

風力タービン適地選定のためのコンピュータによるマイクロサイティング技術 —実地形を対象にした非定常風況・拡散シミュレータRIAM-COMPACTの紹介—

内田孝紀, 大屋裕二

(九州大学応用力学研究所, 連絡先: takanori@riam.kyushu-u.ac.jp, 092-583-7776)

田辺正孝, 葛生和人, 橋本晃慈

((有)流体物理研究所, 連絡先: tanabe@ifpj.com, 042-373-1264)

1. はじめに

現在, 地球温暖化を防ぐため, CO₂の大幅な削減が緊急課題となっている。これに伴い, クリーンで環境に優しい風力エネルギー(自然エネルギー)の有効利用に注目が集まっている。我が国においても, 数基の風力タービンから, 大型のウィンドファームに至るまで, 風力発電施設は急速に増加している。風力タービンの出力は風速の三乗に比例するため, 風の強い場所, つまり, 風力発電に適した風環境を有する地域を的確に, かつピンポイントに選定することが重要である。特に日本の地勢は欧米とは著しく異なり, 平坦な地形は少なく, 多様性に富む複雑地形がほとんどである。こうした状況下では, 図1に示すように流れの衝突, 剥離, 再付着, 逆流などの風に対する地形効果を考慮した風況予測が求められる。

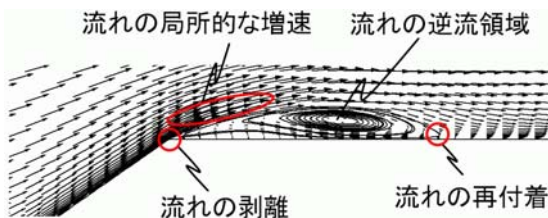


図1 急峻な崖状地形を過ぎる風のパターン,
風に対する地形効果

コンピュータを用いて風況を予測するソフトウェアとして, 欧米ではアメリカのDOE(エネルギー省)とAero VIRONMENT社の共同開発したAVENUと, デンマークのRiso研究所が開発したWAsPが広く利用されている¹⁾。これらのソフトでは, 風況観測データ, 地形条件, 地表面粗度, 風力タービン条件などに基づき, 任意の地点の風況や風力エネルギー賦存量をシミュレーションすることが可能である。但し, これらのソフトは, 欧米の比較的平坦な地形を対象にしているため, 我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。また, 大気安定度を考慮できないこと, 対象地域内における風観測データが必要であることなどの問題点が指摘されている。

上記の社会的・工学的要請を受け, 我々は数(十)km以下の局所域スケールに的を絞り, RIAM-COMPACT(Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain)と称する非定常風況・拡散シミュレータを開発している²⁻⁴⁾。この数値モデルは, (有限)差分法に基づいたFORTRAN(FORmula TRANslator)プログラムである。乱流モデルには, LES(Large-Eddy Simulation)を採用している。LESとは, 比較的大きな渦構造を直接計算し, それより小さい渦構造のみをモデル化する手法である。一方, 現在国内で開発されている風況予測ソフトは, 計算時間の問題からRANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes equation)と呼ばれるレイノルズ平均型乱流モデルを採用している^{5, 6)}。RANSとは, 時間的に変化しない, すなわち, 定常的な流れ場を解くものである。しかしながら, 近年のコンピュータ性能の向上は著しく, 計算時間の問題も劇的に解消されつつある⁷⁻¹⁰⁾。空間平均型の乱流モデルであるLESは, 時々刻々と変化する非定常な風況場, あるいは, 拡散場をシミュレーションすることが可能である。ここが時間平均型の乱流モデルであるRANSと大きく異なる点である。また, モデルパラメータのチューニングにおいても, LESはRANSに比べて極めて少なく, 汎用性に優れた手法である。非定常な風況場, あるいは, 拡散場がいったん得られれば, それらをアニメーションなどで視覚化することで, 風の通り道などの風況特性が容易に理解される。非定常な風況特性を簡単に数値予測し, その結果をアニメーションなどで視覚的に捉えることが出来れば, 多額の費用を要する風洞実験の代替ツールになるとともに, 実用的な設計の一助になることが大いに期待され

