

CFDと風力開発

石原 孟^{*1}
飯塚 悟^{*2}

1. はじめに

2010年までに風力発電が300万kWとする政府の目標を実現するために、風力開発は急速に拡大している。2003年度末には風力発電の導入量は68万kWに達し、全国各地には735基の大型風車が設置されている。現在日本における風力発電導入量は世界第8位、国内における風力発電産業も形成されつつある。

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、風力開発を成功させるためには開発対象地点における精度の高い風況予測は不可欠である。それに加え、風力発電の出力が風速に応じて変動するために、風力発電導入量の増加に伴い、電力システムの安定性の維持または各種電源の経済的な運用のために数分先から1日先の風力発電量を精度よく予測するニーズも急速に増えている。

本報では数値流体解析CFD(Computational Fluid Dynamics)を利用した風況予測の現状を概説し、10年後の風力開発におけるCFD利用を展望する。

2. 期待されているCFD技術

風力開発の事業性に影響を与える要素として

工事中道路の有無、送電線までの距離、土地利用の状況、風況など様々な条件があり、中でも風況予測の精度が風力発電事業に与える影響は最も大きい。そのため、風力開発を行う際にはまず開発対象地域のある1、2箇所で1年間の風況観測を行い、そして、これらの観測データを基に、風況予測モデルを用いて、風車設置地点における風配、風速の発生頻度並びに年間発電量を予測し、風力発電事業の採算性を評価する。従って、風況予測モデルの精度は風力発電事業を大きく左右し、その予測精度の向上は極めて重要である。

風況予測手法として、現在欧州で開発された線形風況予測モデルWAsPは最も広く利用されている。このモデルの特長としては流体力学の基礎方程式であるナビエ・ストークス方程式を線形化することにより、地形、地表面粗度による風速の増減効果、建物などの障害物の遮蔽効果を線形的に評価することを可能にし、少ない計算時間で安定した風況予測を実現している点である。しかしながら、WAsPはデンマークのような比較的平坦な地形上の風況予測を想定しているため、わが国のような急峻で複雑な地形に適用した場合にはその予測精度は著しく低下することがある。

この問題を解決するために、剥離を伴う急峻な地形上の複雑流れ場を予測できるCFDをベースとする非線形風況予測モデルの開発が期待され、またCFD技術と天気予報技術とを融合することによ

*1 東京大学大学院 工学系研究科
E-mail : ishihara@bridge.t.u-tokyo.ac.jp
*2 産業技術総合研究所
原稿受付日 平成16年12月2日

り、風観測によらない風況予測や数分先から1日先の発電量予報の実現が求められている。

3. 世界をリードしてきた日本のCFD技術

複雑乱流場におけるCFDの利用について、日本は、建物周辺の複雑乱流場を対象としたLES解析をはじめ、Dynamic SGSモデルの複雑乱流場解析への適用、実用的なLES解析に必要な流入変動風の生成法の開発は、常に世界をリードした研究を行ってきた。現在国内においては剥離を含む複雑地形上の流れ場を精度よく予測できるCFDベースの非線形風況予測モデルはすでに幾つか開発され^{(1)~(6)}、地形、地表面粗度、森林などの植物キャノピが流れ場に与える影響を評価できるようになっている。また複雑地形上の局所風況を予測するための質量保存則に基づく境界処理手法や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が提案され、数km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が実現されている⁽¹⁾。以下、日本で開発された非線形風況予測モデルによる解析例を紹介する。

図1には $k-\epsilon$ モデルを用いた非線形風況予測モデルにより求められた孤立峰周りの3次元流線を示している。山背後に回り込んだ流線は、山の風下斜面に生じた上昇流にのって山頂まで持ち上げられた後に下流方向に流れていく様子が捉えられている⁽²⁾。

図2には孤立峰の中心断面における平均速度成分 U と乱流エネルギーの鉛直分布を示す。孤立峰の風上麓での風速の減少や山頂での流れの増速、更に山背後の流れの剥離とそれに伴う乱れの増大などがよく再現され、風洞実験から得られた値ともよく一致している。また標準 $k-\epsilon$ モデルの結果に比べ、Shihの非線形 $k-\epsilon$ モデルによる解析結果がより実験値に近いことが分かる。これは、非線形 $k-\epsilon$ モデルがレイノルズ応力の非等方性を考慮したことによるものである。

