

〔特集〕複雑地形上の風況予測法

非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその実用化

A Nonlinear Wind Prediction Model MASCOT
: Development and Application*東京大学大学院工学系研究科 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。

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としてはネスティング (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⁶⁾ が提案されている。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 10 m 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 500 m 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 50 m の格子を用いる必要があり、500 m 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

* 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

† E-mail : ishihara@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

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、3次元孤立峰、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。

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 は従来の線形モデルに比べ、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¹⁴⁾。
- 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¹⁴⁾。

- 6) 本プログラムは標高 (50 m 分解能) と地表面粗度 (100 m 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。
- 7) 更に対象領域内の1地点における風速・風向の時系列データ (観測または気象予測から) が得られていれば、年平均風速、平均風速の日変化や月変化、または平均風速のワイル分布が得られる。
- 8) 本プログラムはグラフィック・ユーザー・インターフェイ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も可能である。

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 を用いた解析例を幾つか紹介する。まず3次元孤立峰を対象とした解析を行い、非線形風況予測モデルの予測精度を明らかにする。そして、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、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) 3次元孤立峰

非線形風況予測モデルの予測精度を検証するために、余弦の2乗の形状をもつ3次元孤立峰を対象とした。図1には3次元孤立峰の断面形状及び座標系を示す。孤立峰の高さ H は 40 mm、底面長さ $2L$ は 200 mm、山の最大傾斜角度は 32° である。山の表面には毛足の長さ 5 mm の人工芝で覆われている。検証に用いた風洞実験データの詳細

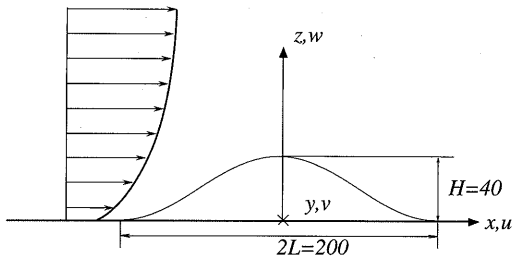


図1 3次元孤立峰の断面形状と座標系

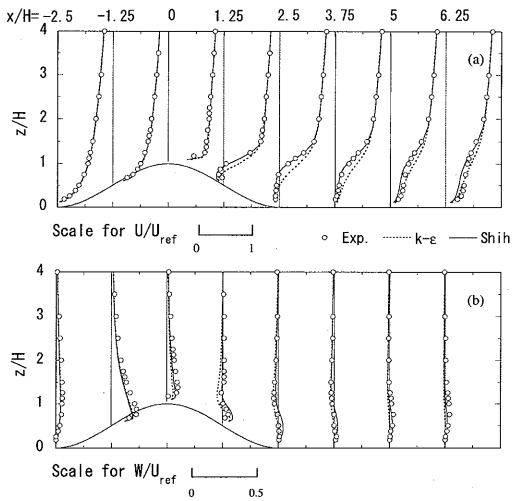


図2 3次元山の中心断面における平均速度成分 U , W

については文献 10 を参照されたい。

図 2 には 3 次元孤立峰の中心断面における平均速度成分 U , W の鉛直分布を示す。全体的に見ると、Shih の非線形 $k-\epsilon$ モデルによる解析結果は実験値によく一致し、山背後の剥離域での流速分布も正確に再現している。一方、標準 $k-\epsilon$ モデルの解析結果は剥離域での平均流速成分 U を若干過大に評価し、また山を回り込む流れの収束により形成された上昇流を過小に評価していることが分かる。標準モデルが剥離域での平均流速成分 U を過大に評価する理由は乱流エネルギーの過大評価によるものと考えられる。

