

# Simple Laser Source を用いたレーザー伸縮計について

竹本 修三・小林 年夫

## ON THE LASER EXTENSOMETER WITH A SIMPLE LASER SOURCE

By *Shuzo* TAKEMOTO and *Toshio* KOBAYASHI

### Synopsis

A new type of laser extensometer with a simple laser source is described. The system uses a Michelson interferometer having the mutually perpendicular optical paths of equal length. The fringe displacement in the interference pattern, formed by the relative change of optical paths, is detected photo-electrically by the image sensor consisting of a row of 64 photodiodes. Examples of ground-strain records obtained from this system at the Amagase Observatory are shown together with records obtained from other laser extensometers installed in the same tunnel.

### 1. はじめに

波長安定化レーザーを光源とするレーザー伸縮計は石英管・スーパーインヴァーナル棒等の基準尺を媒体とせずに、安定した光の波長を単位として2点間の微小な相対変位を直接的に、しかも定量的に測定することができるという優れた特性を持っている。しかしこの方式の伸縮計が広く普及しない原因の一つとして波長安定化レーザーが高価であり、またレーザーチューブの交換にも多額の費用がかかることが挙げられる。そこで波長安定化を考慮していない安価な小型ガスレーザーを光源として使用し、しかも上記の特性をそのまま生かし得るような新しい方式のレーザー伸縮計を開発した。この装置を天ヶ瀬地殻変動観測室に設置して1980年より連続観測を続けている。

今回の報告は装置の概要を述べると共に、天ヶ瀬観測室における同装置と既存の波長安定化レーザーを用いたレーザー伸縮計との比較観測の結果について述べる。

### 2. レーザー伸縮計システム

He-Ne ガスレーザーは  $3.39\ \mu\text{m}$ ,  $1.153\ \mu\text{m}$  及び  $0.6328\ \mu\text{m}$  の3つの波長の発振が可能であるが一般には可視領域で取扱いが容易な  $0.6328\ \mu\text{m}$  の波長が使われている。いま、波長 ( $\lambda$ )  $\approx 0.6\ \mu\text{m}$ , 周波数 ( $f$ )  $\approx 5 \times 10^{14}\ \text{Hz}$  とするとレーザーチューブの内部においては原子の熱運動のドップラー効果によって  $f$  は  $10^9\ \text{Hz}$  程度の幅を持っている。即ち  $\Delta f/f$  は約  $2 \times 10^{-6}$  である。これをレーザーチューブの両端にとりつけた共振ミラーによって共振周波数のみを選択的に取り出すことにより、出力光 ( $\lambda_0, f_0$ ) のスペクトル幅  $\Delta f_0$  は  $10^3\ \text{Hz}$ ,  $\Delta f_0/f_0$  は  $10^{-12}$  程度となる。このようにガスレーザーは発光スペクトルの幅が極めて狭く、時間的・空間的な coherency が良いことから、これを光源として光路差が  $1\ \text{km}$  を越える長大な干渉計方式の伸縮計も作られている<sup>1)</sup>。しかしこの場合、波長安定化を考慮していない一般のガスレーザーを光源として用いたのでは、共振器の温度変化等によって  $f_0$  が  $\Delta f$  の範囲内で変動するので  $10^{-6}$  程度の精度しか得られない。そこでこの方法で微小な地殻ひずみの測定を行うためには何らかの方法でレーザー光の波長安定化をはかる必要がある。例えば Berger and Lovberg<sup>2)</sup> は恒温槽内の石英管でできている長さ  $30\ \text{cm}$  の基準共振器の共振周波数にレーザー出力を lock する方法で  $800\ \text{m}$  の光路差を持つレーザー伸縮計をつくり  $10^{-9}/$

year の精度を得ており, Levine and Hall<sup>3)</sup> は He-Ne ガスレーザーの波長  $3.39\ \mu\text{m}$  の波がメタン蒸気中を通過する際の回転スペクトル吸収を利用して, また Goulyt 其他<sup>4)</sup> は波長  $0.6328\ \mu\text{m}$  の波が沃素蒸気中を通過する際の吸収を利用して波長を lock する方法により  $10^{-10}\sim 10^{-12}$  程度の波長安定度を持つレーザーをつくり, それぞれ数 10 m オーダーの光路差のレーザー伸縮計を製作している。

