

矩形容器内における共存対流の熱流動特性

Mixed convection in a slender rectangular channel

(平成16年9月受理)

篠木 政利* (SHINOKI Masatoshi)

Abstract

This paper describes the influence of through-flow on the mixed convection in a slender rectangular channel. In a rectangular enclosure, the convection structure most often observed is rolls with axes parallel to the smaller side of the rectangular enclosure. If a through-flow is imposed on such convection, the fluid flows keeping its structure in the region that Ra number is large and Re number is small. In such a mixed convection, the flow pattern plays an important role in the heat transfer process. In this study, the flow-visualization by thermo-sensitive liquid-crystal suspension method were conducted covering wide Ra and Re ranges. Consequently, the convection pattern was classified into three patterns by use of Ra and Re numbers.

1. 緒言

熱対流(自然対流)に強制流が印加された場合、あるいは強制的に流されている流体中に温度差が生じ、その流体中に密度差が発生した場合、それらは混合流れのため、相互に作用し、複雑な流れ場を確立する。このような混合流れは、大気中での丘陵地帯における風、陸地および海における微風、そして基礎流体力学や熱伝達の研究、また微小電子機器の冷却、小型熱交換器の熱伝達、化学蒸着(CVD)における単結晶膜の成長、太陽エネルギー収集器などの数多くの科学技術までを含むような、地球物理学や工学技術などにおける現象において幅広い範囲で目立って起り、その流れの構造に対する詳細な理解が重要となる。したがって、それらの伝熱流動特性を理解する上で、そのような共存対流現象の対流構造について、詳細な研究が求められている。

本研究では、上記に述べた共存対流現象の熱輸送現象解明の手始めとして、2次元領域場における共存対流現象の対流構造に着目した。上下伝熱面がそれぞれ一様に加熱、冷却された水平薄肉矩形流路をモデルとして用い、その薄肉矩形流路内に強制対流効果として一様な一方向流を与えた対流場で起こる共存対流現象について感温液晶懸濁法による流れの可視化³⁾を行うことで、対流現象を明らかにしようとした。以下にその結果について述べる。

2. 実験装置

本実験に使用した可視化実験装置の概要図をFig.1に示す。実験装置は、主にテストセクション、上下面伝熱部、テストセクションに強制流を与えるためのローラーポンプ、作動流体の流入温度を制御するための熱交換器、緩衝油槽で構成されている。また、テストセクションの両端には、それぞれ整流格子が設置されている。その他に、上下面伝熱部の温度を調節するための恒温水循環装置がそれぞれ一台ずつ、テストセクション周囲の温度を調節するための恒温水循環装置が一台、テストセクション内の各断面を照射するためのキセノンライトが装置両側にそれぞれ一台ずつ設置されている。

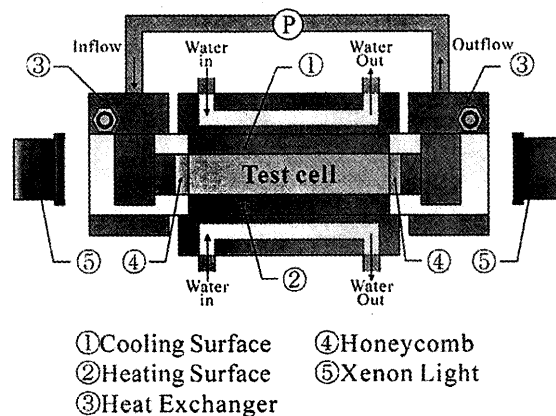


Fig.1 Experimental setup

* 福島工業高等専門学校 機械工学科 (いわき市平上荒川字長尾 30)