3 次元孤立峰周りの流れ場の構造を理解するために、3 次元流線を図 3 に示した。山背後に回り込んだ流線は山の風上斜面に生じた上昇流にのっ

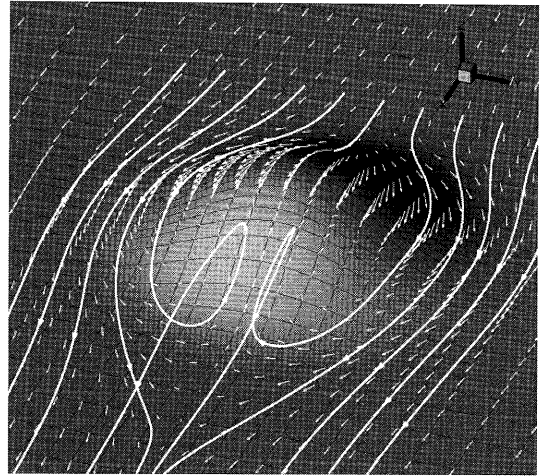


図3 3次元孤立峰における流線

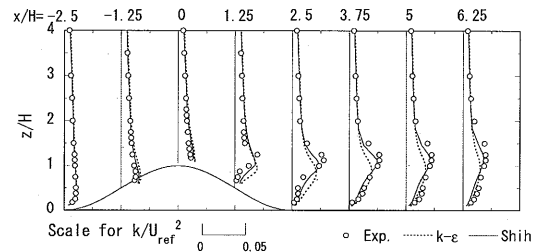


図4 3次元山の中心断面における乱流エネルギー

て山頂まで持ち上げられた後に下流方向に流れていく。山背後に回り込む流れの存在は 3 次元の剥離域に開いた流線パターンを形成される理由となっている。

風車の耐風安全性と耐久性を考える際に、変動風速の予測精度も重要である。急峻な 3 次元山を越える流れ場の乱流特性を過去に数値解析により調べた例が少なく、乱流モデルによる変動風速の予測精度について不明な点が多く残されている。図 4 には 3 次元山の中心断面における乱流エネルギーの鉛直分布を示す。Shih の非線形モデルによる予測結果は標準モデルより実験値に近い。特に標準モデルによる乱流エネルギーの過大評価は Shih のモデルにより大きく改善されている。Shih の非線形モデルによる乱流エネルギーの予測精度の向上は山の風上斜面及び山頂付近にも見られた。これは非線形モデルを用いることにより、レ

インフルズ応力の非等方性の予測精度が改善されたことによるものと考えられる。

b) 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 1/2,000 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 40 m 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

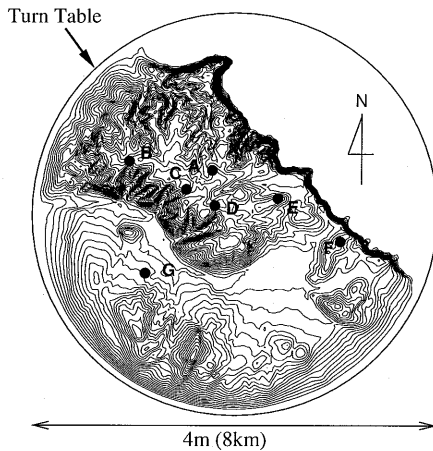


図 5 地形の等高線と測定点の配置

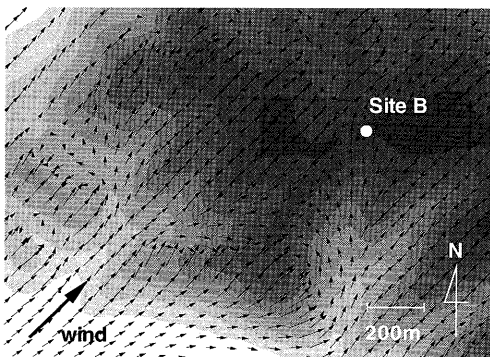


図 6 B 地点 SW 風向における地上 10m での風速分布

験結果と比較し、その有用性を明らかにする。

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 10 m 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 地点の南には南南向きの深い谷があり、風が南西から吹くときに、B 地点での地表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 40 m 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。

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。

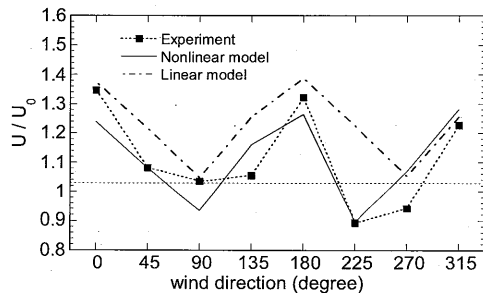


図 7 B 地点での地上 40 m における風向別風速比

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1km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。

