

3次元複雑地形を過ぎる安定成層流の数値シミュレーション

Numerical simulation of stably stratified flows past a 3-D complex terrain

○内田 孝紀* 大屋裕二** 小園茂平***
Takanori UCHIDA Yuji OHYA Shigehira OZONO

ABSTRACT

A direct numerical simulation code for density stratified flows past a 3-D complex terrain is developed. A 3-D complex terrain is approximately represented by a rectangular grid system. At first, the simulation code is applied to stably stratified flows past a 3-D isolated hill. The numerical results are compared with those based on a body-fitted-coordinate system and the flow visualization experiments by the density-stratified towing tank. The overall flow structures are in good agreement. Next, this code is also applied to an artificial 3-D complex terrain and the effect of stratification on the flows past the terrain is examined.

Key Words : Stratified flows, Finite-difference method, Rectangular grid system, 3-D isolated hill, 3-D complex terrain

1. はじめに

大気境界層流では鉛直方向に密度が変化した成層状態にある場合が多く、そのような成層流が物体を過ぎる場合には浮力効果により様々な流動現象が出現する。特に夜間の安定成層流は汚染物質の移流・拡散現象等の大気汚染問題としても非常に重要である。従来から地面上の物体周りの成層流に関する実験的研究¹⁾は数多く報告されているものの、数値的研究²⁾は比較的少ない。さらに、現実に存在する山や建築物等は3次元としての複雑地形を構成していることを考えると、より実用的な3次元計算が望まれる。このような3次元複雑地形を過ぎる成層流を差分法により数値シミュレーションする場合、地形表面に沿った一般曲線座標系(境界適合座標系)を用いて地形表面に精度良く引き付けた計算格子を生成することは非常に困難であり、またかなりの時間を要することになる。そこで提案されているのが格子生成が非常に容易であるデカルト座標系の矩形格子を用いて“矩形格子近似法”と呼ばれる手法で物体を表現(マスクング)する方法³⁾である。この手法は原則として滑らかな曲線は表現し得ないが物体が存在していることは表現でき、計算格子を数多く設定することが出来れば曲線的な形状も高い精度で近似可能である。将来の計算機メモリ等の性能向上を考えると非常に有効でかつ汎用性が高い手法と思われる。

本研究の目的は、この矩形格子近似法で表現した3次元複雑地形を過ぎる成層流の精度良い計算コードを開発し、より実用的な数値シミュレーションを行なうことである。以前、我々は3次元複雑地形を対象とし

* 九州大学大学院 総合理工学研究科 大気海洋環境システム学専攻 (〒860 春日市春日公園六丁目一番地)
** 九州大学 応用力学研究所 助教授 (〒860 春日市春日公園六丁目一番地)
*** 九州大学 応用力学研究所 助手 (〒860 春日市春日公園六丁目一番地)

た成層流の計算コードを円錐周り流れに適用しその有効性を考察した⁴⁾。本報では、さらに計算格子および境界条件等を見直し計算コードに改良を加えた。まず計算コードの精度を検証するために複雑地形の一要素を成すと考えられる単純地形モデル(3次元孤立峰)を対象とし数値シミュレーションを行なう。計算結果は一般曲線座標系を用いた計算結果および密度成層水槽による可視化実験と比較する。次に人工的に作成した3次元複雑地形モデルへの適用も考える。

2. 単純地形モデル(3次元孤立峰)の計算

2.1. 流れの支配方程式および計算方法

3次元(x-y-z平面、但しzは鉛直上向き)で非定常・非圧縮性粘性流れを考える。物体への近寄り流速は一定とし、物体から十分上流で鉛直勾配一定($d\rho_B(z)/dz=-1$)の基本密度場 $\rho_B(z)$ を考え、それに静水圧平衡で対応する基本圧力場を $p_B(z)$ とする。流速は $u_i=(u, v, w)$ とし基本密度場および基本圧力場からのずれを p', p' とする。さらに密度の非拡散およびBoussinesq近似を仮定する。以上から本計算での未知数 u_i, p', p' に対する無次元化された支配方程式は連続の式とNavier-Stokes方程式および密度方程式の(1)・

