一般曲線座標系 LES による局地的風況予測法の開発

安定成層流体中における孤立地形の周辺風況場の推定

Development of a numerical prediction method for local wind fields by LES based on a generalized curvilinear coordinate system

On the prediction of wind fields around an isolated hill in a stably stratified fluid

内田孝紀, 九大応力研, 〒816-8580 春日市春日公園 6-1, takanori@riam.kyushu-u.ac.jp 大屋裕二, 九大応力研, 〒816-8580 春日市春日公園 6-1, ohya@riam.kyushu-u.ac.jp Takanori UCHIDA, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Kasuga 816-8580, Japan Yuji OHYA, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Kasuga 816-8580, Japan

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) based on a generalized curvilinear collocated grid. First, in order to test the accuracy of the LES code, the stably stratified airflows over an isolated hill were calculated. A strong wind area caused by the lee wave was clearly seen near the first trough behind the hill. Next, we calculated the non-stratified airflow over real complex terrain in a horizontal region of $9.5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ with relatively fine spatial resolution (x = y=50 m). In the numerical results flow characteristics such as the wind speed-up were successfully simulated.

1.はじめに

風工学分野における数値流体シミュレーションは,コンピ ュータの演算性能などの飛躍的な向上により,野外観測や風 洞実験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,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期待されている.

そこで我々は差分法(FDM)に基づいた DNS(Direct Numerical Simulation)^{(1),(2)}やLES(Large-Eddy Simulation)^{(3),(4)}により,数m~数kmの空間スケールを有する地上構造物や小スケール地形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.本報では一般曲線座標系 LES による解析結果を紹介する.まず計算コードの精度を検証するため,安定成層流体中における孤立地形周りの風況場シミュレーションを行う.特に一様近寄り流速に対する流れの増速率とその発生場所が精度良く予測できるかどうかに注目する.次に実地形上の中立成層流の計算を行い,局所的な風の増速や減速の予測精度を検討する.

2. 一般曲線座標系 LES による風況予測モデルの概要

2.1 Smagorinsky モデルに基づいた LES 基礎式

本研究では,非圧縮の安定成層流(d_B/dz=1)を考える.地 形の代表的な高さスケールは h とし,近寄り流速 U は一様と する Boussinesq 近似を用い,流れの代表スケール U, h, 0(参 照値)で無次元化した LES 基礎式は以下のようになる.なお, SGS モデルには Smagorinsky モデル⁽⁵⁾を用いる.

$$\begin{split} &\frac{\partial \overline{u}_{i}}{\partial x_{i}}=0\ ,\ \frac{\partial \overline{u}_{i}}{\partial t}+\overline{u}_{j}\frac{\partial \overline{u}_{i}}{\partial x_{j}}=-\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_{i}}+\frac{1}{Re}\frac{\partial^{2}\overline{u}_{i}}{\partial x_{j}\partial x_{j}}-\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_{j}}-\frac{\overline{\theta}\delta_{i3}}{Fr^{2}}\ ,\\ &\frac{\partial \overline{\theta}}{\partial t}+\overline{u}_{j}\frac{\partial \overline{\theta}}{\partial x_{j}}=\frac{1}{Re}\frac{\partial^{2}\overline{\theta}}{Pr}\frac{\partial^{2}\overline{\theta}}{\partial x_{j}\partial x_{j}}-\frac{\partial h_{j}}{\partial x_{j}}+\overline{w}\ ,\\ &\tau_{ij}=\frac{1}{3}\delta_{ij}\tau_{kk}-2\nu_{SGS}\overline{S}_{ij}\ ,\ \nu_{SGS}=\left(C_{s}f_{s}\Delta\right)^{2}\left|\overline{S}\right|\ ,\\ &f_{s}=1-exp\left(-z^{*}/25\right),\ \ \Delta=\left(h_{x}h_{y}h_{z}\right)^{1/3},\\ &\overline{S}_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial \overline{u}_{i}}{\partial x_{j}}+\frac{\partial \overline{u}_{j}}{\partial x_{i}}\right),\ \left|\overline{S}\right|=\left(2\overline{S}_{ij}\overline{S}_{ij}\right)^{1/2}\ ,\ h_{j}=-\frac{\nu_{SGS}}{Pr_{SGS}}\frac{\partial \overline{\theta}}{\partial x_{j}}\ . \end{split}$$

ここで,式中の Re, Fr, Pr はそれぞれ Reynolds 数(=Uh/), Froude 数(=U/Nh, N は浮力振動数), Prandtl 数(=0.71)である.