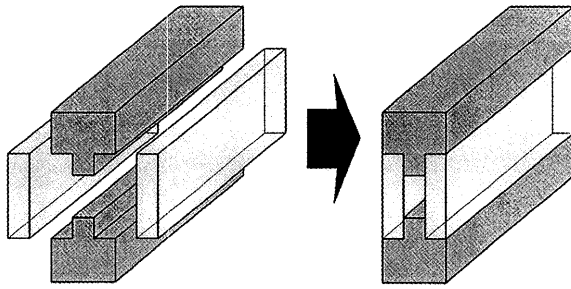


Fig.2 Schematic diagram of the test section

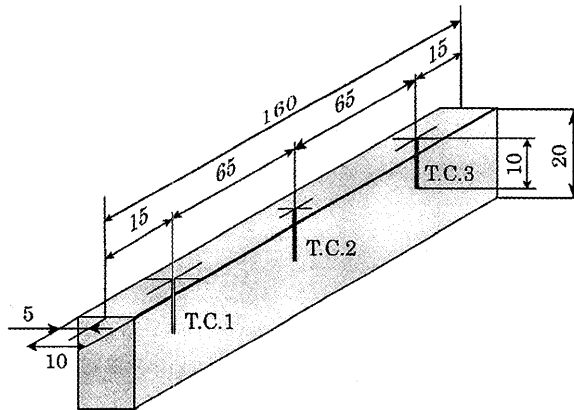


Fig.3 Thermocouple position in the test channel

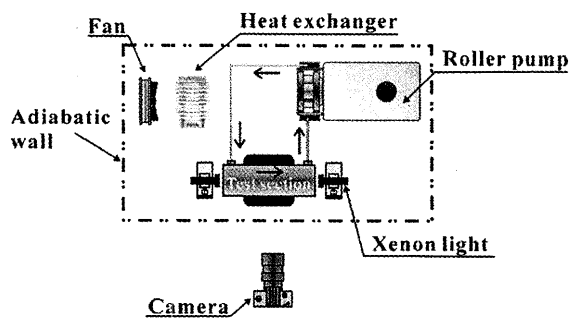


Fig.4 Schematic upper view of the experimental setup

次に、テストセクションの詳細図をFig.2に示す。Fig.2に示されるように、テストセクションは、正面板と背面板で上下面伝熱部である銅ブロックを挟むことにより構成された水平矩形流路である。なお、テストセクションの正面、および背面板には、断熱のため亚克力板を使用した。正面板はテストセクション内を観察出来るように15[mm]厚の透明亚克力板とし、背面板には観察を容易にするために13[mm]厚の透明亚克力板に2[mm]厚の黒色亚克力板を貼り付けてある。テストセクション上下面の伝熱部は、それぞれ厚さ45[mm]の銅ブロックで構成されており、各銅ブロックには流路が設けてある。この流路に恒温水循環装置より一定温度の水を流入することで、上下伝熱面温度を制御した。また上面伝熱部には、感温液晶注入、あるいはテストセクション内の作動流体温度測定用の熱電対を挿入

するための銅管(内径1.2[mm])が3箇所貫通している。なお、熱電対を挿入し温度計測を行う際にはFig.3のような位置で行った。

作動流体は、ローラーポンプによりチューブ内を流れ、テストセクションの左側に設置された熱交換器で所定の温度となり、テストセクション左端に設けられた流路へ流れ込む。そして整流格子により流れが整えられた後、テストセクション内へと流入し、テストセクション右端に設けられた流路から流出する。流出した作動流体は、テストセクション右側に設置された熱交換器を通過した後、緩衝油槽に入り、再びローラーポンプによってテストセクションへ流れていく(Fig.1および4参照)。

テストセル周辺は、亚克力板を数枚使用した多重構造になっているが、外部の熱擾乱の影響を避けることはどうしても難しい。したがって、Fig.4に示すように装置周辺を発砲スチロール製の断熱ボックスで覆い、その断熱ボックス内に熱交換器、およびファンを設置して、ボックス内の温度を一定に保った。なお、ボックス内の温度は、上部伝熱面温度と下部伝熱面温度の中間温度に設定した。

