

# 小円柱が及ぼす衝突噴流熱伝達への影響

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

## An Impinging Jet Heat Transfer Affected by a Small Cylinder

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

Heat transfer measurements were conducted for a two-dimensional impinging jet in which a cylinder was mounted rigidly. Air jet was discharged from a rectangular slot having the width,  $h$ , of 15mm and the aspect ratio of 33. The jet Reynolds number was set at about 10,000. The diameters,  $D$ , of cylinders were 4, 6 and 8mm and the distance between the cylinder and target plate was ranged within 5 times of the cylinder diameter. Local Nusselt number attained around the stagnation point was augmented a little by insertion of a cylinder, however, mean Nusselt number was not augmented in comparison with the maximum mean Nusselt number attained in a case of insertion of no cylinder.

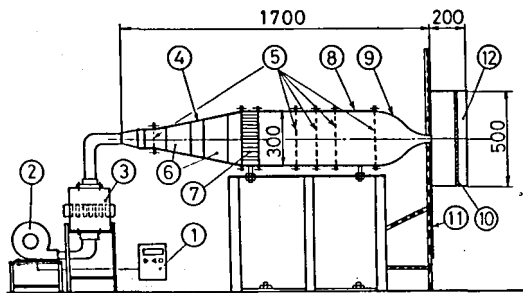
キーワード：衝突噴流，円柱，熱伝達，強制対流

### 1. 緒言

供給流量が少なく伝熱制御が容易なうえ、よどみ点近傍で高い熱伝達係数が得られる衝突噴流は、工業上幅広く応用され、従来より多くの研究<sup>1)2)</sup>がなされてきた。特に近年ガスタービン翼の冷却手段と

して注目されているが、このような内壁の冷却においては内部流が生じ、そのためよどみ点近傍でさえ熱伝達係数の低下<sup>3)</sup>がみられる。高温ガスタービン翼の冷却効率を高めることは、タービンの熱効率向上および省エネルギーの観点からもきわめて重要であり、よりいっそうの伝熱促進が要求されている。

平板あるいは物体まわりの熱伝達増進法として、(1)噴流中に円柱群<sup>4)</sup>を挿入した場合、(2)衝突平板前方に多孔板<sup>5)6)</sup>を設置した場合、(3)噴流への音波の入力あるいは脈動噴流<sup>7)~9)</sup>による場合、あるいは(4)物体に近接して平板を設置した場合<sup>10)~12)</sup>などが報告されている。しかし噴流中に一本の円柱を挿入した際の平板熱伝達への影響に関する研究はあまりな



① Inverter ② Blower ③ Cooler ④ Diffuser ⑤ Wire Mesh  
⑥ Guide Vane ⑦ Honeycomb ⑧ Settling Chamber  
⑨ Nozzle ⑩ Target Plate ⑪ End Plate ⑫ Side Plate

図1 実験装置概要

本研究は平成8年度長野高専教育研究特別経費の助成を受け行われた

- \* 機械工学科助教授
- \*\* 機械工学科教授
- \*\*\* 信州大学工学部教授
- # 京都大学大学院助教授
- ## 京都大学大学院教授

原稿受付 1997年9月19日

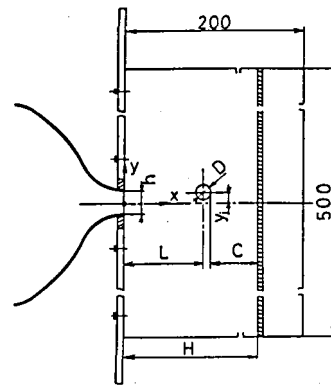


図2 座標系

されていないようである。さらに円柱を弾性支持し円柱を積極的に振動させた際の衝突噴流熱伝達に関する研究はいまだなされていないようである。

そこで本研究は円柱を弾性支持した場合の結果と比較する上で重要な円柱を固定して設置した場合を扱うこととする。円柱径および円柱と平板との隙間を変化させ、その際の平板上の熱伝達の変化を実験的に明らかにすることを目的とする。

