

高度な風況精査ソフトウェア MASCOT の開発とその実用化*

A High-precision Software MASCOT for Wind Climate Assessment : development and application

石原 孟**
Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

風力発電量は風速の3乗に比例することから、小さな風速の予測誤差が大きな風力発電量の予測誤差につながる。そのため風力発電機設置位置における正確な風況予測が大変重要である。

現在風力発電量を予測するためには風況予測モデルが用いられている。その代表的な例は Jackson & Hunt¹⁾ により提案された線形モデルに基づく WASP²⁾ があり、世界的に広く使われている。しかし、線形モデルは地形の傾斜勾配が大きくなるにつれ、山頂での予測精度が悪くなる³⁾。また山の背後においては線形モデルが風速を過大に評価することがよく知られている⁴⁾。更に、WASP により竜飛ウィンドパークにおける年平均風速を求める場合には地点によって予測誤差が非常に大きいことが Matsuzaka ら⁵⁾ の研究によって明らかにされている。従って、わが国のような急峻な地形における複雑風況を精度よく予測するには非線形風況予測モデルが必要となる。

一方、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⁶⁾。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⁷⁾ 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。この方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、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⁸⁾ 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.⁹⁾ 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。

本報告では、まず流れの剥離を含む複雑地上の局所風況を高精度で予測できる非線形モデル MASCOT (Microclimate Analysis System for Complex Terrain)¹⁰⁾ ~¹⁴⁾ を説明し、2次元尾根、3次元複雑地形及び竜飛ウィンドパークに適用したときの予測精度を調べると共に、線形モデル WASP の適用限界を明らかにする。そして、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)を紹介し、実測データとの比較検証によりその有効性を示すと共に、MASCOT の将来展望について述べる。

* 2003年6月27日~28日「第3回風力エネルギー利用総合セミナー」

** 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻

連絡先: E-mail: ishihara@bridge.t.u-tokyo.ac.jp TEL: 03-5841-6097 FAX: 03-5841-7454

2 非線形風況予測モデル MASCOT の開発

2.1 プログラムの特徴

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¹⁰⁾。

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¹⁰⁾。

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¹⁰⁾。

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¹³⁾。

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¹³⁾。

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。更に対象領域内の1地点における観測データが得られていれば、平均風速や乱れ、また年間発電量予測に必要な風速のワイブル分布が得られる。

7) 本プログラムはグラフィック・ユーザー・インタフェースと流れ場の可視化ツールが備えており、解析開始する前に、対象地点の標高、地表面粗度、また解析に使用される格子、観測地点や風車の位置を確認できる。更に解析結果は等値線、風速ベクトルなどの可視化ツールにより見ることが可能である。

2.2 MASCOT の応用例

非線形風況予測モデルの有用性を示すために、MASCOT を用いた解析例をいくつか紹介する。まず2次元尾根を対象とした解析を行い、山の傾斜勾配が局地風況に与える影響を調べると共に、線形モデルの適用限界を明らかにする。そして、3次元複雑地形における風況予測を行い、剥離を伴う流れ場に対する非線

形風況予測モデル MASCOT の有用性を明らかにする。最後に、実際地形の代表的な例である竜飛ウィンドパークを対象に風況予測を実施し、予測結果と実測結果とを比較することにより、年平均風速における線形モデルと非線形モデルの予測精度を明らかにする。

a) 2次元尾根

地形を越える流れ場は地形の急峻の度合い、すなわち、地形の傾斜勾配に大きく依存する。本研究では図1に示すような余弦の2乗の断面形状をもつ2次元尾根を対象に傾斜角度($=\tan^{-1}(H/2L)$)を系統的に変化させ、山の傾斜勾配が流れ場に与える影響を詳しく調べた。解析は傾斜角度 2.9 度、5.7 度、11.3 度、21.8 度、38.7 度の5つのケースについて行った。

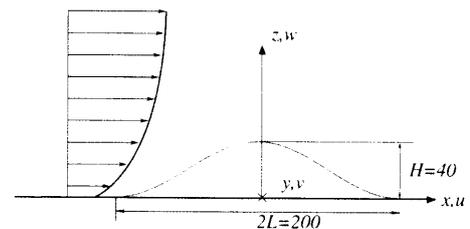


図1 2次元尾根の形状(平均傾斜角 21.8度)

