

小円柱設置による衝突噴流熱伝達の制御*

羽田喜昭*¹ 倉澤英夫*² 土屋良明*³ 中部主敬*⁴ 鈴木健二郎*⁵

Control of an Impinging Jet Heat Transfer with a Small Circular Cylinder

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

A two-dimensional jet impinged on a target plate vertically placed for the jet axis. The target plate was mounted at a distance from the jet exit of 3 times the jet slot width. A circular cylinder was installed on the jet central plane between the target plate and the jet exit. Characteristics of flow field and heat transfer in changing the diameters and the locations of the circular cylinder were examined. The maximum local Nusselt number attained around the stagnation point was augmented by about 76% and the average Nusselt number increased by about 30% compared to the ones for normal impinging jet without the insertion of a cylinder.

キーワード：衝突噴流, 熱伝達, 円柱, 圧力, 流れの可視化

1. 諸言

衝突噴流は局所的な加熱・冷却の特性に優れているため工業上幅広く利用されてきた。そのため衝突噴流熱伝達の促進・制御に関する研究は多数報告^{(1)~(4)}されている。しかし、衝突噴流中に挿入した弾性支持円柱を自励振動させる場合の熱伝達特性への影響についての報告は行われていなかったため、既報⁽⁵⁾⁽⁶⁾ではそれに関する報告を行った。その結果、円柱を振動させることによって熱伝達促進・制御が可能であるという指針を得た。しかし、熱伝達を制御するうえで有効な物体挿入位置や挿入物体の大きさについての検討は不十分であり、それらについてさらに詳細な検討が必要と思われる。

そこで、円柱を振動させた場合の詳細な熱伝達特性を検討する前に、本報告では衝突噴流中に円柱を固定支持した場合に着目することにし、ここでは円柱直径および円柱挿入位置の変更に伴う衝突平板熱伝達および流れ場の変化について検討した。

2. 実験装置および方法

図1に座標系を示す。噴出口短辺 h が 15mm であり、アスペクト比 33 の長方形噴出口より空気が水平方向に噴出する。噴出口の長辺と等しい間隔で噴流中心面に垂直で互いに平行姿勢で設置した 2 枚の側板で噴流を挟み、衝突平板をその側板に垂直に設置した。ここでは、噴出口と衝突平板との距離を $H=3h$ とした。衝突平板と噴流中心軸との交点を座標原点とし、その点から噴出口に向かう水平軸を x 軸とし、座標原点から x 軸に直交して噴出口短辺方向に y 軸をとる。噴流中心面上に設置した円柱の直径 D は、2, 4, 6mm の 3 種類であり、円柱と衝突平板のすき間を C とする。すき間 C を $2\text{mm} \leq C \leq 33\text{mm}$ の範囲

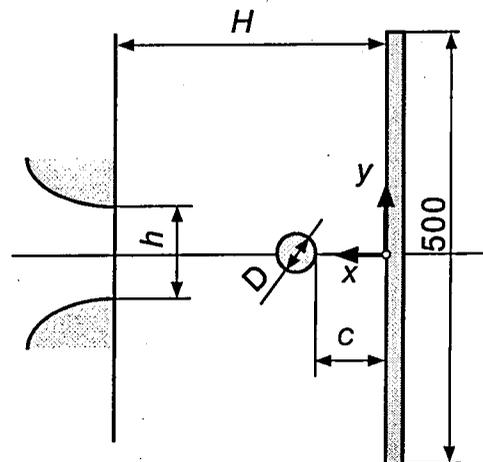


Fig. 1 Coordinate system

* 本研究の一部は平成 13 年度長野高専特別研究経費の助成を受けて行われた。

*¹ 機械工学科 助教授

*² 機械工学科 教授

*³ 信州大学工学部 教授

*⁴ 大阪府立大学工学部 教授

*⁵ 京都大学大学院 教授

で変更した場合の衝突平板面上の変動圧力および局所熱伝達率を測定した。圧力測定孔の直径は0.5mm、深さは5mmであり、衝突平板裏面側より取り付けられた圧力センサーを用いて衝突平板面上の変動圧力を $-7 \leq y/h \leq 7$ にわたって5mm~15mm間隔で測定した。変動圧力のサンプリング周波数を5KHzとし、データ数を20000としてデータレコーダーに収録し、パーソナルコンピューターを用いてデータ処理した。

