく予測するためには最低でも50mの格子を用いる必要があり、500mの格子間隔は本研究で対象とした竜飛岬では明らかに不十分である。

一方、統計力学的局所化手法として、Frank et al.⁴⁾ は全球モデルの解析結果を統計処理し、それぞれのケースに対し、力学的に地域風況を予測し、さらに局所的な地形、地表面粗度の影響を考慮に入れた局所風況への変換のために、線形風況予測モデル WASP を用いた。しかし、この手法は、海

陸風や山谷風などの局地循環を再現できず、また局所風況の予測に線形モデル WASP を用いているため、急峻な地形が多い日本には適用できないという問題点がある。

本研究では、地域気象モデル RAMS と非線形モデル MASCOT を利用した新しい風況精査手法(力学統計的局所化)を提案し、実測データとの比較検証によりその有効性を示す。

2. 力学統計的局所化手法の提案

気象モデルを利用した従来の風況精査手法の問題点を解決するために、本研究では地域気象モデル RAMS と非線形風況予測モデル MASCOT を利用した新しい風況精査手法(力学統計的局所化)を提案した。

図1には本手法の概要を示す。全球モデルの計算結果を初期条件ならびに境界条件として地域気象モデルをその内側に順次ネスティングさせ、1年分の時系列計算を行う。最も内側の計算グリッドは格子間隔を1~2km程度とする。このようにして計算された1年分の風速場に対し統計処理を行い、地域風況を求める。地域風況には大地形や局地循環の効果は含まれているが、1~2kmの格子で解像できない小地形の効果は考慮されていない。そこで小地形の影響を考慮するために非線形風況予測モデル MASCOT を用い、地域風況を局所風況に変換する。

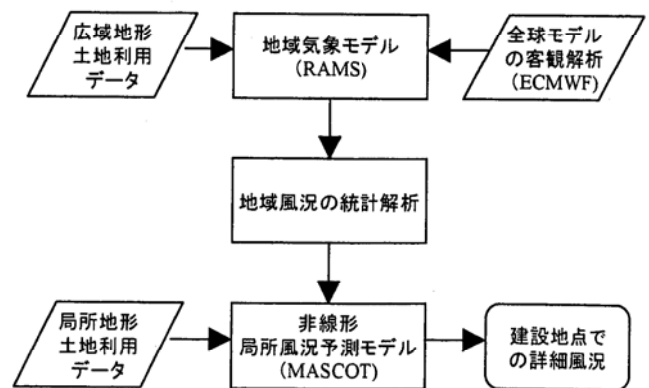


図1 力学統計的局所化の流れ

* 平成15年11月20日第25回風力エネルギー利用シンポジウムにおいて講演

** 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 *** 九州大学応用力学研究所

以上のように、この手法では、まず地域気象モデルをネスティングさせ、力学的に風速場の時系列データを求める。次に統計解析により地域風況を求め、最後に局所風況への変換を行う。従って、この手法は力学統計的局所化手法(DSD: Dynamical Statistical Downscaling)と呼ぶことができる。表1には従来の予測手法と本研究で提案した力学統計的局所化手法の特徴を示す。

表1 各風況精査手法の比較

手法	特徴
ネスティング	各スケールの物理現象を厳密に取り扱える。統計処理をしないため、計算時間が膨大
統計力学的局所化	総観スケール(数百km)の現象を統計処理することにより、計算時間を短縮できるが、局地循環を再現できない。
力学統計的局所化	局地循環を再現し、メソスケール(数km)の現象を統計処理することにより、計算時間を短縮できる。

図2に本研究で提案した地域風況から局所風況への変換手法の概念図を示す。地域風況には局地循環及び大地形の効果は含まれているが、図2(a)に示すように局所地形の解像度は不十分である。そこで気象モデルで解像できる粗い局所地形の効果と実際の局所地形の効果との差を補正することにより実地形上の局所風況を再現する。

まず、気象モデルで用いた1~2km程度の解像度を持つ粗い地形と粗度を用い、MASCOTによる風況シミュレーションを行い、地域風況から仮想領域の風況への変換を行う(図2(a))。次に、10m~50m程度の解像度を持つ細かい地形と地表面粗度を用いた風況シミュレーションを行い、仮想領域の風況から対象地点での実風況へと変換する(図2(b))。すなわち、本手法では、まず仮想領域での標準風況を求め、次に対象地点の実風況に変換する。この手法を標準実風況変換(IRA: Idealizing and Realizing Approach)と呼ぶ。

