

2 値化相関法 2D-PTV とその 2 円柱干渉流への応用

山本 富士夫*1 植村 知正*2 幸川 光雄*1 井口 学*3 酒井 善秀*4

Binary Correlation Method for 2D-PTD and its Application to Two Cylinder Interaction Flow

Fujio YAMAMOTO, Tomomasa UEMURA, Mitsuo KOUKAWA, Manabu IGUCHI,
and Yoshihide SAKAI

(Received Jan. 31, 1992)

This study deals with fluctuating interaction flows around two circular cylinders arrayed in tandem arrangement. After the flows are visualized by a hydrogen bubble tracer technique, the two-dimensional particle tracking velocimetry (2D-PTV) based on binary correlation method is applied to measure the flow velocities of the whole field. Using the results of instantaneous and time mean velocity vectors, vorticity contours, streamlines and root mean square values of the fluctuating velocities, the analysis and discussions on the flow fields are made.

1. 緒 言

この十数年の間に、二次元流速の測定のためのデジタル画像処理の技術が開発されてきた。はじめに、流れの中に混入されたトレーサ粒子の流跡線の長さから流速を計算する写真を使った方法が考案された[1, 2]。この方法は、速度ベクトルの始点と終点を決定するために、照明のいくつかの特別な技術を必要とした。次に、連続したビデオ画面内の各粒子を自動的に同定し、各粒子の速度を計算する粒子追跡速度測定法 (PTV) が提案された。これは、ベクトルの方向の問題を解決するのに成果を収めた[3, 4]。短い時間間隔の二画面間の粒子分布パターンの類似に基づく粒子速度ベクトルを計算するのに相関法が開発された[5]。筆者らは、二つの 2 値化画面の間の粒子分布パターンの類似性に基づく速度ベクトルの計算のための高速アルゴリズムを持つ 2 値化相関法を提案した[6-8]。最近では、三次元 PTV の手法が開発されている[9-11]。

*1 機械工学科, *2 大阪大学基礎工学部, *3 大阪大学工学部, *4 P F Uソフウェアラボラトリ(株)

本研究では、直列配置の2円柱まわりの変動流を扱う。アルミニウム又は水素気泡をトレーサとして可視化した後、2値化相関法に基づく2D-PTVが、その変動流の全流れ場の速度の測定に適用される。瞬時速度ベクトルと平均時間速度ベクトル、渦度分布図、流線、変動速度の自乗平均平方根値（RMS値）の結果を使って、流れ場の解析と検討を行う。

2. 2値化相関法 2D-PTV

2値化相関法は著者ら[6-8]によって提案された。その概要を以下で簡単に説明する。

短い時間間隔 Δt での粒子像の二つの画面が、図1(a)と(b)に示されているようなトレーサ法により可視化された二次元流れから得られたとする。急速な滑り流れや回転流れが起きないとすると粒子分布パターンは、このような短い時間間隔において、良好な類似性を保つと考えられる。現在の問題点は、第1画面内の参照粒子に対応する第2画面内の粒子を探し出すことである。粒子同定の原理は、相互相関係数を使って、重ねられた二つの粒子分布パターンの最良な類似性を探し出すことに基づいている。

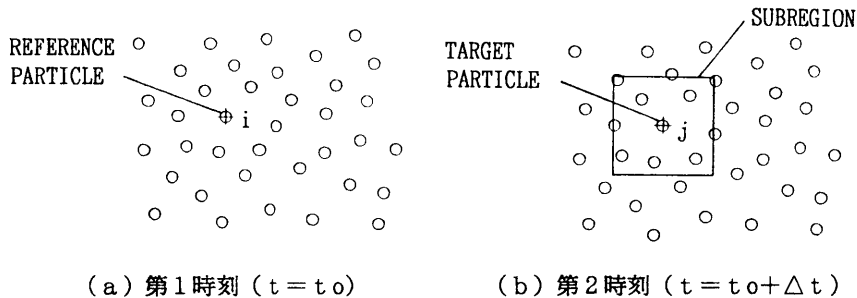


図1 トレーサ粒子の分布

FとGの二つのパターンの相互相関係数は一般に次のように定義される。

$$C_{fg} = \frac{\int f(x, y) \cdot g(x, y) dS}{\sqrt{\int \{f(x, y)\}^2 dS \cdot \int \{g(x, y)\}^2 dS}} \quad (1)$$

