

# 研究展望

## REVIEW

# 研究展望

## 高速ビデオカメラの現状と水工学分野への適用

江藤剛治<sup>1</sup>・竹原幸生<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 近畿大学教授 理工学部土木工学科 (〒577 東大阪市小若江3-4-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 近畿大学助手 理工学部土木工学科 (同上)

流体運動の可視化計測を目的として高速ビデオカメラを開発した。撮影速度は標準モードで4,500pps(枚/秒)であり、解像力を下げた場合は最高で40,500ppsで撮影することができる。撮像素子にはMCP型のイメージンテンシファイヤを直結しており、極めて高感度である。このカメラの開発の経緯、仕様、適用例を示す。また、その他の高速撮影技術についてもまとめて紹介する。

**Key Words:** *highspeed video-camera, fluid mechanics, PTV, hydraulics*

### 1. はじめに

#### (1) 本報告の目的

科学・工学全般において可視化技術は非常に有効な研究手段である<sup>1),4),5),25)</sup>。しかしながら、これらの用途においては特殊な条件下での撮影が要求されることが多い。このような撮影を一般的に特殊撮影と呼ぶ。特殊撮影には下記のようなものがある<sup>2)</sup>。

- ① 超高速撮影, ② 微光量撮影, ③ 超高倍率撮影,
- ④ 超高解像度撮影, ⑤ 可視光以外の撮影。

一方、撮影環境としても高温、超低温、高重力下、強い電磁波中での撮影等、特殊な環境下での撮影が必要となる。

本報告ではこのうち超高速撮影を取り上げる。まず、著者らの開発した高速ビデオカメラ<sup>3)</sup>とその適用例について概説する。次に、高速撮影技術全般とその水工学への適用可能性等について展望する。

本報告では著者らの研究成果だけでなく、高速連続撮影に関連する他の機器や研究についても紹介し、高速撮影を用いた研究に興味を持っている読者に基本的な情報を提供する。

高速撮影の歴史に関しては植村・山本<sup>4),5)</sup>の解説論文でまとめられている。また、高速撮影に関するシンポジウム、国際会議等の学会活動も活発になってきた。

#### (2) 本報告の概要

第2節では著者らの開発したシステムの概要、およびこのシステムを水工学および他の土木工学関連課題に適用した例を示す。またこれらの経験に基づいて、このシステムの問題点と改良の方向を示す。最大の問題点は4,500pps(pictures per second, 枚/秒)では速度が不足するケースが多いことである。

第3節ではこの速度不足の問題を解決するための手段に言及する。まずアンケート調査に基づき、科学・工学の広い分野にわたって高速撮影の用途と必要な撮影速度を明らかにする。次にそれらに対応可能な既存の他の高速撮影技術と、現在提案されている、もしくは開発中のより高速の撮影技術を紹介する。

#### (3) 流れの可視化計測と高速ビデオカメラ

著者らの研究室では、1980年代末ころからPTV(Particle Tracking Velocimetry)に関する技術開発を続けてきた。検討してみると、当時の技術ではPTVで実際の流れを測ることは困難であることがわかった。次のような基本となる技術開発も不十分であった。

- ① ビデオカメラ(高速、高解像力、高感度他)
- ② 画像上の多数の粒子の自動追跡アルゴリズム
- ③ トレーサーとしての水中での中立浮遊粒子

この中で、現在でも、より高性能のビデオカメラの開発がPTVの実用化にとって最大の課題である。例えばわずか30cm/secの流れ中でも、1×1cmの領域を通常の30ppsのビデオカメラで撮影すると、1コマ後には撮影対象物はフレーム外に飛び出し、連続撮影はできない。よって当時、ビデオカメラによる可視化計測は、遅い層流などの特殊な流れ計測以外には使えないというのが一般的な認識となっていた。

## 2. 4,500枚/秒のビデオカメラ

### (1) 基本仕様

#### a) 前提条件

PTVによる流体の3次元計測には通常3台(以上)のビデオカメラが必要である<sup>6)</sup>。複数の画面上の視差から3次元位置を推定するので、カメラ間の同期は完全

でなければならない。またカメラごとに特性が変わったり、時間変化するおそれのある画像歪がなくてはならない。

さらに高速撮影においては光量不足が決定的な障害になることが多い。これを補うにはイメージインテンシファイヤを内蔵させれば良い。とくにマイクロチャンネルプレート型イメージインテンシファイヤ(MCP型II, 補遺I参照)を撮像素子に直接取り付ければ、無歪となる。

PTVでは撮影後、電子計算機により大量のデータを処理しなければならない。そのためには画像情報はデジタル情報として記録される方がよい。

さらにPTVでは多数の粒子を識別できることが望ましいので、できる限り解像力が高い方がよい。

以上よりPTV用高速ビデオカメラの基本仕様を決めるための要望として以下の6条件が上げられる。

- ① 高速、② 完全同期、③ 無歪、④ 高感度(II内蔵)、⑤ デジタル記録、⑥ 高解像力、

この他、高速撮影ではカラー化、再生の容易さ、総フレーム数、現象の生起との同期撮影、コンパクトさ、などの課題もある。高速ビデオカメラの場合上記①～⑥以外の条件は大きな障害とはならない。

高速および高感度と、高解像力とは競合する。著者らは第一段階として高解像力は犠牲にして、①～⑤の項目を満たすビデオカメラを開発した。

#### b) フレームレート

開発したビデオカメラが高速である理由は次の4つである。

- ① 16本の信号読み出し線からの並列読み出し
- ② 高い信号読み出し周波数
- ③ ICメモリー上への上書き連続書き込み
- ④ 部分撮影

通常のビデオカメラからの画像信号の読み出しは、画素を1列づつ走査することにより行う。本機では、信号読み出し線を16本とし、16本づつの走査線を同時に走査する。これで速度は16倍となる。これはコダック社の特許である。

本機では、読み出し周波数を $2 \times 10^7$  Hz 近くまで上げることができた。すなわち、1/(2千万) 秒程度で1つの画素から信号を読み出している。

読み出した信号はすぐAD変換し、画像構成することなくIC上に上書きし、撮影停止後に、ICに残っている信号からゆっくり画像構成することにした。これにより機械部分が全く無く、画像構成に必要な時間等も省略できた。

256×256の全画素のうち、一部の画素だけを使えば信号読み出し量が減るので高速化できる。

以上より標準のフレームレートは画素数256×256に対して4,500ppsとなった。また、最も小さい領域(1画面64×64画素)の場合では、40,500ppsの撮影が可能となった。

#### c) 撮像素子

全画素数は256行×256列の65,536個である。画素ピッチを40 $\mu$ mとしたので、受光面のサイズは1辺10.24mm(=256×0.04)の正方形である。これらの理由を以下に述べる。

