

風況予測ソフトウェア MASCOT の技術と解析例

東京大学大学院工学系研究科 石原 孟, 山口 敦

1. はじめに

風力発電においては、国と地域における賦存量や特定プロジェクトの年間発電量を高精度に推定することは重要である。これに加え、風力発電機の選定や風車の支持構造物の設計においては、対象地点の設計風速や乱流強度の推定も必要である。わが国においては、風力発電の導入が先行しているデンマークやドイツ北部と異なり、地形が急峻で複雑である上、台風が頻繁に襲来するため、ヨーロッパで開発された風況解析技術をそのまま用いることができない。

著者らは、これらの問題を解決するために 2000 年から風況解析ソフトウェア MASCOT の開発を行ってきた。MASCOT には日本国内の標高 (50m 分解能)、地表面粗度 (100m 分解能)、台風情報に関するデータベースが備えられており、緯度、経度を入力するだけで、国内の任意地点における風況解析が可能である。また、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も備えられており、解析開始前に、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。流れ場の解析結果を等値線、風速ベクトルなどにより可視化することができるとともに、風配図、風速別出現頻度分布、再現期間別設計風速などの図面の作成も可能である。

本稿では MASCOT で用いられている技術と解析例について紹介すると共に、MASCOT による風況予測の将来展望について述べる。

2. 数値流体解析による風況予測

従来、地形の影響を考慮して風力発電量を予測するためには Jackson & Hunt¹⁾により提案された線形モデルに基づく WASP²⁾が世界的に広く使われてきた。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³⁾ため、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。

著者らはこの問題を解決するために数値流体解析に基づく非線形気流解析モデル MASCOT Basic を開発してきた^{4) 5)}。この非線形気流解析モデル MASCOT Basic は従来の線形モデルに比べ、以下の特徴を持っている。

- 1) 一般座標系を採用し、任意傾斜角度をもつ地形に対応でき、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) 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 PC で解析することが可能である。

MASCOT Basic による気流解析結果と、対象領域内の 1 地点における風速・風向の時系列データまたは風況統計値から対象領域内任意地点における年平均風速、平均風速の日変化や月変化、風配図・風速別出現頻度が得られる。

複雑地形中の風況予測例として、青森県の竜飛岬への適用例を紹介する。竜飛岬には東北電力 (株) の集合型風力発電基地「竜飛ウインドパーク」があり、11 台の風車が設置されていた (図 1)。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た。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、他の 10 地点での風況を予測した。

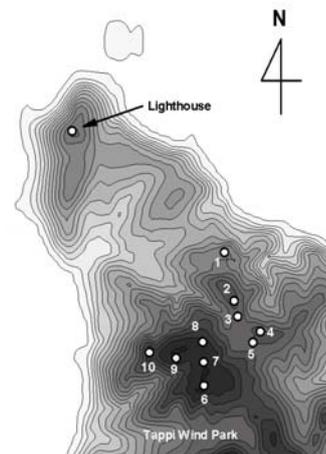


図 1 竜飛ウインドパーク内の風車の配置図

図 2 には年平均風速の予測結果を示す。従来の線形モデル WASP による解析結果は主風向時に山頂背後となる 2~5 号機の年平均風速を過大に評価しているのに対して、非線形モデルを利用した予測値が観測値とよく一致していることが分かる。予測誤差も線形モデルの 14.2% から 4.9% に大きく減少した。

* 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

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

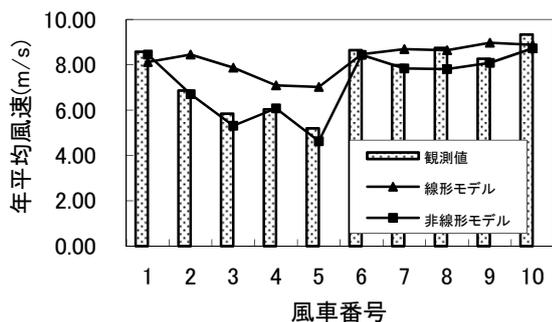


図2 年平均風速の予測結果と観測値との比較

修正 $k-\epsilon$ -モデルを用いた MASCOT Basic の解析では剥離を含む急峻な地形における平均風速や乱れの標準偏差を精度よく予測することが可能であるが、乱流場における非定常性や 3次元渦構造を直接求めるには LES 解析が必要である。図3には LES 解析により求めた 3次元孤立峰の背後の複雑乱流場を示す。複雑地形上に設置された風車はこのような変動風速により大きな変動荷重を受ける可能性がある。現在開発されている MASCOT Basic の次期バージョンでは LES モデルを使うことが可能である。このように求められた 3次元複雑乱流場と本特集で紹介される空力弾性モデル CAST[®]を用いることにより、複雑地形上に設置される風車の疲労寿命を高精度に評価することが可能になる。

