

レーザー干渉計による伸縮計・ひずみ地震計の Calibration について

竹 本 修 三

CALIBRATION OF EXTENSOMETERS AND STRAIN SEISMOMETERS WITH A LASER INTERFEROMETER

By Shuzo TAKEMOTO

Synopsis

The use of a laser interferometer has been one of the most successful technique for calibrating extensometers and strain seismometers. We have calibrated horizontal extensometers and strain seismometers installed at the Donzurubo Observatory and the Amagase Station using a Michelson interferometer with a He-Ne gas laser source. The sensitivity of these instruments have been determined by comparing the absolute displacement, measured by the motion of interferometric images, with the recorded output amplitude of ordinary observing system.

1. は じ め に

地震に伴う急激な strain field の変化が現在の観測計器の精度内で十分見出し得るという理論的な根拠は、“くいちがいの弾性論”に基づいて、半無限弾性体の場合の F. Press, 弾性球モデルを考えた場合の A. Ben-Menahem その他、等の計算によって与えられている。^{1), 2)} 一方、観測の方からも地震に伴う strain step がしばしば認められており、筆者等はローラー形スーパーインヴァール棒伸縮計の観測記録を用いて、これらの観測値が定性的には“くいちがいの弾性論”から計算された residual strain field のパターンと比較的良く一致することを報告した。³⁾ しかしながら今後このような定性的な議論から一歩進めて厳密に定量的な取り扱いをしようとする場合には、現在使用している観測計器の感度決定の方法そのものの信頼性について再検討して見なければならない。なぜならば、石英管或いはスーパーインヴァール棒等の熱膨張係数の小さい材質を基準尺として、 $10^{-8} \sim 10^{-10}$ という極めて微小な量の地殻のひずみを測定する伸縮計・ひずみ地震計の計器感度を通常の観測範囲内で直接求めることが困難であるために、多くの場合これよりも大きな変化量に対する計器の感度を求め、その結果を通常の観測範囲に内挿してこの領域での計器感度としている。このために±40%程度以上の誤差はさけられず、観測量を定量的に扱おうとする場合、厳密な議論には耐えられない。この点、レーザー干渉計を用いて伸縮計、ひずみ地震計の calibration を行なえば、波長の非常に安定したレーザーの光波を距離測定基準として用い、通常の観測範囲内の微小変化量に対する計器感度を直接測定することができる。そこで、今回 He-Ne ガスレーザーを用いて Michelson 形の干渉計装置をつくり、天ヶ瀬地殻変動観測室及び屯鶴峯地殻変動観測所に設置されているローラー形スーパーインヴァール棒伸縮計・石英管ひずみ地震計の calibration を行なった。

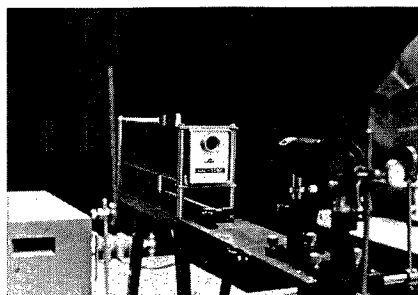


Photo. 1 General view of laser interferometer.

