

日本におけるレーザーひずみ計観測の進展

竹本 修三*

* 京都大学大学院理学研究科

要 旨

わが国におけるレーザーひずみ計（伸縮計）観測の発展の経緯を概観した後、京都大学で行われてきたレーザー伸縮計観測の結果をやや詳しく述べるとともに、ホログラフィ及び電子式スペックル・パターン干渉法（ESPI法）を応用した地殻ひずみ・応力測定装置の開発の経緯についても簡単に説明した。防災研究所におけるレーザー伸縮計観測から得られたダム水位変化や地下水汲み上げに起因するひずみ変化、広域地下水変化とひずみ変化などは、今後、水と地殻ひずみ変化の関係を考える上で興味深い観測事実である。

キーワード：レーザー干渉計、伸縮計、ひずみ計、地殻ひずみ、地球潮汐

1. はじめに

レーザーは現在、様々な分野に应用されているが、その基本的な形態である固体レーザー、気体レーザー及び半導体レーザーの3つが、1960年から1962年にかけてのわずか3年足らずの間に相次いで誕生した。

地球物理学の分野でも、レーザーの優れた単色性、可干渉性を生かしたレーザー干渉計方式の伸縮計が、1960年代の半ばから、米国で次々に開発された（Vali et al., 1966: Van Veen et al., 1966: Vali and Bostrom, 1969: Berger and Lonberg, 1969, 1970: Van Veen, 1970: Levine and Hall, 1972 など）。1970年代になると、英国（Gerard, 1971: Gouty et al., 1974）や旧ソ連邦（Alyoshin et al., 1980, 1984: Dolgikh et al., 1983）でも、レーザー伸縮計の開発が進み、長期間の連続観測が各国で始まった。

石英管やスーパーインヴァール棒を基準尺として用いた従来の伸縮計に比べて、レーザー干渉計方式の伸縮計の利点は、微小なひずみ変化を光の干渉を利用して定量的に測定できることである。このため、本質的に計器の検定（キャリブレーション）の必要がなく、また、基準尺の変形やその支持機構の間の摩擦などを考慮しなくてもよいことも長所である。

本稿では、わが国のレーザー伸縮計観測の発展を概観した後、おもに京都大学で実施されてきたレーザー干渉計方式の地殻ひずみ・地殻応力の精密観測装置の開発のこれまでの取り組みについて述べる。

2. 1970～1990 年代の日本におけるレーザー伸縮計観測

わが国においては、計量研究所（現・独立行政法人産業技術総合研究所計量標準総合センター）のグループが、1970年に気象庁松代地震観測所に基線長25mのマイケルソン型レーザー伸縮計を設置し、基礎実験を開始した（清野・他, 1977: 田中, 1983）。この実験は、1970年代後半まで続けられ、計量研究所が開発したヨウ素安定化He-Neレーザーを光源として用いることにより、地球潮汐の検出が可能な域にまで達した。この経験に基づき、1970年代後半には、計量研究所（つくば市）の光学実験トンネル内に基線長30mのマイケルソン型レーザー伸縮計が設置され、1980年から1992まで、12年間にわたり、連続観測が行われた（大石・他, 1996）。

一方、東京工業大学精密工学研究所においても、1970年代の後半からレーザー伸縮計の開発が行われた（浅川・他, 1979, 1980）。長津田キャンパスの地下光学トンネル内に設置された52mの基線長をもつマイケルソン型のレーザー伸縮計を用いた連続観測が、1983年2月から約2年間にわたって実施された（東京工業大学 研究・交流センター, 1985）。

その間、京都大学においては、1970年から防災研究所天ヶ瀬地殻変動観測室において、レーザー干渉計を用いたスーパーインヴァール棒伸縮計のキャリブレーションが実施され（竹本, 1975）、1978年に

は同観測室内にヒューレット・パッカード社製の波長安定化 He-Ne レーザーを光源とする基線長約 16m のマイケルソン型レーザー伸縮計が設置された (Takemoto, 1979)。

その後、1980~90 年代にかけて、京大の六甲高雄観測室 (Takemoto et al., 1994, 1998a) や花山観測室 (竹本・他, 2003b), 名大の犬山観測室 (Araya et al., 2002) などにレーザー伸縮計が設置され、長期間の連続観測が実施された。このほか、緯度観測所 (現・国立天文台水沢観測所) においてもレーザー伸縮計の開発が試みられ、その技術は、その後の絶対重力計開発や月周回衛星搭載のレーザー高度計 (LALT) の開発などに生かされている。

3. レーザー干渉計を用いたスーパーインヴァー爾棒伸縮計のキャリブレーション

防災研究所天ヶ瀬地殻変動観測室は、Fig. 1(a) に示すように、断面が馬蹄形をした全長 1830m の直線状坑道の入口から 400~500m の区間を仕切って観測室として使用している。1967 年にスーパーインヴァー爾棒伸縮計、佐々式スーパーインヴァー爾線伸縮計、水平振子型傾斜計及び水管傾斜計などの計器が同観測室内に設置され (高田・他, 1968), それ以来 40 年近くにわたって地殻変動観測が続けられている。

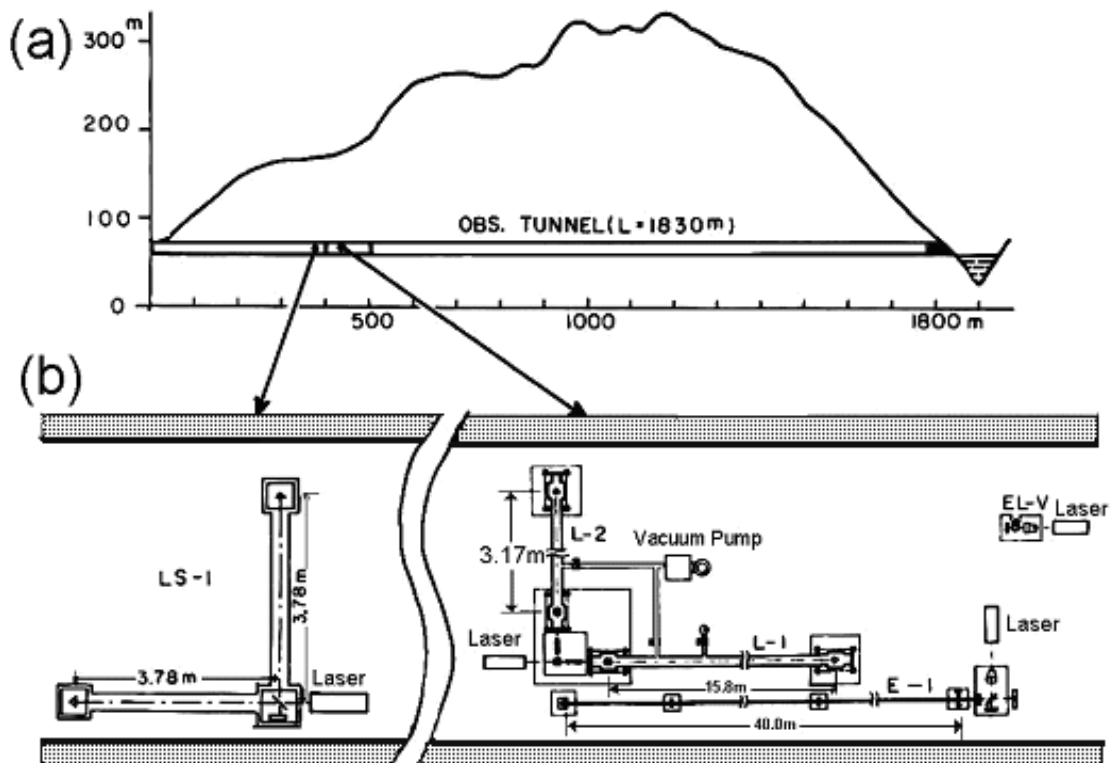


Fig. 1 (a) Amagase observation tunnel, (b) Arrangement of extensometers with laser interferometric devices.

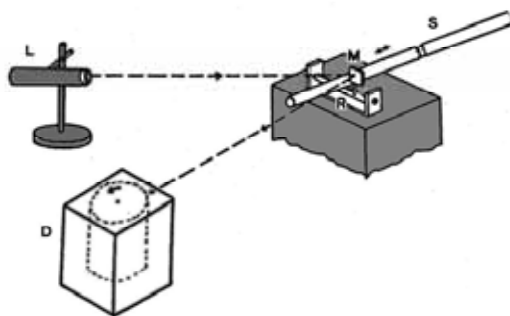


Fig. 2 Device of an optical lever recording system of the "roller" extensometer. S: Super-invar bar, R: Roller, M: Mirror, L: Lamp, D: Recording Drum.

