

赤外線ビデオカメラを用いた河川表面流の PTV計測

INFRARED PARTICLE TRACKING VELOCIMETRY FOR APPLICATIONS TO MEASUREMENTS OF SURFACE VELOCITY FIELDS OF RIVERS

江藤剛治¹・竹原幸生²・高野保英³・藤田一郎⁴・酒井信行⁵・
綾史郎⁶・玉井昌宏⁷・宮本仁志⁸・武藤裕則⁹

T. Goji ETOH, Kohsei TAKEHARA, Yasuhide TAKANO, Ichiro FUJITA, Nobuyuki SAKAI,
Shiro AYA, Masahiro TAMAI, Hitoshi MIYAMOTO and Yasunori MUTO

¹正会員 工博 近畿大学教授 理工学部 (〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)

²正会員 工博 近畿大学助教授 理工学部 (〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)

³正会員 工博 近畿大学助手 理工学部 (〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)

⁴正会員 学博 神戸大学助教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

⁵国土交通省近畿地方整備局淀川工事事務所 事業対策官 (〒573-1191 枚方市新町2-2-10)

⁶正会員 工博 大阪工業大学教授 工学部 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)

⁷正会員 工博 大阪大学大学院助教授 工学研究科 (〒565-8871 吹田市山田丘2-1)

⁸正会員 学博 神戸大学助手 工学部 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

⁹正会員 Ph. D. 京都大学助手 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

The Infrared PTV (Particle Tracking Velocimetry) is proposed for applications to measurements of surface velocity fields of local water bodies, such as rivers, lakes, ponds, estuaries and coastal areas. The tracers are either ice particles or soaked and frozen flat edible cakes. The cameras are infrared sensitive. PTV algorithms can be applied to the infrared particle images. The system can measure detailed surface velocity fields of floods even in the darkness. No or negligible pollutant is supplied respectively by the ice particles or the flat cakes. Development and application of CEFD (Computational/Experimental Fluid Dynamics) are suggested to directly combine the accurate measurements of surface flow fields by the infrared PTV with advanced computational techniques to depict detailed water motions under the surfaces.

Key Words : Infrared camera, PTV, Image velocimetry, surface flow, CEFD

1. はじめに

本研究は河川懇談会の共同研究グループ「画像計測による河川環境の総合モニタリング技術の開発(代表:藤田)」の一環として行われているものである。河川工学の分野では映像を用いた計測技術の開発は始まったばかりで、まだ十分にはその意義や背景が理解されていない。したがってまず少し広い観点から、ローカル・リモート・センシングによる水環境評価の方向性について筆者らの見解を述べる。一方、試験的に行った具体的な計測例についても紹介する。全体的なフレーム・ワークと方向性に関する考察と、具体的な技術の開発とは、新技術開発における車の両輪である。本論文は本シンポジウム

における本共同研究グループからの最初の報告であるので、これら両方の内容を含む。

具体的な技術開発の例としては、赤外線を用いた河川の画像速度計測(IV: Image Velocimetry)を取り上げる。

以下では「静止画像を『(狭義の)画像』」、「動画画像を『映像』」と呼び、併せて「(広義の)画像」と呼ぶことにする。

2. 画像速度計測の現状と赤外線PTVの位置付け

(1) 映像計測とデータ・マイニング

「ビデオ画像は観察には適しているが、定量情報を得

るのには適していない。画像を見るだけで終わってしまう。」これは映像計測技術の開発に対して良く耳にする疑問の声である。

温度・速度などの点計測は時間と強度の2次元ベクトル計測である。映像計測は空間2次元、時間1次元、光の波長1次元、強度1次元の5次元計測である。複数のカメラを用いて空間3次元計測すれば6次元計測となる。色は3原色で表されることになっているが、これも正しくないようで、最近の高品位撮像技術に関する研究では、3原色分解の場合と、可視域を16の波長に分解した場合の現実感の比較研究なども進んでいる¹⁾。

