2円板間外向き流れの伝熱特性*

望月 貞成**, 平岡 淳***

Heat Transfer Characteristics in Radially Outward Flow between Two Parallel Disks

by Sadanari MOCHIZUKI and Jun HIRAOKA

An experimental study was conducted to determine the heat transfer characteristics in radially outward flow between two parallel disks.

The local heat transfer coefficients along the disk radius were measured in detail and the flow patterns between the two disks were visualized using a paraffin mist injection technique. It was disclosed that self-sustained periodic flow separation, a unique characteristic of radially outward flow between the disks, occurs when the Reynolds number reaches about 1200. With a further increase in the Reynolds number, oscillating flow results in a flow transition into a turbulent flow, and three distinct regions of heat transfer, namely, laminar, oscillating laminar and turbulent coexist along the disk radius.

Key Words: Convective heat transfer, Radial flow, Flow separation, Oscillating flow, Parallel disks

1. ま え が き

平行2円板間の外向き放射状流れにおいては、壁面間距離は一定であっても流れ方向に流路断面積が拡大するため、レイノルズ数がある程度以上の値になると静圧が下流にゆくに従って上昇する状況が生ずる。このような条件下では、流れにはく離が発生する可能性が考えられ、従来よりこの問題に関していくつかの研究^{(1)~(4)}がなされてきている。しかし、これら従来の研究はすべて理論解析であり、いずれもはく離泡が2枚の壁面上の同一半径位置にそれぞれ定常的かつ軸対称に存在するとの仮定のもとに問題を扱っている。これに対し、最近、望月ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾は、2円板間の外向き放射状流れの熱伝達特性に関する研究途上において流れの可視化により流動状況を調べた結果、流れに生ずるはく離は従来考えられていたような定常現象ではなく、自励振動現象であることをはじめて明らかにした。すなわち、はく離は、ある半径位置(レイノルズ数によって定まる)において2枚の壁面上に交互に周期的に発生し、その結果、例えば図1に示されるように、下流

域には半径方向に規則正しく交互に並ぶ渦列が形成される(現象は円周方向には一様)ことを見出す⁽⁵⁾とともに、非定常項を含む full Navier-Stokes 式を大形電子計算機を用いて数値的に解くことにより、上述の現象が Navier-Stokes 式の解として得られることを示している⁽⁶⁾。

2円板間放射状流れの熱伝達についても過去にいくつかの研究⁽⁷⁾⁽⁸⁾がなされたが、それらは流れに生ずるはく離現象と伝熱特性との関係については触れていなかった。望月ら⁽⁵⁾は、上述のはく離現象が熱伝達特性に与える影響についても実験による検討を行い、いくつかの新しい知見を得ている。例えば、局所熱伝達率

図1 2円板($d_1=320$ mm, $d_2=620$ mm, $s=8$ mm)間放射状流れ(空気, $Re=1200$)を円板の半径と中心軸を含む面でレーザー光にて切断して可視化した例(トレーサにパラフィンミストを使用)

* 昭和60年5月21日 第22回日本伝熱シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 昭和60年7月24日.

** 正員, 東京農工大学工学部 (〒184 小金井市中町2-24-16).

*** 学生員, 東京農工大学工学部.

は半径方向に単調に減少するのではなく、ある半径位置において急に上昇しはじめることや、その上昇しはじめる半径位置はレイノルズ数の増大に応じて上流側へ移動することなどを見い出すとともに、これらが前述のはく離現象に起因するものであることを明らかにしている。

本研究は、実験範囲の拡大と実験精度の向上を目的として新たに製作しなおした装置を用い、既報⁽⁵⁾において見い出された前述の現象の再確認を行うとともに、円板間流れの流動機構と熱伝達特性との関係をより詳細に調べることを目的としている。

