

天気予報技術を利用した風環境評価手法の提案

Wind Environment Assessment based on Numerical Weather Prediction

石原 孟^{*1}, 山口 敦^{*1}
 Takeshi ISHIIHARA, Atsushi YAMAGUCHI

1. はじめに

現在、我が国における風環境評価の際には気象庁気象官署、気象庁地域気象観測所(アメダス)における観測データ、自治体の大気観測データ(大気環境測定データ、消防署測定データなど)が基準風速として用いられている。しかし、これらの観測データを用いる場合には幾つかの問題点が残されている。まず、長期観測データを用いる場合には、測器の変更や都市化による周辺地表面粗度の変化に対する経年補正が必要となり、また観測データは周辺の樹木、建物などによる局所的な影響を受けており、代表性が欠けていることもある。さらに、風速の鉛直分布は周辺の地形、粗度の影響を受けて、風向別に大きく異なるため、観測高度から他の高度に変換する際の高度補正の手法にも課題が残されている。

近年、天気予報技術の進歩に伴い、数値気象予測に基づく風環境評価が行われるようになってきた。NEDOの委託によって開発されたLAWEPS¹⁾では、気象庁の数値モデルによる格子点の値を初期値・境界値とし、地形標高や土地利用を考慮した高解像度の物理モデルを順次5段階にネスティングさせることにより、水平スケール10mの局所な風環境を予測することを可能にした。しかし、この方法ではネスティングされた全解析領域に対し、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。このため、極値に関する定量的な検討は困難であり、更に2000年1年分のデータのみを対象としている点にも留意する必要がある。本報では著者らが最近開発した力学統計的局所化に基づく風環境予測手法を紹介し、複雑地形の影響を受けた地点の局所な風環境の予測結果と実測と比較することにより、その有用性と予測精度を示すと共に、天気予報技術を利用した風環境評価の将来展望について

述べる。

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環境評価手法の問題点を解決するために、筆者らは地域気象モデルRAMS²⁾と非線形モデルMASCOT(Microclimate Analysis System for Complex Terrain)³⁻⁶⁾を利用した新しい風環境評価手法、すなわち、力学統計的局所化⁷⁾を提案した。

図-1に本手法の流れを示す。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RAMS²⁾を用い、1年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1年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1年分の10分ごとのデータが求められているため、風環境の季節変化が再現されている。ただし、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。

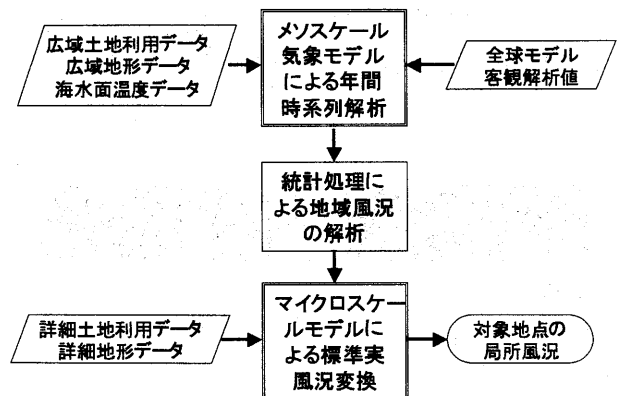


図1 力学統計的局所化の流れ

次に、気象モデルにより求めた年間風速・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、地域風環境を求める。

*1 東京大学東京大学大学院工学系研究科総合研究機構

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

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、地域風環境を微細地形の効果を考慮に入れた局所風環境に変換する。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ネスティングする LAWEPS の手法に比べ、解析時間は大幅に短縮される。

地域風環境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除去し、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と呼ばれる手法を提案する。

図 2 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、地域風環境から 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環境を求める(図-2(a))。このようにして求めた仮想的な上流領域での風環境を標準風環境と呼ぶ。標準風環境には海陸風、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環境へと変換する(図-2(b))。このようにして求められた局所風環境には海陸風、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。

