

実河川を対象とした画像計測技術

Image Analysis Techniques for River Flow

藤 田 一 郎

Ichiro FUJITA

1. まえがき

画像を利用した計測技術は情報工学や機械工学などの分野を中心に著しい発展を遂げ、実用に供されるものも数多くなってきた。OCRに見られるような文字認識システム、医療における画像診断システム、ファクトリーオートメーションにおける製品位置決めシステム、衛星画像の解析システムなど例を挙げれば枚挙に遑がない。ついに二足歩行を始めたロボットの視覚であるロボットビジョンもリアルタイム画像計測技術の賜物であると言えよう。

視点を流れ計測の分野へ移してみると、基礎的あるいは要素的な画像解析の技術開発の段階は概ね終焉したといえ、広範囲な分野への応用が広まりつつあるのが現状である。最近のトピックとしては、顕微鏡下での血管内流動やマイクロチャネル流れなどマイクロスケール（数ミクロンから数ミリのスケール）が対象の画像計測が注目を浴びている^{1,2)}。計測ボリュームも二次元場から始まって、面内三次元場あるいはフル三次元場へと拡大してきた³⁾。また、このように二次元あるいは三次元の計測が行われるようになると、そこで得られる時空間データの情報は従来の点計測とは比較にならないほど膨大なものとなるため、点計測のデータをベースとして発展してきた従来のデータ処理法に取って代わる新たな整理法の模索も行われている⁴⁾。もちろん、このような計測技術の発展には、画像計測に関する様々なデバイス（光源、カメラなど）の著しい性能の向上が貢献していることも見逃せない点である。最近では、3 K、すなわち 1Kx1K ピクセルで 1Kfps(frame per second)以上の機器も登場し、流体画像計測の分野には活気が見られる⁵⁾。

一方、画像計測を行う上で最も重要なのは、如何にして流れをうまく可視化するかという点である。流れの可視化は、染料注入によるオズボーン・レイノルズの有名な層流乱流の実験や水素気泡法を用いたクラインらのバースティング現象の発見⁶⁾などに代表されるように、水理学や流体力学の発展に非常に重要な貢献を果たしてきたが、単に流れの定性的な特性を観察しているだけではないかと言った批判があったことも事実である。しかしながら、上述の画像計測技術の発展によって可視化画像は単なる写真から、膨大な情報量のつまった媒体へと見事な脱皮を遂げることができたわけである。流れに投入した粒子を手作業で追跡していた時代があったことを考えると、現在の状況はまさに隔世の感がある。

以上のような最先端を走る可視化画像計測技術の華々しい発展と比較すると、同じ流れの計測とは言っても河川工学における流れの計測、その中でも実際河川を対象とした計測手法は依然として点計測が主体であって、先端的な画像計測の技術を積極的に取り入れる工夫はあまり行われてこなかったのが現状であり、反省点でもある。計測を自然条件下で行わなければならないという非常に過酷なハンディキャップはあるものの、やはり何らかの形で画像計測の導入を図ることは今後の河川計測技術の発展のためにも重要である。別の言い方をすれば、この分野の計測技術にはまだまだ発展の余地があり、今後の進展が期待されているチャレンジングな技術分野であるとも言える。本稿では、このような現状をふまえた上で、それでもこれまでわずかながら発展してきた実河川を対象とした画像計測の解析法等について詳述したいと思う。

2. 従来の計測法の問題点と画像計測の必要性

まず、実際河川の流れを対象とする際の従来の方法の問題点と画像計測の必要性について考えてみる。一般的に川の流れを測る目的には、流量観測と流況観測の二つがある。以下では個々の観測方法に関して具体的にふれる。

2. 1 流量観測の場合

流量データは、河川の計画や管理において水位とともに最も基本的な水文資料であるから、対象が一級河川の場合には低水から高水に至るまでの定期的な流量計測が業務化されている。ただし、上流域の国土交通省管轄外の河道区間や二級河川以下の河川では、電力関連の河川を除けば、流量の実測データがほとんどないのが現状であり、降雨データから流出解析によってその値を推定しているにすぎない。

流量の計測方法は低水時と高水時で全く異なる方法がとられている。すなわち、低水時にはプロペラ流速計による計測（２点法）、高水時には浮子による計測が行われている。低水時観測における大きな問題点は、流量観測そのものに多大な時間と経費（人件費）がかかる点であり、計測の自動化あるいは省力化が強く望まれている。

一方、洪水観測においては以下のような様々な問題点が指摘されている⁷⁾。

- ① 観測には常に3～5名の人手が必要だが、浮子観測を専門とする業者が少なくなっている点
- ② 急な出水の場合には、観測が間に合わずピーク流量を欠測する場合がある点
- ③ 連続的な流量観測の実施が実際上困難な点
- ④ 浮子が必ずしも測線上を移動しない点
- ⑤ 出水規模が大きい場合、観測そのものの遂行が危険で計測不可能となる場合がある点

このうち、④の問題点を端的に示しているのが図-1に示す浮子の軌跡である。この図は夜間の洪水流観時に左岸側から撮影された発光浮子の軌跡を合成した後、画面全体を幾何補正したものである。この図から明かなように、浮子の軌跡は特に河岸近くで河道中央に偏移する傾向を示している。これは河岸近くで強まる内部二次流の影響と思われるが、下流側の浮子の見通し断面は図中に示された範囲よりもさらに下流側に位置するため、二つの見通し断面を通過中に浮子は水深や流速が小さな河岸近くから、水深も流速も大きくなるさらに中央寄りへと移流されることになる。従って、測線を通過すると仮定して算出した流量は過大評価されるか、あるいはこれまで過大評価されていた可能性がある。図-1のように比較的直線的な河道区間でさえこのように浮子の軌道が変

化してしまうことを考えると、地形的な制約などからやむを得ず湾曲部などで行われる浮子観測流量には高い計測精度は期待できないことがわかる。なお、図-1で軌跡がジグザグになっているのは、浮子の上下の揺動が幾何補正時に強調されたためである。

一方、②や⑤によるピーク流量の欠測は、河川計画の策定においては致命的な問題点である。特に、中小都市河川においては

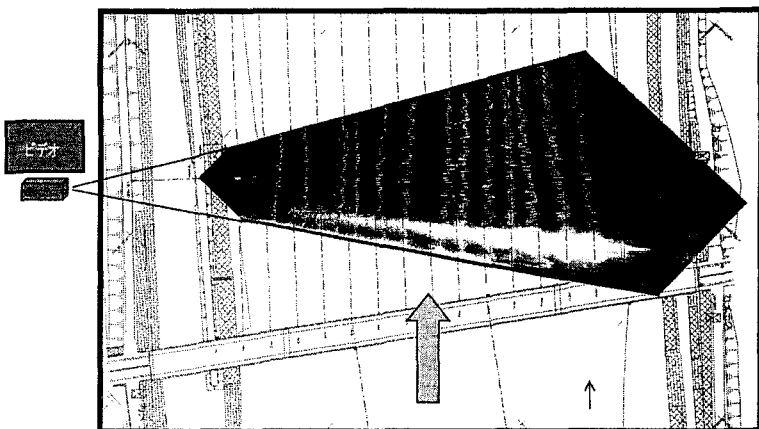


図-1 洪水中の浮子の軌跡（魚野川）

ピーク流量に達するまでの時間が短いために、実際上浮子観測は困難である。したがって、自動計測の必要性は高く、画像計測法はその一手法として有力である。

2. 2 流況観測の場合

実河川の流況を把握しようとする目的は以下の二点にまとめられる。

- ① 模型実験では再現が困難な現象の解明
- ② 二次元、三次元シミュレーションの妥当性の評価

①については、例えば河岸浸食などの発生原因などを調べる際に、模型実験などでは実河川レベルのレイノルズ数や土壌の状態を再現できないために、実際に河岸に作用している流体力や浸食のメカニズムを明らかにすることは困難であり、したがって現実の流れ場を直接把握することが重要となる。あるいは、ボイル渦のような大スケールの渦は実験室で再現するのは非常に難しいため、その特性を調べるためには現地における観測が不可欠となる。

②については、近年、河川流の二次元あるいは三次元数値シミュレーション技法が発展し⁸⁾、河道計画の策定など実用的な場面においても利用されることが多くなってきたことは事実であるが、シミュレーション結果を現地のデータをもとにして詳細に検証した例はあまりない。河道形状が平面的にも横断的にも変化が少ない場合には問題はないが、河川構造物や橋脚が混在するような複雑な流れ場が対象となると、シミュレーションモデルの選択、計算格子の配置の違いなどが計算結果に影響を及ぼす可能性は大いにある。したがって、現地レベルで詳細な流れ場の計測が可能となれば、モデルの検証だけでなくモデルの改良にも大きく貢献できるはずである。

2. 3 現地計測の現状

流れを対象を絞って、現在使われている計測法について少し触れてみる。従来の計測機器の大部分は点計測装置である。一般には現地用に改良された携帯用の計測装置が利用されている。例えば、プロペラ流速計、電磁流速計あるいは超音波流速計がこれに相当する。プロペラ流速計は前述のように低水流量観測に利用されているが、一成分しか得られないため、流れの構造を調べるためには二次元あるいは三次元の流速成分が得られる電磁流速計や超音波流速計が用いられる。しかしながら、このような計測機器は一般に高価なため多点同時計測を行う場合でも高々2～3点のデータが得られるに過ぎない^{9,10)}。8台の電磁流速計を使った例もあるが¹¹⁾一般的ではない。これらの計測機器の特徴は、一点における計測は非常に高精度に行えるが、流れ場を空間的に把握するためには流速計を流水中の定点で支持するシステムを順次移動させなければならない。したがって、洪水流中の計測はこのタイプの計測システムでは行うことができない。このような計測装置に対して、近年では超音波パルスのドップラー効果を利用した ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)が利用されるようになってきた¹²⁾。この装置では、プローブ直下の流速分布を三次元的に捉えることができる点が画期的であるが、空間的に高密度な情報を得るにはやはりプローブの位置を細かく移動させる必要がある。また、プローブからの距離が大きくなるにつれて計測ボリュームが大きくなり計測精度が低下すること、また外国製品であるため内部の仕様が不明といった問題もある。

