

UDC 533.6.071:
53.082.5:
621.375.826

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-516

レーザ・ホログラフィによる流れの可視化予備実験

原 亘 利

1977 年 11 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

レーザ・ホログラフィによる流れの可視化予備実験*

原 亘 利**

Preliminary Investigation of Laser Holographic Flow Visualization

By Nobutoshi HARA

ABSTRACT

Laser holography provides greater performance in aerodynamic testing than optical techniques previously used due to the light wave front reconstructed from the hologram containing all original density field data.

This means that the reconstructed light wave can be analyzed using not only conventional procedures, but also new more advanced methods, such as time-differential interferometry.

Presented in this paper are some preliminary experimental results on the application of laser holography to axisymmetric supersonic flow field observations utilizing the following methods;

- (1) holographic schlieren method,
- (2) dual holographic interferometry,
- (3) double exposure holographic interferometry and
- (4) real-time holographic interferometry.

The experimental values obtained utilizing these methods on a free-jet, a sharp cone and a flat faced body are compared with conventional interferometric data and experimental and calculated pressure distributions, with good agreement being observed.

1. はじめに

高速空気力学実験において古くから用いられてきた光学観測法は、他の方法にない重要な利点を持つ。それは、

- (1) 流れ場に何等影響を与えない。
- (2) 時間遅れがない。
- (3) きわめて多くの情報が一度に得られる。

などである。しかし、従来の光学技術ではこれらの利点を十分に活用させることができなかった。その最大の原因は、光の周波数が非常に高いため、現存するいかなる検波器をもってしても、光波面から直接位相情報を検出することができないという点にあった。

しかし、この問題も、最近になってレーザ・ホログラ

フィが実用化されたため、原理的には、一応解決の道が開かれた。すなわち、光の波動を直接検出するのではなく、レーザ光を利用し、波面状態を干涉縞の粗密分布および明暗比分布に変換して記録するのである。この場合、光波面情報の記録-再生は可逆的に行われるため、レーザ・ホログラフィは単なる情報の記録、再生技術ではなく、光波動場の記録-再現技術と見なせるようになる。そこで、物理現象の観測にこの方法を用いると、光学的には、或る瞬間の現象を凍結させたのと同じ効果が得られ、その結果として、情報検出を容易にし、光学観測法の利点を最大限に活用させられるようになる。

レーザ・ホログラフィのこのような特性は、流れ場観測法の能力を大きく伸ばすものとして現在各種流体実験への利用が望まれている。しかし、本方式は開発されてまだ日も浅く、技術上の問題点もかなり残されているため、実用に当っては、事前に十分な検討が必要と思われる。

*昭和52年10月4日 受付

** 空気力学第二部

現在、当所超音速風洞の流れ場観測に本方式を用いる計画が進められている。本報は、この計画に沿って行われた予備実験の概要について述べるものである。

2. 記号

- A : 供試模型の半径 (mm)
 $A_0(x), A_0^2(x, y)$: 目的光の振幅係数分布
 A_r : 参照光の振幅係数
 D : ホログラムの有効直径 (mm)
 D_N : ノズル出口の直径
 $D(x, y)$: ホログラムの濃度分布
 $E_h(x, y)$: 記録面への露光量分布
 f : 点光源から記録面までの距離 (mm)
 $I(x), I(x, y)$: 記録面における強度分布
 \bar{I}_0 : 目的光の平均強度
 \bar{I}_r : 参照光の平均強度
 \bar{I}_{in} : 照射光の平均強度
 \bar{I}_{R1} : 一回折光の平均強度
 k : 角波数 ($2\pi/\lambda$)
 M : マッハ数
 N : 乾板の分解能 (本/mm)
 p : 圧力 (kg/cm^2)
 R : 軸から半径方向への距離 (mm)
 R_B : 模型前面に沿っての半径方向距離 (mm)
 $T_H(x)$: ホログラムの透過率分布
 X : 軸方向距離 (mm)
 X_B : 模型先端からの軸方向距離 (mm)
 x, y : 記録面における座標
 α : 位相定数 ($k \sin \theta$)
 θ : 参照光の入射角度 (度)
 r : 乾板の特性曲線の勾配
 ε : 再生された点光源像の大きさ (mm)
 η : 回折効率 (%)
 λ : 光源の波長 (Å)
 $\nu(x)$: 空間周波数分布 (本/mm)
 ρ : 密度 ($\text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$)
 Σ_0 : 目的光波面の複素振幅
 Σ_r : 参照光波面の複素振幅
 Σ_R : 再生光波面の複素振幅
 Σ_i : 照射光波面の複素振幅
 τ : 露光時間 (秒)
 $\phi(x), \phi(x, y)$: 目的光波面の位相分布
 ω : 光の角周波数 ($2\pi c/\lambda$)
 添字
 0 : よどみ点

02 : 垂直衝撃波の後のよどみ点

∞ : 一様流

3. レーザ・ホログラフィの一般的特性

レーザ・ホログラフィの原理等については、既に多くの解説書¹⁾²⁾³⁾が出されているので、ここでの説明は流体観測で必要と思われる事項のみに止める。

3.1 通常の写真記録法とレーザ・ホログラフィの相違点

光波面情報の記録では一般にフィルム、写真乾板等の感光剤層が用いられている。いま、通常の写真記録法の場合を想定し、図1で示されるように乾板面P上に複素

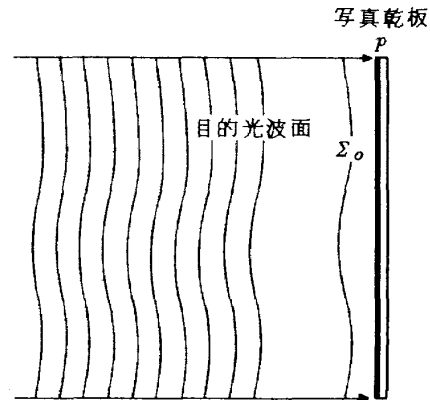


図1 通常の写真記録法の場合

振幅 Σ_0 が(1)式で表わされる目的光波面（以下、簡単のため目的光波面 Σ_0 と記す）が入射している場合を考えて見る。

$$\Sigma_0 = A_0(x, y) \cdot e^{j\phi(x, y)} \cdot e^{j\omega t} \quad (1)$$

この場合、感光剤層にできる潜像の濃度分布 $D(x, y)$ は、露光量分布、すなわち、入射光の時間平均強度分布 $\langle I(x, y) \rangle$ と露光時間 τ との積に比例し、

$$D(x, y) \propto E_h(x, y) = \langle I(x, y) \rangle \cdot \tau = \langle |\Sigma_0|^2 \rangle \cdot \tau = A_0^2(x, y) \cdot \tau \quad (2)$$

となり、通常の写真記録方式の場合、目的光波面の振幅の二乗に関する情報しか記録できないことがわかる。

次に、図2で示されるように、目的光 Σ_0 に別の参照光 Σ_r を加えて記録して見ることにする。なお、この場合の参照光は、目的光と同じ波長の無変調平面波を用い、乾板面において、

$$\Sigma_r = A_r e^{j\omega t} \quad (3)$$

と表わされるものとする、両波面は加え合わされ、次式の時間平均強度分布 $\langle I(x, y) \rangle$ が得られる。

$$\langle I(x, y) \rangle = \langle |\Sigma_0 + \Sigma_r|^2 \rangle = A_0^2(x, y) + A_r^2 + A_r \cdot A_0(x, y) \cdot e^{-j\phi(x, y)} + A_r \cdot A_0(x, y) \cdot e^{j\phi(x, y)} \quad (4)$$