このうち、スーパーインヴァー爾棒伸縮計は、岩盤に固定された 2 本の柱 (固定端と自由端) の間の微小な相対変位 (ひずみ) を熱膨張係数の小さいスーパーインヴァー爾棒を基準尺として測定するものである。

伸縮計のひずみ検出機構には、様々な工夫がなされているが、そのなかで最も簡単なローラー型伸縮計の構造が Fig. 2 に示されている。すなわち、基準尺と自由端の柱との間に、両端を時計用軸受けで支えられたローラーを置くと、基準尺と柱との間の相対変位は、ローラーの回転に換えられる。ローラー

のわずかな回転は、光源ランプ (L) とローラーに取り付けられた小さな鏡 (M) により、光テコの原理により光学的に拡大され、約 2m 離れた記録ドラム (D) 内の印画紙上に記録される。伸縮計の長さ (2つの柱の間の距離) を 10m, ローラーの半径を 1mm としたとき、記録紙上で $2.5 \times 10^{-8} / \text{mm}$ のひずみ検出感度が得られる。

このような簡単な装置で、月や太陽の潮汐力による地球潮汐ひずみも検出でき、長期間の地殻ひずみ変化を安定して記録できることから、京都大学の多くの地殻変動観測室で、このローラー型伸縮計が長年にわたって使用されてきた。しかし、この型の伸縮計で得られた潮汐ひずみ変化を理論的に予測された値と比較すると、観測値が小さすぎる。そこで、1970年代のはじめに、レーザー干渉計を用いて天ヶ瀬地殻変動観測室のローラー型スーパーインヴァール棒伸縮計 (Fig. 1(b) の E-1 成分) のキャリブレーションが行われた (竹本, 1975)。キャリブレーション装置の概略が Fig. 3 に示されている。

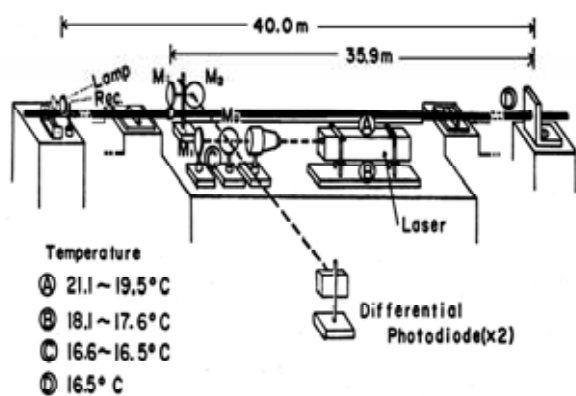


Fig. 3 Laser interferometric calibration system for a "roller" extensometer.

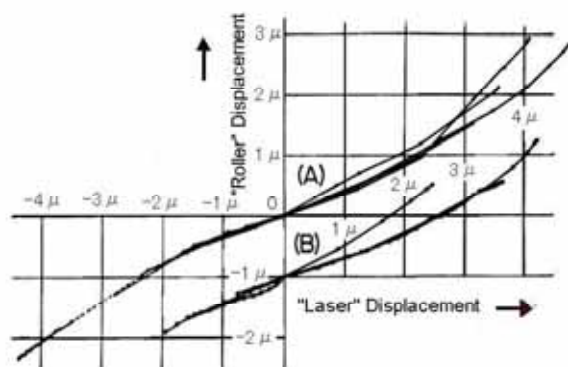


Fig. 4 Displacements observed with the "roller" device of the E-1 linear extensometer and the laser interferometer.

キャリブレーションは、スーパーインヴァール棒の固定端近くに巻きつけたニクロム線を加熱することにより行われた。スーパーインヴァール棒の熱的変形に伴う棒の先端部分の微小変位を“ローラー”方式とレーザー干渉計で同時に記録し、両者を比較した。その結果、Fig. 4 に示されているように、1~2μm 程度の微小変位の領域では、ローラー型伸縮計の検出機構で得られた見かけの変位は、レーザー干渉計で得られた値の 40% 程度しかなく、両者の比が 1 になるのは、変位が 4μm 以上の領域であることがわかった。

4. 天ヶ瀬観測室におけるレーザー伸縮計を用いた連続観測

1978 年には天ヶ瀬観測室に同観測所内に米国ヒューレット・パッカード社製の波長安定化 He-Ne レーザー (HP5501A) を光源とする 2 成分のマイケルソン型レーザー伸縮計 (Fig. 1(b) の L-1 と L-2) が設置され、1989 年までの約 12 年にわたって観測が継続された (Takemoto, 1979)。L-1 は坑道に沿う方向 (N72.5°W) の成分、L-2 は坑道と直交する方向 (N17.5°E) の成分であり、基線長はそれぞれ、15.8m, 3.2m である。

波長安定化レーザーを光源とする 2 成分のレーザー伸縮計 (L-1, L-2) が天ヶ瀬観測室に設置された後、同観測室のスーパーインヴァール棒伸縮計の坑道に沿う方向の水平成分 (Fig. 1(b) の E-1) と坑道の天井と床面との相対変位を測定する上下成分 (Fig. 1(b) の EL-V に、レーザー干渉計を用いた検出装置が取り付けられた (竹本, 1977)。さらに、坑道入口から約 380m の場所に波長安定化されていない Ne-Ne レーザーを光源として用いた直交 2 軸の等光路長の差の変化を検出するマイケルソン型レーザー伸縮計 (Fig. 1(b) の LS-1) が設置された (竹本・小林, 1982)。

4. 1 地球潮汐ひずみ

レーザー伸縮計の導入により、地殻ひずみ変化の定量的な議論が可能となったので、1979 年 3 月 6 日から 390 日間の連続観測データを用いて潮汐解析を行った (Takemoto, 1981)。

Fig. 5 に L-1 成分 (N72.5°W) と L-2 成分 (N17.5°E) について、M2 と O1 分潮の観測値を固体潮汐ひずみのほか、海洋潮汐荷重影響と Cavity 効果や地形影響を含めた理論的な予測値と比較した結果を示してある。理論的な予測値に対する観測値の比は、坑道に沿う L-1 成分が 0.85~0.86, 坑道と直交する L-2 成

分が 1.33~1.52 であった。坑道に沿う方向の観測値と理論的な予測値との差は 15%程度なのに対して、坑道と直交する方向の観測値が理論的な予測値より 30%以上大きいのは、坑道と直交する方向では潮汐力による地下水压の変動が潮汐ひずみ変化を増幅しているためと考えられる。

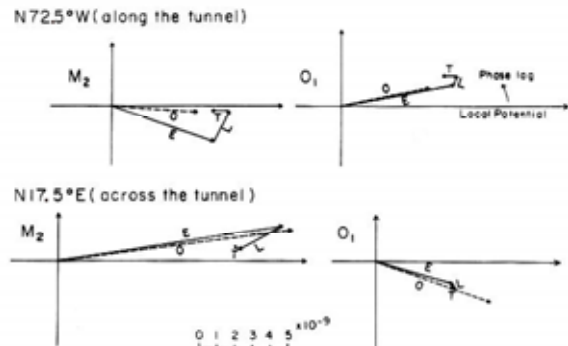


Fig. 5 Vector diagrams of M2 and O1 constituents. E: Theoretically expected solid earth tide for the Gutenberg-Bullen A earth model, L: Contribution from ocean tide loading, T: topographic effect, O: observed tide.

4.2 ダム水位変化とひずみ変化

天ヶ瀬観測室から数 100m の距離にある天ヶ瀬ダムの水位変化と関連したひずみ変化が、レーザー伸縮計による観測から見出された (竹本, 1982: Takemoto, 1983)。

Fig. 6 に EL-V, L-1, L-2 及び E-1 成分の伸縮計で得られたひずみ変化の 25 時間移動平均 (上側) と天ヶ瀬ダムの水位の日変化 (下側) とが比較して示されている。図から、急激な降雨に伴うダム水位の上昇 (a), (b) 及び (d) とダム放水に伴う水位低下 (c) 及び (e) に対応した顕著なひずみ変化が認識できる。興味深いのは、ダム水位の上昇に伴って、坑道断面の上下成分 (EL-V) は“伸び”, 坑道を横切る水平成分 (L-2) は“縮み”の変化を示すのに対して、長い直線状坑道の坑道に沿う方向の成分 (L-1 及び E-1) にはダムの水位変化と関連した変化が見られないことである。このような変化のプロセスは、以下のように考えることができる。

観測室周辺の地下水面はもともと観測室より上にあったものが、外部に自由に水を流し得る坑道が掘削されたために、周囲の地下水面は、坑道に向かって急激に落ち込むことになった。そして、坑道周辺の地下水浸透圧は、坑道と直交する方向に働き、地下水面が上昇すると、坑道断面の水平方向の圧力が増すことになる。そこで、坑道断面は、水平方向に縮み、上下方向に伸びるというものである。

