

二次元衝突噴流の渦運動の可視化と圧力変動

Relation between the Vortex Motion and the Pressure Fluctuation
in a Plane Impinging Jet

赤司 信義*・石川 誠**・斎藤 隆***

By Nobuyoshi AKASHI, Makoto ISHIKAWA and Takashi SAITOU

The relation between the vortex structures and the flow characteristics in the flow development region of a impinging plane jet was investigated using the technique of flow visualization. For the flow visulization, the laser induced fluoresent method and the dye-particle image velocimetry method were adopted. It was shown that the vortex motions hardly change by the flow impingement. Particularly, by the direct pressure measurements and the image processing analyses, the relation between the vortex motion and the pressure fluctuation was revealed.

Keywords: Plane Impinging Jet, Vortex Motion, DPIV,
Flow Visualization, Pressure Fluctuation

1. はじめに

二次元衝突噴流の流れ構造の解明は、周囲水との混合や衝突面上の物質輸送機構等を考察する上で重要である。また、噴出口から衝突面までの衝突距離が乱れの形成領域内にある場合の衝突噴流は、二次元的な渦構造が得られやすいことから、渦の衝突や渦運動と圧力変動など流れ場との関係を解明する上での基本的な流れ場でもある。自由噴流の組織的渦構造に関する研究は、これまでも数多くなされている。著者らは、これまでに、二次元噴流の乱れの形成領域における渦構造の可視化を行って、ノズル近傍で発生したスパン方向に軸を持つ渦（横渦と呼ぶ）が次第に流れ方向に軸を持つ渦（縦渦と呼ぶ）を誘起し、両者が重なり合いながら、発達、崩壊していく事を明らかにした¹⁾。

本研究では、まず、レーザライトシートによる蛍光染料法を用いて二次元衝突噴流の渦運動の可視化を行い、衝突前後の渦運動を調べると共に可視化観察と底面圧力測定を同時に行ってスパン方向と流れ方向の渦運動と底面圧力変動との関係を検討した。また、蛍光染料法と PIV 法とを併用した DPIV (Dye-Particle Image Velocimetry)法³⁾を用いて、流れ場を可視化し、粒子流跡の画像処理を行って、渦度の輸送過程や瞬間圧力場の計算を行い、底面圧力変動との関係や渦運動と圧力変動との関係を明らかにした。

* 正会員 工博 西日本工業大学教授 工学部土木工学科 (〒800-03 福岡県京都郡苅田町新津 1633)

** 正会員 西日本工業大学助手 工学部土木工学科 (〒800-03 福岡県京都郡苅田町新津 1633)

*** 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台)

2. 実験装置と実験方法

実験装置は、両面ガラス張りの鋼枠製水槽（長さ 3 m、高さ 0.71 m、奥行 0.20 m）で、水槽中央にアクリルガラスで作製された幅 1 cm のノズルが設置されている。アクリルガラスで作製された衝突板は、ノズルから 5 cm 離れた位置に水平に設置されている。ノズル室内には 4 mm セル、高さ 3 cm のハニカムを設置した。蛍光染料には比重 1.002 のフルオレセインナトリウム水溶液を用いた。この蛍光染料は立体視の場合には、ノズル室上部の管路部より 20 ~ 30 sec（総量で 300 cc 程度）注入し、ノズルより染料が放出される前に注入を停止した。撮影は、図 1 に示すように、衝突後の流れ方向に垂直な断面とそれに直交する水路中央の断面、及び、水路斜め前方からの全体像について行われた。それぞれの方向からの可視化を横断面視、縦断面視、立体視と呼ぶことにする。横断面視は、ノズル中央の断面から 20 cm 離れた位置の衝突板の上に 7 cm x 5 cm の鏡を水槽手前に 45° 傾けて設置し、この鏡に写る像を撮影した。可視化には、2 W のアルゴンレーザーライトシートを使用した。横断面視と縦断面視の場合、染料が水槽内でほぼ均一に混合され、ノズルから蛍光染料水溶液が全く放出されなくなってから撮影を開始した。立体視の場合は、出力 300 W のスライドプロジェクタを使用し、噴流の片側だけを照射し、染料が放出されている状態を撮影した。撮影には、ビデオカメラを使用した。本文中の写真はビデオプリンタで取り出したものである。

