

# PCクラスタを用いた風況予測シミュレータ RIAM-COMPACTの実用化へ向けた検討\*

## Examination towards Utilization of the RIAM-COMPACT by using a PC Cluster

○内田 孝紀\*\*, 大屋 裕二\*\*

Takanori UCHIDA and Yuji OHYA

### 1. 緒言

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)と称する風況予測シミュレータを開発している<sup>1)</sup>。この数値モデルの最も大きな特長は、流れの衝突、剥離、再付着、逆流などの風に対する地形効果(非定常な流動現象)を高精度に予測できる点である。既に、種々の単純地形と複雑地形を対象にした風況場解析にRIAM-COMPACTを適用し、風洞実験の結果と比較してその予測精度と有効性を確認している。現在は、RIAM-COMPACTの実用化へ向け、小規模なPCクラスタによるスカラー並列計算の導入を検討している。

本報では、単純地形として急峻な傾斜角度を有する孤立峰を、複雑地形として鹿児島県野間岬を対象とした解析例を紹介する。また同時に、小規模なPCクラスタを用いたRIAM-COMPACTの結果を紹介する。

### 2. RIAM-COMPACTの特長

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。主な特長として以下のことが挙げられる。

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、二つの格子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る。ここでは、実地形の起伏形状に関係なく直線的な計算格子を設定し、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。これは座標変換に伴う記憶容量が必要であるが、地形近傍の流動現象を高精度に数値予測する際には非常に有効である。

- 2) 1)の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。
- 3) 乱流モデルのLES(Large-Eddy Simulation)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、これを利用し風力タービンに対する気流変動の影響などを別途調査することが可能である。さらには、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になる。
- 4) 種々の大気安定度(中立, 不安定, 安定)を考慮した計算が可能である。特に安定時の場合には、局地強風を利用した風力発電に関して、高精度な風況精査(適地選定)が可能である。
- 5) 地域気象モデルの解析結果との接続により、風況精査だけでなく、大型ウイ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)が可能である。
- 6) ネスティング手法(one-way nesting)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。
- 7) 流入変動風を生成するためのドライバ部を計算領域の上流側に設定し、そこで非定常流体計算を行い、これを流入条件として用いることが可能である。
- 8) 風況場の解析結果に基づき、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。
- 9) 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。

### 3. RIAM-COMPACTの予測精度

ここで示す結果は、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RIAM-COMPACTの予測精度(一様流中での風に対する地形効果)を検証したものである。

#### 3.1 単純地形の場合

急峻な傾斜角度を有する孤立峰を対象とし、数値シ

\* 平成15年11月20日「第25回風力エネルギー利用シンポジウム」にて講演, 原稿受付10月10日

\*\* 会員, 九州大学応用力学研究所(〒816-8580 春日市春日公園6-1, 連絡先: takanori@riam.kyushu-u.ac.jp)

ミュレーションと風洞実験を行った。孤立峰の高さ $h$ は10cmとし、実大気スケールの約1/2000を想定している。孤立峰の主流方向に $x$ 軸を、主流直交方向に $y$ 軸を、鉛直方向に $z$ 軸を設定する。気流計測は、逆流と順流が検出可能なSFP(Split-Film Probe)を用いた。一様流入風速は $U=1.5\text{m/s}$ である。孤立峰の高さ $h$ に基づいたレイノルズ数 $Re(=Uh/\nu)$ は約 $10^4$ である。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(1010CTAユニット, 1013リニヤライザ)を使用した。風洞実験の詳細については、文献<sup>2)</sup>を参照していただきたい。

数値シミュレーションに関して、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を用いた。数値計算法の詳細は文献<sup>1)</sup>を参照していただきたい。計算領域は主流方向( $x$ )、主流直交方向( $y$ )、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。格子点数は $x, y, z$ 方向に $260 \times 121 \times 71$ 点である。速度の境界条件に関して、地面は風洞実験と同じ条件を課すため、流入境界面から17 $h$ 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。

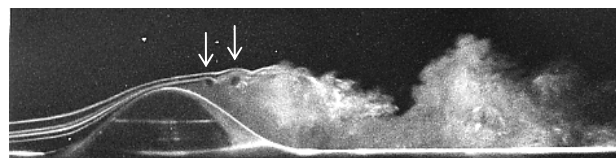
孤立峰周辺の風況パターン(瞬間場)に関して、数値シミュレーションと風洞実験の比較を図1に示す。両者ともに定性的な流れの挙動は非常に類似している。孤立峰の頂部付近から剥離したせん断層は、孤立した渦に巻き上がっている(図中に矢印で表示)。これらの孤立した渦は次々に合体して剥離バブルを形成し、ここから大規模渦が放出されて流下している。