このようなレイノルズ平均型乱流モデルを用

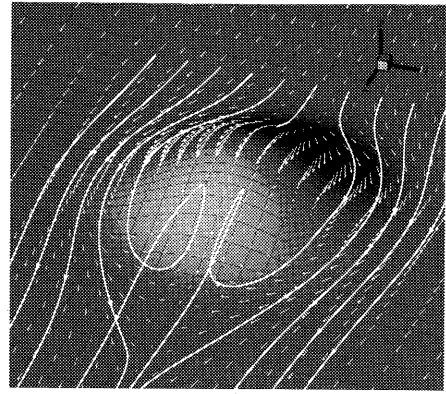


図1 孤立峰周りの3次元流線⁽²⁾

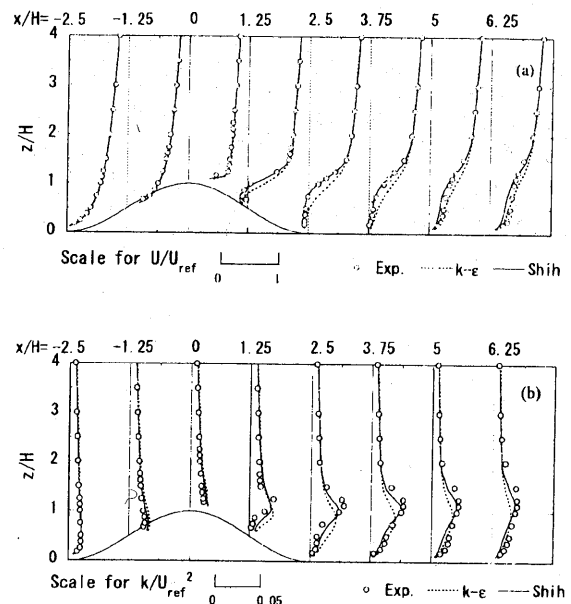


図2 孤立峰の中心断面における平均速度成分 U と乱流エネルギーの鉛直分布⁽²⁾

いたCFD解析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ことが分かる。しかし、山の背後の乱流場における非定常特性を求めるにはLES解析が必要である。図3には同じ形状の孤立峰に対してLESモデルによる3次元非定常計算の結果を示す。孤立峰の2分の1の高さにおける水平断面内での瞬間風速ベクトルを示し、孤立峰の背後の流れは風直角方向に蛇行していることが分かる。このような蛇行はカルマン渦に起因するものと乱流境界層中の風直角方向の風速変動に起因するものがある。

図4には2次元尾根まわりの瞬間的な流れパ

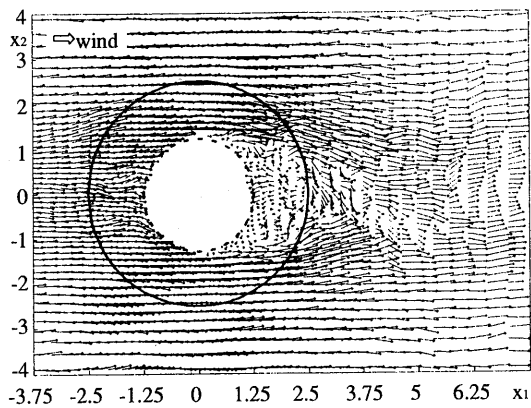


図3 孤立峰の2分の1の高さにおける水平断面内での瞬間風速ベクトル

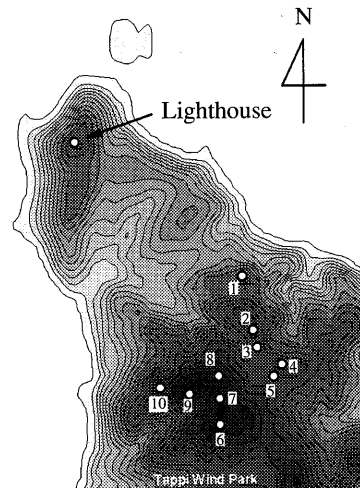
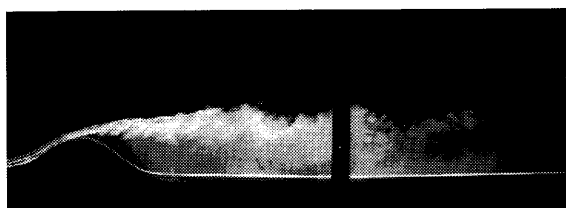
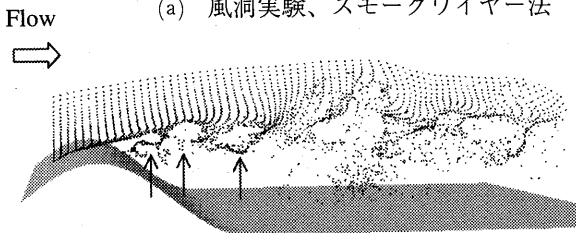


