

〔特集〕複雑地形上の風況予測法

風況予測シミュレータ RIAM-COMPACT の開発

風況精査とリアルタイムシミュレーション

Development of the Local Wind Field Simulator RIAM-COMPACT Wind Field Assessment and Real Time Simulation

*九州大学応用力学研究所 内田 孝紀†
Takanori UCHIDA

*九州大学応用力学研究所 大屋 裕二
Yuji OHYA

1. はじめに

日本国内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。こうした状況において、風力タービン設置のための風況精査(適地選定)や、大型ウィンドファーム建設後の局所風況場のリアルタイムシミュレーション(日々の発電量予測)を高精度に数値予測するためには、流れの衝突、剥離、再附着、逆流などの風に対する地形効果を再現することが極めて重要である。

現在、我々は数百mから数(十)km程度まで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)^{1, 2)}と称する風況予測シミュレータを開発している。2章ではこのRIAM-COMPACTの特長を、3章では2次元尾根モデルと実地形モデルを対象にしたRIAM-COMPACTの予測精度の検証を、4章では局所風況場のリアルタイムシミュレーションを目的とし、数(十)km以上の広域スケール(メソスケール)を対象とした地域気象モデルCSU-RAMS

(Colorado State University, Regional Atmospheric Modeling System)³⁾との接続法を、5章ではRIAM-COMPACTの実用化へ向けた検討として、計算機性能(小規模スカラー並列計算機)の最新の知見を報告する。

2. RIAM-COMPACT の特長

我々が開発を進めている風況予測シミュレータRIAM-COMPACTは(有限)差分法に基づいたFORTRANプログラムである。主な特長を以下に示す。詳細な内容については、文献^{1, 2)}を参照していただきたい。

- 1) 国土地理院などの標高数値データに基づいて複雑地形を再現する際、計算機メモリなどのハード面と、対象とする地域に含まれる地形起伏などに応じて以下に示す二つの格子系(座標系)を適宜選択することが可能である。一つは、直交座標系のスタガード格子であり、地形の傾斜角度が極端に大きい場合や、計算機メモリなどが十分でない場合に有効である。ここでは、実地形の起伏形状に関係なく直線的な座標系を設定し、実地形は計算格子の集合体で階段状に近似される。もう一つは、一般曲線座標系のコロケート格子である。これは変換の測度(metric)などの記憶容量が必要であるが、地形近傍の風況特性を高精度に

* 〒816-8580 春日市春日公園 6-1

† E-mail : takanori@riam.kyushu-u.ac.jp

数値予測するには非常に有効である。

- 2) 複雑地形上の非定常な高レイノルズ数複雑乱流場を計算対象とするため、LES (Large-Eddy Simulation) と呼ばれる乱流モデルを採用している。
- 3) 安定時、中立時、不安定時などの種々の大気安定度を考慮した風況予測が可能である。
- 4) one-way nesting に基づいた 2 重ネスティングシステムを導入することにより、多段階的に解像度を上げた同時並行計算が可能である。
- 5) 計算領域の上流側にドライバ部を設定し、ここで非定常流体シミュレーションを行い、ここで得られた乱流場 (変動風) を流入気流条件として用いることが可能である。すなわち、より現実に近い状況 (複雑地形が大気乱流境界層に完全に埋没した状態) を模擬した計算が可能である。
- 6) 安定時、中立時、不安定時などの種々の大気安定度の下で得られた風況場に基づき、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が可能である。

3. 風況精査

ここでは、2次元尾根モデルと実地形モデルを対象にした RIAM-COMPACT による計算結果を示す。計算結果は、逆流と順流が検知可能な SFP (Split-Film Probe) を用いた風洞実験⁴⁾の結果と比較し、RIAM-COMPACT の予測精度について述べる。但し、本報で示す結果は、実際の自然風を対象にしたものではなく、流入気流の乱れや地表面粗度などを伴わない単純化・理想化された状況の下での予測精度 (風に対する地形効果) の検証結果である。

3.1 2次元尾根モデルの場合

本研究の風洞実験は、九州大学応用力学研究所の温度成層風洞を用いて行った。但し、気流の安定度は中立状態とする。この風洞は開放型の吸い込み式で長さ 13.5 m × 幅 1.5 m × 高さ 1.2 m の測

定胴を有する。風速範囲は 0.5 ~ 2.0 m/s であり、主流風速を 1.0 m/s に設定した際の乱れ強さの分布は 0.4 % 程度である。2次元尾根モデルへの近寄り流れとして一様流入条件を課すため、以下に示す二つの工夫を施した。一つは、風洞の上流側床面に高さ 11.5 cm の台座を置き、この上に 2次元尾根モデルを設置した。これは風洞床面に発達する地面境界層の影響を受けないようにするためである。もう一つは、先端に僅かな傾斜を付けた 10 cm のアルミ板をモデル前縁から設置し、そこからの流れの剥離を抑制した。本研究で使用した 2次元尾根モデルの断面は以下の式で記述されるコサイン形状である。

$$z(x) = 0.5h \times \{1 + \cos(\pi x/a)\} \quad (1)$$

2次元尾根モデルは厚さ 0.2, 0.35 mm のプラスチック板とダウ化工機(株)のウッドラックを用いて自主制作した。モデル高さ h は 10 cm とし、実大気スケールの約 1/2000 を想定している。(1)式における地形形状パラメータは $a = 2h$ ($= 20$ cm) とし、急峻な傾斜角度を有する 2次元尾根モデルを対象とする。モデルの主流方向に x 軸を、主流直交方向 (スパン方向) に y 軸を、鉛直方向に z 軸を設定する。モデルの y 軸方向の長さは $L = 9h$ ($= 91$ cm) である。モデル高さ h と風洞高さ $H = 1.2$ m とのブロック比は $H/h = 12$ であり、対応する閉塞率 ($= h/H \times 100$) は 8.3 % である。なお、毛足の長さ $z_r = 5$ mm ($z_r/h = 0.05$) の人工芝をモデル表面とその下流地面上に添付し、気流性状に対する地表面粗度の影響についても検討を行った。この結果は省略する。モデルの設置に関して、 y 方向に 2次元的な流れ場を再現するため、モデルの両端に端板として上流側の角部をとった透明の亚克力 (可視化用) と黒色で塗装したベニヤ板を設置した。気流計測は逆流と順流が検知可能な SFP を用いた。SFP には日本カノマックス(株)のモデル 1288 (ストレート型) を用い、併せて同社の熱線流速計 (1010 CTA ユニット, 1013 リニヤライザ) を使用した。SFP のセンサー部を図 1 に示す。SFP は細い石英ロッドの

