

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—

NUMERICAL SIMULATION OF AIRFLOW AROUND A STEEP CAPE

—ABOUT THE APPLICABILITY OF THE MESOSCALE MODEL CSU-RAMS AND THE CFD MODEL RIAM-COMPACT—

○内田 孝紀¹⁾, 大屋 裕二²⁾, 鶴野 伊津志²⁾

Takanori UCHIDA¹⁾, Yuji OHYA²⁾ and Itushi UNO²⁾

ABSTRACT

In the present study, the numerical simulation of airflow around a steep cape was performed by using the mesoscale model CSU-RAMS (Colorado State University, Regional Atmospheric Modeling System) and the CFD (Computational Fluid Dynamics) model RIAM-COMPACT (Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain). The wind speed obtained by the CSU-RAMS was in a good agreement with the observed data. On the other hand, the numerical results obtained by the RIAM-COMPACT demonstrated that the changes induced on the wind field by the topographic effect, such as the flow impingement, separation and reattachment, are successfully simulated. If the CSU-RAMS and the RIAM-COMPACT can be merged effectively, it can be said that a highly precise numerical simulation will become possible.

Key Words : Mesoscale model, CSU-RAMS, CFD model, RIAM-COMPACT, Large-eddy simulation, Steep cape

1. はじめに

近年, 風工学分野における数値流体力学CFD(Computational Fluid Dynamics)は, コンピュータの演算速度の飛躍的な向上と記憶容量の増大などに伴い, 野外観測や風洞シミュレーションに並ぶ有力な研究手法として確立されつつある. 特に数(十)km以下の局所域スケールに的を絞り, 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高精度に再現可能な局地的風況予測モデル(流体力学モデル, 以下“CFDモデル”と称する)の開発に注目が集まっている^{1,2)}. 局地的風況予測モデルが実用化されると, 都市域や複雑地形上の大気汚染物質の移流拡散現象予測, 種々の風力タービンの適地選定のための風況精査などに大きく寄与することが期待される. こうした社会的・工学的要請を受け, 我々はLES(Large-Eddy Simulation)に基づき, 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(CFDモデル)を開発している³⁻⁵⁾. 非圧縮性流体を対象にしたCFDモデルでは, 風に対する地形効果を高精度に予測することは可能である. しかし, 圧力に関するPoisson方程式の緩和計算を伴うため, 日変化, すなわち, 現実的な時間スケールの数値シミュレーションは現在でも困難である. 一方, 気象分野における広域(メソスケール)を対象にした気象力学モデル(メソスケールモデル)では, 現実的な時間スケールの時間積分が比較的容易に行える^{6, 7)}. 米国では, “気象力学モデルとCFDモデルの結合”に関するワークショップが開かれるなど, 大気環境アセスメントやテロ対策などに関連して, 両モデルを融合する試みが既に始まっている(米国気象学会主催, 2004年1月, ワシントン州シアトル市). 本研究では, 急峻な傾斜角度を有する岬を例に取り, 地域気象モデルCSU-RAMS (Colorado State University, Regional Atmospheric Modeling System)⁶⁾と, CFDモデルであるRIAM-COMPACTによる数値シミュレーションを行い, それぞれの数値モデルの特徴を示すとともに, 両者の融合・接続の可能性を探る.

2. 地域気象モデルCSU-RAMSの概要と計算結果

CSU-RAMSはPielkeらにより開発され, 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力学モデルである. 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, 各ユーザーが目的に応じて容易に設定および変更が可能である. 本研究では, バージョン4.4を用い, 雲や降水過程は考慮せず, 気流場のみの再現計算を行う. また, 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する. 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,

^{1), 2)} 九州大学応用力学研究所 助手, 教授 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1)

