



多モード光ファイバーを用いるフィゾー型干渉計による 微小振幅振動の測定

中 島 俊 典

理化学研究所 〒351-01 和光市広沢 2-1

(1987年1月9日受理)

Measurement of Small Amplitude Vibrations by a Fizeau-Type Interferometer Using a Multimode Optical Fiber

Toshinori NAKAJIMA

The Institute of Physical and Chemical Research,
2-1, Hiroosawa, Wako 351-01

A Fizeau-type interferometer using a multimode optical fiber is constructed and applied to the measurement of small amplitude vibrations of a mirror and a rough surfaces. A gradient index rod lens is used at the exit end of an optical fiber as a beam splitter and a collimating lens. Since two interfering beams of light are transmitted through the same optical fiber, the complicated phase variation of light due to multimode dispersion in an optical fiber does not affect the output of the interferometer. The interferometer can be adjusted more easily than the one that uses a single-mode optical fiber. Vibration amplitudes in the range 0.1-100 nm have been measured when the distance between the gradient index rod lens and the vibrating surface is fixed at 10 mm. A vibration amplitude of 28 nm has been detected at a distance of 150 mm, even when the surface is rough and the light reflected and directed into the optical fiber is weak.

1. 序 論

精密な機械部品や構造物,あるいは小型の振動子や音響変換素子などの振動状態を解析するには,光の波長またはそれ以下の微小な振動振幅を測定することが必要になる。光の干渉による方法は,このような測定に有効な手段として利用されている¹⁾。しかし,当然のことながら,物体を照明して干渉計を構成できる場所でないといけない。

光ファイバーを干渉計の光路に用いると,光路を自由に曲げて光を導くことができるので,これまで困難であった場所でも測定ができるようになる。

単一モード光ファイバーは,コアとクラッドの屈折率,コア径および光の波長によって決まる規格化周波数が小さいので,最低次のモードの光しか伝播しない²⁾。光ファイバーの軸に垂直な断面内での電場ベクトルの大きさは軸上で最大で,軸からコアの周辺に向けてゆるやかに減小する。

電場ベクトルの振動の位相は,この断面内で一定である。そのため,単一モード光ファイバーは干渉計の光路として光を導くのに都合がよい。なお,電場ベクトルの振動面を考えると,互いに直交する振動面をもつ二つの直線偏光が伝播する。これらの伝播速度は,実際にはわずかに異なるので,偏光状態は保存されない。

しかし,単一モード光ファイバーは,コア径が数 μm 程度と小さいので,レンズなどの光学素子との位置合せがむずかしく,光結合が容易ではない。また,拡散面で散乱した光は,ごく一部しか光ファイバーに導くことができない。

一方,多モード光ファイバーはコア径が数十 μm 以上あるので,光結合は比較的簡単で,散乱光も効率よく取り込むことができる。ただし,光ファイバーを伝播する多数のモードの光が存在し,それぞれが異なる位相変化を受けるので,光ファイバーを透過した光には,各モ

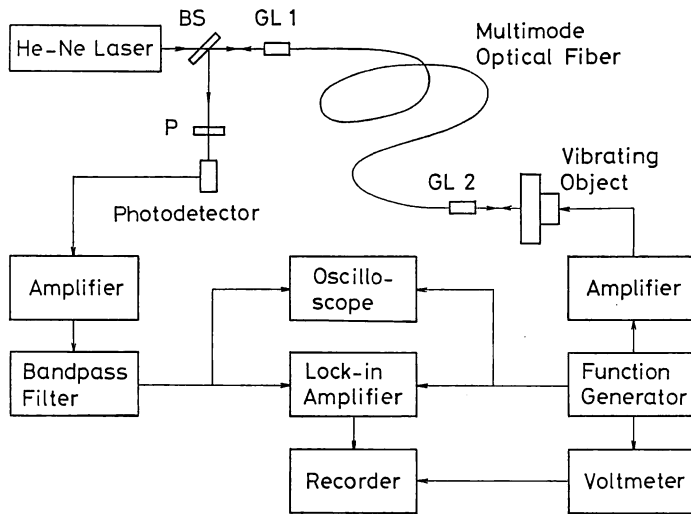


Fig. 1 Experimental configuration of a multimode optical fiber interferometer for measuring small amplitude vibrations.