る。

こうした観点から、我々はRIAM-COMPACTの実用化へ向けた検討をここ数年間行ってきた。2003年11月、九大TLO(Technology Licensing Organization, 株式会社産学連携機構九州, URL : <http://www.k-uip.co.jp/>)の協力の下、(有)流体物理研究所からWindows搭載のPC(Personal Computer)上で動作するソフトウェアパッケージとして販売される運びとなった。同社では、SCore型PCクラスタによる受託解析サービスも同時に開始された。PCクラスタとは、汎用的なPCをネットワークで複数台接続した並列計算機システムである。最新のPentium4搭載機では、4台程度でベクトル型スーパーコンピュータ1台分の性能を有する⁷⁻¹⁰。並列計算機を使用すれば、非定常な数値シミュレーションの計算時間が劇的に短縮化される。本報では、RIAM-COMPACTの操作性やGUI(Graphical User Interface)環境などについて紹介するとともに、実際の適用例を示す。

2. RIAM-COMPACTの操作性とGUI環境

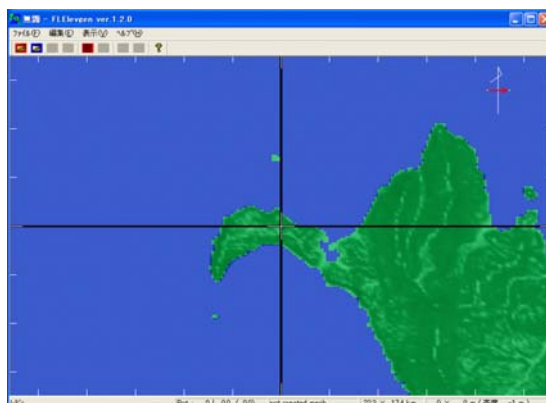
ソフトウェアとしてのRIAM-COMPACTは、①前処理(Pre-processing)、②ソルバー(Solver)、③後処理(Post-processing)のプロセスから構成される。以下では、それぞれの操作方法を説明する。

2.1 前処理ソフトFLElevgen

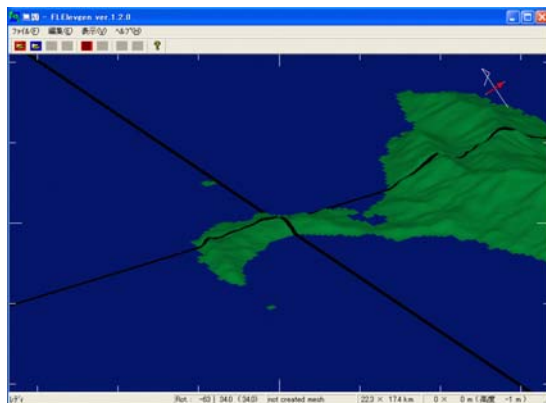
ここでは、前処理(計算に必要なグリッドの生成)を行うFLElevgenの操作方法を説明する。FLElevgenは、OPEN GL(OPEN Graphics Library)という汎用API(Application Program Interface)を利用したソフトである。グリッドデータは国土地理院の数値地図50mメッシュ(標高)に基づいて生成する。これは、国土地理院が刊行している2万5千分1地形図に描かれている等高線を計測してベクトルデータを作成し、それから計算によって求めた数値標高モデル(DEM: Digital Elevation Model)である。収録されているデータは標高のみで、道路や行政

界などの地図要素は含まれていない。標高点の間隔は南北方向に1.5秒、東西方向に2.25秒であり、実距離では約50mである。標高値は5桁の数値で記録されているが、1桁目(0.1mの位)は0で切り捨てられている。例えば、標高1000mであれば「10000」である。最小単位は「m」である。海部には「-9999」というコードが振られている。販売元は(財)日本地図センターであり、全国が3枚のCD-ROMに収められている。CD-ROMは各7,500円(税込)であり、それぞれの収録範囲は表1に示す通りである。

