

超高速ビデオカメラを用いた透過性構造物内部の流体運動可視化に関する実験

Visualization of Fluid Motion at Permeable Structure by Ultra High-Speed Video Camera

井田 康夫*・榎木 亨**・須貝 輝博***

Yasuo. Ida, Toru. Sawaragi and Akihiro. Sugai

A fluid motion at permeable layer constructed model of precast concrete armor unit was visualized in oscillatory flow. Many turbulence measurements have been ever done by point measurement techniques such as LDA. In this study, a method of measurement has been conducted by a particle tracking velocimetry for 2-D space. It has been composed of Kalman's filtering theory, the Chai-Square-test and initial evaluation of velocities of particles which newly appear in the flame. Images of $30\ \mu\text{m}$ diameter particles were taken using a ultra high-speed video camera and Argon-ion laser slit illumination.

Keywords : (Permeable structure , Flow visualization , Particle tracking velocimetry)

1. 緒言

最近の海岸域には多様な透過性構造物が採用され、消波、侵食防止、水質改善など大きな効用が認められている。しかし、これらの計画・設計に必要な波浪変形の計算法はいまだ確立されていない。この原因は基礎方程式中の慣性力係数(CM)と抵抗係数(f_R)を正確に評価できない点にある。とりわけ乱流抵抗係数(C_f)を明らかにしなければ透過性構造物内での波の力学的な記述はできない。このためには構造物内の複雑な流体運動を正確にかつ乱さずに可視化する必要がある。

しかしながら、三次元的に乱れの強い流れ場を時空間的に乱さずに連続計測して可視化し、さらに個々の粒子の動きを追跡することは容易ではない。

そこで本論ではその第一段階として、透過性構造物内部の流体運動を二次元的に解明するため、新たに開発された超高速ビデオカメラと極めて透明度の高い消波ブロック模型を用い、空隙中の流体運動を振動流水槽の外側から可視化し、自動粒子追跡アルゴリズムによる粒子の追跡手法により流体場を明らかにしようとするものである。

2. 二次元流体運動の可視化と粒子追跡

波・流れ場の流体計測はレーザードップラー流速計などにより広く行われているが、流体運動の可視化とこれに続く定量的解析を精確に行うためには次の要件を充足しなければならない。

①場を乱さない非接触型の計測である

②点計測ではなく、二次元(あるいは三次元)に展開している多数の粒子の同時情報を連続的な時系列データとして得られる。

③計測データが短時間に処理でき、例えば時間ス

テップごとの流速ベクトル図が容易に得られる。

このような条件に適合する計測法はビデオ画像計測であり、以下に今回の計測システムと粒子追跡手法の概要を述べる。

2.1 計測システム

(1)超高速ビデオカメラ

ビデオ画像計測において最大のネックはこの計測に応え得るビデオカメラが存在しなかったことである。通常のビデオカメラ(30pps)では比較的遅い現象でも流体計測の用をなさない。そこで近畿大学理工学部江藤剛治教授の開発された世界最高速のビデオカメラ(256×256画素で4500pps)を使用する。このカメラは高速である上、完全同期、無歪み、イメージインテンシファイヤ内蔵という特徴を持つ。

(2)透明体模型

この計測の第二のネックは透明で屈折率が低く硬度があり、そして比重は1より相当大きい模型を必要とする事である。今回は以下の方法でテトラポッド型の模型を製作した。

主剤であるメタクリル酸メチルモノマー中の重合禁止剤を5%水酸化ナトリウムで除去した後、残留水分を無水硫酸ナトリウムを加えて1日静置する。

この精製済みの溶液に重合開始剤(ベンゾイルパーオキサイド:爆発性のある危険物質)を加える。この溶液を40℃に加熱して粘性を高め、ブロック型枠に流し込み、3日位放置すると硬化し、極めて透明度の高い模型(屈折率1.498)が得られる。

