

環状流路内の層流化現象に関する研究：第2報 内 管加熱の場合

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/10.15017/17656>

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告．8（1），pp.51-56，1986-07-25．九州大学大学院総合理工学
研究科
バージョン：
権利関係：



環状流路内の層流化現象に関する研究 (第2報 内管加熱の場合)

鳥居 修一・清水昭比古・長谷川 修
(昭和61年3月27日 受理)

Laminarization of annular duct flow (Part 2 inner tube heating)

Shuichi TORII, Akihiko SIMIZU and Shu HASEGAWA

Experimental study was performed on convective heat transfer in annular passage in order to clarify the condition for occurrence of turbulent to laminar reverse transition. Examined Reynolds number ranged from 6000 to 10000 and nondimensional heating parameter q^+_{in} from 0.2×10^{-3} to 4.5×10^{-3} . Although most of experimental conditions in terms of nondimensional heating parameter satisfied the criteria proposed so far for circular tube flows, no definite laminarization was observed in the present study. At the region of fully developed heating, however, Nusselt number shows maximum 10% drop from the well known heat transfer correlation of variable flow properties, and rather agrees with the correlation proposed by S. Fujii et al.

1. 緒 言

高温ガス炉の層流化現象に関して、前報¹⁾では環状流路の外管を強く加熱する実験を行い各無次元パラメータの影響を検討した。その結果、これまで円管内流で層流化が発生するとされてきた入口無次元熱流束パラメータの値を環状流路内の流れで実現させても必ずしも層流化は発生しないこと、したがって環状流は円管内流に比べて層流化しにくいことが明らかとなった。前報で外管を加熱したのは試験部の製作上好都合であるというだけで環状流の層流化現象の研究上本質的なことではない。本報では、より炉心形態に近い内管加熱を採用し、前報の装置より加熱区間と加熱量を増加させた装置によって流動伝熱実験を行い、温度助走区間の影響をより軽減させて層流化発生の有無を検証するとともに、従来必ずしも十分でない環状流路の高温熱伝達に関する知見を得ることを目的とする。

2. 実 験 装 置

2.1. 装 置 の 概 要

前報では、作動流体として空気のみを使用した。本報では空気の他に窒素を使用した。九州大学高温固気混相媒体伝熱流動実験装置²⁾を単相ガスループとし

エネルギー変換工学専攻

て使用し本研究の流動装置に替えた。ガスの通常の作動圧力は約0.15 MPaである。

伝熱試験部の詳細を Fig. 1 に示す。試験部は、大小のステンレス製シームレス管 (内管外径 27.2 mm, 外管内径 39.4 mm) からなる同心二重管構造になっている。試験部全長 3200 mm のうち、上流側 1200 mm を加熱開始点で十分流体力学的に発達した状態を得るための助走区間として使用し、残りの 2000 mm で作動媒体を加熱した。助走区間ならびに加熱区間には流れを乱すようなスパーサ類は一切用いていない。

環状流路の偏心を最小限に抑制するために、外管の姿勢を鉛直から $\pm 0.1^\circ$ 以内に保ち、内管と外管の中心が一致するように精度よく作られたスパーサを整流筒内部と混合室内部に取り付けた。特に、整流筒内部のスパーサは内管上をスライドできるように取り付けられており、これによって内管の上下方向の熱膨張を吸収させた。

整流筒内部と混合室に設けられた電極を通じて内管を直接通電加熱した。内管には酸化アルミ断熱材を挿入してその内部での自然対流を抑制した。伝熱試験部全体の断熱には前報と同様に真空断熱を採用し、研磨仕上げされたステンレス製の円筒形反射板を加熱区間の外管の周囲に2枚固定してふく射熱損失を減少させた。さらに、断熱容器には外管の軸方向の熱膨張を