図2には代表的な3つのケース(5.7度、11.3度、21.8度)における流れの流線を示す。平均傾斜角 5.7度($L/H=5$)のケースでは流れが剥離せず、山を越える流れの流線はほぼ対称となっている。平均傾斜角が 11.3度($L/H=2.5$)になると、山背後に弱い剥離流が形成される。この剥離流は壁面近傍にしか見られない。更に傾斜角が 21.8度($L/H=1.25$)になると、山の背後に大きな循環流が形成される。この場合、山背後の流れ場は接近流と全く異なる。

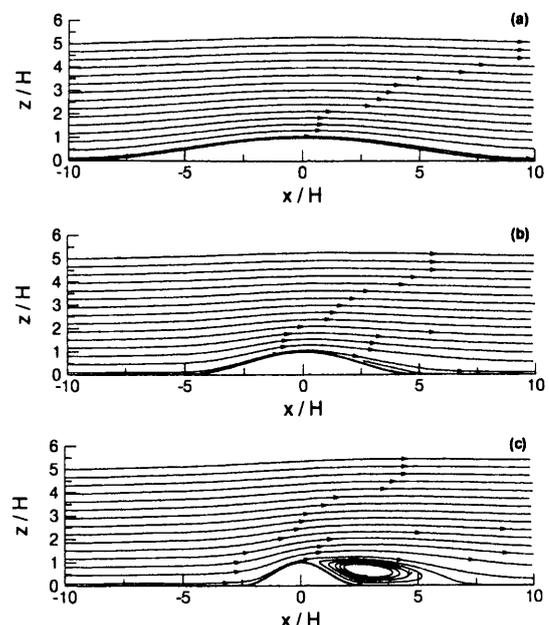


図2 傾斜角度の異なる2次元尾根を越える流れ場の流線

図3には風速比の流れ方向の変化を示す。ここで風速比は、地形上での風速を地形がないときの風速で割ったものとして定義され、1より大きいとき増速、1より小さいときは減速を意味する。流れが剥離すると、線形モデルの予測精度が大きく低下する。ここでは $x/H=0$ が山頂、 $x/H=-2.5$ と $+2.5$ がそれぞれ尾根の風上と風下の麓を表す。線形モデルはすべての領域において風速を過大に評価している。特に山の背後では実験と非線形モデルモデルが負の風速比を示すのに対して、線形モデルは1に近い風速比を示し、山背後の風速を大きく過大に評価していることが分かる。

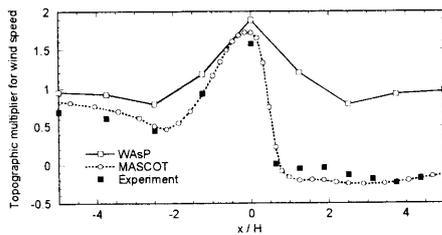


図3 風速比の流れ方向の変化

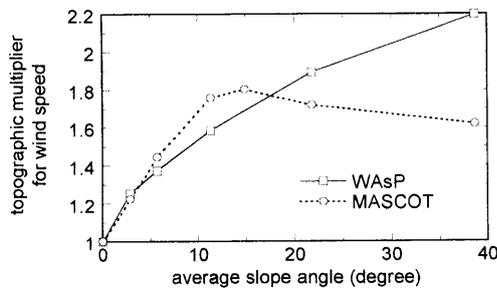


図4 山頂での風速比の傾斜角度による変化

図4には山頂での風速比の傾斜角度による変化を示す。この図から分かるように、線形モデルでは山頂での風速が傾斜角度の増加に伴い、単調的に増大すると予測されているのに対して、非線形モデルでは山頂での風速の増加は傾斜角度が15度の時にピークをもつことを示している。これは傾斜角度が15度を超えると、流れの剥離が顕著となり、山の背後に死水領域ができ、尾根の形状が見かけ上に変化したことによるものである。線形モデルは平均傾斜角度が20度を超えると、風速を過大に評価し、5度から15度の範囲内では風速を過小評価する。結局、線形モデルは平均傾斜角度が5度以内の場合のみ風速を正しく予測する。これは従来言われている線形モデルの適用限界とよく一致している。

