波長が異なる二つのレーザパルスによる 微粒子のホログラフィ観測*

村上 昭年** 石川 宗晴***
白水 正男*** 白銀 辰雄***

Holographic Observation of Fine Particles by Two Laser Pulses of Different Wave Length

by

Terutoshi MURAKAMI, Muneharu ISHIKAWA, Masao SHIROUZU
and Tatsuo SHIROKANE

(Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka)

For measuring the size and velocity of fine particles the double pulsed laser holographic method is a useful technique, but this is not convenient for the system of high particle number density, because of the difficulty in identification of moving particles on a double exposure hologram. In order to remove this difficulty, we have developed a new technique employing the two pulsed lasers of different wave length.

The two lasers are set in the same optical axis passing through the observation section, and fired at an interval of few milli~micro seconds depending on the particle velocity in the experimental objects. The two output beams with holographic information of the object particles are separated into two camera boxes by a half mirror and two interference filters, and then the holograms of the particle system at different instants are recorded on two films separately. These two holograms are superimposed each other, and the distances of particle movements are measured microscopically. From the distance and pulse interval, the velocity distribution of particles are obtained. This new technique was applied successfully to observe the disintegration mechanism of liquid spray.

(Received Dec. 21, 1977)

キー・ワード：レーザ応用，ホログラフィ，微粒子，粒度-速度分布測定，光学的測定

1 緒 言

直径が5～100 μ の微粒子群の挙動を、巨視的な煙の動きとしてでなく、個々の粒子の動きとしてとらえること、すなわち各粒子の大きさと速度の分布を知ること、種々の現象解析の手がかりとして重要な情報となる。しかし粒子が小さくかつ動いていると、その観測には多くの困難が伴う。我々は先に Thompson¹⁾等によって発展させられたレーザ・インラインホログラムとして微粒子を撮影する方法によって、液体の微粒化機構の観察、衝撃波による浮遊微粒子の加速状況の観測を行った。しかしその現象で重要な粒子速度を測定することはできなかった。最近ダブルパルスレーザを用いて、一枚の乾板上に粒子の移動前後のホログ

ラムを記録し、その距離とパルス間隔から速度を求める方法が発表されている²⁾。しかしこの方法では、粒子の数密度が高いと、どの粒子がどこへ移動したか、その同定が困難で微粒子群の速度分布を得ることはできない。

我々は、これを改善するために、2台の色素レーザを適当な時間をおいてそれぞれ異った波長で発振させ、その二つのレーザパルスを同一光軸に沿って観測試料部に入射させ、出てくる二つの情報光をハーフミラーと2枚の干渉フィルターを用いて分離し、別々のフィルム上にホログラムとして記録させる方法を開発した。速度分布はこの2枚のホログラムから測定される変位と、パルス間隔から求めることができる。

本報では、この装置・方法と、それを用いて実際にノズルから噴出する液体微粒子流れを観測した結果について報告する。

* 原稿受理 昭和52年12月21日

** 正会員 九州大学工学部 福岡市東区箱崎

*** 九州大学大学院 福岡市東区箱崎

2 実 験

2・1 装置

観測装置は Fig. 1, 2 のホログラム記録装置と Fig. 3 の再生装置の二つから成っており, 記録装置で得られたホログラムは再生装置で3次元的な再生を行うことによって解析され, 多くの情報をひき出すことができる。

記録装置は2台の色素パルスレーザをもつ光源部と2枚の干渉フィルタを内蔵したカメラ部とからなっている。

色素レーザAは色素としてロダミン 6Gを用い, 回折格子によりカメラの干渉フィルタ (半値幅 $6\text{m}\mu$, 最大透過率82%) J_A の中心波長 $589\text{m}\mu$ にチューニングする。同様に色素レーザBは色素としてロダミン Bを用い, 干渉フィルタ (半値幅 $10\text{m}\mu$, 最大透過率85%) J_B の中心波長 $635\text{m}\mu$ にチューニングする。この二つの波長は, 本装置で用いるレンズ系の色収差によるトラブルを少なくすることと, 二つのレーザ光を分離する干渉フィルタの半値幅特性 (半値幅 $10\text{m}\mu$ 以下) とのかねあいから決められた。色素はどちらも, $5 \times 10^{-4}\text{mole/l}$ のエタノール溶液にして用いる。色素パルスレーザAはPhase-R社のDL-10 (最大出力エネルギー 250mJ , 公称パルス幅 450nsec) で, パルスレーザBはそれをモデルにして当研究室で製作したものである。