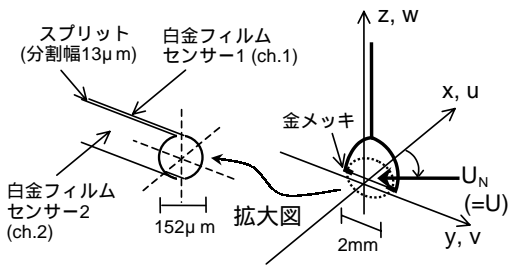


図1 SFPのセンサー部

表面に蒸着させた白金フィルムに2本のスプリット(分割線)をひき,2枚の半円筒形熱膜を形成させたものである。センサー部は直径152 μm,有効受感部長さ2 mm,分割線の幅約13 μmである。

本研究では,SFPの分割面が z 軸と平行になるようにモデルの上方から挿入し,鉛直方向(z)にトラバースしながら主流方向(x)の速度成分(u)のみを測定した。SFPでは,スカラー風速 U_N と風向角度の較正が必要になる。 U_N はそれぞれのフィルムセンサー1,2の出力電圧 E_1, E_2 の和から, u は E_1, E_2 の差から求める。 U_N と u が分かれば, u は(2)式から求めることができる。なお,校正定数の算出にはstattsoftジャパン(株)の統計解析ソフトSTATISTICAおよび(株)ヒューリンクスのグラフ作成ソフトKaleida Graphを用いた。

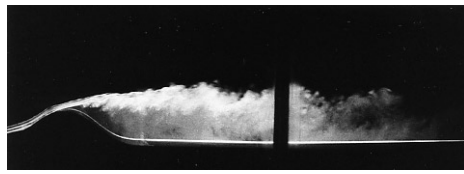
$$u = U_n \cdot \cos \theta \quad (2)$$

電圧値の時系列データはオフセット電圧(シフト電圧)2.5 V,アンプ(ゲイン)1倍,カットオフ周波数200 Hzのローパスフィルターの処理を行い,A/D変換ボードを介してサンプリング周波数500 Hzでパーソナルコンピュータに取り込む。一連のデータ収集には,カノーブス(株)のDSS for Windowsを用いた。これはカノーブス製のA/D変換ボード「ADXM-98シリーズ」を利用し,Windows上でアナログ信号をデジタル信号として取り込むためのアプリケーションである。電圧値の時系列データは学内LANでワークステーションに転送し,そこで速度成分(u)に変換して平均速度プロファイルと乱れ強さの鉛直分布を求め

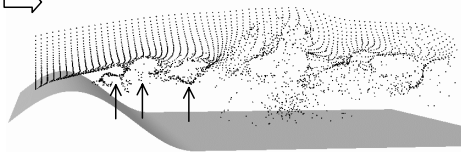
る。各測定点におけるデータ数は50,000個で100 sのサンプリング時間(平均時間)である。一様流入風速は $U = 1.5 \text{ m/s}$ とし,モデルへの風向角度は0度である。モデル高さ $h = 10 \text{ cm}$ に基づいたレイノルズ数 $Re (= Uh/\nu)$ は約 10^4 である。なお,気流風速のモニターやSFPの較正に必要な風速の基準値の測定には,超音波流速計(カイジョー DA-600, TR-90AX型プローブ)を使用した。

数値計算法に関して,本研究では一般曲線座標系のコロケート格子に基づいたRIAM-COMPACTを用い,2次元尾根モデルを過ぎる流れの数値シミュレーションを風洞実験と同一条件で行った。数値計算法の詳細は文献^{1,2)}を参照して頂きたい。計算領域は主流方向(x),主流直交(スパン)方向(y),鉛直方向(z)に $40h (\pm 20h) \times 9h \times 10h$ の空間領域を有し,風洞実験とほぼ同じである。ここで, h はモデルの高さである。格子点数は x, y, z 方向に $260 \times 91 \times 71$ 点である。格子分割に関して, x 方向の格子幅は不等間隔に $(0.04 \sim 1)h$, y 方向の格子幅は等間隔に $0.1h$, z 方向の格子幅は不等間隔に $(3.5 \times 10^{-3} \sim 0.5)h$ である。初期条件には,2次元DNS(Direct Numerical Simulation)の結果(x - z 断面,無次元時間 $t = 100$)を y 方向に一樣に与えた。速度の境界条件に関して,流入境界面は一樣流入条件,側方境界面と上部境界面は滑り条件,流出境界面は対流型流出条件とする。地面は風洞実験と同じ条件を課すため,流入境界面から $17h$ までは滑り条件とし,それより下流にのみ粘着条件を課した。レイノルズ数は風洞実験と同様,モデル高さ h と一様流入風速 U に基づき, $Re (= Uh/\nu) = 10^4$ とした。時間刻みは $\Delta t = 2 \times 10^{-3} h/U$ とした。

2次元尾根モデルまわりの風況パターン(瞬間場)の比較を図2に示す。風洞実験では,スモークワイヤー法により流れ場の可視化を行った。この方法では以下のように流れ場を可視化する。モデルのすぐ上流で高さレベルを変えて数本のワイヤー(0.3 mmのニクロム線)を平行に配線する。これに流動パラフィンとアルミ粉を混ぜたものを



(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2 2次元尾根モデルまわりの風況パターンの比較, 瞬間場, スパン中央断面 ($y=0$)

