

## 二次元衝突噴流中に弾性支持円柱を挿入した際の熱伝達機構に関する一考察 (熱伝達に及ぼす間欠性の影響)

羽田喜昭\*・倉澤英夫\*\*・土屋良明\*\*\*・中部主敬+・鈴木健二郎+

### A Consideration on Heat Transfer Mechanism of Two-Dimensional Impinging Jet Disturbed by an Elastically-Suspended Circular Cylinder (Effects of Intermittency on Heat Transfer)

Yoshiaki HANEDA, Hideo KURASAWA, Yoshiaki TSUCHIYA,  
Kazuyoshi NAKABE, Kenjiro SUZUKI

One of the circular cylinders with several diameters was elastically suspended with spring in the jet impingement region between a jet slot and a heat transfer target plate. The slot-to-plate distance  $H$  was kept constant to be 3 or 5 times of the slot width,  $h=15\text{mm}$ . The Reynolds number was fixed at 10,000, being exceptionally 5,000 in the case of flow visualization. Periodical swinging motion of the cylinder across the jet was observed because of the cylinder vibration self-induced with the jet flow. Time traces of velocity near the target plate were detected by hot-wire anemometer. Examination was carried out on the relation between the patterns of intermittency function defined by threshold levels of turbulence intensity and heat transfer near the stagnation region. The patterns could be classified into three ones in the case of  $H/h=3$ . Two kinds of types resulted in enhancement of heat transfer in the case of  $H/h=3$ . However, There was no remarkable difference of the pattern by the existence of circular cylinder insertion in the jet in the case of  $H/h=5$ .

キーワード：衝突噴流，自励振動，間欠関数，伝熱促進，円柱

### 1. 緒 言

衝突噴流熱伝達は、少ない供給流量で伝熱制御が容易なこと、また淀み点近傍で局所的に高い熱伝達係数が得られること<sup>1)</sup>から工業上幅広く応用されてきた。衝突噴流熱伝達の促進法に関しては、(1)噴流中への物体挿入<sup>2)~5)</sup>(2)噴流中への音波の入力や脈動噴流あるいは噴流の自励振動現象の利用<sup>6)~9)</sup>(3)斜め衝突噴流による衝突面への縦渦生成<sup>10)~12)</sup>などの研究が報告されている。しかし、噴流の流れに揺動を外部から積極的に与えた際の衝突熱伝達への影響に関する研究は従来なされていなかった。そこで、著者らは上述の(1)(2)を組み合わせた方法で二次元噴流

場に揺動を付加する手段として、弾性支持された円柱を噴流中に挿入することを試みた<sup>13)14)</sup>。既報では、渦との干渉によって自励振動する円柱の壁面熱伝達への影響<sup>13)</sup>あるいは円柱が自励振動する際の流れ場の定性的変化を可視化および衝突平板近傍の流速測定によって明らかにするとともに、かかる場合に誘起される流れの変動特性と平板の局所熱伝達率の変化の関係について検討した<sup>14)</sup>。

本研究では、既報<sup>14)</sup>で報告した二次元噴流中に弾性支持円柱を挿入し円柱が自励振動した際の衝突平板近傍の流れの間欠性<sup>14)</sup>についてさらに検討を加え、円柱の振動数の違いによる流れの間欠性の相違等について明らかにし、伝熱機構との関係について検討することを目的とする。

本研究の一部は、平成10年度教育先端設備費により行われた

\* 機械工学科助教授  
\*\* 機械工学科教授  
\*\*\* 信州大学工学部  
+ 京都大学大学院工学研究科  
原稿受付 1999年9月30日

おもな記号

|     |          |    |
|-----|----------|----|
| $A$ | 振動円柱の振幅  | mm |
| $D$ | 円柱直径     | mm |
| $f$ | 円柱の振動周波数 | Hz |

|               |   |
|---------------|---|
| $I(u', \tau)$ | 衝突平板近傍速度の間欠関数                                 |
| $Nu$          | 円柱挿入時の局所ヌセルト数                                 |
| $Nu_o$        | 円柱を挿入しない場合のよどみ点局所ヌセルト数                        |
| $Q$           | 全発熱量 W  |
| $q_{net}$     | 正味熱流束 W/m <sup>2</sup>                        |
| $Re$          | レイノルズ数 = $U_o h / \nu$                        |
| $S$           | 加熱面の表面積 m <sup>2</sup>                        |
| $T_b$         | 伝熱板裏面温度 K                                     |
| $T_o$         | 噴流温度 K  |
| $T_\infty$    | 周囲温度 K  |
| $t$           | 衝突平板の厚さ m                                     |
| $t_o$         | 計測時間 s  |
| $U_o$         | 噴流出口速度 m/s                                    |
| $u'_{\tau}$   | 間欠関数のための乱れ強さに関するしきい値 m/s                      |
| $V$           | 衝突平板近傍の速度信号 m/s                               |
| $x$           | 衝突平板上から噴流軸方向への距離 mm                           |
| $y$           | 衝突平板の幾何学的よどみ点から $x$ 軸に直交して噴出口の短辺方向への距離 mm     |
| $y_d$         | 噴流中心軸からの円柱の変位 mm                              |
| $\gamma$      | 間欠係数  |
| $\epsilon$    | ステンレス網箔の放射率                                   |
| $\lambda$     | 空気の熱伝導率 W/mK                                  |
| $\lambda_p$   | 伝熱板の熱伝導率 W/mK                                 |
| $\nu$         | 空気の動粘性係数 m <sup>2</sup> /s                    |
| $\sigma$      | ステファン・ボルツマン定数 W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> |
| $\tau$        | 時間 s  |

