

ラージ・エディ・シミュレーションによる 局地的風況予測モデルの評価

内田 孝紀*, 大屋 裕二*

(2000年11月30日受理)

Assessment of LES Codes for Predicting Local Wind System over Complex Terrain

Takanori UCHIDA and Yuji OHYA

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

Abstract

In order to develop an overall efficient and accurate model of simulating an unsteady three-dimensional airflow over complex terrain with characteristic length scales of the order of kilometers, we have been examining the large-eddy simulation (LES) technique using a finite-difference method (FDM). The LES codes are based on two grid systems and corresponding variable arrangement: one is an orthogonal staggered grid; the other is a generalized curvilinear collocated grid. Using these codes, we calculated the non-stratified airflow over complex terrain in a horizontal region of 9.5km×5km with relatively fine spatial resolution ($\Delta x = \Delta y = 50\text{m}$). Both codes remarkably removed the numerical difficulties such as the convergence of the successive over relaxation (SOR) method in solving the pressure Poisson equation, resulting in the numerical results with much higher accuracy. Despite the differences in the grid system and in the variable arrangement, no significant differences in the flow pattern between the both numerical results were found, and overall characteristic phenomena such as the wind speed-up were successfully simulated.

Key words : Large-eddy simulation, Orthogonal staggered grid, Generalized curvilinear collocated grid, Local wind system, Complex terrain

1. 緒言

風工学分野における数値流体シミュレーション (CWE : computational wind engineering) は、コンピュータの演算性能などのハードウェアと、計算手法などのソフトウェアの急速な発達に伴い、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注目されている。特に局地的強風域の推定やその発生メカニズムの解明、また近年注目を集めている風力発電における適地選定問題などに関連して、数 m ~ 数 km 程度の空間スケールを有する地上構造物や小規模地形周りの高精度な風況予測シミュレーション法の開発が強く望まれている。

そこで我々は差分法 (FDM: finite-difference method) により数 m ~ 数 km 程度の空間スケールを対象にした局地的風況予測モデルの開発を行っている。具体的には、直交座標系のスタガード格子と一般曲線座標系のコロケート格子に基づき (Fig.1, Fig.2 を参照), 乱流モデルを使用せずに流れの支配方程式を直接解く direct

numerical simulation (DNS)^{1, 2)} と乱流モデルの一つで空間平均を施した支配方程式を解く large-eddy simulation (LES)^{3, 4)} を検討している。本報では直交座標系のスタガード格子と一般曲線座標系のコロケート格子に基づいた LES コードに関して、その実用性と有効性を検討する目的で、同じ条件で実地形上の流れ解析を行い、CPU 時間や風況パターンの比較などを行った。

2. LES コードの概要

2.1 LES における流れの支配方程式

LES では流れ場に空間フィルタ (あるいは空間平均) 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) 成分または解像可能なスケール (resolvable scale) の渦と、それよりも小さな SGS (sub-grid scale) 成分の渦とに分離する。これに伴い、計算格子で解像できる程度にまで滑らかにされた GS 成分の大規模

* 九州大学応用力学研究所

渦については、流れ場の影響を強く受けるため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については、フィルタリングにより生じたSGS応力を物理的考察に基づいてモデル化して計算に取り入れる。差分法においては一般に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。本研究では、SGSモデルとして局所平衡と渦粘性を仮定したスマゴリンスキーモデル⁵⁾を採用する。空間フィルタを施して粗視化(coarse graining)した連続の式とナビエ・ストークス方程式の無次元形を以下に示す。ここで、主流方向、スパン方向、鉛直方向を示す座標系は $x_i(x_1=x, x_2=y, x_3=z)$ とし、各方向における速度の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。長さの代表値には計算領域の特徴的な地形高さスケール h を選び、速度の代表値には h における速度 U_∞ を選ぶ。よって、流れ場を特徴づけるレイノルズ数は U_∞ と h を用いて $Re=U_\infty h/\nu$ と定義される。なお、重複する添え字には総和規約が適用される。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

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

(2)式中の ν_{SGS} はSGS渦粘性係数と呼ばれ、スマゴリンスキーモデル⁵⁾における唯一のモデルパラメータであるスマゴリンスキー定数 C_s と歪速度テンソル(strain-rate tensor) \bar{S}_{ij} を用いて以下のように定義される。ここで、 C_s にはvan Driest型の壁面減衰関数(wall damping function) f_s を乗じて地表面付近において修正を施す。なお、コード上の使用についてはTable.1に示す。

$$\nu_{SGS} = (C_s f_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (3)$$

$$f_s = 1 - \exp(-z^+ / 25) \quad (4)$$

$$|\bar{S}| = (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{1/2} \quad (5)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