ードの光の重ね合わせにより、スペックルパターンが現われる²⁾。

このような位相変化を受けても、光を2光束に分割して干渉させる前、あるいは干渉する2光束を重ね合わせた後であれば、干渉する2光束に対する影響は同じであり、問題とはならない³⁾。

なお、それだけではなく、2光束に分けた光のいずれか一方、または両方を多モード光ファイバーで伝送しても、干渉測定を行なうことができる⁴⁾。この場合には、スペックルパターンで変調された干渉縞、あるいは各スペックルの中に細かい干渉縞を生じる。これはスペックル干渉法で、拡散面で散乱してスペックルパターンを示す光を、鏡面からの反射光と重ね合わせたり、あるいは拡散面からの光どうしを重ね合わせて記録する場合と同様である⁵⁾。

また、上に述べた二つの場合が組み合わされていてもよい。たとえば、全光ファイバー化マイケルソン型干渉計では、光を2光束に分割する前と重ね合わせた後に、多モード光ファイバーで伝送するだけでなく、2光束に分割してから重ね合わせるまでの間も、多モード光ファイバーで伝送している^{6,7)}。

本研究では、多モード光ファイバーを、光の分割前と重ね合わせの後に光の伝送路として用い、屈折率分布型ロッドレンズを、ビームスプリッターとコリメーターレンズとして用いるフィゾー型干渉計を製作し、鏡面および粗面について、光の波長以下の微小振幅振動の測定を試みた。この干渉計はほぼ共通光路で安定しており、コア径

の大きい多モード光ファイバーを用いることにより、粗面についてもナノメートル以下の振動振幅まで測定できる。以下に、干渉計の構成、測定の原理および実験と検討の結果について述べる。

2. 光ファイバー干渉計の構成

Fig. 1 に製作したフィゾー型光ファイバー干渉計の構成を示す。発振器からの信号によってピエゾ振動子で加振されている物体の振動を測定する。He-Ne レーザ光を屈折率分布型ロッドレンズ(セルフォックレンズ) GL 1 で集束させて、多モード光ファイバーに入射させる。光ファイバーを透過した光を、屈折率分布型ロッドレンズ GL 2 でほぼ平行な光として振動物体を照明する。ロッドレンズ GL 2 の出射端面には半透明膜がつけてあり、光を一部、反射する。物体表面で正反射あるいは拡散反射した光は、ロッドレンズ GL 2 の出射端面での反射光と重なって再び光ファイバーに入射し、もとの光路を逆にたどる。この光の一部を半透明鏡 BS で取り出し、偏光板 P を通して光電検出する。光電検出器の開口は光ファイバーからの光をすべて取り込める大きさにしておく。偏光板はロッドレンズ GL 1 および光ファイバーの入射端面からの反射光を除去するために用いる。

検出した信号を増幅し、物体の振動周波数を中心周波数とする帯域フィルターに通した後、物体を加振する信号を参照信号としてロックイン検出する。オシロスコープは検出した信号を確認するためのものである。記録計ではロックイン増幅器の出力を、加振信号の電圧に対

して記録する。

この干渉計では光ファイバーの出射端とロッドレンズ GL2 を同一の支持台上に固定すれば、光を物体の近くへ自由に導いて、干渉測定をすることができる。

3. 微小振動振幅測定の実理

Fig. 1 でロッドレンズ GL2 の出射端面および物体表面で反射して、光電検出器に達する光の複素振幅を、それぞれ R および $O \exp\{i\phi(t)\}$ とする。 R および O は、多モード光ファイバーの各モードによって異なる光の位相変化も含むとする。光電検出器に達した光をすべて合わせて検出すると、得られる信号 $V(t)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} V(t) &= |R + O \exp\{i\phi(t)\}|^2 \\ &= R^2 + O^2 + 2RO \cos \phi(t) \end{aligned} \quad (1)$$

ここでは、光電検出器の効率などを表す比例定数は省略した。

物体が周波数 f_0 、振幅 a で正弦波状に振動しているとすると、

$$\phi(t) = \phi_0 + (4\pi a/\lambda) \sin 2\pi f_0 t \quad (2)$$

と表わせる。ここで、 λ はレーザー光の波長であり、 ϕ_0 は物体が静止しているときに、ロッドレンズ GL2 と物体との間を光が往復するために生じる位相変化である。

