

実体視と画像相関解析を併用した 洪水航空写真解析手法の構築と検証

FLOOD FLOW ANALYSIS ON AERIAL PHOTOS BY IMAGE CORRELATION
METHOD WITH SUPPORT OF STEREO VISUALIZATION

箕浦靖久¹・石川忠晴²・吉田圭介³

Yasuhisa MINOURA, Tadaharu ISHIKAWA and Keisuke YOSHIDA

¹学生会員 東京工業大学 環境理工学創造専攻 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

²フェロー会員 工博 東京工業大学教授 環境理工学創造専攻 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

³正会員 博(工) 東京工業大学 産学官連携研究員 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

Stereo images of river freshets taken by airplanes contain a lot of useful information for river engineering works. The image correlation analysis on a computer, which is a standard technique for stereo image analysis, sometimes produces anomalous results because the color patterns to be traced on the flood water surface are not very clear. On the other hand, a classical manual analysis through a stereoscope usually works well even in such conditions by the excellent perspective sensitivity of human eyes, but the manual analysis costs much labor and time.

In this study, a new technique was developed for analyzing the stereo images by combining the above mentioned two methods. A few image correlation analyses are carried out by changing the parameter. Each result is compared with the original image through the stereoscope, and when errors are detected at some points, other results are referred and replaced for them if correct vectors were obtained in others. This process is not very troublesome and errors decrease greatly.

Key Words : Flood flow, Stereo image analysis, Image correlation analysis, Man-machine system, Aerial photographs of river freshet, Stereo eyeglasses

1. はじめに

我が国は地理的・気候的に水害の頻度が高く、洪水防御のための河道改修に多大の労力と時間をかけてきた。従来より河道管理には一次元不定流ないし一次元不等流計算が用いられている。しかし実際の堤防決壊は河道内の平面的ないし三次元的特性が関わっていることが多く、そのために洪水流の局所的特性の研究が近年盛んに行われている¹⁾。また近年の計算機の能力向上に伴い、数値シミュレーションによる洪水流解析が可能となってきた。しかし、計算結果を検証する現地データが少なく精度比較が不十分である。

河川流の計測法としては、従来、簡便な浮子を用いた観測が行われてきた。しかし浮子観測には浮子の偏流を主として様々な問題点が指摘されている²⁾。近年はADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)を用いた洪水時の水深方向流速分布の計測が試みられている³⁾⁴⁾。一方で、

河川表面流を対象とし、ビデオ画像⁵⁾や洪水航空写真を利用した画像解析(PIV解析)も行われている。特に洪水航空写真は、河道全域にわたる洪水表面の流況を一挙に捉えられる点において先に述べた計測法より優れており、木下⁶⁾による並列らせん流の発見、福岡ら⁷⁾による洪水時の河道内樹木の存在に起因する大規模水平混合の把握などの成果が報告されている。そこで本研究では洪水航空写真を数値シミュレーション結果の検証用データとして用いることを考え、その実用的解析手法について検討している⁸⁾。

初期の頃の洪水航空写真解析では、カメロン効果⁹⁾を利用した実体視により表面流速ベクトルを求めていた。この方法は解析精度が高いものの、労力が非常にかかることが難点であった。その後、相関法を用いた計算機上での画像解析¹⁰⁾が行なわれるようになった。こちらは簡便・高速である反面、計算機の錯誤が混入しやすい。

上記の手法の長短は相補的であることから、人間が実体視で得た情報を必要に応じて計算機に与えることによ



写真-1 解析装置

表-1 解析対象画像と諸元

対象洪水	平成10年9月17日 利根川出水	
撮影高度	1530m	
縮尺	1 / 10,000	
撮影時間間隔	6.40 sec	
1pixelあたりの距離	0.85 m	
対象画像	撮影時刻	撮影場所
A	8:06	利根川 64k 付近
B	8:11	利根川 60k 付近

り相関法による画像解析の精度を向上させられると考えている。前報⁸⁾では、実体視と画像相関解析を組み合わせた簡易な装置を作成した。その装置を用いて相関解析の誤りを抽出し、さらにマニュアルで修正することにより、既存の相関解析では解析するのが困難な画像に対しても解析できた。しかし誤りが多数になるとすべてをマニュアルで修正するのは困難である。そこで本研究では、まず相関解析で錯誤が生じやすい状況ごとに相関法の精度向上を試みた。続いて、パラメータを変化させることにより複数の相関解析を行い、その中から実体視により正しい結果を“選択”する方法を検討した。つまり、実体視による“計測”回数を減少させることにより解析にかかる労力の軽減をはかるものである。本研究では、これらの手法の妥当性を検討するとともに、得られた流速ベクトルから表面流線と収束・発散を求める手法についても検討した。