最近の撮像素子の画素ピッチは10 $\mu$ m程度であるから、かなり大きな画素面積にしている。また開口率(各画素の面積に占める有効受光面積、すなわちフォトダイオードの面積の割合)は83%と特別に大きくし、残りの17%に、各画素に必要な回路を組み込んでいる。これらは経験上、高速撮影においてはフレームレート(撮影速度)の方は十分であっても、1フレーム当たりの露光時間の不足が原因で撮影が困難になる例が多いという事実を考慮して、できる限り明るい撮像素子を作ろうとしたためである。

また顕微鏡下での撮影などにおける光量不足に対処するために、設計当初から、MCP型IIを内蔵できる装置とすることにしていたので、受光面のサイズは、浜松ホトニクス社製の標準的MCP型IIの出力窓(有効径 $\phi$ 17mm)の内側に入るように、12mm( $\approx 17/\sqrt{2}$ )より少し小さい値(10.24mm)とした。やや小さくしたのは、光学系のケラレや受光面周辺での回路組み込みを考慮したためである。

画素ピッチは、MCP型IIと撮像素子を直接ファイバ結合した場合の総合解像力も考慮して決めた。著者らの試算ではこの総合解像力は、最良の条件下で、画素ピッチで30~40 $\mu$ m程度と推定された(補遺II)。

#### d) イメージインテンシファイヤ

MCP型IIは、イメージコンバータ型のイメージインテンシファイヤと違い(補遺I)、画像歪を生じない。これにより数100mlxという非常に暗い条件下でも4,500ppsで撮影できる。また、高速ゲーティング(シャッターリング)が可能である。本機の場合で100ns(1/(1千万)秒)のゲーティングが可能である。

また本機の撮像素子はMOS型であるためフォーカルプレーン効果があるが、ゲーティングにより、これを防ぐことができる。

今回は、次の2つの目的から市販の機器(例えば浜松ホトニクス社製C2925)を改造した特注品を用いた。

- ① 蛍光面の残像を無くす。
- ② 繰り返し周波数を上げる。

市販品の蛍光材料はP20であった。これは222 $\mu$ s(4,500pps)で6%、25 $\mu$ s(40,500pps)で30%程度の残光がある<sup>7)</sup>。これを防ぐために、より残光の少ないP24

を用いることにした。P24を用いると発生蛍光強度が低下する。これを補うためにMCP出力面と蛍光面の距離を0.5mmから1.0mmに2倍程度広げ、ゲイン電圧も6kVから8kVに上げた。これにより蛍光面に衝突する電子のエネルギーは50~100%増加する。ただし、解像力は若干低下する。

1回ゲーティングを行うと、次にゲーティングを行うためには、溜まっている電荷を排出する必要がある。このため、ゲーティングの繰り返し周波数は、ゲーティング速度に比べて数桁低くなる。市販品では最大10kHzであった。今回は128×128の領域の撮影速度が13.5kHz(13,500pps)であるので、ここまではカバーできるようにゲーティング周波数を15kHzにまで上げた。

ゲーティングを行わないでIIを開けたままにしておく場合は、撮影速度を上げて問題はない。ただし、残像が出る可能性がある。

以上改造点をまとめる。

- ①蛍光材料をP20からP24とした。
- ②MCPと蛍光面との距離を0.5mmから1.0mmに変え、加電圧を6kVから8kVに上げた。
- ③ゲーティング繰り返し周波数を10kHzから15kHzに上げた。

#### e) ICメモリーによる記憶装置

撮影された画像信号は撮影後すぐにAD変換され、画像構成することなく、いわば垂れ流しのデジタル信号としてICメモリーに記録される。画像は撮影終了後に内蔵のマイコンで構成する。また記録されたデジタル信号をそのまま出力し、電子計算機で処理することもできる。

記憶枚数は標準で1,000枚であり、ボードの追加により5,000枚まで拡張できる。よって記録時間は4,500ppsに対して標準で約0.22(≒1/4,500)秒、最大で約1.1秒である。ただし、フレームレートはコマ落としにより小さくできる。例えば、500ppsとすれば最大10秒間の撮影ができる。

#### f) 上書き操作と画像トリガー

記憶はエンドレス上書き方式である。例えば記憶枚数が1,000枚のとき、1,001枚目の画像は1枚目のメモリー上に記録される。トリガーがかかるとこのような上書き操作が停止する。

1,000枚記憶の場合、現象生起の前後0.22秒間にトリガー信号を発する必要がある。強い光、電気信号、音を生ずる現象では、これらをトリガー信号として利用できる。しかし、例えば、顕微鏡下のいつ起こるか分からない現象等、そうでない場合は適当なタイミングでトリガー信号を出すことはきわめて難しい。

著者らは現在、ビデオトリガー(画面の指定された領域で平均輝度の変化があると電気信号を発する装置)

を取り付けて、画像をモニタリングし、画像変化があると上書き操作を停止するシステムにしている。

#### g) 3台の高速ビデオカメラによる撮影

以下の目的のために、3台の高速ビデオカメラを同時に製作した<sup>6),8)</sup>。

- ①3次元撮影、②3断面撮影、③カラー撮影(3波長撮影)、④遅延同期による超高速撮影

3断面撮影としてはある現象を、ミクロ、ローカル、マクロに同時撮影する場合等がある。1つのレンズから入った同一の画像を3方向に分ける装置を作り(これも試作した)、各光路にR、G、Bフィルターを入れれば簡単にカラー撮影や、複数波長域での撮影ができる<sup>8)</sup>。例えば著者らは、アルゴンイオンレーザーを使って、青(488nm)、緑(514nm)、蛍光(520nm以上の波長)での同時撮影に用いている。またMCP型IIの超高速ゲーティング機能を使い、ゲーティングのタイミングを1/(10万~1千万)秒程度ずらすと、1/(10万~1千万)秒のフレームレートで3枚の連続画像が得られ、超高速マルチフレーミングカメラとなる。

## (2) 水工学および土木関連分野への適用例

### a) 検討対象

カメラの利用可能性や問題点を探るために、試作当初より、できるだけ多くの研究者にお願いして、種々の現象を撮影して頂いている<sup>9)~17),31)</sup>。3台作ったことにより、前節2.(1)g)項で述べた当初の目的よりは、このように多方面でお使い頂くことに役立っている。

表-1には、これまでの様々な適用例のうち、土木工学、および機械工学などの土木の関連分野における適用例を示す。

用途としては流体力学(燃焼等を含む)に対する適用例が多い。トンネルの切り羽の崩壊実験に使った例もあるが、今後このような土砂崩壊実験や地震による液状化などの実験に使われる例は増えると思われる。

以下に近畿大学のカメラを使って具体的な研究成果が得られた例を示す。著者らの専門の関係で流体計測への適用例が多くなっている。

### b) 水表面に衝突した水滴による水運動

#### 目的

最終的には雨滴、飛沫による水表面の気体の取り込み機構の解明を目的にしている。本例では、直径約4.6mmの水滴を、1~45cmの高さから自由落下させ、表面付近の水運動を観察した<sup>12)</sup>。