実験に際しては、まず、テストセクション内に空気のボイドが入らないように注意して、作動流体であるシリコンオイルを入れる。シリコンオイルの物性値はTable1に示す。シリコンオイル注入後、テストセクション上下伝熱面の温度差を高く設定することで強い対流を起こし、しばらく放置する。これは、シリコンオイルをテストセクションに対して馴染ませるためでもある(シリコンオイルを馴染ませないと液晶がテストセクションの前後壁に付着し、可視化が困難になる)。次いで、シリコンオイルに液晶を混合したもの(重量比約0.1%)を、テストセクション両側の流路から注射器を用いて、テストセクション内に注入する。液晶注入後、対流が発達するまで再び放置する。これは液晶の沈殿を防ぎ、また液晶の攪拌を促すためである。液晶が十分に攪拌したら、対流を静止させるために、テストセクションの上下伝熱面の温度を等しくする。

完全に対流が静止し、熱平衡状態になったのを確認後、テストセクション上下面温度を上面冷却、下面加熱の状態です定の温度差になるように設定する。設定温度差にし、対流が十分発達した後、テストセクション内の自然対

Table 1 Physical property of Silicon oil KF96-100cSt

Kinematic Viscosity ν [m ² /s]	1.00×10 ⁻⁴
Density ρ [kg/m ³]	965
Specific heat C_p [kJ/kg·K]	1.55
Thermal conductivity λ [W/m·K]	0.163
Thermal expansion coefficient β [K ⁻¹]	99×10 ⁻⁵
Prandtl number Pr	911

流パターンを観察、および写真撮影を行う。なお、テストセクション両側の熱交換器、および断熱ボックス内の温度は、テストセクション上下伝熱面温度の中間温度に設定した。

次いで、ローラーポンプの電圧を所定の電圧にし、テストセクション内の流体に一方向流を印加し、対流が十分発達したのを確認した後に、対流の遷移パターンの1周期に要する時間を測定する(ここでいう周期とは、ある対流パターンから、その対流パターンに戻るまでの時間のことである)。1周期に要する時間を測定した後、1/8もしくは1/4周期毎に撮影を行う。

対流パターン撮影時には、テストセクション両側に設けたキセノンライトのスリット光をテストセクションの側面から照射し、約2[m]前方(スリット光の照射断面に対して垂直方向)から写真撮影を行った。

3. 無次元パラメータ

本研究においては、以下に示すような無次元数を用いた。自然対流の強度を示すレイリー数 Ra_{HS} は式(1)に示すような Hele-Shaw 近似に基づくレイリー数を適用した⁴⁾。これは、前後壁の効果により流体が拘束され、流れが二次元的になることを考慮したレイリー数であり、一般的な臨界レイリー数 $Ra_{critical}$ が 1700 程度であるのに対して、Hele-Shaw 近似に基づくレイリー数の臨界値は $Ra_{HS,critical}=170$ 程度になる。レイノルズ数、グラスホフ数に關しては式(2)に示すような一般的な定義を用いた。

$$Ra_{HS} = \frac{\beta g \Delta T H D^2}{12 a \nu} \quad (1)$$

$$Re = \frac{u_m H}{\nu} \quad (2)$$

$$Gr = \frac{\beta g \Delta T H^3}{\nu^2} \quad (3)$$

ここで、 β は体膨張率、 g は重力加速度、 ΔT は上下面温度差、 D, H はそれぞれテストセクションの流路幅、流路高さ、 a は熱拡散率、 ν は動粘度、 u_m は平均流入速度を示している。ここで、式(1)における $D^2/12$ という項が前後壁の効果を考慮に入れた修正係数となっている。

4. 可視化実験結果

4.1 自然対流パターン

まずは、本実験装置において、強制流を印加しない自然対流状態での対流パターンをPhoto 1に示す。この実験は以下の共存対流のパターンと比較するために行ったものである。