このようないわゆる接触型プローブタイプの計測装置に対して、最近では河川表面流を対象とした非接触型の流速計が流量観測に使われるようになってきた¹³⁾。電波流速計や超音波流速計がこれに相当する。この種の流速計では、河川表面にスポット状に照射した電波や超音波の水面からの反射波を受け、ドップラー効果を利用してスポット面の平均流速を求めている。スポット面のサイズは直径3m程度である。後述する画像計測法とこれらの機器との比較を表-1に示した。ドップラー効果型の流速計はリアルタイムの計測システムの構築が容易で、実河川における実績もあるが、基本的には電磁波を照射する方向の流速成分を求める点計測装置であるため、横断流速分布を求めるためには装置一式を横断方向に計測のたびに移動させな

表－１・非接触型流速計の特徴比較

	電波流速計	超音波流速計	P I V	オプティカルフロー
計測原理	ドップラー効果		テンプレートパターンマッチング	時空間微分
使用周波数他	マイクロ波 20.4KHz	超音波 10.525GHz	可視光	可視光
計測対象	水面の凹凸 (3.6mm 以上)	水面の凹凸	表面濃淡分布	表面濃淡分布
計測領域	一辺 2～4m の楕円	一辺 2～4m の楕円	1 ベクトル当たり数 m～10m 四方、テンプレートの取り方により変化	およそ数 m 四方、ズームにより変化
俯角	30～45 度	30～45 度	最遠点で 6 度程度以上～	30～90 度
偏角	0 度	0 度	制限なし	制限なし
横断流速分布の計測	流速計を平行移動	流速計を平行移動	固定点 (河岸高所) からの全幅同時計測可能、河川幅 100m/台 (目安)	ビデオカメラを平行移動、50m/台 (目安)、河岸から也可
測定範囲 (m/s)	0.5～10.0 (水面の状態により異なる)	0.5～10.0 (水面の状態により異なる)	0～10.0 (目安) 逆流も測定可能	0.5～10.0 (目安) 逆流も測定可能
流速成分	照射方向の 1 成分	照射方向の 1 成分	二次元成分	二次元成分
設置場所	橋 (水面まで 10 m 以内)	橋 (水面まで 10 m 以内)	河岸、橋	橋 (河岸)
夜間計測	可能	可能	照明を利用、熱赤外線カメラ	照明を利用
リアルタイム計測	可能	可能	水位計との連動で可能	可能
特徴	実際河川での計測実績が豊富にある	基本原理は電波流速計と同様	橋がない場所でも計測可能、複数カメラ利用で 100m 以上の河川幅をカバー可能、I T V カメラを利用可能	中小河川の観測に適する I T V カメラを利用可能

ればならないわずらわしさがある。表－１に示したオプティカルフロー法も基本的にはドップラー型のものと同様の計測空間や稼動性を有するが、対象が局所的な画像の濃淡である点が異なる。後述の PIV 法も画像の濃淡が流速の情報源であるが計測原理は異なる。

以上、様々な計測の場に対して、従来の計測機器の特徴と問題点について指摘してきたが、本稿の主題である画像解析による方法はここで触れた問題点をすべて解消するものではもちろんない。しかしながら、以下に示していくようにその簡便性、経済性あるいは計測原理の単純さは魅力的なものであり、流体力学の計測機器がホットワイヤ型から画像型へと転換しつつあるように、河川工学においても少し遅れて同様の経過をたどる時期が到来したのではないかとみている。

2. 4 I T V 施設利用の可能性

実河川の流れを直接観察できる有効な場所として ITV (Industrial Television) 施設がある。これは情報通信のインフラ整備の一環として一級河川の堤防を利用した光ファイバー網の敷設が全国規模で行われた際に、主要な地点に配備されたものである。この光ファイバー網はいわゆる総合防災情報ネットワークのシステムを構築するものであり、水系全体の流況や河川管理施設の状況を 24 時間体制で集中管理することがその主目的とされている。例えば、淀川水系では水位観測所、樋門、排水機場等の計 51 地点においてその設置が完了し、現在稼動している。ITV 施設の具体的な目的は多種多様だが、例えば取水施設の監視、不法行為 (不法取水、不法工作物、不法投棄) の監視、河川環境 (植生、鳥類などの生態) の状況把握、洪水時の河岸状

況の監視などがあげられる。各 ITV 施設に設置された CCTV(Closed Circuit Television)カメラは、各地方整備局の工事事務所内に備え付けられた操作パネル（専用パソコン）によってチャンネルの切り替えが容易に行え、各チャンネルのカメラアングルやズームを自在に制御できるようになっている。配備されている CCTV カメラ本体の性能は、ズーム倍率だけを比較しても一般的な家庭用ビデオカメラよりはるかに高性能なものであり、さらに外部光が弱まると自動的に光蓄積モードになるため微弱な明かりの下でも観測が可能となっている。

以上のように、高性能なビデオカメラが ITV 施設に配備されるなど、河川網をめぐるインフラが十分に整備されつつあるのは確かであるが、ITV 施設利用の現状は、緊急的な災害時を除けば必ずしも有効活用されていないのが実態のようである。これは、ITV 施設の利用形態がいわゆる監視のレベルにとどまっているためであり、必要に応じて CCTV カメラから定量的な情報を引き出すことが可能であれば、ITV 施設の活用範囲は格段に広がることは間違いない。ビデオ画像から引き出せる可能性のある定量的な情報としては、流れに関する情報、河川周辺の植生繁茂状況、さらには河川公園などの利用実態（利用者数）などが考えられる。あるいは、定量的な情報ではないが、洪水時における河岸危険箇所のリアルタイムのモニタリング、すなわち河岸の侵食、崩落や変形を自動的に検出して水防活動を支援するシステムの構築などにも ITV 施設は有効であると思われる。ただし、本稿では、これらのうち流れ場の計測に絞って議論をすすめる。

3. 河川流の画像計測におけるトレーサ

一般に可視化画像を用いた画像計測では流れに追従するトレーサが必須である。実験室レベルの流れ計測の場合は、水の場合、比重が 1.02 程度のナイロン破砕粒子などを使うことが多い。実験室では流れの非常に微細な構造を調べることが多いためにトレーサの流れへの追従性は非常に重要であり、特に逆流などがある場合には $10\mu\text{m}$ 程度のトレーサでなければ十分な追従性は保証されない。ところが、対象が実河川流となると計測の事情は大きく変わってくる。まず、長さスケールが幅方向には 10cm のオーダーから $10\text{m}\sim 100\text{m}$ のオーダーへ、水深方向には $1\sim 10\text{cm}$ のオーダーから 1m のオーダーへと急増する。これは、 10 倍から 1000 倍へのスケールアップに相当する。したがって、当然のことながら実験室レベルの議論は単純には適用できなくなる。例えばトレーサのサイズもそれ相応に大きくせざるを得ない。また、河川が対象となると流体内部を可視化して観測することは非常に難しくなる。それは場所的な制約もあるが、特に浮流砂が多くなるといくら強度の強い光を照射しても大部分の光は散乱されてしまうからである。したがって、河川流の可視化画像計測では表面流の計測に限らざるを得ないのが現状である。表面流の可視化は従来、表面浮遊法として知られる。実験室レベルでは、粒径がミリのオーダーの球形粒子が使われることが多いが、河川流が対象になると例えば洪水の際に上流から流下してくる流木やごみ、泡などが自然トレーサとして立派に役に立ってくる。ただし、このような自然トレーサは必ずしも常に流下してくるとは限らないし、もちろん平水時には自然的なトレーサは全くなくなる。以下では、平水時と洪水時に別けて議論をすすめる。

3. 1 平水時のトレーサ

前述のように平水時には、自然発生的なトレーサは一般に利用できないため、積極的にトレーサを投入することが必要となる。トレーサのサイズは少なくとも河岸や橋などから観察して視認できる程度のものが必要となるが、河川幅が大きいほど、あるいは流速が大きいほど必要なトレーサの量は増大する。トレーサの種類によっては環境への悪影響も懸念されるため、その材質には注意しなければならない。最近使われるようになったものとしては、梱包用の緩衝材として製品化されている粒子がある¹⁴⁾。粒子とはいっても形状は棒状（径 2cm 、長さ 5cm 程度）である。成分は生分解性のとうもろこし（コーンスターチ）であり、仕様によれば土中において約 45 日で 80% 生分解するので、環境にやさしいトレーサと言える。ただし、とう

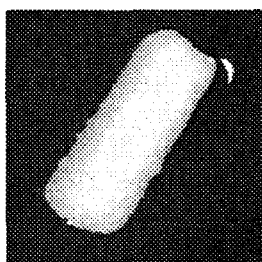
もろこしは澱粉であるから、トレーサ投入が水質環境に影響を与えるような非常に水質の良い河川（溪流など）には使わない方がよい。

トレーサの浸潤性を示したのが図－２である。水面にトレーサを置いた後の状況を水面上から観測したが、図からもわかるように５分程度経過すると十分に水を吸い込んで分解し散乱する。実際の河川に投入した場合には乱れが大きいほど早く散乱するが、散乱が著しい場合でも１～２分程度は水面上で視認できるので問題はない。また、このトレーサは水面に投入後、比較的短い時間で吸水し散乱する前にすでにその大部分が水面下に没するため、風などによって水面を‘走る’ことはなく、水面近くの流れにうまく追随する。難しいのはトレーサの投入方法である。トレーサは非常に軽量なため、河岸からの人手による投入では散布範囲が狭い範囲に限られてくる。河川全幅に渡るトレーサ散布は計測範囲の上流からボートを横断させながら行うか、橋があればそこから行えばよい。トレーサの投入量は目的にもよるが、スポット的に流れを可視化するためには一箇所の投入でバケツ一杯程度の量があればよい。ただし、幅が５０ｍ程度の河川を詳細に調べたケースでは合計で数 m^3 の投入量が必要であった。