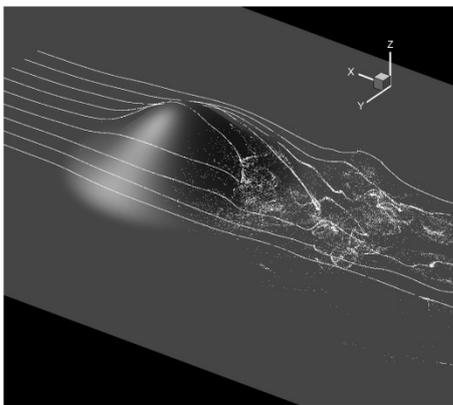


図3 3次元孤立峰の背後における複雑乱流場

3. 気象モデルとの併用による風況予測

第2章で述べた手法では対象地点近傍での最低1年間の現地観測値が必要であったが、観測を行わず風況を把握することができれば風力開発の時間を短縮することが可能である。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⁸⁾が提案されているが、ネスティング手法では計算時間の制約から条件付きネスティングを行わざるを得ず、月別の風況を高精度に推定する際には問題が残されていた。

これらの問題を解決するために著者らはメソスケール気象モデルと予測モデルを利用した新しい風況精査手法(力学統計的局所化)を開発してきた⁸⁾。なお、日本全国のメソスケール気象モデルによる解析結果は NEDO による局所的風況予測モデル(LAWEPS)の「風況マップ表示システム」として公開されており⁸⁾、MASCOT ではこのデータと気流解析結果を組み合わせることで、観測データを用いずに日本全国任意地点での風況解析が可能となった。

本手法では、全球モデルの解析結果を初期条件・境界条件とした1年分のメソスケール気象解析結果に対して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 以下の小地形の効果は考慮されていないため、前節で述べた MASCOT Basic の結果を用い、地域風況を局所風況に変換する。著者らはこの手法を力学統計的局所化手法(DSD: Dynamical Statistical Downscaling)と名付けた。

観測データを用いない風況予測例として、竜飛ウインドパークにおける解析を示す。図4はメソスケール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夏季(a)と冬季(b)の西風の時の流れ場を示す。夏季には大気は安定成層しているため、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のに対し、冬季には地表面付近で大気の状態が中立であるため、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、メソスケール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。

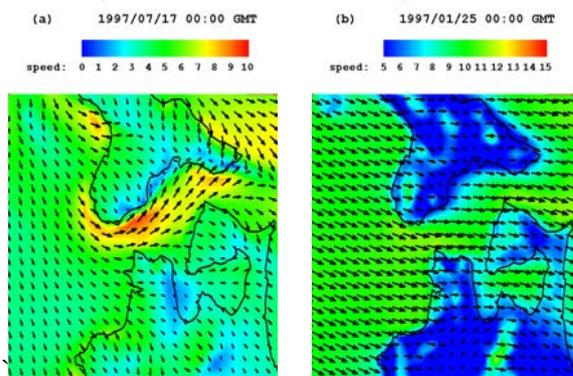


図4 気象モデルにより計算された風速場

メソスケール気象モデルによって得られた地域風況を局所風況へと変換する手法として、非線形気流解析モデル MASCOT Basic の結果を用い、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た。この手法を用いて推定した竜飛岬灯台における 10 分平均風速の時系列の一部を図5に示す。メソスケール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。この手法により、観測データを用いずに局所風況を予測することが可能となった。

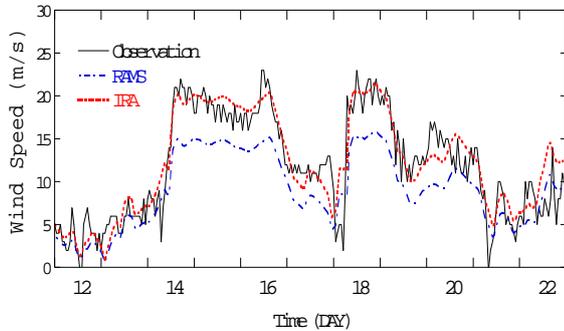


図5 竜飛岬灯台での10分平均風速の時系列(1月)

