高速度撮影に関する動向*

祖山 均**, 川野聡恭***

Recent Techniques of High-Speed Observations

Hitoshi SOYAMA and Satoyuki KAWANO

1. 緒言

近年、高速度撮影装置および技術の進歩に伴い、衝撃波、燃焼、爆発、衝突、液体微粒化、キャビテーションなどの高速現象の可視化が成功裡に実施されつつある。光学顕微鏡から電子顕微鏡への観察方法が発展したのに伴って多くの新事実が発見・実証されたように、高速度撮影技術の進歩による高速度現象の可視化にも数多くの期待が寄せられている。

特に、最近の電子部品・機器の高速・高性能化による高速度ビデオカメラの高速化には目覚ましい進歩が見られる。高速度ビデオカメラは、直接デジタル画像入力でき、また、その操作性の簡易さから従来の高速度撮影装置より使いやすい装置となっており、可視化における多方面への応用が容易に可能である。

著者らは、液体が高速で流れる場合に速度エネルギーの増大に伴い圧力が低下し液体が気化して気泡を生ずる現象、すなわち、主にキャビテーションと呼ばれる現象の高速度写真・映画および高速度ビデオによる観察を行っている。特に、キャビテーションは、圧力の回復に伴い、気泡が液体にもどる時（以下では崩壊という）に金属をも破壊（壊食）する高衝撃圧を発生し、流体機械に致命的損傷を与えることから、機械の高速化において大きな障壁となっている。また、キャビテーションのタイプにより壊食率が100倍以上異なるこ

とから、いかなるタイプのキャビテーションが発生しているかを特定するために、高速度観察がきわめて重要であり、また、高速で変動するキャビテーションの挙動を観察することにより壊食機構の解明にも非常に役立っている。

一般的な可視化技法については優れたテキストが出版されている¹⁾ので、ここでは、高速度ビデオカメラを主として、高速度撮影の撮影装置、照明装置および手法について、流体科学研究所における活用例や著者らの使用上の経験を取り上げながら、最近の動向を述べてみる。

2. 撮影装置および方法

2.1 高速度ビデオカメラ

照明装置には、光源として一般にはハロゲンランプ、アルゴンイオンレーザなどの連続光を用い、可視化対象に応じてシュリーレン光学系やレーザライトシートを使用する。現在、市販されている高速度ビデオカメラの最高記録速度は40,500フレーム/秒である。

高速度ビデオカメラは、CCDでとらえた画像を半導体メモリ（あるいはビデオテープやハードディスクなど）に直接書き込む方式なので後述する他の高速度撮影装置と比較して以下のような利点がある。

- ・高速度現象の経時変化を観察できる。
- ・デジタル画像入力が可能である。
- ・高速映画などのフィルム記録方式に比べて、低照度で現象を可視化でき、また、フィルムを現像する必要がないので、ランニングコストが安く、また、撮影直後に現象を観察できる。

*原稿受付 1995年1月11日

**正会員 東北大学流体科学研究所

***東北大学流体科学研究所

- ・常に、画像をメモリに蓄えているので、トリガー回路を用いることにより確率的な現象や瞬間的な現象も容易に可視化でき、また、トリガーを現象の前、中間、後に任意に設定できる。
 - ・イメージコンバータカメラ、ドラムカメラよりも数多くのフレーム数を記録できる。
 - ・製品によっては、カラーで記録できる。
 - ・ビデオに録画しやすいので、プレゼンテーションに便利である。
- なお、性能的に不十分な点としては、
- ・イメージコンバータカメラ、ドラムカメラ、高速度映画に比べて、記録速度、シャッター速度が遅い。
 - ・フィルム記録方式に比べて画像の解像度が劣る。

シャッター速度については、イメージインテンシファイア(略称 I I)を用いることにより、シャッター速度を向上させることが可能である。特に、製品によっては、シャッター速度が1マイクロ秒のカメラもあるので、高速度現象の可視化には非常に有効であろう。しかしながら、高速度ビデオカメラの記録速度が I I の性能を上回る場合、すなわち、I I に記録された画像が消えるのに要する時間よりも早く次の画面が入力されると、画像に常に残像が生じて現象の可視化が困難となる。なお、波長により種々の I I が市販されているので、可視化対象に適した I I を選べば良好な結果が期待できよう。画像の解像度については、高速度ビデオカメラのビデオ出力信号から通常のビデオプリンターを用いて現象が明瞭に可視化できない場合も、デジタルデータから画像処理専用のカラープリンターを用いるとかなり鮮明な画像を得られる。