塗り, ワイヤーに通電して加熱し, 気化した煙で流れ場を可視化する. 照明装置としてスリットを付けた1kWのスライドプロジェクター(株)理化学マスターのHILUX-HR)を風洞上部に3~4台設置し, これからの光でモデルのスパン中央断面($y=0$)を可視化した. カメラによる撮影は標準レンズを用い, 絞りは1.2でシャッタースピード(露出時間)は $1/125$ sとした. 風速は 1.5 m/sで, 気流計測と同じ条件である. 特にモデルの頂部付近で剥離した境界層(剥離せん断層)の挙動に注目するため, 煙がモデル表面近くを流れるようにワイヤー高さを調節した. 一方, 数値シミュレーションでは, パッシブ粒子追跡法により流れ場の可視化を行った. 粒子の放出間隔(無次元時間)は $\Delta t = 0.1$ で合計100コマ(無次元時間 $t = 200 \sim 210$)のデータから成る. 数値シミュレーションおよび風洞実験ともに定性的な流れの挙動は非常に類似している. すなわち, 流れはモデル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2(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(横渦)が放出されて流下している. 結果として, モデル背後の流れは複雑乱流場を呈している.

数値シミュレーションに関して, 時間および主流直交方向(y)の空間平均を行った流れ場に対して描いた流線図を図3に示す. ここで, 時間平均は無次元時間 $t = 200 \sim 300$ で行った. モデルの背後には渦領域が形成されている. その中心は, モデルの頂部から約 $4h$ 下流に位置する. 渦領域の大きさ, つまり, モデルの頂部付近から剥離したせん断層が下流側地面上に再付着する位置はモデルの頂部から約 $8h$ である.

図3に示すa~kの計11点で主流方向(x)の平均速度プロファイル($U = \langle u \rangle$)と乱れ強さ($\sigma_u = \langle u'^2 \rangle^{1/2}$)を評価し, RIAM-COMPACTによる数値シミュレーションとSFPによる風洞実験の比較を行った. その結果を図4(平均速度プロファイル), 図5(乱れ強さ)に示す. ここでは, 紙面の都合上, 幾つかの代表点のみを示す. 実線が数値シミュレーションであり, シンボルが風洞実験である. また, 記号 $\langle \rangle$ に関して, 風洞実験では時間平均を示し, 数値シミュレーションでは時間平均(無次元時間 $t = 200 \sim 300$)および主流直交方向(y)の空間平均を意味する. 変動成分は $u' = u - \langle u \rangle$ で定義される. 数値シミュレーションおよび風洞実験ともに, 横軸は各地点における上空風速 U_{ref} で, 縦軸はモデルの高さ h で正規化した. なお, 縦軸の z^* はモデル表面からの高さを示す. 図4, 図5ともにRIAM-COMPACTによる数値シミュレーションと風洞実験は極めて良好な一致を得た.

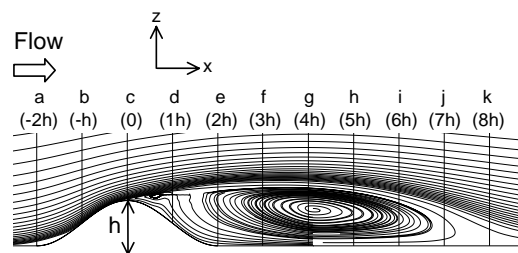


図3 時間平均および主流直交方向(y)の空間平均を行った流れ場に対する流線図, $t = 200 \sim 300$

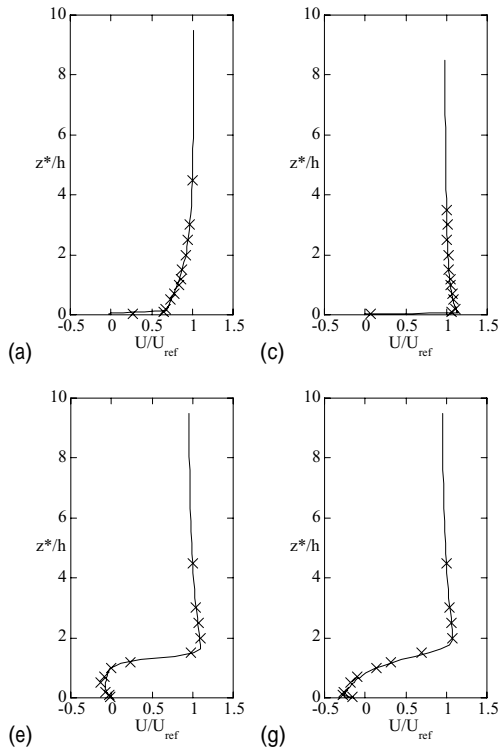


図4 主流方向(x)の平均速度プロファイル(U/U_{ref})の比較, 実線: RIAM-COMPACT による数値シミュレーション, シンボル: SFP による風洞実験

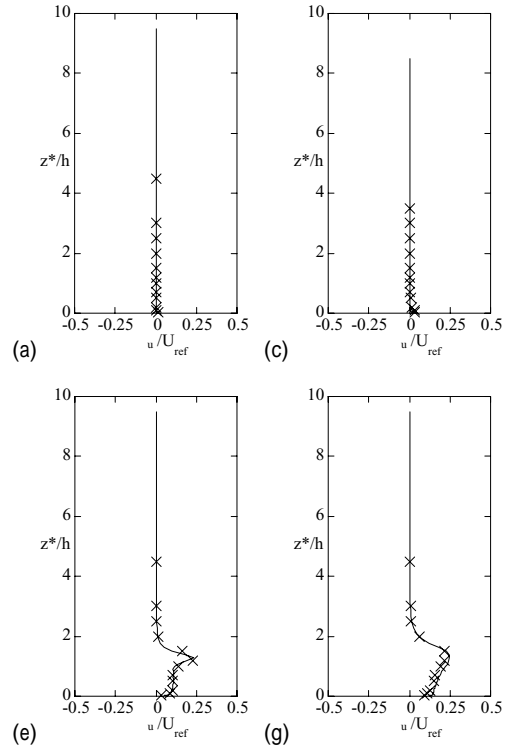


図5 主流方向(x)の乱れ強さ(σ_u/U_{ref})の鉛直分布の比較, 実線: RIAM-COMPACT による数値シミュレーション, シンボル: SFP による風洞実験

3.2 実地形モデルの場合

次に, 実地形モデル上の風況場を対象に行った RIAM-COMPACT の予測精度の検証結果について示す. 対象領域は図6に示す野間岬である. 野間岬は鹿児島県南西部の笠沙(かささ)町に位置し, 岬の西側には傾斜角度 30 度を越える急峻な崖状地形が広がる典型的な複雑地形である. 最大標高は 143 m であり, ここには九州電力の風力発電施設が建設され, 実証試験が行われている(図7を参照).

