

琉球大学学術リポジトリ

衝突噴流群の流動・熱伝達特性

メタデータ	言語: 出版者: 日本機械学会 公開日: 2007-03-04 キーワード (Ja): キーワード (En): Jet, Heat Transfer, Flow Visualization, Forced Convection, Circular Nozzle, Multiple Impingement Jets, Infrared Image 作成者: 親川, 兼勇, 花城, 可清, 松田, 昇一, 屋我, 実, 檜和田, 宗彦 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/131

衝突噴流群の流動・熱伝達特性*

親川 兼 勇^{*1}, 花 城 可 清^{*2}, 松 田 昇 一^{*1}
屋 我 実^{*1}, 檜 和 田 宗 彦^{*3}Study on Flow and Heat Transfer of
Multiple Impingement JetsKenyu OYAKAWA^{*4}, Kasei HANASHIRO, Shoichi MATSUDA,
Minoru YAGA and Munehiko HIWADA^{**}Department of Mechanical Systems Engineering, Ryuky University,
1 Senbaru, Nishihara, Okinawa, 903-0213 Japan

Multiple jets are often used to obtain high heat transfer in wide area. Heat and flow behaviour of multiple jets show more complicate characteristics due to the existence of the interactions between adjoining jets, and between jets and spent flows. To clarify the influence of the flow behavior on heat transfer fields, the time and spatial heat transfer coefficients over the impingement plate were measured using an infrared radiometer when four jets impinged to the impingement plate for various jets arrangement and separating distance from jet exit to the impingement plate. The flow fields were also visualized by means of a water table. The heat transfer characteristics is made clear from the results of the instantaneous heat transfer contour or temperature fluctuation values.

Key Words: Jet, Heat Transfer, Flow Visualization, Forced Convection, Circular Nozzle, Multiple Impingement Jets, Infrared Image

1. 緒 言

衝突噴流は、噴流が衝突する物体表面のよどみ点(岐点)近傍で大きな熱伝達率および物質伝達率が得られることより、物体を加熱・冷却あるいは乾燥する場合など、工業的に広く利用されている⁽¹⁾。広範囲に高い熱伝達率および物質伝達率が要求される場合には、噴流は噴流群として用いられるが、衝突噴流群は伝熱促進と同時にある領域を均一に加熱・冷却するなどの一様性が重要な課題となる。Sheriff ら⁽²⁾は噴流を励起することで衝突噴流群の伝熱促進と一様性の向上を試みたが、一様性は向上したものの伝熱促進は図られず、伝熱増大については不明な点が残された。

噴流群は、隣接する噴流が周囲流体から誘引する量の優劣によって噴流軸が揺動する場合や、あるいは、どちらかに軸が湾曲する双安定な流動のほか、衝突した後に外部に流出する流れが隣接する噴流の衝突を妨げるなどの現象が起こる。

本研究では、噴流群の基礎となる正方形に配列された四つの円形噴流を垂直に伝熱面に衝突させた場合を対象として噴口間の距離が噴口直径の2倍および3倍となるように配置し、衝突平板を噴口に近づけた場合から遠く離れた場合に対して衝突噴流群の基本的な流動と伝熱特性を解明するために伝熱面上の温度分布を時・空間的に測定した。これより各噴流が未発達の状態でも衝突し、衝突後に各流出流が干渉する場合や、衝突前に噴流がすでに干渉し合っている場合、あるいは、その中間の状態での伝熱特性を解明しようとするものである。流れ場は可視化し、衝突噴流群の伝熱特性に及ぼす流動特性を明らかにした。さらに温度場と流れ場の同時測定を行い、時間的に、また空間的に変化する温度・流れ場を考察した。

2. 実験装置および方法

本実験では、作動流体として水を用いた。噴流は噴流観測用水槽とメインタンクとのヘッド差で流出させる。図1に噴口形状、実験装置の概略、赤外線映像装置およびデジタルビデオカメラの配置を示す。4噴口は直径 $D=6\text{ mm}$ の円形オリフィス形噴口をそれぞれ噴口中心間距離 $L=12\text{ mm}$ および 18 mm と正方形に4個配列したものをを用い、噴流を下方から上部に設