Fig. 7 は、この様子を模式的に示した図である。坑道断面が円形の場合には、水平方向と上下方向の

変位量の比は約 3:1 で、符号は逆になる。

浅い観測坑、とくに常時湧水がある地殻変動観測室では、降雨に伴い、顕著なひずみ変化がしばしば観測されている。このような降雨に伴うひずみ変化にも観測室の形状と計器設置の方向が大きく影響しており、本節で述べたのと同様な地下水浸透圧のモデルでうまく説明できる (竹本, 1984)。

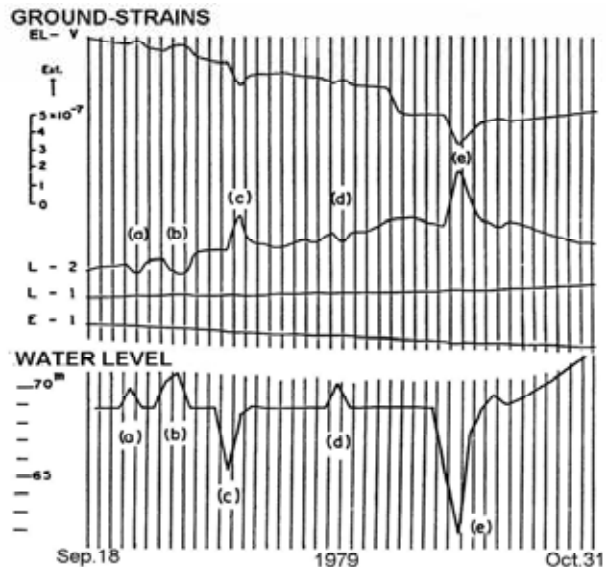


Fig. 6 (upper) 25-hour running means of ground-strains observed with laser strainmeters. (lower) daily mean of water level of the Amagase reservoir..

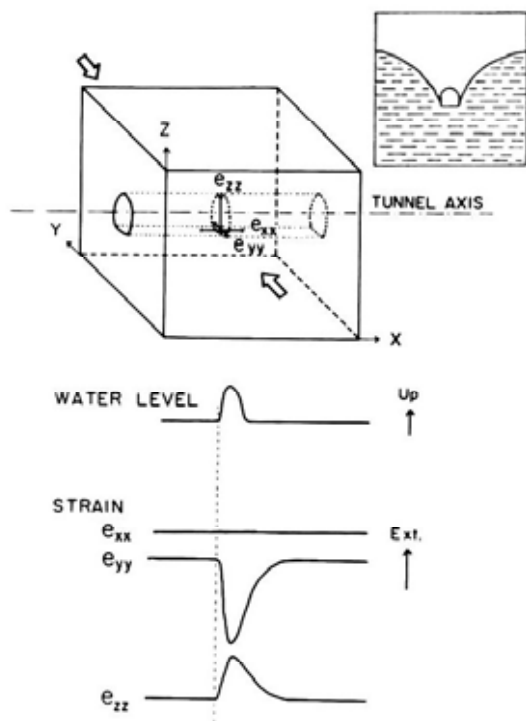


Fig. 7 Schematic diagram showing strain changes around the observation tunnel caused by rapid draw-up of water level of the Amagase reservoir.

4. 3 広域地下水場の変化とひずみ変化

Fig. 8 (a) は、天ヶ瀬観測室のレーザー伸縮計で観測された1987年1月1日から1989年8月31日までのひずみ変化を、坑内温度 (TEMP), 気圧 (BARO) 及び 降水量 (PREC) とともに示したものである (Takemoto, 1991a)。なお、L-1 成分の長期のトレンドは、あらかじめ除いてある。

Fig. 8 (a) から、坑道に沿う方向の L-1 成分のひずみの季節変化はきわめて小さく、年間を通じて 3×10^{-7} 程度であるのに対して、坑道と直交する方向の L-2 成分、あるいは、直交 2 軸の差を検出する方式の LS-1 成分で観測されるひずみ変化は1桁以上大きく、 10^{-6} オーダーであることがわかる。このことは、前節で述べたダム水位変化に伴うひずみ変化と同様に、ひずみの季節変化も Fig. 7 で示したモデルで説明し得る。つまり、坑道と直交する方向が卓越する季節

変化は、観測坑道周辺の地下水圧の状態変化を反映していると考えられる。

Fig. 8 (a) の L-2 あるいは LS-1 の変化を、同じ図に示されている降水量 (PREC) と比較すると、降水量の包らく線を1~2ヶ月遅らせれば、坑道と直交する方向のひずみ変化によく似てくる。また、Fig. 8 (b) には、天ヶ瀬観測室から北方に約14km離れた逢坂山観測室にある観測井の水位変化が示されているが、この図と Fig. 8 (a) の L-2 及び LS-1 とを比較すると、互いに共通性が見られる。

これらのことを総合的に判断すると、天ヶ瀬観測室の坑道と直交する方向のひずみ変化は、琵琶湖から大阪湾に注ぐ瀬田川—宇治川—淀川水系を含む広域の地下水圧の変化を反映していると考えることができる。

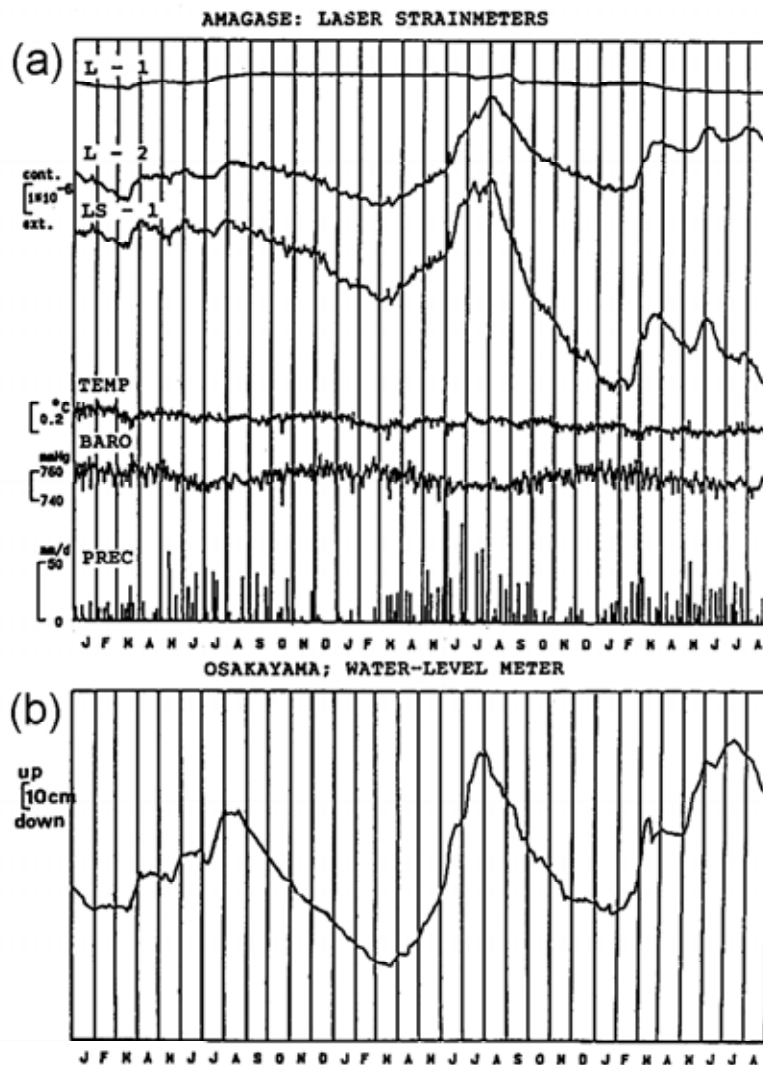


Fig. 8 (a) Observational results of ground-strains (L-1, L-2 and LS-1), ambient temperature changes (TEMP), atmospheric pressure changes (BARO) and precipitation (PREC) measured at the Amagase observatory during the period from January 01, 1987 to August 31, 1989. (b) Water level changes measured at the Osakayama observatory during the same period.