(3)流体

透過層内の粒子運動を外部から歪なく計測するためには透明ブロックと同じ屈折率の流体を使用する必要がある、このためヨウ化ナトリウム水溶液(重量

* 正会員 大阪工業大学工学部土木工学科 (535 大阪市旭区大宮)

** 正会員 大阪大学工学部土木工学科

*** 学生会員 大阪工業大学大学院工学研究科

百分率 63 %)を用いる。

(4)トレーサー粒子

定量的測定を行うためにはトレーサー粒子の径、比重、個数が問題となり、特に比重は、使用する流体の比重に合わせなければならないが、今回の実験では乱れの強い現象であるため、流体よりやや比重は小さいが比重 1.4 で、直径 $30\ \mu m$ 程度のポリ塩化ビニルを用いる。

(5)照明

出力 200mW のアルゴンイオンレーザーの励起光を光学レンズを通して約 5mm 厚のシート光として用いる。

2.2 粒子追跡手法

画像解析による流れ場の粒子追跡手法は研究の目的、解析時間と費用、解析精度を勘案して各研究者が適宜、判断して、次のいずれかの方法を採用している。

(1)個々の粒子を追跡する方法 (PTV: Particle Tracking Velocimetry)

(2)多数の粒子群の分布パターンを追跡する方法
ここでは解析精度を重視し、(1)による解析を行う。

具体的には近畿大学で開発された粒子自動追跡アルゴリズムをメインとする図-1に示すフローで画像解析を行うが各ステップの内容を簡単に説明する。

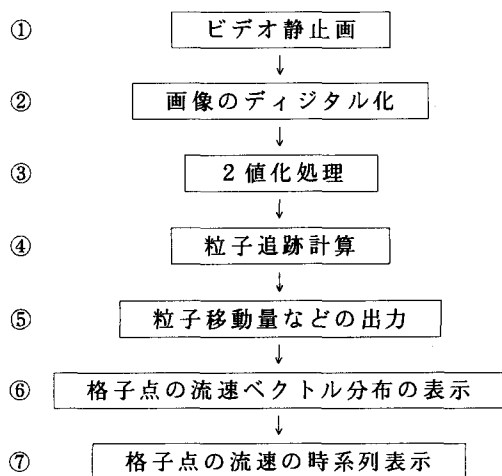


図-1 粒子追跡のフロー

①ビデオ静止画および②画像のデジタル化

超高速ビデオカメラの記録から研究目的に合う静止画を連続的あるいは間歇的に1画面ずつデジタル化する。

③2値化処理

デジタル化された画像から粒子のみを取り出すために2値化処理をおこなう。この場合、画像内の不要な粒子やノイズを除去し、以後の解析をスムーズに進めるため、所要の粒子の径や輝度を設定して処理を行い、各粒子の空間情報(座標、粒子面積)を得る。

④粒子追跡計算

粒子の追跡計算は2値化処理によって得られる多数の粒子の情報を画面ごとに追跡する。この粒子追跡アルゴリズムの根幹は次の3項目である。

1)前時刻の粒子情報(粒子の位置、粒子面積など)から、カルマンフィルターを用いて現時刻の粒子情報を推定する。

2)前時刻と現時刻の粒子間で、同一の粒子かどうかの対応付けを χ^2 検定により行う。この方法はまず、個々の粒子の推定値と実測値の誤差を求め、これを粒子情報の最適推定分散値を用いて正規化する。

これより座標(x,y)、粒子面積に関する3つの独立変数が得られる。これらの自乗和は自由度3の χ^2 分布に従うため、最小の χ^2 値を持つものを同一粒子と判定する。

3)流れの三次元性が強い場合には各時間ステップで粒子の消滅、出現がある。この場合、新たに出てきた粒子に情報の初期値を与えねばならない。このため前時刻の粒子と対応付いた粒子でドローネ三角形網(最小角を最大にする三角形網を形成する)をつくり、出現した粒子が含まれる三角形の各頂点の粒子情報から、その粒子の情報を内挿する。

