

複雑地形上の非定常風況シミュレーションにおける 流出境界断面の取扱いについて

内田, 孝紀
九州大学応用力学研究所

大屋, 裕二
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/26804>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 129, pp.129-133, 2005-09. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

複雑地形上の非定常風況シミュレーションにおける 流出境界断面の取扱いについて

内田 孝紀*, 大屋 裕二*

(2005年7月29日受理)

About the Handling of the Outflow Boundary in Unsteady Numerical Simulation of Airflow over Complex Terrain

Takanori UCHIDA and Yuji OHYA

E-mail of corresponding author: takanori@riam.kyushu-u.ac.jp

Abstract

We are developing the numerical model called the RIAM-COMPACT (Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain). The object domain of this numerical model is from several m to several km, and can predict the airflow and the gas diffusion over complex terrain with high precision. In the present paper, we discuss the handling of the outflow boundary in unsteady numerical simulation of airflow over complex terrain. The simulation of six cases was executed to this purpose. As a result, to execute the calculation with stability, it was shown that the area about three times the typical height of topography was necessary.

Key words : RIAM-COMPACT, Unsteady numerical simulation, Complex terrain, Outflow boundary

1. 緒言

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の有効利用に注目が集まっている。日本においても, 数基の風力タービンから, 数十基の風力タービンから構成される大型のウイ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。風力タービンの発電出力は風速の三乗に比例するため, 風況の良好な地点を的確に, 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考慮することが極めて重要である。最近では, 風力タービン近傍の地形起伏や粗度の影響による風の乱れが, 風力タービンの発電出力に影響を与えているとの報告もある。今後の風力発電施設は, 山間部などのより厳しい場所に設置せざるを得ない。よって, 日本国内で風力エネルギーが有効に利用されていくためには, 風力タービンのハブ高さにおける気流性状を今まで以上に高い精度で予測する必要がある。

我々の研究グループでは, 数(十)km以下の狭

領域スケールに的を絞って, RIAM-COMPACT (Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain)と称する非定常・非線形風況シミュレータを開発している¹⁻⁵⁾。RIAM-COMPACTは, 風力タービンの適地選定のために開発された数値モデルである。最大の特徴は, 国内外を問わずあらゆる市街地から複雑地形にまで適用可能で, かつ, 局所域の風の流れをアニメーションとして視覚化できる点にある。2003年11月から, (有)流体物理研究所, 西日本技術開発(株), (有)環境ジーアイエス研究所の三社の提携企業と連携し, ソフトウェア販売と受託解析サービスを開始した。既に民間企業や研究機関など多数に納入実績を有し, 大手電力事業者や風力発電デベロッパーの受託解析も数多く実施している。

複雑地形上の非定常な風況シミュレーションを行う際に注意すべき点は幾つかある。その中で最も注意を要する点は, 流出境界断面の取扱いである。すなわち, 非定常風況シミュレーションでは, 地形から形成された種々の渦をスムーズに計算領域の外部に流出させる必要がある。対流型の流出条件が種々の渦をスムーズに流出させることはこれまでの研究で示されているが, 流出境界面までにどの程度の距離が必要なのかはほとんど議論されて