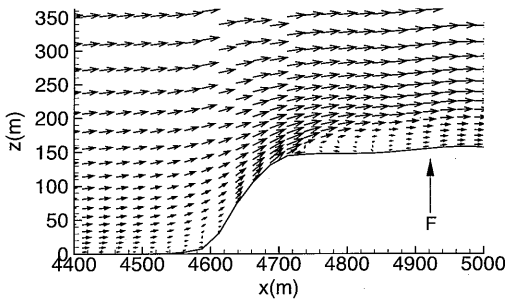


図8 F地点NE風向における垂直断面内の風速分布

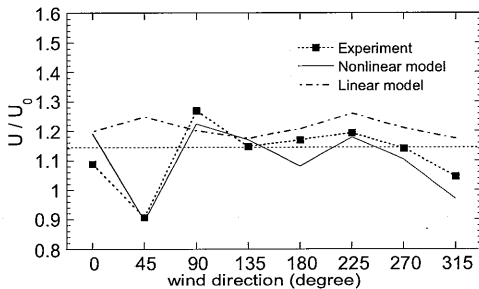


図9 F地点での地上40mにおける風向別風速比

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。

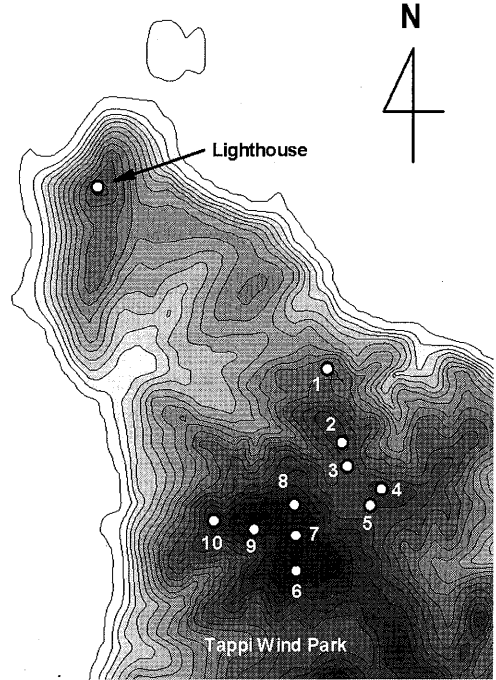


図10 竜飛ウインドパーク内の風車の配置図

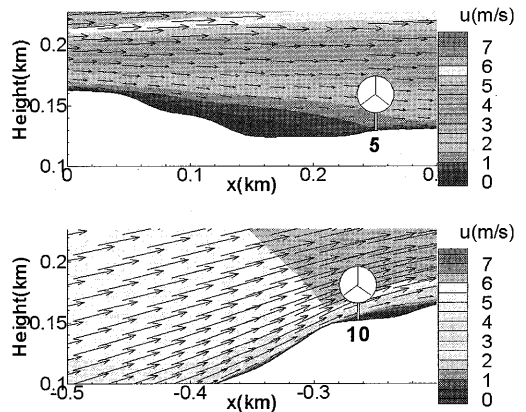


図11 E-W断面内の平均風速ベクトル (上:5号機 下:10号機)

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 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。

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^{15, 16)}。

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 1～2 km 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、1～2 km 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 を使い、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 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 1～2 km 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 14(a)）。次に、