FLElevgenの操作方法について説明する。PCのデスクトップ上に実行バイナリのFLElevgen.exeのショートカットを作成しておき、これをダブルクリックして起動する。FLElevgenの操作はウィンドウのプルダウンメニュー(pull-down menu)から行う。CD-ROMに同封されている標準地域メッシュ・コード一覧図に基づき、対象地域の標高データを入力する。例えば、図2に示す鹿児島県野間岬の場合



(a)上から眺めた様子



(b)鳥瞰図

図2 標高数値データを入力したウィンドウの様子、鹿児島県野間岬の場合

日本-1	北海道(北方を除く)
日本-2	東北・関東・ 北陸・中部(小笠原諸島含む)
日本-3	中部・近畿・中国・ 四国・九州(沖縄・南西諸島含む)

表1 CD-ROMの収録範囲

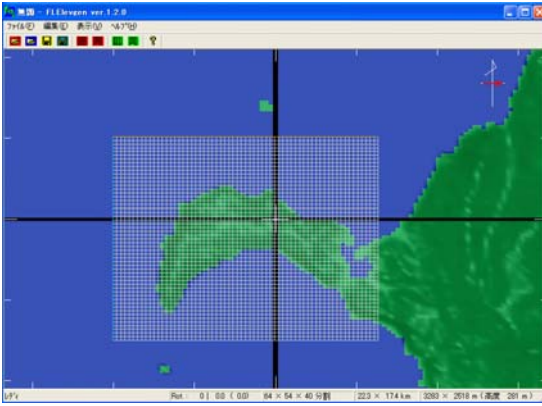


図3 3次元構造格子(初期メッシュ)の作成,
上から眺めた様子

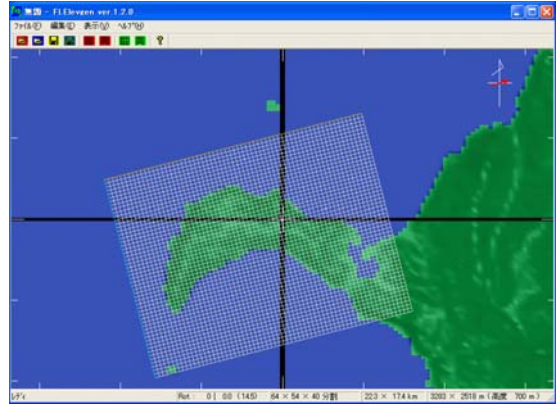


図5 3次元構造格子を回転させた場合, 上から眺めた様子, 右上の赤い矢印が風向を示す

には、473000.MEM, 473001.MEM, 473010.MEM, 473011.MEMである。標高数値データを入力したウィンドウの様子を図2に示す。ウィンドウに表示される地形や、後述する生成したグリッドは、マウスによる拡大縮小、平行移動、回転などの視界操作が可能である。

グリッドデータの生成は以下のように行う。標高データを入力した後、メインメニューの[編集—初期メッシュの作成]を選択すると、ウィンドウ上に十字の白いラインが現れる。この状態からマウスドラックにより水平方向(x-y)の範囲を指定する。水平方向の領域の範囲は数値(単位はm)で指定することも可能である。この一連の作業は何度でも繰り返して行うことが可能である。以上の操作により、図3に示すような水平方向には直交で、鉛直方向には地形形状に適合した3次元構造格子が自動的に生成される。

FLElevgenでは、水平方向(x-y方向)と鉛直方向

(z方向)におけるメッシュ集中度の編集が可能である。ここでは、鉛直方向の編集について説明する。一般に、風に対する地形効果を精度良く再現するためには、地形近傍にグリッドを引き付ける、すなわち、グリッドを集中させる必要がある。この作業はメインメニューの[編集—メッシュ集中度(k方向)]を選択して行う。鉛直方向の編集作業を行ったグリッドの様子を図4に示す。この作業も、ユーザーはマウス操作により対話的に何度でも繰り返して行うことが可能である。