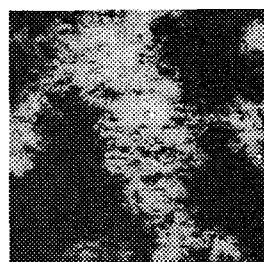
河岸からではなくさらに上空のヘリコプターな

どからの画像計測の例では、緩衝材トレーサよりも大きなサイズ的环境トレーサの利用が有効である。実際の計測例では、直径１５ｃｍ程度の食用のセンベイが有効であった¹⁶⁾。図－３に河川表面をセンベイで可視化撮影した例を示す。３００ｍ程度上空からの撮影画像であるが、個々のトレーサを明瞭に識別できることがわかる。トレーサはボートから投入されているが、河川表面を万遍なくカバーするには表面流線を予め調べておき、適切なポイントから投入する必要がある。ただし、湧き出しが卓越するような場合にはトレーサが行き渡らず表面流の可視化は困難となる。

特殊なケースとして、平水時でも水面に微小振幅のさざ波が生じる場合にはトレーサとして利用できる¹⁶⁾。波向が単一方向の重力波が発生するほどの波が生じている場合には無理だが、水面に数ミリ程度の凹凸を生じさせる程度の風が吹き付ける場合には、持続性はあまりないが水面流の状況が非常に明瞭に確認できるようになる。すなわち、無風下では水面は滑面状態で対岸あるいは上空の様子が鏡面反射して見えているにすぎないが、微風下では水面は粗面状態となりその凹凸が流れとともに移流している様子がわかるようになる。その点を確かめるために、水面に微小擾乱が生じている画像を後述の方法で幾何補正し、その中のある矩形領域を切り出して縦に並べたものを図－４に示した。矩形領域内の輝度はヒストグラム平均化手法によりコントラストを強調してある。これより、水面近傍には数ｍスケールの何らかの構造があり、それが平均流にのって下流方向に移流している様子がわかる。このような状況は微風下の河川表面では頻繁に観察できるため、場合によっては河川流のトレーサとして有効利用できる。さらに特殊なケースとして、冬季には流氷がトレーサとして使える場合もある¹⁷⁾。

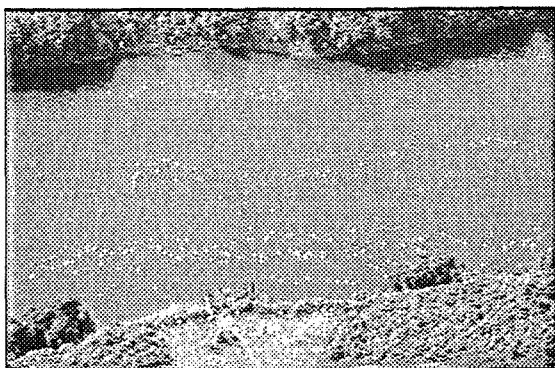


(1)初期状態

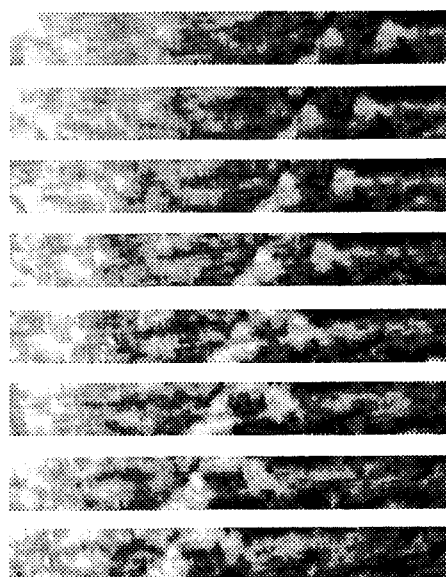
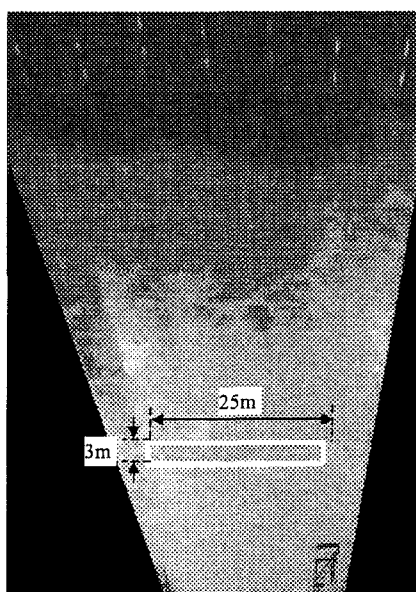


(2) 5分後の状態

図－２ トレーサの変形状態



図－３ センベイによる河川表面流の可視化（ヘリコプターからの撮影画像、白い点が個々のセンベイで画面右の上流側からボートで投入散布、河川幅は約６０ｍ）



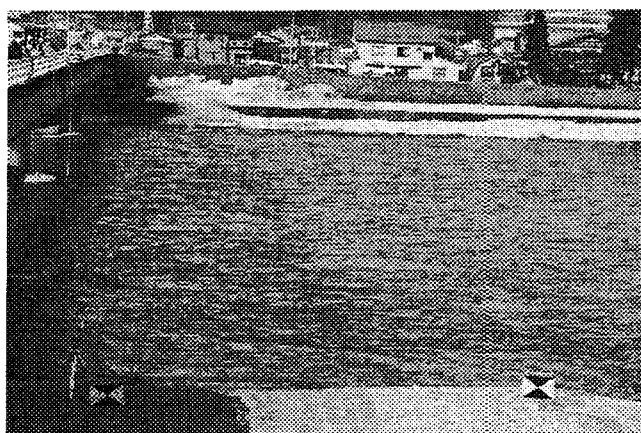
(a) 幾何補正後の画像と検査枠

(b) 表面輝度分布の時間変化

図ー 4 微風下における河川表面の凸凹の移流状況 (時間変化は上から順に1秒間隔, フレーム内の輝度はヒストグラム平均化により強調)

3. 2 洪水時のトレーサ

洪水時には前述のように、流木やごみ、泡などが発生し、表面流とともに流下する状況がよく見られる。これらは特に洪水の水位上昇時によく観察できるが、航空写真の解析においては流速ベクトルを表す唯一の手がかりとして利用される。しかしながら、このような自然トレーサは必ずしも常に現れるわけではないため、一般的な可視化媒体として利用することはできない。洪水時と平水時の河川表面の状態で明らかに異なるのは、洪水時の場合、乱れが強いために水面が大きく変動している点である。このような水面変動は、局所的に見れば規則性もなく流れの状態とは無関係のように思えるが、例えば、洪水流の表面を撮影したビデオ画像を早回しすると、水面の凹凸全体が流れの方向に動いていることが容易に確認できるはずである。このような水面の凸凹は、流木のような個々のトレーサではなく、平面的に流れ場を可視化した面トレーサとして利用することができる。洪水時の水面の状態をよく表している画像を図ー 5 に示す。これは、春先の融雪出水にともなう洪水流を河岸から撮影したものだが、水面には無数の凸凹が発生



図ー 5 洪水時に発生する河川表面の凹凸(波紋)

していることがわかる。表-1で示したすべての非接触型の流速計が計測対象としているのはまさにこの水面の凹凸である。すなわち、ドップラー型では凹凸面からの電磁波の反射、画像型では凸凹面からの光の反射の濃淡を調べることによって流速を求めようとしている。

このような水面の凹凸は水面に完全に凍結された状態で移流されているのではなく、個々の微小な波が折り重なって渾然とした重複波の状態で存在している。個々の波は、航行する船が作るような波高の大きな航跡波とは異なって方向性がなく波長や波速も小さい。このような小スケールの波の発生要因としては、

- ① 開水路粗面乱流場における水面近傍の圧力変動
- ② ボイル渦等の水面への衝突およびその痕跡
- ③ 橋脚など河川構造物背後で発生した後流や衝撃波の痕跡
- ④ 風の影響

などが考えられる。洪水時に観測されるのはこれらの要因が複合的に影響しあった結果生じる水面の擾乱である。したがって、単純にその波速を求めることは難しいが、洪水時に観察される水面凹凸の波長が1~10cm程度であるのに対し、水深がメートルオーダーの値をとることから、ちなみに深水波として波速を計算してみるとその値は10~40cm/s程度となる。ただ、現実にはこのような波があったとしても単一波としては存在し得ず、各々の波の波向は不規則で互いに打ち消しあうため、ビデオ画像上である種の移動媒体として認識されるのは、洪水の平均流（低平地では2~3m/s程度）に、平均すれば無視できる程度の速度成分を持つ水面の擾乱が重畳した場ということになる。通常、これらの微小水面擾乱には方向性がないため、これらのノイズ（微小波速の影響）は平均処理によって除去できる。ただし、強い風によって方向性の強い重力波が連続的に発生している場合には、その影響は無視できず重力波の波速の方を追跡してしまう可能性が高い。このような水面の凸凹は水面波紋とも呼べるが、その発生条件や強度と河川における水理条件との関係は必ずしも明らかになってはおらず、今後の研究が必要である。

河岸からではなく、さらに上空から撮影された画像の場合には、大スケールの流れの構造が表面流の可視化に役立つ場合がある。その例を図-6に示す。これは東海豪雨災害の際に、庄内川の支川である新川の破堤部をヘリコプターから撮影したビデオ画像の一場面であるが¹⁸⁾、この例では前述のような個々の波紋はほとんど確認できない。その代わり、水面には直径が数m以上のオーダーと思われるマダラ模様のパターンが現れている。また、色の濃淡の違いも明確である。これらは明らかに大スケールのボイル渦が水表面に残した痕跡であり、暗い部分が湧昇部、白い部分が収斂部に相当するものと考えられる。このような痕跡が全体的に表面流とともに流下している様子は容易にビデオ映像で確認でき、後述のように面トレーサとして画像計測に利用可能である。