【流れの支配方程式(無次元形)】

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\rho}{Fr^2} \delta_{i3} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho}{\partial x_j} = w \quad (3)$$

(3)式となる。(2)式中のReおよびFrはそれぞれ無次元パラメータReynolds数($=\rho_0 U h / \mu$)、Froude数($=U / N h$)である。ここで、Uは物体への近寄り流速、hは物体高さ、 μ は粘性係数、Nは浮力振動数($N^2 = -(g/\rho_0)(d\rho/dz)$)、gは重力加速度、 ρ_0 は基準密度)である。但し、(1)・(3)式および以下では p', p' のプライムは省略している。

(1)・(3)式に矩形格子では $x=x(\xi)$ 等、一般曲線格子では $x=x(\xi, \eta, \zeta)$ の座標変換を導入して差分法により離散化を行ない数値解 u_i, p, ρ を求める。計算のアルゴリズムはEulerの1次陽的解法を基礎とするFractional-Step法である。計算格子上の変数配置はregular配置とし、未知数 u_i, p, ρ は同一点で定義される。空間項の離散化に関しては移流項に3次精度風上差分のKawamura-Kuwaharaスキーム、残りの空間項は全て2次精度中心差分で近似した。圧力のPoisson方程式は各タイムステップごとにSOR法により解いた。初期条件は無次元時間Time=0.0で全領域において $u_i=(1, 0, 0)$ 、 $p=0$ 、 $\rho=0$ とするimpulsive-startとした。速度の境界条件は物体上流で一様流速 $u=U=1$ を与え、物体下流では移流速度に一様流速を用いるSommerfeld放射条件とした。左右境界および上部境界は速度(1, 0, 0)で移動するものとした。地面上はnon-slip条件とし矩形格子近似法での物体形状は物体内に含まれる格子点上に流速0の条件を課すことで表現した。圧力の境界条件では地面上は(2)式に $u_i=0$ を代入して得られる式の1次片側差分とし、その他の境界は全てNeumann条件とした。密度に関しては物体上流で基本場からのずれを0とし、その他の境界は全てNeumann条件とした。計算はRe=1000とし中立流および安定成層のFr=0.2について無次元時間刻み $\Delta t=0.01$ として無次元時間Time=200.0まで20,000ステップ行なった。計算格子は矩形格子および一般曲線格子ともにx軸、y軸、z軸方向に121×71×31点である。物体形状は矩形格子では頂角90度の円錐上部をカットした形状とし、一般曲線格子では $z(r)=1/(1+r^4)$ (rは物体中心からの距離)で近似されるベル状とした。物体頂部での最小格子幅 Δz_{\min} は双方の計算格子ともに一致している。図1, 2に矩形格子および一般曲線格子における計算領域と物体形状の様子を示す。なお計算は全て高速パソコンAlpha 275 AXPにより倍精度で行なった。

2.2. 計算結果

図3にまず矩形格子の中立流の計算結果を示す。図3(a)は圧力の等値面図を示しているが、物体後方のアーチ渦が捉えられている。また、図3(b)は物体後方のy-z平面の速度ベクトル図を示しているが、物体後方に明らかな縦渦構造が確認される。双方ともに水槽実験等⁵⁾で確認されている渦構造が再現されている。

図4は無次元時間Time=30.0および70.0での安定成層流におけるx-z平面(流れ方向鉛直断面： $y=0$)の速度ベクトル図を示している。双方ともにほぼ水平的な流れ場となっている。また物体下流では逆流領域が確認される。これは強く安定成層した流れ状態であるので流速の水平成分が卓越し、流れが物体を乗り越えること

が出来ずに水平面内で2次元的に物体を回り込む迂回流が形成されているためと思われる。

図5は安定成層流に関して物体上流($z=0.5h$)から粒子を飛ばしたときの軌跡として表示される流線図の時間発展を示している。時間の経過とともに物体後流の再循環領域(双子渦)の不安定が生じ、カルマン渦列に似た流れに移行していくのが分かる。矩形格子および一般曲線格子ともに流れの様子は非常に良く一致している。