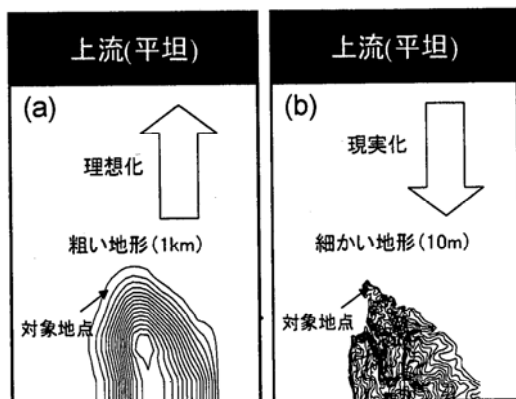


図2 標準実風況変換の概念図

3. 数値予測モデル

3.1 地域気象予測モデル RAMS

地域気象モデルはコロラド大学が開発したRAMS43 (Regional Atmospheric Modeling System)⁹⁾を使用した。本モデルはナビエーストークス方程式を基本とする非静水圧大気力学モデルであり、雲・放射過程、陸面過程がモデル化されており、並列計算にも対応している。RAMSに採用されている基礎方程式は以下に示す。

• 運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial x} + f_v \quad (3-1)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial y} - f_u \quad (3-2)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial z} - \frac{g \theta_v'}{\theta_0} \quad (3-3)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

• 熱力学の式

$$\frac{\partial \theta_{il}}{\partial t} = -u \frac{\partial \theta_{il}}{\partial x} - v \frac{\partial \theta_{il}}{\partial y} - w \frac{\partial \theta_{il}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial x} \right) \quad (3-4)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial \theta_{il}}{\partial t} \right)_{rad}$$

• 水混合比の保存式

$$\frac{\partial r_n}{\partial t} = -u \frac{\partial r_n}{\partial x} - v \frac{\partial r_n}{\partial y} - w \frac{\partial r_n}{\partial z} \quad (3-5)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial r_n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial r_n}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial r_n}{\partial z} \right)$$

• 連続の式

$$\frac{\partial \pi'}{\partial t} = - \frac{R \pi_0}{c_v \rho_0 \theta_0} \left(\frac{\partial \rho_0 \theta_0 u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_0 \theta_0 v}{\partial y} + \frac{\partial \rho_0 \theta_0 w}{\partial z} \right) \quad (3-6)$$

ここで、 u , v , w はそれぞれ東西、南北、鉛直方向の速度成分、 θ_{il} は液体、固体の相当温位、 r_n は水混合比である。更に、 f はコリオリパラメーター、 K_m と K_h は運動量と熱・水蒸気の渦粘性係数、 π と π' はエクスター関数とその摂動分、 θ は温位、 θ_v' は仮温位の摂動分、 c_v は定容積比熱、 ρ は大気密度、 rad はそれぞれ放射パラメータリゼーションを表す。

3.2 非線形風況予測モデル MASCOT

非線形風況予測モデル MASCOT は従来のモデルに比べ、以下の特徴を持っている。

- 1) 本モデルは一般座標系を採用し、任意傾斜角度をもつ地形を対応でき、また鉛直方向に不等間隔格子、水平方向にズームング格子を採用することにより、必要な領域に格子を集中させることができる。
- 2) 離散化手法としては質量及び運動量の保存則を満足する有限体積法を用い、数値解法には安定性の高い半陰解法 SIMPLE 法を採用している。
- 3) 乱流モデルとしては標準 $k-\epsilon$ または修正 $k-\epsilon$ モデルを用いることにより、平均風速場のみならず、剥離を含む複雑流れ場の変動風速の標準偏差を精度よく予測することが可能である。
- 4) また複雑地形における局所風況を予測するため、新しい境界処理手法を開発し、境界処理が内部領域に与える影響を最小限にした。
- 5) 大規模線形連立方程式を高速かつ安定に解くための手法を提案し、100 万格子を用いた 10km 四方の風況予測は 1 台のコンピュータで 1 時間以内に解析することが可能である。
- 6) 本プログラムは標高 (50m 分解能) と地表面粗度 (100m 分解能) に関するデータ・ベースを備えており、任意地点における緯度、経度を入力すれば、風況解析が可能となる。

モデルの詳細については文献 (6) , (7) を参照されたい。

4. 実測による検証

本研究では提案された力学統計的局所化手法の有効性を示すため、観測データが揃っている青森県竜飛岬を対象とした。竜飛岬は年間を通じて強風が吹き、東北電力(株)の集合型風力発電基地竜飛ウィンドパークがあり、11 機の風車が設置されており、各風車のナセル上で風観測が行われている。また竜飛岬先端には灯台があり、1 時間ごとの 10 分平均風速が観測されている。本研究では 1997 年の 1 年間の観測データを検証データとして用いた。