表 1 には、各社から市販されている主な高速度ビデオカメラの特徴を示す。ほとんど各カメラと

もに、最高速度で記録する場合の画面の大きさは、記録速度を上げるためにフルフレームの数分の一程度の分割フレームとなる。なお、A社 I 型、B社 I 型ともにフルフレーム(256画素×256画素)での記録速度は4,500フレーム/秒であり、最高記録速度の分割フレームは64画素×64画素である。また、両社の最高記録速度は同じであるが、画面の走査方式が異なるために画面の歪みに差がある。両社ともに画面を上下方向に16ブロックに分割して記録しているが、A社の場合は上のブロックからブロックごと順番に記録するのに対し、B社の場合は各ブロックの上からそれぞれ順番に記録する方式となっている。C社の製品は、カラーで記録できること、および、高速度ビデオカメラ本体がハードディスクドライブ(HDD)を内蔵していることに特徴がある。カラー画像の利点は言うまでもないが、画像データは膨大な量になるために HDD ごとカメラ本体から抜き出してパーソナルコンピュータへデータを移管する方式は便利であろう。著者らは、高速度ビデオカメラ本体から専用ボードを介してパソコンにデータを転送して、パソコンの HDD に一時的に記録し、光磁気(MO)ディスクにデータを保存しているが、パソコンへのデータ転送時、および、HDD から MO ディスクへのデータ転送時には撮影を中断しなければならない。パソコン、HDD 等の性能にもよるが、データ量が膨大(256階調、256画素×256画素の画像データを40,500フレーム/秒、0.1秒間で253Mバイト!) するために、NEC PC9821を使用している著者らの経験でも撮影の中断が数十分から数時間に及ぶことも少なくない。したがって、HDD の着脱によるデータ転送・保存という方法は撮影上非常に便利であろう。

図 1 には、東北大学流体科学研究所超高速流研究部門でキャビテーションの可視化に用いた高速度ビデオカメラ撮影装置の一例を示す。可視化対象のキャビテーションは、高速で流れる水中に生ずる微細な気泡から構成されているので、観測窓を透明アクリル製樹脂で制作し、像の歪みを極力少なくするために、測定部外側は平面かつ光学的に滑らかに仕上げている。光源には、シネキングライトもしくはアルゴンイオンレーザを用いたレ

表 1 各社の高速度ビデオカメラの特徴

メーカー	型	記録速度 (フレーム/秒)	特 徴
A 社	I	30~40,500	I I 装着 (最高速度 1 マイクロ秒)
	II	30~12,000	
B 社	I	30~40,500	I I 装着モデルあり
	II	30~2,000	
C 社	I	30~4,500	HDD 装着 カラー記録
	II	30~2,000

図1 可視化システムの概略図

図2 バタフライ弁まわりの高壊食性渦キャビテーションの様相

ーザライトシートを使用して、高速度ビデオカメラで撮影している。撮影した画像は本体のメモリに蓄えられ、専用ボードを介してパソコンに各フレームごとにデジタルデータとして転送し、さらに、ネットワークを介してワークステーションへ送り、画像処理している。図2には、高速度ビデオカメラによる撮影の一例として、バタフライ弁まわりの高壊食性渦キャビテーションを渦コアの方向から拡大して撮影した様相の経時変化を示す²⁾。ここでは、キャビテーションは、多数の微細な気泡から構成されているので、白色の雲状に見える。気泡が渦コアを中心として変形しながら回転し、やがて凝集して崩壊する様相が良く見て取れよう。これらの渦キャビテーションは、発

生する箇所が確率的であるために、これまで高速映画による拡大撮影は困難であったが、高速度ビデオカメラではモニタしながら撮影箇所を拡大でき、また、何度でも再撮影が可能なので、初めて撮影に成功したものである。

図3(口絵1参照)には、同様の渦キャビテーションをレーザライトシート光を用いて撮影した様相と、それらの画像を相関法³⁾を用いて画像処理して求めた速度ベクトルを示す。

