

高熱流束加熱による環状流路内の熱伝達*

鳥居修一,** 清水昭比古**
長谷川修,*** 草間伸行****

Convective Heat Transfer in Annular Passage with High Heat Flux

Shuichi TORII, Akihiko SHIMIZU,
Shu HASEGAWA, and Nobuyuki KUSAMA

An experimental study was performed on convective heat transfer of concentric annular gas flow with the inner tube heated. The examined region of the Reynolds number ranged from 6 000 to 10 000 and that of the dimensionless heat flux parameter from 0.2×10^{-3} to 5.5×10^{-3} . Special attention was paid to the examination of the existing correlations for high heat flux heat transfer and also to the criteria for the occurrence of so-called laminarization of the annular flow. No laminarization was detected even for the highest heat flux case although they satisfied the proposed criteria for the occurrence of laminarization for the circular tube flows. It is anticipated, therefore, that the annular flow is less vulnerable to laminarization than is the circular tube flow. Experimental results also show that as the exponent of (T_w/T_m) it is recommended to use 0.38 instead of 0.20 or 0.31, which were proposed by the former authors for heat transfer with variable properties.

Key Words: Convective Heat Transfer, Annular Flow, Variable Property, High Heat Flux, Laminarization

1. 緒 言

高温ガス炉冷却材のヘリウムやロケットエンジン冷却用の水素ガスの流れは非常に大きな熱流束で加熱される。この場合の熱伝達の整理相関式には周知のように物性値の温度依存性を考慮したものが使用されるが、円管内の流れに関してはそれらはかなりの程度まで整備されており、例えば Kays⁽¹⁾, McEligot ら⁽²⁾の研究が挙げられる。一方、高温ガス炉の炉心内での流動形態として重要な同心二重円管の場合には、例えば Dalle Donne ら⁽³⁾が実験的に求めた相関式や Malik ら⁽⁴⁾の数値計算によるものなどがあるが、それらは必ずしも十分とは言えない。また、円管内の流れを強く加熱した場合には、作動媒体が急激な熱膨張による加速を受ける結果いわゆる層流化現象の発生することが報告されているが、環状流路に対する層流化現象の研究は比較的少ない。さらに従来提唱されている環状流路に対する相関式は、乱流領域でもかなり高いレイノ

ルズ数領域のものであり、レイノルズ数が比較的低い領域での信頼性は十分とはいえない。このような状況にかんがみ、本研究では環状流路の内管をかなり高温にまで加熱して層流化の有無を検証するとともに、その場合の熱伝達相関式を得ることを目的としている。結果的には、本研究で用いた実験装置では明確な層流化現象をとらえることはできなかったが、従来提唱されてきた高熱流束加熱での熱伝達相関式の当否に関する幾つかの有用な知見を得ることができたのでここに報告する。

2. 記 号

 c_p : 定圧比熱 d : 水力直径 $= D_{out} - D_{in}$ D_{in} : 環状流路の内管の外径 D_{out} : 環状流路の外管の内径 G : 単位面積当たりの質量流量 h : 熱伝達係数 K : 加速パラメータ N_u : ヌセルト数 $= hd/\lambda$ Pr : プラントル数 $= c_p \mu / \lambda$ q : 熱流束 q_{in}^* : 入口無次元熱流束パラメータ

* 昭和61年11月18日, 第940回講演会において講演, 原稿受付 昭和61年5月13日.