DPIV法では、トレーサ粒子として、直径 100 μm 比重 1.02 のナイロン粒子をエチルアルコールに浸した後、注入した。この時、蛍光染料は、すでに水槽内で攪拌されている状態とした。

底面圧力は、衝突底板に埋め込んだ径 3 mm の圧力センサー（受感部は 8 mm）によって測定された。圧力変動は、オシロスコープで変動を確認しながら、アンプから 1/100 sec 間隔で直接ハードディスクに記録された。

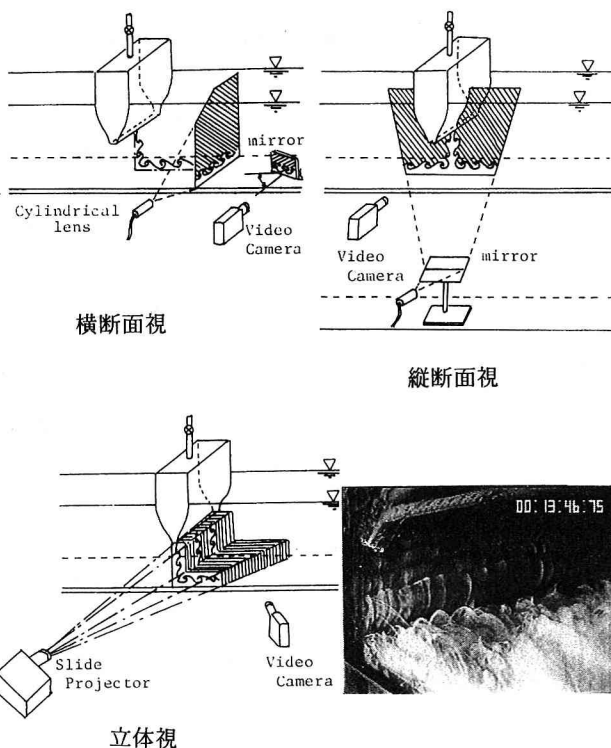


図 1 流れの可視化の概略

写真 1 立体視: Re=1710

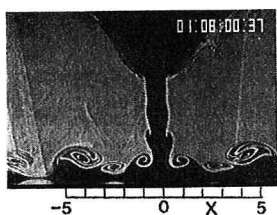


写真 2 縦断面視: Re=802

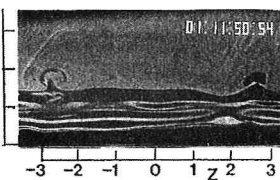


写真 5 横断面視: Re=802

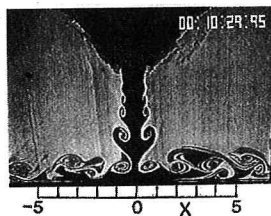


写真 3 縦断面視: Re=1710

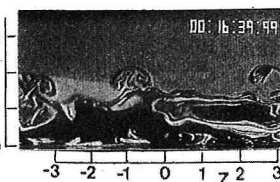


写真 6 横断面視: Re=1710

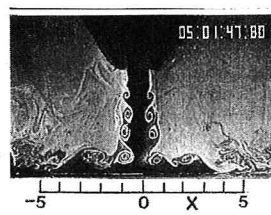


写真 4 縦断面視: Re=2920

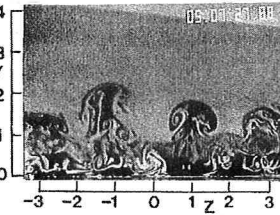


写真 7 横断面視: Re=2920

3. 実験結果とその検討

写真 1 は、 $Re (= u_o \cdot b_o / \nu) = 1710$ の立体視を示している。ノズル近傍で発生したスパン方向に軸を持つ横渦に流れ方向に軸を持つ縦渦からなるリブ構造がスパン方向にいくつも重なり合いながら、底板に衝突して流れの向きを水平に変え、崩壊していく様子が撮影されている。写真 2、3、4 と写真 5、6、7 は $Re = 802$ 、 1710 、 2921 の縦断面視と横断面視を示したものである。縦断面視を見ると、 Re 数が 802 の場合は、衝突前の渦の発生は顕著でなく、衝突後に明瞭な渦が認められ緩やかに発達しつつ合体していく様子をうかがう事ができる。 Re 数が 1710 になると、衝突前に既に明瞭な渦が発生し、衝突後、既に存在していた渦を水面方向に押し上げるかのように底板に沿ってめぐり込むようにして合体していく様子がうかがえる。さらに、 Re 数が 2921 になると、衝突前の渦の発生数が多くなり、衝突後すぐに崩壊し始めていることが分かる。写真 5、6、7 の横断面視を見ると、 Re 数が 802 の場合は、二次元性がほぼ保たれているものの、 $Z = \pm 2.5$ の位置に緩やかな縦渦構造が認められる。 Re 数が 1710 になると、二次元性の保たれている部分は狭くなり、明瞭な縦渦構造が認められる。さらに、 Re 数が 2921 と大きくなると、もはや二次元性は認めにくく、激しく複雑な縦渦構造を示している。また、 Re 数が 802 から 2921 と大きくなると、縦渦の間隔が小さくなっていることも分かる。

図 2 は、 $u_o = 15.5 \text{ cm/sec}$ ， $Re = 1558$ の条件で $X = 1 \text{ cm}$ と 3 cm の 2 点の底面圧力と可視化を同時に行った結果を示したものである。圧力変化のサンプリング間隔は $1/100 \text{ sec}$ で、 60 秒間 測定された。図中の 4 枚の写真は、圧力変動の $t = 0.43 \text{ sec}$ と $t = 0.63 \text{ sec}$ ， 0.83 sec ， 0.98 sec の時の画像である。底面圧力は、図から分かる様に非常に周期的な傾向を持つ変動を示している。変動周波数はほぼ 3 Hz で、

