

# 解 説

## 最近のホログラフィの応用計測

松 田 浩 史

機械技術研究所物理情報部 〒305 つくば市並木 1-2

(1990年12月3日受理)

### Recent Holographic Interferometry

Kiyofumi MATSUDA

Department of Applied Physics and Information Science, 1-2, Namiki, Tsukuba 305

#### 1. はじめに

ホログラフィ技術は1948年 Gaborにより発明され、その後1962年 Leithと Upatnieksにより改良された。現在までに多くの分野への応用が提案されており、その中でも干渉計測はホログラフィの重要な応用分野の一つである。ホログラフィ干渉法の辿った道を簡単に振り返ってみると、1960年代の後半に基本的取扱いや干渉縞の性質についての研究が行われ、1970年代から1980年代前半にかけては、その特色を利用した新しい干渉法の提示や新しい手法の導入による精度の向上、さらには応用についてのデモンストレーションが行われ、1980年代後半には、実際に産業界において利用する立場からの研究が行われてきた。

ホログラフィ干渉法は、主に、①粗面の干渉を行うことができる、②時間分割の干渉を行うことができる、③振動測定が可能である、④光学系等の収差補正や入射側と射出側の光軸を任意に選択できる、⑤瞬間現象の干渉計測が可能であるなど従来の干渉法には見られない特色を備えている。

本稿では、このような特色を備えたホログラフィ干渉法の最近の情況を調べるために、1985年以降発表された論文を中心に解説してみたいと思う。最近の5年間といつてもその全部を網羅することは著者にとって困難なことなので、その一部を解説し最近の傾向が示せればと思う。

#### 2. ホログラフィ干渉法

最近、面の変位や変形を高精度に測定するために、フ

リンジスキャニング法やヘテロダイン法<sup>1,2)</sup>がホログラフィ干渉法に取り入れられてきた。そして、高精度な測定が要求されるとき、干渉縞の端数を読み取る。このようにして、各点ごとに値を測定していくなければならない。またハリハランによって確立された実時間ホログラフィ干渉法の位相ステップシステム<sup>3,4)</sup>は、一般に位相シフターとしてピエゾエレクトリックトランスデューサ(PZT)が用いられており、位相シフターを較正する必要がある。

このような較正を必要としないディジタル位相シフトホログラフィ干渉法を用いた高精度な変形測定法の報告<sup>5)</sup>がある。図1は、その基本原理を示す光学系でレーザー光は2光束に分けられ、物体を照明する。他方の光はPZTを取り付けたミラーで反射され、ホログラムを作製する参照光となる。ホロカメラには変形前の物体を記録しておき、次に物体が変形すると、PZTによって参照光に $\delta$ の位相シフトを与えて変形前の物体の波面を再生し、この再生波面と変形の生じた物体からの実在波面とを実時間干渉させる。位相を $\delta$ ずつステップ的に4回変えて各点が測定され、四つの方程式を作り式を解いて位相を求める。この方法と通常の位相ステップ法との違いは、参照光の位相を時間に対して直線的に変化させながら測定を行うので、4回変えて測定される各点は $-2\delta$ から $-\delta$ まで、 $-\delta$ から0まで、0から $\delta$ まで、 $\delta$ から $2\delta$ までそれぞれ時間的に積分されて測定されることである。この方法において重要なことは、時間に対して一定の位相変化を与えることであり、このようにすれば、位相シフターの較正を行わずにすむ。実験では片持ち梁のそれの測定とハニカム構造の非破壊検査を行っ

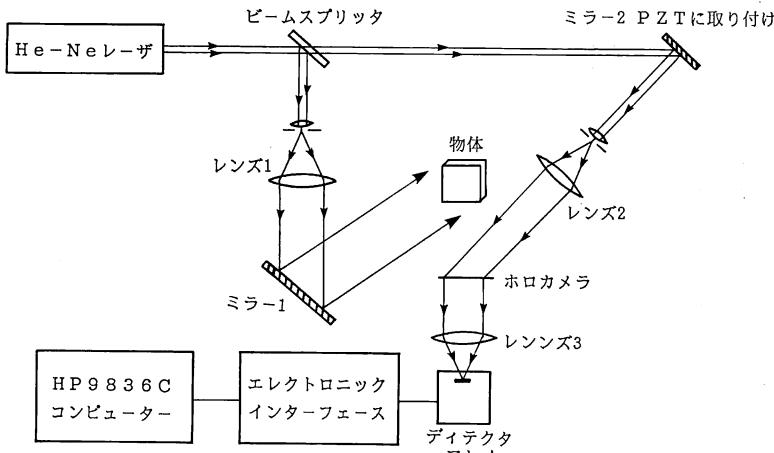


図 1 デジタル位相シフトホログラフィック干渉計

た。その結果粗面物体の小さな変形に対しても、また大きな変形に対しても非常に正確なデータが得られた。

干渉縞の位置や強度変化とは独立して位相を正確に測定することができるヘテロダイイン技術は、高解像度で干渉縞を内挿する有力な手段になっている。これまでホログラフィ干渉法に応用されたヘテロダイイン法には、物体面の変形測定<sup>6,7)</sup>、位相物体の測定<sup>8)</sup>、表面の等高線の形成<sup>9)</sup>などがある。最近、ヘテロダイインホログラフィ干渉法を歪み測定<sup>10)</sup>に応用し、そのときの理論的実験的限界を示す報告<sup>11)</sup>もなされている。

