

画像処理による合流部大規模剥離渦の運動特性に関する研究

Investigation of Large-Scale Separated Eddies at Confluence
by Using Image Processing Technique

藤田一郎*・河村三郎**

By Ichiro FUJITA and Saburo KOMURA

Kinematic characteristics of large-scale eddies at a two-dimensional confluence are examined by using a correlation method, one of the image processing techniques. In this paper, a method for detecting and correcting erroneous velocity vectors, calculated by the correlation method is presented and it is used to obtain successive velocity fields of the water duct confluence flow of the discharge ratio $Qr = 0.2$ and 0.4 at $Re = 3 \times 10^4$. When a reverse flow region decreases, the results show that several small scale eddies are created and they are convected at a speed nearly equal to the mean flow velocity.

Keywords: confluence flow, image processing, large-scale eddy

1. まえがき

合流部においては、支流からの流れが主流に貫入する際に剥離が生じ、大規模な剥離渦群（剥離泡）の変動を伴う流れの状況が現われる。剥離泡の規模は、合流角あるいは流量比が大きいほど大規模なものとなるが、開水路における合流部ではこのような剥離渦の特性が水深方向にも変化するために、三次元性の強い非常に複雑な流況が生じる¹⁾。合流現象による剥離渦の基本的な特性を把握するためには、このような流れの三次元性をできるだけ排除した流れを調べる必要があると考え、本研究では長方形断面の管水路が直角に合流する場合について検討を行った。それは、管水路中央の断面においては開水路の場合よりも二次元性の卓越した流れが生じていると考えたからである。

一方、流れの計測手法に関していえば、従来の点計測では、流れ場を二次元と仮定しても、場所的・時間的に変動の激しいこのような流れに対して、その全体像を的確に把握することはほとんど不可能である。そこで、本研究では個々の計測点における精度は多少犠牲にしても、流れ場全体の特徴をある程度の精度内で求める手法として、画像処理手法の一つである相関法²⁾³⁾を用い、連続的な画像の処理によって合流部剥離渦の運動特性について検討した。

* 正会員 岐阜大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 岐阜大学教授 工学部土木工学科

2. 実験装置および画像処理装置

実験装置の概要を図-1に示す。合流水路は本流が2.5m, 支流が1.0mの水平に設置されたアクリル樹脂製の管水路であり, 本流の中央付近で直角に合流させている。水中ポンプからの流量はいくつかのバルブ操作によって本流と支流に配分し, 管水路内に $4.9 \times 10^4 \text{ Pa}$ 程度の圧力がかかるように下流水槽のバルブを調整した。流れにはトレーサとして比重が約1.02, 平均粒径が0.6mm程度のナイロン粒子を投入しており, ハロゲンスリット光源からの光膜を水路中央に水平に照射して流れの可視化を行った。図-2にビデオ画像の撮影装置を示す。タイムカウンタは1/100秒読みであり, ビデオ画像に同時に撮し込むことによって一コマ毎の画像の識別を行った。管路の断面は, $B=0.15\text{m}$, $B_2=0.10\text{m}$, $H=0.10\text{m}$ であり, レイノルズ数は $Re=U_s B/\nu$, 流量比は $Q_r=Q_2/Q_s$ で定義した。 Q_s, U_s はそれぞれ合流後流れの流量と断面平均流速, Q_2 は支流流量である。本論文では $Re=3 \times 10^4$, $Q_r=0.2, 0.4$ の場合の検討例を示す。

画像処理には512x512画素, 256階調の分解能をもつ画像処理装置(PIAS, LA-525)を使用し, ビデオ静止画像を一コマずつ濃淡画像データに変換して連続データを得た。ここでは10Hzで10秒間のサンプリングに相当する100組200画像のデータを各ケースについて処理した。