レーザライトシート光を渦キャビテーションの渦コアと直角に照射しているので、速度ベクトルは渦コアと直角の面における速度成分を示している。なお、速度ベクトル図の1コマ目は画像の1コマ目と2コマ目の相関から求めており、以下の各コマは順次そのように求めている。画像および速度ベクトルから、まず、気泡密度の高い領域(渦コア領域)を中心として多数の気泡および渦コアが回転し、やがて回転中心に向かって収縮している様相が見て取れる。すなわち、このような解析方法により、直径数cmのキャビテーション流れの局所的速度分布の計測が可能である。いうまでもなく、従来の方法に

よるこのような高速かつ気液混相流の局所の流れ場の速度の計測は困難である。

以上のように、高速度ビデオカメラにより、従来撮影が困難であった現象も可視化でき、また、デジタル画像が得られることから画像処理により容易に速度ベクトルも得られるようになってきている。また、これらの各時刻ごとのデジタル画像を時間方向に積層化して、高速流れの準3次元流れの構造を可視化することも可能である⁴⁾。

2.2 高速度映画

前述の高速度ビデオカメラと同様な照明装置、光学系を用いて、映画撮影用フィルムに高速度で記録する。通常の映画は、24フレーム/秒であるが、高速度映画は、数万フレーム/秒程度である。

図3
レーザーライトシートによる渦キャ
ピテーションの可視化例と画像処理
により得られた速度ベクトル図

フィルムには、一般には16mmフィルムを使用し、カラーフィルムも使用でき、ビデオと異なり白黒と同様の記録速度を得られる。なお、記録速度を向上させるためには、フィルムの移動速度を上げるのと、回転シャッターの回転速度を上げる方法

がある。高速度映画の最大の利点は、その解像度であり、また、シャッター速度が記録速度の約十分の一程度であるので、鮮明な画像が得られる。特に、論文などの印刷物に用いる場合は非常に便利である。しかしながら、高速度でフィルムに記

録するために高輝度照明を必要とし、また、フィルム現像を要するために、高速度ビデオカメラに比べて撮影が困難で良好な撮影結果を得るのに時間を要する。特に、画像処理においては、別途に画像入力する必要があり、画像処理するにはデータが劣化するおそれと、デジタル化に手数と時間を要する。なお、周期的な現象（たとえば、液体薄膜の崩壊による液体微粒化現象⁵⁾）などの予測可能な現象は撮影可能であるが、高速度ビデオカメラと異なり、現象にトリガーを設定できないので、確率的な現象では可視化が困難である。

図4には、キャビテーションを伴う水中水噴流の高速映画による観察結果⁶⁾を示す。ここでもキャビテーションは微細な気泡からなる気泡雲を構成している。従来の瞬間写真を用いた高速写真観察では、さまざまな形をした気泡雲の様相が明らかにされていたが、高速映画による観察により気泡雲が周期的に放出されることが初めて明らかに

なった。なお、この放出周期は高速映画の写真を計測して求められたが、その後、高速度ビデオカメラによる観察では、デジタル画像を用いて任意の位置の画素値の経時変化の周波数解析により容易に求められるようになった。

2.3 イメージコンバータカメラ

イメージコンバータカメラ(略称イメコン)は非常に高速であることが特徴である。現在、広く普及しているタイプのイメコンでは、プラグインを交換することにより、フレーミング速度を毎秒 $1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^7$ コマ、露出時間を $20 \mu\text{s} \sim 10 \text{ns}$ の範囲で変えることができる。したがってキャビテーション気泡の生成や崩壊、気泡界面の挙動の解析といった非常に高速な現象の可視化に適している⁷⁾。しかしながら一度に撮影できるフレーム数が少ないという欠点を持ち、通常、18コマ程度である。

これらの欠点を克服すべく、高速度ビデオカメラを開発したグループによってイメージコンバータカメラの開発計画がある。これによれば、毎秒1億コマの高速度撮影が可能で、光ファイバでリンクされたパソコンのHDDにデータを書き込むタイプが製品化されるようである。これを用いれば、一度に撮影できるフレーム数が少ないという欠点が克服されそうである。

2.4 ドラムカメラ

詳細については本号の特集記事を参照されたい。

2.5 瞬間写真

照明装置には、クセノン・フラッシュランプやルビーレーザなどのせん光時間が短い光源を用いて、対象に応じた光学系やレーザライトシートを使用し、スチルカメラで撮影することにより、高速度の瞬間的な現象を可視化できる。なお、多重露光することにより、軌跡や速度を求めることも可能であり、また、周期的現象であればトリガー回路と遅延回路を用いて遅延時間を変えることにより、現象の経時変化について情報を得ることが可能である。瞬間写真は、前述の方法に比べて、現象の経時変化の可視化は困難であるが、低コストで高速度撮影が可能である。