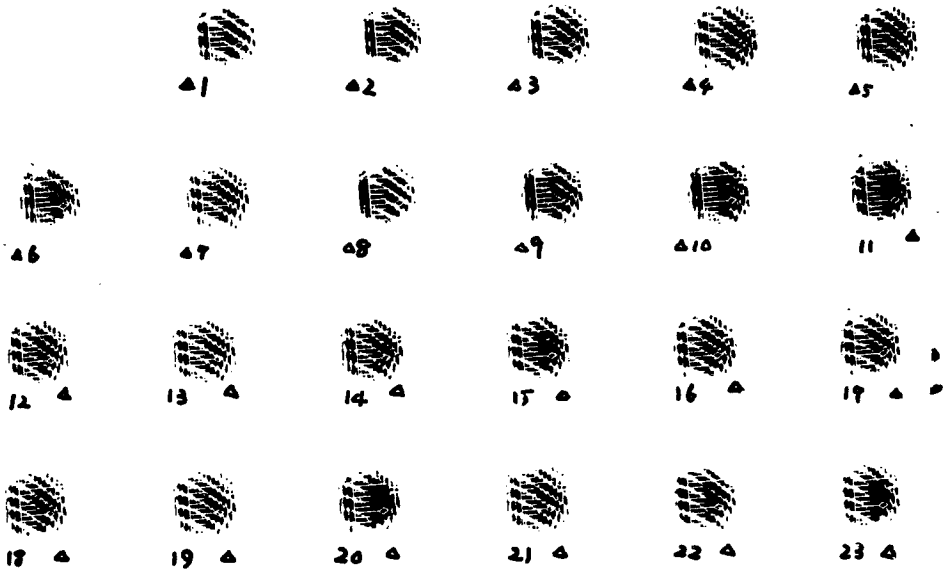


Fig. 1 Reproduction of film records showing interferometric images.

2. 測定方法

Photo. 1 にレーザー干渉計装置の概観を示す。使用したレーザーは小形内部ミラー形 He-Ne ガスレーザーで波長 $6328\text{\AA}$ 、シングルモード出力 1 mW である。このレーザー本体と、コリメーター、ハーフミラー及び二枚の全反射ミラーで Michelson 形の干渉計システムを構成する。まずレーザービームをコリメーターで $30\text{ mm}\phi$ の平行光線とし、これを光軸に対して 45° の角度に置かれたハーフミラーで二つの互いに直角な光路に分ける。このうちの一つは伸縮計・ひずみ地震計の基準尺の自由端に近い位置に取りつけた全反射ミラー (M_1) までを往復する測定光路であり、他の一つはこの測定光路に直角な方向の定位置に固定された全反射ミラー (M_2) を往復する基準光路である。この二つの光路を経た光は再びハーフミラーを通して合成され、 M_1 , M_2 のいずれかを光軸に対してわずかに傾むけた時、明暗の干渉シマを生ずる。この干渉シマは測定光路の M_1 の微小距離変化につれて平行移動し、スクリーン上で観測される明暗のシマ模様は M_1 が $0.3164\text{ }\mu$ ($=\lambda/2$) の変位をするごとに同じ位置で繰り返される。そこでこれをシステムに独立なスケールといっしょに写真記録し、記録上の基準点からのシマ模様の動きを順次読み取ることによって、伸縮計・ひずみ地震計の基準尺に外部から与えた微小変位量の絶対値を知ることができる。この際これと並行して、通常の観測記録方式による記録（ローラー形伸縮計では光学拡大装置によるプロマイド記録、容量変化形ひずみ地震計では極板の相対変化に比例した電圧変化の記録）を得る。そして基準尺に微小変位を与えた時にこれらの記録上にあらわれる変化の大きさをさきのレーザー干渉計システムから求めた変位の絶対値と比較するこ

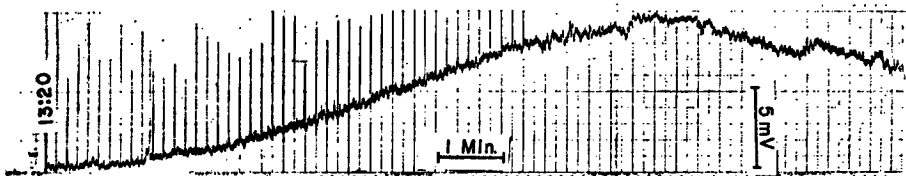


Fig. 2 Recording from strain seismometer of calibrating test (DSS-2).