## 2. 実験装置および方法

図1に座標系を示す。空気は噴出口の幅  $h=15$  mm を短辺とするアスペクト比約33の長方形ノズルより水平方向に噴出される。噴出口と衝突平板との距離  $H$  は、噴出口の幅  $h$  に対し、 $H/h=3$  および  $5$  の2種類の位置とした。図2および図3に円柱の支持方法を示す。図2は直径が  $D=4$  mm の円柱の両端をコイルバネで支持した場合<sup>13)</sup>である。また、図3のアルミニウム製円管の直径は  $D=4, 6, 8$  mm ( $D/h=0.27, 0.4, 0.53$ )、長さが50mmであり、この円管中心部に幅2.5mm厚さ0.8mmのバネ鋼を挿入し、ノズル長辺と等しい幅で平行に設置した2枚の側板の一方に片持ちで支持した<sup>14)</sup>。なお円柱と平板とのすき間  $C$  は、衝突平板と円柱中心との間隔を一定値 (= 8 mm) にしたため、 $D=4, 6, 8$  mm の各円柱の場合ですき間はそれぞれ  $C=6, 5, 4$  mm となった。衝突平板近傍速度の測定お

び伝熱実験の際の  $U_o$  は10m/sであり噴出口の幅  $h$  に基づくレイノルズ数  $Re$  は  $0.9 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^4$  であった。

衝突平板のよどみ点近傍の局所熱伝達率については、既報<sup>13), 14)</sup>の結果を参照した。平板の局所ヌセルト数は次式で定義した。

$$Nu = \frac{q_{net} \times h}{\lambda(T_w - T_o)} \dots \dots \dots (1)$$

$$q_{net} = \frac{Q}{S} - q_r - q_c \dots \dots \dots (2)$$

$$q_c = \frac{\lambda_p(T_w - T_b)}{t} \dots \dots \dots (3)$$

$$q_r = \epsilon \sigma(T_w^4 - T_\infty^4) \dots \dots \dots (4)$$

また、流れの可視化は、スモークワイヤ法で発生した煙にレーザーシート光を照射し高速カメラで撮影した。その際の噴流出口速度  $U_o$  は写真撮影条件を考慮して5 m/sとした。

振動円柱の変位の測定は、歪みゲージと動歪み計によって行った。また、円柱の変位と衝突平板近傍の速度の変化を対応付けるため、衝突平板の2 mm上空にI型熱線プローブを固定し、噴流中心軸上から  $y$  方向に  $0 \leq y/h \leq 2$  の範囲でプローブを移動させて各位置での熱線流速計出力と動歪み計出力をデジタルレコーダならびに光磁気ディスクに収録し必要に応じてパーソナルコンピュータでデータ処理した。