2.2 数値計算法

一般曲線座標系(- -)を導入し,上式を計算面に変換 する.変換後の支配方程式は差分法によって離散化を行い, 数値解を求める.支配方程式の時間積分法はオイラー陽解法 に基づいた部分段階法である.空間項の離散化に関して,対 流項には3次精度風上差分を適用し,残りの全ての空間項に は2次精度中心差分を用いる.但し,対流項の4次精度中心 差分には補間法⁽⁶⁾を用い,数値拡散項の重みはK-K スキーム ⁽⁷⁾の =3 に対して =0.5 とし,その影響は十分小さくする.

3. 孤立地形を過ぎる安定成層流の計算

3.1 計算パラメータなど

計算コードの精度を検証するため,孤立地形を過ぎる安定 成層流の計算を行った.計算領域は地形の高さをhとして主 流方向(x)に 27.5h,スパン方向(y)に 15h,鉛直方向(z)に 5h の空間を有する 孤立地形は流入境界から 7.5h 下流のスパン 中央に設置する.断面形状は $z(x, y)=cos^2((x^2+y^2)^{1/2}/2L)$ で 記述される余弦の2乗とした.ここでパラメータLは2.5で ある.格子点数はx,y,z方向にそれぞれ221×121×81点で あり最小格子幅 z_{min} は0.002hである計算はRe=3000で, 中立成層流のFr= と安定成層流のFr=1,0.5,0.1の4ケース に対して行った.初期条件はインパルシブスタートとした. 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,地表面は粘着条件,流出境界は対流流 出条件とした.無次元時間刻みは t=0.002 とし,モデルパ ラメータについては $C_s=0.1, Pr_{SGS}=0.5$ とした.

3.2 計算結果と考察

Fig.1 と Fig.2 に中立成層流の Fr= と安定成層流の Fr=1, 0.5, 0.1 に関して,スパン中央断面内の流線図(Fig.1)と,これ に対応した速度成分(\bar{u})の等値線図(Fig.2)を示す.Fig.1(a)と Fig.2(a)の中立成層流の Fr= では,地形背後において3次元 的な渦構造が示唆される.この渦構造はほぼ周期的に地形下 流へ放出されて流下する.Fig.1(b)と Fig.2(b)の安定成層流の Fr=1 では,長波長の風下波が地形下流に形成されている.こ れに伴い地形頂部付近からの流れの剥離が抑制されるとと もに,地形表面に沿って流れの増速域(\bar{u} > 1)が明確に見られ



(a) Fr= (non-stratified flow)



(b) Fr=1 (stably stratified flow)



(c) Fr=0.5 (stably stratified flow)



(d) Fr=0.1 (stably stratified flow)

Fig.1 The instantaneous wind field near the hill (streamlines), Re=3000.

る.また地形表面に沿った流れは風下波の上昇流により,裾 野付近から剥離して逆流域を形成している.Fig.1(c)と Fig.2(c)の安定成層流のFr=0.5では、成層度の増加に伴いFr=1 と比べて波長の短い風下波が地形下流に形成されている.結 果として、地形表面に沿った加速流(ū > 1)は中腹付近から剥 離し,地形からすぐ下流の上空に逆流域が誘起されている. なお, Fr=1, 0.5 において励起される風下波は定在波的であり, その波長は線形理論による予測値(2 Fr)とほぼ一致する. Fig.1(d)と Fig.2(d)の安定成層流の Fr=0.1 では, 鉛直方向の流 体運動は強く抑制され,流れはほぼ水平的である.これは地 形を回り込む流れが卓越していることを意味する.より強く 安定成層した流れ(Fr < 1)の挙動に関しては,分離流線高さ Hs(=1-Fr)と呼ばれるクライテリアが知られている.これは地 形上流において Hs よりも上空の流体は地形頂部を乗り越え, Hs よりも下層の流体は地形を回り込むというものである. 本研究の Fr=0.5, 0.1 においても Hs が観察され, その値は理 論値とほぼ一致した.以上述べてきた風況パターンは過去の 数値シミュレーション結果(1),(7)と非常に良い一致を示す.