これに対して今回我々が試作したレーザー伸縮計の基本は Fig. 1 (A) に示すように直交する 2 つの光路

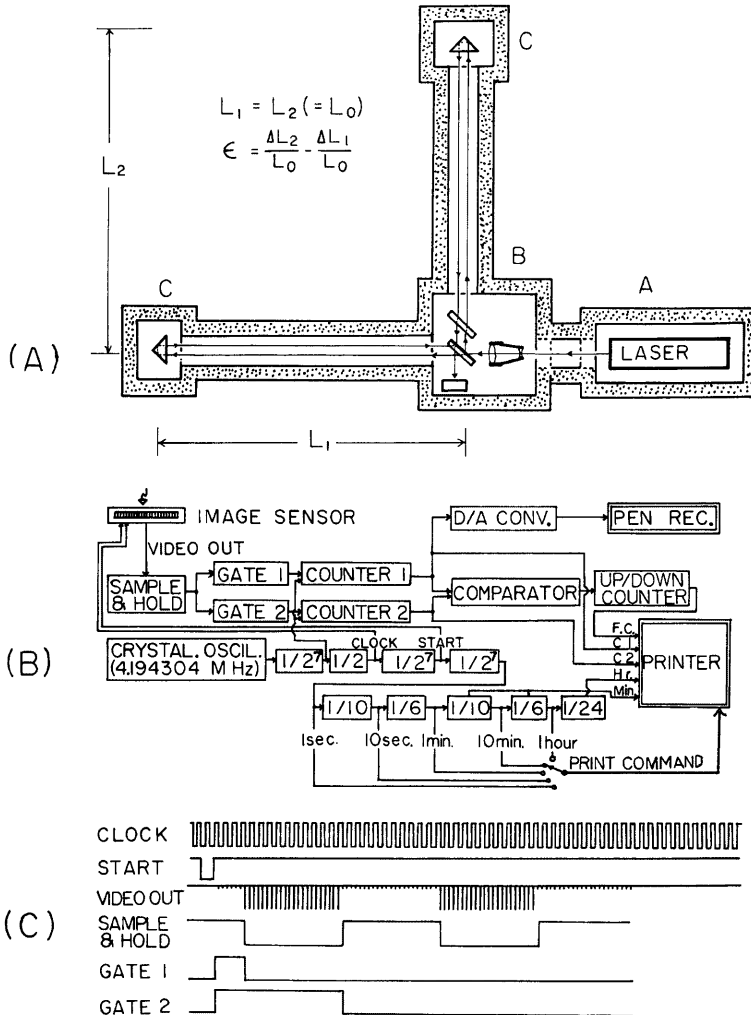


Fig. 1. Configuration of the laser extensometer. (A); optical system, (B); block diagram of recording system, (C); timing chart.