この2台のレーザA, Bを用いて同じ観測対象の時間変化をとらえるために, A, Bから出るパルスは同一光軸上を通過して観測部へ入射せねばならない。この調整はHe-Ne 気体レーザEを用いて行う。このビームは通常のインラインホログラフィ法の場合と同じよ

うに, ビームエキスパンダーFで必要な観測部の視野に合わせ口径の大きい平行光束にされる。光の強さは, レンズ L_1, L_2 の組合わせによって, フィルムの感度に合わせて調節できる。 L_1 と L_2 の間には雑音を除くためのピンホールP (直径 300μ) を設けた。

カメラ部は観測装置の最も主要な部分で, 同一光軸上を通過して入射してきた波長の異なる二つの光の情報を, ここで分離して二つのフィルム上に別々に記録する。すなわちAのパルスはハーフミラー D_2 で2方向に分割され, 直進した光は干渉フィルタ J_B でカットされ, 反射された情報光のみがフィルム K_A にホログラムとして記録される。パルスBも同様に二つの干渉フィルタに達するが, この場合は, 逆に透過直進した情報光のみがフィルム K_B に記録される。

インライン法で良いホログラムを得るためには, フィルム面を試料粒子に近づける必要があるのと, ハーフミラー D_2 , 干渉フィルタ J_A, J_B 等を組込むために, フーリエ変換レンズ系 (L_3, L_4, L_5) を使用して光学的にフィルム面を試料に近づける方法をとった。これらとシャッターM (コバルト No. 0) およびカメラボックス2台は, Fig. 1 (b) のように配置されている。レンズは焦点距離 70mm のものを使っている。レンズはレーザ光を使用するので, 内部反射による干渉を少なくするために単レンズとし, 収差を防ぐため非球面レンズ (ニコン製) を用いた。ハーフミラー D_2 はマイクロメーターヘッドで位置および角度を調整できるようにし, カメラボックスもヘリコイド中間リングを介して取り付け, 2台のカメラボックスの撮影面を一致させることができるようにした。シャッターは観測部で用いる計測用レーザ等のバックグラウンド光をカットするためのものであり, そのシンクロ接点によりレーザ発振用遅延トリガ回路をトリガすることもできる。

またフーリエ変換第一レンズを別のレンズホルダーを用いて焦点距離 50mm の非球面レンズに代え, 拡大したホログラムを得ることもできる。

2台のレーザの発振時刻の設定は, 遅延トリガ回路 H_A, H_B で行う。この回路の中の遅延回路は, 数個の単安定マルチバイブレータで構成されており, 可変抵抗およびコンデンサの切り換えで遅延時間を設定している。遅延トリガ回路の最終段のトリガ回路はFig. 2のようにレーザ発振時のノイズが回路を通過して遅延回路に影響を及ぼすのを防ぐために, フォトカプラーPCを介して前段の遅延回路に接続されている。同様な理由でトリガ回路の電源は9Vの乾電池を用いた。このような回路構成によって二つの遅延トリガ回路 (H_A, H_B) の干渉を防ぎ, 設定されたパルス間隔でレーザA, Bを発振させることができるようにした。

再生装置では再生像をモニターしながら記録できる

Fig. 1(a). Schematic diagram of hologram recording system.

Fig. 1(b). Holographic camera.

TTL: SN74121N T_{R1}, T_{R2} : 2SC372
 T_{R3} : 2SA562 PC: TLP503
 R_1 : 10K, R_2 : 5.1k, R_3 : 180, R_4 : 470,
 R_5 : 3.3k C_1 : 0.01 μ F, E: 9V

Fig. 2. Trigger circuit for pulse dye-laser operation.

A: Reconstruction laser beam (He-Ne gas laser)
 B: Hologram C: Shutter
 D: Fourier transform lens system
 E: Transformed reconstructed image
 F: Monitor plane G: Camera lens
 H: Monitor screen I: Camera box

Fig. 3. Schematic diagram of reconstruction system with monitor.