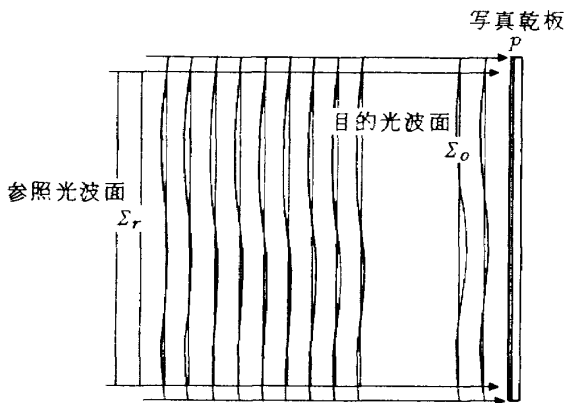


図2 In-Line型ホログラフィ記録方式

これは丁度、無線周波における二乗検波作用と同じ効果となり、(4)式右辺の各項は、入射光に対する直流分出力（第1項、第2項）と信号成分出力（第3項、第4項）に対応する。なお、この場合、直流分については特に重要でないが、信号成分の第3項、第4項において元の目的光の波面状態が表示されるため、この状態で乾板を露光させることにより、完全な光波面情報が記録できることがわかる。なお、第3項は目的光の共役波面を表わしている。また、(4)式は三角関数表示を用いると、次式のように書き換えることができる。

$$\langle I(x,y) \rangle = A_o^2(x,y) + A_r^2 + 2A_r \cdot A_o(x,y) \cos \phi(x,y) \quad (5)$$

(5)式3項は、二波面によって生じた干渉縞分布を示すもので、これから、本方式の場合、目的光波面の振幅情報と位相情報が、それぞれ干渉縞の明暗比分布および粗密分布に変換されて乾板面に記録されることが理解できる。

本方式はD.Gaborの創案によるもので、全て“の光波面情報が記録できる写真技術”と言う意味からホログラフィ(Holography)と名付けられた。しかし、発明された当初の方式は図2で示したように、目的光と参照光を同じ方向から入射させて記録するIn-Line方式であったため、情報読み出しに際して、照射光および信号の共役成分が干渉し合い、このままでは良好な情報を得ることができず、あまり実用に向かなかった。その後、この二重像を取り除くための多くの研究が続けられてきたが、レーザ光の実現と相まってLeith, Upatnieksらにより、さらにより解決法が見出されたため、ホログラフィも実用化への道が開かれるようになった。最近では、一般にホログラフィと呼ぶ場合は、ほとんどがこのLeith-Upatnieks型のものを指して居り、In-Line型のものはあまり用いられなくなった。

3.2 Leith-Upatnieksの方法(Off-Axis型ホログラフィ)

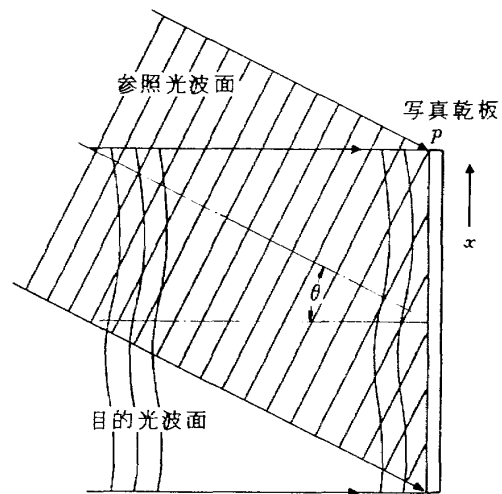


図3 Off-Axis型ホログラフィ記録方式

LeithとUpatnieksは図3に示すように参照光 Σ_r と目的光 Σ_o をそれぞれ異った方向から乾板面に入射させて記録するOff-Axis方式を考案して二重像および照射光の分離に成功した。以下にこの方法の簡単な説明を行う。

いま、記録面を1次元で考え、その位置におけるそれぞれの波面が次式で与えられるものとする、

$$\Sigma_o = A_o(x) \cdot e^{j\phi(x)} \cdot e^{j\omega t} \quad (6)$$

$$\Sigma_r = A_r \cdot e^{j\alpha x} \cdot e^{j\omega t} \quad (7)$$

乾板上において両波面は加算されて、次式の時間平均強度分布が得られる。

$$\begin{aligned} \langle I(x) \rangle &= \langle |\Sigma_r + \Sigma_o|^2 \rangle = A_r^2 + A_o^2(x) + A_r e^{j\alpha x} A_o(x) \\ &\quad \cdot e^{j\phi(x)} + A_r \cdot e^{-j\alpha x} \cdot A_o(x) \cdot e^{-j\phi(x)} \\ &= A_r^2 + A_o^2(x) + 2A_r \cdot A_o(x) \cos \{ \phi(x) + k \sin \theta \} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $\alpha = k \sin \theta$ とし、 θ は目的光と参照光の入射角度差を表わしており、また k は角波数と呼ばれる定数で、 $k = 2\pi/\lambda$ の内容を時つ。

いま、目的光および参照光が共に無変調平面波の場合を考えると、(8)式において、 $\phi(x) = \text{一定}$ となり、その時の干渉縞分布 $v(x)$ は、

$$\begin{aligned} v(x) &= 1/2\pi \cdot d/dx (2\pi/\lambda \cdot \sin \theta \cdot x) \\ &= \sin \theta/\lambda \end{aligned} \quad (9)$$

となり、入射角度差 θ と波長 λ で決まる等間隔の平行縞となる。

なお、一般のホログラフィでは、前述の通り振幅情報については干渉縞の明暗比として記録されるため、直線性の良い記録を行うためには明暗の反転が起らないように、参照光強度に比べて目的光強度を十分低く抑え、また全体の露光量としては乾板特性曲線の直線部に合わせ

て与える必要がある。いま、この条件に従って乾板を露光し、現像処理を行うと、次式の透過率分布 $T_H(x)$ を持つホログラム原板が得られる。

$$T_H(x) \propto \left[\langle |I(x)| \rangle \right]^{-\frac{r}{2}} \simeq A_r^{-r} \cdot e^{-r/2 \cdot A_r^{-(r+1)} \cdot e^{ja_x} \cdot A_0(x) \cdot e^{j\phi(x)}} \cdot e^{-r/2 \cdot A_r^{-(r+1)} \cdot e^{-ja_x} \cdot A_0(x) \cdot e^{-j\phi(x)}} \quad (10)$$

なお、ここで r は使用乾板の特性曲線の勾配を表わすものであるが、この値は現像処理法等によっても若干変るため、(10)式は特に比例式を用いて示した。

次に、このホログラムを図4のように配置し、記録時に用いた参照光と同じ光波面 Σ_i 、

$$\Sigma_i = \Sigma_r = A_r \cdot e^{-ja_x} \cdot e^{j\omega t} \quad (11)$$

を用いてこれに照射して見ることにする。このときホログラム面 H を通過して得られる光波面 Σ_R は、

$$\begin{aligned} \Sigma_R &= \Sigma_i \cdot T_H(x) \\ &= A_r^{(1-r)} \cdot e^{-ja_x} \cdot e^{j\omega t} \\ &\quad \cdot e^{-r/2 \cdot A_r^{-r} \cdot A_0(x) \cdot e^{j\phi(x)} \cdot e^{j\omega t}} \\ &\quad \cdot e^{-r/2 \cdot A_r^{-r} \cdot e^{-2ja_x} \cdot A_0(x) \cdot e^{-j\phi(x)} \cdot e^{j\omega t}} \quad (12) \end{aligned}$$

となり、右辺各項に対応した光波面が図4の(1)、(2)、(3)の各方向に放射される。なお、この場合のホログラムは

一種の回折格子としての働きをし、(12)式の各項がそれぞれ0次、+1次、-1次回折光に対応する。また、ここでは、ホログラム面全域において $A_r = \text{一定}$ と考えられるから、+1次回折光は元の目的光に等しい波面と見なすことができる。また、-1次回折光は、その共役波面となる。

Off-Axis型ホログラフィでは、このように目的光と参照光との入射角度差 θ を適当に選ぶことによって、必要な波面だけを分離して取り出すことができる。

3.3 ホログラムの分解能特性

次に、図5に示すように目的光波面が単一点光源から放射される球面波の場合を考えて見よう。いま点光源位置から記録面までの距離を f とすると、この場合の記録面における目的光の分布は次式に従う。

$$\Sigma_o = A_o \cdot e^{jkx^2/2f} \cdot e^{j\omega t} \quad (13)$$

また、参照光としては、(7)式に示した平面波を用いるものとする、乾板上での時間平均強度分布は次式の通りとなる。

$$\begin{aligned} \langle I(x) \rangle &= \langle |\Sigma_o + \Sigma_r|^2 \rangle \\ &= A_o^2 + A_r^2 + A_o \cdot e^{jkx^2/2f} \cdot A_r \cdot e^{ja_x} \\ &\quad + A_o \cdot e^{-jkx^2/2f} \cdot A_r \cdot e^{-ja_x} \end{aligned}$$

