九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

# 環状流路内の層流化現象に関する研究

鳥居，修一
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

清水，昭比古
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

長谷川，修
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

https://doi.org/10.15017/17628

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告. 7 (1), pp.69-74, 1985-08-01. 九州大学大学院総合理工学研究科
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

# 環状流路内の層流化現象に関する研究

鳥居修一・清水昭比古*・長谷川　修*

(昭和60年3月31日　受理)

# Laminarization of annular duct flow

Shuichi TORII, Akihiko SHIMIZU, Shu HASEGAWA

Experimental study was performed on convective heat transfer of air flows in concentric annular channels in order to clarify the criteria for occurrence of turbulent to laminar reverse transition (laminarization). The flow channels both with and without convergence were used and strong heating conditions were realized so that non-dimensional heating parameters exceed the proposed criteria for the laminarization of the flow within circular tube. No laminarization, however, was observed when the channel has no convergence and it is supposed that the annular flow is seemingly less vulnerable to the laminarization. The heat transfer with convergent passage shows some laminarization behavior and this trend is seen to be enhanced as the heating level is increased.

## 1. 緒　　言

高温ガス炉の伝熱流動に関する重要な研究課題として，冷却材の層流化現象といわれるものがある．これは，チャンネル入口におけるレイノルズ数が乱流を実現させるに足る値であるにも拘らず，流れが下流で層流的な挙動を示すことをいい，Bankston[1], Patel ら[2]などによって流れの加速が要因であるとされている．流路を絞ることによって層流化が発生することは，Moretti ら[3], Tanaka ら[4]などによってすでに示されているが，一方，高温ガス炉のように強い加熱を伴う場合にも冷却材が膨張加速され層流化が発生する危険性がある．しかも，高温ガス炉では，高温を達成するために冷却材のレイノルズ数は必然的に他の炉形に比べて低く，いわゆる遷移レイノルズ数により近くなるのでその危険性はさらに大きい．加熱の程度が強い場合には，流れの加速に粘性係数の増加による冷却材レイノルズ数の低下が重畳された複雑な現象になると考えられる．一旦層流化が発生すればそれは当然熱伝達の劣化につながり，燃料棒の健全性を保つ上からははなはだ好ましくない．したがって，その発生の機構，条件などに関する詳細な知見を得ることは重要な課題となっている．

エネルギー変換工学専攻修士課程
* エネルギー変換工学専攻

従来，円管内の流れに関しては，Coon[5], McEligot[6], 小川ら[7]などが層流化発生の条件を提示しているが，実際の炉心形状である環状流路に対してはその発生条件などについて必ずしも明確にされていない．本研究は，このような状況に鑑み，環状流路内の流れを1）縮流を伴わず高熱流束加熱によって加速する場合，2）流路を絞ることによって加速を行なう場合，の双方について一連の伝熱流動実験を行ない，層流化発生の条件およびその場合の熱伝達特性に関する知見を得ることを目的としている．

## 2. 実 験 装 置

**Fig. 1** に伝熱試験部の詳細を示す．試験部は大小のステンレス製シームレス管からなる環状流路であり，その外管の内径は 40.6 mm，肉厚は 4 mm である．内管としては大小2本のステンレス製シームレス管（肉厚 3 mm で外径 21.7 mm および 27.2 mm）を用い，その内部には対流を防ぐために断熱材を詰めている．作動流体としては空気を用いた．空気は，整流筒から環状流路に入る際にトリッピングワイヤで強制的に乱流に遷移させられ，十分な長さの速度助走区間を経て加熱部に入り，混合室を経て外気へ放出される．電気抵抗値を増すために加熱部外管の肉厚を 1.2 mm まで薄肉加工したうえでこれに交流を直接通電して流れを加熱した．スペーサ類は流れを局所的に乱す恐れがあるので試験部には一切設けず，内管の固定は整流筒内部

と加熱区間下流の二箇所で行った．熱損失の軽減を図るために真空容器で加熱部を覆い，さらに容器の内壁に銀メッキを施してふく射伝熱を抑制している．加熱部の管壁温度の測定は，外管の外表面にスポット溶接した28対のクロメルーアルメル熱電対を用いて行った．これらは，加熱開始点から100 mmの位置より軸方向に100 mm間隔で左右対称に溶接されている．