スマゴリンスキーモデル⁵⁾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。直交座標系では、フィルタ幅は格子幅と同じとして各方向の格子幅 $h_i(=h_x, h_y, h_z)$ により以下のように定義する。

$$\Delta = (h_x h_y h_z)^{1/3} \quad (7)$$

以上、(1)-(7)式が直交座標系におけるLESの支配方程式である。一般曲線座標系に基づくLESコードでは、上記の(1)-(7)式は計算面 $(\xi-\eta-\zeta)$ に変換される。

2.2 座標系と変数配置

気象分野における複雑地形上の流れ解析では、 σ 座標系、あるいは z^* 座標系(terrain-following vertical coordinate system)が使用される。本研究ではFig.1, Fig.2に示すように、直交座標系ではスタガード格子、一般曲線座標系ではコロケート格子の組み合わせを採用する。スタガード格子では計算格子のセル中心に圧力を定義し、セル界面に各速度成分を定義する。この場合、実地形は計算格子のセルの集合体で矩形形状に近似される。この方法は原則として滑らかな曲線は表現できないが、格子解像度を上げれば曲線的な地形形状も高い精度で表される。一方、コロケート格子ではセル中心に圧力と物理速度成分を定義し、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。

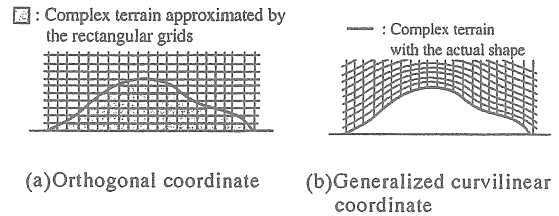
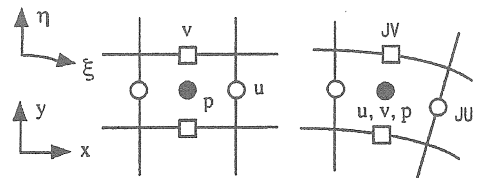


Fig.1 Coordinate system



(a) Staggered grid (b) Collocated grid
Fig.2 Variable arrangement

2.3 数値計算法

LESの支配方程式である(2)式は若干の付加項を伴うナビエ・ストークス方程式であるので、一般に使用される非定常流体解析法がそのまま適用できる。速度場と圧力場のカップリングアルゴリズムには、オイラー陽解法に基づいた部分段階法(fractional step method)⁶⁾を用いる。圧力については、2段階に分けた(2)式のうち、圧力勾配項を含む式を(1)式に代入して圧力のPoisson方程

	Code I	Code II
Coordinate system	Orthogonal coordinate	Generalized curvilinear coordinate
Variable arrangement	Staggered arrangement	Collocated arrangement
Discretization method	Finite-difference method (FDM)	
Coupling algorithm	Fractional step method	
Time advancement method	Euler explicit method	
Poisson equation for pressure	Successive over relaxation (SOR) method	
Convective terms	3rd-order upwind scheme based on an interpolation method ⁷⁾ ($\alpha=0.5$)	
Other spatial derivative terms	2nd-order central scheme	
SGS model	Smagorinsky model	
Wall damping function	Not used	Used

Table.1 Characteristics of the LES codes

式を導き, SOR法(successive over relaxation method)により緩和計算する. 空間項の離散化に関して, (2)式の対流項には3次精度風上差分を適用する. 但し, 4次精度中心差分は補間法⁷⁾に基づき, また4階微分の数値拡散項の重みは通常使用されるK-Kスキーム⁸⁾の $\alpha=3$ に対して $\alpha=0.5$ とし, その影響は十分小さくする. 残りの空間項については2次精度中心差分を用いる. 直交座標系の場合を例に取り, 実際の計算手順を以下に示す. なお, 直交座標系のスタガード格子と一般曲線座標系のコロケート格子に基づいたLESコードの概要をTable.1に示す. 以後, 直交座標系のスタガード格子に基づいたLESコードをCode I, 一般曲線座標系のコロケート格子に基づいたLESコードをCode IIと称する.

