

ヘリコプターを用いた実河川表面流の 画像計測の試み

AN ATTEMPT OF FIELD MEASUREMENTS OF SURFACE FLOW ON A RIVER
BY USING A HELICOPTER AIDED IMAGE VELOCIMETRY

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

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

- ¹正会員 博(工) 近畿大学助教授 理工学部土木工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)
²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)
³正会員 博(工) 近畿大学助手 理工学部土木工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)
⁴正会員 工博 近畿大学教授 理工学部土木工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)
⁵正会員 工博 大阪工業大学教授 工学部土木工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)
⁶正会員 工博 大阪大学大学院助教授 工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)
⁷正会員 工修 神戸大学助手 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
⁸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)

Field measurements of surface flows on a river by using a helicopter were carried out. Image Velocimetry (IV) is applied for measurement of surface flow of the river. The images are taken by a video camera which is built in the helicopter. For tracers of surface river flows, the "Senbei" is selected because of its decomposable in natural situation.

Key Words : Helicopter, Field measurements, PTV, surface river flow

1. はじめに

近年の画像処理技術の発展により、種々の応用分野に画像を用いた自動計測法が開発され、実用化され始めている。しかし、現時点では画像処理技術を用いた河川域や沿岸域等の水域自動モニタリングシステムの開発はほとんど行われていない。これらの計測技術が開発されれば、これまで計測に費やしてきた労力を大幅に減少できる。また、画像計測では面的な計測が可能となり、これまでの定点観測に比べ、非常に多くの情報を一度に計測することができる。さらに、各波長域の画像を撮影、解析すれば、流れ場計測や地形計測ばかりでなく、温度場、植生場等の各種の情報を計測できる可能性がある¹⁾。

これまで、IV(Image Velocimetry)技術は実験開水路流れや風洞内の流れ等の実験室スケール(数センチから数メートルのオーダー)で主に開発されてきた。IV技術のうちいくつかはすでに市販化され、広く用いられるよ

うになってきた。最近、機械工学分野を中心にマイクロチャンネル内の流れを顕微鏡を通してIV計測する技術が活発に開発されている(Micro PIVと呼ばれている)。

著者らは、IV技術をより大きなスケール(メソスケール、数十メートルから数百メートル)に適用する技術を開発する。さらに大きなスケール(マクロスケール、数キロ以上)の流れ場計測では人工衛星の画像を使うことが考えられる(表-1参照)。

対象としているメソスケール計測では、飛行機、飛行船やヘリコプターなどにビデオカメラを装着し、河川等の表面にトレーサーを散布し、撮影する方法が考えられる。撮影された画像から表面流速を計測する。トレーサーとしては、自然界に極力影響を与えないものを選ぶ必要がある。

今回は、国土交通省淀川工事事務所の協力を得て、ヘリコプターに搭載されたビデオカメラを使用して撮影した画像により、実河川表面流速の計測を試みた。特に本報告では、IV技術のうち、PTV(Particle Tracking

表-1 観測スケールによるIVの分類

	対象領域	計測対象例
ス ケ ー ル	ミクロスケール (数 μm ～数 mm)	顕微鏡下のマイクロ チャンネル内の流れ
	ローカスケール (数 cm ～数 m)	室内水路実験，室内環 境下の流れ場等
	メソスケール (数 m ～数百 m)	河川，湖沼，沿岸等の 流れ場計測
	マクロスケール (数 km ～数百 km)	海洋，大気等の流れ場 計測

Velocimetry)を適用した結果を報告する。

2. 現地観測の概要

(1)観測に用いたヘリコプター

観測には国土交通省近畿地方整備局のヘリコプター「きんき号」(全長17.1m，全高4.61m，ローター直径14.0m，ベル412EP型)を使用した(写真-1参照)。きんき号にはパイロット，撮影機器オペレータを含めて8名の搭乗が可能であり，今回は総勢5名が搭乗した。最大航続時間は5.1時間である。