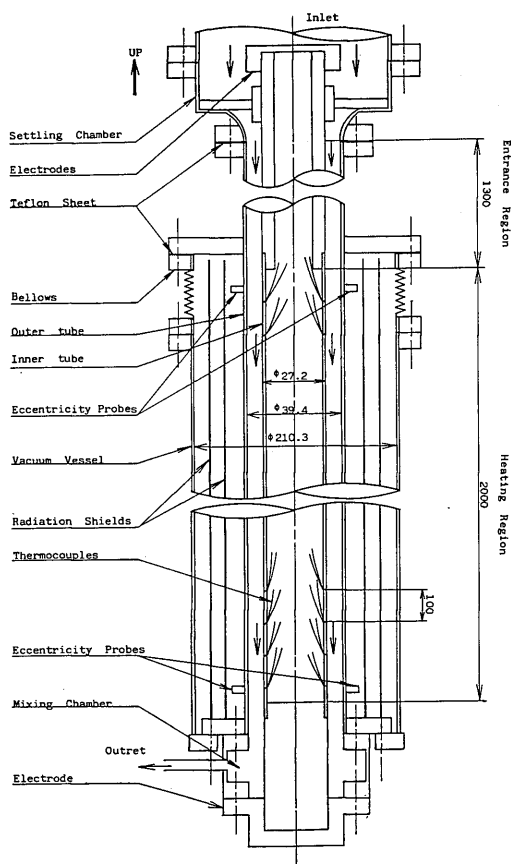


Fig. 1 Details of heat transfer test section.

吸収するためのベローズを取り付けた。

管表面の正味の熱流束は加熱区間の印加電力からふく射熱損失と流れ方向の熱伝導損失を考慮して求めた。加熱開始点での流体温度として整流筒内部の温度を用い、加熱区間の任意の位置でのバルク温度は流体の熱バランスより計算で求めた。実験を通じて、整流筒内の流体温度は常に常温、印加電力の最大値は 20000 W/m^2 、混合室温度の最大値は 350° 、壁温のそれは 600° である。

2.2. 内管の構造

内管の全長は 3200 mm 、そのうち加熱部は 2000 mm 、非加熱部は 1200 mm である。加熱部には、肉厚 1.65 mm のステンレス製シームレス管を、非加熱部には肉厚 3 mm の銅管をそれぞれ使い、両者の接合には長さ 50 mm の精度よい細目ネジを用いた。非加

熱部にも銅の抵抗に基づく多少の発熱が有るが、その発熱量は加熱部の約 100 分の 1 である。

軸方向の管壁温度分布測定を熱電対で行ったが、その取り付けは次のようにした。直径 0.65 mm のクロメル-アルメル熱電対をあらかじめ絶縁用セラミック管を通しておきこれを管の端から管内に挿入する。しかるのち、管にせん孔された 2 mm の小孔から熱電対の接点を引き抜きこれを管表面に点溶接した。その位置は、藤田ら³⁾ にならって流れ方向には 100 mm 間隔、周方向には 90° づつ回転したらせん状配置として偏心の程度をモニターできるようにした。加熱区間の両端に熱電対の取り付けと同じ方法で電圧タップを溶接してその電位差を測定した。

3. 実験結果と考察

3.1. 偏心の測定

Dalle Donne ら⁴⁾ は、環状流路を用いた熱伝達の実験で内管と外管との偏心が特に影響を及ぼすと述べている。本実験で用いた伝熱試験部はかなり長くしかも試験部にはスペーサは挿入されていないので、内管が弓状になる恐れは十分考えられる。藤井ら⁵⁾ は、偏心量を測定するために、偏心ゲージ挿入孔を加熱部中心の周方向に 3 ヶ所設けている。しかしながら本実験では、装置の構造上藤井らの測定手法は採用できないので、藤田らにならって前述のように配置した熱電対の指示値をプロットしてその分布がなめらかな平均曲線の 1% 以内に収まっていれば偏心がないとした。

Fig. 2 に流れ方向の壁温分布を示す。図中の上部のグ

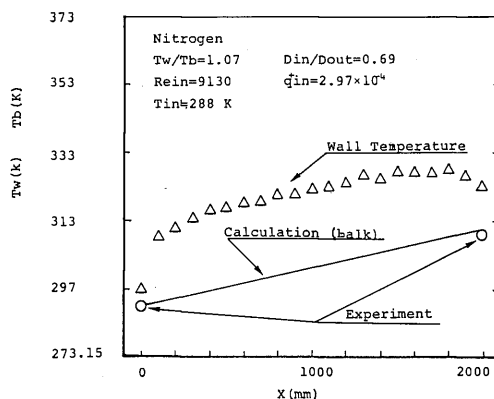


Fig. 2 Variation of wall and bulk temperature along test tube.

