スペーサが、周囲の伝熱流動に及ぼす影響に関する基礎研究*

(スペーサが円柱の場合)

一 宮 浩 市**, 秋 野 詔 夫***
功 刀 資 彰***, 光 城 浩 二†

A Fundamental Study of the Heat Transfer and Flow Situation around a Spacer

(In the Case of a Circular Cylinder as a Spacer)

by Koichi ICHIMIYA, Norio AKINO, Tomoaki KUNUGI, and Koji MITSUSHIRO

This paper describes the heat transfer augmentation and flow situation around a single spacer (a circular cylinder) on a heated surface in a parallel plate duct in order to examine basically the effects of the spacer in the fuel elements of a High Temperature Gas-cooled Reactor. A thermosensitive liquid crystal film was used to clarify the effective region of the heat transfer. The mean Nusselt number, which was estimated within arbitrary distance from the spacer to the downstream direction, took a peak at the dimensionless distance $X/D=1\sim3$, and after that decreased gradually with flow direction. How heat transfer corresponds to the flow situation is also examined. The horseshoe vortex, produced around the spacer, affects the wake and contributes to the increase of the local heat transfer.

Key Words: Thermal Engineering, Forced Convective Heat Transfer, Spacer, Thermosensitive Liquid Crystal Film, Flow Visualization, Wake

1. 緒 言

多目的高温ガス炉の燃料要素内では冷却材のヘリウムガスが燃料棒と燃料棒間あるいは燃料棒と減速材間の狭い空間を通過する。その空間を保持するため燃料棒の周囲あるいは長さ方向にリブがつけられ、それがスペーサの役目をしている。しかし、このスペーサが周囲の伝熱流動にどのような影響を及ぼすのか、影響する範囲はどの程度なのか。まだ具体的に明らかにされてないので、その基礎研究を行う必要がある。

このようなリブに関する研究には、平板上にリブを設置した場合の、三次元流れおよびリブ側面の熱伝達に、物質伝達を応用して実験を行ったり⁽¹⁾、あるいは二次流れで伝熱促進を目的に、はく離・再付着による局所熱伝達の向上をはかっているものがある⁽²⁾。また平行平板流路内に円柱を流路中心に流路幅方向に流れに直角に設置し、ブロックage比(流路幅に対する円柱の外径比)を変化させ、局所熱伝達および流動状態に与える影響を検討した実験がある^{(3)~(5)}。しかし

スペーサのように流れに直角に、しかも流路高さにわたってリブが取付けられた系の、リブによる影響を扱った研究はあまり見られない。

本研究では、スペーサの影響に関する基礎研究として平行平板流路内に流路上面から下面へ円柱を、流れに直角に1個設置し、その円柱が上面の伝熱面あるいは流動状態に与える影響を実験的に検討した。特に熱伝達へ与える影響範囲を調べる目的で、熱電対なら数十ないし100本以上必要なところを1枚の液晶膜をはり、温度分布の可視化を行った。さらに回流水槽を利用して熱伝達分布に対応した流れの状態を観察した。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置 実験装置の概略を図1に示す。流路間隔(H)10 mm、幅230 mm、全長2100 mmの平行平板流路が試験部として送風機の吸込側に設置されている。流体としての空気は流量制御用バルブ②、流量計③を経て整流部④に入る。その後、平行平板流路の助走部を通過して加熱部⑤で加熱された後、送風機⑦を経て大気へ戻される。円柱1個⑥が加熱開始点より375 mm(整流部入口より1600 mm)に流路上面より下面にわたって設置された。円柱は加熱面に1/100 mm程度の薄いシリコン系グリースで接着され、さら

* 昭和60年11月20日 関西支部第245回講演会において講演、原稿受付 昭和60年5月28日。

** 正員、山梨大学工学部(〒400 甲府市武田4-3-11)。

*** 正員、日本原子力研究所(〒319-11 茨城県那珂郡東海村)。

† 学生員、山梨大学大学院。

に平行平板流路の上・下板によりはさみこまれ密着されている。流路断面は図2のように、流路上板は透明アクリル板で作られた液晶膜およびステンレスはくで構成されている。流路側面、下面はアクリル板、ベークライト板、断熱材で熱の漏れを防いでいる。加熱部は、厚さ0.05 mm、長さ750 mmのステンレスはくから成り、流路上面にはられ、交流100 Vの電極を通じて直接通電することにより一様熱流束(q)を得た。