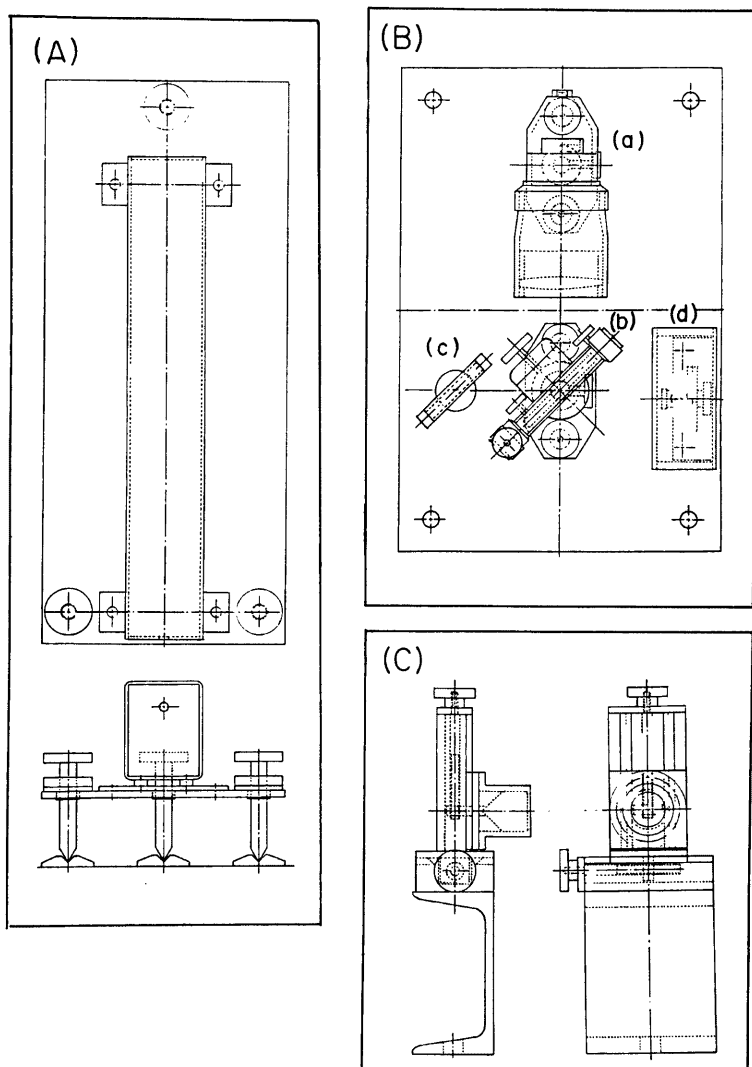


Fig. 2. Mechanical design of optical mount. (A); laser source, (B); beam splitter ((a) beam expanding telescope, (b) half-mirror, (c) compensator, (d) image-sensor housing), (C); retroreflector.

( $L_1$ ) と ( $L_2$ ) を等しくとった Michelson 型の干渉計である。即ち、従来からのレーザー伸縮計の殆んどが波長安定化レーザーを光源とする光路差の大きな干渉計を用いて一軸方向のひずみ変化を検出する方式であったのに対して、今回の方式は直交する二軸のひずみの差を検出するものである。この方式の最大の利点は、 $L_1$  と  $L_2$  の光路差を無くすることによりレーザー発振器の波長のずれの影響が相殺されるから、光源として波長安定化を考慮していない安価なレーザーを使用できることにある。さらに従来からの光路差の大きな干渉計方式の場合には気圧・気温変化に伴う屈折率変化の影響を避けるために光路を真空化することが必要であったが、今回の方式では気圧・気温変化の影響も第一次近似としては相殺されるので、光路内の気圧・気温勾配を無視し得る限り光路を真空化しなくてもよい。

レーザー干渉計の全体の構成図を Fig. 1 (A) に、また各部分の詳細を Fig. 2 に示してある。光源としては出力 0.5 mW, シングルモードの He-Ne ガスレーザー (日本科学エンジニアリング KK 製, NEO-

