

## 非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその応用\*

## A nonlinear wind prediction model MASCOT: development and application

石原 孟\*\* 山口 敦\*\* 藤野 陽三\*\*\* 日比一喜\*\*\*\*  
Takeshi ISHIHARA Atsushi YAMAGUCHI Yozo FUJINO Kazuki HIBI

## 1. 結論

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 & Hunt<sup>(1)</sup> により提案された線形モデルに基づく WASP<sup>(2)</sup> 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、予測精度が悪くなる<sup>(3)</sup>。特に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<sup>(4)</sup>。例えば、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<sup>(5)</sup> 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。そのため、著者らは流れの剥離を含む複雑地上の局所風況を精度よく予測できる非線形モデル MASCOT (Microclimate Analysis System for Complex Terrain)<sup>(6)</sup> を開発し、風力エネルギー利用シンポジウムにて発表してきた<sup>(7)(8)</sup>。

本研究では、非線形風況予測モデル MASCOT の最新開発状況を説明すると共に、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。

## 2 非線形風況予測モデル MASCOT の開発

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<sup>(6)</sup>。

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<sup>(6)</sup>。

3) 乱流モデルとしては標準  $k-\epsilon$  または非線形  $k-\epsilon$  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<sup>(6)</sup>。

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<sup>(9)</sup>。

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 PC で 1 時間以内に解析することを可能にした<sup>(9)</sup>。

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。

現在、グラフィック・ユーザー・インターフェイスや流れ場の可視化ツールなどの開発が進められており、今年度中の完成を目指す。

## 3 MASCOT の応用例と考察

非線形風況予測モデルの有用性を示すために、ここでは MASCOT を用いた解析例を幾つか紹介する。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

\* 2002 年 11 月 20 日～21 日「第 24 回風力エネルギー利用シンポジウム」において講演、原稿受付年月日

\*\* 会員, \*\*\* 非会員, 東京大学大学院工学系研究科 \*\*\*\* 非会員 清水建設(株)技術研究所

る。

### 3.1 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。

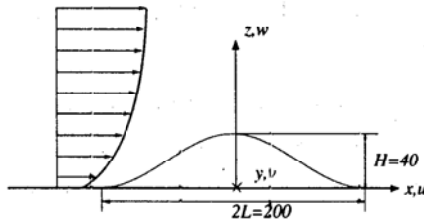


図1 2次元尾根の形状 (平均傾斜角 21.8 度)

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。

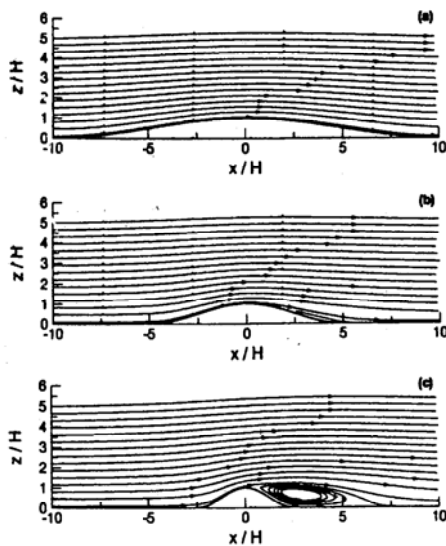


図2 傾斜角度の異なる2次元尾根を越える流れの流線

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。

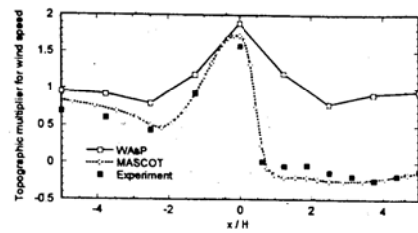


図3 風速比の流れ方向の変化

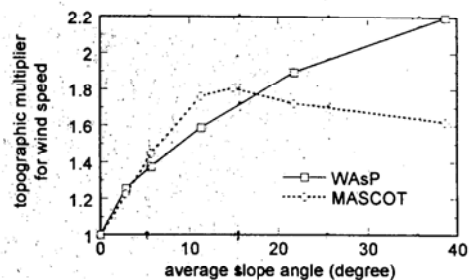


図4 山頂での風速比の傾斜角度による変化

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。

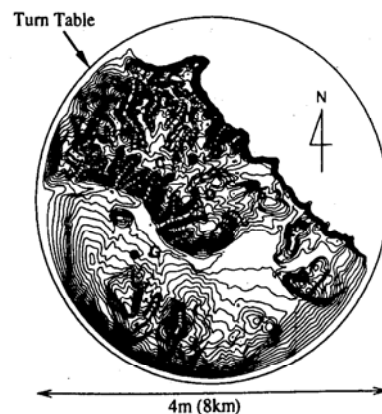


図5 地形の等高線と測定点の配置

### 3.2 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<sup>9)</sup>。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。