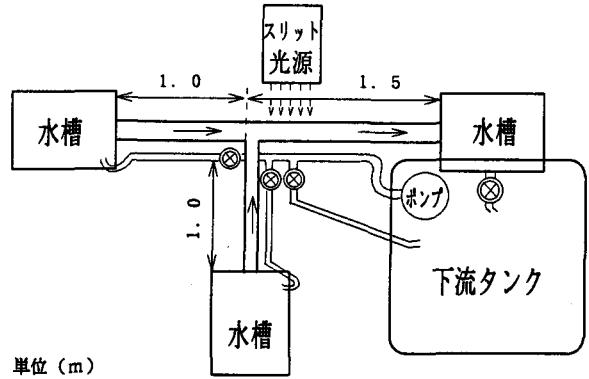


図-1 実験装置

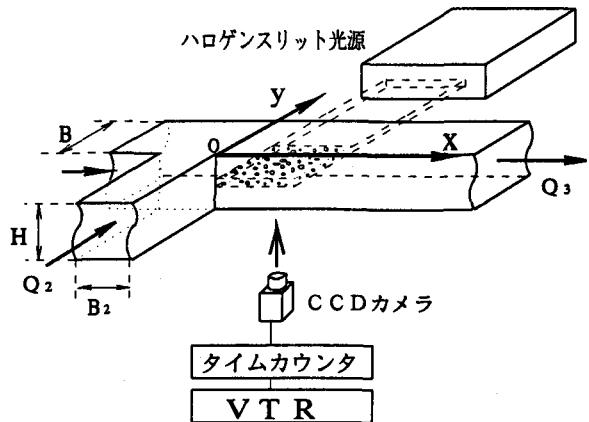


図-2 画像計測装置

3. 相関法の改良

3.1 連続画像への適用

従来使用していた相関法では, 探査領域をすべての計算点に対して一定としていたため, 相関処理に必要な以上の時間を要していた。この点を解消するために, 最大相関点を以下のような単純な方法でトラッキングした。すなわち, 時刻 N , 計算点 (x_{ij}, y_{ij}) における流速ベクトルを (U_{ij}^N, V_{ij}^N) , それ以前の時間ステップにおける値を $(U_{ij}^{N-1}, V_{ij}^{N-1})$, $(U_{ij}^{N-2}, V_{ij}^{N-2})$ とするとき探査領域 (Xs_{ij}^N, Ys_{ij}^N) を次式で与えた。

$$Xs_{ij}^N = x_{ij} + U_{ij}^{N-1} \Delta t \pm |U_{ij}^{N-1} - U_{ij}^{N-2}| \Delta t \quad (1)$$

$$Ys_{ij}^N = y_{ij} + V_{ij}^{N-1} \Delta t \pm |V_{ij}^{N-1} - V_{ij}^{N-2}| \Delta t \quad (2)$$

最初の2つの時間ステップでは固定した探査領域を用いるが, それ以降は時間進行にともなって更新される探査領域を用いることにより, 処理時間を大幅に減少させることができた。

3. 2 異常ベクトルの検出・補正方法

ある点Pにおいて得られた流速ベクトルが周囲のベクトルに対して異常かどうかを判別するために、点P周辺の流れの連続性を考慮する新たな方法を考案した。まず、図-3に示すように点Pの周囲の点を(N, S, W, E)と(NE, NW, SE, SW)の組に分け、(N, S, W, E)の各点における流速ベクトルを用いて(D_1, D_2, D_3, D_4)の各三角形領域に対して発散($\text{div } U$)を計算する。ただし、差分は前進差分と後退差分を使い分けることとし、領域 D_1 に対する発散の値も D_1 のように表わすと、三角形領域に対する発散の値は例えば次のように表わされる。

$$D_1 = (U_E - U_P)/\Delta x + (V_N - V_P)/\Delta y \quad (3)$$

$$D_2 = (U_P - U_W)/\Delta x + (V_N - V_P)/\Delta y \quad (4)$$

領域(D_5, D_6, D_7, D_8)に対しては ξ, η 方向の差分が必要となるが、図-3に示したような座標変換を行えば、各領域に対する発散を以下のように得ることができる。

$$D_5 = (U_{NE} - U_P)\Delta y - (U_{NW} - U_P)\Delta y + (V_{NW} - V_P)\Delta x + (V_{NE} - V_P)\Delta x / (\Delta\xi\Delta\eta J) \quad (5)$$