** 正員, 九州大学大学院総合理工学研究科 (〒816 春日市春日公園6-1).

*** 正員, 九州大学工学部 (〒815 福岡市東区箱崎6-10-1).

**** 九州大学大学院.

$$= q_w / (G c_p T)_{in}$$

$$Re: \text{レイノルズ数} = Gd/\mu$$

$$St: \text{スタントン数} = h/c_p G$$

T : 温度

x : 加熱開始点からの距離

λ : 熱伝導率

μ : 粘性係数

添字

b : バルク

in: 入口

w: 壁

3. 実験装置の概要

本研究の作動媒体には窒素ガスを用いた。ガス流動装置には、九州大学高温固気混相媒体伝熱流動実験装置⁽⁶⁾を単相ループとして使用し、これに図1に示す環状流路からなる伝熱試験部を取付けた。これは、外管内径 39.4 mm、内管外径 27.2 mm の 2 本のステンレス製シームレス管からなる環状流路構造であり、これを鉛直方向に設置して作動ガスを上方から下方へ流動させた。整流筒に引き続く試験部全長は 3 200 mm で、そのうち上流側 1 200 mm を流体力学的に十分発達した流れを得るための助走区間として使用し、残りの 2 000 mm で窒素ガスを加熱した。軸方向にほぼ一様の熱流束分布を得るために整流筒内部と混合室内部の電極を通じて内管を直接通電加熱した。このように、非加熱部を含む内管の両端に加熱用電極を取付けたので、速度助走区間(非加熱部)における内管の発熱を最小限に抑えるためにこの部分には肉厚 3 mm の銅管を用い、長さ 50 mm の精度よい細目ねじを使用して銅管と加熱部のステンレス管を接合させた。このようにしても助走区間に多少の発熱が残るが、それは加熱部の約 100 分の 1 程度である。さらに、内管の内部に酸化アルミニウム断熱材を充てんして自然対流を防いだ。流路内で余分な乱れが発生しないように試験部の流路には偏心防止用のスペーサは設けず、内管の固定は整流筒内部のスペーサと試験部下流の混合室内の 2 箇所で行った。とくに、整流筒内部のスペーサは内管上をスライドできるようにして内管の上下方向の熱膨張を吸収させた。加熱部全体の断熱には真空断熱法を採用し、真空容器の内部に研磨仕上げされたステンレス製の円筒形反射板を 2 枚固定してふく射熱損失の軽減を図った。さらに真空容器にはベローズを取付けて外管の熱膨張を吸収させた。

軸方向の管壁温度分布の測定には直径 0.65 mm のクロメル-アルメル熱電対を用いた。その取付けは、あ

らかじめセラミック管に通した熱電対を管の端から管内に挿入し、管にあけた 2 mm の穴から熱電対の接点を引き抜き管表面に点溶接した。その位置は、偏心の程度も把握できるように下流に向かって 100 mm 間隔、周方向に 90° ずつ回転したらせん状になっている。

加熱区間の両端に取付けられた電圧タップから印加電力を求め、ふく射熱損失と流れ方向の熱伝導を考慮して管表面の正味の熱流束を算定した。加熱開始点での流体温度としては整流筒内部での測定値を用い、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部の流体温度は常に常温であり、印加電力は入口無次元熱流束パラメータで $q_{in}^* = 5.5 \times 10^{-3}$ まで、さらに入口レイノルズ数は 6 000 から 10 000 の範囲とした。