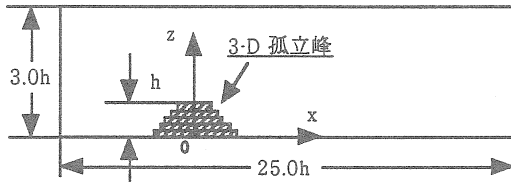
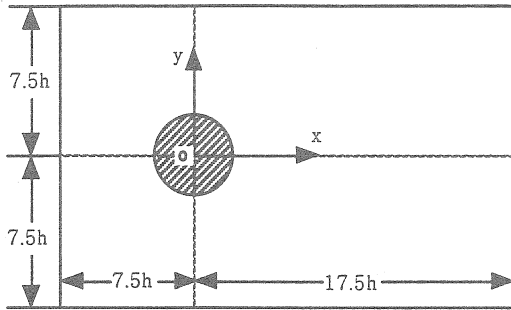
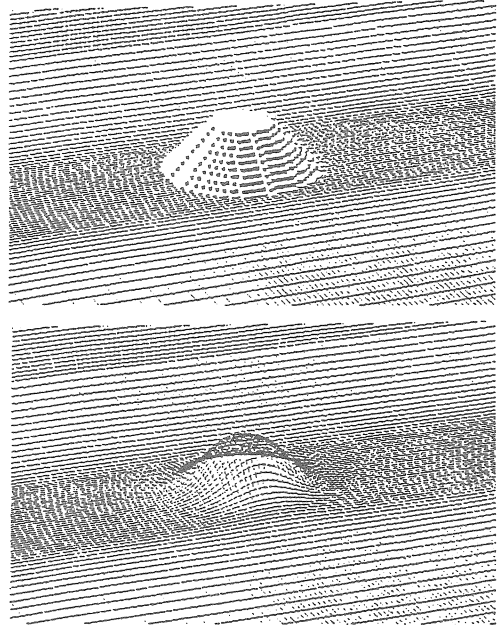
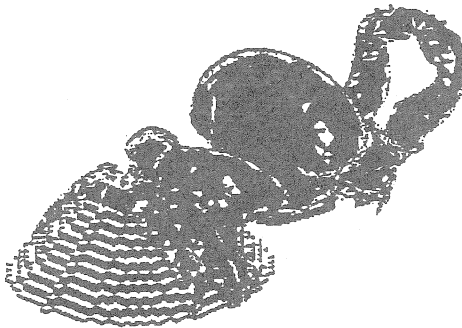


図1 計算領域

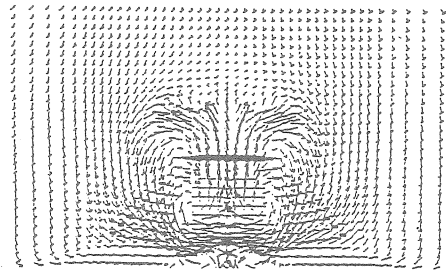


(上) 矩形格子, (下) 一般曲線格子

図2 物体形状の様子

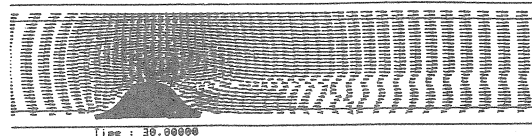
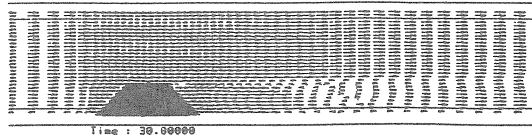


(a) 物体後方のアーチ渦(圧力の等値面図)