FLElevgenでは、任意の風向設定も可能である。すなわち、地形に対してグリッドを任意に回転させることができる。これにより、任意の風向を対象にしたシミュレーションが可能になる。図5にグリッドを回転させた例を示す。図中右上に表示されている赤い矢印が風向を意味している。

生成されたグリッドに対して、マウス操作により領域内の任意の標高データを強制的にゼロにすることが可能である。これは、計算を安定に進行させるため、対象地域に関係の無い隅部に位置する地形を削除する際などに非常に有効である。

上記のように生成されたグリッドデータは、後述するソルバーのRIAM-COMPACTに入力するためのデータと、後処理ソフトのFLScopeで使用するためのデータとして保存される。

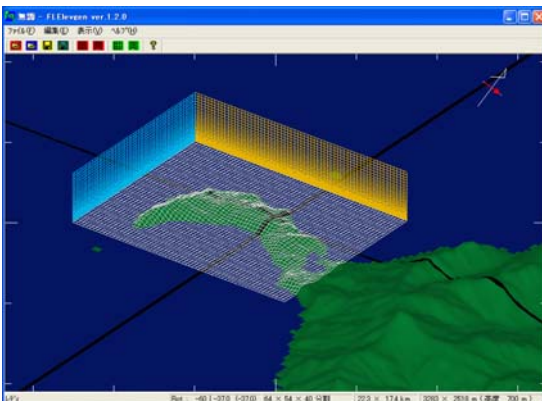


図4 地表面付近に初期メッシュを
引き付けた様子, 鳥瞰図

2.2 ソルバーRIAM-COMPACT

RIAM-COMPACTの主な特長を以下に示す。詳細は<http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/windeng/takanori/>を参照して頂きたい。

1) 国土地理院の標高数値データに基づいて複

雑地形を再現する際、シグマ座標系のコロケート格子を採用している。また同時に、流体の保存性に優れた差分スキームを用い、高精度な数値シミュレーションを実現している。

- 2) 直交座標系のスタガード格子に基づいたRIAM-COMPACTでは、建物群あるいは市街地の風環境シミュレーションが可能である。これについては別の機会に報告する。
- 3) 乱流モデルのLESを採用することで、非定常な高レイノルズ数複雑乱流場を解析することが可能である。非定常に変化する風況場が得られるため、風力タービンに対する気流変動の影響や、複数台の風力タービンにおける後流の干渉問題を調査することも可能である。また、風力タービンの特性値であるパワーカーブやスラスト係数から、発電量などを予測することも可能である。
- 4) 種々の大気安定度(中立時, 不安定時, 安定時)を考慮した計算が可能である。特に安定時の場合には、今後“おろし風”や“だし風”などの局地強風を利用した風力発電が注目される。これに関して、高精度な風況調査が可能である。
- 5) 地域気象モデルを利用した広域スケールの気流場シミュレーションを行い、その解析結果をRIAM-COMPACTの流入気流条件として用いることができる。これにより、狭域風況場のリアルタイムシミュレーションが可能になる。これは大型ウィンドファーム建設後の日々の発電量予測システムなどに極めて有効である。
- 6) 非定常に変化する風況場に基づき、大気汚染物質などのスカラー濃度の拡散場シミュレーション(大気環境アセスメント)が可能である。
- 7) 入力データや境界条件を変更することで、風力タービンなどのブラフボディ周辺流れのDNS(Direct Numerical Simulation), あるいは、LESが可能である。

以下では、ソルバーの実行方法を説明する。ソルバーはコマンドプロンプトから実行する。ユーザーは数個のパラメータを指定するのみで良い。具体的には、ファイル名“infile.dat”と“para.dat”の二つのファイルを編集する。“infile.dat”では、前処理ソフトFLElevgenで生成したメッシュデータのファイル名と、継続計算するためのフィールドデータのフ

イル名を指定する。“para.dat”では表2に示すパラメータの設定を行う(図6を参照)。

UVEC	流れ方向の風速(m/s). 今の場合には, 5(m/s)である.
BEKI	べき乗則の指数. 今の場合には, 1/7乗則である.
NSTEP	計算のステップ数. 今の場合には, 10000ステップである.
NSOR	計算の進捗状況をディスプレイに出力する間隔. 今の場合には, 10ステップおきに出力する.
ICON	計算を初期から始めるのか, あるいは, 継続するのかを示すパラメータ. ICON=0は初期からの計算, ICON=1は継続計算を示す.
IPROG	可視化ソフトFLScopeに入力するためのデータの出力間隔. 今の場合には, 100ステップおきに出力する.

