

(I - 39) Smagorinskyモデルを用いたLESによる地形風数値シミュレーション

中央大学 学生員 ○ 本郷 拓人
中央大学 正会員 檜山 和男
鹿島建設 近藤 宏二

1. はじめに

地形周辺の風の流れは、剥離、逆流等を含む複雑な流れとなり、風向や風速が大きく変化するため風の流れを把握することは重要になってくる。従来、流況の把握は風洞実験によって行われていたが、近年、計算機性能の向上、計算理論の進歩にともない、数値シミュレーションの有効性が認められつつある。

本報告では、代表的な単純地形モデル(平板と30度の勾配を有する谷)を過ぎる地形風数値シミュレーションを行い、風洞実験結果と比較し、本解析手法の有効性を検討する。解析手法には、Smagorinsky渦粘性モデルを用いたLES(Large Eddy Simulation)を使用した。

2. LESの基礎方程式

非圧縮粘性乱流に対するLESの基礎方程式には、フィルタリングされたNavier-Stokes運動方程式とEulerの連続式を用いる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \bar{u}_{i,j} + P_{,i} = \left(\frac{1}{Re} + \nu_{SGS} \right) \bar{u}_{i,jj} \quad (1)$$

$$\bar{u}_{i,j} = 0 \quad (2)$$

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

ここで、 $_{,i}$ は*i*方向の偏微分、 $\bar{u}_i$ は*i*方向のフィルタリングされた流速、 $\bar{p}$ はフィルタリングされた圧力、 Re はレイノルズ数、 ν_{SGS} はSGSの渦粘性、 k_{SGS} はSGSの乱流エネルギーを表す。

SGSの渦粘性 ν_{SGS} にはSmagorinsky渦粘性モデルを用いた。

$$\nu_{SGS} = (C_S \Delta)^2 \bar{S}^{1/2} \quad (4)$$

$$\bar{S} = \bar{u}_{i,j} (\bar{u}_{i,j} + \bar{u}_{j,i}) \quad (5)$$

ここで、 Δ は粗視化のスケール、 C_S はSmagorinsky定数である。

式(1)、式(2)を空間方向にSUPG法に基づく有限要素法を、時間方向に修正準陰解法を用いて離散化すると、次の有限要素方程式が得られる。

$$\begin{aligned} & \frac{M_c u_i^{n+1} - M_c u_i^n}{\Delta t} + K(u_j^n) u_i^n \\ & = M_c M_L^{-1} C p^{n+1} - \left(\frac{1}{Re} + \nu_{SGS} \right) S u_i^n \end{aligned} \quad (6)$$

$$C^T u_i^{n+1} = 0 \quad (7)$$

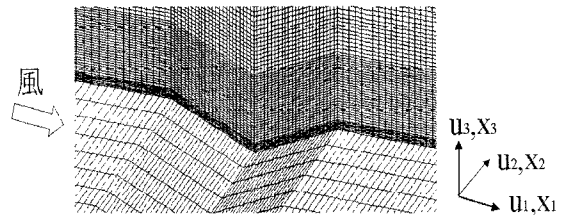
ここで、 K 、 C 、 S は係数行列であり、とくに M_C はコンシステントな質量行列、 M_L は集中化した質量行列である。なお、離散化要素としては、流速双一次、圧力区分0次のQ1/P0要素を用いた。式(6)、式(7)から圧力部を掃き出すと、次の圧力ポアソン方程式が得られる。

$$(C^T M_L^{-1} C) \Delta t p^{n+1} = -C^T M_c^{-1} b_i^n \quad (8)$$

ここで、 b_i^n は運動方程式の既知項をまとめたものである、 D は圧力安定行列(PSM項)¹⁾である。離散化については文献2)に詳しい。

3. 解析条件

本報告では数値解析例として平板と30度の勾配を有する谷の流れ解析を行い、中立の条件で行われた風洞実験結果との比較・検討を行う。図-1に谷の解析に用いた有限要素分割図を示す。両解析とも最小メッシュ幅は $0.04L$ (L は谷の深さ)であり、閉塞率は5%とした。また、スパン方向には $2L$ としている。境界条件は上面でslip条件、下面でnon-slip条件とし、側面には周期境界条件を適用した。流入条件は風洞実験で得られた主流方向平均速度の鉛直方向分布を与え、初期条件は2次元解析で得られた結果 u_1, u_3 を x_2 方向に同一に与え、 $u_2 = 0$ としたものを使用した。計算条件は、微小時間増分量 $\Delta t = 0.002$ 、レイノルズ数 $Re = 27,200$ (平板)、 $29,900$ (谷)、Smagorinsky定数 $C_S = 0.1$ とした。



節点総数：472,689 要素総数：444,080

図-1 有限要素分割図(谷近傍)

KeyWords: 地形風, LES, 安定化FEM
〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27
TEL. 03-3817-1815, FAX. 03-3817-1803