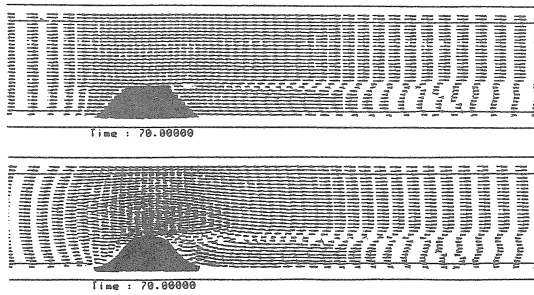
(b) 物体後方の縦渦構造(速度ベクトル図)

図3 矩形格子の中立流($Re=1000$: $Time=48.0$)の計算結果



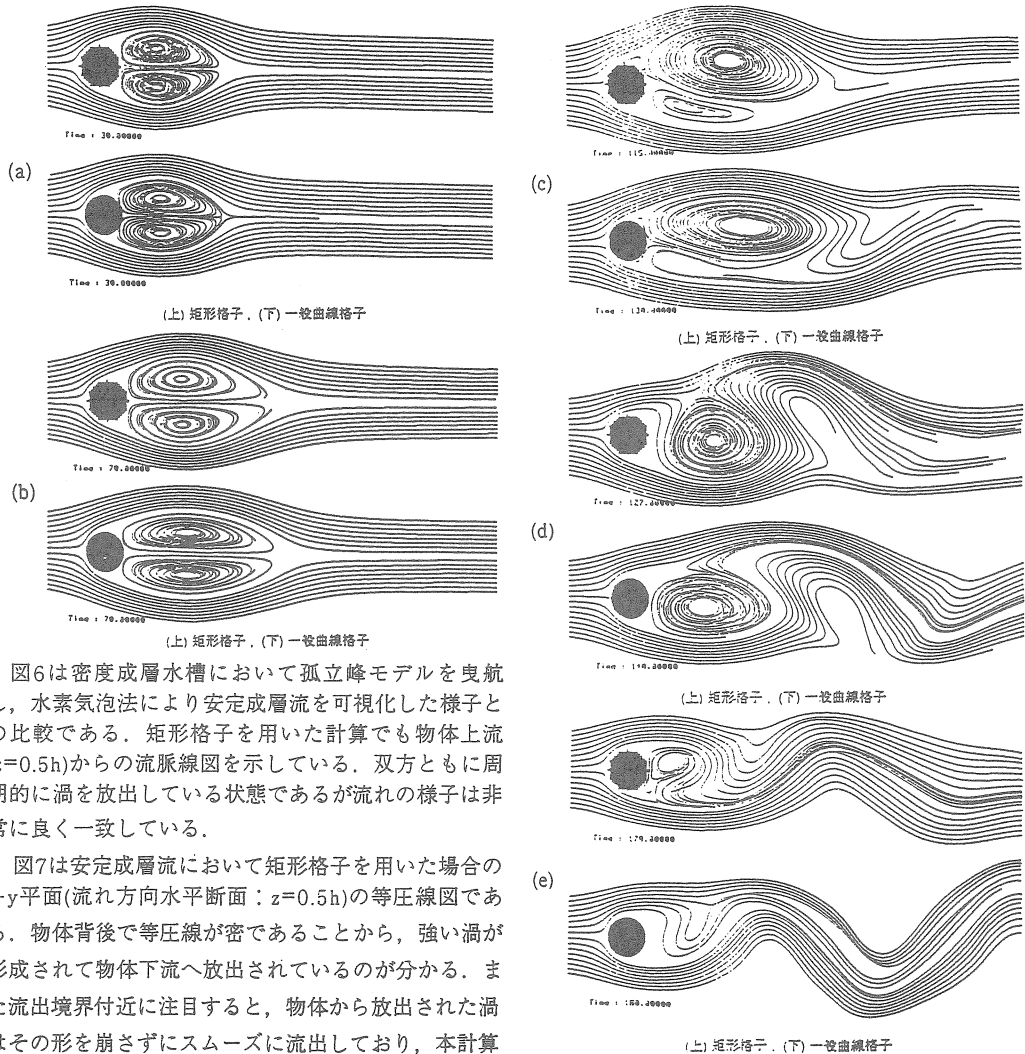
(上) 矩形格子, (下) 一般曲線格子

図4 次頁に続く



(上) 矩形格子, (下) 一般曲線格子

図4 安定成層流($Fr=0.2 : Re=1000 : Time=30.0, 70.0$), $x-z$ 平面($y=0$)における速度ベクトル図



(上) 矩形格子, (下) 一般曲線格子

(上) 矩形格子, (下) 一般曲線格子

(上) 矩形格子, (下) 一般曲線格子

(上) 矩形格子, (下) 一般曲線格子

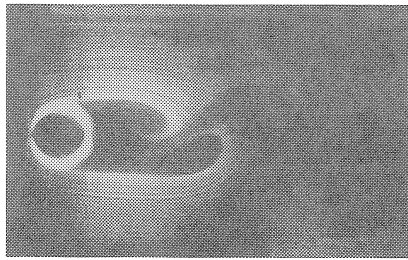
(上) 矩形格子, (下) 一般曲線格子

図6は密度成層水槽において孤立峰モデルを曳航し、水素気泡法により安定成層流を可視化した様子との比較である。矩形格子を用いた計算でも物体上流($z=0.5h$)からの流脈線図を示している。双方ともに周期的に渦を放出している状態であるが流れの様子は非常に良く一致している。

