洪水流航空写真の画像解析

Image Processing for Aerial Photographs of Flood Flow

木下良作

宇民 正*, 上野鉄男*

Ryousaku KINOSHITA

Tadashi UTAMI and Tetsuo UENO

Abstract: The aerial stereo photograph of a flood flow which is generally covered by patterns of foams and turbid flow was first analyzed by Kinoshita to obtain velocity distributions over the whole surface using parallax method.

In this paper, the automatically analyzing method of the same kind of photographs practical use was proposed. The cross-correlation method was used to obtain velocity vectors, and the method to correct the erroneous vectors and one for matching a pair of photographs were proposed.

Using the resultant distribution of velocity vectors the distributions of vorticity, divergence and streamlines were calculated and the structure of vortices occurring around the edge of the flood pain was examined.

1. 概 説

洪水時航測写真による洪水流解析法は、既に20年以上前に木下^{1)~4)}により開発され、これによって洪水の乱流特性や河川流の蛇行現象に関する新たな知見が得られた。これを基礎に木下^{5)~12)}は、河床砂州、河岸に発生する大規模渦、高水敷での土砂推積現象、河道蛇行特性などを解明し、さらに河道平面計画など河川工学分野にも寄与してきた。

航空写真により直接に得られる河川流に関する情報は乱流構造のある瞬間の水面における現象に関するものである。木下^{8),12)~14)}は、洪水流解析によって見いだされた並列らせん流や河岸に発生する大規模渦などの現象と類似の現象を実験室に再現し、その内部の構造

を検討するという手法をとった。これにより洪水流航空写真測量の意義は一層高められた。

宇民・上野^{15),16)}は、木下の実験室における計測方法を改良して流れの断層面における流況の2次元的な計測法を開発した。すなわち、流れの水平断層面をシート状の光で照射してそこでの流況を僅かな時間差で2枚撮影し、1対の写真データの間に画像相関法を適用してその断層面における流速ベクトル分布を得た。

著者らは、上記の手法を洪水流航空写真の画像解析に適用することにより、洪水流航測の手法を、従来の立体図化機を用いる段階より一段と有用なものにすることができると考えた。

すなわち、第1に、従来の方法では航空写真の主点基線方向の流速成分のコンター図と流速ベクトルとが別々にかつ人の視覚を利用して図化されていた。これに対して、この方法では流速ベクトルそのものが客観的に数量化される。したがって解析処理のハードウェアとソフトウェアが完成すれば、数多くの航測写真を自動的かつ正確に処理でき、労力と時間が節約されるし、解析に熟練を要しない。第2に、前述の様に従来の方法では航空写真の主点基線方向の流速成分の

* 京都大学防災研究所宇治川水理実験所
(京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
「写真測量とリモートセンシング」Vol. 29, No. 6, 1990

みが図化されるという制約があった。そのため、写真撮影に際しても飛行経路の選択に制約があり、操縦が複雑であったし、曲率の大きな弯曲部での流れの解析が困難であった。一方、この方法では、解析は撮影機の飛行方向に左右されないの、撮影も比較的容易であるし、弯曲部でも解析上の制約もない。第3に、数値化された流速ベクトルを用いて流速以外の各種水理量（流線、発散、渦度等）を計算し図化することができるので、解析により得られる情報量も豊富である。

一方、画像相関法を用いた写真画像の解析は、空中写真から地図の等高線を自動的に製作する方法として、既に1950年代の終り頃から開発されてきた。わが国においては、森ら^{17),18),19)}の先駆的な研究ならびに村井ら^{20),21)}のリニアアレイセンサーによるステレオ画像を用いた研究などがある。これらは何れも、二つの画像の立体視を自動化しようとするものであり、画像のステレオマッチングの手法には面積相関法が用いられている。

地図の自動図化に面積相関法を適用する際には、相関をとる面積（相関窓）の大きさの決定が難しいこと、また、崖などの地形の傾斜の大きな所では隠蔽部分が存在し、正しいマッチングができないこと、などといった問題点がある²²⁾。森ら¹⁹⁾および服部ら^{23),24)}は、画像のフィルタリング、ならびに、最初に粗にマッチングを行い、次第に細かいマッチングに移る段階的な手法（course-to-fine 法）などを適用してこれらの問題に対処した。

洪水流の解析においても、僅かな時間差（4秒程度）をもって撮影された二枚の航空写真から相関法によって流速ベクトルを得るが、次のような特徴あるいは問題点がある。

先ず第一に、解析の対象となる洪水流の表面は平滑で殆ど水平に近く、また、洪水流は連続体であって地形のような急激な変動がない。これは、地形解析の際に問題となる画像の投影歪みが無く、隠蔽部分も存在しないことを意味している。したがってこの点では洪水流解析は地形解析よりも容易である。