4. 実験結果と考察

4.1 偏心の検出 環状流路を用いた熱伝達の実験では、内管の偏心が特に重要である。本実験で用い

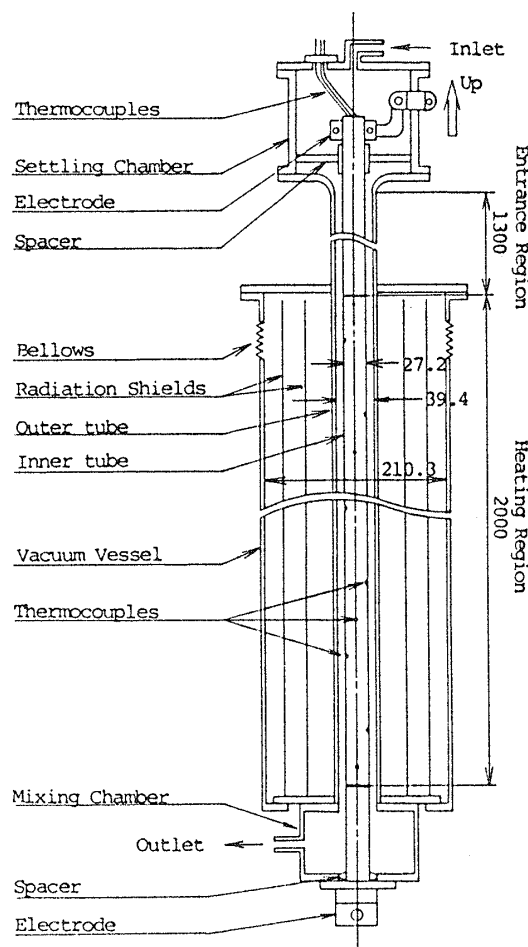


図1 伝熱試験部詳細図

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一切用いていないので内管が弓状になる恐れは十分に考えられる。例えば藤井ら⁽⁶⁾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箇所設けて偏心の軽減に努めている。しかしながら、本実験では装置の構造上藤井らの測定方法が採用できなかったため、藤田ら⁽⁷⁾にならって内管にらせん状に取付けた熱電対の測定値が軸方向になめらかな曲線を描いていれば偏心がないとした。図2にその一例を示す。図2中にある壁温の測定値の分布は平均曲線の数%以内に収まっており、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。かなり加熱量が増加しても壁温分布は同じような傾向を示していた。

4・2 低熱流束加熱の結果 装置の全般的な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小さい条件のもとで一連の熱伝達の実験を行った。まず流れ方向の局所熱伝達係数を算定するに際して、バルク温度の評価が重要である。図2の下部に流体の熱バランス式より求めた流れ方向のバルク温度の計算値の一例を示している。図2の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。混合室内温度と計算値とはよく一致しており、一連の実験を通じてその誤差は最大で5%以内であった。したがってバルク温度の計算値は十分に信頼できるものと判断した。いずれの測定でも、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し加熱開始点から $x/d=50$ 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。この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図3に示す。Dalle Donne は、環状流

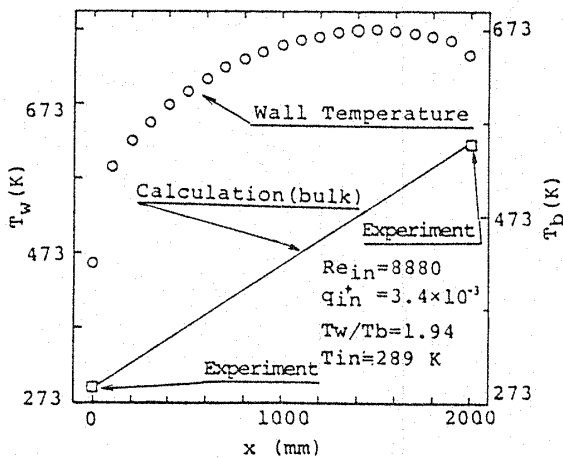


図2 流れ方向のバルク温度および壁温の分布

路を用いた熱伝達の実験結果を整理して、半径比と物性値の温度依存性を考慮した乱流領域での熱伝達相関式として次式を提唱している。

$$Nu_b = 0.018 \left(\frac{D_{out}}{D_{in}} \right)^{0.16} R_{e,b}^{0.8} P_r^{0.4} \left(\frac{T_w}{T_{in}} \right)^{-0.2} \dots (1)$$

図3中の実線は式(1)で $(T_w/T_{in})=1$ としたものを示している。実験点は相関式とよく一致していることから本実験装置による測定は十分に信頼できるものと判断した。

