



レーザーホログラフィによる地殻変動測定

竹本 修三

京都大学防災研究所 〒611 宇治市五ヶ庄

(1987年2月26日受理)

Measurement of Crustal Deformations Using a Laser Holographic Technique

Shuzo TAKEMOTO

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University,
Gokasho, Uji 611

1. はじめに

世界でも有数の地震・火山国である日本は、現代における地殻の活動がきわめて活発な地域の一つであり、年間 10^{-6} ~ 10^{-7} 程度の割合で、じわじわと地殻内部にひずみ (strain) が蓄積されている。このような地殻ひずみの時間的変化を常時監視することを目的として、伸縮計を用いた連続観測が国内各地の地殻変動観測所 (室) において行なわれている。伸縮計の原理は、岩盤に固定された2本の柱の距離変化、すなわち、この間の相対的な伸縮量を、基準尺と呼ばれる“物差し”をあてて測定するという簡単なものであるが、測定の対象となる地殻ひずみ変化そのものがきわめて微小な量であることから、測定に際しては高精度・高感度の測定技術が要求される。また、測定に及ぼす基準尺自体の熱的変形の影響を避けるために、基準尺には石英管、スーパーインヴァール棒等の熱膨張係数のきわめて小さい材質が用いられている。他方、このような基準尺を必要としないタイプの伸縮計として、干渉計方式のレーザー伸縮計もある。なお、これら各種伸縮計の詳細については、Agnewの最近の論文¹⁾を参照されたい。

伸縮計を用いた地殻変動観測は、気温変化等の気象的擾乱を避けるために、一般に地下の観測坑道内で行なわれている。これにより、地殻内部のひずみエネルギーの蓄積に伴う長期的なひずみ変化のほか、月および太陽の引力によって惹き起される地殻の潮汐ひずみ変化等の観測を行なっている。海岸で潮の干満変化が見られるよう

に、固い地殻もわずかではあるが潮汐変化を示す。この潮汐ひずみ変化の精密観測は、地球内部の構造を調べる手がかりとなるばかりでなく、長期にわたる連続観測からその振幅に異常が見いだせれば、地震予知につながる可能性があると考えられている。ところで、日本で観測される地殻の潮汐ひずみの振幅は 10^{-8} の桁であるが、これは 100 m の長さの伸縮計を考えた場合に、その両端の相対変位が $1 \mu\text{m}$ に相当する変化 ($1 \mu\text{m}/100 \text{m} = 10^{-6} \text{m}/10^2 \text{m} = 10^{-8}$ (strain)) である。

地殻変動観測は上記のような微小ひずみ変化を対象とするものであるが、最近、このような微小ひずみの計測にレーザーホログラフィを用いた干渉計測法を積極的に応用する研究が進められている^{2,3)}。すなわち、地殻変動観測用の地下坑道内に大型ホログラフィ装置を設置し、坑道壁面の 1~2 m 四方の範囲のホログラムをつくり、そこにあらわれる干渉縞の動きを実時間法で測定することから、坑道壁面の微小ひずみ変化の空間的パターンを直接求めようという考えである。

このほか、レーザーホログラフィの地球物理学分野への応用としては、室内実験で岩石に圧力を加えた場合の破壊前後の変形パターンをホログラフィ干渉法で測定し、破壊現象の解明から地震の発生機構を調べようという研究⁴⁻⁷⁾や、野外実験で地中に掘削されたボアホールの奥の壁面変形を、ホログラフィ干渉法で測定し、その地域に働いている地殻応力の大きさと方向を求めようという研究⁸⁾などが行なわれている。

本稿では筆者らの研究を主体に、レーザーホログラフ

ィによる地殻変動観測の具体的測定技術と研究成果の一部を紹介する。また、本方法の現状での問題点と改善策についても、若干言及している。

2. ホログラフィ干渉計測法の特徴

単色性に優れ、可干渉距離の長いレーザー光を光源として用いたホログラフィ干渉計測法は、3次元の物体のわずかな形状変化をレーザー光の1/2波長を基本単位として定量的に検出することができる。さらに、この方法は被写体に非接触でひずみ計測を行ないうることや、被写体表面が粗面のままでさしつかえないことも利点である。このような特徴を生かして、ホログラフィの技術は応用力学の分野で弾性実験⁹⁾や振動解析^{10,11)}などに利用されているほか、ゴムタイヤの微細な瑕疵検査など、一部の産業分野で製品の非破壊検査用装置として実用化されている¹²⁾。