$f(x, y)$ と $g(x, y)$ は、明るさ、密度、等々の様なものの二つの分布パターンを表す。

もし、トレーサ粒子像の画面が一つのしきい値によって2値化されるならば、関数 f と g の値は、粒子画像内部の各画素では1をとり、その外部の各画素では0をとる。参照粒子 i と目標粒子 j を中心とする二つのパターン I と J をそれらの中心で重ね合わせると、2値化パターン I と J に対する相互相関係数の式(1)は次のように簡単化される。

$$C_{ij} = \frac{L}{\sqrt{p \cdot q}} \quad (2)$$

ここで、 p と q は第1時刻 ($t = t_0$) と第2時刻 ($t = t_0 + \Delta t$) の相関領域内の各粒子数で、 L は二つのパターンの論理積の”真値”の合計である。ここに、 L は具体的に粒子画像の重なり面積の合計をピクセルで表したものである。もし、一つの粒子ペアに対して C_{ij} の最大値が見つけれ

れると、その二つの粒子は同一の粒子であるとみなされる。粒子の速度は同定された粒子の移動距離 $\Delta \vec{S}$ と時間間隔 Δt ($=1/10$ 秒) から次のように計算される。

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{S}}{\Delta t} \quad (3)$$

3. 実験装置と方法

図2に実験装置の全体図を示す。装置は、図2に示す通り、一様流れ水槽、二つの試験円柱、水素気泡発生装置とその電極、照明装置、ビデオ装置、パーソナルコンピュータを含むデジタル画像処理装置から成る。画像処理装置は、8ビット-256×256ピクセル型で16フレームを保存することができる。

二つの試験円柱の直径と長さは、10mmと290mmである。2円柱間の距離は、 $L/d = 1.0 \sim 8.0$ の範囲内で1.0きざみで配置される。

実験では、2円柱干渉の流れパターンを、2円柱の距離の各場合ごとにアルミニウムトレーサ法を使うことにより可視化され写真にとられる。また、水素気泡トレーサ法は、流れの可視化と画像処理に適用される。はしご形電極に供給される電圧は気泡の大きさに応じて300、400または500Vに制御される。パルス間隔と幅はそれぞれ0.5秒と0.014秒である。これらの実験から、瞬間流速と平均時間流速の分布、流線、渦度分布、流速変動成分のRMS値を求め、その結果より2円柱干渉流を解析する。なお、試験円柱に関するレイノルズ数は192から598の範囲内である。

