

50m真空干渉計による地面振動計測

Earth Strain Measurements with a
50M Vacuum Interferometer

田幸敏治, 浅川賢一, 鷹取洋, 平田照二

T. Tako, K. Asakawa, H. Takatori, S. Hirata

東京工業大学精密工学研究所

Research Laboratory of Precision Machinery and
Electronics, Tokyo Institute of Technology

〔前書き〕

波長の安定度の良いレーザーを光源とする長距離干渉計を用いて地殻変動を測定しようとする試みが、世界の数カ所で行なわれている。今回東京工業大学の長津田キャンパス内に建設された光学トンネル内に、約50mの真空光路を用いたマイケルソン干渉計を設置し、レーザーの波長変動や地面振動が干渉縞の変動に及ぼす影響について調べた。⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

この光学トンネルはトンネル部の長さが50mあり、両側に4×6mの測定室がある。さらにその外側には2×4m程度の予備室がついていて、測定室と外気が直接接触しないようになっている。天井の上には2~3mほど土が被せられている。両側の測定室内には床から切り離されたコンクリートのブロック(縦2m、横1m、深さ1m)からできている光学台があり、その上に写真2のような定盤が置いてある。定盤の上にはステンレス製の真空容器(内径630mmφ)があり、その内にマイケルソンあるいはファブリペロ型の干渉計が組めるようになっている。この両端にある真空容器はステンレス製の2本の真空パイプ(内径100mmφ)で結ばれている。パイプの途中にはベローズが3組含まれていて、熱膨張等による歪を吸収するようになっている。このパイプは真空中に引けるほか、任意の気体を任意の圧力で封入できるようになっている。真空系は2台の油回転ポンプ(1500ℓ/min及び500ℓ/min)と2台の8インチ油拡散ポンプで排気されており、真空度は 10^{-5} Torrである。またトンネルの内部には定盤が50m並んでいて、その上で色々な実験ができるようになっている。トンネル内の温度は18℃~23℃であり、11月に最高、5月に最低となる。一週間当りの温度変化は0.3℃以下である。湿度は100%近くになるので、除湿されている。両側の測定室及び予備室は空調設備が完備しており、温度は23℃にコントロールされている。

〔実験方法〕

実験装置は図1のようになっている。レーザーは633nmのHe-Neレーザー(SP-119)を用いている。波長は外部の制御回路により積分制御でラムデットプの中心に安定化されている。波長の安定度は $10^{-10}(\Delta\lambda/\lambda/\sqrt{Hz})(10Hz付近)$ と推定される。レーザーの波長は変調されており、その周期は1kHz、振幅は周波数に換算して6MHz p-pである。これは干渉縞