(2) 式を(1)式に代入し、ベッセル関数による展開公式を利用して展開する。さらに、中心周波数が f_0 の帯域フィルターに通すと、得られる信号 $\Delta V_1(t)$ は

$$\Delta V_1(t) = -4RO \sin \phi_0 J_1(4\pi a/\lambda) \sin 2\pi f_0 t \quad (3)$$

となる。ここで、信号が最大となるように

$$\phi_0 = (2m - 1/2)\pi \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4)$$

とする。これは、ロッドレンズ GL2 と物体との間の距離を特定の値に設定することに相当する。このとき、信号 $\Delta V_1(t)$ は

$$\Delta V_1(t) = 4RO J_1(4\pi a/\lambda) \sin 2\pi f_0 t \quad (5)$$

となる。

この信号から、 RO の値と無関係に物体の振動振幅を求めるために次のようにする¹⁾。振動振幅 a を 0 から、しだいに大きくしてゆくと、信号 $\Delta V_1(t)$ の振幅 $4RO \times J_1(4\pi a/\lambda) = \Delta V_1$ は、1次のベッセル関数に従って 0 から増大してゆく。最初の極大値をとるのは

$$4\pi a/\lambda = 1.84 \quad (6)$$

のときである。この極大値を $\Delta V_{1\max}$ とすると、 $J_1(1.84) = 0.582$ であることから、

$$\Delta V_1/\Delta V_{1\max} = J_1(4\pi a/\lambda)/0.582 \quad (7)$$

の関係が得られる。したがって、 $\Delta V_{1\max}$ をあらかじめ測定しておけば、 ΔV_1 の値から振動振幅を求めることができる。

とくに、振動振幅が小さくて、 $(4\pi a/\lambda) \ll 1$ のときは

$$J_1(4\pi a/\lambda) \cong 2\pi a/\lambda \quad (8)$$

であるので、

$$a = 0.582\lambda \Delta V_1 / (2\pi \Delta V_{1\max}) \quad (9)$$

となり、振動振幅 a は信号の大きさ ΔV_1 に比例する。

4. 実験結果と考察

実験では、光ファイバーとしてコア径 $50 \mu\text{m}$ 、クラッド径 $125 \mu\text{m}$ の屈折率分布型多モード光ファイバーを用いた。長さは 8.5 m である。屈折率分布型ロッドレンズは二つとも、直径 1.8 mm 、長さ 4.2 mm (ピッチ 0.23) である。ロッドレンズ GL2 の出射端面には誘電体多層膜をつけて、反射率を約 19% とした。レーザーは He-Ne レーザー (波長 632.8 nm 、出力約 15 mW) で、光電検出にはシリコンフォトダイオードを使用した。

物体表面が鏡面の場合には、ロッドレンズ GL2 からの光が表面に垂直入射して、正反射光が光ファイバーにもどるように調整する。多モード光ファイバーは、単一モード光ファイバーに比べてコア径が大きいので、調整は比較的簡単である。物体表面が粗面の場合には、調整はさらに簡単である。ロッドレンズ GL2 からの光が、表面に垂直に近い角度で入射するようにするだけで、拡散反射した光の一部が光ファイバーにもどる。

物体表面が鏡面でも粗面でも、ほぼ同じように物体の

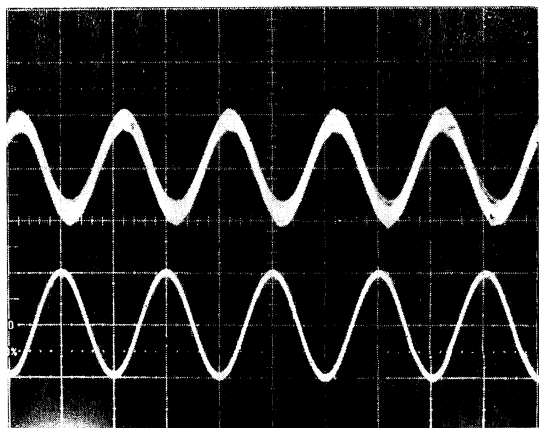


Fig. 2 Detected signal (upper trace) and drive signal (lower trace) to the object with a rough surface. The frequency of vibration is 1 kHz and vibration amplitude is 7.8 nm .