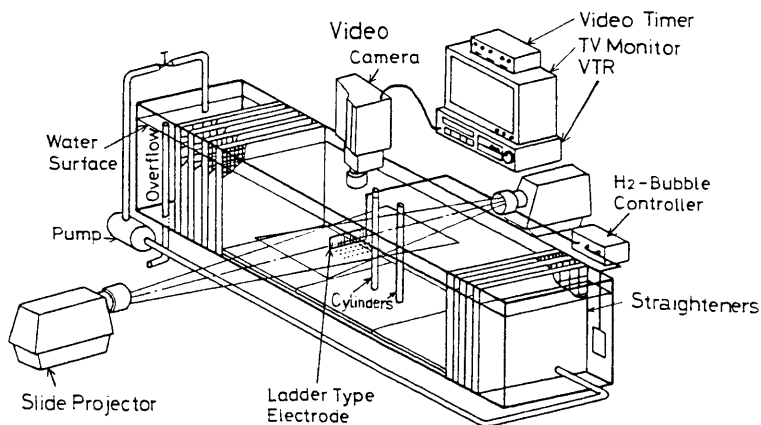


図2 実験装置概略

流線と渦度の計算の過程において、粒子画像の各位置での速度は、次の式に基づく距離の逆数の補間法を用いて、格子点にそれらを再配置させる。

$$u(m, n) = \frac{\sum_{i=1}^4 \left(\frac{u_i}{d_i} \right)}{\sum_{i=1}^4 \left(\frac{1}{d_i} \right)}, \quad v(m, n) = \frac{\sum_{i=1}^4 \left(\frac{v_i}{d_i} \right)}{\sum_{i=1}^4 \left(\frac{1}{d_i} \right)} \quad (4)$$

ここで、 m と n は格子点 P の座標である。図3に示す四つの象限内の4点は式(4)を計算するのに用いられる。過度くと流れ関数 $\psi(m, n)$ は、次式で計算される。

$$\zeta(m, n) = \frac{v(m+1, n) - v(m-1, n)}{2\Delta x} - \frac{u(m, n+1) - u(m, n-1)}{2\Delta y} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi(m, n) &= \psi(m-1, n) - \bar{v}\Delta x && (x \text{ 方向に対して}) \\ \psi(m, n) &= \psi(m, n-1) + \bar{u}\Delta y && (y \text{ 方向に対して}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで Δx と Δy はそれぞれ x と y 方向の格子の辺長である。そして、

$$\left. \begin{aligned} \bar{u} &= \frac{u(m, n-1) + u(m, n)}{2} \\ \bar{v} &= \frac{v(m-1, n) + v(m, n)}{2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

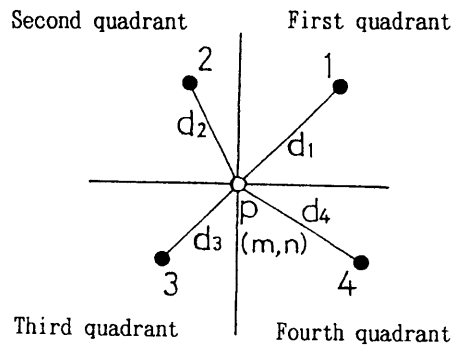


図3 距離の逆数補間法

もし、2値化相関法に基づく上述の2値化相関法が使われるとすると、図4(a)に示すようないくつかの誤対応ベクトルが偶然生じる。一定の大きさの相関領域を持つ2値化相関法を適用したいくつかの誤対応ベクトルが現れる場合には、他の可変の相関領域を持つ2値化相関法が誤対応ベクトルを含む場所において部分的に繰り返して適用される。それでもいくつかの誤対応ベクトルがその後にも残るならば、著者ら[11]が提案していたダブルチェック法が使用される。図4(b)は、そのような誤対応ベクトルの修正された結果を示す。

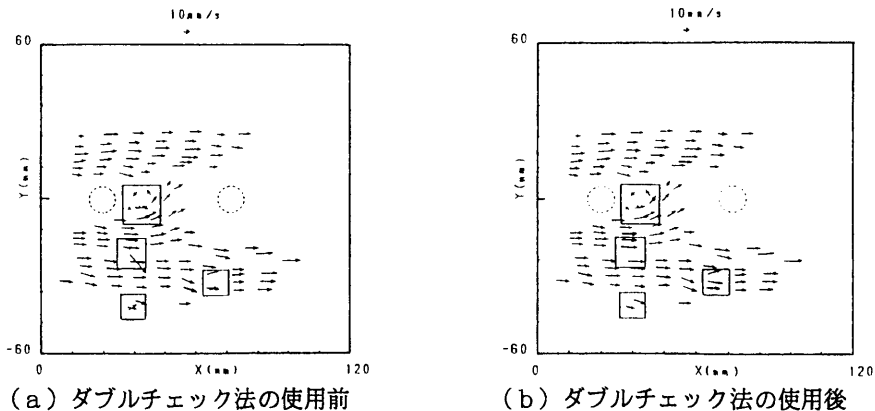


図4 速度ベクトルの一例

4. 実験結果と検討

論文[12]の中で述べられているように、直列配置の2円柱まわりの流れパターンは、次の三つに分類される。図5 (a), (b), (c)にそれぞれ流れパターンのスケッチを示す。

