E114

流体温度ゆらぎがある平行平板間流路内の非定常熱伝達 Unsteady Heat Transfer in a Channel Flow with Fluid Temperature Fluctuation

○学 吉村 進哉 (同志社大院) 犬飼 宏明 (キヤノン) 正 千田 衛 (同志社大)
正 稲岡 恭二 (同志社大) 村松 壽晴 (核燃料サイクル開発機構)

Shinya YOSHIMURA, Hiroaki INUKAI, Mamoru SENDA, Kyoji INAKA and Toshiharu MURAMATSU

Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto 610-0321

Fluid temperature fluctuation of low frequency, known as the thermal striping phenomena, occurs in the mixing tees of nuclear components with hot and cold fluids. In this study, in order to elucidate the heat transfer characteristic of the thermal striping phenomena, fluid temperature fluctuation is developed by the periodic large scale vortices in a channel flow with rectangular cylinder, and the heat transfer coefficients were measured by the thin film heat flux sensor which was installed in the channel wall. The fluctuations of Nusselt number and fluid temperature are antiphase in the periodic temperature fluctuation field. And the time averaged Nusselt number in the fluid temperature fluctuation field is almost equal to that of the constant fluid temperature, although the R.M.S. of Nusselt number increases with fluid temperature fluctuation.

Key Words: Fluid Temperature Fluctuation, Unsteady Heat Transfer, Thin Film Heat Flux Sensor

1. 緒言

工業プラント用の配管系において、温度の異なる二流体が混合する領域では、サーマルストライピング現象と呼ばれる低周波数の流体温度ゆらぎが生じる。この現象により構造物に熱疲労が発生する可能性があるため、それを防止することは熱的設計を行う上で重要な課題となっている。しかし、流体温度ゆらぎがある場合の熱伝達特性の解明^{(1)~(6)}は、重要でありながらも実験的に検討された例は少ない。

本研究では、流体温度ゆらぎがある流れの熱伝達特性を明らかにするために、矩形流路に設置した角柱から周期的に放出される大きなスケールの渦によって流体の温度ゆらぎを実現し、流路壁面に設置した薄膜熱流束センサ⁽⁶⁾を用いて非定常熱伝達率の測定を行うことを目的とする。

2. 実験装置及び実験方法

実験装置の概略を Fig.1 に示す。テスト部に流入する作動流体の水は上下に分け、それぞれに温度一定の高温水と低温水 (温度差 $\Delta T=20[^\circ\text{C}]$) を流すことで、角柱上下から発生する渦に温度差をつけ、周期的な流体温度ゆらぎを実現する。テスト部は、高さ $H=50[\text{mm}]$ 、スパン方向長さ $150[\text{mm}]$ の矩形流路であり、座標系はテスト部入口断面の中心を原点として、流れ方向を x 、それに垂直な高さ方向を y とする。また、角柱の断面は流れ方向を b 、高さを h とし、 b/h を変化させることで放出渦のストローホール数 Sr 、すなわち流体温度ゆらぎの周波数を制御する。角柱はその前面が $x/H=0.6$ で、上下対称となるように設置した。熱伝達実験では、壁面における熱流束変動を測定するために、Fig.2 に示す厚さ $3[\mu\text{m}]$ のニッケル箔をフォトエッチングにより作製した薄膜熱流束センサを用いた。センサは銅ブロックに貼り、スパン方向中央、 $x/H=2.5$ の位置にセンサ検知部を流路壁面と同じ面になるように設置した。なお、壁面熱流束センサの動作原理は定温度型熱線流速計と同様であり、銅ブロック及び銅板はヒータで通電加熱して壁温一定で高温水より約 $5[^\circ\text{C}]$ 高くなるように設定した。また熱流束センサと同じ位置における流体温度を壁面からの距離を変えて ($0.40 \leq y/H \leq 0.48$) 熱電対で測定し、熱伝達率は壁温と流体温度の差で定義した。実験は入口断面平均流速

Fig.1 Schematic view of test section.

Fig.2 Heat flux sensor and test plate.