振動に対応する信号を検出することができた。ただし、拡散反射光は正反射光に比べて弱いので、検出される信号の大きさは粗面の場合のほうが小さい。

ピエゾ振動子の粗い表面の振動を観測した例を Fig. 2 に示す。上が、周波数 1 kHz, 振幅 7.8 nm で振動しているときに得られた信号で、下は加振信号である。帯域フィルターの中心周波数は 1 kHz で、帯域幅は 20 Hz である。ロッドレンズ GL2 から物体までの距離は 10 mm とした。なお、(4)式で与えた条件を実際に満足させて、信号を最大にするために、この実験ではピエゾ振動子自体に直流バイアス電圧を加えて、ロッドレンズと物体との間の距離を微調整した。光ファイバーの出射端とロッドレンズの支持台にピエゾ素子をつけて、変位させてもよい。

このような信号をロックイン増幅器に入れて、加振信号を参照信号として検出した。得られる信号電圧を、加振信号の電圧に対して記録した結果を Fig. 3 に示す。振動周波数は 1 kHz, ロッドレンズと物体との距離は 10 mm である。Fig. 3(a) は加振電圧が 0~510 V の

場合である。検出される信号の電圧は、加振電圧に対してほぼ 1 次のベッセル関数に従って変化している。しかし、実際には物体の振動振幅が加振電圧に比例しないので、1 次のベッセル関数に正しく従っているとはいえない。信号電圧が極大となるのは、加振電圧が 402 V のときである。このときの振動振幅は(6)式から、92.7 nm である。さらに、信号の大きさから(7)式によって、加振電圧に対する振動振幅を求めてグラフに表示すると、Fig. 4 のようになる。振動振幅は 0~116 nm である。振動振幅と加振電圧とは、比例関係からわずかにずれている。

Fig. 3(b) は加振電圧が 0~100 V の場合で、振動振幅にすると、0~21.3 nm に対応する。この範囲では、信号電圧が加振電圧に比例して増大している。振動振幅も加振電圧に比例している。次に、加振電圧が 0~20 V で、振動振幅が 0~4.67 nm に対応する場合を Fig. 3(c) に示す。この範囲でも、信号電圧が加振電圧にほぼ比例して変化している。加振電圧が小さくて振動振幅がさらに小さくなると、信号電圧も小さくなり、変動が著