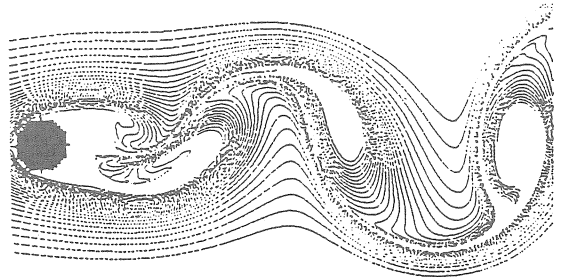
図7は安定成層流において矩形格子を用いた場合の $x-y$ 平面(流れ方向水平断面： $z=0.5h$)の等圧線図である。物体背後で等圧線が密であることから、強い渦が形成されて物体下流へ放出されているのが分かる。また流出境界付近に注目すると、物体から放出された渦はその形を崩さずにスムーズに流出しており、本計算での流出条件の妥当性を支持している。

なお矩形格子を用いた実計算時間は20,000ステップで約13時間であったのに対し一般曲線格子を用いた計算では約6倍の約78時間を要している。

図5 安定成層流($Fr=0.2 : Re=1000$), $x-y$ 平面($z=0.5h$)の流線図の時間発展



可視化写真(水槽実験; $Fr=0.2 : Re=135$)



矩形格子の計算結果($Fr=0.2 : Re=1000 : Time=180.0$)

図6 水素気泡法による可視化写真との比較(安定成層流)

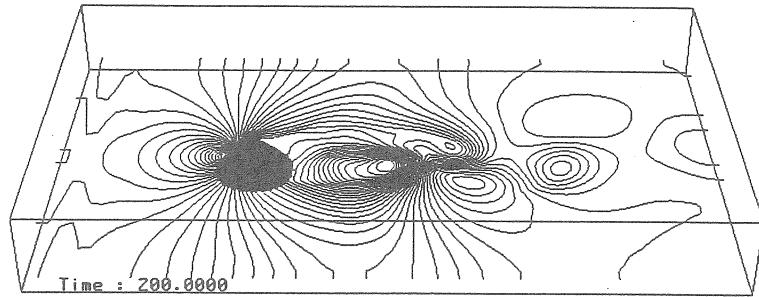


図7 安定成層流($Fr=0.2 : Re=1000 : Time=200.0$), $x-y$ 平面($z=0.5h$)の等圧線図(矩形格子の計算結果)