$$D_6 = (U_P - U_{SW})\Delta y - (U_{NW} - U_P)\Delta y + (V_{NW} - V_P)\Delta x + (V_P - V_{SW})\Delta x / (\Delta\xi\Delta\eta J) \quad (6)$$

$$D_7 = (U_P - U_{SW})\Delta y - (U_P - U_{SE})\Delta y + (V_P - V_{SE})\Delta x + (V_P - V_{SW})\Delta x / (\Delta\xi\Delta\eta J) \quad (7)$$

$$D_8 = (U_{NE} - U_P)\Delta y - (U_P - U_{SE})\Delta y + (V_P - V_{SE})\Delta x + (V_{NE} - V_P)\Delta x / (\Delta\xi\Delta\eta J) \quad (8)$$

ここに、Jは変換ヤコビアンでここでは次式で与えられる。

$$J = 2\Delta x\Delta y / (\Delta\xi\Delta\eta) \quad (9)$$

異常ベクトルの検出は以下のように行う。すなわち、各々の発散の組の最大値、

$$D_{\max 1} = \text{Max}(D_1, D_2, D_3, D_4) \quad (10)$$

$$D_{\max 2} = \text{Max}(D_5, D_6, D_7, D_8) \quad (11)$$

を求め、 $D_{\max 1}$ と $D_{\max 2}$ があるしきい値 $D_{\max}$ に対し、同時に次の条件

$$D_{\max 1} > D_{\max} \quad \text{and} \quad D_{\max 2} > D_{\max} \quad (12)$$

を満たしておれば、異常ベクトルと判定する。ここで問題となるのは、しきい値 $D_{\max}$ の与え方であるが、相関法で得られた流速ベクトルの値は、対応する相関係数が小さいほど計測精度が低下しているため、発散の値の分布には明瞭なジャンプは見られず、したがって明確なしきい値の基準を設定することは困難であった。そこで、予備的にしきい値を段階的に変化させて異常値検出のようすを調べ、その中から最適と思われる値を使用することとした。本研究で対象とした流れにおいては、異常ベクトルの検出率は5~10パーセント程度であった。異常と判断された計算点における値は、周囲の正常な値から補間された値と置き換えた。

3. 3 流速ベクトルの再補正

これまでの操作によって、瞬間的な流速ベクトルを求めることは一応できるが、前述のように計測誤差が

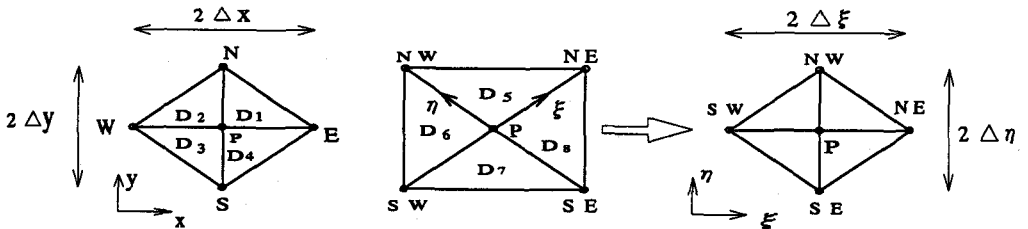


図-3 異常ベクトル検出のための座標および変換座標

含まれているために、流れの連続性の点からはまだ不十分な面がある。そこで、ここでは二次元の流れ場を仮定し、運動量方程式の非定常解法において用いられている流速・圧力の同時調節を、異常ベクトルを除去・補正した後の流速ベクトルに施すことによってベクトルの再補正を行った。流速・圧力の同時調節スキームにはSOLA法を用いた。SOLA法の適用に際しては、格子点上で得られている流速ベクトルをスタガード格子に再配分して計算を行った。SOLA法における収束判定には、次のような比較的緩やかな条件を用いた。

$$\sum_{i=1}^{NX} \sum_{j=1}^{NY} D_{ij} < (\sum_{i=1}^{NX} \sum_{j=1}^{NY} D_{ij}|_{k=0})/3 \quad (13)$$

