

二重露光ホログラフィー干渉法による 三次元変位解析について

渡 辺 孝 一 宮 川 修
大 野 弘 機 中 野 周 二
塩 川 延 洋

新潟大学歯学部歯科理工学教室 (主任: 塩川延洋教授)

吉 田 薫 草 刈 玄

新潟大学歯学部補綴学第2教室 (主任: 草刈 玄教授)

(昭和51年11月13日受付)

On the Analysis of Three Dimensional Displacements by Double-Exposure
Holographic Interferometry

Kouichi WATANABE, Osamu MIYAKAWA, Hiroki OHNO,
Syuji NAKANO and Nobuhiro SIOKAWA

*Department of Dental Materials and Technology, Niigata University School of Dentistry
(Director: Prof. Nobuhiro Siokawa)*

Kaoru YOSHIDA and Haruka KUSAKARI

*2nd Department of Prosthetic Dentistry, Niigata University School of Dentistry
(Director: Prof. Haruka Kusakari)*

I 緒 言

ホログラフィーとその歯学への応用例の2, 3について概要をさきに紹介したが¹⁾, その後ホログラフィーを応用した研究報告が歯科領域においても見られるようになった²⁾⁻⁸⁾。しかし, そのすべてが定量的な解析を行っているわけではない。光の干渉を応用したホログラフィー干渉法は通常の測定器に比べて感度が非常に良いことや, 任意の形状の試料を無接触で測定できる等の利点を持っているが, その反面いろいろな原因の干渉が混在し, その結果フリンジパターンが複雑になり, 解析することが困難となる場合もある。今回二重露光ホログラフィー干渉法を用いた代表的な変位解析法につき検討し, その中でも特に歯科領域に有効だと思われる2つの解析法を選び実験し, 精

度, 長所, 短所等を考察した。

II 変位解析法

二重露光ホログラフィー干渉法による変位測定はホログラフィーの特徴を有効に利用している1つである。ホログラフィー装置により, ある時間 t_1 における試料からの波面と, 次の時間 t_2 での波面とを同一乾板に二重露光して記録し, 現像したホログラムの再生像は試料表面の t_1, t_2 での光学的状態を再現する。

このように2つの像が同時に再生されることにより, 2回の露光の間に試料の表面が変位していれば, それぞれの状態での像が互いに干渉しあい, その結果明暗の縞が再生像に生じる。この再生像上の各点の干渉縞次数を測定し, 解析することにより, 試料上の各点の変位方向と変位量を求

めることができる。フリンジパターンは原理的には光路の差によって決定されるのであるが、測定条件によって見かけ上いろいろに変化する。フリンジパターンを変化させる因子を列挙すると、

- 1) 光束の種類, すなわち試料を照明する光が平行光か発散光か,
- 2) ミラーや乾板などの光学装置の変位,
- 3) 光路中の空気の屈折率の変化,
- 4) 試料の形態,
- 5) 試料の剛体運動による平行移動や回転,
- 6) 試料各点の不規則な変位, すなわち本測定法の対象となる変位,

等がある。このうち2)と3)は試料の変位ではなく、解析の際にノイズとなるので消去する必要がある。それにはホログラム作製時に静止物体を試料と同時に記録し、再生したとき静止物体の像にフリンジが現われていないことを確かめればよく、比較的容易に避けることができる。以後は2)と3)の因子が入っていないものとして扱う。

これに反して5)の剛体変位と6)の不規則な変位が同時に生じている場合は分離することがそれほど容易ではない。剛体運動だけ考えても、 x , y , z 3方向への平行移動と x , y , z 軸のまわりの回転の計6個の成分があり、しかも通常はこれらが複雑に混在して生じている。さらに4)の試料形態の因子と6)の不規則変位が加わってフリンジパターンが決定されるのであるから、情報量が多すぎて、干渉縞を解析し、各点の変位量を求めることがかなり困難となる。しかし、これまで変位方向とその量を求めるためいろいろな方法が提案されており⁹⁾⁻¹¹⁾、それらはつぎの3つに大別される。

1) 露光時に条件をつける方法 (解析法A)

この方法はホログラム作製時に、試料を平行光で照明し、その照射角度を適当に選ぶことによって試料の平行移動や回転によるフリンジが区別できることを応用している。すなわち平行移動の方向や回転の軸によりフリンジのあらわれかたが異なること、および再生像を撮影する際にピントの合う位置が試料の像とフリンジとで異なることを利用している。この方法は試料が平面と近似でき

る形態で、しかも変位の種類がある程度わかっている場合に有効で、精度がよく解析も容易であるため広く応用されている。しかし、形態の複雑な試料や、あらかじめ変位の種類が予想できない場合には、解析が著しく困難となり、事実上不可能となる。

2) 再生時に条件をつける方法 (解析法B)

これはホログラムの作り方と像の再生方法は上記と同様であるが、像の観察は再生実像面にピンホールを置きその後ろにできる回折像を解析する方法である。ピンホールによってできた回折像のフリンジの密度と、角度により変位成分とその量を計算することができる。Boone¹⁹⁾らによってなされた実験では、近似的に平面とみなせる試料を用いて、比較的大きな変位については精度よく求まっている。しかし、この方法は1点1点の変位を求めるのに、その都度回折像をつくり測定しなければならぬので技術的な繁雑さを伴う。