風洞実験では, 約 1/2500 の野間岬の地形模型(最大模型高さ約 6 cm)を(株)アルテの 3 mm 厚の発砲スチロール(イレパネ材料)と(株)カンペハピオの変成シリコンを用いて自主制作した. 気流計測は, 先と同様, 一様流入条件の下で SFP を用いて行った. 北風を対象とし, 図7に示す実際



図6 野間岬と周辺地勢

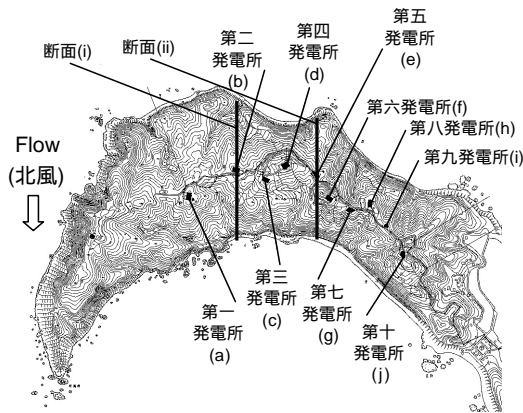


図7 野間岬における風力タービン設置位置
(風洞実験における気流計測位置)

の風力タービン設置位置(計10箇所)で主流方向(x)の速度成分(u)の計測を行った。実験条件などは先の2次元尾根モデルを対象にした場合と同様である。ここで、一様流入風速 $U = 1.5 \text{ m/s}$ と、最大模型高さ $h = 6 \text{ cm}$ に基づいたレイノルズ数 $Re (= Uh/\nu)$ は約 6×10^3 である。

数値計算に関して、計算領域は実スケールで主流方向(x)、主流直交方向(y)、鉛直方向(z)に $12(\pm 6) \text{ km} \times 12(\pm 6) \text{ km} \times 1.43 \text{ km}$ の空間を有する。実地形の形状は北海道地図(株)の10m高分解能デジタル標高データ DEM(Digital Elevation Model, GISMAP Terrain シリーズ)に基づいて作成し、鉛直方向は地表面付近において密になるように不等間隔($\Delta z = 0.5 \sim 143 \text{ m}$)の格子分割とした。格子点数は x, y, z 方向に $251 \times 271 \times 81$ 点である。最大地形高さ $h (= 143 \text{ m})$ と一様流入風速 U に基づいたレイノルズ数に関しては、 $Re (= Uh/\nu) = 6 \times 10^3$ (風洞実験と同じ)、 10^4 を設定した。両者の計算結果はほとんど同じであったので、ここでは $Re = 10^4$ の計算結果のみを示す。時間刻みは $\Delta t = 5 \times 10^{-4} h/U$ とした。その他の境界条件や計算パラメータなどは先の2次元尾根モデルを対象にした場合と同様である。

瞬間場(無次元時間 $t = 100$)に関して、野間岬上の速度ベクトル図を図8に示す。両者ともに、図中の実線は野間岬の輪郭を示している。また、

速度ベクトルのスケールは同じであり、主流方向(x)に7点、主流直交方向(y)に5点おきに表示している。野間岬上では流れは局所的に増速している。これについては後述する。一方下流側では、流れの剥離やそれに起因した逆流域が明確に観察される。