4. 解析結果

(1) 平板の流れ解析

図-2に計算領域流出口付近における風速分布図について実験結果と計算結果の比較を示す。地表面に近くにつれ数値解析の風速が実験に比べ小さくなっている。この原因の1つとして、今回比較的粗い計算格子を使用したため、*non-slip*条件の影響がでていることが考えられる。図-3に流出口付近の u_1 成分、 u_3 成分の rms 値の実験との比較を示す。図より数値解析では乱れが十分に再現されていないことがわかる。これは流入条件で平均速度の鉛直勾配のみしか与えていないためである。乱流の2次の統計量が再現されていないため図-2のように平均速度勾配に変化が起きていると考えられる。

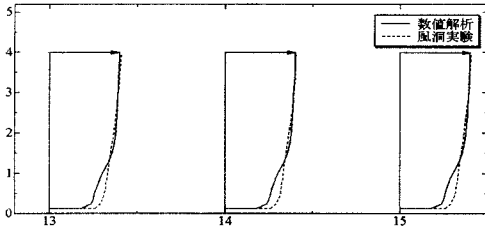


図-2 風速分布図の比較

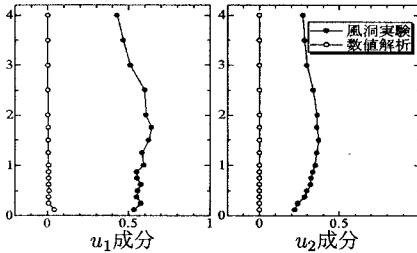


図-3 rms 値の比較

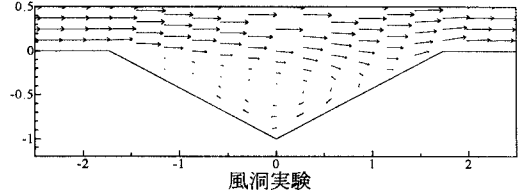
(2) 30度の勾配を有する谷の流れ解析

図-4、5にスパン方向中心断面における風速ベクトル図と流線図について実験結果と計算結果の比較を示す。実験に比べ数値解析では谷間に発生する循環流の風速が大きく、渦のスケールも大きいものとなり、3次元性が見られなかった。渦の中心位置も実験結果は谷間の中心にあるのに対し、解析結果では若干上流側になっている。

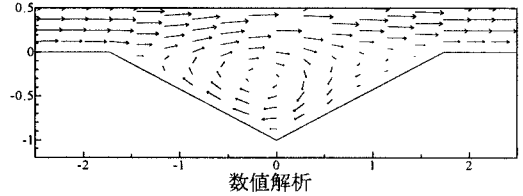
5. おわりに

本報告ではSmagorinskyモデルを用いたLESによる地形風数値シミュレーションを行い、風洞実験結果と比較し以下の結論を得た。

- 平板の解析では、実験に比べ地表面付近の風速が減少している。これは*non-slip*条件の影響、または、乱流の2次の統計量を再現していないためと考えられる。

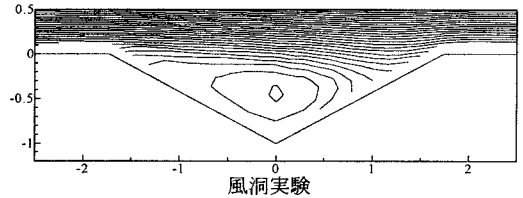


風洞実験

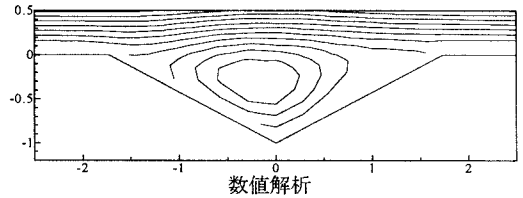


数値解析

図-4 風速ベクトル図の比較



風洞実験



数値解析

図-5 流線図の比較

- 谷の解析においては、実験に比べ谷間に発生する渦のスケールが大きく、循環も強いものになった。平板の解析において、地表面付近での風速の減少を少なくし実験のプロファイルを再現するためには、今後より細かな計算格子を使用するか2次の統計量を再現する必要がある⁴⁾と思われる。また谷の解析については、渦の循環が強く3次元性が出なかったため、スパン方向への領域を大きくするなど検討していく予定である。

参考文献

- 1) 水上昭, " Q_1-P_0 要素による FEM 流れ解析のための安定化行列", 第8回数値流体力学シンポジウム論文集, 647-650, (1994).
- 2) 櫻山和男, 猪股渉, " 混合補間要素を用いた非圧縮粘性流れ解析のための高精度安定化有限要素法", 土木学会論文集 No.591/I-43, 125-137, (1998).
- 3) 宮森俊和, 猪股渉, 櫻山和男, " 安定化有限要素法による非圧縮粘性乱流解析", 第24回関東支部技術研究発表会講演概要集, 102-103.
- 4) 近藤宏二, 持田灯, 村上周三, 土屋学, " 乱流境界層を対象としたLESのための流入変動風の生成法に関する研究 -流入変動風生成時の空間相関の再現が計算結果に及ぼす影響について-", 第12回数値流体力学シンポジウム論文集, 163-164, (1998).