

中央大学 学生員 ○本郷 拓人
中央大学大学院 学生員 山口 敏
中央大学 正会員 檜山 和男

1. はじめに

近年のコンピュータのハードウェアの急速な発展と計算手法の進歩により、地形風の把握に対して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、著者らが提案した非圧縮粘性流れ解析のための安定化有限要素法^{1),2)}を地形風解析に適用しその有効性について検討するものである。数値解析例として、代表的な単純地形モデル(30度の勾配を有する山)の2次元流れ解析を行い、中立の条件で行われた風洞実験結果との比較を行った。

2. 基礎方程式

基礎方程式は非圧縮粘性流れの基礎方程式である Navier-Stokes 方程式と連続式を用いる。代表長さ L 、代表流速 U で無次元化すると以下の基礎方程式が導かれる³⁾。

運動方程式；

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} = -p_{,i} + \frac{1}{Re} u_{i,jj} \quad (1)$$

連続式；

$$u_{i,i} = 0 \quad (2)$$

ここで、 i は i 方向の偏微分、 u_i は i 方向の速度成分、 p は圧力、 Re はレイノルズ数を表している。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。

$$\frac{M_c u_i^{n+1} - M_c u_i^n}{\Delta t} + K(u_j^n) u_i^n = M_c M_L^{-1} C p^{n+1} - \frac{1}{Re} S u_i^n \quad (3)$$

$$C^T u_i^{n+1} = 0 \quad (4)$$

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⁴⁾を用いた。式(3)、式(4)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。

$$(C^T M_L^{-1} C + D) \Delta t p^{n+1} = -C^T M_c^{-1} b_i^n \quad (5)$$

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り、 D は圧力安定化行列 (PSM 項) である。離散化については文献3) に詳しい。

3. 解析条件

本報告では数値解析例として30度の勾配を有する山の流れ解析を行い、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。解析には節点総数 11,529、要素総数 11,284 の有限要素分割を用いた。最小メッシュ幅は 0.04L (L は山の高さ) である。図-1 に計算領域と境界条件、図-2 に山近傍の有限要素分割図を示す。境界条件は上面で *slip* 条件、下面で *non-slip* 条件とした。図-3 に流入条件の図を示す。実験で得られた風速をスプライン補間し、高さ 4.0 以上では測定結果がないため一定の風速を与えている。計算条件は、微小時間増分 $\Delta t = 0.002$ 、レイノルズ数 $Re = 24,872$ とした。

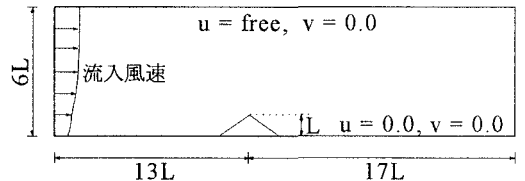


図-1 計算領域

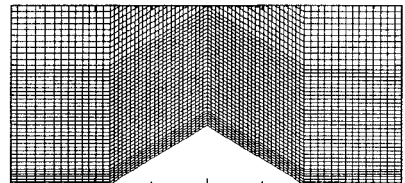


図-2 有限要素分割図 (山近傍)

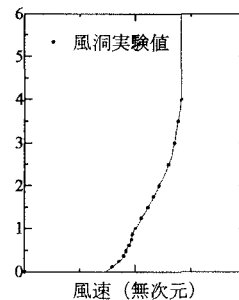


図-3 流入条件

4. 解析結果

図-4 に風速ベクトル図について実験結果と計算結果との比較を示す。計算結果は風洞実験の測定位置と一致する節点を取り、時間平均された値を表示している。図より、

KeyWords: 安定化有限要素法, 地形風

〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

TEL. 03-3817-1815 FAX. 03-3817-1803

山後方に見られる循環流の風速の比較において、計算結果の方が実験結果と比較して地表面付近に近づくにつれて大きくなり、渦のスケールも大きくなるがわかる。

計算結果と実験結果との差異をより明らかにするために、表-1に示す任意鉛直断面を取り出し、両者の風速ベクトルの比較を図-5に示した。断面Iでは、風速、風向ともにほぼ一致しているが、計算結果では最も地表面に近い風速ベクトルが、実験結果と比べて若干上向きになっている。この影響で山後方に生じる渦のスケールが大きく、かつ細長くなっている。この差異は計算が2次元計算であるため、スパン方向のエネルギーの散逸がないことによると考えられる。しかし、図に示す座標で鉛直方向2.0より上では、定性的にも定量的にもよい一致を示しているといえる。