- (2)式の filtered ナビエ・ストークス方程式を2段階に分け, 圧力勾配項以外の各項を含む式から速度のGS成分 \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} の中間値 \bar{u}^* , \bar{v}^* , \bar{w}^* を求める.
- \bar{u}^* , \bar{v}^* , \bar{w}^* が(1)式を満足するように総圧力 \bar{P}^{n+1} を圧力方程式からSOR法により求める.
- \bar{u}^* , \bar{v}^* , \bar{w}^* 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} を求める.

3. 実地形上の流れ解析への適用

3.1 計算領域とパラメータ

Code I, Code IIの実用性と有効性を検討する目的で, 同一条件で実地形上の流れ解析を行った. 今回計

算対象に選んだ地域は, Fig.3に示す糸島半島付近(実線で囲んだ地域)である. ここは九州大学の新キャンパス移転が予定されている地域を含み, 水平方向に $9.5\text{km} \times 5\text{km}$ の空間を有する.

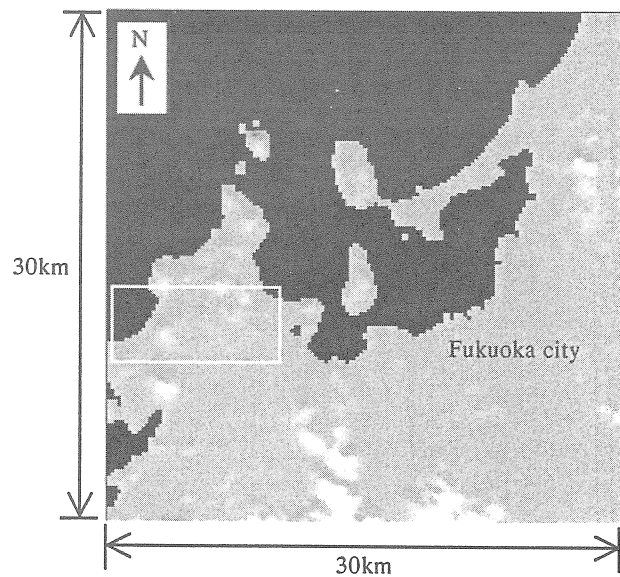


Fig.3 Computational domain (solid line)

Fig.4にはFig.3において実線で囲んだ領域の拡大図, すなわち, 計算領域の鳥瞰図を示す. 計算領域は実距離で主流方向(x), スパン方向(y), 鉛直方向(z)に $9.5\text{km} \times 5\text{km} \times 1.22\text{km}$ である. 計算領域の地勢を概観すると, 標高244mの火山が卓越しており, その東側に緩やかな丘陵地帯(キャンパス移転地を含む)が広がっている. 実地形の形状は国土地理院発行の数値地図