気象庁のGPV(Grid Point Value)データを6時間ごとに計算に取り入れる。本研究では、メソスケールモデルMSM(Meso-Scale Model)を用いる。MSM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10km)である。配信時の格子系は等緯度等経度である。これは、水平分解能約60km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20kmの領域スペクトルモデルRSM(Regional Spectral Model)と比べて解像度は最も高い。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, 100hpa(高度約300m~15km)の合計14層から成る。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。なお、1000hpa(高度約100m)は上層(975, 950hpa)から外挿して与えた。もう一つは、多重ネスティングシステムである。これにより広域から狭域までの双方向的な同時並行計算を行い、空間スケールを段階的に絞り込むことが可能である。

計算対象は鹿児島県南西部の笠沙町に位置する野間岬(最大標高143m)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1を参照)。CSU-RAMSの計算では、4重ネストシステムを導入した。計算領域を図2に示す。便宜上、空間スケールの大きい順にGrid-1, Grid-2, Grid-3, Grid-4と称する。それぞれの水平空間分解能は、国土地理院の50m標高数値データに基づいて5km, 1km, 250m, 50mとした。対応する時間刻みは、15s, 3s, 0.5s, 0.25sである。それぞれの格子点数は、30×30×23点, 32×32×23点, 30×30×23点, 62×62×23点である。ここで、鉛直方向の格子分割は全てのメッシュで同じとし、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 $\Delta z_{\min}=45m$ である。計算は2003年4月1日から4月7日までの6日間(144時間)について行った。

2003年4月2日の9時(JST)におけるGrid-1(水平分解能5km), Grid-4(水平分解能50m)の気流場を図3に示す。ここで、地上高さは約45mである。Grid-4では、Grid-1の広域気流場を反映した結果が得られており、岬上空では北風が卓越している。CSU-RAMSが時間平均型の乱流モデルであること、また、今回の計算では鉛直方向の分解能(特に地表面からの第一メッシュ幅、すなわち、最小メッシュ幅)が十分に小さくないことに起因して、風に対する地形効果は