点計測でさえ定量情報を得ることができるようになるまでに長い時間を必要とした。代表値だけでも、平均値、最頻値、中央値などが提案され、ばらつきの指標に至っては、標準偏差、絶対値偏差、4分位偏差、レンジなどの統計学の教科書に載っているもののほかに、有義波高のように、本質的には他の指標と差異はないものの、各学問・技術分野に固有の歴史を背負った指標が今でも多く使われている。さらに各種の分布関数、相関関数やスペクトルなどが広く使われるようになるまでに数十年を要した。

6次元の映像計測は、2次元の点計測の経験からは推測しがたい多量の情報を含んでいる。ここから必要な情報を定量化して取り出すには試行錯誤に基づく多くの概念や解析技術の開発が必要である。これが上記の「見るだけで…」という大きな誤解の原因である。映像から必要な情報を取り出す技術を、地中から有用鉱物を掘り出す技術（マイニング）に見立てて、データ・マイニングと呼び、情報処理分野における重要な研究課題の一つとなってきた。

PIV(Particle Image Velocimetry)は画像から「流速場」という定量情報を自動的に抽出することができるようにした、という意味でデータ・マイニングの最初の大きな成功例の一つと見ることもできる。

本共同研究グループで行っている、河川利用者の自動抽出技術の開発も、このような観点で行っているデータ・マイニングの1要素技術である²⁾。

(2) PIVの動向とローカル・リモート・センシング

PIVは当初、室内レベルの流れの解析を対象として開発された。現在PIVをバイオ・フルード・メカニクスやマイクロ・マシン周りの流れのような顕微鏡下の流れ解析に適用する研究が積極的に進められている。これをマイクロ・スケールPIVと呼んでいる。

河川工学分野ではこれらとは逆に、より大きな空間領域を対象とするPIV技術を開発する必要がある。一方これは、人工衛星からのリモート・センシング技術に対する、ローカル・リモート・センシングの1要素技術として重要である。

(3) 水域のPTVとCEFD

PTV (Particle Tracking Velocimetry) は粒子を直接追跡するという点でPIVの中でも最も解像力が高い。図-1は筆者らの解析したRushton Turbin周りの流れであるが、100万画素のカメラを用いて、9204個のトレーサ粒子のペアリングに成功している³⁾。また図-2は、筆者らが開発した100万枚/秒の超高速ビデオカメラ⁴⁾で撮影したスプレイ噴霧に対してPTVを適用した例を示している⁵⁾。以下では主としてPTVを対象として議論する。

PTVを河川流計測に用いる利点は、詳細な表面流速分布を連続的に計測できる点である。また、低水時および洪水時のいずれでも計測できるという利点も有している。いずれのケースでも、2. (5) で後述するようにトレーサの選択に気を付ける必要がある。

室内実験におけるPTVと、水域のPTV技術の基本的な相違の一つは、水域では水面上でのみ詳細な流速の時空間変化を計測できることである。水中での流れ場を知るためには、水面での流速計測値を条件とした数値計算により、より精密に流れ場を推定する必要がある。いくつかの点でADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) 等による流速の点または線計測や、水温計測などを行い、これらの結果を数値計算における条件として加えたとお良い。淀川においてPTVを適用した筆者らの経験でも（例えば3. (3) の例）、現在の数値計算技術では再現が難しいと思われる明瞭な沈み込みなどが計測されている。

すなわち計測と数値計算を融合させた解析が必要である。気象学では、このような手法をデータの4次元化と呼んでいるが、この呼称は手法の実体を表すものとしては必ずしも適当でない。筆者らは以前から、CEFD (Computational/Experimental Fluid Dynamics) という呼称により、計測と計算の直接の融合を図ることを提唱している。