3. 3次元複雑地形モデルへの適用

3.1. 流れの支配方程式および計算方法

次に本計算コードの3次元複雑地形への適用を考える。3次元複雑地形は図8に示すような人工的に作成したものを対象とする。流れの支配方程式および離散化については第2章と同様である。但し, Navier-Stokes方程式および密度方程式の時間項には2次精度後退差分を用いている。初期条件はimpulsive-startとし, 速度の境界条件で左右境界を滑り条件とした以外は全て第2章と同様である。計算は $Re=1000$ とし中立流および成層流($Fr=2.2, 0.2$)について, 無次元時間刻み $\Delta t=0.005$ として無次元時間 $Time=25.0$ まで5,000ステップ行なった。計算領域は x 軸, y 軸, z 軸方向に $2.5 \text{ km} \times 2.5 \text{ km} \times 1.0 \text{ km}$ の空間を有し, 計算格子は水平方向には等間隔(25m)とし鉛直方向のみ不等間隔(10m~100m)で x 軸, y 軸, z 軸方向に $101 \times 101 \times 51$ 点である。

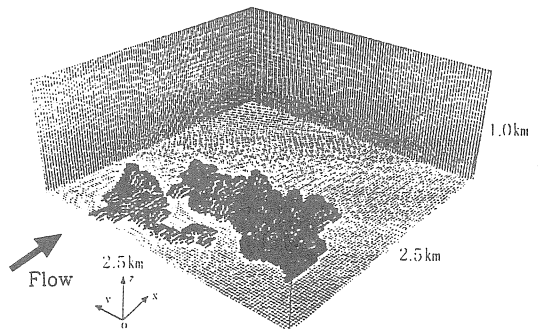


図8 人工的に作成した3次元複雑地形モデル

3.2. 計算結果

図9は中立流および成層流($Fr=2.2, 0.2$)において物体上流から粒子を飛ばしたときの軌跡として表示される流線図である。中立流の場合には地形からの大きな剥離は認められない。次に成層流の場合であるが, $Fr=2.2$ の場合についてまず注目すべきことは, 成層の効果により地形の下流側に振幅は非常に小さいものの風下波が励起されているということである。また, 地形下層部での流体は鉛直方向の運動が抑制され, 地形を乗り越えることが出来ずに地形を回り込んでいるのが分かる。非常に強く安定成層した $Fr=0.2$ の場合には全体的にはほぼ水平的な流れ場となっている。その証拠に $Fr=2.2$ の場合と比較して, 地形下層部のより多くの流体が地形を回り込んでいる。これらの現象は明らかに中立流の場合とは異なる成層流特有の現象である。

図10は $z=38.66 \text{ m}(k=5)$ における $x-y$ 平面(流れ方向水平断面)の速度ベクトル図である。中立流の場合には地形からの大きな剥離は認められない。成層流の $Fr=2.2, 0.2$ の場合には非常に興味深い流れ場が捉えられている。双方ともに地形を回り込む辺りで流速が増加しているのが分かる。さらに地形と地形の谷間でも非常に

強い流速の増加が認められる。これらの現象はより強く安定成層した $Fr=0.2$ の方がその傾向が強いと言える。また双方ともに水平面内の流れが卓越するために地形の後方まで強く流れが回り込んでいる。なお各ケースにおける実計算時間は5,000ステップで約19~20時間であった。