* 九州大学応用力学研究所

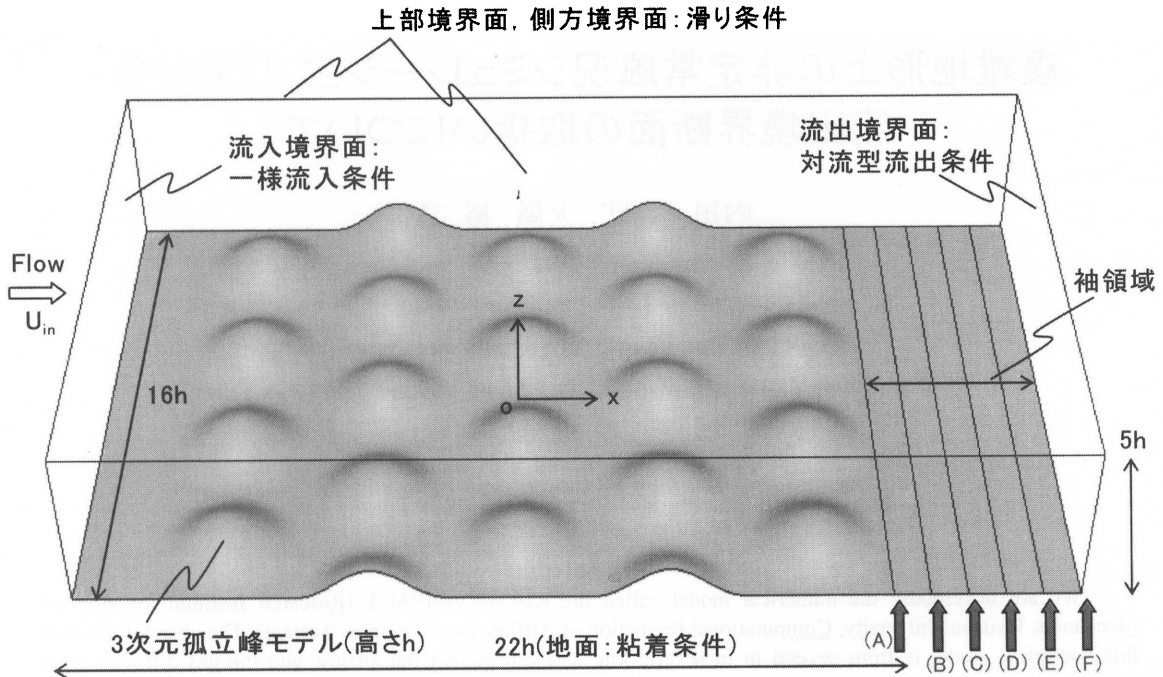


Fig.1 Computational domain and coordinate system

	追加した袖領域	主流方向全体の長さ	メッシュ数
Case1	0h	22h	111 × 81 × 41
Fig.1(A)			
Case2	1h	23h	116 × 81 × 41
Fig.1(B)			
Case3	2h	24h	121 × 81 × 41
Fig.1(C)			
Case4	3h	25h	126 × 81 × 41
Fig.1(D)			
Case5	4h	26h	131 × 81 × 41
Fig.1(E)			
Case6	5h	27h	136 × 81 × 41
Fig.1(F)			

Table.1

いない。

本研究では、3次元の孤立峰が千鳥状に配置された状況を複雑地形のモデルとし、孤立地形の高さ h を基準スケールとしてどの程度流出断面までの距離が必要かを議論する。特に計算安定性、つまり、圧力のポアソン方程式の緩和計算に要する時間(反復回数)と残差の時間変化に注目する。

2. 風況シミュレータRIAM-COMPACTによる数値シミュレーション

ここでは、本研究で用いた数値計算法や計算

領域、計算パラメータ、境界条件などを記述する。

複雑地形の周辺に形成される流れを高精度に数値予測するため、一般曲線座標系のコロケート格子を用いた。ここでコロケート格子とは、計算格子のセル中心に物理速度成分と(総)圧力を定義し、セル界面に反変速度成分にヤコビアンを乗じた変数を定義する格子系である。数値計算法は差分法(FDM)に基づき、ラージ・エディ・シミュレーション(LES)を行う。流れの支配方程式は、フィルタ操作を施された非圧縮流体の連続の式とナビエ・ストークス方程式である。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

(1)

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

(2)

計算アルゴリズムは部分段階法(F-S法)に準じ、時間進行法はオイラー陽解法に基づく。圧力に関するポアソン方程式は逐次過緩和法(SOR法)により解く。空間項の離散化は式(2)の対流項を除いて全て2次精度中心差分とし、対流項は3次精度風上差分とする。ここで、対流項を構成する4次精度中心差分は梶島による補間法⁶⁾(4点差分+4点補間)を用いる。数値拡散項の重みは通常使用される河村-桑原スキーム⁷⁾タイプの $\alpha=3$ に対して、

$\alpha=0.5$ としその影響は十分に小さくする. SGSモデルには標準スマゴリンスキーモデル⁸⁾を用いる.