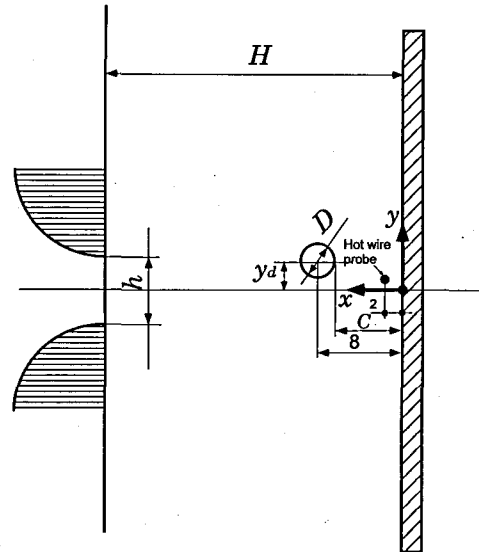


図1 座標系

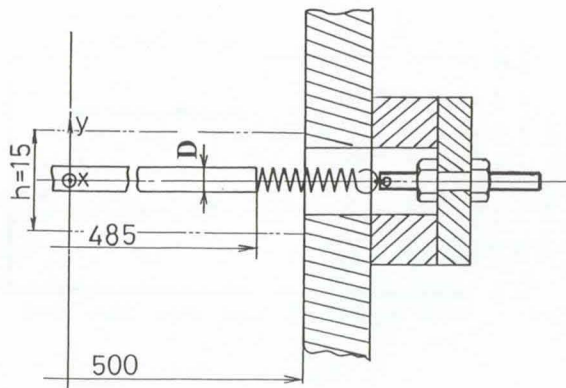


図2 コイルバネによる円柱の支持方法

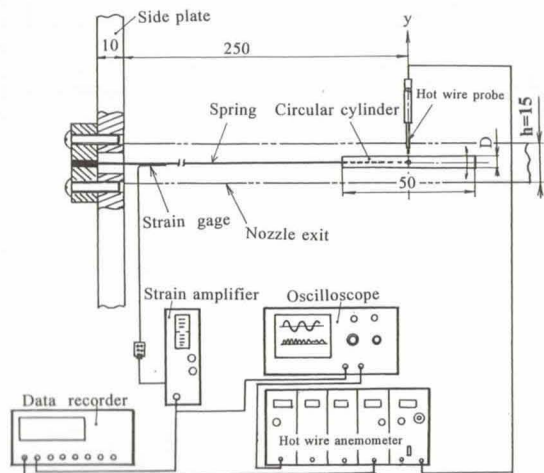


図3 板バネによる円柱の支持方法と円柱の変位測定法の概要

### 3. 実験結果および考察

表1および表2にコイルバネの寸法と円柱の振動特性を示す。D=4 mmの場合に注目するとコイルバネによって円柱両端を支持した場合に比べ、板バネによる片持ち支持の場合は振幅が大きく、振動数が約1/5~1/7と小さくなっている。以下の説明では円柱両端をコイルバネで支持した場合には、No. 1~No. 4 (D=4 mm) とし、円柱を片持ちで支持した場合には、D=4, 6, 8 mmと呼ぶことにする。

表1 コイルバネの寸法と振動円柱の特性 (D=4 mm)

| Spring No. | Diam. of wire(mm) | Free length of spring(mm) | 2×A (mm) |     | f(Hz) |      |
|------------|-------------------|---------------------------|----------|-----|-------|------|
|            |                   |                           | H/h      | H/h | H/h   | H/h  |
|            |                   |                           | 3        | 5   | 3     | 5    |
| No. 1      | 0.25              | 12                        | 8        | 7   | 27    | 28   |
| No. 2      | 0.40              | 10                        | 2        | 3   | 29    | 31   |
| No. 3      | 0.29              | 9                         | 3        | 7   | 25    | 25   |
| No. 4      | 0.50              | 12                        | 3        | 7   | 37.5  | 37.5 |

表2 片持ち支持の振動円柱の特性

| D(mm) | H/h=3   |       | H/h=5   |       |
|-------|---------|-------|---------|-------|
|       | 2×A(mm) | f(Hz) | 2×A(mm) | f(Hz) |
| 4     | 6       | 5.3   | 12      | 5.3   |
| 6     | 16      | 4.2   | 18      | 4.2   |
| 8     | 30      | 3.5   | 30      | 3.5   |

#### 3-1 円柱振動時の流れ場の変化

図4は、D=4 mmの円柱を挿入した際の流れを可視化した様子である。円柱は上方から下方へ移動している瞬間であり、円柱の後方と衝突平板との間に巻き込む流れが観察される。円柱中心が噴流軸上 (y/h=0) を横切る直後から、この巻き込み流れの方向は反転し上方から下方に流れることが観察された。

流れの間欠性について検討する前に、振動円柱と流れ場の定性的関係を明らかにするため、図5(a)(b)は、既報<sup>14)</sup>ですでに報告したD=4, 6, 8 mmの円柱を片持ちバネで支持した際の各円柱の相対変位 y<sub>d</sub>/Dと衝突平板の幾何学的よどみ点近傍の相対速度 V/U<sub>0</sub>の時間波形を対比して示す。いずれの場合も円柱が噴流中心軸上 (y/h=0) 付近に位置したとき、流速は極小となりその前後で極大となる。この極小値は、流れの可視化結果より噴流が噴流中心軸を横切る円柱に遮られて左右に対称に分岐しているために生じたものであり、この前後で衝突平板のよどみ点近傍の流れ方向が左右に逆転している。衝突平板をH/h=3に設置し、かつ小さい直径D=4 mmの円柱を挿入した場合には、円柱の変位が最大/最小になる時ともに他の場合に比べて大きな流速が得られている。なお、No. 1~No. 4 (D=4 mm) の波形は、図6に例示するように円柱の振動数が高いため、周期性がより早くなっている。

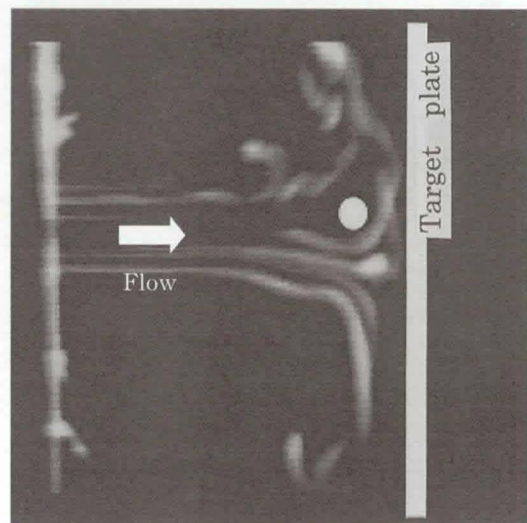
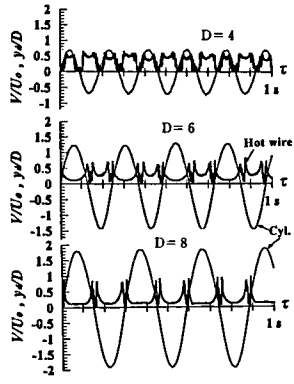
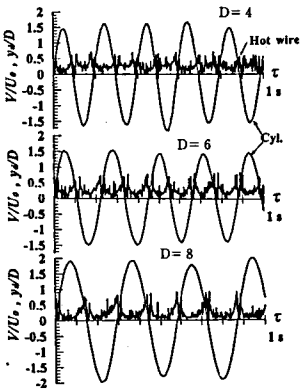


