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*

(流れに直交する円柱列の場合)

一 宮 浩 市^{*1}, 秋 野 詔 夫^{*2}
功 刀 資 彰^{*2}, 光 城 浩 二^{*3}

A Fundamental Study of the Heat Transfer and Flow Situation around Spacers (In the Case of a Single Row of Several Cylindrical Rods in Cross Flow)

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

The present paper describes the characteristics of heat transfer and the flow situation around several spacers (a single row of several cylindrical rods) in cross flow on a heated surface in a parallel plate duct. Temperature distribution was obtained by using a thermosensitive liquid crystal film and a narrow band optical filter method without human color sensation. The local Nusselt number between the two cylindrical rods is expressed in the function of the Reynolds number, the local position and pitch of the cylindrical rods. The effects of pitch and Reynolds number affect the wake flow patterns, which are classified into three domains.

Key Words: Thermal Engineering, Forced Convection, Heat Transfer, Spacers, Thermosensitive Liquid Crystal Film, Narrow Band Optical Filter, Flow Visualization

1. 緒 言

多目的高温ガス炉の燃料要素内に設置されるスペーサの周囲に与える影響を基礎的に検討するため、前報⁽¹⁾では平行平板流路内に単一円柱を設置し、それが周囲の伝熱流動に及ぼす影響を、液晶を用いて実験的に検討した。本研究では、さらに推し進めて、より実用に近い複数円柱について、その効果を実験的に求めるものである。複数円柱を使用した研究には、流れに直角に数本の円柱を流路内に設置し、円柱側面上の局所および平均熱伝達を求めたものがある⁽²⁾⁽³⁾。さらに、熱交換器の小形化に関連して3本管の管ピッチを変化させ、端板上の流れ挙動と円管側面の伝熱特性を求めた実験的研究があり、円管数が3本であるがゆえの特徴が得られている⁽⁴⁾。このように、多くの研究で求められているのは、円柱あるいは円管の側面熱伝達であり、本研究で対象としているような、流路幅にわたって任意のピッチで複数円柱を、流れに直角に、しかも流路間隔全体に設置した体系は少なく、これらの複数円柱

が周囲の伝熱流動に及ぼす影響を明らかにしたものはほとんどみられない。

本研究の目的は、上述の複数円柱が、周囲の伝熱面に与える影響を検討すること、特に円柱間の局所熱伝達および熱伝達と可視化による流動との対応を検討することにある。さらに、液晶による色分布を温度に定量化する際、人間の主観を取り除いた著者らの開発した狭帯域干渉フィルタ法⁽⁵⁾の有効性を合わせて検討することにある。

主 な 記 号 の 説 明

D : 円柱の直径

D_H : 水力学的相当直径 $= 2H$

H : 流路の上板と下板の間隔

Nu : ヌッセルト数 $= \alpha \cdot D_H / \lambda$

P_i : 円柱のピッチ

q : 熱流束

Re : レイノルズ数 $= U_m \cdot D_H / \nu$

T_b : 混合平均温度

T_w : 伝熱面温度

U : 局所時間平均速度

U_m : 流路断面平均速度

U_{max} : 流路断面内最大速度

* 昭和62年11月3日 北陸信越支部北陸地方学術講演会において講演、原稿受付 昭和62年1月30日。

^{*1} 正員、山梨大学工学部 (〒400 甲府市武田4-3-11)。

^{*2} 正員、日本原子力研究所 (〒319-11 茨城県那珂郡東海村)。

^{*3} 正員、松下電器産業(株) (〒571 門真市松葉町)。

調節した。熱流束としては正味加熱量を求め、熱伝達係数としては次式を用いた。

$$\alpha = q / (T_w - T_b) \quad \cdots \cdots (1)$$

複数円柱のピッチ P_i は 57.5, 46.0, 38.3, 32.86 mm で、ピッチと直径の比 P_i/D はそれぞれ 2.875, 2.3, 1.915, 1.643 である。実験条件を表 2 に整理した。

なお伝熱実験における円柱設置位置は、流路入口からの距離が水力学的相当直径の 70 倍、加熱開始点からの距離で 18 倍である。流体力学的には十分発達しており、熱的にも片面加熱平行平板の熱的に発達した値に近い値を得たことがすでに確認されている⁽¹⁾。

さらに流れの可視化実験に使用した回流水槽中の試験部内の円柱設置位置付近における速度分布を、代表的に $Re=1000, 10000$ に対し図 4 に求めた。それぞれ層流の放物線分布、乱流の $1/7$ 乗則にほぼ一致しており、流動状態はほぼ発達しているといえる。したがって伝熱実験と流れの可視化実験を対応させることが可能である。

