

下面加熱矩形ダクト流内対流の数値シミュレーション

山本 稀 義* 細川 巖** 田中 義規**

Numerical Simulation of Thermal Convection in a Rectangular Duct Flow Heated from its Bottom

by

Kiyoshi YAMAMOTO
National Aerospace Laboratory
Iwao HOSOKAWA and Yoshinori TANAKA
University of Electro-Communications

ABSTRACT

Numerical simulation of thermal convection in a horizontal rectangular duct flow heated from its bottom and side walls is conducted using a method based on the Fourier spectral method. As a result, it is seen that the convective secondary flow is induced not only by the Rayleigh-Benard convection but by the natural convection near the side walls. When Reynolds numbers are rather larger values, 500 and 220, we have almost stationary longitudinal convective rolls in the flow. On the other hand, when the Reynolds numbers are smaller values, 90 and 50, the rolls fluctuate chaotically in space and time; then the time-averaged secondary flow is almost vanishing and the fluid temperature widely constant in the central part of the flow.

Keywords: numerical simulation, rectangular duct flow, convection, transition

1. はじめに

矩形ダクト流は工学上重要な基本的剪断流であるが、その遷移機構はいまだ未知のところが多い。さらにこれに温度場が加わると、レイリー・ベナール対流と自然対流が競合した複雑な2次流が発生する。ここではこの様な矩形ダクト流中の対流による2次流の発生過程を数値シミュレーションによって明らかにすると共に、2次流の発生をダクトの側壁温度条件および流れのパラメータを用いて制御するための基礎的要件を調べた結果について報告する。

計算機の発達に伴って複雑な乱流の数値シミュレーションも可能になってきたが、ナビエ・ストークス方程式の計算法の中で、スペクトル法は差分法に比べて計算精度が良いために最近乱流の数値シミュレーションによく用いられるようになってきている¹⁾。ここでは筆者等が先にチャンネル流の計算に用いたフーリエ・スペクトル法²⁾をダクト流に応用した。

2. 数値計算の説明

流れの座標系をダクトの軸方向に x 軸、鉛直方向に z 軸、これ等に垂直に y 軸をとる。計算領域を L_x, L_y, L_z と取り、 $y = \pm L_y/2, z = \pm L_z/2$ をダクト壁とする。流れの速度、温度をそれぞれ基本

* 航空宇宙技術研究所
** 電気通信大学

場 $U(y, z)$, $\Theta(y, z)$ と変動成分 $u(x, t)$, $\theta(x, t)$ の和で表すと, u, θ の方程式は

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_\alpha}{\partial t} = & -U \frac{\partial u_\alpha}{\partial x} - \left(v \frac{\partial U}{\partial y} + w \frac{\partial U}{\partial z} \right) \delta_{\alpha x} - \mathbf{u} \cdot \nabla u_\alpha \\ & - \nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 u_\alpha + \frac{G_r}{Re^2} (\theta + \theta) \delta_{\alpha z} \quad (1) \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} = & -U \frac{\partial \theta}{\partial x} - v \frac{\partial \theta}{\partial y} - w \frac{\partial \theta}{\partial z} - \mathbf{u} \cdot \nabla \theta + \frac{1}{Re P_r} \nabla^2 \theta \end{aligned} \quad (2)$$

と得られる。

ここで, U は温度場がない矩形ダクト流の定常解, Θ は流れがない流体について温度境界条件のみで定まる温度場の定常解で, p は圧力場を表す。また, Re, G_r, P_r はそれぞれレイノルズ数, グラスホフ数, プラントル数で, $\delta_{\alpha z}$ はクロネッカーのデルタである。

数値計算は u, θ をフーリエ級数で展開し, そのフーリエ成分について計算するスペクトル法を使用するが, 計算法の詳細は既に報告してあるのでここでは省略する³⁾。計算のいろいろなパラメータは次の様に定める。まず, 計算領域を $L_x = \pi$, $L_y = 1.5$, $L_z = L_y/2$ (ダクトの縦横比 2) とする。また, グラスホフ数 G_r は 480000, プラントル数 P_r は 0.71 と固定し, レイノルズ数 Re をパラメータとしてその効果を調べる。