表2 ソルバーに入力する各種パラメータ

“infile.dat”と“para.dat”の二つのファイルの編集が終了すると、後は“go”と入力すれば計算が開始される。図6に実際のディスプレイの表示を示す。

```

C:¥RIAM-COMPACT¥demo>go
C:¥RIAM-COMPACT¥demo>3dtopo-win.exe

////////////////////////////////////
//                               //
// ==<< Welcome to the RIAM-COMPACT ! >>== //
//                               //
// (Research Institute for Applied Mechanics, //
// Kyushu University, //
// Computational Prediction of Airflow over //
// Complex Terrain) //
//                               //
// # LES of airflow over complex terrain //
// # Generalized curvilinear collocated grid //
// # Windows edition : Ver.1.0 //
// # Max grid number = 181(x)*181(y)*61(z) //
//                               //
//                               T.Uchida & Y.Ohya //
//                               //
////////////////////////////////////
Input file name check!
File name of input grid data = grid.dat
File name of input field data = 3d-field.dat
Continue(1) or not(2) ?
1

*****
Grid data reading !
Complete !
*****

Wind speed (m/s)           =           5.0
Index number of power law =           7.0

```



```

Step number of calculation =      10000
Step number of display      =         10
Step number of FLScope3D    =         100
Mesh points NX, NY, NZ      =         65          55
41
Total mesh points NX*NY*NZ =      146575
Calculation condition       = from the specified time
Continue(1) or not(2) ?
1

```

```

*****
Field data reading !
Complete !
*****

```

```

*****
Time= 50.020 Uin(m/s)= 5.0 lstep= 10
Iteration number of Poisson equation= 1
Root mean square error= 3.22965705444747D-004
*****
Time= 50.040 Uin(m/s)= 5.0 lstep= 20
Iteration number of Poisson equation= 1
Root mean square error= 3.25716635494464D-004
*****

```

図6 ソルバーを実行した様子

2.3 後処理ソフトFLScope

ここでは、前処理ソフトのFLElevgenで作成したグリッドデータと、ソルバーのRIAM-COMPACTから出力されたフィールドデータを用いて、計算結果を視覚化する後処理ソフトFLScopeの特長や操作方法について簡単に説明する。

FLScopeは前処理ソフトのFLElevgenと同様、OPEN GLという汎用APIを利用した流れ場の可視化ソフトである。このソフトは、流体計算における後処理に特化しており、また計算機に対する負荷が極めて小さいのが大きな特長である。実行バイナリのファイルサイズは600KB程度である。起動方法

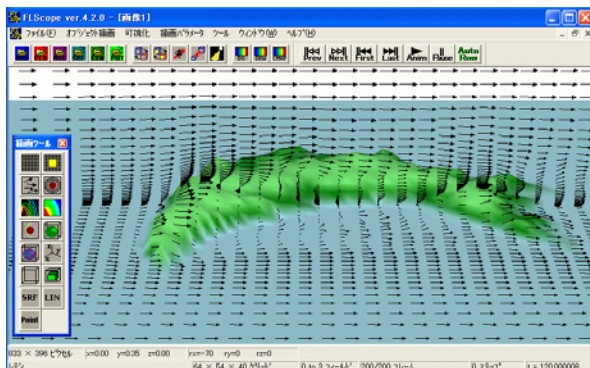
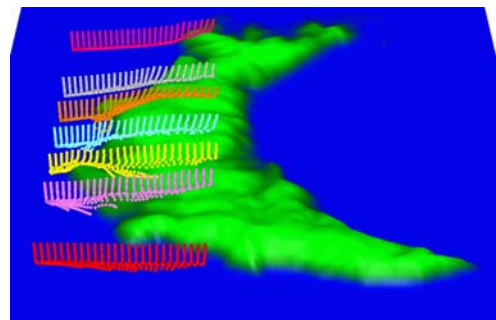