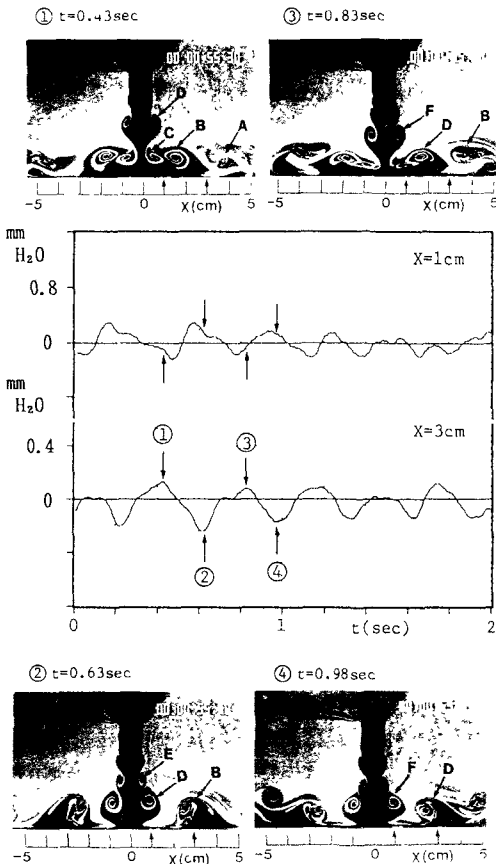


図 2 縦断面視と底面圧力の同時測定: $Re=1558$

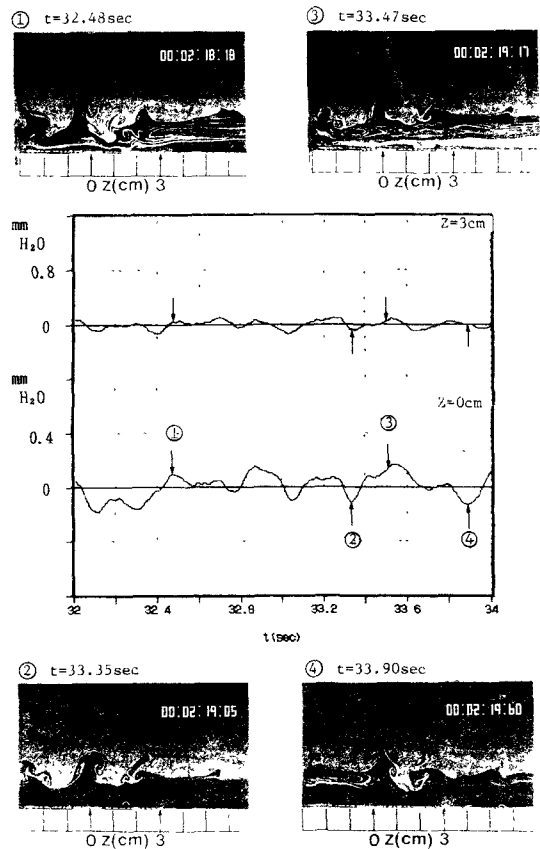


図 3 横断面視と底面圧力の同時測定: $Re=1621$

St 数 ($= f \cdot b_0 / u_0$) = 0.19 となっている。ビデオ観察によれば、横渦の通過周波数の読み取り値は、 $St = 0.2$ となっていて、ほぼ同じ結果が得られている。このことから、底面圧力変動は横渦の通過に密接な関係があるものとする。そこで、まず、①～④の可視化画像の個々の渦を追跡し、渦がどのように変化していくかを見る。①で見られる渦 A, B, C, D において、A の渦は、渦の形をはっきり見る事ができず、B の渦は、C の渦を巻き込むようにに覆いかぶさるような形となっている。②では、B の渦は C の渦と既に合体し、D の渦の発達過程だけが見られ、その後方には新たな E の渦が現れている。③においては、D の渦は ①の B の渦と同じ様なパターンを示している。又、④の D の渦も②の B の渦と同じ様なパターンを示している。次に、 $X = 1 \text{ cm}$ と 3 cm の位置での底面圧力と可視化画像とを比較する。 $X = 3 \text{ cm}$ で底面圧力が高くなっている時の渦の配置を①の画像で見ると、B の渦が上から下に押え込まれるような形になっている。③の画像からも $X = 3 \text{ cm}$ では、渦が押え込まれて圧力は高くなっていることが分かる。 $X = 3 \text{ cm}$ で底面圧力が小さくなっている②と④の画像を見ると、どちらも、渦が上方に吸い上げられたような形になっている。底面圧力の減少は (①→②や③→④等の過程)、渦が上方に押し上げられることに起因し、界面の高さが大きい位置で底面圧力は低くなる事が認められた。又、底面圧力の増大は (②→③等の過程)、押し上げられた水塊が底面に下降することに起因するものと考えられる。なお、図中の写真では、縦渦との関係が明確ではないが、Photo 6 で見たように $Re = 1710$ では部分的に二次元性が保たれていることを考慮すると、図中の圧力変動はほぼ横渦に対応していると考えられる。

図3は、衝突点から 3 cm 離れた地点の横断面視と、水路中央 $Z=0$ と水路中央から 3cm 離れた地点 $Z=3$ の底面圧力の同時測定結果を示したものである。図中の①と③の横断面視で、底面近くにいくつかの筋が見られることから、横渦が底面近くを通過し、周囲水が底面近くにまで混合されていること、縦渦の付け根は底面近くに見られず縦渦の上に重なるように形成されていることが分かる。図中の②と④の横断面視では、スパン方向の筋が見られないこと、底面近くの噴出水による層が形成されていることから、横渦が持ち上げられて図2中の②のBのような渦の横断面が観察されたものと考えられる。図2の②のBの渦の通過に伴う底面圧力変動と対応して、この横断面視の結果から、横渦持ち上げられるように流下するとき、底面圧力が低下することが分かる。また、①と③の横断面視と底面圧力変動の関係も、横渦が底面近くに押しつけられるようにして流下するとき、底面圧力が上昇することと対応している。

