

JAERI - M
92-170

飛行中の固体水素ペレットの影絵
(Shadowgraph) 測定

1992年11月

長谷川浩一・河西 敏・鈴木 貞明・小田 泰嗣*

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 (株)原子力資料サービス

飛行中の固体水素ペレットの影絵 (Shadowgraph) 測定

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

長谷川浩一・河西 敏⁺・鈴木 貞明

小田 泰嗣*

(1992年10月9日受理)

高速・多発ペレット入射装置から射出された固体水素ペレットの影絵を撮影する系についてまとめた。高輝度パルス光源とビデオ・カメラを組み合わせた撮影系により、ペレット入射装置から1～5 Hz 間隔で高速度で発射されるペレットの影絵を、ほぼ100%の確率で撮影することができた。

Measurement of Shadowgraph of Flying Solid-hydrogen Pellets

Kouichi HASEGAWA, Satoshi KASAI⁺, Sadaaki SUZUKI
and Yasushi ODA^{*}

Department of Fusion Facility
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 9, 1992)

The measurement system of shadowgraphs of flying pellets for the high-speed multi-pellet injector is described. Shadowgraphs of pellets ejected repeatedly with 1-5 Hz could be taken with about 100 % probability by using the system, which is composed of an intense pulse-lamp with a video-camera and a timing control system.

Keywords: Solid Hydrogen, Multi-pellet, Nuclear Fusion, Tokamak,
Shadowgraph, Repeating Pneumatic Pellet-injector

⁺ Department of Fusion Engineering Research
^{*} Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 影絵 (Shadowgraph) 撮影法	1
3. 高速・多発ペレット入射装置用の影絵 (Shadowgraph) 撮影系	3
4. 多発ペレットの影絵 (Shadowgraph)	4
5. 考 察	6
6. ま と め	7
謝 辞	7
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
2. Method of Shadowgraph-measurement	1
3. Measurement System of Shadowgraph for the High-velocity and Multi-pellets Injector	3
4. Shadowgraphs of Flying Multi-pellets	4
5. Discussions	6
6. Summary	7
Acknowledgements	7
References	7

1. はじめに

核融合研究では、プラズマの内部領域に粒子を効率よく補給するための研究が進められている。従来よく使用されてきたガス補給法に加えて、固体水素ペレットを高速度でプラズマに入射する方法が、近年効率の高い粒子補給法として注目されるようになってきた。この方法の開発では、多数のペレットを高速度で再現よく、信頼性高く打ち出す技術を開発することが重要になっている¹⁾。この入射技術の開発と共に、発射されるペレットのパラメータ（速度、質量、運動量、形状）を精度高く測定する技術の開発も重要な課題である。速度、質量、運動量は、ペレットの状態を知る上で最も基本的な量であり、ペレットの定量的評価に用いられている。一方、ペレットの形状撮影法は、装置から発射されたペレットの健全性を視覚的に捕らえることができる点で、非常に優れている。本報告書では、高速・多発ペレット入射技術²⁾を開発して行く上で、有力なペレット観察手段であるペレットの影絵（Shadowgraph）撮影法と、その観測結果について記述した。

2. 影絵（Shadowgraph）撮影法

気体、液体等の流体の流れの様子を調べる方法として、流れの可視化の手法が多く用いられている³⁻⁶⁾。この手法は、壁面トレース法、タフト法、直接注入トレース法、化学反応法、電気制御法、光学的方法に大別される。流体の種類や観察の対象によって手法に適、不適があるが、その多くは実用化されている。その中で光学的方法は、流れにまったく影響を与えずに可視化できる特徴を有し、流動する流体中における屈折、干渉、複屈折、放電発光、界面における反射などの光学現象を利用する方法である。影絵（Shadowgraph）法、シュリーレン法、マッハツェンダ干渉法、レーザホログラフ法、ミラージュ法、放電法、モアレ法、ステレオ写真法、流動複屈折法、サーモグラフ法等がある。流体の密度計測には干渉計法が、密度勾配についてはシュリーレン法が、用いられている。また、密度勾配の変化については影絵法がよく用いられている。三次元の流れの場を観察するにはホログラフ法が適している。干渉計法やホログラフ法は質の高い情報を提供するが、影絵からの定量的情報は少ない。しかし、影絵法は、干渉計法等他の方法に比べて価格が安く、操作法も極めて簡単であるという利点から、流体の流れの様子を定性的に調べる方法として、超音速気流の衝撃波、膨張波、後流の研究等によく使用されている。今回の飛行中の固体水素ペレットの影絵測定は、この手法を飛翔固体ペレットに応用したものである。

影絵法は、その名の示す通り物体の影の写真を撮影する方法である。物体の密度変化による光の影を、直接スクリーンに投影して観察するもので直接投影法とも呼ばれる。媒質の密度変化による屈折率の変化を利用したものである。第1図のように点光源Sより出た光は、密度が一様でない観測気体（液体）を通過するとき曲げられ、スクリーンPの上に明るさの濃淡をもつ像をつ

1. はじめに

核融合研究では、プラズマの内部領域に粒子を効率よく補給するための研究が進められている。従来よく使用されてきたガス補給法に加えて、固体水素ペレットを高速度でプラズマに入射する方法が、近年効率の高い粒子補給法として注目されるようになってきた。この方法の開発では、多数のペレットを高速度で再現よく、信頼性高く打ち出す技術を開発することが重要になっている¹⁾。この入射技術の開発と共に、発射されるペレットのパラメータ（速度、質量、運動量、形状）を精度高く測定する技術の開発も重要な課題である。速度、質量、運動量は、ペレットの状態を知る上で最も基本的な量であり、ペレットの定量的評価に用いられている。一方、ペレットの形状撮影法は、装置から発射されたペレットの健全性を視覚的に捕らえることができる点で、非常に優れている。本報告書では、高速・多発ペレット入射技術²⁾を開発して行く上で、有力なペレット観察手段であるペレットの影絵（Shadowgraph）撮影法と、その観測結果について記述した。

2. 影絵（Shadowgraph）撮影法

気体、液体等の流体の流れの様子を調べる方法として、流れの可視化の手法が多く用いられている³⁻⁵⁾。この手法は、壁面トレース法、タフト法、直接注入トレース法、化学反応法、電気制御法、光学的方法に大別される。流体の種類や観察の対象によって手法に適、不適があるが、その多くは実用化されている。その中で光学的方法は、流れにまったく影響を与えずに可視化できる特徴を有し、流動する流体中における屈折、干渉、複屈折、放電発光、界面における反射などの光学現象を利用する方法である。影絵（Shadowgraph）法、ジュリーレン法、マッハツェンダ干渉法、レーザホログラフ法、ミラージュ法、放電法、モアレ法、ステレオ写真法、流動複屈折法、サーモグラフ法等がある。流体の密度計測には干渉計法が、密度勾配についてはジュリーレン法が、用いられている。また、密度勾配の変化については影絵法がよく用いられている。三次元の流れの場を観察するにはホログラフ法が適している。干渉計法やホログラフ法は質の高い情報を提供するが、影絵からの定量的情報は少ない。しかし、影絵法は、干渉計法等他の方法に比べて価格が安く、操作法も極めて簡単であるという利点から、流体の流れの様子を定性的に調べる方法として、超音速気流の衝撃波、膨張波、後流の研究等によく使用されている。今回の飛行中の固体水素ペレットの影絵測定は、この手法を飛翔固体ペレットに応用したものである。

影絵法は、その名の示す通り物体の影の写真を撮影する方法である。物体の密度変化による光の影を、直接スクリーンに投影して観察するもので直接投影法とも呼ばれる。媒質の密度変化による屈折率の変化を利用したものである。第1図のように点光源Sより出た光は、密度が一様でない観測気体（液体）を通過するとき曲げられ、スクリーンPの上に明るさの濃淡をもつ像をつ

くる。但し、密度変化は2次元で紙面に垂直な x 方向には変わらないものと仮定する。

点Aを通過する光線 r_A の屈折角(y 方向への)は $\epsilon_y = \int_0^d (1/n) \partial n / \partial y dy$ であるから、屈折率 n が $n = 1 + K\rho$ で表される気体に対しては、

$$\epsilon_y = \int_0^d (K/n) \partial \rho / \partial y dz$$

となる。ここで、 ρ は密度、 K は気体の種類によって決まる正の定数(ただし、厳密には波長によって僅かに変わる。Gladstone-Dale定数という)。密度は y 方向にのみ変化するものとする、光線 r_A の全屈折角は

$$\epsilon_y = \frac{Kd}{n} \frac{d\rho}{dy} \simeq Kd \frac{d\rho}{dy}$$

となる。もし密度勾配 $d\rho/dy$ が y 方向に一定ならば、全ての光は一様に曲げられ、スクリーン上での像の明るさ I は変わらない。従って明るさの変化 ΔI は密度勾配の変化によって現れることがわかる。すなわち、

$$\Delta I \propto d \epsilon_y / dy \propto d^2 \rho / d^2 y$$

密度が x, y 方向ともに変化する一般の場合は、

$$\Delta I \propto \partial^2 \rho / \partial^2 x + \partial^2 \rho / \partial^2 y$$

