

岩倉観測室におけるレーザーホログラフィを用いた 地殻ひずみの観測

竹本 修三・山田 勝

Crustal Strain Measurements Using a Laser Holographic Method
at the Iwakura Observatory

By Shuzo TAKEMOTO and Masaru YAMADA

Synopsis

The technique of laser holographic interferometry can detect two- or three-dimensional small displacements in terms of the wavelength of laser light, without contacting the object. We developed a portable holographic recording system consisting of a 30 mW He-Ne gas laser and associated optical elements. The system was installed in a tunnel having a length of 30 m at Iwakura, Kyoto in 1988. Using the system, small deformations of the tunnel due to tidal forces were successfully observed. The results are consistent with tidal strains observed with extensometers which were installed in the same tunnel.

1. はじめに

ホログラフィ干渉計測法は、3次元の物体の微小な形状変化をレーザー光の1/2波長を単位として定量的に検出することができる優れた計測技術である。さらに、被写体に非接触でひずみ変化の計測を行ない得ることや、被写体の表面が粗のままでも差支えないことなどもこの方法の利点である。われわれは、この技術に応用して地殻ひずみの多次元的なパターン変化を精度良く測定するための研究を1984年以来進めている。すなわち、雑微動ノイズが極めて小さく、温度変化もほとんどない地下観測坑道内に高出力のレーザー発振器を用いた大型ホログラフィ記録装置を設置して、坑道壁面の1~2 m四方の範囲のホログラム像を写真乾板に記録し、この乾板を通して見えるホログラム再生像と現実に見えている坑道壁面からの反射波との重ね合わせによって生じる干渉じまの時間的変化を実時間法で測定することにより、観測坑道の微小ひずみ変化を直接求めようというのがその基本的な考え方である。

この考えに基づいて、出力50 mWのヘリウム・ネオン・ガスレーザーを光源とする地殻変動観測用ホログラフィ記録装置を開発し、これを用いた地殻ひずみの観測を天ヶ瀬地殻変動観測室（京都府宇治市）において行なっている^{1),2),3)}。さらにその後、近畿各地の地殻変動観測室における移動観測を目的として、やや小型の出力30 mWのヘリウム・ネオン・ガスレーザーを用いたホログラフィ記録装置を製作した。この装置を用いて1988年度に岩倉観測室において行なった約4か月間の観測結果を報告する。