図4は、実験条件が Re 数 804 の場合で、DPIV法によりシャッタースピード 1/500 sec の縦断面視の画像を基にして、いくつかの粒子について 2 sec 程度追跡し、ノズルからの流下距離 S/b_0 に対して、流跡を描いたものである。衝突前の流跡は、ほぼ直線的に流下し、衝突後の粒子の中には、回転しながら流下するもののあることが分かる。衝突前は、粒子の流跡の観察が容易なことや、ノズルから衝突版までの衝突距離が短く、乱れの形成領域にあることにより、ほぼ二次元的な流れになっていることが分かる。

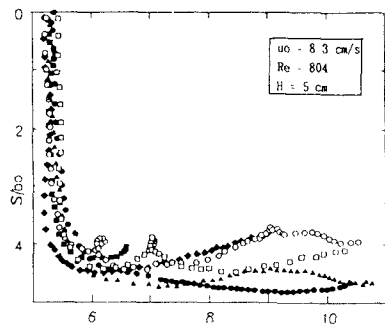


図4 粒子流跡:Re=804

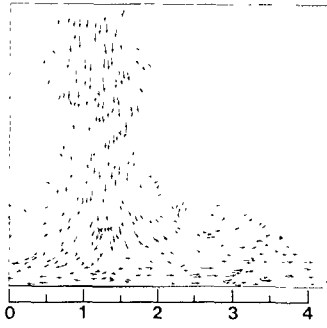


図5 瞬間速度ベクトル

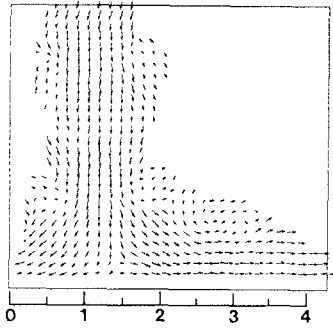


図6 格子点瞬間速度ベクトル

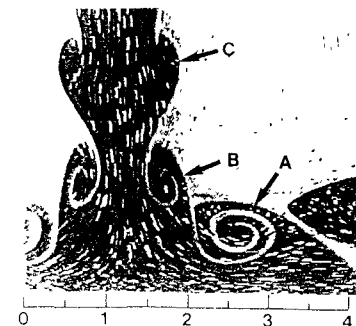
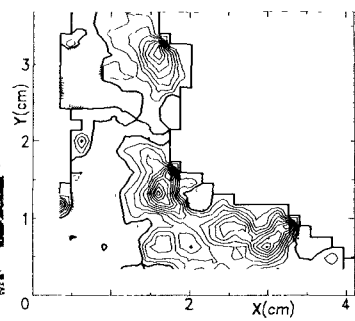
图7 DPIV 画像(1) $t=0.50\text{ s}$ 

图11 等涡度分布(1)

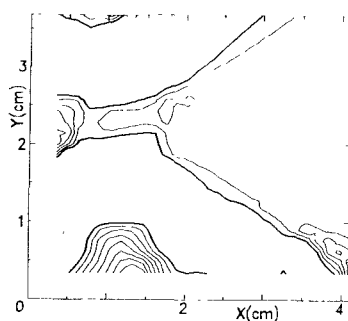


图15 等压力分布(1)