の関係が成立する。

以上のことから、影絵法によって得られるスクリーン上のコントラストは、気体密度の2次微分すなわち密度勾配の変化に比例するものといえる。

影絵測定用システムは、非常に簡単であり、輝度が強い点光源、集光レンズ(または凹面鏡)及びスクリーン(あるいは、写真乾板、2次元センサー、ビデオ・カメラ等)から基本的には構成されている。第2図(a)のようにこれらを配置すると、まずテスト領域で流体の流れがないときに、レンズで平行にした光でスクリーンを一様に照明する。この状態でテスト領域に流体を流す。流体内部に密度勾配があると、そこで光は屈折する。しかし、密度勾配が一定であると、光は同じ量だけ偏向されるので、スクリーン上の明るさに変化が現れない。密度勾配が変化している所では、光が発散したり、集光したりするため、スクリーン上の明るさが変化する。スクリーンの結像面と観測流体との距離 l を大きくすると像のコントラストは大きくなるが、分解能はそれに逆比例して小さくなる。また、分解能はレンズの焦点距離 F と光源の大きさ s との比 F/s に比例するから、全体として $F/s \cdot l$ に比例するといえる。従ってコントラストと分解能を考慮して光学系の F, s, l を適当に選ぶことが必要である。優れた分解能を得るためには大きな F が望ましいから、レンズの代わりに凹面鏡が用いられる。例えば第2図(b)のようにすれば、影絵法と同時にシュリーレン法に利用することもできる。

3. 高速・多発ペレット入射装置用の影絵 (Shadowgraph) 撮影系

撮影系の基本的構成は第2図 (a) (b) に示すようなものであるが、動的に変化する流れの様子を瞬間を捕らえたり、秒速数 100 m/s 以上の高速度で飛行する物体の影絵を正確に撮るには、撮影系に工夫が必要である。

高速・多発ペレット入射装置用²⁾に整備した撮影系は第3図のような構成である。銃口から 1 cm と 5 cm 離れた位置にレーザ・ダイオードとフォト・ダイオードを組み合わせたスピード・センサーをそれぞれ設置してある。この内の銃口に近い位置にある1番目のスピード・センサーからの信号により遅延パルス発生器を駆動させる。このパルス発生器から出すトリガー・パルスの遅延時間を適当な値に設定することにより、影絵を撮影する時に発光させる光源のタイミングを調整することができる。影絵を撮影するための光源とビデオ・カメラは、2組そろえてあり、一台は、互いに 4 cm 離れて取り付けられている2個のスピード・センサーのほぼ中央に設置してある。他の一台は、スピード・センサーの下流側に設けたテフロン製のガイドチューブと更に下流側に取り付けられたマイクロ波キャビティに接続しているステンレス製のガイドチューブの間に設置してある。

ここで、もう少し詳しく回路系を示したものが第3図 (b) である。一对のスピード・センサーからの信号を、プリアンプに入力し、お互いの信号の極性を変え、+信号と-信号を重ね合わせ、これをオシロスコープ、あるいは CAMAC 電子回路とパーソナル・コンピュータでモニターできるようにしてある。これは、後でペレットの速度を求めるときに、信号処理をやり易くするためである。ここでは、重ね合わせた信号から銃口に近い1番目のスピード・センサーの信号(+信号)のみを取り出し、増幅するために、差動アンプを用いている(ただし、かならずしもこのようにする必要はない)。このアンプ出力を遅延パルス発生器 (BERKELEY NUCLEONICS CORP. 製, モデル7010) に入れる。この発生器から出される遅延パルスを増幅して、光源用の電源(菅原製作所製パルス電源)のトリガー・パルス信号として用いている。このトリガー・パルスの遅延時間を調整してあれば、銃身からペレットが発射され、1番目のスピード・センサーを通過すると(レーザ・ダイオードからのレーザ光を横切る)、ペレットがビデオ・カメラの前を通過するタイミングに合わせて光源を発光させることができる。点光源のパルス・ランプからの光を平行光にするために、点光源から 5 cm の位置にレンズ(焦点距離 5 cm)を付けてある。光源の発光強度が強すぎると、影絵をコントラスト良く得ることができない。このような場合には光減衰フィルターを光源の前に入れる必要がある。また直径 4.5 cm のレンズ面全体における光の強さをほぼ一様にして、撮影される像を鮮明にするために、光を若干散乱させることが重要である。ここでは、これらの役目をさせるために、減衰フィルターとしてテフロン・シート(厚さ = 0.2 mm) 4枚を重ねて用いた。銃身から発射されるペレットの速度は常に一定ではないために(ただし、ある範囲内にある)、ペレットの速度が多少変化しても、影絵を 100% の確率で捕らえるには、銃口の極近くに光源を光らせるためのトリガー・パルスを得るセンサーを置くことが重要

である。更にビデオ・カメラと光源もこのセンサーの近くに取り付けること、及び撮影できる視野の大きさをペレット速度が変化する量を考慮して決めて置くことも重要である。ここでは、前述したように銃身から1 cm離れた位置にあるスピード・センサーの信号を、光源を光らせるためのトリガー・パルスに使用し、視野の広がり直径約5 cmの円にした。また、トリガー・パルスが発生してから光源が光り始め、強度が最大になるまでの遅れ時間が短い光源を用いることが、確実に影絵を撮影する上で重要な要素である。第4図は、ここで使用した光源の発光の遅れ時間の測定をした時のブロック図である。遅延パルス発生器からのパルスにより、パルス・ランプを発光させ、その光をフォト・ダイオードで測定し、発光の遅れ時間を求める。ここでは応答性の優れたフォト・ダイオードを使用した(立上がり時間 = 1~2 μ sec)。なお、遅延パルス発生器へ入力するパルスに対する光源の発光遅れ時間の測定は、実際に影絵の測定に使用している回路を含めて行った。遅延パルス発生器から出せる疑似パルス(遅延パルス発生器の前面パネル上にあるメイン・トリガースイッチにより、外部からのトリガー信号に対応するパルスが発生させることができる)により出されるイニシャル・パルスで、オシロスコープの掃引を開始させる。光源を発光させるための遅延時間を、このパルスから10 μ secに設定して発光遅れ時間の測定を行った。第5図はその一例である。菅原製作所製のランプは、遅延パルスから約2 μ sec遅れて光り始め、更に約3 μ sec後に最大強度に達する(同図(a))。一方、XENON CORP.製のランプ(同図(b))は、発光開始までに約56 μ secかかる。最大強度になるまでの時間は同じであるが、この遅れ時間の再現性はかなり良い。ここで光源用電源までの間に入れてある電子回路での遅れ時間は、測定の結果ほとんど無視できる。以上のテストから、発光遅れ時間が短い菅原製作所製のランプを銃口に近い位置での影絵撮影用の光源として使い、もう一つの遅れ時間が長いランプは下流側での撮影に用いることにした。

4. 多発ペレットの影絵 (Shadowgraph)

第3章で記述した撮影系を用いて、高速・多発ペレット入射装置から発射される直径3 mm、長さ3.5 mm(設計上のペレット寸法)の影絵を撮影した。第6図(a)はその代表的な一例で、撮影している位置は、銃口に近い位置(第1撮影点)であり、影絵を撮影するときには、暗幕を使って遮光をしている。第6図(a)の写真は、ヘリウムガス33 kgf/cm²で加速し、300 ms間隔で8回ペレットを射出したときの速度約1.1 km/sの第1ペレットの影絵である。

ペレットの大きさを知るためにスケールも同時に写してある。左端の目盛りゼロの位置に銃口があり、右に向かってペレットは飛行している。ペレット本体そのものと、その周りに薄い濃淡のある影が写っている。この影については、5章の考察で詳しく述べる。銃口から約2 cm飛行した時点でペレットの大きさは、設計寸法(3 mm ϕ X \times 3.5 mmL)より10~20%減少している。この減少の割合は、ペレットを生成、発射する条件により異なるが、極力この値を小さくすることが、高速・多発ペレット入射技術開発の課題である。

第6図(b)は室内光で、銃身の銃口と大きさの比較をするためのスケールを観測窓から写し

である。更にビデオ・カメラと光源もこのセンサーの近くに取り付けること、及び撮影できる視野の大きさをペレット速度が変化する量を考慮して決めて置くことも重要である。ここでは、前述したように銃身から1 cm離れた位置にあるスピード・センサーの信号を、光源を光らせるためのトリガー・パルスに使用し、視野の広がり直径約5 cmの円にした。また、トリガー・パルスが発生してから光源が光り始め、強度が最大になるまでの遅れ時間が短い光源を用いることが、確実に影絵を撮影する上で重要な要素である。第4図は、ここで使用した光源の発光の遅れ時間の測定をした時のブロック図である。遅延パルス発生器からのパルスにより、パルス・ランプを発光させ、その光をフォト・ダイオードで測定し、発光の遅れ時間を求める。ここでは応答性の優れたフォト・ダイオードを使用した(立上がり時間 = 1~2 μsec)。なお、遅延パルス発生器へ入力するパルスに対する光源の発光遅れ時間の測定は、実際に影絵の測定に使用している回路を含めて行った。遅延パルス発生器から出せる疑似パルス(遅延パルス発生器の前面パネル上にあるメイン・トリガースイッチにより、外部からのトリガー信号に対応するパルスが発生させることができる)により出されるイニシャル・パルスで、オシロスコープの掃引を開始させる。光源を発光させるための遅延時間を、このパルスから10 μsec に設定して発光遅れ時間の測定を行った。第5図はその一例である。菅原製作所製のランプは、遅延パルスから約2 μsec 遅れて光り始め、更に約3 μsec 後に最大強度に達する(同図(a))。一方、XENON CORP.製のランプ(同図(b))は、発光開始までに約56 μsec かかる。最大強度になるまでの時間は同じであるが、この遅れ時間の再現性はかなり良い。ここで光源用電源までの間に入れてある電子回路での遅れ時間は、測定の結果ほとんど無視できる。以上のテストから、発光遅れ時間が短い菅原製作所製のランプを銃口に近い位置での影絵撮影用の光源として使い、もう一つの遅れ時間が長いランプは下流側での撮影に用いることにした。