2. 実験装置および実験方法

図2に装置主要部の概略を示す。テストセクションは、同一軸上に間隔 $s=3.9$ mm で互いに平行に置かれた上下2枚の環状円板伝熱面により構成される。これら伝熱面はいずれもベークライト製基板(外径 ϕ 500, 内径 ϕ 160, 厚さ 10 mm)にはられた導電性プラスチック膜(厚さ 200 μ m, このうち導電部厚さ 20 μ m, 本来はポテンショメータなどに使用され、抵抗値の一意性は極めて優れている)より成る。伝熱面は、その内周および外周に設けられたリング状電極より直接通電することにより発熱する。したがって、発熱密度 q は半径方向距離 r に対し、

$$q = W / \{2\pi r^2 \ln(r_f/r_i)\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

のように変化する。ここで、 W ：一円板あたりの印加電力、 r_i および r_f ：それぞれ発熱部の内半径および外半径である。本実験では、 $r_i=80$ mm から $r_f=217$ mm まで(したがって、 $d_1=160$ mm, $d_2=434$ mm, $d_1/s=41.0$)をテストセクションとした。

伝熱面の温度 t_w は、半径上に 5.5 mm 間隔で設けられた 24 個の極細線クロメル・アルメル熱電対(素線径 25 μ m)により測定される。熱電対の测温接点は、図3に示されるように、各位置ごとに導電性プラスチックフィルム裏面より小穴を掘り、测温接点を導電層部に直接接触させた後に耐熱性接着剤を充てんすることにより取付けられている。上下いずれのベークライト基板もその背面および外周は発泡スチロール材により断熱されている。

図4に実験装置全体の概略系統を示す。空気はターボファンにより供給され、整定室、層流形流量計、整流筒およびベルマウスを順次経て、上方より図2に示される装置本体へ流入した後、半径方向外向きに向きを変え、金網メッシュおよび絞り部を通過しテストセクションである2円板間へと流入する。テストセクション入口空気温度 t_{ai} は装置本体入口部にて素線径 25 μ m のクロメル・アルメル熱電対により計測される。すべての計測値は、オンラインでマイクロコンピュータへと入力され所要の処理が行われる。

図2 実験装置主要部

図3 熱電対取付けの詳細

図4 実験装置概略系統

3. 実験結果および考察

図5に諸量の半径方向分布測定結果の一例を示す。図5中、 t_w は壁温の実測値であり、 $\dot{q}$ は式(1)で与えられる発熱密度である。 $\dot{q}'$ は、伝熱面背面よりベークライト板および断熱材を経て鋼製の基板へ至る漏えい熱流束を各測温点ごとに一次元熱伝導を仮定して見積もり、 $\dot{q}$ を補正した結果で、これがテストセクション内の空気流へと伝達される熱流束になる。 t_a はこの $\dot{q}'$ を用いて算出される空気混合平均温度である。このようにして求められる諸量を用い、局所熱伝達率 h は、

$$h = \dot{q}' / (t_w - t_a) \quad \dots\dots\dots (2)$$

より算出される。

図6に局所ヌセルト数 $Nu = hD_H/k$ の半径方向分布を各レイノルズ数ごとに示す。また、図6に示されている結果を横軸に無次元量

$$X = \frac{R^2 - R_1^2}{RePr} \frac{4(s/d_1)}{1 + d_2/d_1}$$

を採って整理しなおすと図7を得る。図7のうち、2本の実線はそれぞれ流れが円板入口から出口に至るまで一様流速分布であるとした場合およびポアズイユ分布であるとした場合に得られる理論解であり、これらの場合には Nu と X の関係は Re によらずそれぞれ単一の曲線で表される。ここで、 $Re = u_m D_H / \nu$ 、 u_m ： $r_m = (r_1 + r_2)/2$ における平均流速、 D_H ：流路の等価直径 $= 2s$ 、 ν ：動粘性係数、 k ：熱伝導率、 Pr ：プラントル数、 $R = r/a$ 、 $R_1 = r_1/a$ 、 $a = s/2$ である。これらの図より以下のことがわかる。

(1) Re が比較的小さい ($Re \leq 1000$) 場合には、 Nu は入口からの距離 $R - R_1$ の増大とともに単調に減

少し、ポアズイユ流の場合よりも若干低下(図7)した後わずかに上向きに転じてからポアズイユ流の場合の一定値に漸近する。

(2) Re がある程度大きくなると、 Nu は $R - R_1$ が小さいうちは $R - R_1$ の増加とともに単調に減少するが、 $R - R_1$ がある値に達すると急に上昇に転ずる。すなわち、 Nu の半径方向分布に極めて明確な極小値が存在するようになる。