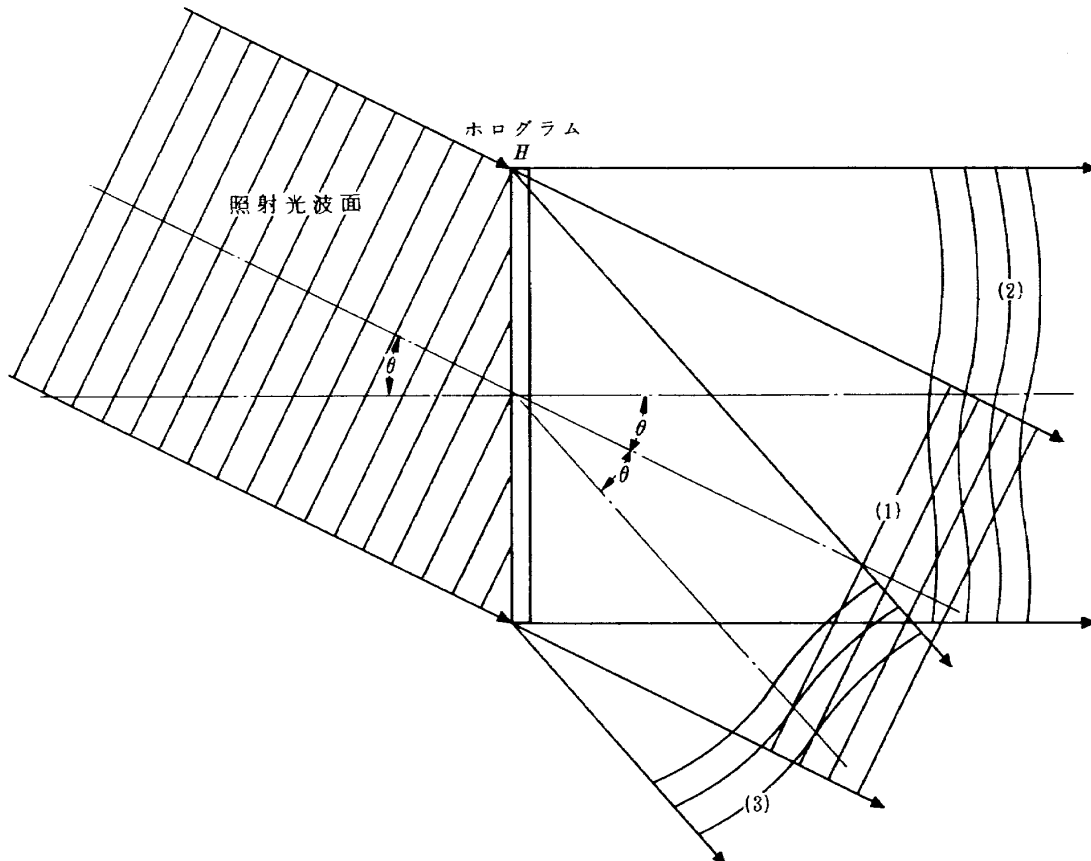


図4 Off-Axis型ホログラフィ再生方式

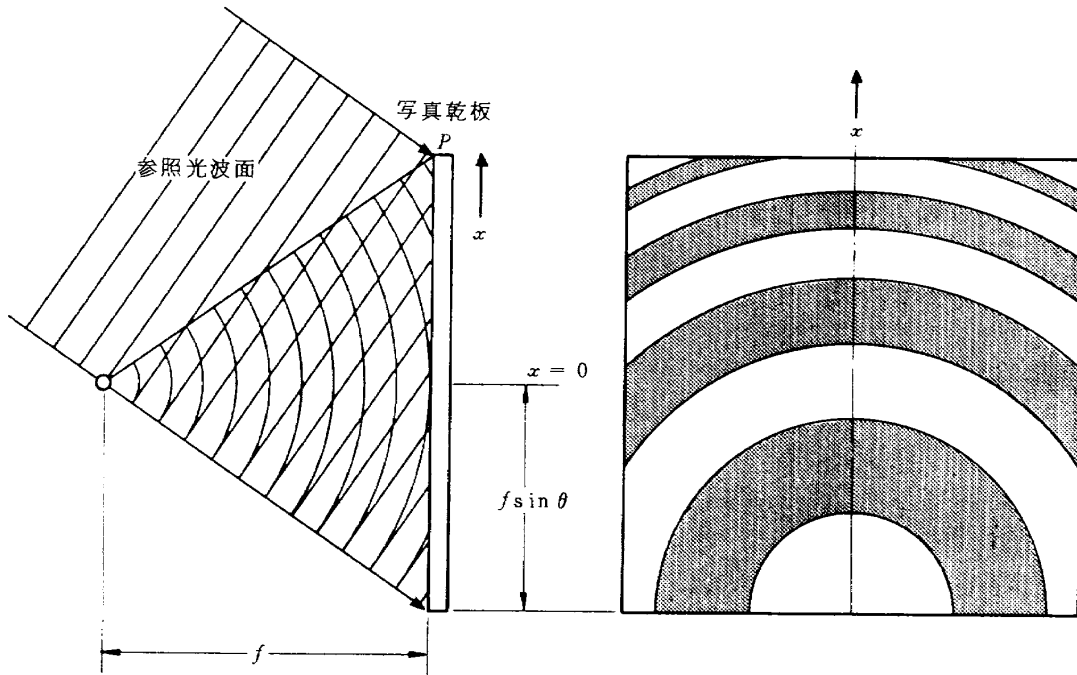


図5 点光源のホログラム記録(左)とその干渉縞分布(右)

$$\begin{aligned}
 &= A_0^2 + A_r^2 + 2A_0A_r \cos(kx^2/2f + \alpha x) \\
 &= A_0^2 + A_r^2 + 2A_0A_r \cos\{k/2f(x + f \sin \theta)^2 \\
 &\quad + f k \sin^2 \theta / 2\} \quad (14)
 \end{aligned}$$

これは、図5右図に示すような中心が $x = -f \sin \theta$ だけずれたフレネル輪帯板を表わし、またこの場合の干渉縞の空間周波数分布 $\nu(x)$ は次式に従う。

$$\nu(x) = 1/2\pi \cdot d/dx (kx^2/2f + \alpha x) = x/\lambda f + \sin \theta / \lambda \quad (15)$$

このように、拡散光波面のOff-Axis ホログラフィでは θ が大きくなる程、また点光源位置から乾板面を見張る角度が大きくなる程空間周波数範囲は広がる。いま分解能 N (本/mm) の乾板を用いてこの干渉縞分布を記録する場合を考えると、干渉縞が完全に分離されて記録できる空間周波数の範囲は、

$$N \geq \nu(x) \quad (16)$$

となり、振動等の影響がなく、理想的な状態で記録された単一点光源のホログラムは次式で示される直径 D (mm) の中に記録される。

$$D = \lambda \cdot f (N - \sin \theta / \lambda) + f \sin \theta = \lambda \cdot f \cdot N \quad (17)$$

次に、図6に示すように、このホログラムを再生したときに得られる点光源像の大きさ ϵ を考えて見ると、回折理論により、同じ大きさのレンズの持つ分解能と略等¹⁾ しくなり次式で与えられる。

$$\epsilon = \lambda f / D = 1/N \quad (\text{mm}) \quad (18)$$

このように、レーザ・ホログラフィでは、再生される

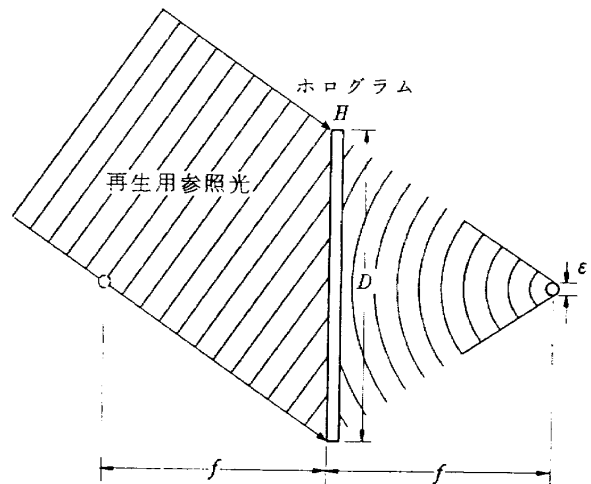


図6 点光源の記録されたホログラムの再生

光波面の質が、主に記録されている情報量に関係しているため、良質な再生光を得るためには、出来る限り高い分解能を持つ乾板を用いることと、振動等の影響を取り除き、有効直径の大きなホログラム記録を行うことが重要となる。なお、これ等の特性は、前述の平行光波面の記録、再生に対しても適用されるものである。