3) 各点の光路差を計算する方法 (解析法C)

この方法は、光源から試料上の1点を経て乾板に達するまでの光路長とその点のフリンジの次数から変位方向と量を決定するもので、複雑な形態の試料で、しかも変位方向やその量が予想できない場合でも、決められた手順に従って試料上のそれぞれの点について計算することにより変位を解析できる長所がある。

図1で光源Sから発した光が試料上の点Pで反射し、乾板上の点H1に達したとすると、光路長は $\overline{SP} + \overline{PH1}$ となる(以下これを点Pの光路長という)。2回目の露光の時に点PがP'に変位していたとすると、その光路長は $\overline{SP'} + \overline{P'H1}$ となり、点Pの光路長と異なる。試料上すべての点について同様のことがいえるので、このホログラムを再生した場合の像の上には干渉縞が現われ、P点の明暗は上記光路長の差によって定まる。それ故点Pの光路長とフリンジ次数を測定することによって、変位量が計算できる。数式的には、P点の微小変位の x , y , z 成分 U , V , W を未知数とする三元一次連立方程式に帰着されるので、視点すなわち再生像を得るためのホログラム上の点H1, H2, H3の3点に取り、それぞれに対する同

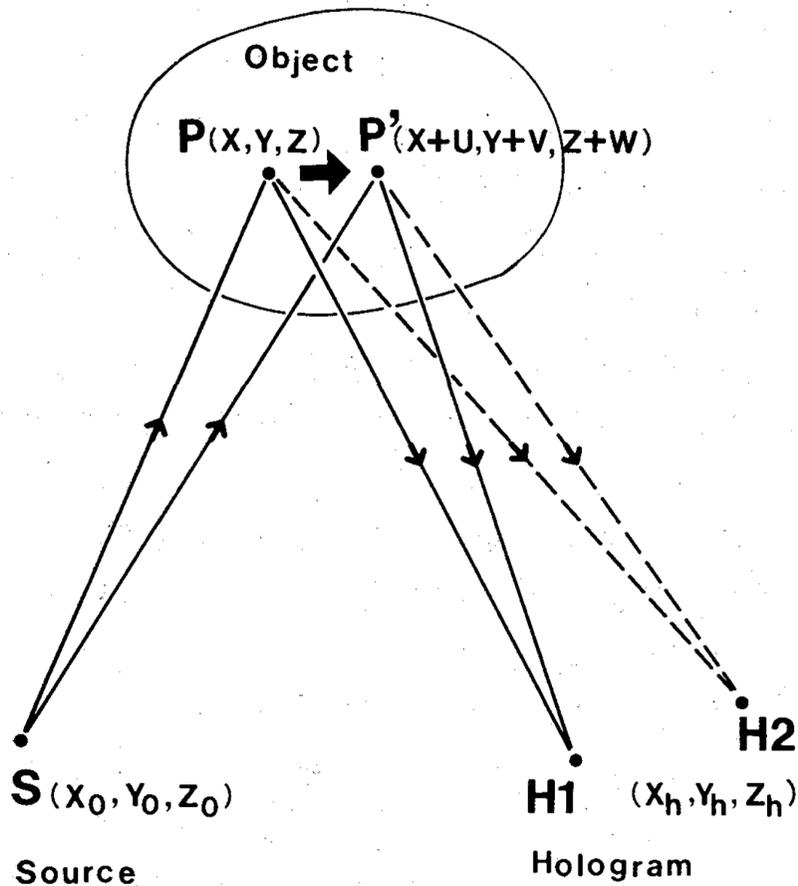


図1 解析法Cの原理を示す模式図

一点Pの光路長とフリンジ次数を求めることにより、3つの独立な一次式を得る。このようにして得られた三元一次連立方程式を解くことにより、 x, y, z 方向の変位量 U, V, W が求まる。

この方法は適用範囲が広く、そのため誤差を小さくするいろいろな改良が試みられているが、原理的には多元一次連立方程式を解くこと、すなわちマトリックスの計算に帰着できる。この連立方程式は $\mathbf{A} \cdot \mathbf{D} = \mathbf{N} \cdot \lambda$ と表わされる。ここで \mathbf{A} は光学系によって決まる係数マトリックス、 \mathbf{D} は求めようとする点の変位マトリックス、 \mathbf{N} はその点でのフリンジ次数マトリックス、 λ は用いた光の波長である。この解は、 $\mathbf{D} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{N} \cdot \lambda$ となる。ただし \mathbf{A}^{-1} は \mathbf{A} の逆マトリックスである。ここで \mathbf{A}, \mathbf{N} を測定するときの誤差が最後の結果にどのような影響を与えるか調べる。今フリンジ次数の読み取り誤差を $\Delta \mathbf{N}$ とし、得られた変位量の誤差を $\Delta \mathbf{D}$ とすると、その間の関係は $\Delta \mathbf{D} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \Delta \mathbf{N} \cdot \lambda$ となる。ここで両辺のノルムを取り、若干の定理を用いると、最終的に得られた結果に含まれている誤差の上限は、 $\|\Delta \mathbf{D}\| \leq \|\mathbf{A}^{-1}\| \cdot \|\Delta \mathbf{N}\| \cdot \lambda$ となる。 $\|\Delta \mathbf{D}\|$ はノルムとしての絶対誤差、すなわち合成された変位量に対する誤差と考えられる。 $\|\mathbf{A}^{-1}\|$ の大きさはミラーや乾板等の光学系の配置によ