(3) この Nu に極小値が現れる半径位置は、図6中の破線で示されるように、 Re の増加とともに上流側へと移動する。

(4) Re がさらに大きくなる ($Re > 5000$) と、 Nu の半径方向分布には、2箇所において極小値が現れる

図6 Nu の半径方向分布

図5 諸量の半径方向分布

図7 Nu と X との関係

ようになる。

以上の結果の各々について以下に考察を加えることとする。

まず、上記(1)は、円板間放射状流れにおいて流れが定常層流であれば、半径方向距離に反比例して減少する平均流速および下流に至るにつれて発達する速度および温度境界層の効果を考えれば当然予想される結果である。ただし、 N_u がポアズイユ流の場合の値 N_{up} よりも低下した後に N_{up} に漸近してゆく現象は、入口でほぼ一様流速分布を有する流れが下流に至るにつれてポアズイユ流に近づくまでの流速分布の変化過程を考えることにより説明される。すなわち、放射状流れでは流路断面積一定の管内の流れとは異なり、入口での一様流速分布は境界層の発達とともに変曲点を有す(壁面近くでやせた)流速分布に変化し、その後、後述のはく離を生じない場合には、次第にポアズイユ分布へと漸近していくからである⁽⁶⁾。

(2)および(3)は流れのはく離現象によるものである。すなわち、既に報告⁽⁵⁾されているように、円板間放射状流れでは Re がある程度以上になるとある半径位置において2枚の壁面上に交互に自励振動的に周期的な軸対称層流はく離が発生し、下流域には半径方向に規則正しく並ぶ渦列が形成され(Re が比較的大きい場合には渦列はさらに乱流へと遷移する)、はく離発生点の位置は Re の増加とともに上流側へと移動するためである。図8は、本研究で用いた熱伝達実験装置と幾何学的にほぼ相似な流路($s=5\text{ mm}$, $d_1=221\text{ mm}$, $d_1/s=44.2$, 上下2枚の円板のうち上側円板は透明なアクリル樹脂製)において、円板間入口絞り部の円周上に設けたスリットよりパラフィンミストを注入することにより可視化された空気流を円板上方より撮影した一例である(撮影条件: $f/1.4$, $1/2000\text{ s}$)。図8中、白く見える同心円状の複数の輪は、上下の円板面上に交互に環状に発生するはく離に応じて形成された渦に対応している。このように、水を用いて行われ

図8 2円板($d_1=221\text{ mm}$, $d_2=800\text{ mm}$, $s=5\text{ mm}$)間の流れ($Re=1850$)を円板上方より撮影した例

た既報⁽⁵⁾の可視化実験において観察されたものと同じ結果が空気を用いた本実験においても得られている。

なお、上記可視化用円板の壁面近傍(半径方向位置は $R-R_1=59.7$)に熱線プローブを設置し、はく離発生周期に応じた流速変動の様子を調べたところ、はく離が発生している場合の流速変動は周期的であり、図8の場合のはく離発生周波数 f はおおむね 140 Hz であった。また、 f は Re の増大に応じて増加することが観察されている。図6からは、熱伝達に対してはく離の影響が生じはじめるレイノルズ数 Re_{cr} は、 $Re_{cr}=1000\sim 1400$ の間と推定されるが、熱線による可視化用円板内における観測結果によると、はく離が発生しはじめるレイノルズ数は $Re_{cr}\approx 1200$ であった。

(4)の現象については、第2番めの N_u の極小値の発生が乱流への遷移に対応するものとも予想されるが、この現象の機構については今後の研究に委ねたい。

図9は、円板面上の半径方向各位置における局所ヌセルト数 N_u が Re によってどのように変化するかを示した一例である。入口近くの点Aにおいては、ほぼ $N_u \propto Re^{0.5}$ の関係があり、本実験で扱ったレイノルズ数範囲では常に定常層流の熱伝達が生じている。一方、下流域の点BおよびCでは Re が小さいときは層流熱伝達特性を示すが、 Re が増加するとある Re ではく離の到達に対応して N_u は急激に上昇しはじめる。半径位置によってこの N_u の立ち上がりの Re が異なるのは、 Re の増加に応じてはく離発生点が次第に上流側へ移動することによる。