b) 3次元複雑地形

次に北海道積丹半島先端の一部を対象とした解析例を紹介する。この場所は北海道代表的地形であり、縮尺1/2000の地形模型を用いた風洞実験も実施されている¹²⁾。図5に地形の等高線と測定点の配置を示す。この図から分かるように、測定点B, C, DではS風向からW風向にかけて複雑に入り組んだ地形が広がり、谷に沿う風が大きく増速することが予測される。事実、風洞実験から、地上40mの高さでは30%以上の風速の増加が予測されている。ここでは、風洞実験で測定した代表的な地点における流れ場を解析し、本研究で開発した非線形モデルによる予測結果と風洞実験結果と比較し、その有用性を明らかにする。

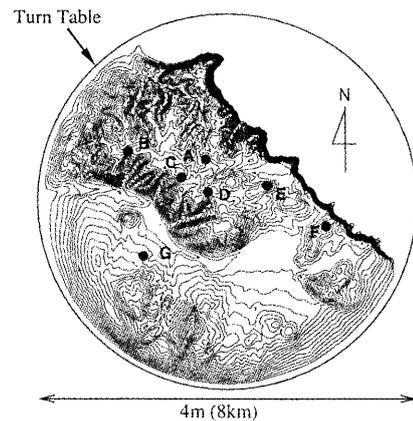


図5 地形の等高線と測定点の配置

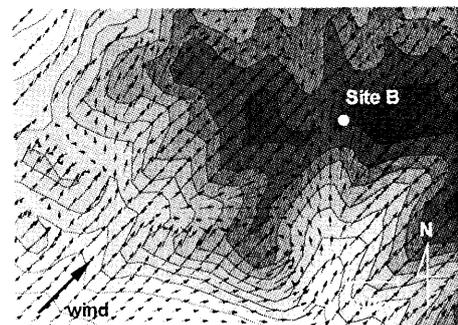


図6 B地点SW風向における地上10mでの風速分布

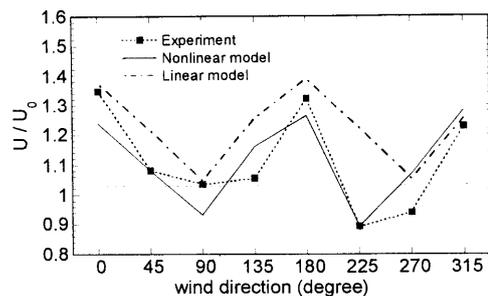


図7 B地点での地上40mにおける風向別風速比

まず尾根の上に位置するB地点について調べる。この地点の周りは複雑に入り組んだ谷があり、風向によ

って風速の変化が大きい。図 6 には B 地点付近における南西風向の地上 10m での風速ベクトルを示す。図中に地形の標高を記し、色の濃いところは高い標高を表す。B 地点の南には南南西向きに深い谷があり、風が南西から吹くときに、B 地点での地表面付近の風の風向は南向きに変化している。線形モデルによる予測では B 点付近の風向は地形がないときの風向とほとんど変わらず、このような風向の変化は全く見られない。

図 7 には B 地点での地上 40m における風向別風速比を示す。横軸は風向を表し、0 度は北風、180 度は南風に対応している。縦軸は風速比を表す。点線が実験値、実線は本研究で開発した非線形モデルによる予測結果、一点鎖線は線形モデルによる予測結果を示す。線形モデルは全体的に風速を過大に評価している。特に、風が南西(225 度)から吹いてくるときの過大評価が顕著である。一方、本研究で開発された線形モデルによる予測結果は偏りがなく風洞実験の結果を再現している。速が過大に評価されていることが分かる。