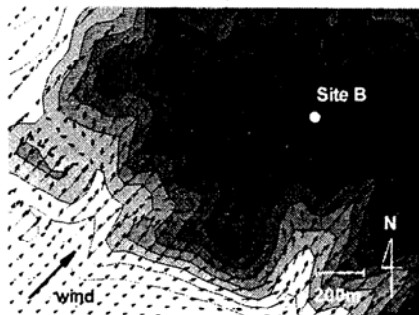


図6 B地点SW風向における地上10mでの風速ベクトル

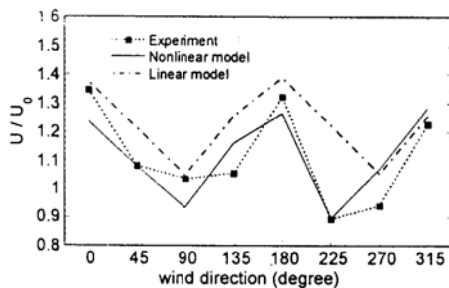


図7 B地点での地上40mにおける風向別風速比

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。

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。

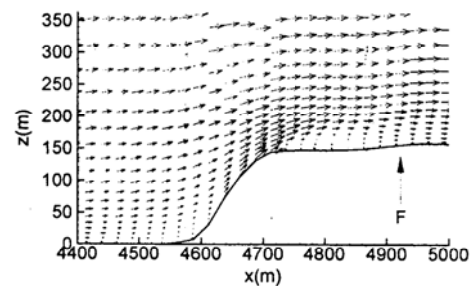


図8 F地点NE風向における垂直断面内の風速ベクトル

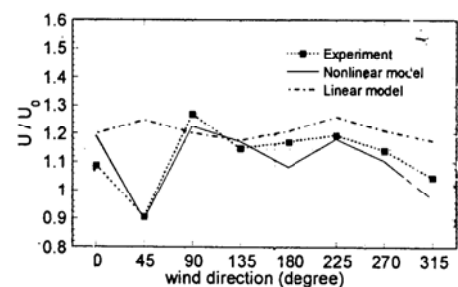


図9 F地点での地上40mにおける風向別風速比

### 3.3 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10 竜飛ウインドパーク内の風車の配置図

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。

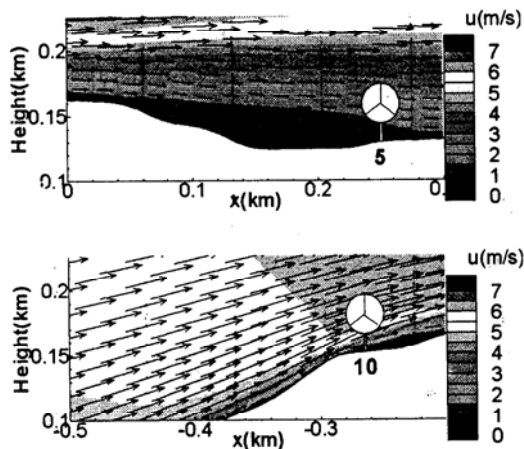


図11 E-W断面内の平均風速ベクトル(上:5号機下:10号機)

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。

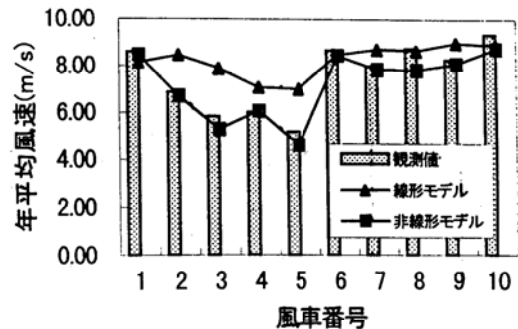


図12 年平均風速の予測結果と観測値との比較

#### 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イ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。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。
- 2) 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。
- 3) 非線形モデルMASCOTを竜飛ウイ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。

謝辞： 本研究は一部(財)日産科学振興財団の助成を受けた。また竜飛ウインドパークにおける風向・風速の観測データは東北電力株式会社より提供して頂いた。ここに記して謝意を表する。

#### 文 献

- (1) P.S.Jackson and J.C.R.Hunt, 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), 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) 石原孟, 日比一喜, 日本風工学会論文集, No.83, pp.175-188, 2000.
- (7) 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, 2001.
- (8) 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, 2002.
- (9) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三, 土木学会論文集 (掲載予定)

(JAPANESE)

石原孟 助教授  
東京大学大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻  
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1  
TEL 03-5841-6097  
FAX 03-5841-7454  
email: ishihara@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

(ENGLISH)

Takeshi ISHIHARA Associate Professor  
Department of Civil Engineering, University of Tokyo  
7-3-1, hongo, bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan  
Tel: +81-3-5841-6097  
Fax: +81-3-5841-7454  
email: ishihara@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