#### 実験装置の概要

水槽はアクリル樹脂製で、直径35.5cmの円筒水槽が、幅40.0cmの正方形水槽に入っている。

0.5mmのメスピペットの先端を加工し、ノズルとした。上端には電磁弁を直列に2個取り付けて、0.02

表-1 土木関連分野における適用例 (著者らが撮影に協力した例より)

分類	対象	撮影の成否	必要フレームレート(pps)	問題点
	現象			
固体	材料の衝撃破壊	一部成功	$10^5 \sim 10^6$ $10^6 \sim 10^7$	クラック発生順序の撮影: 成功 クラック進展撮影: 速度不足
	トンネル切り羽の崩壊	成功	$10^3 \sim 10^4$	
流体	渦輪の水表面衝突	成功	$10^3 \sim 10^4$	
	衝撃波の干渉	困難	$10^6 \sim 10^7$	撮影速度不足
	渦輪の乱流遷移	成功	$10^3 \sim 10^4$	
	液滴の水表面衝突	成功	$10^3 \sim 10^4$	
	転波列	可能性あり	$10^3 \sim 10^5$	薄層の撮影
	気泡の水表面での崩壊	一部成功	$10^4 \sim 10^6$	フィルムスプレーでは解像力不足
	キャピテーション	困難	$10^6 \sim 10^7$	撮影速度不足
	水中の固体粒子群の沈降	可能性あり	$10^3 \sim 10^5$	固体粒子群中流れ: 撮影困難
	回転円管中の気波2層流	可能性あり	$10^4 \sim 10^6$	気泡が多いときの撮影困難
	透過性構造物内の振動乱流	成功	$10^3 \sim 10^4$	水と構造物の屈折率整合
	火炎混合過程	成功	$10^4 \sim 10^5$	
人体	走者の足の運動	成功	$10^3 \sim 10^4$	

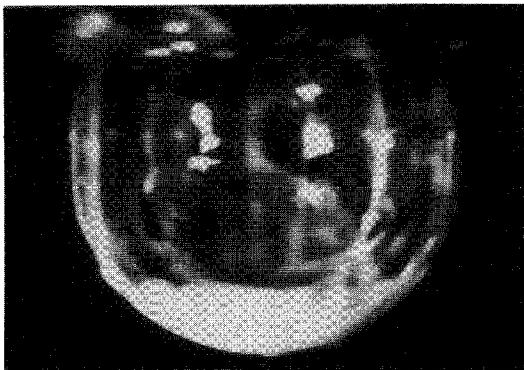


写真-1 液滴の水表面衝突 (落下距離 45cm)  
(液滴直径約 4.6mm, 液滴水表面衝突後 0.024sec)

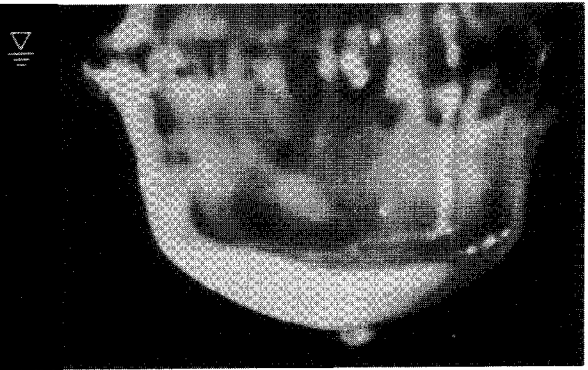


写真-2 液滴の水表面衝突 (落下距離 15cm)  
(液滴直径約 4.6mm, 液滴水表面衝突後 0.017sec)

秒間だけ両方の弁が開くようにした。この間に上部の空気が解放されて水滴が1個落ちる。水滴の大きさはメスビレットの目盛りの減少と高速ビデオカメラによる水滴の撮影の2種の方法で測定した。その結果1個の水滴の径は、 $4.60 \pm 0.09$  mm でほぼ一定であることがわかった。ただし上下左右に振動しながら落ちている。

水滴は、水の物性を大きく変えない程度に薄い白色

ポスターカラーで着色した。

#### 結果の概要

落下高さによって水中では全く違った現象が起きている。例を写真-1 (落下高さ 45 cm), 写真-2 (落下高さ 15 cm) に示す。例えば写真-2では、写真-1には見られない、キャピテーション下端から下方への元の水滴塊の一部の噴出 (一種の渦輪と見られる) が生じる。



写真-3 気泡の水表面での破裂  
(気泡直径約 2.6mm, 気泡崩壊開始後 0.00689sec)

### c) 気泡の水表面での破裂

気泡の水表面での破裂による気体輸送過程の解明を目的としている。現在のところ直径 2.59~2.65mm の気泡を、長さ精度で 1% 程度の再現性で発生させることができるようになった。

写真-3 には水表面上方から撮影した気泡破裂の写真を示す。肉眼では小さな気泡がフッと消えるだけの現象であるが、写真-3 に見られるように実はその瞬間に非常に強い上昇ジェットが生じており、これによって多くの小水滴が空中に放出されること等が観測された。

### d) 振動流の乱流測定

井田ら<sup>13)</sup>の研究に協力して撮影したものである。

テトラポッド模型を組み上げた中の振動流による乱れの画像計測を行った。テトラポッドの模型は低屈折率透明体で作成し、ヨウ化ナトリウムの溶解により水の屈折率を上げ、両者の屈折率を合わせて、可視化を可能にした<sup>8)</sup>。このとき、最大流速は 100cm/sec 程度になった。この流れを 1 個のテトラポッド模型のスケールで撮影すると、撮影領域は 7.6cm 四方程度となる。このとき必要な撮影速度 (フレームレート、推定法は 3.(1)b) 参照) は最低でも 130pps 程度となり、高速ビデオカメラによる撮影が不可避となった。今回の計測では 750pps で撮影を行っている。

### e) トンネル切り羽の崩壊

久武らによる成果である<sup>14), 15)</sup>。標準砂の砂層に直径 13 cm のトンネルを作り、支え板を手前に引いて切り羽を崩壊させる。これを CEM (DEM の 1 種) で数値解析した結果と比較した。

今回高速ビデオカメラを用いることにより、急激な崩壊の計測が可能になり、数値計算結果等との直接的な比較が可能となった。また崩壊範囲のみならず、崩壊の進行過程までが撮影できた。

### f) 硬石膏板の衝撃破壊

臺丸谷らの研究に協力して撮影したものである<sup>16)</sup>。

石膏板に衝撃力を加えると、その衝撃力の大きさや試験体の形状等によって種々の破壊パターンが現れる。これまでは破壊後の破片を組み合わせて元の形状を再現することにより、最終的な破壊パターンを調べていた。この場合、破壊が一瞬のうちに生ずるため、破壊線 (複数) の発生順序を知ることが困難であった。