2. 解析システムの構成

(1) 解析装置の特徴

ステレオ航空写真をデジタル画像に変換してコンピュータに入力し、水平に置いたワイドディスプレイ上に並べて表示する。その上に実体鏡を設置することで、デジタル画像を実体視できるようにした(写真-1)。この方法によれば、画像の位置や色調の修正が簡単にできるため、解析者の個性によらず実体視できる。また、相関解析の結果を原画像と同時に実体視することにより、相関解析の誤りを容易に検出でき、マニュアルで修正することも可能になる。

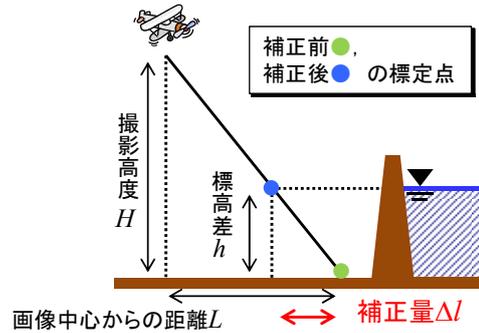


図-1 標高差の幾何学的補正

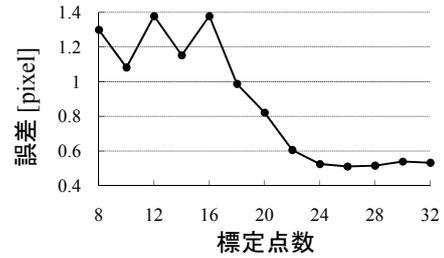


図-2 誤差解析結果

なお本研究では平成10年9月17日利根川出水で撮影された航空写真を使用した。本論文に示す解析対象画像は表-1に示す2組である。このうちAは濃淡がはっきりしない領域を含むため、通常の相関法では解析が難しい画像である。本手法の適用性を示すために使用した。一方Bは大規模な水平渦が生じており、この渦の周囲での流れの構造を検討するために使用した。

(2) 画像間の座標変換式

ステレオ画像の空間座標を対応させる際に、従来は河岸水際に標定点を設置する方法が一般的であったが、この方法は手間が非常にかかる。一方、本研究の解析対象河道は沖積地にあり、堤内地盤はほぼ平坦で且つ傾斜は水面勾配にほぼ等しい。そこで筆者らは半自動的に標定点を設置する方法を開発している⁸⁾。その結果、標定点を簡単にいくらかでも増やすことができ、座標変換式の平均誤差は1pixel近くまで減少した。しかし、平均的に1pixelの誤差が生じている場合、常に誤差を含んでいることと同様である。そこで、以下の工夫を行った。

洪水時の水面は堤内地盤に比べて標高が高いために、この高低差による視差の補正を行う必要がある(図-1)。地盤と水面の標高差を h 、画像中心から当該点までの距離を L 、撮影高度を H とすると、水平位置の補正量 Δl は次式で表せる。

$$\Delta l = L \frac{h}{H} \quad (1)$$

また、航空写真は各所に歪みを含んでおり、全画面に共通の座標変換式を用いると誤差が発生しやすい。そこで前報で述べた方法で十分な量の標定点を用意し、解析

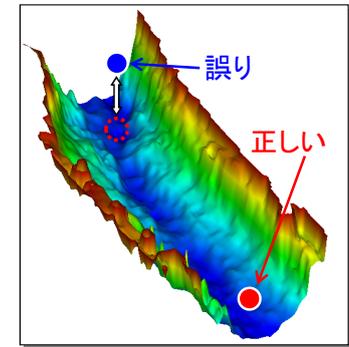
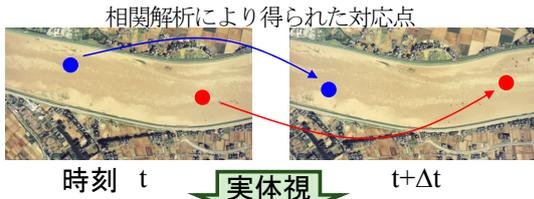