流れの可視化はスモークワイヤー法で行った。

熱伝達測定用衝突平板は、 $500 \times 500 \text{mm}^2$ 、厚さ15mmの亚克力樹脂製であり、裏側には厚さ20mmの断熱材が施してある。その表面中央部に幅12mm、厚さ $20 \mu\text{m}$ のステンレス鋼箔7枚を約1mmの間隔をあけてy軸に平行になるように貼り、それを電気的に直列に接続した。中央部のステンレス鋼箔裏面に接するように表面温度 T_w 測定用直径0.1mmのクロメル・アルメル熱電対がy軸に沿って $-10 \leq y/h \leq 10$ の範囲に合計61対固着されている。また、衝突平板裏面の同一列上に同種同径の熱電対を25対固着し、それらから得られる平板裏面温度分布を平板厚さ方向への熱伝導損失の評価に用いた。ステンレス鋼箔を通電加熱した場合の総発熱量をステンレス鋼表面積で除し、その値から各測定位置における平板厚さ方向への熱伝導損失および放射損失を引いた正味熱流束を q_{net} とし、局所ヌセルト数を

$$Nu = q_{net} \cdot h / \lambda (T_w - T_o)$$

で定義する。 T_o 、 λ は噴流温度および温度 $(T_w + T_o)/2$ の空気の熱伝導率である。熱伝達測定の不確かさは6.5% (95%包括度)である。

なお、噴流噴出速度 U_o は衝突平板面の圧力測定および熱伝達測定の場合には10m/sであり、流れの可視化の場合には5m/sである。 U_o および h 基準のレイノルズ数 Re は、それぞれ9500および4800である。

3. 実験結果および考察

3-1 流れ場特性

円柱と平板のすき間比 C/D の値を変更した場合の衝突平板面上の時間平均圧力を $D=6\text{mm}$ の場合について図2に例示する。図2中には衝突平板面上圧力 P を円柱を挿入しない場合も含め、 $(P - P_\infty) / (P_o - P_\infty)$ の形で示してある。ここで、 P_o は円柱を挿入しない場合の衝突平板の幾何学的原点における時間平均圧力であり、 P_∞ は大気圧である。円柱を挿入

した場合には衝突平板面上に平均圧力の極大が生じるのは、円柱表面から生じたはく離流が平板に衝突するためと考えられる。円柱と平板のすき間比 C/D 値の増大に伴い $y/h=0$ 付近の圧力が減少し、圧力の極大値位置は $y/h=0$ から離れることから推察すると、円柱と平板のすき間が増大するとそのはく離流の広がりが増大すると考えられる。

図2と同一条件における衝突平板面上の変動圧力のrms値 $\sqrt{p'^2}$ を $(P_o - P_\infty)$ で除した形で $D=6\text{mm}$ の場合を図3に例示する。 $|y/h| \leq 2$ で認められる $\sqrt{p'^2} / (P_o - P_\infty)$ の極大値位置は、図2に示した衝突平板面上の円柱を挿入した場合の時間平均圧力の極大値位置とほぼ等しく、変動圧力の極大値はすき間比 C/D 値が増大するにつれ増大する。し