ここに、 D_{ij} は各コントロール・ボリュームにおける発散値、 NX, NY は x, y 方向の流速ベクトルの数、 k は繰り返しの回数である。ただし、初期の圧力分布はすべてゼロとおいた。

以上のような手順によって得られた流速ベクトルの例を全く補正を行っていないものと比較して図-4に示す。補正前の流速分布の中に含まれている特徴的な流速分布のパターンが、より明瞭な形で得られていることがわかる。

4. 剥離渦の運動に関する検討

4. 1 平面的な運動パターン

本研究では、相関法における参照フレームサイズを 23×23 画素とした。1画素に相当する物理的な大きさは 0.6mm 程度だったので、以下の相関法による解析結果は、約 1.4cm 四方の小領域内の流れを平均化したものとみなせる。この意味において、相関法による解析手法は少なくとも二次元場においては、コントロール・ボリューム内の流速変動の空間平均値を対象とするLES (Large Eddy Simulation) と類似した点を有するものと考えられ興味深い。LESにおけるコントロール・ボリュームと同様に、理論的には参照フレームサイズが小さいほど空間分解能は向上するが、実際には参照フレームを小さくし過ぎるとその中にトレーサが存在する確率が低下し、その結果異常ベクトルが数多く発生することになる。したがって、本研究では異常ベクトル発生率を10パーセント程度に抑えるために前述のようなサイズを採用した。

流量比が0.4の半水深の断面で得られた典型的な流速分布パターンを図-5に示す。 $T=0.9$ では2つの比較的大規模な渦が並んで剥離領域内に存在している様子が得られている。 $T=1.3$ ではさらに剥離泡が発達している。この場合にも基本的には2つの大規模渦が見られるが、側壁付近まではその影響は及んでおらず側壁近傍では一様な逆流状態が生じている。 $T=2.4$ は剥離泡が収縮を始めたときのパターンである。この場合には大規模な渦構造は消失し、剥離せん断層に沿って比較的規模の小さい渦がいくつか並んでいることがわかる。 $T=4.0$ は急激に収縮が進んでいる場合であり、せん断層に沿う剥離渦は存在しているが、それらは側壁にまで達して、剥離領域の幅が非常に狭くなっている。 $T=5.7$ から $T=6.8$ にかけては、剥離領域が主流からの

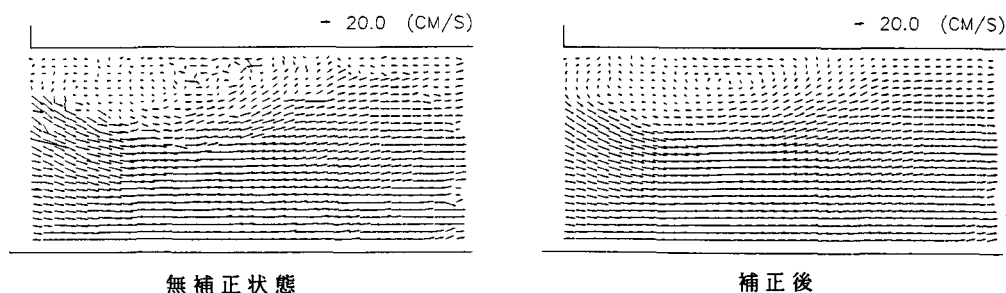


図-4 異常ベクトルの検出と連続性を考慮した再補正

運動量の供給を受け、再び増大し始めている様子をとらえている。再付着点付近の大規模な1つの渦の流下にともなって剥離泡が発達していることがわかる。

4. 2 剥離領域の時間変動

以上のような剥離領域のマクロ的な変動の様子をさらに詳細に調べるために、図-6に示すような側壁に平行な検査線上における流速ベクトル列の流向に注目した。図-6には剥離泡が2つに分裂したときの流向のパターンを模式的に示しているが、U成分の流向は剥離泡全体の伸縮の影響によって変化し、V成分の流向は個々の渦の移動によって変化する。従って、両成分の時間変化を比較すれば大規模渦運動の特徴をとらえることができる。

