

# ドラム式超高速カメラの研究

植 村 恒 義

## 1. ま え が き

超高速現象の解析には種々の超高速写真撮影装置が使用されているが、対象とする現象の性質に応じて、毎秒数百駒から毎秒数千駒ないし一億駒に達する超高速の撮影速度を必要とする。このように撮影速度は $10^2$ 駒/秒から $10^8$ 駒/秒の非常な広範囲にわたっているため、それぞれのオーダーの撮影速度に応じて最も適した超高速撮影装置を使用しなければならない。

工業界における機械的な超高速現象の解析には毎秒数百駒ないし数千駒の撮影速度をもつカメラでその大半は解決できるので、すでに製品化されたプリズム式超高速カメラが広く使用されている。機械的な超高速現象の中でも高い周波数の振動や衝撃等の現象解析には、毎秒数万駒以上の撮影速度を必要とし、とくに燃焼、爆発、衝撃破壊等の現象は毎秒数十万駒以上の撮影速度を有する装置を用いなければ解析は不可能である。

筆者はこれらの現象の解析に最も適したドラム式超高速カメラの研究を約 10 年前より行っているが、多面体反射鏡とフィルムドラムを一体とし、可動部の機構の簡略化を計り、より超高速の撮影を可能とした点を特徴とする機構を考察し、さきに M-1 型カメラ<sup>1)</sup> (最高撮影速度 9,000 駒/秒、16mm フィルム標準画面の大きさで連続 180 駒撮影可能) および M-2 型カメラ<sup>2)</sup> (最高撮影速度 70,000 駒/秒、16mm フィルム使用、連続 180 駒) を完成し、火薬の点火機構、爆発現象等の解析研究に使用してきた。さらにこれを改良した M-3 型超高速カメラを製作し、前二者に比べて光学系の性能を著しく向上させることができた。なお、この M-3 型カメラを小型軽量化し、撮影速度毎秒 200,000~300,000 駒の性能を有する M-4 型カメラを計画しているので、これらの概要を報告する。

## 2. M-3 型超高速カメラ<sup>4)</sup>の光学系

M-3 型カメラの光学系の改良点は第 1 図 B に示す通りである。同図 A に示すように M-2 型カメラにおいては、被写体からの光束は上方より第 1 レンズ  $L_1$  を通り、180 面体に側面を研磨した  $45^\circ$  多角錐台反射鏡 M (特殊工具鋼製、外径 120mm、厚さ 15mm) の反射面で水平方向に反射され、 $F_1$  の位置に第 1 の実像を作る。第 2 レンズ  $L_2$  (焦点距離 25mm、F1.5 の cine 用写真レンズ) で第 1 実像  $F_1$  を 5 倍に拡大してドラムの内側に巻いたフィルム面上に第 2 の実像  $F_2$  を作る。レンズ  $L_2$  とフィ

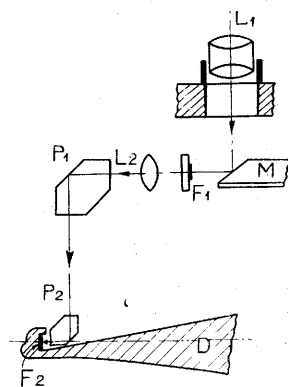
ルムとの間には直角プリズム  $P_1$ 、および方向反転用屋根型プリズム  $P_2$  を使用し、反射鏡 M の反射面より第 1 実像  $F_1$  までの光学的でこの長さとし、ドラムの回転中心からフィルムに至る距離を 1:5 の比率にしてある。このようにして像とフィルムとの移動速度なら

びに方向を完全に一致させることができ、一定の露出時間の間、像はフィルム面上で相対的に静止するようになっている。

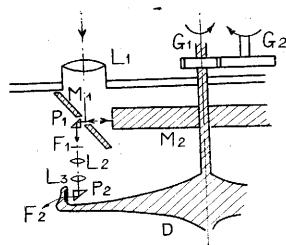
この光学系はカメラ内部で第 1 レンズ  $L_1$  の作る第 1 実像  $F_1$  を第 2 レンズ  $L_2$  で 5 倍に拡大する機構になっているので拡大撮影には有利であるが、縮小撮影の場合は光量が減少