第二に、実用面に関しては、地形解析の場合は、その解析結果は汎用に供せられるために高度の厳密性が要請されるが、洪水流解析の場合は、先ずその利用目的が何であるかが重要であり、それに応じた精度の範囲内で、ある場合には迅速性が要請されたり、ある場合には解析手段や方法の簡便性が要請される。

第三に、洪水流解析のための洪水流写真撮影が容易でない²⁵⁾。洪水時には一般に天候は悪く、フライトに適さない。さらに、日本の場合洪水の生起時間は短い、とりわけ洪水の表面のトレーサーとなるような気泡や斑紋が現れる期間は限られている。洪水流解析では、気象の変化を見てタイミングよくしかも鮮明な洪水流の水面を撮影する高度の特殊技術が前提となる。写真撮影に関しては、洪水流撮影の場合は固定点から撮影された写真でも解析可能であり、また、撮影時間間隔の大小によって解析結果や精度が変わってくる。

第四に、現実には完全かつ鮮明な写真画像を得ることは容易ではなく、①写真画像に雲影が入っている、②水面におけるトレーサーや斑紋が不十分、③日没のために露光が不十分、④水面に太陽の反射が入っている、⑤橋などの構造物やその影が水面を横切っている、などと言った不具合を含む写真が得られることが多い。これらの処理については特別の工夫が必要である。

本論文では、第三および第四の問題には触れず、実用的な観点からの洪水流解析法について述べる。すなわち、洪水流解析においても地形解析と同様な相関法が用いられるが、洪水流解析においてはそれに特有の解析法が開発される必要がある。ここでは、立体図化機を使用しないことを前提としてこの方法について述べると共に、この方法による解析でどのような情報が得られるかについても考察する。

2. 解析の方法

面積相関法により流速ベクトルを求めた。この方法による場合、相関の窓の範囲内で平均化された流速ベクトルが得られることになる。したがって相関の窓はなるべく小さい方がよいが、小さくし過ぎると誤ベクトルを得る結果となる。そこで、流速ベクトルの計算は、初めは粗く、次には精密に、2段階に分けて行った。この方法は、上記の問題に対処できる他に、計算時間を短縮できるという利点ももっている。

解析は立体図化機を使わないと言う趣旨で行われ、以下のような手順で進められた。

2.1 航空写真の数値化

利根川下流における昭和46年洪水の航空写真フィルム（No.972, No.973, 時間差4.2秒）の密着焼付版（図一1, 22cm×23cm）を京大大型計算機センターのドラ

図一 解析した航空写真

図二 第1段階の相関解析によって得られた相関ベクトルの分布。太いベクトルは相関の窓が 17×17 画素の場合、細いベクトルは 19×19 画素以上の場合。等高線は最大相関係数の分布を示す

ムスキャナーを利用して、50ミクロンの分解能で8 bit データとして数値化し、磁気テープに入力した。数値化の範囲は $18\text{cm} \times 13\text{cm}$ であり、したがってデータ数は 3600×2600 である。写真をドラムにセットする際に生じる左写真と右写真の偏位や偏角は、計算段階で処理することとした。

数値化されたデータすなわち写真の濃淡の分布を計算機に入力した。以下の解析における計算時間と計算機の容量の制約のため、隣りあう 2×2 個の画素の濃度の平均値を1画素の濃度に置き換えるという操作を

繰り返すことにより、各画素の間隔が100ミクロンのデータ、200ミクロンのデータ、ならびに400ミクロンのデータの三種のデータを作成した。なお、座標系は、200ミクロンピッチデータの左下角を原点とする直交座標系を用いた。

2.2 相互相関解析の第1段階

相互相関解析の第1段階では、400ミクロンピッチの写真データを用いて、相関の窓の大きさは、17画素 $\times$ 17画素とした。得られたデータの内、400ミクロンピッ

図一 3 第2段階の相関解析によって最終的に得られた流速ベクトル。太いベクトルは修正されたベクトル。陰影部分は相関の窓が15×15画素以上の場合、それ以外は11×11画素の場合

図一 4 第2段階の相関解析における最大相関係数の分布

チデータの左右の写真の濃度分布のコンター図を描き、両者を比較することによって、対応点のx座標ならびにy座標の最大偏差をそれぞれ見積った。その結果、左写真の任意の点に対する右写真の対応点がx方向には-30画素から0画素、y方向には-10画素か

ら+10画素の範囲内に存在することがわかった。したがって、ここでは検索の範囲を上記の31画素×21画素の範囲とした。すなわち、右写真のこの範囲内で相関係数が最大となる点を検索した。もしも得られた相関係数の最大値が0.6よりも小さければ相関の窓の大き