- ① L の距離が短い場合、一対の円柱は渦放出において一体の物体のように振る舞う。
- ② L の距離が中間の場合、前方の円柱からの周期的な渦放出は、後方円柱の後流であたかも干渉のない流れのように連続して観測される。
- ③ L の距離の長い場合、前方円柱からの放出された渦は、後方円柱からの渦と干渉し合う。

図6は、アルミニウムトレーサ法により可視化された流れパターンの例を示す。図はビデオ画面の複写である。流れパターンの分類の結果は、表1に示すように、レイノルズ数の三つの場合に対してまとめられている。

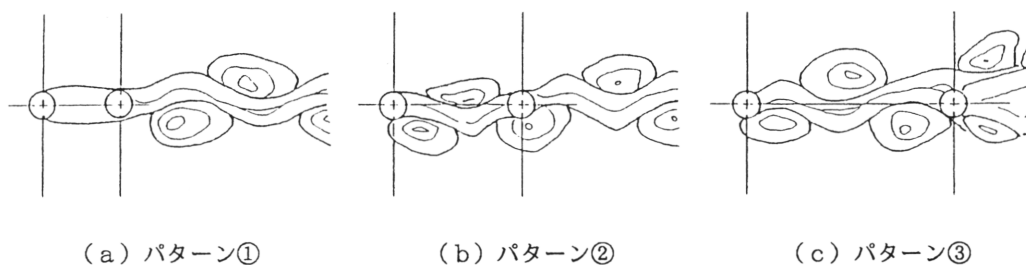


図5 流れパターンのスケッチ

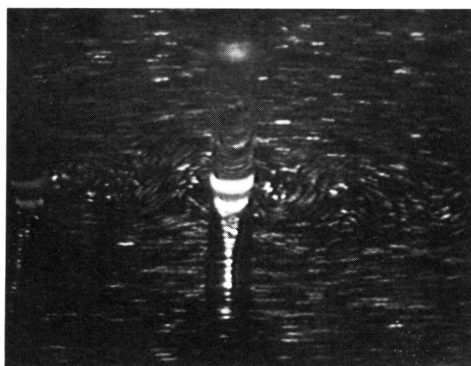


図6 アルミニウムトレーサ法により可視化された流れパターンの一例

表1 流れパターンの分類

		$Re = 223$	$Re = 498$	$Re = 598$
TYPE	①	$L/d = 1.0 \sim 3.0$	$L/d = 1.0$	$L/d = 1.0$
	②	$L/d = 4.0 \sim 6.0$	$L/d = 2.0 \sim 4.0$	$L/d = 2.0 \sim 4.0$
	③	$L/d = 7.0 \sim 8.0$	$L/d = 5.0 \sim 8.0$	$L/d = 5.0 \sim 8.0$

図7と図8は $Re=192\sim 208$ の場合の2D-PTVによる画像解析の結果の例を示す(水の一様流速, $U=18.8\text{mm/s}$)。あらゆるベクトルはある時刻での格子点上に再配置した瞬間の速度を示す。これらの図の中の“+”印は格子点上での速度がゼロであることを意味している。 $L/d=3.0$ の時、 $\vec{v}=\vec{0}$ と $t=0$ の2円柱間の死水域が見られ、変動流は図7より後方円柱の後流で観測される。 $L/d=8.0$ の時、速度の大きい変動が2円柱間に見られ、主流と共に変動流部分の範囲が拡張し、渦は前方円柱のちょうど後方が高いが、後方円柱に近づくにつれて低くなる。これは水流の粘性拡散が原因である。