とテスト部高さ H で定義された Re 数が 4500 及び 9000 の場合で行い、このときの物性値は、合流後に熱的平衡温度に達したときの温度に対するものを用いた。また、 Sr 数は、角柱高さ h と角柱挿入位置での断面平均流速で定義した。

3. 実験結果及び考察

Fig.3 に流体温度ゆらぎ場における局所 Nu 数と流体温度の変動波形を、 $Re=9000$, $Sr=0.174$ の場合について示す。これらの変動は、Fig.4(a)及び(b)のパワースペクトル密度を表した図より明らかなように、角柱からの放出渦に等しい卓越した周波数を有し、周期的な流体温度ゆらぎ場では熱流束の変動もそれと同期して変動することがわかる。また Fig.5 に示したように、局所 Nu 数と流体温度の変動の相互相関係数は遅れ時間 $\tau \approx 0.17[\text{sec}]$ で負の相関が最大となっている。 Nu 数と流体温度の変動が逆位相となるのは、壁面温度を高温流体の温度より高く設定していることから、高温流体が薄

Fig.3 Fluctuation of Nusselt number and temperature for $Sr=0.174(Re=9000)$.

Fig.4 Spectral distribution for (a)temperature and (b)Nusselt number fluctuations ($Sr=0.174, Re=9000$).

Fig.5 Cross-correlation coefficient between Nusselt number and fluid temperature fluctuations.

膜熱流束センサ上方を通過する際には、壁面から流体への熱輸送量が減少し、逆に低温流体が通過する際には、熱輸送量が増加するためだと考えられる。

Fig.6に流体温度ゆらぎ場における局所時間平均 Nu 数を、ゆらぎのない場合での局所時間平均 Nu_0 数で除したものを示す。ここで、流体温度ゆらぎ場における Nu 数の算出に用いる流体代表温度 T_b については、壁面からの位置 y/H を変化させて求めた。 $0.44 \leq y/H \leq 0.48$ の範囲における Nu/Nu_0 の変化は大きく、 $y/H \leq 0.44$ では変化が小さくなることから、温度境界層はおおよそ $0.1H$ と考えられる。また Fig.6 から、流体温度ゆらぎ場における局所時間平均 Nu 数を温度ゆらぎのない場合における値と比較すると、 Re 数と Sr 数に関わらず Nu 数には大きな変化がないことがわかる。

さらに、 Fig.7に流体温度ゆらぎの RMS を、また Fig.8に温度ゆらぎ場における Nu 数の RMS をゆらぎのない場合での RMS で除した値を示す。ただし、このときの流体代表温度 T_b は温度境界層の外縁にあたると思われる $y/H=0.40$ の位置での値を用いた。 Fig.7より、本実験条件下では流体温度ゆらぎの RMS 値 T_{RMS} は、代表温度差 $(T_w - T_b)$ の約 25% である。また、 Fig.8 から流体温度ゆらぎ場における局所 Nu 数の RMS は Re 数に依存し、約 1.2 から 1.6 倍の範囲で増加している。

Fig.6 The ratio of time averaged Nusselt number.

Fig.7 $R.M.S.$ of temperature fluctuation($y/H=0.40$).

Fig.8 The ratio of $R.M.S.$ of Nusselt number($y/H=0.40$).

4. 結言

- (1) 周期的な流体温度ゆらぎ場において、局所 Nu 数と壁面付近での流体温度の変動波形は逆位相となる。
- (2) 流体温度ゆらぎ場での局所時間平均 Nu 数は、本実験条件の下ではゆらぎのない場合とほぼ同等である。
- (3) 流体温度ゆらぎ場における局所 Nu 数の RMS 値は、ゆらぎのない場合の値より約 1.2 倍から 1.6 倍の範囲で増加する。

参考文献

- (1) Naoto Kasahara, et al., Nuclear Engineering and Design, 212, 281-292 (2002)
- (2) 河村 勉ら, 機論(B編), 69-682, 1445-1452(2002).
- (3) 高橋志郎ら, 機論(B編), 66-651, 2905-2911(2000).
- (4) 中川慎二ら, 機論(B編), 64-622, 1817-1824(1998).