4・3 高熱流束加熱の結果 熱流束を徐々に大きくした時のヌセルト数とバルクレイノルズ数の関係を図4に示す。この場合、レイノルズ数は加熱開始後の温度変化に伴って入口の値 ($R_{e,in}$) から次第に低下する。入口無次元熱流束パラメータ q_{in}^+ が 0.75×10^{-3} と比較的小さい場合では、いずれの実験結果においても、ヌセルト数はレイノルズ数が低下する下流に向かってほぼ式(1)にそって変化している。これに対して、 $q_{in}^+ = 2.01 \times 10^{-3}$ の実験点は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 $q_{in}^+ = 3.79 \times 10^{-3}$ 程度に加熱量を増すと、実験点は下流に向かって単調に減少し、上の場合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。藤井らは、ヌセルト数は q_{in}^+ の増加とともに低下するものの、 $q_{in}^+ = (7 \sim 10) \times 10^{-3}$ 上になると加熱量をそれ以上大きくしてもヌセルト数は低下せずにある傾きを持つ相関式に漸近する傾向があると報告している。これは式(2)で表される。

$$Nu_b = 0.04 R_{e,b}^{2/3} P_r^{0.4} \dots (2)$$

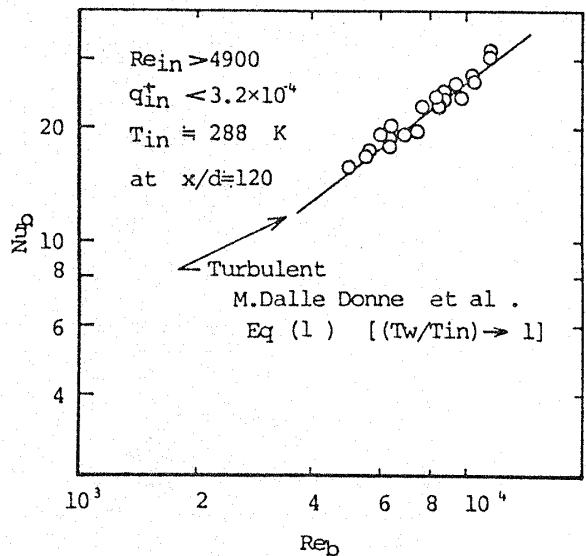


図3 低熱流束加熱におけるヌセルト数

式(2)を一点鎖線で図に示してみると、加熱量が $q_{in}^+ = 3.79 \times 10^{-3}$ と藤井らの実験に比べて小さいにもかかわらず実験点はほぼ式(2)の熱伝達相関式に漸近している。このような傾向は実験で行った $q_{in}^+ \geq 3.79 \times 10^{-3}$ のいずれの場合にも見られた。 $q_{in}^+ = 3.79 \times 10^{-3}$ の結果は変物性の影響をかなり受けていると考えられるので、 q_{in}^+ がこの値に近い幾つかの実験結果を式(1)に従って図5に再整理した。加熱開始点近傍の実験点は温度助走区間の影響によって急激に低下するが、下流域ではほぼ式(1)で整理できる。しかし実験点を子細に見ると、いずれの結果も下流域で式(1)の相関式に比べて10%程度低下している。このような低下は $q_{in}^+ \geq 3.79 \times 10^{-3}$ の結果においても現れている。このような相違の原因として、流れの構造が等温流のそれに比べて何らかの変化を被った場合と相関式そのものに問題がある場合の双方が考えられる。

4.4 円管の層流化開始条件との比較 森ら⁽⁸⁾は、乱流域で直円管を強く加熱した場合、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%以上ずれているものとそうでないものとに分類して層流化発生の有無を判定している。この判定法が仮に環状流にも適用できるものとするれば、図5に見られるヌセルト数の低下は層流化発生の可能性を示唆していると考えられる。そこで、従来円管の層流化発生の判定法として入口レイノルズ数と入口無次元熱流束パラメータによる整理が用いられているので、これを、式(1)と10%程度のずれを生ずるすべての実験データに適用して図6にまとめた。図6中には、Coonら⁽⁹⁾、小川ら⁽¹⁰⁾、McEligotら⁽¹¹⁾がそれぞれ提唱した層流化開始条件を併記している。実験結果はすべて円管の層流化開始条件のいずれかを満足している。一方、現在まで環状流路における層流化開始条件は報告されていないが、McEligotが円管の場合に提唱している層流化の条件式を環状流路の場合について変形してみると次式のようなになる。

$$K \cong \frac{4q_{in}^+}{Re_{in}} \left(1 + 4q_{in}^+ \frac{X}{d}\right)^{-0.43} \left(\frac{D_{in}}{D_{out} + D_{in}}\right) \dots\dots (3)$$