ここで以下の点に注意しておく。いかに精密に計測し

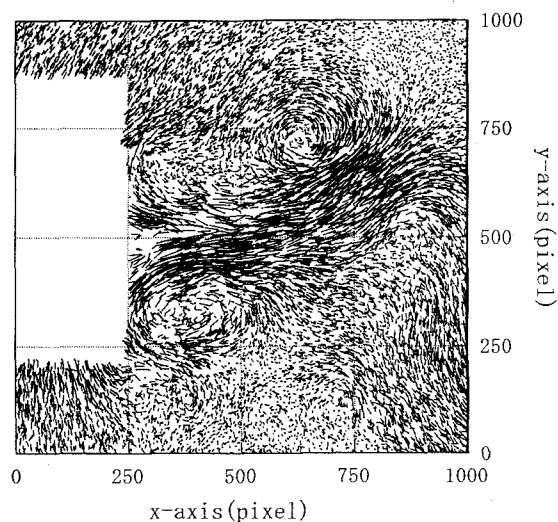
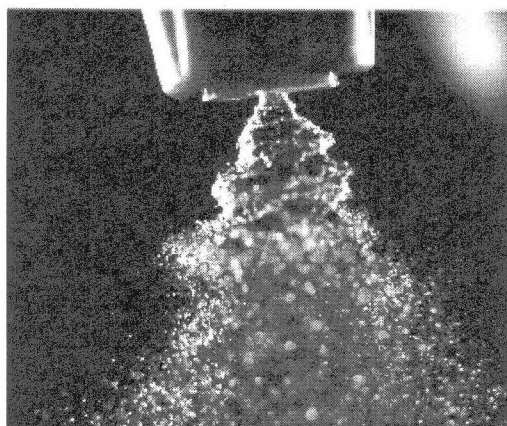
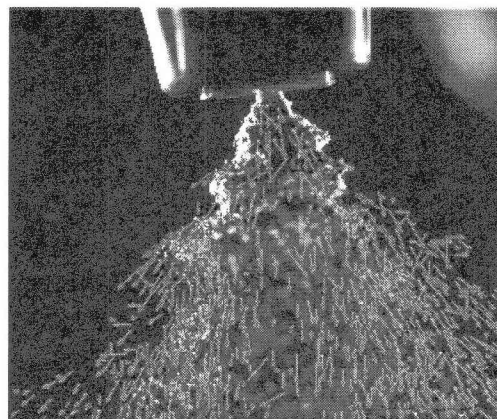


図-1 Super-Resolution KC法³⁾による Rushton Turbine内の流れ場計測(9,204 vectors)



(a) 原画像



(b) ベクトル分布図

図-2 100万枚/秒のビデオカメラより撮影されたスプレイ噴霧のPTV解析例 (100,000fpsで撮影)⁵⁾

でも計測値と計算値には本質的なズレがある。誤差のない計測を行ったとしても計測値が正しいわけではない。もう一つ重要な視点は、「計算値はもともとグリッド・スケールの代表値である。」という点である。代表値と言う点で計算値の方がより高精度である確率は十分に高い。計測値にはグリッド・スケール内での平均値に対して、乱れなどによる偏差が加わっている。計算値のズレはシフトもしくは数値計算上の不安定性による周期的誤差が多い。計測値の誤差は主としてランダム誤差である。これらを考慮したCEFDを構築することが必要である。以上の議論はPTVを用いる場合により重要となる。PCIV(Particle Concentration Image Velocimetry)⁵⁾ではもともとグリッド・スケールの平均値を計測している。

(4) ダイナミックPTV

これまでPTVは連続する2枚の画像から、ある時刻における流速場を推定することに主眼が置かれていた。筆者らはこれをInstantaneous PTVと呼んでいる。時間変化までを対象にする場合はDynamic PTVと呼んでいる。Dynamic PTVは単にInstantaneous PTVをつないだものではない。ある時刻の流れ場の推定に直前の流れ場情報やそれまでの時系列情報を利用すると効果的な推定ができることは当然である。Dynamic PTVでは、このような適応制御的アルゴリズムの適用が効果的となるので、Instantaneous PTVアルゴリズムとは基本的に異なる観点でアルゴリズムを開発する方が良い⁵⁾。

