

直交格子法による薄い物体まわりの流れの解析

Numerical Simulation of Flows around Thin-Bodies Using Cartesian Grid Method

○朴 炳湖 (電通大), 黒田 成昭 (電通大)

Binghu PIAO and Shigeaki KURODA

Dept. Mech. Eng. & Intelligent Sys., Univ. of Electro-Communications, 1-5-1 Chofushi, Tokyo 182-8585, Japan

In the previous paper, we proposed the LBFCGM (Locally Boundary Fitted Cartesian Grid Method). In the LBFCGM, the body fitted grid was used in the near surface region and Cartesian grid and cut cells were used in the other region to discretize the computational region. In this paper, we modified this method to simulate the flow around thin-body. The numerical results were obtained for steady flow normal to a plate in a channel for Reynolds number 20 and compared with the some previous experimental results and a good agreement was obtained.

1. 緒言

近年, CFD の応用が進む中, 格子生成が容易である直交格子への関心が高まっており, 研究が急速に進んでいる. 直交格子には, 直交格子のみ使用する方法, カットセルを使用する方法^{1,2)}および境界近傍で境界適合格子を使用する方法^{3,4)}などが提案されている. なお, 計算の安定性を修正することでカット点をそのまま差分計算に使用する方法⁵⁾も提案されている. 直交格子法では格子の節約や高精度の計算を必要とする場所だけに集中的に格子を再分割する LMR (Locally Mesh Refinement)や計算を行いながら必要な場所を再分割する AMR (Adaptive Mesh Refinement)の実現が簡単であることが知られている.

直交格子法での一つの大きな課題は, 薄い物体への対応である. 特に薄い物体 (セルよりも小さい) の場合はカットセルを使用する手法は応用し難い.

筆者らにより提案された部分境界適合直交格子法は格子生成自動化を実現できると同時に境界付近で境界適合格子を使用しているため解析精度の向上が可能である. なお, 薄い物体へ自由に対応できる境界適合格子を物体近傍で使用するため, 薄い物体への対応が可能であると考えられる.

本研究では, 部分境界適合直交格子法^{3,6)}を薄い物体まわりの流れの解析に適用されることを目的とする.

2. 格子生成

2.1. 部分境界適合直交格子の生成

直交格子を薄い物体に適応させた場合の大きな問題の一つに, 物体形状を捉えるために膨大な格子数を必要とすることである. これは基本的に直交格子ではセルを単位に物体を再現するため起きる問題である. 直交格子とは違い, 境界適合格子や非構造格子では, セル辺で物体形状を近似しているため, このような問題は生じない.

部分境界適合直交格子での格子生成手順を次のようにまとめる:

- ① まず流れ場全体に直交格子を生成する.
- ② 次に境界線の貫通によりカットセルを生成する. このステップは薄い物体の場合に直接使用することはできない.
- ③ 次に物体表面に沿って境界適合格子を生成する.
- ④ 直交格子の再分割により, 境界適合格子数を増やす.
- ⑤ 境界適合格子の表面直交性および隣接セルの面積均一性を修正する.
- ⑥ 最後に楕円形方程式を用いて境界適合格子についてスムージング処理を行う.

円柱を例にした場合, Fig. 1に示すような格子を生成

することが可能である. 格子生成の詳細については筆者らの論文⁶⁾を参考されたい.