ホログラフィ干渉法を地殻変動観測に用いる場合の利点としては、次のようなことが考えられる。まず第一に、ホログラフィ干渉法は、従来からの伸縮計と違って基準尺を必要とせず、非接触で微小ひずみの測定ができることである。このことは基準尺自体の変形や、基準尺と支持台との間の摩擦等の問題を考慮しなくてもすむ。

次に、ホログラフィ干渉法のもう一つの利点は、空間的なひずみ変化のパターンを一度に検出できることである。従来からの伸縮計は2点間の相対変位を求めるものであるから、1成分の伸縮計で一つの方向のひずみ成分しか測定できない。ところで、地殻内部の3次元的な弾性ひずみの状態を完全にあらわすためには、6個の独立なひずみ成分 (e_{xx} , e_{yy} , e_{zz} , e_{xy} , e_{yz} , e_{zx}) を決定する必要がある。2次元に話を限ったとしても、3個の独立なひずみ成分 (e_{xx} , e_{yy} , e_{xy}) を求めなければならない。そこで、通常行なわれている伸縮計による観測では、異なる方向に掘られた3本の水平坑道の中にそれぞれ1成分ずつの伸縮計を配置し、合わせて3成分の伸縮計で得られる観測データを重ね合わせるにより三つの未知数を求め、水平面内の2次元的なひずみ変化量を決定している。これに対してホログラフィ干渉法では、干渉縞の移動を調べるにより、空間的なひずみ変化のパターンを一度に検出することができる。

3. 観測方法と測定条件

京都大学防災研究所・天ヶ瀬地殻変動観測室（京都府宇治市志津川仙郷谷）に地殻変動観測を目的とするレーザーホログラフィ装置が設置されたのは1984年のこと

である。ここで行なわれているホログラフィを用いた地殻変動観測の具体的な方法と測定条件について、次に説明する。

ホログラフィ干渉法で微小変位の計測を行なう場合、測定場所の地面振動や気温変化を極力避ける必要があるが、以下に述べるように、地殻変動観測用の地下坑道の中にはホログラフィの実験を行なうのに適した場所であり、ホログラムを作成するうえで、地面振動や温度変化による光路の屈折率変化の影響はほとんど問題にならない。天ヶ瀬観測室の場合、周期0.1~10sの範囲の雑微動ノイズは2 μ kine以下であり、坑内の温度変化は年間を通じて0.1°C以下である。しかし、地下の坑道内であるから、湿度は常に100%に近い状態にある。湿度は高くともその変動は少ないから、屈折率変化への影響は無視してよいと考えられる。ただし、このような環境下でレーザー光源や計測器が正常に作動するための防護策は必要である。もう一つの気象要素として気圧変化があるが、坑道内といえども気圧は地表におけるのと同様に变化する。短時間のホログラフィの実験なら、気圧の経時変化はまず問題にならないが、実時間法で長期間のひずみ変化を測定しようとする場合には、気圧の変動に伴う光路の屈折率変化がノイズとなりうる。これの対策として、ホログラフィの被写体への光路と参照光の光路とがなるべく近いところを通るように光学系を配置して、気圧の絶対値は大きく変化しても、光路間での相対的な気圧変化は相殺されるようにした。

天ヶ瀬地殻変動観測室の観測坑道は旧発電所用の導水トンネルを改修したものである。全長1,830m、高さ・幅ともに約6mの馬蹄型をした観測坑道の、入口から400~500mの区間に伸縮計や傾斜計などの観測計器を

