

## レーザー干渉伸縮計

工業技術院計量研究所  
桜井 好正・清野 昭一・大石 忠尚

この稿は、今回本資料を作成するにあたって、特にお願いして寄稿していただきました。(1977年9月1日原稿受理)

### 1. はじめに

地殻変動の様子を連続的にとらえるために各種の伸縮計や傾斜計が考案、開発されてきた。現在、伸縮計として最も信頼され、広く用いられているものは、40年ほど前に Hugo Benioff によって考案された石英管伸縮計であろう<sup>1)</sup>。この種の伸縮計の感度は  $10^{-11}$  に達すると言われている<sup>2)</sup>。しかし熔融石英のように人工的に作った材料は内部に残った加工ひずみなどの影響で長さが経年的に変化する可能性があり、その大きさについて信頼に足る豊富なデータはないが  $10^{-6} \sim 10^{-8}$  と推定されている<sup>3)</sup>。また石英は熱膨張係数が小さいことで知られているものの  $5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$  程度の大きさはもっており、 $0.02^{\circ}\text{C}$  の温度変化でさえ  $1 \times 10^{-8}$  の伸縮を生じるので、これ以上の精度を得ることは容易ではない。その他に、石英管は通常  $20 \sim 30 \text{ m}$  程度が限界で、局所的な変動を避けてもっと長い距離での地殻の伸縮を観測するには不向きであるという問題もある。

そのような事情から、単色性にすぐれ、干渉性もよいレーザーが出現すると、高感度で基点間隔の長い伸縮計としてレーザー干渉伸縮計が検討された。1965年米国の V.Vali らは初めて長さ  $10 \text{ m}$  のレーザー干渉伸縮計を成功させた<sup>4)</sup>。ファブリー・ペロー干渉計の光路を気密管で覆っている。干渉じまの読み取りは、干渉じま信号を光電検出してブラウン管上にリサージュ図形を描かせ、この輝点の位置から干渉じまの読み取りをする方法により  $0.01$  フリンジの感度を得ている。さらに翌年には干渉じまの読み取り法を改良し、光電検出器を干渉じまの移動に追従させる方式に変え、石英管伸縮計の記録と比較した<sup>5)</sup>。その後英国の G.C.P.King らも  $55 \text{ m}$  のレーザー伸縮計を作った<sup>6)</sup>。コーナーキューブを反射鏡とするマイケルソン干渉計で、光路は真空になっている。また Vali らは伸縮計を飛躍的に拡大し、 $1,020 \text{ m}$  のものを作った<sup>7)</sup>。2光束干渉に近い、低反射率の鏡を用いたファブリー・ペロー干渉計で、検流計の反射鏡を利用して干渉じまを追尾する読み取り方式を用いている。同じく米国で、トンネル内ではなく、地上に設置された  $800 \text{ m}$  のレーザー伸縮計が出現した<sup>8)</sup>。光路はむろん真空パイプで覆われ、両端の基点は二重に空調された小屋で囲われている。干渉計はマイケルソン型で、干渉じま計数法により  $4 \times 10^{-10}$  の感度を得ている。最近の試みとしては干渉じまを読み取る代わりにレーザー間のビートにより地殻の伸縮を検出することが行われている。その一つは米国の J.Hall らによるもの<sup>9)</sup>で、波長  $3.39 \mu\text{m}$  の赤外レーザーを用い、長さ  $30 \text{ m}$  の球面のファブリー・ペロー干渉計を伸縮計とし、この間隔の変化に合わせてレーザーの発振周波数を変動させる。他方に波長安定化した同じく赤外のレーザーを用意し、これら2台のレーザーの間のビート周波数の変動を周波数カウンタで計数するという方式である。他の一つは英国で N.R.Goulty らが試みたもの<sup>10)</sup>で、こちらは可視光の波長  $0.6328 \mu\text{m}$  を用いて長さ  $54 \text{ m}$  の伸縮計を構成している。

計量研究所でも、地殻ひずみそのものの研究ではなく、長さの精密測定の立場から、1969年頃から

松代の地震観測所の坑内を借用して断続的にレーザー干渉伸縮計の研究を進めてきた。その結果いくつかの観測記録が得られ、それに用いた伸縮計の誤差の評価も行ったので、それらについて以下に述べる。