流路を絞って加速をさせる実験においては，内管のみを，**Fig. 1** 中の点線で示すようなテーパを施したものと取り替えた．この際の流路は，加熱開始前までは一様断面流路（内管の外径は，10.5 mmおよび21.7 mm）で，加速開始点から250 mmまでの区間が縮流部となり，その後は再び一様断面流路（内管の外径は30.0 mm）となる．縮流部を用いる実験では，縮流区間に限って熱電対を流れの方向に20 mm間隔で取り付けた．

壁での熱流束は，区間の印加電力からふく射損失と軸方向の熱伝導損失を考慮して求め，流体の熱バランスよりバルク温度を算出した．熱伝達係数の算定に必要な外管の内壁温度は，熱伝導方程式により外壁温度から修正して求めた．

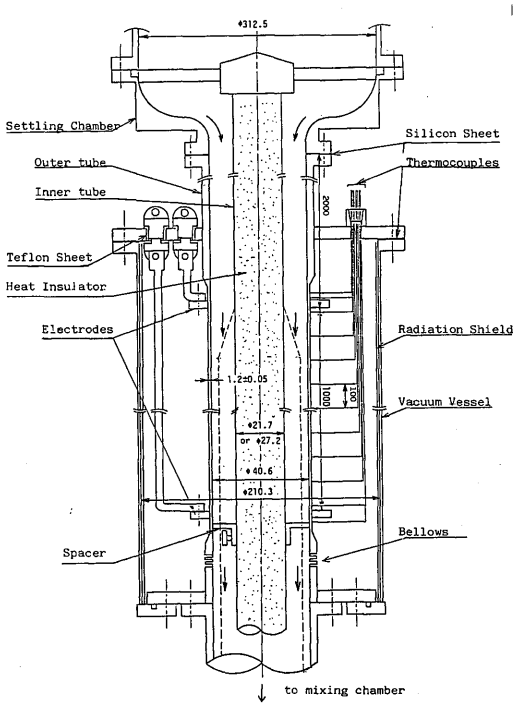


**Fig. 1**　Details of heat transfer test section

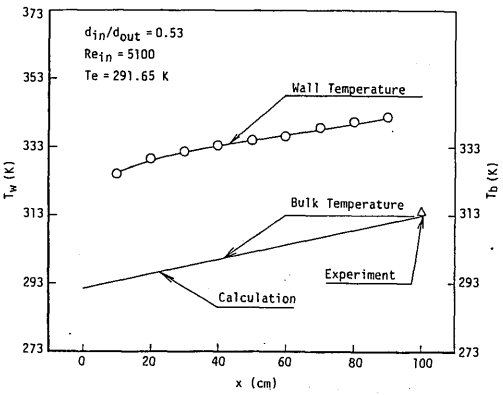


**Fig. 2**　Variation of wall and bulk temperatures along test tube.

実験を通じて，空気の入口温度は室温であり，出口温度の最大値はほぼ220℃，壁温の最大値は約500℃である．

## 3. 実験結果と考察

### 3.1. 一様断面環状流路の場合

#### 3.1.1 低熱流束加熱の熱伝達

まず，装置全体の信頼性を確認するために比較的熱流束の低い条件のもとで一連の熱伝達の測定を行った．**Fig. 2** に，印加電力から算定した流れ方向のバルク温度の計算値及び壁温の測定値の例を示している．図中右端には測定した混合室内でのガス温度を併記している．図のように，混合室内温度は計算値とよく一致しており，最大でもその差は5% 以内であったので局所のバルク温度の値は十分信頼できるものと思われる．また，図から加熱区間内で熱的に十分発達した流れが実現されていることもわかる．**Fig. 3** は熱的に十分発達した領域でのヌセルト数とレイノルズ数の関係を示したものである．乱流領域における実験値は，半径比を考慮したDalle Donneら[8]の実験式およびKaysら[9]の解析値とよく一致している．更に円管との比較のために，Dittus-Boelterの実験式