4. 多発ペレットの影絵 (Shadowgraph)

第3章で記述した撮影系を用いて、高速・多発ペレット入射装置から発射される直径3 mm、長さ3.5 mm(設計上のペレット寸法)の影絵を撮影した。第6図(a)はその代表的な一例で、撮影している位置は、銃口に近い位置(第1撮影点)であり、影絵を撮影するときには、暗幕を使って遮光をしている。第6図(a)の写真は、ヘリウムガス33 kgf/cm²で加速し、300 ms間隔で8回ペレットを射出したときの速度約1.1 km/sの第1ペレットの影絵である。

ペレットの大きさを知るためにスケールも同時に写してある。左端の目盛りゼロの位置に銃口があり、右に向かってペレットは飛行している。ペレット本体そのものと、その周りに薄い濃淡のある影が写っている。この影については、5章の考察で詳しく述べる。銃口から約2 cm飛行した時点でのペレットの大きさは、設計寸法(3 mm ϕ X \times 3.5 mmL)より10~20%減少している。この減少の割合は、ペレットを生成、発射する条件により異なるが、極力この値を小さくすることが、高速・多発ペレット入射技術開発の課題である。

第6図(b)は室内光で、銃身の銃口と大きさの比較をするためのスケールを観測窓から写し

た写真である。この写真から銃身とスケールの位置関係がわかる。ペレットがスケールのほぼ真上を通過するように設置してある。

第7図は、第6図(a)のペレットのスピード・センサー出力と第3マイクロ波キャビティーの出力信号波形である。CH1の波形のトレース(フォト・ダイオード信号であり、時間幅を拡大してある)はスピード・センサー出力で、1番目のスピード・センサー信号と2番目のスピード・センサー信号を加算した合成信号で1番目の信号と2番目の信号の極性を逆にして、信号の区別ができるようにしている。CH1に矢印で示す時刻でマイナスに振れているのは、菅原製作所製のランプの発光の時の反射光などによるものである。このことから分かるように光源が発光している時刻は、1番目のスピード・センサーからの信号と2番目のスピード・センサーからの信号の間に示した矢印の位置である。すなわち、ペレットが1番目のスピード・センサーを通過してから約 $18\mu\text{sec}$ である。

CH2の波形のトレースは第3図(a)で示す第3マイクロ波キャビティーの出力信号波形である。図中にCH1と同じ矢印で示す信号は、パルス・ランプの発光によるもので、2番目のスピード・センサー信号と同時刻に出力されている。この時のペレット速度は約 1.1 km/s である。

次に、ピストンの押し出し速度 10 mm/s において、 2 Hz の周期で8個のペレットを連射したとき、第1撮影点で撮影した影絵を第8図に示す。全てのペレットの影絵が非常に鮮明に撮れている。射出されたペレットの速度は、 $1.00\text{ km/s} \pm 0.05\text{ km/s}$ の範囲にある。この影絵を見る限りでは、銃口から打ち出されたペレットの大きさは非常に良く揃っているといえる。しかし、ペレットの質量の大きさを示す第3マイクロ波キャビティーの出力信号値(ΔV)には、各ペレットでかなりの差がある。これは、キャビティーによる測定的位置が、銃口から下流側に 1 m 離れており、しかも途中に長さ 23.5 cm のステンレス製ガイドチューブ(直径 $=5\text{ mm}$)があり、この内部をペレットが通過するときにチューブの内壁と接触して溶けるためと考えられる。また、溶ける量は、チューブに入る時の角度に依存しているようでもある。

次に、第1撮影点から下流に約 16 cm 離れた位置(第2撮影点)で撮影した影絵について記述する。ここでの撮影では、光源を発光させるための基準パルスを前述した撮影で用いた1番目のスピード・センサーから取っている。この時の1番目のスピード・センサーから光源までの距離は約 18 cm で、本来、撮影する位置に近い場所で基準となるパルスを得ることが、失敗することなく影絵を撮影する点からは好ましいが、観測窓の取付スペースの制約上やむを得ず 18 cm 離れた位置で撮影することにした。

第9図(a)は、 500 ms 間隔で4個のペレットを発射したとき、第2撮影点で撮影した影絵の一例である。この写真の特徴は、ペレット本体の影絵の周りに明るさの濃淡を持つ雲がないことである。この原因についても考察で述べるが、周辺にペレットからアブレーションした粒子がほとんど存在しないためと思われる。銃口の近くで測定したペレット速度は、4個のペレットがほとんど同じであるにもかかわらず、この写真に写っている位置が異なっている(光源を発光させるための遅延時間は同じにしてある)。これは、第1撮影点と第2撮影点の間にあるテフロン製ガイドチューブの内面にペレットが接触して速度が減衰するためである。ここでの撮影では、遅延時間を $160\sim 180\mu\text{sec}$ の間に設定している。また、第3キャビティーの出力信号値(ΔV)は $2.1\text{ V}\sim 2.6\text{ V}$ で、第6図(a)のペレットに比べ、比較的ばらつきが少なくなっている。第

9 図 (b) には、第 2 撮影点のビデオ・カメラにより、遮光せずに室内の通常光で撮影したスケールとガイドチューブの写真を位置関係の参考として示した。

第 1 撮影点では、第 10 図で示すように、正常に射出されたペレット以外に割れたペレット、砕けたペレット、あるいはガス状になったもの等様々なペレットを写すことができる。図中の (a) は、銃身内部あるいは装填部付近に、前の打出しテストで残った固体水素があり、第 1 ペレットの発射時に一緒に飛び出している写真。(b) はガス状になったペレット、(c) は後部が円錐状に溶けているペレット、(d) は後部が砕けたペレット、(e) は径方向に一樣に溶けたペレットである。このように発射されるペレットの状態、固体水素の状態等を影絵から定性的ではあるが知ることができる。

また、第 10 図 (f) はこれらのペレットを、撮影した時の銃身とスケールの位置を参考として写した写真である。

5. 考 察

ペレットを影絵 (Shadowgraph) 撮影法で写したとき、物体の周囲に見られる縁の鋭い明るさに濃淡がある影 (雲) は、物体が置かれている流体の流れの速度が物体に対して音速を越えているために、物体の周りの流体に密度勾配が変化しているところがある場合、この影は衝撃波として現れる。あるいは、これとは異なる原因で密度勾配の変化が生じた場合にも現れると考えられる。この報告書でまとめた影絵では、ペレットの速度が 1 km/s 前後、加速ガスのヘリウムの温度が室温 (約 $27 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$) であるから、その音速が約 1 km/s の条件のもとで撮影したものである。さて加速ガスは高真空まで膨張すると次式で与えられるように速度が増える⁶⁾。

$$v = c_0 \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1} \left(1 - \left(\frac{P}{P_0}\right)\right) \frac{\gamma - 1}{\gamma}}$$

ここで、 c_0 は音速、 γ は比熱比 (He, $\gamma = 5/3$)、 P_0 と P は膨張前と後の加速ガスの圧力である。 60 kgf/cm^2 の加速ガスが約 30 Torr まで膨張すると仮定して、 v を求めると約 1.72 km/s となる。また、この速度は、最大でも音速 c_0 の $\sqrt{3}$ 倍である。従って、相対的には流体の速度は音速を越えないので、衝撃波は形成されない。すなわち、この影は衝撃波によるものではなく、これとは別の原因よりできた密度勾配の変化によるものとなるが、密度勾配のできる原因は何か。この影が第 1 撮影点でのみ見えることから、ペレットが銃口付近にいるときは、周辺部に多量の加速ガスがあるため、ペレットの表面がこのガスによりアブレーションを受け、水素ガスがペレットから噴出し、銃身からの加速ガスで流され、写真で見られるような位置に水素ガスによる密度勾配の変化が作られるためと考えられる。第 2 撮影点では、加速ガスが拡散してしまうので、ペレットのアブレーションが極端に少なくなるために影はできないものと思われる。