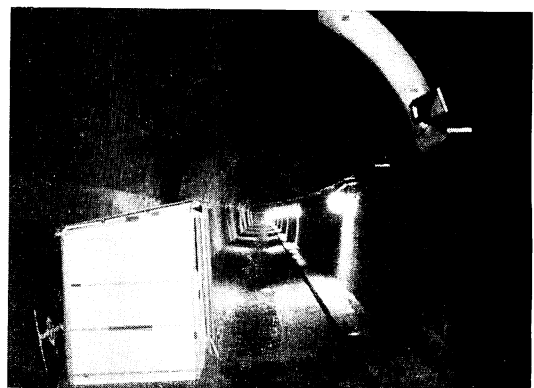


図1 天ヶ瀬観測室坑道内部の写真
ホログラフィ装置を設置した位置（320m奥）より坑道入口方向を見たもの。

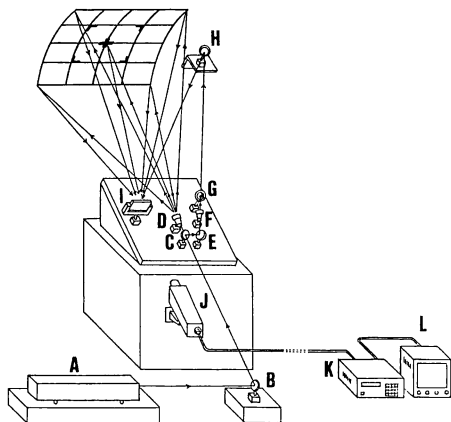


図2 レーザーホログラフィ記録装置
 A: He-Ne ガスレーザー (出力 50 mW), B: 光路変換器, C: ビームスプリッター, D: ビームエキスパンダー, E: 光路変換器, F: ビームエキスパンダー, G: 光減衰器, H: 参照ミラー, I: 乾板ホルダー, J: 低照度型テレビカメラ, K: 長時間ビデオレコーダー, L: モニターテレビ

集中的に配置して、1967 年以来連続観測を行なっている。この観測坑道の入口から約 320 m 奥に、レーザーホログラフィ装置が設置されている。図1に坑道内部の写真を示してあるが、図の右上方にホログラフィの被写体となる白ペンキを吹き付けた約 2m 四方の坑道壁面と、参照ミラーの収納ボックスが見えている。また、図の左下に見える「小屋」の中にホログラフィ装置の主要部分が設置されている。

図2は、実際のホログラフィ装置の配置を示したものである。光源としては出力 50 mW の He-Ne ガスレーザーを使用し、坑道に沿う方向に置かれたレーザー光源 (A) から出た光を光路変換器 (B) により坑道と直交する斜め 45° 上方の方向に変えた後、透明ガラス板を用いたビームスプリッター (C) で 2 方向に分割する。まず、ビームスプリッターを透過した光はビームエキスパンダー (D) を用いて光束を拡大した後、約 5 m 離れた坑道壁面の約 2 m 四方に向けて照射される。一方、ビームスプリッターの表面で反射された光は光路変換器 (E)、ビ