4. 一般化キャンピーモデルによる風況予測

非線形風況予測モデルでは、地表面の境界条件は粗度長により定義していたが、風力発電設備設置予定地や参照風速計周辺に樹高の高い森林や建物などの障害物がある場合には、粗度長による境界条件の適用には限界がある¹⁰⁾。

一方、風環境予測手法としてキャンピーモデルを用いた解析が提案されている。キャンピーモデルでは、障害物による流体力及び障害物による乱流の生成と消散項を運動量及び乱流の輸送方程式に付加することにより、建物や植生などの障害物による影響がモデル化される。しかしながら、従来の研究では広域のメソスケール解析では土地利用データベースに基づく粗度長さを、数値流体解析では都市建物形状のデータベースによるキャンピーモデルを用いており、異なる解析モデル間の接続が問題となる。著者らは、この問題を解決するため、まず建物、植生の効果を統一的に表現可能な流体力ならびに低占有率から高占有率までの都市キャンピーの解析に適用可能な乱流モデルを導出し、一般化キャンピーモデルを提案した¹¹⁾。

一般化キャンピーモデルを用いた解析例として、東京都江東区新木場の東京ヘリポート内にある気象庁新木場アメダス地点での風況予測結果を示す。対象地点の南側は若洲公園であり、標高 20m 程度の小高い丘がある。さらに南方には東京湾が広がる。また西側は倉庫街と貯木場が混在し、地形は平坦である。一方、東側は荒川の河口に面している。西から北にかけて市街地と水面からなる複雑な地表面状態になっている。

本例では風観測データと比較するために、新木場アメダス地点における風向別風速出現頻度を、力学統計的局所化手法と一般化キャンピーモデルを用いた気流解析により求めた。図 6 には新木場アメダスにおける風速階級別の風速出

現頻度の観測値とメソスケール気象モデルによる予測値およびアメダス地点における局所風況の予測値の比較を示す。メソスケール気象モデルによる予測値は観測値に比べ過大評価しているのに対して、建物や植生の効果を考慮したアメダス地点における局所風況の予測値は観測値とよく一致していることが分かる。

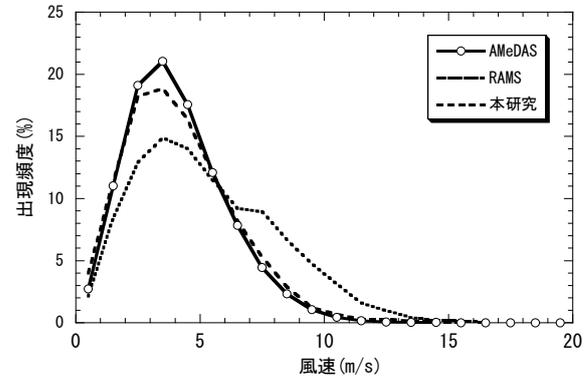


図6 新木場アメダスにおける風速階級別風速の出現頻度

5. 台風シミュレーションによる設計風速の評価

風力発電設備の設計風速を評価するためには、年最大風速の非超過確率分布を高精度に推定する必要がある。強風の成因が温帯低気圧である地域においては、国際標準 IEC61400-1¹²⁾ に示されるように、MCP 法(Measure-Correlate-Predict)を用いて、近隣の気象官署での風観測記録から対象地点における風速を推定し、ガンベル分布により年最大風速の 50 年再現期待値を求めることができる。

一方、日本のように熱帯低気圧および温帯低気圧の両方が強風の要因となる混合気候では、強風の成因を考慮した年最大風速の確率分布を評価する必要がある。熱帯低気圧による強風の比超過確率分布を推定する手法としてモンテカルロシミュレーションを用いた手法が広く使われている。MASCOT には日本周辺の台風に関するデータベースが備えられており、モンテカルロシミュレーションによる設計風速評価が可能となっている¹³⁾。

熱帯低気圧のモンテカルロシミュレーションではまず、過去の熱帯低気圧に関する進路や気圧等の観測データにより、熱帯低気圧の気圧場を表す 5 つのパラメータ(中心気圧低下量、最大風速半径、進行速度、最接近距離、進行方向)及び熱帯低気圧の年発生数の確率分布を求める。次に求められた確率分布を用いて、モンテカルロシミュレーションにより 1 万年分の仮想熱帯低気圧を発生させる。そして発生した熱帯低気圧の気圧場から傾度風速を求め、MASCOT Basic の結果から地表面の粗度や地形の効果を考慮した実地形上の風速を推定する。最後に、推定した風速の時系列データを基に各年における年最大風速を抽出し、昇順に並べ、非超過確率分布を求める。