後流渦のスケール、強さの差異をより明らかにするために図-6に流線図の比較を示す。図より計算結果は実験結果に比べ、後流渦のスケールが若干大きく細長いものとなっていることがわかる。渦の中心位置は図の座標で、実験結果が水平方向約3.5、鉛直方向約0.6に対し、計算結果は、水平方向約4.0、鉛直方向約0.8と若干遠く高い位置となっている。また、計算結果では、風速ベクトル図からもわかるように、山の前方と後方に小さい2次渦が見られるが、実験結果には見られない。

5. おわりに

本報告において地形風解析に対する安定化有限要素法の適用性を検討するために、単純地形モデル（30度の勾配を有する山の流れ）解析を行い、風洞実験結果との比較を行った。その結果、定性的にはよく一致したものの定量的には大きく異なった。とくに、後流渦の地表面付近の風速ベクトルの大きさに大きな差異が見られた。また、山頂付近での風速ベクトルが、数値解析では風洞実験に比べて上向きになり、その影響で山後方に発生する渦のスケールが、実験結果に比べ大きく後方に細長いものとなった。この原因としては、計算が2次元計算であるためにスパン方向へのエネルギーの散逸がないことが大きいと考えられる。今後は3次元計算を行うとともに、より細かいメッシュを用いての計算及び乱流モデルを導入していく予定である。

謝辞

本論文に用いた風洞実験結果は、鹿島建設株式会社技術研究所より提供していただいた。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 猪股渉, 櫻山和男, "安定化有限要素法による非圧縮性流れ解析", 第10回数値流体力学シンポジウム論文集, 334-335, (1996).
- 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) 大熊武司, 神田順, 田村幸雄, "建築物の耐風設計", 鹿島出版会, (1996).
- 4) 水上昭, "Q1-P0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).

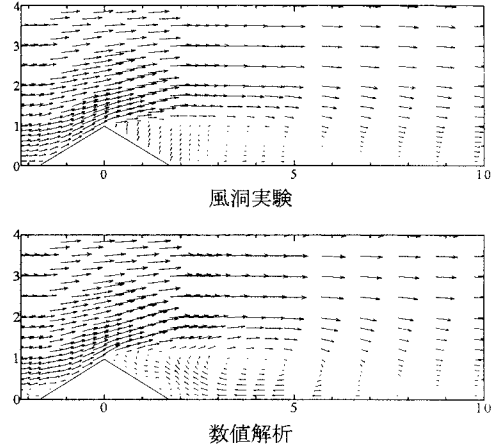


図-4 風速ベクトル図の比較

表-1 断面の位置

断面	I	II	III	IV	V
断面位置	0.000	1.982	4.232	6.732	9.732

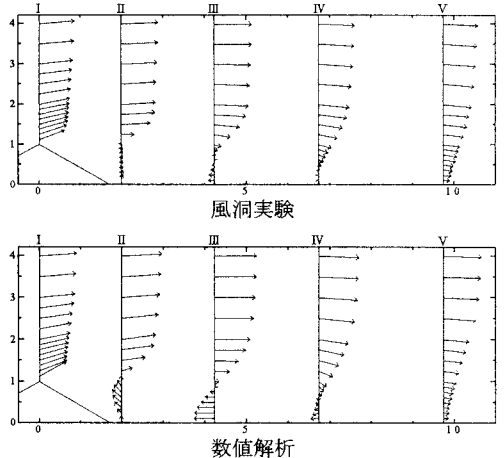


図-5 任意断面における風速ベクトル図の比較

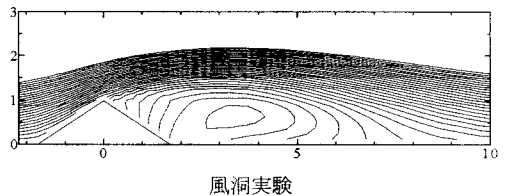


図-6 流線図の比較