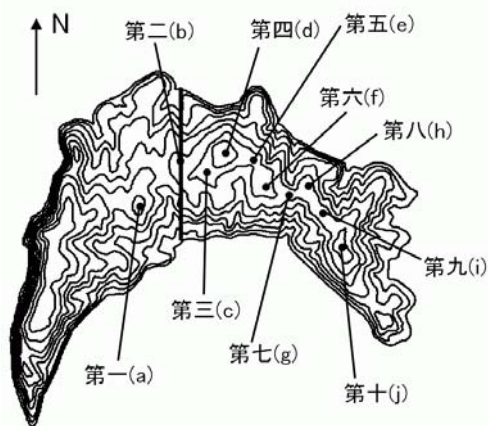


図1 鹿児島県笠沙町に位置する野間岬(最大標高143m)と九州電力(株)の10基の風力タービン

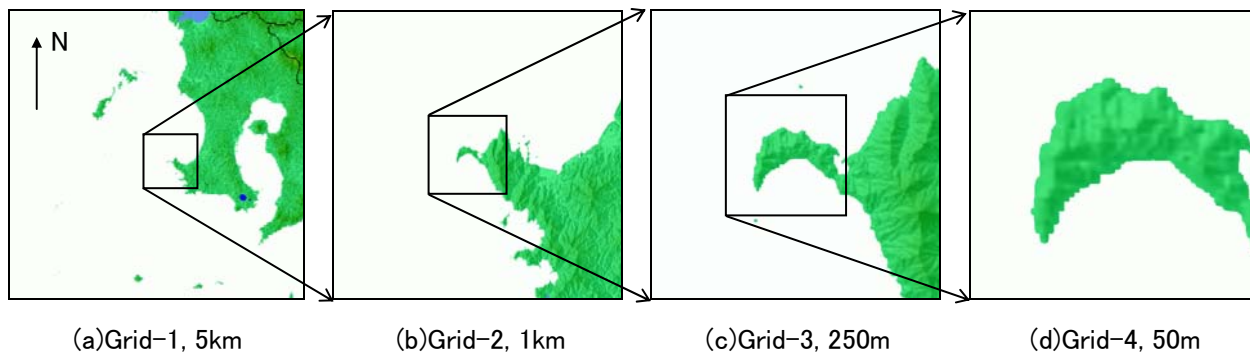


図2 地域気象モデルCSU-RAMSで用いた計算領域, 4重ネストシステム, 上記の数値は水平分解能を示す。

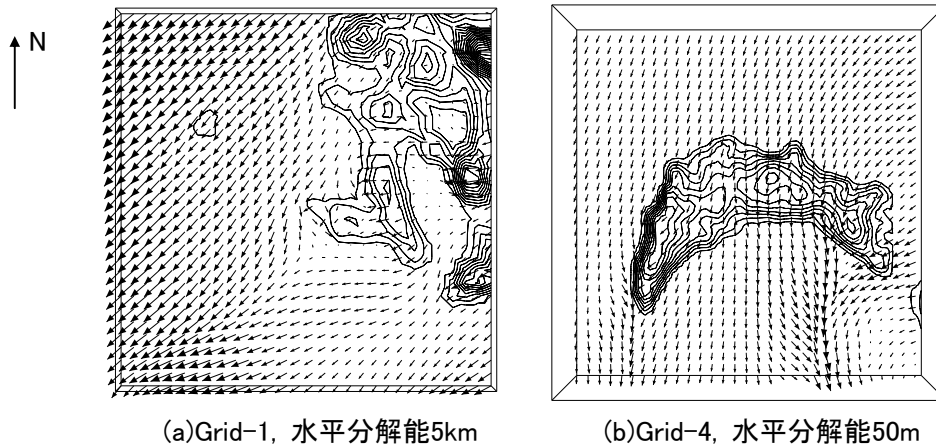


図3 地域気象モデルCSU-RAMSの計算結果, 地上約45mの速度ベクトル図, 2003年4月2日, 9:00(JST)