(5) PTVの要素技術と赤外線PTV

PTVには以下の3つの要素技術がある：(1)撮影装置、(2)トレーサー、(3)解析ソフト。

撮影装置には架台(担体)や照明装置なども含まれる。解析ソフトも粒子抽出、追跡、その他のように数段階にわけられる。

トレーサー開発は単純なようで、PIVのどのような応用分野においても非常に難しい開発課題である。河川や沿岸域における水面流速計測のトレーサーは次のような条件を満たす必要がある。

- (1) 水より少し軽い、(2) 視認性、(3) 環境負荷がない、(4) 自然な流れを乱さない、(5) コスト

筆者らは通常、ヒトが食べても問題のない直径15cm程度の煎餅を用いている。実測時に鳥が煎餅をさらっていくこともある。しかし煎餅は夜間の計測には適さない。洪水はいつ起こるかわからない。したがって氷、もしくは水に浸して凍らせた煎餅をトレーサーとし、撮影装置として赤外線カメラで撮影してPTVを適用することを提唱している。

既存の赤外線カメラの解像力は最も大きいもので756×485画素程度である。例えば100m程度の空間領域を対象とすると、1画素は17cm程度に対応する。基本的にかなり大きなトレーサーを必要とすることになるので、新たに高解像赤外線カメラ(レンズを含む)を開発することが望まれる。人工衛星ではリニアセンサーを使って高解像度化しているが、担体が不安定なローカル・リモート・センシングではリニア・センサーの適用は難しい。

近赤外線まで感度のある高解像のモノクロ・センサーを付けたカメラに、自動交換干渉フィルターを付け、人工衛星リモート・センシングと同様に、スペクトル分解して撮影した映像(もしくは画像)を用いると水質も計測できる可能性がある。

映像情報の取得という点から見ると、道路と河川に著しい違いがある。河川敷では生物の生息に対する考慮の問題などがあり、夜間に通常のカメラで十分な映像が得られるだけの照明をすることが困難である。赤外線カメラでは色情報が取れない。また既存のものは解像力が不足する。したがってNHKで開発された世界一の超高感度ハイビジョン・カメラ等も並列かつ先行的に導入し、近未来のローカル・リモート・センシングの可能性と課題について集中的な検討を行っておくことが望まれる。

(6) 全天候型係留飛行船

カメラは高所の定位置に据え付けることもできる。しかし機動性があればなお便利である。飛行機、ヘリコプター、飛行船、気球、船舶のマスト、河岸を走る車の上、などの移動体の上に取り付けければ機動性が高まる。筆者

らはこのような移動体を担体と呼んでいる。担体の満たすべき条件は以下のとおりである。

- (1) 安全性、(2) ペイロード、(3) 耐候性（耐風安定性、耐水性）、(4) 機動性と停留性、(5) 搬送性、(6) 操作性、(7) コスト（初期コスト、ランニング・コスト）

これらの要求は相反する。筆者らはこれらを以下のような具体的な仕様としてまとめている。

- (1) 風速15m/sまで計測可能、(2) 数mm/hの降雨下で計測可能（具体的な値は未決定）、(3) 高度100mまで計測可能（当面）、(4) ペイロード20kg以上、(5) 5人以内の未熟練者で操作可能、(6) 1～2台のワンボックスカーで搬送可能、(7) 24時間停留計測可能、(8) 高い機動性、(9) 噴水が小さく、かつできる限り水を乱さない、(10) 事故が生じて環境負荷が小さい、(11) 低コスト