9 図 (b) には、第 2 撮影点のビデオ・カメラにより、遮光せずに室内の通常光で撮影したスケールとガイドチューブの写真を位置関係の参考として示した。

第 1 撮影点では、第 10 図で示すように、正常に射出されたペレット以外に割れたペレット、砕けたペレット、あるいはガス状になったもの等様々なペレットを写すことができる。図中の (a) は、銃身内部あるいは装填部付近に、前の打出しテストで残った固体水素があり、第 1 ペレットの発射時に一緒に飛び出している写真。(b) はガス状になったペレット、(c) は後部が円錐状に溶けているペレット、(d) は後部が砕けたペレット、(e) は径方向に一樣に溶けたペレットである。このように発射されるペレットの状態、固体水素の状態等を影絵から定性的ではあるが知ることができる。

また、第 10 図 (f) はこれらのペレットを、撮影した時の銃身とスケールの位置を参考として写した写真である。

5. 考 察

ペレットを影絵 (Shadowgraph) 撮影法で写したとき、物体の周囲に見られる縁の鋭い明るさに濃淡がある影 (雲) は、物体が置かれている流体の流れの速度が物体に対して音速を越えているために、物体の周りの流体に密度勾配が変化しているところがある場合、この影は衝撃波として現れる。あるいは、これとは異なる原因で密度勾配の変化が生じた場合にも現れると考えられる。この報告書でまとめた影絵では、ペレットの速度が 1 km/s 前後、加速ガスのヘリウムの温度が室温 (約 $27 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$) であるから、その音速が約 1 km/s の条件のもとで撮影したものである。さて加速ガスは高真空まで膨張すると次式で与えられるように速度が増える⁶⁾。

$$v = c_0 \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1} (1 - (P/P_0)) \frac{\gamma - 1}{\gamma}}$$

ここで、 c_0 は音速、 γ は比熱比 (He, $\gamma = 5/3$)、 P_0 と P は膨張前と後の加速ガスの圧力である。 60 kgf/cm^2 の加速ガスが約 30 Torr まで膨張すると仮定して、 v を求めると約 1.72 km/s となる。また、この速度は、最大でも音速 c_0 の $\sqrt{3}$ 倍である。従って、相対的には流体の速度は音速を越えないので、衝撃波は形成されない。すなわち、この影は衝撃波によるものではなく、これとは別の原因よりできた密度勾配の変化によるものとなるが、密度勾配のできる原因は何か。この影が第 1 撮影点でのみ見えることから、ペレットが銃口付近にいるときは、周辺部に多量の加速ガスがあるため、ペレットの表面がこのガスによりアブレーションを受け、水素ガスがペレットから噴出し、銃身からの加速ガスで流され、写真で見られるような位置に水素ガスによる密度勾配の変化が作られるためと考えられる。第 2 撮影点では、加速ガスが拡散してしまうので、ペレットのアブレーションが極端に少なくなるために影はできないものと思われる。

6. ま と め

高速・多発ペレット入射装置から射出されるペレットの影絵の撮影について記述した。この方法は、飛行中のペレットの状態を視覚に捕らえることができる点でペレット入射装置の技術開発を行う上で有用なものである。しかも定量的な測定と合わせることにより、研究開発が一層やり易くなった。

光源の発光強度の調整、光源を発光させるためのトリガー・パルス信号の取り方の工夫等を行うことにより、ほぼ 100 % の確率で影絵を撮影できるようになった。

今後更に流れの可視化技術を発展させて、より定量的な観測ができるようにする予定である。

謝 辞

高速・多発ペレット入射装置の技術開発研究を進めるにあたり、終始議論、激励していただいたプラズマ物理実験研究室長の前田彦祐博士に心から感謝致します。影絵の撮影結果について議論していただいたプラズマ物理実験研究室の小川宏明氏に感謝します。また、JFT-2M 装置の運転保守業務の合間にこの開発研究に参加できるよう御配慮頂いた JFT - 2M 試験室の諸氏に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) C.T. Chang: Phys. Reports (Review Section of Phys. Letters) 206 No. 4 (1991) 143-196.
- (2) S. Kasai, K. Hasegawa, Y. Miura, S. Suzuki, Y. Oda, M. Onozuka: "A Repeating Pneumatic Hydrogen Pellet Injector on JAERI", submitted in JAERI-M Report.
- (3) A.H. Shapiro: "The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow", Jhon Wiley & Sons, New York Chichester Brisbane Toronto Singapore Vol. 1 (1953) 59.
- (4) N.F. Barnes and S.L. Bellinger, J. Opt. Soc. of America, 35 (1945) 497.
- (5) 浅沼 強, 他, "流れの可視化ハンドブック", 朝倉書店, 54.
- (6) L.D. Landau, E.M. Lifshits: "Fluid Mechanics", 日本語版, 竹内均訳: "流体力学 2" 東京図書株式会社, 361.

6. ま と め

高速・多発ペレット入射装置から射出されるペレットの影絵の撮影について記述した。この方法は、飛行中のペレットの状態を視覚に捕らえることができる点でペレット入射装置の技術開発を行う上で有用なものである。しかも定量的な測定と合わせることにより、研究開発が一層やり易くなった。

光源の発光強度の調整、光源を発光させるためのトリガー・パルス信号の取り方の工夫等を行うことにより、ほぼ 100 % の確率で影絵を撮影できるようになった。

今後更に流れの可視化技術を発展させて、より定量的な観測ができるようにする予定である。

謝 辞

高速・多発ペレット入射装置の技術開発研究を進めるにあたり、終始議論、激励していただいたプラズマ物理実験研究室長の前田彦祐博士に心から感謝致します。影絵の撮影結果について議論していただいたプラズマ物理実験研究室の小川宏明氏に感謝します。また、JFT-2M 装置の運転保守業務の合間にこの開発研究に参加できるよう御配慮頂いた JFT - 2M 試験室の諸氏に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) C.T. Chang: Phys. Reports (Review Section of Phys. Letters) 206 No. 4 (1991) 143-196.
- (2) S. Kasai, K. Hasegawa, Y. Miura, S. Suzuki, Y. Oda, M. Onozuka: "A Repeating Pneumatic Hydrogen Pellet Injector on JAERI", submitted in JAERI-M Report.
- (3) A.H. Shapiro: "The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow", Jhon Wiley & Sons, New York Chichester Brisbane Toronto Singapore Vol. 1 (1953) 59.
- (4) N.F. Barnes and S.L. Bellinger, J. Opt. Soc. of America, 35 (1945) 497.
- (5) 浅沼 強, 他, "流れの可視化ハンドブック", 朝倉書店, 54.
- (6) L.D. Landau, E.M. Lifshits: "Fluid Mechanics", 日本語版, 竹内均訳: "流体力学 2" 東京図書株式会社, 361.

6. ま と め

高速・多発ペレット入射装置から射出されるペレットの影絵の撮影について記述した。この方法は、飛行中のペレットの状態を視覚に捕らえることができる点でペレット入射装置の技術開発を行う上で有用なものである。しかも定量的な測定と合わせることで、研究開発が一層やり易くなった。

光源の発光強度の調整、光源を発光させるためのトリガー・パルス信号の取り方の工夫等を行うことにより、ほぼ 100 % の確率で影絵を撮影できるようになった。

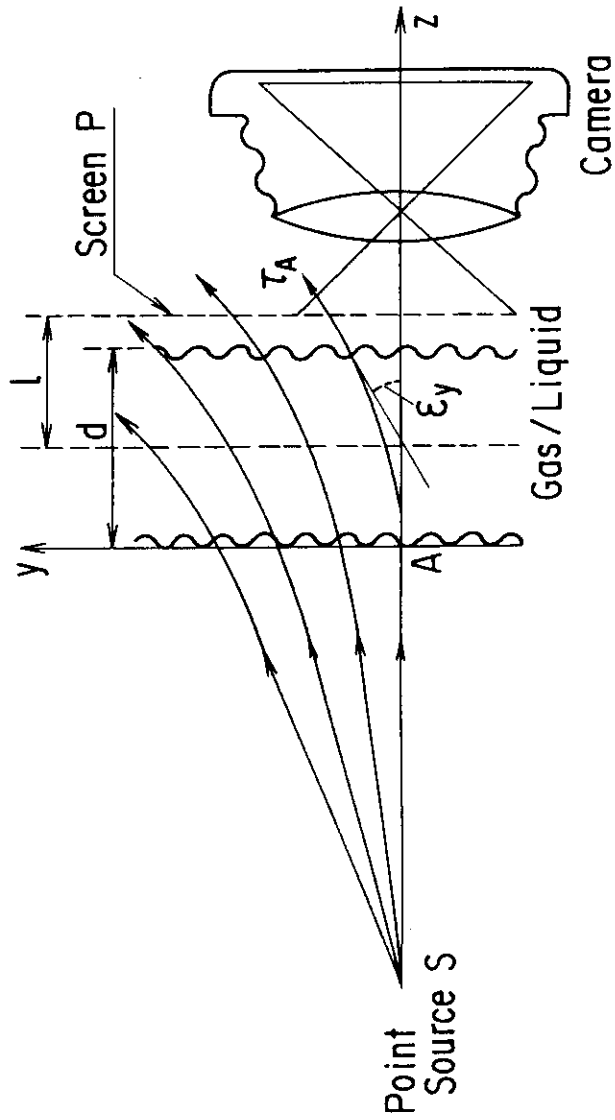
今後更に流れの可視化技術を発展させて、より定量的な観測ができるようにする予定である。