$$Nu = 0.021\, Re^{0.8} Pr^{0.4} \qquad (1)$$

を示している．測定値はレイノルズ数が3000近傍でDalle Donneら[8]の実験式から離れているが，これは

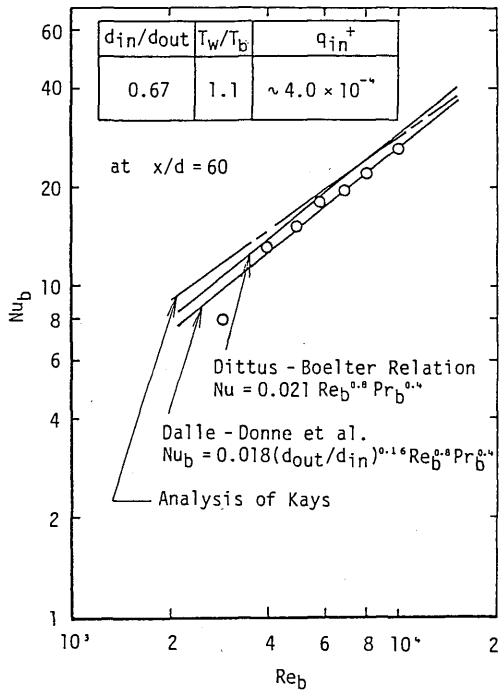


**Fig. 3** Nusselt number for lower heat flux (without channel contraction).

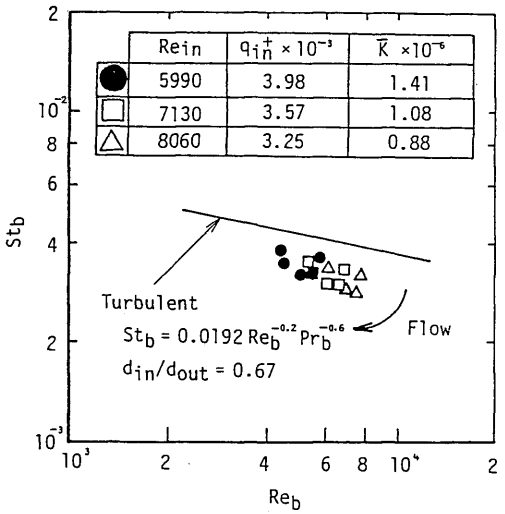


**Fig. 4** Stanton number for higher heat flux (without channel contraction).

レイノルズ数が遷移領域に達しているためと考えられ，全体として本実験装置は十分信頼できるものと思われる．

### 3.1.2. 高熱流束加熱の熱伝達

内管と外管の直径比が $d_{in}/d_{out}=0.67$ からなる試験部を用いて熱流束を高くしたときのスタントン数とバルクレイノルズ数の関係を **Fig. 4** に示す．加熱開始点近傍の実験値は，半径比を考慮した Dalle Donne ら[8] の乱流域の熱伝達相関式から急激に離れているが，加熱終了点に近づくにつれて乱流の熱伝達に回復している．一方，$d_{in}/d_{out}=0.53$ の場合の実験結果も同じような傾向を示している．Bankston [1] は，円管を用いた高熱流束加熱の実験で，レイノルズ数から判断して乱流領域と考えられるにもかかわらず層流の熱伝達特性を示す場合を層流化発生と定義している．この判断に従えば，図ではまだ層流化は起こっていないと考えられる．流路を絞ることによって流れが加速されて層流化が起こる場合，開始条件として次式で与えられる加速パラメータ $K$ を用いる整理が一般に行なわれている．

$$K=\frac{\nu}{U_m^2}\cdot\frac{dU}{dx} \tag{2}$$

Coon[5] は，円管を用いた高熱流束加熱による実験において，$K=1.8\times10^{-6}$ で層流化が発生すると報告している．この開始条件に従えば，入口レイノルズ数が $Re_{in}=4990$ の実験では層流化が発生しても不思議でないが **Fig. 4** ではそのような兆候は見られない．そこで，本実験結果を，強く加熱される円管内流の層流化開始条件として従来提唱されているものと比較してみると **Fig. 5** のようになる．すなわち，McEligot[6] らは，その条件を，入口レイノルズ数 $Re_{in}$ と入口無次元熱流束パラメータ $q_{in}^+$ を用いて図中の一点鎖線のようになるとしている．また，Coon[5] は，加速パラメータに連続の式，完全ガスの状態方程式およびエネルギバランス式を用いて，層流化開始条件を表わしている．後者のはつぎのとおりである．

$$\frac{4q_{in}^+}{Re_{in}}\cdot\frac{\mu_b}{\mu_{in}}\cdot\frac{c_{pin}}{c_{pb}}\cdot\frac{T_{in}}{T_b}=1.5\times10^{-6} \tag{3}$$