伝熱面の温度測定には、円柱の影響が及ぶ範囲が一目で判断できるように感温液晶膜を使用した。本実験で採用したのはコレステリック形⁽⁶⁾で温度により8種類の色を示し、マイクロカプセル化され寿命の長いものである。液晶膜は幅230 mm、長さ750 mmの範囲にわたって塗布されており感温液晶層、黒色の接着層から成りたっている。液晶の発色と温度の関係は検定実験⁽⁷⁾により校正され表1に整理した。この関係は、一端を電気ヒータ、他端に冷却コイルを取付け直線の温度分布を示す銅板に、本実験と同じ液晶を密着し、発色と熱電対による温度から求められた。液晶の発色は26~36°Cの範囲にわたり、低温側より黒・焦茶、茶、

だいだい、黄、黄緑、緑、青、紺の順になっている。色と色の境界は比較的、明確に現れるので基準温度としてはこの境界温度を使用することとした。

円柱周囲の流れを観察するため図3に示す回流水槽を用いた。流路間隔20 mm、幅300 mm、使用した円柱は外径20 mmで流路中央に設置した。可視化トレーサとして雲母の微粒子に酸化チタンで被覆した、粒度30 μm 、比重約3のパール顔料を用いた⁽⁸⁾。パール顔料は光を良く反射するうえに粒子形状がりん片状で、アルミニウム粉末と同様、流れのせん断方向を検知し、適切な照明により流れの様子を鮮明に可視化することができる。

2・2 実験方法 円柱のない片面加熱面の、平滑平行平板流路の伝熱実験を予備的に行った後、円柱を設置した実験に移った。

円柱を設定した後、規定流量の空気を流し、ステンレスはくに直接通電した。伝熱面温度が液晶膜の感温範囲内に入るように電流、電圧を調整した。流体の入口・出口温度は熱電対にて測定し、その間、直線的に変化するとして任意の位置の流体温度 T_b を求めた。正味加熱量と電気入力との差は最大7%程度であった。伝熱面温度 T_w は、感温液晶膜による発色を写真撮影し表1より色を温度に換算して求めた。局所熱伝達係数 α は次式で計算した。

図1 実験装置の概略

図2 試験部の断面図

表1 色と温度の関係

color boundary	temperature (°C)
black-dark brown	26.0 $\pm$ 0.2
dark brown-light brown	27.1 $\pm$ 0.2
light brown-orange	28.3 $\pm$ 0.2
orange-yellow	29.8 $\pm$ 0.5
yellow-yellow green	30.7 $\pm$ 0.6
yellow green-green	31.3 $\pm$ 0.4
green-light blue	32.3 $\pm$ 0.5
light blue-dark blue	35.6 $\pm$ 0.4

図3 可視化のための回流水槽

$$\alpha = q / (T_w - T_o) \dots\dots\dots (1)$$

なお局所熱伝達係数の精度は、壁温、流体温度の誤差を考慮して約±10%程度である。

実験では円柱の高さ10mmを一定にし、円柱の外径 D を10, 15, 20mmの3種類変化させ、さらに円柱の材料の影響を検討する意味でアクリル材と黄銅の2種類を用いた。流路高さの2倍を代表長さとするレイノルズ数 Re の範囲は1000~10000である。

3. 結果と検討

3・1 平滑流路の熱伝達 平滑流路における伝熱実験の結果を図4に示す。縦軸にほぼ発達したヌセルト数 Nu_{∞} 、横軸にレイノルズ数 Re をとっている。これらの値は円柱の設置位置に相当する位置で得られたもので、流体力学的には十分発達し、熱的にもほぼ発達した状態で得られている。乱流領域では約±10%のばらつきがあるものの、発達した値⁽⁹⁾に近い結果を得て

図4 平滑流路におけるヌセルト数

図5 円柱周囲の温度分布(感温液晶膜)
(円柱:アクリル材, $D=10$ mm)