* 原稿受付 2003年3月19日。

^{*1} 正員、琉球大学工学部(☎903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1)。^{*2} 琉球大学大学院。^{*3} 正員、岐阜大学工学部(☎501-1193 岐阜市柳戸1-1)。

E-mail: oyakawa@tec.u-ryukyuu.ac.jp

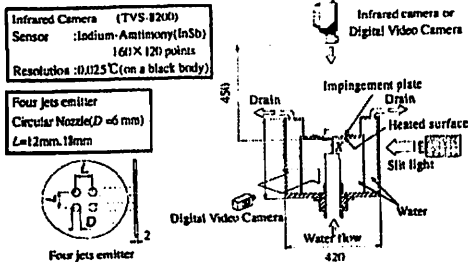


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

けられた平板へ垂直に衝突させる。座標系は噴口から衝突平板までの間隔を X 、四つの噴口の中間点を伝熱面上に鏡像した点を原点として半径方向を r とした。伝熱面は厚さ $10\ \mu\text{m}$ のステンレスはく ($190\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$) を衝突平板に張り付け、直流電源で通電加熱することで熱流束一定の条件とした。衝突平板の温度はステンレスはくの厚さが $10\ \mu\text{m}$ と薄いので表面温度 t_w と裏面温度は同一とみなし、真後ろから伝熱面の裏面温度を測定できるように衝突平板の中央部に直径 $80\ \text{mm}$ の観測用の窓を設けた。伝熱面の時定数は $0.018 \sim 0.036\ \text{s}$ である。赤外線映像装置は 160×120 素子のインジウム・アンチモン (InSb) センサが搭載されており、伝熱面全面の温度分布が測定できる。衝突平板上の局所熱伝達率 h_x は熱流束を表面温度 t_w と噴口出口温度 t_0 との差で除すことで求めた。流れ場は Fluorescein をトレーサに用いて水槽側部よりスリット光を照射して可視化し、デジタルビデオカメラで撮影した。実験は噴口と平板間距離 $X/D = 0.5 \sim 8$ に対して、噴口出口速度 U と噴口直径 D を代表長さとするレイノルズ数 $Re (= U \cdot D / \nu) = 500 \sim 1000$ で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 流れ場の可視化 まず、流れ場の例として、 $Re = 1000$ で $L/D = 2$ について、噴口と平板間距離を $X/D = 1, 6, 8$ と変化した場合の側面からの可視化写真を図 2(a)~(c) に示す。なお図 2, 3(a) の下段に流れの模式図を示す。図 2(a) の $X/D = 1$ は噴口中心部がよく確認できないが、平板に沿う流れが $r/D = 3$ 付近ではく離して噴口と平板間を循環しており、外縁部では平板に沿って半径方向に流れる。噴口と平板間距離が大きく $X/D = 6$ になると噴流どうしが干渉し合って平板におつかる前にすでにかく乱されている。それぞれの噴流間にあたる中央部 ($r/D = 1$