破壊線の発生順序は次のような意味で非常に重要である。破壊線が 1 本生じると、弾性波の伝達はその破壊線で阻害されるので、次の破壊線の発生は第一の破壊線の位置や形状に左右される。

高速ビデオカメラによる撮影により、破壊線の発生順序を確認することができた。各破壊線はクラック (亀裂) として進展するが、それが試験片のどちらの端から発生するかについても得られた画像よりおおよそ推定できる。

ただし、クラックの進行速度までは今回の高速ビデオカメラでは計測できない。

### (3) 問題点と改良の方向

上記のような適用経験から表-2 のような問題点と改良の方向が明らかになってきた<sup>17)</sup>。撮影速度不足が最も大きな問題である。しかし、本質的に本機の改良ではこの問題は解決しない。これについては次節 (第 3 節) で改めて検討する。それ以外の点については、本機の方式を採用して、改良することにより解決することができる。これらの改良案については表-2 の右欄に説明している。

## 3. 超高速連続撮影

### (1) 高速撮影の用途に関するアンケート調査

#### a) アンケートの概要

近畿大学のカメラの使用経験で 4,500 pps では速度不足となる例が多かった。これを解決するにはより高速のビデオカメラを開発せざるを得ない。その基礎資料を得るために、高速撮影の用途や撮影条件についてアンケート調査を行った。

文部省の大学教員名鑑<sup>18)</sup>から研究対象を考慮して約 500 名の教員を選んだ。また通産省の研究所名鑑<sup>19)</sup>から国公立および企業の研究所約 200 を選び、合計約 500 通のアンケートを送付した。以下の簡単な内容のアンケートとした。

① 高速撮影が役立つ可能性はあるか ② 用途 ③ 必要フレームレート ④ 照明等撮影時のその他の制約

合計約 1,000 通のアンケートに対して約 30 % の回答を頂いた。そのうち、「関係ない」と答えた回答を除

表-2 問題点と改良の方向(近畿大学での使用経験より)

問題点	改良の方向
高速化	新たな撮像素子の開発が必要
高解像度化	新たな撮像素子の開発が必要
自動トリガー	現在は外部に取り付けているのでかさばる 内蔵型の装置が必要
カラー化	容易, MCP型II内蔵の場合についても検討中
MCPと撮像素子の結合法	振動等でずれ, ノイズの原因となる
振動, 温度, 電磁波等の影響	総合的な対策が必要
コードの長さ, 接合部の問題	コード長不足, ノイズの原因, 電液によるモニタリング等
デジタル画像の転送の問題	ワークステーションへの直接転送手段が必要
並列読みだしによる縞状のノイズ	0補正の他に勾配補正が必要, あるいはユーザー補正
4500枚/秒以下での露光時間	現在固定されている

く, 約 200 通について用途やフレームレート, 制約等を整理した。

b) フレームレートの推定法

著者らは, 最低限必要な撮影速度(フレームレート)を以下のような考え方で推定することを提案する。

- ① 移動: 同一撮影領域の中に撮影対象物が連続5~10枚写っている。
- ② 連続的变化: 撮影対象変動を代表する周波数の5~10倍
- ③ 単発的変動: 継続時間の逆数の5~10倍。

例えば速度Vで移動中の撮影対象物が長さLの撮影領域の1/10を進む時間は,  $1/10 \cdot L/V$  である。連続10枚の画像があれば速度や加速度も計測できる。

以上は1画面ごとに画像を止めて計測を行うか, もしくは5pps程度のスローモーション再生で観察を行う場合であって, 通常の30ppsの速度で再生するときにはさらに10倍程度のフレームレートを必要とする。

c) アンケート結果

用途

用途を表-3の様式で整理した。全部でA4で4ページの表となった<sup>20)</sup>。

表-3には各用途に対する必要フレームレートも併記しているが, これは回答を参考にして著者らが修正したものである。

必要フレームレート

図-1には全用途に対する必要フレームレートの分布を図示している。

用途の40%以上が $10^5$ pps以上のフレームレートを必要とする。また $10^6$ ppsで95.2%,  $10^7$ ppsで99.4%のユーザーの希望が満たされることがわかる。よって次期超高速ビデオカメラを作るとすれば, メガヘルツ連

開発した4,500ppsのビデオカメラで撮影可能  
提案の1,000,000ppsのビデオカメラで撮影可能

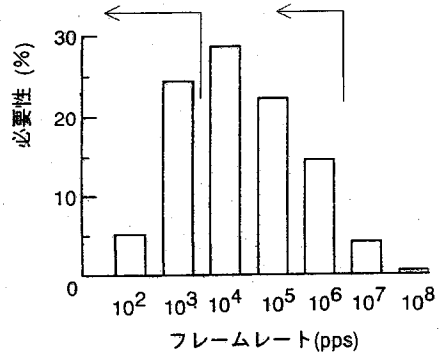


図-1 必要フレームレートの分布(アンケート結果)

続撮影(3.(2)a)), すなわち $10^6 \sim 10^7$ ppsの撮影速度を目指す必要があることがわかる。

d) 撮影上の制約

指摘された撮影上の制約を, 撮影システムの性能向上で対応すべき事項と, 撮影環境(の改善)にも強くかかわる事項に分類した(表-4)。

照明もしくは高感度が最も強く要望されている。撮影対象現象との同期撮影も要望が強い。これらについては著者らが開発したビデオカメラの設計, 改良時にも十分配慮している。

表-3 高速撮影の用途と必要フレームレート(アンケート結果)