おもな記号

- H : ノズルと衝突平板の距離
- h : 噴出口短辺
- $U_0$  : 噴流出口速度
- D : 円柱直径
- L : ノズルと円柱中心の距離
- C : 円柱と衝突平板との隙間
- $y_i$  : 円柱のオフセット距離
- Q : 総発熱量
- $T_w$  : 表面温度
- $T_o$  : 風洞内温度
- $q_c$  : 伝導損出
- $\lambda$  : 空気の熱伝導率
- Nu : 平板局所ヌセルト数
- $Nu_m$  : 平板の平均ヌセルト数
- Re : レイノルズ数

2. 実験装置および方法

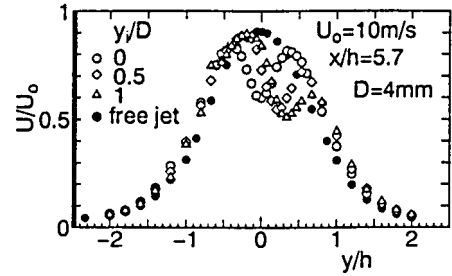
図1, 図2は実験装置および座標系をそれぞれ示す。噴出口短辺  $h$  が15mm, アスペクト比が33の長方形ノズルより空気が噴出される。噴出口長辺と等しい幅に2枚の端板が設置され、この間に円柱を固定した。円柱直径  $D$  は, 4, 6, 8mm の3種類であり, 噴出口短辺に対する比はそれぞれ0.27, 0.4, 0.53である。伝熱実験用衝突平板は500mm×500mm (厚さ10mm) のアクリル樹脂製であり, これ

表1 円柱と衝突平板の設置条件

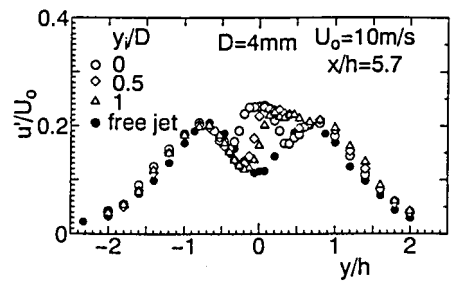
$y_i/D = 0, 0.5$			$y_i/D = 0$	
円柱径 D(mm)	ノズル円柱 距離固定 (L/h)	円柱平板 隙間変化 (C/D)	ノズル平板 距離固定 (H/h)	ノズル円柱 距離 (L/h)
4	5	0.5~5	7	3~6.3
6	5	0.5~5	7	3~6.3
8	5	0.25~5	7	4~6.3

円柱径 D(mm)	ノズル円柱 距離 L/h	円柱平板 隙間固定 C/D	オフセット $y_i/D$
4	5	2	0.5~2.5



(a) 平均速度



(b) 乱れ強さ

図3 円柱後方の平均速度と乱れ強さ

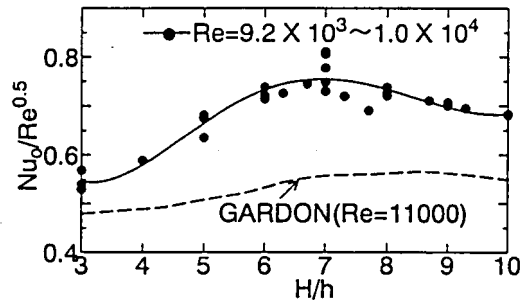


図4 ノズル平板距離によるよみ点局所ヌセルト数の変化

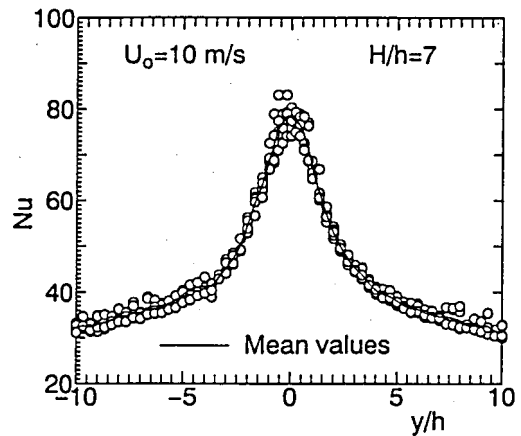
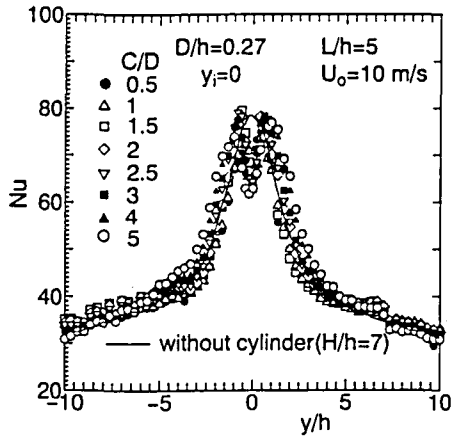


