

I - B19

複雑地形を過ぎる安定成層流のDNS

九大応力研 正員 大屋裕二
九大院総理工 内田孝紀

【1. はじめに】

本研究の目的は、デカルト座標系のもとで矩形格子近似法¹⁾(Fig.1)で表現した複雑地形を過ぎる安定成層流の精度良い計算コードを開発し、実用的な数値シミュレーションを行うことにある。我々は既に不等間隔・レギュラー格子の計算コードを開発し、その有効性を確認した^{2), 3)}。その後、不等間隔・スタaggerド格子の計算コードを開発し孤立峰を対象とした計算を行った。その結果、従来の計算コードと比較して改善が見られたのでここに報告する。さらに多方向差分法を施したBFC(境界適合座標系)・レギュラー格子の計算および密度成層水槽による可視化実験とも比較・検討を行う。

【2. 数値計算法等】

本計算の支配方程式は(1)-(3)式である。但し、密度の非拡散およびBoussinesq近似を仮定する。

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

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

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

本計算の支配方程式(無次元形)

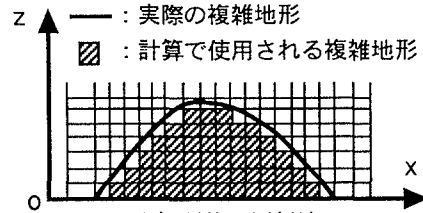


Fig.1 矩形格子近似法

(2)式中のReはReynolds数($=\rho_0 U h / \mu$), FrはFroude数($=U / N h$)である。但し, Uは近寄り流速, hは物体高さ, μ は粘性係数, Nは浮力振動数($N^2 = -(g/\rho_0)(dp/dz)$), gは重力加速度, ρ_0 は基準密度)である。

本研究では差分法により離散化を行い数値解を求める。デカルト座標系の不等間隔・レギュラー格子およびスタaggerド格子の計算は(1)-(3)式に $x=x(\xi)$ 等の座標変換を導入する。(2)式の時間積分法は移流項にAdams-Bashforth法(2次陽的), 粘性項にCrank-Nicholson法(2次陰的), 圧力項に1次のEuler陰解法, 浮力項に1次のEuler陽解法を組み合わせたFractional-Step法である。(3)式の時間積分法は1次のEuler陽解法である。空間項の離散化は(2)式および(3)式の移流項に関しては3次精度風上差分であるK-Kスキーム, その他の空間項は2次精度中心差分とした。但し, スタaggerド格子の計算では(2)式の移流項を梶島による4次精度中心差分に4階微分数値粘性項(本計算ではK-Kスキームタイプ)を付加した修正3次精度風上差分⁴⁾とした。また, 4変数(速度の3成分とスカラーポテンシャル)は1ステップごとにSOR法により反復計算される。一方, BFC・レギュラー格子の計算は $x=x(\xi, \eta, \zeta)$ 等の座標変換を導入する。(2)式の時間積分法は1次のEuler陽解法を基礎とするFractional-Step法である。(3)式の時間積分法は1次のEuler陽解法である。空間項の離散化は(2)式および(3)式の移流項に関してはK-Kスキーム, その他の空間項は2次精度中心差分とした。圧力のPoisson方程式は1ステップごとにSOR法により反復計算される。さらに全ての空間項を多方向差分法¹⁾で近似した。

Key words : Finite-difference method, Nonuniform Cartesian staggered grid,
Stably stratified flow, Complex terrain

〒 816 春日市春日公園六丁目一番地 TEL 092-583-7777 FAX 092-583-7779

計算は無次元時間刻み $\Delta t=0.01$ として $Re=1000$ のもとで、安定成層流($Fr=1.5$)について行った。計算の格子点数は全ての計算についてx軸、y軸、z軸方向に各々 $71 \times 61 \times 31$ 点である。計算領域は文献3と同様である。計算対象とした孤立峰の形状はBFCでは $z(r)=1/(1+r^4)$ (r は物体中心からの距離)で近似されるベル形状である。一方、デカルト座標系ではBFCのベル形状を矩形格子近似法で表現したものである(Fig.2)。初期条件および境界条件は文献2,3を参照されたい。