分類		撮影対象	必要フレームレート(pps)
流 れ 体	乱流・渦	<ul style="list-style-type: none"> <li>・乱流現象(第二種二次流れ)</li> <li>・乱流バースティング現象</li> <li>・噴流</li> <li>・渦(発生, 発達, 二次衝撃波)</li> </ul>	$10^2 \sim 10^4$ $10^3 \sim 10^4$ $10^3 \sim 10^6$ $10^3 \sim 10^5$
	物体周囲の流れ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・物体後流中の流れ(高速艇, 橋など)</li> <li>・ガスタービン内の流れ</li> <li>・回転翼(ヘリコプター等)後ろの流れの渦</li> <li>・クロスフロー風車等の内部の流れ</li> <li>・弾性振動翼周りの流れ</li> <li>・超音速流れ線の測定(バリスティック模型)</li> </ul>	$10^2 \sim 10^5$ $10^4 \sim 10^6$ $10^4 \sim 10^5$ $10^3 \sim 10^5$ $10^4 \sim 10^5$ $10^4 \sim 10^5$
	砕波	<ul style="list-style-type: none"> <li>・沿岸域の砕波</li> <li>・砕波の計測</li> </ul>	$10^3 \sim 10^4$ $10^3 \sim 10^4$
	二相流	<ul style="list-style-type: none"> <li>・乱流中の粒子の飛散</li> <li>・土粒子などの流れ</li> <li>・気液または液液二相流界面現象</li> <li>・二相流(水と空気)ジェット内の気泡の挙動</li> <li>・地震時の砂の液状化機構</li> </ul>	$10^2 \sim 10^4$ $10^3 \sim 10^4$ $10^3 \sim 10^5$ $10^4 \sim 10^5$ $10^3 \sim 10^4$
	噴霧	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高速液体噴流の微粒化の過程</li> <li>・高速印刷時のインキの噴出</li> <li>・ディーゼル噴霧</li> <li>・燃料噴霧</li> </ul>	$10^2 \sim 10^6$ $10^3 \sim 10^6$ $10^3 \sim 10^6$ $10^5 \sim 10^6$
	気泡流	<ul style="list-style-type: none"> <li>・キャビテーション(小気泡の挙動)</li> <li>・ロケットポンプ内の非定常キャビテーション</li> <li>・油膜の破れ, 蒸発</li> <li>・気泡の成長, 破裂</li> </ul>	$10^2 \sim 10^6$ $10^3 \sim 10^6$ $10^3 \sim 10^6$ $10^5 \sim 10^6$
衝撃波	<ul style="list-style-type: none"> <li>・衝撃波伝播(回折, 反射, 吸収, 屈折)</li> <li>・衝撃波による気泡, 液滴の挙動</li> <li>・衝撃波と境界層との干渉</li> </ul>	$10^2 \sim 10^7$ $10^5 \sim 10^7$ $10^4 \sim 10^8$	

(大学については以下2ページ省略。国公立・企業の研究所についても同様の表ができています。)

## (2) メガヘルツ連続撮影

### a) 定義

高速撮影の用途に関するアンケート結果 3.(1)c) により明らかなように、 $10^6 \sim 10^7$  pps までの連続画像撮影機器の要望が高い。 $10^6 \sim 10^7$  pps で連続画像を撮影することを「メガヘルツ(MHz)連続撮影」と呼ぶことにする。この要望を満足する高速撮影装置について整理、分類し、それらの性能を評価する。

### b) 分類

#### 性能評価の規準

高速撮影機器の評価の基準として、2(1)a)で下記の11条件を上げた。

- ①フレームレート, ②感度, ③解像力, ④フレーム数,
- ⑤再生の容易さ, ⑥カラー, ⑦現象生起との同期, ⑧複数の機器の同期撮影, ⑨無歪, ⑩デジタル記録, ⑪コンパクトさ

以上に加えて、費用(⑬購入価格, ⑭ランニングコスト)も重要な評価項目となる。以下では機器の原理の紹介とともに、これらの評価基準から見た優劣比較を

行う。

#### フレーム数

連続撮影可能フレーム数について検討する。

著者らはフレーム数により、高速撮影機器を表-5のように分類した。1枚の画像の場合は、高速ストロボやパルスレーザー等による重ね撮影となる。

連続2枚以上10枚程度まで撮影可能な機器をマルチフレーミングカメラと呼ぶ。このうち、フレーム数が2~3枚の場合は機器の製作においては、高速カメラを並列に使うなどの方法により、比較的容易に実現できる。10枚程度の場合は、後述のイメージコンバータ型マルチフレーミングカメラのような特別な工夫が必要になるので、分けて表示している。それでも10枚程度の連続画像からは動画は得られない。並べられた連続静止画像から必要な情報を読み取って行く。

一方、300枚以上の連続画像があると、30ppsで10秒以上の動画として見せることができる。

科学計測を目的とする場合においては、5pps程度であっても、動画で再生できる。多少は画像がぎくしゃ



表-4 撮影上の制約・要望 (アンケート結果)

事 項		件 数			備考
種 別	制約・要望	大学	研究所	計	
カメラの性能向上に関する件	感度の向上	12	17	29	照明と関係
	分解能の向上	9	5	14	
	広ダイナミックレンジ カラー化		2	2	容易
制御部	トリガー	2	7	9	問題ない
	総フレーム数増 2台以上の同期撮影	4 1	1	5 1	問題ない
光学系等	顕微鏡下・接写	1	2	3	問題ない
	特殊フィルタ装着	2	2	4	問題ない
	X線, 赤外線撮影	1	2	3	素子にも関係
	電子顕微鏡撮影		1	1	
撮影環境に関する事項	高温下撮影		1	1	カメラ外部からの保護, 内部の改良, 光学系の 改良等で総合的に対処 することが必要。  感度の項に含めている。
	超低温低温下撮影	2		2	
	小さい場での撮影		3	3	
	生体内の撮影		1	1	
	塵芥の多い場		1	1	
	振動場		1	1	
	高重力下		1	1	
	水中撮影	2	1	3	
	耐放電ノイズ 低・冷照明撮影		1	1	

くするが、科学者が動画像として認識するには差し支えない程度である。連続画像が 50 枚以上あると、5 pps で再生すれば、連続 10 秒以上の動画像が得られる。よって著者らはフレーム数が 50 枚以上の場合の電子式カメラを、マルチフレーミングカメラと区別して、ビデオカメラと定義している。

### c) 既存の機器

#### 高速映画用フィルムカメラ

フィルムを用いる高速映画撮影では、通常フィルムはドラム上に固定し、ドラム自体を高速回転させる方法や、レンズの後ろのプリズムを回転させて光路を高速回転させ、扇状の面に貼られたフィルム上に結像する方法、これらを組み合わせた方法等がある。わが国では植村、山本らにより技術開発が進められた。

長所は次のとおりである。

- ③解像力は比較的高い。
- ④連続 100 枚程度の撮影が可能であり、動画像による再生もできる。
- ⑥カラー撮影も可能である。

欠点は次のようなものである。

- ②感度が不十分で強い照明が必要である。
- ⑤現象するまで写ったかどうか確認できない。
- ⑦現象生起とシャッターリングとの同期が難しい。
- ⑧複数カメラ間での撮影同期が難しい。
- ⑬写るまで多量のフィルムを消費する。

各項目の前の○数字は先述 (3.(2)b)) の評価基準の番号を示す。以下の機器の説明においても同様である。

最近では、機械的なシャッターリングの代わりに連続パルスレーザー等を用いて、照明された瞬間に光が当たっているフィルム面に飛び飛びに連続画像を撮影する方法が開発されている。

#### 高速ビデオカメラ

著者らの開発した高速ビデオカメラの長所、欠点については 2.(1) に述べた。これは市販のものとしては現在でも世界最高速である。しかしながら表-2 に示したような改良すべき点がある。この表を最初に提示したのは 1993 年 12 月であったから、その後これらの点を改良したビデオカメラが開発・市販されはじめている。それらと著者らの開発したビデオカメラの特徴を比較した例を表-6 に示している。

