高速ドラムカメラの試作と衝撃波現象の
観察への応用*小野寺英輝*¹ 小野寺 収*² 高山和喜*²Development of High-Speed Drum Camera and its Application
for Shock Wave Research

Hideki ONODERA, Osamu ONODERA and Kazuyoshi TAKAYAMA

To explore the most suitable method for measuring shock wave phenomena, we have designed and constructed a high-speed drum camera combined with a pulsed argon-ion laser as a light source. This paper presents the performance of the drum camera and its application to the observation of microexplosion-driven shock waves. A commercial air turbine drives an octagonal mirror continuously up to 220,000 rpm. by changing the supply pressure to the turbine. The pulse interval of the laser is variable from 250 nsec to 2.5 msec with the fixed pulse duration of 15 nsec. In selecting the appropriate laser pulse interval and the mirror rotating speed, a framing speed of 4×10^6 fps and 40 numbers of frames can be obtained. Then the spatial resolution is 25 lines/mm at 4×10^6 fps. The present spatial resolution is excellent if compared with that of the image converter camera, whose spatial resolution is 10 lines/mm at 1×10^6 fps. More than this, the total cost of this camera was about three million yen. In order to demonstrate the usefulness of this drum camera, microexplosion-driven shock waves in air are observed. Consequently, it is found that the present microexplosion-induced spherical shock wave satisfies the similarity law.

Key Words: Flow Measurements, Compressible Flow, Drum Camera, Argon-Ion Laser, Cavity Damper, Microexplosion, Shock Wave, Self-Similar Solution

1. はじめに

超音速流れあるいは衝撃波管内の衝撃波現象を定量的に計測するためには、高速度写真を用いた光学可視化計測法は特に有効である⁽¹⁾。連続光源を用いる駒どり撮影には、高速のシャッターリングが必要であり、たとえば機械式では回転プリズムを使用し⁽²⁾、電気式ではイメージコンバータチューブ(転像管)を用いる方法がある⁽³⁾。また、ドラムカメラを用いる場合には、短時間に繰り返し発光するストロボ光源を用い駒どり撮影を行う⁽³⁾。しかし、一般にストロボ光源に用いるキセノン放電管の発光パルス幅は高々 $1 \mu\text{sec}$ 程度で、普通の高速度現象の観測には適当であるが、たとえば、空気中の強い衝撃波、あるいは透明な固体や水中の衝撃波のような超高速現象の可視化計測には十分とは言えない。

超高速の衝撃波現象の可視化には、発光パルス幅がより短い光源が必要である。ジャイアントパルスレーザは発光パルス幅も短く光量も十分なので、一駒撮影の光源に適当で⁽⁴⁾、またその写真の空間解像度も良好であるが、同一現象を時系列的に連続撮

表1 ドラムカメラの主要諸元。

Outside diameter	900 mm
Outside Thickness	100 mm
Film Length	2500 mm
Supply Pressure	0 to 0.36 MPa
Mirror Revolution	0 to 220,000 rpm
Spatial Resolution	25 lines/mm for 4×10^6 fps
Frames	1 to 40 frames
Streak Speed	upto 100 ns/mm

図1 ドラムカメラの構造の概略。

* 平成2年6月9日 東北支部八戸地方講演会において講演、
原稿受付 平成2年6月18日。

*¹ 正員、東北大学大学院 (〒980 仙台市青葉区片平2-1-1)。

*² 正員、東北大学流体科学研究所。

図2 受光部(リレーレンズと取付部).

図3 ドラムカメラ内部.

影することはできない。この点を克服するものに、レーザストロボがあり、これはルビーレーザをフラッシュランプの閃光の間に繰り返し発振させるので高速現象の観察に有効であるが⁽⁵⁾、一般的ではない。イメージコンバータカメラはストリーク撮影もでき、取扱が簡単で有効であるが、記録画像数が制限され、また画像の解像度も10本/mm程度にとどまる。

本報は、衝撃波現象の可視化に最適な光学可視化法の開発を目指し、光源としてキャビティガンバ付きアルゴンイオンレーザを用いた時の試作ドラムカメラの構造と特性、さらに衝撃波現象観察への応用例について示す。なお、本報では、このカメラのチャンネルのうち1チャンネルのみを使用した結果を示すが、このカメラはレンズ系を3組有し、3現象の同時計測が出来る3チャンネル機能を持つ。

2. 試作カメラ

試作したドラムカメラの主要諸元を表1に、その構造の概略を図1に示す。このドラムカメラは直径900mm、幅100mmで、35mmまたは70mmロールフィルムが使用できる。

ドラムカメラ内部の回転鏡が高速回転すると、その周辺は超高速になり、衝撃波が発生することが知られている。この衝撃波は造波抵抗になるばかりでなく、内部構造に不要の擾乱を与え、画像に歪みを与えることになり、はなはだしい時には回転鏡の破

図4 六面鏡および駆動用エアタービン.