まず、温度差が $\Delta T = 1.0$ [K]の時にはテストセル両端でわずかな流動が見られるものの、テストセル全体を通して対流は発生しておらず、熱輸送は熱伝導によって行われている。 $\Delta T = 1.5$ [K]の比較的温度差の低い場合でのパターンでは、テストセル全体に不安定ではあるが10個のロールが形成された。ロールの流れ方向は、テストセル左側から順に左回り、右回りと交互になっている。温度差を上げていき、 $\Delta T = 2.5$ [K]では安定した対流パターンとなり、テストセル全体をほぼ10等分にするようなロールが形成されるパターンを呈した。本実験装置において、臨界レイリー数は既報において知られているように $Ra_{HS}=170$ 付近



a) $\Delta T = 1.0 K (Ra_{HS} = 148)$



b) $\Delta T = 1.5 K (Ra_{HS} = 223)$



c) $\Delta T = 2.5 K (Ra_{HS} = 371)$

Photo 1 Natural convection patterns

であることが確かめられた。

4.2 共存対流パターン

次に、本実験装置において、上記に述べた自然対流パターンに強制流を与えた場合の対流パターンを以下に示す。ここで示す実験結果は上下伝熱面温度差を $\Delta T = 2.5$ [K]に固定し、強制流の強さを変化させて行った。また、これらの画像はスチールカメラを用い、適度なシャッター速度で液晶粒子の軌跡が写るように設定しているため、定性的ではあるが流れ場の様子も把握できる。

Photo 2は、上面伝熱面温度22.5[deg.C]、下面伝熱面温度25[deg.C]で、上下伝熱面温度差 $\Delta T = 2.5$ [K] ($Ra_{HS}=371$)の自然対流場に、テストセル左側から右側へ一方向流を与えたときの対流パターンを示したものである。

まず、Photo 1-cの自然対流場に $u_m=1.2$ [mm/min] ($Re=3.8 \times 10^{-3}$)の一方向流を与えたときの対流パターンをPhoto 2-aに示す。このとき周期は1380[s]であり、Photo 2は1/8周期ごとの状態を示している。まず流路出口近傍、すなわちテストセル右端のロールは、一方向流により押されてテストセル内から消えてしまい、流路入口近傍、すなわちテストセル左端のロールは大きくなっていく。 $t=0$ で10個であったロール(ロールの流れ方向は左から順に右回り、左回りと交互になっている)は、 $t=\tau/4$ のときには9個になる。更に時間が経過すると、テストセル左端に新たなロールが形成されはじめ、 $t=\tau/2$ になると、再びロール