3. 実験結果および検討

3.1 温度分布 複数円柱の周囲の、液晶による

表 1 波長と温度の関係

Wave Length [nm]	Temperature [°C]	Wave Length [nm]	Temperature [°C]
477.0	34.9 ± 0.3	598.5	30.1 ± 0.2
500.0	33.0 ± 0.4	627.0	29.7 ± 0.0
524.0	32.1 ± 0.2	651.0	29.5 ± 0.1
537.5	31.5 ± 0.1	672.0	29.3 ± 0.1
548.5	31.2 ± 0.1	700.0	28.9 ± 0.2
561.5	30.7 ± 0.1	729.5	28.8 ± 0.2
577.0	30.5 ± 0.2	747.0	28.7 ± 0.2
589.0	30.2 ± 0.2

図 3 試験部の断面

色分布の代表例を図 5 に示す。比較的温度の高い部分は青く、低くなるにつれ黄色、茶色、焦茶になっている。円柱同士の干渉による流れの影響から生ずる局所伝熱面温度の特徴が一目で明らかである。この分布を定量的に表したのが図 6, 7 である。図 6 にはピッチを一定 ($P_i/D=2.3$) にして Re を 1000, 4000, 10000 と変化させた場合の、流路中央に設置された円柱を中心に、画像処理による等温分布が示されている。温度分布は、比較的ピッチが大きいため各円柱に対し独立した形で存在している。 Re が 1000 の場合、単一円柱による分布と同様、各円柱の直後によどみ域があり、高温領域が存在している。さらに、円柱間の後方約 $3D$ の位置に閉じた等温線が存在している。円柱前方は、いわゆる馬てい形渦による、温度こう配が大きく等温線が密な状態になっている。レイノルズ数が増大 ($Re=4000, 10000$) するにつれ、円柱直後よりむしろ円柱間に影響が現れ、比較的高温領域が相互に関係し合い下流側にのびている。

図 7 にはレイノルズ数を一定 ($Re=2000$) にして、ピッチを変化させた場合の等温線が示されている。ピッチが比較的大きい $P_i/D=2.875$ の場合、円柱周囲の等温線がコブラ形となり、コブラ形の首根にあたる部分に閉じた高温領域が広がる。 P_i/D が 2.3, 1.915 と

表 2 実験条件

Reynolds Number	Re	1000 ~ 15000
Heat Flux	q (W/m ²)	115.9 ~ 567.5
Distance Between Upper and Lower Plate	H (mm)	10
Pitch of Cylindrical rod	P_i (mm)	57.5, 46.38, 32.86
Diameter of Cylindrical rod	D (mm)	20

図 4 回流装置(流れの可視化)内の円柱設置付近の速度分布

減少するにつれ、コブラ形のくびれがなくなり、円柱間の閉じた高温領域も狭くなる。 $P_i/D=1.643$ に至っては、流路中央の円柱周囲の等温線は拡大した閉じた分布となり、円柱後方には、3箇所閉じた低温領域が存在する。さらに両隣の円柱周囲の等温線は収縮し

図5 液晶膜の色分布 ($P_i/D=1.643$, $Re=2000$)

(a) $Re=1000$

(b) $Re=4000$

(c) $Re=10000$

Flow direction

図6 等温分布 ($P_i/D=2.3$)

(a) $P_i/D=2.875$

(b) $P_i/D=2.3$

(c) $P_i/D=1.915$

(d) $P_i/D=1.643$

Flow direction

図7 等温分布 ($Re=2000$)

た形状となる。図には現れていないが、この拡大・収縮の等温線は交互に現れている。これから等温線の分解能は前報⁽¹⁾に比較して著しく改善されている。

3・2 局所ヌッセルト数 流路中央に設置された円柱を中心に、その中心線上の、流れ方向(X)および流れに直角方向($y:2$ 円柱間)の局所ヌッセルト数に

ついて検討する。

レイノルズ数を一定($Re=2000, 15000$)にして円柱のピッチを変化させた場合の流れ方向の局所ヌッセルト数を図8に示す。図8(a)は、円柱中心を零として、 X を負で表すことにより、円柱より上流側を示している。いずれのレイノルズ数においても P_i/D が

(a) 円柱の上流側

(b) 円柱の後流側

図8 流れ方向の中心線上の局所ヌッセルト数

(a) 円柱の上流側

(b) 円柱の後流側

図9 流れ方向の中心線上の局所ヌッセルト数

1.915 より 2.875 の範囲ではピッチによる差はあまりみられないが、 P_i/D が 1.643 では X/D が -0.7 付近より急激に上昇していることがわかる。これに対し、円柱の下流側〔図 8 (b)〕では $Re=2000$ において、円柱直後に極小値がみられ、その後、極大値をとり、発達した値に漸近する。この極小値の位置はピッチには依存していないようである。一方、 $Re=15000$ では、