⑤粒子移動量などの出力

所定の時間内の粒子の運動を、各時間ステップで対応付いた粒子の位置や移動量を連続的に出力する。

⑥格子点の流速ベクトル分布の表示

断面内に所要の格子点を設け、対応付いた粒子の移動量から各格子点の流速ベクトルを内、外挿し、断面全体の流速ベクトルの分布を表示する。

⑦格子点の流速の時系列表示

所要の格子点の流速またはこの格子点を中心とする半径rの領域内の平均流速を求め、x,y方向の流速の時系列的变化を表示する。

3. 実験および考察

3.1 実験概要

実験は図-2に示すように高さ 15cm、幅 20cm、長さ 147cm のU字型振動流水槽(透明アクリル樹脂製)の中央部に長さ 60cm の透過層を設置して行なった。この透過層は写真-1の透明ブロック模型(高さ 7.2cm)を乱積みに填充し、両端を金網(2cm メッシュ)で被覆している。

振動流は、水槽の鉛直部にあるピストンを無断変速機付きモーターにより周期 2.55sec で約 10cm 上下動させて発生させた。

流体は前述のように、透明ブロックと屈折率の等しいヨウ化ナトリウム水溶液を用いた。

計測は、トレーサー粒子(ポリ塩化ビニル)を投入し、粒子の挙動がほぼ安定した後、超高速ビデオカメラによりレコードレート 750pps で 6sec 間の流況を記録した。そしてこれを 30pps で、ビデオテープに再録した。計測断面は透過層内外の流体運動を把握する

ため、透過層端部を中心とする約 15cm 平方の鉛直面で、ここにレーザーによるシート光を 5mm 厚で照射している。またこの断面は水槽側面より 2cm 奥側にある。

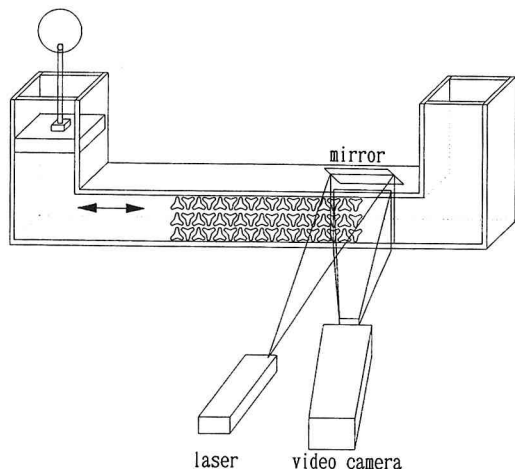


図-2 実験装置のイメージ図

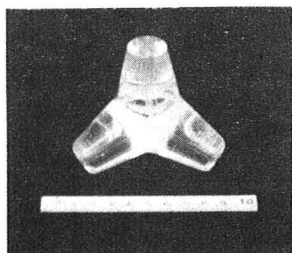


写真-1 透明ブロック模型

3.2 画像解析の手順

画像処理の機器は画像処理装置(nexus 6510)とパーソナルコンピュータ(PC-9801VM)を用い、粒子の追跡計算はEWS(SUN SPARCSTATION IPX)で行なった。

解析の対象とする画面は1周期分で、 $2.55\text{sec} \times 750\text{pps} = 1912$ 枚という膨大な数となるので、これを5画面ごとにサンプリングし、合計387画面で解析を進める。

解析の手順は図-1のフローに従って行なった。以下に透過層外部の粒子追跡の例を示す。

写真-2はビデオ静止画で、これを2値化したものを写真-3に示す。そして粒子の追跡計算を行い、各時間ステップの対応付いた粒子の位置と移動量を連続的に示したものが写真-4である。さらに写真-5は対応付いた粒子のある時刻の流速ベクトルを表している。このような過程を経て格子点の流速ベクトルの分布図などの所要の成果が得られる。