対流はダクトの側壁温度条件に依存する。すなわち, 側壁近傍の自然対流は発生する対流ロールの回転方向を規定するだけでなく, ロールの不安定化をもたらすと考えられる。この様な側壁温度条件の効果を明らかにするために, 側壁温度分布を変えて計算を行う。

3. 計算結果と検討

図 1 は $Re=500$ で側壁温度分布が無次元温度で 0.2 (一定) の場合の計算結果を示し, 上図は流れ (x 方向) に垂直な速度成分のベクトル分布, 下図は流体温度分布 (等高線) を示す。この場合側壁温度は 0.2 と平均流体温度に比べて低いので, 側壁近傍では自然対流によって下降流が誘起され, 逆に, ダクトの中央では, 上昇する比較的安定な一対の対流ロールが実現している。発生した 2 次

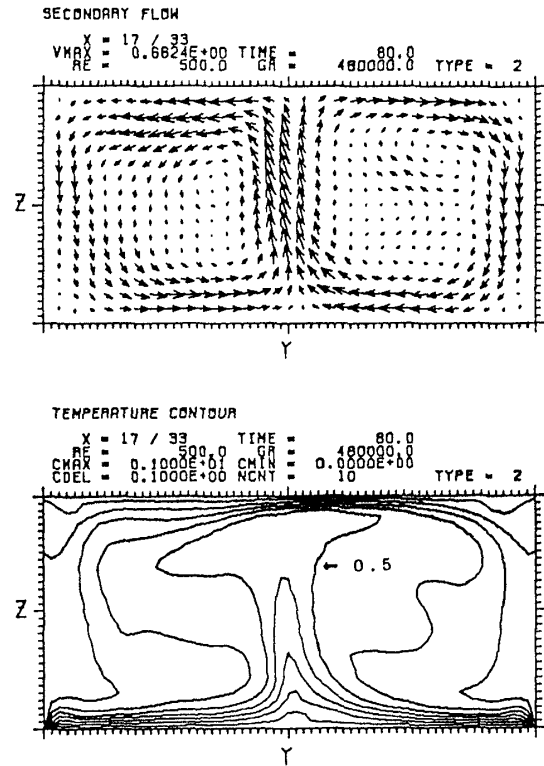


図 1 流れに垂直な 2 次流のベクトル分布と流体温度分布

$Re=500$, 側壁温度は 0.2, $t=80$

流はほとんど 2 次元的で, かつ, 定常的である。流体温度分布は下面近傍の高温流体が上昇するためダクトの中央部分で高くなる分布が得られている。

図 2 は $Re=220$ で側壁温度分布が鉛直方向に直線的に減少する場合に発生する 2 次流と流体温度分布を示す。この場合側壁温度の平均は平均流体温度と等しくなるので, 側壁近傍の自然対流は対流ロールの回転方向を決定する事が出来ない。計算結果は 3 個のロールが実現する結果を示すが, 対流の回転方向は初期に与えた流れの微小攪乱に依存する。これは, 初期速度の符号を反転すると発生する対流の回転方向が逆転する事から確かめられる。ただ, この場合非定常はまだ小さい。

対流ロールはレイノルズ数に依存して不安定になる。図 3 は $Re=50$ の場合に 2 次流と流体温度分布の時間平均をとった結果を示す ($Re=90$ の場合も同様な結果が得られる)。計算結果はダクトの中央部に 2 次流の平均が零で平均流体温度一定の領域が広範囲に実現する事を示す。この様な流