壊にもつながることになる。これを軽減するために、この試作カメラでは内部を真空排気できるような構造を有する。特に、ドラムカメラ内部を負圧にするとき、直径約900mmのカメラのふたは非常に大きな外側からの力にさらされ変形するので、この変形を考慮してふたの厚みを20mmとし、中間支持柱をもつ構造となっている。

また、試作したドラムカメラには、3つの受光部 L_1, L_2, L_3 が取り付けられ、光学系を工夫すると、同一現象を円筒部内面の外周に装填されたフィルムに同時に異なる3方向から、それぞれ角度90度間隔の円弧の内側に記録できる。実際には回転鏡の制約からこの円弧のうち有効に記録に利用できる部分はそれぞれ約45度の範囲である。図2にカメラ本体から取り出した受光部を、図3にカメラの内部を示す。受光部に入射した光は、内部のレンズ系を通り、 M_1 で反射し、さらにカメラ本体中央部の8角形の回転鏡RM（鏡面有効長20mm、一面の有効幅4mm、重量16.4g、チタン合金製）で反射して、それぞれの3チャンネルに相当するフィルム上に結像する。8角形回転鏡はドリル用のエアタービン（東芝タンガロイ製TPFスピンドルTPF-15A）により駆動される。図4に回転鏡を取り付けたエアタービンを示す。タービンの駆動には高圧空気を用い、その圧力を変えて回転数を制御した。供給空気圧をゲージ圧0.1~0.36MPaの範囲で変えることにより、カメラ内部が大気圧の状態、回転鏡の回転数は最高220,000rpmまで連続的に制御できた。図5(a)に低速域、図5(b)に高速域のタービンへの供給空気圧と回転鏡回転数の関係を示す。このように、エアタービンは低速域から高速域まで、滑らかで連続的な回転数変化を示し回転数制御が容易であることを示している。なお、Jは画像をRM上の適切な位置に送るための M_1 の調節つまみである。撮影に用いた35mm長尺フィルムは、明室でパトローネヘフィルムを装填する際に使用する器具を改造したフィルム繰り出し装置（図3F）からカメラ外部のつまみ操作により繰り出され、円筒内面の周上の溝Sに沿って全周にわ

たって容易にセットされる。この溝には小孔が一樣にあけられ、フィルムを円筒内面の周上に真空吸引して固定できる。フィルムの巻取りは、撮影後Fの位置でフィルム切断後フィルム巻取り部Rのつまみによりカメラ外部から容易に行われる。

図6に撮影装置の概略を示す。撮影に用いた光源はアルゴンイオンレーザ (Spectra Physics製2030出力35W) である。これに、内部でレーザ光を折り返し、駆動パルス入力時のみに光路を解放する仕組みを持ったキャビティダンパ (Spectra Physics製3295) を組み合わせてパルス幅 15 nsecで段階的に発光周波数 4 kHz - 4 MHz, パルス間隔 250nsec ~ 2.5msecの発振が可能である。キャビティダンパを通過したレーザ光の出力は連続光で5~6W, 400 KHz発振の状態では約 3W 程度であった。このアルゴンイオンレーザ光の発光間隔と回転鏡の回転数を適切に選べば、解像度を低下させることなく、最大撮影速度 毎秒 4.0×10^6 駒で通常駒数 40 の撮影が可能