計算領域, 座標系, 境界条件を図1に示す. 計算領域は孤立地形の高さを h として主流直交方向(y)に $16h$, 鉛直方向(z)に $5h$ とする. ここで, 主流方向(x)は流入境界面から $22h$ までを複雑地形とし, それより下流に袖領域(最大 $5h$)を付加させて計算安定性にどのような影響があるかを調査した. 孤立地形の形状は式(3)で記述されるコサイン形状で, これを千鳥状に22個配置した. 式(3)の地形形状パラメータ a は2とした.

$$z(r) = 0.5h \times \{1 + \cos(\pi r / a)\}, \quad r = (x^2 + y^2)^{1/2} \quad (3)$$

格子点数と併せて本研究で検討した6ケースの条件を表1に示す. x 方向の格子幅は等間隔に $(2.0 \times 10^{-1})h$, y 方向の格子幅は等間隔に $(2.0 \times 10^{-1})h$, z 方向の格子幅は不等間隔に $(3.5 \times 10^{-3} \sim 1.0)h$ である. 流入境界面は一様流入条件, 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. 地面は粘着条件とする. 式(2)の無次元パラメータ Re はレイノルズ数 $(=U_{in}h/\nu)$ であり, $Re(=U_{in}h/\nu)=10^4$ とした. ここで, h は孤立地形の高さ, U_{in} は一様流入風速, ν は動粘性係数である. 時間刻みは $\Delta t=2 \times 10^{-3}h/U_{in}$ とした.

3. 計算結果

地面から $z^*=0.5h$ における主流方向(x)の速度成分のコンター図を図2に示す. ここでは, 代表して袖領域が無いCase1と, 袖領域を $5h$ 付加したCase6(h は孤立地形の高さ)の比較を示す. 図2に対応する速度ベクトルの比較を図3に示す. 図2および図3ともにCase1では, 流出境界付近に最も近い地形から発生している渦が, 流出境界付近で停滞している. 後述するが, Case1では計算が途中で破綻した. アニメーションを作成して観察すると, この渦領域は常に流出境界付近に存在していた. これが計算の破綻の直接的な原因であると言える. これに対し, 袖領域を $5h$ 付加したCase6では, Case1で見られたような流出境界付近での非物理的な挙動は見られず, 渦がスムーズに流下している. この結果から, 以下のことが明らかになった. それは, 渦を停滞させることなく計算領域の外に流出させる対流型流出条件を課していても, それだけでは不十分で, 計算が破綻する場合がある. 言