謝 辞

高速・多発ペレット入射装置の技術開発研究を進めるにあたり、終始議論、激励していただいたプラズマ物理実験研究室長の前田彦祐博士に心から感謝致します。影絵の撮影結果について議論していただいたプラズマ物理実験研究室の小川宏明氏に感謝します。また、JFT-2M 装置の運転保守業務の合間にこの開発研究に参加できるよう御配慮頂いた JFT - 2M 試験室の諸氏に感謝致します。

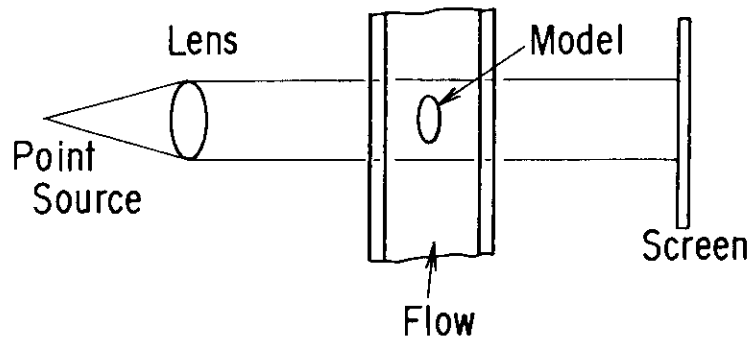
参 考 文 献

- (1) C.T. Chang: Phys. Reports (Review Section of Phys. Letters) 206 No. 4 (1991) 143-196.
- (2) S. Kasai, K. Hasegawa, Y. Miura, S. Suzuki, Y. Oda, M. Onozuka: "A Repeating Pneumatic Hydrogen Pellet Injector on JAERI", submitted in JAERI-M Report.
- (3) A.H. Shapiro: "The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow", Jhon Wiley & Sons, New York Chichester Brisbane Toronto Singapore Vol. 1 (1953) 59.
- (4) N.F. Barnes and S.L. Bellinger, J. Opt. Soc. of America, 35 (1945) 497.
- (5) 浅沼 強, 他, "流れの可視化ハンドブック", 朝倉書店, 54.
- (6) L.D. Landau, E.M. Lifshits: "Fluid Mechanics", 日本語版, 竹内均訳: "流体力学 2" 東京図書株式会社, 361.

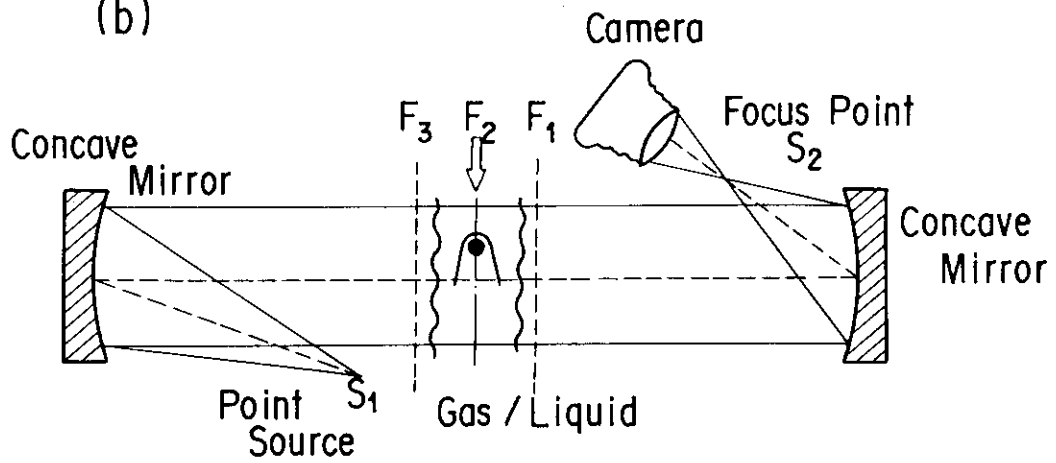


第1図 影絵 (Shadowgraph) 法の原理

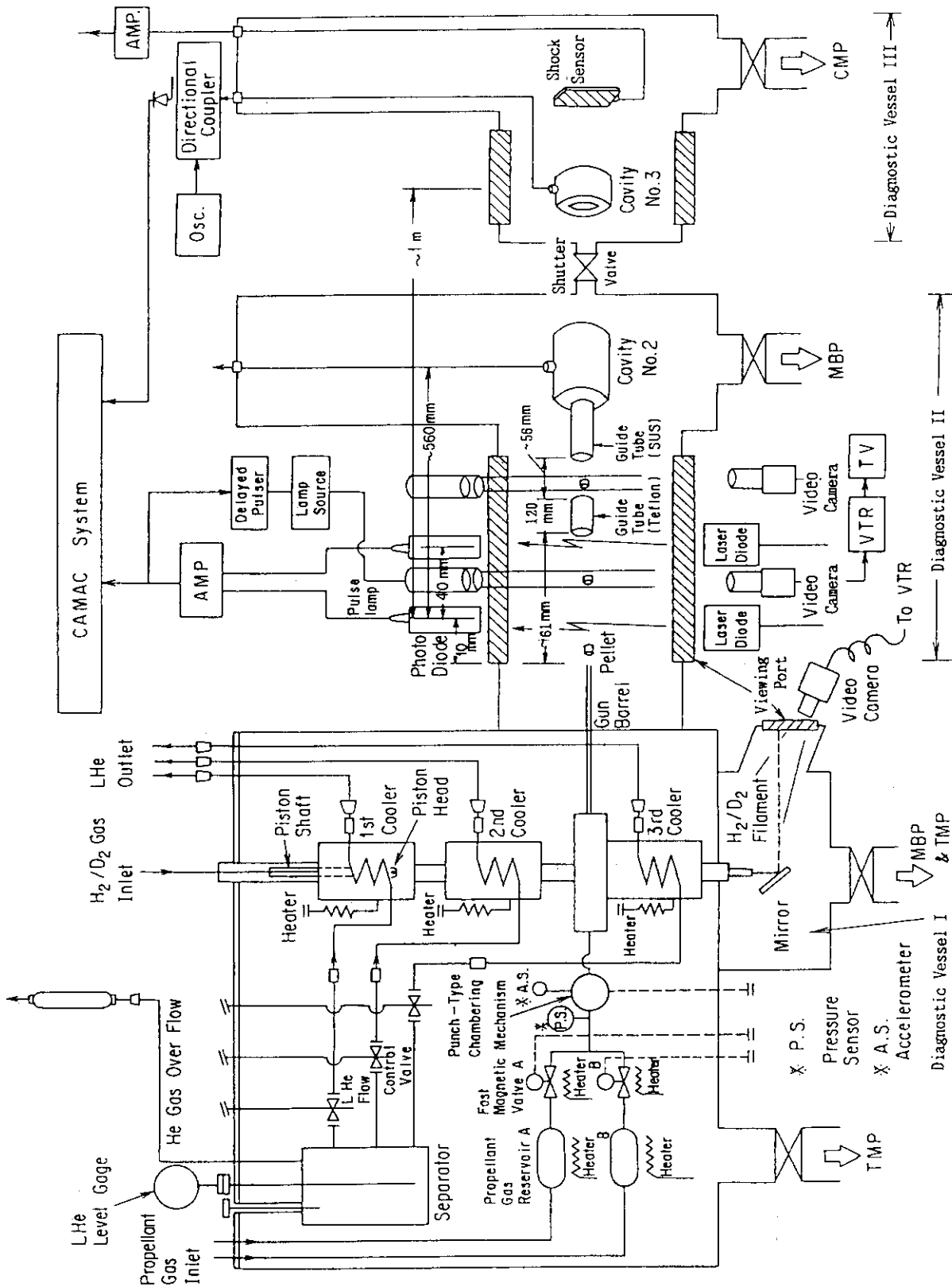
(a)