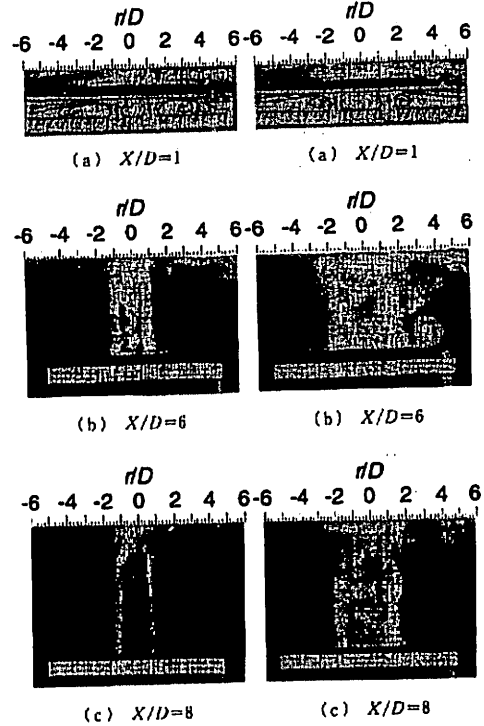
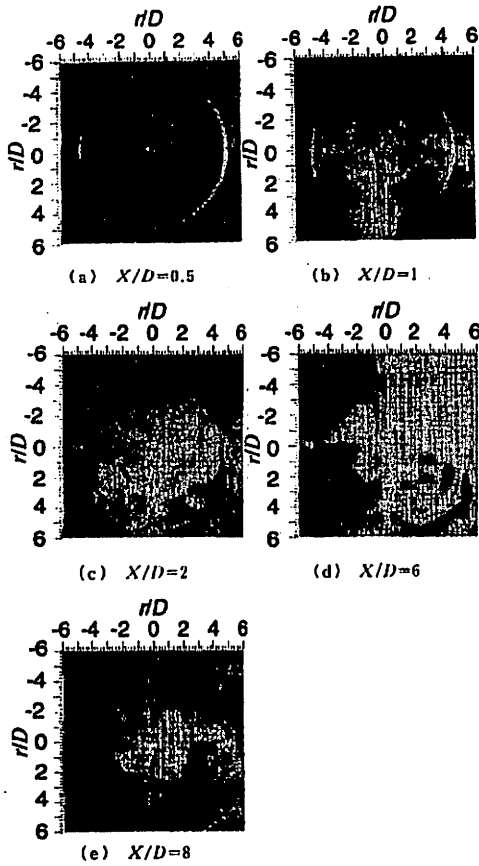


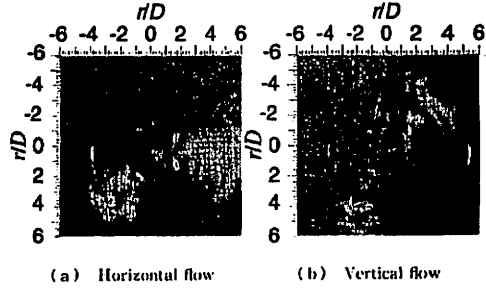
Fig. 2 Visualization of flow ($L/D = 2, Re = 1000$) Fig. 3 Visualization of flow ($L/D = 3, Re = 1000$)

~1) においては衝突後の流れは原点方向へ流れ、原点付近で互いにおつかり、噴口板方向へ流れる逆流が生じる。その逆流は噴口板まで到達し、その後噴口板に沿って半径方向へ流れ、噴流と噴流の間から外縁部へ流出する。この逆流が噴口板まで到達し、噴流間から流出する際、それぞれの噴流は噴口出口付近から大きくかく乱されることがわかった。ここでは、 $X/D = 1$ で見られたような噴口板と衝突平板間を循環する流れは見られない。さらに X/D が大きくなって図 2(c) $X/D = 8$ になると噴流間を逆流する流れは噴口板までは届かなくなる。

次に、両噴口間距離を $L/D = 3$ とし、 $X/D = 1, 6, 8$ の場合の側面からの可視化写真を図 3(a)~(c) に示す。図 3(a) $X/D = 1$ のときは前述の $L/D = 2$ と同じく噴口中心部はよく確認できないが、外縁部では平板に沿って流れる。図 3(b) $X/D = 6$ になると $L/D = 2, X/D = 6$ の場合と同じように噴流が衝突した後、四つの噴流の間を逆流する流れが噴口板まで到達し、噴口板上に沿って流れる現象が見られる。図 3(c) $X/D = 8$ となっても噴流どうしが干渉し合い、平板に

Fig. 4 Visualization of flow ($L/D=3$, $Re=500$)

ぶつかる前にかく乱され、外縁部へ広がる流れと噴流との間では逆流が起こる。これは $L/D=2$, $X/D=8$ とは異なり、噴流が平板へ衝突した後の逆流が噴口板まで連続的に到達していることによる。これまでは噴流を側面から観察したが、今度は上面から見てみる。透明の衝突平板に衝突したようすを平板の裏面から可視化した写真を $L/D=3$ で $X/D=0.5, 1, 2, 6, 8$ ($Re=500$) の場合を図4(a)~(e)に示す。図4(a) $X/D=0.5$ のとき全体的に見ると染料は平板に沿って流れる。特に、十字形の染料の濃い部分が見られ、この部分での平板に沿う流れは速い。また、四つの噴流外縁部では噴流は衝突後そのまま放射状に流れるが、噴流は噴流間と外縁部とは流れのようすが大きく変わる。まず、四つの噴流の間ではそれぞれの噴流が放射状に広がろうとするが、隣り合う噴口間を通る十字形の干渉領域が見られる。これは噴流間の流体はその噴口間から出ていくのでこの十字形の流れのようすが顕