よう、Fig. 3 のようなカメラボックスとモニター装置を組合わせて記録装置とし全体を一緒に動かせるようにレールにのせた。He-Ne 気体レーザ (NEC: GLG 2034, 出力 3mW) ビームをピンホールおよびビームエキパンダーを通して口径40 ϕ の平行光束にし、口径20 ϕ の中心部だけを再生光Aとして用いた。

フーリエ変換レンズ系Dは再生光Aによって再生されたホログラムBの像をEの位置に移すためのものである。これによってホログラムBに非常に近い再生像もカメラボックスIのフィルムに記録することができる。

モニタ装置はカメラレンズG、モニタスクリーンHから成っており、モニタ面上の像はカメラレンズ ($f=55$, F/1.8) GでモニタスクリーンH上に投影される。雲台上のカメラボックスIのフィルム面とモニタ面Fを一致させ、この面上の像がモニタスクリーンHに映るようにカメラレンズGのヘリコイドを回して一度ピント調節をすれば、あとは記録装置をスライドさせてモニタスクリーンH上に像が再生されたところでカメラボックスIを雲台に設置し露光すればモニター上にとらえたのと同じ再生像を記録することができるようにしている。

2.2 方法

昭和53年7月

本法の特徴は、動いている粒子系の時間において撮られた2枚のホログラムを比較して系の運動状態を微視的にとらえ得るということ、またそれが3次元的に観測可能であるということである。

これらの有用性を確かめるために、まずガスクロマトグラフ用噴霧器による噴霧微粒子の速度分布を計測することを試みた。ノズル付近の観測は、ノズル先端が Fig. 1 の観測部の視野内にくるように噴霧器を設置し、窒素ガスを 0.75 kg/cm² の圧力で送って蒸留水の噴霧を発生させ、またノズルが影絵として鮮明に写るようカメラの撮影面をノズル先端の位置に合わせて行った。

ノズルから離れた所の、ゆっくり落下している噴霧の観測では噴霧の乱れを防ぐために観測部に幅 30mm のガイドをおき、それに沿って、視野の斜め上方に霧を噴き出させ落下してくる噴霧をとらえる方法をとった。また観測部には2枚のホログラムの比較・照合を安易にするために規準になる針を視野内に設置した。

つぎに、粒子の3次元的位置を決める上での再生位置および粒径の精度を調べるために、粒径の分っているガラスビーズを距離の分った位置に置いて二つのホログラムを作り、それぞれの再生を行った。ガラスビーズは100~120 μ の直径のものを使い、それをフィルムベースに付着させたものを2枚つくり、それぞれ、カメラ装置の撮影面から 21.9 mm, 59.3 mm の距離に置いてレーザパルスA, Bによる二つのホログラムを作成した。

3 結果と考察

3.1 ノズルによる微粒化過程と粒子速度の観測

ノズルから離れたところの噴霧の動きを二つのホログラムを重ね焼きした写真が Fig. 4 である。視野内に見える2本の針の間隔は 8.5 mm でパルス幅は 2.5 msec であった。パルス間隔の測定はハーフミラー D_1 で D_1E 方向に分割された二つのパルスを光電管でとらえ、その信号をシンクロスコープに記録して行った

Fig. 4. Slowly moving spray droplets (15~60 cm/sec).

ものである。カメラの焦点にある粒子は影絵としてそのままの粒径で記録される。このためホログラム中のこのような粒子の径を測定することによって、大まかな粒径分布を知ることができる。この場合の粒子は130 μ 前後であった。また針間隔を規準スケールとして粒子の変位を算出し、測定したパルス間隔から平均速度を計算すると、粒子は15~60 cm/sec のゆっくりした速度で落下していることがわかった。また粒子はほぼ光軸に垂直な平面内で運動していることが粒子の干渉パターンがほとんど変化しないことからわかる。

ノズル付近の速い動きを、二つのホログラムを重ね焼きしてとらえたものが Fig. 5 (a)で、液柱は気流によって乱され複雑な変形過程を経て分裂し、微粒子を生成しており、生成された粒径の異った多数の粒子が気流に押され、種々の速度をもって運動している様子が観測された。このときのパルス間隔は70 μ secであった。粒子の平均速度を計算すると5~20 m/secであることがわかった。この速度分布を本方法の特徴を生

Fig. 5(a). Dynamic observation of disintegrated liquids and particles.

Fig. 5(b). Velocity distribution of (a).