さをx方向y方向に2つつ拡大して上記の相関計算をやり直した。

次いで、相関係数最大の画素位置を中心とする3画素×3画素の各画素位置における相関係数の分布に最小自乗法を用いて2次曲面を適合させ、相互相関係数が最大となる点の位置座標を計算した。以下においては、この様にして得られた左右写真の対応点同士を同一の座標系の上で矢印で結んだものを相関ベクトルと呼ぶこととする。

洪水流は連続体であって、地形のような急激な変化がないことを考慮すると、相隣る相関ベクトルは大きく異なることはない。したがって、左写真のある点の対応点の検索において相互相関係数の最大値に十分に大きな値（この場合は閾値を0.9とした）が得られた場合には、その点に隣あっている左写真の点の対応点の検索に際しては、その対応点の位置をある程度正確に予測することができるので、上記の検索範囲31画素×21画素を11画素×11画素に縮小した。

対応点の検索は左写真のx方向ならびにy方向に4mm毎に行われ、x方向に41点、y方向に33点、合計1353点について対応点が計算された。この計算で得られた結果を図-2に示す。本図で、左右写真の対応点同士を結ぶ相関ベクトルが矢印で示されており、洪水流の水面以外の部分には陰影（点）が施されている。また、各対応点の最大相関係数 C_r がコンターで示されているが、この値はかなり高いことがわかる。相関の窓を17画素×17画素よりも拡大して求められた相関ベクトルは細い実線で描かれているが、その数はごく僅かである。

本図には、明らかに誤って算出されたと判断される若干の相関ベクトルが含まれているが、これらは水面の領域の外にあって、以後の解析には関係しないのでそれらを無視した。

2.3 相互相関解析の第2段階

相互相関解析の第2段階では、200ミクロンピッチの写真データを用いた。相関の窓の大きさは、11画素×11画素とし、左写真のx軸方向ならびにy軸方向に0.4mm毎に対応点を右写真から検索した。対応点の検索に際しては、第1段階の解析結果を内挿することによって対応点の位置を予測し、その点の周りの7画素×7画素を検索範囲とした。

2.4 計算データの修正

計算により得られた相関ベクトルの内には、誤って得られたものも若干含まれているので、それらを取り除く必要がある。誤ベクトルの除去のために、洪水流は連続体であり地形のような急激な変動がないことを考慮して、以下の2種類の方法を試みた。

(1) 2次元ヒストグラム法

得られた相関ベクトル場を小領域に分割し、各小領域内において相関ベクトルのx方向成分uとy方向成分vに関する二次元ヒストグラムを作成し、モード値からのふれが閾値を越える相関ベクトルを除去した。

この方法による場合、小領域が流れの強せん断層等の流速の急変部を含む場合、二次元ヒストグラムが二山型となり、正確に求められた相関ベクトルまで廃棄してしまうことがわかった。したがって、結局この方法は用いなかった。

(2) 3次曲面適合法

相関ベクトル場内に小領域を設定し、そこにおけるu分布とv分布に別々に最小自乗法を用いて3次曲面を適合させた。各々の値と適合曲面との差が標準誤差の A_{cr} 倍を超える場合、その相関ベクトルを除去した。

ここでは小領域としてx方向に12相関ベクトル、y方向に9相関ベクトルを含む領域を採用してそこにおける12×9個の相関ベクトルの内相関係数が0.6を超えるものについてu分布v分布のそれぞれについて3次曲面を適合させた。次いで、この小領域の中央部の8×5個の相関ベクトルについて上記3次曲面からの差を検定した。この検定によって誤ベクトルとされたものについては、3次曲面によって与えられる値をもって相関ベクトルの成分とした。一対の写真から得られた1つの相関ベクトル場について上記の検定を3度繰り返して行った。 A_{cr} の値として本解析では3.3を採用したがその根拠については次章に述べる。

2.5 左右写真の位置合わせ

洪水流航空写真撮影に際しては緊急に撮影体制に入るので標定点を事前に設定しておくことは一般には困難であること、航空写真の解析結果の利用目的に応じた精度の範囲で流速に関する情報が得られればよいこと、洪水流航空写真の解析には迅速性が要請されること、等を勘案して、本解析においては左右写真の相互標定は直接的には行わず、河川流の水際における相関ベクトルが0になるように各相関ベクトルを修正し

た。洪水流の水面がほとんど水平に近いことを考慮すると、このことは、左右写真の河川の水際線を一致させることを意味している。勿論、評定点が確定している場合には、それをういた標定を行えばよい。