Fig. 5 Visualization of switching flow ($L/D=2$, $X/D=2$, $Re=500$)

著となると思われる。外縁部では噴流はそのまま平板に沿って放射状に流れるが、先ほどの十字形の数値成分に誘引される形でその境界で干渉が起こり、渦が間欠的に生成される。この四つの噴流間の中心領域では流れが停滞するひし形の循環領域が存在する。図4(b) $X/D=1$ のとき四つの噴流間では非常に複雑な流れ場ができています。その境界ではせん断流が生じて渦を生成しているのが確認できる。 $X/D=0.5$ で見られたひし形の領域は見られなくなる。図4(c) $X/D=2$ になると、十字方向の数値成分が弱くなり、外縁部の流れは四つ葉のように広がる。図4(d) $X/D=6$ になるとそれぞれの噴流が揺動するため隣り合う噴流が干渉し合い、中心部までかく乱される。さらに図4(e) $X/D=8$ となると、十字形の流脈は残るものの単一噴流が衝突したように平板に沿う流れが半径方向に広がる。これらは $L/D=2$ においても同様に起きるが噴流間のようすは干渉が大きく、このように明りような分布とはならない。

次に、噴流の偏流現象について考察しよう。噴流群の流れの特性としてよく見られる噴流と噴流の干渉によって、噴流が衝突した後に半径方向に広がる流れの方向が時間的に変化する偏流現象が起こる。 $L/D=2$, $X/D=2$ における流れは、その代表例であり、可視化が容易な $Re=500$ の場合での詳細な可視化像を図5(a), (b)に示す。図5(a), (b)は図4と同様に衝突平板の上部から可視化した写真で図の中心部には四つの噴口が設けられており、図5(b)は図5(a)のある時間後の写真である。図5(a)の流れにおいて噴流が平板に衝突する前に左右それぞれの噴流が上下の噴流と合体し、あたかも縦軸に長軸をもつ二つの長円形の噴流のような流れ⁽¹⁾となる。それにより、長円形の縦軸と横軸の曲率半径の違いによる axis switching 現象が起こったため、衝突後の流れが横軸に広がったと思われる。なお、この隣り合う噴流はどの噴流と合

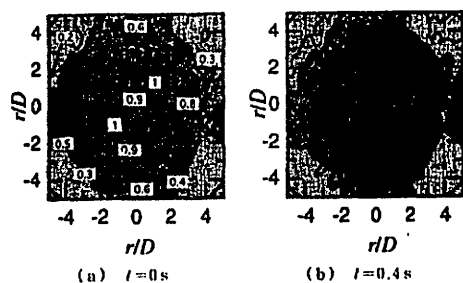


Fig. 6 Instantaneous contour of iso-heat transfer coefficient normalized by stagnation point with infrared image measurement ($L/D=2$, $X/D=1$, $Re=1000$)

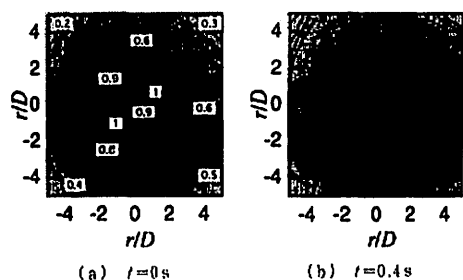


Fig. 7 Instantaneous contour of iso-heat transfer coefficient normalized by stagnation point with infrared image measurement ($L/D=2$, $X/D=6$, $Re=1000$)