ヘテロダイイン技術を応用する場合、図 2 に示すように、三つの参照光が必要となる。一つの参照光は物体の変形前の状態を記録するときに、もう一つの参照光は変形後の記録に用いる。ホログラムを再成するときは、一方の参照光に周波数変調器を導入し、位相を時間とともに直線的にシフトさせる。このとき、歪みによって生ずる

干渉縞の位相はビート周波数信号の位相として検出される。実験では、音響光変調器 (AOM) が一つの参照光の中に二つ用いられ、互いに逆の符号の周波数シフトを行わせている。記録するときは両方とも 40 MHz で変調するため差はゼロになり、再生するときは片方が 40 MHz、もう一方が 40.1 MHz で変調するため差は 100 kHz となる。スクリーン上には二つの検出器が配置されており、一方の検出器を固定してそのとき得られる信号を基準のビート信号として用い、他方の検出器はスクリーン上を移動させ各点でのビート信号を検出し、基準のビート信号と比較して位相を求め、変形測定を行う。数 mm の空間分解能で 1 μm/m の歪みに対する感度を達成することができた。

またホログラフィ干渉の二重露光法で、干渉縞の符号を自動的に決めるフリンジスキャニング技術が報告<sup>12)</sup>されている。その方法は、既知のフリンジ方向に単純に直

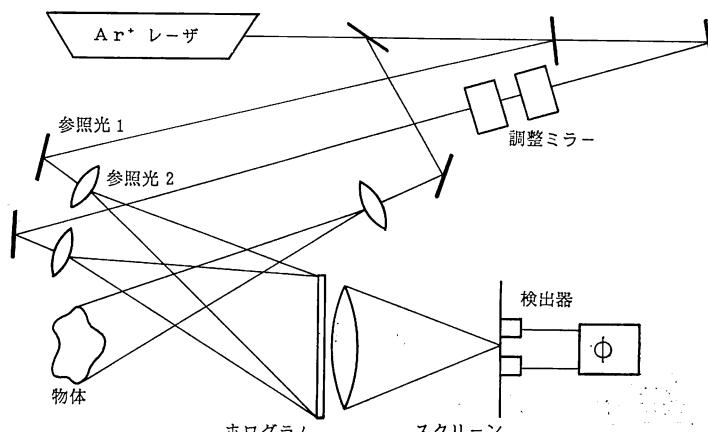


図 2 ヘテロダイインホログラフィック干渉計

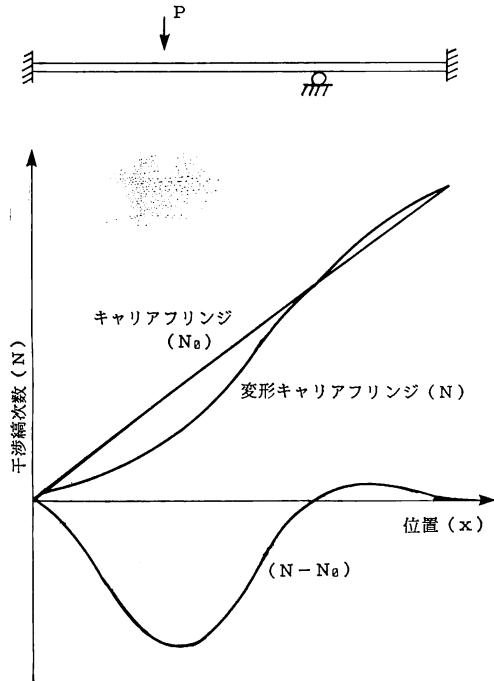


図3 キャリアフリンジ技術を用いた変位測定例

線的に増加するキャリアフリンジを用いる方法で、ミラーには目盛りのついた回転ステージが取り付けられており、粗面物体の変形前に記録し、次に変形後ミラーをわずかに回転させて二重露光記録してリニアキャリアフリンジを作製し、これを写真撮影する。マイクロスコープとコンパレータで写真を調べ、参照面におけるフリンジの位置と変調された干渉縞のフリンジの位置が測定され、変形していないもののカーブから変形したもののか

ーブが引き算されて、物体の変形量が求められる。実験では梁を曲げる問題が取り扱われ、得られた結果が図3に示されている。正負の符号は変形したキャリアフリンジが参照キャリアフリンジの右側にくるか左側にくるかによって決められる。

ホログラフィを非破壊検査などへ応用する場合、瞬間的な位相の測定が必要になる。リニアフリンジキャリアを用いる方法は精密な角度の調節が必要になるが、物体光の動きに対してそれほど影響を受けず、精密な調節を必要としないサーキュラーフリンジキャリアを用いる方法も提案<sup>13)</sup>されている。二重露光の最初の露光で点光源から生ずる球面波で物体を照明し、次に点光源の位置を光軸方向にずらして二回目の露光をするとリング状のキャリアフリンジが生じる。この方法では、正の方向に変形するときフリンジキャリアの中心は変形の中心方向に動き、負の時逆方向に動くことから符号の判定を行う。