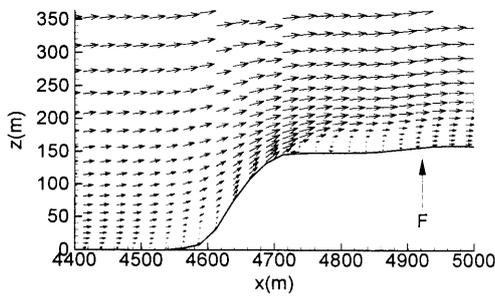


図 8 F 地点 NE 風向における垂直断面内の風速分布

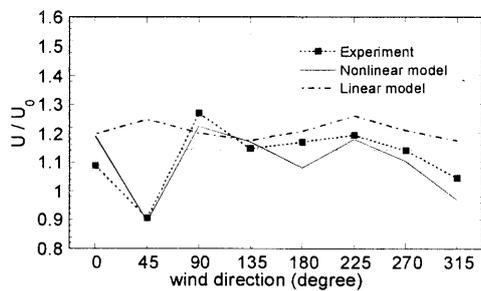


図 9 F 地点での地上 40m における風向別風速比

次に、線形モデルによる予測誤差が最も大きかった F 地点について調べる。図 8 には測定点 F 地点を通る鉛直断面内における風速ベクトルを示す。風が崖に直角となる北東方向から吹くときに急峻な崖の前縁から流れの剥離が起こる。このような剥離は線形モデルから全く予想されない。その結果、線形モデルによる平均風速値は風洞実験による結果より大きくなる。

図 9 には F 地点での風向別風速比を示す。B 地点と

同様に線形モデルは全体的に風速を過大評価していることがわかる。特に流れの剥離が起こる北東風向では、実験値は大きな減速を示しているのに対し、線形モデルの値は他の風向とほぼ変わらない。これは線形モデルが流れの剥離を再現できないことによるものである。一方非線形モデルによる予測結果は風洞実験結果とよく一致している。

c) 竜飛ウインドパーク

最後に青森県の竜飛岬を対象した解析例を紹介する。竜飛岬には東北電力(株)の「集合型風力発電基地」があり、11 台の風車が設置されている。図 10 には竜飛ウインドパーク内の風車の配置を示す。風車 1~10 号機のナセルの上に風車型風向風速計が設置されており、風速・風向の 10 分平均値が観測されている。この例ではウインドパークから 1 km 離れた灯台で得られた風向・風速データを参照観測データとして用いた。

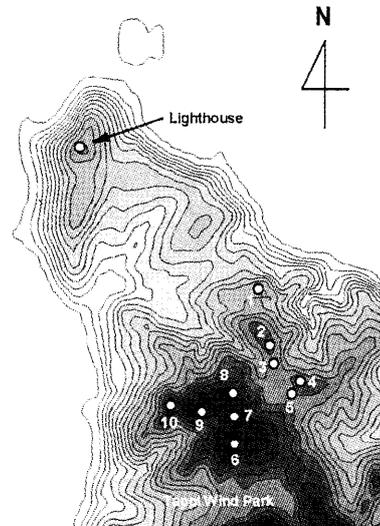


図 10 竜飛ウインドパーク内の風車の配置図

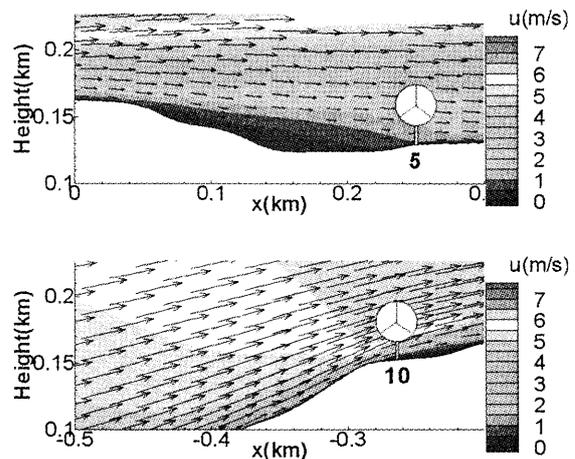


図 11 E-W 断面内の平均風速ベクトル(上:5 号機 下:10 号機)

複雑地形が平均風速場に与える影響を調べるために、5号機と10号機の位置におけるE-W断面内の平均風速ベクトルを図11に示す。5号機は山頂の窪んだ地点に位置しているため、風車高さでの風速が大きく減少している。一方10号機は上り斜面の増速場所に位置しているため、風車高さにおける平均風速が大きくなっている。