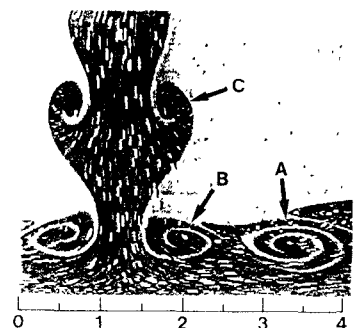
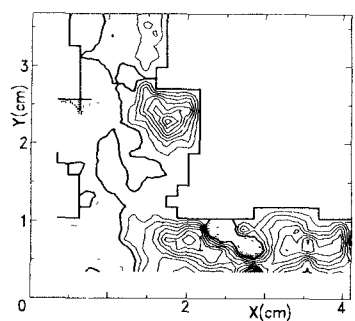
图8 DPIV 画像(2) $t=0.67\text{ s}$ 

图12 等涡度分布(2)

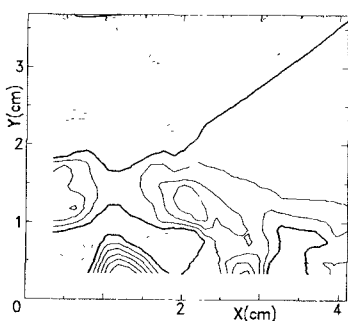


图16 等压力分布(2)

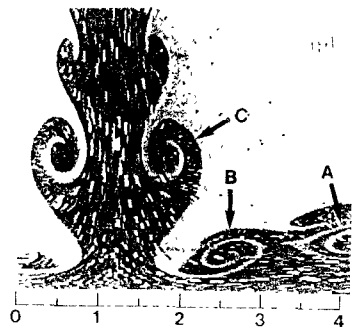
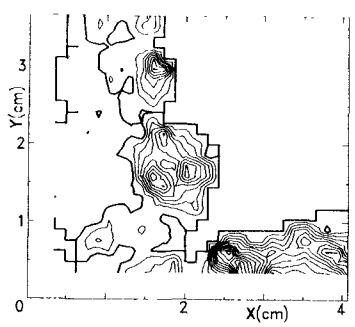
图9 DPIV 画像(3) $t=0.83\text{ s}$ 

图13 等涡度分布(3)

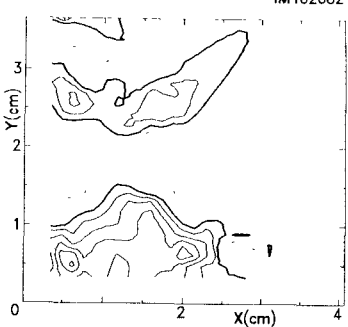


图17 等压力分布(3)

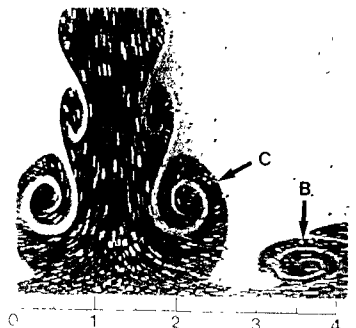
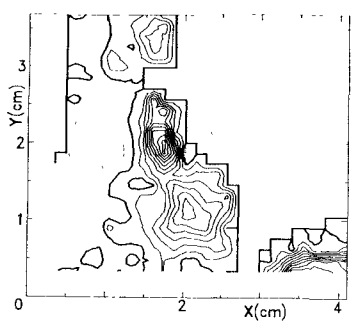
图10 DPIV 画像(4) $t=1.00\text{ s}$ 

图14 等涡度分布(4)

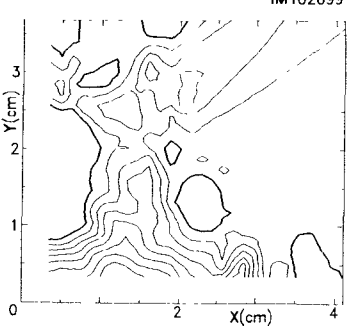


图18 等压力分布(4)

図5～18は、シャッタースピード 1/60 sec でDP I V法により撮影した流跡画像と画像処理による結果を示したものである。図5は、図7の流跡画像を基に瞬間速度ベクトルを示したものである。速度ベクトルは、流跡の始点終点座標をディジタイザで読み取り、この流跡の長さから求められた。

