10407 非定常過程における水平正方形加熱流路内三次元複合対流熱伝達

Transient Process of Three-dimensional Mixed Convection and Heat Transfer in a Horizontal Square Duct with Heated Walls

○正 鳥山孝司 (山梨大学大学院)

正 一宮浩市 (山梨大学大学院)

Koji TORIYAMA, University of Yamanashi, Takeda-4, Kofu-shi, Yamanashi

Koichi ICHIMIYA, University of Yamanashi, Takeda-4, Kofu-shi, Yamanashi

The transient flow and heat transfer characteristics of the mixed convection in a horizontal square duct with heated walls are examined numerically in three-dimensional system. The SIMPLE procedure and QUICK scheme are applied to solve the governing equations through a control volume. The working fluid is water, and the temperature dependence of kinetic viscosity ν and thermal conductivity λ of water is considered in this analysis. Numerical results show that the reverse flow and the spiral flow flows appear on the upper wall and along the flow direction, respectively. The local Nusselt numbers are presented from the starting point of the heat transfer to the exit corresponding to the transient flow behavior.

Key Words: Mixed Convection, Transient Process, Horizontal Square Duct, Heat Transfer, Reverse Flow, Numerical Analysis

1. 緒言

層流複合対流は、熱交換器、太陽熱集熱器、CVD 炉、微小機器の冷却など幅広い所に見られ、これまでも数多くの研究がおこなわれてきている⁽¹⁾。しかしながら、定常状態に至るまでの過程について取り扱った論文は少ない。

そこで本研究では、上壁を断熱、残りの3方を加熱壁とする水平正方形流路内の複合対流について数値解析を行い、非定常過程における3次元的な流れの発達および流動状況に対応する伝熱特性について詳細に検討した。

2. 解析モデル及び数値解析

解析モデルを図1に示す。座標系は流路入口下部を原点とする3次元直交座標系 (x, y, z) を用いた。流路は、流れ方向に x 軸、断面上向きに y 軸、水平方向に z 軸をとり、それぞれの寸法は、 $800\text{mm} \times 20\text{mm} \times 20\text{mm}$ とした。また、重力は y 軸負の向きにかかっているものとした。この流路の上流側は 400mm の断熱助走路、それより下流側が加熱流路となっている。加熱流路は、上壁を断熱壁とし、側壁及び下壁面温度を $T_w=60^\circ\text{C}$ とした。作動流体の流入温度は、 $T_0=20^\circ\text{C}$ とし、流路入口には、 $Re=100$ の層流の発達した速度分布を与えた。なお、流路出口の速度及び温度の勾配は零とした。無次元化に用いた作動流体の物性値の参照温度は流入温度 $T_0=20^\circ\text{C}$ とした。この条件におけるリチャードソン数 Ri は62.78である。また、流体は壁面では滑らないものとした。

計算には連続の式、運動の式、エネルギー式を用いた。なお、運動の式の浮力項には Boussinesq 近似を適用した。式中の熱伝導率及び動粘性係数は温度の3次式で近似することにより温度依存性を考慮した。熱放射は無視した。基礎方程式の離散化にはコントロールボリューム法⁽²⁾を用い、対流項に

は数値粘性の影響の少ない QUICK⁽³⁾を適用した。なお、計算には圧力補正法(SIMPLE)⁽²⁾を使用した。格子には等間隔スタガード格子を用い、格子数は $800(x) \times 20(y) \times 20(z)=320000$ とした。初期条件として、時間 $t=0\text{s}$ のとき、全領域に発達した速度分布と流入温度と同じ温度を与え、圧力は零とした。計算は、時間ステップ $\Delta t=0.01\text{s}$ の時間発展で行った。本解析条件では、約100秒後まで大きく流動状況が変化し、約200秒後には定常状態へ至る。また強制対流のみの場合では、約50秒後に定常状態となり、そのヌセルト数は理論値と一致することを確認している。

3. 解析結果及び検討

3次元的な流動機構の時間的な変化について検討するため、代表的に、図2に5, 10, 15, 20, 50, 100秒後の流跡線図を示す。なお、流跡は $z=5\text{mm}$ から等間隔に6ヵ所から流入させた。5秒後では、流体は助走路内を加熱部まで流路の下流側に向かって真っ直ぐに流動し、一度下壁側へ流動方向を変えた後、側壁に沿って流体が上昇するような流れ方向に軸を持つスパイラルな流れを形成する。なお、加熱開始部付近の上壁付近では、流路上流側に向かって流体が流れる逆流域が形成さ