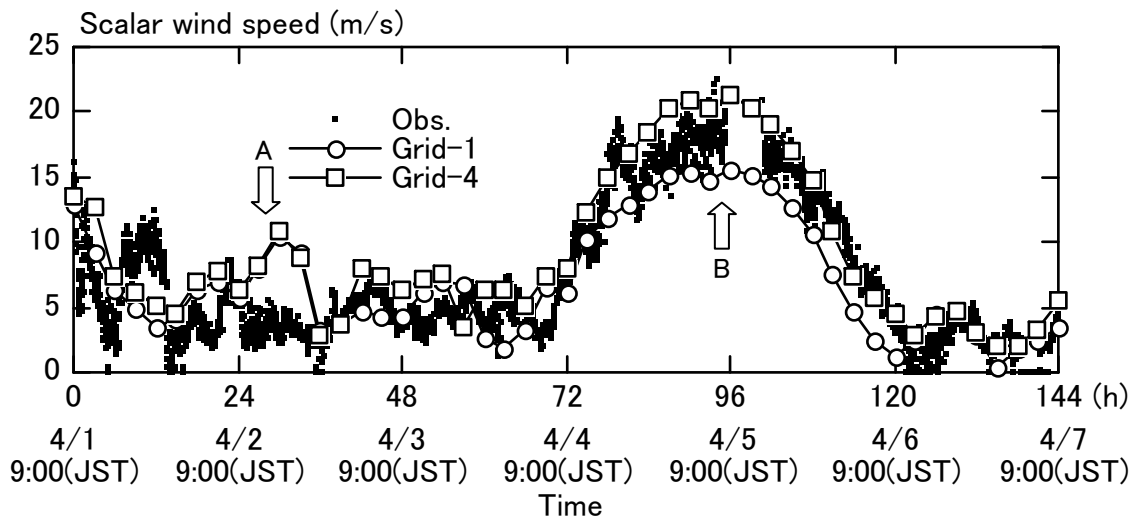


図4 地域気象モデルCSU-RAMSの計算結果と野外観測値との比較, 第4発電所, スカラー風速値, 地上約45m

顕著には捉えられていない。最小メッシュ幅を、後述するCFDモデル(RIAM-COMPACT)と同程度にした計算を試みたが、収束が悪くうまくいかなかった。この原因がどこにあったのかは、今後、検討する予定である。第4発電所におけるGrid-1, Grid-4のスカラー風速値と実測値との比較を図4に示す。紙面の都合上省略するが、風向も良好な一致を得た。計算結果は野外観測値の定性的な傾向を再現している。特に、計算上は野間岬の地形をほとんど再現していないGrid-1の結果が、実測値の傾向を定性的に捉えていることは非常に興味深い。これは、岬周辺の気流場が局地的な気象条件ではなく、メソスケールの気圧傾度などの影響で決定されていることを示唆している。予想されるように、Grid-4では格子解像度の増加に伴い、Grid-1よりも良好な一致を得た(図中の矢印B)。但し、CSU-RAMSの結果と野外観測結果のずれが大きい箇所も幾つか確認できる(例えば図中の矢印A)。これは、風に対する地形効果などが十分に捉えられていないためだと考えられる。よって、岬周辺の気流場をさらに精緻に再現するためには、以下に示すCFDモデルの導入が必要である。

3. CFDモデルRIAM-COMPACTの概要と計算結果

3.1 標準Smagorinskyモデルに基づいたLES基礎式

CFDモデルであるRIAM-COMPACTは、非圧縮性流体の連続の式とNavier-Stokes方程式に基づき、都市域や複雑地形上の非定常な風況場および拡散場をLESにより数値予測する。RIAM-COMPACTでは、種々の大気安定度を考慮することが可能である。本研究では中立成層状態下での風況場が対象であるので、その支配方程式を以下に示す。LESでは流れ場に空間フィルタを施し、大小様々なスケールの乱流渦を計算格子よりも大きなGS(Grid Scale)

成分の渦と、それよりも小さなSGS(Sub-Grid Scale)成分の渦に分離する。GS成分の大規模渦はモデルに頼らず直接数値シミュレーションを行う。一方で、SGS成分の小規模渦が担う、主としてエネルギー消散作用はSGS応力を物理的考察に基づいてモデル化する。差分法では空間フィルタと微分操作の互換性が成立するので、フィルタ関数を陽に与える必要はない。SGSモデルには計算安定性に優れた標準Smagorinskyモデル⁸⁾を採用する。これは、局所平衡と渦粘性を仮定しており、エネルギー散逸の総量は妥当なモデルである。空間フィルタを施して粗視化した連続の式とNavier-Stokes方程式を以下の(1), (2)式に示す。但し、座標系は $x_i(x_1=x, x_2=y, x_3=z)$ とし、これに対応する物理速度のGS成分は $\bar{u}_i(\bar{u}_1=\bar{u}, \bar{u}_2=\bar{v}, \bar{u}_3=\bar{w})$ とする。ここで、添え字1, 2, 3は主流方向, 主流直交方向, 鉛直方向を示す。速度は境界層上空の風速 U , 長さは建物あるいは地形の特徴的な高さスケール H , 時間は H/U , 圧力は参照密度 ρ と U の積 ρU^2 で無次元化されている。なお、重複する添え字には総和規約が適用される。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1) \quad \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + 2 \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{1}{\text{Re}} + \nu_{\text{SGS}} \right) \bar{S}_{ij} \right] \quad (2)$$

(2)式中の \bar{P} は総圧力と呼ばれ、以下のように定義される。

$$\bar{P} = \bar{p} + \frac{2}{3} k_{\text{SGS}} \quad (3)$$

(3)式中の \bar{p} は圧力のGS成分であり、 k_{SGS} はSGS運動エネルギーで以下のように定義される。

$$k_{\text{SGS}} = \frac{1}{2} (\overline{u_k u_k} - \bar{u}_k \bar{u}_k) = \frac{1}{2} \overline{u'_k u'_k} \quad (4)$$

(2)式中のSGS渦粘性係数 ν_{SGS} は、標準Smagorinskyモデルにおける唯一の無次元パラメータであるSmagorinsky定数 C_s と歪速度テンソル \bar{S}_{ij} を用いて以下のように定義される。

$$\nu_{\text{SGS}} = (C_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (5) \quad |\bar{S}| = (2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{1/2} \quad (6) \quad \bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