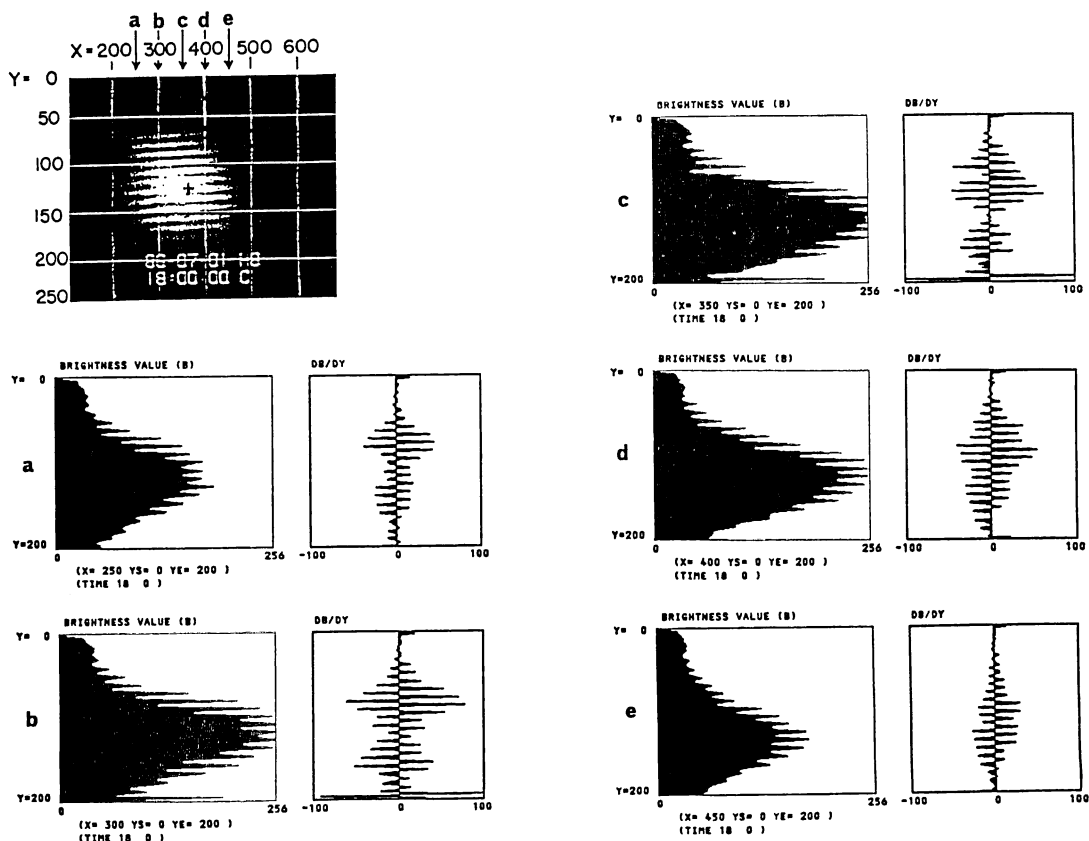


図3 干渉縞パターンの再生画像(左上), および Y 軸方向に沿う各画素 ($Y=0\sim 200$) の明暗分布とその微分値
 a: $X=250$, b: $X=300$, c: $X=350$, d: $X=400$, e: $X=450$

ームエキスパンダー(F)、光減衰器(G)を通った後、参照ミラー(H)に向けて照射される。壁面からの散乱光の一部と参照ミラーからの反射光を(C~G)の光学系と同じ定盤の上に置かれた乾板ホルダー(I)内の写真乾板(アグファゲパルト, 10E75)の上に重ね合わせ、1~3 minの露光時間をかけてホログラムを撮影する。この際、物体光と参照光との明るさの比率が1:3程度になるように参照光用の光減衰器を調整しておく。

現像済の乾板を元の位置にもどし、光減衰器を再調整し、参照光の明るさが最大になるようにした後、乾板を通して被写体である坑道壁面を見ると、乾板上の壁面ホログラム像と現実の壁面とが重なって見える。この際、乾板の位置を撮影時よりわずかに数 μm 程度傾けると、乾板上に多数の干涉縞が現われる。この干涉縞の経時変化を低照度型テレビカメラ(J)を用いて長時間ビデオレコーダー(K)に記録する。なお、(L)はモニター用の受像機である。

得られたビデオテープを持ち帰り、録画時に用いたのと同じ型のビデオレコーダーで再生し、さらに画像処理装置およびパーソナルコンピュータを用いて解析を行なう。再生画像上で、壁面に描かれた基準マークを不動点として、これに対する干涉縞の動きを追跡すれば、地殻応力変化に伴う坑道壁面の微小変形を、レーザー光の1/2波長(0.3 μm)を単位として定量的に検出することができる。

4. 観測結果の処理および解析

解析にあたっては、ビデオテープの再生画面を一定の時間間隔(1 min, 10 min, 1 h等)で静止させ、この信号を画像処理装置に取り込む。使用している画像処理装置は縦・横の画素数が512 \times 768、階調度8ビットのものであるが、長時間ビデオレコーダーとのマッチングの関係で、縦方向の画素数は半分の256点しか使えない。図3に解析結果の一例を示してある。図の左上は画像処理装置に取り込んだビデオ画面にスケールを入れて、テレビプリンターに出力させたものである。図の中央に坑道壁面に描いた基準マーク(+印)が見えているが、これを中心に10本以上の干涉縞が識別できる。いま、横軸をX、縦軸をYとしたとき、Y軸に沿う方向、すなわち、干涉縞を横切る方向の画面の明暗分布を見てみよう。図3(a)~(e)は、Xを250から50ずつ増やしていったときの、Yが0~200範囲のラインに沿う各点の明暗分布とその微分値を示したものである。明暗分布は図の左端が最も暗く、右へ進むほど明るい状態をあらわ