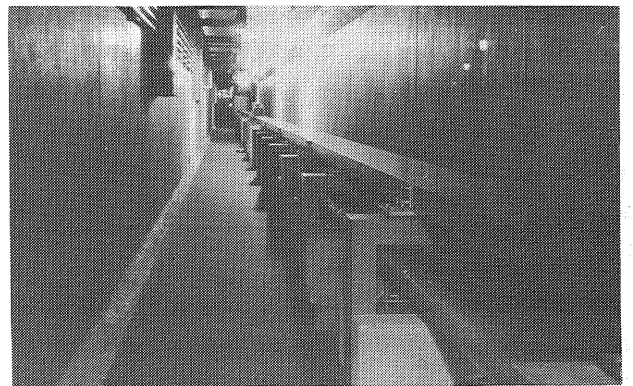


写真1 光学トンネルの内部
真空パイプと定盤

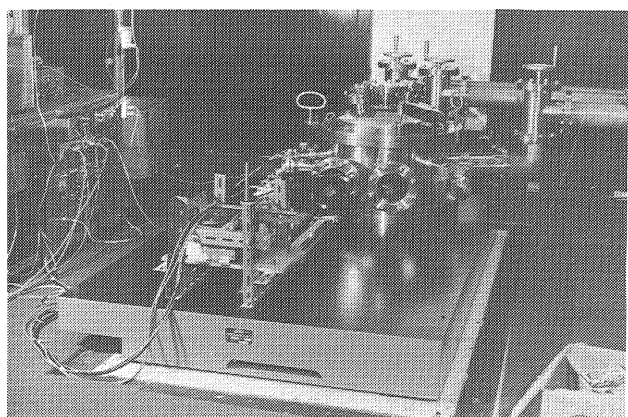


写真2 光学系及び真空容器

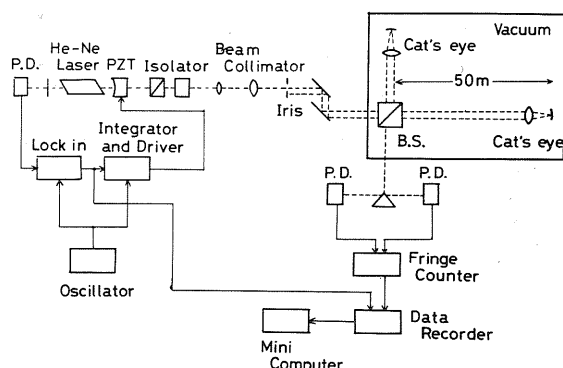


図1 実験装置

P. D. フォトダイオード
B. S. ビームスプリッター

の変動に換算すると約2縞に相当する。ビームの径はビームコリメーターにより約10mm中に拡大されている。反射鏡にはキャッツアイを用いており、入射光と反射光は15mm程度位置がずれている。従って干渉計からレーザーにもどる反射光は絞りによりカットできる。この絞りとアイソレーター（1/4入板とカウンタムソンプリズムからできている）の働きにより、干渉計からレーザーへのバックトークの影響はほとんど取り除くことができた。ビームスプリッターとキャッツアイ及びその中間の光路はすべて真空中に入っている。干渉縞の位相が $\pi/2$ 異なる2点に2つのフォトダイオードが置かれている。フォトダイオードの出力はフリンジカウンターに入れられ、1/4縞ごとにデジタル的にカウントされ、さらにD-Aコンバーターにより電圧に変換される。干渉縞が変調されている場合にはD-Aコンバーターの出力をローパスフィルターに入れることにより精度が改善され、本研究の場合には $1/120$ 縞の精度を得ることができた。⁽⁵⁾これは距離のひずみに換算すると $\Delta L/L = 6 \times 10^{-11}$ になる。フリンジカウンターの出力はデータレコーダーに記録され、後でミニコンピュータで解析された。

〔結果〕

図2は約3秒間の干渉縞の変動を距離のひずみ $\Delta L/L$ に換算して示したものである。これはデータレコーダーに記録したものをゆっくり再生しながらX-Yレコーダーで書かせたものである。この図からこまかい50Hzの規則的な振動と3Hz程度の振動が存在することが分かる。

図3は約15分間の干渉縞の変動を記録したものである。図から約0.3Hzの規則的な振動が存在することが分かる。この振動の振幅は大きくなったり小さくなったりする特徴がある。図2と図3、及び図4は縦軸の大きさが異なっていることに注意を要する。

図4は一週間の干渉軸の変動を記録したものである。下側が伸びる方向に対応する。図から一日周期の振動が存在することが明らかである。この振動は夜間は比較的静かであるが、昼間に急激に伸び縮みをする。一日当りの伸縮の大きさは 3×10^{-7} 程度である。また一日当たり 10^{-7} 程度のドリフトが存在する。

図5はジャワでおきたM6.9の地震の影響による干渉縞の変動である。振幅は 10^{-7} 程度であり、小さな振動が数時間後まで続いていることが分かる。図6は有珠山の噴火による干渉縞の変動である。明白な振動が現われている。