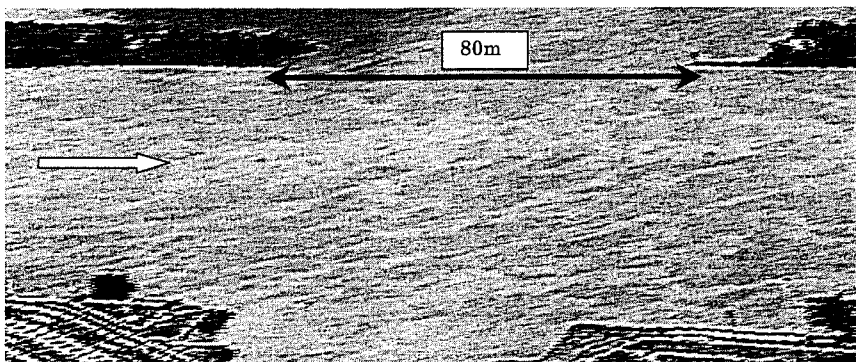


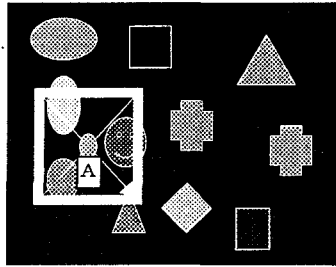
図-6 河川表面の大スケールの構造（新川破堤部）

4 画像計測の諸手法

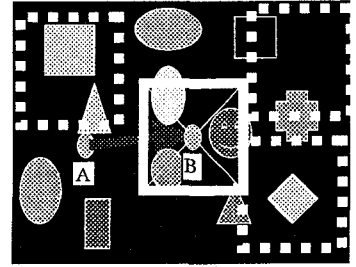
3章では実河川の画像計測で利用できる様々なトレーサを紹介したが、どのタイプのトレーサを用いるにしても、トレーサのある時間内での移動距離が計測できれば流速が得られることに変わりはない。一般的に、流体の画像計測は個々の粒子を追跡するPTV法(Particle Tracking Velocimetry)と、面的なパターンの移動を追跡するPIV法(Particle Image Velocimetry)に大別できるが、その他にも時空間微分法(オプティカルフロー法)と呼ばれる手法も有望である¹⁹⁾。ここでは、洪水流のように個々のトレーサを識別できないような場合でも利用できるPIV法と時空間微分法およびその変形版であるSTIV(Spatio-Temporal Image Velocimetry)²⁰⁾についてふれることにする。ただし、河川流の場合は通常、河岸や橋などから観測・撮影することが多いので、得られた画像は必ず歪みをもった画像となる。したがって、ここで説明する解析法は、STIV法を除けばすべて画像の歪みを幾何補正した無歪み画像に対して適用することになる。幾何補正の方法については次章で解説する。

4.1 PIV法の基本原理

PIV法はテンプレートパターンマッチングに基づく画像計測法である。計測の概念図を図-7に示した。第1画像上の白枠で囲んだ領域が一つのテンプレートであり、このテンプレート内部のパターン(河川画像の場合は波紋による模様)と類似したパターンを第2画像上で探索する。テンプレートは、検査領域、相関窓あるいは参照フレームなどとも呼ばれる。図-7では、中心が点A



(1) 第1画像 ($t = 0$)



(2) 第2画像 ($t = DT$)

図-7 PIVの概念図

あるテンプレートのパターンが点Bに中心を持つテンプレートと類似している様子を示している。このようなパターンの類似性はテンプレート間の輝度値の差で表すこともできるが、相互相関係数を指標とするのが一般的である。PIV法が相関法とも呼ばれる所以である。相互相関係数 R は第1画像、第2画像の各テンプレートの輝度分布を a_{ij} , b_{ij} ($i=1\sim M$, $j=1\sim N$)としたとき次式で定義される。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \{ (a_{ij} - \overline{a_{ij}}) (b_{ij} - \overline{b_{ij}}) \}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (a_{ij} - \overline{a_{ij}})^2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (b_{ij} - \overline{b_{ij}})^2}} \quad (1)$$

ここに、

$$\overline{a_{ij}} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_{ij}}{MN}, \quad \overline{b_{ij}} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N b_{ij}}{MN} \quad (2,3)$$

は各テンプレート内の輝度分布の平均値を示す。相互相関係数の値はまったく同じパターンのテンプレート間では1、互いに輝度が反転したテンプレート間では-1の値をとる。テンプレートのサイズは内部のパターンが周囲のパターンと有意な差を持つように決めればよい。ただ、幾何補正した画像の場合にはノイズ的

な要素が多く含まれるため、マッチングの際の誤対応で異常ベクトルが発生しやすい可能性がある。これを防ぐためには実験室レベルの PIV で用いるテンプレートよりは大き目のサイズをとる方がよい。サイズの基準は特にはないが、 $M(N)=25\sim50$ 画素程度がひとつの目安の値である。また、一つのテンプレートに対するマッチングはある探査領域の中で行うが、この探査領域のサイズが大きすぎると演算に時間を要し、小さすぎるとマッチングすべきパターンが見つからず異常ベクトルの発生要因となるため注意が必要である。

表-2 R の分布

	R_{jp}	
R_{im}	R_{max}	R_{ip}
	R_{jm}	

ここまでで得られるのは、相互相関係数のピーク位置を画素単位の移動ステップで検索した結果得られる移動ベクトルである。マウスなどを利用してマニュアル操作で得られる精度はすべてこのレベルである。PIV では、通常は計測精度を高めるためにサブピクセルの補正移動量を追加する。補正量の求め方にはパラボリック補正法やガウシアン補正法などがある²⁾。画面上の座標として横方向に i 軸、縦方向に j 軸を取り、画素単位の探査で得られた最大相互相関係数 R_{max} の位置を中心に、上下左右の相互相関係数を表-2 のように定義するとパラボリック補正量は

$$D_{sx} = \frac{R_{im} - R_{jp}}{2R_{im} - 4R_{max} + 2R_{jp}} DX \quad (4)$$

$$D_{sy} = \frac{R_{jm} - R_{jp}}{2R_{jm} - 4R_{max} + 2R_{jp}} DY \quad (5)$$

そして、ガウシアン補正量は

$$D_{sx} = \frac{\ln(R_{im}) - \ln(R_{jp})}{2\ln(R_{im}) - 4\ln(R_{max}) + 2\ln(R_{jp})} DX \quad (6)$$

$$D_{sy} = \frac{\ln(R_{jm}) - \ln(R_{jp})}{2\ln(R_{jm}) - 4\ln(R_{max}) + 2\ln(R_{jp})} DY \quad (7)$$

のように与えられる。ここに、 DX, DY は 1 画素の実長である。画素レベルのパターンの移動ベクトルを (D_{px}, D_{py}) とすると PIV で得られる流速ベクトル (u, v) は、サブピクセル補正を考慮して

$$(u, v) = (D_{px} + D_{sx}, D_{py} + D_{sy}) / DT \quad (8)$$

で与えられる。ここで示したサブピクセル補正の精度は平行流の場合で 0.1~0.2 画素程度なので、このような補正量を追加することによって、従来よりも 5~10 倍程度の精度向上が見込まれる。

PIV で重要なもう一つの点は、画像の時間間隔 DT の与え方である。すなわち、 DT が短すぎるとパターンの変位量がわずかになり、相関は非常に高いが実際の移動量は検出できない結果となる。一方、 DT が大きすぎるとパターンの変形が大きくなり相関が低くなったり、異常ベクトルが発生したりするようになる。この傾向は特にせん断変形が卓越するようなケース、すなわち河岸近くの流れあるいは水制のような河川構造部周りの流れの計測において顕著となる。したがって、 DT の設定には十分な注意が必要である。実験室レベルの PIV 計測では、目安として最大移動量が 10 画素程度になるように DT を調整することが多いが、幾何補正画像に対する河川流の PIV では必ずしもこの原則は当てはまらない。このため DT を変化させた予備的なトライアルを行い、流速成分が安定して検出できる最適値を調べておく必要がある。

4. 2 PIV の計測精度 (一般論)

PIV の一般的な計測精度は、画像時間間隔 (DT)、テンプレートサイズ (M)、および画像生成における空間解

像度(DX, DY)等によって変化する。PIV の基本的な速度分解能はトレーサの 1 画素移動量に相当する速度、すなわち、

$$\Delta u = DX/DT \quad (9)$$

で与えられるが、前述のサブピクセル補正を考慮するし最大移動量を 10 画素とすると、PIV による計測可能範囲は x 軸方向で

$$u = (0.1 \sim 10)DX/DT \quad (10)$$

程度となる。具体的な例として、 $DX=10\text{cm}, DT=0.2\text{sec}$ とすると、 u の範囲は $0.05 \sim 5\text{m/s}$ となるが、ビデオ画像の最小値時間間隔である $DT=1/30\text{sec}$ とすると、 $u=0.3 \sim 30\text{m/s}$ となり十分な精度は期待できなくなる。ただ、さらに高精度のアルゴリズムも開発されつつあるので、計測精度は今後改善される可能性が高い。

4. 3 時空間微分法 (オプティカルフロー法)

時空間微分法は、輝度分布が流体とともに移流すると仮定して輝度の時空間的な変化量から速度ベクトルを推定する逆問題の一つと見なせる。いま、輝度分布を $f(x, y, t)$ とすると輝度分布に関する移流方程式は次式で与えられる。

$$f_t + uf_x + vf_y = e \quad (11)$$

ここに、 e は背景画像の輝度分布の変化、添え字は偏微分を表す。式(11)中の f_t, f_x, f_y は輝度分布から算出できるので、背景の変化はないものとする、速度成分 (u, v) はある小領域(A)内で次の目的関数

$$G(u, v) = \sum_A (f_t + uf_x + vf_y)^2 \quad (12)$$

が最小となるように最小二乗法で求めることができる。例えば、小領域内での速度変化がないと仮定すれば速度成分 (u, v) は次式から算出できる。

$$\begin{pmatrix} \sum_A f_x^2 & \sum_A f_x f_y \\ \sum_A f_x f_y & \sum_A f_y^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \sum_A f_x f_t \\ \sum_A f_y f_t \end{pmatrix} \quad (13)$$