て決定され、今回試みた実験の場合ではその値は2~3であった。たとえば $\|\mathbf{A}^{-1}\|$ が2.5の場合はフリンジがそれぞれ%の精度で読めたとしても変位の各成分の誤差は 0.16μ となる。同様に $\|\mathbf{A}\|$ に含まれる誤差 $\|\Delta \mathbf{A}\|$ も最終結果に影響を及ぼすのであるが、 $\|\Delta \mathbf{N}\|$ に比べて小さな影響しか与えないことが若干の計算から導かれる。フリンジ次数を%の精度で読めるのは条件の良い場合であって、さらに $\|\Delta \mathbf{A}\|$ にも多少の誤差が入っていることを考えると、結局各変位成分の誤差として、 $0.3 \sim 0.4 \mu$ の誤差が含まれていると思われる。精度を向上させるためには、 \mathbf{A}, \mathbf{N} を精度よく求めると同時に $\|\mathbf{A}^{-1}\|$ を小さくする必要がある。

III 実験と解析

1) 装置と方法

レーザーは出力30 mWのHe-Neガスレーザー(波長 0.6328μ)を用いた。光学系はその都度若干変えたので個々の実験で述べる。乾板はアグファ社製10E75を使用し、露光時間は1回約0.5秒で、現像液はシートフィルム用アートドールを使用した。ホログラムから再生した虚像または実像を35 mmカメラで撮影し、印画紙上でフリンジ次数を測定した。なお再生する時に像を拡大するための光学系は用いなかった。

2) 解析法A

光源から発した光を平行光にして、試料が平行移動や回転運動をした場合にどのようなフリンジパターンが現われるかを実験した。光の入射角度は視軸と一致させた場合に最も解析が容易となるのであるが、今回は技術的な配慮から斜めに照射した。

写真1にはこの場合の光学系の一部と試料としての読取顕微鏡の配置を示した。写真2と3は読取顕微鏡の鏡筒部を約 180μ 前後方向、すなわち視軸と平行に移動する前後で2重露光して作った1枚のホログラムから再生した虚像である。この場合は同心円状のフリンジパターンでしかもフリンジのできる位置と試料面が同じ面上にないため、虚像撮影でピントを合わせる時、両方同時にピントを合わせることができない。写真2は試料面