図10は、図6の破線で示される関係を Re と $R-R_1$ との関係に書き直したいわば伝熱形態マップである。これより、2円板間の半径方向流れの熱伝達においては、(1) Re が低いときは円板間入口から出口まで

図9 N_u と Re への依存性

図 10 伝熱形態マップ

の全域において層流熱伝達が存在するが、(2) Re が大きくなると、上流部には常に層流熱伝達領域が存在し下流域には層流はく離およびそれに続く強いかく乱を伴う流れ⁽⁶⁾の影響を受けた熱伝達領域が存在する。(3) 両領域の境界は Re の増加とともに上流側へ移動する。(4) 本実験に供した 2 円板の幾何学的形状については、層流はく離の影響が発生しはじめるレイノルズ数はほぼ 1200 程度であることがわかる。

図 11 に、テストセクション全体の平均ヌセルト数 $Nu_m = h_m D_H / k$ と Re との関係を示す。ただし、

$$h_m = \int_{r_1}^{r_2} 2hrdr / (r_2^2 - r_1^2)$$

である。図 11 より、 Nu_m は、 Re が小さい場合はポアズイユ流の場合の理論値に近く、 Re の増大とともに徐々に増加するが、 $Re \approx 1200$ あたりよりはいく離発生の影響を受けて急激に上昇しはじめ、 $Re \approx 5000$ あたり以降はほぼ $Nu_m \propto Re^{0.8}$ の傾向を示すことがわかる。これより、円板面全体についての伝熱特性を支配する伝熱形態は、図 11 に示されるように、 Re が大きくなるにつれて順次、(i) 定常層流、(ii) はく離に起因するかく乱を受ける流れ、および(iii) 乱流の順に変化すると考えることができよう。

4. 結 論

平行 2 円板間外向き放射状流れの熱伝達について、局所熱伝達率の半径方向分布を種々のレイノルズ数に対して詳細に調べ、その結果と流れとの関係を検討することにより以下のことが明らかになった。

図 11 Nu_m と Re との関係

(1) Re が低いときには、円板間の入口から出口までの全域にわたって層流熱伝達が存在するが、その場合、局所ヌセルト数はポアズイユ流に対する値よりも低下することがある。

(2) Re がある値 Re_{cr} (本実験に供した流路の幾何学的寸法比については $Re_{cr} \approx 1200$) 以上になると、上流部には常に層流熱伝達領域が存在するが、下流域には周期的な層流はく離およびそれに続く強いかく乱を伴う流れの影響を受けた熱伝達領域が存在するようになる。

(3) 上記両領域の境界は、レイノルズ数の増加とともに上流側へ移動する。

(4) 円板面全体についての伝熱特性は、 Re の値により、(i) 定常層流、(ii) はく離に起因するかく乱がある流れ、および(iii) 乱流それぞれが支配的であるような三つの場合に大別される。

実験装置の製作および実験の遂行に協力された、当時東京農工大学学生の竹内真二および風祭英人の両君に感謝致します。また、本研究の一部は、文部省科学研究費(一般 C)による助成を受けて行われたことを付記し謝意を表します。

文 献

- (1) Woolard, W. H., *Trans. ASME, Ser. E*, 24-1 (1957), 9.
- (2) 石沢, 機論, 30-219 (昭 39), 1301.
- (3) 石沢, 機論, 31-224 (昭 40), 535.
- (4) Raal, J. D., *J. Fluid Mech.*, Pt. 3, 85 (1978), 401.
- (5) 望月・矢尾, 機論, 49-438, B (昭 58), 426.
- (6) Mochizuki, S. and Yang, W.-J., *J. Fluid Mech.*, 154 (1985), 377.
- (7) Kreith, F., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 9-4 (1966), 265.
- (8) Suryanarayana, N. V., ほか 2 名, *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 105-3 (1983), 519.

