回転鏡式高速度カメラの試作と応用*

小野 寺 英 輝**

Design of Rotating Mirror Type High Speed Camera and Its Apprication for Shock Wave Research

Hideki ONODERA

1. はじめに

高速現象の計測を目的とした可視化については、19世紀末のE. Machによる飛翔弾丸の撮影を嚆矢として、爾来さまざまな方法が行われてきている。特に工業火薬の分野では、古くから高速度撮影による現象の解析が行われてきており、これは大規模爆発実験においては特に有効な解析手段である。この研究の流れは、まず回転プリズム式の高速度カメラによる爆速の計測にはじまるが、その時間解像度（一般的には 2×10^5 fps; flames per second, 程度が最高）および空間解像度（10 lines/mm程度）の制約から、現象の巨視的把握にとどまっていた¹⁾。

その後、ドラムカメラを用いた高速度撮影が盛んになった²⁾が、一般に、光源に用いるキセノン放電管の発光パルス幅はたかだか $1\mu\text{s}$ 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でない。そこでその後、イメージコンバータチューブ（転像管）を用いる方法が発達することになった。この方法は、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 lines/mm程度という制約がある。そこで、このような欠点を補うべく著

者らの開発した回転鏡式（ドラム）カメラ^{3),4)}について以下に紹介したい。

2. 試作カメラ

試作したカメラの主要諸元を表1に、その概形を図1に示す。このドラムカメラは外径900mm、厚さ100mmで、ドラム内側のフィルムが挿入されるスリットを交換することで35mmまたは70mmの長尺ロールフィルムが使用できるようになっている。

表1 試作カメラの主要諸元

Outside diameter	900 mm
Outside Thickness	100 mm
Film Length	2500 mm
Supply Pressure	0 to 0.36 MPa
Mirror Rotation Speed	0 to 220,000 rpm
Spatial Resolution	25 lines/mm (at 4×10^6 frames/s)
Frames	1 to 40 frames
Streak Rate	max 100 ns/mm

図1 試作カメラの外観図

*原稿受付 1995年1月6日

**正会員 岩手大学地域共同研究センター

ドラム形式を持つ高速度カメラには回転ドラム式と回転鏡式の2種類があるが、試作カメラでは高速回転に有利である後者の形式を採った。

さて、鏡が高速回転すると、その周辺には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。そこで、試作カメラには、これを軽減するために、内部の排気可能な機構を組み込んだ。また、内部が負圧となることでカメラのふたは非常に大きな外力にさらされるので、これを考慮して、その厚みを20mmとし、中間支持柱をもつ構造とした。

また、試作したドラムカメラは、同一構造の三つの受光部 L_A 、 L_B 、 L_C を有し、光学系を工夫すると、装填されたフィルムに、同一現象を同時に異なる3方向から、それぞれ角度90度間隔で記録できる。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。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。

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、内部の写真の引き伸ばし機用のレンズを利用したリレーレンズ系を通り、 M_1 で反射し、さらに

図2 受光部ユニット (リレーレンズと取付部)

(RM:回転鏡, S:フィルムスリット, F:フィルム繰出し部, R:フィルム巻取部)

図3 ドラムカメラ内部

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)で反射して、それぞれのチャンネルに対応するフィルム上に結像する。この回転鏡は、超高速回転に伴い空気との摩擦抵抗により発熱するので、耐熱性に優れたチタン合金製とした。

さて、回転鏡式のカメラにおいて、その撮影間隔を縮め、時間解像度を向上させるためには、光源の発光間隔を短くすることが必要なのは当然である。しかしそれ以上に、隣接するコマの撮影像の重畳を防ぐために、回転鏡の回転数を従来に比して格段に増大させる必要がある。そこで試作機では、電動機に比して容易に超高速が得られる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)を使用することとした。タービンの駆動には高压空気をを用い、その供給圧力を変えることで回転数を制御した。圧力をゲージ圧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では、回転鏡の回転数は最高220,000rpmまで連続的に制御できた。図4(a)に

(a) 低速回転領域 ($0 \sim 8 \times 10^3 \text{rpm}$)

(b) 高速回転領域 ($8 \times 10^3 \sim 2.2 \times 10^5 \text{rpm}$)

図4 タービン給気圧と回転鏡回転数の関係

低速域、図4(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。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がわかる。なお、このエアタービンは空気軸受けを使用しており、運転中は0.3MPa程度の圧力を軸受に常時印加している必要がある。そのため容量0.5 m³程度のエアリザーバをコンプレッサ・タービン間に設置し運転時の供給圧力の低下を防いだ。さらに、圧縮空気中の水分を除去するため複数段のエアフィルタを挿入した。単段のフィルタでは水分が軸受けに達して目づまりの原因となり、一度軸受けの焼き付きを引き起こした。

回転鏡回転数の計測は、低速域では、CWレーザ光を受光部から入射させ、その回転鏡からの反射光をドラム周上のファインダ部に設置したフォトセルで受け、出力をユニバーサルカウンタで計測することにより行った。しかし、高速域では、光源の発光周波数がフォトセルの立ち上がり時間を上回り、計測が不可能となったため、実際にカメラを作動させ、光源の発光をフィルムに記録して、各コマの間隔から回転数を計測する方法を採った。