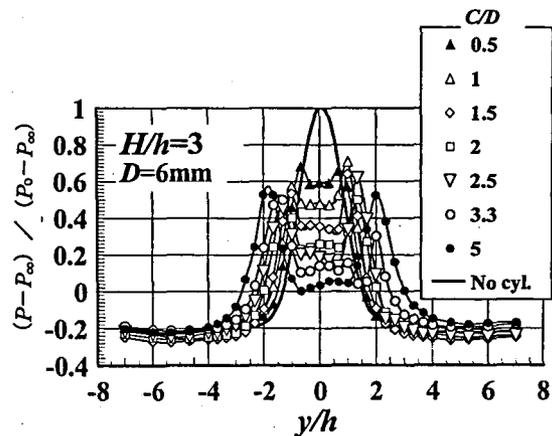


Fig. 2 Distributions of mean pressure

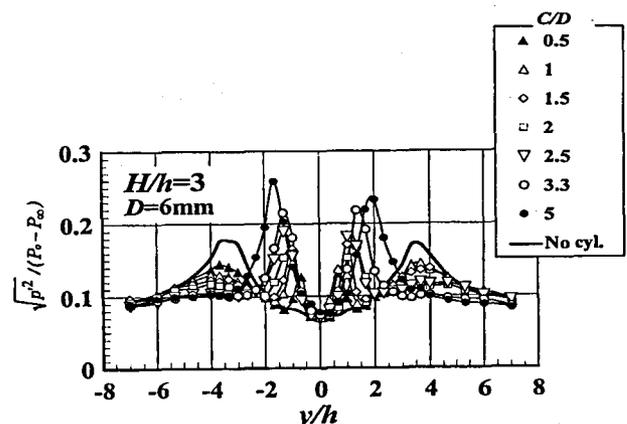


Fig. 3 Distributions of fluctuating pressure

3-2 熱伝達特性

$D=2, 4, 6\text{mm}$ のそれぞれの円柱を衝突噴流中に挿入し、すき間比 C/D 値を変更した場合の衝突平板局所ヌセルト数 Nu の分布を検討した。 $D=2, 6\text{mm}$ の場合を図 5(a)(b)に例示する。 図 5 中には円柱を挿入しない場合に得られた局所ヌセルト数を太い実線で併記してある。 いずれの円柱を挿入した場合とも $y/h=0$ 付近では Nu 値が円柱を挿入しない場合の $y/h=0$ でのその値に比べて著しく減少するものの、その付近と衝突平板面上の downstream 領域を除く領域では Nu 値の増大が認められる。 $|y/h| \leq 2$ で得られる Nu の極大値が最大になる条件は $D=6\text{mm}$, $C/D=5$ であり、円柱を挿入しない場合の $y/h=0$ における局所ヌセルト数に比べて約 76% 増大している。 この増大比は既報⁽⁵⁾⁽⁶⁾の結果より大きく、また円柱群⁽³⁾によって得られた結果ともほぼ同じ増大割合である。 Nu

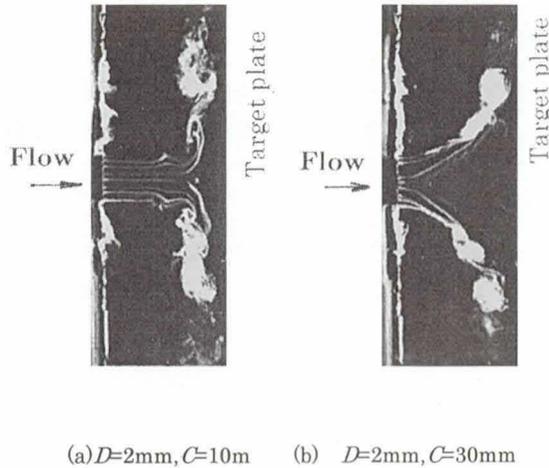
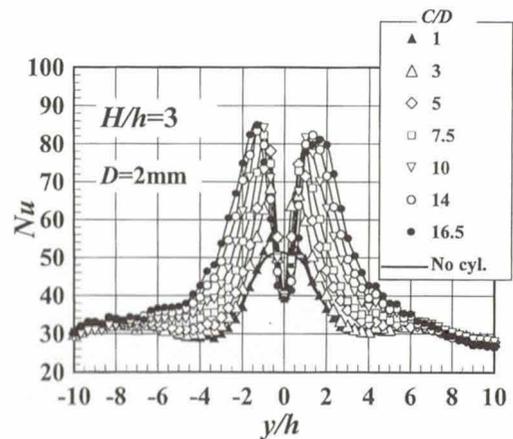


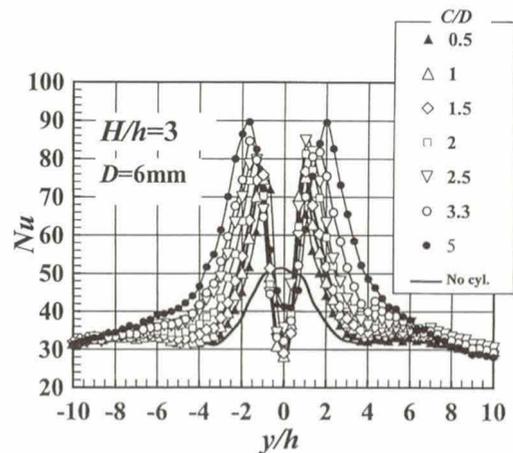
Fig. 4 Flow visualization

かし、円柱を挿入しない場合において $y/h=\pm 3.5$ 付近で認められる変動圧力の極大は、 C/D 値の増大につれてその値が減少し、 $C/D=5$ の場合にはその極大が存在せず、 C/D 値によって変動圧力の分布形が定性的に異なる。