撮影装置として，振動防止懸架装置に装着されたビデオカメラ，赤外線カメラおよびスチールカメラがある。ビデオカメラは44倍までのズームが可能である。除震装置が装備されており，エンジン等の振動による画像のブレは極力除去されている。

きんき号には，画像伝送装置が装備されており，撮影された可視画像や赤外画像を地上の受信局にリアルタイムで送信することができる。今回はこの装置は使用しなかった。

(2)観測状況

観測は平成13年6月11日に国土交通省近畿地方整備局淀川工事事務所の協力を得て行った。当日の天候は曇りのち晴れ，気温27℃，水温25.1℃(午後3時58分に観測)であった。

トレーサーの散布は動力付きボートにより，河川横断方向に人為的に散布した。

観測地点は，宇治川，木津川，桂川の三川合流部地点より，宇治川上流1km付近である(図-1参照)。今回の計測では河岸に設置されているITV(Industrial Television)を用いた計測も同時に行われており⁵⁾，計測結果の比較が可能となっている。

今回の計測は，主に河川表面流速測定法の開発を目的とした。表面に浮遊するトレーサーとして，ノボンフォーム(PIV用)と煎餅(PTV用)を用いた。ノボンフォームは緩衝剤として用いられている自然分解するも



写真-1 観測に用いたヘリコプター
きんき号：国土交通省所有



図-1 計測地点

の(主成分は澱粉)であり，5分ほどで水に溶けてしまう。煎餅は一般に市販されているものであり，直径約15cm，厚さ約2mmの薄いものである。ノボンフォームに比べて，水表面に浮遊した状態で比較的長時間保つ。今回撮影するスケールでは，画像上で煎餅を1つ1つ識別できるサイズであり，PTV用のトレーサーとして適している。

ヘリコプターから撮影された画像から，地上の座標系に変換するため，川岸に標定点を配置した。標定点としては，高さ1.5m，幅40cm，厚み2cm程度の木製標定パネルを用いた。右岸側に10カ所，左岸側に7カ所の計17カ所に標定点を設置した。

3. 画像計測法

(1)画像計測原理

ヘリコプターに搭載されたビデオカメラで撮影された画像から，河川表面を流れるトレーサーの移動を計測する。カメラ画像から実空間上の位置を計測するには，カメラの内部パラメータ(レンズ光軸と画像の交わる画像

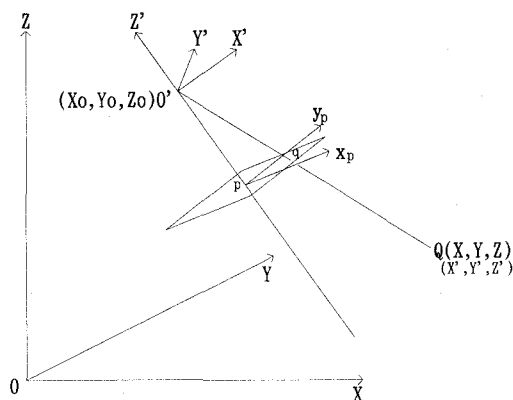


図-2 画像座標系と実空間座標系の関係

上の位置 (x_0, y_0) ，レンズ光軸と画像面のなす角度 (ϕ, ψ, θ) ，焦点距離 (C) 等)および外部パラメータ(カメラレンズ中心位置 (X_0, Y_0, Z_0) ，カメラ姿勢 (α, β, γ) 等)の情報が必要となる。

画像上の位置 (x_p, y_p) と実空間上の位置 (X, Y, Z) の関係は次式で表される^{3,4)}(図-2参照)。

$$x_p - x_0 = -X' \frac{c}{Z'} \quad (1)$$

$$y_p - y_0 = -Y' \frac{c}{Z'} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで， $(a_{11}, a_{12}, a_{13}, \dots, a_{33})$ はカメラ外部パラメータ (α, β, γ) によって決まる。0-XYZ座標系は地上座標系であり，0'-X'Y'Z'座標系は実空間上のカメラレンズ中心位置を基準とした座標系である。通常のフィルムカメラを用いる場合， C は焦点距離(長さ)であるが，今回はデジタル画像座標と実空間の変換係数(画素/長さ)となっている。