4.実地形上の中立成層流の計算

4.1 計算パラメータなど

本計算コードにより,実地形を過ぎる中立成層流の計算を 行った.計算対象地域は,Fig.3 に示す糸島半島付近(図中に 実線で示す地域)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9.5km×5kmの 空間を有する.Fig.4 には計算領域の拡大図を示す.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 がっている計算領域は火山(244m)を代表スケールhとして, 主流方向(x),スパン方向(y),鉛直方向(z) に約40h×20h×5h



(a) Fr= (non-stratified flow)



(b) Fr=1 (stably stratified flow)







(d) Fr=0.1 (stably stratified flow)

Fig.2 The instantaneous wind field near the hill (contour lines of the streamwise velocity component (\overline{u})), Re=3000.

である.実地形の形状は国土地理院発行の数値地図データ (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 196×101×61 点である.水平方向には等間 隔の分解能(x=y=50m,すなわち,x=y=0.2h)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(z=0.85~61m,すなわち,z=0.0035~0.25h)に設定した.計 算のReynolds数は、火山頂部における風速Uを用いてRe=U h/=10⁴と設定した.今回はこの地域の卓越風である西の



Fig.3 The area covering the computational domain (inner solid line). The computational domain is 9.5km × 5km.



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,地表面は 粘着条件,流出境界は対流流出条件とした.無次元時間刻み は t=0.001 とし, モデルパラメータについては Cs=0.1 とし た.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 =5m/s とすると, 本計算で用いた動粘性係数は =0.122m²/s となる.また無次 元時間 100 の計算は約 1.4h の時間積分に対応する.



(a) The wind distributions



(b) The distributions of the streamwise velocity component (\overline{u})

Fig.7 The instantaneous wind field at 10m above the ground in the region shown by the inner solid line in Fig.4.

4.2 計算結果と考察

まず計算領域全体の風況特性について考察する.Fig.5, Fig.6には高度約10mにおける瞬間場と時間平均場の風速分 布を示す.但し,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.Fig.5,Fig.6においても,火山を回り込む流れや火山背後 での逆流域が明確に捉えられている.特に,Fig.5,Fig.6とも にわずかな地形の起伏によって気流がダイナミックに変動 し,それに伴い風が局所的に増速あるいは減速していること は非常に興味深い.

次にFig.4において実線で囲んだ地域(キャンパス移転地を 含む)に注目し,そこでの風況特性について考察する.Fig.7 には瞬間場における風速分布と速度成分(〒)の分布を示す. ここでFig.5, Fig.6と同様,高度は約10mである.Fig.8には Fig.7に対応した時間平均場を示す.Fig.7の瞬間場に注目す る.先に述べたように,この地域への流入風は火山(244m) の影響を受けてかなり変動している.また地形の起伏により 気流が局所的に増速あるいは減速している様子が明確に分 かる.特に風の増速域は地形の頂部付近において顕著に見ら れる.これらの傾向は Fig.8の時間平均場においても同様に 確認される.Fig.9 にパーティクルシミュレーションの結果



(b) The distributions of the streamwise velocity component (\overline{u})

Fig.8 The time-averaged wind field at 10m above the ground in the region shown by the inner solid line in Fig.4.

の示す.この図からこれまで述べてきた地形効果による気流 変化がより明確に分かる.



Fig.9 The particles simulation in the region shown by the inner solid line in Fig.4.

5.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,孤立地形および実地 形周辺流れの計算を行った.その結果,本研究において以下 の知見を得た.

- 安定成層流体中における孤立地形周りの風況場シミュレーションでは,種々の安定度に特徴的な流れパターンが再現できた.特に安定成層流のFr=1,0.5 では,風下波の下降流に伴い地形頂部付近からの流れの剥離が抑制される.結果として地形表面に沿って流れの局所的な増速域(ū>1)が出現する.
- 実地形を過ぎる中立成層流の計算では,地形効果による 気流変化が精度良く捉えられ,これに伴う風の局所的な 増速あるいは減速も再現される.

6.今後の課題

我々が開発した一般曲線座標系のコロケート格子に基づ いた LES 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特性の再現

- 3) 高 Reynolds 数への対応
- 4) 大気成層乱流に適した SGS モデルの改良
- 5) 注目する地域の風況場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
 にしたメソスケール大気乱流モデルとの接続法の開発

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) Uchida, T. and Ohya, Y., J. Wind Eng. and Ind. Aerodyn., 81 (1999) 283
- (3) 藤井,内田,烏谷,大屋,航空宇宙学会西部支部講演論 文集,(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) 持田,村上,松井,富永,第33回日本伝熱シンポジウム 講演論文集,(1996)437
- (6) 梶島,日本機械学会論文集 B編,60-578 (1994) 3319
- (7) Suzuki, M. and Kuwahara, K., Fluid Dyn. Res., 9 (1992) 1