撮影に用いた35mm長尺フィルムは、明室でパトローネへ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れば、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える。

撮影像の焦点合わせは、まず、ドラム外周に3か所設けたファインダー用の孔に、焦点面がフィルム面と同一の高さになるように製作したファインダーを挿入して行う。焦点合わせ終了後はその部分に真鍮製のアタッチメントを挿入し、遮光をはかるようにした。

これらの装置は一部外注で加工した部分もあるものの、主要部分の製作は東北大学流体科学研究所附属工場で行った。全製作費用は約3,000,000円であった。

4. 光源と撮影例

4.1 キセノンフラッシュランプ

まず最初に光源として、高圧火花発生装置(菅原研究所MM-305AA, 出力最大4J/Pulse)とキセノンフラッシュランプを組み合わせたものを用い、パルス幅約1 μ s(約1J/Pulse)で撮影を行った。

図5は二酸化炭素雰囲気中で10mgのアジ化銀ペレット(直径約1.5mm×長さ約1.5mm, 密度約3.77g/cm³, 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25mJ/pulse, パルス幅7nsec, 波長1.064 μ m)を用いて起爆した場合の様子を撮影したものである。この光源では、内蔵するコンデンサの容量の制約から発光数が制限され、ここに示したパルス間隔55 μ sの場合、発光数は25となり、全記録時間は1320 μ sとなる。これより一段階発光間隔をせばめることも可能であるが、この場合、一つのパルス当たりのエネルギーが減少し、写真撮影が困難となった。なお、爆発実験を二酸化炭素雰囲気中において行ったのは、光源の発光間隔の広さを補う

図5 気中微小爆発の可視化 (AgN₃-10mg, キセノンフラッシュ光源, シャドウグラフ法)

ために音速を減少させ、衝撃波伝播速度を低下させることにより、球状衝撃波を捕捉するコマ数を増加させるためである（性能試験のため、このような操作を行った）。

さて、撮影は、発光パルス幅が約 $1\mu\text{s}$ と長いいため、わずかに衝撃波面のぶれが見られるものの、鮮明な衝撃波を捕捉できている。しかしながら、発光間隔が長いと、前述のような音速を低下させる操作を行ってもなお、数コマ程度しか波面を捕捉できない。この光源は、発光間隔が長く時間解像度が劣るが、比較的安価で光量も十分にあり低速現象には適する。

4.2 キャビティダンパ付きアルゴンイオンレーザ

4.2.1. キャビティダンパ

アルゴンイオンレーザは通常連続光のみを出力する。しかし、光路上にキャビティダンパという装置を設置することで、連続的にパルス発光を行わせることができる。

キャビティダンパの作動原理の概略を図6に示す。イオンレーザから発射されたレーザ光は、プリズムを経てM2で反射し、ブラッグセルと呼ばれる溶融ガラス製の変調器で振動波と干渉し、キャビティダンパ終端鏡M1に達する。この光線は同一光路をM3に向かって通り、再びM1に向かう。一方、ブラッグセルで、振動波と干渉して生じたパルス状の回折光は、入射光と別光路を経てM1、M2で反射しプリズムを経て発射される。非発射時のエネルギーはキャビティダンパの光路で蓄えられることになるので、パルス幅に対応する時間における光線のエネルギーはキャビティダンパを使用した方が大きくなる。また、撮影間隔はこの振動波の周波数によって規定されることになり、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

図6 キャビティダンパの作動原理

5~6W、400kHz発振の状態では平均化した出力は約3W程度であった。キャビティダンパは、製品としては常時発振を継続するので、トリガパルスのパルス幅に対応する時間、設定した周波数で発光するように回路の簡単な改造を行った。このキャビティダンパ（Spectra Physics製3295）とアルゴンイオンレーザ（Spectra Physics製2030出力35W）を組み合わせることでパルス幅15nsで段階的に発光周波数4kHz~4MHz（パルス間隔250ns~2.5ms）の発振が可能となる。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 $4.0 \times 10^6 \text{fps}$ で、駒数80程度までの撮影が可能である。さらに、8面の回転鏡に代えて4面鏡を使用し、 L_A のみの1チャンネル、または L_B 、 L_C 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び、連続光源を用いて現象をスリットを通して観測すれば、最大掃引速度100ns/mmでストリーク撮影もできる。さらに記録できるフィルム上の長さは約500mmと長く、イメージコンバータ式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 μsec という長時間の間記録ができることになる。したがって、試作したカメラは、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、計測の結果1 μsec 以下であった。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である。

4.2.2 空間分解能試験

図7 テストチャートの撮影例（ $8.0 \times 10^6 \text{fps}$ 、Arレーザ）

図8 撮影装置の概略

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、平行光線光路上に円筒レンズを2枚組み合わせ、光強度の増大を計った。図8にこの撮影装置の概略を示す。撮影には8種類のフィルムと4種類の現像液の組み合わせを試行錯誤した末、最も増感が可能であるという結果が得られたフジネオパンsuper PRESTO1600 (ASA 1600)を使用し、フジアートドール現像液で、 29°C 25分間の増感現象を行うという方法をとった。この処理は、フィルムの技術資料の範囲を大幅に超えるものであり、具体的な数値をあげることはできないが、実効感度はASA3200をはるかに上回っていると考えられる。