である。また、隣接する駒と駒の間隔を狭めることによって、駒数 80 程度までは増やすことができる。さらに、8面の回転鏡に代えて4面鏡を使用し、 L_1 のみ、または L_1, L_2 の2チャンネル記録を行う場合、駒数約 160 が可能である。加えて、回転鏡の回転速度を適当に選べ、連続光源を用いて現象をスリットを通して観測すれば、ストリーク撮影も出来る。このときの最大掃引速度は100 nsec/mmである。さらに記録できるフィルム上の長さは500 mmと長く、イメージコンバータカメラの記録長さの7倍に達する。すなわち、この時間精度で50 μ secという長時間の間記録が出来ることになる。試作したドラムカメラは、衝撃波現象を観測するためのストリークカメラとしても十分な特性を持つ。

光源に使用したアルゴンイオンレーザおよびキャビティダンパの駆動パルス入力から発光までの時間遅れは 1 μ sec以下である。現象とアルゴンイオンレーザ光の同期には遅延回路を適宜組み込み、完全な同期撮影が可能となった。

3. 性能試験

図7に毎秒 8.0×10^5 駒相当の撮影速度で、テストチャートの像を記録した結果を示す。光学系は影写真系で、光路上に円筒レンズを2枚組合せ、平行光線をつくった。撮影には フジ ネオパン super PRESTO1600 (ASA 1600)を用い、フジアートドール現像液で、29°Cで25分間の増感現像を行った。

イメージコンバータカメラを用いた撮影では、プレート間で電子ビームを偏向するので、高速撮影では画像の周囲が多少ゆがむのは避けられなかった。

(a) 低速回転領域

(b) 高速回転領域

図5 タービン給気圧と回転鏡回転数の関係。

図6 光学系および空気供給系の概略

図7 テストチャート撮影例, 8.0×10^5 fps. 図8 気中微小爆発のホログラフィ干渉系法による可視化例, AgN_3 10mg.

しかし、この電子方式に比較すると、試作したドラムカメラでは、画像の歪みは非常に少ない。また、この撮影方式では機械的なシャッターを用いずに、アルゴンイオンレーザの非常に短いパルスを用いているので、回転鏡が高速回転しても像のぶれはほとんど現れない。さらに、画像の空間解像度は 4.0×10^6 駒/秒で 25 本/mm 程度で、イメージコンバータカメラの解像度、 1.0×10^6 駒/秒で 10 本/mm、を大きく上回っている。また、フィルム上での画像の大きさは $3 \sim 5 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ である。これは、イメージコンバータカメラで駒数 16 で撮影した時の画面の大きさにほぼ相当する。以上より、空間解像度、撮影駒数ともに、試作の 3 チャンネルドラムカメラの方が優れていると結論できる。今回は超高速撮影を目的としたので低速での性能にはあまり言及しなかったが、低速域でも光源としてストロボを使用することにより、非常に優れた像を得られることが予備試験により確認されている。

また、装置は一部外注で加工したものの主要部分は本研究所附属工場で作成したので、全製作費用は約 3,000,000 円であった。

なお、フィルム面上での空間解像度の計測は JIS B 7174「写真レンズの解像力測定方法」に準じ、撮影倍率 0.2411、テストチャートは GRATICULES 社製 NBS 5 分解能テストチャートを使用した。

4. 衝撃波現象への応用、気中微小爆発

試作ドラムカメラを用いて衝撃波現象の観察を試みる。一例として、気中微小爆発による球状衝撃波の生成過程を取り上げる。10mg のアジ化銀ペレット、直径約 1.5mm、長さ約 1.5mm、密度約 3.77 g/cm^3 (中国化薬製) を直径 0.6mm のグラスファイバー先端に接着し、それを YAG レーザ (Laser Photonics 製, LPI/model MYL-100, 出力 25 mJ/pulse , パルス幅 7nsec, 波長 $1.064 \mu\text{m}$) を用いて起爆した。図 8 は気中微小爆発の爆発生成気体 (図中矢印 G) と発生した衝撃波 (矢印 S) をホログラフィ干渉計法で観測した結果である。爆発生成気体の膨張は様ではなく、最初にパルスレーザのエネルギーを受けた方向にジェット状となり、これが球状衝撃波に重なって凸状の衝撃波が現れる。このジェットに誘起された衝撃波速度は大きく、球状衝撃波と干渉しているのが分かる (図中矢印 J)。本研究では駒どり撮影の画面は図中破線部分に相当する。この観測視野はたて細で、グラスファイバーに対し直交するが、これは前述のようにジェットに誘起された衝撃波を避けて、球状衝撃波の運動を計測しようとするためである。