相関ベクトルは、x、y両方向に0.4mm 間隔で求められているので、水際線上における相関ベクトルは、線型内挿計算により水際線に沿ってx方向に0.4mm 間隔で求められた。ただし、河岸が流れの中に突出しているような所や水当り箇所では、水際線近くで流速が大きくなるために水際線のマッチングが悪くなるので、その様な場所における相関ベクトルは位置合わせには使用しなかった。

この様にして得た水際線における相関ベクトル分布に3次曲面を最小自乗法を用いて適合させ、得られた最適化相関ベクトル分布を各相関ベクトルから差し引くことによって河道内の流速ベクトル分布を得た。

図-3は、この様にして得られた流速ベクトルの分布を示したもので、横断方向には解析で得られた速度ベクトルのすべてが記入されており、流下方向には4つに一つの割合で記入されている。これら流速ベクトルのうち前項で述べた処理によって修正されたものは、本図では太く描かれている。また、相関の窓の1辺の画素数が11画素×11画素を超えた所を陰影で示している。

本図には、水面領域のみならず、陸地部分の「流速ベクトル」も描かれているが、これらは言うまでもなく土地の高低を表しており、水面領域における流速ベクトルに比べてずっと小さな値になっている(木下^{2),3)}。

3. 解析法の検討

以上において、洪水流航空写真の解析方法についてその概要を述べた。本節では、この方法に含まれる問題点のいくつかについて検討する。

3.1 左右写真の間の偏角の検討

図-2において、横方向に並んでいる相関ベクトルの先端を平均的に連ねる直線がx軸となす角度を計測することにより、左右写真の間の偏角 θ はほぼ0.029 radであることがわかる。この偏角 θ は写真撮影の際の機体の旋回により、あるいは写真をドラムスキャナーにセットする際に生じたものと考えられる。 θ が

あまり大きいと、左右の写真の相関の窓同士がその縁近くでずれてくるおそれがある。相関の窓の中心からrの距離にある点でのずれは $r\theta$ であり、 $r\theta$ が1画素の直径より十分小さければよい。

第1段階の相関解析の場合、相関の窓の隅角部でrは最大値 $\sqrt{8^2+8^2}\times 0.4=4.5(\text{mm})$ をとり、 $r\theta=0.13(\text{mm})$ で、 $r\theta$ は1画素の大きさ0.4(mm)よりも十分小さいので問題は無いと考えられる。

第2段階の相関解析では、rの最大値は $\sqrt{5^2+5^2}\times 0.2=1.4(\text{mm})$ であり、 $r\theta=0.04(\text{mm})$ で、1画素の大きさ0.2(mm)よりも十分小さいのでさらに問題は無い。

3.2 相関の窓の大きさに関する検討

上記の相関解析において得られた各相関ベクトルの最大相関係数を図-4に示す。本図から最大相関係数の値は全般的に非常に高いことがわかる。しかし、局所的にはその値は0.7よりも小さな値をとっている。

この様に最大相関係数が局所的に小さくなる主たる原因としては、写真画像の濃淡分布がその付近で単調なことが上げられる。図-5は、相関の窓の大きさと同じ11画素×11画素の小領域毎に写真濃淡の標準偏差を計算したものである。本図と図-4とを比較すると、写真濃淡の標準偏差が5以下のときに最大相関係数が非常に小さくなっていること、また、この様な標準偏差の低下は剥離域や低速域などで生じていることがわかる。

先の相関解析において、得られた相関ベクトルの最大相関係数が0.6より小さい場合には相関の窓を拡大して再度相関解析を行うという処理をした。写真の濃淡の標準偏差の低い所ではその計算領域を拡大することによって標準偏差が増大すること、ならびにその様な場所では流速も小さく、したがって流速変動も小さいことを考慮すると、上記の処理は、計算の精度をさほど低下させることなく、しかも誤ベクトルの算出を避けるという点で適当であったと考えられる。

また、図-3には、相関の窓の1辺の画素数が11画素×11画素を超えた所を陰影で示している。これによると、大部分のところで相関の窓の大きさは11画素×11画素となっていること、また、それを超えたところでも誤ベクトルがとくに増加している様子は認められず、この点からも上記の方法の優位性が指摘される。

本解析では、相関の窓の大きさを11画素×11画素と

図一五 写真の11×11画素の範囲における濃度分布の標準偏差の分布

図一六 河川の各横断面における平均流速と流量の分布。3本の曲線は、左右写真の位置合わせに平面適合を用いた場合、2次曲面適合を用いた場合、ならびに3次曲面適合を用いた場合に対応する

したが、1画素の大きさが0.2mmで写真縮尺が1/10,000であることを考慮すると、得られた流速ベクトルは22m×22mの領域の平均的なものであることがわかる。したがって本解析の結果は微細な乱流構造を示すものとはなっておらず、10ないし20mより大きなスケールの乱流構造を反映していると見なされる。