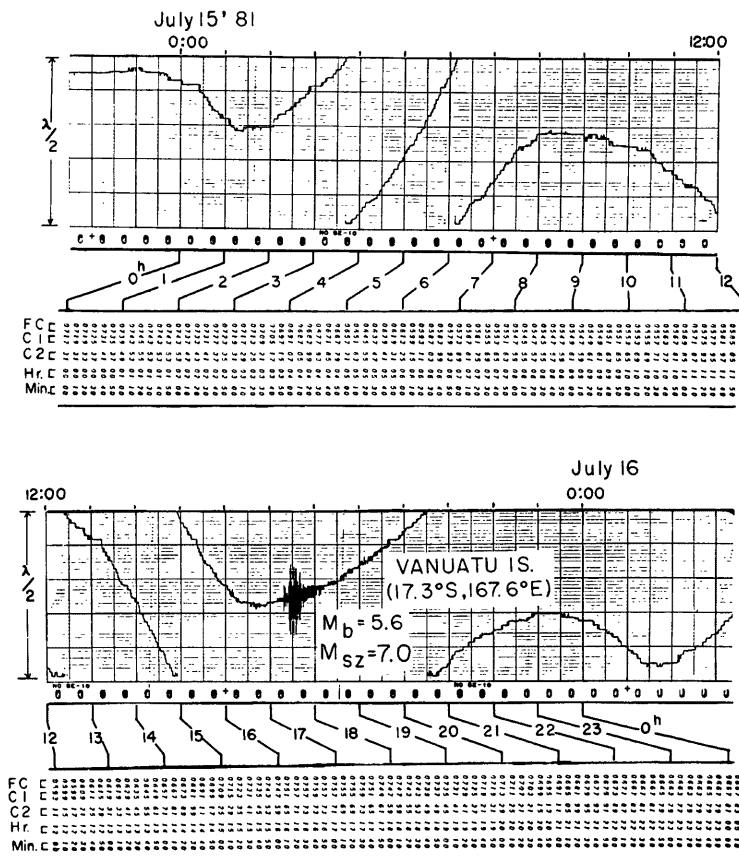


Fig. 3. Examples of records.

M1 型) を使用し, これから出た光はビームエキスパンダー (a) によって約 10 mm $\phi$  の平行光線に換えられた後, ハーフミラー (b) によって直交する二軸に分けられる。その各々はほぼ等距離に置かれたコーナーキューブミラー (c) で反射した後再びハーフミラー (b) で重ね合わされ, 明暗の干渉ジマを生ずる。この際, 一方の光路には光路差補正用としてハーフミラーと同じ厚さの透過ミラー (c) が必要であるが, 今回天ヶ瀬観測室に設置した装置にはこれを付けてない。ハーフミラー及び 2 つのコーナーキューブミラーはそれぞれ微細ネジの付いた真鍮製の台に組み込まれており, これ等は隧道床面より下の岩盤に密着したコンクリート台の上に固定されている。光路は全て厚さ 25 mm ないし 50 mm の発泡スチロール板で保護されている。

ハーフミラーと 2 つのコーナーキューブミラーの間の相対距離変化 ( $\Delta L_2 - \Delta L_1$ ) によって生ずる干渉ジマの移動は 64 エLEMENT のイメージセンサーによって光電変換される。検出回路のブロックダイアグラムとタイミングチャートは Fig. 1 (B), (C) に示してあるが, これは既に天ヶ瀬観測室のスーパーインヴァーナル棒伸縮計の一部にレーザー干渉計装置を取付けて観測を行なっているもの<sup>5)</sup> と基本的には同じである。まず干渉ジマの明 $\rightarrow$ 暗 $\rightarrow$ 明の 1 フリンジがイメージセンサーの面上で 50 エLEMENT (1.25 mm) になるようにハーフミラーの角度を調整しておく。イメージセンサーの各 ELEMENT は発振周波数 4.19304 MHz の温度補償型水晶発振器 (キンセキ KK 製 TCXO-3A 型) から分周した 16.384 KHz のクロックパルスに従って 1 から 64 まで順番に作動し, それぞれの点における干渉ジマの明暗を判定する (VIDEO OUT)。このパルス列を矩形波に整形した後 (SAMPLE and HOLD), スタートパルスから最初に “暗”  $\rightarrow$  “明” になる点までと最初に “明”  $\rightarrow$  “暗” になる点までの 2 つのゲート (GATE 1, 2) をつくり, これ等のゲートに含まれるクロックパルスの 2 倍のパルス列 (32.768 kHz) の数をカウントする ( $C_1, C_2$ )。さらに  $C_1$  と  $C_2$  との差を常時比較して変位が  $\pm 1$  フリンジを越える毎に加減算回路を作動させ (F. C.), フリンジの移動数をカウントする。F. C.,  $C_1, C_2$  の値は時刻と共にプリンターに印字される。このシステムの分解能はレーザー光の半波長の 1/50, 即ち 0.0063  $\mu$ m であり, これがプリンターの最小桁の 2 カウントに相当する。さらに  $C_1$  出力については D/A 変換器を通した後, ペンレコーダーによるアナログ記録も同時に行なっている。これ等の記録の例を Fig. 3 に示してある。図で潮汐ひずみ変化に乗っている地震の例は震央距離約 6000 km の南太平洋で起きた  $M_{sz}=7.0$  の地震の場合である。