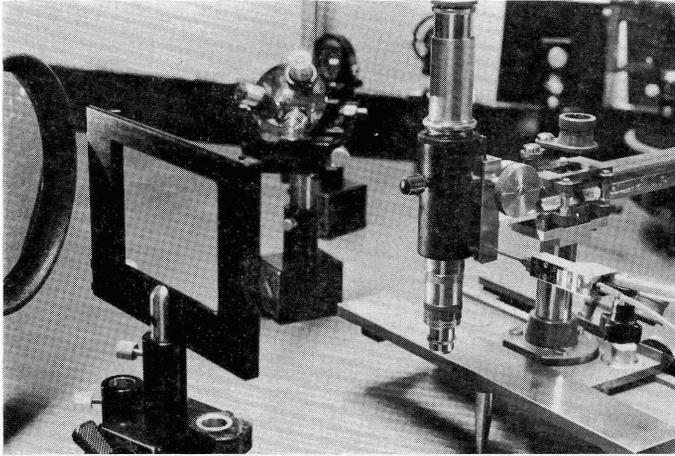


写真 1 読取顕微鏡の鏡筒を視軸方向へ平行移動させる実験

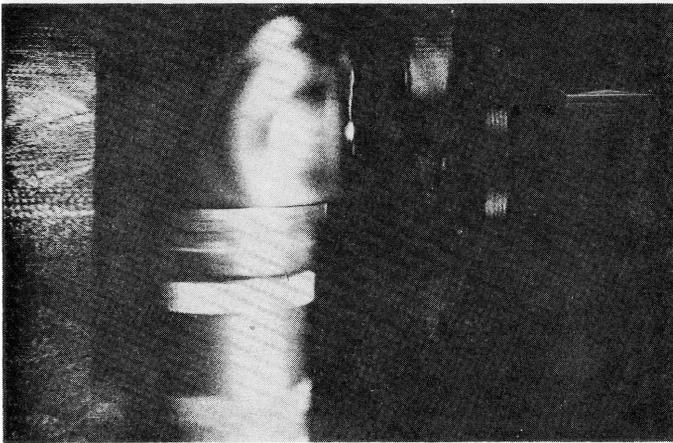


写真 2 写真1の実験で作ったホログラムからの再生像. カメラのピントを鏡筒に合わせて撮影

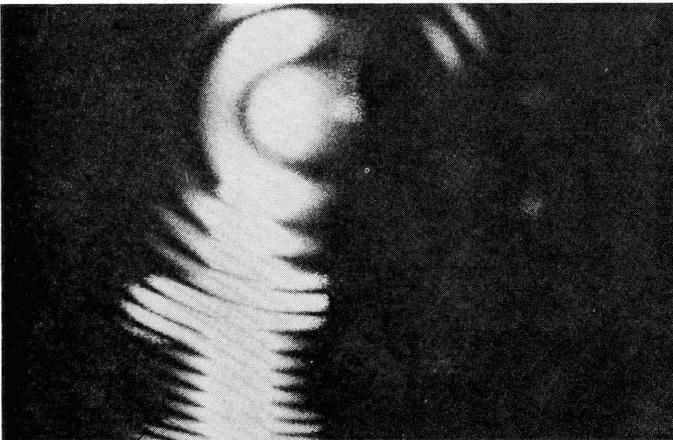


写真 3 写真1の実験で作ったホログラムからの再生像. カメラのピントを無限遠にして撮影

にピントを合わせた場合で、この時フリンジはボケている。ピントを無限遠に合わせた場合が写真3でフリンジは鮮明であるが、試料はボケてしまっている。

またフリンジ間隔は変位量に比較して大きく、多少この方向に平行移動があっても、フリンジが少ししか現われないことがわかる。このように前後方向の平行移動は、フリンジパターンとピントの位置により判定ができる。

写真4と5はハイトゲージを前の例の読取顕微鏡の位置に置き、そのスケール部分を視軸と直角方向（この場合は上下方向）へ約 20μ 平行移動し

た場合の再生虚像で、写真4は試料にピントを合わせた時、写真5は無限遠にピントを合わせたものである。この場合は直線状等間隔のフリンジが現われる。この種の変位も前の例と同様にフリンジパターンとピントの位置によって判定することが可能である。

写真6は鋼尺の曲げ変形について実験した場合で、一端を固定し12cm離れた他端をマイクロメーターを用いて 30μ 視軸方向へ変位させた。これは視軸に垂直な軸のまわりに平面を回転した場合の応用例に相当する。