## 2. レーザー伸縮計の原理

波長安定化レーザー、2光束コーナーキューブ干渉計および干渉じまの読み取り・記録装置よりなるレーザー伸縮計の構成を Fig.1 に示す。レーザー光はコリメータにより直径約 10 mm の平行光束となって、第 1 基礎上に固定された干渉計に入射する。ビームスプリッタで反射された光束は光路長変調器を通り、参照用コーナーキューブで折り返されてビームスプリッタにもどる。一方ビームスプリッタを透過した光束は 25 m 隔てた第 2 基礎上の測定用コーナーキューブで折り返され、移相器を通してビームスプリッタにもどる。ビームスプリッタ上で、これらの光が再び重ね合わされて干渉が生じる。25 m の光路の大部分は気密管中を通り、露出部の光路長は参照側と測定側とで等しくしてある。光路長変調器は平行平面ガラスを回転振動させて光路長を周期的に変化させるもので、Lamb dip の中心に発振周波数をロックするために周波数変調がかけられている方式のレーザーの場合には不用である。移相器は 2 個の平行平面ガラスからなっており、一方は固定し、他方はそれに対しわずかに傾けることによって、光束の 2 つの部分に  $\lambda/4$  の光路差を与えるものである。したがって得られる干渉じまは  $90^\circ$  位相の異なる 2 つの部分に分かれており、これらの光の強度をそれぞれのフォトダイオードで光電変換して干渉次数アナログ変換部に送る。

一般に振幅分割方式の 2 光束干渉計の干渉光強度は

$$I = I_0 \{1 - a \cos(2\pi x)\} \quad (1)$$

で表される。 $I_0$  および  $a$  ( $\leq 1$ ) は定数、 $x$  は  $x = 2nd/\lambda$  で表される干渉次数である。光路を真空または気密にすることによって光路の屈折率  $n$  を一定にすれば、干渉次数の変化  $\Delta x/x$  は干渉計の鏡面間隔の  $d$  の変化すなわち地殻ひずみ  $\Delta d/d$  を表すことになる。