体するかは定まっておらず、上下それぞれの噴流が左右の噴流と合体した場合には図5(b)に示すように流れは縦軸方向へ大きく広がる。この衝突後の流れが縦、横どちらかの方向へ広がる switching の周期の詳細は明らかでない。

3.2 局所熱伝達率分布の時・空間的な変化 噴流群の流れ場は隣接する噴流どうしの干渉および噴流と衝突後外部へ流出する流れとの干渉によって時・空間的にたえず変動しており、そのため噴流群を伝熱面に衝突させた場合の伝熱場は時・空間的に変動している。その一例として伝熱面上の瞬間的な熱伝達率分布を $L/D=2$, $X/D=1$ を例にとり図6(a), (b)に示す。図の縦軸、横軸には r/D をとった。図6中の黒い領域は高熱伝達率領域を表し、白い領域は低熱伝達率領域を示す。図6(a)中の数字は伝熱面上の熱伝達率 h_x をそれぞれ四つの噴口中心位置の時間平均熱伝達率の平均値 h_{max} で標準化した値である。等熱伝達率線の間隔は0.1とした。なお図6(b)は、図6(a)の時間を $t=0$ とし、その $t=0.4s$ 後の熱伝達率分布である。図6(a), および図6(b)ともにそれぞれの

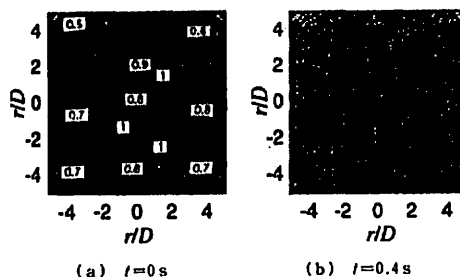


Fig. 8 Instantaneous contour of iso-heat transfer coefficient normalized by stagnation point with infrared image measurement ($L/D=3$, $X/D=1$, $Re=1000$)

噴口中心位置にあたる $r/D=\pm 1$ に最も高い熱伝達率領域が見られ、その中間点にあたる原点 ($r/D=0$) 付近で比較的に高い熱伝達率領域が見られる。原点付近の熱伝達率領域はそれぞれの噴流の衝突後の平板に沿う原点方向への流れのために生じると思われる。 $r/D=\pm 3$ 近傍では等熱伝達率線は $r/D=0$ 方向にくぼみ、対角線方向に広がる。さらに、外側では十字方向に高熱伝達率領域が広がっている。流れ場の可視化よりそれぞれ噴流の衝突後の流れは十字方向に大きく広がっており、高熱伝達率領域が十字方向に広がることに対応している。図6(a)と図6(b)を比較すると中央部、外縁部ともに変動しているようすがわかる。

次に、衝突平板間隔を大きくした $X/D=6$ の熱伝達率分布を図7(a), (b)に示す。図7より中央部では $X/D=1$ と同様に最も高い熱伝達率領域がそれぞれの噴口中心位置付近にあり、比較的に高い熱伝達率領域が原点付近にある。外縁部では $X/D=1$ と異なり高熱伝達率領域は半径方向にほぼ一様に広がっている。これは噴口と平板間の間隔が大きくなり、それぞれの噴流が平板に衝突する前に発達し混合するため、あたかも単一の噴流が衝突した場合の様相を示す。 $X/D=8$ 以上になると単一噴流と同じように中心部で熱伝達率が高く、半径方向にいくにしたがって低くなる、ほぼ軸対称な分布となる。図7(a)と図7(b)とは噴流が発達した状態で衝突しているため $X/D=1$ の場合と比べて伝熱場は時・空間的に大きく変動している。なお、これら変動に対応する温度の分布の等 rms 値の分布を後出の図13に示す。

噴口間距離を大きくした $L/D=3$, $X/D=1$ の熱伝達率分布を図8(a), (b)に示す。図8(a), (b)ともに $L/D=2$, $X/D=1$ と同様に、それぞれの噴口位置の $r/D=\pm 1.5$ 付近で最も高い熱伝達率領域が見ら