孤立峰周辺の瞬間場に関して、流跡線図を図2に示す。孤立峰背後の流れは複雑乱流場を呈しているのが分かる。孤立峰周辺の時間平均場に関して、流線図と速度ベクトル図を図3に示す。図3(a)では、孤立峰の背後に渦領域が形成されている。その中心は、孤立峰の頂部から約 $2h$ 下流である。図3(b)では、孤立峰の下流に一对の渦領域(双子渦)が形成されている。

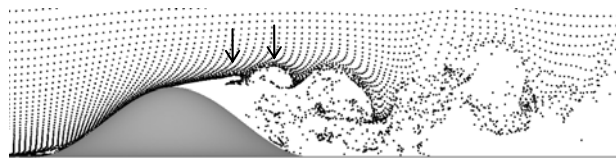
主流方向( $x$ )の平均速度プロファイルに関して、数値シミュレーションと風洞実験の比較を図4に示す。ここでは、図3(a)に矢印で示す地点の結果を示す。両者ともに、横軸は各地点の上空風速 $U_{ref}$ で、縦軸は孤立峰の高さ $h$ で正規化している。縦軸の $z^*$ は地形表面からの高さを示す。RIAM-COMPACTによる数値シミュレーションとSFPによる風洞実験は極めて良好な一致を示している。

### 3.2 複雑地形の場合

対象領域は鹿児島県南西部の笠沙町に位置する野間岬である。ここでは、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5を参照)。風洞実験では、約1/2500の地形模型を使用した。気流

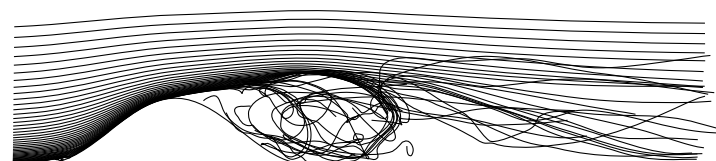


(a)風洞実験, スモークワイヤー法

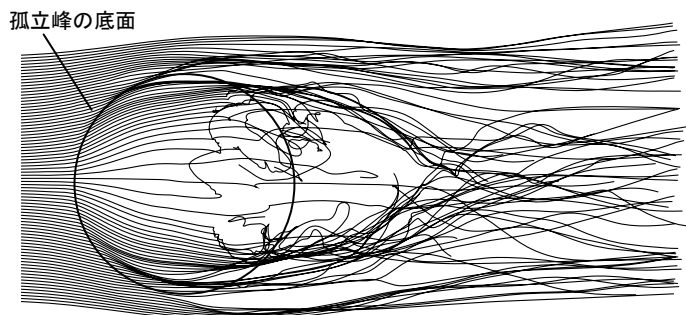


(b)RIAM-COMPACT, パッシブ粒子追跡法

図1 孤立峰周辺の流れパターンの比較, 瞬間場,  $y=0$

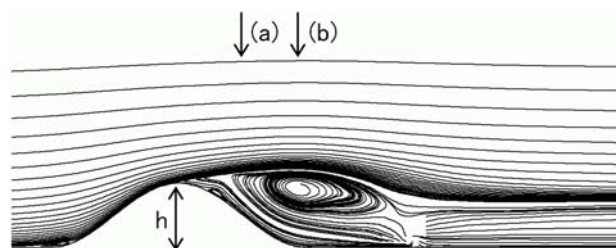


(a)Side view, 主流直交方向の中央断面( $y=0$ )

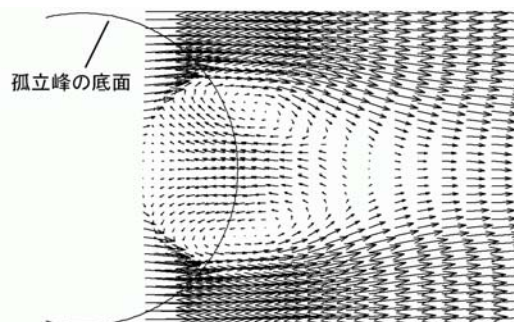


(b)Top view, 地面近傍( $z^* \doteq 0.04h$ )から粒子を放出

図2 孤立峰周辺の瞬間場, 流跡線図



(a)流線図, Side view, 主流直交方向の中央断面( $y=0$ )