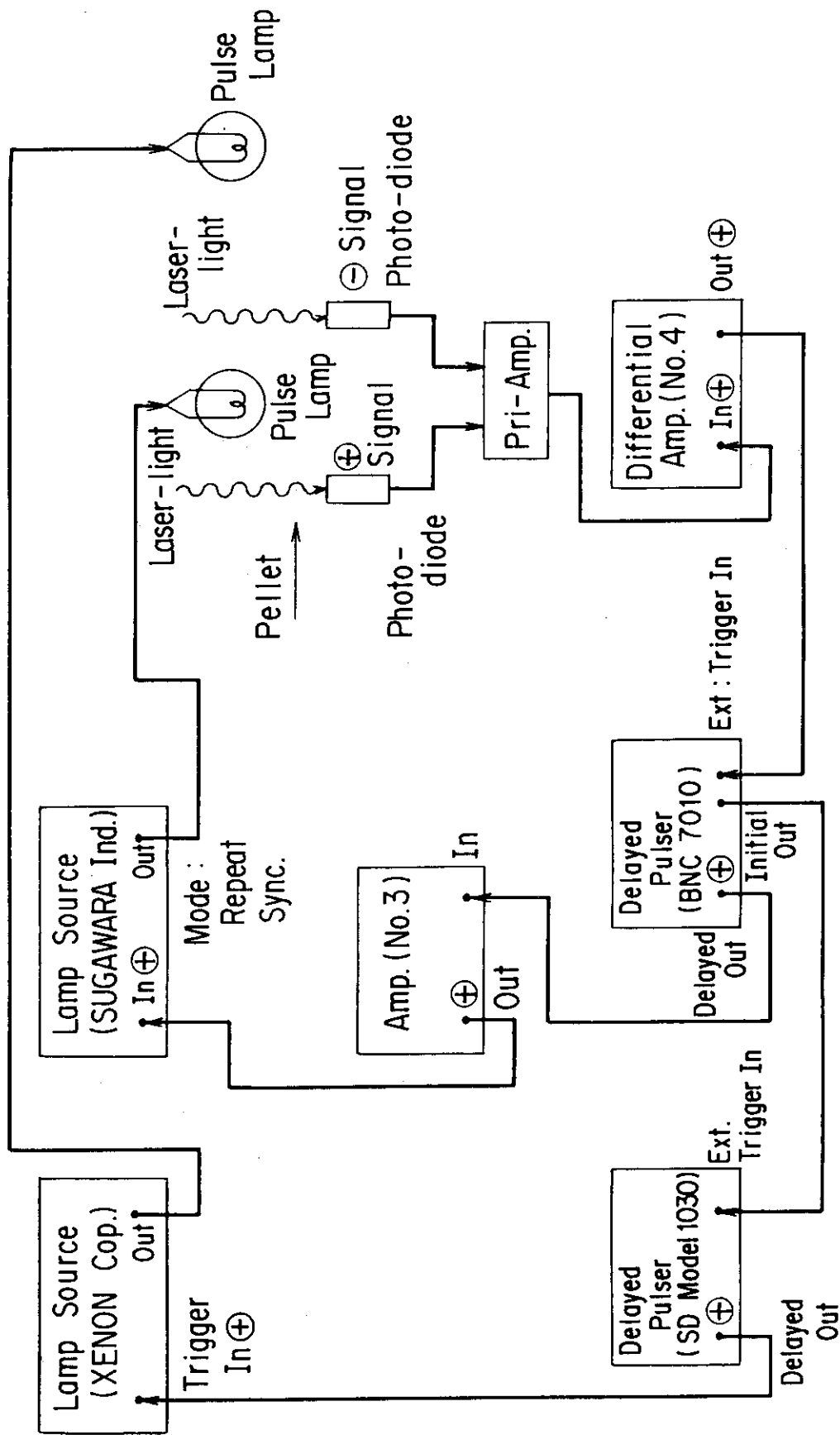
(b)



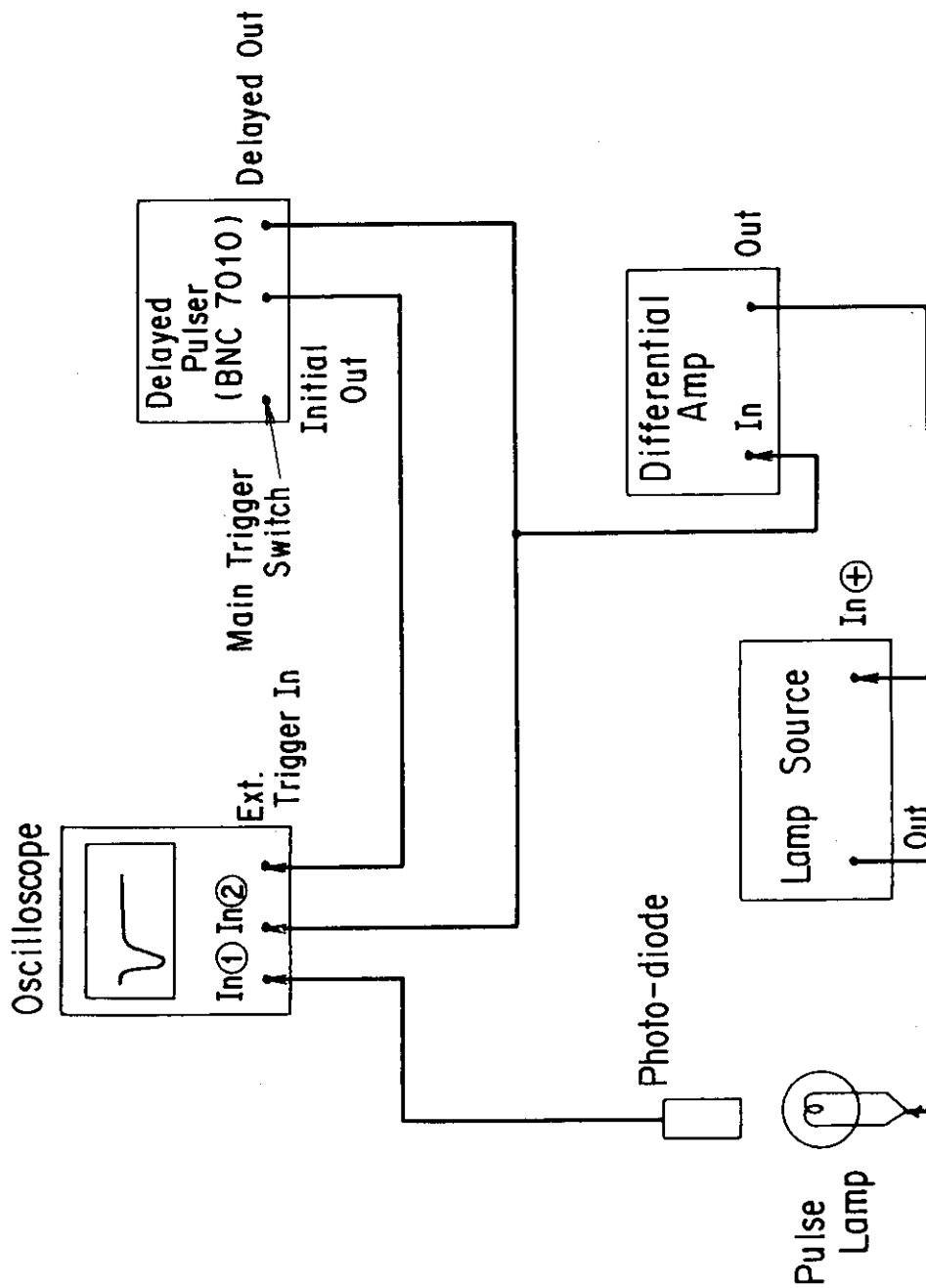
第2図 (a) 影絵 (Shadowgraph) 撮影の基本系,
 (b) 影絵撮影への凹面鏡の応用例



第3図 (a) 高速・多発ペレット入射装置用の影絵 (Shadowgraph) 撮影系



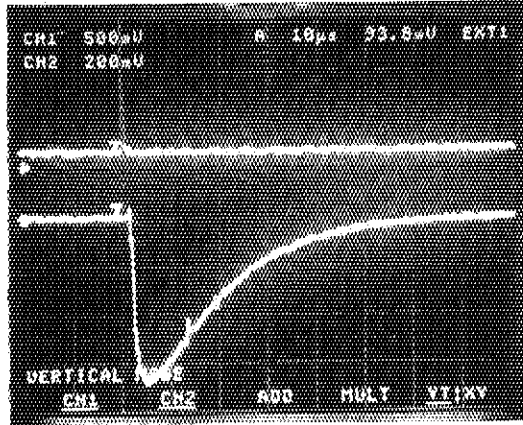
第3図 (b) 影絵 (Shadowgraph) 撮影系パルス・ランプ回路のブロック図



第4図 光源の発光遅れ時間測定系のブロック図

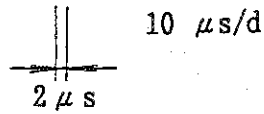
(a)

菅原製作所製のランプ



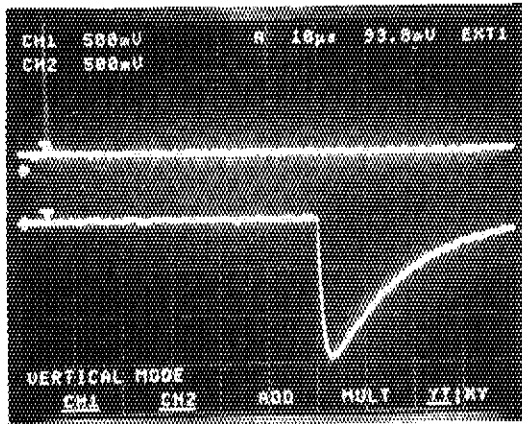
Upper Trace : Delayed Pulse
(500 mV/s)

Lower Trace : Photo-diode
Signal
(200 mV/d)



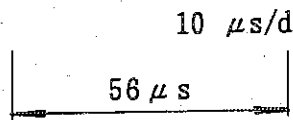
(b)

XENON CORP製のランプ



Upper Trace : Delayed Pulse
(500 mV/s)