相関解析の第3段階として、1画素の大きさが0.1mmのデータを用いて、相関の窓をやはり11画素×11画素として、水面領域内の狭い範囲について計算を試みた。この場合は、流速ベクトルは11m×11mの領域

の平均的なものであるが、相関解析は十分正確な結果をもたらすことが確認された。

ただ、上記のように、相関の窓の大きさは写真の濃度分布の影響を受けるし、また左右写真の時間間隔4.2秒の間の洪水の平均流下距離は5mであり、その間に乱流構造も変形するので、相関の窓の大きさをいわずに小さくしても解析精度は向上せずに計算時間とデータの量を増大させるだけの結果となる。したがって、相関の窓の大きさは写真解析の使用目的にあわせて決めるべきであろう。

写真解析の使用目的に応じて、左右写真の撮影時間間隔、写真数値化の分解能、相関解析の相関窓の大きさなどの値をいくらにとるべきかについては、今後の課題としたい。また、本研究においては、紙面の制約もあり、200ミクロンピッチのデータを用いた解析結果について検討を加えることとし、50ミクロンピッチデータおよび100ミクロンピッチデータを用いた解析については触れないこととする。

3.3 誤ベクトルを除去する際の標準誤差の閾値の検討

2.4で述べたように、各相関ベクトルの、周辺小領域における適合曲面からの偏差が標準誤差の A_{cr} 倍を超える場合、その相関ベクトルを誤ベクトルとした。 A_{cr} の値によって検出された誤ベクトルの個数は表－1の様である。

表－1 3次曲面適合法により検出された誤ベクトル数

A_{cr}	第1段階	第2段階	第3段階	合 計
4.0	341	32	1	374
3.5	729	85	14	828
3.3	1011	166	23	1200
3.0	1644	377	62	2083

A_{cr} の上記4種類の値について誤ベクトルを検出し、その結果得られた相関ベクトルを、左右写真の位置合わせにともなう修正を行った後、図－3と同様の図化をして視覚によって検討した結果、 $A_{cr}=3.3$ のとき誤ベクトルは殆ど完全に除去されていると認められた。したがって、ここではその場合の結果を採用することとした。

相関解析の第2段階では、解析の対象とした写真流域は160mm×80mm、解析のピッチは0.4mmであるから、解析のメッシュ数は $400 \times 200 = 80,000$ である。しかし相関解析は、水面部分およびその周辺領域の44,357個のメッシュについてのみ行った。そのうち水面領域にある相関ベクトル数は35,088、さらにそのうちの誤ベクトルは993であった。したがって、水面領域では平均的に35個に1個の割合で相関ベクトルが修正されたことになる。

実際に、誤ベクトルを消去していない図と図－3とを比較すると、視覚的に判断して、若干の正しく求められた速度ベクトルまで誤ベクトルとして処理されて

いることがわかる。誤ベクトルの検出法については今後の検討が必要である。

3.4 左右写真の位置合わせの方法の検討

左右写真の位置合わせのために、水際線における相関ベクトル分布に最小自乗法を適用し、それらに平面、2次曲面あるいは3次曲面を適合させた。適合させた平面、2次曲面あるいは3次曲面に関して得られた適合式は以下のようである。

平面；

$$u = -2.7200820 + 0.0071660x - 0.0317618y$$

$$v = -1.9775540 + 0.0286408x + 0.0035645y$$

2次曲面；

$$u = -3.0338890 + 0.0140790x - 0.0295136y$$

$$-0.0000656x^2 - 0.0000238xy + 0.0000485y^2$$

$$v = -2.0392660 + 0.0272587x + 0.0092391y$$

$$-0.0000353x^2 + 0.0000159xy + 0.0000348y^2$$

3次曲面；

$$u = -3.1811623 + 0.0132561x - 0.0102967y$$

$$-0.0000410x^2 + 0.0000651xy - 0.0007067y^2$$

$$+0.0000001x^3 - 0.0000004x^2y - 0.0000011$$

$$xy^2 + 0.0000080y^3$$

$$v = -2.0801721 + 0.0264997x + 0.0154451y$$

$$+0.0000183x^2 + 0.0000013xy - 0.0002628y^2$$

$$+0.0000000x^3 - 0.0000000x^2y - 0.0000004$$

$$xy^2 + 0.0000024y^3$$

これによると、2次曲面と3次曲面に関しては、その適合式の定数項ならびに1次の項の係数はほぼ一致しているが、平面の適合式のそれはかなり異なっている。

以上のようにして得られた最適化相関ベクトル分布を各相関ベクトルから差し引くことによって河道内の流速ベクトル分布を得た。そのx方向成分とy方向成分をあらためてそれぞれuおよびvで表すこととする。

