

解説

光ファイバーによる地殻歪の測定

花田 英夫

国立天文台地球回転研究系 〒023 水沢市星ヶ丘町 2-12

(1989年10月16日受理)

Earth Strain Measurement by Optical Fibers

Hideo HANADA

Division of Earth Rotation, National Astronomical Observatory,
2-12, Hoshigaoka, Mizusawa 023

1. はじめに

光ファイバーはおもに光通信の分野で発達してきたが、その取扱いの簡便さ、信号の遠距離伝達能力、小型軽量等の利点を生かして、変位計、温度計、圧力計等の各種のセンサーにも幅広く応用されるようになってきた。センサーにはおもに単一モードの光ファイバーが使用されているが、高感度の測定を行うためには、さらに、マイケルソン、マッハ・ツェンダー等の方式の干渉計を組むことが必要となる。

そのような状況のなかで、高感度の変位センサーの特徴を生かして、光ファイバーを地殻歪の計測に利用しようとする試みもみられるようになってきた^{1,2)}。次章で述べるように、地殻歪の変化量は1年当り 10^{-7} 程度 (100 m に対して $10 \mu\text{m}$ の変位に相当する) と非常に小さいので、これを観測するセンサーとしては、これ以上の分解能をもつことはもちろんのこと、ゆっくりとした動きを正確に捉えられる長期間の安定性もち、環境の変化に対しても強いことが要求される。

ここでは、筆者がカリフォルニア大学サンディエゴ校の地球物理・惑星物理研究所において共同で行った実験結果をもとに、光ファイバーを地殻歪の測定に利用するうえで知らなければならない性質、問題点等について述べる。

2. 地殻歪とその計測

地殻歪とは、地球表面付近が地球内部や外部からの力

によって変形することで、その原因は、月や太陽による引力が場所によって異なることによるもの、地殻プレートが海溝付近で地球内部に潜り込み、その上部の地殻がそれに引きずられることによるもの、火山マグマが上昇し上部の地殻に圧力を加えることによるもの等いろいろある。変化量は非常に小さく、時間も非常に長いので、高感度で安定なセンサーが必要とされる。たとえば、国立天文台水沢観測センターの江刺地球潮汐観測施設で石英管伸縮計によって観測された結果では、潮汐によって半日や一日周期で変化する地殻歪の振幅は約 3×10^{-8} 以下、経年的な変化量は1年当り約 1×10^{-7} 以下である³⁾。したがって、 10^{-9} 以上の分解能をもったセンサーが一般的に必要である。地殻歪の測定は、簡単にいえば、地球を相手にしたヤング率の測定であり、地球内部の状態や変動を推定するのに貴重な情報源となる。また、地殻歪を生じさせる原因のほとんどは、地盤の傾斜も引き起こすので、歪と傾斜を並行して測定することによってより多くの情報が得られる。

地殻歪の測定はいろいろな規模でいろいろなセンサーを用いて行われている。長いものからいくつか例をあげると、銀河系外からくる電波の到達時刻の差を利用して地球の直径規模の歪を直接計ることができる VLBI (超長基線電波干渉計)⁴⁾、約 1 km の真空筒にヘリウム・ネオンレーザーのビームを通し、マイケルソン干渉計で両端の変位を測定するレーザー歪計⁵⁾、温度変化の小さい数 10 m から数 100 m の長さの横坑内において、溶融石英等の低膨張率の材質の基準尺を用いてそれに対す

る相対変位を測定する石英管歪計⁶⁾、地中に液体の充滿した容器を埋め込み、その液面の上下変動から容器の容積の変化つまりまわりの地殻の歪を測定する体積歪計⁷⁾、短いものでは、岩盤に貼りつけた歪ゲージによる数 cm の長さの測定⁸⁾等がある。各種歪計については Agnew⁹⁾ による詳しいまとめがある。

それぞれの歪計の問題点を挙げていくと、VLBI の場合には大気中の水蒸気量を正確に測定することが困難なことからくる電波伝播誤差の問題、長距離のレーザー歪計の場合には反射光が微弱となる問題、坑道内の歪計では降雨、地下水等による局所的な変動や温度変化の問題等がある。

3. 光ファイバーによる地殻歪測定の原理

2点間の距離を光を用いて測定しようとする場合、空气中あるいは真空中でレーザーを標的に照射しその反射光の到達時間を測定したり、マイケルソン型のレーザー干渉計を用いて干渉縞の数と位相を測定したりするが、光ファイバーを用いた場合にも、原理的にこれらと同じ方法が適応できる。レーザービームの通過する媒質が真空や空気であるかファイバーであるかだけの違いである。高感度の光学測定には干渉計を用いるのが不可欠であるので、ここでは、光ファイバーを用いた干渉計について述べることにする。歪計測のための光ファイバーを用いたマイケルソン干渉計の模式図を図1に示す。ファイバーを用いない、通常のレーザー干渉計のビームスプリッターに相当するものは分岐結合回路、反射鏡に相当するものは先端の切断面に施された銀コーティングである。ファイバーへのレーザービームの導入には集光レンズが用いられる。干渉縞の位相検出を行うためには、フ