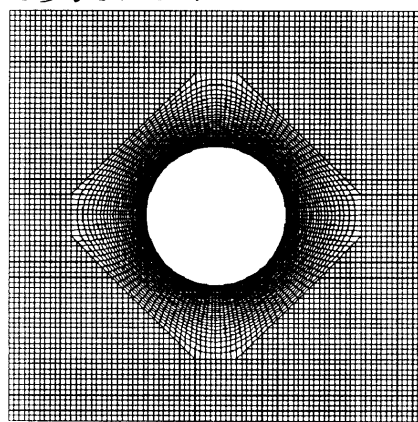


Fig. 1 Locally Boundary Fitted Cartesian Grid

2.2. 薄い物体まわりの格子生成

基本的には前節で説明した手順に従って格子を生成する. 前節で説明した格子生成ステップ②でカットセルを生成しているが, 薄い物体まわりに直接カットセルを生成することが困難であるため, 本研究では薄い物体にセルサイズより大きい仮想的「厚み」を与えることで, 仮想形状を形成する. 仮想形状を基準にステップ②-③を実行することで, カットセルおよび境界適合格子を生成することができる. その後, 境界適合格子の内側点を実際の表面へ移動させ, 仮想形状の役割を終える. 以上の手順に従い, 薄い物体まわりの格子を生成することが可能である.

Fig. 2に薄い平板まわりの格子の様子を示す.

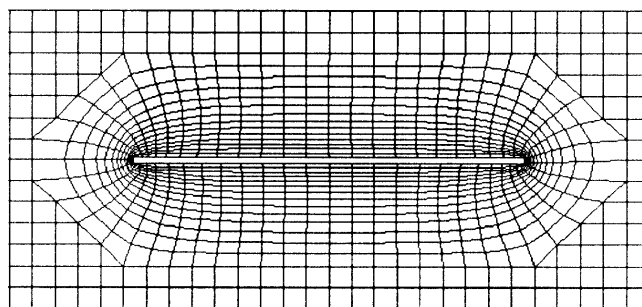


Fig. 2 Sample of grids around a thin flat plate

3. 計算手法

基礎方程式に二次元非圧縮 Navier・Stokes 方程式(1)と連続の式(2)を用いる.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

u, v はそれぞれ x 方向と y 方向の速度, p は圧力で, Re はレイノルズ数である. すべての変数は代表速度, 代表長さおよび流体の密度により無次元化された.

3.1. 計算手法

計算アルゴリズムには, Kim&Moin⁸⁾により提案された Fractional Step Method を用いる. 時間進行の処理について, 対流項および粘性項にそれぞれ二次精度の Adams-Bashforth 法と Crank-Nicholson 法を使用する. 空間微分項の離散について, 対流項および粘性項にそれぞれ QUICK スキームと 2 次精度の中心差分を使用する. 本研究では離散化手法として有限体積法に基づいて支配方程式の離散化を行った. すべての物理量はセルの中心に配置するコロケート格子系を採用した.

速度と圧力の計算には SOR 法を用いて反復計算を行い, 収束判定は式(3)に示すとおり, 最大反復誤差を 10^{-5} とした.

$$\text{MAX} \left| \frac{\phi^{k+1} - \phi^k}{\phi_0} \right| < 10^{-5} \quad (3)$$

ϕ は反復計算の変数 (速度, 圧力) で, ϕ_0 はその変数の流れ場全体での平均値である.

物体表面速度の境界条件としてすべりなし条件を与えた. なお, コロケート格子を採用したため, ポアソン方程式を解くときの境界条件は特に必要としない.

4. テスト計算および計算結果

本研究では生成した格子系の有効性を確かめるため, チャンネル中に, 主流方向の垂直方向に立っている平板周りの流れについて解析を行い, Dennis et al.⁷⁾の実験結果と比較を行った.

4.1. 計算モデル及び計算格子

Fig. 3 に計算モデルを示す. 平板の長さを D , チャンネルの幅を L とする. レイノルズ数 Re は平板の長さ D および一様流速 U , 動粘性係数で算出した.

計算は Dennis et al. の実験と同様に $D/L=0.2$, $\text{Re}=20$ の条件で行った.

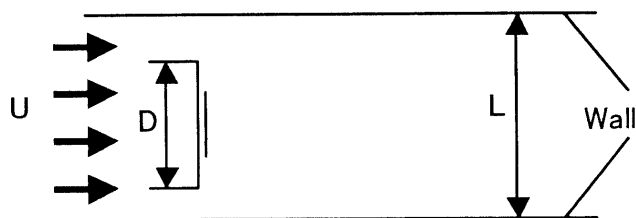


Fig. 3 Computational model

Fig. 4 に計算格子を示す. 図の左に示されている一部拡大図に示したとおり, 物体近傍にも精度良い境界適合格子が生成されていることが確認できる.