ラフによれば壁温分布は平均曲線の数%以内に収まって規則的なうねりが現れていないことから偏心はほとんどないと考えられる。低熱流束から高熱流束加熱までの実験を通じて、壁温分布は図中と同じような傾向を示していた。

3.2. 低熱流束加熱の熱伝達

装置全体の信頼性を確認するために変物性の影響の少ない、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。

まず、流れ方向の局所熱伝達係数の算定に際してバルク温度の評価が重要である。Fig. 2の下部に、流体の熱バランス式から求めた流れ方向のバルク温度の計算値の例を示している。同図中両端には測定した整流筒内および混合室内のガス温度を併記している。図に示すように混合室内温度と計算値はよく一致しており、最大でその差は5%以内であった。この差は、熱流束の程度にかかわらず常に一定値を越えることはなかった。したがって、バルク温度の計算値は十分信頼できるものと判断した。いずれの実験結果においても、局所熱伝達係数は加熱助走区間の影響で流れ方向に徐々に低下するが、加熱開始点から約 $X/d=50$ 以上では一定値に近づく傾向を示したので $X/d \geq 50$ を熱的に発達した領域と判断した。Fig. 3に熱的に十分発達し

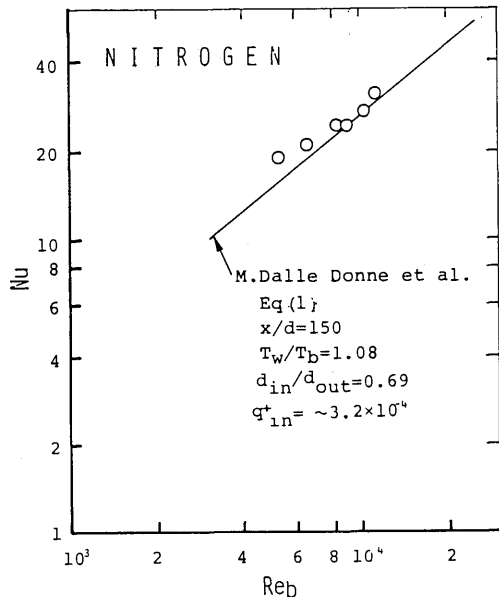


Fig. 3 Nusselt number for lower heat flux.

た領域でのヌセルト数とレイノルズ数の関係を示す。乱流領域での実験値は、半径比を考慮した Dalle Donne らの実験式

$$Nu_b = 0.018 \left(\frac{D_{out}}{D_{in}} \right)^{0.16} Re_b^{0.8} Pr_b^{0.4} \quad (1)$$