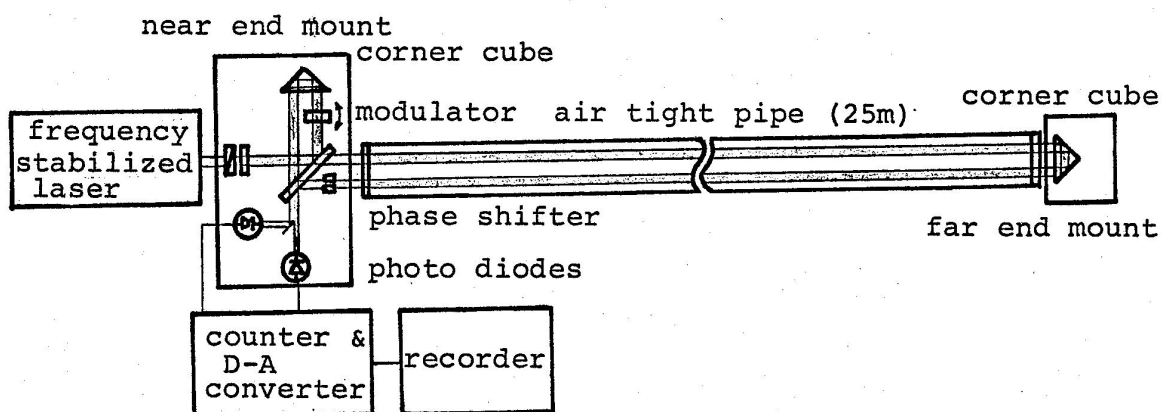


Fig.1 レーザー伸縮計の構成。波長安定化レーザー、コーナーキューブ干渉計、干渉次数アナログ変換器、記録計よりなる。

干渉光の位相の変化から干渉次数の変化をアナログ表示するには、2個のフォトダイオードからの信号を整形し、組み合わせて、干渉次数1の変化に対し4個の割合でパルス列を作り出し、さらに干渉次数の変化の方向も弁別して、可逆カウンタにより計数する。前に述べたように光路長あるいは波長が変調されているために干渉次数も周期的に変化し、カウンタの数値も周期的に変化する。この時々刻々変化する計数値をリアルタイムでD-A変換すると、最小分割単位である $\lambda/8$  ( $\lambda/2 \times 1/4$ ) に比例した電圧を単位とした階段状に変化する電圧が得られる。この電圧を低域フィルタを通して変調周期以上の周波数成分を除去すると、干渉次数の計数に伴うステップ状のいわゆる量子化ひずみは干渉次数の変調の周波数より高い周波数成分となすので、これらはほとんど除去されてしまい、地殻ひずみの変化に伴う比較的遅い干渉次数の変化が正確にアナログ表示される。この変換の誤差は、条件を適当に選べば、 $\lambda/200$  以下にすることができる<sup>11)</sup>。

### 3. 測定結果

レーザー伸縮計を地震観測所の坑内でやや入口に近い場所に据えて取った記録の一例が **Fig.2** である。同図には参考のため、その地点から約 150 m 屋に設置されている同じく南北方向の石英管伸縮計の記録も併せて示してある。これらの記録は相当によく一致する部分もあり、全く異なる部分もある。レーザー伸縮計はトンネルの入口に近く、川や井戸の水源に近い。さらには石英管伸縮計との中の岩盤に水をよく通す部分があるなど地質、地形の違いの影響が含まれているので、これらの記録の差異を測定方式による違いに帰することは無理があろう。**Fig.3** は記録の一部を拡大したもので、低気圧の通過による気圧の急激な変化に伴って地殻も伸縮していることがよく分かる。この伸縮は  $10 - 9$  程度 ( $25 \text{ m}$  で  $0.025 \mu\text{m}$ ) の微小なものであるが、レーザー干渉計では容易に検出できる。**Fig.4** は 1976 年 7 月 28 日早朝の中国唐山市付近の地震に伴う地殻の伸縮をレーザー伸縮計が記録したものである。この地震によって  $10 - 7$  程度の地殻の伸縮があり、それが 1 時間程かかって減衰している様子がよく分かる。地震前後の記録のくいちがいはストレインステップではなく、伸縮が記録範囲を越えたため自動的に記録のリセットが行われたためのものである。

レーザー伸縮計の光路はほとんど気密管で覆われていて、空気の屈折率の変化によって測定値に誤差を生じることを防いでいる。しかし気密管を設置することが困難な場合もあるので、空気の屈折率の変化を気圧や気温の変化から計算し、測定値を補正することも一つの方法として考える必要がある。空気の屈折率と気圧、気温などの関係を表す式は  $B \cdot \text{Edle}'n^{12)}$  や増井<sup>13)</sup> によって提案されているが、 $10 - 8$  以上の高精度領域ではその有効性がはっきりしない。そこでレーザー干渉計を用いて、気圧計や温度計から計算される空気の屈折率の変化の補正がどの程度うまく行われるかを試してみた<sup>14)</sup>。マイケルソン干渉計の両腕を等長とし、一方の光路は気密管で覆って空気の屈折率変化を防ぎ、他方は気密にされていない塩化ビニールの筒で覆って気流の乱れの影響だけを防いでいる。したがって干渉計の出力は空気の屈折率の変化をまともに受ける。これに対して気圧、気温の変化から空気の屈折率の変化を計算して補正を加え、その結果がどうなるかをみる。先に述べたように干渉計の両腕は等長であるので地殻の変動やレーザーの波長波長変動などの影響は全く受けず、空気の屈折率の補正が正確に行われれば補正された出力は一定になるはずである。**Fig.5** がそのような実験の結果の一例で、8 時間の間にほぼ  $1.5 \times 10 - 7$  の屈折率の変化があった (F: 干渉計出力, P: 気圧) のに対し、補正された出力 C は  $7 \times 10 - 9$  程度の変化であり、それも大部分がドリフトであるので、補正に用いた増幅器をもっとドリフトの少ないものにすればさらに良い結果が得られよう。