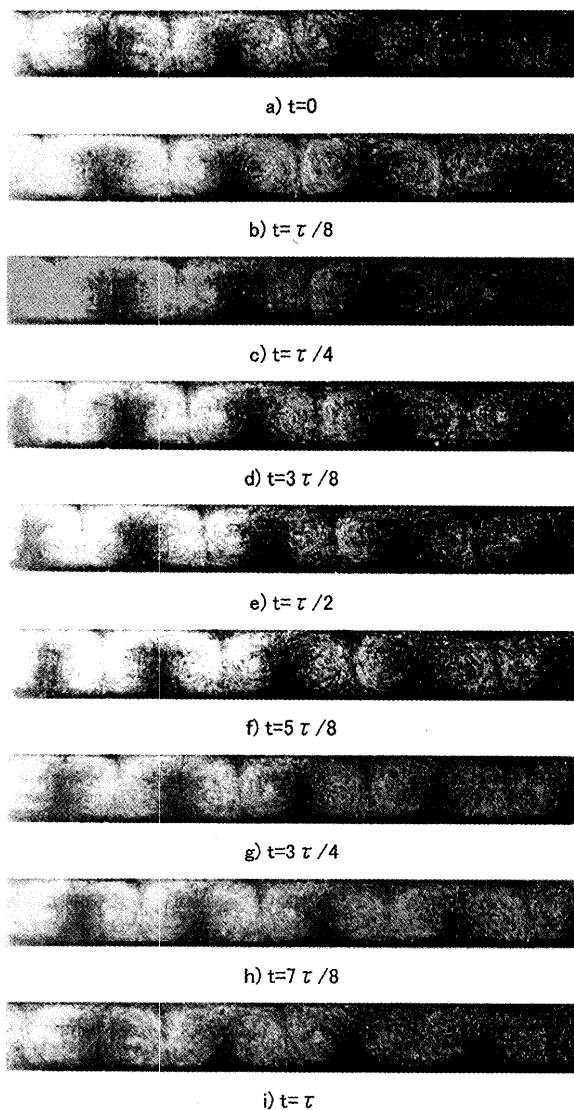


Photo 2 Effect of through-flow on the convection pattern

$$\Delta T = 2.5K (Ra_{HS} = 371), u_m = 1.2 \text{ mm/min} (Re = 3.8 \times 10^{-3})$$

の数が10個になる。ロールの流れ方向は初期状態($t=0$)のときと逆になっている。そして、 $t=3\tau/4$ で再び9個となり(ロールの流れの方向は $t=\tau/4$ のときと逆)、 $t=7\tau/8$ では、テストセル左端に新たなロールが形成されはじめ、 $t=\tau$ で初期状態、すなわち $t=0$ の状態に戻る。この条件では、自然対流の流れの構造が一方向流によってほとんど崩されることなく、テストセル全領域の流体が自然対流のロール構造を維持したまま連続的に移動し、かつ周期的に決まった対流パターンを示した。

Photo 3は、先程と同様に自然対流場に $u_m=4.9$ [mm/min] ($Re=1.6 \times 10^{-2}$)の一方向流を与えて、流れの遷移パターンがほぼ一定になってからの一連の写真である。このとき周期は208[s]であり、Photo 3は1/8周期ごとの状態を示している。この実験結果では、下流側においては流れが蛇行的になっているのがわかる。また、上流側では一方向流の影響で垂直方向の速度成分がほとんど

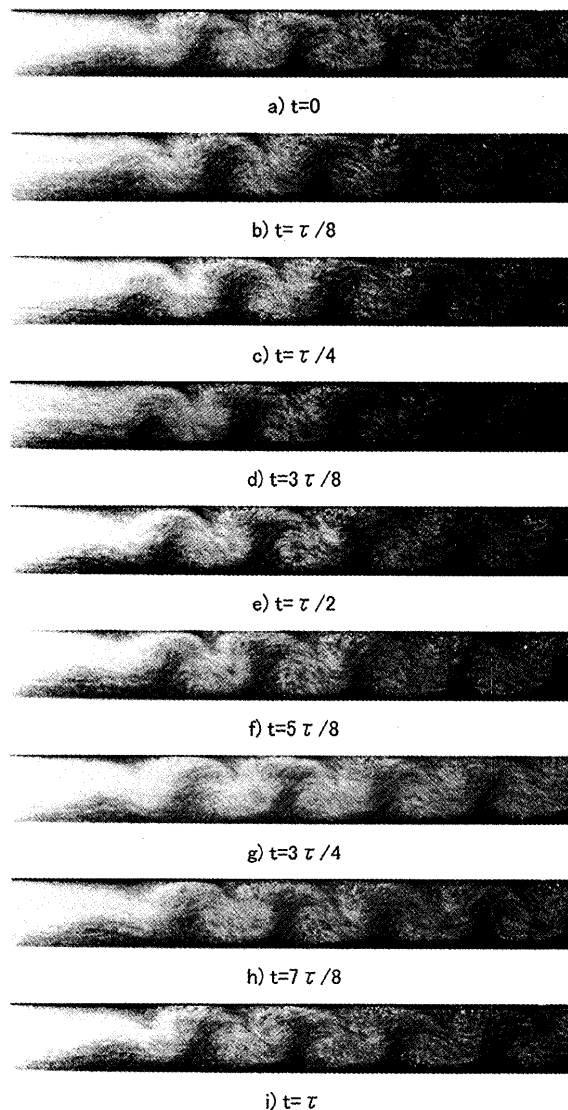


Photo 3 Effect of through-flow on the convection pattern

$$\Delta T = 2.5K (Ra_{HS} = 371), u_m = 4.9 \text{ mm/min} (Re = 1.6 \times 10^{-2})$$