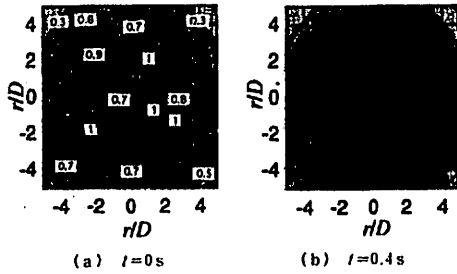


Fig. 9 Instantaneous contour of iso-heat transfer coefficient normalized by stagnation point with infrared image measurement ($L/D=3$, $X/D=6$, $Re=1000$)

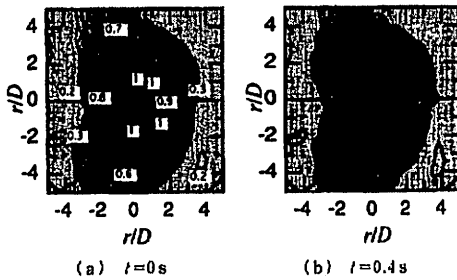
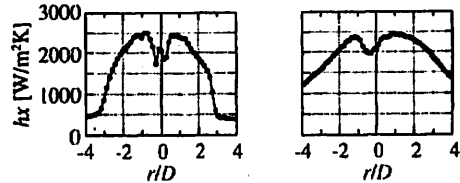
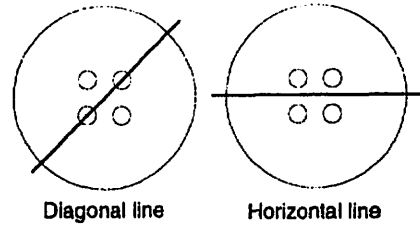
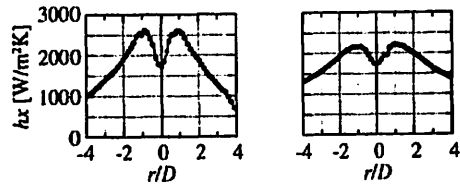


Fig. 10 Instantaneous contour of iso-heat transfer coefficient normalized by stagnation point with infrared image measurement ($L/D=2$, $X/D=2$, $Re=1000$)

れ、外縁部にいくにつれて熱伝達率は低くなる。なお $L/D=2$, $X/D=1$ と異なり、それぞれの噴口間に縦、横軸方向に細長い比較的高い熱伝達率領域が定常的に見られる。これは、各噴流が衝突後に平板に沿って流れる際に、その一部がそれぞれの噴口位置の中間で衝突し、その後原点方向と外縁部に流れることによって生じる。原点には 45° 回転した十字形の比較的高い熱伝達率領域がある。これはそれぞれの噴流間からの原点方向への流れにより形成されている。その噴流間から原点方向への流れの発生する頻度は特定できないが、温度変動の周波数解析結果によると $f=1$ Hz 以下で高い Power spectrum を示した。噴口間距離をそのままにして噴口と平板間距離を大きくした $X/D=6$ の熱伝達率分布を図 9(a), (b) に示す。 $L/D=3$, $X/D=6$ では噴流が発達した状態で衝突しており、 $L/D=3$, $X/D=1$ での原点付近に見られた十字形の高熱伝達率領域とそれぞれの噴口間位置に見られた縦、横軸方向に細長い高熱伝達率領域が見られなくなる。中央部の高熱伝達率領域は噴口中心の位置からずれており、そのずれは $L/D=2$, $X/D=6$ の場合より

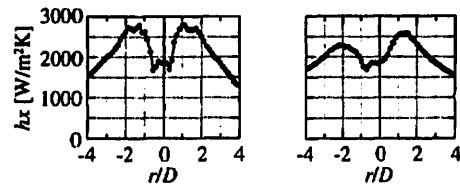


(a) $X/D=1$

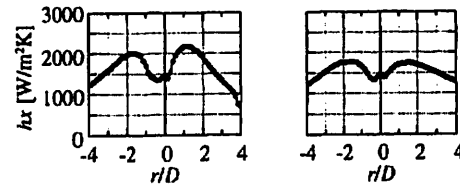


(b) $X/D=6$

Fig. 11 Comparison between local heat transfer coefficients at Diagonal and Horizontal line ($L/D=2$, $Re=1000$)