無次元時間 $t = 100 \sim 200$ で時間平均した流れ場に関して、図7に示す実線(断面(i)および断面

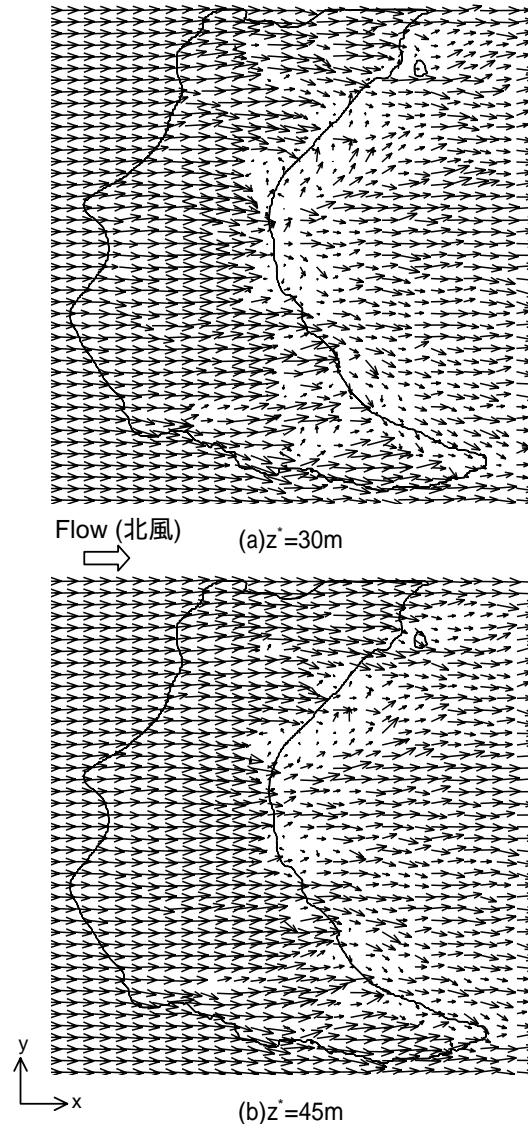


図8 瞬間場($t = 100$)に対する速度ベクトル図、水平断面、図中の実線は野間岬の輪郭を示す。

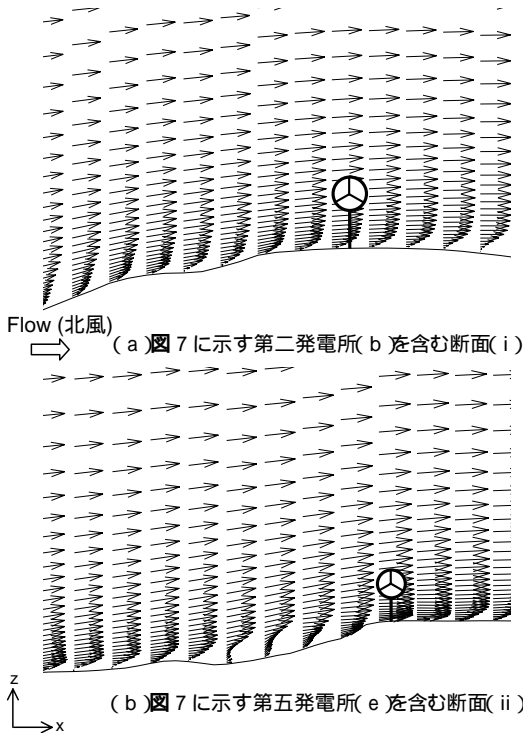


図9 時間平均場 ($t=100 \sim 200$) に対する速度ベクトル図, 鉛直断面

(ii)) を含む鉛直断面内の速度ベクトル図を 図9 に示す. ここで, 図中には風力タービンの位置を表示している. また, 両者の速度ベクトルのスケールは異なり, 主流方向 (x) および鉛直方向 (z) に数点おきに表示している. 両者ともに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7 に示す風力タービン設置位置 ($a \sim j$ の計10点) で主流方向 (x) の平均速度プロファイル ($U = \langle u \rangle$) を評価し, RIAM-COMPACT による数値シミュレーションと SFP による風洞実験の比較を行った. その結果を 図10 に示す. ここでは, 紙面の都合上, 幾つかの代表点のみを示す. 実線が数値シミュレーションであり, シンボルが風洞実験である. また記号 $\langle \rangle$ は, 風洞実験および数値シミュレーションともに時間平均を意味する. 数値シミュレーションでは, 無次元時間

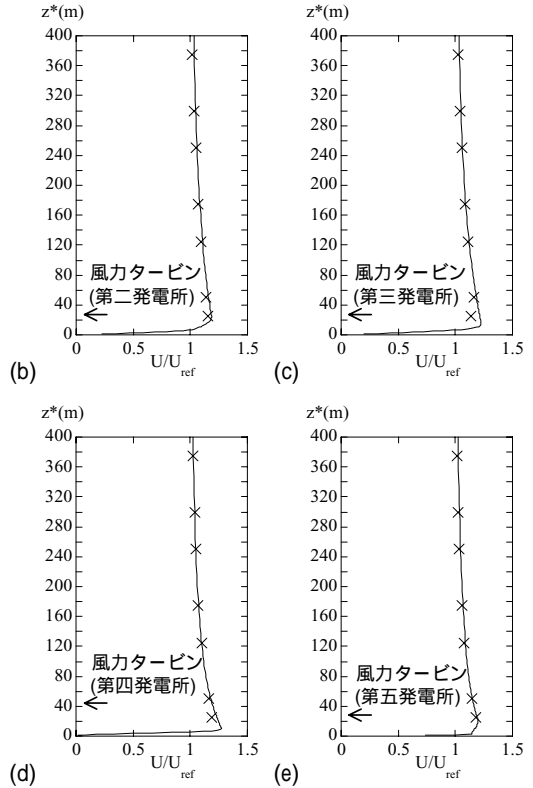


図10 主流方向 (x) の平均速度プロファイル (U/U_{ref}) の比較, 実線: RIAM-COMPACT による数値シミュレーション, シンボル: SFP による風洞実験

$t = 100 \sim 200$ の時間平均である. 数値シミュレーションおよび風洞実験ともに, 横軸は各地点における上空風速 U_{ref} で正規化した. 縦軸は地形表面からの高さスケール $z^*(m)$ で表示している. また図中には, 風力タービンのハブ中心高さを示している. 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において極めて良好な一致を示している. 特に, 風力タービンのハブ中心高さ付近では, 数値シミュレーションおよび風洞実験ともに風が局所的に増速しているのが分かる.

4. 地域気象モデル CSU-RAMS との接続によるリアルタイムシミュレーション

我々は局所風況場のリアルタイムシミュレーションを目的とし, 数(十)km 以上の広域スケール,

いわゆる、メソスケールを対象とした地域気象モデル CSU-RAMS (Colorado State University, Regional Atmospheric Modeling System)³⁾ と、風況予測シミュレータ RIAM-COMPACT との接続法を検討している。ここでは、その手法と適用例を紹介する。

CSU-RAMS は Pielke らにより開発され、広域スケール(メソスケール)の大気環境予測シミュレーションを目的とした気象モデルである。支配方程式は圧縮性の非静力学方程式系から構成されている。CSU-RAMS の大きな特徴として以下のことが挙げられる。CSU-RAMS では様々な種類のオプションが用意されており、各ユーザが目的に応じて容易に設定と変更が可能である。本研究では、v.4.3.0 を用い、雲や降水過程は考慮せず、気流場のみを再現計算を行った。種々のオプションのうち、特に以下に示す二つのオプションを有効に利用することとした。一つは、総観規模の気象場を計算に反映させるため、4次元データ同化手法(FDDA, Four-Dimensional Data Assimilation)を用い、気象庁のGPV(Grid Point Value)データを計算に取り入れる。本研究では、メソスケールスペクトルモデルMSM(Mesoscale Spectral Model)のデータを用いる。もう一つは、2重ネスティングシステム(two-way nesting)を導入し、広域から局所域へスケールを段階的に絞り込む。