存在せず、成層化した状態で流体が移動していく様子が観察された。

Photo 4は、自然対流場に $u_m=7.1$ [mm/min] ($Re=2.4 \times 10^{-2}$)の一方向流を与えたときの対流パターンを示したものである。このときの周期は112[s]であり、Photo 4は1/4周期ごとの状態を示している。この場合も、Photo 3の場合と同様、上流側においては、流体が成層化した状態で移動しており、下流側では、垂直方向の速度成分がPhoto 3の場合に比べて小さくはなっているが、蛇行的な流れとなっている。また流入流速が増加したことにより、Photo 3の場合に比べて上流側の成層化した領域が広がっており、テストセル中央付近にまで及んでいる。

更に流速を上げ、 $u_m=9.0$ [mm/min] ($Re=3.0 \times 10^{-2}$)の一方向流を自然対流場に与えたときの対流パターンをPhoto 5に示す。この条件では、テストセル全体を流体が成層化した状態で移動しており、テストセル内を温度境界

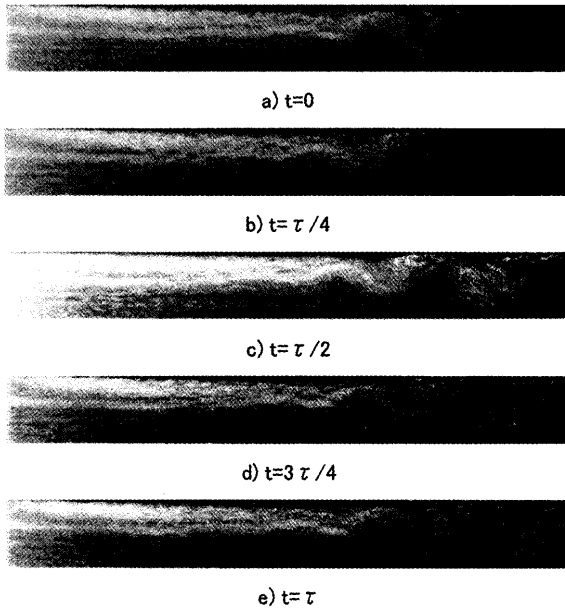


Photo 4 Effect of through-flow on the convection pattern

$$\Delta T = 2.5K (Ra_{HS} = 371), u_m = 7.1mm/min (Re = 2.4 \times 10^{-2})$$



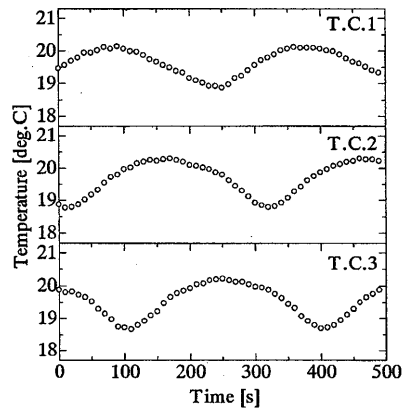
Photo 5 Effect of through-flow on the convection pattern