これらの振動の性質を明らかにするために、計算機により周波数解析を行なった。図7は干渉縞の変動のパワースペクトル密度である。図より0.3Hz, 3Hz, 50Hz, 及び50Hzの高調波に対応する所にピークが存在することが分かる。

干渉縞の変動とレーザーの波長変動との間の相関を調べるために、干渉縞の変動とレーザーの制御系の誤差信号との間のコヒーレンシーを計算したものが図8である。ここで2つの信号 $x(t)$, $y(t)$ の間のコヒーレンシーは次式により定義される。

$$\text{Coh}_{xy}(f) = \left[\frac{|P_{xy}(f)|^2}{P_x(f) P_y(f)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

$P_x(f)$: $x(t)$ のパワースペクトル

$P_y(f)$: $y(t)$ のパワースペクトル

$P_{xy}(f)$: $x(t)$, $y(t)$ の相互スペクトル

図から分かるように1 Hz ~ 100 Hz の範囲では相関が非常に大きい。高周波数側で相関が小さくなるのは、高周波数側での信号のレベルが小さいため、測定器(主にデーターレコーダー)のノイズの影響を受けるためと思われる。
【結論】

今回の実験では主に干渉縞の変動とレーザーの波長変動との間の相関を中心に調べた。その結果1 ~ 100 Hz の範囲では2つの変動の間の相関は非常に大きく、干渉縞の変動は主にレーザーの波長変動によってまわっていることが分かった。1 Hz 以下では相関は小さく、干渉縞の変動は主に地面振動によりまわっていることが推測できる。またいくつかの規則的振動が現われた。その周波数は50 Hz 及びその高調波、3 Hz , 0.3 Hz , 1 cycle/day である。その原因はそれぞれ電源からのハム(50 Hz とその高調波)、レーザーの波長の変動(3 Hz)、地面の振動(0.3 Hz と 1 cycle/day)によるものと推定できる。

なおレーザーの波長の安定化については、現在フィードバックのゲイン、ディテクターの S/N 等に問題が残っており、パワースペクトルにして一桁程度(1 Hz 以上)は改善できるものと思われる。またさらに安定度のより要素の吸収線を利用した安定化レーザーを準備している。