図12には年平均風速の予測結果を示す。図中の黒四角は局地風モデルによる予測結果、黒三角は従来の線形モデルの予測結果を表す。局地風モデルによる予測値が観測値とよく一致しているのに対して、線形モデルWASPは2～5号機の年平均風速を過大に評価している。2～5号機では山頂のやや低い場所に位置するため、主風向Wに対して上流側の地形の影響を受け、風速が減少している。従来の線形モデルではこのような風速の減少を再現できない。10号機平均では線形モデルWASPの予測誤差が14.2%であるのに対して、非線形モデルであるMASCOTは4.9%となる。非線形モデルによる予測精度は格段に向上していることが分かる。

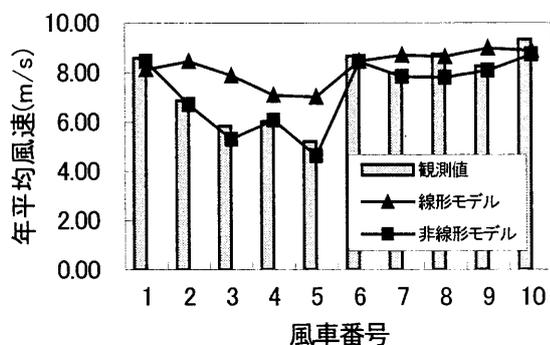


図12 年平均風速の予測結果と観測値との比較

3. MASCOTによる高度な風況精査

3.1 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^{[3], [6]}。

図13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局所風況予測モデルMASCOTを用い、地域風況を局所風況に変換する。

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。

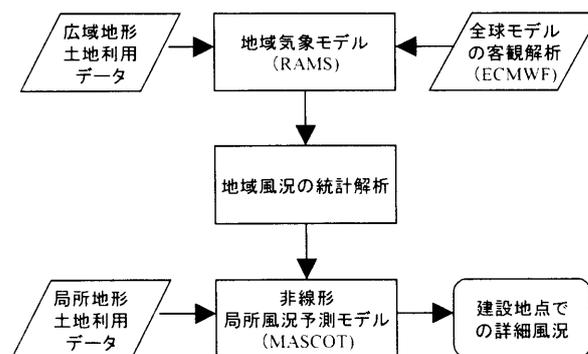


図13 力学・統計的局所化の流れ

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14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14(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14(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14(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。

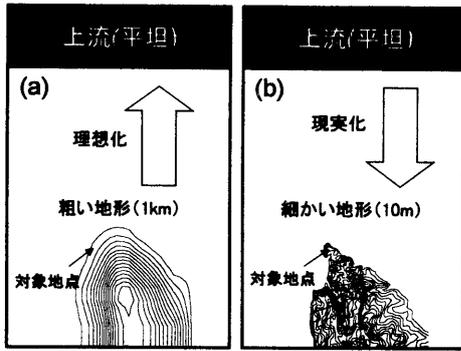


図14 標準実風況変換の概念図

3.2 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。

a) 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RAMS¹⁷⁾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15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16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17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16(a)には夏季の代表的な風速場を示し、大気の状態(図17(a))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16(b)には冬季の代表的な風速場を示し、大気の状態(図17(b))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。