図-3 相関解析の誤差チェック

する地点近傍の標定点から作成した局所的な座標変換式を用いることができるようにした。

必要標定点数を調べるために、河道内樹木をターゲットとして座標変換式の精度を評価した。用いた樹木は9本であり、誤差評価は次式で示すpixel単位で算定位置の誤差の平均とした。

$$Err = \sqrt{\sum_j^9 (\Delta x_j^2 + \Delta y_j^2) / 9} \quad (2)$$

ここに、 Δx_j 、 Δy_j は流下方向および横断方向でのpixel単位の推定誤差である。図-2に示すように、標定点の数が24程度になると誤差は0.5pixel程度に収まることが分かった。

3. 実体視と相関解析を組み合わせた解析法の構築

(1) 相関解析結果の誤差チェック

写真-1に示した装置を用いて、相関解析結果をステレオ画像にして原画像と同時に実体視をする。相関解析結果が正しい場合には背景画像に接して見え、誤りである場合は高低差を生じて見える(図-3)。さらに高低差は相関解析の定量的な誤差を表している。

この方法を用いて、相関解析による誤ベクトル発生の傾向を調べた。その結果、誤ベクトルが発生しやすい状況は、a) 濃淡パターンがほとんどない低流速部 b) 低水路河岸の流速急変部 c) 河道内の樹木や人工物の周辺の3通りに分類できた。そこで次に、各状況で誤差を軽減する方法を検討した。

a) 濃淡パターンがほとんどない低流速部

高水敷など低流速の部分では泡や濁質が少なく水面の濃淡変化が緩やかであり、高流速部と同じ相関窓を用いると誤ベクトルの割合が高くなる。そこで岡部ら¹¹⁾に倣

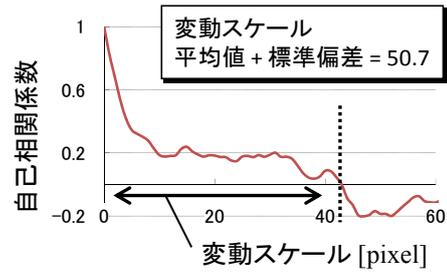


図-4 輝度値の自己相関関数

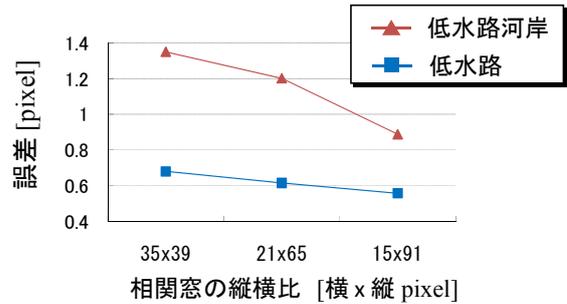


図-5 相関窓の縦横比と誤差

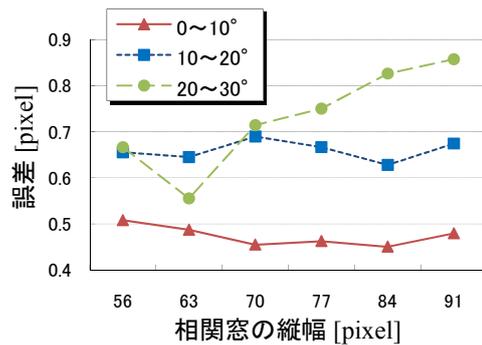


図-6 相関窓の縦幅と誤差

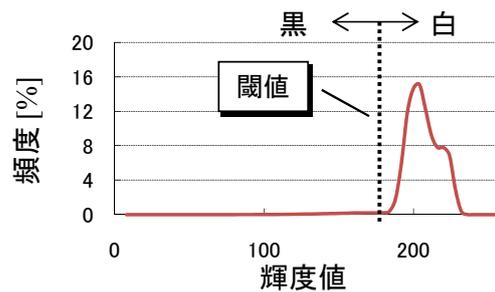


図-7 輝度値のヒストグラム



図-8 画像の二値化(前, 後)