Fig.1 Coordinate system

Fig.2 Streak lines

Fig.3 Position of reverse flow area

Fig.4 Local Nusselt number on the bottom wall

(a) Transient process from 0[s] to 300[s]

(b) Transient process from 0[s] to 50[s]

Fig.5 Average Nusselt number on the walls with time

れ、この逆流域は時間経過と共に上流側へと伸長する。また、スパイラルな流れのピッチも時間経過と共に増大する。

図3に逆流域の流路上流側の端と下流側の端の位置を時間に対してプロットした。逆流域の流路下流側の端の位置は、時間経過とともに急激に流路下流側へと伸長し、約60秒後に $x=620\text{mm}$ 付近まで達する。なお、それ以後は時間が経過しても逆流域の流路下流側の端の位置は移動しない。一方、逆流域の流路上流側の端の位置はゆっくりと流路上流側へと伸長し、約300秒後に $x=50\text{mm}$ 付近まで達する。すなわち、逆流域の流路下流側は比較的早い時間で伸長しなくなるが、逆流域全体の長さは長い時間をかけて伸長する。

流動状況に対応した伝熱状況について検討するため、下壁面上の局所ヌッセルト数を図4に示す。5秒後では、伝熱開始部付近を除き、どの断面に対してもほぼ同じようなヌッセルト数分布を取る。なお、側壁側近傍のヌッセルト数の値は下壁中央付近の値よりも高い。流動方向に見ると、ヌッセルト数は伝熱開始部で大きな値を取り、下流に向かうにつれて減少した後、 $x=410\sim 420\text{mm}$ の区間で流動方向に対して波状の分布を示す。これは、主流が上壁側に形成される逆流域を避けるように下壁側付近を流動することにより生じる。10秒後では、流路断面に対して左右対称の2つ凸な分布をとる。また、上流側の波状の分布は下流側へと移動しながらその範囲を広げる ($x=440\sim 480\text{mm}$)。 $x=440\text{mm}$ 付近の側壁側ではヌッセルト数は小さな値を示している。この位置は、図2の10秒後の図のスパイラルの流れが側壁に沿って下壁面付近から上昇する位置に相当する。さらに時間が経過すると、このヌッセルト数の減少する位置は下流側にまで表れるようになる。50秒後では、 $x=640\text{mm}$ よりも下流側でのヌッセルト数分布の対称性が崩れてくる。この対称性が崩れる位置は、図3の50秒後での逆流域の下流側にあたる。なお、この非対称性は定常状態に至った後でも残る。

図5に流路の各壁面の平均ヌッセルト数を強制対流のみのものと同時に時間に対してプロットした。なお、図5(a)は0~300秒間を、図5(b)は初期段階の0~50秒間を示した。図5(a)では、強制対流のみの場合、伝熱開始とともにヌッセルト数は著しく減少し、およそ50秒後には定常状態に至る。一方、複合対流の場合、伝熱開始直後に大きく変動してから定常状態に至るが、その値は強制対流のみの場合よりも4~7倍と大きい。また、側壁面上の値よりも下壁面上での値の方が大きい。これは、スパイラルな流れの形成により、流路中心付近の流体が下壁に衝突し、下壁面上のヌッセルト数が増大するためである。また、全壁面の平均値では、強制対流のみの場合と比較しておよそ5倍程度高い値となり熱伝達が促進されている。図5(b)では、下壁の値に着目すると、伝熱開始とともに一度減少して5秒後に極小値を取り、10秒後に極大値を取った後、定常状態へ至る。これは、伝熱開始後直後では、強制対流のみの場合と同様にヌッセルト数は急激に減少するが、スパイラルな流れの形成と共に、下壁面上のヌッセルト数が増大するためである。

4. 結言

上壁を断熱、残りの三方を加熱壁とする水平正方形流路内の複合対流について数値解析を行い、非定常過程における流れの発達および流動状況に対応する伝熱特性について検討した。

参考文献

- (1) 功刀・一宮・坂元, 機論(B), 60(572), pp.1393-1400 (1994).
- (2) Patanker S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, pp.11-150, Hemisphere Publishing Corporation, (1980).
- (3) Leonard B.P., *Computer Method in Fluid*, pp.159-195, Pentech Press, (1980).