Fig. 5(c). Enlarged photograph of (a).

かして図式化したものが Fig. 5 (b)で、線分は各時刻に対応した粒子の中心を結んだもので粒子の平均速度の大きさと方向を表している。また視野内の粒子が集まっているところの大体の粒子数密度を計算すると、面積密度は7個/mm²、体積密度は0.35個/mm³であった。

ノズル出口の複雑な形状をもつ液柱部分は Fig. 5 (c)のように、レーザパルスAまたはBによって記録された二つの影絵を区別するために露光時間を変えて重ね焼きをし濃淡をつけて表した。この写真で二つの時刻の液柱の形を対応づけてみると、矢印①のリガメントが70 μ sec後に矢印②のリガメントと粒子群③に分裂したものと考えられる。

3・2 再生精度

この実験例では焦点距離50 mmのレンズをカメラに取り付けて実験を行ったためにホログラムは1.4倍に拡大されたものとなった。また記録光波長と再生光波長が異⁴⁾っているために、粒径および再生位置の測定値は次式で換算しなおして、設定値と比較した。

$$z = z' \frac{\lambda_2}{\lambda_1 m^2}, \quad d = \frac{d'}{m}$$

ここで、 z はホログラムから再生面までの距離、 d は粒径、 λ_1 は記録光波長、 λ_2 は再生光波長、 m はホログラムの倍率であり、測定値をダッシュをつけて表している。

Fig. 6 (a)はホログラム撮影面から21.9 mmのところ⁵⁾に置いたガラスビーズの一つと、それに対応する、フィルム K_A中の粒子のホログラムとの拡大写真である。このホログラムを三つの異った位置で再生したものが Fig. 6 (b)の①、②、③である。それぞれホログラムから、19.3、19.7、20.1 mmの位置で再生されたもので②の像の境界がもっともはっきりしている。こ

Fig. 6(a). Glass beads and its Fraunhofer hologram.

Fig. 6(b). Reconstructed images at different image planes.

のことから、再生位置として 19.7 mm、位置の不確かさを ± 0.4 mm とすると再生位置は実際の距離に比べ最大 7% 短くなっていることになる。また②の再生像の粒径を測ると、中心の大きな像の直径は 107μ で実物のビーズの径 112μ に比べ、 5μ ほど小さなものとなっていた。他の 100μ くらいの粒子径に対しても同様で、最大 7% 小さな像になっていた。

4 結 言

二つの異なる波長のレーザパルスを用いて粒子数密度の高い系の微視的挙動をとらえる方法を開発し、その効用を調べるための実験を行った。実際には 2 枚のホログラムから粒子の移動を計測する際に本論文で示した写真と異なり、二つのホログラムを 2 色のフィルターを通して重ね撮りしたカラー写真で解析しており、Fig. 5 (a) のような白黒写真から解析するのに比べて、より明らかに、安易にできる。しかし、顕微鏡を通して重ね撮りすることは簡単ではなく、その撮影装置の開発がのぞまれる。また干渉フィルターを通しても充分再生にたえるホログラムを得ることができた。

今回は、ホログラムの 3 次元再生像からの 3 次元速度分布の測定は行っていないが、現象によっては興味ある解析法としてホログラムの特徴を発揮できるであろう。

本研究に要した費用の一部は昭和52年度文部省科学

研究費補助金特定 (I) No. 210411 の援助によることを記し謝意を表する。

Nomenclature

A : Dye laser A	B : Dye laser B
C_1, C_2 : Mirrors	D_1, D_2 : Half mirrors
E : He-Ne gas laser for alignment	
F : Beam expander	
G : Observation area	
H_A, H_B : Delayed trigger circuits	
I : Trigger input	
J_A, J_B : Interference filters	
K_A, K_B : Films	
L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 : Lenses	
M : Shutter	
P : Pinhole	

(昭和52年11月28日 第15回粉体に関する討論会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Thompson, B. J., J. Phys. E., **7**, 781 (1974).
- 2) Fourny, M. E., and J. H. Matkin, Rev. Sci. Instr., **40**, 205 (1969).
- 3) Meier, R. W., J. Opt. Soc. Am., **55**, 1963 (1965).
- 4) Thompson, B. J., J. H. Ward, and W. R. Zinky, Appl. Opt., **6**, 519 (1967).