いる。一方、層流域では解析値は Re によらず5.4である⁽¹⁰⁾。実験値は $Re=1000$ では解析値と良い一致であるが、 $Re=2000$ では遷移域に近いめか、少し高い値を示している。液晶膜により熱伝達の値を求めるには少し難点があるものの実験を反復することにより、ある程度の一致が得られた。

3・2 単一円柱の周囲の熱伝達 円柱を使用した実験による結果を示す。図5に、円柱の材料がアクリル材、円柱径10mmに対し、 Re を1000, 4000, 10000に変化させた場合の液晶膜に生ずる温度分布を示す。本来、発色している状態であるが、白黒におおよその色合を言葉で示した。同色は等温状態を示していることになる。 $Re=1000$ では円柱後によどみ域があり、高温領域が存在する。 Re が増大するにつれ、円柱の周囲二方向に分れた流れが円柱後方で合流し、それによる熱伝達向上域(低温域)が拡大していることがわかる。さらに円柱の下流側に生ずる温度分布のくぼみ(コブラの頭部に似る)が Re の増大とともに円柱に近づく(上流へ移行)傾向にある。

上述の温度分布と式(1)の α とから求められるヌセルト数 Nu 分布を、円柱の外径 D を基にした無次元距離(X/D :円柱下流端から流れ方向の距離, Y/D :

図6 局所ヌセルト数($D=10$ mm)

D ：円柱中心軸から流れと直角方向の距離) に対し 3 種類の Re について示したのが図 6 である。図 6 (a) ~ (c) のアクリル材の円柱については、 $Re=1000$ で円柱後方のよどみ域に入る前に最大ヌセルト数 $N_{u\max}$ の位置があるのに対し、 Re が増大 (乱流域) すると円柱の中心対称軸線上に存在する。また明確に熱伝達の増大と判断できる領域は Re が 1000 に対し、 X/D が約 5 であるのが、 Re が 10000 では約 11 と 2 倍強に拡大している。しかし詳細に温度分布を検討すると定量的評価は困難なものの X/D が 20 以上になっても中心線を境にわずかに周囲と異なる発色をしている領域が存在している。

円柱材料がアクリル材 (熱伝導率: $0.194 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) では伝熱面上にほぼ断熱状態で設置されるが、黄銅 (熱伝導率: $98.9 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) では熱伝導率の高いため円柱のフィン効果 (拡大伝熱面の影響による熱伝達の向上) が大きく作用し、図 6 (d) に現れているように、見掛け上、円柱側面付近に最大ヌセルト数が存在している。この値はアクリル材の場合より高いものの全体の熱伝達の改善領域としては、それほど大差はない。

円柱直径 D の相違による熱伝達への影響は Re が同じであれば変化は少なく、改善領域の絶対値は増大するものの距離を D で無次元化して整理すると本実

験範囲では、ほぼ相似分布で表示される。

熱伝達の増大評価には、(i) 最大ヌセルト数 $N_{u\max}$ と、(ii) 平均ヌセルト数 N_{um} を、それぞれ平滑流路の発達したヌセルト数 $N_{u\infty}$ で除した $N_{u\max}/N_{u\infty}$ あるいは $N_{um}/N_{u\infty}$ で表示するのが一般的である。(i) の評価は最大評価である。(ii) では従来、影響領域全体の平均が使用されているのが多いが、本研究では、円柱の下流側面からの距離を流れ方向に任意にとり、各距離に対する $N_{um}/N_{u\infty}$ を求めることにより円柱の影響がどの領域で最も大きいかを判断した。円柱の下流側面から任意の距離における、平滑流路の発達したヌセルト数 $N_{u\infty} (\equiv N_{u0})$ より大きい促進された領域を図 6 の等ヌセルト数分布に対応して図 7 に示す。そこで、任意に促進されたヌセルト数を N_{uK} 、その占める面積を A_K として掛けあわせて N 個の領域全体について平均化すると $N_{um}/N_{u\infty}$ は次式となる。

$$\frac{N_{um}}{N_{u\infty}} = \frac{\sum_{K=1}^{N-1} (N_{uK+1} - N_{uK}) A_{K+1} + N_{u1} A_1}{N_{u0} A_1} \dots (2)$$

この二つの評価を図示すると図 8, 9 になる。

図 8 には①の評価の $N_{u\max}/N_{u\infty}$ と Re の関係が、アクリル材と黄銅について示されている。層流域から Re が 4000 までは促進率は増大し、極大値をとった