図5 円柱を挿入しない場合の局所ヌセルト数分布

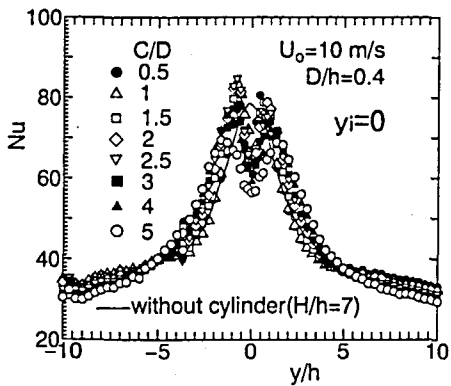
に幅50mm, 厚さ20 $\mu$ mのステンレス鋼箔を7枚直列に貼り合わせ通電加熱することでほぼ等熱流束が得られるようにした。ステンレス鋼表面温度測定用直径0.1mmのクロメル-アルメル熱電対が板の中央部 $y = \pm 230$ mm内に81本固着されている。また衝突平板の裏面に23本の熱電対を固着し熱伝導損出の評価に用いた。熱放射による損出は無視し平板の局所ヌセルト数を次式で定義した。

$$Nu = [(Q/A) - q_c] h / (T_w - T_o) \lambda$$

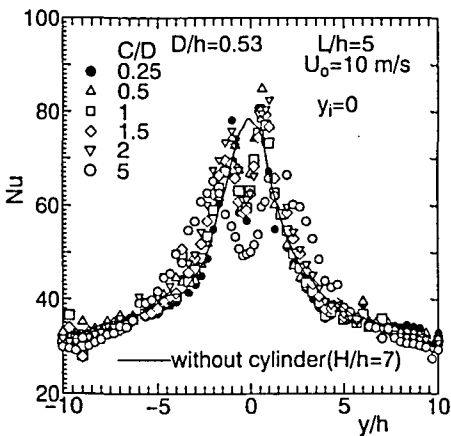
噴流出口速度  $U_o$  はインバータで送風機の回転数を調節することで10m/sに固定した。噴流出口速度および噴出口短辺に基づくレイノルズ数  $Re$  は約10,000である。ノズルと衝突平板との距離  $H$  はよども点局所熱伝達率が極大となる範囲 $\circ$ を考慮し  $3 \leq H/h \leq 10$  とした。