地面振動に関しては、光学トンネルの場所の関係から自動車等による振動の影響をかなり受

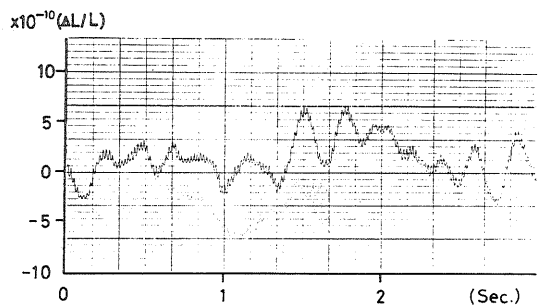


図2 干渉縞の変動 - 3秒間

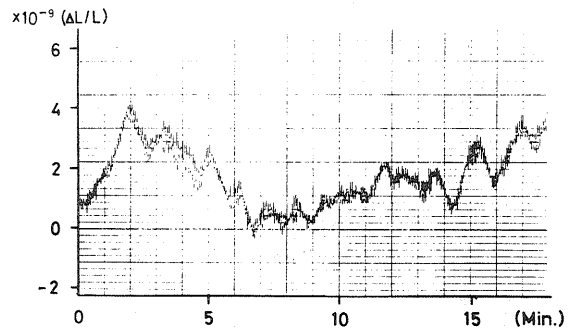


図3 干渉縞の変動 - 15分間

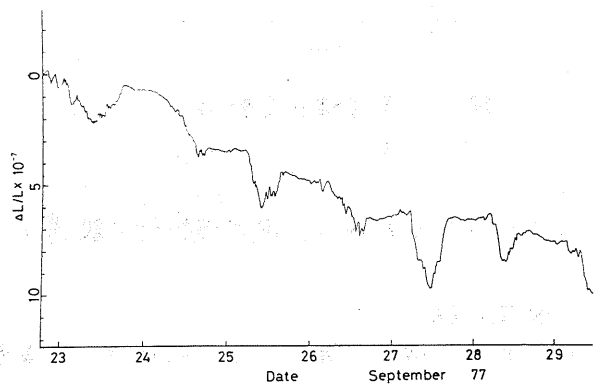


図4 干渉縞の変動 - 1週間

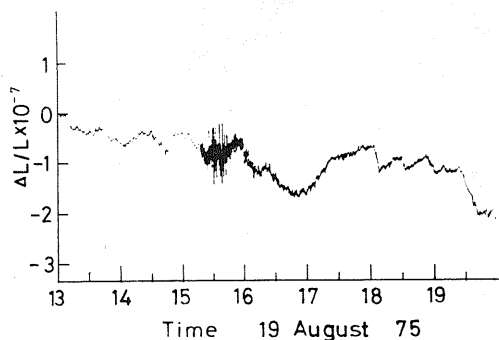


図5 シャワの地震(M6.9)による干渉縞の変動

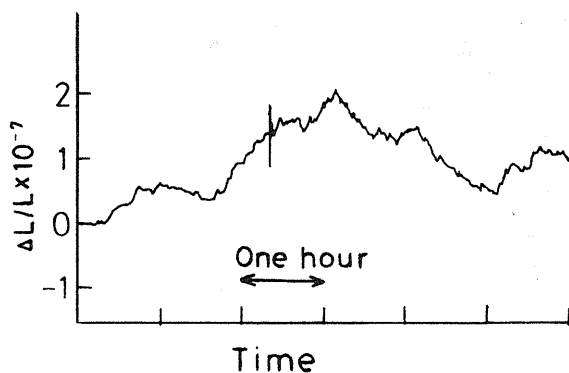


図6 有珠山の噴火による干渉縞の変動

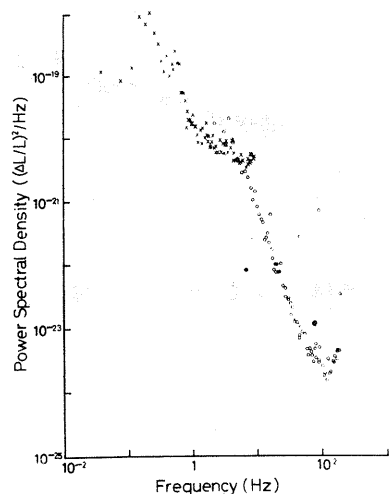


図7 干渉縞の変動のパワースペクトル

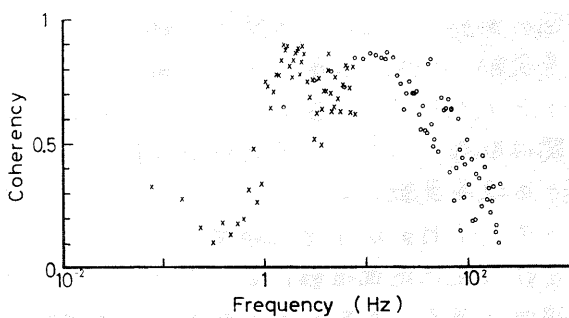


図8 干渉縞の変動とレーダーの波長変動とのコヒーレンシー

けているようである。現在振動計を設置して干渉縞の変動と比較する実験を準備中である。

[参考文献]

- (1) 田幸, 浅川, 青木 : 昭和51年夏季応物連合講演会予稿集 P143
- (2) 浅川, 田幸 : " " P144
- (3) 田幸, 浅川, 鷹取 : 昭和52年秋季応物学術講演会予稿集 P133
- (4) 浅川, 鷹取, 平田, 田幸 : " " P134
- (5) 大石, 桜井, 清野 : 計測自動制御学会論文集 10 (1969) P.114