写真7はホログラムからの再生像で、この場合

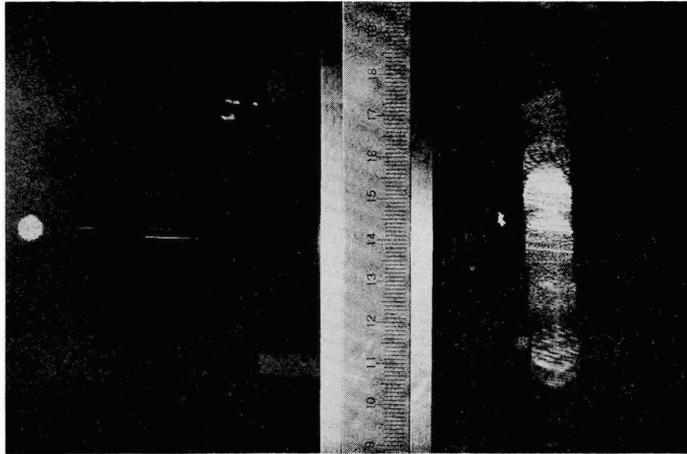


写真4 ハイトゲージのスケールを視軸に直角に平行移動させる実験で作ったホログラムからの再生像。カメラのピントをスケールに合わせて撮影

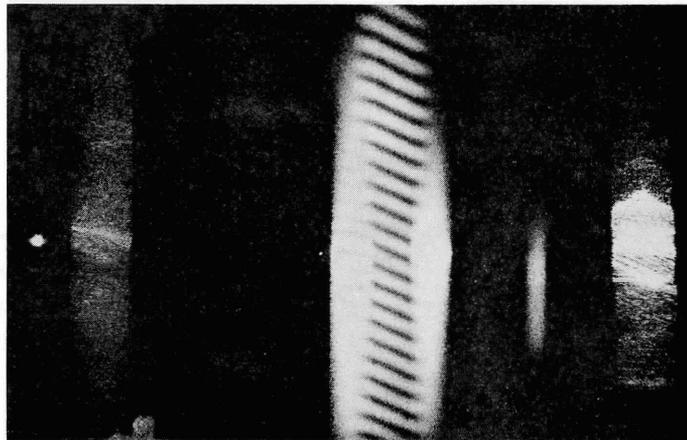


写真5 写真4と同じ。カメラのピントを無限遠にして撮影

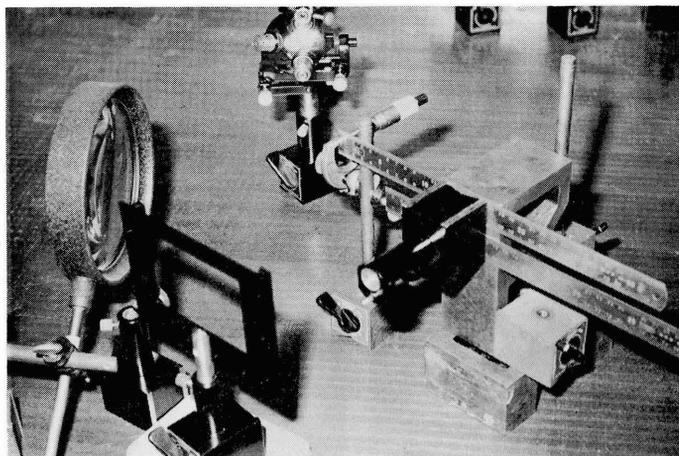


写真6 鋼尺を曲げる実験

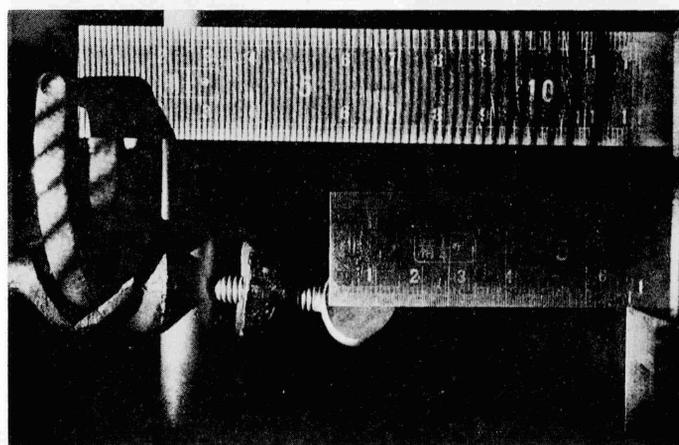


写真7 写真6の実験で作ったホログラムからの再生像. カメラのピントを鋼尺に合わせて撮影

は試料の表面とフリンジの現われる位置が一致している。すなわち試料表面にピントを合わせることによって自動的にフリンジにもピントが合う。下方に別の鋼尺が写っているが、これは光学系の各装置にノイズとなる変位が存在するかどうかをチェックするためのものである。左側にフリンジが斜めに現われている部分があるが、これはマイクロメーターのフレームで、鋼尺を一定量曲げるためにマイクロメーターを操作したことによって動いたものと思われる。

この場合のように視軸方向への変位が試料の各部分で異なっている場合（視軸に垂直な軸のまわりに平面を回転した場合も同じ）には、フリンジ

の現われる位置と試料表面が一致し、かつフリンジの次数により変位量を求めることができる。理論的にはフリンジパターンが1増減するごとに視軸方向への変位量が $\Delta Z = \lambda / (1 + \cos \theta)$ だけ増減することになる。ここで λ は使用している光の波長、 θ は視軸（ここでは試料表面にも垂直）と平行光線のなす角度である。例えば平面状試料に垂直方向から光を照射すれば $\theta = 0^\circ$ となり $\Delta Z = \lambda / 2$ となる。今回の実験では $\theta = 55^\circ$ によってあり、1フリンジあたりの変位量は理論上 $\Delta Z = 0.42 \mu$ である。一方、材料力学の片持ちハリのたわみの公式 $Z = Z_l (3lx^2 - x^3) / 2l^3$ （ここに Z_l は自由端に与えた変位、 l はハリの長さ、 x は固

定端からの距離)を適用して写真7を解析した結果は、1フリッジあたり $\Delta Z = 0.41 \mu \pm 0.02 \mu$ で、変位を与えた位置 l の不正確さとマイクロメーターにも誤差のあることを考えると理論値との一致は非常によく、この方法によれば、誤差を 0.03μ かあるいはそれ以下に押えることも可能である。

本解析法はたとえば視軸方向にのみ単純な不等変位がある場合のような、ある限られた変位に関して精度が非常によく、またフリッジ次数と変位の対応もわかりやすく、容易に解析できるという長所を持っているが、現実には起る変位はこれまで述べた単一な変位が組合わさったものとなるた

め、フリッジパターンが複雑となり、またフリッジの現われる位置は無限度でも試料表面でもなく、その中間の距離になってしまう。そのうえ形態の複雑な試料では、形態の因子も加わってフリッジパターンはさらに複雑になり、事実上解析が不可能となる。