今回のレーザー伸縮計は直交する二軸のひずみ変化の差を取り出す方式であるために, 従来から行なわれている一軸方向のひずみ変化を測定する方式, いわゆる Benioff 型の伸縮計とは異なるいくつかの特徴を持っている。まず潮汐ひずみ変化の観測において, 海洋潮汐の荷重影響及び地形・地質等の局所的影響がないものとした場合, Benioff 型の伸縮計による観測値は Love 数 ( $h$ ) 及び志田数 ( $l$ ) を含むが, 今回の方式によれば  $h$  を含む項は消去できる。従って  $l$  の値を直接決定できる可能性がある。また, 地震波の入射方位に対するレスポンスの違いを Van Veen<sup>6)</sup> の論文から引用して Fig. 4 に示してあるが図で (a), (b) は Benioff 型伸縮計の縦波と横波に対するレスポンスであり, (c), (d) は今回の方式の伸縮計のそれぞれに対するレスポンスである。今回の方式の伸縮計は横波に対する感度が良いのが一つの特徴である。

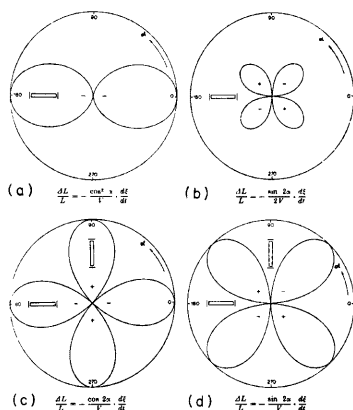


Fig. 4. Directional responses of laser extensometers. (a), (b); Benioff type for longitudinal and transverse waves, (c), (d); laser extensometer in our case for longitudinal and transverse waves, respectively (after Van Veen<sup>6)</sup>).

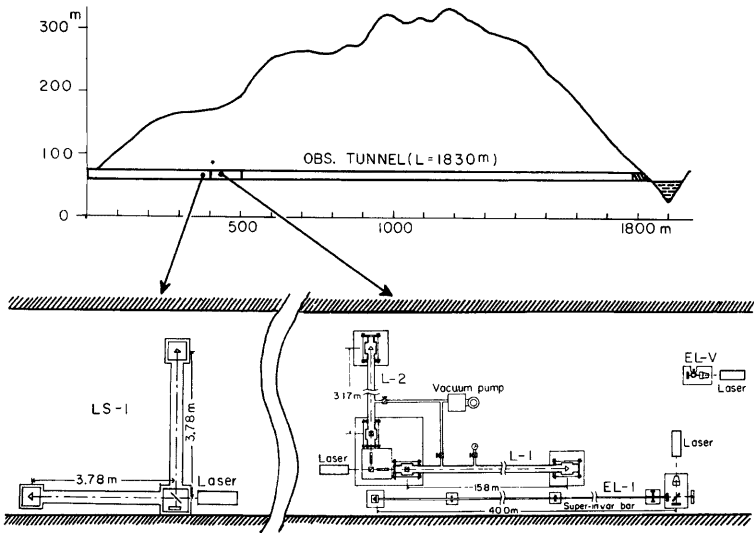


Fig. 5. Arrangement of laser extensometers at the Amagase tunnel.