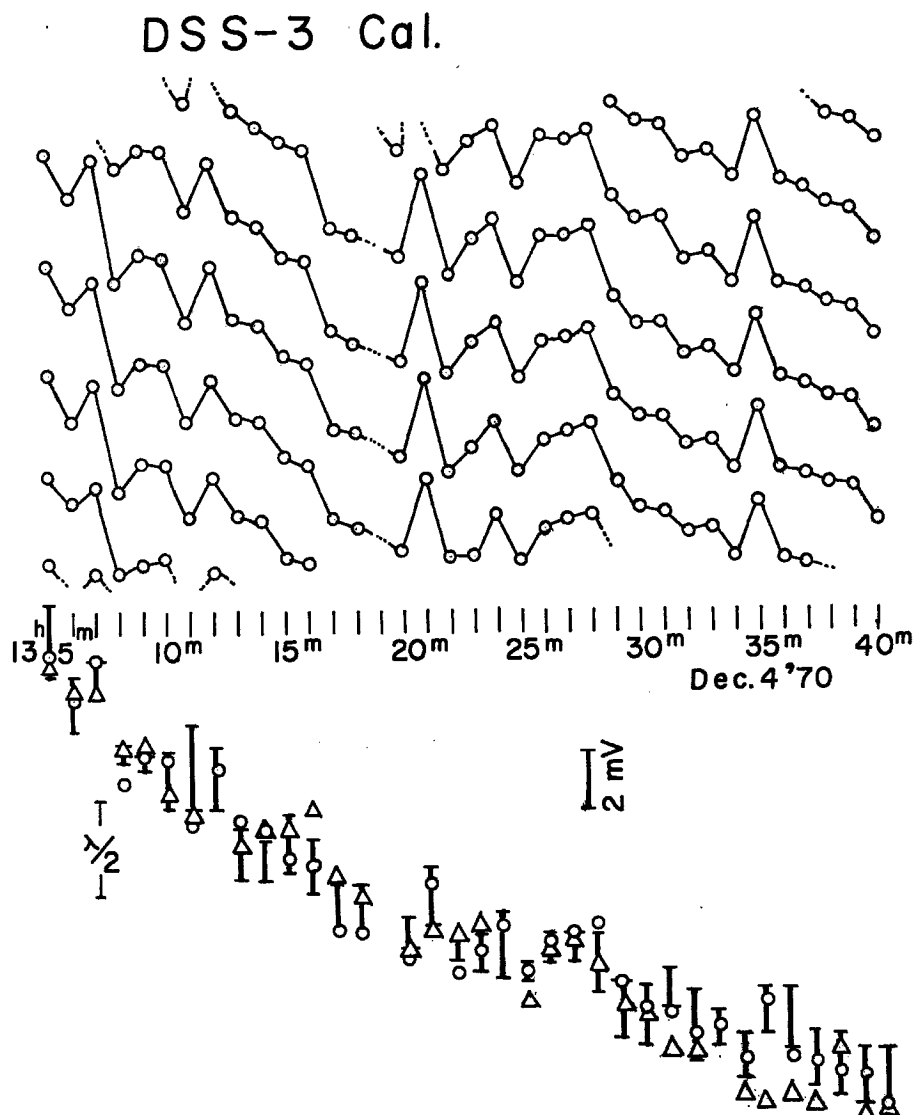


Fig. 3 Comparison of interferometric image displacements and corresponding record from DSS-3 strain seismometer at the Donzurubo Observatory.

とにより計器感度を測定した。なお、同様の試みは G. Hade その他によって Lamont Geological Observatory の Ogdensburg Station のひずみ地震計について行なわれている⁴⁾。

3. 測定結果

Fig. 1 に干渉ジマの写真記録のいくつかの例を並べて示す。この各々はカメラに接写リングを付けて $F=1.4$ (開放), $1/1000$ のシャッタースピードで撮影したものでフィルムは TRI-X を使用した。

基準尺への変位の与え方は、最初鉛でつくった重さの異なるいくつかの荷重を瞬間的にぶらさげて一定時間後にとりはずすことにより、step 状の変位の記録をとる方法を考えたが、短周期の back-ground noise が