図5 竜飛ウインドパーク内の風車の配置図



(a) 風洞実験、スモークワイヤー法



(b) RIAM-COMPACTによる数値シミュレーション、パッシブ粒子追跡法

図4 2次元尾根まわりの瞬間的な流れパターン⁽⁴⁾

ターンの解析例を示す⁽⁴⁾。数値シミュレーションの結果は風洞実験により可視化された流れの挙動をよく再現していることが分かる。すなわち、流れは2次元尾根の頂部付近で剥離し、剥離したせん断層は孤立した渦に巻き上がっている(数値シミュレーションの結果図4(b)の矢印を参照)。これらの孤立した渦は次々に合体して剥離バブルを形成し、ここから大規模渦が放出されて流下している。結果として、尾根背後の流れは複雑乱流場を呈している。

山岳地帯に設置された風車はこのような風速変動により大きく振動することがあり、山岳地帯における風車の耐風安全性や耐用年数などを考える場合にはLESモデルを用いた風況予測技術が有用なツールとなることが分かる。

4. CFD技術利用の現状と課題

CFDをベースとする非線形風況予測モデルはすでに風力開発の現場で利用されている。その一例として、非線形風況予測モデルMASCOT (Microclimate Analysis System for Complex Terrain)を用いた複雑地形上の風況予測結果を紹介する。

青森県の竜飛岬は日本有数の風況のよい場所として知られ、竜飛灯台における年平均風速は10m/sに達している。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5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いる。1997年の観測データによると、ウインドパーク内に設置された10機の風車の設備利用率は大きな差があり、最も高い10号機は最も低い5号機の2.6倍である。この違いを明らかにするために、竜飛ウインドパークから1km離れた灯台で得られた風向・風速データを基にウインドファーム内の各風車周辺の気流分布性状並びに年平均風速を求めた。

図6には、設備利用率が最も低い5号機と最も高い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、風車ハブ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、風車ハブ高

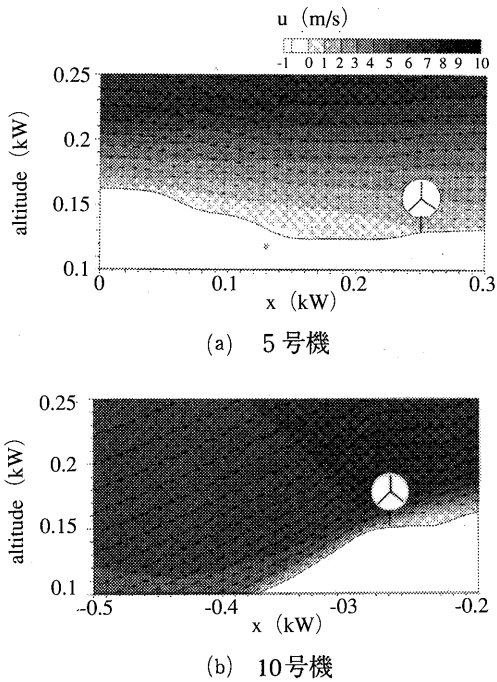


図6 E-W断面内の平均風速ベクトル⁽¹⁾

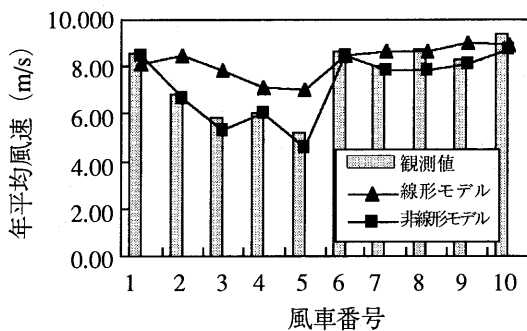


図7 年平均風速の予測値と観測値との比較⁽¹⁾

さにおける平均風速が大きくなっている。竜飛岬の卓越風向は西風であるため、図6に示すような平均風速分布の違いが年平均風速及び発電量に大きな影響を与える。

図7には年平均風速の予測結果を示す。図中の黒四角は非線形風況予測モデルMASCOTによる予測結果、黒三角は従来の線形モデルWAsPの予測結果を表す。非線形風況予測モデルMASCOT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

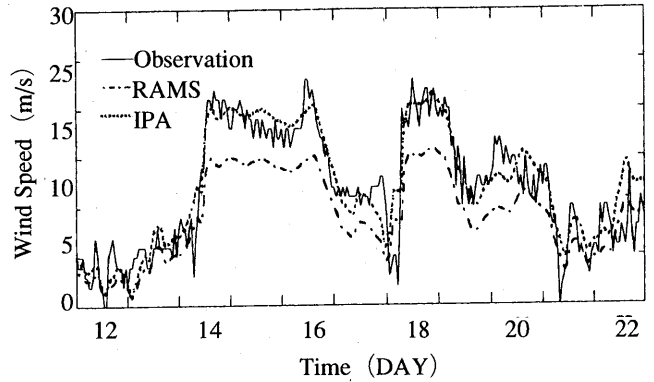


図8 竜飛岬灯台での10分平均風速の時系列⁽¹⁾

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。CFD技術を利用した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。