さて、イメージコンバータカメラを用いた場合の撮影では、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い。一方、試作したカメラの撮影像を見ると、その歪みは非常に少ない。また、機械的なシャッターを用いずに、光源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 $4.0 \times 10^6 \text{fps}$ で25 lines/mm程度に達し、イメージコンバータカメラの解像度($1.0 \times 10^6 \text{fps}$ で10 lines/mm)を大きく上回っている。しかも、フィルム上での画像の大きさは3~5 mm×25mmと、イメージコンバータ式カメラで撮影駒

数16の場合の画面サイズにはほぼ相当する。この大ききで後述のように最大160コマ程度の撮影が可能なのである。撮影速度では $2.0 \times 10^7 \text{fps}$ というイメージコンバータチューブ式カメラも存在するが、最大コマ数が制限され、解像度についても、その特性上どうしても劣る。したがって、光源を適切に選択することで、この比較的単純なカメラであっても十分に極限状況の観察が可能である。

なお、フィルム面上での空間解像度の計測はJISB7174「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NBS5分解能テストチャートを使用した。

4.2.3 適用例

図9(a)(口絵3参照)に、大気中で図5と同様の方法によって起爆させた10mgのアジ化銀微小爆発の、試作ドラムカメラ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 $1.25 \mu\text{s}$ ($8 \times 10^5 \text{fps}$ 相当)である。起爆直後、爆発生成気体界面と、駒動される衝撃波とは密着してよく分離されず、双方の区別はできない。7駒め($8.75 \mu\text{s}$ 後)から一部衝撃波が分離されはじめ、観察可能となる。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、時間の経過と共に衝撃波は球状に移行している。

図9(b)は同一の現象を試作カメラを用いてストリーク撮影したものである。この掃引速度は約 $0.5 \mu\text{s}/\text{mm}$, 記録長は約500mmである。爆発生成気体と衝撃波の分離過程をはっきりと観察することができる。これらの写真解析から、ある程度以上の大規模爆発について、成立が確認されていた^{5),6)}自己相似解⁷⁾が、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³⁾。したがって、適切な光学観測方法を導入すれば、大規

(a) フレーミングモード撮影 (8×10^4 fps) (b) ストリークモード撮影 ($0.5 \mu\text{s}/\text{mm}$)図9 気中微小爆発の可視化例 (AgN_3 -20mg, Arレーザ, シャドウグラフ法)

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であることになる。なお、結果の計測には、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とった。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10に同じく20mgのアジ化銀の点爆発によって発生した球状衝撃波が、剛体壁および軟多孔質

図10 球状衝撃波の壁面での反射解析例 (AgN_3 -20mg)

壁で反射した場合の波面の軌跡の計測結果を示す。反射直後は、波面の干渉もあってはっきりと確認できない部分もあるものの、全体としては $1.25\mu\text{s}$ の時間解像度で56コマ、総計で $70\mu\text{s}$ 撮影を行っている。これまではストリーク撮影でしか可能でなかった、このような長時間・高解像度の駒どり撮影も可能となった。

このように試作カメラの記録画像数が多いことは、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とする。さらに、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があげられる。

なお、写真中央部に横に走る明線は、キャビ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を用い、キャビティダンパ発振時のみ光路を解放することで十分低減が可能である。

おわりに

本ドラムカメラの開発により、平成3年度可視化情報学会技術賞をいただくことができた。足掛け3年にわたる努力が報われた感があり、非常に感謝なことであった。改めてここにお礼を申しあげたい。また末筆ながら、開発に当たり熱心なご指導をいただいた東北大学流体科学研究所高山和喜教授に心から感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 例えば、大川：工業火薬協会誌、13-4, 247-258 (1952)
- 2) 例えば、須藤：工業火薬協会誌、15-4, 277-281 (1955)
- 3) Onodera, H. et al. : Rep. Inst. Fluid Sci., Tohoku Univ., vol. 2, 49-62 (1991).
- 4) 小野寺ほか2名：日本機械学会論文集、57-534B, 545-550 (1991).
- 5) 例えば、Baker, W.E., Explosions in Air, Univ. Texas Press, Austin, 1973.
- 6) Saito, T. and Glass, I. I. : Proc. R. Soc. Lond. A384 (1982) 217.
- 7) Guderley, G. : Luftfahrtforschung 18 (1942) 302-312.

口絵 3 試作回転鏡式高速度カメラを用いて駒撮り撮影されたアジ化銀微小爆発による爆発生成気体界面と衝撃波(撮影駒間隔は $1.25\mu\text{s}$)

(岩手大学 小野寺英輝)(本文93頁参照)

口絵 4 自動車用熱強化ガラス中に生じた衝撃破壊の高速度カラー光弾性写真(試験片ピント)

(九州大学応用力学研究所 高橋 清, 馬田俊雄)(本文100頁参照)