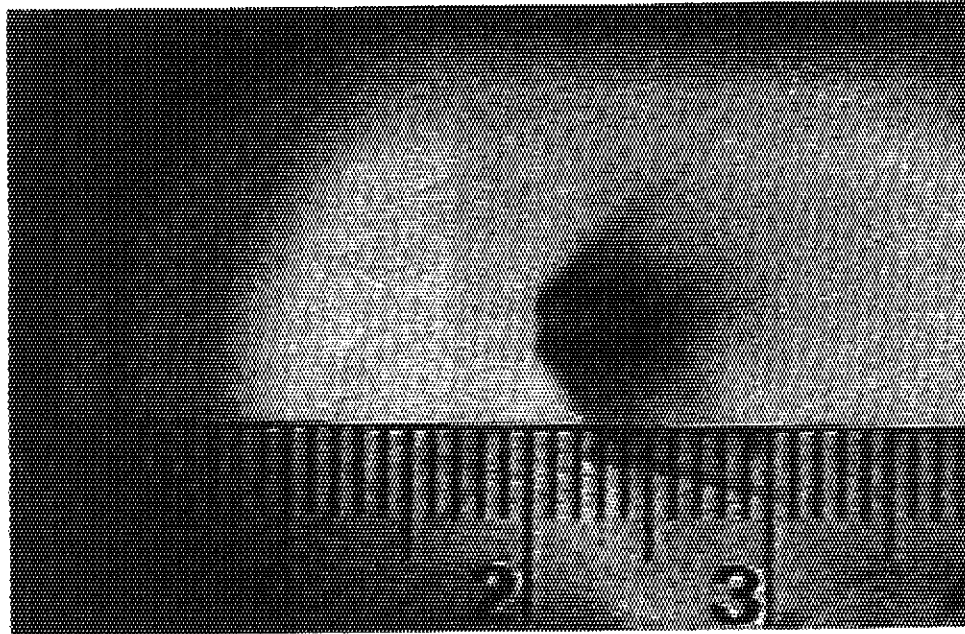
Lower Trace : Photo-diode
Signal
(500 mV/d)



第5図 (a)菅原製作所製のランプの発光特性写真, (b) XENON CORP.製のランプの発光特性写真

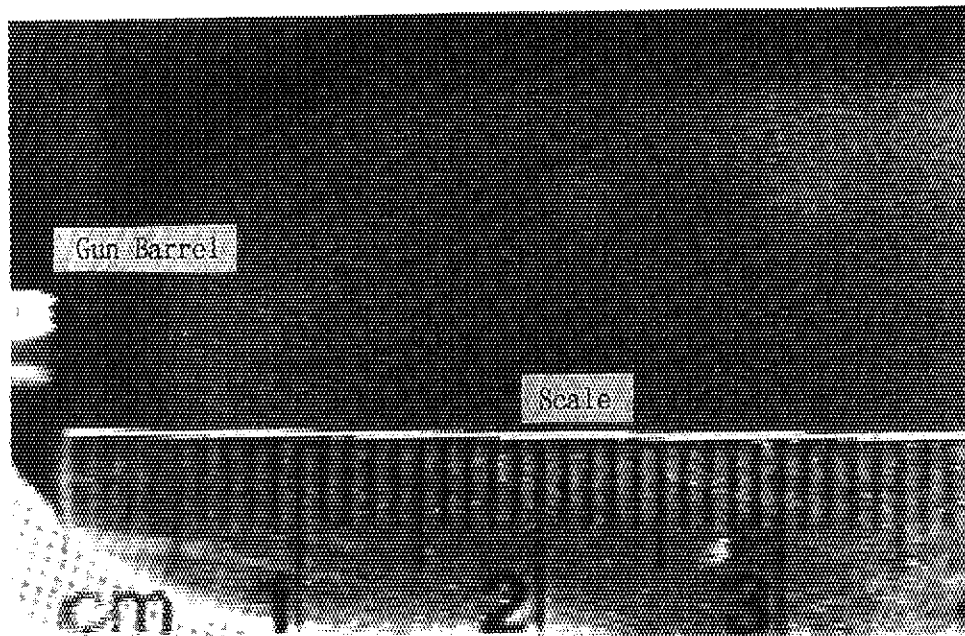
1991/2/14/#22-No.1

(a)

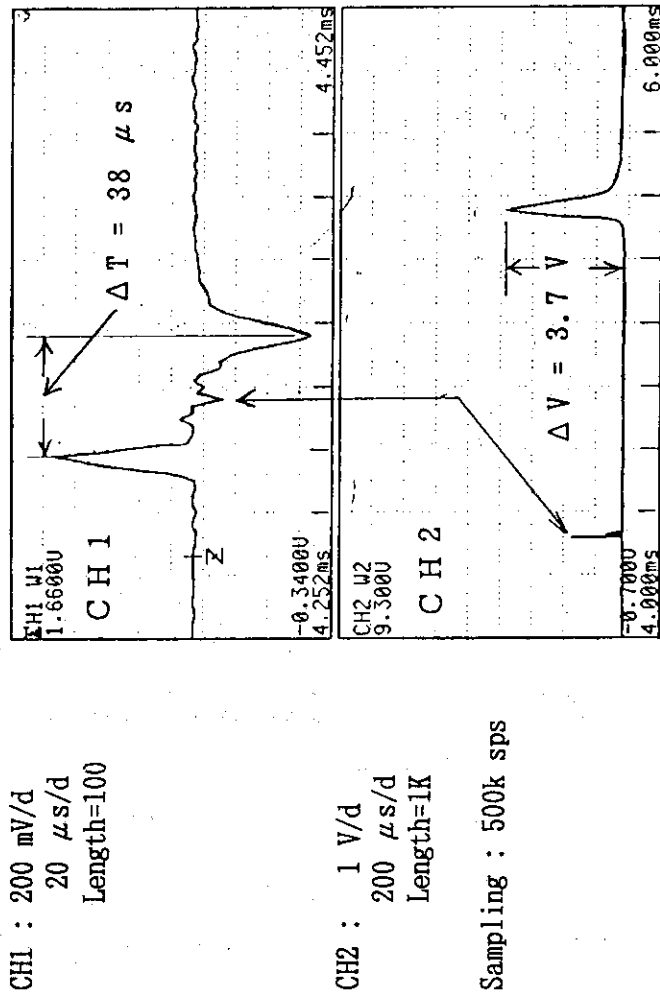


↑ Gun Muzzle Pellet →

(b)



第6図 (a)約 1.1 km/sで発射されたペレットの影絵 (Shadowgraph)
(b)ペレットの大きさを知るために銃身軸の真下に置かれたスケールと左端の筒状の銃身の先端部を写した写真



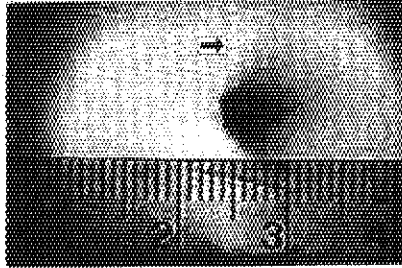
第7図 フォトダイオードとマイクロ波キャパチバーにより測定した第6図(a)に示すペレットの速度と質量の出力信号波形のオシロスコープ上のトレース図

Hydrogen Pellets (1991/ 2/12/# 9)