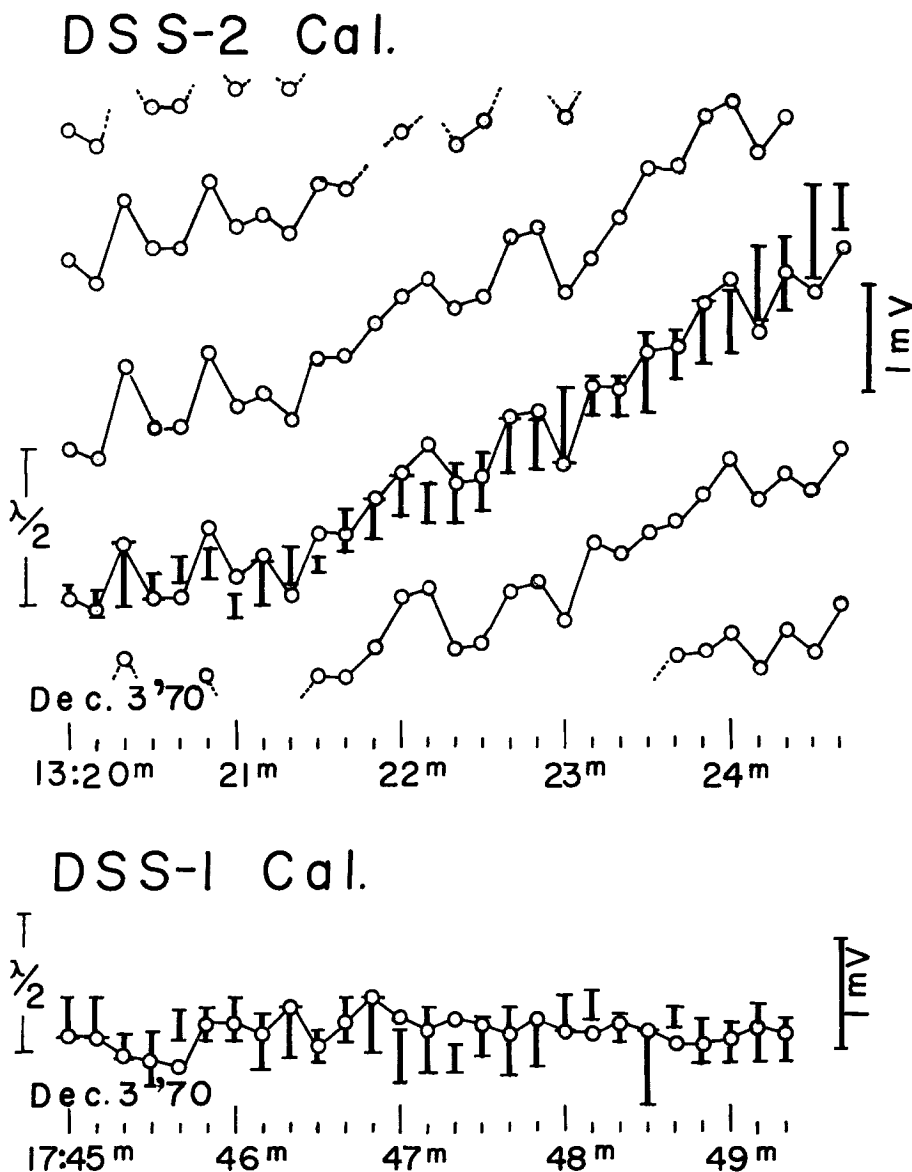


Fig. 4 Comparison of interferometric image displacements and corresponding records from DSS-2 and DSS-1 strain seismometers at the Donzurubo Observatory.