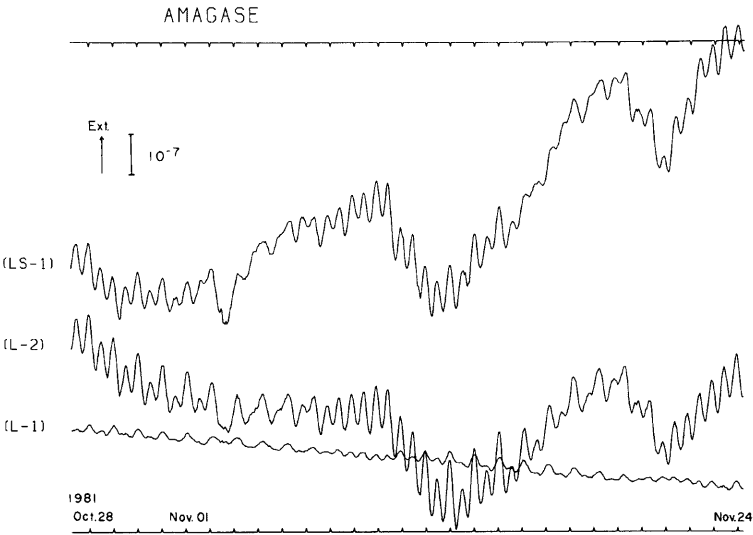


Fig. 6. Comparison of strain changes observed with three extensometers for a period of 28 days.

### 3. 観 測 結 果

天ヶ瀬観測室においては全長 1830 m の隧道の入口から 400~500 m の間に伸縮計・傾斜計等の観測計器が設置され、1967年より観測が続けられている<sup>7)</sup>。この隧道内の入口から約 370 m はいった場所に今回試作したレーザー伸縮計 (LS-1) を新たに設置した。この伸縮計の光路長 ( $L_1$ ,  $L_2$ ) は 3.80 m でありひずみ変化の分解能は  $1.7 \times 10^{-9}$  である。Fig. 5 に示すように同隧道内にはこの伸縮計の他に波長安定化レーザーを光源とする従来の型のレーザー伸縮計 (L-1, L-2) 及び既存のスーパーインヴァーナル棒伸縮計の先端にレーザー干渉計記録装置を取付けた方式のレーザー伸縮計 (EL-1, EL-V) も設置されている<sup>8)</sup>。今回設置した LS-1 成分は隧道の軸と直交する方向と隧道に沿う方向のひずみ変化の差を測定する方式であるから、計器と地盤の結合が良ければこの成分の観測結果は L-2 から L-1 を差し引いたものと等しくなければならない。この点に着目して観測結果の比較を行なった。

Fig. 6 に LS-1, L-2, L-1 成分の約 4 週間の観測結果の例を示してある。潮汐ひずみ変化について見ると、隧道の軸と直交する成分 (L-2) は cavity effect によって増幅されるために隧道に沿う方向の成分 (L-1) に比べて極めて大きい。また LS-1 成分の潮汐ひずみ変化の振幅は L-2 と L-1 成分との差にはほぼ等しいと言える。次に LS-1 及び L-2 成分には数日間に  $3 \sim 5 \times 10^{-7}$  に達する大きな非周期的変化が見られる