また、Huignardらは、BBO結晶を用いる実時間二重露光干渉法を報告<sup>14)</sup>しており、またBSOを用いて動的干渉、すなわち現象の動的変化が任意の時間間隔で連続して得られるという報告<sup>15)</sup>もある。これらの報告では、物体を透過した位相共役波と平面波を干渉させて位相変化を検出する。これに対して、二つの位相共役波を用いて動きのある物体を干渉測定する新しい方法も提案<sup>16)</sup>されている。

図4にはその光学系が示されている。アルゴンレーザー光はビームスプリッタ BS<sub>1</sub>, BS<sub>2</sub>によって二つの参照光と一つの物体照明を作り、照明光はビームスプリッタ BS<sub>3</sub>によって二つの信号光に分割され、BSOにホログラムとして記録される。次に、二つの参照光がミラー

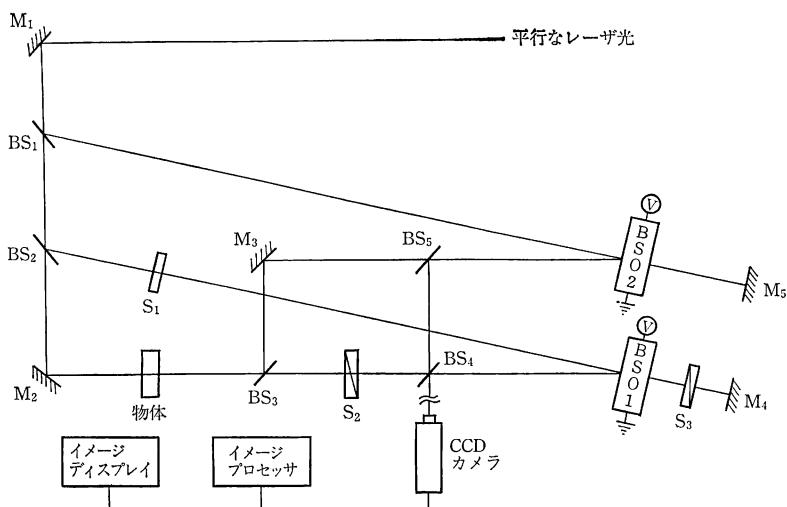


図4 二つの位相共役波を用いる動的物体の干渉測定法

$M_4, M_5$  でそれぞれ反射され、 $BSO_1, BSO_2$  を照明し、それぞれの  $BSO$  から再生された位相共役波は二つのビームスプリッタ  $BS_4, BS_5$  を用いて互いに干渉させる。図に示すように、連続して書き込んだり読み出したりするためには三つのシャッターが使われる。最初にシャッター  $S_1$  と  $S_2$  が開かれ  $S_3$  が閉じているので、 $BSO_1$  にホログラムが作製される。 $\Delta t$  の時間経た後、シャッター  $S_1$  と  $S_3$  が開かれ、 $S_2$  は閉じた状態にされるので、 $BSO_1$  からのホログラムが読み出される。そして  $BSO_2$  からの位相共役波と干渉する。結果は TV カメラとイメージメモリを用いて干渉縞として記録される。書き込みと読み出しの最小サイクルタイムは 2.5 秒、 $BSO$  の応答時間は 0.5 ミリ秒である。実験では先細りしたタンク内の水の動き、塩水のかたまりが拡散していく様子や水タンクを加熱したときの対流の様子を示す干渉縞が観測されている。

### 3. ホログラム素子 (HOE) を用いた干渉計

最近 CGH を用いた非球面形状測定用干渉計の報告<sup>17)</sup>がなされている。干渉法は非球面全面が瞬時に求まるという大きな利点があり、CGH を用いれば精度も高く実用的な方法となる。しかし、精度の高い非球面の参考波面を CGH で製作することは困難であり、また球面波と非球面波で生ずる干渉縞は細かくなりすぎて測定が困難になる。そこで被測定非球面の測定値がわかっていない場合は非球面を球面波に変換する CGH を製作することができ、この CGH によって変換された球面波と参考球面波とを干渉させれば粗い干渉縞が得られ、非球面レンズの測定が可能となる。電子線描画により作製された CGH は、画素サイズ  $2.5 \mu\text{m}$  角、最大空間周波数 200 本/mm、描画領域最大  $62.25 \text{ mm}$  角、温度変化の影響を軽減するため、基板には低膨張ガラスを使用している。図 5 に示すように干渉計には、フィゾー型の干渉法が用いられている。フリンジスキャニング法を用いて干渉縞の解析を行うため、光量むらなどの影響は軽減され、測定精度 PV 値  $\lambda/10$ 、RMS 値  $\lambda/50$  である。

理想的な平面波面の CGH をプロッターで描画し、パターンを写真で縮小するやり方で、干渉計の基準平面波を作製する報告<sup>18)</sup>もある。この場合、プロッタの描画精度や縮小レンズの収差の影響のため、 $\lambda/4$  程度の平面波面しか得られない。そこで、いったんホログラムを作製しておき、このホログラムから再生される平面波を測定する。つぎに測定したプロッタ誤差やレンズ収差の分を補正するように CGH をもう一度作製しなおし、最初と