とはほぼ一致しており、本実験装置は十分信頼できるものと判断した。

3.3. 高熱流束加熱の熱伝達

幾つかの無次元熱流束の値に対して、ヌセルト数とバルクレイノルズ数の関係を Fig. 4に示す。入口無

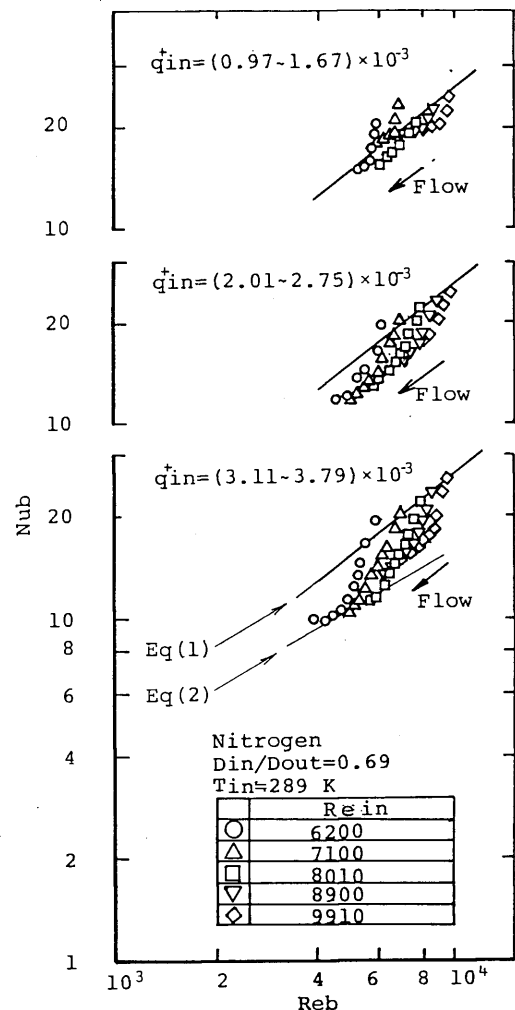


Fig. 4 Variation of Nusselt number along test tube for several heat fluxes.

次元熱流束パラメータ q_m^+ が $(0.97 \sim 1.67) \times 10^{-3}$ の範囲では、いずれの実験結果も加熱開始点近傍で半径比を考慮した Dalle Donne らの乱流域の熱伝達相関式から離れてはいるが、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。 $q_m^+ = (2.01 \sim 2.75) \times 10^{-3}$ では前述のように加熱開始点近傍で相関式から離れ、下流に進むに従ってある傾きを持つ相関式に落ち着く傾向が見られる。さらに、 $q_m^+ = (3.11 \sim 3.79) \times 10^{-3}$ 程度に熱流束を大きくしていくと、実験点は下流に向かって単調に減少して前述の結果よりも傾きの小さい相関式に漸近していく。このような傾向は藤井らの実験でも現れている。彼らは、 q_m^+ の増加とともに Nu_b は低下するが、 $q_m^+ = (7 \sim 10) \times 10^{-3}$ 以上では q_m^+ をそれ以上大きくしても Nu_b は低下せず下式で表される相関式に落ち着く、と報告している。

$$Nu_b = 0.04 Re_b^{2/3} Pr_b^{1/4} \quad (2)$$

図のように実験点を式 (2) と比較してみると、加熱量が $q_m^+ = (3.11 \sim 3.79) \times 10^{-3}$ と藤井らの実験に比べて小さくても、実験結果はほぼ式 (2) の熱伝達相関式に漸近するようである。Dalle Donne らは、半径比と物性値の温度依存性を考慮した熱伝達相関式として次式を提唱している。

$$Nu_b = 0.018 \left(\frac{D_{out}}{D_{in}} \right)^{0.16} Re_b^{2/3} Pr_b^{1/4} \left(\frac{T_w}{T_{in}} \right)^{-0.2} \quad (3)$$

$q_m^+ \geq 3.11 \times 10^{-3}$ 以上の実験データを、上式に従って Fig. 5 に再整理した。加熱開始点近傍の実験値は、温度助走区間の影響によって急激に低下し、加熱終了点に近づくにつれて式 (3) に漸近している。しかし実験点の変化を子細に見ると、入口レイノルズ数が $Re_{in} = 5930$ の場合を除いて下流域でのヌセルト数は式 (3) に比べて約 10% 低い。この低下は実験誤差であることも考えられるが、 q_m^+ が約 2×10^{-3} 程度ではいずれのヌセルト数も下流域では式 (3) の線上に位置していることから、Fig. 5 の熱伝達結果は十分信頼できるものと思われる。森ら⁶⁾ は、乱流領域で直円管を加熱した場合の下流域でのヌセルト数が、助走区間と非等温流での物性値の温度依存性を考慮した熱伝達相関式から 10% 以上ずれるものとそうでないものに分類して層流化の発生限界を判定している。この判定法が仮に環状流にも適用できるとすれば Fig. 5 の