現時点でも著者らのシステムが優れている点は、初めから、MCP 型 II を撮像素子に直結するように設計している点である。これにより、画質は少し荒れるものの数 100 mlux という微光下で、4,500 pps の高速撮影が可能となっている (通常は数 100 lux 必要)。一方、従来、II を付けるとカラー化が困難になるとされてきたが、著者らは IC へのデジタル記録機能を使って、MCP 型 II 付きビデオカメラのカラー化技術も提案している<sup>21)</sup>。

表-5 メガヘルツ撮影

総フレーム数		1	2~3	10	50~	300~			
機器の名称	フィルム式	スチールカメラ	マルチフレーミングカメラ			高速映画用カメラ			
	電子式	メガピクセルCCDカメラ				高速ビデオカメラ			
撮影再生の手法		1枚の画像上で重ね撮影	連続静止画像の解析			動画像再生 なめらかな動画像再生			
代表的な機器	フィルム式	マルチストロボ撮影 (パルスレーザ等)	カメラ2~3台の組み み合わせで容易に作 製可能	クランツシャルデン カメラ	ドラムカメラ	(未開発)			
	電子式	ストロボ式電子顕微鏡		イメージコンバータ 型マルチフレーミン グカメラ (電子式クランツシ ャルデンカメラ)	(未開発)				
特 徴	方式	フィルム式	電子式	フィルム式	電子式	フィルム式	電子式	フィルム式	電子式
	①フレームレート	-	-	x	x	o	o	o	o
	②感度	o	o	o	o	o	o	o	o
	③解像力	o	o	o	o	o	o	o	o
	④総フレーム数	-	-	x	x	x	x	x	x
	⑤再生の容易さ	-	-	x	x	x	x	x	x
	⑥カラー化	o	o	o	o	x	x	o	o
	⑦現象生起との同期	o	o	o	o	o	o	o	o
	⑧複数機器の同期	-	-	o	o	o	o	o	o
	⑨無歪	o	o	o	o	x	o	o	o
	⑩デジタル記録	x	o	x	o	x	x	x	x
	⑪コンパクトさ	o	o	x	x	x	o	o	o
	⑫購入価格	o	o	o	o	o	o	o	o
	⑬ランニングコスト	o	o	o	o	o	o	o	o
	市販の機器	フィルム式	市販のカメラで可能	市販のカメラで可能			積原式 植村式 cordin製(米国)		なし
電子式		阪大工学部電子ビーム研 究施設で試作	市販のカメラで可能			TRN製, IMACON製, NAC製		なし	

表-6 高速ビデオカメラ

方式	素子	解像度 (フルフレーム)	フレームレート(pps)		総フレーム数 (標準設定)	記録方式	カラー	感度	その他	メーカー名
			フルフレーム	分割領域						
著者らの方式	MOS	256×256	4,500	40,500 (64×64)	1,000枚 (256×256)	IC上にディジ タル記録	白黒	極めて高感度 (MCP型II内蔵)		フォトロン社 コダック社
NAC方式	CMD	580×434	500	2,000 (260×234)	1,600枚 (580×434)		カラー		耐高G下 撮影	NAC社
ワインバー ガー方式	CCD	512×512	1,000	3,500 (512×128)	250枚 (512×512)		白黒		耐高G下 撮影	ワインバーガ ー社

イメージコンバータ型マルチフレーミングカメラ

イメージコンバータ型マルチフレーミングカメラは、光を光電面で電子流に変え、電子レンズで結像面である蛍光面の一部に結像させ、電子レンズの水平、鉛直方向制御電圧を急変させることにより、蛍光面上の結像部を移動させ、複数の連続画像を1枚の蛍光面上に結像させるという機構である。

長所は以下のとおりである。

- ①10<sup>7</sup>ppsの高速撮影が可能である。現在最も強力なMHz連続撮影機器である。
- ②通常、電子流の経路中にMCPを内蔵させているの

で、極めて高感度であり、メガヘルツ連続撮影においても過度の照明を必要としない。

欠点は以下のようなものである。

- ③枚数に逆比例して蛍光面上の1枚の画像のサイズが小さくなり、解像力が落ちる。
- ④連続撮影枚数が10枚程度で動画像を構成できない。
- ⑥カラー化が難しい。
- ⑦現象生起との同期が困難である。
- ⑨画像歪が生じる。

クランツシャルデンカメラ

10個程度の光源と同数の独立のカメラを持ち、光

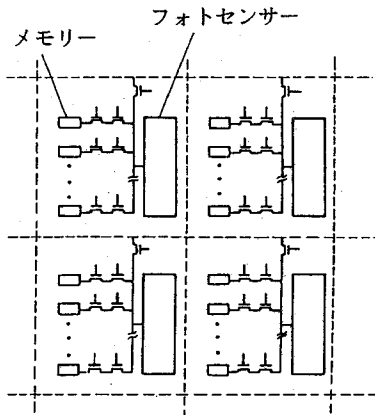


図-2 メモリー内蔵型撮像素子

源 1 から撮影対象物を通過した光はカメラ 1 に入るように、光源 2 からはカメラ 2 に入るようになっている。各光源の光る瞬間とカメラのシャッタリングを同期させることにより、10 枚程度の高速連続撮影を行う。最近では、CCD カメラを並べた電子式クラウンツシャルデンカメラも開発されている<sup>22)</sup>。

#### マルチフレーミングビンホールカメラ

土木工学で利用される可能性はないが、世界最高速のマルチフレーミングカメラである<sup>23)</sup>。

現在、170ps (1/58 億秒) での撮影が可能である。このためには撮影ターゲットが極度に明るいものに限られる。現在、レーザー核融合のベレットの爆縮などの撮影に成功している。

#### d) 開発中の機器

##### 画素内記録型高速撮像素子の提案

これは各画素の 1 つ 1 つの中にそれぞれ複数のメモリーを用意し、各画素の第 1 メモリーに第 1 画像を、第 2 メモリーに第 2 画像を記録することにより、画像情報を画素外に読み出すことなく超高速に記録するという方式である (図-2 参照)<sup>24)~27)</sup>。これによれば原理的にはトランジスターのゲーティングのスピードまで高速化することが可能である。

##### PHB 型超高速ビデオカメラ

光永<sup>28)</sup>により、最近提案された方法で画期的な超高速ビデオ撮影技術になる可能性がある。

パーシステントホールバーニング (Persistent Hole Burning: PHB) と呼ばれる現象を利用している。理論上はサブナノ秒の速度で、数千万枚の画像を記録することができる。現在のところ、以下のような問題が残っている。