討 論

〔質問〕 相原利雄〔東北大学高速力学研究所〕

(1) 図4を見るかぎり、ベルマウス付近の流れは上下対称になっていないと思われる。平行円板部の流れは上下対称になっているか。浮力の影響とともに、流れの非対称性がはく離特性に影響することはないか。

(2) 貴報の測定結果は、上面に関するものか、下面に関するものか。どちらか。

(3) 加熱開始点付近の主流乱れはどの程度か。

(4) 貴実験は減速流(円板間隔一定)に関するものであるが、流れの進行とともに流路間隔が狭くなる等速流(ただし入口においては13%程度のじょう乱を含む)に関する著者らの実験(付1)でも、平行壁面間の層流理論に比べ、2~7倍程度の優れた伝熱特性が得られている。等速流でも貴結果のようなはく離の発生を期待してよいのか。

〔回答〕 (1) 本実験装置においては、上下円板面の各々について、本文の実験装置の項に述べたような半径方向伝熱面温度分布計測用熱電対列が円周方向に120°間隔で3箇所設けられており、これらにより円周方向および上下の現象の対称性についてはあらかじめ検討がなされている。それによると、円板間隔 s が大きくなると上下の円板の温度分布は互いに異なるようになり、ご指摘のように平行円板部の流れは無視し得ないほどの上下非対称性を持つようになる。しかし、本研究で扱った円板間隔(3.9 mm)程度であれば、上下の円板面の温度分布はほぼ一致する。したがって、流れもほぼ対称であると考えている。なお、流れの非対称性がはく離特性に影響を与えることは十分予想される。また、 Re が最も小さい場合($Re=473$, はく離は発生せず定常層流熱伝達が生じている)でさえも、実験結果は強制対流熱伝達の理論値に良く一致している(図7)ゆえ、浮力の影響は本実験においては無視し得るものと考えられる。

(2) 下面に関するものである〔なお、上記(1)参照〕。

(3) 今回は、乱れについての系統的な測定を行っていないのでこれに関して議論をするのに十分なデータは得られていないが、円板外周側から細いホットワイヤローブを挿入して測定した結果によると、 $Re=1000\sim4000$ において5%程度であった。

(4) 本研究にみられるようなはく離が発生するための主要条件の一つは、減速流にともなう流れ方向の静圧上昇にあると考えられる。したがって、断定はできないが、上記条件に欠ける等速流においては、ここで扱ったようなはく離の発生は期待しにくいと思われる。

〔質問〕 柏木孝夫〔東京工業大学〕

工学的に大変興味ある現象を扱っておられ、有益な結果を導かれたことに対し敬意を表す。

本研究における実験装置は半径 r_1, r_2 が固定されておりレイノルズ数は $(r_1+r_2)/2$ における値で定義されている。そして、熱伝達特性の分類をレイノルズ数だけで議論しておられるが、最終的には図7の X で $R=R_2(R_2=r_2/a)$ を代入した値にレイノルズ数の影響を加味した実験式により分類されるべきであるように思えるがいかがか。

〔回答〕 流れの様相およびそれに応じた熱伝達特性に及ぼす互いに独立な主要要因としては、レイノルズ数、幾何学的形状・寸法比($s/d_1, d_2/d_1$ など)、流入する流れの特性、その他があるが、ご指摘のように本研究ではそのうちでも特にレイノルズ数の影響を調べることに主眼を置いている。

ポアズイユ流やスラグ流のような半径方向流速成分のみを有する単純な流れに対する熱伝達については、 Nu は図7の X (レイノルズ数および幾何学的要素の影響を含んでいる)のみにより表すことができるが、一般的にはそうではない(少なくとも原理的には)。実際、はく離があるような場合には、 X は結果を整理するのに必ずしも適切ではない。種々の要因の影響を含めた熱伝達特性の分類およびそれに応じた整理式(実験式)についての議論は今後の課題と考えている。

(付1) Aihara, T. and Saga, R., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 105-1 (1983), 18.