同じように，小川ら[7] も図中の実線で示す開始条件を得ている．この式は，下式で表わされる．

$$q_{in}^+=4.94\times10^{-3}Re_{in}^{0.05}\left\{1-\left(\frac{3410}{Re_{in}}\right)^{0.75}\right\} \tag{4}$$

**Fig. 5** の3つの実験点は，いずれも Coon[5], McEligot[6], および小川ら[7]の層流化開始条件のいずれかを満たしている．したがって，環状流路内の流れは円管の場合よりかなり層流化しにくく，また，流路形状の差異を度外視して $K$ のみを判断基準として用いるのは適切でないと思われる．

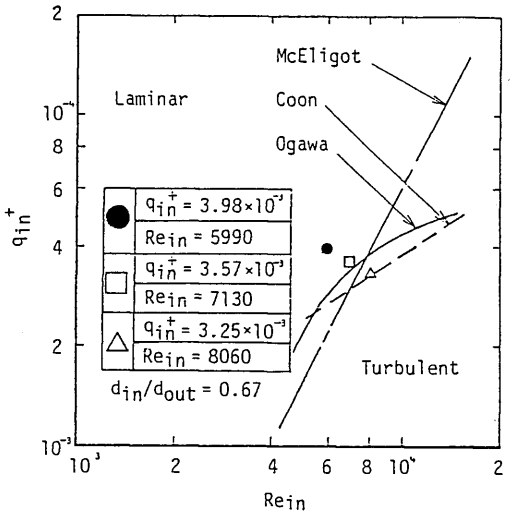


**Fig. 5** Comparison of experimntal data with proposed criteria for laminarization.

### 3.2. 縮流を伴う環状流路の場合

#### 3.2.1. 低熱流束加熱の熱伝達

縮流を伴う環状流路を用いた場合の実験結果の代表例をヌセルト数と加熱開始点からの距離との関係で **Fig. 6** に示す．この場合，加速パラメータは一定ではなく流れ方向に変化する．図中の2つの実線のうち上のものは，縮流を伴わず熱流束の比較的低い場合の実験結果（3.1.1.節）のうち，レイノルズ数と半径比が縮流後のそれと近いものを選んで示したものである．下の実線は，縮流を伴わない層流に対する Lundberg ら[10]の解析結果（ただしレイノルズ数は小さい）を示している．加速パラメータが比較的小さい場合のヌセルト数は，縮流部で一旦低下し流路断面が一様となる平行区間で，縮流終了後のレイノルズ数に相当す