明確な極小値は現れないものの、ピッチによる値の差は円柱の上流側よりは大きい。図 9 にピッチ ($P_i/D=2.3$) を一定にしてレイノルズ数をパラメータにした流れ方向の局所ヌッセルト数を示す。円柱の上流側〔図 9 (a)〕では、 Re が増大するにつれ、局所ヌッセルト数の流れ方向に対するこう配が著しく大きくなる。円柱の下流側〔図 9 (b)〕では、 $Re=1000$ において $X/$

図 10 円柱間の局所ヌッセルト数

図 11 円柱側面から $(P_i/2)$ までの局所ヌッセルト数 (両対数関係)

図 12 (y/D) の指数

$D=1.25$, $Re=2000$ において $X/D=1.0$ 付近で Nu 極小値をとり、その位置は Re の増大とともに円柱に近づく傾向を示している。2000 より高い Re の範囲では、本実験の精度内に極小値は現れなかった。

図 10 に、流れに直角方向の、2 円柱間の局所ヌッセルト数を流路中央の円柱を基準に示す。図 10(a) は、 Re を一定 ($Re=2000, 15000$) とし、ピッチをパラメータにして表されている。いずれのピッチに対しても円柱間の中央で極小値をとり、ほぼ対称な分布を示しており、流路中心上の円柱から極小点まで一つの漸近線によって減少しているのがわかる。極小値はピッチが減少するにつれ増大しており、この傾向は、定性的にはレイノルズ数に依存していない。図 10(b) には、 P_i/D を一定 ($P_i/D=2.3$) にし、 Re をパラメータにした分布が示されている。傾向は前述と同様であり、 Re による相違は Nu の値の差に現れている。

円柱間の局所ヌッセルト数はこれまでほとんど求められていないので定量的に表示することを試みた。円柱間では、分布が対称であるので、円柱側面付近から ($P_i/2$) までの Nu と y/D の関係を、代表的に $P_i/D=2.3$ に対し、両対数グラフで図 11 に表示した。これにより Nu が Re と (y/D) の指数関数 $Nu \sim Re^m (y/D)^n$ で表されていることが明らかになった。特に (y/D) の指数 n は Re と P_i/D の関数となり、 P_i/D をパラメータとして表すと図 12 となる。ただし n は負であるので図 12 では絶対値で表示されている。図 12 によると

n の絶対値は Re の 0.220 乗で変化している。したがって指数 n は次式となる。

$$n = -0.223 Re^{0.220} (P_i/D)^{-0.732} \dots\dots\dots (2)$$

一方、指数 m は Re に依存し、全体を整理し、円柱間の局所ヌッセルト数 Nu を求めると次式となる。

$Re < 2000$ に対し

$$Nu = 0.979 Re^{0.372} (y/D)^n \dots\dots\dots (3)$$

$Re > 2000$

$$Nu = 0.236 Re^{0.569} (y/D)^n \dots\dots\dots (4)$$

ただし、指数 n は式 (2) を使用する。

本実験式を実験値と比較すると $\pm 15\%$ 内に収まった。

3.3 流れの可視化 伝熱状態を流動状態と対応させるため流れの可視化の代表例を示す。

図 13 は間隔が最も広い $P_i/D=2.875$ の場合である。図 13(a) は流路の中心高さの位置にスリット光を照射し主流を撮影したものである。レイノルズ数は $Re=1000, 2000, 6000$ である。流れの経時的变化はなく、それぞれの円柱の周辺、後流にかけて相等しい流れを示しており、単一円柱の場合とほぼよく似ている。円柱間を通過する主流は、下流まで連続しており、それぞれの円柱ごとの流域を分割している。図 13(b) は、同じ P_i/D における下壁に残されたパール顔料の沈積模様であり、レイノルズ数は図 13(a) と同じであ

図 13 定常均等分布状態 ($P_i/D=2.875$)

図 14 定常不均等分布状態 ($P_i/D=1.915$)

図 15 非定常不均等分布状態 ($P_i/D=1.915$, $Re=3000$)

Regime	Flow Pattern	Symbol	Temperature Distribution
A	Steady and Regular Pattern	○	Even and Independent Distribution
B	Steady and Irregular Pattern	⊙	Slightly Uneven and Interferential Distribution
C	Unsteady and Irregular Pattern	●	Uneven and Interferential Distribution