カメラパラメータが既知であれば，レンズ中心位置から，画像中に写っている物体を通った投影線上に実際の物体が存在する。移動物体の3次元位置を計測するには2台以上のカメラで撮影された画像から，それぞれ画像に対して同一物体に対する投影線を延ばし，その交点(実際は交わらないことが多く，最も近くなる点を用いる)から3次元位置を決定する。

今回の計測ではビデオカメラ1台で行った。よって，トレーサー位置を計測するには，トレーサーの3次元位置に関する情報が必要となる。今回は，別途観測された水面位置情報を用いた。今回は観測面内での水面位置を一定と考えて計測を行った。

水面の位置 Z が既知であれば，(3)式より Z' が決定される。よって，(1)，(2)式より，画像上の位置 (x_p, y_p) から実空間上のカメラレンズ中心位置を基準とした座標

系の位置 (X', Y') が決まる。 (X', Y') が決まれば式(3)より，地上座標系 (X, Y) が決まる。

(2)標定点を用いたカメラパラメータの推定法

通常，写真測量では，それらのカメラパラメータは高精度に測定，もしくは制御されている。今回，撮影に用いたビデオカメラは，測量を目的として導入されたものではなく，カメラパラメータに関する情報がなく，何らかの方法で推定する必要がある。今回はあらかじめ観測地点に設置した標定点から，カメラパラメータを推定する。

パラメータの推定では，地上座標系の標定点位置から画像座標系に変換したときの座標位置と，実測の標定点画像位置との誤差の自乗和が最小になるようにカメラパラメータを決定した。誤差の自乗和の最小値はPowell法を用いて求めた。

徐ら³⁾によれば，最近の製造技術の進歩により，一般のビデオカメラを計測に用いる場合，カメラ内部パラメータはレンズ光軸と画像が交わる点 (x_0, y_0) ，および焦点距離 (C) だけで良いとしている。カメラ外部パラメータの6個を加えて，計9個のパラメータを推定する必要がある。

パラメータの推定において，求めるパラメータ数が多くなると初期値精度により最適値へ収束できなくなったり，収束に要する時間が大きくなる。推定するパラメータ数を少なくするため， (x_0, y_0) は画像中心位置として，求めるカメラパラメータを7個とした。

今回は，カメラパラメータを推定するのに用いる標定点の数が9～11点であった。また，今回の計測では，1/2秒とし，連続30枚(15秒間)の画像に対して処理を行った。よって，30枚全ての画像に対してカメラパラメータの推定を行った。

(3)カメラパラメータの推定結果

図-3にカメラパラメータの推定精度の指標である1標定点あたり画像座標上での当てはめ誤差を示している。全ての画像に対して当てはめ誤差は1 pixel以下となっている。観測時間内の誤差の標準偏差は約0.62 pixelであった。画像面とレンズ光軸が交わる点を画像中心位置と仮定してカメラパラメータの推定を行った条件下でも，誤差の標準偏差が1.0 pixel以下の高精度でカメラパラメータをすることができた。

図-4には，推定されたカメラパラメータを用いて，標定点の画像座標上の位置から地上座標系に変換した位置と実測位置との誤差の標準偏差を示したものである。全時刻の平均は12.8 cmであった。平水時の川幅が約70 mであり，その値を基準として1画素当たりの長さの概略値を計算すると約15 cmとなり，図-3の結果と一致する。また，時刻0 sec(計測開始)と時刻12.0 secの画像に対する推定誤差の標準偏差が20 cm以上と，他の時刻に比べて