標準Smagorinskyモデルでは、大小様々なスケールの乱流渦を分離するフィルタ幅が代表長さスケールとなる。デカルト座標系では、フィルタ幅は格子幅と同じとし各方向の格子幅 $h_i(h_x, h_y, h_z)$ を用いて以下のように定義される。

$$\Delta = (h_x h_y h_z)^{1/3} \quad (8)$$

以上、(1)-(8)式がデカルト座標系(物理面)での標準Smagorinskyモデルに基づいたLES基礎式である。

3.2 数値計算法

本研究では z^* 座標系(terrain-following vertical coordinate system)のコロケート格子に基づいた差分法により数値解を求める。よって、上記のLES基礎式は物理面から計算面に写像される。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圧力を定義し、セル界面にヤコビアンを乗じた反変速度成分を定義する格子系である。速度場と圧力場のカップリングアルゴリズムには、Eulerの1次陽解法を基礎とした部分段階法を採用する。圧力は2段階に分けた(2)式のうち、圧力勾配項を含む式を(1)式に代入してPoisson方程式を導き、SOR法(Successive Over Relaxation method)により緩和計算して算出する。空間項の離散化に関して、(2)式の対流項には補間法⁹⁾による4次精度中心差分に4階微分の数値粘性項を付加した3次精度風上差分を用いる。ここで、数値粘性項の重みは $\alpha=0.5$ とし、その影響は十分に小さくした。一般に使用される3次精度風上差分のKawamura-Kuwaharaスキーム¹⁰⁾では $\alpha=3$ である。残りの全ての空間項には、2次精度中心差分を適用した。以下に実際の計算手順を示す。

1. $\bar{u}^n, \bar{v}^n, \bar{w}^n$ を用いて座標変換された(5)式から, SGS渦粘性係数 ν_{SGS} を求める.
2. (2)式のfiltered Navier-Stokes方程式を座標変換した後に2段階に分け, 圧力勾配項以外の各項を含む式から物理速度のGS成分 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ の中間値 $\bar{u}^*, \bar{v}^*, \bar{w}^*$ を求める.
3. 物理速度成分の中間値 $\bar{u}^*, \bar{v}^*, \bar{w}^*$ を反変速度成分 U^*, V^*, W^* に変換し, ヤコビアン J を乗じて JU^*, JV^*, JW^* としてセル界面にスタガード配置する.
4. JU^*, JV^*, JW^* が, 座標変換された(1)式を満足するように総圧力 \bar{P}^{n+1} をPoisson方程式からSOR法で求める.
5. $\bar{u}^*, \bar{v}^*, \bar{w}^*, JU^*, JV^*, JW^*$ に \bar{P}^{n+1} の勾配を加えて新たな時間ステップの $\bar{u}^{n+1}, \bar{v}^{n+1}, \bar{w}^{n+1}, JU^{n+1}, JV^{n+1}, JW^{n+1}$ を求める.

3.3 計算対象地域と諸条件

図3(b)に示す地域気象モデルCSU-RAMSのGrid-4の結果(4月2日の9時(JST))と比較するため, 鹿児島県野間岬の風況場シミュレーションを行った. 水平分解能はCSU-RAMSと同じであり, 国土地理院の50m標高数値データを用いた. 鉛直方向は地表面付近で密になるように不等間隔の空間分解能($\Delta z=0.5\sim 143\text{m}$)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 $5\text{km}\times 5\text{km}\times 1.43\text{km}$ の空間を有する(図5を参照). 格子点数はx, y, z方向に $101\times 101\times 51$ 点である. 鉛直方向の最小メッシュ幅と格子点数がCSU-RAMSの場合とは大きく異なる. 先に述べたように, CSU-RAMSを狭域の気流場解析へ適用した際には, 計算の安定性と収束性が著しく低下した. 一方, RIAM-COMPACTではそのような問題は生じなかった. 風向は図3(b)に示すCSU-RAMSの結果に基づき, 北風とした. 速度の境界条件に関して, 流入境界面では1/7乗のべき法則に従うプロファイルを与え, 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. 圧力の境界条件は全ての境界面でNeumann条件とした. 野間岬の最大標高 $H(=143\text{m})$ と, 流入境界面での高度 H における風速 U_{ref} に基づいたReynolds数は $Re(=U_{ref}H/\nu)=10^4$ とした. 時間刻みは $\Delta t=2\times 10^{-3}H/U_{ref}$ とした. (5)式中のSmagorinsky定数 C_s は全計算領域で0.1に固定し, 地表面近傍で C_s を減じるため, 壁面減衰関数を併用した.