3.3 考察

(1) 流速ベクトルの空間分布

解析結果の出力例を図-3に示す。この図は各時間ステップの粒子位置を連続的に示したもので、対

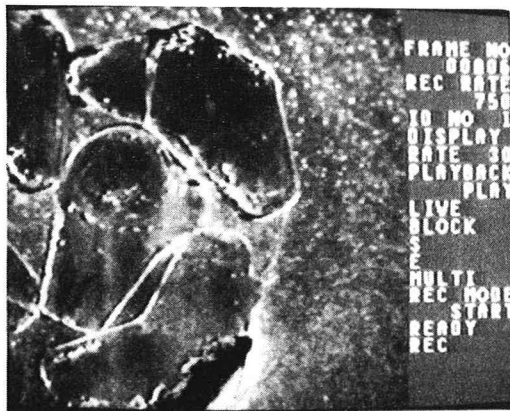


写真-2 ビデオ静止画像

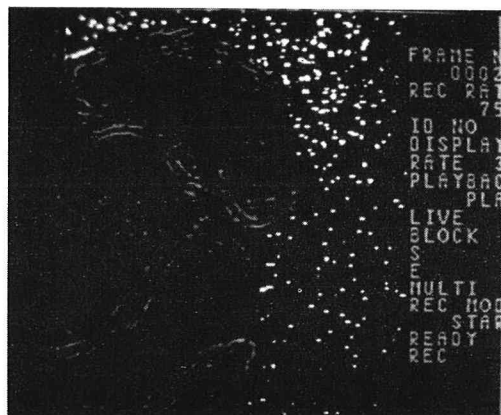


写真-3 2値化処理

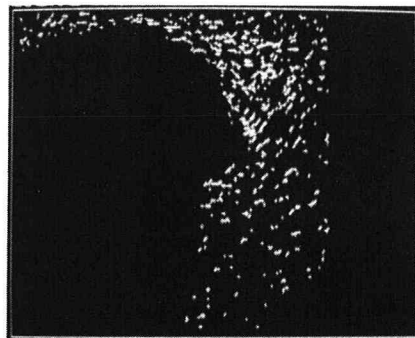


写真-4 粒子位置と移動量

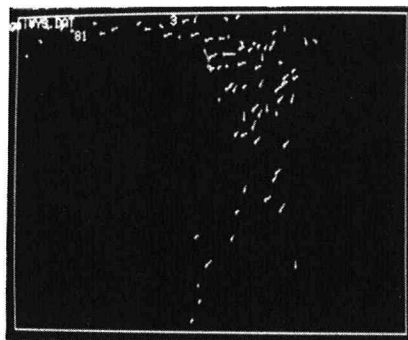


写真-5 流速ベクトル

応付いた各粒子の軌跡が読み取れる。この場合の粒子は透過層外部では各時間ステップで平均7割程度が対応付けれるが、内部においては流体運動の三次

元性が強く、その割合は平均5割程度である。

そこで透過層外部のみに格子点を設定し、流速ベクトルの空間分布を見ることとし、この例を図-4に示す。この図は、全体としては右向きに流れている時刻の流速ベクトル図であるが渦の形成が顕著に見られ、録画の原画と対比しても流況をほぼ把握している。また他の時間ステップにおいても妥当な流速ベクトルの分布図が得られた。