(a)デカルト座標系(BFCのベル形状を矩形格子近似法で表現したもの)



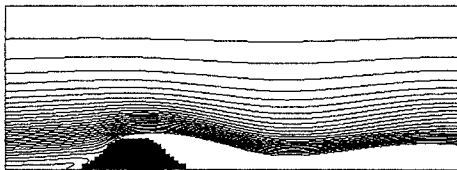
(b)BFC($z(r)=1/(1+r^4)$, r は物体中心からの距離)



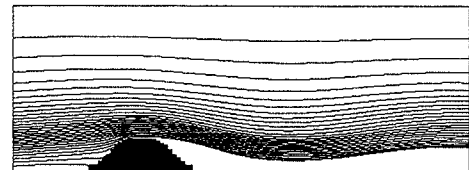
Fig.2 孤立峰の物体形状

【3. 計算結果】

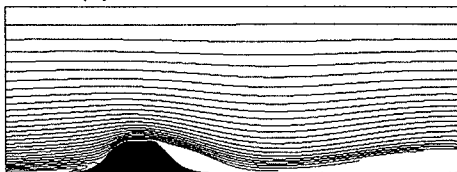
Fig.3に物体上流から粒子を飛ばしたときの軌跡として表示される流線図(数値計算,(a)-(c))および流脈線図(密度成層水槽による可視化実験,(d))を示す(但し、数値計算では無次元時間50から60まで時間平均された流れ場に対する可視化である)。数値計算((a)-(c))および水槽実験(d)を比較すると、定性的な流れ場の様子は非常に良く一致しているものの風下波の波長等に差異が見られる。この主な原因は水槽実験のモデル形状がかなり急峻であることによるものと思われる。一方、数値計算どうしを比較すると、不等間隔・レギュラー格子の計算(a)は物体上流の角からの剥離が顕著であり、それに伴い物体背後の循環領域が大きく評価されている。その結果、BFC・レギュラー格子の計算(c)と比較して風下波の波長が若干長く評価されている。一方、不等間隔・スタッガード格子の計算(b)は物体上流の角からの剥離は抑制され物体背後の循環領域も小さく、BFC・レギュラー格子の計算(c)と比較して風下波の波長等は非常に良く一致している。



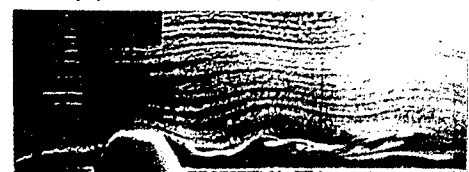
(a)不等間隔・レギュラー格子



(b)不等間隔・スタッガード格子



(c)BFC・レギュラー格子



(d)密度成層水槽による可視化実験

Fig.3 時間平均された流れ場に対する流線図(数値計算,(a)-(c))および流脈線図(密度成層水槽による可視化実験,(d)). ($Re=1000, Fr=1.5$)

【4. 結び】

デカルト座標系のもとで矩形格子近似法で表現した複雑地形を過ぎる安定成層流の計算コードを開発した。不等間隔・レギュラー格子およびスタッガード格子の計算について多方向差分法を施したBFC・レギュラー格子の計算および密度成層水槽による可視化実験と比較・検討を行った。その結果、不等間隔・スタッガード格子の計算は解の空間的振動が避けられ、かつBFCの計算および密度成層水槽による可視化実験とより良い一致を示し、改善が見られた。

【参考文献】

- 1) 橋口, 森原 第9回数値流体力学シンポジウム講演文集, 451 (1995)
- 2) 内田, 大屋, 小園 第14回風工学シンポジウム講演文集, 91 (1996)
- 3) 内田, 大屋 第10回数値流体力学シンポジウム講演文集, 304 (1996)
- 4) 梶島 日本機械学会論文集B編60巻578号, 3319 (1994)