本研究では、九州大学新キャンパス移転地上(図11(b)に黒色で塗りつぶした地域)の風況場を対象とする。移転地は福岡市西区の元岡・桑原地区(糸島半島中央東寄り)に位置し、周辺地勢の特徴として西側に244mの火山、南西に365mの可也山が位置している(図14を参照)。この目的に対し、全体で三段階の計算領域を設定して計算を行う。ここでは便宜上、空間スケールの大きい順にグリッド1、グリッド2、グリッド3と呼ぶこととする。CSU-RAMS では4次元データ同化手法を導入し、2重ネスティングシステムにより同時かつ双方向的にデータをやり取りしながらグリッド1、グリッド2の計算を行う。グリッド

2の計算結果から、移転地周辺の卓越風向や速度の鉛直プロファイルなどの気流特性を抽出し、これに基づいてグリッド3を設定し、一般曲線座標系のコロケート格子に基づいたRIAM-COMPACTにより計算を行う。

CSU-RAMS の計算領域(グリッド1, グリッド2)を図11に示す。グリッド1は総観規模の気象場を計算に反映させるため、北部九州を含む領域を設定する。グリッド2は糸島半島と脊振山地を含む領域である。グリッド1, グリッド2における計算パラメータなどを表1に示す。ここで、鉛直方向のメッシュ分割については、グリッド1, グリッド2とも同じとし、上方に向かって1.15倍の刻みで増加させた。最小メッシュ幅は100m, 最大メッシュ幅は1,000mである。計算は2002年7月1日(JST 9時)~2002年7月3日(JST 9時)の48時間について行った。ここで、最初の24時

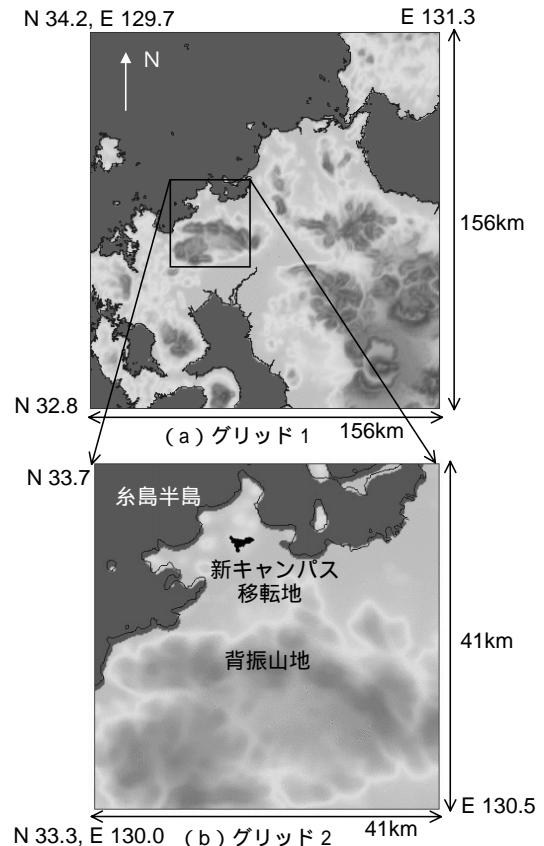


図11 CSU-RAMSの計算領域

表1 CSU-RAMSにおける計算パラメータなど

	グリッド1	グリッド2
水平方向のメッシュ数	40 × 40	42 × 42
水平格子の解像度(m)	4000	1000
鉛直方向のメッシュ数	23 (1点目は地中)	23 (1点目は地中)
鉛直格子の解像度(m)	48.25 ~ 11008	48.25 ~ 11008
時間刻み(s)	30	15

間は CSU-RAMS のならし計算である．モデルの初期値と連続的な同化(ナッジング)のための境界値は，気象庁の数値予報 GPV データの一つであるメソスケールスペクトルモデル(MSM)から事前に作成した．本研究では，6時間おきに4次元(時間1次元+空間3次元)に同化させて計算を行った．MSM データは日本付近を対象としており，空間解像度は経度方向と緯度方向に 0.25 度 × 0.2 度(約 10 km)である．格子系は等緯度等経度である．これは，水平分解能約 60 km の全球スペクトルモデル(GSM, Global Spectral Model)や，東アジア域を対象とした水平分解能約 20 km の領域スペクトルモデル(RSM, Regional Spectral Model)と比較して最も解像度が高い．MSM データセットは国内2進格子点通報式であり，気象業務支援センターから一日4回(00UTC, 06UTC, 12UTC, 18UTC)提供される．それぞれの時間から3時間おきに18時間の予報値が格納されている．本研究では，初期値のみを使用した．気圧面(P面)は，975, 950, 925, 900, 850, 800, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100 hpa(高度約 300 m ~ 15 km)の合計14層から成り，各気圧面においてジオポテンシャル高度，水平風の東西成分，水平風の南北成分，気温，相対湿度などのデータが保存されている．

本研究では，RIAM-COMPACTへ接続する時間を2002年7月2日(JST 9時)に設定した．CSU-RAMSのグリッド2について，7月2日(JST 9時)における水平断面内の気流場(流線図)