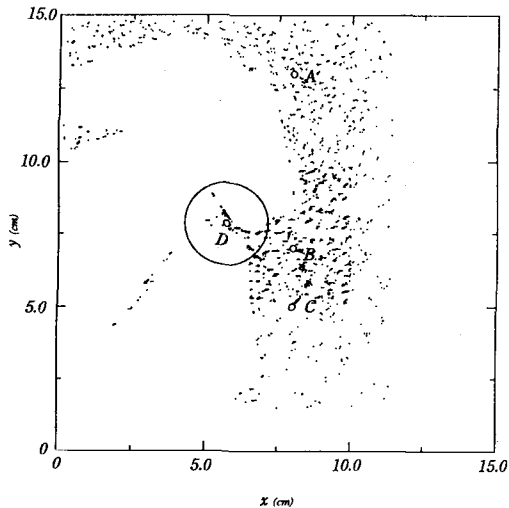


図-3 粒子の軌跡

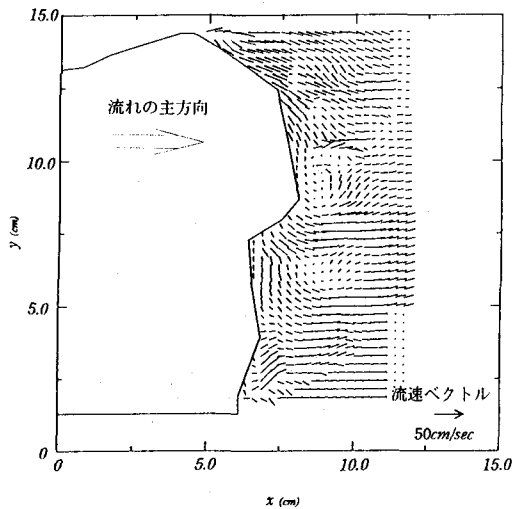


図-4 格子点の流速ベクトル

(2) 流速成分(u, v)の時間的变化

図-3の x 座標の等しいA,B,Cの3点においてそれぞれ流速ベクトルの水平、鉛直方向の流速成分 u, v の時間的变化を1周期にわたり求める。この結果を図-5~図-7に示す。これらの図よりB,Cの2点においては u, v は変動成分を持ちつつ、その平均値は時間と共に一定の傾向で変化しているが、明らかに v の平均値の変化よりも u の平均値の変化量の方が大きいことが確認できる。しかし、A点は水槽上面に近く、透過層内を通らない水流の影響を受け、他の2点とはパターンが異なる。

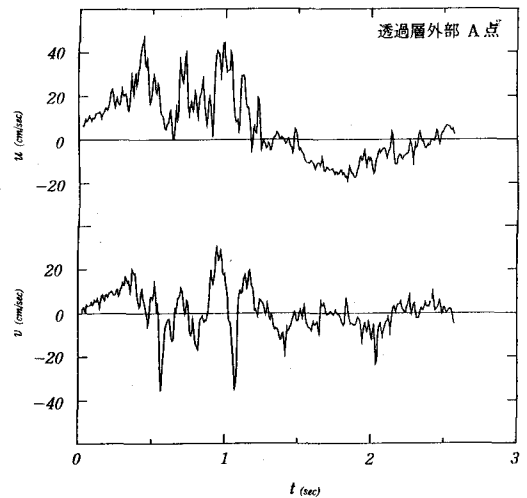


図-5 格子点の流速成分の変動(A点)

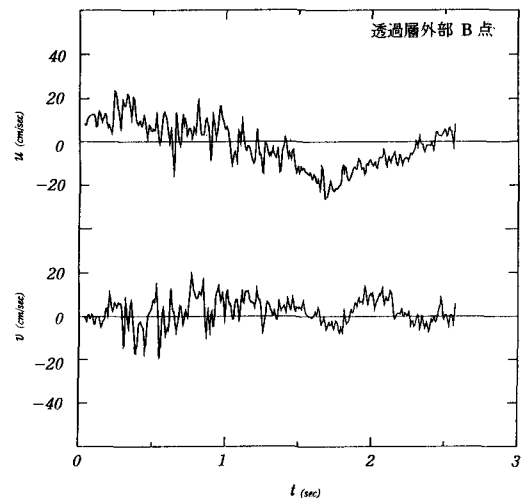


図-6 格子点の流速成分の変動(B点)