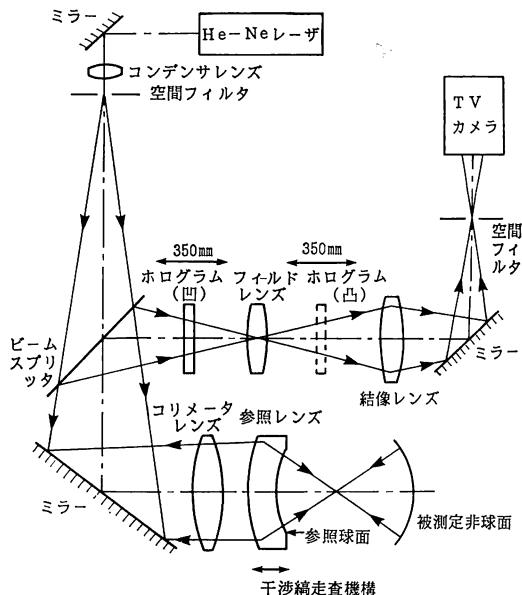


図 5 CGH を用いた非球面形状測定干渉計

全く同じプロッタで描画し、同じ写真レンズで縮小すると、定常的な描画誤差やレンズ収差は補正され、より理想的な平面波が得られる。この方式により  $\lambda/40$  程度の平面波を作製することに成功した。この方法を螺旋状の基準波面作製に適用し、旋盤などで加工した金属面の測定の基準波面として利用することも提案<sup>19)</sup>されている。

HOE を斜入射干渉計に用いる報告<sup>20)</sup>もある。最近機械部品も高精度に加工されるようになってきたが、まだ機械部品などの表面は光学的にみれば粗面の状態になっており、鮮明な干渉縞を観測することができない。そこで被測定面すれすれに光を入射させ測定する斜入射干渉計の光学系が図 6 に示されている。レーザー光は、拡大され平行光にされて回折格子に入射させる。0 次光はそのまま直進し、1 次回折光は被測定面で正反射してそれぞれ 2 番目の回折格子に到達する。2 番目の回折格子では、0 次光（平面波）は、被測定面で反射してきた光（被測定波面）と同じ方向に回折され、ホログラムスクリーンに到達する。そして平面波と被測定波面の光が互いに干渉し干渉縞を形成する。ホログラムスクリーンは、平面波と球面波で作られた HOE で、レンズ作用をする。本干渉計はコンピュータ用ハードディスク、DAD などのプラスチックディスク、IC ウェハなどの測定に利用され、測定面積  $150 \text{ mm}^2$ 、粗定感度は  $2 \mu\text{m}/\text{縞}$  である。

HOE をホログラフィシアリング干渉計に用いて、液面の変形を実時間で観測する報告<sup>21)</sup>もある。シアリング

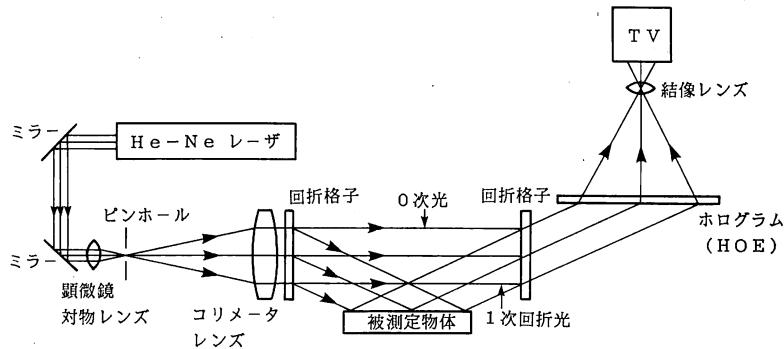


図 6 斜入射干渉計

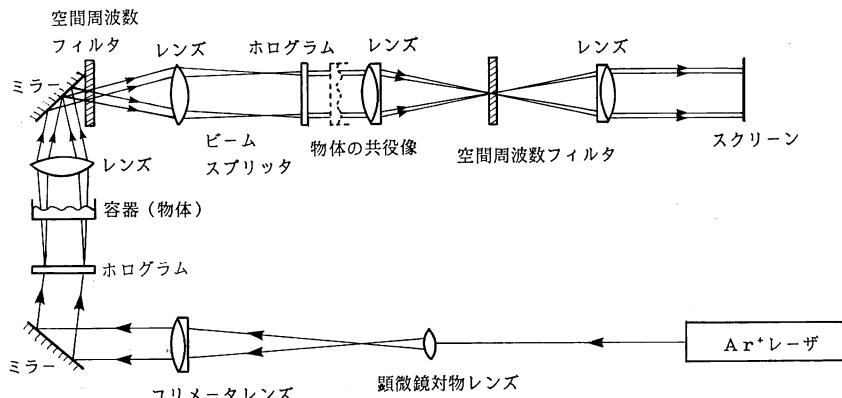


図 7 ホログラムシアリング干渉計による水面窪み測定

干渉法は、被測定波面を二つに振幅分割し、互いに横方向にずらして干渉させるいわゆる微分干渉法である。本報告では2枚のHOEが用いられており、それぞれのHOEにはピッチのわずかに異なる二つの回折格子が記録されている。