図 7 局所ヌセルト数の模式図

図 8 最大ヌセルト数

図 9 平均ヌセルト数

後、乱流域では減少する傾向にある。円柱がアクリル材の場合、最大ヌセルト数 N_{umax} を Re で表示すると指数 $n=0.66$ であった。急拡大流の再付着による最大ヌセルト数に対しては、Zemanick ら⁽¹¹⁾は $n=2/3$ を、Filetti ら⁽¹²⁾は、 $n=0.593\sim0.689$ を与えており、一方、平板上に設置された有限円柱側面の熱伝達⁽¹⁾において、円柱径と高さの比が1の場合では $n=0.657$ となり、いずれも本実験による値に類似していることは興味深い。熱伝導率の高い黄銅に対してはフィン効果によりアクリル材の場合より全体の Re にわたって N_{umax} は高いが、 Re が約4000で最大25%高い値を示した。

図9(a)、(b)には(ii)の評価の平均ヌセルト数 $N_{um}/N_{u\infty}$ と X/D の関係を Re をパラメータにして示した。円柱がアクリル材の場合 Re が1000から2000では、よどみ域の前の円柱に近い部分に影響の大きい部分があり、それが Re の増大につれ X/D が1~2, Re が10000では $X/D\approx3$ 付近で極大値をとる分布になる。それ以上、下流になると1に漸減していく。これらの代表的分布傾向を破線で示した。この傾向には直径の相違による差は明確に現れていない。図9(b)の黄銅では $N_{um}/N_{u\infty}$ はフィン効果のため Re によらず円柱に近い $X/D\approx1$ で最も高い値を示しており、下流になると1に漸近する。

上述の事柄は、複数のスぺーサを設置する際、長さ方向のピッチを決定する時の基礎資料となり得る。

3.3 流動状態 回流水槽を使用して、円柱周辺の種々の断面で、局所熱伝達と対応して流れを観察した。その結果、流れの主要な構造は、円柱に衝突した後、生ずる後流と円柱基部を取り巻く馬てい渦とによって特徴付けられていることが明らかになった。

図10は流路の中央をスリット光で水平方向より照明して撮影したものである。 Re は1000, 4000, 10000である。いずれにも上流岐点流れ、円柱側面のはく離流れ、後流が認められ、流れに直交する長い円柱周辺の流れと類似している。後流は Re に強く依存し、円柱直後のよどみ域および下流のウェーク域に分けられる。 Re が1500未満では、よどみ領域には安定な双子渦が存在し、その末尾は長く伸び、ウェーク領域は認められない。流れは安定であり層流と判断される。このよどみ域に対応して、液晶膜による温度分布は青く、高温になっている。 Re が1500を超えると、双子渦の末尾に変動が現れはじめる。さらに Re が増加すると、よどみ域の中の流れが不規則になり、領域も縮少する。 Re が2000を超えるとよどみ域の下流に乱れたウェーク領域が現れ、ついで領域の幅が下流に向かって広がり始める。4000を超えるとカルマン渦に似た交番渦が発生し始めるが、6000以下では乱れた

図10 流路間隔中間(1/2H)の流線模様
(露光: F1.4, 1/2 s)

図11 下壁上の粒子沈着模様
(露光: F8, 1/4 s)

図 12 流動模式図

ウェーク領域の中で崩壊する。この Re の範囲で、図 8 に見られるように最大ヌセルト数比 $N_{u\max}/N_{u\infty}$ が、最大値をとるのである。8000 以上ではウェーク領域で交番渦は崩壊せず、さらに Re を増大しても流れの様子は変化しなくなる。図 10 に示された写真は、長時間露光で撮影したため時間平均化された流れとなっているので交番渦は認められない。交番渦はパール顔料水溶液を上流より供給する、いわゆる注入流脈法によりめいりょうに観察することができる。この交番渦は、通常のカルマン渦と比較して 2 けた程度大きいレイノルズ数で発生しはじめており、その三次元的構造は今のところ明らかではない。次に流路の上方より垂直にスリット光で照明し、流路側方より円柱周辺の流れを拡大鏡を用いて詳細に観察した。その結果、流れが円柱上流側に衝突し、円柱基部を取り巻き下流へ流出する複数の馬てい渦⁽¹³⁾が生じていることが見出された。 Re が 2500 以下では、定常的な二つの馬てい渦が観察された。 Re が約 4000 を超えると、四つの馬てい渦が観察されるが、外側の二つは間欠的に発生していた。 Re が 6000 を超えると、すべての馬てい渦が間欠的に発生することが明らかになった。これらの間欠性は前記の交番渦の挙動と関連していると考えられる。