5. 可搬型レーザー伸縮計による観測 ー地下水汲み上げに伴うひずみ変化ー

伸縮計を用いた地殻ひずみの精密観測は、気象影響等の擾乱を避けるために、一般に地下横坑の奥深くで行われている。このために、観測点の選定に大きな制約を受ける。もし、地表近くで精度よく地殻ひずみを測定できる観測システムが確立されれば、観測の自由度が増す。このような観点から、防災研究所では Fig. 9 に示されている可搬型レーザー伸縮計システムを作り、これを 1985 年 3 月に京都大学宇治構内のガレージ裏の空地に設置し、約 1 年間の試験観測を実施した（竹本・他、1985）。

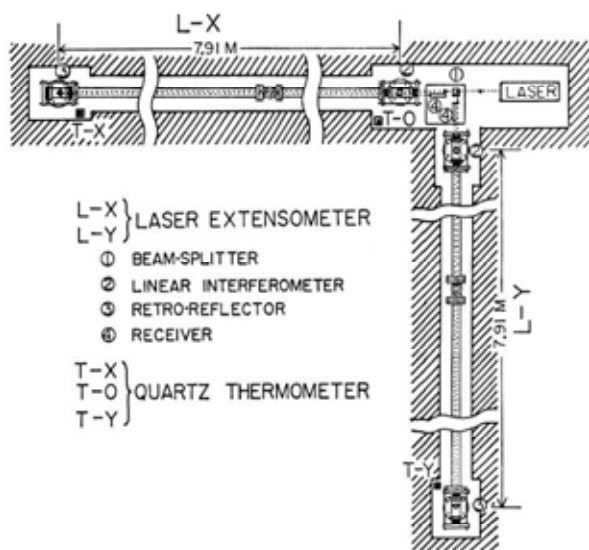


Fig. 9 Portable laser extensometer system.

このシステムは、天ヶ瀬観測室の L-1 及び L-2 レーザー伸縮計システムとほぼ同様であり、1 台の波長安定化レーザー（HP5518A）を光源として、直交 2 軸のそれぞれの方向に独立な 2 組のマイケルソン型干渉計から構成されている。宇治構内の試験観測では、2 組の干渉計の光路長をそれぞれ 7.91m として、EW 及び NS 方向のひずみを測定した。

光学系チャンバー部の基礎台は、地表下 2m の深さまで掘り下げ、その下に鉄筋を打ち込んだ後、地表下 60cm までコンクリートで固めて作られた。干渉計用ステンレス・パイプは地表から約 60cm の深さの溝の中に設置された後、その上の 30~40cm 程度を土で埋め戻した。

試験観測の結果、気温の日変化及び降雨による影響が 10^{-6} オーダー、構内にある給用水井戸の地下水汲み上げの影響が 10^{-7} オーダー、付近のガレージ

から車が出入りする際のノイズが 10^{-8} オーダーであり、このような浅い観測壕で、潮汐ひずみを検出し得る程度の高精度地殻ひずみの観測は、実際上困難であることがわかった。

可搬型レーザー伸縮計システムは、その後、1987 年 6 月から 1988 年 8 月まで三重県南牟婁郡紀和町の紀州観測室で使用され（竹本・他、1990）、その後、1988 年 12 月から 1997 年 6 月まで神戸市の六甲高雄観測室で使用された（Takemoto et al., 1994, 1998a）。

京大宇治構内における試験観測では、潮汐ひずみ変化を検出するには至らなかったが、構内の地下水汲み上げに伴って観測されたひずみ変化について言及しておく。

Fig. 10 に可搬型レーザー伸縮計システムと構内 3 ヶ所の井戸（No.1, No.2 及び No.3）との相対的な位置関係が示されている。これらの井戸のストレーナーの深さは、いずれも約 150m であり、毎分 2 トンの揚水能力のポンプで地下水の汲み上げを行っている。レーザー伸縮計の観測地点に最も近いのは No.2 の井戸であり、南西に約 50m の距離にある。続いて No.1 が東南東に 210m、最も遠いのが No.3 で、北北西に 270m の距離にある。

Fig. 11 に地下水の汲み上げに伴うひずみ変化が示されている。最も近い No.2 の井戸が稼働すると、レーザー伸縮計は EW 及び NS 成分ともに、“縮み”の変化を示し、ひずみ量は、それぞれ、 -2.2×10^{-7} 及び -4.1×10^{-7} である。No.1 の井戸が稼働した場合には、EW 成分が 1.0×10^{-7} （“伸び”）、NS 成分が -1.4×10^{-7} （“縮み”）の変化を示す。No.3 の井戸の場合には、EW 成分が -0.4×10^{-7} （“縮み”）、NS 成分が 0.7×10^{-7} （“伸び”）の変化を示す。また、Fig. 11 の右下に示されているように、No.1 と No.2 が同時に稼働した場合には、EW 成分が -2.0×10^{-7} （“縮み”）、NS 成分が -5.9×10^{-7} （“縮み”）の変化を示す。

これらの地下水汲み上げに伴うひずみ変化は、ストレーナーの位置に茂木モデル（Mogi, 1958）の球状圧力源を仮定することにより、うまく説明できる。Fig. 12 に地下水汲み上げの茂木モデル、Fig. 13 にこのモデルから求められる変位、及び、ひずみ変化、Fig. 14 にモデルに基づく計算値と観測値との比較を示してある。

このように、地表付近に設置された伸縮計が急激な地下水汲み上げに伴う地下水圧の変化に敏感に反応しており、観測されたひずみ変化が弾性媒質中の球状圧力源の圧力変化でうまく説明できることは興味深い。

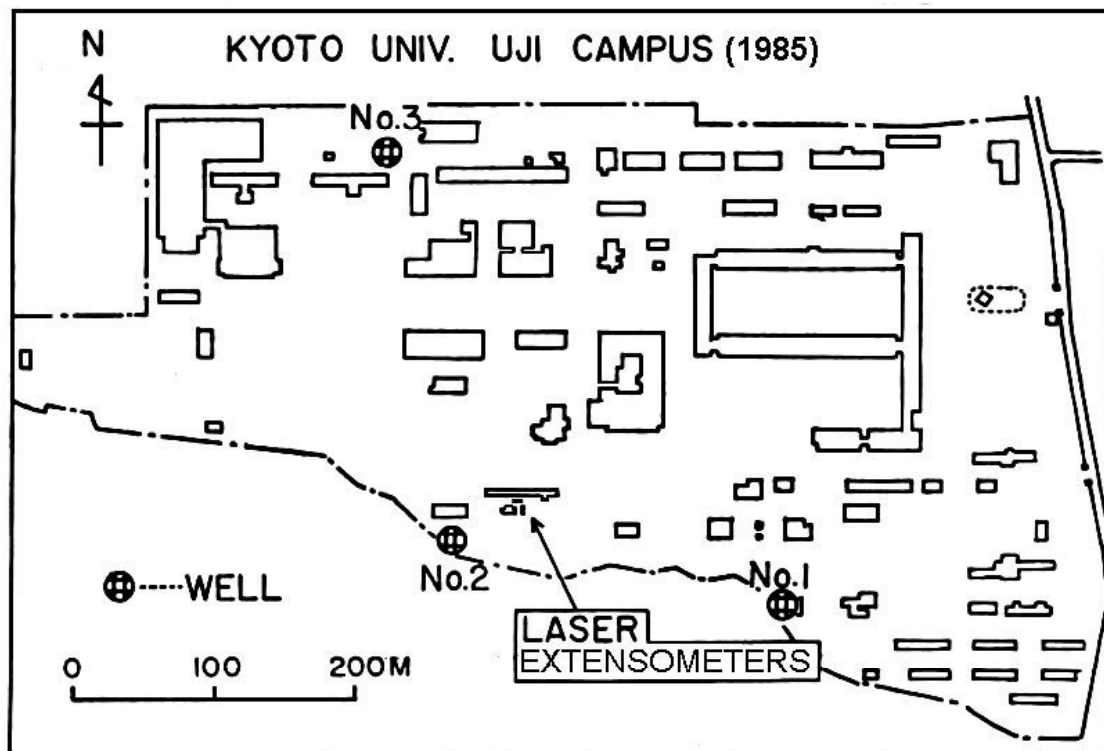


Fig. 10 Observation site of portable laser extensometers and three wells in the Uji campus of Kyoto University