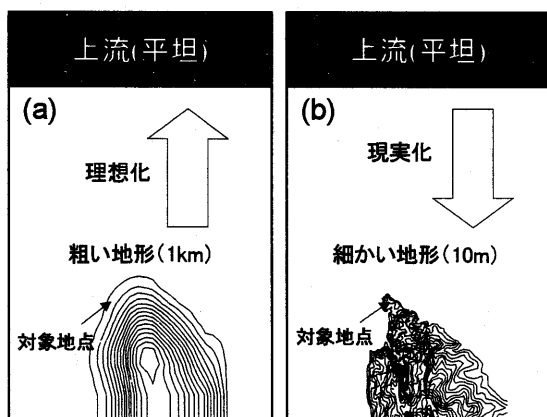


図2 標準実風況変換の概念図

以上のように、本手法では水平解像度 1km までは従来のネスティング手法と同様に時系列の計算を行うことによりメソスケールの気象現象を忠実に再現したが、それ以下のマイクロスケールの気象現象に対しては微細地形の効果のみを評価した。メソスケールの気象現象に対して統計処理することにより、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、月別の局所風環境に対しても精度の高い予測を可能にした。

3. 実測による検証

本研究で提案し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。図3には竜飛ウインドパーク内の風車の配置を示す。またウインドパークから約1km離れ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。

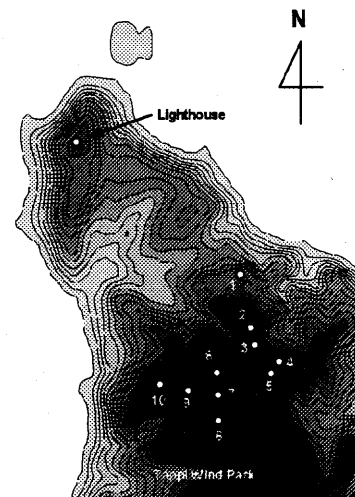


図3 竜飛ウインドパーク内の風車の配置図

3.1 気象モデルRAMSによる地域風環境の予測

本研究で用いた地域気象モデル RAMS²⁾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6時間ごとの客観解析値を内挿して用いた。解析は図4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.