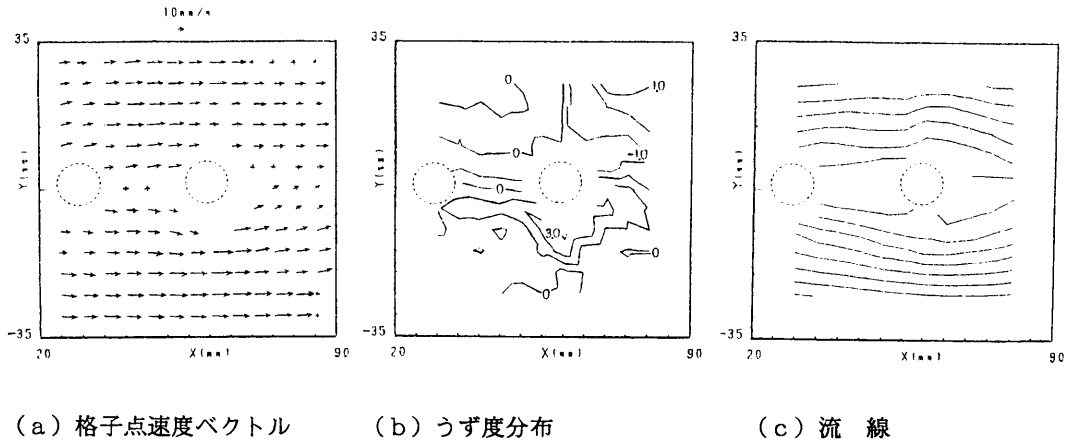


図7 画像解析の結果の一例 ($L/d=3.0$, $Re=208$)

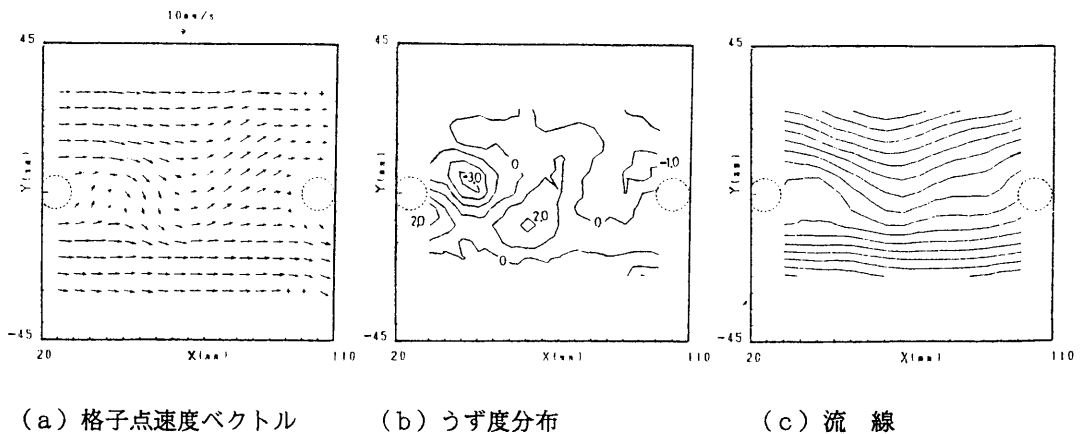


図8 画像解析の結果の一例 ($L/d=8.0$, $Re=201$)

図9は、 $L/d=5.0$, $Re=208$ の場合の速度の y 成分の変動成分 v' のRMS値分布を示す。この図は全時間間隔5.0秒間の51枚の連続画面の画像解析から得られたものである。 v' のRMS値は後方円柱の上流付近で最大値をとる。そこで流れの変動強さは最大になることがわかる。