4.1 気象モデル RAMS による地域風況の予測

本研究で用いた地域気象モデル RAMS はナビエストークス方程式を基本とする非静水圧大気力学モデルであり、雲・放射過程、陸面過程がモデル化されている。

境界条件にはヨーロッパ中期気象予報センター(ECMWF)による客観解析値(6 時間ごと)を内挿して用いた。解析は図 3 に示すような 4 段にネスティングされた格子を用いた。東北

と北海道を含む領域に 8km メッシュ、津軽海峡を含む領域に 4km メッシュ、竜飛岬周辺に 2km メッシュ、竜飛岬に 1km メッシュを用いて計算を行った。

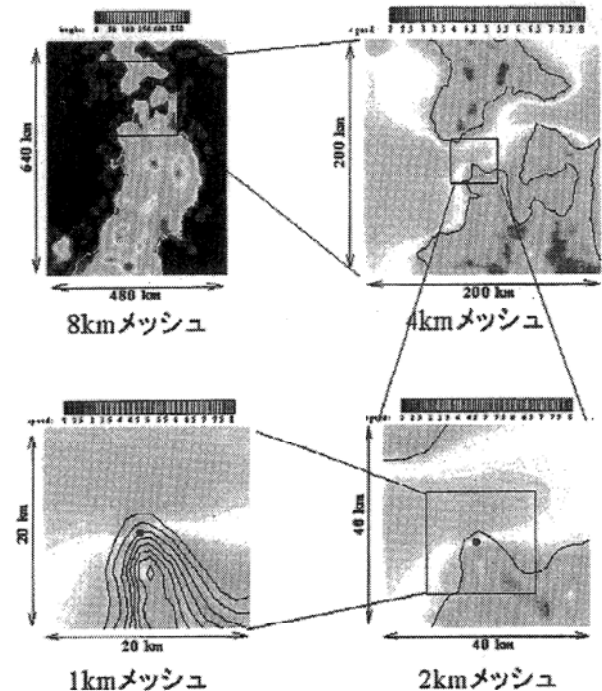


図3 地域気象モデルの計算領域

図4に地域気象モデルによって計算された竜飛岬を含む津軽海峡付近での西風の時の流れ場を示す。また図5には、それぞれの時期に対応する温位の鉛直分布を示し、夏季には大気は安定成層しているのに対して、冬季には地表面付近で大気の状態が中立である。図4(a)には夏季の代表的な風速場を示し、大気の状態(図5)が安定のため、流れが岬を回りこむことにより、津軽海峡に風が集中し強くなっていることが分かる。一方、図4(b)には冬季の代表的な風速場を示し、大気の状態(図5)がほぼ中立のため、流れが岬を回りこむことなく、山を越えている。このように、地域気象モデルによる時系列解析結果は風速場に大地形や大気安定度が与える影響を正しく反映していることがわかる。

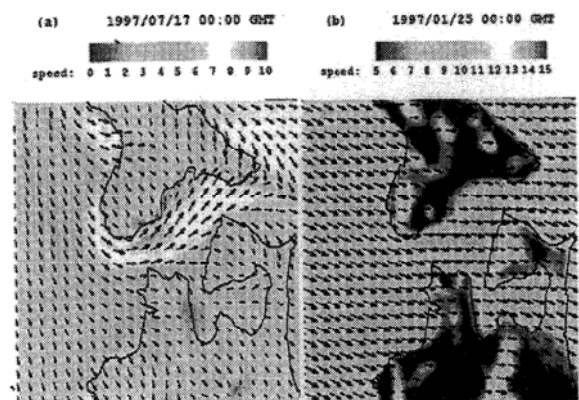


図4 地域気象モデルによって計算された風速場

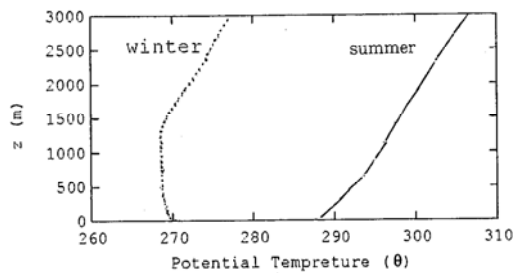


図5 竜飛岬での冬季と夏季の温位の鉛直分布

4.2 非線形モデル MASCOT による局所風況の予測

地域風況から局所風況への変換手法としては、地表面粗度、地形、障害物の影響が線形的に重ね合わせられると仮定し、その影響を除去し標準風況を求め、更に局所風況に変換する手法が提案されている⁹⁾。しかし、日本では、地形が急峻なため、線形モデルを用いた変換手法を適用することができない。そこで本研究では非線形モデル MASCOT を用い、上流の仮想領域(平坦で粗度一様)の風況を介して地域風況を局所風況に変換する手法を提案し、対象地点における 16 方位の風速比・風向偏角を計算した。解析では対象地点を中心に 10km 四方の領域をとり、竜飛岬付近での水平格子間隔を 10m とした。