3.4 計算結果と考察

RIAM-COMPACTで得られた計算結果(速度ベクトル図)を図6に示す. 図6(a)の水平断面の結果では, 図3(b)に示す地域気象モデルCSU-RAMSの結果とほぼ同じ高度(地上約45m)であるにも関わらず, 有意な違いが確認される. 図6(a)では, 岬の頂部付近における流れの局所的な増速や, 後流域での減速などが明確に再現されている. 第二発電所を通る鉛直断面(図1の実線)の様子を図6(b)に示す. 風力タービン(図中に表示)が設置されている地点では, 流れが局所的に増速している. 後流域では気流がダイナミックに変動しており, 渦放出が捉えられている. 定量的な考察は省略したが, RIAM-COMPACTによる計算結果は風洞実験および野外観測データと良好な一致を得た³⁾.

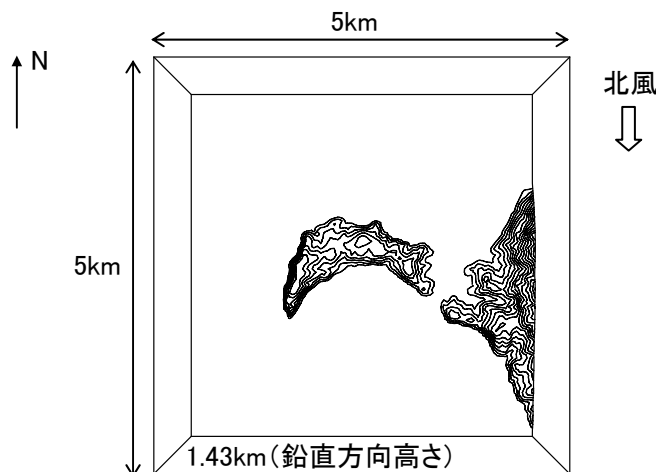
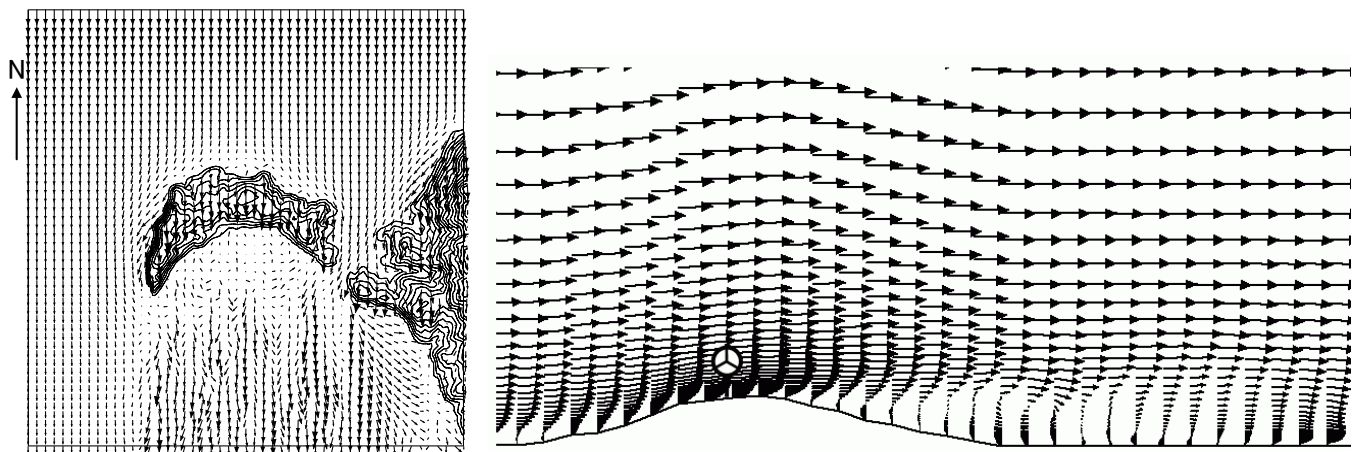