不利となるので、多面体反射鏡、ならびにレンズ系を改良することにより、拡大率を 2 倍程度とし、レンズ系の明るさを 1 桁明るくし、縮小撮影にも有利に使用できるカメラとして M-3 型超高速カメラを製作した。

第 1 図 B は M-3 型カメラの光学系を示す。同図において被写体よりの光束は第 1 レンズ  $L_1$  (Aero-Ektar レンズ、焦点距離 305mm、F2.5 の背後に付加レンズを取りつけ、焦点距離 240mm、F2.0 のレンズに改造したもの) に垂直に入射し、固定反射鏡  $M_1$  により水平に曲げられ、多面体反射鏡  $M_2$  (直径 300mm、厚さ 32mm の円筒側面を 180 面体または 360 面体の多角柱に研磨したもの) の反射面で垂直に反射して戻り、固定反射鏡  $M_1$  の中央に開けた小孔を通過する。小孔のすぐ背後においた反転用屋根型プリズム  $P_1$  で下方に直角に曲げられ、 $F_1$  の位置に第 1 の実像を結ぶ。この実像  $F_1$  をレンズ  $L_2$  (焦点距離 25mm、F1.9 の 16mm cine 用写真レンズ) で受け平行光束とし、さらにレンズ  $L_3$  (焦点距離

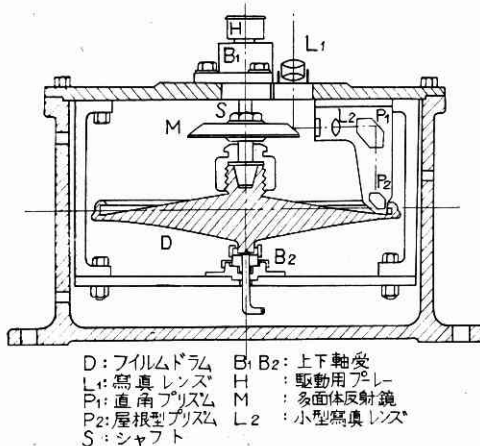


第 1 図 A M-2 型超高速カメラの光学系



第 1 図 B M-3 型超高速カメラの光学系

50mm, F2.0 のライカ型カメラ用写真レンズ) を通過し、直角プリズム  $P_2$  で水平に曲げられ、フィルムドラムの内側に巻いたフィルム面上に第2の実像  $F_2$  を結ぶ。第2実像  $F_2$  は第1実像  $F_1$  の2倍の拡大像となっている。多面体反射鏡  $M_2$  の反射面より第1実像  $F_1$  までの光学的な長さ、ドラムの回転中心からフィルムに至る半径距離を1:4の比率にしてある。このようにしてM-2型カメラと同様に像とフィルムの移動速度ならびに方向を完全に一致させてある。M-2型は多角錐反射鏡を使用し、光束を直角に曲げて反射しているが、M-3型は多角柱反射鏡を用い光束を垂直に反射して入射方向へ再び戻る方式をとっている。この方式の著しい利点は、光学的にこの長さが同一の場合、M-2型の多角錐反射鏡では反射鏡の回転角速度に比例する第1実像の移動速度を得るだけであるが、M-3型の多角柱鏡を使用すれば反射鏡の回転角速度の2倍の移動速度を得ることができる。この理由により同一の像の移動速度を得るためには多角柱鏡は多角錐鏡に比べて光学的にこの長さを2分の1に短縮することができる。したがって、第1レンズ  $L_1$  のバックフォーカス(レンズ最後の面より焦点面までの距離)は多角柱鏡を使用すれば多角錐鏡の場合の2分の1でよいことになり非常に有利となってくる。なおまた多角錐鏡は反射面の中央部と周辺部で反射する光束の光学的にこの長さが異なってくるため、焦点面上におけるある点の移動速度は反射面の中央部からくる光と周辺部からくる光とで差異を生じてくる。これ回転多角錐鏡特有の、画面のボケを生ずる一種の収差ではある。この収差は多角柱鏡を使用することにより完全に除去することが可能である。