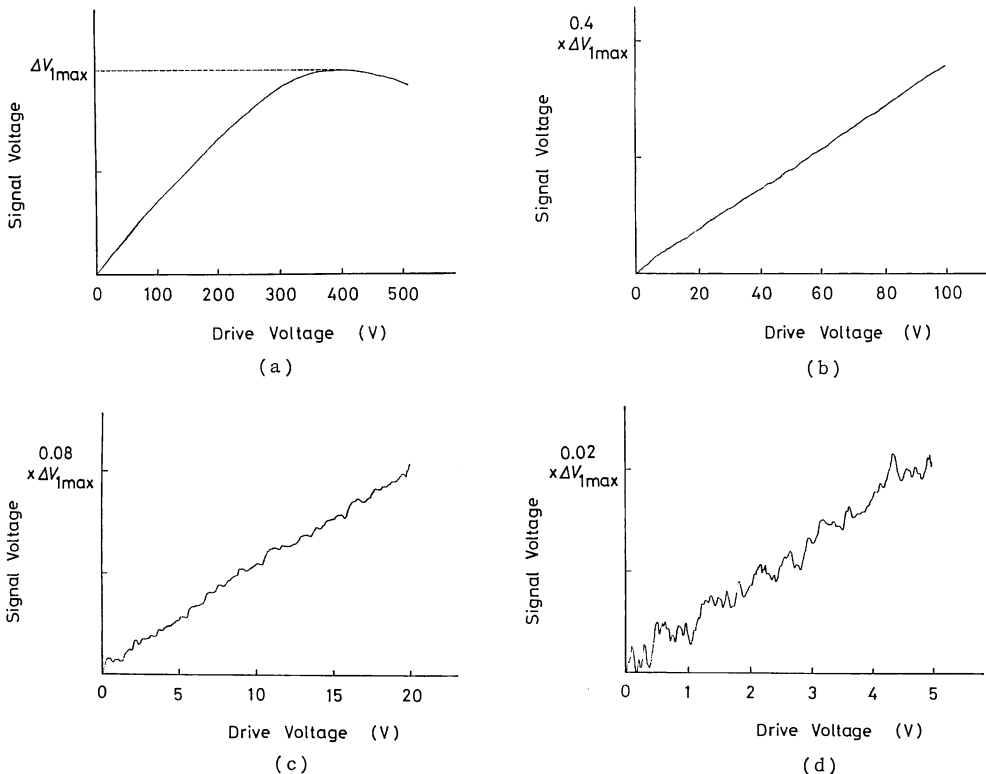


Fig. 3 Signal voltage against drive voltage to the object with a rough surface for different voltage ranges. The frequency of vibration is 1 kHz and the vibration amplitudes correspond to (a) 0-116 nm, (b) 0-21.3 nm, (c) 0-4.67 nm and (d) 0-1.24 nm, respectively.

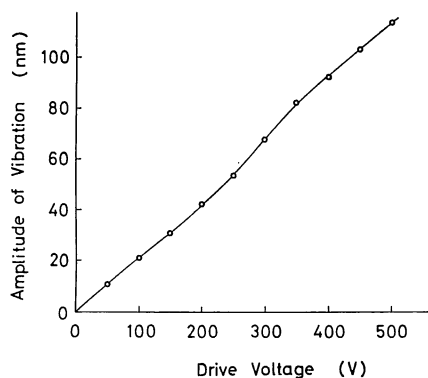


Fig. 4 Amplitude of vibration against drive voltage to the object with a rough surface.

しくなる。Fig. 3(d)は加振電圧が0~5Vで、振動振幅が0~1.24nmに対応する場合である。なお、ロックイン増幅器の積分時間は、Fig. 3(a)~(d)のいずれの場合も0.3sである。

信号電圧の変動はさまざまな要因によって起こる。この干渉計では、干渉する2光束が同一の光ファイバーを透過するので、初めに述べたように、光ファイバー中の各モードによって異なる光の位相変化は、測定に影響しない。また、光ファイバー周辺の温度変動や光ファイバーに加わる機械的振動のような外乱も、干渉する2光束に対して同じ影響を与えるときは問題とならない。そのため、この干渉計では、干渉する2光束が別々の光ファイバーを透過する場合に比べると、外乱の影響は非常に小さい。この実験では、光ファイバーは常温の室内で定盤上に置いてあるだけで、外乱に対して特別な対策はとらなかった。しかし、外乱によって各モードの光の位相が異なった変動を受けると、検出される信号電圧に変動を生じる。これを避けるには、光ファイバーからの光をすべて光電検出器に取り込まないで、開口を制限するとよい⁷⁾。なお、この各モードの光による位相変化の違いをとらえると、1本の多モード光ファイバーのみによって、音圧などを検出することができる⁸⁾。

一方、ロッドレンズGL1および光ファイバーの入射端面からの反射光が、光ファイバーをもどってきた光と重なって干渉すると、検出される信号が変動する。このような干渉が起こっても、光ファイバーをもどってきた光の位相が、物体の振動による以外に時間的な変動をしなければ、信号電圧は一定で変動はない。しかし、光ファイバーを透過する光の位相が外乱によって変動すると、干渉する2光束について同一の位相変動であっても、反射光との干渉により信号電圧が変動する。この影

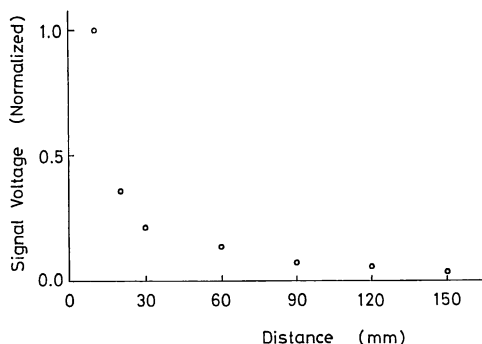


Fig. 5 Signal voltage against distance between the gradient index rod lens and the object with a rough surface.