逆にフリッジパターンが同心円状や直線状のように単純な場合は試料全体の平行移動や、回転等の剛体運動によるフリッジかどうか確かめる必要がある。

3) 解析法 C

この方法では光路長を計算しなければならない

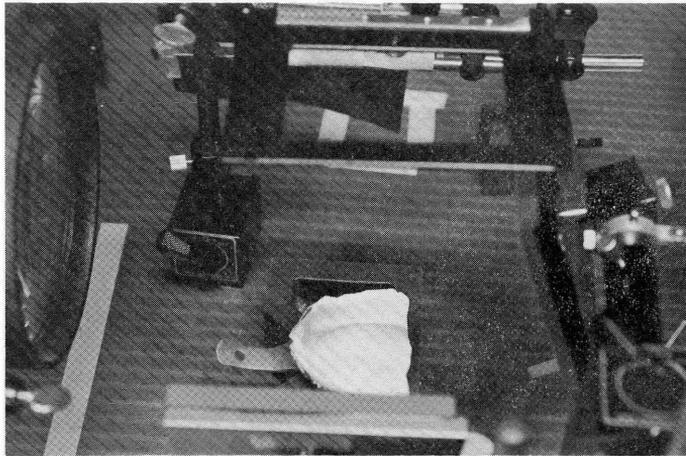


写真8 試料の上方に乾板を水平に置く配置

ことを考慮して照明は点光源とした。また定盤の上面を基準面と考え、乾板はこれと平行で試料の垂直上方にくるように立体的に配置したので、試料は斜め上方から照明するようになっている(写真8)。ホログラム作製後、再生はレーザービームをそのままホログラムに照射し、スクリーン上に再生実像を投影してカメラで撮影した。三元一次連立方程式の計算には新潟大学情報処理センターの電子計算機 HITAC 8350 を用い、Sweep out method で行った。なお、ホログラム上の3視点の選び方が不相当であったり、フリッジ次数の測定が不確かだったために、3つの一次式が完全には独立でなくなり、ときにより大きな誤差が入るおそれがあるので、得られた各変位成分を用

いて、測定した各点での位相差を計算し、測定されたフリッジ次数と大差ないかをチェックした。

まず、硬化後長時間経過したせっこう試料を精度 1μ の電気マイクロメーター検定器に乗せて平行移動した場合について実験した。せっこう試料は正方形板上に半球をのせて一体にした形態のもので、この試料を互に垂直な3方向へそれぞれ 15μ 、 9μ 、 4μ 変位させる前後で二重露光してホログラムを得た。このホログラム上の互いになるべく離れた3視点について再生像を撮影すると、写真9の a, b, c に示すようにいずれも直線状のフリッジパターンが現われ、剛体移動であることが推察される。

写真dは照明光の方向を若干変えて二重露光

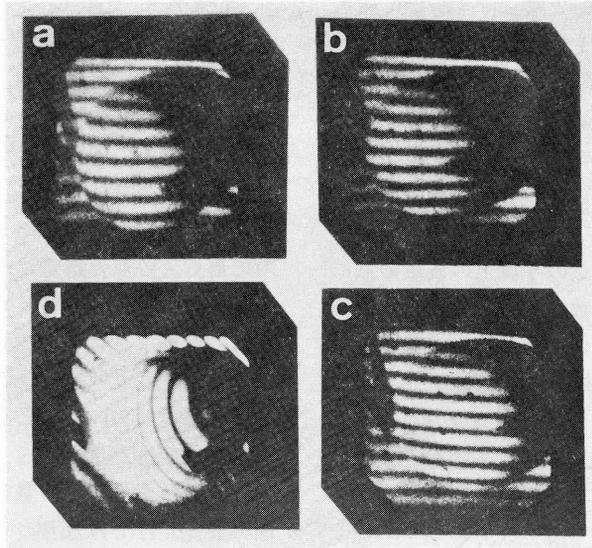


写真 9 a, b, c: 3 視点からの再生像, d: 等高縞による形態の記録

し、そのホログラムから物体の形態を等高縞のある像として記録したもので¹⁾、光路長を計算するとき試料上の点の座標の決定に利用した。解析の結果、3方向の変位はそれぞれ 20μ 、 13μ 、 6μ となり、実際に与えた変位より2~3割大きな値となった。この場合の誤差は、変位を与えるときの誤差を考慮しても大きすぎるので、フリンジ次数

を定める際の0次のフリンジの判定がずれていたためではないかと推定される。このことは各方向の変位量の比がほぼ同じになっていることから正当と考えられる。

つぎに、無歯顎印象の変形を求める実験を行ってみた。ヘビーボディタイプのシリコーン印象材を通法に従って練和して市販の金属トレーに盛

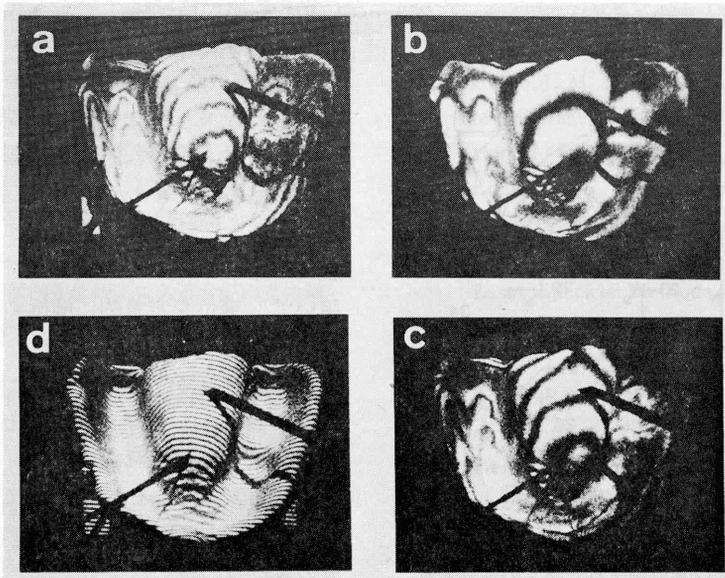


写真 10 a, b, c: 3 視点からの再生像, d: 等高縞による形態の記録

り、これをせっこう模型に圧接して4分後に撤去し、6分間放置した後に1回目の露光をし、40秒間において2回目の露光を行ってホログラムをつかった。写真10のa, b, cは前の場合と同様にこのホログラム上の3視点についての再生像を撮影したものである。dは写真9のdと同様に試料の形態を等高縞記録したもので、基準面を定盤面にとった場合の等高線は、この写真上の多数の点について座標とフリンジ次数を読みとって座標変換し、基準面に垂直な方向の座標が等しい点を結んで、図2のように求めることができる。