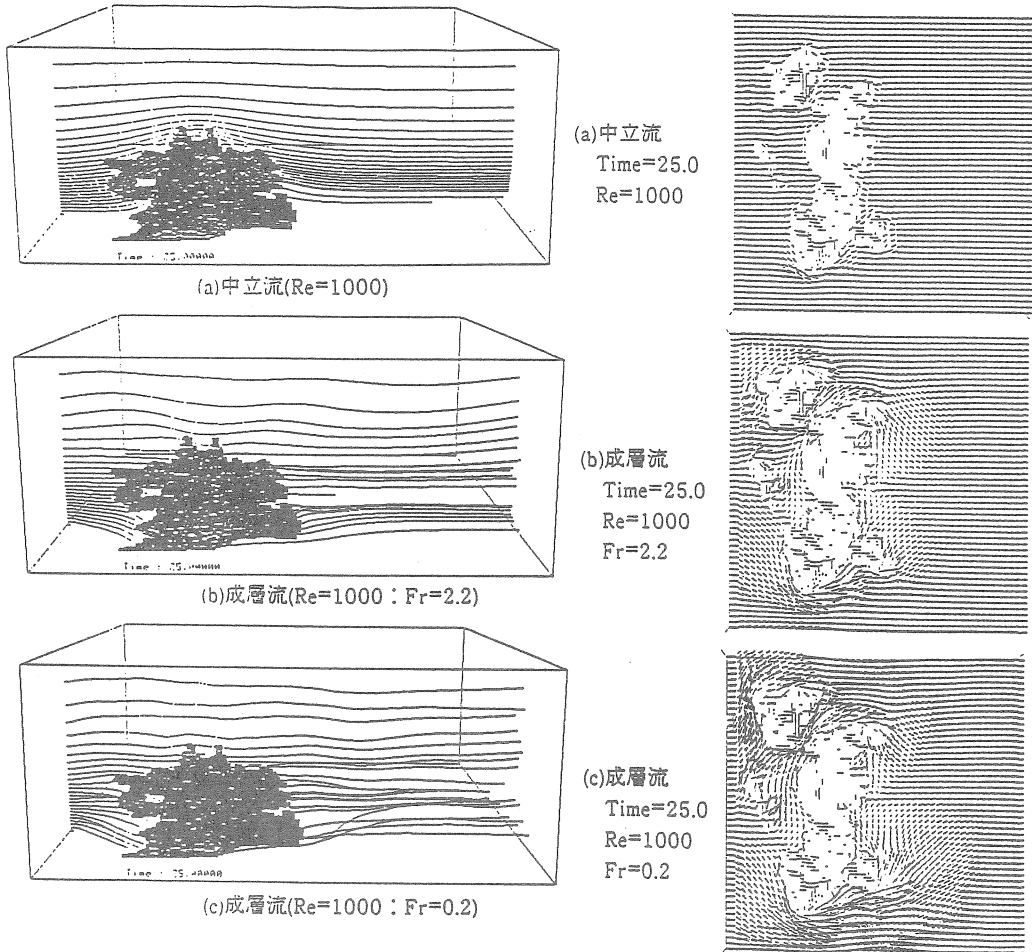


図9 流線図(Re=1000 : Time=25.0)

図10 x-y平面における速度ベクトル図(z=38.66m(k=5))

4. 結び

矩形格子近似法で表現した3次元複雑地形を過ぎる成層流の有効な計算コードを開発した。本計算コードの精度を検証するためにまず3次元孤立峰を計算対象とし、 $Re=1000$ のもとで中立流および安定成層流($Fr=0.2$)のケースについて数値シミュレーションを行なった。計算結果は一様曲線座標系を用いた計算結果および密度成層水槽による可視化実験と比較を行った。大域的な流れの挙動は非常に良く一致しており、本計算コードの有効性が確認された。次に人工的に作成した3次元複雑地形モデルに本計算コードを適用し、成層流特有の現象を捉えることが出来た。今後は乱流モデル(LES等)の組み込みを考慮するとともに、実際の3次元複雑地形を対象としたより実用的な乱流場の数値シミュレーションを行なう予定である。

【参考文献】

- 1) Snyder W.H(1985) Fluid modeling of pollutant and diffusion in stably stratified flows over complex terrain, Ann. Rev. Fluid Mech., 17, 239-266
- 2) Suzuki, M. & Kuwahara, K. (1989) Stratified flow past a bell-shaped hill, AIAA 89-1824
- 3) 橋口真直, 桑原邦郎 (1995) 3次元物体のまわりの流れの数値計算, 第9回数値流体シンポ 451-452
- 4) 小園茂平, 前田明記, 大屋裕二 (1993) 3次元複雑地形上の密度流れに関する数値計算, 日本風工学会誌 第55号 97-98
- 5) 泉耕二 (1977) 孤立峰まわりの流れに関する実験, 筑波大学水理実験センター報告 No.1, 33-40