い、輝度値の自己相関係数が0となる距離（変動スケール）を図-4のように算出した（このケースの場合は43pixel）．高水敷の種々の点で変動スケールを求めたところ、その平均値と標準偏差の和が50.7pixelになったことから、高水敷の低流速部分においては1辺を51pixelの正方形相関窓を用いることとした．

b) 低水路河岸の流速急変部

画像相関法では相関窓内の平均的な流速を求めることになる．相関窓が横断方向に広く、窓内での流速差が大きい場合、誤差は大きくなる．そこで、面積が等しく縦横比が異なる3種類の相関窓を用いて解析した．図-5には実体視により求めた誤差を示す．低水路河岸・低水路ともに最も縦長（横幅15pixel）の相関窓を用いたときに誤差が小さくなるのがわかる．

次に、横断方向の幅を15pixelに固定し、流下方向に長さを変化させた場合の誤差を図-6に示す．3つの線は相関窓の軸線に対する流れの角度別になっている．流れが斜めになるほど誤差が大きくなるが、相関窓の縦幅が63pixel以下になると流向の影響はほとんど見られない．そこで低流速部以外については、流下方向に63pixel、横断方向に15pixelの長方形の相関窓を設定した．

c) 河道内の樹木や人工物の周辺

航空写真には河道内の樹木や高水敷の地面、係留された浚渫船など、様々なものが写っている．これらをここでは“固体”と呼ぶことにする．固体は輪郭がはっきりしており色彩も鮮やかである．一方、流水部分のトレーサーは泡や濁質の濃淡であることから、輝度値の差が比較的少なく、また時間的に形状が変化する．したがって、固体と流水が含まれる相関窓では、固体の影響により、相関解析による流速値はほとんど0になってしまう．

固体の多くは洪水表面とは明らかに色調が異なり、多くは暗くなっている．そこでまず、概ね河道のみの領域で輝度値の頻度分布を作成すると図-7に示すように、シャープな屈曲点が存在する．この値（この図の場合は180）を閾値として原画像を二値化すると、図-8に示すように、河道内の樹木や浚渫船が流水部分から明らかに分離できている．そこで、同図で黒く分離されたピクセルを除外して相関係数を算出することにより、多くの場合は固体の影響を除去できると考えた．

(2) 探査領域の限定による誤ベクトルの除去

流体運動は連続的であるから、既に正しく解析された部分の近傍ではそれに近いところに正解があると考えられる．そこで既に得られた結果を“参照データ”とし探査領域（濃淡模様を探す領域）を限定する．同時に予想される流速に基づき、前節に述べた低流速部の判定も行う．具体的には以下の手順による．

図-9中に示す Line-a のように正確な流速ベクトルが既に得られているとする．Line-a のベクトルを延長して、これから解析する隣の測線（Line-b）との交点にベ

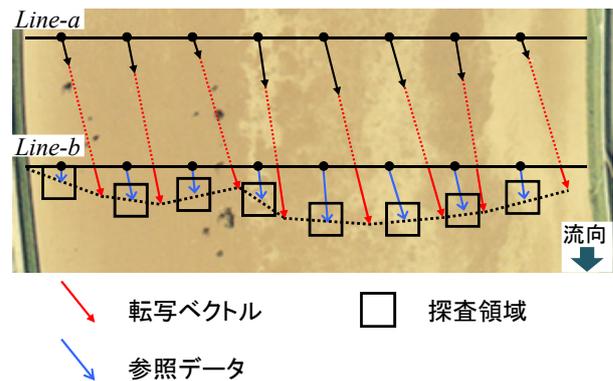


図-9 参照データの作成

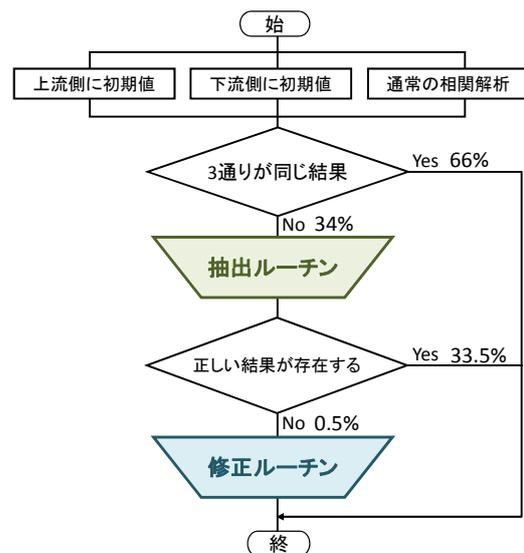


図-10 解析の流れ

クトルを転写する（図中の赤色のベクトル）．その位置は等間隔ではないので、隣り合うベクトルの線形内挿から流速を求めたい位置での仮の流速ベクトル（図中の青色のベクトル）を求める．これを参照データとして、その周囲に比較的小さな探査領域を設定して最終解を求める．探査領域の限定により、離れたところに偶然類似の濃淡パターンが存在する場合の誤ベクトル発生を防ぐことができる．