以上を満たすものとして、現在のところ、「空中プロペラ推進カタマラン型船舶係留電動エンジン付き全天候型飛行船」が最適と考えている。

動力は将来的には燃料電池を導入することを考えている。近年、自動車メーカーが燃料電池車の開発に力を入れている。これにより軽量・高馬力のモーターの開発が進んでいる。またコストの飛躍的低減が期待できる。これにより、担体の制御が容易になるだけでなく、運悪く事故を起こしたときの環境影響を最小限にとどめることができる。

3. 撮影例

(1) 竜田川における夜間のPTV計測

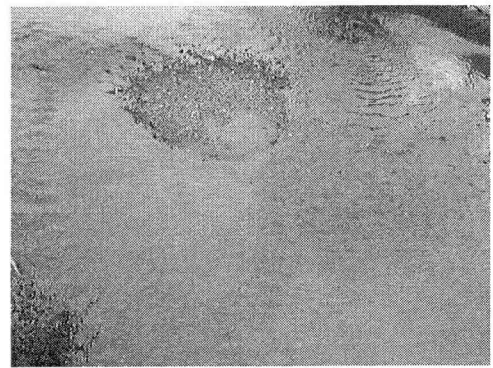
図-3は竜田川において夜間に直径約2cmの氷を撒き、PTV解析した例を示している。川幅は8m程度である。小さな州の周りを回り込む流れが可視化されている。

図-3(b)に示すように、粒子抽出画像にかなりのノイズが乗っている。これも良く整備された実験室レベルの計測とは全く異なる点である。原因を究明して、最初の粒子抽出におけるノイズを減少させるとともに、効果的に取り除くソフトウェアを開発する必要がある。

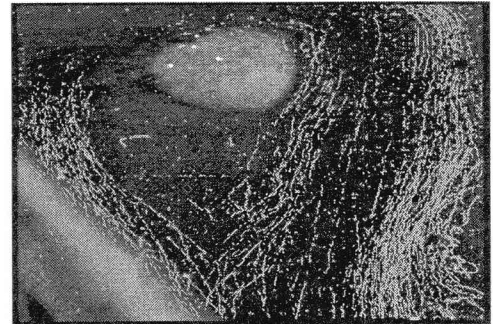
(2) 淀川3川合流点での赤外線撮影例

図-4は2個の暖めた煎餅を撒きヘリコプター搭載の赤外線カメラで撮影したものである。図中○で囲んだものがトレーサーであるが十分な視認性がある。

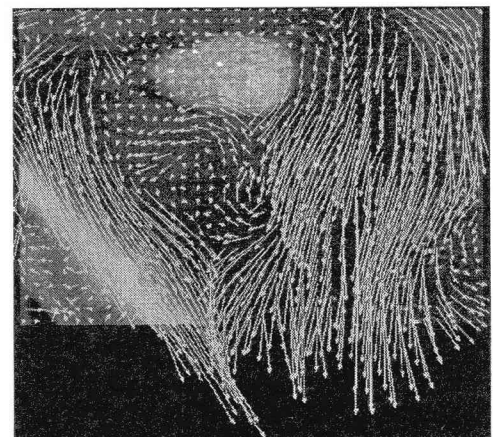
図-5は3川合流部の赤外線画像（検知波長帯8～12 μ m、遠赤外域）である。左側が木津川、右側が宇治川であるが、両河川の水が極めて明瞭に分離されて可視化されている。その主因は水温の違いと考えられるが、浮遊砂濃度の違いや水深の違いが反映されている可能性もある。今後グラントツルースを明確にして、地道な計測を続けられれば、流れ場と同時に、種々の水質特性も計測できるようになる可能性が高い。



(a) 計測地点(昼間に撮影)