図4 流れの可視化 (H/h=3, D=4 mm)



(a)  $H/h = 3$



(b)  $H/h = 5$

図5 規格化した衝突平板近傍の流速と円柱変位の時間変化

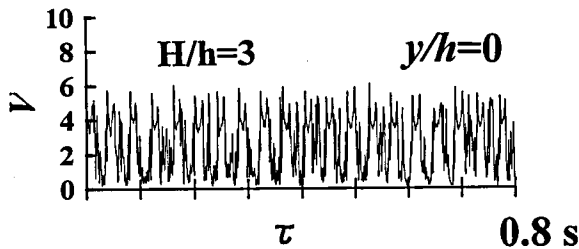


図6  $H/h = 3$ での衝突平板近傍の流速波形例 (No. 3,  $D = 4$  mm)

3-2 よどみ点近傍の伝熱特性

衝突平板位置が $H/h = 3$ および5の場合の、円柱振動時の幾何学的よどみ点局所ヌセルト数 $Nu$ と円柱を挿入しない際のよどみ点局所ヌセルト数 $Nu_0$ との比を図7に示す。 $H/h = 3$ では、 $D = 8$  mmの場合を除いて円柱が振動することによる伝熱促進効果が約10%~18%認められる。それに対し、 $H/h = 5$ ではNo. 3とNo. 4で約10%の伝熱促進効果が認められるが、その他の場合には促進効果が小さく条件によってはむしろヌセルト数が減少している場合もある。

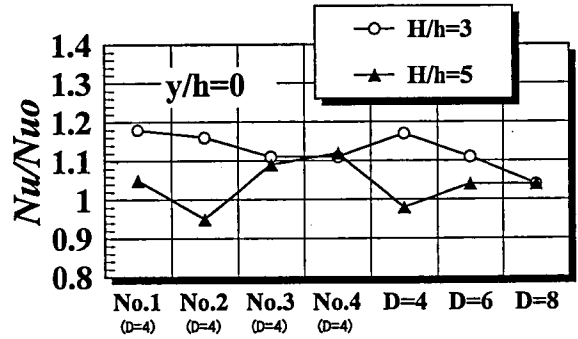
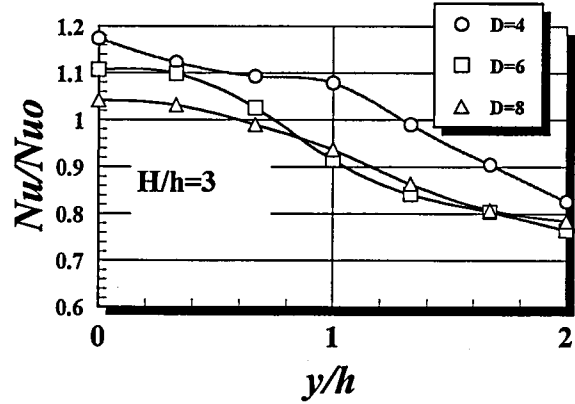
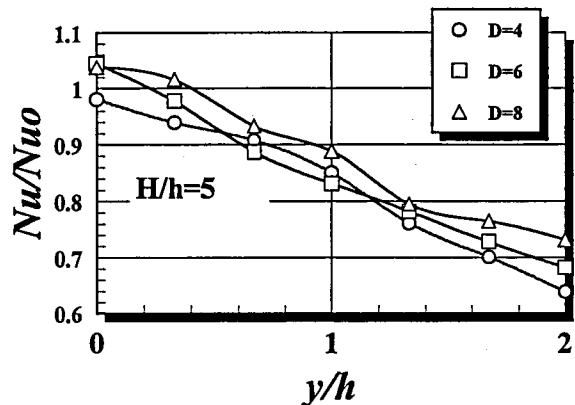


図7 よどみ点局所ヌセルト数の促進割合



(a)  $H/h = 3$



(b)  $H/h = 5$

図8 よどみ点近傍の局所ヌセルト数分布 ( $0 \leq y/h \leq 2$ )

図8(a)(b)には、 $D = 4, 6, 8$  mmの場合における  $0 \leq y/h \leq 2$  の範囲での $Nu_0$ に対する $Nu$ 分布の変化を示す。 $H/h = 3$ の $D = 4$ および6 mmの場合には、それぞれ  $0 \leq y/h \leq 1$  および  $0 \leq y/h \leq 0.33$  の範囲で約9%以上の伝熱促進が認められ幾何学的よどみ点近傍の局所ヌセルト数分布は平坦でかつ高い値となっている。この分布形は振動数が大きいNo. 1~No. 4の場合には、衝突平板位置が $H/h = 3$ および5の両方の場合に認められた<sup>13)</sup>が、振動数が小さい場合の $H/h = 5$ では生じていない(図

8(b)).