結果は層流化の兆候を示したものであると考えられる Bankston⁷⁾ は、円管を用いた高熱流束加熱の実験を行い、スタントン数とバルクレイノルズ数の関係から層流化の発生限界を報告している。彼は、バルク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、スタントン数が層流の値を示すことから層流化の発生を判断した。同じ実験データをこの方法に基づいて Fig. 6 に整理してみた。加熱開始点近傍の実験

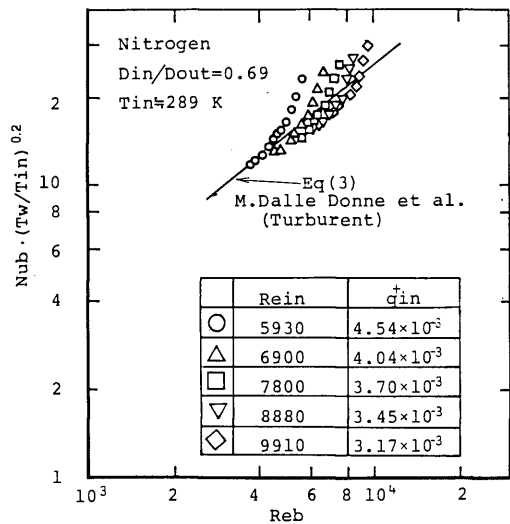


Fig. 5 Corrected Nusselt number for higher heat flux.

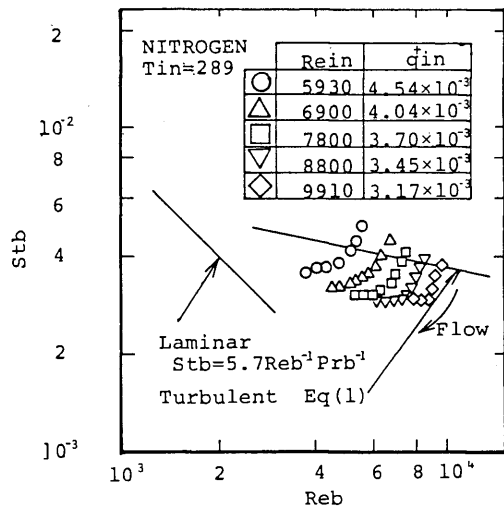


Fig. 6 Stanton number for higher heat flux.

値は式(2)の熱伝達相関式から急激に離れるが、円管の場合のように下流域で層流値へ向かって急激に減少するような兆候はない。さらに前報で示された熱伝達の回復は見られず、乱流と層流の中間的な値をとりながら加熱終了点へ近づく傾向にある。Bankstonの判断に従えば層流化は発生していないことになるが、前報の結果と比較すれば相関式からの低下の程度はかなり大きい。そこで、円管に対して従来提唱されている層流化開始条件と本実験の結果とをFig. 7に併記してみる。図中の3つの実線は、それぞれ Coon⁸⁾、小川ら⁹⁾、および McEligot¹⁰⁾の条件である。すなわち、McEligot は実験結果を層流域、遷移域、乱流域に分類して図中の実線で示している。Coon 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ーバランス式を用いて下式に示すような条件を得ている。

$$\frac{4q_m^+}{Re_{in}} \frac{\mu_b}{\mu_{in}} \frac{c_{p_{in}}}{c_{p_b}} \frac{T_{in}}{T_b} = 1.5 \times 10^{-6} \quad (4)$$

同様に、小川らも次式で表される開始条件を提唱している。

$$q_m^+ = 4.94 \times 10^{-3} Re_{in}^{0.05} \left\{ 1 - \left(\frac{3140}{Re_{in}} \right)^{0.75} \right\} \quad (5)$$