図7においてレーザー光を最初のホログラムH<sub>1</sub>に入射させ、このときホログラムから生ずる二つの平行光(二つの1次回折光)が利用される。これらの光は水を満たした容器を下から照明し、2番目のホログラムH<sub>2</sub>に到達する。H<sub>2</sub>はH<sub>1</sub>の共役な位置に置かれており、物体面では振幅分割された二つの波面は互いに横方向へずらされる。これらの光が2番目のホログラムH<sub>2</sub>を通って、同じ方向に進み、スクリーン上にシアリング干渉縞を作る。たとえば、アメンボを置くと、水面の窪みの状態のシアリング干渉图形が実時間で観測される。本干渉計は球面や非球面レンズの収差、液体や気体、表面張力などの測定に用いることができる。

その他、平行平面板を用いるMurtyのシアリング干渉計を膜厚測定に応用し、そのときの光学系の収差補正にHOEを用いる報告<sup>22)</sup>、油面をホログラムに記録し

ておき、測定するときにホログラムから再生し干渉計の参照波面として用いる報告<sup>23)</sup>、ホログラムレンズを用いた干渉法による膜厚測定法に関する報告<sup>24)</sup>、ランダムな波面を記録した2枚のHOEを直線計に応用した報告<sup>25)</sup>などがである。

#### 4. ホログラフィ干渉法の産業への応用

ホログラフィ干渉法は自動車、航空機などの産業分野へ応用する研究報告も最近多くなされている。自動車では、たとえばトランスマッキンケースのねじりによる変形が生ずると、ケースの破損、ペアリングの焼き付きや振動騒音の原因になるが、ホログラフィ干渉の二重露光法や実時間法で測定<sup>26)</sup>されており、また、エンジンの燃焼による変形やディスクブレーキの熱変形測定<sup>26)</sup>も行われている。振動計測に関しては、油量により振動特性が変化するオイルパンやフロントフロアからダッシュパネル付近のパルスレーザーによる振動測定<sup>26)</sup>、さらに衝撃波が原因でマフラーから排気びびり音が発生するが、ダブルパルスレーザーホログラフィを用いるマフラー・シェルの振動モード解析が報告<sup>27)</sup>されている。

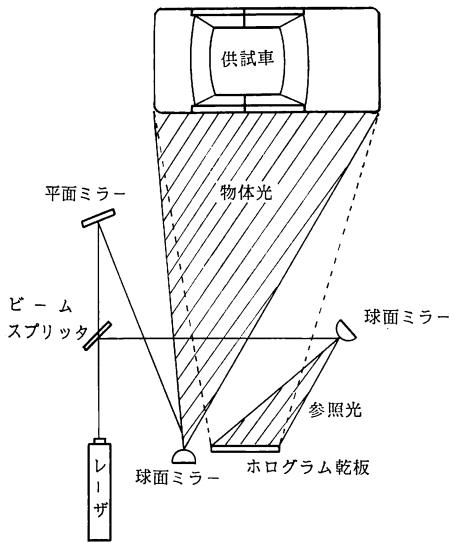


図 8 ホログラフィによる自動車の振動計測  
(時間平均法)

また、ホログラフィ振動計測法を用いたこもり音解析技術に関する報告<sup>28)</sup>もある。自動車の車内騒音は車内のパネルが振動するために生ずる。そこで時間平均法を用いて、ボディパネルの振動測定を行った。時間平均法は、振動の腹の部分では光が再生されず黒くなり、節の部分は明るく再生されるため、腹と節が明暗により固定され、したがって低周波数のこもり音の振動測定（0.1～10数  $\mu\text{m}$ ）に適している。用いられた光学系は図8に示されており、レーザーは防振台上に設置した。車内にはスピーカーを宙ぞりにし、こもり音を再現してボディパネルを振動（たとえば 3,600 rpm, 120 Hz）させた。実験結果は、実際に車を作るときに生かされ、こもり音を 3～10 dB 低減することができた。

航空機の翼の破壊はほとんどの場合共振によるものであり、ホログラフィの時間平均法による振動計測が生産現場で実用化されている<sup>29)</sup>。また、圧縮機・タービンの動翼やディスなどの部品が回転しているときの挙動をパルスレーザーを用いて計測したり、あるいは、イメージローテータを回転させ、見かせ上回転物体を静止させて測定する方法も<sup>30,31)</sup>提案されている。図9にはその光学系が示されており、測定においてはイメージローテータと回転物体の回転軸を正確に調整しなければならない。さらに、航空機材料の内部欠陥の非破壊検査、たとえば圧縮機静翼シュークラウドシール部のろう付け状態の検査<sup>32)</sup>にも振動計測法が用いられている。

また、高速で回転するジェットエンジンの遷音速ファン動翼内を流れる衝撃波形状をダブルパルスレーザーホログラフィ干渉法を用いて計測することに成功した報告<sup>33)</sup>もある。光源としてジャイアントパルスレーザー（出力 1 J, パルス幅 20 ns, パルス間隔 1～750  $\mu\text{s}$ ）を用いる。物体光は、拡散板（2枚のスリガラス）を通して照明し、12枚のホログラムを連続して撮影できるように構成されている。物体の照明光として散乱光を用いると、透明物体でも干渉縞の局在化が生じ、衝撃波面の三次元的情報をもたらす。