3-3 熱伝達に及ぼす流れの間欠性の影響

図9(a)(b)に例示するような二種類の速度変動波形に対し、衝突平板の熱伝達に寄与<sup>15)</sup>すると考えられる速度変動の大きな流れが時間的に変化する様子を明らかにするため、次のような間欠関数 $I(u'_\tau, \tau)$ を定義する。ただし、 $u'_\tau$ はよどみ点の局所ヌセルト数が極大となるノズル出口-衝突平板間距離に近い $H/h=7$ に対応する位置における自由噴流の噴流中心軸上速度のr.m.s値である。

$$I(u'_\tau, \tau) = \begin{cases} 1 & (|V - V_{mean}| - u'_\tau \geq 0) \\ 0 & (|V - V_{mean}| - u'_\tau < 0) \end{cases} \dots\dots\dots(5)$$

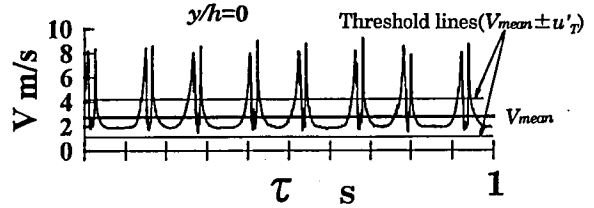
また、上述の $I(u'_\tau, \tau)$ を用いて次式から間欠係数 $\gamma$ を求めた。

$$\gamma = \frac{1}{t_0} \sum_{i=1}^n I_i(u'_\tau, \tau) \Delta\tau \dots\dots\dots(6)$$

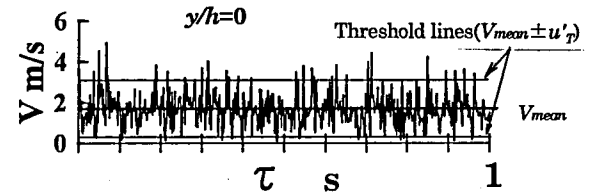
ここで、 $t_0$ は全計測時間を、また $\Delta\tau$ はサンプリング時間間隔、 $n$ はサンプリングデータ総数を表す。図10(a)~(d)および図11(a)~(d)は、それぞれ衝突距離が $H/h=3$ および5での幾何学的よどみ点近傍 $0 \leq y/h \leq 2$ での間欠関数 $I(u'_\tau, \tau)$ の時間履歴である。 $H/h=3$ (図10)では、円柱を挿入しない場合 $0 \leq y/h \leq 0.67$ ではほとんど間欠関数は0であるが、その後よどみ点から離れるにつれランダム的に $I(u'_\tau, \tau)$ は0, 1を繰り返すようになる。円柱を挿入することによる $0 \leq y/h \leq 0.67$ の範囲での間欠関数の時間的な変化は、円柱径の最も小さい $D/h=0.27$ の場合には、間欠関数の値が比較的長時間0になった後、ある程度の時間ランダムに0, 1を繰り返すという変化パターンが見て取れる。この場合の $Nu$ 数は前節で示したとおり、円柱を挿入しない場合に比べてその増加が顕著であり(図8参照)、伝熱促進に及ぼす乱れ特性には速度変動量の間欠性が寄与していると考えられる。したがって、他の円柱の場合と比べて、円柱の振動振幅が小さく、振動数も大きい $D/h=0.27$ の場合(表2参照)に、界面更新頻度<sup>15)</sup>が伝熱特性に影響している可能性がある。

円柱径が大きくなると、ランダムに0, 1を繰り返すパターンが顕著でなく、間欠関数の変化に円柱の振動に対応する明確な周期性が強まるが、円柱を挿入しない場合の熱伝達との違いは少ない。

一方、図11の $H/h=5$ の場合を見ると、円柱径に依存せず間欠関数 $I(u'_\tau, \tau)$ のパターンが類似しており、時間的によりランダム化している。しかし、この場合にも前節で示したとおり $Nu$ 分布に、円柱挿入の有無や円柱径による、顕著な相違はあまり見



(a) 振動円柱を挿入した場合 ( $H/h=3$ )



(b) 円柱無しの場合 ( $H/h=5$ )

図9 衝突平板近傍の流速波形例

られず、頻度分布形が及ぼす伝熱特性への影響は小さい。

図12(a)(b)には $H/h=3, 5$ での $D=4$  mmの円柱両端をコイルバネで支持した際の流れの間欠関数の時間履歴を例示する。 $H/h=3$ での間欠関数の時間変化は図10(b) ( $D=4$  mm)の $y/h=0$ の場合に比べよりランダム的な変化をしている。しかし、 $H/h=5$ では図11の間欠関数の時間的な変化パターンと大きな違いは認められない。

図13(a)(b)には、 $H/h=3, 5$ における(6)式より求めた間欠係数を示す。円柱が振動することで流れに揺動が付加され間欠係数は増加するが、この値の大小とヌセルト数との間には強い相関は認められない。

3-4 間欠関数のパターンと流れ場の関係

$H/h=3$ の間欠関数の時間履歴は、図14のように3パターンに分類できる。パターンIは周期的に $I(u'_\tau, \tau)$ が0, 1を繰り返すが、0の時間が長く1となる回数が少ない場合である。パターンIIの間欠関数も周期的であるが比較的長時間0となった後ランダムに0, 1を繰り返す場合である。パターンIIIは、比較的ランダムに0, 1を繰り返す場合である。これらのパターンと流れ場の関係について考察することとする。流れ場を模式的に示すと図15のようになっていると考えられる。円柱が噴流軸より上方に位置した場合、円柱の後方に巻き込む流れが生じるとともに、円柱からはく離流が生じていると考えられる。また、ノズルから発生した渦も平板に衝突しているが、この渦が噴流中心軸上付近まで到達しているかによって間欠関数のパターンに違いが生じている。まず、衝突平板位置が $H/h=3$ では、自由噴流のポテンシャルコア領域に対応するため、図