円柱直径および円柱と平板のすき間の違いによる流れの違いを検討するため、 $D=2, 4, 6\text{mm}$ の各円柱を $C=10, 20, 30\text{mm}$ の位置にそれぞれ置いた場合の流れの可視化を行った。 図 4 (a)(b)には $D=2\text{mm}$ ($D/h=0.13$) の円柱を挿入した場合の流れの可視化結果を例示する。 $C=10\text{mm}$ ($C/D=5$) の場合には、噴流が平板に衝突する付近までその幅の増大は認められず円柱挿入による噴流幅への影響は小さい。 それに対して $C=30\text{mm}$ ($C/D=15$) の場合には円柱に衝突した流れが対称的に分岐し噴流幅が増大している。 また、円柱表面から生じたはく離流が噴流せん断層側に向かって巻き込まれるように見てとれ、その噴流せん断層付近には大規模な渦が認められる。 図 3 に示した変動圧力分布形の C 値による定性的相違は流れ様式の相違に起因すると考えられる。 すなわち C 値が小さい場合には円柱から生じたはく離流が平板に衝突する領域と噴流せん断層が平板に衝突後大規模渦になる領域で衝突平板面上の変動圧力が極大になるのに対し、 C 値が大きい場合にはその両領域が衝突平板面上でほぼ同一となるため、その付近で変動圧力が極大になると考えられる。



(a) $D=2\text{mm}$



(b) $D=6\text{mm}$

Fig. 5 Distributions of local Nusselt number

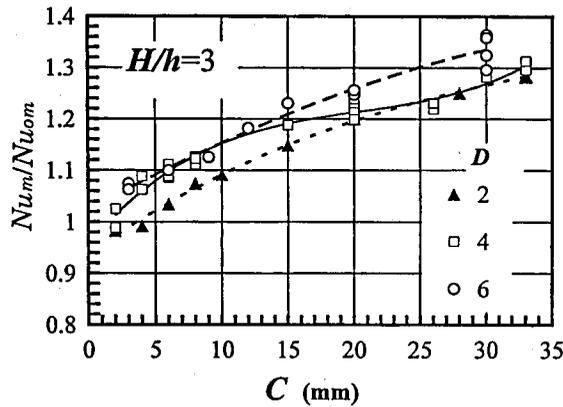


Fig. 6 Distributions of mean Nusselt number with C ($-10 \leq y/h \leq 10$).

の極大値位置は、衝突平板面上の平均圧力の極大値位置および $|y/h| \leq 2$ での変動圧力の極大値位置とほぼ一致し、円柱表面からはく離れた流れが衝突する領域で Nu が極大になると考えられる。

図6にはすき間 C 値を変更した場合の $-10 \leq y/h \leq 10$ の領域における空間平均ヌセルト数 Nu_m の変化を、円柱を挿入しない場合の同一領域における平均ヌセルト数 Nu_{om} に対する比として表してある。円柱を噴出口近くに設置した場合にはいずれの円柱を挿入しても平均ヌセルト数が約30%あるいはそれ以上増大している。これは $y/h=0$ 付近では局所ヌセルト数 Nu が減少するものの、その付近を除く $-8 \leq y/h \leq 8$ の領域で局所ヌセルト数が増大するためである。

4. 結 言

3種類の直径の異なる円柱をそれぞれ衝突噴流の中心面上に挿入し、挿入位置の変更に伴う流れ場と熱伝達特性の変化を検討した。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) 円柱を挿入した場合に衝突平板面上の幾何学的よどみ点近傍に生じる平均圧力の極大位置と変動圧力の rms 値の極大値位置とはほぼ一致する。
- (2) いずれの円柱を挿入した場合にも、流れは円柱に対しほぼ対称的に分岐する。特に円柱と衝突平板とのすき間が大きい場合にはそれが小さい場合と比較して、分岐する流れの幅が増大する。
- (3) 円柱と衝突平板との隙間が大きい場合、すなわち円柱を噴出口に近接して設置した場合には、衝突平板面上の局所ヌセルト数が約76%増大し、平均ヌセルト数が約30%増大する。

参 考 文 献

- 1) Khan, M. M. Ali, 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 pp40-42, 1980.
- 2) 栗間, 宮本, 原田, 機論 B 編, 54 巻 503 号 pp.1736-1743, 1988.
- 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 pp70-72, 1991.
- 4) Hwang, S. D., Lee, C. H. and Cho, H. H., Int. J. Heat and Fluid Flow, pp.293-300, 2001.
- 5) Haneda, Y., Tsuchiya, Y., Nakabe, K. and Suzuki, K., I. J. Heat and Fluid Flow, pp.115-124, 1998.
- 6) 羽田・他4名・機論 B 編, 66 巻 644 号 pp.1176-1183, 2000.