第2図 M-2型超高速カメラの構造

全光学系の総合的明るさはM-2型カメラではF25となっているが、M-3型カメラにおいてはF5であり、20数倍明るくなっている。

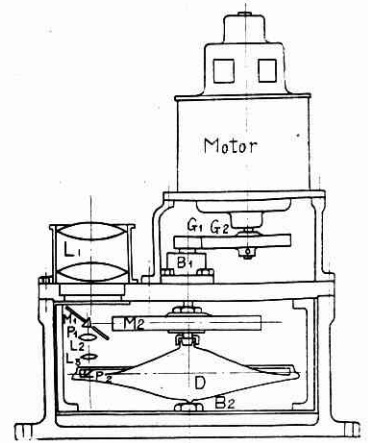
### 3. M-3型カメラの構造

第2図はM-2型超高速カメラの構造で、第3図はM-3型超高速カメラの構造を示したもので、第4図はその外観を示す写真である。

この2者の構造上の差異を考慮しつつM-3型について説明する。

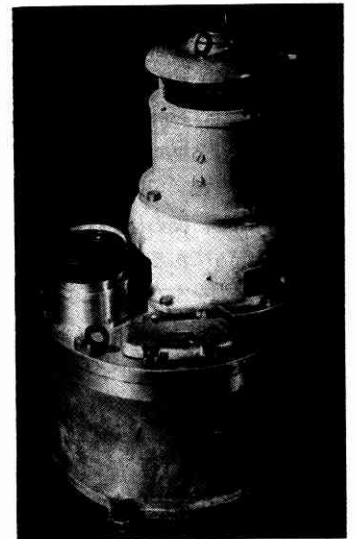
#### (a) フィルム移動用ドラム

フィルムドラムDはM-3型においてもM-2型と同一形状、同一材質のものを使用した。図に示すような断面



第3図 M-3型超高速カメラの構造

面を有する円盤で、ニッケル・クロム・モリブデン特殊鋼製、外径490mm、重量約30kg、鍛造後熱処理済み、引張破壊強さ140kg/mm<sup>2</sup>以上、加工仕上精度1/100mm以内で、回転軸の回りのバランスを精密に出してある。断面の形状は弾性理論による高速回転円盤の平等引張強さの形を用いた。中心部は孔はなく、上端突起部の外周に切ったねじでシャフトに連結し、下部には小突起を設け軸受けに嵌合する。中心部に生ずる円心力による引張応力は弾性理論の計算によれば43,



第4図 M-3型超高速カメラの外観

000r. p. m. で120kg/mm<sup>2</sup>となるが、筆者の行った遠心力による高速回転円盤の破壊に関する基礎実験の結果<sup>6)</sup>では、遠心力による破壊が起る時期は中心部の引張応力が、材料のもつ引張破壊強さに達した時ではなく、中心を通る断面全体の平均応力が材料の引張破壊強さに達した時であることが確認されているので、実際には弾性理論による計算の回転数よりずっと高い回転数まで破壊しないはずであるから、フィルムドラムの最高使用回転数30,000r. p. m. までは十分大丈夫と思われる。すなわち

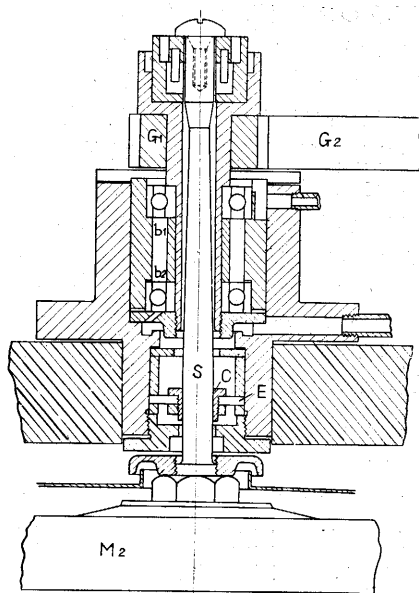
このドラムは使用中に中心部から真っ二つに割れることはないはずであるが、円周部分はフィルムを内側に巻くため図に示すような特殊な形状をしているので、この部分の応力は理論では確実に計算できない。したがって実際に回転試験を行ってみないと 30,000 r. p. m. まで安全かどうかわからない。もし周辺の1部がちぎれて吹き飛んだ場合、秒速数百米の機関砲弾程度のものが飛び出してくるのと同じような状態となり、非常な危険が予想される。このため万一破壊した場合非常な危険があるので、周囲に丈夫な防禦壁を築き徐々に回転を増加して幾回も試験を繰り返す、回転中の振動状態、弾性ならびに塑性変形の量などを測定し安全を期している。現在のところモーターの出力ならびに軸受部の制約もあるので、最高回転数 25,000 r. p. m. までの範囲で使用しており、この時の撮影速度は 16mm 標準大きさで 75,000 駒/秒、またその半截の大きさで 150,000 駒/秒を得ている。またフィルムの移動速度は 560m/秒の高速に達しており、このようなフィルム移動速度は外国においてもその類を見ない。