かなり大きいために干渉ジマが常に振動していて、荷重をかけた場合とかけない場合のレベルの差が読みとれなかった。そこで次に基準尺の固定端に近い部分をアルコールランプ・ハンダゴテ等の熱源であたためてやり、基準尺の熱膨張を利用して連続的な変位を与える方法をとった。この場合にも back-ground noise による振動はあるが、それでも干渉ジマが一方方向に動いて行く傾向は読み取ることができた。この方法で基準尺に微小変位を与えた時の通常の観測方式で得られた記録の例として、Fig. 2 に屯鶴峯地殻変動観測所のひずみ地震計 DSS-2 (N4.5°E) について得られたものを示した。図で 10 秒ごとに time mark がはいてい

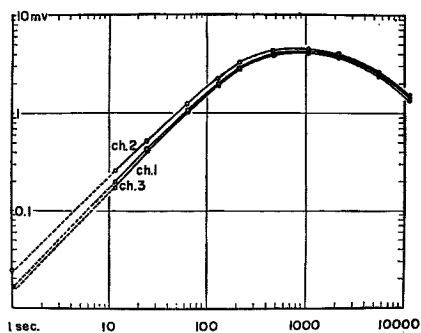


Fig. 5 Amplitude response curves of band pass filters.

るが、この時間間隔で干渉ジマのずれの様子を順次写真記録して行ったものである。他の成分についても 10 秒あるいは 1 分の間隔で干渉ジマの写真記録を撮って行った。Figs. 3, 4 は屯鶴峯地殻変動観測所のひずみ地震計三成分について、このようにして得られた干渉ジマのずれを通常の観測方式による記録と比較したものである。図で白ヌキの円を実線で結んだものが基準点から測った干渉ジマの動きであり、上下の巾を持った太い実線が通常の記録で得られたこの時刻での変位量である。これに巾があるのは短周期の back-ground noise によるものである。また Fig. 3 に△で示してあるのはこのひずみ地震計と同じ基準尺を使用した伸縮計光電変換装置⁵⁾によるデジタル記録の変化量であり、ひずみ地震計のアナ

ログ記録の変化の量とよく一致している。

この結果、ひずみ地震計の基準尺が $\lambda/2 = 0.3164 \mu$ の変位をした時の通常の観測方式による記録上の感度は DSS-1 (E4.5°S): (1.2mV), DSS-2 (N4.5°E): 1.2 ± 0.3 mV, DSS-3 (N40.5°W): 3.9 ± 0.9 mV となり基準尺の長さは三成分とも 16.45 m であるから、記録計を 5 mV の range で使用した場合、記録上の 1 mm の感度はひずみにして、それぞれ 1.1×10^{-9} , $1.42 \sim 0.85 \times 10^{-9}$, $0.43 \sim 0.27 \times 10^{-9}$ となる。但し、この感度は極板間隔によって大きく変わるので絶対的なものではない。また、実際の観測状態ではこの出力を Fig. 5 に示すような特性を持つ RC の band pass filter を通しているため、さらに感度は低くなる。Fig. 5 の縦軸は入力 10 mV に対する各周期での振巾特性である。

Fig. 6 は天ヶ瀬地殻変動観測室の坑道方向に置かれた基準尺の長さ 40.2 m のスーパーインヴァール棒伸縮計の calibration の結果である。太い実線はプロマイド記録上の変位の大きさをコンパレータで読み取った値である。これと干渉ジマのずれとを比較すると伸縮計の基準尺が $\lambda/2$ の変位をうけた時、プロマイド