ここでの小領域は PIV におけるテンプレートとは意味合いが違うが、サイズのには同程度のものと考えておけばよい。

時空間微分法は、空間軸上だけでなく時間軸上においてもパターンの微小な変位を仮定しているので、画像間隔としては、一般的なビデオ画像の場合、最小フレーム間隔の $1/30\text{sec}$ をとるのが普通である。したがって、PIV のように時間間隔について試行錯誤する必要はないが、微小変位の条件が崩れると異常値が増大するため注意が必要である。最近では、PIV と組合せ、サブピクセル補正に時空間微分を利用する方法も提案されている²²⁾。

4. 4 S T I V (Spatio-Temporal Image Velocimetry)法²⁰⁾

STIV 法は一次元 (主流方向) の平均速度場を求める新たな画像計測手法である。これまで説明してきた方法と比較するために図-8 に模式図を示した。通常のビデオ画像ではフレーム画像の最小時間間隔(ΔT)は $1/30\text{sec}$ である。PIV では前述のように連続画像の時間間隔を調整するので、最初の画像と N 番目の画像から速度場を得る。時空間微分法 (オプティカルフロー法) では最小時間間隔 ΔT の連続画像を用いるが結果が若干 noisy になる。PIV 法や時空間微分法が面的なパターンの変化から二次元流速ベクトルを算出するのに対し、STIV 法では連続する数十枚の画像をすべて用いて線上 (検査線と呼ぶ) の流速成分を求める (図

－ 8 (c)).

輝度の空間勾配を求めるという点では、オプティカルフロー法の一次元版とも言えるが、輝度の勾配値を移流方程式ではなく画像処理によって求めている点が従来の方法と大きく異なる。

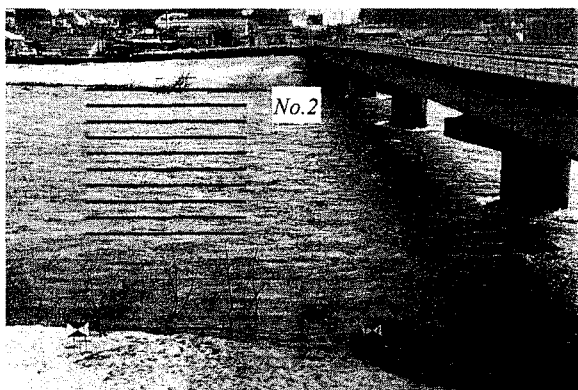
STIV 法で用いる時空間画像の一例を図－ 9 に示す。これは図－ 10 に示した検査線 No.2 上の輝度分布を時間軸方向に積み重ねて生成したものである。この例では、時空間画像の生成に約 11 秒間 330 フレームのビデオ画像を用いた。ノイズは含まれているものの、全体的な傾向として右下に向かう縞模様が確認できる。この中で相対的に黒い部分は水面凹凸の谷の部分、白い部分は水面凹凸の峰の部分に対応している。これらの縞模様は途切れ途切れではあるが局所的には連続しており、しかも各縞パターンがほぼ平行であることから、この時間内（約 11 秒間）では水面凹凸（波紋）の形状がほぼ凍結された状態で移流されているといえる。従って、この縞パターンの平均的な傾き ϕ を求めれば検査線状を通過している表面流の平均流速が得られることになる。すなわち、検査線上の平均流速は次式から得られる。

$$U = \frac{S_x}{S_t} \tan \phi \quad (14)$$

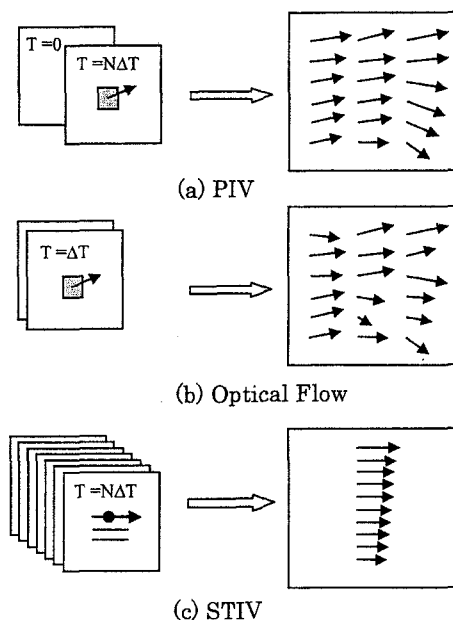
ここに、 S_x (m/画素)：検査線軸の単位長さスケール、 S_t (sec/画素)：時間軸の単位時間スケールである。 St の値は容易にわかるが、 S_x の値は場所によって変化するので、個々の検査線の実長は後述の幾何補正の関係式を用いて求めておく必要がある。

縞パターンの傾きは以下の式から求めることができる。

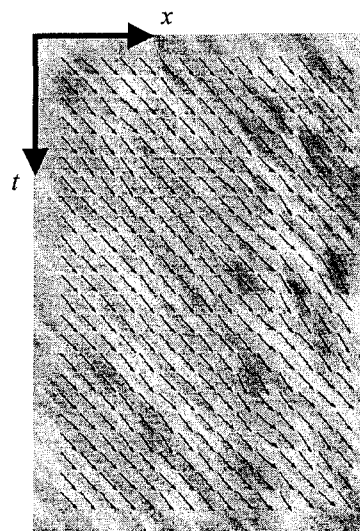
$$\tan 2\phi = \frac{2J_{12}}{J_{22} - J_{11}} \quad (15)$$



図－ 10 検査線の設定状況



図－ 8 各手法の比較



図－ 9 時空間画像の一例（横軸が検査線，縦が時間軸）

ここに、 J_{12} などは時空間画像上の輝度勾配に関連するテンソルで

$$J_{pq} = \int_A \frac{\partial f}{\partial x_p} \frac{\partial f}{\partial x_q} dx dt \quad (16)$$

から計算できる。 f は輝度分布、添え字の p および q は時空間の成分を表す指数で、ここでは $x_1=x$ および $x_2=t$ である。 A は輝度勾配値の積分領域であり、一辺が10～20画素程度の正方領域を想定しておけばよい。また、縞パターンのコヒーレンシーは次式で定義される。

$$C_c = \frac{\sqrt{(J_{22} - J_{11})^2 + 4J_{12}^2}}{J_{11} + J_{22}} \quad (17)$$

この値は縞パターンの強さを示すパラメータであり、理想的な縞パターンの場合に1、全くパターンがない場合に0の値をとる指標である。図-9には式(15)を用いて得られた勾配ベクトルが重ねて示してある。縞パターンの勾配が良好に計算されていることがわかる。なお、縞パターンの傾きを求める他の有効な方法として、画像をせん断変形させながら最適値を求める変形法²³⁾もあるがここでは説明は省略する。

5 斜め画像の幾何補正法

以上、基本的な画像計測法について説明してきたが、実際に対象となる画像は一般的には斜めから撮影された大きな歪みを伴った画像である。したがって、上述のどの方法を用いるにしても、画面上の座標(CRT座標)と物理座標の対応関係を明らかにしておかなければならない。また、斜め画像の幾何補正を行った後にPIVを適用するLSPIV(Large-Scale PIV)^{24,25)}法では、高精度の画像変換が必要となってくる。以下では、これらの事項について説明を加える。

5. 1 水面高さを考慮した画像間の座標変換式

図-11に物理座標 (X, Y, Z) とCRT座標 (x, y) の対応関係を示したが、この二つの座標系間の関係は図中に示した標定点の各座標系における値を用いて求めることができる。ここでは、両座標系間の関係式として次式を仮定する。

$$x = \frac{A_1 X + A_2 Y + A_3 Z + A_4}{C_1 X + C_2 Y + C_3 Z + 1}, \quad y = \frac{B_1 X + B_2 Y + B_3 Z + B_4}{C_1 X + C_2 Y + C_3 Z + 1} \quad (18)$$

式(18)における11個の変換係数 $A_1 \sim A_4, B_1 \sim B_4, C_1 \sim C_3$ は、6点以上の標定点座標を用いて次の最少二乗法により求めることができる。

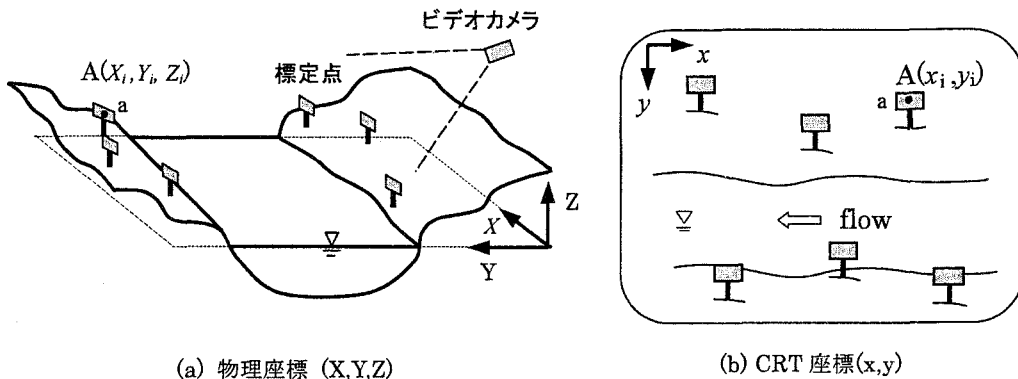


図-11 標定点の物理座標とCRT座標

$$\underline{E} = (\underline{F}^T \underline{F})^{-1} \underline{F}^T \underline{G} \quad (19)$$