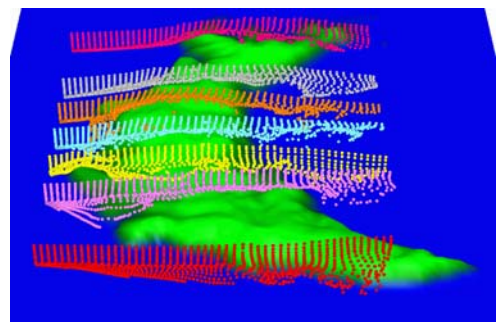
図7 FLScopeのウィンドウの様子

や操作方法は、FLElevgenと基本的に同じである。つまり、PCのデスクトップ上にFLScope.exeのショートカットを作成しておき、これをダブルクリックして起動する。FLScopeの操作はウィンドウのプルダウンメニューから行う(図7を参照)。

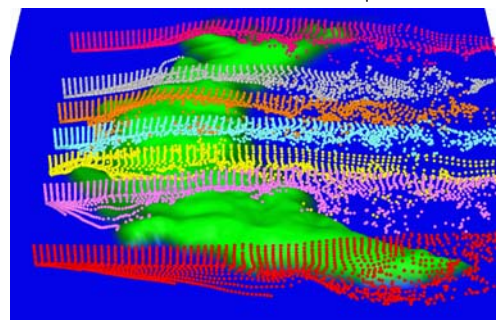
ソルバーから出力される各節点上の変数の数は、風速3成分、圧力、温度、スカラー濃度、基本物理量から派生する渦度や圧力のラプラシアンなど5~7つ程度である。FLScopeは、計算メッシュ、速度ベクトル、等値線、カラーシェーディング、等値面、流線、パーティクルパス、ボリュームレンダリング、サーフィスパスレンダリングなど、流体シミュレーションにおける可視化手法は全て網羅されている。また、数多くの表示オプション(例えば、速度ベクトル表示における矢羽の開き角度の変更など)が用意



(a)無次元時間T



(b)無次元時間T+ΔT₁



(c)無次元時間T+ΔT₂

図8 パッシブ粒子追跡法の鳥瞰図、北風

されており、ユーザーの目的に応じてきめ細やかな可視化が可能である。前処理ソフトのFLElevgenと同様、マウスと簡単なキーボード操作により、画面表示を見ながら対話的に可視化することができる。RIAM-COMPACTにおけるソフトウェアは、その操作性やユーザーフレンドリーなGUI環境において他の製品と一線を画するものである。

以下では、鹿児島県野間岬周辺の風況場を例にとり、FLScopeを用いた代表的な可視化例を紹介する。FLScopeの詳細な操作方法や、種々の流れ場の可視化例については、文献¹¹⁾を参照して頂きたい。

RIAM-COMPACTは、乱流モデルLESに基づいており、時々刻々と変化する非定常な風況場、あるいは、拡散場をシミュレーションすることが可能である。非定常な風況場は、図8に示すパッシブ粒子追跡法で視覚化するとその風況特性が容易に理解される¹²⁾。図8では、流れの衝突、剥離、再付着、逆流などの風に対する地形効果を含む複雑な風の流れが明確に再現されている。また同時に、他の地域よりも局所的に風が増速している場所、すなわち、風の道なども観察される。これらはアニメーションを作成して眺めることでさらに臨場感が増し、風況特性の把握に役立つものと考えられる。FLScopeでは、このようなアニメーションの作成も容易に行うことができ、これらのファイルはプレゼンテーションの資料などにも有効に活用できる。図9には、地形近傍の速度ベクトル図と、流れ方向の速度成分のカラーシェーディングを重ね合わせた例を示す。カラーシェーディングの赤い地域が周りに比べて局所的に風が増加していることを意味し、一方、青い地域が周りに比べて局所的に風が減速、あるいは、逆流していることを意味する。このよ