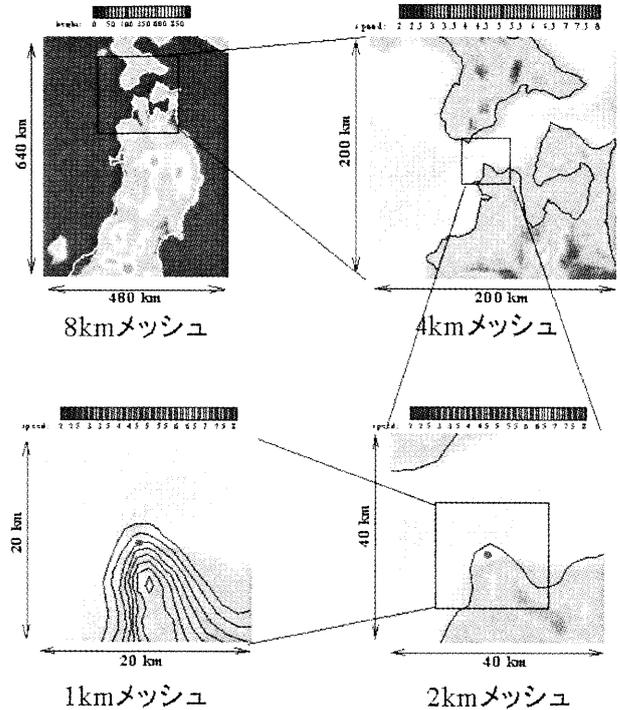


図15 地域気象モデルの計算領域

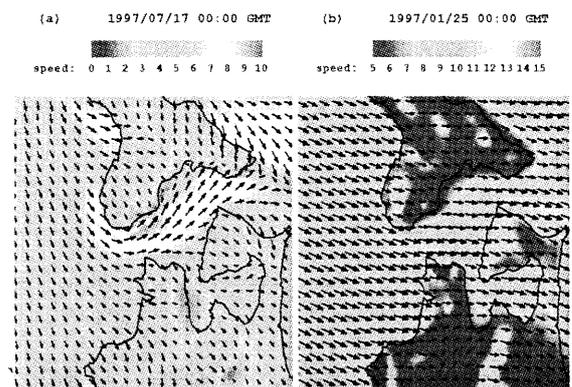


図16 地域気象モデルによって計算された風速場

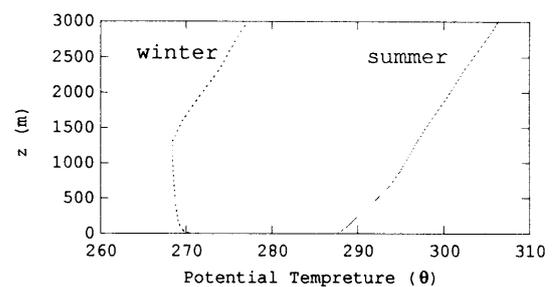


図17 竜飛岬での冬季と夏季の温位の鉛直分布

c) 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 18 には竜飛岬灯台における 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、鎖線が標準・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 19 には竜飛岬灯台で観測された風速のワイブル分布と解析による求められた風速のワイブル分布を示す。標準実風況変換を行った後の風速のワイブル分布は竜飛岬灯台で観測された風速のワイブル分布にほぼ一致していることが分かる。

図 20 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。

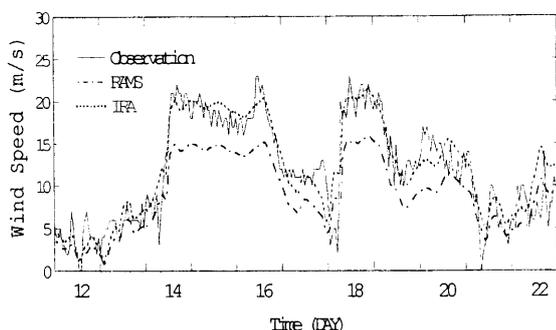


図 18 竜飛岬灯台での 10 分平均風速の時系列 (1 月)