図 9 に本ドラムカメラでの撮影写真法による撮影結果を示す。この時のタービン給気圧力は 0.19MPa、回転鏡の回転数は約 130,000rpm、撮影間隔は $1.25 \mu\text{sec}$ 、毎秒 8×10^5 駒相当である。起爆直後、爆発生成気体界面と、駆動される衝撃波とは密着してよく分離されず、双方の区別は出来ない。7 駒め ($8.75 \mu\text{sec}$ 後) から一部衝撃波が分離されはじめ、観察可能となる。前述したファイバー方向へのジェットの成長が 1, 2 駒めに観察される。爆発生成気体は爆発の初期では大きな密度を持ち加速的に膨張する。一方、前方の空気は低密度なので、この両者の組合せでは高密度気体層が低密度気体層の方向に加速され Rayleigh-Taylor 不安定を生じる。この結果、爆発生成気体は凹凸状となり、初期の段階ではこれにより駆動される衝撃波も凹凸状を示す。一方、拡大する衝撃波は安定なので、約 $33 \mu\text{sec}$ 後には衝撃波は球状になる。

このドラムカメラで記録できる画像数が通常 40 駒で、イメージコンバータカメラの約 2.5 倍と多いことから、ここで試みた点爆発での衝撃波の初生のような高速の現象はもちろん、移動速度は遅くとも高周波数の変動成分を持つ現象の可視化計測も可能である。さらに、記録画像数が多いことは、現象の開始時間遅れが非常に不安定で正確にトリガが掛からないような現象の記録にも対応できる等の利点

図9 気中微小爆発のドラムカメラによる可視化例(影写真), AgN_3 10mg, 8×10^5 fps.

があげられる。なお、写真中央部に横に走る明線は、キャピティダンパからのもれ光の影響による。本実験ではこれを防ぐ特別な工夫は施さなかったが、これは光路上に適当な電磁式のシャッターを用いることで、防ぐことができる。

図10に縦軸に時間、横軸に爆心からの距離をベレット質量の三乗根で除した換算距離^{*)}をとって爆発生成気体とそれによって駆動された衝撃波の位置を表す。ここで使用したアジ化銀の爆轟速度は約5000m/secで⁽⁹⁾、常温の空気中ではマッハ数約15に相当する。まず爆発生成気体はこの爆轟速度に近い速度で膨張するが、ベレットの爆轟が完了すると、爆発生成気体は爆轟によって与えられたエネルギーを使い果たし、急速な膨張は止まり、その半径はある最大値を取った後はわずかに収縮するかの傾向を示している。この爆発生成気体はピストンの役目を果たし、衝撃波を駆動するので、爆発生成気体が膨張をやめると、衝撃波は先行し、爆発生成気体と分離される。その後では爆発生成気体の停止、そして若干の後退に伴う膨張波によって衝撃波速度は減衰する。なお、計測には図9の写真の画像情報をCCDカメラ(JVC TK870)で取り込み、画像処理システム(日本アビオニクス製SPICA II)に入力・処理し、中心軸上での画像の濃度分布から衝撃波等の位置を求めるという方法を取った。また、上記の画像処理システムでは判別の難しい駒については副尺付き読み取り顕微鏡により精度確認し処理した。

図11に起爆中心軸を含む面上での爆発生成気体

^{*)}付録参照

の膨張速度およびこれに駆動される衝撃波の速度の変化を縦軸にマッハ数、横軸に爆心からの換算距離で示す。

強い衝撃波について、Guderley⁽⁶⁾は自己相似解を適用し、衝撃波伝播位置と時間の関係を求めた。自己相似解では衝撃波の位置 R は、 $R = C(-t)^n$ で表わされる。 n は自己相似指数と呼ばれ、上式を非定常準一次元流れの基礎式に代入して得られる1階の常微分方程式を、数値積分することによって求められる。球状衝撃波の場合、 $n=0.717$ である⁽⁶⁾。この式より容易に衝撃波マッハ数は衝撃波半径の関数として次式のように求められる⁽⁷⁾。