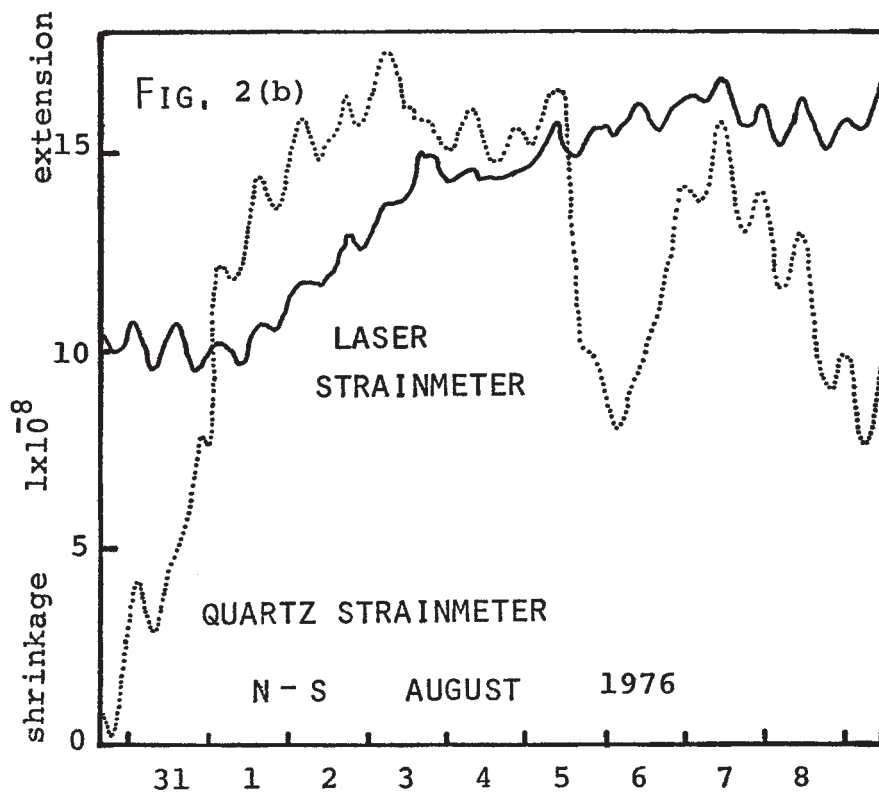
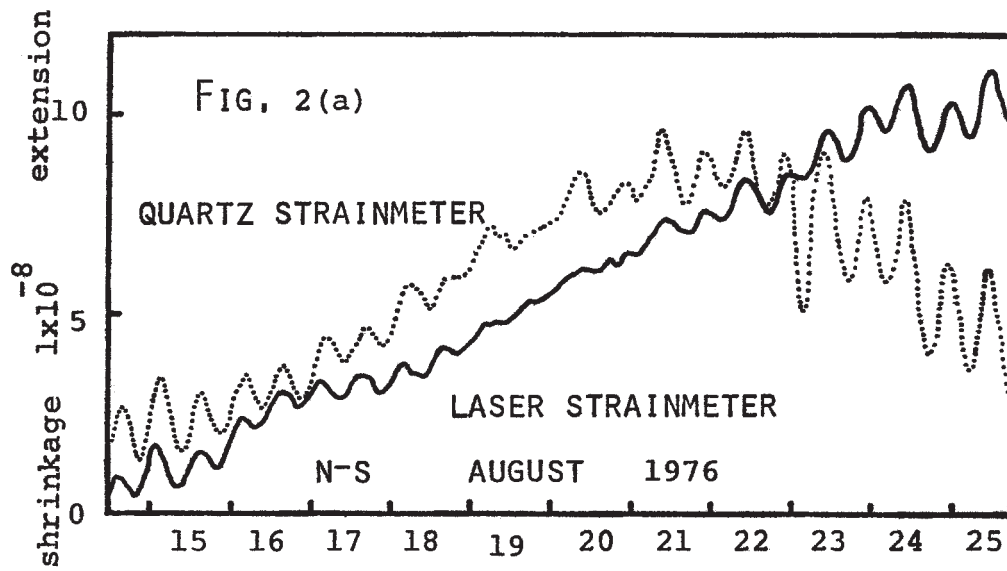


Fig.2 25 m のレーザー伸縮計の記録. 参考のため松代地震観測所の同じ南北方向の 100 m の石英管伸縮計の記録を点線で示した. (a)は2つの記録がかなり一致している例で, (b)はかなりくいちがっている例.