ただし原論文では上式の括弧の指数としてヘリウムおよび空気について報告されているだけなので、ここでは実験で用いた作動ガスにちかい空気のものを用いた。藤井らにならって、Coonの報告した円管の層流化

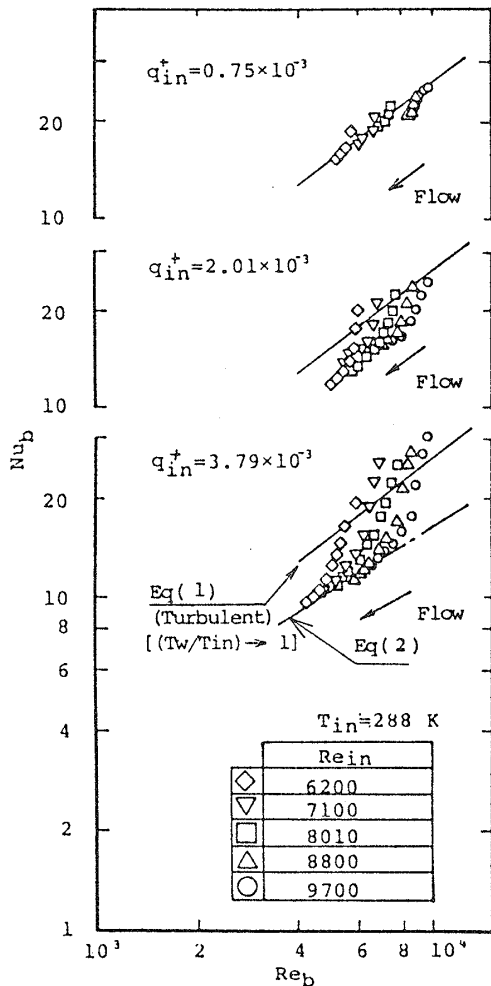


図4 高熱流束加熱におけるヌセルト数の変化

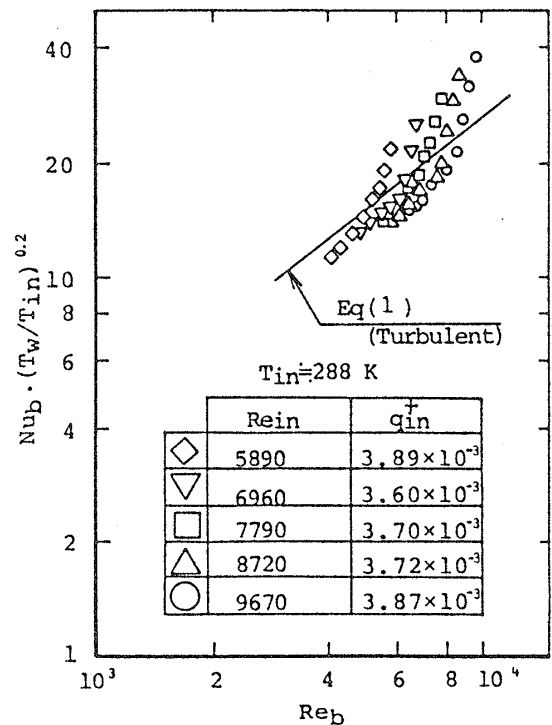


図5 変物性の影響を考慮したヌセルト数

開始条件 $K=1.5 \times 10^{-6}$ と、式(3)とを用いて求めた環状管路の層流化開始条件を図6中に実線で示す。環状管路における層流化開始の限界として実線が仮に正しいものとするれば、図6中の結果は層流化の起こっていないことを意味する。さらに、藤井らは実線の開始条件を満足している結果でも管路に熱線風速計を挿入してみると乱れが存在すると報告していること、および本実験での入口無次元熱流束パラメータは藤井らの実験よりも幾分小さいことから、図6中の実験点では層流化は発生していないものと考えられる。したがって、環状管路における層流化の発生の有無を判断するものとして、従来提唱されている円管の層流化開始条件や森らの方法をそのまま適用するのは不十分であり、藤井らの報告と同様に環状管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。

4.5 変物性の効果 4.4節で層流化が発生している可能性はうすいことが明らかになったので、次に変物性の影響を考慮した Dalle Donne らの熱伝達相関式について検討する。図7は、式(1)を導出する際に Dalle Donne が行った手法で一連の熱伝達実験の結果を整理したものである。図7中に示されている実験点は、加熱開始点から四つの異なる無次元距離における測定値であり、図中の点線は式(1)に本実験装置の半径比を代入したものである。一点鎖線は、物性値の温度依存性を考慮した Malik らの数値計算の結果を示している。ただし数値計算で用いた半径比は本実験装置のそれと異なっているため温度比の指数のみを示している。実線は、 $q_{in}^+ = (0.97 \sim 5.29) \times 10^{-3}$ の範囲で行った結果を整理したものである。これによれば、