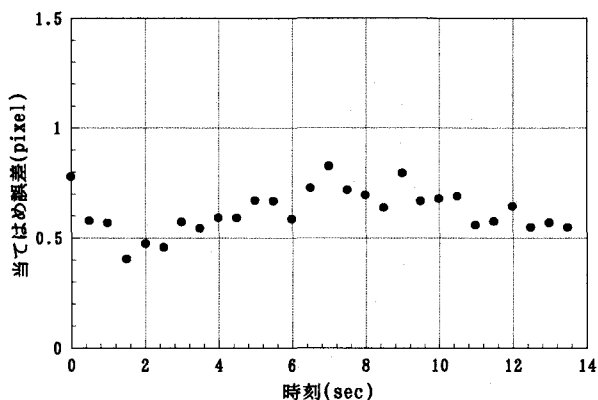


図-3 画像座標上での当てはめ誤差の標準偏差

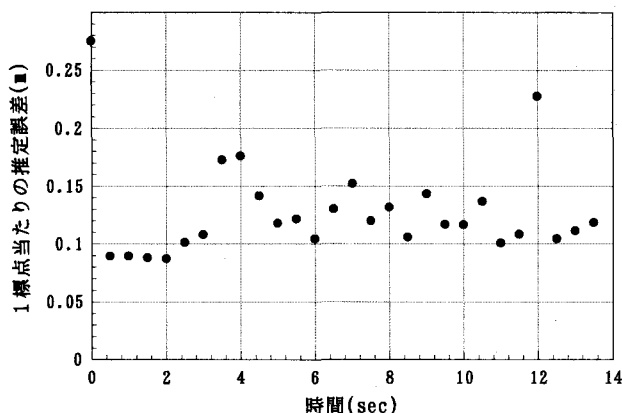


図-4 実空間上への推定誤差の標準偏差

大きな値となっている。

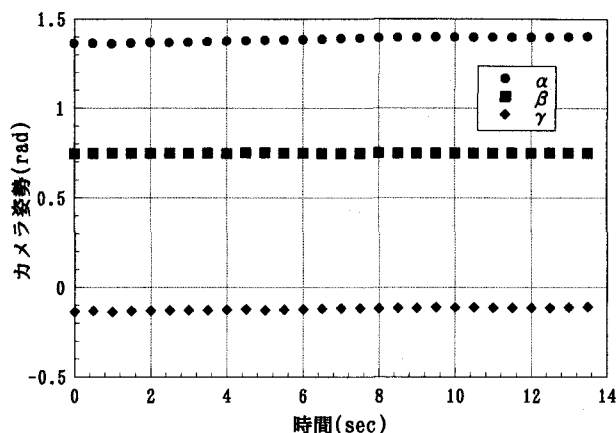
図-5には推定されたカメラパラメータを示す。外部パラメータであるカメラ姿勢(α, β, γ)は計測時間内で安定した値となった(図-5(a))。一方、外部パラメータのカメラレンズ中心位置に関しては、計測開始から2秒間、つまり計測開始から5番目までのデータにバラツキがあり、それ以降は比較的安定している(図-5(b),(c))。同様に、内部パラメータである画像座標から実空間座標への変換係数(C)に関しても計測開始から5番目までのデータにバラツキがあり、それ以降は安定している。

(4)PTV技術

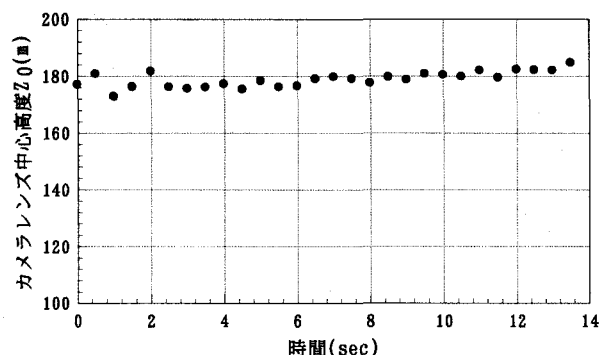
PTVアルゴリズムとしては、竹原ら²⁾が提案している Super-Resolution KC法を適用している。