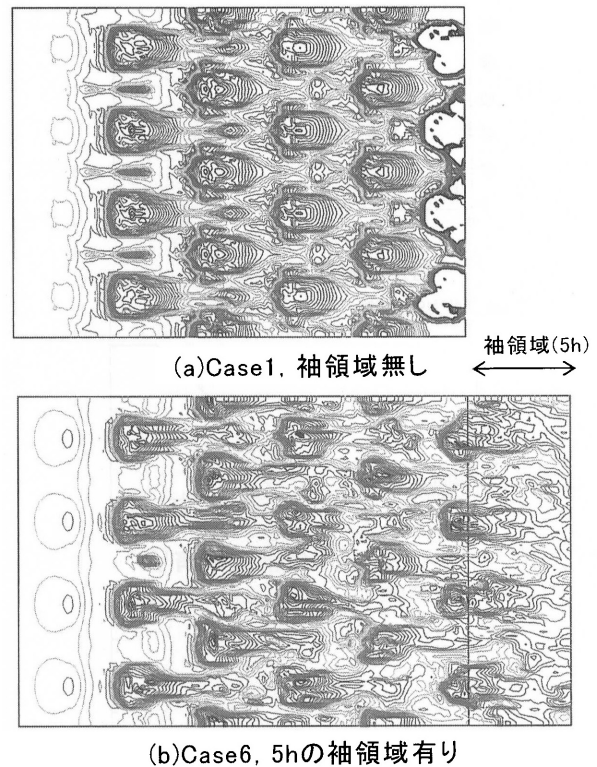


Fig.2 Comparison of contourline of streamwise velocity component at $z^*=0.5h$

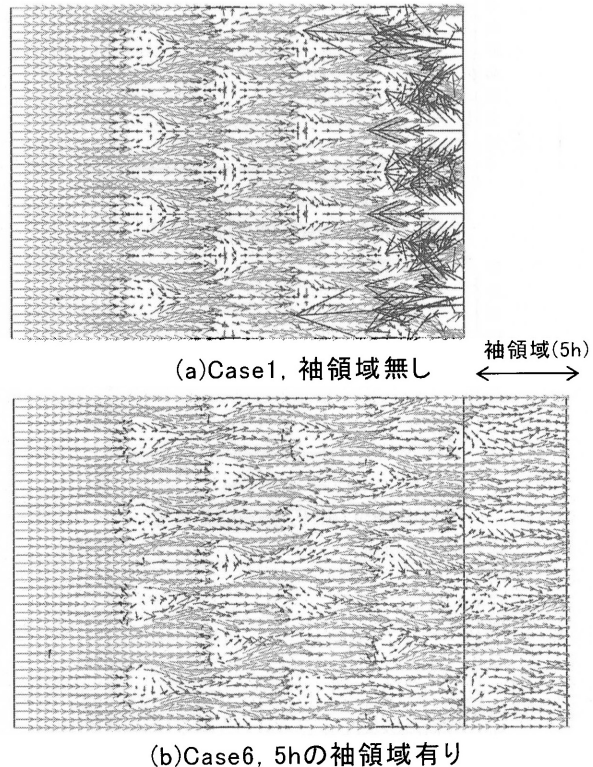


Fig.3 Comparison of velocity vector at $z^*=0.5h$

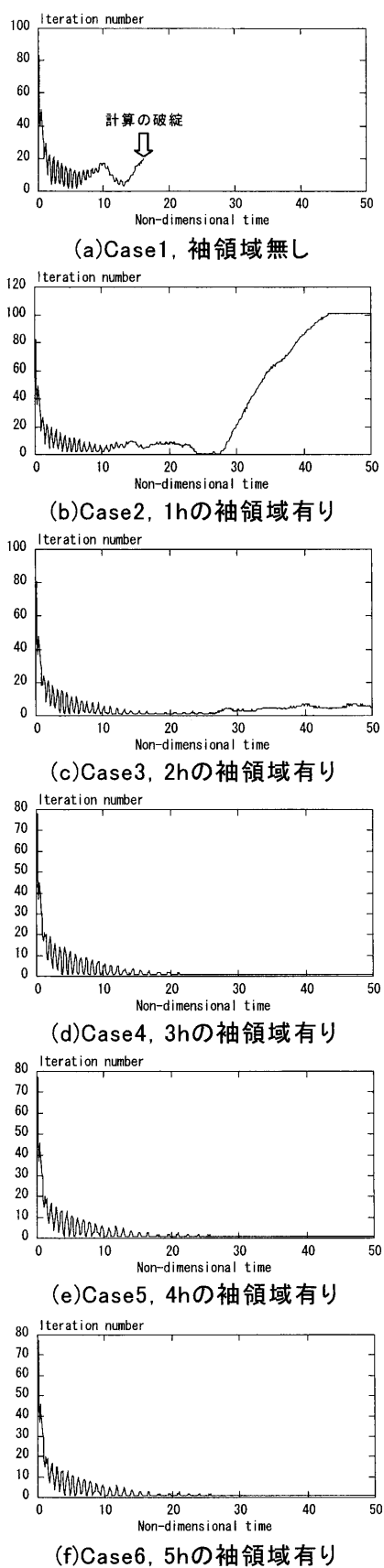


Fig.4 Comparison of iteration number of Poisson equation

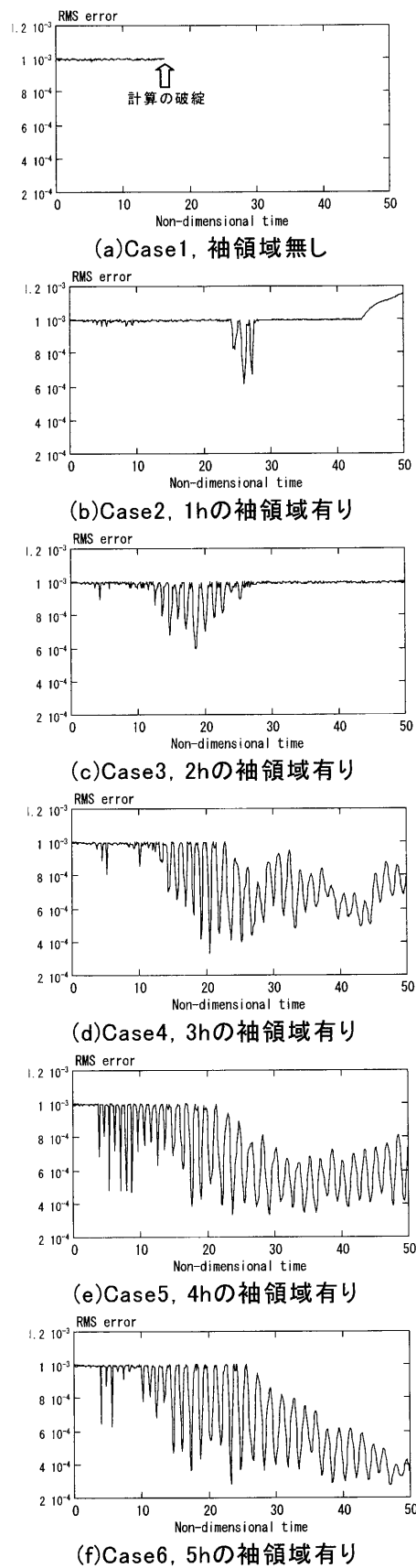


Fig.5 Comparison of RMS error of Poisson equation

い換えると、代表スケールの5倍程度の袖領域を付加するだけで上記のような不具合は発生せず計算を安定に実行することができる。

図4および図5には、それぞれのケースにおける圧力のポアソン方程式の反復回数と、残差(RMS値)の時間変化を示す。圧力のポアソン方程式の諸パラメータに関して、最大反復回数は100回、収束判定係数(収束判定の閾値)は 10^{-3} とした。袖領域の無いCase1では、計算が破綻し、残差が非数NaN(Not a Number)の表示を示した。これは先にも示したように、渦が流出境界面の近くに停滞し、スムーズに流下していかないことが主な原因である。袖領域を1h付加したCase2では、無次元時間で25付近まではいったん収束するものの、それ以降は反復回数が急速に増加している。これに伴い残差も増加している。袖領域を2h付加したCase3では、反復回数が減少しているが、残差はほとんど減少していない。よって、Case3の袖領域は不十分であることが分かる。袖領域を3h以上付加したCase4～Case6では、反復回数と残差の両者が時間の経過とともに減少している様子が示された。これらの時間変化はCase1～Case3とは明らかに違う。今回の数値シミュレーションでは、3h以上の袖領域を付加すれば計算が良好に実行されることが示された。

4. 結 言

本研究では、3次元の孤立地形が千鳥状に配置された状況を複雑地形のモデルとして非定常数値シミュレーション(LES)を実施した。特に、孤立地形の高さを基準スケールとし、安定に計算を行うためにはどの程度流出断面までの距離が必要かを議論した。この目的に対し、圧力のポアソン方程式の緩和計算に要する時間(反復回数)と残差の時間変化に注目した。その結果、本研究で設定した状況において安定に計算を実行するためには、孤立地形の高さの3倍以上の袖領域が必要であることが示された。