$$\Delta T = 2.5K (Ra_{HS} = 371), u_m = 9.0mm/min (Re = 3.0 \times 10^{-2})$$

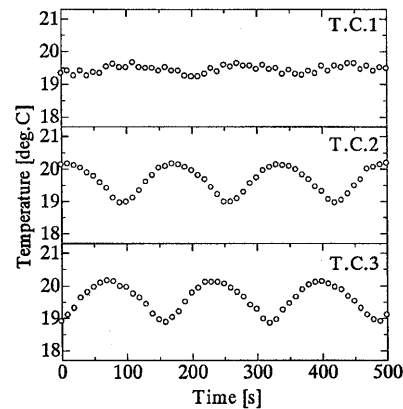
層が発達しながら流れていく様子のみが観察された。

4.3 温度測定結果

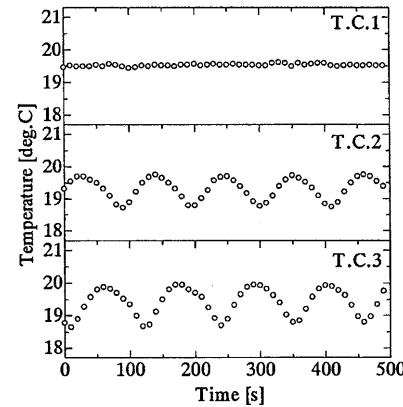
Fig.5に示すのは上下伝熱面温度差が $\Delta T = 4.0 [K]$ の際の熱電対（各熱電対の位置はFig.3参照）の温度測定結果である。先程の可視化実験の際とレイリー数が異なるが、Fig5-aがPhoto 2のように、テストセル全領域の流体が自然対流のロール構造を維持したまま連続的に移動していった場合の温度変動を示している。いずれの熱電対も周期的に温度変動を繰り返している様子がわかる。次に、Fig5-bはPhoto 3のように上流側では一方向流の影響で成層化した状態で流体が移動し、下流側においては流れが蛇行的になっている際の温度変動を表している。上流側のT.C.1では温度変動の振幅が小さく、下流側のT.C.3では振幅が大きくなっていることがわかる。Fig5-cはPhoto 4のような流動状態の時に得られた温度変動パターンである。上流部での流れがほとんど成層状態であるため、T.C.1ではほとんど温度変動がなく、ほぼ一直線になっている。また、Fig.5-a~cの温度測定結果において、T.C.3の温度変動の振幅に着目すると、ほとんど違いがないことがわかる。これは、強制流が印可されることにより、温度変動の周期は変わるものの、振幅は強制流の影響をあまり受けず、上下伝熱面温度差に大きく影響を受けるからであると推測される。



a) $u_m = 2.5 [mm/min], Re = 8.0 \times 10^{-3}, Ra_{HS} = 594$



b) $u_m = 7.1 [mm/min], Re = 2.3 \times 10^{-2}, Ra_{HS} = 594$



c) $u_m = 9.0 [mm/min], Re = 3.0 \times 10^{-2}, Ra_{HS} = 594$

Fig.5 Temperature fluctuation

4.4 フローパターンマップ

これまでの実験結果より、定性的ではあるが流れの構造を以下の3パターンに分類した。

Pattern (i)

流路出口からロールが消えていくと同時に、流路入口近傍に新たなロールが形成されるような、テストセル全体の流体が自然対流構造を維持した状態で連続的に移動するパターン

→慣性効果に比べ、浮力効果が十分強いようなパターン

Pattern (ii)

上昇および下降しているトレーサーが右隣のロールへ流れ込み、テストセル全体の流れが蛇行型になるパターン
→慣性効果がかなり弱く、浮力効果によって導かれる垂直方向の速度成分がテストセル全体に残っているようなパターン

Pattern (iii)

下流側では、流れが蛇行型になるが、上流側では成層化した状態で流体が移動するパターン、もしくはテストセル全体を流体が成層化した状態で移動し、テストセル内を温度境界層が発達しながら流れていくパターン

→下流側では慣性効果に比べて浮力効果がやや強いが、上流側では慣性効果が十分に強いようなパターン、もしくはテストセル全体を通して慣性効果が十分に強いようなパターン

Fig.6に上記のパターンによって区別したフローパターンマップを示す。このフローパターンマップは、Hele-Shaw近似に基づくレイリー数 Ra_{HS} とレイノルズ数 Re の関数として、本実験で得られた上記の各対流パターンをプロットしたものである。またマップ中の各実線は、本実験結果を基にした $Gr/Re^2=constant$ の曲線である。このマップから、 Gr/Re^2 の値によってフローパターンをある程度、整理することができた。次に、Fig.7はレイノルズ数 Re と流れの周期 τ_1 、流体が波長分の距離を移動するのに要する時間 τ_2 、およびHele-Shaw近似に基づくレイリー数 Ra_{HS} の関係を表したものである。Fig.7からは、レイノルズ数が大きくなる、すなわち流入流速が大きくなるに伴って、流れの周期、ならびに流体が波長分の距離を移動するのに要する時間は減少していき、各プロットがほぼ一つの曲線上に乗ることがわかる。このことから、自然対流場に一方向流を印加したことによって導かれる流れの周期は Ra_{HS} にはほとんど依存せず、 Re に大きく依存すると考えられる。