PIVには、画像からの速度算出原理に基づいて大きく分けて2つの方法がある。1つの方法は、ある検索小領域内のトレーサ粒子分布パターンの移動を求める PMV(Pattern Matching Velocimetry)であり、もう1つは、個々のトレーサ粒子を追跡するPTVである。PMVの代表的なものは相関法である。すでに標準的なソフトとして市販化されている。PTVに関しても、いくつかの方法が提案されており、一部市販化されているものもある。

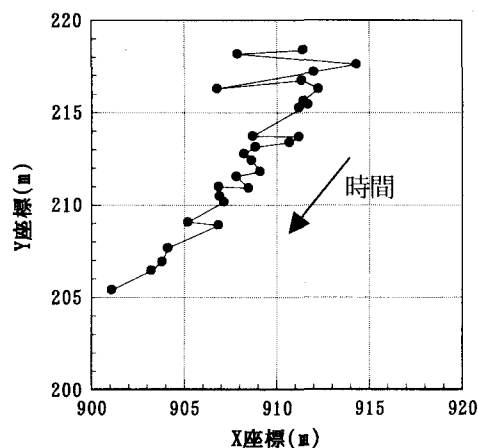
PMVの長所の1つは、2時刻間の画像から流速を求めることができることである。PTVでも2時刻間に対応付



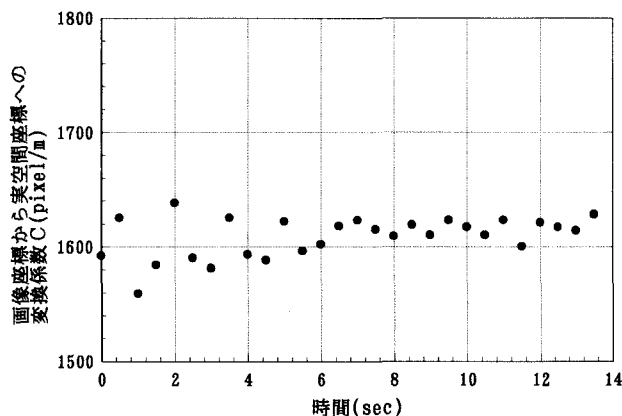
(a) カメラ姿勢(α, β, γ)



(b) カメラレンズ中心高度(Z_0)



(c) カメラレンズ中心位置(X_0, Y_0)



(d) 画像座標から実空間座標への変換係数(C)

図-5 カメラパラメータの推定結果



写真-2 トレーサーとして散布された煎餅の画像の1例

可能なアルゴリズムも提案されているが、粒子数が増せば誤対応の確率も増す。誤対応の確率を減少させるには、対応付けに用いる画像数を増加させるしかない。

PTVの長所として、PMVに比べて空間解像度が高いことが上げられる。PMVは検索領域内にある数個～十数個の粒子の平均移動量を計測しているものであり、個々の粒子の移動を求めたPTVに比べて原理的に解像度が低い。PMVでも、検索領域をオーバーラップすることで、見かけ上、多数のベクトルを得ることができるが、実質的な空間解像度は検索領域のサイズで決まる。

PMVとPTVの長所を組み合わせたSuper-Resolution法がKeaneら⁶⁾によって提案されている。Super-Resolution法では、まず、PMVにより粗い格子点上の流速ベクトルを求め、その格子点の速度情報を元に各粒子に速度を内挿し、PTVで2時刻間の同一粒子の同定を行う。これにより、2時刻間で粒子を追跡することができ、解像度の高い流速場の計測が可能となる。