図-7は $Qr=0.4$ に対するU、V成分の流向の時間的な変化をプロットしたものである。白い部分が順流、それ以外が逆流域であり、逆流流速が大きい部分(U, V<-5cm/s)を濃く示している。U成分の流向分布には、 $T=2.0$ から $T=6.0$ にかけて逆流域(剥離泡)が半分程度に減少し、その後再び増大傾向となる様子が示されて

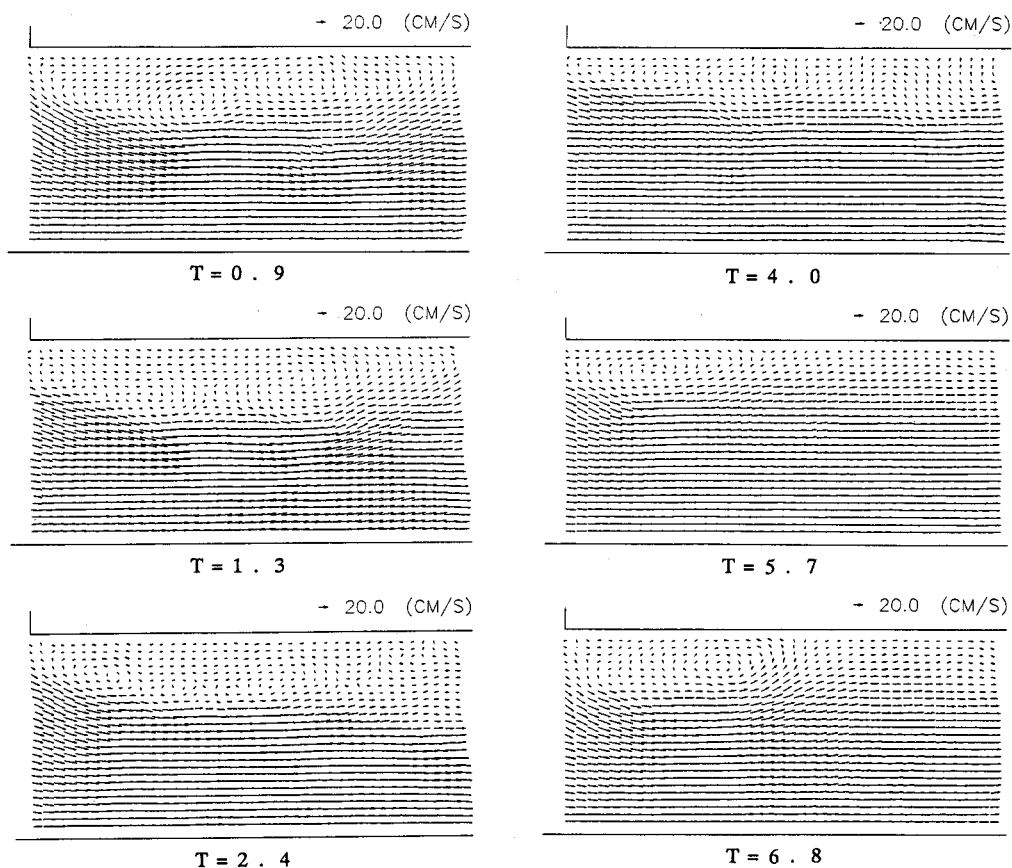


図-5 剥離渦配置の典型的なパターン ($Qr = 0.4$)

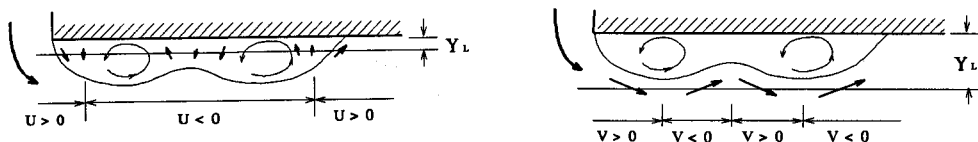


図-6 剥離渦の位置と流向の関係

いる。これは図-5において示した考察とよく一致している。検査線の位置は異なるが、V成分の流向分布には、逆流域が縮小する部分に対応して何本かの斜めの白筋が現われている。図-4で説明したように、これらは個々の渦の通過の様子を間接的に示すものであり、剥離泡の収縮期にはその分裂にともなって小規模な渦が多数発生することがわかる。また、この白筋の傾きは渦の流下方向への移流速度を表わしているが、この場合その勾配はいずれの渦に対してもほぼ一定であり、20~25cm/s程度である。この値は合流後流路の平均流速にほぼ等しく、この領域では分裂渦が平均流に乗って移流していることがわかる。これに対し、剥離泡の膨張期にはこのような小規模渦はほとんど生じておらず、主流からの運動量の供給を受けながら低速度で移動・発達していることがわかる。