響は、光電検出器の前に偏光板を置き、直線偏光の反射光を除くことで避けられた。

そのほかにも、信号電圧の変動の原因として、支持台の振動などによる光ファイバーとロッドレンズとの位置関係、あるいはロッドレンズGL2と物体との距離の変動、加振電圧の変動、レーザー光の強度変動などが挙げられる。

この実験では、初めに挙げた外乱による各モードによって異なる光の位相変動、およびロッドレンズと物体との距離の変動による影響が比較的大きい。そのなかでも、位相変動の影響のほうが大きい。このことは、別に行なった単一モード光ファイバーを光の伝送路として用いる実験では、ほぼ同じ条件で信号の変動が少ないことから推測できる。ロッドレンズと物体は同一の台の上に固定しており、その間の距離は、いったん、信号が最大になるように微調整して安定すれば、変動は小さかった。

Fig. 3(d)の結果から、定量的な振動振幅の測定は別としても、仮りに加振電圧が0.5Vのところまで振動を検出できるとすると、ほぼ0.1nmの振動振幅まで検出することができる。

ロッドレンズGL2から物体までの距離を大きくしても、物体表面が鏡面の場合には信号に大きな変化は見られない。しかし、粗面の場合には拡散反射して再び光ファイバーに入射する光が急激に弱くなるので、信号の検出がしだいに困難になる。Fig. 5に粗面までの距離に対する信号電圧の変化を示す。振動振幅は28nmで、一定である。150mmの距離まで粗面を離しても、振動を検出することができた。このときの信号電圧は、10mmの距離での信号電圧の約1/28であった。なお、単一モード光ファイバーを用いる場合には、粗面までの距離が

数 mm 以下でないと、信号を検出できなかった。

5. 結 論

多モード光ファイバーと屈折率分布型ロッドレンズを用いて、光路を自由に曲げられるフィゾー型干渉計を製作し、光の波長以下の微小振幅振動の測定をした。この干渉計は、ほぼ共通光路の干渉計であるので、外界の温度変動や振動の影響を受けにくい。また、光ファイバーのコア径が大きいため、単一モード光ファイバーを用いる場合に比べて、干渉計の調整が簡単である。光ファイバー先端のロッドレンズから物体までの距離を 10 mm としたとき、0.1~100 nm の範囲の振動振幅を測定できた。物体表面が粗面で、反射して干渉計にもどる光が弱くても、振動振幅を 28 nm としたとき、物体までの距離が 150 mm まで振動を検出することができた。

この干渉計は、微小振幅振動の測定に限らず、たとえば、変位の測定にも利用できる。物体表面が粗面の場合に、とくに有用であると思われる。

文 献

- 1) H. A. Deferrari, R. A. Darby and F. A. Andrews: "Vibrational displacement and mode-shape measurement by a laser interferometer," J. Acoust. Soc. Am., **42** (1967) 982-990.
- 2) 今井正明, 大塚喜弘: "光波干渉応用技術 6 光ファイバ干渉計測", 光学, **13** (1984) 153-162.
- 3) P. Shajenko: "On the feasibility of using multimode optical fibers in optical hydrophones," J. Acoust. Soc. Am., **69** (1981) 1829-1830.
- 4) P. Shajenko: "Multimode optical fibers as sensing devices," Appl. Opt., **21** (1982) 4185-4186.
- 5) J. A. Leendertz: "Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect," J. Phys. E, **3** (1970) 214-218.
- 6) M. Imai, T. Ohashi and Y. Ohtsuka: "High-sensitive all-fiber Michelson interferometer by use of differential output configuration," Opt. Commun., **39** (1981) 7-10.
- 7) M. Imai, T. Ohashi and Y. Ohtsuka: "Multimode-optical-fiber Michelson interferometer," J. Lightwave Technol., **LT-1** (1983) 75-81.
- 8) M. R. Layton and J. A. Bucaro: "Optical fiber acoustic sensor utilizing mode-mode interference," Appl. Opt., **18** (1979) 666-670.