4. レーザ光源

ホログラフィの光源としてレーザは欠かすことのできない重要なものである。レーザの選択は記録感光材料の特性、観測対象等によって適宜行えばよいが、何れの場合

合も、干渉性の良いものを選ぶ必要がある。現在、比較的によく用いられているものとして $He-Ne$ レーザ、アルゴンイオンレーザ、ルビーレーザ等がある。

4.1 $He-Ne$ レーザ

ホログラフィ、または他の光学測定装置の光源として、現在最も広く用いられているもので、 6328 \AA の連続光が得られる。出力は TEM_{00} 発振で 50 mW 程度までのものが製造されており、現存するホログラフィ光源としては最も良い干渉性と安定性を持っている。しかし出力が小さいため、あまり高速現象の記録には向かず、比較的安定した現象の記録、または再生用としてよく用いられている。

4.2 アルゴンイオンレーザ

アルゴンイオンレーザは、可視域における連続発振光としては最も大きな出力が得られ、 TEM_{00} 連続発振で数 10 mW から数 W 程度のものが現在製造されている。本レーザの場合、青から緑にかけての可視域 ($4579 \text{ \AA} \sim 5145 \text{ \AA}$) で数本のスペクトルが同時発振し、またドップラ幅もかなり広いので、ホログラフィ光源として用いる場合には特に波長選択器や、エタロン板を用いた共振器構成が必要となる。また、作動中のプラズマ管の温度もかなり高くなるため、大型のものでは水冷の必要があり、その取扱いは前の $He-Ne$ レーザに比べてやや煩雑である。

4.3 ルビーレーザ

ルビーレーザは常温において波長 6943 \AA の非常に短いパルス光 (約 30 nsec 程度) が得られるため、特に高速現象のホログラム記録に有利である。レーザ媒質としては人工的に生長させたルビーロッドが使用され、キセノンランプによる光励起方式が用いられている。また、本レーザでは共振器内に置かれた Q スイッチによるジャイアントパルス発振方式が一般に用いられている。

ルビーレーザの場合も、可干渉距離を延長する方法として、共振器内にエタロン板を置く複共振器構造の採用やアイリスアパーチャによる横モード発振の抑制が行われている。しかし、本レーザの場合、レーザロッド自体の光学的均一性によっても、出力光の特性が決まるため、ホログラフィに使用するものでは特にルビーロッドの厳選が必要である。また、波長再現性の良いレーザ発振を行わせるためには、レーザヘッド全体の精度の高い温度制御が必要となる。

5. レーザ・ホログラフィの流れ場観測への応用

レーザ・ホログラフィは光波面そのものを記録し、またそれを再生できる技術である。そこで試験対象とする

流れ場にレーザ光をあてて、その透過光波面をこの方法を用いて記録しておく、実験後の任意の時刻においても、元の流れ場の情報を持つ観測光波面が得られるようになる。⁴⁾ これは、光学観測の面から見た場合、流れ場における現象を完全に凍結させ得たことと同じ効果を持つもので、光学情報の検出に際してきわめて多くの利益をもたらすものとなる。

以下に本方式を流れ場観測に用いる場合のいくつかの方法について述べる。

5.1 観測光波面の記録と再生

一般の固体形状のホログラム記録の場合と異なり、透明流れ場の観測に用いる場合には、図 7 のような光学系がよく用いられる。これは、従来よりシュリーレン観測などで用いてきた光学系に新たに参照光の光学系を加えたものである。ホログラムの記録は写真乾板面に測定部を通過してきた目的光と参照光を同時にあてて行う。なお観測面積が大きい場合には、乾板をテレメータレンズの後方に置いて、集束する目的光を記録してもよい。

露光された写真乾板に現像処理を行うと、濃淡の干渉縞分布を持つ振幅ホログラムが得られる。このホログラムを記録時の乾板位置に戻し、今度は参照光だけをこれに照射すると、ホログラム面後方に向けて元の測定光波面が再生される。なお、この場合、ホログラム位置、照射光の角度、波長が記録時と全く同じであれば、再生光波面は記録時の測定光と相似な波面となり、後述する実時間干渉法において重要な役割が果せるようになる。また、再生光を用いて流れ場の状態を可視化したい場合には、従来のシャドウグラフ法、シュリーレン法がそのまま適用できる。

5.2 ホログラフィ干渉法

ホログラフィ応用技術の中で、干渉測定は最も利用効果、実用性に富んだものと言える。

これまでの流れ場測定で用いられてきたマッハツェンダ干渉法、マイケルソン干渉法などは、異った光路を通過させた光波面同士と比較によって流れ場の僅かな光路差変化を検出する方法であったため、精度の高い干渉測定を行うには、各光路の波面状態を完全に等しくしなければならず、それらの光学系を作るのにきわめて多くの困難があった。しかし、ホログラフィを用いる場合には、同一光路による時間差干渉法が利用できるため、従来の方法のようなきびしい条件は全く不要となり、大きな視野を必要とするような干渉測定でも比較的に容易となる。以下にホログラフィ干渉法のいくつかの手法について述べる。

5.2.1 二重露光干渉法

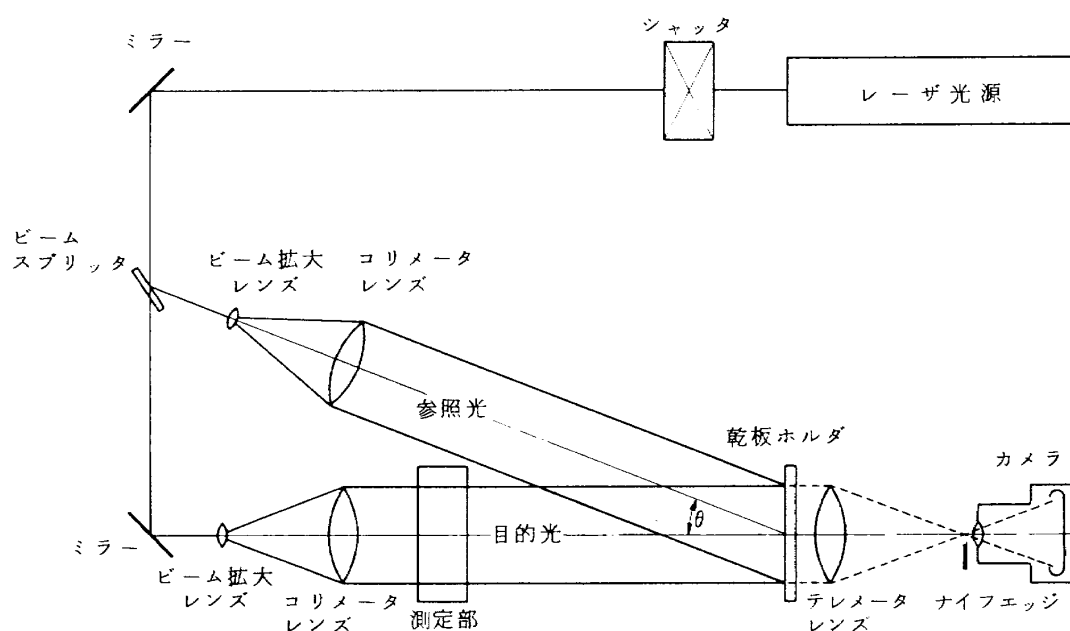


図7 ホログラフィを用いた流れ場観測光学系

観測光波面のホログラム記録を行う場合、同一乾板上に流れの無い状態と流動状態においてそれぞれ1回ずつ計2回の露光を与えて記録しておき、後でこのホログラムを再生すると、各状態における波面が同時に、また、同一空間上に再生され、測定フィールドの光路長変化に応じた干渉縞が現れる。この場合、干渉縞の移動量と測定フィールドの密度変化との間には一定の関係があるため、この干渉縞の変化量を検出することによって、流れ場における密度分布が求められる。