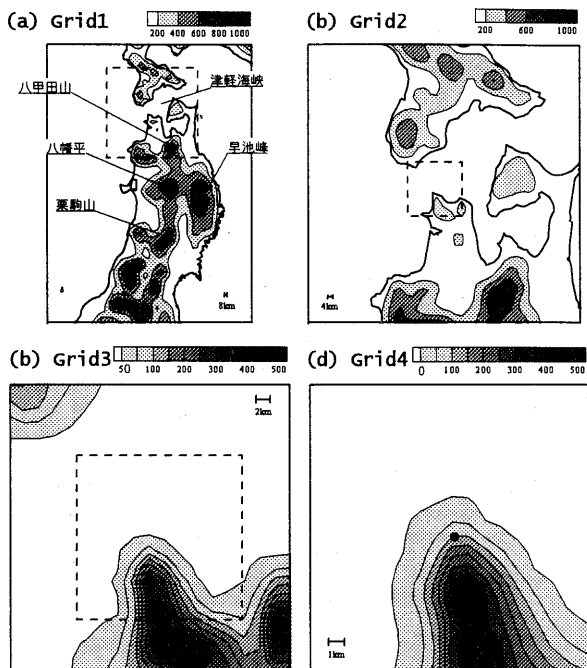


図4 地域気象モデルの計算領域

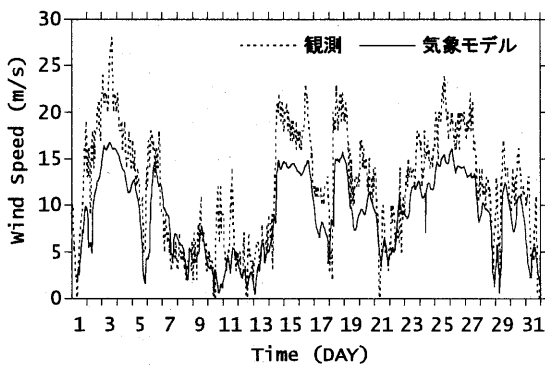


図5 龍飛崎灯台における1997年1月の10分平均風速

地域気象モデルRAMSの解析によって求められた地域風環境の特性を明らかにするため, 計算格子点において求められた10分平均風速を龍飛崎灯台の位置に内挿し, 観測データと比較した. 見やすくするために龍飛崎灯台における1997年1月の10分平均風速のみを図5に示す. この図から, 高低気圧の移動に伴う数日スケールの風速の増減パターンがよく捉えられていることがわかる. 例えば, 1月2日から4日にかけて低気圧が北日本を西から東にかけて横断したため風速が増大し, 地域気象モデルはこの現象を正しく予測している. 同様の現象は1月14日から16日にも見られ, この時も地域気象モデルによる予測値は増大している. また23日から27日にかけては低気圧が太平洋上を北上したため, 強い西高東低型の気圧配置となり, 北日本を中心に強

い西風が吹いた. この現象も地域気象モデルによりの確に予測されている. 一方, 風速の絶対値は局所的な地形の効果が再現されていないため大幅に過小評価している.

図6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7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6(a)には夏季の代表的な風速場を示し, 大気の状態(図7)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6(b)には冬季の代表的な風速場を示し, 大気の状態(図7)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6 地域気象モデルによって計算された風速場

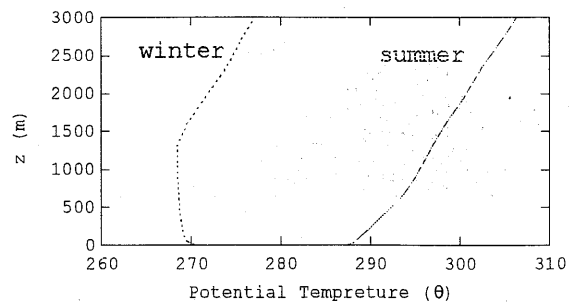


図7 竜飛岬での冬季と夏季の温位の鉛直分布

3.2 MASCOTによる局所風環境の予測

第2章で説明した標準実風況変換に基づく力学統計的局所化手法を用い, 地域風環境を局所風環境に変換した. 風況予測モデルMASCOTを用い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. まず, 龍飛崎灯台における風配, 風速階級別の出現頻度を求め, メソスケール

ル気象モデルの解析結果から求めたもの及び観測値と比較した。図8に風配、図9に風速階級別出現頻度を示す。風配に関してはメソスケール気象モデルにより観測値をよく再現していることがわかる。これは龍飛埼灯台が小高い丘の上に位置しており、局所地形によって風向が大きく変化しないことを示している。一方、風速階級別出現頻度については本手法が局所地形の効果を考慮に入れた局所風環境が観測値をよく再現しているのに対し、メソスケール気象モデルから求めた値は風速を大幅に過小評価している。本手法を用いた場合の年平均風速の予測誤差は4.6%であったが、メソスケール気象モデルの値をそのまま用いた場合には29.8%に達した。

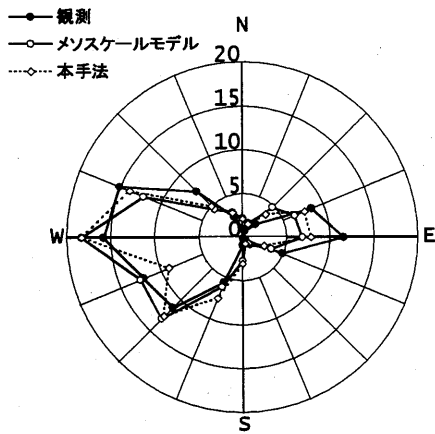


図8 地域気象モデルと本手法により求められた風配と観測値との比較(龍飛埼灯台, 1997年)