図 6 には竜飛岬灯台における 1 月の 10 分平均風速の時系列の一部を示す。一点鎖線が地域気象モデルのみの予測結果、点線が標準実風況変換法を用いて局所地形の効果を取り入れた予測値、実線が観測値である。地域気象モデルのみの予測結果は全体的な傾向を捕らえているものの、風速を過小評価しており、年間の平均風速の予測誤差は 25.4%に達した。これは水平スケール 1km 以下の小スケールの地形が考慮されていないためであり、格子間隔 1km の地域気象モデルのみでは実際の風況精査を行うことはできない。一方、標準実風況変換を行った場合、この過小評価は大きく改善され、年平均風速の予測誤差は 3.5%に減少している。

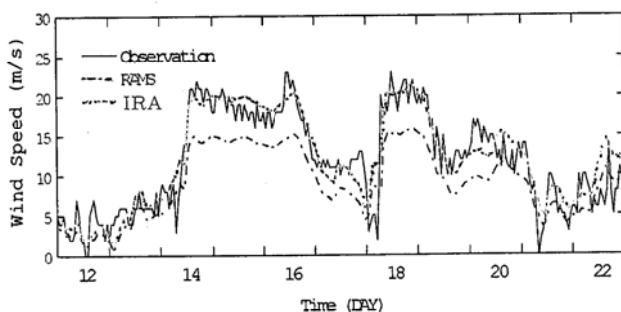


図6 竜飛岬灯台での 10 分平均風速の時系列 (1 月)

図 7 には竜飛ウィンドパーク内の各風車のナセル上で測定された年平均風速と本手法により予測された年平均風速と

の比較を示す。本手法による年平均風速の平均予測誤差は約 8% となり、従来手法の予測誤差の約 3 分の 1 以下になっていることがわかる。

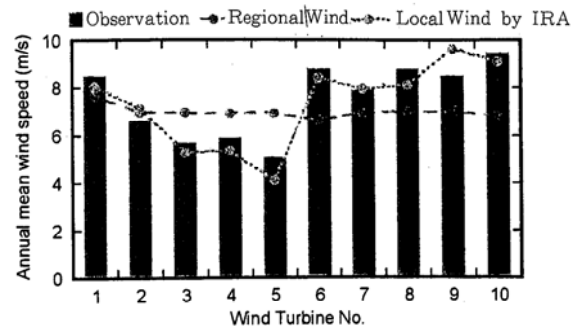


図7 年平均風速の実測値と予測値との比較

5. まとめ

本研究では新しい風況精査手法、すなわち、力学統計的局所化手法を提案することにより、風観測によらず全国任意地点の詳細風況の予測が可能となった。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 地域気象モデルを用いることにより、大地形や大気の安定度の影響を反映した地域風況の予測が可能であるが、微細な地形の影響を考慮することができない。
- 2) 地域の風況特性と微細な地形の影響を同時に考慮できる DSD 法を用いることにより、風観測によらず建設地点における詳細風況の予測を可能となった。
- 3) 本研究により提案された力学統計的局所化手法 (DSD 法) に基づく風況精査手法は計算時間が短く、年平均風速の予測精度は数パーセント程度である。

謝辞： 本研究では東北電力株式会社より竜飛ウィンドパークにおける風向・風速の観測データを提供して頂いた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- 1) F. Frey-Buñes et al., Theor. Appl. Climatol., vol. 50, pp. 117-131, 1993.
- 2) 村上周三ほか, 日本風工学会誌, No.91, pp.9-16, 2002.
- 3) 谷川亮一ほか, 第 24 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp. 119-122, 2002.
- 4) H. P. Frank et al., The Numerical Wind Atlas - the KAMM/WASP Method, Risø National Laboratory, 2001.
- 5) R. A. Pielke et al., Meteorol. Atmos. Phys., vol. 49, pp. 69-91, 1992.
- 6) 石原孟, 日比一喜, 日本風工学会誌, No.83, pp.175-188, 2000.
- 7) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三, 土木学会論文集, No.731/I-63, pp.195-221, 2003.