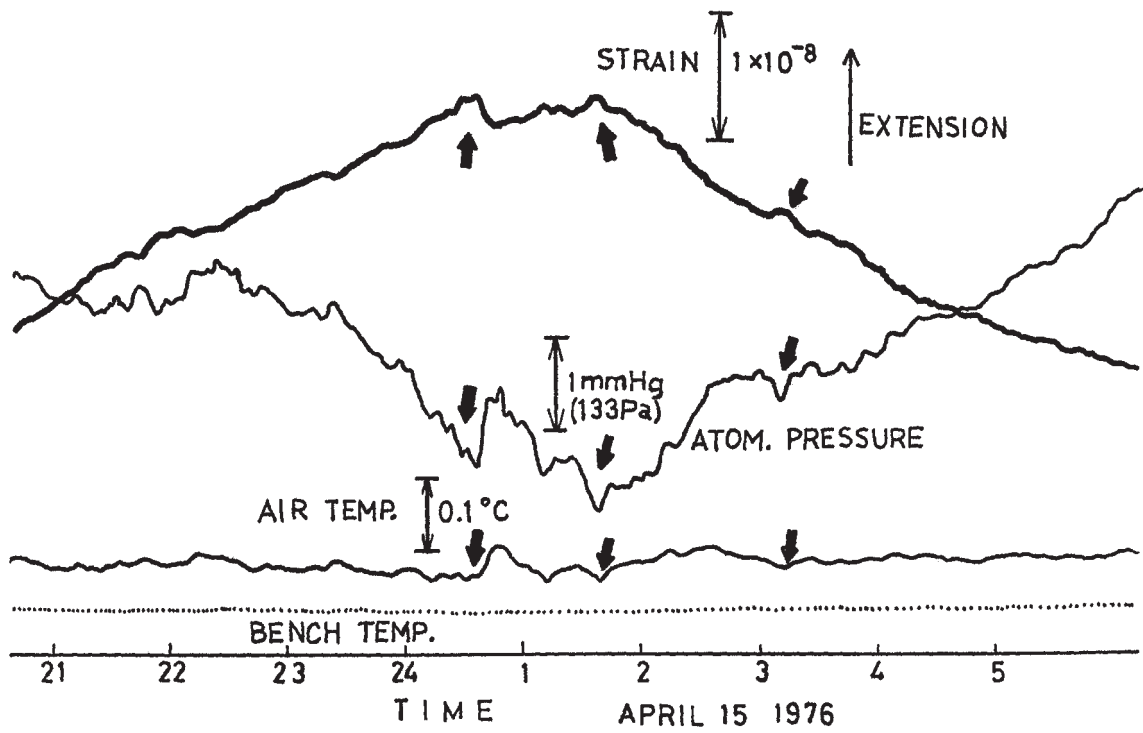


Fig.3 急激な気圧の変化に伴う気温、地殻の伸縮の記録.