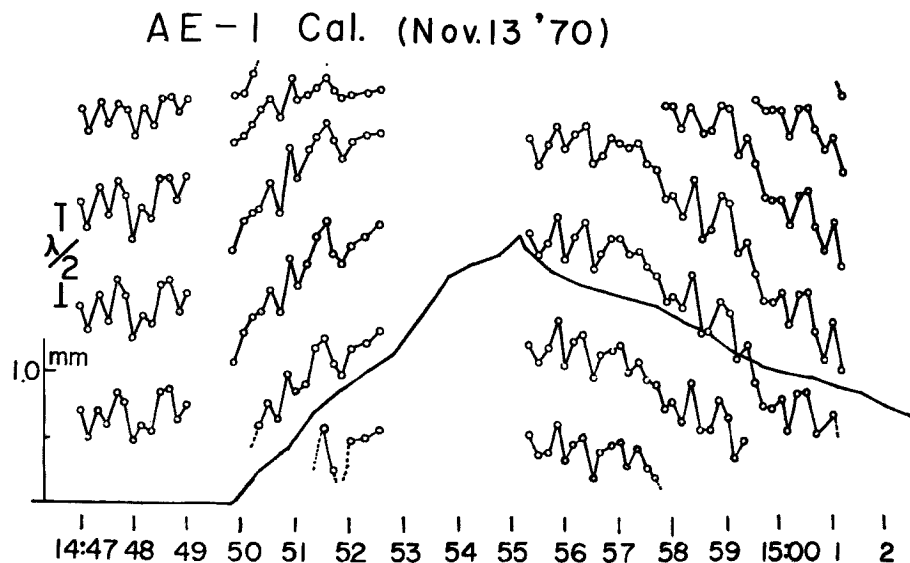


Fig. 6 Comparison of interferometric image displacements and corresponding record from AE-1 extensometer at the Amagase Station.

DE-1 Cal.