2. 観測装置

岩倉地殻変動観測室（京都市左京区岩倉長谷町）においては、Fig. 1(a)に示すように、3重の扉で仕切ら

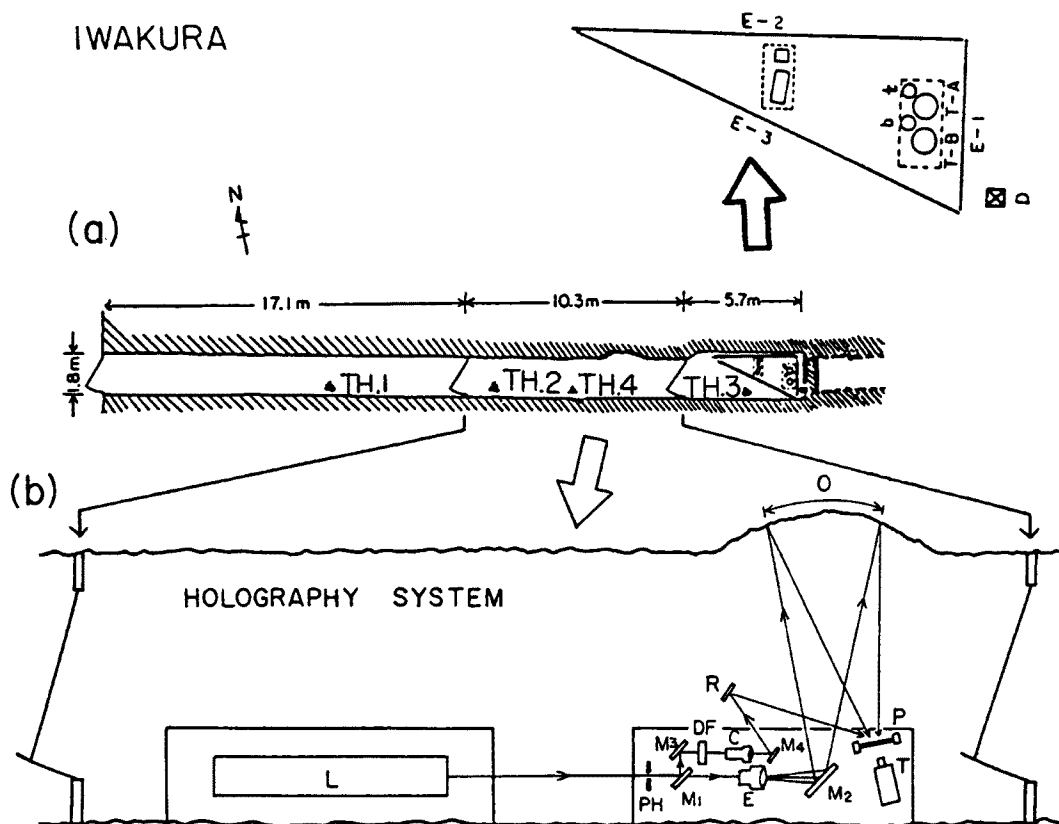


Fig. 1 (a): Arrangement of instruments in the tunnel at Iwakura. E-1~3; super-invar bar extensometers, T-A, B; horizontal pendulum type tiltmeters, b; barometer, t; bimetallic thermometer, TH. 1~TH. 4; quartz thermometers.
 (b): Laser holography system. L; 30 mW He-Ne laser, PH; pin-hole, M₁~M₄; mirrors, E; beam-expander, DF; neutral-density filter, C; collimator, R; reference mirror, P; photographic-plate and plate holder, T; video camera, O; object wall.

れた約 30 m の長さの観測坑道の最奥部に 3 成分のローラー型スーパー・インヴァール棒伸縮計と 2 成分の水平振り型傾斜計を設置して、1965 年以来、光学記録方式による地殻変動連続観測を続けている⁴⁾。1988 年 7 月末に、この観測室の坑道入口から約 20 m 奥の、2 番目と 3 番目の扉の間のスペースにホログラフィ記録装置を設置し、同年 11 月までの約 4 カ月間にわたって観測を実施した。坑道壁面は素掘りのままであるが、ホログラフィの被写体となる直径約 1 m の範囲の壁面部分については、中央部をやや深く掘りこみ、被写体上の各点の光路差が 20 cm 以内に納まるように整形した上、反射率を良くするために白色ペンキを吹き付けてある。

ホログラフィ装置の配置を Fig. 1(b) 及び Fig. 2 に示してある。坑道に沿って置かれた出力 30 mW のヘリウム・ネオン・ガスレーザー (L) から出た光は、ピン・ホール (PH) を通った後、ビーム・スプリッター (M₁) により 2 方向に分割される。M₁ を透過した光は、ビーム・エキスパンダー (E) によって光束が拡大され、さらに全反射ミラー (M₂) によって向きを変えられ、約 1.2 m 離れた被写体壁面 (O) に向けて照射される。一方、M₁ の表面で反射した光は、全反射ミラー (M₃)、光減衰器 (DF)、コリメーター (C)、全反射ミラー (M₄) を経て、参照ミラー (R) に向けて照射される。この 2 つの光波、すなわち、被写体壁面からの反射波と R からの反射波とは、乾板ホルダー (P) 内の写真乾板の上に重ね合わされ、1~3 分の露光