図 16 伝熱と流れの領域分け

る。模様は各円柱ごとに独立した状態を表しており、熱伝達の分布とよく対応している。この状態を本論では定常均等分布状態 (A 領域) と呼ぶことにする。図 14 は、 $P_i/D=1.915$ の場合であり、 $Re=1000, 2000$ である。図 14(a) は主流を示したものであり、図 14(b) は下壁上の沈積模様である。図 14 によると、主流および沈積模様には円柱の後流で、干渉による、拡大した広いウエークと収縮した狭いウエークが生じているが、これらの配置は経時的に変化しない。この状態は定常不均等分布状態 (B 領域) と呼ぶことにする。

$P_i/D=1.915$ では、 Re が 3000 をこえると下壁上の沈積模様は明りょうでなくなるため、下壁に接するようにスリット光をあて、下壁に接する流線を可視化した。図 15 は、このようにして異なった瞬間に撮影した写真である。図 15 よりウエークが、不安定な干渉のため経時的にパターンを変えていることを見いだした。この状態を非定常不均等分布状態 (C 領域) と呼ぶことにする。

以上の流動状態を伝熱状態 (温度分布) と対応させたのが図 16 である。横軸を P_i/D 、縦軸を Re として領域分けを行ったものである。図 16 中の丸印は温度分布の状態を表している。図 6 (a) などのように、一つ

の条件ではどの円柱に対しても独立的に同様の分布を示している均等分布、図 7 (d) などのように、円柱のピッチあるいは Re により円柱の干渉による影響の現れた、明りょうな不均等分布、さらに、それらの中間的な、弱い不均等分布の 3 種類である。また、破線は流れの可視化領域を表し、図 16 中の A, B, C は前述の流動状態の分類を示している。そして、実線がそれらの境界である。図 16 によると流動状態の A 領域と温度分布の均等分布領域が、B, C 領域と不均等分布領域が対応していることがわかる。しかし、B 領域と C 領域の相違は定常性と非定常性であるが、温度分布には明確にその相違は現れなかった。今後、乱流構造も含めたこれらの機構については検討する予定である。

4. 結 論

平行平板流路内に、複数円柱を流れに直角に設置し、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) 温度分布の測定には感温液晶膜を利用した。色分布から温度への定量化には、人間の主観の入らない狭帯域干渉フィルタ法を使用し、かなり温度こう配の大きい範囲でも有効であることが明らかになった。

(2) 円柱の中心線上における円柱間の局所ヌッセルト数 Nu が、レイノルズ数 (Re) と無次元距離 (y/D) の指数関数形で表示された。なお (y/D) の指数は Re と無次元ピッチ (P_i/D) で表された。

(3) 比較的ピッチの大きい複数円柱周囲の伝熱流動は単一円柱の場合とほぼ同様の分布を示し、ピッチの小さい場合は円柱同士干渉し合い、ウエークおよび温度分布に広く拡大した領域と収縮した狭い領域が現れた。全体として円柱後の流動状態はピッチとレイノルズ数により大きく 3 種類の領域に分類された。

本研究は、昭和 60 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原子力研究所 河村 洋氏および菱田 誠氏にお世話になった。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) 一宮・ほか 3 名, 機論, 52-474, B (昭 61), 919.
- (2) Ward, J., *Proc. 6th Int. Heat Transf. Conf.*, HX-15 (1978), 273.
- (3) 相場・ほか 2 名, 第 19 回日本伝熱シンポジウム講演集, A 303 (昭 57), 88.
- (4) 熊田・ほか 3 名, 第 19 回日本伝熱シンポジウム講演集, A 304 (昭 57), 91.
- (5) 功刀・ほか 2 名, 機論, 53-485, B (昭 62), 241.

討 論

〔質問〕 佐 藤 豪〔金沢工業大学〕

無次元ですべてのデータを整理しておられるが、円柱のすきまなどは、絶対値がきいてくることはないか。別の表現でいうと、この無次元の整理の適用可能範囲はどうか。

〔回答〕 複数円柱が伝熱流動に及ぼす影響領域の絶対値そのものにはご指摘のように円柱すきまなどの寸法がきいてくる。しかし前報〔文献(1)〕で単一円柱の実験を行ったが、基準長さとして円柱径をとること

により伝熱流動の影響領域を相似的に評価できた。したがって円柱径で距離を無次元化するのは妥当性があると思う。ただ円柱間のすきまがごく狭く、あるいは流動状態が高速で圧縮性を考慮しなければならなくなると異なる。そういう意味で、本結果を適用する場合、円柱間のすきまの影響は本実験条件の Re 数範囲で、本実験条件(円柱のすきま 12.86 mm から 37.5 mm)より小さい場合よりむしろ大きい寸法に適用範囲は広がると思う。