$$\frac{dR}{dt} = -n(-t)^{n-1} \sim R^{(n-1)/n} \quad (1)$$

一方、衝撃波マッハ数 $M \sim \frac{dR}{dt}$ なので、

$$M \sim R^{(n-1)/n} = R^{-0.3947} \quad (2)$$

を得る。

(2)式を実線で示した。自己相似解は得られた爆発生成気体とこれに密着する衝撃波のマッハ数の変化とよく一致する。このように、自己相似解による衝撃波マッハ数と衝撃波半径の関係は、強い衝撃波に対して成立するので、爆発生成気体に密着した衝撃波についてもよく成り立つ。次に、生成した球状衝撃波が写真上で爆発生成気体と分離して確認できる程度の距離まで進行すると、球状衝撃波のマッハ数の変化は、自己相似解を下回る。Saitoら⁽⁸⁾は内爆によって生成した半球状衝撃波の挙動について実験的、数値解析的研究を行い、 $\gamma=1.14$ の気体について、マッハ数1.6～2.9の衝撃波の挙動は

図10 爆発生成気体および衝撃波の半径の時間変化。

図11 衝撃波マッハ数の爆心からの距離による変化。

相似解と離れるが、爆縮中心からある距離以内の、衝撃波が強くなったところでは相似解とよく一致することを示している。球状衝撃波に関する相似解は基本的には非常に強い衝撃波に対して成立する。しかし、ここで示した薬量わずか10mgの点爆発に対しても、爆発生成気体と衝撃波が分離して観測されないような強い衝撃波の領域については十分適用できることが分かった。従って、本報のように適切な光学観測方法を導入すれば、大規模爆発に伴う衝撃波の挙動を実験室内の微小爆発で模擬することも十分可能と考えられる。

5. ま と め

衝撃波研究に適した光学可視化法の開発を目指し、キャビティダンプ付きアルゴンイオンレーザを光源としたドラムカメラを試作し、一応用例として微小気中爆発とそれによって駆動される衝撃波の挙動を観察した。得られた結果を要約すれば、

(1) 試作したドラムカメラを微小爆発に伴う球状衝撃波の生成過程の観察に応用し、わずか10mgという微小爆発で発生する衝撃波の挙動を自己相似解と比較し、爆発生成気体と衝撃波が分離して観測できない強い衝撃波の領域でよい一致を得た。このことは微小爆発であっても、初期段階では自己相似を保つことを示している。

(2) エアタービンを使用し、回転鏡を用いた本ドラムカメラは撮影速度 4×10^6 駒/秒で解像度は25本/mmを有し、高速現象の記録装置として十分な特性を持つ。また、記録できる画像数は通常40駒で、電子式カメラの特性に対して遜色のない特性を持ち、衝撃波現象の可視化に相当である。

終りに臨み、本ドラムカメラの設計では東北大学金属材料研究所庄野安彦教授より有益な助言をいただいた。また、実験には東北大学流体科学研究所衝撃波工学研究センター小島英則、高橋喜久雄両技官、装置製作には同研究所附属工場早坂庄吉技官の熱心な協力を得た。ここに付記しそれぞれ謝意を表する。

付 録

工業火薬の分野では、火薬の爆轟特性が薬量の三乗根に比例することから、 $r/m^{1/3}$ を換算距離として用いるのが慣例となっている。これを一つの指標とすることによって、異なった薬量の爆発現象の定量的比較が可能となる。換算距離は $m/(Kg)^{1/3}$ の次元を有するが、暗々のうちに火薬の密度を一つの定数として $m/(Kg)^{1/3} \cdot (Kg/m^3)^{1/3}$ の様に導入すれば、最終的に無次元数となる。さらに密度による特性の変化を無視し、この表示に至ったとも理解できる。本論文は、この工業火薬の分野の慣例に従った。

参考文献

- (1) Takayama, K., CISM Seminar (1989).
- (2) 例えば, Merzkirch, W., Flow Visualization, Academic Press (1987).
- (3) 例えば, 浅沼編, 流れの可視化ハンドブック, 朝倉書店 (1977).
- (4) Takayama, K., Proc. SPIE vol. 398 (1983) 174.
- (5) Kleine, H., Master Thesis TH Aachen (1985).
- (6) Guderley, G., Luftfahrtforschung 18 (1942) 302.
- (7) Gardner, J. H. et al., J. Fluid Mech. vol. 114 (1982) 41.
- (8) Saito, T. and Glass, I. I., Proc. R. Soc. Lond. A384 (1982) 217.
- (9) 化技研編, 爆薬の爆轟特性解析 (1983) 278.