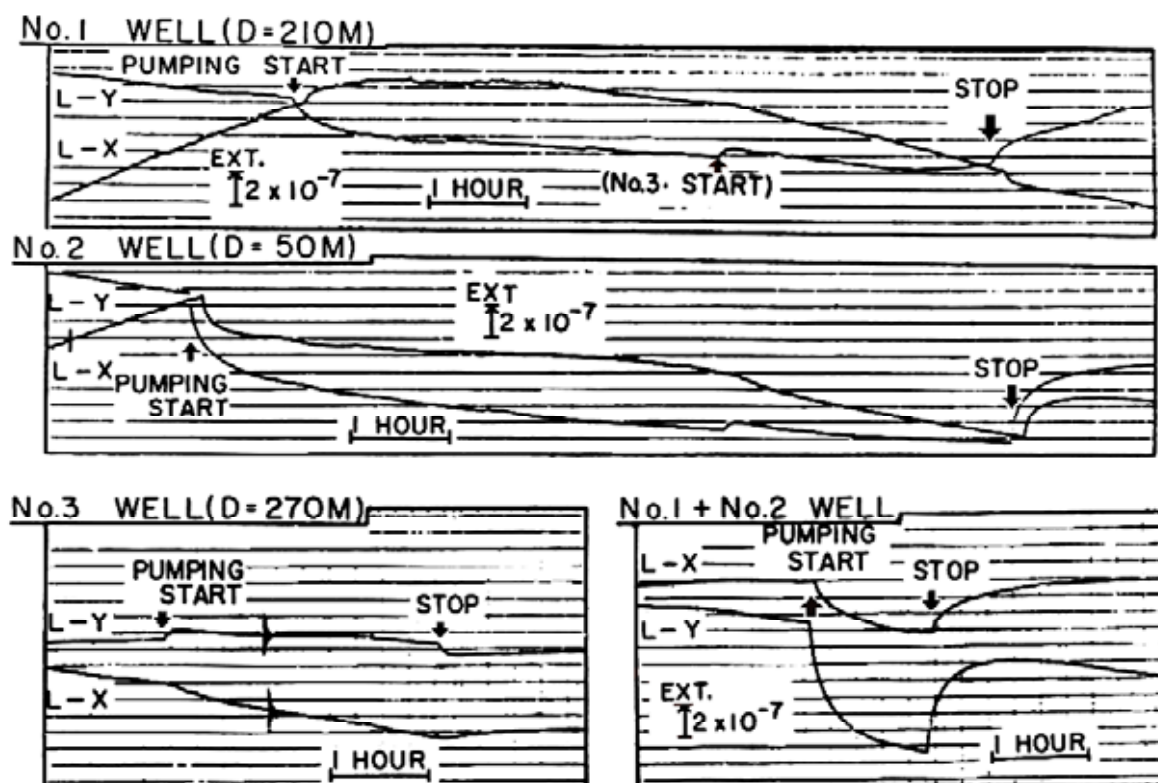


Fig. 11 Records of ground-strains caused by pumping of groundwater.

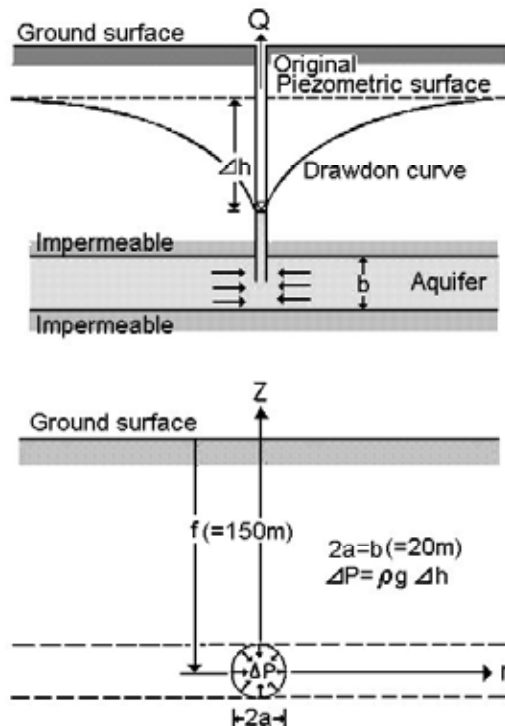


Fig. 12 “Mogi” model for explaining the ground-strain changes caused by pumping of groundwater.

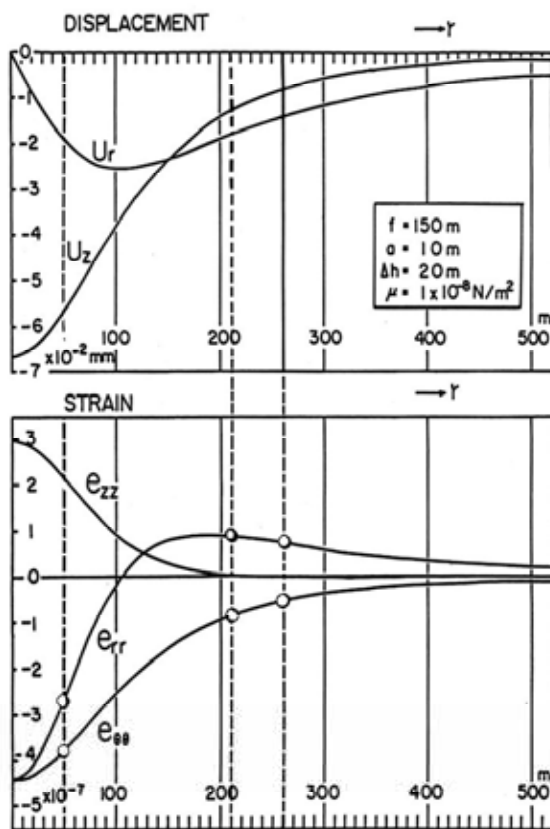


Fig. 13 Displacements and strains calculated from the model shown in Fig. 12.

STRAIN CAUSED BY PUMPING OF GROUNDWATER

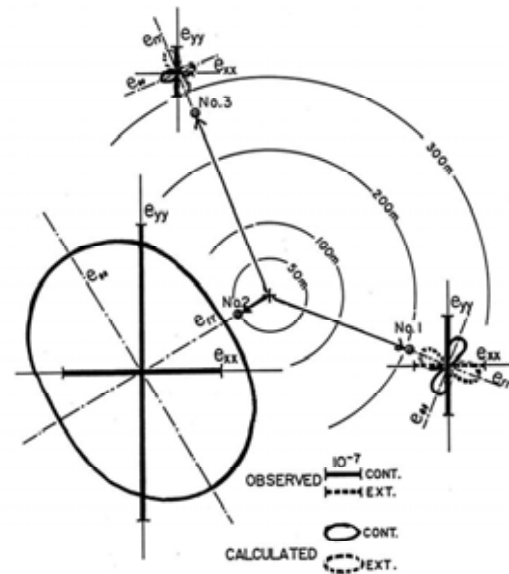


Fig. 14 Comparison between the observed strain changes and calculated ones using the Mogi model.

6. 六甲高雄観測室におけるレーザー伸縮計観測

六甲高雄観測室は、神戸市の新神戸と箕谷地域を結ぶ2本の道路トンネル（新神戸トンネルと第2新神戸トンネル）を繋ぐ連絡通路の一部を利用して1988年11月に開設されたもので、1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震（ $M=7.2$ ）の震源域のほぼ真上に位置していた。しかし、同観測所で得られたレーザー伸縮計（光路長：15.4m、方位： $N69^\circ E$ ）の記録に地震直前の1週間以内に異常ひずみ変化は見られなかった。また、潮汐ひずみの振幅、位相についても地震の前後で有意な変化は見いだされなかった（Takemoto et al., 1998a）。

Igarashi (2000)は、国土地理院によって得られた御前崎周辺の最近20年間の水準測量データに臨界現象の数値モデルである非線形の自己相似関数型を持った方程式を当てはめ、臨界点（地殻の破壊＝地震の発生時期）の時刻 t_c を求めている。この手法を六甲高雄観測室における地震前7年間のデータに適用し、臨界点の時刻 t_c が求まるかどうかを検討した。その結果は、地震の前年の1994年8月～12月の期間に欠測があるために解が収斂せず、 t_c を求めることはできなかった（Takemoto et al., 2003）。

六甲高雄観測室のレーザー伸縮計による観測から兵庫県南部地震と直接結びつく異常なひずみ変化は残念ながら見いだされなかったが、長期間の観測データから、潮汐ひずみの観測に及ぼす海洋潮汐の荷重影響（竹本・他, 1992）や流体核共鳴効果（Li et al.,

1995) の検討などが行われた。約 7 年間のデータから決定された流体核共鳴効果のパラメータとして、自由コア章動の周期 ($T_{FCN} = 427.5 \pm 11.1$ days, Quality factor (Q^{-1}) = $2.0 (\pm 0.8) \times 10^{-4}$ の値が得られている (Mukai et al., 2004)。

7. 神岡観測室の長スパン・レーザー伸縮計

2000年代になると、レーザー技術の発展に伴い、レーザー伸縮計も新たな時代を迎えた。2003年6月には、京都大学と東京大学が共同して、波長安定度が 10^{-13} のヨウ素安定化YAGレーザー (波長532nm) を光源として用いた100mの長スパン・レーザー伸縮計システムを神岡鉱山 (岐阜県) に設置した。これはおもに科学研究費補助金・特定研究領域「重力波の新展開」(代表 坪野公夫)のなかの研究計画「地球物理への応用」(代表 竹本修三)の経費によるものである。

観測坑道は、地下 1000mの固い片麻岩帯に掘削された。この気象的擾乱のきわめて少ない観測室で得られた高精度レーザー伸縮計の観測データを用いて、地球内部ダイナミクスの研究が行われている (竹本・他, 2003a: Takemoto et al., 2004)。Fig. 15 に神岡観測室の長スパン・レーザー伸縮計システムの概観を示してある。

神岡観測室では重力波検出器 (CLIO) (Ohashi et al., 2003) の建設がすすめられているほか、南極昭和基地で使用されていた超伝導重力計が2004年10月に同観測室に移設された。長スパン・レーザー伸縮計と超伝導重力計の観測データを合わせて解析することにより、地球自由振動の常時励起の検証や、Seismic Core Modes, Core Undertone, Slichter modesなどの地球深部ダイナミクスを解明する手がかりとなる微弱な信号が検出されると期待されている。



Fig. 15 View of the laser extensometer system in Kamioka Observatory.