5.2.2 デュアル・ホログラム干渉法

前項のような二重露光を行うかわりに、基準状態、流動状態において、それぞれ別の乾板を用いて波面情報を記録しておき、後でこの二枚のホログラムを重ね合わせて再生すると、再生光波面同士が干渉し、前項の場合と同じような干渉図形が得られるようになる。この方法は原理的には、前の二重露光法と同じものと言えるが、この方法の場合、波面再生時の二枚のホログラム角度を調整することによって観測し易い干渉図形が得られることと、任意に選んだホログラム同士の比較が行える点が大きな特徴と言える。⁵⁾

5.2.3 実時間型干渉法

この方法は、流れの無い基準状態においてホログラム記録を行っておき、得られたホログラムを元の乾板位置に戻して再生し、その再生光と現在流れ場を通過してきた観測光とを重ね合わせて干渉させるものである。この方法を用いると、現象は実時間で観測でき、また干渉図形の記録は通常の写真フィルムを用いて行えるため、光学

系に伝わる振動および流れ場変化に伴う光波面の変化の影響は記録時間の短縮化により、ある程度軽減させられるようになる。なお、この場合には、明るい観測光が必要となり、また明暗比の大きな干渉図形を得るため、特に回折効率の高いホログラムを作っておく必要がある。⁶⁾

高回折率ホログラムの製法については、これまで多くの報告がなされてきたが、実用性および性能の面から見て、現在のところ漂白法によるものが最もよいように思われる。表1は現在筆者のところで用いている処理法であるが、この方法により最高40%程度の回折効率を得られた。(図9参照)

表1 漂白法による位相ホログラム処理

過程	処理剤	温度	時間	備考
前処理	SH-5	20℃	10分	予備硬膜処理によって現像中における膜面の変形を防ぐ
水洗	流水	"	3分	
現像	ATOMAL	"	5分	Agfa 社処方
定着	G 334	"	10分	"
水洗	流水	"	20分	
漂白	赤血塩 1.5% 水溶液	"	3分	
水洗	流水	"	20分	
脱水	エチルアルコール	"	3分	
乾燥				注)使用乾板は Agfa 社 10 E 75 AH

6. 実験および結果

レーザ・ホログラフィを流れ場の観測に用いる場合の問題点とその可能性について調べるため、以下の実験を行った。

観測対象として、今回は円形のソニックノズルから大気中に放出される高速噴流と当所小型超音速風洞（測定部断面 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ ）内に置かれた回転対称物体回りの流れ場を選び、前章で述べた種々の観測法について試験を行った。

観測光学系は図 7 の配置を基準に、それぞれの実験状況に合わせて光学素子を配置している。なお観測視野の大きさは、ここで使用するコリメータレンズの有効径によって決まり、この場合 $70\text{ mm}\phi$ の視野が得られている。また、本方式において使用するレーザ光源は可干渉距離が長く、出力の大きいものが望ましいが、今回の場合、特に可動性を重視し、最も小型の 5 mW He-Ne レーザを用いることにした。

6.1 露光量および光学系の設定に関する試験

流れ場の観測に先立って、使用乾板（Agfa 社 10E75）の最適露光条件と光学系の設定条件について調べることにした。

6.1.1 露光条件の設定

乾板に対する最適露光条件を求めるための実験を次の手順により行った。

まず、参照光光路の途中に偏光フィルタを置き、参照光強度が連続的に変えられるようにし、目的光強度 \bar{I}_0 に対する参照光強度 \bar{I}_r を 1 倍、1.33 倍、2 倍、4 倍と変えてホログラム記録を行い、その時の回折効率の変化を調べることにした。この場合、実験条件を一定にする必要があるため、まず、 $\bar{I}_0/\bar{I}_r = 1$ 、露光時間が 1 秒で標準現象後のホログラム濃度が約 2^7 になるように光源強度を実験的に調節する作業から行った。次に各強度比に対し、1 秒、0.4 秒、0.3 秒、0.2 秒の露光を与えてホログラム記録を行った。この場合、各記録状態のばらつきが予想されたため、同じ条件では 4 枚ずつ記録した。この乾板を同時に現像した結果、濃度は略等しいものが得られた。回折効率 η は各ホログラムに与える照射光の強度 \bar{I}_{in} と 1 次回折光の強度 \bar{I}_{R1} を測定しておき、これらの値から次式によって求めた。

$$\eta = \bar{I}_{R1} / \bar{I}_{in} \times 100 \% \quad (19)$$

図 8 は測定結果で、実験値の範囲とその平均値を表わしている。なお、この場合の入射角度差 θ は 12.2° であった。実験値は比較的ばらつきが多いが、傾向的には強度比が 1 に近くなるに従って高い回折効率を得られるこ

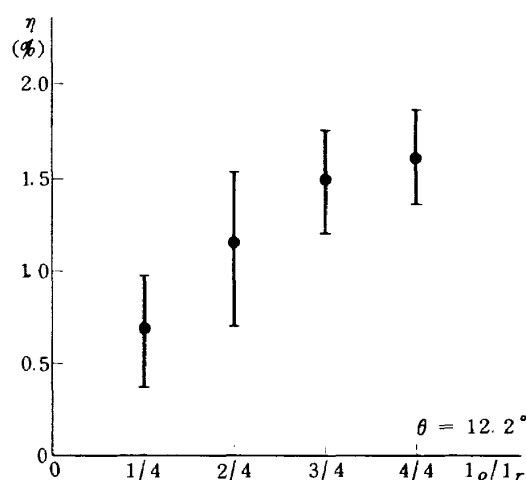


図 8 入射光強度比と回折効率

とが判る。なお、この条件は固体形状を記録対象とする通常のホログラム記録に適用させることは、やや問題があるが、流体観測などの透過型ホログラフィでは設定条件の一つとして使用すべきであると思う。

6.1.2 入射角度差の影響

次に目的光と参照光の入射角度差 θ の影響を調べた。乾板の露光条件としては、前項の方式に従い、 $\bar{I}_0/\bar{I}_r = 1.0$ 、露光時間を 1 秒とし、 θ のみを 4.5° 、 12.2° 、 17.0° と変えて回折効率を測定した。なお、今回は、漂白位相化の効化についても同時に調べるため、同一条件において 8 枚ずつホログラム記録を行い、そのうち 4 枚については漂白処理を加え、位相ホログラムに変換した。これらの回折効率を図 9 に示す。この図からも判る通り、 θ の影響は極めて顕著であり、光学系の設定に当っては、観測状況の許す限り入射角度差を小さくすることが有利と思われる。なお、この場合のように、比較的小さな入射角度差における影響は、使用乾板の分解能（Agfa 10

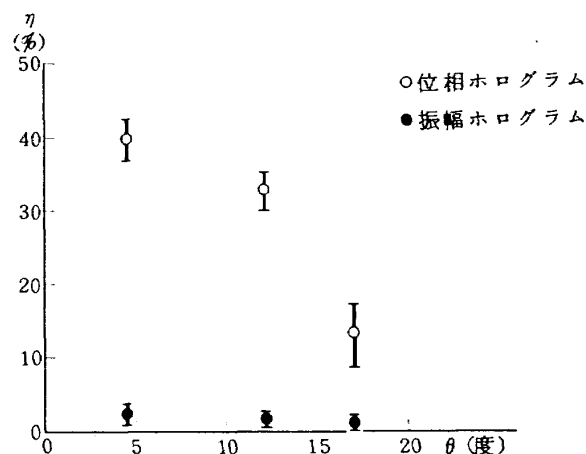


図 9 入射角度差と回折効率変化

E75 では 2800 本/mm 程度) に比べてかなり低い空間周波数の範囲であるため、乾板の特性より、むしろ振動の影響と思われる、良好なホログラム記録を行わせるためには、まず十分な防振対策を施し、その上でこの方法を適用することが肝要と思われる。