(a)  $D/h=0.27$

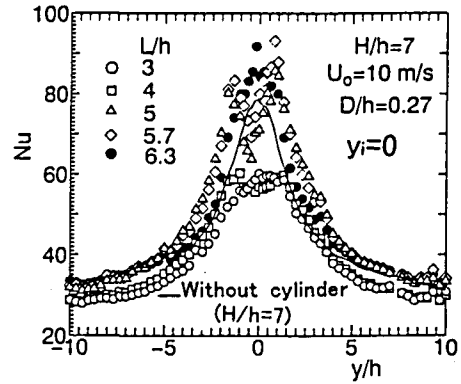


(b)  $D/h=0.4$

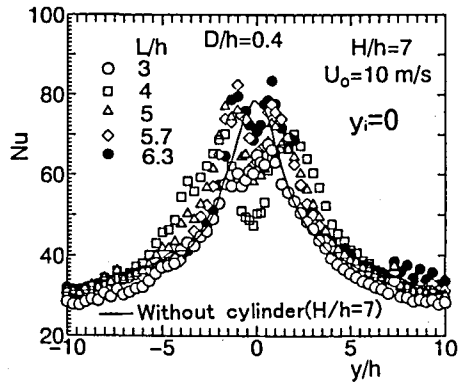


(c)  $D/h=0.53$

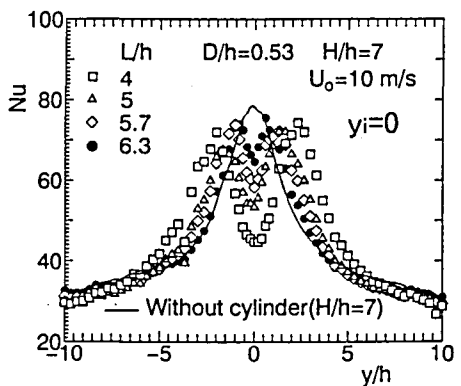
図6 円柱と平板距離によるヌセルト数分布



(a)  $D/h=0.27$



(b)  $D/h=0.4$



(c)  $D/h=0.53$

図7 円柱設置位置によるヌセルト数分布の変化

実験条件を表1に示す。平均流速および乱れ強さは、I型熱線プローブにより測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 流れ場特性

衝突平板を設置しない場合の円柱後方の定性的流れ場の変化を検討するため、直径4mmの円柱後方8mmでの平均速度分布および乱れのrms値分布を図3(a), (b)にそれぞれ示す。円柱後方で平均速度は極小となり、乱れ強さは極大となる。円柱位置をY方向に変化させた場合、平均速度の最大値は自由噴流のそれと比べてほぼ同じものの、乱れ強さは  $0 \leq y/h \leq 0.5$  の範囲で噴流発達領域の値とほぼ同じになる。なお円柱後方では360Hz付近に周波数のピークが認められた。しかし、衝突平板を円柱後方  $C=20\text{mm}$  ( $C/D=5$ ) に設置した場合には、この周波数付近に周波数のピークは存在しない。したがって円柱後方に平板を設置した場合、カルマン渦の発生は抑制されるものと思われるが詳細は今後の課題である。

#### 3.2 伝熱特性(円柱を挿入しない場合)

ノズル-衝突平板距離によるよどみ点局所ヌセルト数  $Nu_0$  の変化を図4に示す。Gardonら<sup>1)</sup>の結果に比べ  $Nu_0$  値は大きくその極大となる位置は  $H/h=7$  付近である。局所ヌセルト数値の定量的差異については今後の課題である。本報告では、円柱を挿入した場合の局所ヌセルト数への影響を、円柱を挿入しない場合によどみ点局所ヌセルト数が極大となる  $H/h=7$  における局所ヌセルト数分布と比較することとする。図5は  $H/h=7$  における局所ヌセルト数の5回の再現性を検討したものであり、よどみ

点付近で最大8%のばらつきが認められた。この算術平均値を以下に示す実験結果との比較として図示した。

#### 3.3 伝熱特性(円柱挿入の場合)

図6(a), (b), (c)は円柱を噴流中心軸上  $L/h=5$  に設置し、円柱と衝突平板との隙間比  $C/D$  を変化させた場合の局所ヌセルト数分布を示す。いずれの円柱径においても円柱背後の再循環流が存在すると思わ

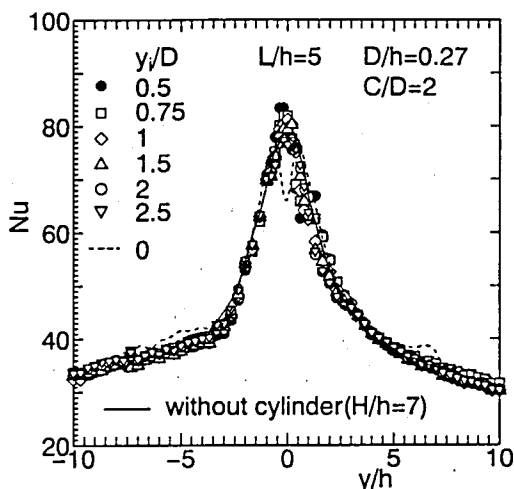
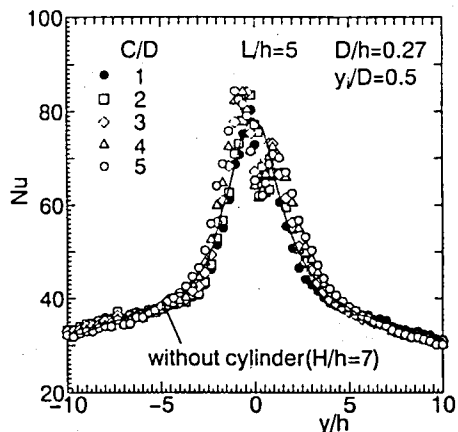
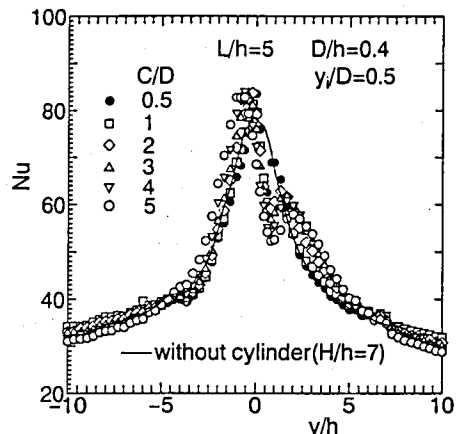