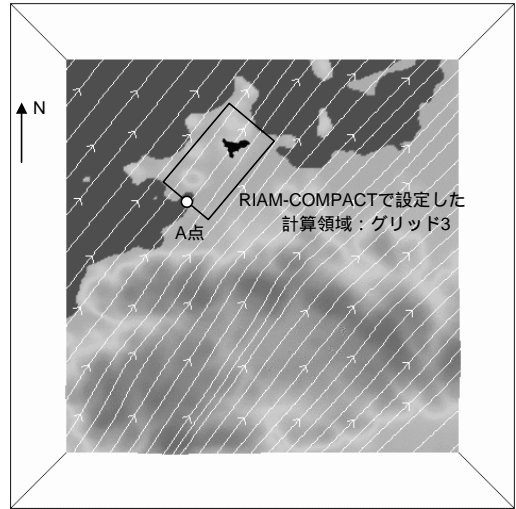


図12 CSU-RAMSにおける計算結果，グリッド2，流線図，7月2日(JST 9時)，水平断面，高度1,300m

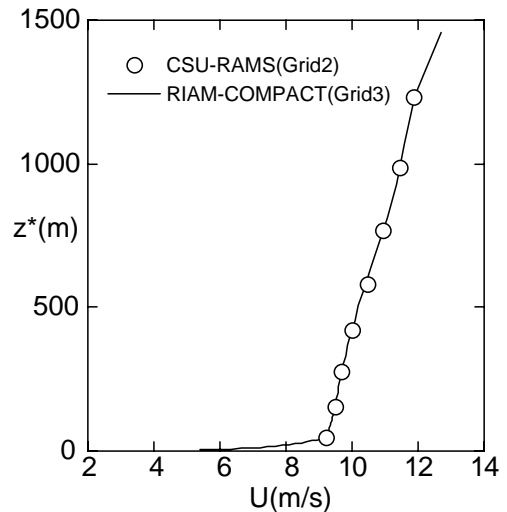


図13 RIAM-COMPACTで用いた流入気流プロフィール

を 図 12 に示す．ここで，高度は 1,300 m である．この図から移転地(図中に黒色で塗りつぶした地域)の上空ではほぼ南西の風が吹いていることが分かる．この結果から，RIAM-COMPACT の計算領域(図 12 に黒線で表示，グリッド 3)を設定し， 図 12 の A 点において気流プロフィールを抽出し，これを RIAM-COMPACT の流入気流条件として与えた(図 13 を参照)．これはグリッド 3

の流入境界面に相当するグリッド 2 の計算結果において、有意な違いが見られなかったためである。図 13 において、シンボルが CSU-RAMS(グリッド 2) の計算結果である。実線で示す RIAM-COMPACT の鉛直方向の格子点上の値については、CSU-RAMS(グリッド 2) の計算結果に基づいて、最下層点の 48(m) より上方では多項式近似で、それ以下では対数近似で内挿した。

本研究では、一般曲線座標系のコロケート格子に基づいた RIAM-COMPACT を用い、移転地上の局地風況場予測を行った。上述したように、CSU-RAMS(グリッド 2) の計算結果から、本研究で対象とした 2002 年 7 月 2 日(JST 9 時)には、移転地上空で南西の風が卓越していることが示された。この結果に基づき、RIAM-COMPACT の計算領域(グリッド 3)を設定した。RIAM-COMPACT の計算領域であるグリッド 3(図 12 の黒線領域の拡大図)を図 14 に示す。ここで、移転地の周辺地勢から、ほぼ上流側に位置する可也山(365 m)の影響が予想された。そこで、これを含めた領域を設定することとした。計算領域は実スケールで主流方向(x)、主流直交方向(y)、鉛直方向(z)に 9.5 km × 5.5 km × 1.46 km の空間を有する。実地形の形状は国土地理院の 50 m 標高数値データを基に作成した。格子点数は x, y, z 方向に 191 × 111 × 51 点である。水平方向は等間隔($\Delta x = \Delta y = 50$ m)の分解能、鉛直方向は地形表面付近で密になるように不等間隔($\Delta z = 1.3 \sim 219$ m)とした。速度の流入条件に関しては、図 13 に示す気流プロファイルを与えた。その他の速度の境界条件は、側方境界面と上部境界面は滑り条件、流出境界面は対流型流出条件とした。地面境界条件は、対数則に基づく人工的境界条件は用いず、粘着条件を課した。計算のレイノルズ数は、可也山(365 m)を高さの代表スケール h とし、流入境界面での高さ h における風速 U_{ref} を用いて $Re(=Uh/\nu)=10^4$ とした。時間刻みは $\Delta t = 2 \times 10^{-3} h/U_{ref}$ とした。計算パラメータについて実スケールとの対応を考察すると、無次元時間 100 の計算は数時間の時間積分に対応する。図 14 に示

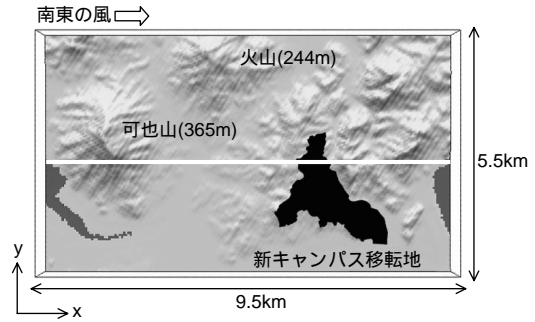


図 14 RIAM-COMPACTにおける計算領域、グリッド 3、図 12 の黒線領域の拡大図

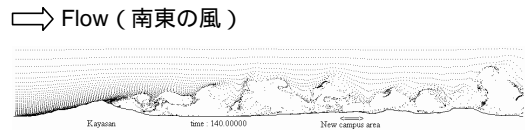


図 15 RIAM-COMPACTの計算結果、図 14 の白色の実線を含む鉛直断面内のパッシブ粒子追跡法の結果、グリッド 3

す白色の実線を含む鉛直断面内のパッシブ粒子追跡法の結果を図 15 に示す。地表面近傍で流れの剥離や逆流など、風に対する地形効果が明確に再現されている。

5. RIAM-COMPACT の実用化へ向けた検討

現在、我々は小規模なスカラー並列計算機を用いた RIAM-COMPACT の実用化について検討している。一つは、32 bit プロセッサの Intel Pentium 4 搭載の PC をギガビット・イーサネット(Intel PRO/1000MT)で接続した分散メモリ方式の SCore 型 PC クラスタ(SCore-D 5.4.0)である。ここでは、MPI(Message Passing Interface)を利用した並列計算(MPICH-SCore 1.2.4)を行う。もう一つは、最速の 64 bit プロセッサの Intel Itanium2 を 4 CPU 搭載した共有メモリ方式の SMP(Symmetric Multi Processor)機である。ここでは、自動並列化オプションを利用して計算を行う。SCore 型 PC クラスタおよび SMP 機では、両者ともに Intel Fortran コンパイラ(v.7.0 or v.7.1)を使用する。本研究で検討した小規模スカラー並