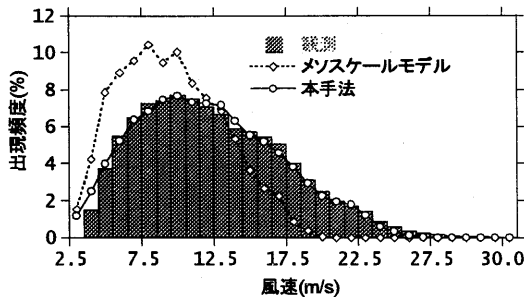


図9 地域気象モデルと本手法により求められた風速階級別出現頻度と観測値との比較(龍飛埼灯台, 1997年)

さらに竜飛ウィンドパーク内の各風車に対して同様の手法を用い、風向・風速別出現頻度を求め、年平均風速を計算した。その結果を図10に示す。棒グラフが観測値、鎖線がメソスケール気象モデルにより求めた値、実線が本手法により微細な地形の影響を取り入れて求めた値を表す。観測値は場所によって大きく異なり、風速の最も低い5号機の年平均風速は5.2m/sである

のに対し、最も風速の高い竜飛岬灯台では倍近い10.1m/sに達する。メソスケール気象モデルにより計算された風速は対象領域全域でほぼ同じ値を示し、場所による風速の違いを再現できない。このため、年平均風速の予測誤差は灯台で29.8%に達し、全風車の平均予測誤差は19.3%となっている。一方、本手法によって求めた年平均風速は5号機における風速の減少や10号機、灯台における増大など風車位置の違いによる年平均風速の違いを定量的に再現している。灯台における年平均風速の予測誤差は4.6%に、全風車の予測誤差の平均は7.6%に改善された。

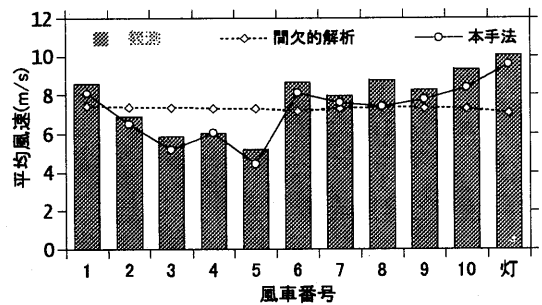


図10 竜飛ウィンドパークと灯台における年平均風速

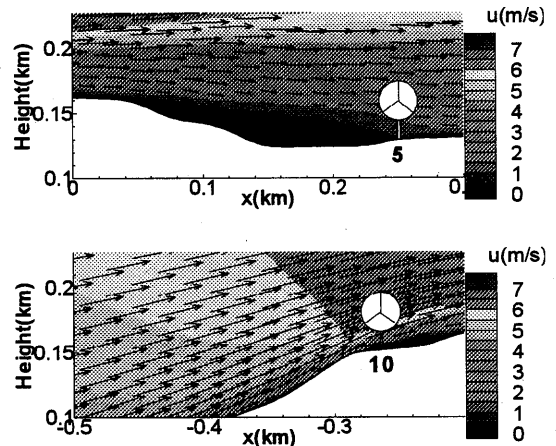


図11 E-W断面内の平均風速ベクトル(上:5号機, 下:10号機)

5号機における風速の減少や、10号機における増大の原因を説明するため、竜飛岬における主風向である西風時の5号機と10号機付近の流れ場のWE鉛直断面を図11に示した。図中のベクトルが風速を、コンターは風速の大きさを示す。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ことがわかる。

第1章で述べたようにLAWEPSでは計算時間を短縮するために、6日に1回、6時間おきに1日4時間、年間計244時間

のみの時系列計算を行っている。このような間欠的な解析が月別の風況の予測精度に与える影響を明らかにするため、本節では月別の平均風速について本手法と間欠的解析手法との比較を行った。