(b) 多面体反射鏡 M-3 型カメラの反射鏡  $M_2$  は直径 300mm、厚さ 32mm の円筒状円盤でその円周側面を 180 面体または 360 面体に研磨したもので、その一反射面の大きさは 8mm×32mm (180 面体の場合) または 4mm×32mm (360 面体の場合) の大きさを持つ。M-2 型の反射鏡が直径 120mm、厚さ 15mm で一反射面の有効面積の大きさが 2mm×15mm であったのに比べて相当大きな反射面となっている。M-3 型の鏡の材質は特殊工具鋼を使用し、面の仕上げはブロック・ゲージ程度の研磨仕上げを行っている。この反射面の仕上げ程度は高速度カメラの解像力を左右する大きな要素となるので最高級の研磨仕上げを行う必要がある。

なお、また多面体の角度の割出し精度が撮影結果の 1 駒 1 駒における画面の上下の振れの原因となるので極力割出しの精度をあげる必要がある。

(c) 軸受け部品 上部軸受部  $B_1$  は 30 数 kg の一体となったフィルムドラムと多面体反射鏡を直径 10mm 程度の細いシャフトで吊し、最高回転数 25,000 r. p. m. 以上を出すので、第 5 図に示すようにシャープレス超遠心分離機の軸受け部と同様な構造のものを用いた。中には内径 17mm の単列ボール・ベアリング (超高速回転用、合成樹脂製リテーナー使用) 2 個 ( $b_1$ ,  $b_2$ ) を使用する。下部軸受  $B_2$  はドラムの振れ止めのためで、スプリングを介して軽くおさえてある。

(d) カメラ本体 レンズ系、上部軸受部、駆動用モーター、反射鏡ならびにフィルムドラム等を取りつける蓋の部分とそれをのせるケースの 2 個の部分に分れる。移動に便利ようにアルミニウム・マグネシウム合金鋳物で製作した。重量約 50kg。



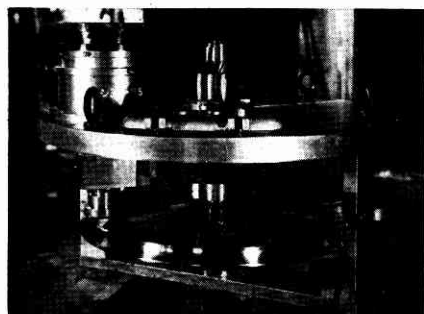
第 5 図 M-3 型カメラの上部軸受部、歯車部、真空用パッキング部の構造

(e) 駆動方式 M-2 型カメラではプーリーをエンドレス・ベルトにより外部に置いたモーターで回転させる方式を用いたが、ベルトの振動、スリップによるプーリー部分の加熱ならびにその影響による軸受部の温度上昇やベルトの伝達動力の制限等の難点を改善するため、M-3 型カメラでは第 3 図に示すように、カメラの上部に堅型直流 5 馬力複捲モーター (最高回転数 6,000 r. p. m., D C 220V, このカメラ用として特に製作したもの) を取りつけ歯車  $G_1$ ,  $G_2$  を介してドラム・シャフトを 25,000 r. p. m. 程度まで駆動する方式を採用した。歯車  $G_1$ ,  $G_2$  は 1:4 の増速比となっており、 $G_1$  は特殊鋼、 $G_2$  は布入りペークライトを使用した。