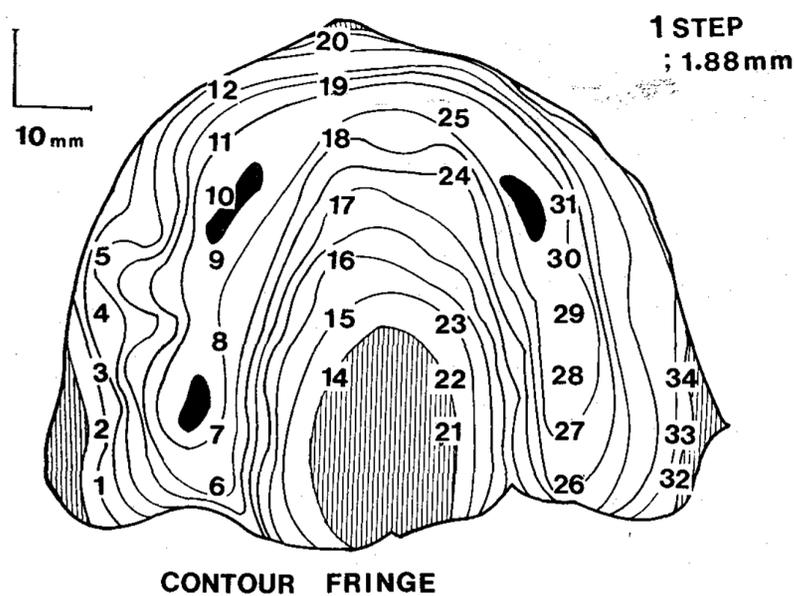


図2 写真10のdから得られた等高線による印象面形態。斜線の部分が最も高い部分、黒い部分が最も低い所。図中の番号は変位を求めた点

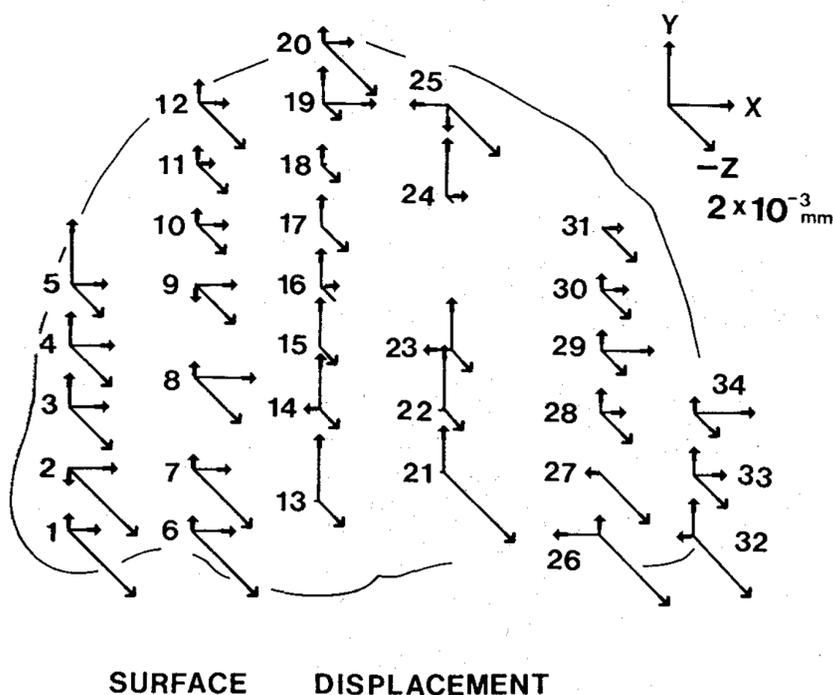


図3 写真10のa, b, cから解析法Cによって求めた各方向の変位量。測定点は図2の番号と対応している

変位の解析は図中の番号をつけた点について行った。写真10のa, b, cにおけるフリンジの次数の決定には、ホログラム上でたとえば写真aの視点から写真bの視点まで連続的に視点を移動させて再生像上の各フリンジの移動を観察し、写真aとbの上のフリンジの対応を確認することによって正確を期した。図3は解析結果をまとめたものである。各点の誤差はそれぞれ異なるが、平均して各変位方向に 0.3μ 前後の誤差が含まれているものと推定される。なお誤差の大きさを考慮して、 0.3μ 以下の変位は無視した。この結果より、中心部はX方向にほとんど変位がないこと、周囲の点は変位が大きく、かつ一様でないことがわかり、変位方向とその量は、印象材の厚さと印象面の形態だけではなく、トレーとの保持関係も重要であると考えられる。なお、トレー内における印象材の変形の詳細については別に報告する予定である。