図 9 の結果で、もう一つ重要な点は、通常の振幅ホログラムを漂白するだけで、極めて高い回折効率を持つ位相ホログラムに変換できることである。この効果は、実時間型ホログラフィ干渉法を用いる場合特に重要となる。

6.2 高速自由噴流の観測

実験装置の概略を図 10 に示す。

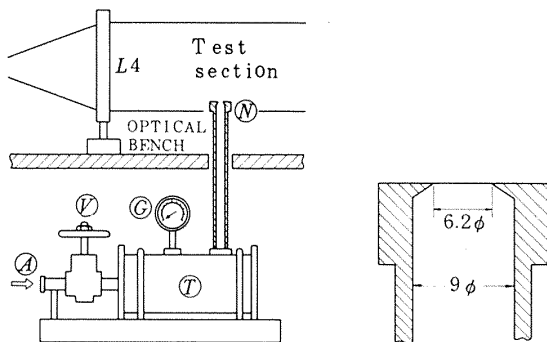


図 10 高速自由噴流実験装置 (左) および
ノズルスロート部 (右)

高速噴流の発生は、貯気槽から高圧乾燥空気を A に導き、集合胴部 T において気流を落付かせた後、ノズル部まで導き、ノズルスロートより大気中に放出して流れ場を作る。ノズル形状は図 10(右) に示すように先端を絞ったソニックスロートとしているため、集合胴部の圧力 (P_0) と大気圧 (P_∞) との比が十分に大きい時は、出口速度は $M = 1.0$ となる。なお、集合胴圧力の大きさはバルブ V の開度により調節し、圧力値 (P_0) の測定は精密圧力計 (アンペアゲージ) を用いて行った。流れ場の観測は図 7 の測定部にノズル部を配置して行った。この場合の目的光と参照光の入射角度差は 12.2° であった。(写真 1 参照)

観測はまず、通風中の目的光に対し 1 回だけの露光によってホログラム記録を行っておき、実験後これを再生し、シャドウグラフ法、シュリーレン法を用いて観測する方法を試みた。(写真 2, 3)

次に、同じホログラムを使用し、無風時のホログラムと重ね合せて、2 枚同時に再生するデュアルホログラム法を試みた。(写真 4, 5)

このように、レーザ・ホログラフィを用いて観測光を 1 度記録して置くと、定性的な観測から定量的な観測ま

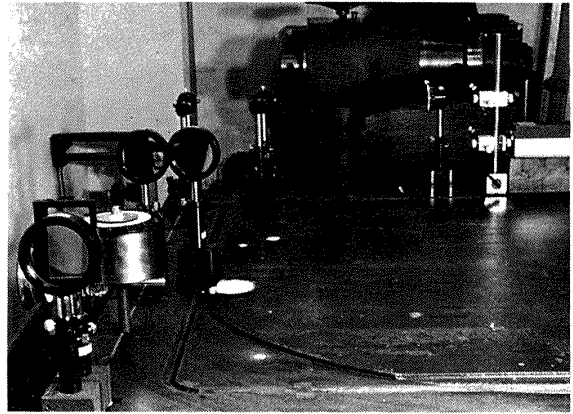


写真 1 高速自由噴流観測装置

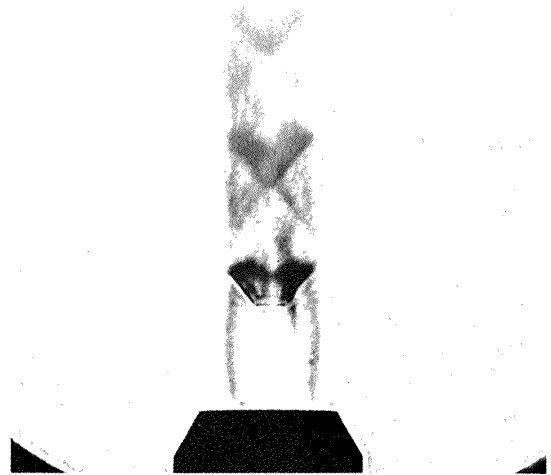


写真 2 単一露光ホログラムのシャドウグラフ法
による観測 ($P_0/P_\infty = 5.26$)

で全て行うことができる。

同じ圧力比の流れ場に対し、二重露光干渉法を用いると写真 6 の干渉図形が得られる。

図 11 は、これらの干渉測定法によって得られた高速噴流内密度分布の測定結果の一例である。また、図 12 は高速噴流軸上における密度分布を、ノズル出口からの距離に対しそれぞれ無次元化してプロットしたもので、他のデータとも比較的によく合っており、本方式の実用性が確認できた。なお、干渉縞移動量から密度量への変換法については文献 8)9)10) 等に詳しく述べられている。



写真3 単一露光ホログラムのシュリーレン法による観測 ($P_0/P_\infty = 5.26$)

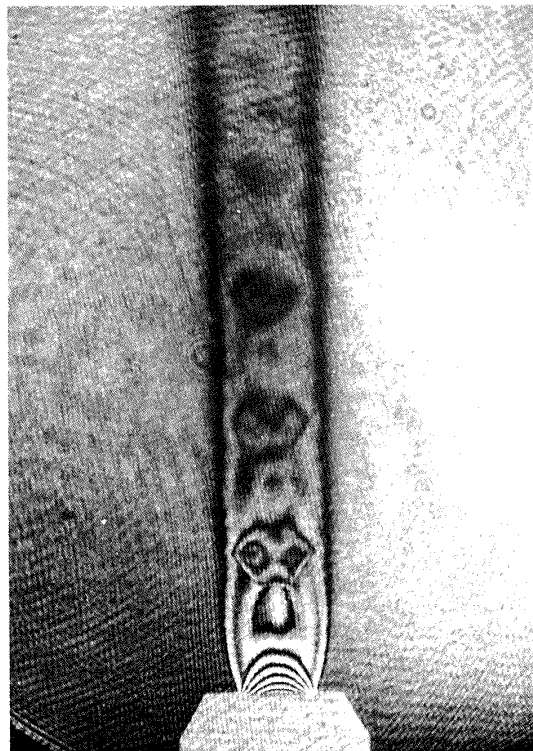


写真5 デュアルホログラム干渉法による観測 (無限縞法による。 $P_0/P_\infty = 5.26$)

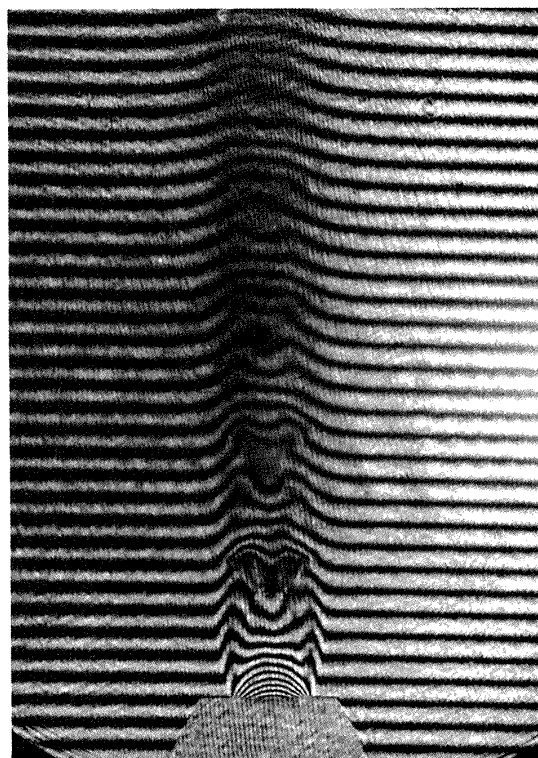


写真4 デュアルホログラム干渉法による観測 (有限縞歩による。 $P_0/P_\infty = 5.26$)