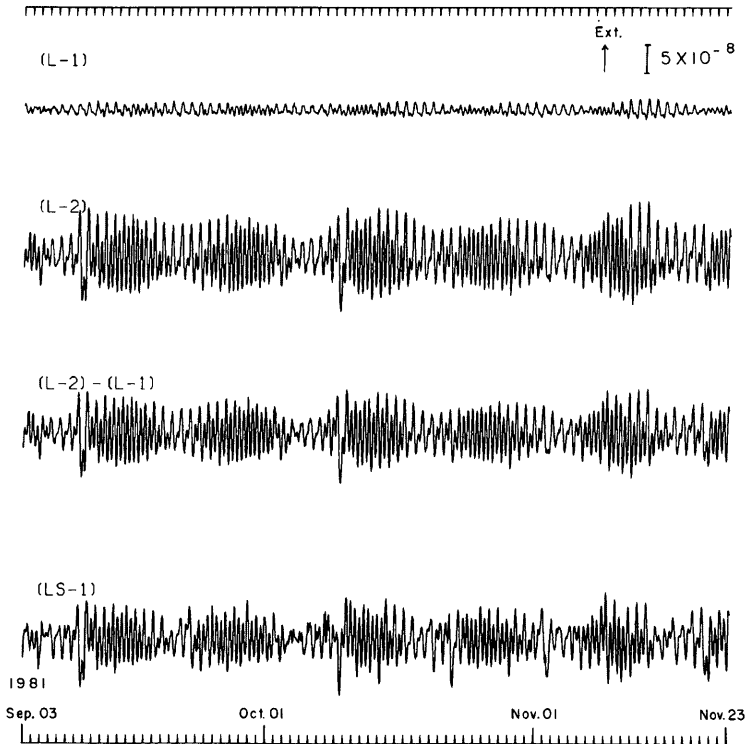


Fig. 7. Tidal strains.

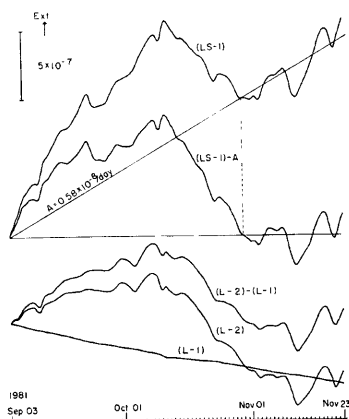


Fig. 8. Secular strains.

両者はほぼ似た変化を示す。計器設置の影響は時間の経過と共に次第に減少するから、あと4～5年経れば (LS-1) は (L-2)-(L-1) と同じオーダーの変化になると考えられる。

#### 4. ま と め

波長安定化を考慮していない安価な小型ガスレーザーを光源として高精度のひずみ測定のできるレーザー伸縮計を開発した。この装置を天ヶ瀬地殻変動観測室に設置して、同観測室に既に設置されている波長安定化レーザーを光源としたレーザー伸縮計と比較観測を行なった結果、両者には本質的な差は認められなかった。

今回開発したレーザー伸縮計は消耗品であるレーザーチューブの交換が安く済むことと共に温度・気圧変化の影響を受けにくいことから、今後適当な観測坑道が無い場所においても地表面から浅いトレンチ内にこの方式の伸縮計を設置することにより、高精度のひずみ測定を行うことができると考えられる。

また、ひずみ地震計として考えた場合、従来の Benioff 型に比べて Love 型の波に対する感度が2倍大きいことから、さらに高密度のイメージセンサーを用いて分解能を上げれば、この方面での利用も大いに期待できる。

おわりに臨み、数多くの御助言をいただいた高田理夫教授、古沢 保助教授に深く感謝すると共に、計器設置及び観測に御協力いただいた山田 勝、広野秋男氏に厚く御礼申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) Vali, V. and R. C. Bostrom: One Thousand Meter Laser Interferometer, Rev. Scient. Instr., Vol. 39, No. 9, 1968, pp. 1304-1306.
- 2) Berger, J. and R. H. Lovberg: A Laser Earth Strain Meter, Rev. Scient. Instr., Vol. 40, No. 12, 1969, pp. 1569-1575.
- 3) Levine, J. and J. L. Hall: Design and Operation of a Methane Absorption Stabilized Laser Strainmeter, J. Geophys. Res., Vol. 77, No. 14, 1972, pp. 2595-2609.
- 4) Goult, N. R., G. C. P. King and A. J. Wallard: Iodine Stabilized Laser Strainmeter, Geophys. J. R. astr. Soc., Vol. 39, 1974, pp. 269-282.

- 5) 竹本修三：レーザー干渉計を用いたスーパーインヴァーナル棒伸縮計について，測地学会誌，第23巻，第4号，1977, pp. 223-231.
- 6) Van Veen, H. J.: A Laser Strain Seismometer, North-Holland Publishing Co., Amsterdam-London, 1970.
- 7) 高田理夫，古沢 保，竹本修三，山田勝：天ヶ瀬地殻変動観測所における地殻変動観測(第4報)，京都大学防災研究所年報，23号 B-1, 1980, pp. 47-54.
- 8) Takemoto, S.: Laser Interferometer Systems for Precise Measurements of Ground-Strains, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 29, Part 2, No. 262, 1979, pp. 65-81.