②コンパクトで強い波長可変レーザーが必要。

①結晶の液体ヘリウムによる冷却が必要なため、コンパクトにできない。

#### e) 高速撮影機器の用途と選択

##### 用途と機器の位置づけ

種々の観点から高速撮影の用途と機器を位置づけ、図表等の形で表しておくとう便利である。表-5 はメガヘルツ撮影手段とそれを 3.(2)b) で述べた性能評価基準で評価したものである。ただし、評価は著者らの主観的判断による。

安藤は、フレームサイズと運動の速度を用いて用途を分類している<sup>29)</sup>。この表示は一般的解説用としては分かりやすい。

技術者、研究者を対象とする場合は、フレームサイズと運動速度の関係は、必要フレームレートとして一つのパラメータにまとめられるので、フレームレートと他のパラメータの関係で表示しておく方がよい。

著者らは、高速撮影機器のフレームレートと総フレーム数、感度、および解像度の関係から機器と用途の分類を行った。一例として図-3 にはフレームレートと総フレーム数の関係から、機器を分類したものを示している。

##### 機器選択の方針

連続撮影のためには現在のところ、基本的には  $10^4$  pps 程度までは高速ビデオカメラ、 $10^4 \sim 10^7$  pps はイメージコンバーター型マルチフレーミングカメラを使うのが有効である。広報用等、より高画質の映像が必要などときがあるが、この場合は現象の確認後、フィルムによる撮影を併用するとよい。ただしフィルムによる超高速撮影においては、それを専門とする研究者<sup>4),5)</sup>と共同撮影するか、専門家<sup>30)</sup>に依頼する方がよい。

1 枚の画像であれば、フィルムと特殊照明 (パルスレーザー等) により高画質の画像が得られる。

#### 4. おわりに

水流の可視化計測を目的として、4,500 pps の高速ビデオカメラを開発した。

これを用いて、流れの可視化だけでなく、できるだけ多くの高速現象を撮影することを試みた。そこで得られた経験を取りまとめた。

問題点も明らかになった。最大の問題点は速度不足である。よって新たなより高速のシステムを開発することを前提として、高速撮影の用途、撮影条件などについてアンケート調査した。用途の 90% 以上は  $10^6 \sim 10^7$  pps のシステム (MHz 連続撮影) で対応可能であることがわかった。これを解決するために現在使える手段とその問題点を整理して示した。

PTV の実用化には、粒子の自動追跡アルゴリズム

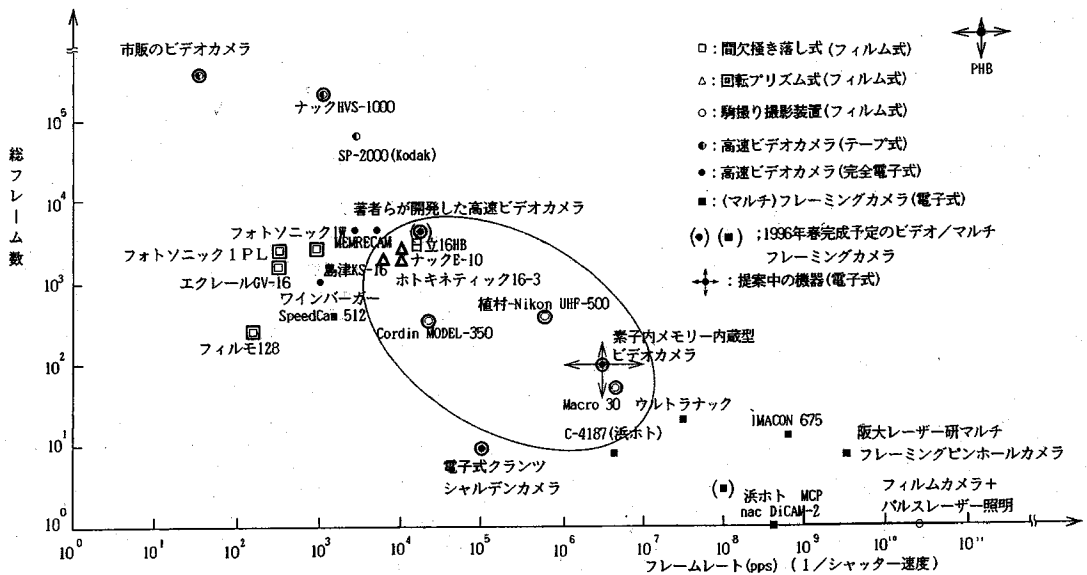


図-3 高速連続撮影装置のフレームレートと総フレーム数による分類 (精円の線で囲んだ領域に電子式撮影装置の空白領域がある.)

の開発と同時に、より高性能の高速ビデオカメラを開発することが必要不可欠である。開発目標は以下のとおりである。フレームレート  $10^6$  pps, 総フレーム数  $10^3 \sim 10^4$ , 解像度  $1000 \times 1000$  pixels, かつ高感度。今後さらなる開発努力が必要である。

### 補遺 I イメージインテンシファイア

イメージインテンシファイア (以下 II と呼ぶ) にはイメージコンバータ型と MCP 型の 2 種類がある。

イメージコンバータ型は光電面で光を電子流に変えた後、高電圧で加速して、蛍光面に衝突させることにより、高ゲインを得る。イメージコンバータ型は、いわゆる糸巻き歪が大きく、MCP 型に比べて装置も大型化する。

MCP 型<sup>7)</sup>は、電子流を光電面のすぐ後方に置かれた、直径  $10 \sim 20 \mu\text{m}$  程度の細孔が多数並んだ、厚さ数  $100 \mu\text{m}$  のガラス板に入射させる。孔の表面には特殊なコーティングがしてあり、孔の壁面に電子が 1 つ衝突すると、多くの 2 次電子が飛び出す。それらがまた壁面に衝突すると、いわゆるアバランシュ効果により、多数の電子が発生する。MCP 面の後方数  $100 \mu\text{m}$  には蛍光面が置かれている。この間に MCP から出てきた電子流を加速し、蛍光面に衝突させる。 $10^4$  程度という極めて大きなゲインが得られる。また、光電面と MCP 面の間にかけた電圧を切ると、光電面で発生した電子が

MCP に届かなくなり、シャッターを閉じたことと同じになる。これを利用して、最高  $3\text{ns}$  程度の早さでゲーティングを行うことができる。

### 補遺 II 総合解像力

標準的 MCP 型 II の解像力は最良の条件で  $23 \text{ lp/mm}$  (ラインペア) である<sup>7)</sup>。これは白と黒の線 1 対 (ラインペア) が  $1\text{mm}$  中に  $23$  組分離識別可能ということを意味する。これを撮像素子の画素ピッチに換算するには、lp の逆数を取り  $1/2$  倍すればよい。 $1/2$  倍するのは、白、黒それぞれの線を撮影するのに各 1 列 (個) の画素が必要だからである。このとき、換算画素ピッチは以下のようになる。

$$\frac{1}{23} \times \frac{1}{2} = 0.0217\text{mm} \approx 22 \mu\text{m}$$

上記の値は MCP 型 II の蛍光出力窓の解像力である。本文 2.(1)d) で述べたとおり、今回用いたものは、MCP と蛍光面の距離を離しているため解像力はもう少し低下し、最良でも  $30 \mu\text{m}$  程度と推定された。