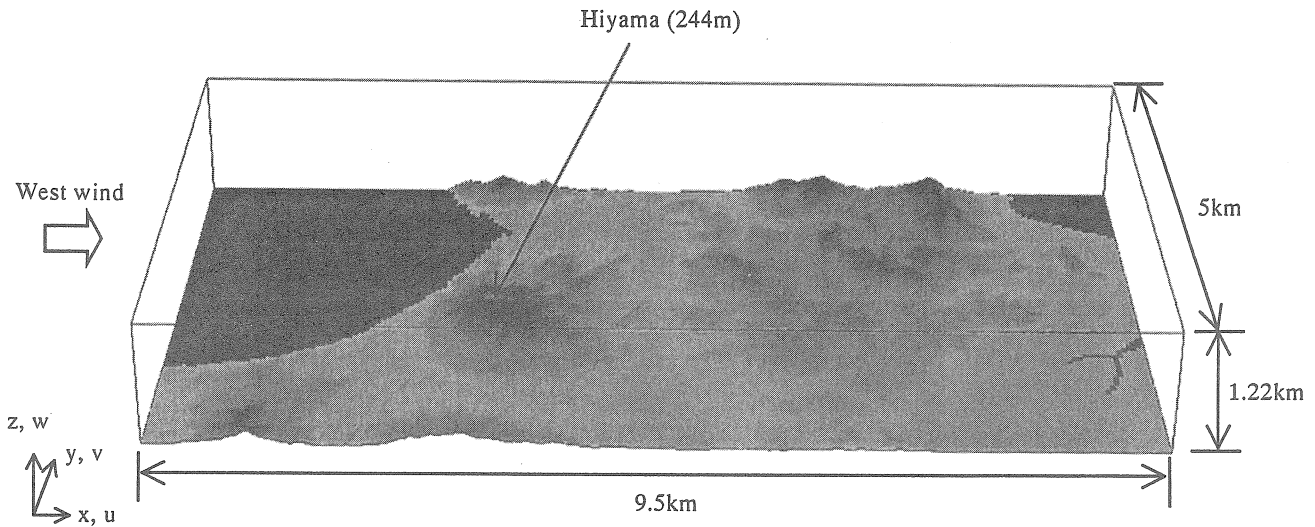


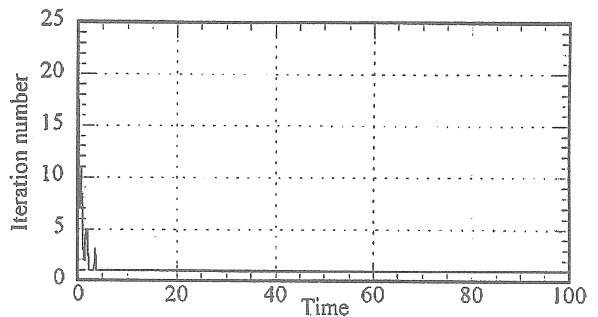
Fig.4 Bird'-eye view of the computational domain

データ(50m メッシュデータ)を基に作成した。格子点数は x, y, z 方向にそれぞれ $191 \times 101 \times 61$ 点である。水平方向には等間隔の分解能($\Delta x = \Delta y = 50\text{m}$)とし、鉛直方向には地表面付近で格子が密になるように不等間隔に設定した($\Delta z = 0.85 \sim 61\text{m}$)。計算のレイノルズ数は、標高 244m の火山を高さの代表値 h とし、火山頂部における風速 U_∞ を用いて $Re = U_\infty h / \nu = 10^4$ と設定した。今回はこの地域の卓越風である西の風を想定して計算を行った。速度の境界条件に関して、流入境界は一様流入条件、側面と上部境界は滑り条件、流出は対流型流出条件、地表面は粘着条件とした。計算の時間刻みは $\Delta t = 2 \times 10^{-3} h / U_\infty$ とし、50,000 ステップの計算を行い、Code I, Code II の計算結果を比較した。(3)式のスマゴリンスキー定数 C_s は Code I, Code II ともに $C_s = 0.1$ とした。なお、Code I については $z^* (= zu_r / \nu)$ が定義し難いなどの理由から壁面減衰関数は使用していない。ここで今回設定した計算パラメータについて実スケールとの対応を考えてみる。今、設定風速を $U_\infty = 5\text{m/s}$ とすると、本計算で用いた動粘性係数は $\nu = 0.122\text{m}^2/\text{s}$ となる。また 50,000 ステップ(無次元時間 100)の計算は約 1.4h の時間積分に対応する。

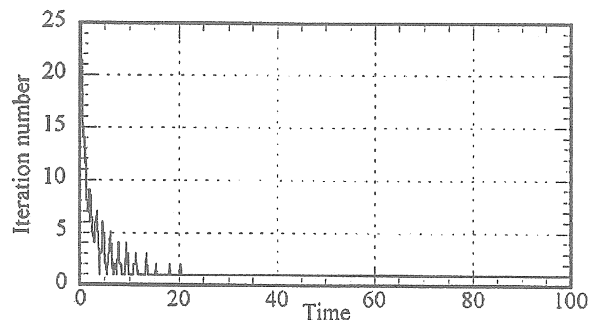
3.2 計算結果と考察

一般に非圧縮流体の数値シミュレーションでは、圧力の Poisson 方程式の求解に全計算時間の 90% 以上が費やされると言われている。そのため、圧力の Poisson 方程式を効率良くかつ高速に計算することは非常に重要となる。そこで、Code I, Code II について圧力の

Poisson 方程式の求解に使用した SOR 法の反復回数の時間変化を調べた。その結果を Fig.5 に示す。ここで、Code I, Code II ともに SOR 法の緩和係数は 0.9, 反復回数の上限は 100 回とし、収束判定は平均二乗残さを用いて 10^{-3} に設定した。



(a) Code I (orthogonal staggered grid)



(b) Code II (generalized curvilinear collocated grid)

Fig.5 Time variation of the iteration number of the SOR method (for pressure Poisson eq.)