(a) $X/D=1$



(b) $X/D=6$

Fig. 12 Comparison between local heat transfer coefficients at Diagonal and Horizontal line ($L/D=3$, $Re=1000$)

大きい。噴口間距離が大きくなったことによりそれぞれの噴流の変動する領域が大きくなったことによる。いま特徴的な流れ・温度場をもつ $L/D=2$, X/D

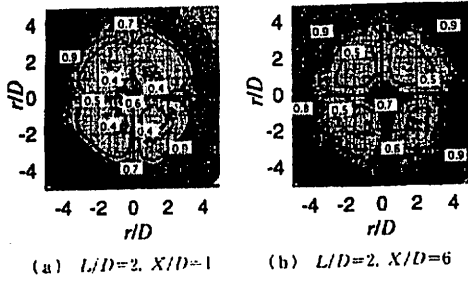


Fig. 13 rms values of temperature fluctuation ($Re=1000$)

$=2$ の場合の熱伝達率分布を図 10(a), (b) に示すが, $L/D=2, X/D=2$ では中心付近に横軸に長軸をもつ二つの長円形の高熱伝達率領域が見られる。外縁部では上下に高熱伝達率領域が広がっている。これは前述の $Re=500, L/D=2, X/D=2$ での流れ場の可視化写真図 5(b) に対応している。

3.3 局所平均熱伝達率 噴流群の流動場が温度場に及ぼす影響をより詳しく見るために、赤外線映像装置による衝突平板上の温度を時間平均(約 20 s 512 個)した平均温度から算出した半径方向の局所平均熱伝達率を示す。 $L/D=2$ と 3 に対して $X/D=1$ および 6 と変えた場合の結果を図 11, 12 にそれぞれ示す。また、前述したように噴口間の流れは非常に複雑であるため、四つの噴口の間中点から二つの噴口中心点を通る半径方向(対角線)と四つの噴口の間中点から隣り合う二つの噴口中心軸を通る半径方向(水平線)の 2 断面における分布を調べた。局所熱伝達率分布図の縦軸には熱伝達率 $h_x(W/m^2 \cdot K)$ 、横軸には r/D をとった。

図 11(a) の対角線は $r/D = \pm 1.0$ 付近で熱伝達率がピークをもち $r/D = 0$ で極大値をとる。 $r/D = 0$ で極大値をとるのは前述の各噴流間の原点方向への流れに起因している。また $r/D = \pm 2.5$ 付近で熱伝達率は急激に小さくなる。これは噴流の衝突後の平板に沿う流れがはく離するのに対応している。水平線では、 $r/D = \pm 2.5$ 付近での熱伝達率は緩やかに減少するが、これは噴流の衝突後の流れが十字方向に広がるためであろう。図 11(b) 対角線では $r/D = \pm 1.0$ 付近で熱伝達率がピークをもち図 11(a) と異なり $r/D = 0$ で極大値をとらない。これは前述したそれぞれ噴流間の原点方向への流入がなくなったためである。さらに図 11(a) と異なり $r/D = \pm 2.5$ 付近で熱伝達率は緩やかに減少しており、噴流が発達した状態で衝突するためと考えられる。図 11(b) 水平線は噴流が発

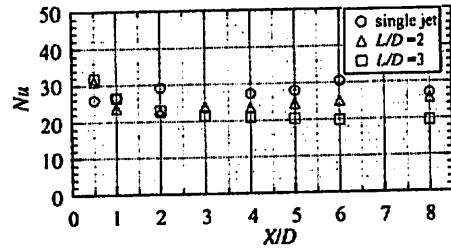


Fig. 14 Variation of Nu number with nozzle-to-plate separation ($Re=1000$, single jet $Re=880$)

達した状態で衝突しているのが図 11(a) と比べて緩やかな分布を示している。図 12(a) 対角線は $r/D = \pm 1.5$ 付近で熱伝達率がピークをもち $r/D = 0$ で極大値をとるが、噴口間距離が大きくなったために図 11(a) 対角線の分布と比べて $r/D = \pm 2.5$ 付近の分布は緩やかである。図 12(a) 水平線は噴口間距離が大きくなったために図 11(a) 水平線と比べて熱伝達率の高低差が小さい。図 12(b) 対角線では噴口位置から熱伝達率のピークがずれている。これは噴口間距離が大きくなったことによりそれぞれの噴流の揺動する領域が広がったためである。図 12(b) 水平線は噴流が発達した状態で衝突しているのが図 12(a) 水平線と比べて緩やかな分布を示す。