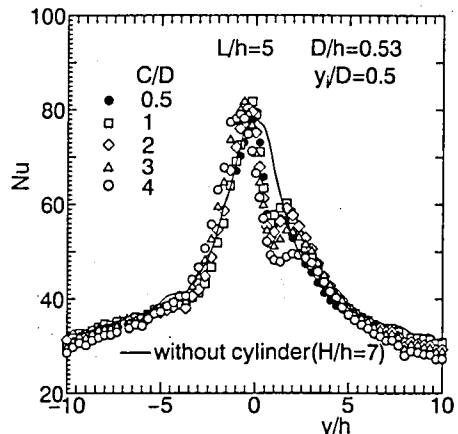
図8 円柱とオフセット距離による局所ヌセルト数分布の変化



(a)  $D/h=0.27$



(b)  $D/h=0.4$



(c)  $D/h=0.53$

図9 円柱平板距離による局所ヌセルト数の変化(円柱をオフセットした場合)

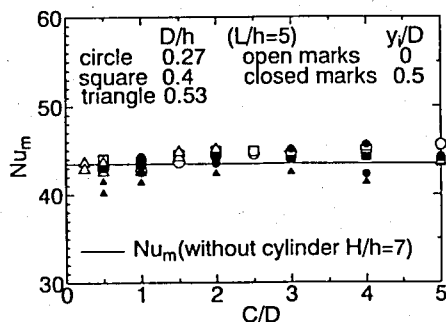


図10 円柱位置による平板の平均ヌセルト数の変化

れる領域で局所ヌセルト数は極小となる。この局所ヌセルト数の極小値は円柱径が大きいくほど小さくなる。しかし、円柱からのせん断層の衝突する付近で局所ヌセルト数値は極大となり図中実線の最大値より大きくなる場合もある。この極大値は円柱と衝突平板の隙間比  $C/D$  に依存しており、 $C/D=5$  と隙間比を大きくした場合には低い値を示す。このことは局所ヌセルト数のよどみ点付近の極大値が最大となる適当な円柱と平板との隙間比の存在を示唆しておりおおむね  $C/D=1 \sim 2$  付近である。

図7(a), (b), (c)は衝突平板位置を  $L/h=7$  に固定し、円柱の設置位置を変化させた際の平板局所ヌセルト数分布を示す。円柱を噴流のポテンシャルコア領域内 ( $L/h=3$ ) に設置した場合いずれも局所ヌセルト数の低下がみられるが、円柱を噴流の遷移領域内  $L/h \geq 5$  に設置した場合には、よどみ点領域近傍で局所ヌセルト数の増加が認められる。

そこで、円柱位置を  $L/h=5$ 、円柱と衝突平板との隙間比を  $C/D=2$  と固定し、直径  $D=4\text{mm}$  ( $D/h=0.27$ ) の円柱を噴流軸から  $y$  方向に変化させ設置した際の局所ヌセルト数分布を図8に示す。いずれのオフセット比  $y_i/D$  においても、局所ヌセルト数の最大となる位置は  $y=0$  付近であり、その値は円柱を噴流軸からオフセット比  $y_i/D=0.5$  付近に設置したとき大きくなる。したがって、噴流の最大速度と円柱から発生するせん断層とがほぼ一致するような位置関係の時、よどみ点付近の伝熱促進には効果的であるといえる。図9(a), (b), (c)は円柱中心を半径分だけ噴流中心軸から  $y$  方向へオフセットし円柱と衝突平板との隙間比を変化させた際の局所ヌセルト数分布を示す。いずれの隙間比  $C/D$  値においても、局所ヌセルト数の最大値は図中実線の極大値 ( $y=0$ ) より若干大きい。円柱径による大きな違いは  $y/h=1$  付近の  $Nu$  分布の極小値に現れ円柱径が大きいくほどその値は小さい。