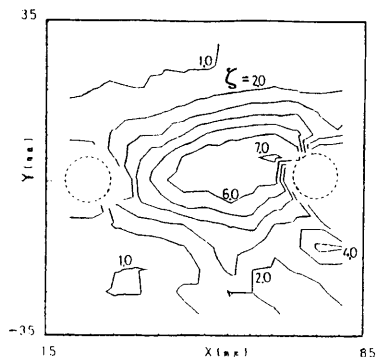


図9 変動成分 v' のRMS値分布

5. 結論

直列配置の2円柱まわりの変動干渉流は2値化相関法に基づく二次元粒子追跡速度測定法(2D-PTV)を用いることにより測定された。瞬間速度ベクトルと平均時間速度ベクトル、渦度分布図、流線、変動速度の自乗平均平方根値の結果が、 $L/d=1.0\sim 8.0$ 、 $Re=192\sim 598$ の範囲内で得られた。結論は次のように要約される。

- (1) 流れパターンは表1のように三つの型に分類された。
- (2) 渦度と v' のRMSの等値線の分布図から、粘性拡散と変動の強さの分布を検討することができた。

この論文では、不確かさ解析は述べられていないが、速度のすべての情報は5%未満の誤差を含み、うず度分布図と流線は約10%未満の誤差を含んでいる。

文献

- [1] Dimotakis, P.E., Debussy, F.D. & Koochesfahani, M.M. : "Particle streak velocity field measurement in a two-dimensional mixing layers", Phys. Fluids, 24, 995-999, 1981.
- [2] Imaichi, K. & Ohmi, K. : "Numerical processing of flow visualization picture-measurement of two-dimensional vortex flow", J. Fluid Mech., 129, 283-311, 1983.
- [3] Kobayashi, T. & Saga, T. : "A real-time velocity measurement algorithm for two-dimensional flow fields", Proc. 2nd Intl. Symp. FLUCOME'88, Sheffield U., 174-178, 1988.
- [4] Racca, R.G. & Dewey, J.M. : "A method for automatic particle tracking in a three-dimensional flow field", Exp. in Fluid, 6, 25-32, 1988.
- [5] Kimura, I. & Takamori, T. : "Image processing of flow around a circular cylinder by using correlation technique", Proc. 4th Intl. Symp. on flow Visualization, Paris, Hemisphere Publ. Co., 221-226, 1986.

- [6] Yamamoto, F., Uemura, T., Koukawa, M., Itoh, M. & Teranishi, A. : "Application of flow visualization and digital image processing techniques to unsteady viscous diffusing free doublet flow", Proc. 2ns Intl. Symp. FLUCOME'88, Sheffield U., 184-188, 1988.
- [7] Uemura, T., Yamamoto, F. & Ohmi, K. : "A high speed algorithm of image analysis for real-time measurement of two-dimensional velocity distribution", ASME FED-85, 129-134, 1989.
- [8] 植村知正, 山本富士夫, 幸川光雄: "二値化相関法-粒子追跡法の高速度画像解析アルゴリズム-", 可視化情報学会誌, 10, 38, 58-64, 1990.
- [9] Nishino, K., Kasagi, N. & Hirata, M.: "Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing", Trans. ASME, J. Fluids Eng., 111, 4, 384-391, 1989.
- [10] Yamamoto, F., Tian, H. Z., Uemura, T., Ohmi, K., Iguchi, M. & Koukawa, M.: "A new particle identification method for 3D PTV", 3rd Triennial Intl. Symp. FLUCOME'91 ASME 1991, San Francisco, 617-622, 1991.
- [11] 山本富士夫, 植村知正, 小川邦康, 近江和生 : "二値化相関法 P T V の正対応率と測定精度の向上", 日本機械学会論文集(B編), 57, 543, 3826-3831, 1991.
- [12] 近江和生: "流れの可視化を用いた二次元物体の後流形成に関する研究", 大阪大学学位(博士)論文, 1991.