Repeat Time = 500 ms (8 pellets)
 Piston Speed = 10 mm/s

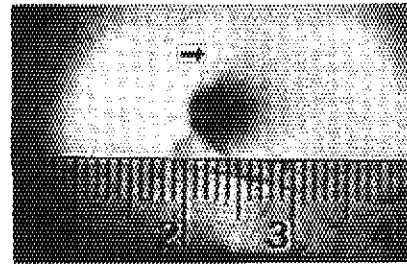
Pellet No.1

Speed= 1.05
 km/s
 $\Delta V = 2.6 \text{ V}$



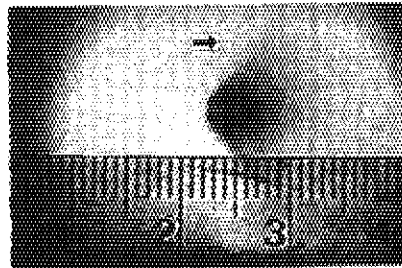
Pellet No.2

Speed= 1.0
 km/s
 $\Delta V = 4.6 \text{ V}$



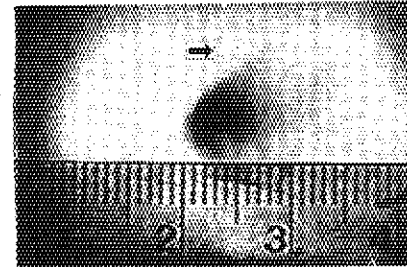
Pellet No.3

Speed= 1.0
 km/s
 $\Delta V = 6.4 \text{ V}$



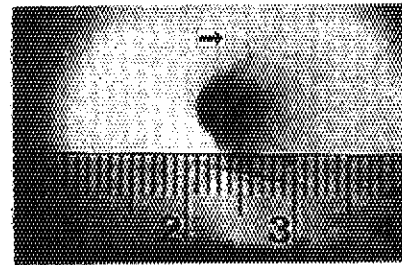
Pellet No.4

Speed= 1.0
 km/s
 $\Delta V = 3.8 \text{ V}$



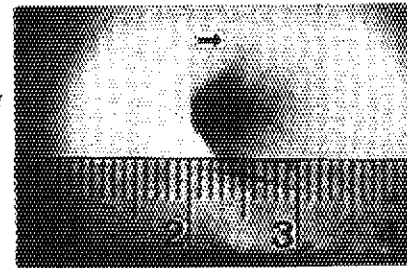
Pellet No.5

Speed= 1.03
 km/s
 $\Delta V = 5.8 \text{ V}$



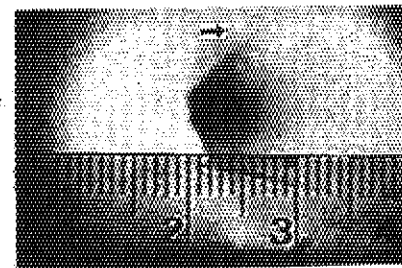
Pellet No.6

Speed= 0.95
 km/s
 $\Delta V = 2.3 \text{ V}$



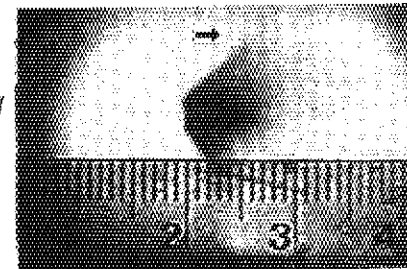
Pellet No.7

Speed= 0.98
 km/s
 $\Delta V = 5.2 \text{ V}$



Pellet No.8

Speed= 1.0
 km/s
 $\Delta V = 6.0 \text{ V}$



第8図 500 ms 間隔で連射された8個のペレットの影絵と速度及びマイクロ波キャビティー出力値 (ΔV)

Hydrogen Pellets (1991/ 6/12/#1260)

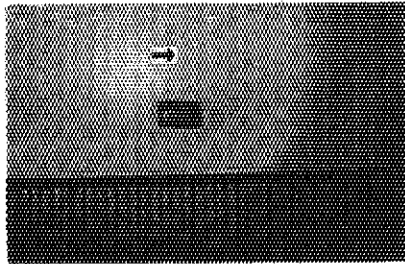
(a)

Repeat Time = 500 ms (4 pellets)
 Piston Speed = 10 mm/s

Pellet No.1

Speed= 1.1
 km/s

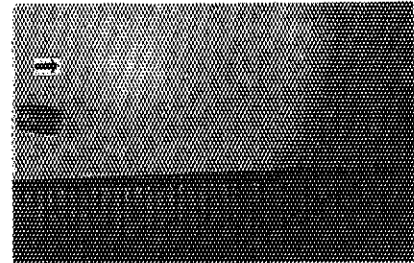
$\Delta V=2.6V$



Pellet No.2

Speed= 1.1
 km/s

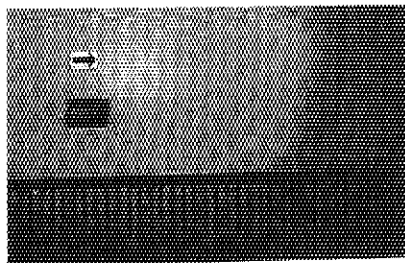
$\Delta V=2.6V$



Pellet No.3

Speed= 1.1
 km/s

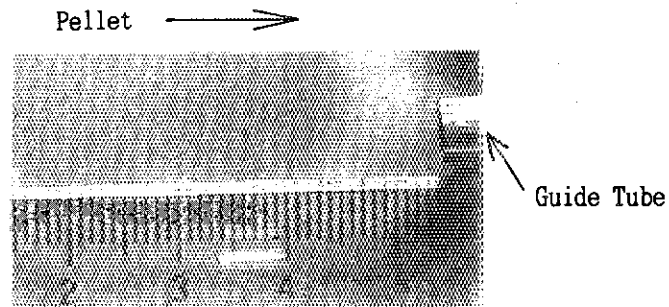
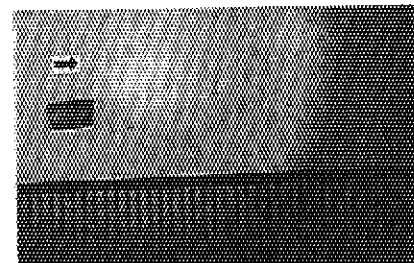
$\Delta V=2.3V$



Pellet No.4

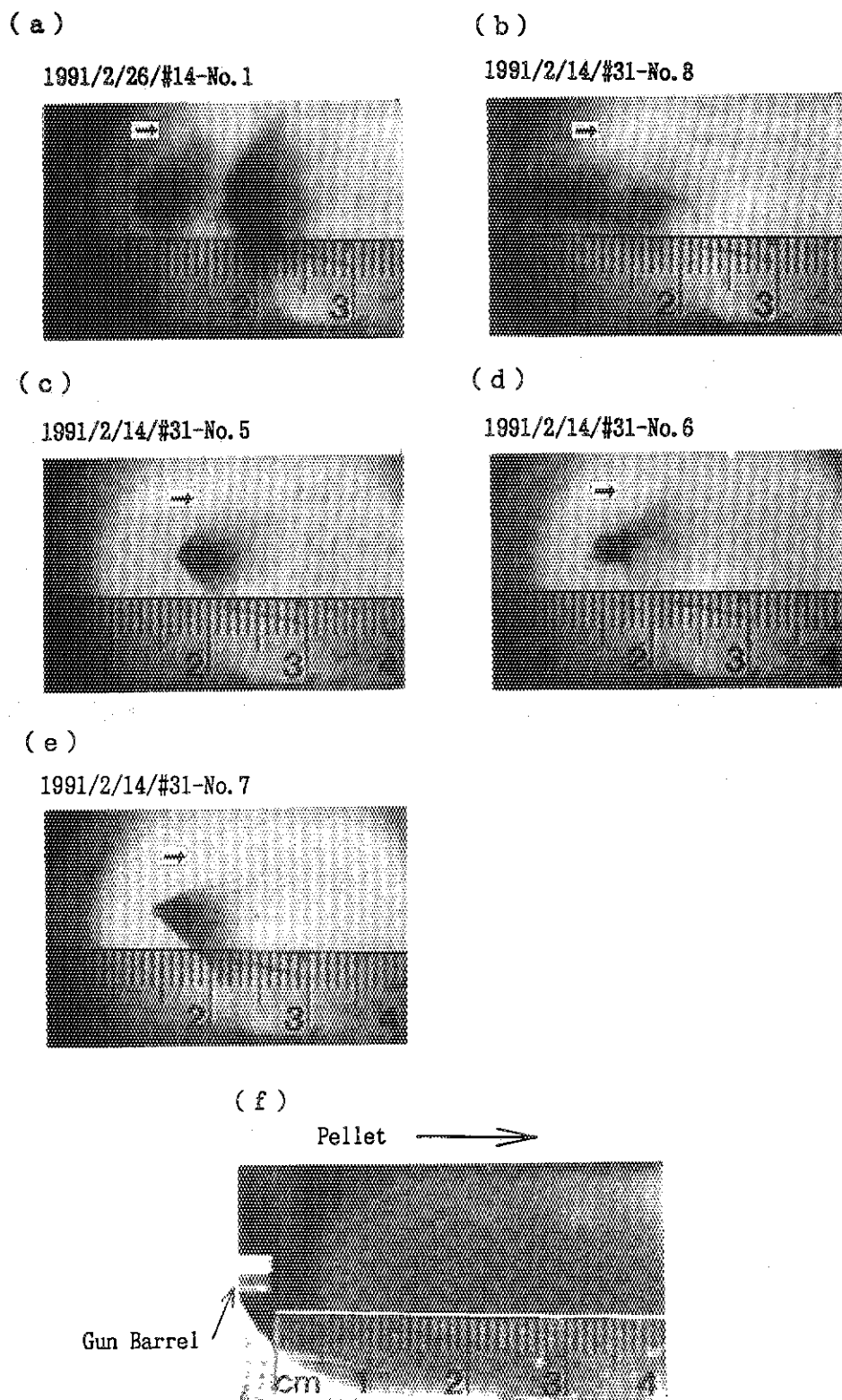
Speed= 1.1
 km/s

$\Delta V=2.1V$



(b)

第9図 (a) 500 ms 間隔で連射された4個のペレットを第2撮影点で写した影絵と速度及びマイクロ波キャビティ出力値 (ΔV) (b) 第2撮影点でペレットの大きさを知るために銃身軸の真下に設置したスケールと内径 $\phi 6$ mm のガイドチューブを写した写真



第10図 (a) 前の発射テストで銃身内または装填部内に残った固体水素が、第1ペレット発射時に一緒に飛び出している写真, (b) ガス状になった雲の写真, (c) 後部が円錐状に溶けているペレット, (d) 後部が砕けたペレット, (e) 径方向に一様に溶けたペレット, (f) ペレットの大きさを知らるために銃身軸の真下に置かれたスケールと左端の筒状の銃身の先端部を写した写真