図－5で水際線のところで全般的に写真濃淡の標準偏差が大きくなっており、図－4でも水際線のところで最大相関係数の値は高くなっている。したがって左右写真の位置合わせに用いられた相関ベクトルは信頼性の高いものであったことがわかる。

つぎに図－6は河川の各横断面における平均流速 u_m と水深1m当りの通過流量 $(Q(m^2/s) = \int u dy)$ を3種の適合法に関して示している。これによると、い

ずれの適合法によっても解析範囲の縁辺約100mあたりで流量が極端に小さくなっている。解析の区間では支川からの顕著な流入がないので、上記の流量はほぼ一定であるべきである。このことを考慮すると、3種の適合法の中では、3次曲面適合法の場合の適合性が最も良いと言える。本解析で3次曲面適合法を用いたのはこの理由によっている。

なお、それ以外のところで、流量に約1割ほどの変動が見られるが、これが実際現象を反映しているのかあるいは誤差のせいなのか、また誤差とすると、写真の伸縮によるものなのかあるいは位置合わせの方法の不備のせいかは明らかでない。

4. 解析結果とその検討

解析した写真(図一1)は取手大橋の下流約4—6kmの地点のものであるが、これを一見して、両側の河岸から流心に向かって流れを抱き込む腕のようなパターンが認められる。この様な流れパターンが、流れのどのような構造を反映しているものなのか、またその構造が河川工学的に(例えば、流れの抵抗や土砂輸送問題に)どのような意味をもっているのか興味がもたれる。

木下²⁶⁾はここでの洪水の流下状況を検討した結果、ある特徴的なことを見いだした。すなわち、流量が約4,000m³/sの時に粗度係数が異常に大きくなっており、その時には低水路の両岸に大規模な渦が生じ、それらの干渉によって疎通が悪くなっていることを示した。

本章では、以上に得た流速ベクトル分布から流れの構造や特性に関してどのような情報が得られるのかについて検討する。以下に掲げる図では、解析領域のうちx=400mから1200mの部分について拡大して示すこととする。

4.1 流速、流線、渦度ならびに発散の分布特性

図一7は流下方向流速成分u(m/s)の分布を示している。図において、流速が1m/s以下の領域は河道の高水敷に相当していると考えられる。高水敷の縁辺と思われるところには強いせん断層があること、水際近くには逆流域を含めてかなり広く低速の領域が存在することがわかる。

図一8は流線を示している。本図から、流線の方向

と図一7から得られる流心線の方向とは一致していないことがわかる。また、水際近くでは渦運動が認められる。

図一9は渦度の鉛直方向成分の分布を示している。図一7の等速度線が接近しているところで、渦度の絶対値が大きくなっている。この様なせん断層は流下方向に長く連なっており、興味あることに、その方向は必ずしも流線とは一致していない。

図一10は発散の分布を示している。水面では発散の正の値は流れの湧き上がりを、また負の値は沈み込みを意味する。

図中には、図一9に示されている渦度の正值の尾根線(渦度の横断方向分布の局所的なピークの生じている位置を流下方向に連ねたもの)の位置を◆印で、同様に負値の尾根線の位置を■印でそれぞれ示している。これらの印の対角線長は渦度の絶対値に比例している。興味あることに、渦度の尾根線の周辺に発散の絶対値の大きな領域が散在しており、しかもそれは湧き上がりであったり、沈み込みであったりしている。

これらの図から、高水敷の縁辺からは強いせん断層が発達しており、そこには渦が連なっていることが予想される。これらの渦を河岸渦と呼称することとする。これら河岸渦の周辺には強い湧昇流と沈み込みとが混在していることがわかる。

さらに図一10のx=850mと1100mの間の低水路部においては、発散の値はさほど大きくはないが、発散の分布が網目状になっており、網目の横断方向の間隔は16mないし20mとなっている。

4.2 河流の濁度の分布特性

図一11に左写真の400ミクロンピッチデータの濃度分布を示す。図中の◆印と■印は先と同様に渦度の尾根線の位置とその大きさを示している。本図から、強い河岸渦の周辺では写真濃度すなわち河流の濁度が大きくなっていることがわかる。これは、先述のように河岸渦の周辺には強い湧昇流があり、それが河床近くの土砂濃度の高い流れを吹き上げ、それらが河岸渦によってさらに拡散されるせいと考えられる。