高圧・高温下での直接噴射式ディーゼル機関の燃焼室内の噴霧状態をパルスレーザーホログラフィを用いて三次元的に観察する報告<sup>34)</sup>もある。光源としてルビーレーザー（波長 694.3 mm）を用いる。物体はホログラム面に近い位置に結像するイメージホログラムにする。ダブルパルスの時間間隔は 0.2 ms、ホログラムは He-Ne レーザーで実像を再生し、顕微鏡付き TV カメラで拡大して写し出す。シングルパルスレーザーと He-Ne レーザー再生によるシュリーレン技術および白色光再生に

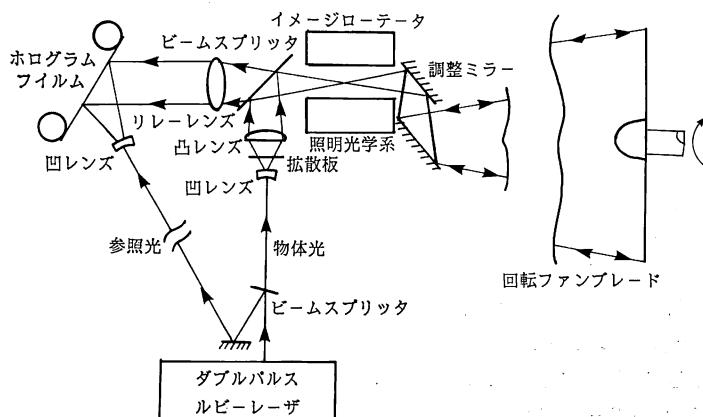


図 9 パルスレーザーによる回転ファンブレードの振動測定

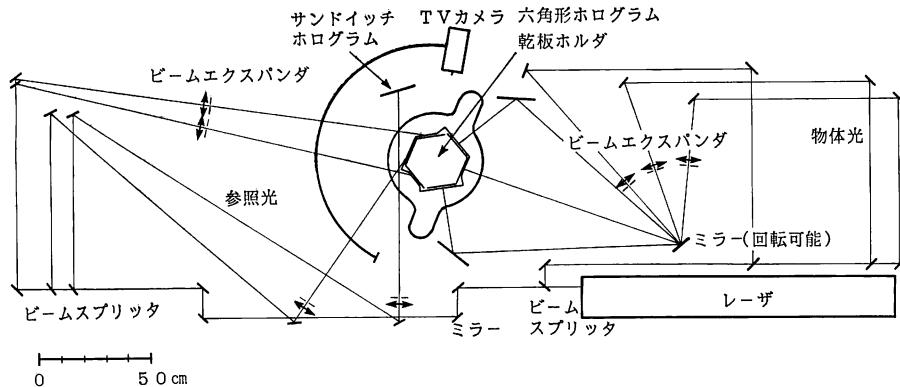


図 10 二重露光ホログラフィ干渉法によるヒートフローの温度分布測定

によるシャドウグラフを併用して観察したり。ダブルパルスレーザーによって得られる干渉縞で観察する。

その他、透明なシリンドリチューブを伝播する瞬間的な炎の温度測定をホログラフィ干渉の二重露光法で行った報告<sup>35,36)</sup>もある。燃焼チューブは空気の中にメタンを混合したもので、一定の圧力、一定の速度 (0.23 m/s) で上方へ伝播する。光源はパルスの Nd: YAG レーザーで電磁シャッターを用いた。そして軸対称炎の二次元温度分布が得られた。また、熱が対流しているときの温度分布を求めるために、多方向から照明して不均一な屈折率をトモグラフィ的に測定する報告<sup>37)</sup>もある。

これまでにもホログラフィ干渉法を用いて3次元的な屈折率分布を測定する報告<sup>38-42)</sup>があり、将来的には非対称なプラズマの研究に用いることが提案されている。図 10 にヒートフローの温度分布測定を行うための反射型ホログラフィ干渉法の光学系が示されている。180° の視野を得るために3枚のホログラムが六角形に配置されており、その中心位置に位相物体、ホログラムの反対側には三つの拡散板が並べられている。二重露光の最初の露光は位相物体を入れずに行い、つぎに対流を起こすように30分間温度を加え定常状態を作り出し、2回目の露光をする。解析はコンピュータトモグラフィ的に行い、屈折率の測定データを温度分布に変換して良好な結果を得た。

媒体の中を伝播する熱の状態をホログラフィ干渉で観察する報告<sup>43)</sup>もなされている。長熱波は固体の中を伝播するとき熱弾性変形を起こすので、ホログラフィ干渉法を用いてこれを観測する。実験は 250 W 赤外光源をレンズを用いて 0.5 cm の小さなスポットに集光し、回転板のチョッパーを使用して周期的に加熱した。図 11 において、50 mW He-Ne レーザーを用い、ホログラムをストロボ的に繰り返して作製すると、熱波のホログラフ