8. レーザー・ホログラフィ及び ESPI 法を用いた地殻変動観測

レーザー伸縮計は、1軸方向のひずみ変化しか検出できないが、多次元の空間的なひずみ変化を同時に検出するレーザー・ホログラフィを用いた地殻変動観測装置の開発が1980年代に京都大学防災研究所で始められた (Takemoto, 1986: Takemoto and Tsuboi, 1988)。

ホログラフィ干渉計測法は、自動車や航空機用機材の非破壊検査のほか、岩石や金属およびプラスチック材料などの“応力”と“ひずみ”の関係を調べる室内実験にも利用されており、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ほか、被写体に非接触でひずみ計測を行ないうことや、被写体の表面が粗のままでもさしつかえないことなども利点としてあげられる。

京都大学防災研究所では、このレーザー・ホログラフィの干渉計測技術を応用して、天ヶ瀬地殻変動観測室内に大型ホログラフィ観測システムを設置し、地殻応力の変化によって生ずるトンネル壁面のわずかな形状変化を干渉縞のパターン変化から精度よく検出することに成功した (竹本, 1987: Takemoto, 1989, 1990)。

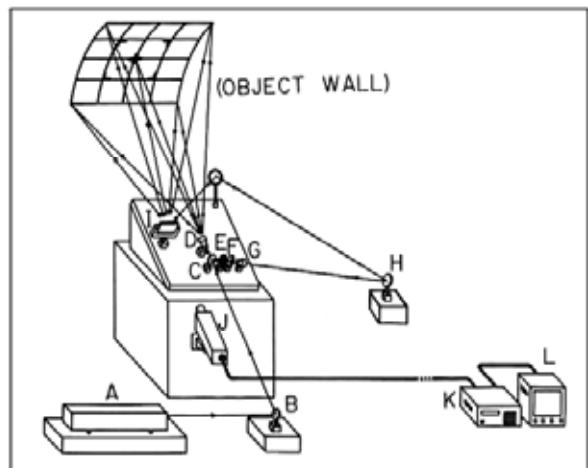


Fig. 16 Illustration of the holographic recording system at Amagase observatory. (A): He-Ne laser, (B): Mirror (beam-bender), (C): Beam-splitter, (D): Beam-expander, (E): Pin-hole, (F): Neutral-density filter, (G): Collimator, (H): Reference mirror, (I): Photographic plate and plate holder, (J): Video camera, (L): Monitor TV.

Fig. 16 に天ヶ瀬観測室に設置されたホログラフィ観測システムの概要が示されている。Fig. 17 の“O”で示された約1m四方の範囲、すなわち、Fig. 18 (b)の領域の変形パターンをホログラム乾板上の干渉縞

(Fig. 18 (a))の動きから検出するものである。このシステムにより、観測坑道の潮汐変形がホログラム乾板を通じて観測できた。Fig. 19 には、Fig. 18 (a)の $X = 400$, $Y = 0 \sim 200$ のライン上の2日間の干渉パターン変化が例示されている。

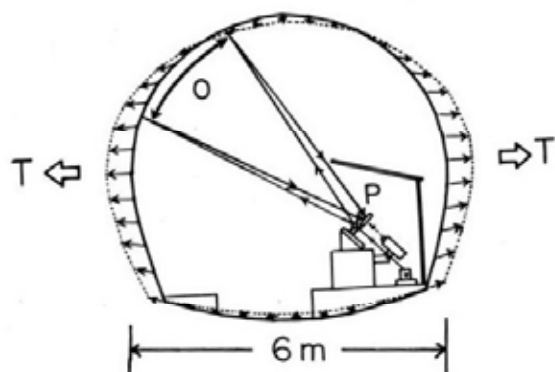


Fig. 17 Tunnel deformation to be detected by the holographic recording system at Amagase.

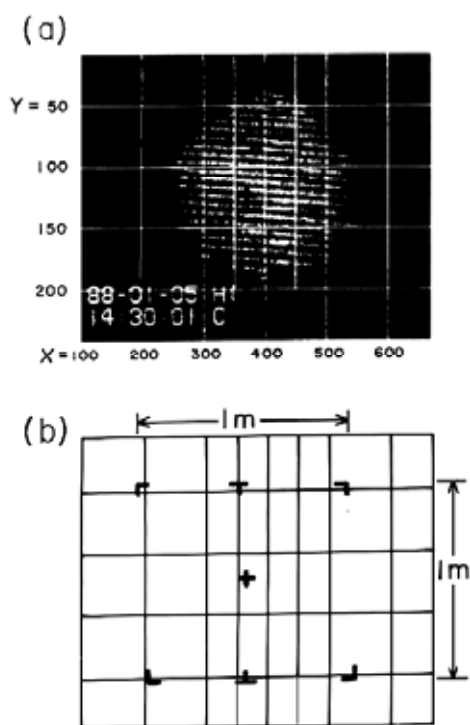


Fig. 18 Example of interferometric pattern on holographic image.

その後、ホログラフィ干渉法を用いた地殻変動観測装置は防災研究所の岩倉観測所にも設置され、坑道変形の面的パターンを検出することに成功した(竹本・山田, 1989)。しかし、この方法は、ホログラムの作製や干渉縞の取り扱いにやや熟練を要する

点に難があり、また、長期間の連続観測に使用するためには乾板の吸湿による影響も考慮しなければならない。すなわち、湿式の写真処理がこの方法の最大のネックとなっている。

これらの問題を解決するために、電子式スペクル・パターン干渉法 (ESPI法) を用いた地殻変動観測装置の開発が京都大学大学院理学研究科ですめられた。ESPI法は、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 (基準画像データ) と、現在見えている壁面からの反射波の画像データ (実時間画像データ) を計算機のなかで重ね合わせることで干渉縞のパターンを得ることができる。理学研究科の上賀茂観測室でESPI法を用いた地殻変動観測の実験が続けられたが (Takemoto et al., 1998b: 竹本・他, 1999), 実用化までには至っていない。

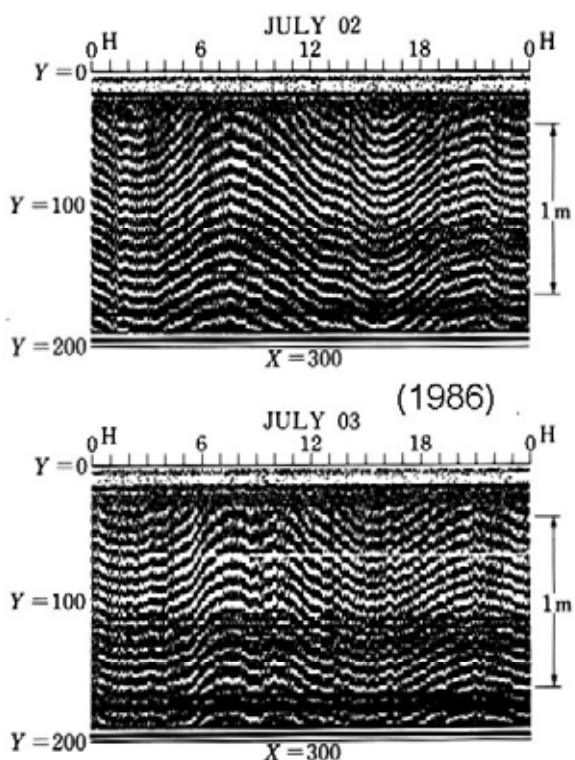


Fig. 19 Example of fringe displacements along a vertical line on a holographic plate for two days.