列計算機のスペックなどを表2に示す。また、SCore型PCクラスタの概観を写真1に示す。

ここでは、一般曲線座標系のコロケート格子に基づいたRIAM-COMPACTを用い、急峻な孤立峰を過ぎる流れ場(図16を参照)の数値シミュレーションを同一条件で行った結果について示す。格子点数は x, y, z 方向に $81 \times 61 \times 51$ 点(約25万点)である。レイノルズ数は孤立峰の高さ h と一様流入風速 U に基づいて $Re(=Uh/\nu)=10^4$ で

表2 小規模スカラー並列計算機のスペック

開発コード名	ノースウッド (第二世代)
クロック周波数	2.8GHz
キャッシュサイズ	Level 1: 12KB+8KB (オンダイ) Level 2: 512KB (オンダイ)
FSB	533MHz (バンド幅:3.2GB/s)
メインメモリ	RDRAM 1GB
製造プロセス	0.13 μ m
備考	32Bits CPU (IA-32), 1-Way ハイパー・スレッディング・ テクノロジー

(a) SCore型PCクラスタ, Intel Pentium4

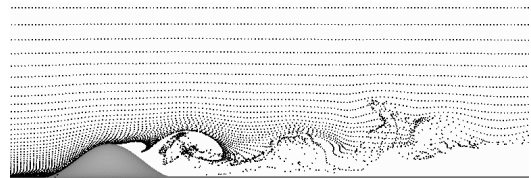
開発コード名	マディソン (第三世代)
クロック周波数	1.5GHz
キャッシュサイズ	Level 1: 32KB (オンダイ) Level 2: 256KB (オンダイ) Level 3: 6MB (オンダイ)
FSB	400MHz (バンド幅:6.4GB/s)
メインメモリ	DDR200 SDRAM 16GB
製造プロセス	0.13 μ m
備考	64Bits CPU (IA-64), 4-Way ハイパー・スレッディング・ テクノロジー

(b) SMP機, Intel Itanium2

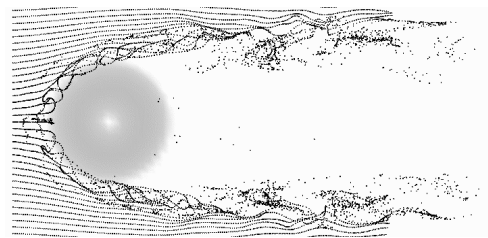
写真1 SCore型PCクラスタの概観写真



ある。時刻は $\Delta t = 2 \times 10^{-3} h/U$ である。同一条件の下でCPU時間を比較するため、孤立峰周辺の流れ場が十分に発達した無次元時間 $t = 100$ の計算結果を入力データとし、 $t = 100 \sim 110$ における計算(5,000ステップの時間積分)を各計算機で実施した。各スカラー並列計算機におけるCPU時間の比較を表3に示す。ここでは、分散メモリ方式のベクトル並列型スーパーコンピュータVPP5000/2(富士通株, 最大浮動小数点演算性能9.6 GFLOPS, 主記憶容量1.5 GB)の1PEを用いたベクトル逐次計算の結果をCPU時間の比較基準とした。すなわち、他の機種別のCPU時間については、VPP5000の計算結果との比(=各計算機のCPU時間/VPP5000のベクトル逐次計



(a) 鉛直断面



(b) 水平断面

図16 RIAM-COMPACTによる急峻な孤立峰を過ぎる流れ場の計算結果、パッシブ粒子追跡法

表3 スーパーコンピュータVPP5000/2の1PEを用いたベクトル逐次計算に対するCPU時間の比

	1CPU	2CPU	4CPU
SCore型PCクラスタ (4ノード4CPU) MPIによる並列計算	4.14	2.62	1.61
SMP機 (4CPU) 自動並列化オプション を利用した並列計算	2.87	1.72	1.14

算の CPU 時間)として表示した。両機種ともに、4 CPU を用いた場合の実行性能はスーパーコンピュータとほぼ同程度である。特に、高性能な小規模SMP機の登場と自動並列化オプションの利用は、非常に有効であることが明らかになった。今後、計算機性能の向上は確実であり、RIAM-COMPACT の実用化はすぐ目前である。

6. おわりに

数百mから数十km程度の局所域スケールの風況場解析を対象に開発した、精緻な風況シミュレータ RIAM-COMPACT の特長とその適用例を示した。RIAM-COMPACT では、急峻な複雑地形に起因した様々な風況パターン(流れの衝突、剥離、再付着、逆流など)が精度良く再現され、その有効性が示された。今後は、RIAM-COMPACT のさらなる高精度化を継続して行うとともに、実用化へ向けた検討を行う予定である。

謝 辞

本報をまとめるにあたり、九州電力(株)には、野間岬ウィンドパークの資料をご提供頂いた。(有流

体物理研究所の田辺正孝氏には、SCore 型 PC クラスタを導入していただいた。富士通(株)の上野潤一郎氏には、SCore 型 PC クラスタ上における MPI 計算に関して多くの助言を頂いた。(株)エッチ・アイ・ティーの内田盛久氏、吉田雅彦氏には、SMP 機のテスト環境(Open-SCC)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) 内田孝紀, 大屋裕二: ネストグリッドを用いた複雑地形上の風況予測シミュレーション, 日本風工学会誌 第92号 (2002) 135-144.
- 2) T. Uchida, Y. Ohya: Large-eddy simulation of turbulent airflow over complex terrain, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 91 (2003) 219-229.
- 3) Pielke et al.: A comprehensive meteorological modeling system - RAMS, Meteor. Atmos. Phys. 49 (1992) 69-91.
- 4) 内田孝紀, 杉谷賢一郎, 大屋裕二: 一様流中の2次元崖状地形まわりの気流性状に関する実験的研究, 日本風工学会誌 第95号 (2003) 233-244.