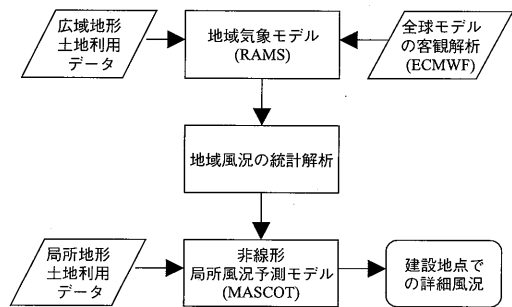


図 13 力学・統計的局所化の流れ

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。

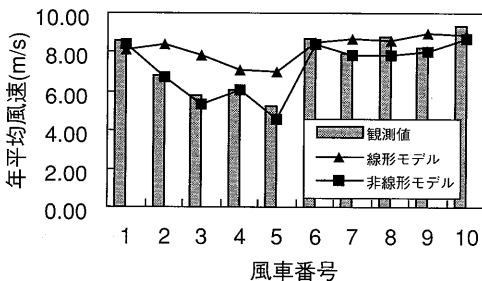


図 12 年平均風速の予測結果と観測値との比較

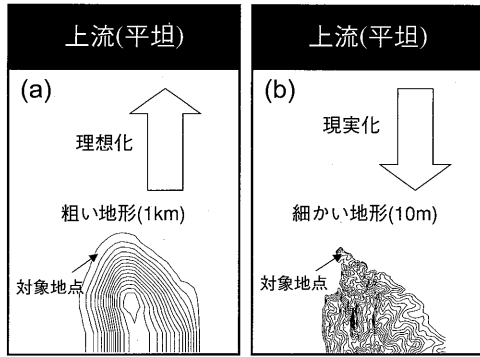


図 14 標準実風況変換の概念図

10 m ~ 50 m 程度の解像度を持つ細かい地形と地表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 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.

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インドパークがあり, 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 8 km メッシュ, 津軽海峡を含む領

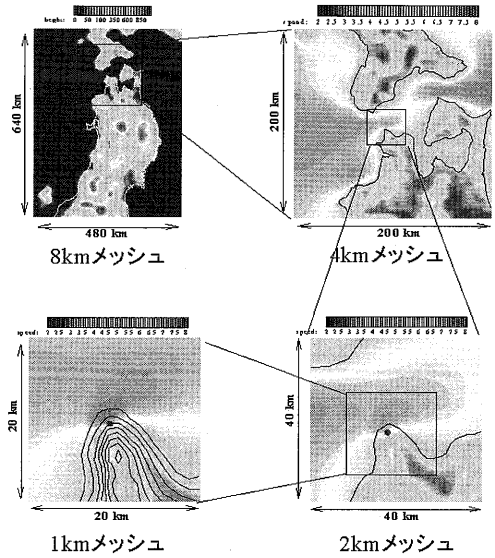


図 15 地域気象モデルの計算領域

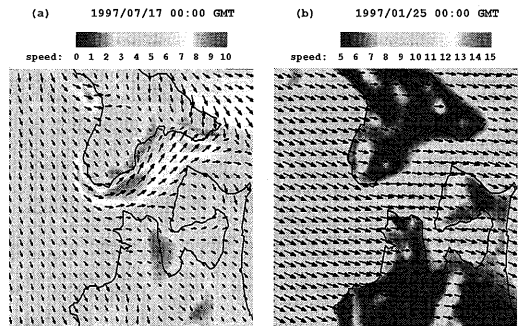


図 16 地域気象モデルによって計算された風速場

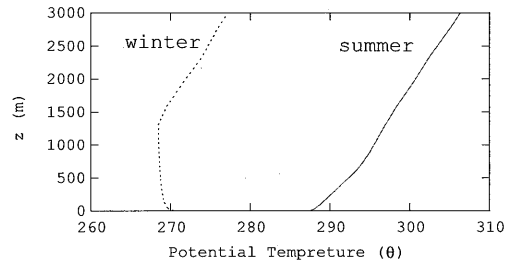


図 17 竜飛岬での冬季と夏季の温位の鉛直分布

域に 4 km メッシュ, 竜飛岬周辺に 2 km メッシュ, 竜飛岬に 1 km 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)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)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。

b) 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10 km四方の領域をとり、竜飛岬付近での水平格子間隔を10 m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

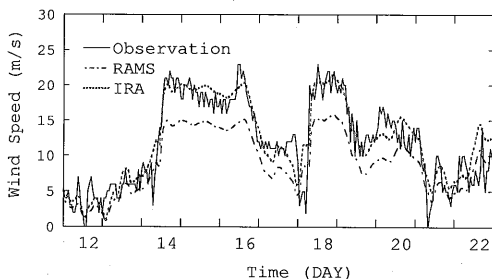


図18 竜飛岬灯台での10分平均風速の時系列(1月)