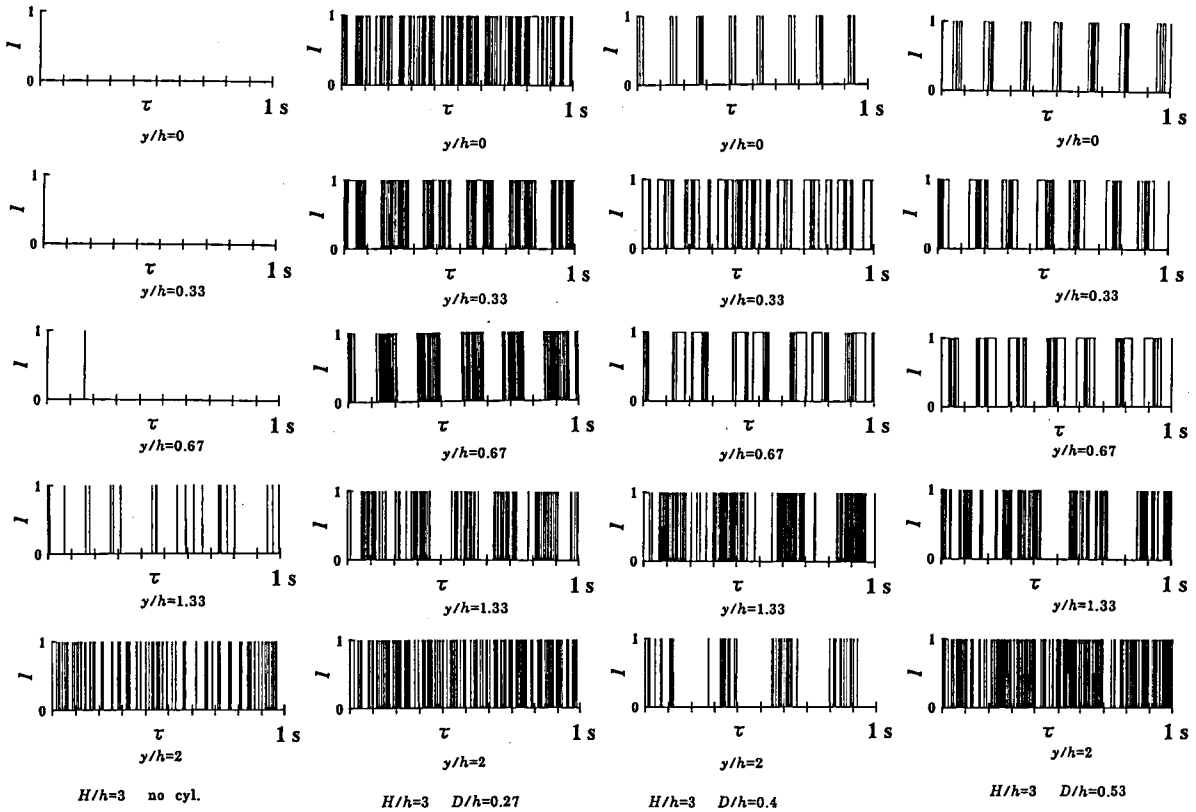


図10 間欠関数の時間履歴 ( $H/h = 3$ )

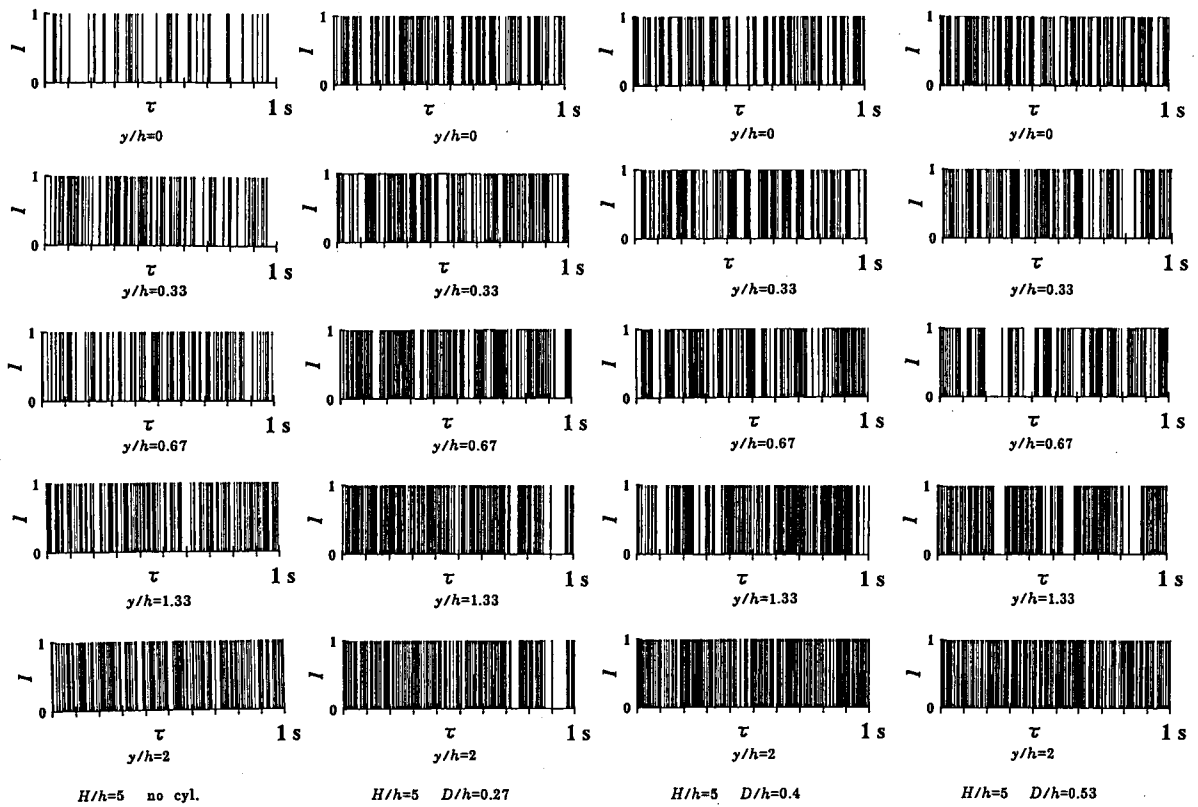
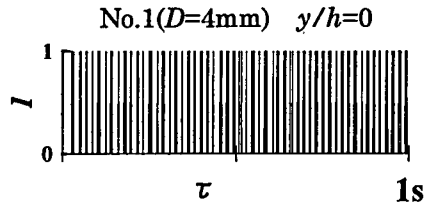
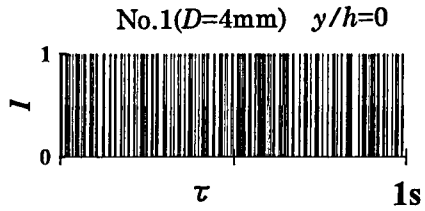