IV ま と め

ホログラフィー干渉法は変位測定の手段として感度が非常によく、特定の形態の試料に限られないなど、歯科領域での応用に有利な特徴を持っている。しかし、感度のよいことは、得られた最終結果の数値の精度がよいことを必ずしも意味しない。変位方向や試料形態に多くの自由度が存在する長所は、逆にいえば解析が困難になる短所ともなっている。さらに、変位量が数 μ という微小なものを測定するので、他の測定方法では問題とならない程の変位もノイズとして拾ってしまう。また得られた結果を他の測定法で検証することも一般には難しい。それ故ホログラフィー干渉法を用いて、変位を定量的に解析するには次のような諸点に留意する必要がある。

1) 試料の変位を測定するためのホログラムを作製するとき、参照として静止している物体を同時に記録し、得られたフリンジパターンが光学系などから入ってくるノイズでないことを確める。

2) 試料の剛体変位によるフリンジと、各部分の変位量の違いによるフリンジを区別する必要があり、特にフリンジパターンが単純で、規則正

しい場合には注意しなければならない。

3) どの解析法を選ぶかは別として, フリンジの次数は正確に決めなければならない。あらかじめ試料の一部が変位しないことがわかっている場合もあるが, 一般的には, 試料上には静止点がなく基準となる点もない。そのため試料外でしかも確実に静止している物体から試料まで第3の物体で連続させ, 順次フリンジ次数を測定しなければならない。

以上の3点は変位を定量的に求める場合に必要な条件であるが, 解析法Aの場合は, 次の条件が加わる。

4) 試料の形態をできるだけ簡略化し, さらに変位方向, 変位量を予想してから実験する。

5) 再生虚像をカメラで撮影するとき, ピントの合う位置も重要な因子となるので絞りをできるだけ開いて, フリンジが試料表面上にあるか否かを判定し易くする。

文 献

- 1) 渡辺孝一, 吉田 薫, 他2名: ホログラフイーの歯学への応用, 歯界展望, **43**: 236-241, 1974.
- 2) 中沢 靖, 他3名: レーザーホログラフイーによる各種補綴物および歯科材料の非破壊検査, 第1報 各種陶材焼付金属と陶材の窯着状態について, 補綴誌, **18**: 246-249, 1975.
- 3) 中沢 靖, 他6名: ホログラフイーによる各種印象材の性状についての検討(その1) シリコーンラバー印象材における厚みの差およびトレーの保持孔による経時的影響について, 補綴誌, **19**: 299-306, 1975.
- 4) 横山建介: 面内変位測定による合釘の支台歯根に及ぼす影響に関する研究, 補綴誌, **18**: 410-419, 1975.
- 5) 福井寿男, 他2名: 金属焼付陶材試料のホログラフイーによる熱変形の検討, 愛院大歯誌, **12**: 79-83, 1975.
- 6) 小林和英, 他2名: ホログラフイー干渉法の

矯正学への応用—歯の移動に関して, 日矯歯誌, **34**: 206-213, 1975.

- 7) 小林和英, 神原 章: ホログラフイーカメラの矯正学への応用—特に上顎顎外固定法について, 城西大紀要, **4**: 277-283, 1975.
- 8) 吉田 薫: 歯の3次元的動きに関する研究—ホログラフイーによる模型実験—, 補綴誌, **20**: 711-733, 1976.
- 9) 永田 良: ホログラフイーの応力, 歪測定への応用(1), 機械の研究, **26**: 779-784, 1974.
- 10) 辻内順平, 他1名: 粗面を用いるホログラフイー干渉, 応用物理, **36**: 232-239, 1967.
- 11) 辻内順平, 他2名: ホログラフイーによる変形の測定(二重露光法を用いた), 応用物理, **37**: 877-882, 1968.
- 12) 斎藤弘義: ホログラフイーと応用力学, 応用物理, **39**: 241-248, 1970.
- 13) 斎藤弘義: ホログラフイー干渉法による変位の測定と応力・歪の解析, 応力と歪, **1**: 19-26, 1971.
- 14) McDonnell, M.: Shape Deformation in Holograms, Photogrammetric Eng., **39**: 251-254, 1973.
- 15) Sciammarella, C.A. and Gilbert, J.A.: Strain Analysis of a Disk Subjected to Diametral Compression by Means of Holographic Interferometry, Appl. Opt., **12**: 1951-1956, 1973.
- 16) Burch, J. M.: Holographic Measurement of Displacement and Strain—an Introduction, J. Strain Analysis, **9**: 1-3, 1974.
- 17) Ennos, A. E.: Hologram Interferometry, Opt. Acoust. Holography, **1971**: 41-51, 1972.
- 18) Ennos, A. E.: Hologram Interferometry and Laser Speckle Methods; Further Applications, Opt. Acoust. Holography, **1971**: 61-70, 1972.
- 19) Boone, P.M. and De Backer, L.C.: Determination of Three Orthogonal Displacement Components from One Double-Exposure Hologram, Optik, **37**: 61-81, 1973.