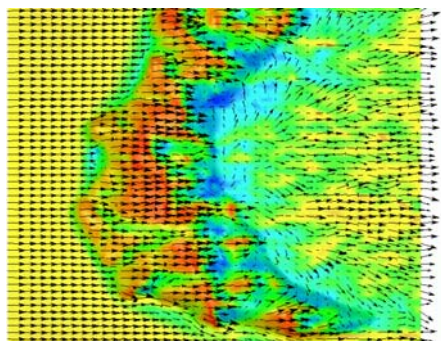


図9 地形近傍の速度ベクトル図と、流れ方向の速度成分のカラーシェーディングを重ね合わせた例、北風

うに、異なる物理量を重ね合わせて可視化することも、流動現象を理解する上では非常に重要である。FLScopeでは、このような可視化も極めて簡単に行うことができる。

野間岬(最大標高143m)では、九州電力(株)の風力タービンが10基設置され、実証試験が行われている(図10を参照)。以下では、風洞実験や実際の風観測データとの比較などについて紹介する。

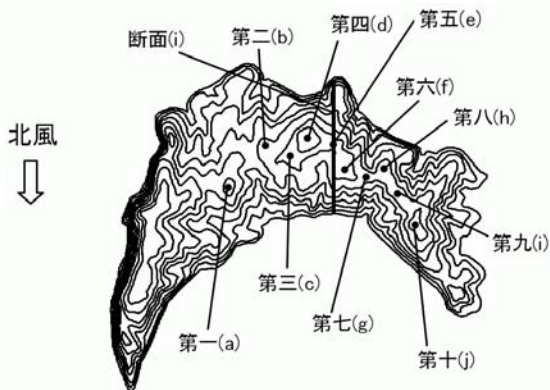


図10 野間岬における風力タービンの設置位置

時間平均場に関して、図10に示す実線(断面(i))を含む鉛直断面内の速度ベクトル図を図11に示す。図中には風力タービンの位置を表示している。風力タービン高さにおいて風速の減少は見られず、適切な場所に設置されていることが分かる。

図10に示す風力タービン設置位置での数値シミュレーションと風洞実験の比較を図12に示す。ここでは(d),(e)点のみを示す。縦軸は地形表面からの高さレベルを実スケールで表示している。RIAM-COMPACTによる数値シミュレーションと風洞実験は全高さレベルで極めて良好な一致を示し