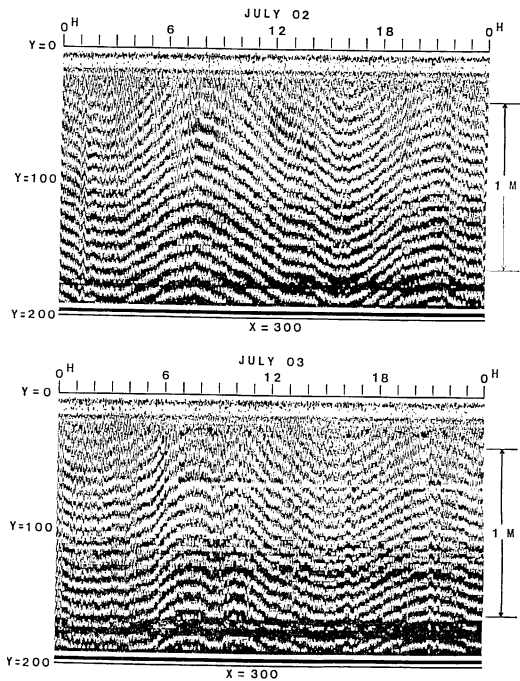


図4 図3(b), $X=300$ の場合の $Y=0\sim 200$ の範囲の干涉縞の時間変化(1986年7月2日00時から7月4日00時まで)

している。画面の中央に近い、 $X=350$ の場合(c)の中央付近が最も明るく、それより上下、あるいは左右の端に近づくほど、画面が暗くなっているのがわかる。これらの明暗分布のY方向の微分値をとると干涉縞の明暗がいわゆる強調される。そこで、これをさらに単純化して微分値が正の場合を1、負かゼロの場合を0と2値化して、パーソナルコンピュータのフロッピーディスクに記録している。

図4は、7月2日および3日に記録したホログラム再生像より、 $X=300$, $Y=0\sim 200$ のデータを1 minごとにフロッピーディスクに取り込んだものの48時間分をプリンターに出力させたものである。図を見ると、縞模様が規則正しく変化していることがわかる。図4の7月2日のデータに着目すると、まず、2~3時の間に最初の谷があり、7~8時の間に最初の山がある。それを過ぎると16時頃に第2の谷があり、21時過ぎに再び山を迎える。この1日2回の山・谷の変化は、地殻の潮汐ひずみ変化を示すものである。この干涉縞の時間変化を、同じ観測坑道内に設置されているレーザー伸縮計の記録と比較したのが図5である。図5の上側(a)は、図4の干涉縞記録の上から数えて4, 9, 14番目の縞模様の48時間にわたる変化を示したものであり、図5の