(b)速度ベクトル図, Top view,  $z^*=0.5h$

図3 孤立峰周辺の時間平均場

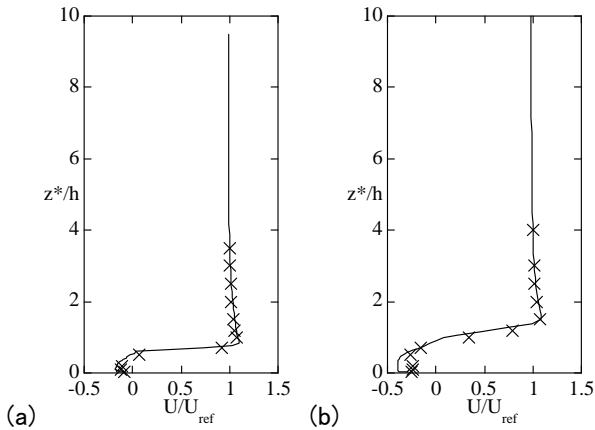


図4 主流方向(x)の平均速度プロファイルの比較,  
実線:RIAM-COMPACTによる数値シミュレーション,  
シンボル:SFPによる風洞実験

計測は、図5に示す実際の風力タービン設置位置(計10箇所)においてSFPを用いて行った。

数値シミュレーションに関して、計算領域は主流方向(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で密になるように不等間隔( $\Delta z=0.5 \sim 143\text{m}$ )とした。格子点数はx, y, z方向に $251 \times 271 \times 81$ 点である。

瞬間場に関して、野間岬上の速度ベクトル図を図6に示す。野間岬上では流れは局所的に増速している。一方、岬の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。

時間平均場に関して、図5に示す実線(断面(ii))を含む鉛直断面内の速度ベクトル図を図7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

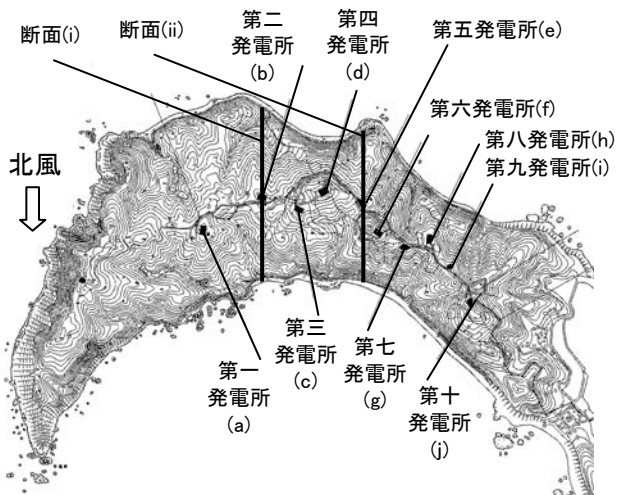


図5 野間岬における風力タービン設置位置  
(風洞実験における気流計測位置)

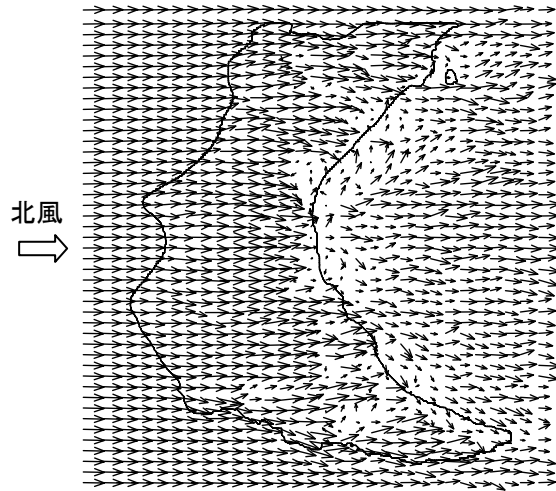


図6 野間岬上の速度ベクトル図, 瞬間場,  $z^*=30\text{m}$ ,  
水平断面, 図中の実線は野間岬の輪郭を示す。

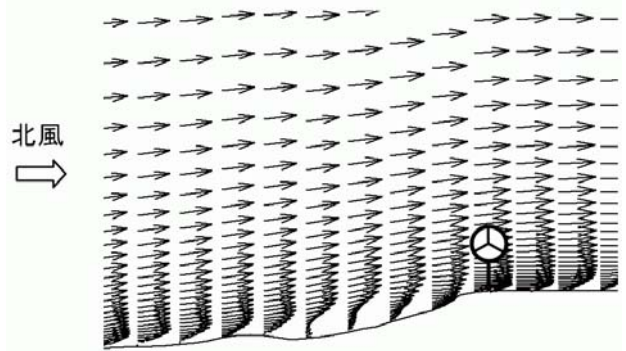


図7 図5に示す第五発電所(e)を含む断面(ii)の  
速度ベクトル図, 時間平均場, 鉛直断面

されていることが分かる。

図5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8に示す。ここでは、代表点のみを示す。縦軸は地形表面からの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SFPによる風洞実験は全高さレベルで極めて良好な