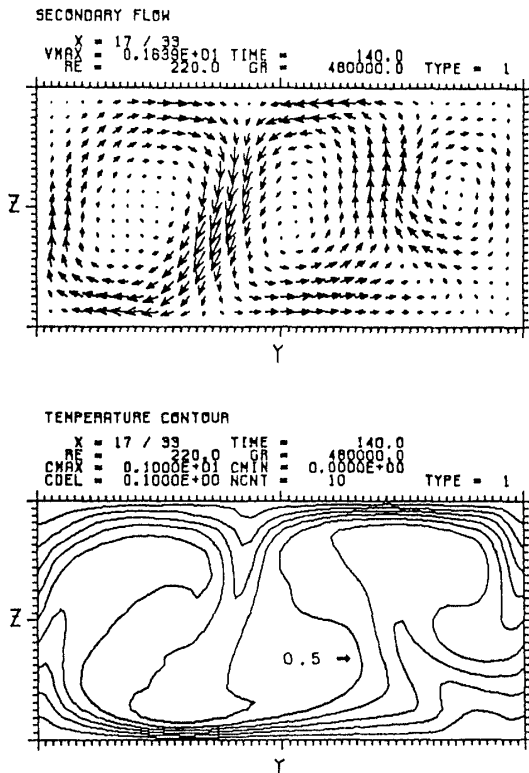


図2 流れに垂直な2次流のベクトル分布と流体温度分布
 $Re=220$, 側壁温度分布が鉛直方向に直線的に減少する場合, $t=140$

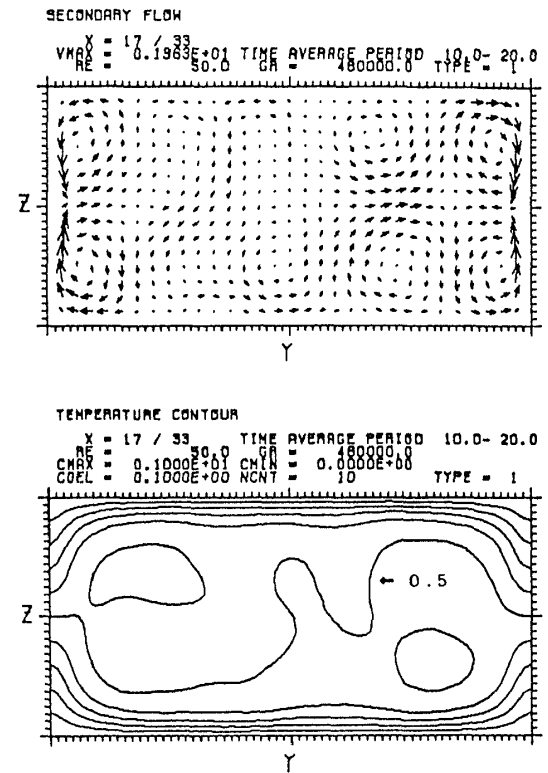


図3 時間平均を取った流れに垂直な2次流と流体温度の分布
 $Re=50$, 側壁温度分布が鉛直方向に直線的に減少する場合, $t=80$

体温度一定の流れの実現は、例えばCVD等で、実用上も重要である⁴⁾。さらにグラスホフ数を大きくして発達した乱流になると再び安定なロールが実現して、この様な温度分布一定の流れは実現しない。この様な非定常な流れはグラスホフ数480000でレイノルズ数が90と50の場合に得られる事が分かったが、今後さらにこの様な流れが実現するパラメータ範囲及び側壁温度分布を詳細に決定する事は重要である。

4. む す び

低レイノルズ数矩形ダクト流中に発生する対流の発達過程を数値シミュレーションによって調べ、以下の結果が得られた。

- 1) ダクトの側壁温度の平均が平均流体温度と異なる場合は安定で定常的な対流ロールが発生し、その回転方向を決めるのは側壁近傍の自然対流である。
- 2) ダクトの側壁温度の平均が平均流体温度と等しい場合は発生する対流ロールの回転方向

は流れの初期条件に依存する。

- 3) この場合そのロールの安定性はレイノルズ数に依存し、レイノルズ数が500と220では対流ロールの非定常性は小さいが、90と50では非定常性は大きくなり、その流れの時間平均を取ると、ダクトの中央の広範な領域で、流れに垂直な2次流の平均が零で、平均流体温度一定の流れが実現する。この様な流れの実現はCVD等実用上も重要である。

参 考 文 献

- 1) C. Canuto *et al.* : *Spectral Methods in Fluid Dynamics*, Springer-Verlag, 1988.
- 2) 山本稀義, 細川 巖 : 第1回数値流体力学シンポジウム講演論文集 (1987), 429.
- 3) 山本稀義, 細川 巖, 田中義規 : 第8回航空機計算空気力学シンポジウム論文集, 航空宇宙技術研究所特別資料 SP-14 (1990), 209.
- 4) H. Moffat and K. F. Jensen : *J. Crystal Growth* **77** (1986), 108.