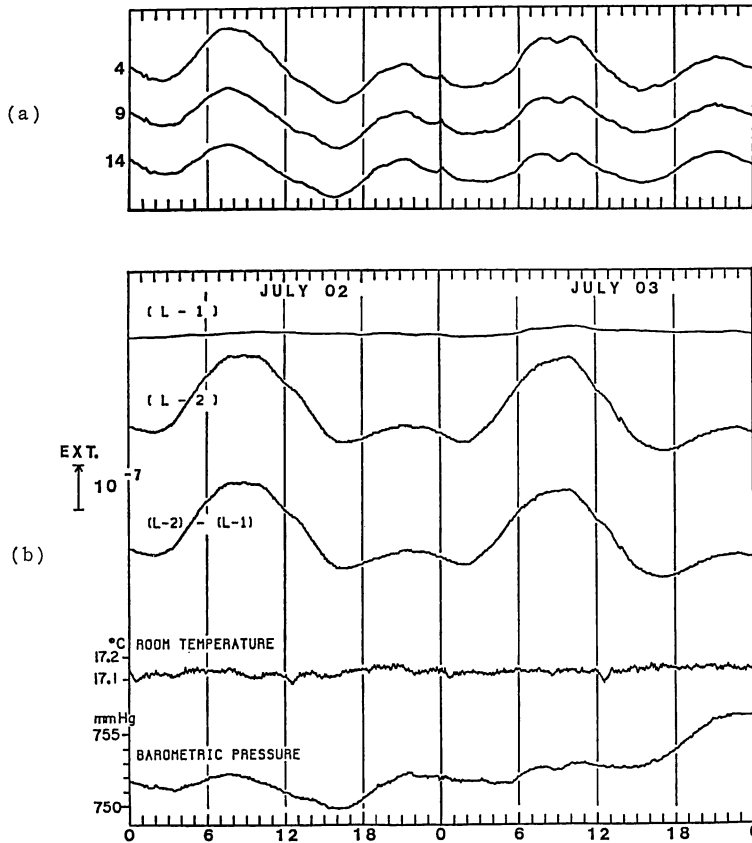


図5 干渉縞の時間変化(a)とレーザー伸縮計記録(b)との比較
 (b)の(L-1)は直線状の長大な観測坑道に沿う方向の成分,(L-2)は坑道の軸と直交する方向の成分のレーザー伸縮計記録,また,(L-2)-(L-1)はこれら2成分の伸縮計記録の差を示す.坑内で測定されている気温・気圧変化も示してある.

下側(b)は、坑道に沿う方向(L-1)とこれに直交する方向(L-2)の2成分のレーザー伸縮計記録、および両者の差(L-2)-(L-1)を坑内気温・気圧変化と共に示したものである。中空の坑道の断面方向のひずみ変化は、“cavity effect”によって坑道に沿う方向のひずみ変化よりも大幅に増幅されるが、坑道断面の水平方向に設置されている(L-2)成分のひずみ変化は、ホログラフィ干渉法で得られた干渉縞の変化ときわめてよく対応している。このことから、ホログラフィ干渉法によって地殻の潮汐ひずみ変化を十分検出しようことが明らかになった。

図4に示した干渉縞の時間的変化をさらに詳しく見ると、干渉縞が全体として上下に移動しているばかりでなく、その間隔も変化している。すなわち、7月2日の7時過ぎの山では、図の範囲で15本の明暗の縞が数えられるのに対して、16時頃では19本に増えている。これは、坑道壁面全体としての前後の動きと、壁面の相対的

な傾斜変化を示すものと考えられる。図6に参照光の光路長が不変とした場合の坑道壁面の動きと干渉縞の移動

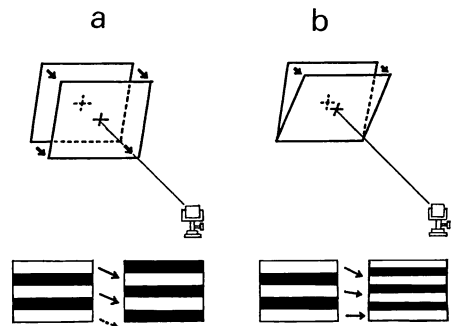


図6 坑道壁面の変動と干渉縞パターンの変化との関係
 (a)壁面全体が一樣にせり出すと干渉縞は平行移動する,(b)壁面が傾くと干渉縞の間隔が変り、縞の本数が増減する。

との関係を示してある。同図左の(a)の場合のように、壁面全体が均一にせり出したとすると、干渉縞の間隔は変わらず、縞模様は上下に平行移動する。これに対して、同図右の(b)のように壁面が傾斜したとすると、干渉縞の間隔に変化があらわれる。しかし、実際の天ヶ瀬観測室のシステムでは、参照ミラーも被写体である壁面と同じ壁面上に取り付けられているので、この場合より若干複雑になるが、いずれにせよ、坑道壁面の空間的ひずみ変化のパターンをこの方法から求めることができる。

5. 現状の問題点と今後の展望

以上、述べてきたようにホログラフィ干渉法を地殻変動観測に利用しうることが明らかになった。しかし、これを長期間にわたる連続観測に使用するためには、なおいくつかの解決しなければならない問題点がある。