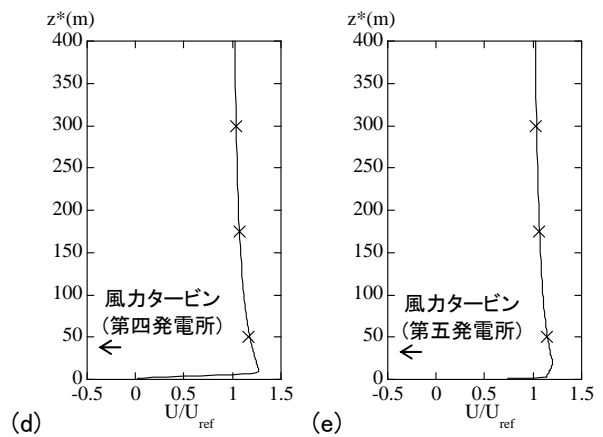


図8 主流方向(x)の平均速度プロファイルの比較,  
実線:RIAM-COMPACTによる数値シミュレーション,  
シンボル:SFPによる風洞実験

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、両者ともに風が局所的に増速している。

第一発電所から第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9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とSFPによる風洞実験ともに野外観測値と良好な一致を得た。

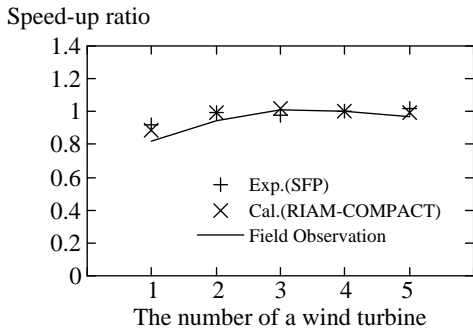


図9 第一～第五発電所の平均風速の増速率の比較, 第4号基が基準, 実測では風速2~10m/sの平均値

#### 4. PCクラスタによる実用化への検討

現在、小規模なスカラー並列計算機を用いたRIAM-COMPACTの実用化を検討している。一つは、32ビットプロセッサのインテルPentium4搭載のPCをギガビット・イーサネットで4台接続したSCore型PCクラスタである。ここでは、MPI(Message Passing Interface)を利用する。もう一つは、最速の64ビットプロセッサのインテルItanium2を4CPU搭載したSMP(Symmetric Multi Processor)機である。ここでは、Fortranコンパイラの自動並列化機能を利用する。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1、表2に示す。

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

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
ノード数	4台
ノード間通信	ギガビット・イーサネット (Intel PRO/1000MT)
スイッチングハブ	8ポートギガビット・スイッチングハブ (Planex FXG-08TX)
主記憶容量(単体)	RDRAM 1GB
キャッシュ	レベル1: 12KB+8KB(オンダイ) レベル2: 512KB(オンダイ)
FSB	533MHz
製造プロセス	0.13 $\mu$ m
OS	Red Hat Linux 7.3 SCore-D 5.4.0
コンパイラ	Intel Fortran Compiler 7.0 MPICH-SCore 1.2.4
備考	32ビットCPU(IA-32), 1-Way

表1 研究室のインテルPentium4搭載のSCore型PCクラスタ(分散メモリ型のスカラー並列計算機)

開発コード名	マディソン(第三世代)
クロック周波数	1.5GHz
主記憶容量	DDR200 16GB
キャッシュ	レベル1: 32KB(オンダイ) レベル2: 256KB(オンダイ) レベル3: 6MB(オンダイ)
FSB	400MHz(バンド幅: 6.4GB/s)
製造プロセス	0.13 $\mu$ m
OS	Red Hat Linux Advanced Server 2.1
コンパイラ	Intel Fortran Compiler 7.1
備考	64ビットCPU(IA-64), 4-Way

表2 (株)HITのインテルItanium2搭載のSMP機  
(共有メモリ型のスカラー並列計算機)

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9.6GFLOPS, 主記憶容量4GB)の1PEによるベクトル逐次計算の結果をCPU時間の比較基準とした。計算対象は先に述べた孤立峰周辺流れである。両機種ともに、4CPUを用いた場合の実行性能は、スーパーコンピュータ1PEとほぼ同程度であることが分かる。今後とも計算機性能はさらに向上することが期待され、RIAM-COMPACTの実用化は確実であると言える。

	1CPU	2CPU	4CPU
SCore型PCクラスタ (MPIによる並列計算)	-	-	1.74
SMP機 (自動並列計算)	4.46	2.59	1.87

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時間の比較, メッシュサイズは約220万点, メモリサイズは約800MB

#### 5. 結言

局所スケールの風況場解析を対象にした精緻な風況予測シミュレータRIAM-COMPACTの特長と、その適用例を示した。現在はGUI(Graphical User Interface)などを含め、実用化へ向けた検討を行っている。また、(有)流体物理研究所(URL: <http://www.ifpj.com/>)において風況精査に関する受託解析サービスおよびソフトウェア販売を実施する予定である。

#### 謝辞

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。(株)エッチ・アイ・ティーには、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, 日本風工学会論文集, No.92 (2002), pp.135-144
- 2) 内田孝紀, 杉谷賢一郎, 大屋裕二, 日本風工学会論文集, No.95 (2003), pp.233-244