日本流体力学会年会 2009

低レイノルズ数における加熱水平正方形ダクトの二次流れと乱流構造 Secondary flow and turbulence structures in a horizontal square-duct heated from below at low Reynolds numbers

○関本 敦, 関山 和英, 河原 源太, 大阪大, 大阪府豊中市待兼山 1-3, E-mail: sekimoto@me.es.osaka-u.ac.jp ウルマン マルクス, カールスルーエ大, ドイツ ピネリ アルフレド, CIEMAT, マドリッド, スペイン

Atsushi Sekimoto, Kazuhide Sekiyama, Genta Kawahara, Osaka University Markus Uhlmann, University of Karlsruhe, Germany Alfredo Pinelli, CIEMAT, Madrid, Spain

Direct numerical simulations of fully developed low-Reynolds-number turbulent flow in a horizontal square duct heated from below are performed at Richardson numbers $0 \le Ri \le 1.03$ to investigate the buoyancy effects on the coherent structures near the walls, i.e. streamwise vortices and associated streaks, and on turbulence-driven secondary flow of Prandtl's second kind. It is found that cross-streamwise thermal convection which is represented by single large-scale circulation appears to affect the coherent structures and the mean secondary flow for $Ri \ge 0.025$. As Riis increased, the near-wall coherent structures are observed to appear more frequently in the region near one of the two corners on the wall, since they are swept along the wall towards the corner by the large-scale convection. The localization of the near-wall structures affects the profile of skin friction and heat transfer rate on the wall.

はじめに

正方形管路内乱流にはプラントルの第二種二次流れが生じ, 運動量や熱の平均的な輸送に大きく影響する.低レイノルズ数 においては,壁面近傍の縦渦の直径のスケールはダクトの幅, つまり平均二次流れ渦と同程度であり,壁面近傍の渦構造が側 壁の拘束を受けて特定の位置に存在するため,平均二次流れが 出現する⁽¹⁾.今回の研究では,浮力の影響を考慮して,ブシネ スク近似を適用した非圧縮ナビエ・ストークス方程式とエネル ギー方程式を,直接数値シミュレーションによって解き,二次 流れと壁面近傍の秩序構造の関連性や,熱伝達の促進などにつ いて考察する.

2. 平均二次流れと秩序構造への浮力の影響

平 均 二 次 流 れ の 強 さ を 表 す 指 標 と し て $u_{\perp} \equiv \left[(1/4h^2) \int_{-h}^{+h} \int_{-h}^{+h} (\overline{v}^2 + \overline{v}^2) dy dz \right]^{1/2}$ を定義し,そ のリチャードソン数 Ri との関係を図 1(a) に示す.また,加 熱壁面 (y/h = -1)の平均ヌセルト数は図 1(b) のようになる. $R_i = 0.025$ 付近で二次流れの特性に大きな変化があり,浮力に よる大循環が平均二次流れに出現する.Ri > 0.025では熱伝達 率も大きく促進される.Ri > 0.25では二次流れはほぼ浮力に よる誘導速度 $u_g \equiv \sqrt{g\beta\Delta TH}$ によってスケールされ,二次流 れはほぼ浮力に支配される.

図 2(a)(b) のように浮力による大循環によって,壁面近傍の準 縦渦構造は角へと運ばれ,角付近では負の渦度をもつ縦渦が正 の渦度をもつ縦渦よりも頻繁に存在する.したがって,二次 流れの生成には縦渦構造が大きく関係していることがわかる. また,図 3(a) に示すように,大循環の影響によって加熱壁面 (y/h = -1)上では角付近により多くの低速ストリークが存在し ており,平均壁面剪断応力や平均ヌセルト数の分布に大きな影 響を及ぼす.

参考文献

 M. Uhlmann, A. Pinelli, G. Kawahara and A. Sekimoto. Marginally turbulent flow in a square duct. J. Fluid Mech. 588:153-162, 2007.



Fig. 1 The Ri dependence of (a) the mean Nusselt number \overline{Nu} averaged over the top and bottom walls, and (b) the intensity of the mean secondary flow u_{\perp} normalized by $u_g = \sqrt{g\beta\Delta TH}$. , $Re_b = 3000; -000; -000, Re_b = 4400$.



Fig. 2 P.d.f.s of the positions of vortex centers (a) with positive vorticity (i.e. clockwise vortices), (b) with negative vorticity (i.e. counter-clockwise vortices) at Re = 4400, Ri = 0.052 ($Gr = 1.0 \times 10^6$). The level of p.d.f.s is represented by gray scale (black is highest and white is lowest). (c) Mean secondary flow (vectors) and mean temperature (contourlines).



Fig. 3 (a) P.d.f. of the positions of low-velocity streaks P on the bottom wall y/h = -1 for Re = 4400, Ri = 0.052. (b) Normalized wall shear stress τ_w on the wall y/h = -1. (c) Normalized local Nusselt number Nu on the bottom wall y/h = -1.