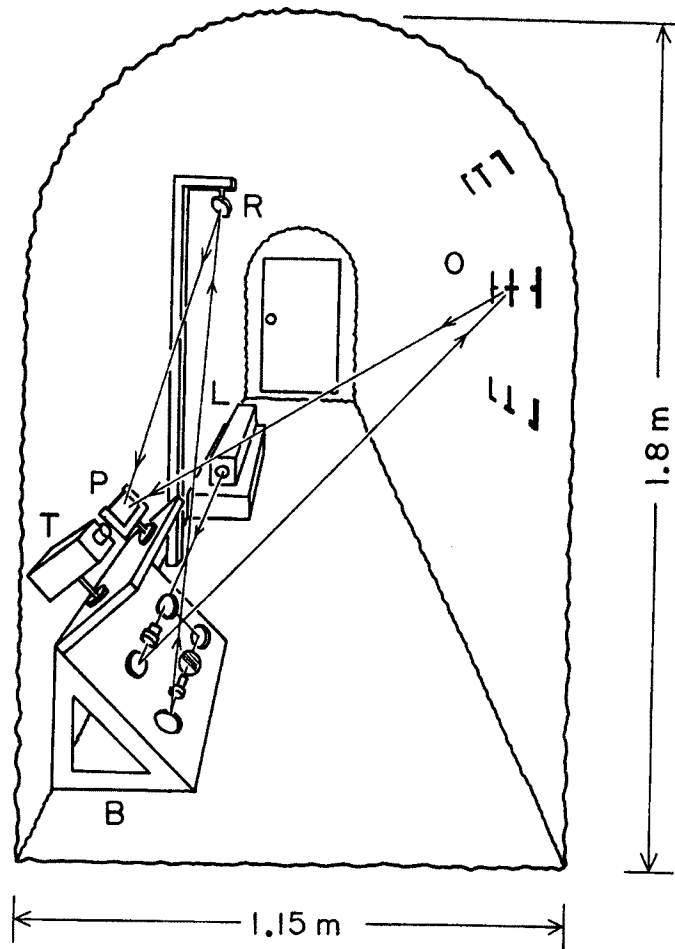


Fig. 2 Schematic view of the holographic recording system at Iwakura.

時間をかけてホログラムが撮影される。撮影済の乾板を現像・定着・水洗処理の後、撮影時と同じ位置に戻し、この乾板を通して被写体壁面を見ると、乾板上の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傾けると、ホログラム乾板上に多数の干渉じまが現われる。この干渉じまパターンの経時変化をニュービコン・テレビカメラ(T) (松下電器産業：WV-1550型)とタイムラプス・ビデオレコーダー (松下電器産業：NV-8050型)によりビデオテープに記録する。このビデオレコーダーは、1巻の標準ビデオテープ(120分用)に2秒毎のビデオ信号を10日間にわたって記録することができるが、テープの交換は1週間毎に行なった。また、この際にホログラム乾板も更新した。

記録さ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、画像処理装置及びパーソナルコンピュータを用いて解析を行なう。

3. 観測結果

得られた干渉じまパターンの例を Fig. 3(a)に示してある。この図は、再生の際に画像処理装置に取り込んだビデオ画面をスケールとともにテレビ・プリンターに出力させたものである。スケールは、横軸(X軸)の200~600、および縦軸(Y軸)の0~200の範囲が被写体壁面上の1m×1mの領域に相当する。図の中央

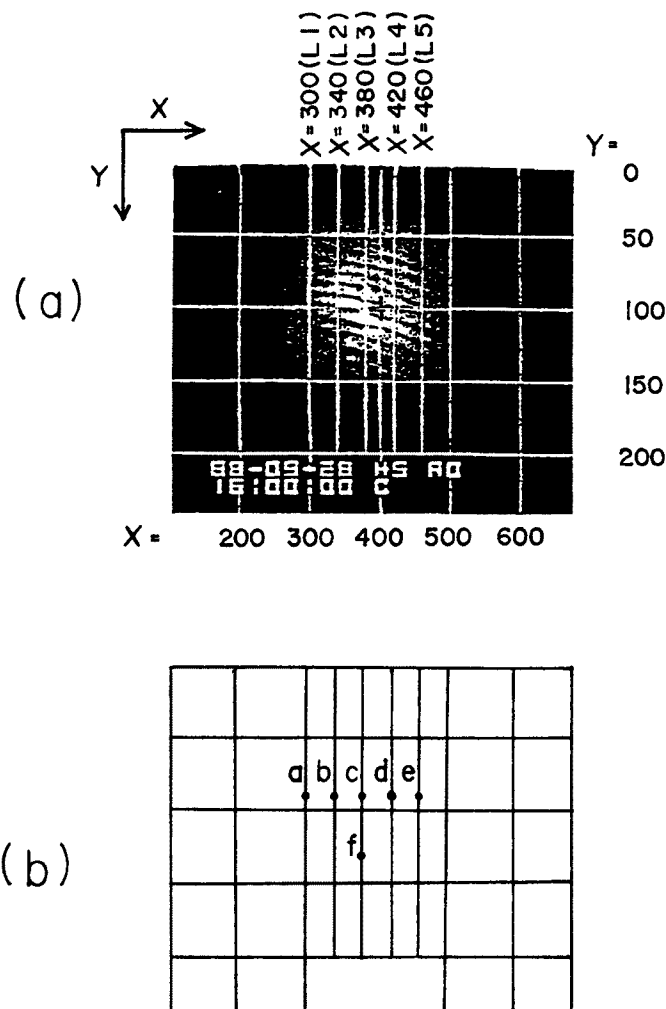


Fig. 3 (a) An example of the monitor picture showing the holographic interference pattern.
 (b) relative positions of a~f points on the monitor picture. Displacements of these points obtained from interference fringe patterns are shown in Fig. 5(a).