現在この方法の最大の難点は、ホログラム乾板の取扱いにあると言える。撮影を済ませた乾板を元の位置にもどして微妙な調整を行ない、干渉縞の向きと間隔を望みどおりにするにはかなりの手間を必要とするが、このように苦労してつくった干渉縞も、乾板の吸湿その他の理由から時間の経過とともにしだいに薄くなる。このため隣り合う干渉縞を何とか識別できるのは1週間が限度となっている。そこで現在は1週間ごとに新しい乾板をつくり直しているが、これはなかなか面倒な作業である。この点を解決するために、ESPI (electronic speckle pattern interferometry) 法¹³⁻¹⁶⁾の利用が考えられる。この方法によれば、ホログラフィの記録媒体として写真乾板を使用せずに、テレビカメラを通じて計算機のメモリーにいったん取り込んだ過去の画像データと、現在見えている壁面からの反射波とのデータを計算機の中で重ね合わせて干渉縞のパターンをつくるのが可能となるから、ホログラム乾板を作成するわずらわしさから解放される。

次にテレビカメラの撮像管の経時変化による性能劣下や、焼付・残像の問題がある。この点に関しては、最近固体撮像素子 (CCD) を用いたテレビカメラの感度が良くなり、最低被写体照度が 1lx 程度のもので市販されるようになってきたので、将来これがわれわれの目的に使えるようになれば、経時変化や焼付という点ではさ

らに改善されると考えられる。

また、ホログラフィの方法は多面的な多くの情報を一度に得られるという利点があるが、これは反面、それだけデータ量が増えるということである。長期にわたる地殻変動の観測では、保存すべきデータの選択や、その解析方法について、さらに検討が必要である。

これらの点が解決されれば、ホログラフィの方法は地殻変動や地震予知の研究にさらに貢献できるものと考えられる。

文 献

- 1) D.C. Agnew: "Strainmeters and tiltmeters," Rev. Geophys., **24** (1986) 579-624.
- 2) 竹本修三: "レーザーホログラフィを用いた地殻変動観測", レーザー研究, **14** (1986) 48-55.
- 3) S. Takemoto: "Application of laser holographic techniques to investigate crustal deformations," Nature, **322** (1986) 49-51.
- 4) H. Spetzler, C. H. Scholz and C. J. Lu: "Strain and creep measurements on rocks by holographic interferometry," Pure Appl. Geophys., **112** (1974) 571-581.
- 5) H. Spetzler and R. J. Martin III: "Correlation of strain and velocity during dilatancy," Nature, **252** (1974) 30-31.
- 6) G. Sobolev, H. Spetzler and B. Salov: "Precursors to failure in rocks while undergoing anelastic deformations," J. Geophys. Res., **83 B** (1978) 1775-1784.
- 7) G. A. Sobolev: "Precursors of an earthquake and conditions of a laboratory experiment," Izv. Acad. Sci. USSR Earth Phys., **16**, No. 12 (1980) 30-43.
- 8) J. D. Bass, D. Schmitt and T. J. Ahrens: "Holographic *in situ* stress measurements," Geophys. J. R. Astron. Soc., **85** (1986) 13-41.
- 9) 齊藤弘義: "ホログラフィと応用力学", 応用物理, **39** (1970) 241-248.
- 10) 中島俊典: "ホログラフィによる振動解析", 応用物理, **41** (1972) 560-573.
- 11) 齊藤弘義: "光干渉計測とその周辺", 理化学研究所報告, **61** (1985) 225-238.
- 12) 長谷部嘉彦: "ホログラフィのゴム工業への応用", 映像情報, **1**, No. 8 (1969) 16-19.
- 13) A. Macovski, S. D. Ramsey and L. F. Schaefer: "Time-lapse interferometry and contouring using television systems," Appl. Opt., **10** (1971) 2722-2727.
- 14) O. Løkkberg: "Electronic speckle pattern interferometry," Phys. Technol., **11** (1980) 16-22.
- 15) 中島俊典, 齊藤弘義: "テレビ系を用いたスペックル干渉法", 光学, **8** (1979) 91-94.
- 16) 中橋末三: "電子的スペックル干渉計", 映像情報 (I), **13** (1981) 81-84.