(3) 複数の始発測線の設定

解析領域の上流側と下流側の2箇所に初期値を設定し、前節の方法を用いて同じ領域を解析する際に生じる誤ベクトルの数を調べた．その結果、上流側、下流側の一方からの解析では、全665点のうち誤ベクトルはそれぞれ49点、83点生じた．そのうちの24点については、上流・下流のどちら側の解析からも誤ベクトルが得られた．このことは、2つの結果から正しいベクトルを選択していくと、その領域の誤ベクトルは24点に減少することを意味している．また、2つの解析結果の差が小さい領域では誤ベクトルと判定されることがなかった．このことから、複数の解析の比較から正しいベクトルを選択するこ

とにより、誤ベクトルの数を実体視による修正をせずに減少させられることがわかる。

4. 実体視を併用した解析

(1) 実体視の活用方法

実体視の役割には (i) 複数の相関解析結果を比較し正しいものを抽出する, (ii) 相関解析結果をマニュアルで修正する, の2種類が考えられる。前者の方が少ない労力ですむ。

そこで、図-10に示す解析手順を考えた。まず (a) 上流側に初期値を設置した解析 (b) 下流側に初期値を設置した解析 (c) 通常の相関解析の3つの解析を行う。通常の相関解析とは、参照データを用いずに全点を独立に相関解析する方法である。得られた流速を比較し、その差がほとんどないものについては正しい結果と判断する。本論文に示す解析例では66%の結果がこの場合に当てはまった。差が大きい残りの34%の結果についてのみ、同時実体視により3つの解析結果の中から正しいものを抽出する(抽出ルーチン)。34%中33.5%については、いずれかの解析で正しい結果が得られていた。最終的に3つのすべてが正しくない0.5%についてのみ、人間が実体視によりマニュアルで修正する(修正ルーチン)。

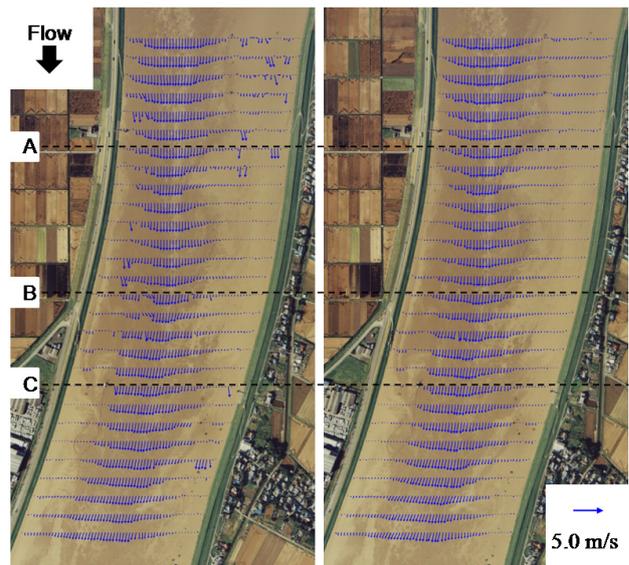
(2) 解析結果と比較

画像Aに上記の手法を適用した結果を図-11に示す。通常の相関解析を行なった (a) では不連続な部分が多数見られるが、本解析 (b) では整然とした結果が得られている。結果の妥当性を調べるため、図中の3本の横断線で実体視により独立に流速分布を算出した。その結果を図-12に青点で示す。通常の相関解析(水色線)ではところどころ大きなズレが見られるのに対し、本論文で述べた手法(赤線)では実体視の結果とほとんど一致している。