付近 ($X=400$, $Y=100$) に被写体壁面に描かれた基準マーク (+印) が見えるが、これを中心に10本以上の干渉じまが識別できる。この基準マークに対する干渉じまの時間的変化を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した。

解析の一例を Fig. 4 に示す。図は、垂直方向の5本の線 L1~L5 ($X=300, 340, 380, 420, 460$) について、それぞれ $Y=0\sim 200$ の範囲の輝度分布 (B)、その微分値 (dB/dY) および dB/dY の一週間の変化 (9月28日~10月5日) を示したものである。被写体の大きさは直径約1mであるが、干渉じまが識別できる範囲はかなり狭く、直径約50cmの範囲に限られている。

次に、被写体壁面上の任意の点の変位は、その点を横切る干渉じまの明暗を時間を追って調べることであり決定できる。すなわち、明→暗→明の1サイクルの変化がレーザー光の $1/2$ 波長 ($=0.32\ \mu\text{m}$) の変化に相

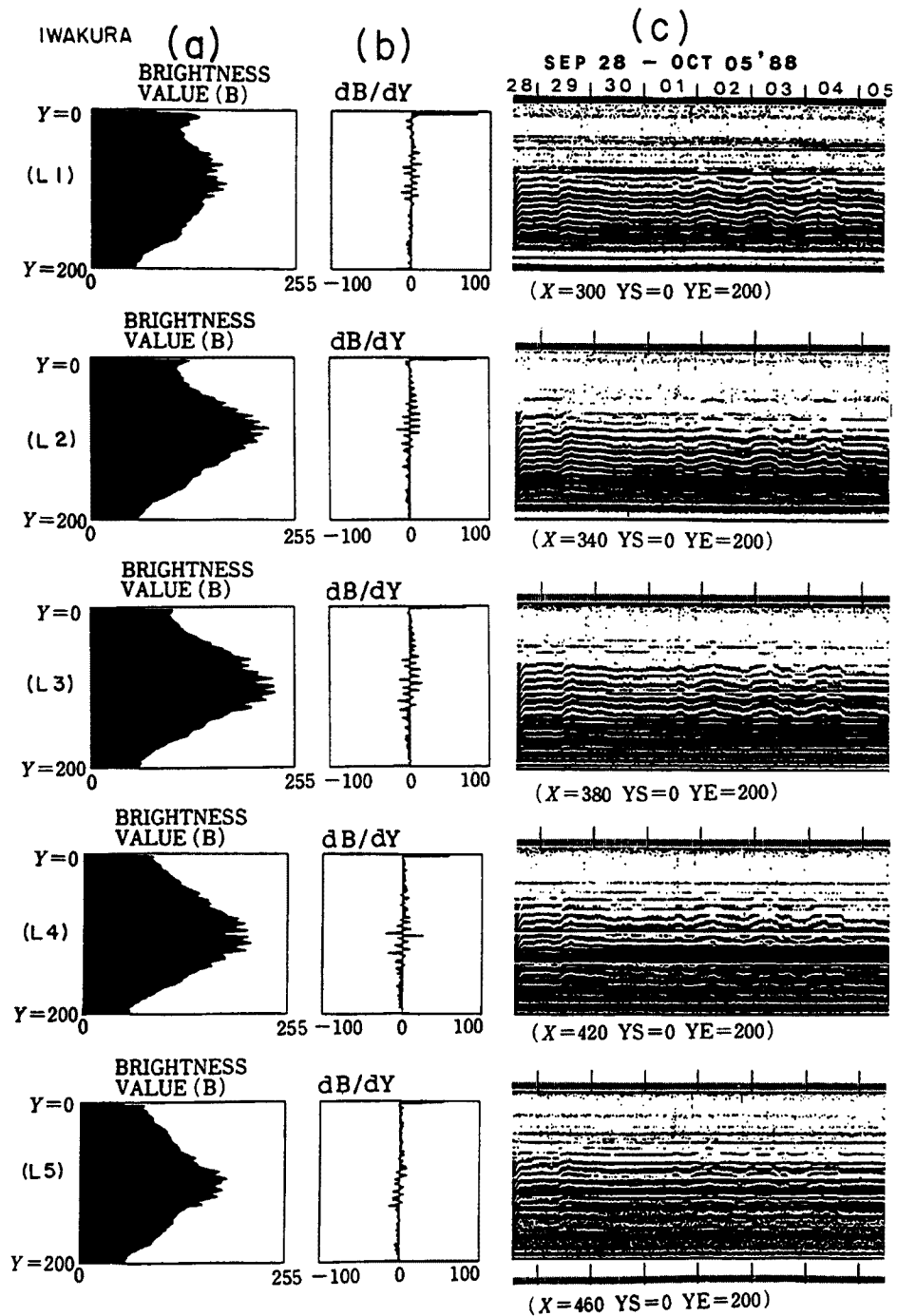


Fig. 4 Examples of image processing.

- (a) Brightness values of the interference fringe pattern along L1~L5 lines (see Fig. 3).
- (b) Derivatives of B (dB/dY).
- (c) Change of dB/dY during a week.

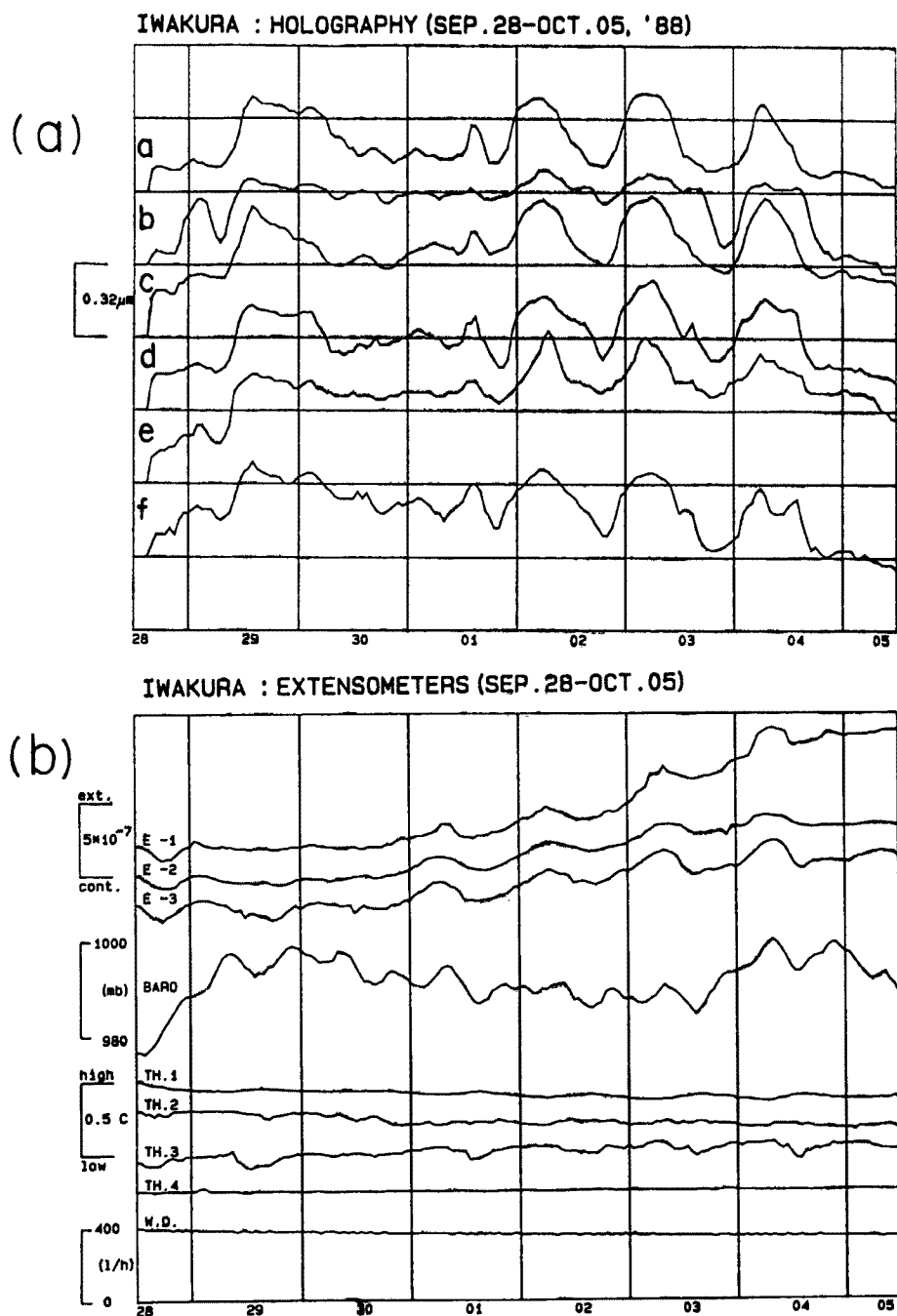


Fig. 5 (a) Displacements of a~f points on the object wall obtained from fringe displacement data shown in Fig. 4(c).