竹原ら²⁾はKeaneらの方法をさらに改良するために、カルマンフィルターと χ^2 検定を用いたPTVアルゴリズム(KC法)⁷⁾、および粒子画像抽出のための粒子マスク相関法(PMC法)⁸⁾を用いた新しいSuper-Resolution法を提案した(Super-Resolution KC法と呼ぶ)。

4. 河川表面流の画像計測結果

写真-2にトレーサーとして散布された煎餅の画像の1例を示す。PTV用のトレーサーとしては画像上で個々の煎餅として認識できる必要がある。今回は直径15cmの煎餅を用いており、概算で求められる1画素当たりの長さ約15cmとほぼ同じ大きさであり、煎餅1枚の画像は約1pixelとして撮影される。写真-2からも煎餅1枚1枚を認識することができる。また、円形の煎餅を用いているため、粒子画像抽出のために開発したPMC法をそのまま用いることができる。

トレーサーは、計測点より上流側数十mの地点で、河

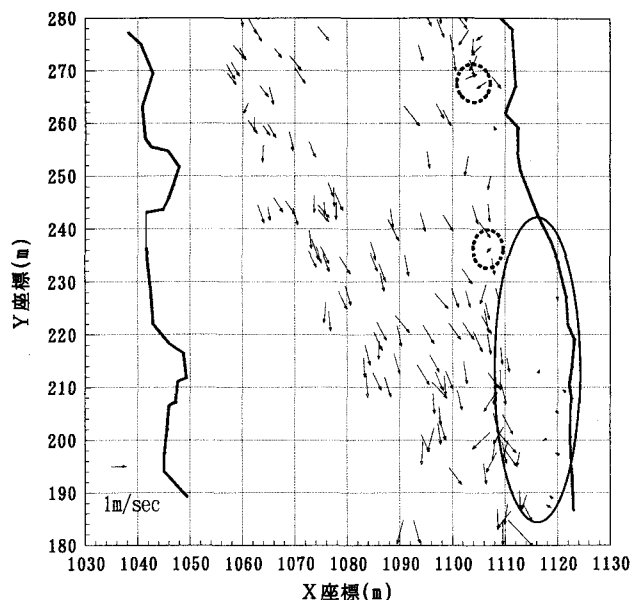


図-6 PTV計測結果の1例(時刻4.5sec)

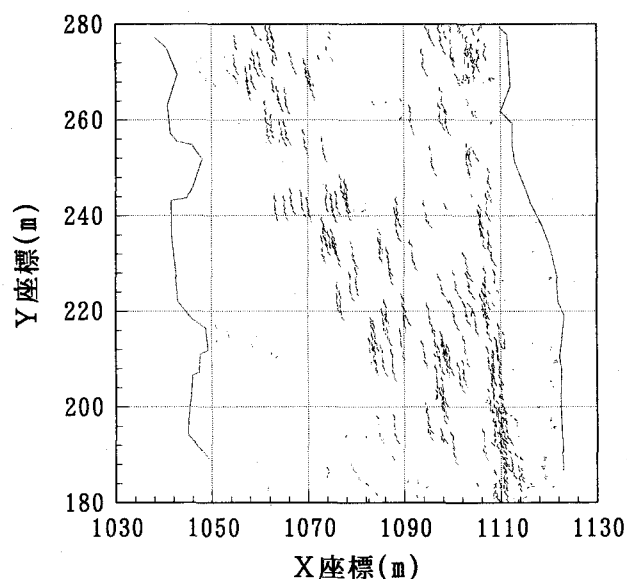


図-7 PTVによる流跡線計測結果(5秒間)

川横断方向に直線状に散布された。流下に伴い、早い主流部分が遅い低速部分を引きずるように進み、尖った分布になる。PTV計測では、トレーサーが計測区間で一様に分布していることが望まれる。また、トレーサーが流れの速い主流部に集まってしまうという問題も生じた。今後、散布の方法等の検討も必要である。