ところで、多くの洪水航空写真はオーバーラップした一連の写真である。そこで“別の組み合わせ”の画像からも同じ地点の解析を行なえる場合が多い。図中の黒線(次の時刻)は、図-11の解析画像の“ひとつ下流側の画像の組み合わせ”に対して本手法を適用したものである。赤線と黒線は、乱流の時間変動のために完全に同一にはならないが、大局的には一致しているといえる。実務において解析対象区間が長い場合、多くの解析結果を実体視の結果と比較することは困難となるが、このように異なる画像組み合わせの結果の比較により解析結果の妥当性を簡便にチェックできる可能性がある。

(3) 洪水表面の流況図

本手法を画像Bに適用して得られた流速ベクトルを図-13(a)に示す。ただし見やすいように縦断方向には



(a) 通常的相关解析 (b) 本手法による解析

図-11 表面流速ベクトル図の比較

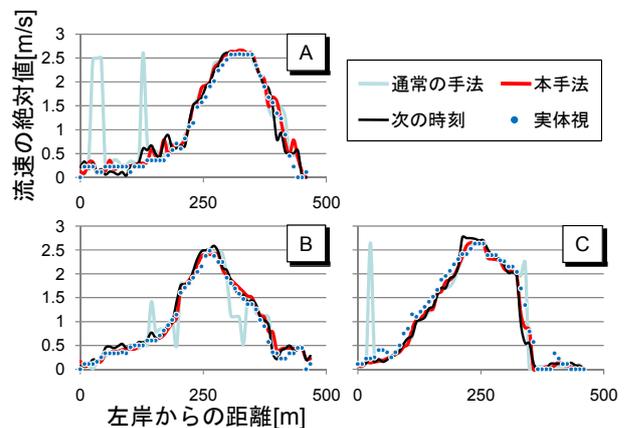


図-12 流速分布の比較

1/4に間引いている。次にM型CIP法¹²⁾によりベクトルを面的に補完し、流線図 (b) と収束・発散図 (c) を求めた。なお青い流線は上流側から、赤の流線は下流側から求めたものである。

外岸側(左側)の流線は河岸渦に対応して蛇行している。原画像 (a) の濃淡線と異なり、流線 (b) は次第に外岸側にシフトしている。すなわち、筋雲が斜めに流れるのと同じで、可視パターンと流線パターンは必ずしも一致しない。一方、(c)において帯状の収束域(青色)と発散域(赤色)が外岸側高水敷から低水路に向かって斜めに走っているが、これは (b) の流線間隔の収縮・拡大に概ね対応しており、さらに、収束域は原画像 (a) の明るい帯に、発散域は暗い帯に概ね対応していることがわかる。また下流区間ではスポット状の収束・発散が多数見られるが、これらのほとんどは樹木等の障害物に対応し、障害物の上流側で潜り込みが、下流側で沸き上がりが生じていることを示している。以上から、本手法による解析結果は水理的に概ね妥当であると考えられる。