図11 間欠関数の時間履歴 ( $H/h = 5$ )

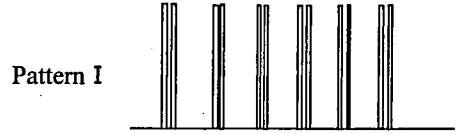


(a)  $H/h=3$

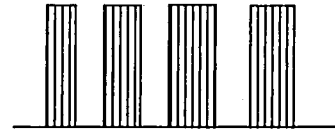


(b)  $H/h=5$

図12 間欠関数の時間履歴例(円柱両端パネ支持の場合)



Pattern II



Pattern III

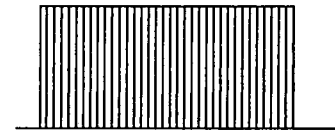
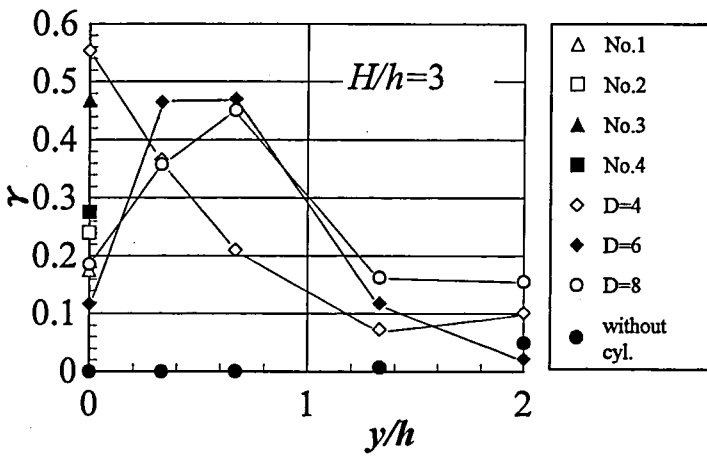
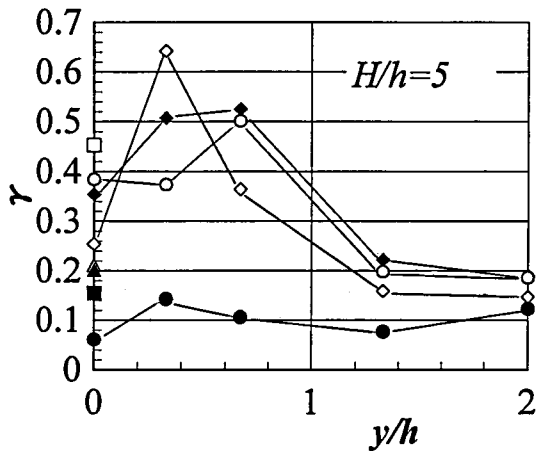


図14 間欠関数のパターン分類



(a)  $H/h=3$



(b)  $H/h=5$

図13 間欠係数分布

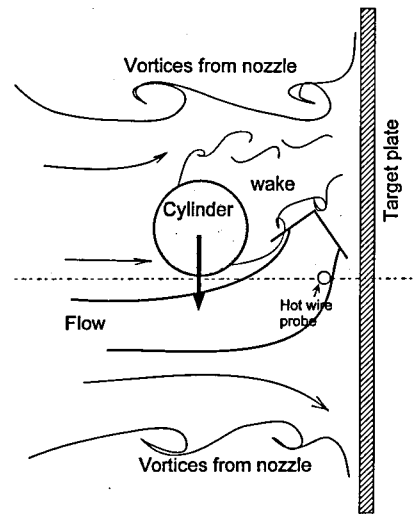


図15 流れ場の概念図

15のようにノズル出口から発生した渦は噴流中心軸上には達していない。そのため円柱を挿入しない際の衝突平板よどみ点近傍の流れは層流であり、この場合間欠関数はほぼ0となる(図10(a))。円柱の振