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1 km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1 km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。

4. まとめ

本研究では、非線形風況予測モデル MASCOT を開発し、3次元孤立峰、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。

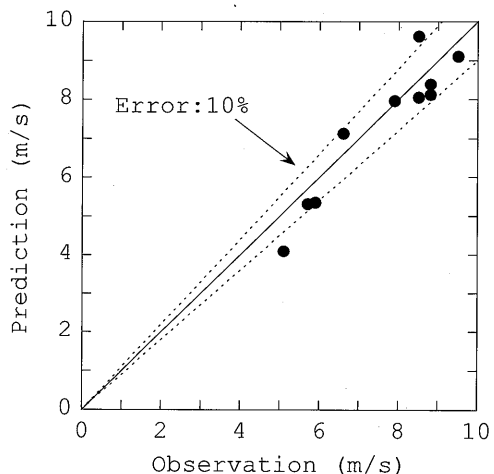


図19 年平均風速の実測値と予測値との比較

- 1) 本研究により開発された3次元風況予測プログラムは剥離に伴う急峻な地形や実際の複雑地形を越える流れ場を高い精度で予測できることが分かった。
- 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2日間に短縮でき、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。
- 5) T. Matsuzaka, K. Tsuchiya and N. Tanaka : Wind resource estimation of Tappi Wind Park, Proc. European Wind Energy Conference, 1997.
- 6) F. Frey-Bunes et al., : A Statistical-Dynamical Downscaling Procedure for Global Climate Simulations, Theor. Appl. Climatol., vol. 50, pp. 117-131, 1993.
- 7) 村上周三ほか：風力発電サイト立地選定のための局所風況予測モデルの開発，日本風工学会誌，No.91, pp.9-16, 2002.
- 8) 谷川亮一ほか：「風力発電機位置決定方法及び風力発電量予測方法」に基づく風況評価，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, Risø National Laboratory, 2001.

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。

参 考 文 献

- 1) P. S. Jackson and J. C. R. Hunt : Turbulent flow over a low hill, Quart. J. R. Meteorol. Soc., Vol. 101, 1975.
- 2) N.G. Mortensen, L. Landberg, I. Troen And E.L. Petersen : Wind Atlas Analysis and Application Program (WasP), Risø National Laboratory, Denmark, 1993.
- 3) D. Xu, and P.A. Taylor : A non-linear extension of the mixed spectral finite-difference model for neutrally stratified turbulent flow over topography, Boundary-Layer Meteorol. Vol.59, pp.177-186, 1992.
- 4) F. E. Hewer : Non-linear numerical model predictions of flow over an isolated hill of moderate slope, Boundary-Layer Meteorol. Vol. 87, pp.381-408, 1998.
- 10) 石原孟，日比一喜：急峻な山を越える乱流場の数値予測，日本風工学論文集，No.83, pp.175-188, 2000.
- 11) 石原孟，山口敦，藤野陽三：複雑地形における高精度風況予測モデルの開発へ向けて，第22回風力エネルギー利用シンポジウム，pp.63-66, 2000.
- 12) A. Yamaguchi, T. Ishihara, Y. Fujino : Experimental study of the wind flow in a coastal region of Japan, J. of Wind Eng. Indus. Aerodyn., Vol.91, pp.247-264, 2003.
- 13) 石原孟，山口敦，藤野陽三，日比一喜：非線形風況予測モデルMASCOTの開発とその応用，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：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.195-221, 2003.
- 15) 石原孟，山口敦，鶴野伊津志，藤野陽三：新しい風況精査手法の提案と実測による検証，その1，力学・統計的局所化手法，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：新しい風況精査手法の提案と実測による検証，その2，

実測による検証, 日本風工学会誌, No.95, pp.55-56, 2003.

hensive Meteorological Modeling System - RAMS, Phys., vol. 49, pp. 69-91, 1992.

17) R. A. Pielke et al., : Meteorol. Atmos. A Compre-