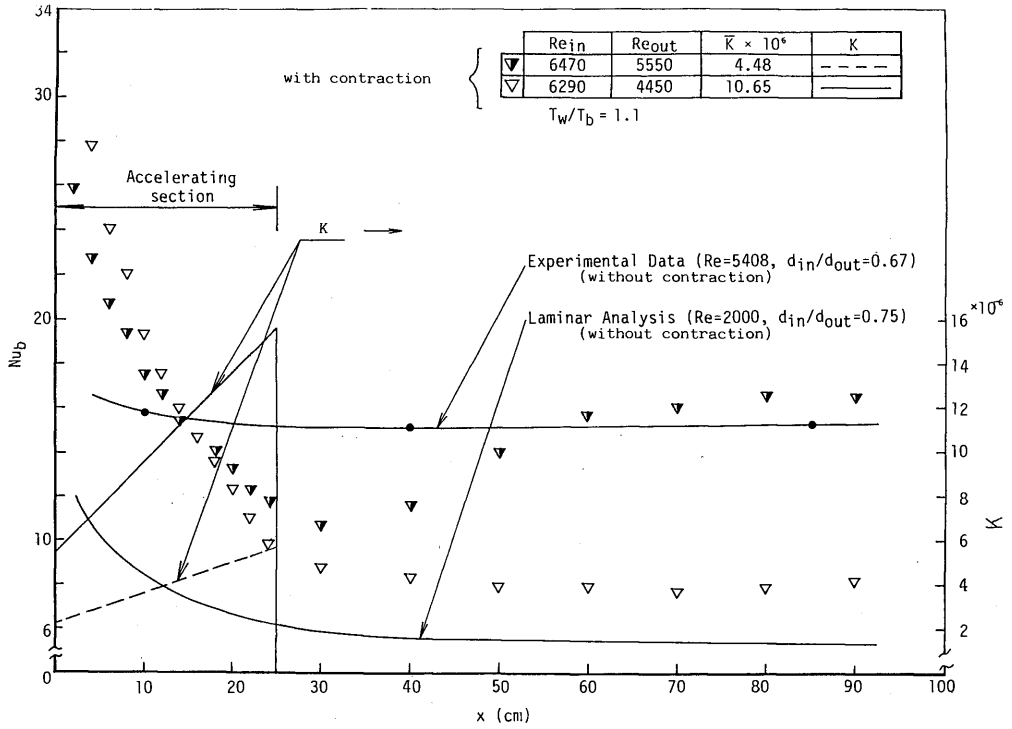


**Fig. 6** Variation of Nusselt number along test tube (with channel contraction).

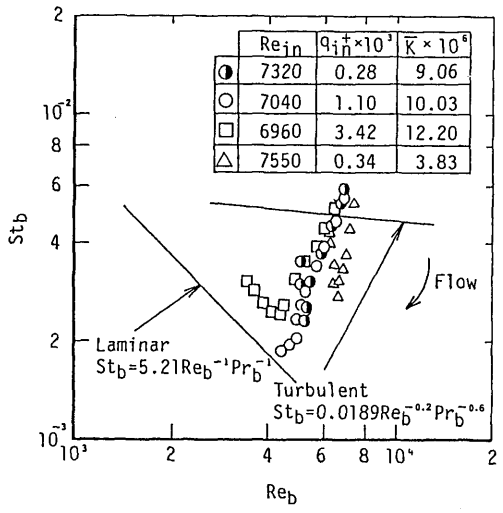


**Fig. 7** Stanton number vs. Reynolds number for higher heat flux (with channel contraction).

る値まで回復している．これに対して加速パラメータが比較的大きくなると，縮流部では前述と同様の傾向を示すが，その後の平行区間では熱伝達は回復せず，むしろ層流の熱伝達に近い特性を示している．縮流がない場合の熱伝達係数は層流乱流のどちらにおいても加熱開始点から低下して一定の値に漸近する．縮流部を用いた場合，縮流開始点近傍で熱伝達が低下するのは助走区間の影響と考えられるが，縮流終了点に近づくにつれて縮流後のレイノルズ数に相当する値に漸近することなく，一旦大きく低下している．このような熱伝達特性は Tanaka ら[4] によっても報告されている．Tanaka ら[4] の実験では二次元流路を用いて流れを加速しているので，レイノルズ数は流れ方向に一定である．しかるに，本実験装置でのレイノルズ数は，管路内で

$$Re=\frac{4\dot{m}}{\mu\pi(d_{out}+d_{in})} \tag{5}$$

のように変化する．したがって，縮流開始点でレイノルズ数が乱流領域にあっても，縮流終了点で遷移または層流領域に達する恐れは確かにあるが，図の2例での縮流終了後のレイノルズ数は十分乱流領域にあり，熱伝達の低下はレイノルズ数の変化に伴うものとは考えられない．したがって，縮流部での熱伝達挙動は層流化が発生したことに起因すると考えられる．ただし，加速パラメータは流れ方向に変化しているため，縮流部のどの位置での加速パラメータの値がヌセルト数の低下に影響しているかは明白でない．