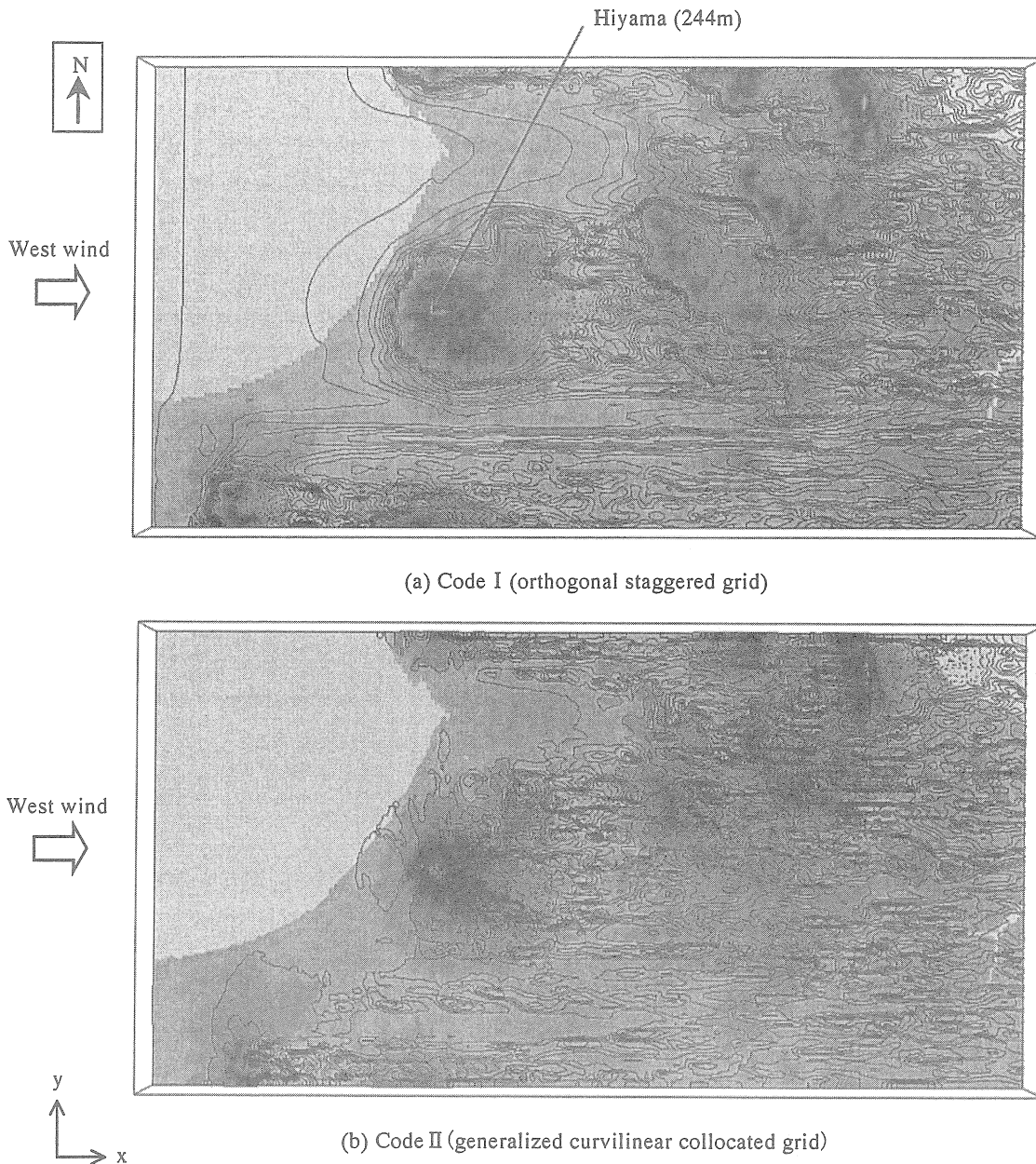


Fig.6 Instantaneous contour lines of the streamwise velocity component (\bar{u}) at $z=70\text{m}$

Fig.5 において最も注目すべきことは、Code I, Code II ともに計算初期を除いてSOR法の反復回数は常に1回となっていることである。これは圧力の Poisson 方程式が非常に効率良くかつ高速に計算されていることを意味する。言い換えると、高精度な数値解(風況場)が得られていることを示唆するものである。この要因として Code I, Code II ともに、それぞれの座標系に適した変数配置のもとで適切な差分近似(特に対流項と圧力の Poisson 方程式の離散化)⁷⁾が施されていることが考えられる。なお、Code I, Code II の CPU 時間はほぼ同じで、所内計算機室の高速演算サーバ VPP5000(メモリサイズ 1.5GB) の 1PE により約 3h 程度であった。