図10は円柱を噴流軸上または  $y_i/D=0.5$  に設置した際の円柱平板隙間比による  $-10 \leq y/h \leq 10$  の範囲内の平均ヌセルト数分布を示す。いずれの円柱径においても隙間比  $C/D$  による変化は小さく、条件によっては図中実線に比べて小さくなる場合もある。これは前述のように円柱後方で局所ヌセルト数の低下部分が平板の平均ヌセルト数に大きく影響しているためである。

#### 4. 結 言

二次元噴流中に小円柱を挿入し、円柱と平板との隙間比による平板の局所ヌセルト数分布について検討した結果次のことが明らかになった。円柱を設置しない際に、ノズルと衝突平板との距離が噴出口短辺の7倍で得られるよどみ点局所ヌセルト数の最大値より、円柱を設置した場合局所ヌセルト数は若干増大する場合がある。しかし、平均ヌセルト数には円柱を設置しても大きな増進効果は得られない。

#### 参考文献

- 1) Gardon R. and Akfirat J.C., Heat transfer characteristics of impinging two-dimensional air jet, ASME J. of Heat Transfer, 1966, 88, 101-108
- 2) Schlünder E.U., Krötzsch P. and Hennecke F.W., Gesetzmäßigkeiten der Wärme- und Stoffübertragung bei der Prallströmung aus Rund- und Schlitzdüsen, Chem. Ing. Tech., 1970, 42, 6, 333-338
- 3) Sparrow E.M., Goldstein R.J. and Rouf M.A., Effect of nozzle-surface separation distance on impingement heat transfer for a jet in a crossflow. Trans. ASME, J. Heat Transfer, 1975, 97, 528-533
- 4) Kataoka K., Ohmura N. and Hamano S., Heat transfer augmentation by combination of jet flow with wake flow. 28th National Heat Transfer Symposium of Japan, 1991, 70-72 (in Japanese)
- 5) Ali Khan M.M., Ohnishi H., Kasagi N., Hirata M. and Kawabata J., Technic of heat transfer augmentation in an axisymmetric impinging jet (3rd report). 17th National Heat Transfer Symposium of Japan, 1980, 40-42 (in Japanese)
- 6) Kurima J., Miyamoto M. and Harada T., Heat transfer augmentation of axisymmetric impinging jet using a perforated plate set in front of a target plate (1st report, the effects of diameter and pitch of holes in a perforated plate). Trans. JSME, 1988, 54(503B), 1736-1743
- 7) Liu T. and Sullivan J.P., Heat transfer and flow structures in an excited circular impinging Jet, Int.

- J. Heat Mass Transfer, 1996, 39(17), 3695-3706
- 8) Zumbrennen D.A. and Aziz M., Convective heat transfer enhancement due to intermittency in an impinging jet, Trans. ASME, J. Heat Transfer, 1993, 115, 91-98
  - 9) Azevedo L.F.A., Webb B.W. and QuEeiroz M., Pulsed air jet impingement heat transfer, Experimental Thermal and Fluid Science, 1994, 8, 206-213
  - 10) Haneda Y., Tsuchiya Y., Kurasawa H. and Suzuki K., A study on the two-dimensional jet impinging on a circular cylinder (1st report, measurements of flow-field and heat transfer around a circular cylinder mounted near two flat plate), Trans. JSME, 1994, 60 (572B), 1401-1407 (in Japanese)
  - 11) Haneda Y., Tsuchiya Y., Kurasawa H. and Suzuki K., A two-dimensional jet impinging heat transfer on a circular cylinder (2nd report, effect of angles between two plates mounted near the cylinder), Trans. JSME, 1995, 61 (583B) 1078-1084 (in Japanese)
  - 12) Haneda Y., Tsuchiya Y., Kurasawa H. and Suzuki K., Impinging jet heat transfer from a circular cylinder mounted in a converging channel between inclined plates, Proc. of the 6th Asian Congress of Fluid Mechanics, 1995, II, 939-942