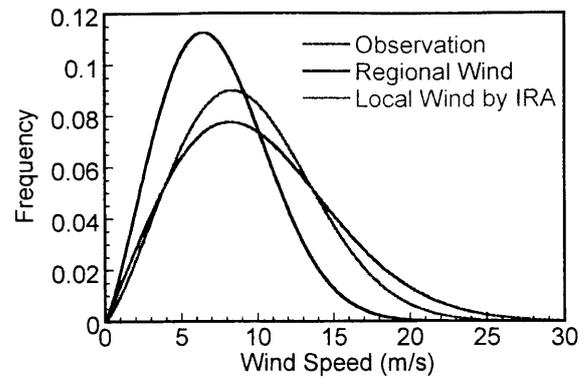


図 19 竜飛岬灯台で観測された風速のワイブル分布

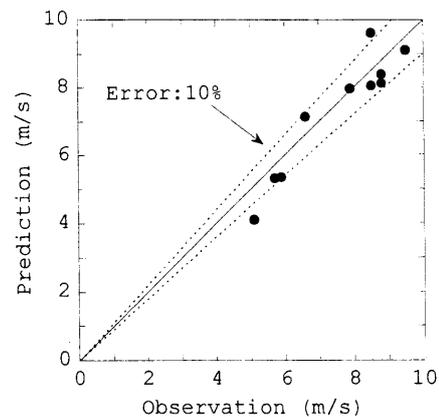


図 20 年平均風速の実測値と予測値との比較

4. まとめ

本研究では、非線形風況予測モデル MASCOT を開発し、2次元尾根、3次元複雑地形及び竜飛ウィンドパークにおける風況予測に適用し、風洞実験と観測データと比較することにより、その有用性を明らかにした。また観測によらない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し、全国任意地点の詳細風況の予測が可能になった。本研究から得られた主な結論は以下に示す。

- 1) 線形モデルは平均傾斜角度が 20 度を超えると、風速を過大に評価し、平均傾斜角度が 5 度以内の場合のみ風速を正しく予測できることが分かった。本研究で開発された非線形モデルは、任意傾斜角度を持つ複雑地形上の局所風況を予測でき、流れの剥離や急激な風向の変化を精度よく再現することが出来る。
- 2) 非線形モデル MASCOT を竜飛ウィンドパークに適用した場合に、10 機の風車における年平均風速の予測誤差は 5% 以下であり、それに対して線形モデル WAsP による年平均風速の予測誤差は 14.2% である。

3) 地域気象モデル RAMS と局所風況予測モデル MASCOT に基づく新しい風況精査手法を用いることにより、観測を行わずに風況精査を行うことが可能となり、風況精査に要する時間を 1 週間に短縮でき、年平均風速の予測精度は従来の手法に比べ、予測誤差は 3 分の 1 程度に低減し、数パーセント程度で予測可能となった。

MASCOT の開発は現在風況予測の部分がほぼ完成し、今後風車の後流を考慮したウインドファーム全体の発電量の予測や風車の強度設計に必要な乱れの詳細構造の高精度予測を実現したい。

謝辞

本研究では東北電力株式会社より竜飛ウイ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。

参考文献

- 1) P. S. Jackson and J. C. R. Hunt, Quart. J. R. Meteorol. Soc., Vol. 101, 1975.
- 2) Ni.G. Mortensen, L. Landberg, I. Troen And E.L. Petersen, Wind Atlas Analysis and Application Program (WasP), Riso National Laboratory, Denmark, 1993.
- 3) D. Xu, and P.A. Taylor, Boundary-Layer Meteorol. Vol.59, pp.177-186, 1992.
- 4) F. E. Hewer, Boundary-Layer Meteorol. Vol. 87, pp.381-408, 1998
- 5) T. Matsuzaka, K. tsuchiya and N. Tanaka, proc. European Wind Energy Conference, 1997.
- 6) F. Frey-Bunes et al., Theor. Appl. Climatol., vol. 50, pp. 117-131, 1993.
- 7) 村上周三ほか, 日本風工学会誌, No.91, pp.9-16, 2002.
- 8) 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.
- 9) H. P. Frank et al., The Numerical Wind Atlas - the KAMM/WAsP Method, Risoe National Laboratory, 2001.
- 10) 石原孟, 日比一喜, 日本風工学会誌, No.83, pp.175-188, 2000.
- 11) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三, 第 22 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.63-66, 2000.
- 12) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三, 第 23 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.188-191, 2001.
- 13) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三, 日比一喜, 第 24 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.91-94, 2002.
- 14) 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.
- 15) 石原孟, 山口敦, 鶴野伊津志, 藤野陽三, 日本風工学会誌, No.95, pp.53-54, 2003.
- 16) 山口敦, 石原孟, 鶴野伊津志, 藤野陽三, 日本風工学会誌, No.95, pp.55-56, 2003.
- 17) R. A. Pielke et al., Meteorol. Atmos. Phys., vol. 49, pp. 69-91, 1992.
- 18) 嶋田健司, 日比一喜, 石原孟, 山口敦, 日本風工学会誌, No.95, pp.57-58, 2003.