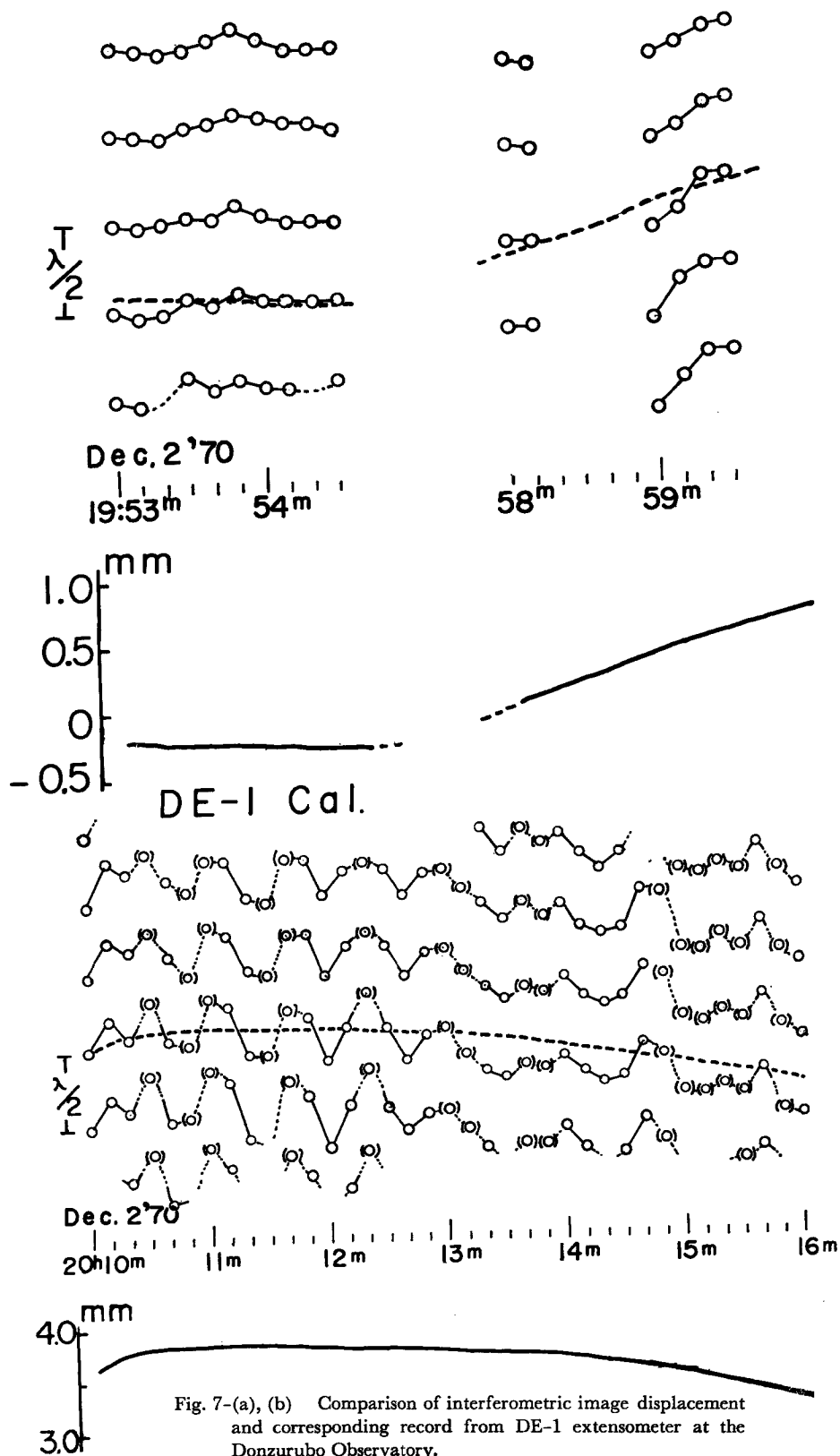


Fig. 7-(a), (b) Comparison of interferometric image displacement and corresponding record from DE-1 extensometer at the Donzurubo Observatory.

記録上にあらわれる変化量の大きさはほぼ 0.8 mm であるから拡大率は 2.5×10^8 倍となる。一方、ローラーの半径を 1 mm, 光学距離を 2.72 m として光学拡大率を計算すると 2.7×10^8 倍となり、真の拡大率は計算で求めたものの 93% であった。しかし noise level を考慮に入れば、この差は誤差の範囲内におさまるものである。

Fig. 7 (a), (b) は同様の方法で屯鶴峯地殻変動観測所の基準尺の長さ 44.2 m のスーパーインヴァール棒伸縮計 (E4.5°S) の calibration の結果でこの場合の真の拡大率は計算から求めたものの 75~85% であった。しかしこの時の干渉ジマの写真記録は鮮明さを欠いていたのでこれから結論を出すことはできない。

今回レーザー干渉計による calibration を実施したのは以上の成分だけで、天ヶ瀬地殻変動観測室のひずみ地震計一成分及び天ヶ瀬、屯鶴峯のローラー形スーパーインヴァール棒伸縮計の他の成分についてはまだ手がついていない。今後早急にこれらについての calibration も行なう予定であるが、これまでの測定を通じて解決しなければならない問題点がいくつか明らかになった。これらを例挙すると次のような点である。

- (1) 鮮明な干渉ジマを得るためには、反射ミラーの調整に非常な労力を必要とする。
- (2) 測定しようという計器のすぐ近くに人間がいて写真記録を撮っているために noise を大きくしている。
- (3) 干渉ジマの写真記録が連続でないために一フリンジ以上の大きな変位に対しては無力である。

これらの中で (1) の点は現状ではある程度やむをえないとしても、(2), (3) の点は自動連続記録の撮れる装置をつくることによって解決できるので今後はこのような方式を考えたい。

おわりに今回の測定にあたってご指導いただいた高田理夫教授に深く感謝するとともに、装置の製作をお願いした小林年夫技官、観測を手伝っていただいた山田 勝、藤田安良両技官に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Press, F.: Displacements, Strains, and Tilts at Teleseismic Distances, Journ. Geophys. Res., Vol. 70, 1965, pp. 2395-2412.
- 2) Ben-Menahem, A., S. J. Singh and F. Solomon: Static Deformation of a Spherical Earth Model by Internal Dislocations, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 59, 1969, pp. 813-853.
- 3) 竹本修三・高田理夫：近畿北部の中規模地震と Strain Step について，地震，第2輯，第23巻，1970，pp. 49-60.
- 4) Hade, G., M. Conner and J.T. Kuo: Laser Interferometer Calibration System for Extensometers, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 58, 1968, pp. 1379-1383.
- 5) 高田理夫・古沢 保・尾上謙介：光電変換装置による地殻変動デジタル観測，京都大学防災研究所年報第12号 A, 1969, pp. 119-122.