(b) PTVにより得られた流跡線図



(c) 空間平均流速分布図

図-3 竜田川における夜間PTV計測

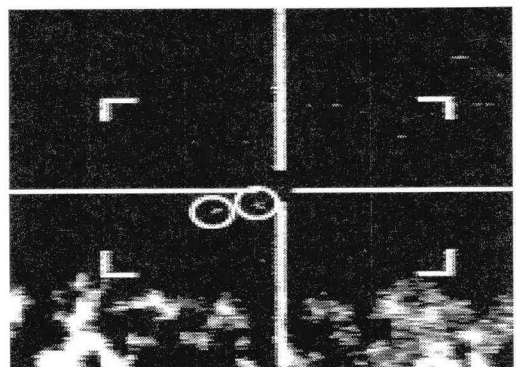


図-4 暖めた煎餅の赤外線画像(淀川でヘリ搭載の赤外線カメラで撮影したもの)

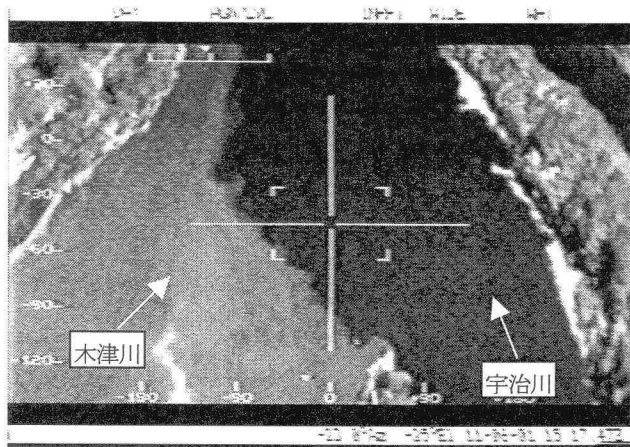


図-5 3川合流部の赤外画像

(3) 可視光によるPTVの例

図-6は煎餅を使ったPTVの例である。図-6(a)は原画像の例、図-6(b)自動追跡例、図-6(c)はそれらを自動補間して得た流れ場の例である。

図-6(b)の右下の楕円で囲んだ部分には目視でもわかる非常に明瞭な沈み込みがあり、トレーサーは沈み込み線に沿って潮目を作るように並んでしまった。沈み込みの右側では、実際には非常に遅い逆流が生じていた（動きが遅いので図中では点になっている）。最近の生態研究によれば、このような局所的な流れが水生生物のライフ・サイクルに重要な役割を果たしていることが多い。

一方、図-6(c)ではこのような局所的な沈み込みや逆流は、平均化過程で消えてしまい、ゆるやかな順流として示されている。これも、現在のPTV技術を河川の現地計測に適用する上で解決すべき課題の一つである。

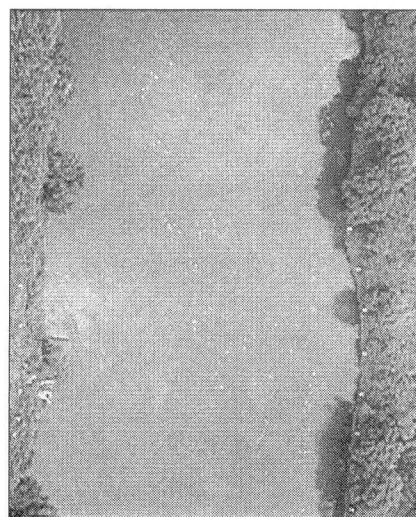
大気の数値計算におけるYamada-MellorのClosure Modelを開発した山田氏は、観測班が気球を上げるときに労力を提供しただけでなく、前もって予想される気球のルート进行を計算する、などのサービスをした。このような計算担当者と実測担当者の交流が、計算モデル開発に大いに役立ったと語っていた。河川のPTV計測においても、前もって数値計算の専門家に協力を依頼し、まんべんなくトレーサーを撒く方法や、集中的に計測するのが望ましい領域などについて数値計算による予測をしていただくと同時に、実測にも協力していただくのが良いと感じている。