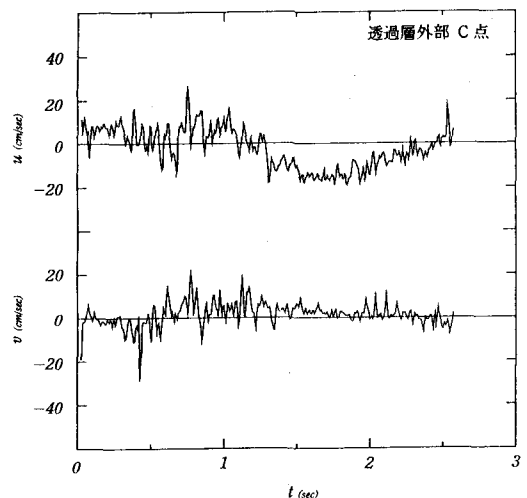


図-7 格子点の流速成分の変動(C点)

次に透過層内部についても図-3のD点を中心とする半径1.6cmの領域で、ある時刻の各粒子の流速ベクトルの平均値を求め、この平均値の u, v の時

間の変化を調べる。この場合のデータの取り込みは5画面間隔でなく、1画面ずつ連続15画面のデータを入力した後、45画面を飛ばし、再び15画面を連続して入力するサンプリング方式で、495画面による解析を試みた。このような方法を用いたのは透過層内部には5画面間隔では対応付けのできる粒子が少ないためである。この結果を図-8および図-9に示す。この図を見ると u, v とも変化の様子は B, C 点の場合と類似しており、1画面ずつ連続的にデータを取り込むことをあるインターバルで行うというサンプリング方式が有効であることを示している。

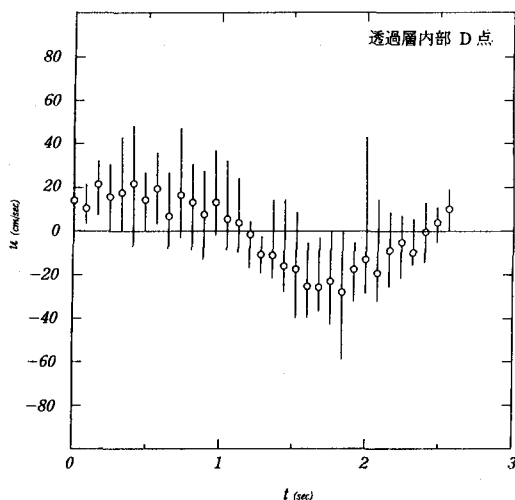


図-8 流速成分の変動(D点付近)

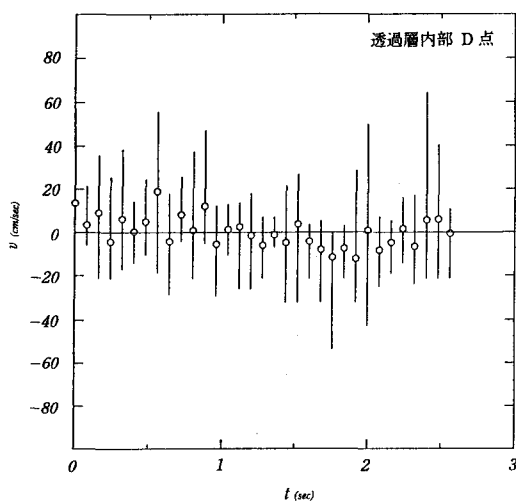


図-9 流速成分の変動(D点付近)

この方法による解析をさらに前出の B 点で行なった結果が図-10および図-11である。これを当初のサンプリング方法による図-6と比較すると、 u, v とも各時間における平均値まわりの変動量に多少の差は見られるが、平均値の挙動はほぼ類似しており、サンプリング方法の違いによる流速計算結果の差はほとんど認められないことが判明した。