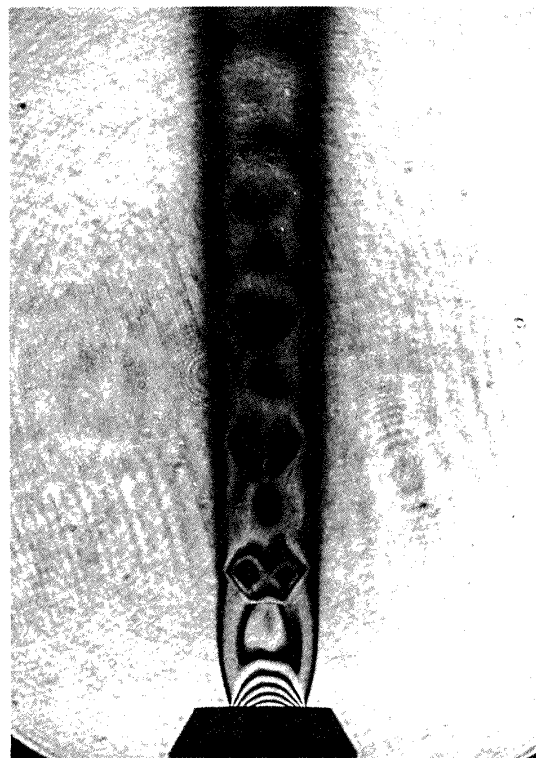


写真6 二重露光干渉法による観測 ($P_0/P_\infty = 5.26$)

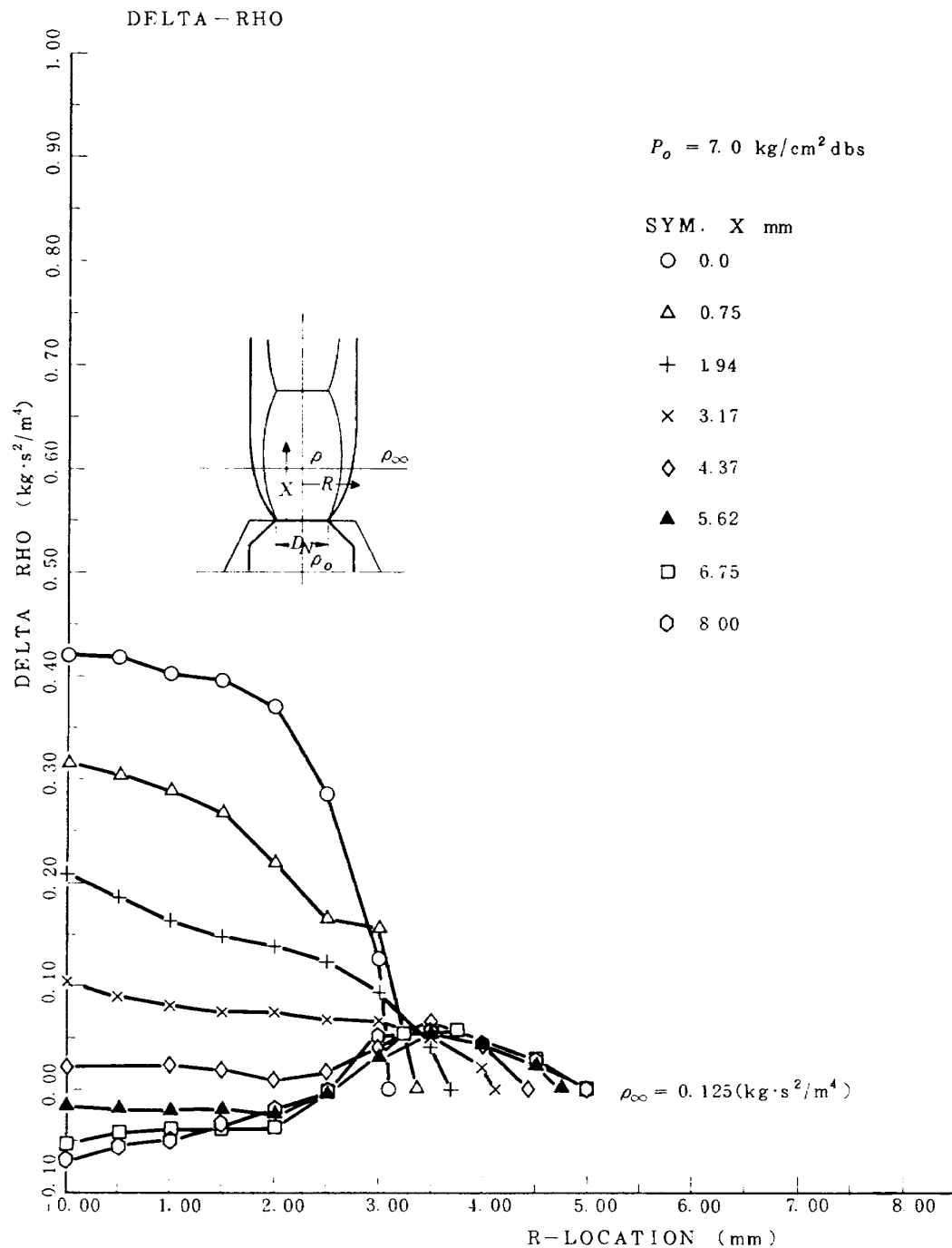
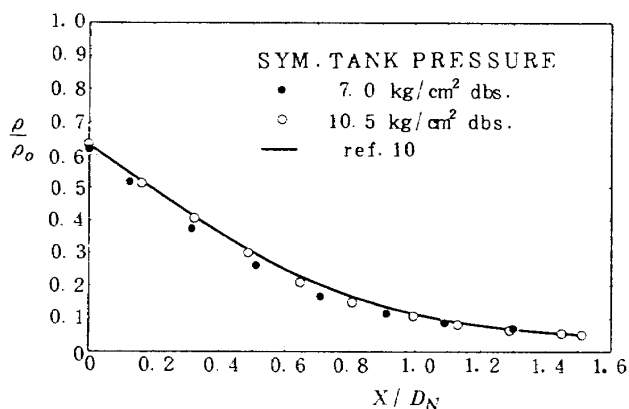

図 11 高速自由噴流内の密度分布 ($P_o/\rho_\infty = 7.0$)


図 12 高速噴流軸上の密度と出口からの距離の関係

6.3 小型超音速風洞における観測実験

小型レーザ光源を用いたホログラフィ観測法の応用例として、ここでは、小型超音速風洞内の流れ場観測に本装置を用いて見た(写真7)。今回の場合、実験装置との関係により、光源部およびホログラム記録部をそれぞれ別の光学台に設置しなければならなくなったことと、風洞通風時に生じる床面の振動や騒音がきわめて大きいことが本方式の使用上かなり不利になるものと思われた。

測定部のマッハ数設定はノズルブロックの交換によって行う。

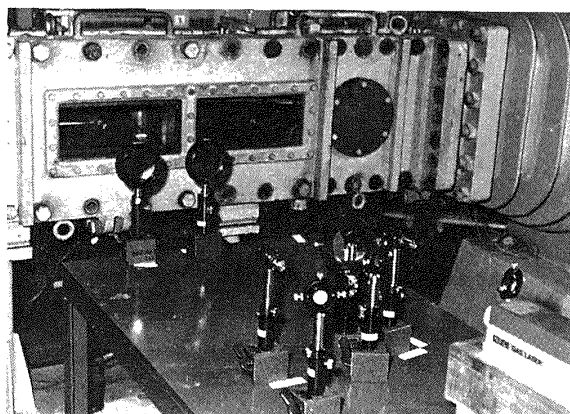
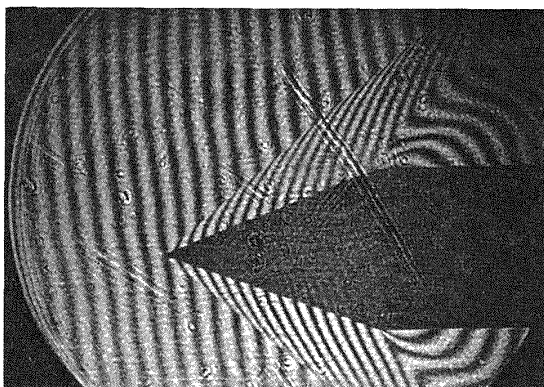
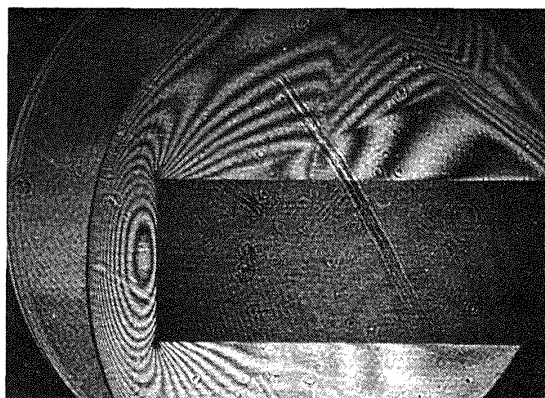