PTV計測結果の1例を図-6に示す。煎餅トレーサーをうまく追跡できているのがわかる。追跡結果に対する人による確認を行った結果、点線で囲まれた部分のベクトルが誤対応であることがわかった。明らかに周囲と大きく違う動きをしているのがわかる。これはPTVにおける誤対応付けが原因である。

ベクトル分布から、流れが左岸側に向かって流れていることがわかる。これは観測部で宇治川が大きく湾曲し

ている部分であり、主流部が湾曲外側に沿って流れているためと思われる。目視による観測でも、煎餅が左岸側に集まっていた。また、橋門で囲んだ部分は、目視で止水域ができていたのが確認されたが、PTVの結果でも流れないことがわかる。

流速ベクトルの平均値は1.1m/secであり、藤田ら⁵⁾の地上設置のビデオカメラによる観測結果1.3 m/secと比較的よく一致している。

図-7には、PTVによって得られた結果から5秒間の流跡線を示したものである。この図からも煎餅トレーサーの動きをうまく追跡しているのが確認できる。

5. まとめ

メソスケールへのIV技術の適用を目的に、ヘリコプターに搭載されたビデオカメラを用いて、実河川表面流のPTV計測を試みた。ビデオカメラはヘリコプターに設置されており、トレーサーとしては、自然界で分解する食用の煎餅を用いた。PTV計測では、画像上で個々のトレーサーを識別する必要があるが、今回は直径15cmの煎餅を用いた。

ビデオ画像から実空間へ変換するため、画像上に写し込まれた十数点の標定点から、カメラパラメータを推定した。推定の結果、既知の実空間上の点から画像座標上へ変換した場合、1pixel以下の精度で推定することができた。今回の撮影スケールでは推定誤差の標準偏差は12.8cmであった。また、PTVによる流れ場計測の結果に対して目視で確認を行った結果、流れ場を高精度で計測することができることがわかった。

今回のボートによる河川横断方向への散布方式では主流部に集まるという問題点が生じた。今後、煎餅トレーサーの散布方法についての検討が必要であることがわ

かった。

謝辞：本研究は、土木学会水理委員会河川懇談会共同研究「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：研究代表者 藤田一郎」の一環として行われた。現地観測を行うに当たり、神戸大学、大阪工業大学、近畿大学の学生諸氏の協力を得た。また、データ整理に関しては近畿大学理工学部4年生の奥野訓史君、原蘭貴徳君、倉井利之君、奥村広宣君の協力を頂いた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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, 第44巻, (2000) pp.443-448.
- 2) Takehara, K., Adrian, R.J., Etoh, T.G., Christensen, K.: A Kalman tracker for super-resolution PIV, Experiments in Fluids, (Suppl.) (2000) pp.S34-S41.
- 3) 徐剛, 辻三郎: 3次元ビジョン, 共立出版社, pp.7-23, 1998
- 4) 保谷忠男: 写真測量, 第3版, (社)日本測量協会, pp.177-184, 1993.
- 5) 藤田一郎, 竹原幸生, 綾史郎, 酒井信行, 玉井昌宏, 高野保英, 宮本仁志: ITV施設および河岸ビデオを用いた各種トレーサによる表面流のLSPIV計測, 土木学会河川懇談会共同研究中間報告, 2001.
- 6) Keane, R.D., Adrian, R.J., Zhang Y.: Super-resolution particle imaging velocimetry, Mes. Sci. Technol., Vol. 6, pp.754-768, 1995.
- 7) 竹原幸生, 江藤剛治, 村田滋, 道奥康治: PTVのための新アルゴリズムの開発, 土木学会論文集, No.533/II-34, pp.107-126, 1996.
- 8) 江藤剛治, 竹原幸生, 道奥康治, 久野悟志: PTVのための粒子画像抽出法に関する検討—粒子マスク相関法について—, 水工学論文集, 第40巻, pp.1051-1058, 1996.

(2001. 10. 1受付)