この方式により M-2 型カメラで問題となった駆動方式上の難点はほとんど解決することができた。

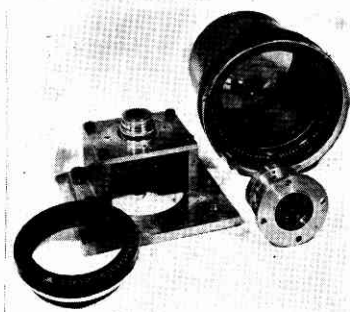
(f) カメラ内部の減圧 高速回転円盤の駆動に要する動力の大半は空気抵抗によるものであるから、内部を減圧することは非常に有利である。M-3 型超高速カメラを大気中で毎分 30,000 回転させると約 100 馬力を必要とするが、1mmHg 程度に減圧すれば駆動馬力はほとんど軸受けの抵抗だけとなり 5 馬力以下の動力で済む。ただし高速回転軸が真空容器を貫く構造となるので、その部分のパッキングはなかなか困難な問題であるが第 5 図下部に示すような機構を用いて現在 1mmHg 程度以下に減圧できた。すなわち図においてシャフト S に滑合するリング C を設け、この C をゴム板 E にとりつけ、E は軸受け部の内壁に外周を固定されている。このようにしてリング C とゴム板 E の部分でシャフトは真空容器を貫くことになるので、リング C の上面に一定量

の油を注入しておけば油はシャフトとリングのわずかな隙間より、少量ずつ次第にカメラ内部に吸い込まれて行くが、この油層によりカメラ内部は外気と遮断されることになる。



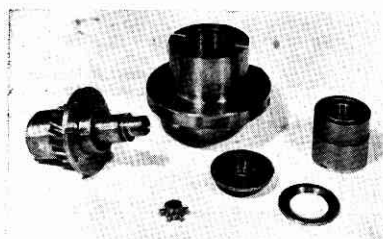
第 6 図 M-3 型カメラの内部構造

空気抵抗は大略気圧に比例するので、空気抵抗を減少させる目的にはこの程度で十分

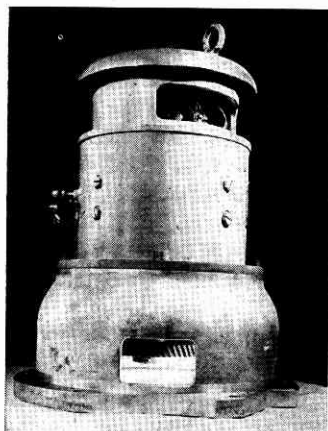


第 7 図 M-3 型カメラのレンズ群

あり高真空は必ずしも必要としない。なお、またカメラ内部の減圧により空気摩擦によるフィルムの温度上昇を防止できる点でも非常に有効である。余り減圧せずにカメラを駆動すると短時間で数十度の温度上昇を来した実例もあり、このように温度が上昇すれば感光材料はカブリを生じ



第 8 図 M-3 型カメラの上部軸受部ならびに歯車



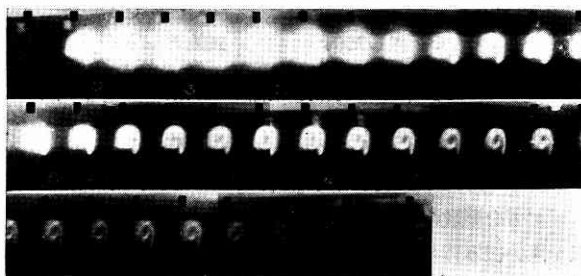
第 9 図 M-3 型カメラ用 5 HP 複捲モーター

て使用に耐えなくなる。第 6 図はカメラ内部の構造を示す写真で左方上部に第 1 レンズ、下方に第 2 レンズ群、中央下方にフィルムドラム、蓋の下部に多面体反射鏡、上部軸受が見える。第 7 図は M-3 型カメラ用レンズ群で、第 8 図は上部軸受部を分解した写真である。第 9 図は M-3 型カメラ

の外観写真で、下部の窓に歯車  $G_2$  が見える。

#### 4. 撮影結果

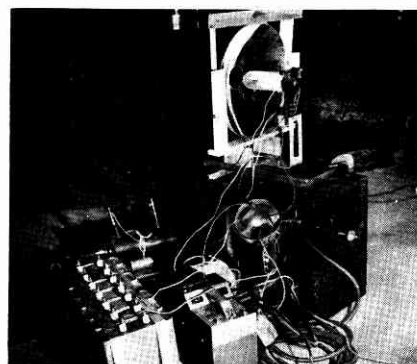
M-3 型超高速カメラは、最近完成したのでまだ多くの現象を撮影するに至っていないが、テスト撮影の結果を 2, 3 報告する。第 10 図の写真は瞬間写真撮影用