ここに,

$$\underline{E} = (A_1 A_2 A_3 A_4 C_1 C_2 C_3 B_1 B_2 B_3 B_4)^T,$$

$$\underline{F} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -x_1 X_1 & -x_1 Y_1 & -x_1 Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 & -x_2 X_2 & -x_2 Y_2 & -x_2 Z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_M & Y_M & Z_M & 1 & -x_M X_M & -x_M Y_M & -x_M Z_M & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -y_1 X_1 & -y_1 Y_1 & -y_1 Z_1 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -y_2 X_2 & -y_2 Y_2 & -y_2 Z_2 & X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -y_M X_M & -y_M Y_M & -y_M Z_M & X_M & Y_M & Z_M & 1 \end{bmatrix}$$

$$\underline{G} = (x_1 x_2 \dots x_M y_1 y_2 \dots y_M)^T$$

であり, $(x_i, y_i) \sim (x_M, y_M)$ は各標定点の CRT 座標, $(X_i, Y_i, Z_i) \sim (X_M, Y_M, Z_M)$ は対応する物理座標である。一方, 水面は一般的に平面の方程式として次式で表せる。

$$Z = D_1 X + D_2 Y + D_3 \quad (20)$$

係数 D_1, D_2, D_3 は水面上で 3 点以上の座標を与えれば求められる。ただし, 水面が緩勾配ならば, $Z \approx D_3$ とおける。式(20)を式(18)に代入すると次式が得られる。

$$x = \frac{(A_1 + A_3 D_1)X + (A_2 + A_3 D_2)Y + (A_3 D_3 + A_4)}{(C_1 + C_3 D_1)X + (C_2 + C_3 D_2)Y + (C_3 D_3 + 1)} \quad (21)$$

$$y = \frac{(B_1 + B_3 D_1)X + (B_2 + B_3 D_2)Y + (B_3 D_3 + B_4)}{(C_1 + C_3 D_1)X + (C_2 + C_3 D_2)Y + (C_3 D_3 + 1)}$$

無歪画像の生成法は次節で説明するが, 生成の際には以下に示す式(21)の逆変換式を用いることになる。

$$X = \frac{c_1 x + c_2 y + c_3}{p_1 x + p_2 y + p_3}, \quad Y = \frac{q_1 x + q_2 y + q_3}{p_1 x + p_2 y + p_3} \quad (22)$$

ここに,

$$\begin{aligned} c_1 &= (B_2 C_3 - B_3 C_2) D_3 + (B_3 - B_4 C_3) D_2 + (B_2 - B_4 C_2) \\ c_2 &= -\{(A_2 C_3 - A_3 C_2) D_3 + (A_3 - A_4 C_3) D_2 + (A_2 - A_4 C_2)\} \\ c_3 &= (A_3 B_4 - A_4 B_3) D_2 + (A_2 B_3 - A_3 B_2) D_3 + (A_2 B_4 - A_4 B_2) \\ p_1 &= (B_3 C_2 - B_2 C_3) D_1 + (B_1 C_3 - B_3 C_1) D_2 + (B_1 C_2 - B_2 C_1) \\ p_2 &= (A_2 C_3 - A_3 C_2) D_1 + (A_3 C_1 - A_1 C_3) D_2 - (A_1 C_2 - A_2 C_1) \\ p_3 &= (A_3 B_2 - A_2 B_3) D_1 + (A_1 B_3 - A_3 B_1) D_2 + (A_1 B_2 - A_2 B_1) \\ q_1 &= -\{(B_1 C_3 - B_3 C_1) D_3 + (B_3 - B_4 C_3) D_1 + (B_1 - B_4 C_1)\} \\ q_2 &= (A_1 C_3 - A_3 C_1) D_3 + (A_3 - A_4 C_3) D_1 + (A_1 - A_4 C_1) \\ q_3 &= -\{(A_3 B_4 - A_4 B_3) D_1 + (A_1 B_3 - A_3 B_1) D_3 + (A_1 B_4 - A_4 B_1)\} \end{aligned}$$

である。

以上の幾何補正を高精度に行うためには, 標定点の配置を注意深く行う必要がある。すなわち, 標定点のレベルがほとんど同じで一直線上に並んでいる場合などは特に最小二乗の誤差が増大する。これを避けるためには, 図-11に示したように平面・鉛直方向の両方向にジグザクに標定点を配置するのが良い。

5. 2 幾何補正法

画像の変換は図-12を参照して次のように行う。まず, 物理座標上に間隔 $\Delta X, \Delta Y$ の格子点網を想定し, 各格子点の CRT 座標への写像点を式(21)から算出する。計算された写像点の座標が整数値であれば離散値空

間である CRT 座標の輝度がそのまま物理座標面での輝度となるが、一般には整数とはならないため、通常は写像点を囲む 4 点の輝度から補間法によって物理座標面での輝度を算出する。このようにして得られる物理座標上の格子点輝度分布が無歪画像に対応する。したがって、格子密度を増せば見かけ上の空間分解能は高められるが、ビデオカメラを用いる場合、CRT 座標の情報量は高々 500x500 点のオーダーなので、生成画像と原画像の情報量が大きく異ならないように格子間隔を設定することが重要となる。また、高精度の幾何補正のためには写像点の周囲 16 点の輝度値を用いる三次補間法²⁰⁾が有効である。すなわち

$$f(x_0, y_0) = \sum_K \sum_L f(x_K, y_L) C(x_K - x_0) C(y_L - y_0) \quad (23)$$

ここに、 (x_K, y_L) : (x_0, y_0) の周囲の格子点座標、 $C(x)$ は次式で与えられる。

$$C(s) = \begin{cases} 1 - 2|s|^2 + |s|^3, & 0 \leq |s| < 1 \\ 4 - 8|s| + 5|s|^2 - |s|^3, & 1 \leq |s| < 2 \\ 0, & 2 \leq |s| \end{cases} \quad (24)$$

5. 3 解析領域の設定

一般に、河川表面を撮影したビデオ画像には計測対象以外の余分な背景が含まれている。そこで、効率的な PIV 解析のために解析領域を以下の手順で絞り込む。

①対象領域の切り出し

CRT 座標上で対象領域が含まれるような矩形領域を決める。すなわち、まず、図-13(1)に示す 4 点 (A~D) の CRT 座標 $(x_A, y_A) \sim (x_D, y_D)$ を求める。

②解像度および画像サイズの設定

式(22)より対応する物理座標 $(X_A, Y_A) \sim (X_D, Y_D)$ を計算し、解析領域の物理範囲 (Lx, Ly) を次式から求める。

$$Lx = \max(X_A, X_B, X_C, X_D) - \min(X_A, X_B, X_C, X_D) \quad (25)$$

$$Ly = \max(Y_A, Y_B, Y_C, Y_D) - \min(Y_A, Y_B, Y_C, Y_D) \quad (26)$$

次に、幾何補正後の画像サイズ Nx, Ny を物理面での格子間隔 $\Delta X, \Delta Y$ 、すなわち空間解像度を調整しながら次式から求める。

$$Nx = Lx / \Delta X, \quad Ny = Ly / \Delta Y \quad (27, 28)$$

$\Delta X, \Delta Y$ の値は任意だが、原画像の情報量が有効に利用されるように決める必要がある。通常解析では幾何補正後の画像サイズが、大きくても一辺が 1500 画素を上回らない程度に設定すればよい。例えば、川幅が 100m の河川であれば、 $\Delta X, \Delta Y$ を 5~10cm 程度にとっておけばよい。

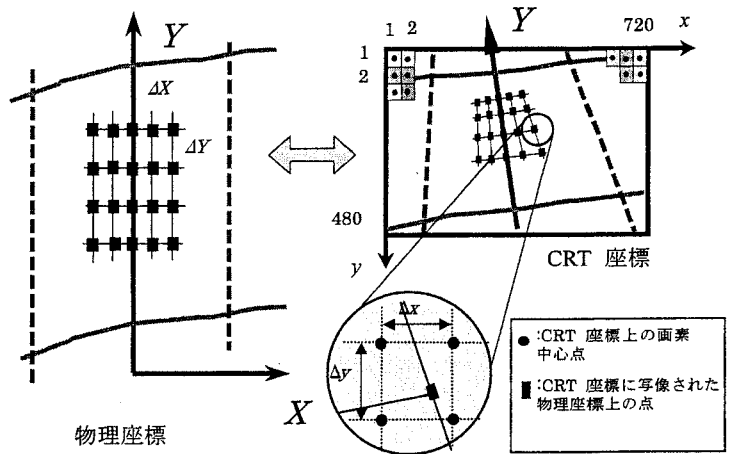


図-12 画像変換方法の模式図

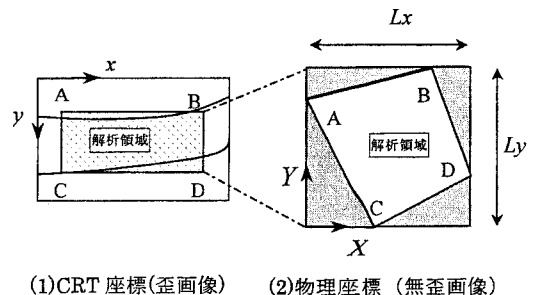


図-13 解析領域の設定

5. 4 斜め画像を利用する際の誤差²⁷⁾

斜め画像の PIV (LSPIV) においては画像の歪のため、速度の計測精度は計測領域内で一定とならず空間的な分布を示す。幾何補正を行って見かけ上大きな画像を生成しても元々の情報は斜め画像内にあるので、計測精度の評価のためには原画像における物理的なピクセルサイズ分布の評価が重要となる。CRT 座標上での微小移動量 (通常 1 ピクセル) を $(\Delta x, \Delta y)$, その移動量に対応する物理平面上の微小移動量を $(\Delta X, \Delta Y)$ とすると、この二つの移動量の関係式は次式で表される。

$$\begin{aligned}\Delta X &= \frac{s_1 y + s_2}{(p_1 x + p_2 y + p_3)^2} \Delta x + \frac{-s_1 x + s_3}{(p_1 x + p_2 y + p_3)^2} \Delta y \\ \Delta Y &= \frac{s_4 y + s_5}{(p_1 x + p_2 y + p_3)^2} \Delta x + \frac{-s_4 x + s_6}{(p_1 x + p_2 y + p_3)^2} \Delta y\end{aligned}\quad (29)$$