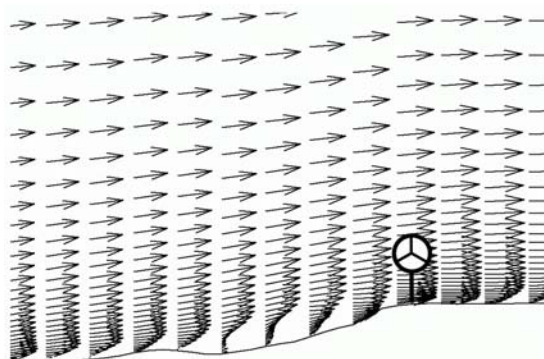


図11 第五発電所(図10(e))を含む鉛直断面内の速度ベクトル図

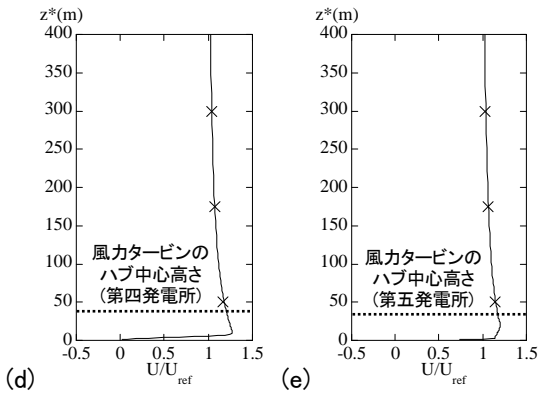


図12 流れ方向の平均速度プロファイルの比較,
 実線:RIAM-COMPACTの結果,
 シンボル:風洞実験の結果

ている。特に、風力タービンのハブ中心高さ付近では、両者ともに風が局所的に増速している。

第一～五発電所における平均風速の増速率に関して、野外観測値(2003年1月の北風の平均値)との比較を図13に示す。ここで、第四発電所の平均風速を基準に表示している。RIAM-COMPACTによる数値シミュレーションは、風洞実験と野外観測値と良好な一致を示しており、地形起伏の影響を受けた増速率の変化が捉えられている。

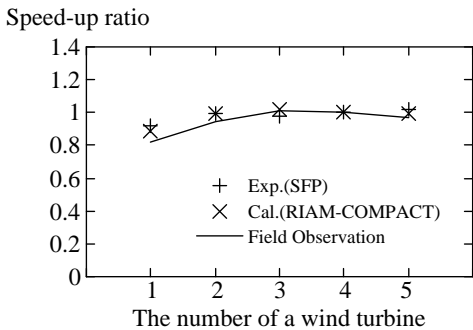


図13 第一～第五発電所における平均風速の増速率の比較, 第4号基が基準, 実測では風速2～10m/sの平均値

3. おわりに

狭域の実地形を対象にした非定常風況・拡散シミュレータRIAM-COMPACTの操作性やGUI環境を紹介するとともに、実際の適用例を示した。

既に、流体テクノ有限会社、三井造船株式会社、石川島播磨重工業株式会社、三菱重工業株式会社、九州電力株式会社、西日本技術開発株式会

社に対して、RIAM-COMPACTの一部提供、受託解析、ソフトウェア販売を実施している。

将来、建物群や市街地向けの小型風力タービンが普及していくことが予想されるが、この適地選定を目的としたRIAM-COMPACTも既に完成している。これはCAD(Computer Aided Design)データの一つであるDXF(Data eXchange Format)形式データを用い、前処理ソフトFLMaskgenで自動的にグリッドを生成し、風況シミュレーションを行うものである。これについては別の機会に報告する。

謝 辞

九大TLO(株式会社産学連携機構九州)の平田徳宏氏には、RIAM-COMPACTの実用化に関連して、多くの助言と協力を頂いた。九州電力(株)には、野間岬ウインドパークの資料をご提供頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 今村博, ターボ機械, 第29巻, 第9号, 2001, pp.21-27
- 2) 内田孝紀, 大屋裕二, 日本流体力学会誌“ながれ”, Vol.22, No.5, 2003, pp.417-428
- 3) 内田孝紀, 大屋裕二, 九州大学応用力学研究所所報, 第126号, 2004, pp.9-15
- 4) 内田孝紀, 大屋裕二, 九州大学応用力学研究所所報, 第126号, 2004, pp.17-22
- 5) 村上周三, 持田灯, 加藤信介, 木村敦子, 日本流体力学会誌“ながれ”, Vol.22, No.5, 2003, pp.375-386
- 6) 石原孟, 日本流体力学会誌“ながれ”, Vol.22, No.5, 2003, pp.387-396
- 7) 内田孝紀, 大屋裕二, 九州大学応用力学研究所所報, 第125号, 2003, pp.5-20
- 8) 内田孝紀, 大屋裕二, 九州大学応用力学研究所所報, 第126号, 2004, pp.1-8
- 9) 内田孝紀, 大屋裕二, 九州大学情報基盤センター年報, 第4号, 2004, pp.19-30
- 10) 内田孝紀, 大屋裕二, 九州大学情報基盤センター広報, Vo.4, No.1, 2004, pp.1-14
- 11) 内田孝紀, 九州大学情報基盤センター広報, Vol.3, No.2, 2003, pp.135-148
- 12) 内田孝紀, 大屋裕二, 可視化情報学会論文集, Vol.23, No.7, 2003, pp.58-65