図-8には、 $Qr=0.2$ の結果を示す。V成分には、白筋が密に並んでいる領域と全くない領域が明らかに存在しており、図-7と同様な剥離泡の変動パターンが見られる。計測時間が十分でないため、変動周期等に関する詳細な特性は不明確だが、 $Qr=0.2$ と0.4のいずれの場合も変動周波数は0.1Hz程度と考えられる。

5. 結論

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 相関法の改良によって効率的に多量の画像が取り扱えるようになった。
- 2) 異常ベクトルの検出方法および流れの連続性を利用したベクトルの補正方法を提示した。
- 3) 剥離泡の収縮期において多数の剥離渦が現われ、その移流速度は平均流速と同程度であることを示した。
本手法によって、マクロ的な剥離渦の挙動をとらえることが可能となったので、今後はこの結果をLES等の数値シミュレーションの検証データとして利用していく考えである。

最後に、画像データの収集に協力してくれた学部四年の畠中悟君に謝意を表します。

参考文献

- 1) 藤田一郎・河村三郎：開水路合流部流れの三次元構造，水工学論文集，Vol. 34, pp. 301-306, 1990.
- 2) 藤田一郎・河村三郎・近藤雅信：粒子画像のシミュレーションによる相関法の精度と精度向上に関する研究，可視化情報，Vol. 11, Suppl. No. 1, pp. 173-176, 1991.
- 3) 藤田一郎・河村三郎・神田徹：相関法の精度と洪水流航空写真への適用，水工学論文集，Vol. 35, pp. 293-298, 1991.

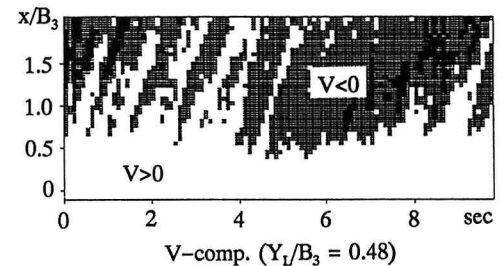
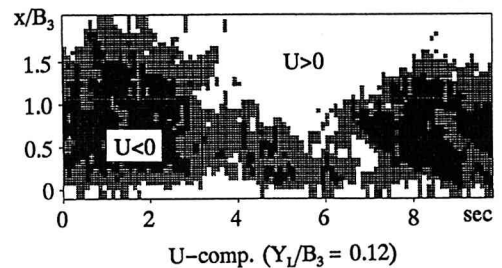


図-7 剥離渦の移動による流向の変化 ($Qr=0.4$)

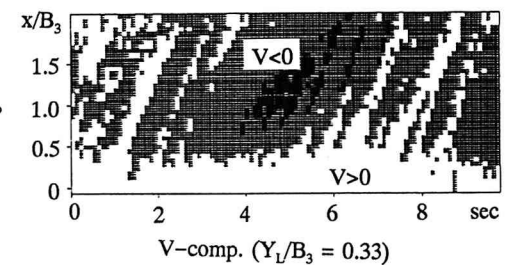
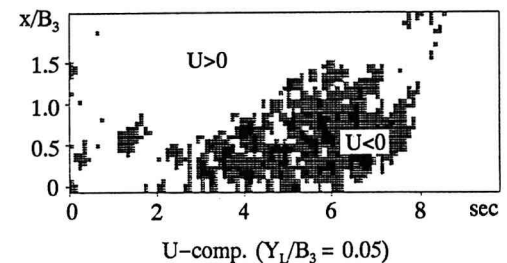


図-8 剥離渦の移動による流向の変化 ($Qr=0.2$)