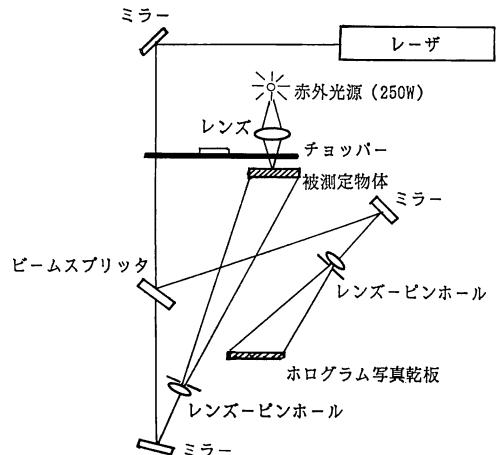


図 11 ホログラフィ干渉法による熱波の可視化

イ再生像が得られる。ホログラムを記録する時間が長くなると、時間平均法の影響が出てあまりうまくいかない。

また、遠く離れた位置や構造的に近づきがたい位置に存在する被測定物体の変形をホログラフィ干渉法で行う場合、ファイバが利用できることを示した報告<sup>44)</sup>もある。実験では水面下にある片持ち梁の変形測定を行ったため、光源として He-Ne レーザーを、物体の照明にシングルモードファイバーを、物体からの散乱光を検出するためにロッドレンズとマルチモードファイバー（解像力 27 本/mm）を用いて、二重露光ホログラフィ干渉で実験を行った。その結果、干渉縞のコントラストは低下するものの良好な結果を得た。

## 5. おわりに

ホログラフィは物体の波面を忠実に再生する技術であり、この技術を干渉測定に応用することによって、従来

の干渉法ではなしえなかった粗面物体の干渉や実時間干渉を行うことができるようになった。しかし、ホログラフィ干渉を行う場合、除振台を取り付けた光学ベンチ、レンズミラーなどの精密な光学部品を必要とし、大がかりな装置となる。それにもかかわらず、最近の方向の一つは自動車産業や航空機産業におけるように、他に有力な測定手段がなく高精度な測定を必要とする分野において使われ始めたことである。もう一つは、ホログラムを光学素子として干渉計の中に組み込んで用いようとする方向であり、将来有望と思われる。しかし、ホログラフィ干渉法が将来発展するためには、感度が高く実時間記録が可能な高解像力の新しい記録材料の開発が必要である。最近の特許を見る限り、多くの会社で記録材料の開発が進められているが、企業秘密か市販されていない。新しい研究の発展のためにも、開発した記録材料が一般の研究者にも利用できるよう配慮することを要望したい。さらに、最近はスペックル干渉法<sup>45)</sup>、TV ホログラフィ (ESPI)<sup>46)</sup>、シアログラフィ<sup>47,48)</sup>なども報告されており、ホログラフィ干渉法と同様に今後の発展を注目していく必要がある。

## 文 献

- 1) R. Dändliker, B. Ineichen and F. M. Mottier : "High resolution hologram interferometry by electric phase measurement," Opt. Commun., **9** (1973) 412.
- 2) R. Dändliker and B. Eliasson : "Accuracy of heterodyne holographic strain and stress determination," Exp. Mech., **19** (1979) 93.
- 3) P. Hariharan, B. F. Oreb and N. Brown : "A digital phase measurement system for real-time holographic interferometry," Opt. Commun., **41** (1982) 393.
- 4) P. Hariharan, B. F. Oreb and N. Brown : "Real-time holographic interferometry: A microcomputer system for the measurement of vector displacement," Appl. Opt., **22** (1983) 876.
- 5) M. Chag, C. P. Hu, P. Lam and J. C. Wyant : "High precision deformation measurement by digital phase shifting holographic interferometry," Appl. Opt., **24** (1985) 3780.
- 6) R. Dändliker : "Heterodyne holographic interferometry," Prog. Opt., **17** (1980) 1.
- 7) R. J. Pryputniewicz : "Heterodyne holography applications in studies of small components," Opt. Eng., **24** (1985) 849.
- 8) P. V. Farrell, G. S. Springer and C. M. Vest : "Heterodyne holographic interferometry: Concentration and temperature measurements in gas mixtures," Appl. Opt., **21** (1982) 1624.
- 9) R. Thalmann and R. Dändliker : "Holographic contouring using electronic phase measurement," Opt. Eng., **24** (1985) 930.
- 10) R. Dändliker and R. Thalmann : "Heterodyne and quasi-heterodyne holographic interferometry," Opt. Eng., **24** (1985) 824.
- 11) R. Thalmann and R. Dändliker : "Strain measurement by heterodyne holographic interferometry," Appl. Opt., **26** (1987) 1964.
- 12) R. D. Plotkowski, Y. Y. Hung, J. D. Hovanesian and G. Gerhart : "Improved fringe carrier technique for unambiguous determination of holographically recorded displacements," Opt. Eng., **24** (1985) 754.
- 13) P. Long, D. H. Hsun and B. Wang : "Circular fringe carrier technique in holographic interferometry," Appl. Opt., **26** (1987) 4282.
- 14) J. P. Huignard and J. P. Herrian : "Real-time double exposure interferometry with Bi<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> crystals in transverse electrooptic configuration," Appl. Opt., **16** (1977) 1807.
- 15) T. Sato, T. Hatsuzawa and O. Ikeda : "Dynamic interferometric observation of differential movement," Appl. Opt., **22** (1983) 3895.
- 16) S. Chang, M. Isono and T. Sato : "Dynamic interferometry using two phase conjugate waves," Appl. Opt., **27** (1988) 4735.
- 17) 玄間隆志 : "CGH を用いた非球面形状測定干渉計", 精密工学会誌, **56** (1990) 25.
- 18) K. Hibino and K. Matsuda : "Production-free computer generated hologram," Optik, **72** (1986) 120.
- 19) 日比野謙一, 大山尚武, 松田淨史 : "計算機ホログラム", 日本機械学会講演論文集 No. 870-13 (1987) 10.
- 20) 安田賢司 : "HOE を用いた斜入射干渉計", 精密工学会誌, **56** (1990) 22.
- 21) K. Matsuda, S. Watanabe and T. Eiju : "Real-time measurement of large liquid surface deformation using a holographic shearing interferometer," Appl. Opt., **24** (1985) 4443.
- 22) K. Matsuda, M. Namiki and T. H. Barnes : "A differential interference contrast system incorporating a murty interferometer and holographic correction," Opt. Lasers Eng., **9** (1988) 35.
- 23) K. Matsuda and H. Shimazatsu : "Holographic interferometer using an oil surface as a reference plane," Proc. of ICO 14th (Proc. SPIE, 813) (1987) 333.
- 24) K. Matsuda and M. Namiki : "Laser interferometric method for the measurement of film thickness, using holographic components," Proc. SPIE, **952**, Laser Technologies in Industry (1988) 292.
- 25) K. Matsuda, K. Tenjinbayasi, T. Kohno and T. Eiju : "Straightness measurement using holographic real time measurement," Conf. Dig. of ICO 14th (Sapporo, 1984) p. 316.
- 26) 正守一郎 : "ホログラフィの自動車技術への応用", 精密工学会誌, **56** (1990) 1801.
- 27) 榎井康之, 下地浩二, 小川澄雄, 許斐敏明, 野平英隆 : "衝撃波に起因する非気音異音の改善手法の開発", 自動車技術会学術講演会前刷集 892 (1989) p. 301.
- 28) 正守一郎, 黒角高志, 笹西和人 : "ホログラフィ振動計測法を用いたこもり音解析技術", 自動車技術会学術講演会前刷集 892 (1989) p. 165.
- 29) 安昭八, 服部博明 : "ホログラフィの航空原動機産業への応用", 精密工学会誌, **56** (1990) 1796.
- 30) P. A. Storey : "Holographic vibration measurement of a rotating fluttering fan," J. AIAA, **22** (1984) 234.
- 31) R. J. Parker and D. G. Jones : "The use of holographic interferometry for turbomachinery fan