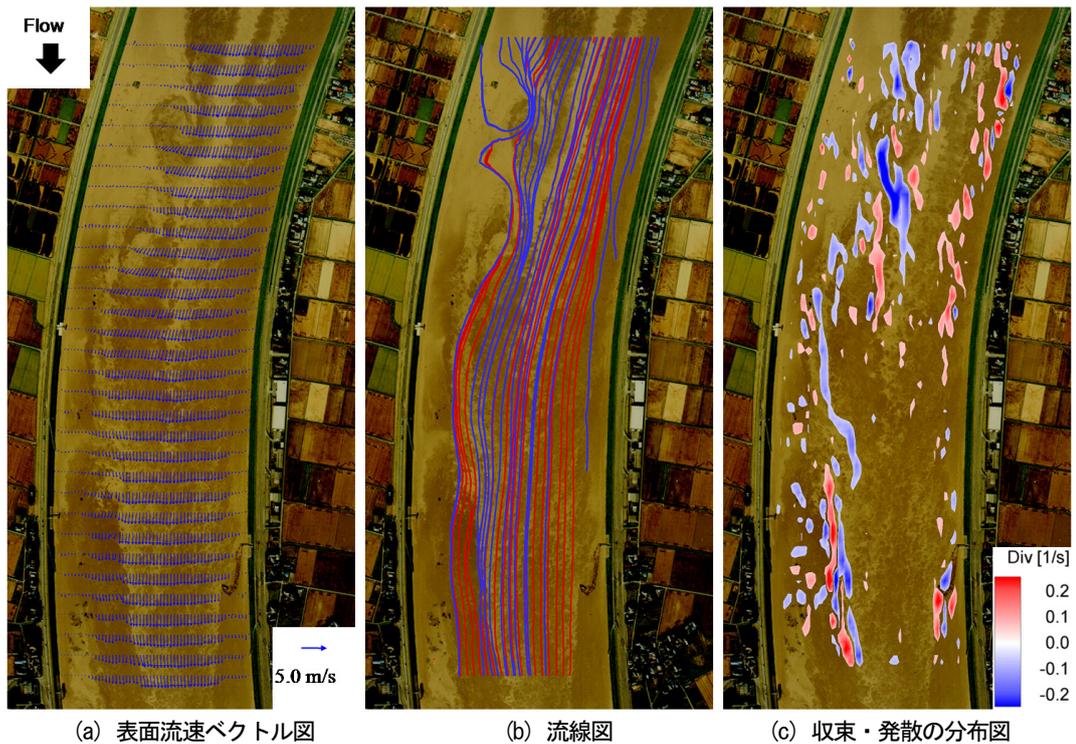


図-13 解析結果の例

5. おわりに

本研究では原画像と相関解析結果を同時に実体視する装置を作成し、実体視と相関解析を併用する航空写真解析システムを構築した。主要な結論を以下に示す。

- 1) 地盤と水面の標高差を幾何学的に補正し、解析地点に応じて局所的な座標変換式を作成した結果、十分な精度を有する座標変換が可能であった。
- 2) 相関解析で誤ベクトルの発生しやすい状況を整理し、それぞれの状況で相関解析の誤差を減少するための方法を見出せた。
- 3) 複数の相関解析結果から実体視により正しいベクトルを選択することにより、誤ベクトルの数はさらに減少し、実体視による労力を軽減できた。
- 4) 以上を総合して図-10 に示す解析手法を構築した。その結果にもとづく流線図や収束発散の計算は妥当な結果を与えているものと考えられた。

今後は解析例を増やすと共に、洪水の内部構造の推定に活用していきたいと考えている。

謝辞：本研究を行うにあたり、国土交通省関東地方整備局利根川下流河川事務所から貴重な洪水航空写真を提供していただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 例えば、池田ら：複断面開水路水平渦の安定性とその3次元構造，土木学会論文集，No.509/II-30，pp.131-142，1995。
- 2) 山口高志：洪水流速および流量観測—その1—，水文・水資

源学会誌，Vol.15 No.6，pp.625-635，2002。

- 3) 木下良作：河川下流部における洪水流量観測法に関する一提案，水文・水資源学会誌，Vol.11 No.5，pp.460-471，1998。
- 4) 二瓶泰雄，木水啓：H-ADCP観測と河川流計算を融合した新しい河川流量モニタリングシステムの構築，土木学会論文集B，Vol.63 No.4，pp.295-310，2007。
- 5) 藤田一郎・河村三郎：ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み，水工学論文集，第44巻，pp.1227-1231，2000。
- 6) 木下良作：航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題，土木学会論文集，No.345/II-1，pp.1-19，1984。
- 7) 福岡捷二・渡辺明英・上阪恒雄・津森貴行：低水路河岸に樹木群のある河道の洪水流の構造—利根川新川通昭和56年8月洪水—，土木学会論文集，No.509/II-30，pp.79-88，1995。
- 8) 箕浦靖久・石川忠晴・吉田圭介：実体視と相関解析の併用による洪水航空写真解析の効率化，水工学論文集，第51巻，pp.1093-1098，2007。
- 9) Cameron, H.L. : The measurement of water current velocity by parallax method, Photogrammetric engineering, No.1, 1952.
- 10) 例えば、宇民正・上野鉄男：写真画像処理による洪水流解析，土木学会論文集，No.503/II-29，pp.1-17，1994。
- 11) 岡部健士・藤田一郎・椿涼太・和久田敦志：現地洪水流の表面ビデオ画像に対するLSPIV解析の適用要領，水工学論文集，第51巻，pp.1087-1092，2007。
- 12) Yabe, T., Mizoe, H., Takizawa, K., Moriki, H., Im, H. and Ogata, Y. : Higher-order schemes with CIP method and adaptive Soroban grid towards mesh-free scheme, Journal of Computational Physics, 194, pp.57-77, 2004

(2008. 9. 30受付)