実験で得られた温度比の指数はいずれの指数よりもかなり大きい。Dalle Donne の行った実験は乱流領域でも比較的高いレイノルズ数で行われていることから、レイノルズ数が比較的低い場合には、同じ温度比に対して得られた結果でも温度比の指数の相違が現れたと思われる。このような点から、乱流領域でもレイノルズ数が比較的低ければ、変物性の効果として $(T_w/T_{in})^{-0.2}$ よりも $(T_w/T_{in})^{-0.38}$ を用いるほうが適切であると思われる。ただし、 $T_w/T_{in} \rightarrow 1$ のときの $Nu_{es}/(R_{es}^{0.8} P_{es}^{0.4})$ の値は図3に見たように式(1)でよく表せるが、式(1)の形に固執して温度比の指数のみを -0.2 から -0.38 に替えただけでは、図7からわかるように $T_w/T_{in} = 1$ における値は一致しないことになる。したがって、実験結果を下式で近似する。

$$1 \leq T_w/T_{in} \leq 1.3$$

$$Nu_{es} = 0.018 \left(\frac{D_{out}}{D_{in}} \right)^{0.16} R_{es}^{0.8} P_{es}^{0.4} \dots\dots\dots (4)$$

$$1.3 \leq T_w/T_{in}$$

$$Nu_{es} = 0.020 \left(\frac{D_{out}}{D_{in}} \right)^{0.16} R_{es}^{0.8} P_{es}^{0.4} \left(\frac{T_w}{T_{in}} \right)^{-0.38} \dots\dots (5)$$