第 10 図 閃光放電管の発光状況撮影速度 50,000 駒/秒

閃光放電管の発光状態を每秒 50,000 駒の撮影速度で撮影したものである。閃光放電管の諸元は次の通りである。閃光管電圧 500 V D.C., コンデンサー容量 60  $\mu$ F, 閃光エネルギー 7.5 watt-second, 閃光継続時間約 1/1,000 秒, 閃光管は国産の試作品である。高速度カメラの撮影諸元は被写体より第 1 レンズまでの距離 1.5m, 使用フィルムはコダック Super-X X 16mm ネガティブ・フィルム, 現像 D-76 15 分で、閃光放電管を直接撮影しているため非常に明るいので第 1 レンズの絞りを F-8 に制限した。このような非常に明るい発光体の撮影には第 1 レンズ F-2 の明るさを相当制限しても撮影が可能である。

反射光で被写体を撮影する場合は、透過光の場合の百倍以上の光量を必要とするから、非常に明るい照明光源を使用しなければならない。このため第 11 図の写真に示すような非常に強力な閃光放電管装置を製作した。この閃光管装置は閃光管電圧 4000 V コンデンサー容量 250  $\mu$ F, 最大出力 2,000



第 11 図 高速度カメラ用強力閃光放電管式照明装置

watt-second, 閃光継続時間 1/1,000 秒の性能を有する。第 12 図の写真は每秒 50,000 駒の撮影速度でテスト・チャートを反射光で撮影した 1 例である。閃光放電管照明装置は抛物面鏡を用いて集光し、出力 250 watt-second で使用した。

この方式の高速度カメラにおいてはフィルムドラム



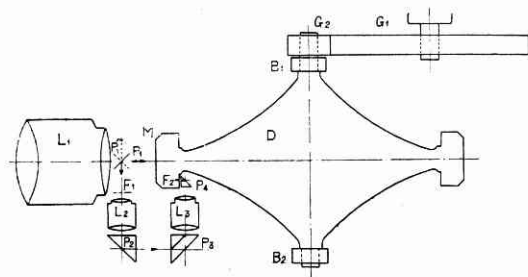
第12図 テストチャートを反射光で撮影した例  
撮影速度50,000 駒/秒

いし 1/300 の露出を与える装置を付属させてあるが、被写体の現象と同期させることが相当困難な問題となってくる。この難点は部屋を暗室にしておき、高速度カメラのレンズを開放にして待機し上述の照明用閃光放電管装置を用い被写体の現象と電氣的に同調させて撮影を行えば、割合簡単に解決できる。

### 5. M—4 型超高速度カメラの計画

M—3 型カメラは移動可能ではあるが、相当の重量をもち現場撮影等には不利であるので、M—3 型の約1/10の大きさで重量約 20kg、最高撮影速度 15,000 ないし 30,000 駒/秒の性能を有するM—4 型カメラを計画 中である。このカメラは普通の 35mm 撮影機用三脚にのせて使用が可能である。第 13 図はM—4 型カメラの構造の概略を示す。図においてフィルムドラムDは直径約 170 mm の独楽状円盤で円周の内側に 8 mm cine 用フィルムを一周づつ 2 列に巻く。

多面体反射鏡MはフィルムドラムDの外周をそのまま120面に研磨してある。換言すれば、M—3型では反射鏡とフィルムドラムは別個のものを用い、一体に連結して使用したがM—4 型ではフィルムドラムの外周そのものを多面体反射鏡として使用しており、この方式にすれば機構が簡単となり、より高速回転に耐え得る特徴がある。



第13図 M—4 型超高速度カメラの構造

光学系としては被写体よりの光束は第1レンズ $L_1$ （焦点距離 105mm,  $F1.5$ , 本カメラ用として特に製作したもの）を通りフィルムドラムの外周の120面体反射鏡Mの反射面で垂直に反射され、小型反射鏡 $F_1$ で直角に曲げられ $F_1$ の位置に第1実像を結ぶ。この実像 $F_1$ をレンズ $L_2$ （焦点距離 50mm,  $F1.5$  のライカ型カメラ用写真レンズ）で受け平行光束とし、さらにレンズ $L_3$ （レンズ $L_2$ と同一のもの）を通過し、フィルムドラムの内