動周波数が小さく、振幅が大きい場合 ( $D=6, 8$  mm) には、円柱が噴流中心軸上付近に位置した場合のみ、円柱後方にまきこむ加速流が生じ、円柱が噴流中心軸から大きくずれた場合には、熱線流速計のプローブ位置での速度が小さく、円柱からの後流の影響も小さいため図9(a)のような速度波形となり、その結果間欠関数はパターンIのようになる。円柱の振動数および振幅が小さい場合 ( $D=4$  mm)、衝突平板のよどみ点近傍には、円柱後方に巻き込む加速流と円柱から発生したはく離流の両方が連続的に存在するため、大きい乱れが付加された加速流となる(図5(a),  $D=4$ )。そのため、間欠関数はパターンIIのようになる。円柱の振動数が大きくなると、衝突平板近傍の流れ方向が円柱の振動数の増加とともに頻繁に変化するため、間欠関数はパターンIIIのようになる。パターンIIIの間欠関数は後述する  $H/h=5$  の円柱を挿入しない場合のパターンと類

似している。

次に  $H/h=5$  では、ノズルから生じた渦が噴流中心軸上付近に達し流れは乱流のため、円柱を挿入しない場合でもパターンⅢのような間欠関数となる。円柱が振動することで、 $H/h=3$  の場合と同様に円柱後方に巻き込む加速流が生じる。しかし、衝突平板への接近流が乱流となっているため、間欠関数の分布は、円柱径や振動数によらずランダムなパターンⅢのようになり円柱を挿入しない場合との間欠関数のパターンの定性的違いが小さい。そのため、 $H/h=3$  の場合に比べ円柱挿入による熱伝達への効果は小さいと考えられる。

#### 4. 結 言

二次元噴流中に弾性支持円柱を挿入した際の衝突平板近傍の流れの時間波形を検出し、熱伝達に及ぼす式(5)で定義した間欠関数の影響について検討した。その結果、間欠関数が0, 1となるパターンとしては3種類に分類できた。衝突平板位置が自由噴流のポテンシャルコア領域に対応する  $H/h=3$  では、間欠関数のパターンⅡ, Ⅲの場合に伝熱促進に効果的である。しかし、 $H/h=5$  では、円柱挿入の有無による間欠関数のパターンの相違は小さく熱伝達への影響が小さいと推察された。

本研究では、I型熱線プローブで衝突平板近傍の流れの速さを検出したため、流れの速度成分が検出できず流れ方向も明らかではない。そのため、伝熱機構を解明する上では、流速の方向成分やその相関を検討する必要があるこれらについては今後の課題である。

謝辞

本研究の一部は、平成10年度教育先端設備費により行われた。関係各位に深く感謝する。

#### 参考文献

- 1) Gardon, R. and Akfirat, J.C., Trans. ASME, J. Heat Transf., 88 (1966), 101-108.
- 2) Khan, A.M.M., 大西, 笠木, 平田, 川畑, 第17回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1980), 40-42.
- 3) 片岡, 大村, 濱野, 第28回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1991), 70-72.
- 4) Khan, A.M.M., Kasagi, N., Hirata, M. and Nisiwaki, N., 7th Int. Heat transfer Conf., 3 (1982), 363-368.
- 5) 栗間, 宮本, 原田, 機論 54-503, B(1988), 1736-1743.
- 6) Liu, T. and Sullivan, J.P., Int. J. Heat Mass Transf., 39-17 (1996), 3695-3706.
- 7) Zumbrennen, D.A. and Aziz, M., Trans. ASME, J. Heat Transf., 115 (1993), 91-98.
- 8) Azevedo, L.F.A., Webb, B.W. and QuEiroz, M., Experimental Thermal and Fluid Science, 8 (1994), 206-213.
- 9) Page, R.H., Chinnoch, P.S. and Seyed-Yagoobi, J., J. Thermophysics and heat transf., 10-2 (1996), 380-382.
- 10) Nakabe, K., Inaoka, K., Ai, T. and Suzuki, K., Energy Conversions and Managements, Vol. 38, No. 10-13 (1997), 1145-1153.
- 11) 中部, 金, 東尾, 陳, 稲岡, 鈴木, 機論, 64-619, B (1998), 181-188.
- 12) Nakabe, K., Suzuki, K., Inaoka, K., Higashio, A., Acton, J.S. and Chen, W., Int. J. Heat and Fluid Flow, 19 (1998), 573-581.
- 13) Haneda, Y., Tsuchiya, Y., Nakabe, K. and Suzuki, K., Int. J. Heat and Fluid Flow, 9 (1998), 115-124.
- 14) 羽田, 土屋, 倉澤, 中部, 鈴木, 機論掲載予定
- 15) Kataoka, K., Suguro, M., Degawa, H., Maruo, K. and Mihata, I., Int. J. Heat Mass Transf., 30-3 (1987), 559-567.