計算領域: $15D \times 5D$

計算格子数: 直交格子 96×104

境界適合格子: 12×104

4.2. 計算結果

Fig. 5 に無制限時間 $t=2.5$ の場合の数値解析結果および可視化実験結果⁵⁾の比較を行った. 無制限時間 2.5 で

はほぼ定常になっていることが Dennis ら⁵⁾の実験及び本解析から確認されている. 図から分かるように, 解析結果は実験値と良く一致している.

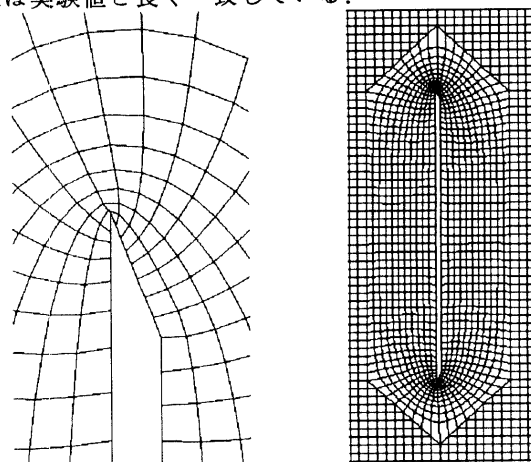
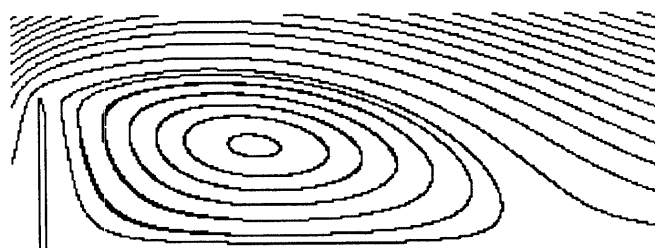
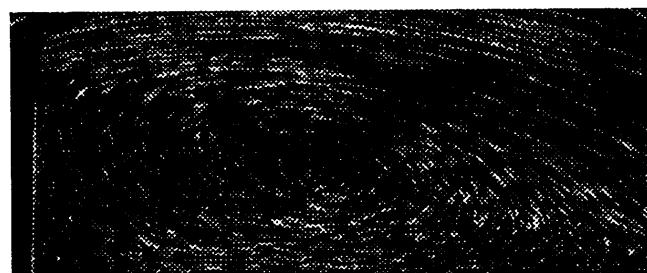


Fig. 4 Computational Grid



(a) Computational result



(b) Experimental result by Dennis et al. (1993)

Fig. 5 Flow field comparison ($\text{Re}=20$, $t=2.5$)

5. まとめ

本研究では, 筆者らにより提案された部分境界適合直交格子を薄い物体まわりの流れの解析に適応させ, 次のような結論を得た.

- ① 仮想厚みを導入することで, 薄い物体まわりに高質な境界適合格子を生成することができた.
- ② 提案した境界適合格子を用いて, チャンネル内部に置かれた平板周りの流れの解析を行い, 実験値と良い一致が確認された.

参考文献

- 1) J.J. Quirk: Comput. fluids, 23-1(1994)125
- 2) 黒田, 朴: 機構論 No. 004-01(2000)3-31
- 3) M. J. Aftosmis et al.: AIAA 99-0777 (1999)
- 4) 朴, 黒田: ながれ, 19-1(2000)37
- 5) 市川, 藤井: 第 13 回数値流体シンポジウム, (2000)250
- 6) 朴, 黒田: 第 15 回数値流体力学シンポジウム, (2001)5
- 7) S. C. R. Dennis et al.: J. Fluid Mech. 248(1993)605