回転以上の間露出すれば、二重撮しとなるので露出を一回転の時間に制限しなければならない。このため機械的シャッターを使用し、1/100 ないし 1/300 の露出を与える装置を付属させてあるが、被写体の現象と同期させることが相当困難な問題となってくる。この難点は部屋を暗室にしておき、高速度カメラのレンズを開放にして待機し上述の照明用閃光放電管装置を用い被写体の現象と電氣的に同調させて撮影を行えば、割合簡単に解決できる。

側に巻いたフィルム面上に第2の実像 $F_2$ を結ぶ。なおこれらのレンズ系の途中に直角プリズム $P_2$ 、反転用屋根型プリズム $P_3$ 、直角プリズム $P_4$ を入れて、図のように光路を屈折させる。実像 $F_1$ と $F_2$ の倍率は1:1で、カメラ全体の総合明るさは $F2.5$ となり、M—3型に較べて4倍明るくなっている。フィルムは片側の一卷きで連続120駒撮影でき、他の側のフィルム上には、半駒だけ時間的にずれた瞬間を、 $P_1'$ 以後上述の光学系と同一のレンズ系を相称位置に配置して（図には示していない）撮影することにより、同様に120駒連続に記録できる。このようにして、半駒時間的にずれた写真を2列に計240駒記録できる。フィルムドラムを歯車 $G_1$ ,  $G_2$ で増速して75,000r.p.m.で回転させ、毎秒300,000駒の最高撮影速度をうるができる。このカメラは現在光学系の試作を終り、本年度中に完成する予定である。

上述のM—1型よりM—4型カメラまでの性能諸元をまとめて示せば第1表のようになる。

第1表 ドラム式超高速度カメラの性能表

型 式	M 1	M 2	M 3	M 4
諸 元				
最高撮影速度 (駒/秒)	9,000	70,000	75,000 150,000	150,000 300,000
ド ラ ム 直 径 mm	470	490	490	170
多面体反射鏡				
面 数	180	180	180 360	120
直 径 mm	120	120	300	170
形 状	角 錐	角 錐	角 柱	角 柱
画面の大きさ mm	7.6×10	7.6×10	7.6×10 3.8×5	3.8×5
連続駒数	180	180	180 360	120 240
光 学 系				
第1レンズ	150 mm f3.5	135 mm f3.5	240 mm f2.0	105 mm f1.5
第2レンズ	25mm f1.8	25mm f1.8	25mm f1.8	50mm f1.5
拡大率	5	5	2	1
明 る さ	f 25	f 25	f 5	f 12.5
駆 動 馬 力 HP	1	10	5	1
重 量 kg	10	100	150	20
			モーター付	モーター付

### 6. む す び

この研究は昭和 23 年、24 年度文部省科学研究費により基礎的研究を行い、昭和 25 年、26 年、27 年度東大生産技術研究所中間試験研究費により本格的試作研究を行ったものである。なおM—4 型カメラは昭和 31 年度文部省科学試験研究費により製作中である。これらの方式のカメラに関し特許 3 件をえた。

終りに臨み、種々ご援助とご教示を戴いた東大生産技研の諸先生に厚く御礼申上げると共に、設計製作に終始協力していただいた当研究室伊藤寛治氏に深く感謝の意を表する。なおカメラの製作にあたり、協力していただいた東大生研中央試作工場、東大理工研工作部、日本光学KK、東京光学KK、黒田映範製作所等関係各位に深く感謝する。（1956. 6. 25.）

### 文 献

- (1) 植村：応用物理学第4回講演会発表（1950年4月27日）
- (2) 植村：『生産研究』第4巻7号（1952年）p. 259～262
- (3) 植村：精機学会講演会発表（1953年10月）
- (4) 植村：精機学会講演会発表（1955年5月8日）
- (5) 植村：第3回応用物理学関係講演会発表（1956年4月5日）
- (6) 植村：『機械の研究』第3巻6号（1951年）p. 357～358
- (7) 植村：『東大理工研報告』第4巻11号（1950年）p. 300～303