図 11 に伝熱面付近の流れに対応する流路下壁上に沈積したパール顔料粒子の模様を、図 12 に馬てい渦および下壁上の沈積模様の模式図を示す。図 11 で黒く写っている部分は、粒子の沈積が少ない所である。このような壁面の模様は、油膜法との類似性より、壁面のせん断応力に対応した流れの特性を表していると考え

えられる。図 11(a) は Re が 1000 であり、円柱の上流側から側方にかけて認められる白い筋状の曲線は、最も円柱に接近した馬てい渦の外側の境界に生じている。図 11(b) は Re が 4000 であるが、同様の白い筋が 2 本認められ、二つの馬てい渦の外側境界に対応している。円柱の下流には、よどみ域に対応した沈積が生じている。その下流で模様の幅が一度縮少し、再び幅が広くなり乱れた状態に移行している。図 11(c) は Re が 10000 であるが粒子は壁面に沿って動揺しつつ下流へ移動しているため壁面に接するようにスリット光を照射し撮影した。円柱周辺の模様は縮少し形状は円に近くなる。下流のウェーク領域の幅はほぼ一定である。この分布特性は Re が 5000 以上に共通に認められた。ここに示した模様の円柱周辺からよどみ域までの部分は液晶によって得られた温度分布と良い対応が見られた。

4. 結 言

平行平板流路内に、スぺーサに対応する円柱を 1 個設置して、周囲の伝熱流動に与える影響について実験的に検討した。

(1) 感温液晶膜を利用して温度分布を可視化して影響範囲を明らかにした。伝熱評価には、最大ヌセルト数と平均ヌセルト数を求め、それぞれの評価の特徴を明らかにした。特にスぺーサ(円柱)より下流に、伝熱促進の最も効果のある領域が存在することがわかった。

(2) スぺーサの材料として熱伝導率の高い黄銅を使用するとアクリル材と比較して局所最大熱伝達係数で最大約 25% のフィン効果のあることがわかった。

(3) パール顔料を使用し、注入流脈法で流れの可視化を行った結果、スぺーサ(円柱)周囲に生ずる馬てい渦が後流の局所熱伝達の増大に大きく影響していることが明らかになった。

今後、本研究の結果をもとに複数のスぺーサに関する研究に発展させ、実用化のための基礎資料を得るものである。

本研究は、昭和 59 年度原子力研究所・協力研究により行われたもので、研究を進めるにあたり高温熱工学室長 河村 洋氏にお世話になった。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) 松和田・ほか 4 名、機論、50-451, B (昭 59), 733.
- (2) 河村・ほか 3 名、機論、50-452, B (昭 59), 1034.
- (3) 松和田・馬淵、機論、46-409, B (昭 55), 1750.
- (4) 親川・馬淵、機論、47-414, B (昭 56), 308.

- (5) 親川・馬淵, 機論, 48-432, B (昭57), 1509.
 - (6) 小林, 液晶, (昭51), 75, 日刊工業新聞社.
 - (7) 秋野・ほか3名, 流れの可視化, 3-8 (昭58), 40.
 - (8) Savaz, Ö., *J. Fluid Mech.*, 152 (1985), 235.
 - (9) 日本機械学会編, 伝熱工学資料, (昭53), 28, 日本機械学会.
 - (10) Kays, W. M., *Convective Heat and Mass Transfer*, (1966), 115, McGraw-Hill.
 - (11) Zemanick, P. P. and Dougall, R. S., *Trans. ASME*, Ser. C, 92-1 (1970), 53.
 - (12) Filetti, E. G. and Kays, W. M., *Trans. ASME*, Ser. C, 89-2 (1967), 163.
 - (13) Baker, C. J., *J. Fluid Mech.*, 95-2 (1979), 347.
-