5. 結 論

レイノルズ数の比較的低い乱流領域において環状管路の内管を強く加熱した伝熱実験を行い、次のような知見を得た。

(1) 予冷を行わずに $q_{in} = 5.5 \times 10^{-3}$ まで加熱したが、明確な層流化現象は見られず、円管内流に対する

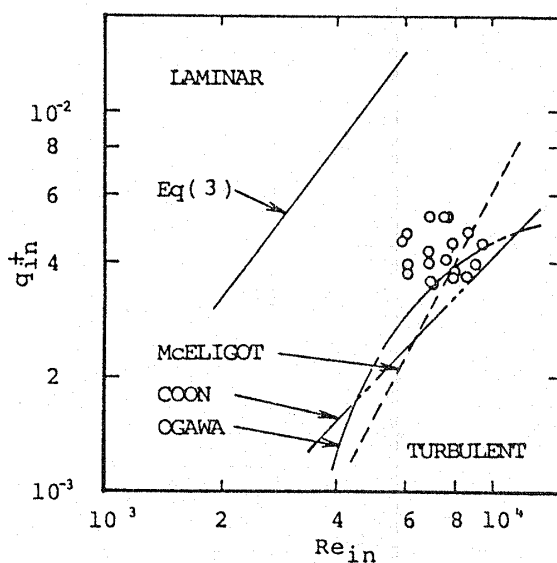


図6 円管の層流化開始条件との比較

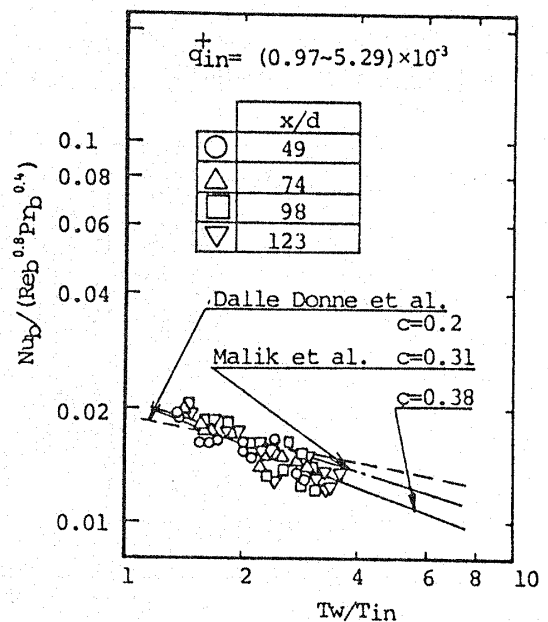


図7 整理式における温度比の指数の比較

層流化開始条件はそのままでは環状流路には適用できない。

(2) $q_{in} = 3.8 \times 10^{-3}$ 以上まで加熱量を増加させた場合、ヌセルト数は単調に減少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。

(3) 従来物性値の温度依存性を考慮するものとして温度比 $(T_w/T_{in})^{-0.2}$ を用いているが、比較的低いレイノルズ数では $(T_w/T_{in})^{-0.38}$ を用いるとより正確な整理ができ、その相関式は式(4)および式(5)で表される。

文 献

(1) Kays, W.M., *Convective Heat and Mass Transfer*,

(1966), 256, McGraw-Hill New York.
 (2) McEligot, D. M., ほか2名, *Trans. ASME, Ser. C*, 87-1 (1965), 67.
 (3) Dalle Donne, M. Meerwald, E., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 16-4 (1973), 787.
 (4) Malik, M. R. and Pletcher, R. H., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 103-2 (1981), 146.
 (5) 金丸・ほか3名, 高温学会誌, 6-1 (昭50), 25.
 (6) 藤井・ほか3名, 日本伝熱シンポジウム講演論文集, (昭50), 97.
 (7) 藤田・長谷川, 機論, 35-277 (昭44), 1920.
 (8) 森・渡辺, 機論, 45-397,B (昭54), 1343.
 (9) Coon, C. W. and Perkins, H. C., *Trans. ASME, Ser. C*, 92-3 (1970), 506.
 (10) 小川・ほか3名, 日本原子力学会誌, 24-1 (昭52), 60.
 (11) McEligot, D. M., ほか2名, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 13-2 (1970), 431.