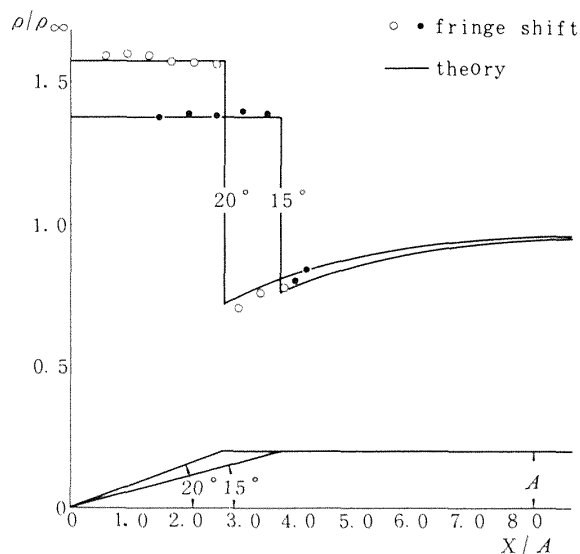
写真7 小型超音速風洞における流れ場の観測

実験は $M = 2.0$ の気流中に迎角 0 でおかれた円錐－円柱模型および平頭円柱模型回りの流れ場を観測対象とした。

最初に通風中の観測光から直接ホログラム記録を行う方法についての実験を、 θ を $12.0^\circ \sim 7.5^\circ$ まで変えながら数回行ったが、通風中の振動により、何れの場合もホログラム記録は成功しなかった。そこで 5.2.3 で述べた実時間型ホログラフィ干渉法を用いることにした。基準ホログラムの記録は、特に外部からの振動の影響を受けないように夜間に行った。この場合、 θ の値は 12° であったが、現像し、漂白処理後の回折効率の値として約 27% が得られた。このホログラムを用いて観測実験を行ったところ、通風中は干渉縞の振動が激しく通常の写真記録法（フォーカルプレーンシャッタにより $1/500$ 秒から $1/1000$ 秒で記録）では干渉図形の記録を行うことができなかった。そこで、特に高速度の写真記録が行えるように、回転円板型のシャッタを併用したところ、略、実用的な干渉図形が得られるようになった。写真 8、9 はこのような方法によって記録した干渉図形で、 $1/5000$ 秒の露光によって記録したものである。

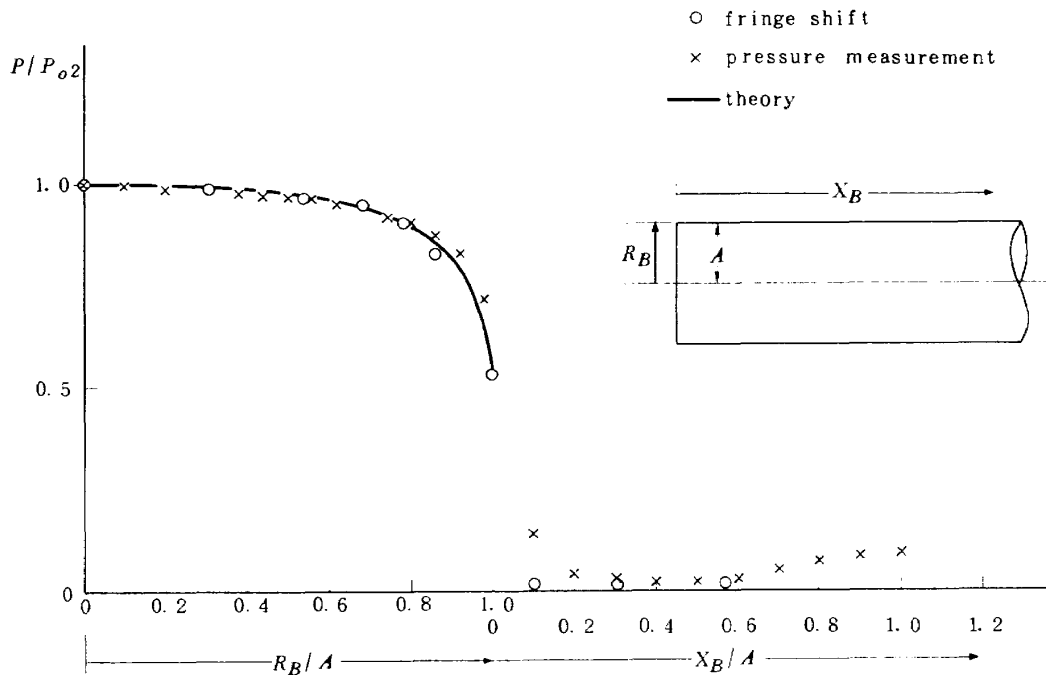
写真8 円錐－円柱模型まわりの流れ場観測
(実時間型干渉法による。 $M = 2.0$)写真9 平頭円柱模型まわりの流れ場観測
(実時間法による。 $M = 2.0$)

また、これらの干渉図形から求められた円錐－円柱模型および平頭円柱模型表面の密度分布、圧力分布は図 13、14 のようになり、理論値¹¹⁾および他の実験法による測定値とも、きわめてよく合うことが確認された。

図13 円錐－円柱模型表面の密度分布 $M = 2.0$

7. むすび

レーザ・ホログラフィを用いた流れ場可視化実験を二・三試みた。今回の実験は、光源として 5 mW He-Ne レーザを用いたものであったが、高速自由噴流、小型超音速風洞など比較的に実用に近い流れ場の観測が行えた。また、この予備実験では流体観測にレーザ・ホログラフィを用いる場合の光学系の設定法、乾板に対する露光条件など、かなり有益なデータも得られた。これらは今後計画される実用観測装置の製作においても大いに役立つものと考ええる。

図 14 平頭円柱模型表面の圧力分布 $M = 2.0$

本書の終りにあたり、実験の開始時より種々の御指導を頂いた東京大学大島耕一教授、元当所超音速風洞計測研究室の谷喬室長（現東京農工大教授）並びに制御研究室の河本巖室長の方々に感謝の意を表します。また、実験および装置の製作において御援助下さいました清水福寿技官、石田清道技官に御礼申し上げます。

文 献

- 1) 久保田，浮田，会田編，光学技術ハンドブック，朝倉書店
- 2) 霜田光一他編，レーザハンドブック，朝倉書店
- 3) 佐藤拓宋，上田光宏，波動と映像，森北出版1972年
- 4) J. D. Trolinger and J. E. O'hare, Aerodynamic Holography, AEDC-TR-70-44, August (1970).
- 5) R. J. Radley and A. G. Havener; The Application of Dual Hologram Interferometry to Wind Tunnel Testing, AIAA paper No. 73-210.
- 6) 大島耕一，原亘利，実時間ホログラフィ干渉法による超音速噴流の観測，第3回流れの可視化シンポジウム講演集，東京大学宇宙航空研究所 昭和50年
- 7) 武田康嗣他，漂白型位相ホログラム，応用物理第40巻第1号 1971年
- 8) H. W. Liepmann and A. Roshko; Elements of Gasdynamics, John Wiley & Sons, Inc.
- 9) S. P. Hutton and M. Eng; The Use of Interferometers in Aerodynamics at the L. F. A. Brunswick, Germany, R & M 2366, July (1946).
- 10) R. Ladenburg, C. C. Van Voorhis and J. Winkler; Interferometric Studies of Faster than Sound Phenomena, Part II, Analysis of Supersonic Air Jets, Physical Review, Vol. 76, No. 5 (1949).
- 11) 河本巖，清水福寿，積分関係法による平頭楕円柱まわりの流れ一迎角のない場合，第8回流体力学講演会講演集，昭和51年10月

航空宇宙技術研究所報告516号

昭和52年11月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)