モンテカルロシミュレーションの解析例として、千葉県銚子沖の洋上地点における熱帯低気圧による年最大風速の非超過確率分布の解析結果を図 7 に示す。予測値(実線)はと観測値(白丸)と一致していることが分かる。この評価手法は IEC61400-1 の第 4 版に盛り込まれる予定である。

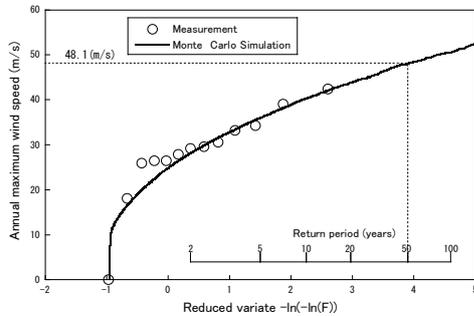


図 7 熱帯低気圧による年最大風速の非超過確率分布

6. まとめ

風況解析ソフトウェア MASCOT は、わが国特有の複雑地形上の風況解析および台風を考慮した設計風速評価が可能である。また日本国内の地形、粗度、台風のデータベースを備えているため、緯度・経度を入力するだけで解析を開始できる。本稿では風況予測ソフトウェア MASCOT に用いられている技術とその解析例について紹介し、その有用性を示した。その結論は、以下のようになる。

- 1) 非線形気流解析モデル MASCOT Basic を竜飛ウインドパークに適用し、灯台における観測データから 10 機の風車位置における風況を予測した結果から、線形モデル WAsP による年平均風速の予測誤差の 14.2% に比べ、5% 以下に低下した。
- 2) 力学・統計的局所化手法を用いることにより、気象モデルによる解析結果と非線形気流解析モデル MASCOT Basic の予測結果から、観測を行わずに風況精査を行うことが可能となり、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。
- 3) 一般化キャルピエモデルを用いることにより、植物や建物が風況に与える影響を精度よく評価することが可能であり、東京都江東区新木場アメダス地点における年間風況予測は、メソスケール気象モデルによる予測に比べ、予測誤差が大きく低下した。
- 4) 熱帯低気圧の年最大風速は、MASCOT Basic とモンテカルロシミュレーション手法と組み合わせることにより、精度よく予測することが可能となり、風車の耐風安全性設計に大きく貢献した。

風況予測技術はこの 10 年間大きな進歩を遂げている。90 年代に広く使われた線形風況予測モデルを第 1 世代風況予測モデルと呼ぶのであれば、本稿で紹介した複雑地形や植

生などを考慮できる非線形風況予測モデルは第 2 世代風況予測モデルと呼ぶことができる。さらに、第 2 章と第 3 章に紹介した LES 解析や気象シミュレーションに基づく非定常風況予測モデルは第 3 世代と言えよう。現在開発中の MASCOT は、非定常風況予測に加え、大気安定度や風車の後流を動的に考慮できる第 4 世代風況予測モデルを目指しており、その実用化が期待されている。

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) 石原孟: 非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその実用化, 日本流体力学会誌, 第 22 巻, 第 2 号, pp.387-396, 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, ファフックバン, 高原景滋, 銘苅壮宏: 風力発電設備の風応答予測に関する研究, 第 19 回風工学シンポジウム論文集, pp.175-180, 2006.
- 7) H.P. Frank et al., The Numerical Wind Atlas - the KAMM/WAsP Method, Risø National Laboratory, 2001.
- 8) 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, No.808/I-74, pp.147-162, 2006.
- 9) 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.
- 10) 嶋田健司, 藤永崇志, 石原孟: 地域気象モデルと非線形風況予測モデルを用いた複雑地形下の風況予測, 第 27 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.249-252, 2005.
- 11) 榎木康太, 石原孟: 一般化キャルピエモデルの提案と都市域における風況予測への応用, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 1, pp.28-47, 2012.
- 12) IEC 61400-1, "Wind turbines-Part 1 Design requirements", Ed.3, 2005.
- 13) 石原孟, 山口敦: モンテカルロシミュレーションと MCP 法を用いた混合気候における極値風速の予測, 日本風工学会論文集, Vol.37, No.3, pp.105-116, 2012.