討 論

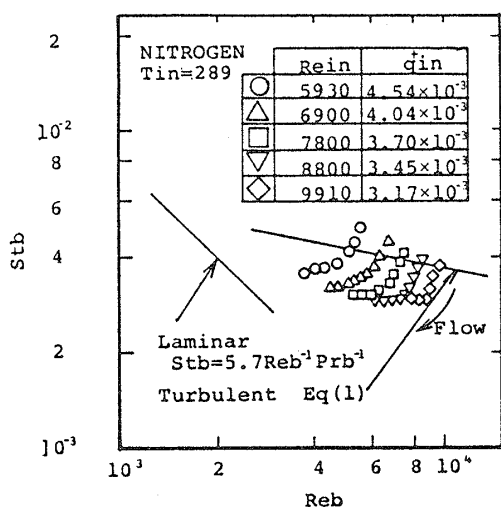
〔質問〕 越後亮三〔東京工業大学工学部〕

(1) 環状流の場合、円管との比較で層流化の条件が異なることを説明するために同一断面内での部分的層流域が共存することを推察しようような実験結果が貴研究で得られているか。

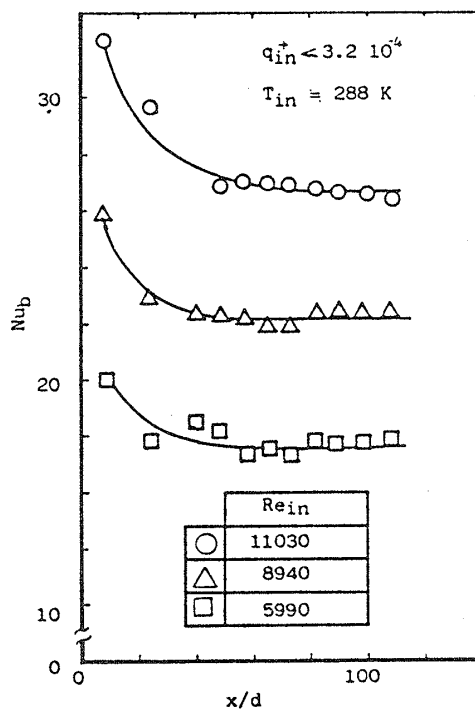
(2) 高熱負荷の実験における壁温分布(図2)で出口付近の温度が低下しているが、熱的に発達した条件と相当に矛盾すると思われるがいかかか。

〔回答〕 (1) 付図1は本研究のデータの一部をスタントン数を用いて整理したものであり、入口無次元熱流束パラメータ q_{in}^+ の値は本文図4の下のものにほぼ対応する。本研究では乱流量の局所測定を行っていないので断定はしかねるが、付図1のスタントン数は乱流層流の両相関式の間位置しておりこれを

部分的層流域が存在すると解釈することはできるかもしれない。これに対して例えば Bankston の論文(付1)の Fig. 10 では q_{in}^+ の大小によってスタントン数は層流と乱流の相関式に完全に分かれている。ただし著者らは部分的層流化あるいは部分的層流域という用語には慎重でありたいと考えている。層流乱流の区別はじょう乱の有無というよりはそのじょう乱が成長するか否かで判断されるべきものとする。一方、流れが加速される場合にはそれが縮流によるものであれ加



付図1 高熱流束加熱におけるスタントン数の変化



付図2 流れ方向のヌセルト数の変化

熱によるものであれ乱流強度は必ずある程度は低下する。したがって、部分的に非常に乱れの弱い領域が存在しても、管内の全域にわたって乱れが維持できなくなる事態が現出しないかぎり、層流化という用語は不適當ではないか。

(2) 円管加熱用電極に銅棒を用いているため、軸方向への熱伝導損失によって加熱終了点近傍の壁温が低下するのはやむをえない。したがって、実験結果の整理に際してこの部分は削除している。

〔質問〕 中川 武夫〔金沢工業大学〕

付図2に示されている加熱点からの距離が小さい範囲($x/D < 50$)でヌッセルト数が急減するのはなぜか。また、ヌッセルト数を求める際に用いたバルク温度を計算によって求めたのは壁面温度を実験的に与えていることと整合正がとれていないのではないか。

〔回答〕 x/D の小さい範囲は、温度助走区間である。バルク温度を電気入力から求めているので、温度場の測定によって求める必要はない。

(付1) Bankston, C. A., *Trans. ASME, Ser. C*, 92-4 (1970), 569.