- evaluation during rotating test," ASME Paper 87-GT-236 (1987).
- 32) J. F. Clarady: "Holographic NDT of composite laminated and bonded structures," *Proc. VI Int. Congr. Exp. Mech.* (1988).
- 33) 安昭八, 玉木貞一, 永野進, 柏木孝夫: "ダブルバルスレーザによる衝撃波の三次元計測", 日本機械学会論文集(B編), **56** (1990) 2626.
- 34) 西田恵哉, 村上直樹, 廣安博之: "高圧, 高温下におけるディーゼル噴霧のホログラフィ計測", 日本機械学会論文集(B編), **52** (1986) 2457.
- 35) D. L. Reuss and P. H. Schultz: "Interferometric temperature measurements of a flame in a cylindrical tube using holography," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 1661.
- 36) D. L. Reuss: "Interferometry probing of a cylindrical tube using holography," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 2197.
- 37) D. Vnkicevic, H. Jager, H. Philipp and J. Woisetschläger: "Tomographic reconstruction of the temperature distribution in a convective heat flow using multidirectional holographic interferometry," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 1508.
- 38) R. D. Matulka and D. J. Collins: "Determination of three dimensional density fields from holographic interferograms," *J. Appl. Phys.*, **42** (1971) 1109.
- 39) D. W. Sweeney and C. M. Vest: "Reconstruction of 3-D refractive index fields from multidirectional interferometric data," *Appl. Opt.*, **12** (1973) 2649.
- 40) C. M. Vest: "Interferometry of strongly refracting axisymmetric phase objects," *Appl. Opt.*, **14** (1975) 1601.
- 41) S. Cha and C. M. Vest: "Tomographic reconstruction of strongly refracting fields and its application to interferometric measurement of boundary layers," *Appl. Opt.*, **20** (1981) 2787.
- 42) C. M. Vest and I. Prikryl: "Tomography by iterative convolution: Empirical study and application to interferometry," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 2433.
- 43) G. H. Kaufmann and C. M. Vest: "Thermal waves visualized by holographic interferometry," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 2799.
- 44) J. A. Gilbert, T. D. Dudderar and A. Nose: "Remote deformation field measurement through different media using fiber optics," *Opt. Eng.*, **24** (1985) 628.
- 45) S. Nakadate and H. Saito: "Fringe scanning speckle-pattern interferometry," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 2172.
- 46) E. Viikhagen: "Nondestructive testing by use of TV holography and deformation phase gradient calculation," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 137.
- 47) Y. Y. Hung: "Shearography: A new optical method for strain measurement and nondestructive testing," *Opt. Eng.*, **21** (1982) 391.
- 48) J. Takezaki and Y. Y. Hung: "Direct measurement of flexural strains in plates by shearography," *J. Appl. Mech.*, **53** (1986) 125.