### 3.2.2. 高熱流束加熱の熱伝達

縮流部を設け，さらに高熱流束加熱を行って流れを加速した場合のスタントン数とバルクレイノルズ数の関係を **Fig. 7** に示す．低熱流束加熱の場合 ($q_{in}^+ = 0.28\times10^{-3}, 0.33\times10^{-3}$) スタントン数は，縮流部を設けた部分で急激に低下して乱流の値から離れていくが，縮流終了後は乱流の値に回復している．これに比較して，加熱が強くなると ($q_{in}$ が大きくなる場合)，縮流終了後のスタントン数は回復せず単調に低下し，レイノルズ数から判断して乱流領域にあるにもかかわらず層流の値に近くなっている．この領域でのスタントン数の変化の様子は加熱の程度にはあまり依存しないが，それより下流でのレイノルズ数は加熱の強いときは変物性の効果により流れ方向に小さくなる．スタントン数が一旦層流領域に達した後は，このレイノルズ数の低下によってその後も層流の熱伝達特性を示している．縮流部を設けずに高熱流束加熱のみで流れを加速した前節の実験では，層流化は発生していないと判断した．さらに，この実験で流体に与えられた加熱量は，**Fig. 7** に示す実験で加えられた加熱量とほぼ同程度であることから，上述の熱伝達の低下は，強い加熱によるというよりはむしろ縮流による流れの加速に起因すると考えられる．

## 4. 結　　論

一様断面，または縮流部を持つ環状流路内の流れに対する一連の熱伝達実験を行ない，層流化開始条件に関して次のような結論を得た．

1）縮流部を設けず加熱のみで流れを加速した場合，環状流路では，円管の場合より層流化は起こりにくい．また，円管に対する層流化発生の判断基準はそのままでは環状流路に適用できず，加速パラメータのみで層流化の発生を判断するのは適切でない．

2）縮流部を用いた低熱流束加熱の実験では，縮流部出口でかなりヌセルト数が低下するので，層流化は発生していると考えられるが，その開始条件は定量的には不明確である．

3）縮流部を設け，さらに強く加熱して流れを加速した場合，スタントン数は流れ方向に急激に低下す

る．この低下は，加熱よりも縮流効果のほうが主たる要因と考えられる．

記　　号

$c_p$：定圧比熱
$d$：水力直径
$d_{in}$：環状流路の内管外直径
$d_{out}$：環状流路の外管内直径
$G$：単位面積あたりの質量流量
$h$：熱伝達係数
$K$：加速パラメータ $(=(\nu/U_m^2)(dU_m/dx))$
$k$：空気の熱伝達率
$\dot{m}$：質量流量
$Nu$：ヌセルト $(=hd/k)$
$Pr$：空気のプラントル数
$q$：熱流束
$q_{in}^+$：入口無次元熱流束パラメータ $(=q_w/(Gc_pT)_{in})$
$Re$：レイノルズ数 $(=U_md/\nu)$
$St$：スタントン数 $(=h/Gc_p)$
$T$：温度
$U$：流れの方向の速度
$x$：加熱開始点からの距離

(ギリシャ文字)

$\mu$：空気の粘性係数
$\nu$：空気の動粘性係数

(添字)

$b$：バルク
$e$：入口（温度のみ）
$in$：入口
$m$：平均（速度のみ）
$out$：出口
$p$：定圧
$w$：壁
$-$：平均

## 参 考 文 献


1) Bankston, C. A., Trans. ASME, Ser, C, 92–4 (1970), 569.
2) Patel, V. C. and Head, M. R., J. Fluid Mech., 34–2 (1968), 371.
3) Moretti, P. E., and Kays, W. M., Int. J. Head & Mass Transf., 8 (1965), 1187.
4) Tanaka, H. and Shimizu, J., Trans, ASME, Ser. C, 99 (1977), 682.
5) Coon, C. W. and Perkins, H. C., Trans, ASME, Ser. C, 92–3 (1977), 506.
6) McEligot, D. M. Coon, C. W. and Perkins, H. C., Int. J. Heat & Mass Transf., 13 (1970), 431.
7) 小川ほか３名，日本原子力学会誌，24–1 (1982), 60.
8) Dalle Donne, M. and Meerwald, E., Int. J. Heat & Mass Transf., 16 (1973), 787.
9) Kays, W. M. and Leung, E. Y., Int, J. Heat & Mass Transf., 16 (1963), 537.
10) Lundberg, R. E. McCuen, P. A. and Reynolds, W. C., Int. J. Heat & Mass Transf., 6 (1963), 495.