先に度々指摘しているように、流速分布、渦度分布、発散分布の特性は流線のパターンと異なっている。河流の濁度分布特性も図一11から例外でないことが認められる。

図-7 x方向流速成分 u の分布

図-8 流線のパターン

図一 鉛直方向渦度成分の分布

図一〇 発散の分布(等高線)。◆ならびに■印は、渦度分布の尾根線ならびに谷線の位置を示し、印の大きさは渦度の絶対値に比例する

図-11 写真濃度の分布(等高線)。◆ならびに■印は、渦度分布の尾根線ならびに谷線の位置を示し、印の大きさは渦度の絶対値に比例する

図-12 河岸渦をそれぞれの移流速度 (U_o) に等しい移動系から見た場合の流線パターンの合成図。図中の陰影は発散の絶対値が0.3を超える領域を示す

4.3 河岸渦の特性について

図-9に示されている渦度分布において、渦度の絶対値が特に大きな領域が流下方向に連なっており、それら一連の渦度分布が図-1に見られるような河岸渦の一つを構成しているようである。しかも図-7と図-9とを比較すると、一つの河岸渦の中では、渦度の尾根線の位置での流速はほぼ一定であることがわかる。

以上の事実から、河岸渦のそれぞれはその位置とスケールに対応した独自の移流速度をもって流下していると考えられそうである。それぞれの河岸渦の形態については、それぞれの移流速度で移動する系から見ると現象を理解しやすい。図-12は、流れの場を各河岸渦が1区分を占めるように適当に領域区分し、各領域区分毎にその内部の流速分布からその河岸渦の移流速度を差し引いたものを用いて流線を描き、それらをパッチワーク的に張り合わせたものである。用いられた移流速度は、渦度分布の尾根線あるいは谷線における流速を図-7から読み取ったもので、各領域区分毎に図中に示されている。図-12には、同時に、発散の絶対値が0.3を超える領域を陰影を施して表示した。

(1) 写真濃度との関連性

図-12と図-11とを比較すると、その全体的なパターンが驚くほどよく対応している。すなわち、図-12で流線の曲率の大きなあるいは流線が渦状に巻いている河岸渦の所では、図-11において写真濃度が高くなっており、しかも、幅が広い河岸渦の周辺では写真濃度の横断方向の広がりも大きくなっている。

さらに図-11において、 $x=910\text{m}\sim 1200\text{m}$ 、 $y=300\text{m}\sim 400\text{m}$ の領域あるいは、 $x=1050\text{m}\sim 1180\text{m}$ 、 $y=470\text{m}\sim 520\text{m}$ の領域で、河岸渦はないが写真濃度が濃くなっていることが認められるが、図-12によれば、これはそれぞれの領域に近接する河岸渦によってもたらされた濁度の高い流れがそこへ移流されたものと理解される。

(2) 渦度分布との関連性

図-12と図-9に示されている渦度分布とを比較すると、渦度の大きなところと、図-12の渦巻状の流線パターンあるいは曲率の大きな流線パターンとは明確に対応していること、ならびに一つの河岸渦は数個の小規模の渦運動から構成されていること、しかも、これら小規模の渦運動の中心で渦度は特に大きくなっていることが認められる。

(3) 発散分布との関連性

発散が0.3を超える領域が図-12に斜線を施して示されている。その位置は図-12では河岸渦を構成する個々の小規模渦の境界に相当しており、そこでは流線が発散している様子が明確に認められる。

(4) 河岸渦の構造

以上から明らかになった河岸渦の構造についてその概要をまとめると以下のようである。すなわち、①一つの河岸渦は、流下方向に連なった強い渦度をもついくつかの小規模渦運動によって構成されている。②河岸渦はその発生位置とスケールに対応する移流速度で移流されている。③隣りあう小規模渦運動の間には流線の特異点（鞍型点あるいは結節点）が形成されている。④特異点を通過する一つの流線の周辺では、強い湧昇流がある。⑤湧昇流によって吹き上げられた河床近傍の土砂濃度の高い流れは、小規模渦によって移流拡散される。⑥このような構造をもつため、湧昇流は渦度分布の尾根線或は谷線と斜交する細長い領域で発生する。

河岸渦の移流速度、発生位置、スケール、ならびに強さについては今後の解明が必要である。

5. 結 語

洪水流航空写真の自動解析法について述べ、さらに解析結果からどのような情報が得られるかについて検討した。

最後に、本研究の進展のため今後検討して行くべき課題についてふれる。

①洪水流解析の使用目的に応じて、左右写真の撮影時間間隔、写真数値化の分解能、相関解析の相関窓の大きさなどの最適値を明らかにすることが重要である。

②航空写真の解析のためには、その解析に耐える良質の航空写真を撮影することが前提である。そのための技術開発が重要である。

③本解析は汎用計算機でなされたが、今後、自動解析のための専用のハードウェアの開発が必要である。

④航空写真の解析から得られる情報は洪水表面での現象に関するものであるから、その解析結果を、数値シミュレーションや水理実験による結果と照合することによってさらに突っ込んだ現象解明をすることが重要である。