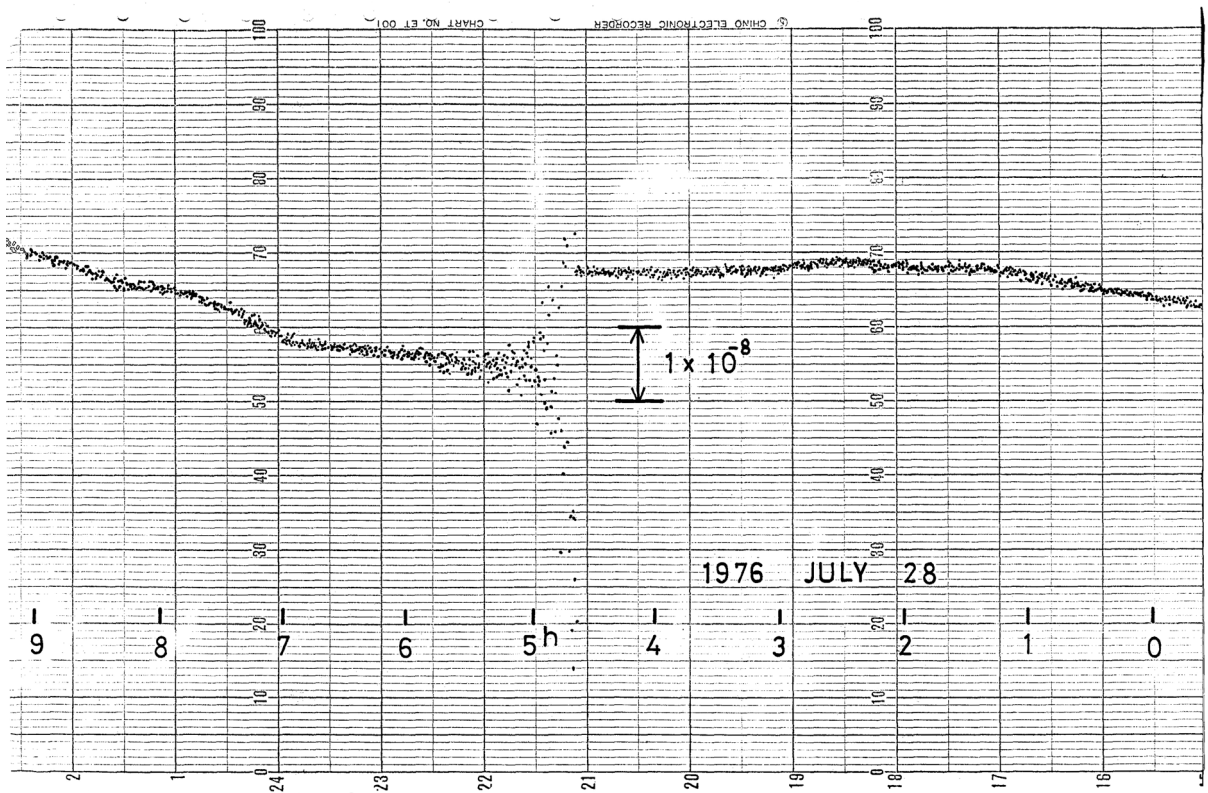
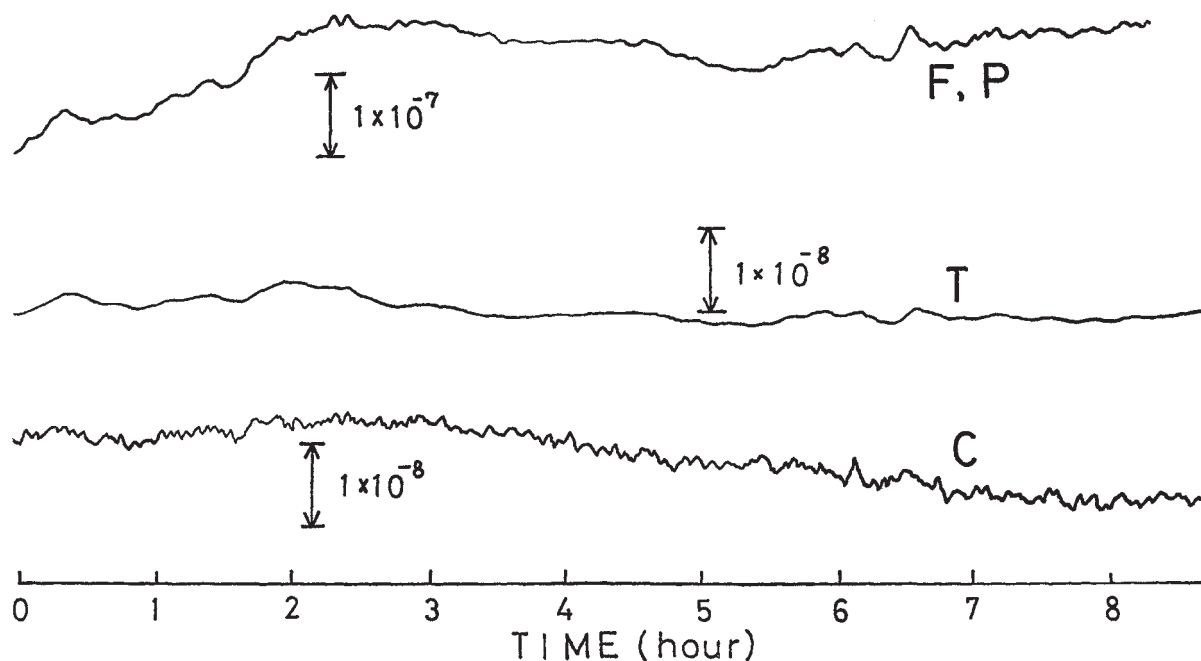


Fig.4 中国唐山地震の影響.