(b) Strain changes observed with extensometers (E-1~3), together with barometric change (BARO), thermometric changes (TH. 1~TH. 4) and ground-water discharge (W. D.).

当する。この変化は、参照光の光路の長さに変化がなければ、Fig. 2 に示す光学ベンチ (B) と被写体壁面との間の相対的な距離変化に帰せられる。参照ミラー (R) は、光学ベンチのすぐ横の鉄製アングルに取り付け

られており、このアングルの根元はコンクリートで固定されている。従って参照光の光路は、地殻応力による坑道のひずみ変化には影響されず、また、温度変化などによるアングル自体の変形量は“Cavity Effect”によって増幅される坑道を横切る方向のひずみ変化量に比べて極めて小さいと考えられる。それ故、参照光の光路の変化は無視することができて、干渉じまの明暗の変化から坑道変形が検出できることになる。

上記の方法で求めた坑道変形を Fig. 5(a)に示す。この図は、9月28日から10月5日までの一週間の干渉じまの変化の記録から、Fig. 3(b)に示されている a~f の各点土での明暗の変化を読み取ったものであるが、直径約 50 cm の範囲内に分布する壁面上のこれら各点の変化に有意な差は認められず、全体として似たような変化を示している。そこで次に、これらの変化を同じ坑道内に設置されている伸縮計や気象観測の記録と比較してみた。Fig. 5(b)は、同図 (a) と同じ期間の 3 成分の伸縮計 (E-1, E-2, E-3) の記録を、気圧・気温・湧水量の観測結果とともに示したものである。Fig. 5 の (a) と (b) とを比べると、(a) の干渉じまの移動から求めた坑道変形は、(b) に示されている気象要素との関連はほとんど認められない。また、伸縮計との対応は、ドリフト成分は異なるが、潮汐ひずみ変化は比較的よく対応している。特に10月2日~4日の潮汐変化を比較すると、ホログラフィ干渉計測法で求めた観測坑道の潮汐変形は 1.2 m 離れた被写体壁面と光学ベンチの間で約 $0.3 \mu\text{m}$ の相対変位を示すのに対して、伸縮計で求めた潮汐ひずみは $1 \sim 2 \times 10^{-7}$ であり、両者は量的にもほぼ一致している。

以上の結果から、移動観測用のホログラフィ記録装置を用いて観測坑道の微小な潮汐ひずみ変化を観測することができた。

4. おわりに

岩倉観測室で実施したホログラフィ干渉計測法による約 4 カ月の移動観測の結果、地殻応力変化にともなう坑道変形を精度良く測定し得る見通しがついた。この方法を長期間の連続観測に使用するためには乾板の吸湿の問題など、現状ではまだまだ改良しなければならない点も多いが、従来からの伸縮計とは基本的に異なり、基準尺を用いる必要がなく、多次元的なひずみ変化を同時に、しかも定量的に求めることができるというホログラフィ干渉計測法の特長を生かして、今後、複雑な形状の観測坑道の“Cavity Effect”の解明などに、積極的にこの方法を利用して行きたいと考えている。

最後に、観測および解析を手伝っていただいた谷 武司、菅野康幸、竹本良子の学生諸君に感謝します。

なお、この研究の一部は、文部省科学研究費一般研究 (C) 62540292 (昭和62年度) および63540304 (昭和63年度) を用いて行なった。

参 考 文 献

- 1) Takemoto, S.: Application of Laser Holographic Techniques to Investigate Crustal Deformations, Nature, Vol. 322, 1986, pp. 49-51.
- 2) 竹本修三：レーザーホログラフィによる地殻変動測定, 光学, 第16巻, 第7号, 1987, pp. 282-287.
- 3) 竹本修三：レーザーホログラフィと地震予知, 共立出版, 1987.
- 4) 竹本修三：京都岩倉における地殻変動観測(I), 京都大学防災研究所年報, 第10号 A, 1967, pp. 157-164.