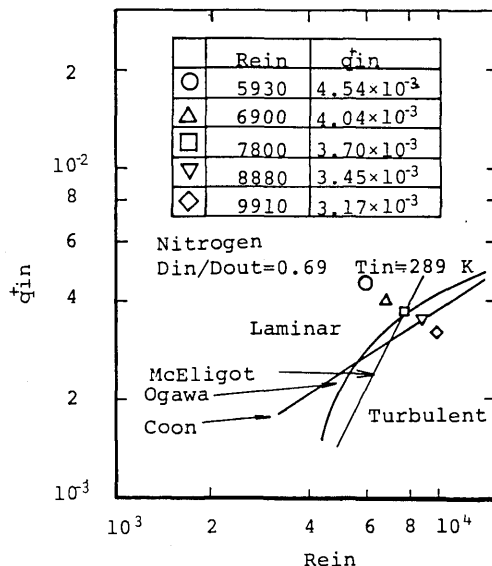


Fig. 7 Comparison of experimental data with proposed criteria for laminarization.

図中の実験点は、 $Re_{in} = 9910$ の実験結果を除いて McEligot, 小川ら, Coon 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、前報と同じく円管の層流化開始条件で環状流路の層流化を予測するのは適切でなく、環状流路内の流れは円管の場合に比べてかなり層流化しにくいと思われる。一方 Fig. 5 のヌセルト数は物性値の温度依存性を考慮しても相関式より約 10% 低下しており、さらに Fig. 6 では下流域で実験点が乱流域と層流域の中間に位置している。したがって、熱伝達の挙動は顕著な層流化の傾向を示してはいないものの乱流の全般的な構造は等温流のそれに比べて何らかの変化を被っている可能性はある。しかしこの点については、熱線風速計等を流路内に挿入して直接流れを測定する方法によらなければはっきりと結論づけることはできず、さらに詳細な検討が必要と思われる。

4. 結 論

環状流路の内管を強く加熱した熱伝達実験を行い、層流化開始条件に関して次のような結論を得た。

1. $q_m^+ = 4.5 \times 10^{-3}$ まで加熱したが、はっきりした層流化は見られず、環状流路では円管の場合より層流化は発生しにくい。さらに、円管に対する層流化開始条件はそのままでは環状流路に適用できない。
2. 加熱量を増加させても q_m^+ が約 3×10^{-3} 以上では、ヌセルト数は単調に低下し続けるのではなく、ある傾きを持つ相関式に漸近する傾向が認められる。

記 号

- c : 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 : 単位面積当たりの質量流量
- h : 熱伝達係数
- k : 窒素ガスの熱伝導率
- Nu : ヌセルト数 ($=hd/k$)
- Pr : 窒素ガスのプラントル数
- q : 熱流束
- q_m^+ : 入口無次元熱流束パラメータ
($=q_w/(Gc_p T_{in})$)
- Re : レイノルズ数 ($=U_m d/\nu$)
- St : スタントン数 ($=h/Gc_p$)

T : 温度

U : 流れ方向の速度

X : 加熱開始点からの距離

(ギリシャ文字)

μ : 窒素ガスの粘性係数

ν : 窒素ガスの動粘性係数

(添字)

b : バルク

in : 入口

m : 平均

out : 出口

p : 定圧

w : 壁

参 考 文 献

- 1) 鳥居ほか2名, 総理工報告, 7-1 (1985), 69.
- 2) 金丸ら, 高温学会誌, 7-4 (1981), 156.
- 3) 藤田恭伸, 長谷川修, 機械学会論文集B編, 35-277 (1969), 1920.
- 4) Dalle Donne, M and Meerwald, E, Int. J. Heat and Mass Transf., 16 (1973), 787.
- 5) 藤井ほか3名, 第17回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1980), 97.
- 6) 森康夫, 渡辺健次, 機械学会論文集B編, 45-397 (1979), 1343.
- 7) Bankston, C. A., Trans. ASME, Ser. C, 92-4 (1970), 569.
- 8) Coon, C. W and Perkins, H. C., Trans. ASME, Ser. C, 92-3 (1977), 506.
- 9) 小川ほか3名, 日本原子力学会誌, 24-1 (1982), 60.
- 10) McEligot, D. M. et al., Int. J. Heat and Mass Transf., 13 (1970), 431.