前述のように、ホログラフィ干渉計測法、あるいは、これをさらに改良した ESPI 法を利用した微小ひずみの観測システムは、対象となる被写体に非接触で多次元的なひずみ変化を同時に、しかも、定量的に検出することができるのが最大の利点である。そこで、この特徴を生かしてホログラフィ干渉計測法及び ESPI 法を応力解放法による地殻応力測定

に应用する試みも京都大学を中心にすすめられた (Mizutani and Takemoto, 1989 : 平林・他, 1993 : Takemoto, 1991b, 1993a, 1993b, 1996 : Hirabayashi and Takemoto, 1994, 1995)。原理的には十分適用が可能と考えられるが、フィールドにおける現場測定に应用するためには、装置のサイズ・重量の問題や振動対策などの問題が残されている。

1990年代のはじめに、ホログラフィ干渉法による地殻ひずみの計測を坑外に出て行うためには、高い鉄塔の上から電波を飛ばせばよいかなどと思案していた矢先に、地震前後の地殻変動パターンを SAR (干渉合成開口レーダー) データの干渉処理から可視的に表現した衝撃的な図が Nature 誌の表紙を飾った (Massonnet, 1993)。カリフォルニア・ランダース地震 (1992) に伴う地殻変動の様子をヨーロッパの ERS-1 に搭載された SAR データを用いて明らかにしたものである。レーザー・ホログラフィを用いた地殻変動観測の論文 (Takemoto, 1986) が Nature 誌に掲載された 7 年後のことであった。

その後、われわれも、In SAR 技術を用いて、桜島や伊豆大島などの火山地域における地殻変動を調べている (奥山・他, 2000, 2002)。

9. おわりに

本稿では、わが国におけるレーザー伸縮計観測の発展の経緯を概観した後、京都大学で行われたレーザー伸縮計観測の結果をやや詳しく述べた。さらに、ホログラフィ及び電子式スペックル・パターン干渉法 (ESPI 法) を応用した地殻ひずみ・応力測定装置の開発の経緯についても説明した。

防災研究所のレーザー伸縮計観測から得られた結果のなかで、ダム水位変化や地下水汲み上げに起因するひずみ変化、広域地下水変化とひずみ変化は、地震の発生に「水」が重要な役割を果たしていることが次々と明らかになってきた現在、水と地殻ひずみ変化・地震発生の関係を考える上で、興味深い観測事実である。

一般に、伸縮計や傾斜計で観測されるひずみ・傾斜変化は、GPS を含む測地測量から求めた地殻変動より大きな動きを示す。第 4 章の天ヶ瀬観測室におけるレーザー伸縮計を用いた連続観測で述べたように、長大な観測坑道の坑道に沿う方向のひずみ変化は比較的小さく、測地測量の結果と調和的である。

伸縮計や水管傾斜計は、計器の長さに比例して感度が上がる。そこで、多くの地殻変動観測室では坑道の長さを有効に使って、なるべく長スパンの計器を設置しようとしている。しかし、坑道のコーナー

に近づけば近づくほど複雑な Cavity 効果を受けることになる。このことが伸縮計や傾斜計による連続観測の結果が測地測量よりも大きな変化を示す一因になっていると考えられる。

しかし、観測坑道の変形は、近傍の地下水変化を反映しているので、敢えて坑道と直交する方向に伸縮計を設置するのも一概に悪いとはいえない。地下水・地殻ひずみ・地震発生のメカニズムを考える上での有用なデータを提供できると考えられるからである。

謝 辞

本研究の一部は、平成 14 ～ 17 年度文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「重力波の新展開」計画研究「地球物理への応用」(14047213) (代表者：竹本修三) を用いて行った。

参考文献

- 浅川賢一・田幸敏治・平田照二 (1979) : レーザー干渉計による地面振動の測定, 応用物理, 第 48 巻, pp.519-525.
- 浅川賢一・田幸敏治 (1980) : レーザー干渉計による地面振動の測定 II—異常振動の検知—, 応用物理, 第 49 巻, pp.1185-1191.
- 大石忠尚・桜井好正・瀬田勝男・藤間一郎・本田徳行・清野昭一 (1996) : レーザ伸縮計を用いた計量研究所光学実験トンネルの伸縮測定, 測地学会誌, 第 42 巻, pp.153-166.
- 奥山 哲・竹本 修三・村上 亮・飛田幹男・藤原 智・中川 弘之・矢来 博司 (2000) : InSAR による桜島の地殻変動の検出 : JERS-1 SAR 1992-1998 間のデータを用いて, ワークショップ「InSAR とその応用」(2000 年 9 月 7 日 -8 日, 東京), <http://www.eorc.nasda.go.jp/INSAR-WS/meeting/paper/d5/d5.html>.
- 奥山 哲・竹本修三・村上 亮・飛田幹男・藤原 智・中川 弘之・矢来博司 (2002) : 伊豆大島島内の局所的地殻変動—D-InSAR を用いて—, 月刊地球, 号外 No.39, pp.90-95.
- 清野昭一・大石忠尚・桜井好正 (1977) : レーザ干渉を応用した地殻ひずみの測定, 計測自動制御学会論文集, 第 13 巻, pp.174-179.
- 高田理夫・尾上謙介・小林年夫・山田 勝 (1968) : 天ヶ瀬地殻変動観測所における地殻変動観測 (序報), 京都大学防災研究所年報, 第 11 号 A, pp.213-220.
- 竹本修三 (1975) : ローラー型伸縮計のレーザを用いた Calibration について, 測地学会誌, 第 21 巻, pp.81-90.
- 竹本修三 (1977) : レーザ干渉計を用いたスーパーインヴァール棒伸縮計について, 測地学会誌, 第 23 巻, pp.223-231.

- 竹本修三(1982)：ダム水位変化に起因するひずみ変化について，測地学会誌，第28巻，pp.41-50.
- 竹本修三(1984)：地殻歪の観測に及ぼす降雨の影響の地下水浸透モデル，地震，第37巻，pp.369-381.
- 竹本修三(1987)：レーザホログラフィと地震予知，共立出版株式会社，192p.
- 竹本修三・小林年夫（1982）：Simple Laser Source を用いたレーザー伸縮計について，京都大学防災研究所年報，第25巻B-1，pp. 31-39.
- 竹本修三・土居 光・平原和朗（1985）：地表に設置されたレーザー伸縮計による土地伸縮変化の観測，測地学会誌，第31巻，pp.295-304.
- 竹本修三・山田 勝（1989）：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，京都大学防災研究所年報，第32号B-1，pp.75-81.
- 竹本修三・平原和朗・田中寅夫（1990）：可搬型レーザー伸縮計システムを用いた紀州観測室における地殻ひずみの観測，測地学会誌，第36巻，pp.101-108.
- 竹本修三・山本剛靖・向井厚志・佐藤忠弘（1992）：潮汐ひずみの観測に及ぼす海洋潮汐の荷重影響，測地学会誌，第38巻，pp.211-219.
- 竹本修三・近藤淳也・向井厚志（1999）：電子式スペックル・パターン干渉法を用いた地殻歪の3次元リアルタイム計測システムの開発：京都大学防災研究所年報，第42号B-1，pp.151-157.
- 竹本修三・新谷昌人・赤松純平・森井互・東 敏博・福田洋一・尾上謙介・市川信夫・川崎一朗・大橋正健・寺田聡一・百瀬秀夫(2003a)：神岡鉱山における100メートルレーザー伸縮計について，京都大学防災研究所年報，第46号 B，pp.749-755.
- 竹本修三・百瀬秀夫・藤森邦夫・東 敏博（2003b）：浅い観測坑におけるレーザー伸縮計を用いた地殻ひずみの観測，測地学会誌，第49巻，pp.215-225.
- 田中敬一（1983）：レーザと計測—極限への挑戦，共立出版株式会社，222pp.
- 東京工業大学研究・交流センター（1985）：長距離レーザ干渉実験年間データ集，209pp.
- 平林 純・竹本修三・鈎卯三郎・田中 豊・天神林孝二（1993）：電子式スペックル・パターン干渉法を用いた地殻応力測定装置の開発，地震，第46巻，pp.135-141.
- Alyoshin, V. A., M. N. Dubrov and A. P. Yakovlev (1980): Laser Interferometer for earth strain measurements, Dokl. Acad. Nauka USSR, Vol. 253, pp.1343-1346 (in Russian).
- Alyoshin, V. A. and M. N. Dubrov (1984) : Long-path Laser Interferometers for geophysical measurements, Manuscripta geodaetica Vol. 9, pp.231-242.
- Araya, A., T. Kunugi, Y. Fukao, I. Yamada, N. Suda, S. Maruyama, N. Mio, and S. Moriwaki (2002): Iodine-stabilized Nd:YAG laser applied to a long-baseline interferometer for wideband earth strain observations, Rev. Sci. Instrum., Vol. 73, pp.2434-2439.
- Berger, J. and R. H. Lonberg (1969): A Laser Strain Meter, Rev. Scientific Instrum., Vol. 40, pp.1569-1576.
- Berger, J. and R. H. Lonberg (1970): Earth Strain Measurements with a Laser Interferometer, Science, Vol. 170, pp.296-303.
- Dolgikh, G.I., A.N. Pavlov, U.Kh. Kopvillem (1983): Observation of Periods of the Free Oscillations of the Earth with a Laser Strainmeter, Izv. Akad. Nauk SSSR, Fiz. Zemli, 1983-No.2, pp.15-20 (in Russian).
- Gerard, V.B. (1971): Geophysical Strainmeter Instrumentation, Recent Crustal Movements, Royal Society of New Zealand, Bulletin Vol. 9, pp.233-236.
- Gouty, N. R., G.C.P. King and A.J. Walland (1974): Iodine Stabilized Laser Strainmeter, Geophys. J. R. astr. Soc., Vol.39, 269-282. Levine, J. and J.L. Hall (1972): Design and Operation of a Methane Absorption Stabilized Laser Strainmeter, J. Geophys. Res., Vol. 77, pp.2595-2609.
- Hirabayashi, J. and S. Takemoto (1994): Development of Crustal Stress Measurement Systems Using Electronic Speckle Pattern Interferometry, Proc. Third International Conference on Optics Within Life Sciences (OWLS III: Optical Methods in Biomedical and Environmental Sciences, Apr. 10-14, 1994, Tokyo, Japan, edited by H. Ohzu and S. Komatsu, Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, pp.277-280.
- Hirabayashi, J. and S. Takemoto (1995): A Borehole Stress-strain Measurement System by Employing Electronic Speckle Pattern Interferometry, Memoirs of the Faculty of Science, Kyoto University, Series of Physics, Astrophysics, Geophysics and Chemistry, Vol. 39, No.2, pp. 177-196.
- Igarashi, G (2000): A Geodetic Sign of the Critical Point of Stress-strain State at a Plate Boundary, Geophys. Res. Lett., Vol. 27, pp.1973-1976.
- Levine, J. and J.L. Hall (1972): Design and Operation of a Methane Absorption Stabilized Laser Strainmeter, J. Geophys. Res., Vol. 77, pp.2595-2609.
- Li, H., S. Takemoto, T. Yamamoto and S. Otsuka (1995) : The Fluid-Core Dynamic Effect Observed with a Laser Strainmeter, J. Geod. Soc. Japan, Vol. 41, pp. 99-108.
- Massonnet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl and T. Rabaute (1993): The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry, Nature, Vol. 364, pp.138-142.
- Mizutani, H. and S. Takemoto (1989) : Application of Holographic Interferometry to Underground Stress Measurements, in Laser Holography in Geophysics, Ellis Horwood Series in Applied Geology, edited by S. Takemoto