MCP 型 II と撮像素子とはファイバーガラスで結合する。この結合による光の分散を考慮すると、総合解像力は画素ピッチ換算で  $30 \sim 40 \mu\text{m}$  と推定された。完成後のチェックでも同程度の値になっていることが確認された。

参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会衝撃問題研究小委員会編：構造物の衝撃挙動と設計法，構造工学シリーズ6，1994.
- 2) 特殊撮影特集，テレビジョン学会誌，Vol.46，No.5，pp.543 - 577，1992.
- 3) 江藤剛治：4,500 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) 植村恒義，山本芳孝：最近の高速度写真技術(1)，機械の研究，第28巻，第1号，pp.33 - 38，1976.
- 5) 植村恒義，山本芳孝：最近の高速度写真技術(2)，機械の研究，第28巻，第2号，pp.15 - 20，1976.
- 6) 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-34，1996.
- 7) 浜松ホトニクス(株)：高速ゲートイメージンテンシファイア C2925 テクニカル・データ・シート.
- 8) 江藤剛治，竹原幸生，横山雄一，井田康夫：水流の可視化に必要な関連技術の開発-比重整合・屈折率整合・多波長計測，土木学会論文集，No.533/II-34，1996.
- 9) Oki, S., Gohda, S. and Furukobo, K.: Measurement of spraying particle behaviors by high speed video camera, *Proc. of ITSC'95*, (to be published).
- 10) 井田民男，大竹一友：超高速ビデオカメラシステムによるラグランジュの時系列乱流拡散火炎混合過程の実験的研究，日本機械学会論文集投稿中.
- 11) 江草利昌，佐川和則，竹原幸生：硬式テニスボールの衝突現象の高速度ビデオカメラによる計測と解析，スポーツ工学シンポジウム1992講演論文集，No. 920-89，pp.81 - 86，1992.
- 12) 江藤剛治，竹原幸生，岸田義広：水表面に衝突する液滴の可視化，可視化情報，Vol.12，Suppl. No.1，pp.215 - 218，1992.
- 13) 井田康夫，榎木亨，須貝輝博：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，海洋開発論文集，Vol.10，pp.307 - 312，1994.
- 14) 久武勝保，村上敏夫，谷山徳二，江藤剛治：トンネル切羽の動的崩壊挙動の高速ビデオ撮影とそのCEM解析，第29回土質工学研究発表会，1994.
- 15) 久武勝保：トンネル切羽の安定・崩壊挙動に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.517/III-31，pp.105 - 115，1995.
- 16) Daimaruya, M., Kobayashi, H. and Syam, B.: Fracture initiation and development in plaster plates under impacts, *DYMAT Journal*, Vol. 11, No.4, pp.1 - 10, 1994.
- 17) 江藤剛治，竹原幸生：近畿大学における高速ビデオカメラの利用例，高速度撮影とフォトニクスに関する総合シンポジウム1993講演予稿集，pp.140 - 143，1993.
- 18) 文部省：大学教員名鑑
- 19) 通産省：研究所名鑑
- 20) Etoh, T. and Takehara, K.: Needs, requirements and new proposals for ultra-high-speed videocameras in Japan, *Proc. of the 21th International Congress on High Speed Photography and Photonics*, SPIE Vol. 2513, pp. 231 - 242, 1995.
- 21) 江藤剛治，竹原幸生：MCPのカラー化，近畿大学理工学部研究報告，第27号，pp.151 - 156，1991.
- 22) Bretthauer, B., Meier, G.E.A. and Stasicki, B.: An electronic Cranz-Schardin camera, *Rev. Sci. Instrum.*, 62(2), pp.364 - 368, 1991.
- 23) Katayama, M., Nakai, M., Yamanaka, T., Izawa, Y. and Nakai, S.: Multi x-ray imaging system for temporally and spatially resolved measurements of imploding inertial confinement fusion targets, *Rev. Sci. Instrum.*, 62(1), pp.124 - 129, 1991.
- 24) Etoh, T. and Takehara, K.: Ultra high-speed multi-framing camera with an automatic trigger, *Ultrahigh- and High-Speed Photography, Videography, and Photonics '92*, SPIE Vol.1757, pp.53 - 57, 1992.
- 25) 江藤剛治，竹原幸生，川尻みどり：高速撮影の用途に関するアンケート調査と3,000万枚/秒のビデオカメラの提案，高速度撮影とフォトニクスに関する総合シンポジウム1993講演予稿集，pp.105 - 108，1993.
- 26) Elloumi, M., Fauvet, E., Goujou, E., Gorria, P., Cathebras, G. and Robert, M.: The study of a photosite for snapshot video, *Proc. of the 21th International congress on High Speed Photography and Photonics*, SPIE Vol. 2513, pp.259 - 267, 1995.
- 27) 森本吉春，田中正夫，瀬口靖幸，野口浩，大場信弥：高速度ビデオカメラの試作と材料の動的変形挙動の研究，文部省科学研究費補助金試験研究(1)報告書，1991.
- 28) Mitsunaga, M., Uesugi, N., Sasaki, H. and Karaki, K.: Holographic motion picture by  $\text{Eu}^{3+} : \text{Y}_2\text{SiO}_5$ , *Optics Letters*, Vol. 19, No.10, pp.752 - 754, 1994.
- 29) 安藤幸司：光と光の記録。(株)ナック，1994.
- 30) (株)サンビコ：高速現象撮影・解析。(株)サンビコ・パンフレット.
- 31) Matsunaga, N., Hashida, M., Mizui, H. and Sugihara, Y.: Quantity of spray transported by strong wind over breaking waves, *Proc. of 24th International Conference on Coastal Engineering*, pp.219 - 231, 1994.

(1995. 11. 22 受付)

## HIGHSPEED VIDEO-CAMERA SYSTEMS AND THEIR APPLICATIONS IN HYDRAULICS

Takeharu ETOH and Kohsei TAKEHARA

Background of development of a highspeed video-camera system by the authors in 1991 and its basic characteristics and performance are outlined. The framerate is 4,500 pps for normal mode with the resolution of 256x256 pixels, and reaches upto 40,500 pps for lower resolution of 64x64 pixels. An image intensifier with a micro channel plate is directly attached to the image sensor which makes it possible to visualize fast-moving targets even in very low illumination. Applications of the system in civil engineering have proved its efficiency and revealed some mechanics to be improved as well. A questionnaire distributed to potential users of highspeed videography all over Japan also pointed out additional improvements and suggested further development of a video-camera system of much higher framerate.