5. 結言

感温液晶懸濁法による可視化実験により、下面加熱・上面冷却の薄肉水平矩形流路内に強制対流効果として一様な一方向流を与えたことによって導かれる対流の遷移パターンについて検討を行った結果、各対流パターンを以下の3つのフローパターンに分類することができ、これらのフローパターンをHele-Shaw近似に基づくレイリー数 Ra_{HS} とレイノルズ数 Re の関数としてプロットし、フローパターンマップを作成することができた。

また自然対流場に一方向流を印加したことによって導かれる流れの周期を計測した結果、Hele-Shaw近似に基づくレイリー数 Ra_{HS} 、レイノルズ数 Re 、および流れの周期の

関係から、自然対流場に一方向流を印加したことによって導かれる流れの周期は、 Ra_{HS} にはほとんど依存せず、 Re に大きく依存することがわかった。

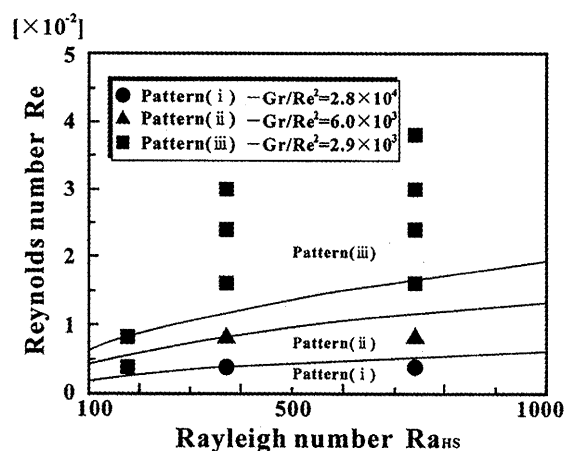


Fig.6 Flow-pattern map

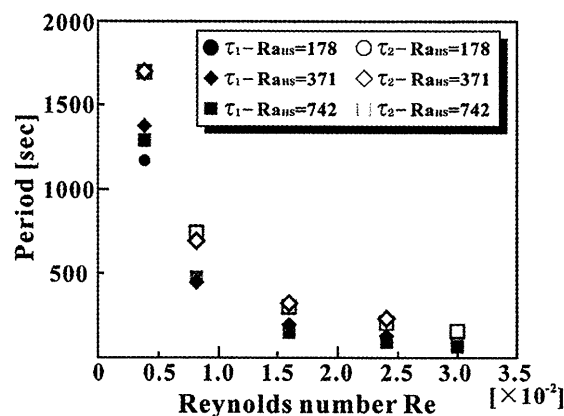


Fig.7 Relationship between Reynolds number and period

References

1. Chandrasekhar, S., Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability, Dover, N.Y., (1961)
2. E.Schroeder, Numerische und experimentelle Untersuchung der dreidimensionalen gemischten Konvektion in quaderfoermigen Behaeltern und im Rechteckkanal, Universitaet Karlsruhe (TH), (1993)
3. Ozawa, M., Mueller, U., Kimura, I. and Takamori, T., Flow and Temperature Measurement of Natural Convection in a Hele-Shaw Cell Using a Thermo-Sensitive Liquid-Crystal Tracer, Experiments in Fluids, Vol.12, pp.213-222, (1992)
4. Guenther, C. and Mueller, U., Rayleigh-Benard Convection in a Hele-Shaw Cell-A Numerical Study, KfK44212, Kernforschungszentrum Karlsruhe, (1987)