ここに、

$$\begin{aligned}s_1 &= p_1 c_2 - p_2 c_1, \quad s_2 = p_1 c_3 - p_3 c_1, \quad s_3 = p_2 c_3 - p_3 c_2, \quad s_4 = p_1 q_2 - p_1 q_2, \quad s_5 = p_1 q_3 - p_3 q_1 \\ s_6 &= p_2 q_3 - p_3 q_2\end{aligned}$$

である。したがって、速度分解能 $(\Delta u, \Delta v)$ は以下の式で評価できる。

$$\Delta u(x, y) = \frac{C_E \Delta X}{\Delta t}, \quad \Delta v(x, y) = \frac{C_E \Delta Y}{\Delta t}\quad (30)$$

ここに、 Δt は画像時間間隔、 C_E はサブピクセル評価による補正係数で前述のように一様流では 0.1~0.2 程度の値である。合成速度分解能 ΔU は Δu と Δv の幾何平均で表される。式(29)(30)より、速度分解能は CRT 座標 (x, y) に依存することがわかる。

5. 5 画像取得の方法

ここでは簡単に画像取得の方法についてふれる。最近ではデジタルビデオカメラの普及およびパソコンの高性能化によって、映像を簡単にパソコンに取り込むことができ、また、書き込み式 DVD (DVD±R, DVD±RW, DVD-RAM) の普及により大容量の映像のディスク保存も容易に行えるようになってきた。これらはすべてデジタルデータであり、AVI あるいは MPEG といった動画形式で記録される。一方、VHS や 8mm ビデオはアナログ方式なので、デジタル化するためにはアナログ信号(NTSC)対応のキャプチャーボードを用意する必要がある。

このようにして取得した動画ファイルは、動画ファイルのままカスタムソフトウェアに取り込むこともできるが、手堅い方法は静止画のファイル群に変換して処理するやり方である。代表的な静止画ファイルの形式は BMP だが、河川流の画像計測ではカラー情報は不要なため、モノクロの RAW ファイルに変換しておけば記録容量が 1/3 で済み、1 バイト単位のバイナリデータとなるので各種プログラミング言語での取り扱いが容易になる。ただし、圧縮された動画ファイルの場合には静止画に展開したとき膨大な容量となるため注意が必要である。

6 実際河川への適用例

この章ではこれまで解説してきたいくつかの方法を用いて行われた解析例を紹介する。

6. 1 魚野川の洪水流観測

信濃川水系の魚野川は、春先になると融雪による出水が連日発生するため洪水流の観測には好都合の河川である。そこで魚野川の堀ノ内地点 (根小屋橋) を主な現地フィールドとして、平成 11 年から平成 13 年にかけて独立行政法人土木研究所、財団法人土木研究センターおよびメーカー (アジア航測、小糸工業、

拓和,東京建設コンサルタント, 横河電子機器) による共同研究が実施された²⁸⁾。図-14に計測結果の比較例を示す。PIV法

(LSPIV)は浮子観測の上流側断面、他の方法は橋脚の影響を排除するために橋の上流側の断面で計測が行われた。PIVに利用するビデオ画像は右岸の建物の屋上に設置したデジタルビデオカメラによって撮影された。

トレーサは水面波紋である。図より、どの方法も左岸側に最大流速を持つような流速分布を示しており概ね良好な結果が得られていることがわかる。なお、

図-1で示した浮子軌跡は同地点での夜間観測時に得られたものである。

同じ地点で別の観測時に得られた画像データを用い、時空間画像を利用して変形法により得られた結果を図-15に示す²⁰⁾。このときは、左岸側だけでなく右岸側からの撮影も行われたが、左岸(建物の屋上)と比べて右岸の撮影高さはあまり高くなく撮影俯角も小さかった(対岸で数度程度)。しかしながら、二つの流速分布はよく一致しており全体的な流れの特徴もうまく捉えられている。

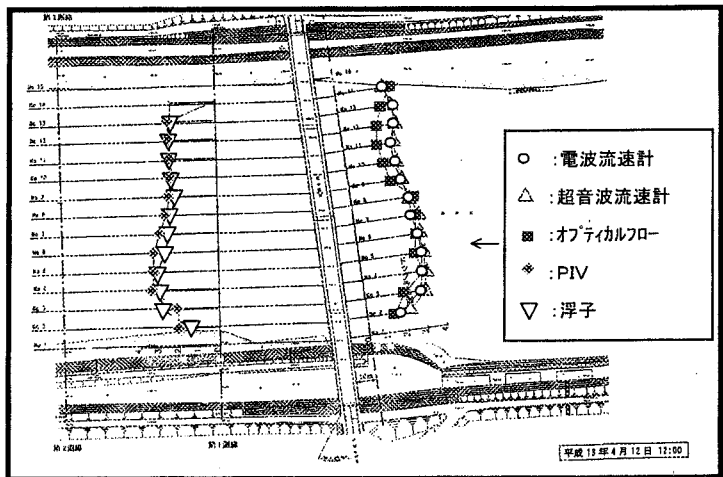


図-14 非接触流速計による計測結果の比較

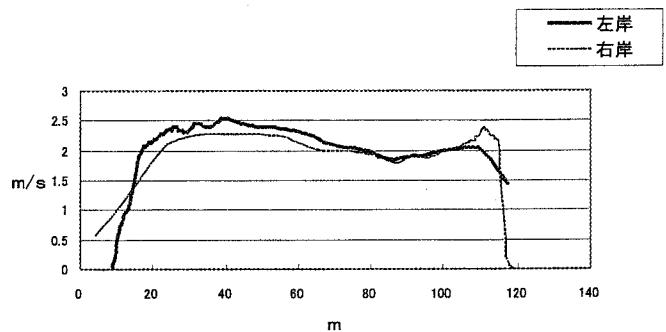


図-15 STIV法(変形法)による解析結果

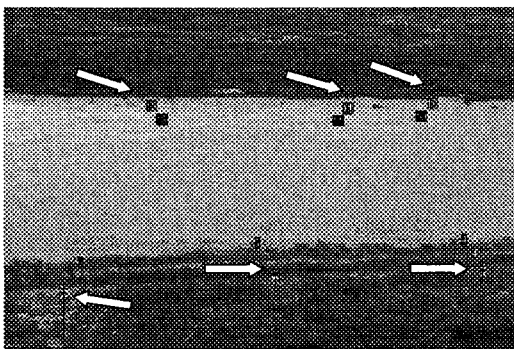


図-16 宇治川水制区間の斜め画像

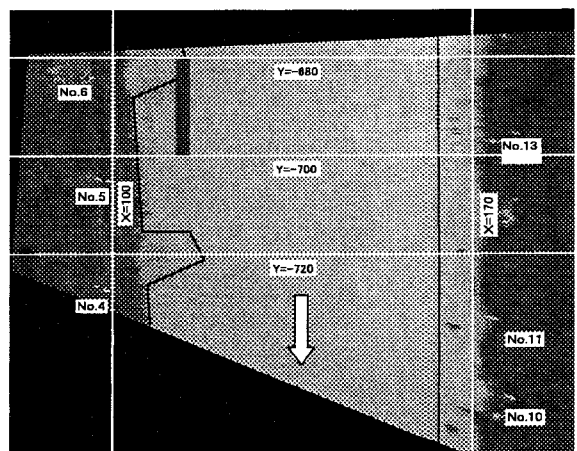


図-17 宇治川水制区間の幾何補正画像 (1100x900画素, 1画素=10cm)

6. 2 宇治川の洪水流観測²⁹⁾

次に宇治川 13.6Km 付近で右岸に水制群が設置してある地点での計測例を示す。図-16 が斜め画像、図-17 が補正画像（黒線で囲まれた部分が水没した水制）である。撮影は京都大学防災研究所の気象観測用鉄塔（高さ 28m のフロア）から行われた。図-17 には木製の標定点（矢印の先端）も示されている。水制

付近の流速ベクトルおよび主流域の流速分布

（最大流速で無次元化）を図-18 に示した。トレーサは水面波紋である。水制区間で流速が低減する様子や水制の存在により最大流速の発生個所が対岸側に移っている状況が良好に得られている。また、洪水流観測の直前（5 日前）の平水時に、環境トレーサを用いて行われた画像計測では最大主流域が水制により近い部分で生じていたことがわかっているが、これは水はね効果の違いによるものと思われる。

図-17 中に太線で示した長さ 20m の検査線（座標は局所座標で $X=112.25\text{m}$ 上）における流れ方向の流速成分の時間変動を図-19 にプロットした。これより、水制区間では大規模で周期的な速

度変動が生じていることがわかる。図よりその周期は約 12sec と読み取れるが、この値はこの時の水理条件（水深 5m、水制間隔 40m）で発生し得るセイシュの周期 11.6sec とほぼ一致しており興味深い。また、ここには示さないが、水制先端から発生する大規模なバイル渦の挙動や強度あるいはその発生頻度なども、水面の擾乱（水面波紋）を利用した LSPIV 解析から求めることができています。このような詳細な流れ場の情報は、従来の方法では全くといってよいほど得られなかった性質のものであり、この点からも画像計測法の有効性が再確認できる。なお、解析では幾何補正の解像度を 10cm とし、15Hz でサンプリングした約 900 枚の画像（60sec）を処理してある。