3.4 温度変動 図 13(a), (b) に $L/D=2$ における $X/D=1, 6$ の伝熱面上の温度変動の rms 値の分布を示す。図 13 中の白い領域は温度変動が小さい領域を表し、黒い領域は温度変動が大きい領域を示す。図 13 中の数字は rms 値($^{\circ}C$)を表す。この等 rms 値線の間隔は $0.1(^{\circ}C)$ である。図 13(a) の場合、噴口の位置 ($r/D = \pm 1$) で温度変動が最も小さい。これは噴流が主流部をもち乱れの少ないポテンシャルコア領域内で衝突しているためである。原点の比較的大きい温度変動領域は前述の原点への流入により生じたと思われる。外縁部の $r/D = \pm 3$ 付近で等 rms 値線は密になるが、温度変動が急激に大きくなることを示している。図 13(b) では、最も小さい温度変動領域が噴口位置より外縁部にずれており、比較的大きい温度変動領域が原点付近に見られる。なお噴流が発達した状態で衝突するために温度変動は全体的に $X/D=1$ と比較して大きい。

3.5 岐点ヌッセルト数 噴口中心位置のヌッセルト数 $Nu (= h_{max} \cdot D / \lambda)$ の X/D による変化を図 14 に示す。それぞれの噴口中心のヌッセルト数の値は約 20 s (512 個) のヌッセルト数を平均した時間平均ヌッセルト数である。 $L/D=2$ の場合、 $X/D=0.5$ で最大

値, $X/D=2$ で極小値をとり, その後わずかに増大している。 $L/D=3$ では, $X/D=0.5$ で最大値をとり, その後 X/D の増加に伴い減少する。単一噴流の場合, ポテンシャルコアが消え噴流軸線上の乱れが大きくなる $X/D=4\sim 6$ 付近で極大値をもつが $L/D=2$ の場合には下流方向にわずかに増加し, $L/D=3$ の場合はわずかに減少する傾向にある。

4. 結 言

衝突噴流群の基礎となる4噴口の噴口間の距離, 噴口と衝突平板との距離を変えた実験を行い, 次の結果を得た。

(1) $L/D=2, 3$ でも衝突後の噴流は原点にも流入し, さらに噴口板に向かって逆流する。そのため噴出した噴流は大きなかく乱を受ける。 $L/D=3$ では $X/D=8$ でも逆流は噴口板まで到達する。

(2) X/D が小さい場合は噴流は衝突後明確な十字方向の広がりを示す。 X/D とともにその影響は薄

れ, $X/D=8$ で十字形の流脈は残るものの単一噴流の性状に似てくる。熱伝達特性は流れ場を反映している。

(3) 温度場は時間・空間的に変化し, 特に $L/D=2$, $X/D=2$ では4噴流がそれぞれ2個ずつ合体し偏流する現象が起こる。

(4) 噴口中心位置でのヌッセルト数は, $X/D=0.5$ では $L/D=2, 3$ とともに単噴口より大きな値を示すが $X/D=2$ 以降では単噴口より値は小さくなる。

文 献

- (1) 平田賢・岡本史紀, 熱流体とエネルギー, (1996), 117-144, 日刊工業新聞社。
- (2) Sheriff, H. S., Zumbrunnen, D. A., Local and Instantaneous Heat Transfer Characteristics of Arrays of Pulsating Jets, *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, **121** (1999), 341-348.
- (3) 親川兼勇・ほか3名, 長円形2噴流の衝突熱伝達特性, 機論, **65-637, B** (1999), 148-154.
- (4) 親川兼勇・屋我実・松田昇一, 長円形衝突噴流の熱伝達および流動特性, 可視化情報学会誌, **19-73** (1999), 39-44.