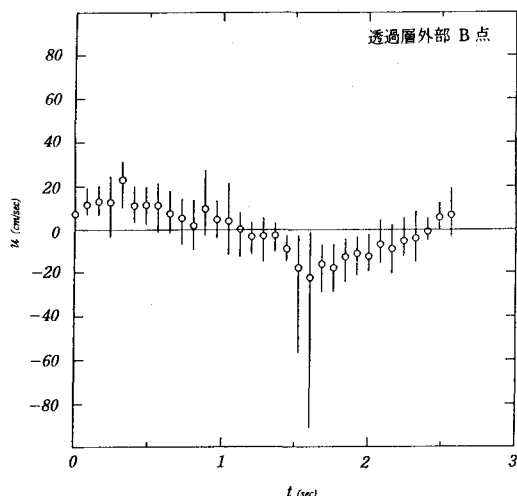


図-10 格子点の流速成分の変動(B点)

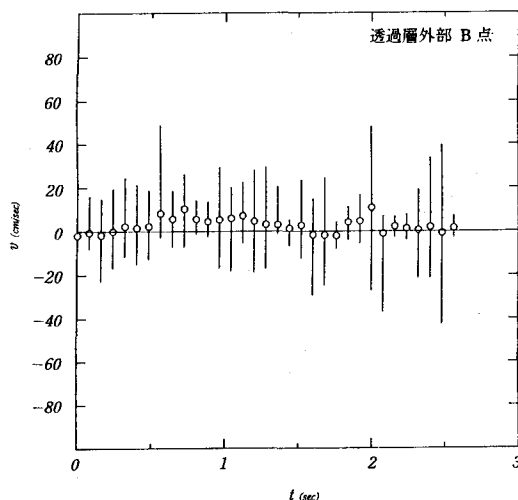


図-11 格子点の流速成分の変動(B点)

4. 結 言

振動流場において透過層内外の二次元流体運動の可視化と粒子追跡計算を、透明体模型を作成した上で、近畿大学で開発された超高速ビデオカメラと自動粒子追跡アルゴリズムを用いて試みた結果を要約する。

(1)従来、手の届かなかった透過層内外の流体運動が超高速ビデオカメラ等の使用により、非接触で、平面的(同時多点の情報)に可視化でき、海岸工学等の分野においても諸問題(例えば空隙構造物のエネルギー逸散など)の解決に画像解析による手法は極めて有効である。

(2)粒子追跡計算にかかる労力はビデオ画像上の粒子の鮮明度に反比例する。このためクリアな画像が得られるよう模型の材料と製法、流体の性質など更なる開発が必要である。

(3)複雑な三次元流れ場でも可能なビデオ画像解析の応用手法の開発が望まれる。

謝辞 この研究を行うにあたり、終始ご指導を賜った近畿大学理工学部土木工学科江藤剛治教授ならびに同、竹原幸生助手に深甚の謝意を表すると共に、透明体ブロックの製法に関して大阪工業大学工学部応用化学科飯田健郎教授のご指導を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 江藤剛治・竹原幸生:多数のトレーサー粒子の自動追跡アルゴリズムの開発, 水工学論文集, 第34巻, pp.686-694, 1990.
- 2) 江藤剛治・竹原幸生:流体中の粒子の自動追跡アル

ゴリズム, 土木学会第46回年次学術講演会概要集, 第II部門, pp.526-527, 1991.

3) 江藤剛治:4500枚/秒の高速ビデオカメラ, テレビジョン学会誌, vol.46, No.5, pp.543-545, 1992.

4) 竹原幸生・江藤剛治・道奥康治・島崎正則:画像上の多数の粒子の自動追跡アルゴリズム, 土木学会第48回年次学術講演会概要集, 第II部門, pp.14-15, 1993.

5) 竹原幸生・江藤剛治・道奥康治:粒子追跡による流れ計測のための新技術の開発, 水工学論文集, 第38巻, pp.689-696, 1994.