図5 CFDモデルRIAM-COMPACTで用いた計算領域, 水平分解能50m, $101\times 101\times 51$ 点



(a)地上約45mの水平断面

(b)図1に示す第二発電所を通る鉛直断面

図6 北風を対象にしたCFDモデルRIAM-COMPACTの計算結果, 速度ベクトル図

4. おわりに

本研究では, 30度以上の傾斜角度を有する鹿児島県野間岬を例に取り, 気象力学モデルのCSU-RAMSとCFDモデルのRIAM-COMPACTによる計算を行った. 本研究では, 鉛直方向の格子解像度の違いなどにより, CSU-RAMSとRIAM-COMPACTの正当な比較が行えなかったものの, 以下の知見を得た.

CSU-RAMSでは日変化などを考慮した現実的な時間スケールの数値シミュレーションが可能であり, 得られた結果は野外観測データを良好に再現することが明らかになった. 一方で, 水平分解能50m程度の狭域の気流場解析にCSU-RAMSを適用した場合, 計算の安定性と収束性に関連し, 鉛直方向に十分な格子解像度を設定することが困難であった. これは乱流モデルの問題などを含めて今後の検討課題としたい.

RIAM-COMPACTでは, 今回のCSU-RAMSの計算では捉えることが出来なかった, 流れの衝突, 剥離, 再付着などを含む複雑乱流場が再現されることを示した.

上記に示した両モデルの特徴を踏まえると, 広域ではマクロサイティングを目的としてCSU-RAMSを, 狭域ではマイクロサイティングを目的としてRIAM-COMPACTを用いるのが妥当であると考えられる. 両モデルの接続に関して, 以下に示すシナリオを提案する. まず, 1km程度の空間解像度でCSU-RAMSの計算を行い, そこから対象地域の卓越風向や風速の鉛直プロファイルなどの気流特性を抽出する. 次に, この計算結果をRIAM-COMPACTの流入気流条件として用い, 地形効果を考慮したきめ細やかな計算を行う¹¹⁾. 両モデルの精緻な融合・接続は今後の課題である.

謝辞

本研究を行うに際し, 九州電力(株)には野間岬風力発電サイトの野外観測データを提供して頂いた. 三菱重工業(株)には地域気象モデルCSU-RAMSに入力可能な野間岬周辺の50m標高数値データを提供して頂いた. ここに記して感謝の意を表します.

参考文献

- 1) 村上周三, 持田灯, 加藤信介, 木村敦子: 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“ながれ”, Vol.22, No.5, 2003, pp.375-386
- 2) 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“ながれ”, Vol.22, No.5, 2003, pp.387-396
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) Pielke et al.: A Comprehensive Meteorological Modeling System-RAMS, Meteor. Atmos. Phys., 49, 1992, pp.69-91
- 7) 吉田保衡, 弓本桂也, 鶴野伊津志: 領域気象モデルRAMSを用いた九州地域の風況特性と風力エネルギーの評価, 九州大学大学院総合理工学報告, 第25巻, 第3号, 2003, pp.387-394
- 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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 内田孝紀, 宮崎康伸, 大屋裕二, 鶴野伊津志: 地域気象モデルを考慮した複雑地形上の風況予測シミュレーション—CSU-RAMSとRIAM-COMPACTの接続—, 第24回風力エネルギー利用シンポジウム講演集, 2002, pp.103-106