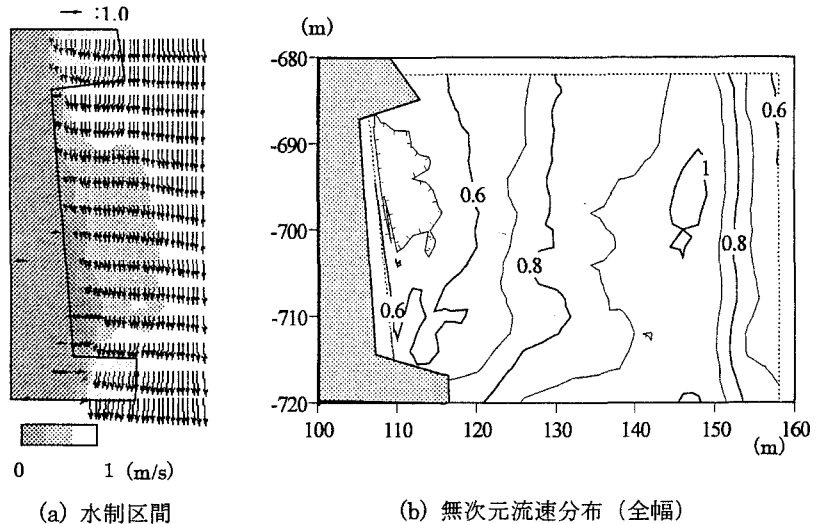


図-18 LSPIVによる計測結果（宇治川）

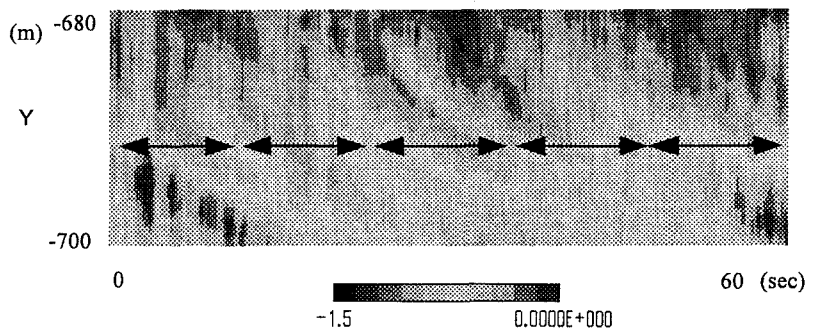
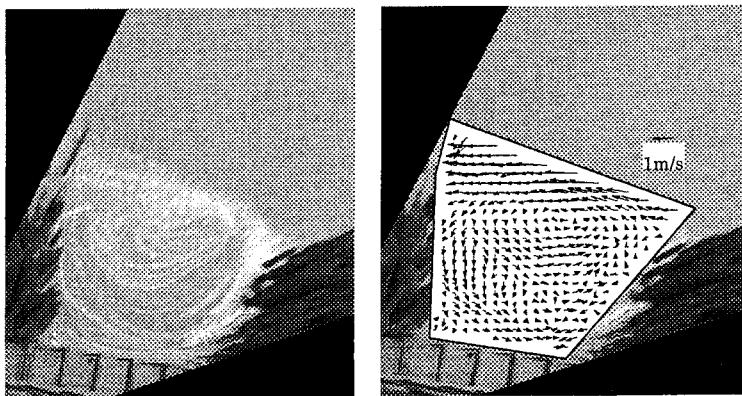


図-19 $X=112.25\text{m}$ の線上の主流流速変動ダイアグラム

6. 3 長良川の平水流観測³⁰⁾

最後の例として、環境トレーサを用いた計測例を図-20に示す。この図は、全部で5基ある透過性水制の上流から2, 3番目の水制間の流れに関する結果を示している。

図-20(a)はトレーサの軌跡を多重合成し、流跡線を可視化したものである。水制区間の流れが大規模に循環している様子をきわめて明瞭に可視化することに成功している。また、テンプレート内にトレーサがある場合を輝度情報から検知し、平均流速ベクトルを求めたのが図-20(b)である。循環渦の中心が主流側に偏移している状況や流跡線に対応した良好な速度場が得られている。このような複雑な流況の把握は、可視化画像解析解析によって始めて可能となったといえる。



(a) 多重合成画像

(b) 平均流速分布

図-20 第 2,3 水制区間の流れの可視化と解析結果 (740x863 画素, $\Delta X=\Delta Y=0.03\text{m}$)

7 おわりに

本稿では、河川表面を撮影した動画像を利用して速度場を求める際の注意点や様々な手法について詳細に述べてきた。このうち、LSPIVについてはCCTVカメラなどからのアナログ画像データ (NTSC 信号) を自動的に取り込み、速度場を自動計測できるリアルタイムモニタリングシステムの構築がほぼ完了し、実証段階に入っている³¹⁾。洪水のピークが生じるのは夜間であることが多いが、撮影上の問題は低照度対応のカメラ (0.0003Lux 対応のものもある) や通常のビデオカメラに照明を併用すれば計測は可能になるものと思われる。ただ、暴風雨などで視界が悪い場合には画像による方法は適用困難である。また、ヘリコプターからの撮影画像に対するLSPIV解析システムも開発されており¹⁸⁾、災害時に撮影された過去の報道ヘリの映像を新たに定量解析できる可能性は残されている。

本稿では触れなかったが、画像の利用範囲はもちろん平面的な速度計測だけに限らない。ステレオ撮影による三次元微地形計測や水面形計測などへも画像利用の可能性がある。ただし、すべてに共通していえることは、対象となるのが数mから数100mにも及ぶ広範囲 (メソスケール) の現象であるにもかかわらず、利用されている映像機材の大半が家庭用のビデオ機器と同程度の解像度しか持っていない点である。本格的に河川の画像計測に取り組むなら、さらに高解像度のビデオ機器 (少なくともハイビジョンカメラのクラス) の導入あるいは目的に応じたビデオカメラそのものの開発が不可欠である。今後のこの分野の発展が期待されるところである。

参考文献

- 1) 杉井康彦他：マイクロチューブ内流れ場の速度分布計測，可視化情報，Vol.22. Suppl.1, pp.165-166, 2002.
- 2) Kawahashi, M.: Recent Topics on Micro Visualization in Japan, 可視化情報，Vol.22. Suppl.1, pp.15-16, 2002.

- 3) (社) 可視化情報学会ワークショップ 最新情報：3次元PIV, (社) 可視化情報学会, 1999.
- 4) 宮本仁志：画像情報に基づく浮遊物質濃度計測と開水路凹部流れの時空間構造解析, 神戸大学博士論文, 2002.
- 5) 佐々木裕康：高速度ビデオカメラ／超高速カメラの最新動向, 可視化情報, Vol.23, No.89, pp.2-6, 2003.
- 6) Kline, S.J.他：The Structure of Turbulent Boundary Layers, J. Fluid Mech., Vol.30, pp.741-773, 1967.
- 7) 青木政一, 藤田一郎, 澤田豊明：洪水と土砂の観測モニタリング, 河川技術論文集, Vol.9, pp.7-12, 2003.
- 8) 細田尚：河川流のモデリングと河床・河道変動解析の進歩, 2002 年度水工学に関する夏期研修会講義集Aコース, A-2-1～A-2-22, 2002.
- 9) 松岡保正：砂礫河床上の乱れ, 水工学論文集, Vol.33, pp.481-486, 1989.
- 10) 辻本哲郎他：小型電磁流速計による野外流路での乱流計測, 水工学論文集, Vol.35, pp.339-344, 1991.
- 11) 日野幹雄他：多点同時計測システムによる実河川洪水流中の3次元大規模乱流構造の測定, 水工学論文集, Vol.36, pp.175-180, 1992.
- 12) 喜澤一史, 井出康郎：河川流量観測における新計測法の提案について, 河川技術論文集, Vol.7, pp.485-490, 2001.
- 13) 山口高志：H-Q地点で水面勾配をはかろう!, 河川技術に関する論文集, Vol.5, pp.35-40, 1999.
- 14) 藤田一郎：トレーサを利用した実河川水制周辺流れのビデオ画像解析, 水工学論文集, Vol.42, pp. 505-510, 1998.
- 15) 竹原幸生他：ヘリコプターを用いた実河川表面流の画像計測の試み, 水工学論文集, Vol.46, pp. 809-814, 2002.
- 16) 藤田一郎他：ITV施設を利用した河川流の画像計測, 河川技術論文集, Vol.8, pp.459-464, 2002.
- 17) Ettema, R., Fujita, I., Muste, M. and Kruger, A. (1997), "Particle-Image Velocimetry for Whole-Field Measurement of Ice Velocities", Cold Regions Science and Technology, 26(2), pp.97-112.
- 18) 藤田一郎, 日野友尋：ヘリコプター画像を対象とした河川流 PIV システムの開発, 可視化情報, Vol.20, Suppl. 1, pp.231-234, 2000.
- 19) 木村一郎他：可視化情報計測, 近代科学社, 2001.
- 20) 藤田一郎, 椿涼太：時空間画像を利用した河川表面波紋の移流速度計測, 河川技術論文集, Vol.9, pp.55-60, 2003.
- 21) Raffel, M.他 (岡本孝司ら訳)：PIVの基礎と応用一粒粒子画像流速測定法, Springer, 2000.
- 22) 西尾他：画像の時空間微分を利用した流場の計測手法—サブピクセル解析としての応用と高次近似項の評価, 可視化情報, Vol.22, Suppl.1, pp.201-204, 2002.
- 23) 藤田一郎, 椿涼太：小俯角のビデオ画像に対応した河川表面流計測手法の開発, 河川技術論文集, Vol. 7, pp.475 - 478, 2001.
- 24) 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, Vol.38, pp.733-738, 1994.
- 25) Fujita, I., Muste, M. and Kruger, A. , : Large-Scale Particle Image Velocimetry for Flow Analysis in Hydraulic Engineering Applications, Journal of Hydraulic Research, Vol.36, No.3, pp.397-414, 1998.
- 26) 村上伸一：画像処理工学, 東京電気大学出版局, 1996.
- 27) 藤田一郎, 綾史郎, 小澤 純：河川表面流のモニタリング手法 LSPIV の改良, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, Vol.4, pp.97-105, 2000.
- 28) 土木研究所他：共同研究報告書第 291 号「非接触型流速計測法の開発」, 2003.
- 29) 藤田一郎他：LSPIV法による水制周辺部の平水時および洪水時流れに関する検討, 水工学論文集, Vol.47, pp.943-948, 2003.
- 30) 藤田一郎, 中島丈晴：実河川流計測におけるLSPIVの汎用化と水制間流れへの適用, 水工学論文集, Vol.44, pp.443-448, 2000.
- 31) 小林範之, 金目達弥, 藤田一郎：PIVによる洪水時河川流量観測装置の開発, 河川技術論文集, Vol. 8, pp.455 - 458, 2002.