図6は、格子点上の瞬間速度ベクトルを示したものである。座標は、図7の左端を原点とし、右側をX軸、上向きをY軸とし、それぞれの速度成分は、X方向をu成分、Y方向をv成分として示している。格子点における瞬間速度ベクトルは、X方向を10分割、Y方向を9分割して格子を作り、それを格子間隔の1/3ずつ、X、Y方向にずらしながら移動平均して求められた。

図7～10のそれぞれの流跡画像を基にして、瞬間の各格子点の渦度 ω_z を求め、等値線図を描いたものが図11～14である。各格子点の渦度は、 $\omega_z = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$ を差分近似し、画像中央付近に基準点を定め、基準点を含むX方向、Y方向の格子点では1方向に積分して求められ、それ以外の格子点ではX方向とY方向の2方向から積分して求められた値を平均して定められた。渦度分布の図中の細い実線は正の渦度を示し、破線は負の渦度を示し、太い実線は渦度が0の分布線を示している。淀み点は、 $X = 1.2$ cmの位置である。速度ベクトル図で噴流中心軸ではほとんど鉛直下方に流れが向いていることから分かるように、噴流中心軸での渦度はほとんど0となっている。

図15～18は等圧力分布図を示したもので、各格子点の圧力は、二次元定常ナビエ・ストークス方程式を差分近似し、画像中央付近の格子点を数値積分の開始点として定め、各格子点の $\partial p / \partial x$ 、 $\partial p / \partial y$ を順次求めた後、この圧力勾配を基にして渦度の計算の場合と同様に、X方向とY方向の数値積分によって求められた。等圧力分布は、求められた各格子点の圧力を基にして線形補間して描かれたものである。ノズル近くのコア領域では、渦形成が少なく、圧力変動も少ないと考えられることから、図11～14の速度ベクトル図の最もノズルに近い、中央付近の格子点の圧力を基準圧力0として、等圧線分布を示した。破線は基準点圧力より低く、実線は高い圧力であることを示している。衝突前の渦構造の流下に伴って、渦度が輸送され、圧力場が形成されていることがよく分かる。衝突前後での渦度を比較すると、ほとんど違いがないことから、衝突前の渦構造がほぼそのまま衝突後の流れへと輸送されるものとする。渦度分布や圧力分布を見ると、渦構造の中心付近では渦度が大きく、圧力は低くなっていること、噴流の衝突によるよどみ点付近での圧力は周囲よりも高い圧力を示していることが分かる。また、底面圧力測定結果からも認められたように、底面付近では、横渦が持ち上げられている付近では、圧力はその周囲よりも低く、横渦が押さえつけられるように底面に沿って流下する付近での圧力は、その周囲よりも高くなっていて、衝突噴流による圧力変動は、流跡画像解析からも、渦運動と密接に関係していることが示されている。

4. おわりに

本研究では、二次元衝突噴流の衝突点近傍の渦構造の可視化と底面圧力の同時測定、及び、渦構造と粒子流跡の同時可視化を行い、衝突前後の渦度分布の関係や渦構造の通過に伴う圧力変動を調べた。その結果、衝突後の渦構造は、衝突前の渦構造をほぼそのまま輸送して、衝突前と同様な横渦、縦渦を持つことや、底面圧力変化は、密接に渦構造の通過と関係していること、渦構造の中心付近で渦度が高く、圧力が低くなるといった定性的傾向が明らかにされた。

参考文献

- (1) 赤司信義、石川誠、斉藤隆：二次元噴流の乱れの形成領域における縦渦構造の可視化
水工学論文集、Vol. 37、pp. 451-456、1993。
- (2) Rockwell, D. O. and Niccolis, W. O. : Natural Breakdown of Planar Jets,
Trans. ASME, J. Basic Eng., Vol. 94, pp. 720-730, 1972.
- (3) 大成博文、渡辺勝利、佐賀孝徳、前田邦男：壁乱流における秩序運動の時空間構造の特徴
第25回乱流シンポジウム講演論文集、pp. 124-127、1993。