スチルカメラのかわりに通常のビデオカメラ(CCDカメラ)を用いてビデオに録画することにより、確率的な現象を容易に可視化できる。ま

図4 キャビテーションを伴う水中水噴流の様相

図5 遠心ポンプに生ずる高壊食性渦キャビテーション

た、CCDカメラを用いることにより、低照度の現象の可視化が容易であり、顕微鏡等を用いた拡大撮影にも応用できる。周知のように、ビデオレコーダは、1/60秒間隔で撮影した2枚の画面(それぞれフィールド画像と呼ぶ)から1枚の画面(フレーム画像と呼ぶ)を構成しているので、フラッシュランプを用いる場合には、せん光時間と発光周波数を考慮しないと、記録したビデオテープの画像がブレたり、時折真黒な画像が混ざることになる。なお、同期装置も市販されている。ビデオ記録装置において、著者の経験上、Hi8とS-VHSでは、画像の鮮明度に顕著な差は認められなかったが、画像を解析する時には、Hi8の場合には各フレームにフレーム番号が付されているので便利である。当然のことながら、CCDカメラの方が撮影が容易であるが、画像の解像度においては、スチル写真には及ばない。

図5(口絵2参照)には、遠心ポンプに生ずる高壊食性渦キャビテーションの瞬間写真による観察の一例⁸⁾を壊食面の様相と併せて示す。ポンプのケーシングの一部と側板を透明アクリル樹脂製と

して、羽根車内部に生ずる渦キャビテーションの様相を観察したものである。羽根車表面には、壊食領域を検出するため、キャビテーションを可視化しやすくするために青タックが塗布してある。右下の楕円状の青タックが剥げた白色領域で渦キャビテーションが崩壊しているのが明瞭に見取れる。言うまでもなく、ここでは、クセノンフラッシュランプをポンプの回転に同期させて発光させて撮影している。図中の壊食領域は、通常の壊食率よりも2桁以上大きい、その原因がこのような特異な渦キャビテーションによることが、高速瞬間写真観察により初めて明らかになった。

3. 結 論

高速度撮影に関する動向を主にキャビテーション現象の可視化を例に挙げ、概説した。これらが、今後、高速度現象の可視化を試みようとする会員のの一助となれば幸いである。

謝 辞

本稿を執筆するにあたり、東北大学流体科学研究所衝撃波工学センタ助手小玉哲也博士から有益なご助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 流れの可視化学会編, 流れの可視化ハンドブック(1986)朝倉書店
- 2) 祖山, 大場, 武田, 大場: バタフライ弁まわりの高壊食性渦キャビテーションの高速写真観察, 日本機械学会論文集, 60-572(B)(1994)1133-1138
- 3) 大場, 石原, 猪岡: 相関法を用いた二次元流速分布計測における過誤のベクトル補正, 流れの可視化, 9-33(1989)145-149
- 4) 祖山, 井小萩, 大場: 画像の積層化立体表示による高速水中水噴流の非定常挙動の解明, 流れの可視化, 14-Suppl. 1(1994)123-126
- 5) Hashimoto, H., Kawano, S., Togari, H., Ihara, A., Suzuki, T. and Harada, T.: Study on Wave Motion and Breakup of Annular Liquid Sheet in a Gas Stream, Proceedings of ICLASS-94 (1994) 8-15
- 6) 祖山, 山内, 安達, 佐藤, 進藤, 大場: 高速水中水噴流まわりのキャビテーション気泡雲の高速写真観察, 日本機械学会論文集, 59-562(B)(1993)1919-1924
- 7) Blake, J. R., Robinson, P. B., Shima, A. and Tomita, Y.: Interaction of Two Cavitation Bubbles with a Rigid Boundary, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 255(1993) 707-721
- 8) 祖山, 岡村, 斉藤, 加藤, 大場: 遠心ポンプに発生する高壊食性渦キャビテーションの観察, 日本機械学会論文集, 59-560(B)(1993)1140-1144

口絵1 渦キャビテーションの高速ビデオ撮影画像とこれらを画像処理して求めたベクトル図

口絵2 遠心ポンプに生ずる高壊食性渦キャビテーションの瞬間写真(左)と壊食面写真(右)

(口絵1,2 東北大学 祖山 均, 川野聡恭)(本文87頁参照)