4. トレーサー

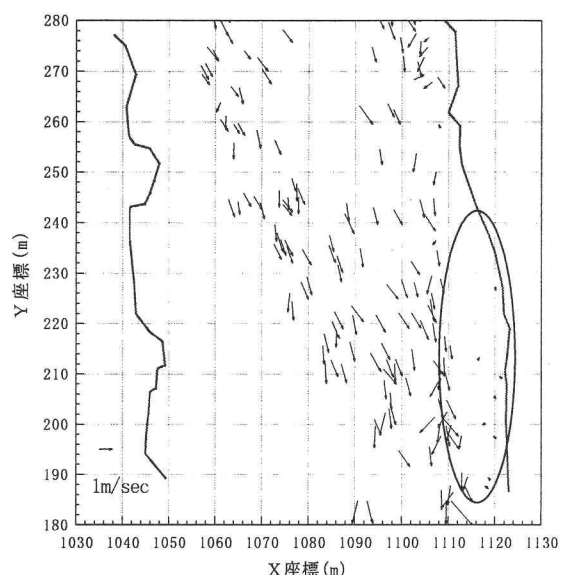
(1) 凍らせた煎餅

図-7に筆者らが使っている煎餅を示す。直径約15cm、厚さ約2mmである。澱粉を多く含んでいるところに特徴がある。

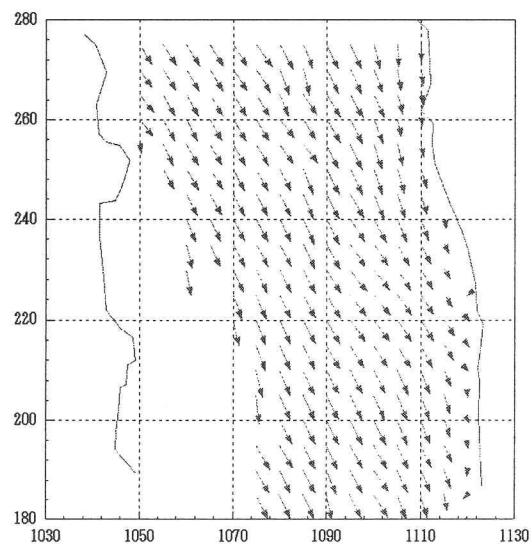
最終的にこの煎餅を選ぶ前に、10種類程度の煎餅を購入し、長時間水に漬けて引っ張り試験を行い、強度の経時変化を調べた。澱粉の多いものは、24時間経ても十分



(a) トレーサーとして散布された煎餅の画像の1例



(b) PTV計測結果の1例(時刻4.5sec)



(c) 自動補完して得た流れ場の例

図-6 煎餅を使ったPTVの例(宇治川)
(図は座標系の関係で左右反転して表示)

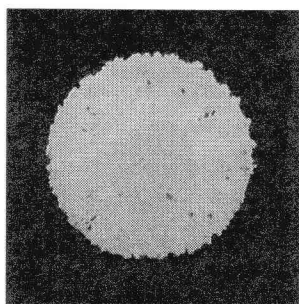


図-7 使用した煎餅

な引っ張り強度を保つ（当然すぐ柔らかくなるが引っ張りには強い）。

昼間はそのまま使うことができる。夜間の赤外線撮影では周囲の温度とできるだけ大きな温度差があることが望ましい。煎餅を十分温めた場合と冷やした場合の実験を行った。100℃に上げると煮えて水中に沈んだ。したがって主として冷やした場合について実験を行った。

図-8に結果の例を示す。凍るまで冷やした場合は約10分間、赤外線カメラによる視認性が保たれる。流速を1m程度とすると、10分間で600m程度移動することになるから、トレーサーとしての時間的保存性も十分である。

(2) 氷

より長時間の保存性を確保するには氷塊を用いれば良い。環境負荷は皆無である。ただしこれが周囲の流れ場に影響を与えない程度の数にする必要がある。これにより夜間の洪水時の流れ場などが、かなり正確に計測できる可能性が高い。