航空写真の数値化には、京都大学大型計算機セン

ターのドラムスキャナーを利用した。その使用にあたり寺嶋広次技官の援助を得た。末筆ながら記して謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 木下良作：空中写真測量による洪水流の表面流速・流向の測定，およびその分布状況と河床形状との関連性について，第8回水理講演会，1963，pp.65-66.
- 2) 木下良作：航空写真による洪水流の解析，写真測量，Vol. 6, No.1, 1967, pp.1-17.
- 3) 木下良作：洪水の構造をさぐる—航空写真からの新しい解析—，科学朝日，1967，7，pp.22-28, pp.31-37.
- 4) 木下良作：航空写真による洪水時の流況測定，土木学会水工学シリーズ，1968.
- 5) 木下良作：河道平面計画試論，土木学会水工学シリーズ，A，1972.
- 6) 木下良作，三輪式：砂レキ推の位置が安定化する流路形状，新砂防，No.94, 1974, pp.12-17.
- 7) 木下良作：洪水流航測の河道計画への応用，写真測量とリモートセンシング，Vol. 14, No.2, 1975, pp.1-12.
- 8) 木下良作：「写真測量法」による河川および模型水路の流速測定，流れの可視化，Vol. 1, No.3, 1981, pp.36-43.
- 9) 木下良作：航空写真に見られる洪水時の乱流現象，第14回乱流シンポジウム，1982，pp.39-54.
- 10) 木下良作：昭和56年8月洪水による石狩川高水敷堆積調査，石狩川開発建設部，1983，pp.538-594.
- 11) 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, 1984，pp.1-19.
- 12) 木下良作：洪水時の沖積作用調査と適正複断面河道に関する実験的研究，沖積河川における洪水流の制御と治水安全度の向上に関する研究，文部省科学研究費自然災害特別研究（岸力代表）報告書，1988，pp.55-68.
- 13) 木下良作：並列らせん流に関する実験的研究，石狩川開発建設部，1977.
- 14) 木下良作：洪水と流路形態の現地観測，土木学会水工学シリーズ，A，1978.
- 15) Utami, T., R.F. Blackwelder and T.Ueno: Flow visualization with image processing of three-dimensional features of coherent structures in an open-channel flow, Intern. Seminar on Near-Wall Turbulence, 1988.
- 16) 宇民正・上野鉄男：複断面蛇行流の可視化観測，京大防災研究所年報，第32号，B-2，1989，pp.963-983.
- 17) 森忠次・服部進・今井啓介・小川一郎：画像相関を使った空中写真からの等高線自動図化の方法——処理手法と自動評定——，写真測量とリモートセンシング，Vol. 20, No.4, 1981，pp.4-13.
- 18) 森忠次・服部進・内田修・田辺広志：画像相関を使った空中写真からの等高線自動図化の方法——偏位修正と標高ファイルの作成——，写真測量とリモートセンシング，Vol. 21, No.2, 1982，pp.4-14.
- 19) 森忠次・服部進・内田修：分割画像ごとの相関法による空中写真からの自動図化，写真測量とリモートセンシング，Vol. 24, No.1, 1985，pp.13-22.
- 20) 村井俊治・柴崎亮介：リニアアレイセンサによる数値地形モデルの自動作成に関するシミュレーション，写真測量とリモートセンシング，Vol. 23, No.3, 1984，pp.13-21.
- 21) 柴崎亮介・村井俊治：リニアアレイセンサによるトリプレット（3重ステレオ）画像を用いたステレオマッチングの精度，安定性の向上に関するシミュレーション，写真測量とリモートセンシング，Vol. 26, No.2, 1987，pp.4-10.
- 22) 服部進・森忠次：計算機によるステレオマッチング手法と自動相関機の現況，写真測量とリモートセンシング，Vol. 25, No.1, 1986，pp.17-26.
- 23) 服部進・森忠次・内田修・藤原重雄：空中写真のステレオマッチングのための多段階相関法の改良（I），写真測量とリモートセンシング，Vol. 25, No.1, 1986，pp.4-16.
- 24) 服部進・森忠次・内田修・藤原重雄：空中写真のステレオマッチングのための多段階相関法の改良（II），写真測量とリモートセンシング，Vol. 25, No.2, 1986，pp.24-38.
- 25) 木下良作：洪水流を航空写真に撮影する飛行の計画，土木技術，Vol. 22, No.9, 1967，pp.49-57.
- 26) 木下良作：利根川下流部の「渦形成問題」の検討，利根川下流部洪水流に関する検討業務解析報告書，関東地方建設局・アジア航測株式会社，1980.