- (229P), Ellis Horwood Ltd. (Chichester, UK), distributed by Halsted Press; a division of John Wiley & Sons Inc.(New York, USA), pp.106-128.
- Mogi, K. (1958): Relations between the Eruptions of Various Volcanoes and the Deformations of the Ground Surface around Them, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Vol. **36**, pp.99-134.
- Mukai, A., S. Takemoto and T. Yamamoto (2004): Fluid Core Resonance Revealed from a Laser Extensometer at the Rokko-Takao Station, Kobe, Japan, *Geophys. J. Int.*, Vol. **156**, pp.22-28.
- Ohashi, M., K. Kuroda, S. Miyoki, T. Uchiyama, K. Yamamoto, K. Kasahara, T. Shintomi, A. Yamamoto, T. Haruyama, Y. Saito, Y. Higashi, T. Suzuki, N. Sato, T. Tomaru, D. Tatsumi, S. Telada, M. Ando, A. Araya, S. Takemoto, T. Higashi, H. Momose, J. Akamatsu and W. Morii (2003): Design and construction status of CLIO, *Class. Quantum Grav.* Vol.**20**, No.17, pp.S599-S607.
- Takemoto, S. (1979): Laser Interferometer Systems for Precise Measurements of Ground- Strains, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst.*, Kyoto Univ., Vol. **29**, Part 2, pp.65-81.
- Takemoto, S. (1981): Effects of Local Inhomogeneities on Tidal Strain Measurements, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst.*, Kyoto Univ., Vol. **31**, Part 4, pp.211-237.
- Takemoto, S. (1983): Effects of Meteorological and Hydrological Changes on Ground-Strain Measurements, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst.*, Kyoto Univ., Vol. **33**, Part 1, pp.15-46.
- Takemoto, S. (1986): Application of Laser Holographic Techniques to Investigate Crustal Deformations, *Nature*, Vol. **322**, July 3, pp.49-51.
- Takemoto, S. (1989): Real-time Holographic Measurement of Crustal Deformation, in *Laser Holography in Geophysics*, Ellis Horwood Series in Applied Geology, edited by S. Takemoto (229P), Ellis Horwood Ltd. (Chichester, UK), distributed by Halsted Press; a division of John Wiley & Sons Inc.(New York, USA), pp.129-167.
- Takemoto, S. (1990): Laser Holographic Measurements of Tidal Deformation of a Tunnel, *Geophys. J. Int.* Vol. **100**, pp.99-106.
- Takemoto, S. (1991a): Some Problems on Detection of Earthquake Precursors by Means of Continuous Monitoring of Crustal Strains and Tilts, *Jour. Geophys. Res.*, Vol. **96**, pp.10,377-10,390.
- Takemoto S.(1991b): Geophysical Applications of Holographic and ESPI Techniques, in "Proc. SPIE Vol. **1553**; Laser Interferometry IV: Computer-Aided Interferometry, pp.168-174.
- Takemoto, S. (1993a): Application of Holography and ESPI in Geophysical Sciences, in "Optical Inspection and Testing" edited by J. D. Trolinger, A Publication of SPIE-The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington, USA, , pp.175-196.
- Takemoto, S. (1993b): Laser Holography and Electronic Speckle Pattern Interferometry in Earthquake Prediction and Analysis, *Proc. Second International Conference on Optics Within Life Sciences (OWLS II) Optics for Protection of Man and Environment against Natural and Technological Disasters*, October 4-9, 1992, Munster, Germany, edited by Gert Von Bally and Hans I. Bjelkhagen, Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, pp. 9-18.
- Takemoto, S. (1996): Holography and ESPI in Geophysics, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol.**24**, pp.145-160.
- Takemoto, S. and T. Tsuboi (1988): Application of Holography and ESPI Techniques to Earthquake Prediction, in "Proc. Laser Technologies in Industry", June 6-8, 1988, Porto, Portugal, pp.230-234.
- Takemoto, S. K. Fujimori, Y. Tanaka, T. Yamamoto, M. Higashinaka, S. Otsuka and M. Omura(1994): Continuous Monitoring of Crustal Strains with a Laser Strainmeter in Kobe, in"Proceedings of the Eighth International Symposium on Recent Crustal Movements", December 6-11, 1993, Kobe, Japan, pp. 253-257.
- Takemoto, S., T.Yamamoto, S.Otsuka, K.Fujimori and A.Mukai (1998a): Tidal Strain Observation at Rokko- Takao Station, Kobe, Japan : *Proc. the 13th Inter. Sympo. on Earth Tides*, Brussels, pp.193-199.
- Takemoto, S., A. Mukai, U. Magari and J.Kondo (1998b): A New Measurement System of Tidal Strains by Employing Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI), *Proc. the 13h Inter. Sympo. on Earth Tides*, Brussels, pp.69-73.
- Takemoto, S., T. Yamamoto, A. Mukai, S. Otsuka and K. Fujimori (2003): Crustal Strain Observation for Nine Years with a Laser Strainmeter in Kobe, Japan, *Journal of Geodynamics*, Vol. **35**, pp.483-498.
- Takemoto, S., A. Araya, J. Akamatsu, W. Morii, H. Momose, M. Ohashi, I. Kawasaki, T. Higashi, Y. Fukuda, S. Miyoki, T. Uchiyama, D. Tatsumi, H. Hanada, I. Naito, S. Telada, N. Ichikawa, K. Onoue and Y. Wada (2004): A 100m laser strainmeter system installed in a 1 km deep tunnel at Kamioka, Gifu, Japan, *Journal of Geodynamics*, Vol. **38**, pp.477-488.
- Vali, V., R.S. Krogstad and R.W. Moss (1966): Observation of Earth Tides using a Laser Inter- ferometer, *J. Appl. Phys.*, Vol. **37**, pp.580-582.

Vali, V. and R.C. Bostrom (1969): One Thousand Meter Laser Interferometer, Rev. Scientific Instrum., Vol. **39**, 1304-1306.
Van Veen, H.J. (1970): A Laser Strain Seismometer, North-Holland Publishing Company, Amstrdam, 79pp.

Van Veen, H.J., J. Savino and L. E. Alsop (1966): An Optical Meser Strainmeter, J. Geophys. Res., Vol. **71**, pp.5478-5479.

Progress of Laser Strainmeter Observations in Japan

Shuzo TAKEMOTO *

*Graduate School of Science, Kyoto University

Synopsis

This manuscript describes progress of laser strainmeter observations in Japan including holography and ESPI application for precise ground-strain measurements. A laser strainmeter is the most reliable and stable instrument for use of crustal strain measurements, because it enables the small strains to be measured quantitatively in terms of the wavelength of laser light without using a length of any solid materials. Based on observational data obtained from laser extensometers at Amagase, remarkable strain changes associated with groundwater level changes were found out.

Keywords: laser interferometer, extensometer, strainmeter, crustal strain, earth tides