実地形の非定常数値シミュレーションを行う際には、計算領域の流出境界面近くに渦放出を伴う地形起伏が存在していないかを確認する必要がある。仮にそのような地形が存在する場合には、その地

形高さの3倍以上の距離を流出境界面との間に設けることが必要であると言える。

参 考 文 献

- 1) 内田孝紀, 大屋裕二: 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—, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol.22, No.5, 2003, pp.417-428
- 2) 内田孝紀, 大屋裕二: 風況シミュレータ RIAM-COMPACTによる拡散場シミュレーション—その1. 不安定時の場合—, 九州大学応用力学研究所所報, 第126号, 2004, pp.9-15
- 3) 内田孝紀, 大屋裕二: 風況シミュレータ RIAM-COMPACTによる拡散場シミュレーション—その2. 安定時の場合—, 九州大学応用力学研究所所報, 第126号, 2004, pp.17-22
- 4) 内田孝紀, 大屋裕二, 田辺正孝, 葛生和人, 橋本晃慈: 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—, 土木施工, Vol.45, No.8, 2004, pp.49-55
- 5) 内田孝紀, 大屋裕二, 鶴野伊津志: 急峻な岬まわりの気流場シミュレーション—気象力学モデル CSU-RAMSと流体力学モデル RIAM-COMPACTの適用性について—, 第18回風工学シンポジウム論文集, 2004, pp.35-40
- 6) 梶島岳夫, 太田貴士, 岡崎和彦, 三宅裕: コロケート格子による非圧縮流れの高次差分解析, 日本機械学会論文集, (B編), 63巻, 614号, 1997, pp.3247-3254
- 7) T. Kawamura, H. Takami and K. Kuwahara: Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness, Fluid Dyn. Res., Vol.1, 1986, pp.145-162
- 8) J. W. Deardorff: A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers, J. Fluid Mech., Vol.41, 1970, pp.453-480