次に Code I, Code II で得られた風況場の比較を行う。Fig.6 に高度約 70m における速度成分(\bar{u})の等値線図($-0.4 \leq \bar{u} \leq 1.4$)を示す。但し、瞬間値であり、また Code II では高さの補正は行っていない。今回設定した風向が西の風であることから、計算領域の東側では火山(244m)の影響を受けた風況場となっていることが予想される。まず注目すべき点として、Code I, Code II では座標系や変数配置が違っても関わらず、両者の風況パターンの定性的な傾向は非常に良く一致していることが挙げられる。Code I, Code II ともに火山を回り込む流れや逆流域が明確に捉えられている。また同時に、わずかな地形の起伏の影響を受けて気流がダイナミックに変

動し、それに伴い局所的に風が増速あるいは減速していることは非常に興味深い。なお、今回は瞬間場のみの定性的な比較にとどまっているが、より定量的な考察および風洞実験、野外観測データとの比較検討は別の機会に報告する。

以上述べてきたように、Code I, Code IIともに圧力の Poisson 方程式は非常に効率良くかつ高速に計算される。これに伴い両者の CPU 時間はほぼ同じである。また同時に、得られる風況パターンは座標系や変数配置によらず、定性的な傾向はほとんど一致する。これらは本解析コードの大きな特徴であり、その有効性を示唆するものである。

4. まとめ

我々は数 m~数 km 程度の空間スケールを対象にした局地的風況予測モデルの開発検討を行っている。本報では直交座標系のスタガード格子に基づいた LES コード(Code I)と、一般曲線座標系のコロケート格子に基づいた LES コード(Code II)に関して、その実用性と有効性を検討する目的で、同じ条件で実地形上の流れ解析を行った。CPU 時間や風況パターンの比較などを行い、本解析コードの主な特徴として以下の知見を得た。

- 1) Code I, Code IIともに圧力の Poisson 方程式の緩和計算は非常に効率良くかつ高速に実行される。これは両コードともに、それぞれの座標系に適した変数配置のもとで適切な差分近似(特に対流項と圧力の Poisson 方程式の離散化)⁷⁾が施されているためである。
- 2) 1)に伴い、Code I, Code IIの CPU 時間はほぼ同じである。
- 3) 得られる風況パターンに関しては、座標系や変数配置によらず Code I, Code IIの定性的な傾向はほとんど一致する。
- 4) わずかな地形の起伏による気流の変動が捉えられ、

また同時に、地形効果による逆流域、あるいは局所的な風の増速や減速も精度良く再現される。

5. 今後の課題

本報で述べたように、本解析コードは数 m~数 km 程度の空間スケールを有する局地的風況予測モデルとして非常に有効であることが示唆された。今後、より高精度な数値予測モデルとして確立し実用に供するためには、以下のような課題に取り組んでいく必要がある。

- 1) 地表面粗度の取り扱い
- 2) 流入変動風としての大気乱流の再現
- 3) 高レイノルズ数への対応
- 4) 大気成層乱流に適した SGS モデルの検討
- 5) 注目する地域を効率良く解析するためのネスティング手法の導入
- 6) 境界条件を適切に設定するための、広域スケールを対象としたメソスケールモデルとの接続法の開発

なお、これらの幾つかについては現在既に検討中である。

参考文献

- 1) 内田, 大屋, 第15回風工学シンポジウム論文集, (1998) 131
- 2) T.Uchida, Y.Ohya, J.Wind Eng. and Ind. Aerodyn., Vol.81 (1999) 283
- 3) 藤井, 内田, 鳥谷, 大屋, 航空宇宙学会西部支部講演集 (2000) 27
- 4) 内田, 大屋, 第16回風工学シンポジウム論文集, (2000) 59
- 5) J.W.Deardorff, J.Fluid.Mech., Vol.41 (1970) 453
- 6) J.Kim et al., J.Comput. Phys., Vol.59 (1985) 308
- 7) 梶島, 養賢堂 (1999)
- 8) T.Kawamura et al., Fluid Dyn. Res., Vol.1 (1986) 145