5. まとめ

夜間でも計測可能な河川流画像計測法の1つとして、氷などをトレーサーとし、赤外線カメラで自動追跡する「赤外線PTV」を提案し、実際に現地と実験室で基礎実験を行った。同時に、河川のローカル・リモート・センシング技術の枠組み、方向性、課題について論じ、その中での赤外線PTVの位置付けを明らかにした。主たる結論と今後の課題を以下にまとめる。

- (1) 凍らせた煎餅や氷をトレーサーとする赤外線PTVにより、夜間でも高精度で表面流速場を計測できる。また、洪水時には水面に浮遊する泡、ゴミ等の熱放射率の違いにより、それらをトレーサーとして認識できる可能性もある。
- (2) 水域のPTVでは表面流速のみが精密に計測できるので、それを条件として水中の流れ場を計算するCFD技術を確立することが重要である。
- (3) 水域の環境計測では限られた範囲しか夜間照明できない。高解像赤外線カメラの開発や超高感度HDTVカメラなどの最新の機器を先行的に導入し、あらゆる

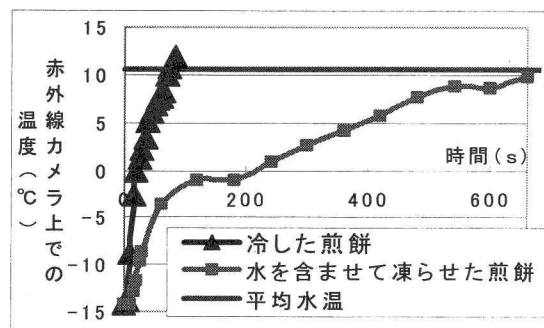


図-8 水面上の煎餅の中心温度

利用可能性を検討することが重要である。

- (4) 映像から河川技術に必要な定量情報を自動的に抽出する多様なデータ・マイニング技術を開発することが今後の最大の課題である。

最後に洪水時の現地計測について一つの提案をしたい。

国土交通省の整備局程度を空間的な広がり単位として、主要な河川の個々について1~2点程度の計測点を決め、洪水が来たときに、近隣の大学の河川研究者がいつせいに集まって計測する計画を「平常時に」作っておく。画像計測機器や土砂関連計測機器なども計測候補地点に集中して先行的に整備する。できれば年1回程度集まってトレーニングの方が良い。実際に洪水が来たときには、集まれる人だけが集まって計測することにより、数値計算モデルを作る上でぜひとも必要な基礎データが集中的に得られる。さらにこれまで口伝では言われていたような現象が、新たに計測の網にかかる可能性もある。このような枠組みを全国で作っておけば、年に1~2回程度は洪水時の貴重な水理データを総合的に得ることができる。

参考文献

- 1) 山口雅浩: ナチュラルビジョンによる高色再現ディスプレイ, 映像情報メディア学会誌, Vol. 55, No. 8/9, pp. 1084-1088, 2001.
- 2) 玉井昌宏, 竹原幸生, 江藤剛治, 酒井信行, 高野保英, 藤田一郎, 綾史郎, 宮本仁志: CCTVを利用した河川管理に関する要望と利用者把握システムの開発の試み, 河川技術論文集, 第8巻, 投稿中.
- 3) Takehara, K., Adrian, R.J., Etoh, G.T. and Christensen, K.T.: A Kalman tracker for super-resolution PIV, *Experiments in Fluids* [Suppl.], S34-S41, 2000.
- 4) 江藤剛治, 武藤秀樹, 竹原幸生, 高野保英, 沖中知雄: 斜行直線CCD型画素周辺記録領域を持つ100万枚/秒の撮像素子, 映像情報メディア学会誌, Vol. 56, No. 3, pp. 483-486, 2002.
- 5) Etoh, G.T., Takehara, K. and Takano, Y.: Development of high-speed video cameras for dynamic PTV, *Journal of Visualization*, to be published.

(2002. 4. 15 受付)