CFD技術は年平均風速などの風況予測の他、風速のリアルタイム予測や風力発電量の予報にも使われている。図8には竜飛岬灯台における10分平均風速の時系列予測結果を示す。一点鎖線が地域気象モデルのみの予測結果、鎖線がCFD技術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。一方、気象予測モデルにCFD技術を取り入れた場合、年平均風速の予測誤差は3.5%に大きく減少した。

CFD技術に基づく非線形風況予測モデルは予測精度の面において従来の線形モデルに比べ大きく進歩したが、3次元非定常解析が必要とされるLESによる解析は計算時間の面においてまだ課題が残されている。また標高1000m以上の山岳地帯での風速の季節変化と日変化を精度よく予測するためには風速と大気温度の組み合わせを考慮する必要があり、解析ケースが大幅に増える。そのため、レイノルズ平均型モデルを用いた気流解析に対しては更なる計算

時間の短縮が求められる。更にLES解析に関してはSGSモデルの改良による精度の向上も今後必要であり、興味のある方は文献5、6を参照されたい。

5. CFD技術普及の鍵

現在、複雑地形上の風況を予測するにはレイノルズ平均型乱流モデルを用いたCFD解析が主流である。レイノルズ平均型モデルを用いる場合には定常解析が可能であるため、解析時間が短く、平均風速や乱れの標準偏差などの統計量を求めることが可能である。一方、3次元非定常解析が必要とするLESモデルを用いる場合には流れ場における支配的な渦成分の数十周期分のデータを求める必要があり、計算時間はレイノルズ平均型モデルの場合に比べ長い。その反面、レイノルズ平均型モデルで得られない流れ場の非定常的な3次元構造や乱れのスペクトル特性を求めることが可能であり、風車の動解析に直接に利用することが可能である。

3次元非定常解析に基づくCFD技術を普及させるためには並列計算機の普及が不可欠である。並列計算機はすでに大学、研究機関、大手企業で広く使われているが、実務のレベルではその利用がまだ少ない。80年代のワークステーションの出現に伴い、FEM技術が広く普及したと同じように、近い将来PCのような使いやすいOSを持つVPCC(バーチャルPCクラスタ、著者が提唱)が出現すれば、LESモデルに基づくより汎用性の高いCFD技術が普及されると期待している。

6. まとめ

CFD技術の応用は風況や風力発電量の予測に限らず、風車の設計などにも広く使われている。その現状と将来展望については次回紹介されるが、風力開発の分野に限って言えば、10年後に

は並列計算機の普及に伴い、LESに基づくより汎用性の高い風況予測が実現されると共に、CFD技術と気象予測技術との融合により、実際の大気乱流特性を正確に反映したリアルタイムの気流シミュレーションが実現されるであろう。

最近気象の分野では静水圧近似を施さない非静力学モデルの採用が活発であり、現業の天気予報に関する非静力学モデルへの移行が始まっている。10年後の天気予報の水平解像度は全球レベルでは現段階での50kmから5km、極東レベルでは10kmから1kmになると期待される。これにより、台風の進路と強度の予測精度が格段に向上され、工学レベルのCFD技術とのスムーズな結合により1mの水平解像度を持つリアルタイムな気流シミュレーションが可能になり、風況や発電量の予測のみならず、風車の強度評価や寿命予測にも使用され、また風力発電設備のリアルタイムな運用管理にも利用されるであろう。

<参考文献>

- (1) 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.
- (2) 石原孟・日比一喜, 急峻な山を越える乱流場の数値予測, 日本風工学会論文集, No.83, pp.175-188, 2000.
- (3) 村上周三・他, 局所風況予測システムLAWEPSの開発と検証, 日本流体力学会誌, 第22巻, 第2号, pp.375-386, 2003.
- (4) 内田孝紀・大屋裕二, 風況予測シミュレータRIAM-COMPACTの開発, 日本流体力学会誌, 第22巻, 第2号, pp.417-428, 2003.
- (5) 飯塚悟・近藤裕昭, 複雑地形上流れのLES(その1), Dynamic SGSモデルの問題点とハイブリッドモデルの適用, 日本建築学会環境系論文集, 568, pp.41-48, 2003.
- (6) 飯塚悟・近藤裕昭, 複雑地形上流れのLES(その2), 壁面減衰関数を必要としない静的SGSモデルの適用とその最適化の一方策, 日本建築学会環境系論文集, 576, pp.23-28, 2004.