

乱流遷移の数値解析

Computation of Transition to Turbulence

○ 内藤 健, 早稲田大学理工学術院, 東京都新宿区大久保 3-4-1, E-mail:k-naito@waseda.jp
Ken Naitoh, Waseda University, 3-4-1 Ookubo Shinjuku, Tokyo, 169-8555 Japan

Transition to turbulence in straight channel is computed directly without using cyclic boundary condition on inlet and outlet. Laminar flow computed in the upstream domain of channel changes to turbulent flow in the middle stage of channel. Basically, the finite difference method based on the multi-level formulation (Ken Naitoh and Kunio Kuwahara, Fluid Dynamics Research, 1992) is employed, which can calculate spatial derivatives of physical quantities and integrated quantities accurately. The new computational method related to boundary condition is proposed for simulating directly transition to turbulence. In the present report, Reynolds number is set to be 20000 and computations of transition to turbulence are done in two-dimensional flows.

1. 諸言

1980 年代に、Moin らは、格子平均型乱流モデルを用いて、直管内乱流の数値計算を行った。[1] その後、Kawamura らは、三次精度の風上差分法を用いた管内乱流の数値解析を行っている。[2] 最近では、熱を伴う管内乱流の数値解析も盛んに行われている。

しかし、著者の知る限りにおいては、いずれも、直管の入口と出口の境界条件を空間的周期境界条件としており、計算空間内の全ての場所で乱流になっており、層流から乱流への遷移現象を直接捉えていない。

近年、燃料電池やマイクロフレイディックスなどに見られるように、流路幅の小さい機器が増え、それらの内部流は、層流と乱流の境付近、つまり、乱流遷移域にある場合も増えており、このような遷移現象を、周期境界条件なしに直接解析する必要がある。人体内の血流を考えても、病巣がある場合には部分的に乱流になる場合もありえるだろう。

そこで、本研究では、入口と出口に空間的な周期境界条件を用いずに、直接、層流から乱流への遷移を計算する。基礎方程式は、2次元の Navier-Stokes 方程式としている。計算方法は、微分量と積分量の両者をバランス良く精度を高く維持しながら計算するための定式化 (Multi-level formulation) に基づいた差分法を用いている。[3]

なお、格子サイズに依存せずにエネルギースペクトルを正確に計算できる三次精度の風上差分法を対流項の差分化に用いている。[4]

一例として、Reynolds 数は 20000 として、直管内計算を行ったところ、管径の数倍の位置で、層流から乱流への遷移が起こり、出口まで続いていることが確認された。

2. 基礎方程式と計算方法

基礎方程式として、二次元非定常非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を用いる。

直管入口境界条件は、一様流速かつ主流方向圧力勾配なし、出口境界条件は、流速・圧力ともに主流方向勾配なしとした。上下の壁の上では、流速はゼロ、圧力は、壁に垂直な方向に勾配ゼロとした。初期条件は、出発流とした。

計算アルゴリズムの基本的な部分は、Marker and Cell (MAC)法を用い、対流項には、三次精度の風上差分法を適用した。時間方向は、Euler の Backward scheme としている。なお、質量の全体的な保存性を確保するために、境界条件と積分量の計算精度向上のために、Multi-level formulation による補正をかけている。

計算格子は、直行等間隔格子を用い、境界層には少なくとも数点の格子がはいるように設定している。乱流場を捉えるために、

通常は、境界層の厚さ方向を細かくし、主流方向には相対的に大きな格子を張ることが通例であるが、本研究では、乱流場を正確に捉えるために、どちらの方向も同じ格子サイズとしている。

3. 計算結果

計算格子数は、主流方向に 900 点、それと垂直な方向に 100 点とした。無次元時間刻み幅 $\Delta t = 0.001$ 、無次元格子サイズ $\Delta x = 0.01$ とした。

図 1 に、無次元時間 450 における、渦度分布を示す。入口から、直管径の 2~3 倍離れたところで、渦が発生し、乱流と考えられる状態に遷移していることがわかる。特に、管中央部分の渦度が生成されていることが特徴的である。

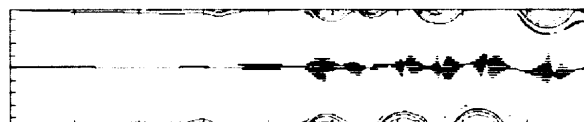


Fig. 1. Vorticity distributions at non-dimensional time $t = 450$.

4. まとめと今後

直交等間隔格子を用い、微分量と積分量の両者の精度をバランスさせて解析する方法論に基づいて、乱流遷移現象を周期境界条件なしで求められる可能性を得た。

なお、以上の解析は二次元解析であり、実験との比較を行うため三次元計算を進めている。また、入口速度分布や入力する乱れの程度による影響についての分析も行う予定である。

参考文献

- (1) P. Moin and J. Kim, J. Fluid Mech. 118, (1982).
- (2) T. Kawamura and K. Kuwahara, AIAA paper 85-0376, (1985).
- (3) K. Naitoh and K. Kuwahara, Fluid Dynamics Research, p. 299-325, (1992).
- (4) K. Kuwahara et al.: Proc. Of the 6th Int. Nobeyama Workshop on the New Century of Comp. Fluid Dynamics, 2003, p. 47-59, (2005).