**Fig.5** 光路の空気の屈折率の変化を補正する実験の記録. F, Pはそれぞれ干渉次数, 気圧を, Tは気温を, Cは空気の屈折率の変化を補正した結果を示す.

#### 4. レーザー伸縮計の誤差評価

筆者らがこれまで使用してきたレーザー伸縮計につき誤差の評価を行った. 詳細については文献<sup>15)</sup>があるので, 結果のみ引用すると表1のようになる.

表1 レーザー伸縮計の誤差評価

誤差要因	最大誤差	条件
レーザーの波長変動	$1 \times 10^{-9}$	H.P.model5525B
アナログ記録の変換誤差	$1 \times 10^{-10}$	正弦波変調, 変調幅1フリンジ
光路変調器のドリフト	$1 \times 10^{-9}$	ガラスの厚み: 8 mm 入射角: $10^\circ$ , 入射角変化: $10''$
気密管の圧力変動	$1 \times 10^{-9}$	圧力変動: 0.4 Pa (3 $\mu$ mHg)
光路露出部の空気の屈折率の変化	$1 \times 10^{-9}$	露出部光路差: 5 mm 屈折率変化: $5 \times 10^{-6}$
伸縮計の長さ 25 m に対する総合誤差 $2 \times 10^{-9}$		

## 5. むすび

レーザー伸縮計の研究動向を概観し、計量研究所が松代地震観測所の坑内を借用して研究を進めているレーザー伸縮計の動作原理、装置、測定結果、測定の精度評価などについて述べた。これまでの測定精度は  $2 \times 10^{-9}$  程度であったが、今後ヨウ素安定化レーザーによる波長安定度の向上、気密管内を真空にする、基線長を拡大するなどの手段によって  $10^{-10}$  オーダーの精度を得ることはさほど困難ではないと思われる。

尚その他にレーザーの寿命や、高湿下の環境対策、データ処理法など、レーザー伸縮計について種々の問題点は残されているが、技術的にみても解決は可能であると考えられる。

最後に本研究の遂行にあたり、実験場所を供与され、また石英管伸縮計のデータの提供など終始ご協力と有益な助言をいただいた気象庁松代地震観測所の方々に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) V.Vali : Sci,Am. 12 (1969).
- 2) 笠原慶一 : 計測と制御, 8, 2 (1969) 125.
- 3) 桜井好正 : 数理科学 86 (1970) 36.
- 4) V.Vali, R.S.Krogstad and R.W.Moss : Rev. Sci. Instrum. 36, 9 (1965) 1352.
- 5) V.Vali, R.S.Krogstad and R.W.Moss : J. Appl. Phy. 37, 2 (1966) 580.
- 6) G.C.P.King, R.G.Bilham, V.B.Gerald, D.Davies and P.H.Sydenham : Nature, 223 (1969) 818.
- 7) V.Vali, and R.C.Bostrom : Rev. Sci. Instrum. 39, 9 (1968) 1304.
- 8) J.Berger and R.H.Lovberg : Rev. Sci. Instrum. 40, 12 (1969) 1569.
- 9) J.Levine and J.L.Hall : J.Geophys. Res., 77 (1972) 2595.
- 10) N.R.Goulty, G.C.P.King and A.J.Wallard : Geophys.J.R. astr. Soc.39 (1974) 262.
- 11) 大石, 桜井, 清野 : 計測自動制御学会論文集, 24, 2 (1975) 70.
- 12) B.Edle' n : Metrologia, 2, 2 (1966) 71.
- 13) T.Masui : Rev D' optique, 36 (1957) 281.
- 14) 大石, 桜井, 清野 : 光学, 5, 5 (1976) 176.
- 15) 清野, 大石, 桜井 : 計測自動制御学会論文集, 13, 2 (1977) 174.