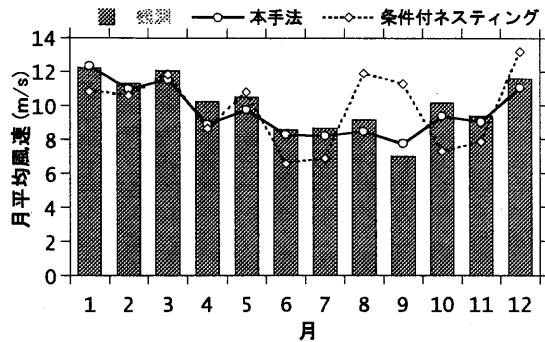


図12 龍飛崎灯台における1997年の月別平均風速

図12には本手法と間欠的な解析により求められた龍飛崎灯台における月別平均風速を観測値と比べたものを示す。棒グラフが観測、実線が本手法、鎖線がLAWEPSと同様のサンプリング間隔による間欠的な解析から求めた月平均風速を示す。間欠的な解析から計算された月平均風速は、冬季から春季にかけては冬季から春季には季節風が安定的に吹いているため、月別平均風速を比較的良好に再現している。一方、夏季から秋季にかけては、台風や低気圧の通過に伴い大幅に風速が変動するため、風速を大幅に過小あるいは過大評価している。例えば、9月において観測された平均風速は7.0m/sであるのに対し、予測値は11.3m/sとなっており大幅な過大評価が見られる。この結果、本手法から求められた月平均風速の平均予測誤差は5.9%であるのに対して、LAWEPSに採用されたサンプリング間隔による間欠的な解析を用いた場合には月平均風速の平均予測誤差は19.3%と大幅に増えることがわかった。

4. 今後の展望

現在気象庁と(財)電力中央研究所の共同研究により1979年から2004年までの26年間の気象観測データの再解析が進められている。また気象庁の現業全球モデルの解像度は現在の約60kmから、2006年に約20kmに高解像度化される予定である。筆者らは現在2000年から2004年の全球モデルの客観解析値をメソスケール気象モデルによるダウンスケーリングし、地域風環境データベースの作成を行っている。このように、近い将来、高解像度の気象シミュレーションに基づく地域風環境データベースが整備され、本報で提案した手法

を用いることにより、気象庁の風観測データによらない全国任意地点における風環境評価が可能になる。本報では、地形の影響を含んだ風環境の予測手法を述べたが、全く同じ手法を用いて、建物周りの風環境評価を行うことが可能である。

5. まとめ

本研究では、天気予報技術を利用した新しい風環境評価手法、すなわち、力学統計的局所化手法を提案し、全国任意地点における風環境評価を可能にした。本研究から得られた主な結論を以下に示す。

- 1) メソスケール気象モデルによって解析された地域風環境は局地循環や成層効果が含まれ、風環境を評価する際の基準とする風速データとして使うことが可能である。
- 2) 非線形モデル MASCOT に基づくダウンスケーリングにより、局所風環境を高精度に予測することができる。龍飛崎灯台において実測と比較した結果、風配と風速階級別出現頻度が観測値とよく一致し、年平均風速の予測誤差は4.6%であることが分かった。
- 3) 同様な手法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平均予測誤差は7.6%であり、ウィンドファーム全域において局所風環境を評価することが可能であることを示した。
- 4) 間欠的な解析に基づく予測手法を用いた場合には夏季における激しい天気の変化を捉えることができず、月平均風速の予測誤差は本研究で提案した手法を用いる場合の5.9%から、19.3%に多く増大することが分かった。

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。

参考文献

- 1) 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.

- 2) R. A. Pielke et al, A Comprehensive Meteorological Modeling System – RAMS, *Meteorol Atmos Phys*, Vol. 49, pp. 69-91, 1992.
- 3) 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.
- 4) A.Yamaguchi, T. Ishihara, Y. Fujino : Experimental study of the wind flow in a coastal region of Japan, *J. Wind Eng. Indust. Aerodyn.*, Vol.91, pp.247-264, 2003
- 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.195-221, 2003.
- 6) 石原孟, 飯塚悟, CFD と風力開発, ターボ機会, No.2 pp. 52-56, 2005.
- 7) 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(投稿中)