ァイバーを圧電素子に巻き付け、周期的な歪変化を与えることによって変調をかけ、ロックイン増幅器で検出する方式が有効である。

真空の経路をもつ、通常のレーザー干渉計に必要な真空筒、真空ポンプ、平面鏡、ビームスプリッター等と比べて、光ファイバー、集光レンズ、分岐結合回路等のファイバー干渉計用の構成部品はより単純で安価であるので、経済性を問題にする場合、たとえば、長距離で多数の観測を行おうとする場合には、光ファイバーは大きな魅力である。ただし、ファイバーに光を伝播させようとする場合、温度変化や機械的な変形によるファイバーの長さ、断面積、屈折率等の変化の特性を十分に知っておく必要がある。また、特性の異なる複数のファイバーを用いて、温度変化等の影響を補正することも可能であろう。これは、波長の異なる複数のレーザーを用いた測距と同じ考え方であるが、ファイバーを用いたほうが容易であるように思われる。

4. 地殻歪測定の立場からみた 光ファイバーの特性

4.1 長期安定性

地殻歪の現象には1年以上の周期をもつものや経年的なものがあるので、その測定は一般的に長期間に及ぶ。したがって測定系の安定性は最も重要な要素の一つである。光ファイバーが地殻歪計測に適しているかどうかを調べるために、同じ場所で通常のレーザー干渉計と光ファイバー干渉計とを並行に観測し両者を比較した例がある²⁾。その実験はカリフォルニア大学サンディエゴ校の地球物理・惑星物理研究所の実験室に掘られた直径2m、深さ24mの縦穴を利用して行われた。底にレーザー干

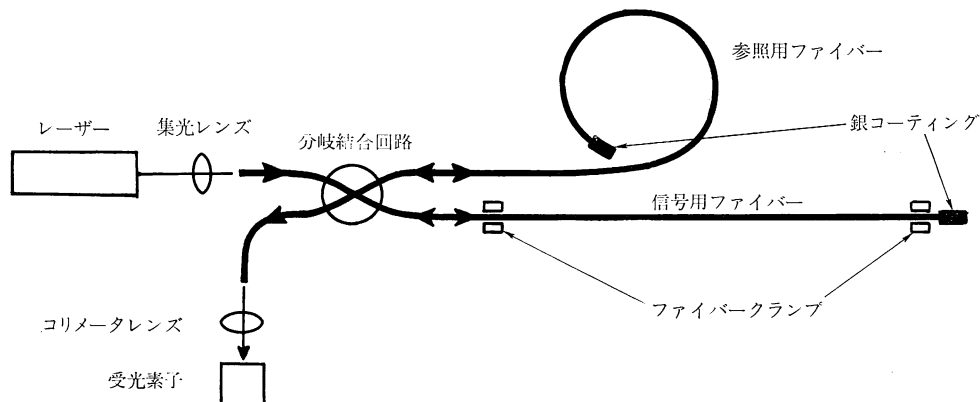


図1 光ファイバーによるマイケルソン干渉計

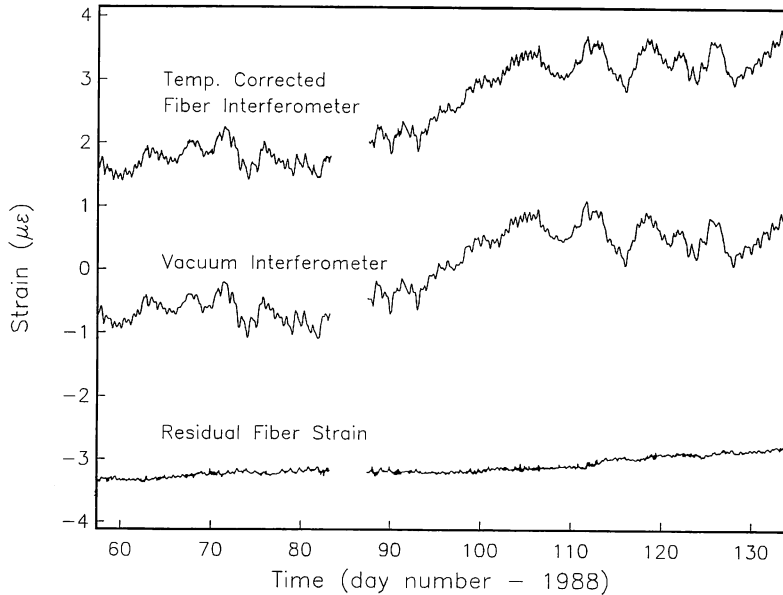


図2 レーザー干渉計と光ファイバー干渉計で観測された地殻歪²⁾

渉計の一方の腕の反射鏡と光ファイバー干渉計の一方の腕の先端が固定され、縦穴の上端から下端までの距離を両干渉計で測定できるようになっている。空気のゆらぎ、温度変化等の環境の影響を避けるために、レーザー干渉計の光路は真空パイプ中を通す、ファイバー干渉計の2本の腕の長さを等しくする、両干渉計のレーザー光源は共通にする、等の工夫がなされている。

結果を見ると通常のレーザー干渉計と光ファイバー干渉計で測定された両端間の距離変化は互いにかなりよく一致していることがわかる(図2)。ここでファイバー干渉計の結果には4.2節で述べる温度係数を用いた補正と4.3節で述べる歪係数を用いた補正が施されている。この実験室は海岸から約100mしか離れていないので、両者の記録には潮汐や波浪の影響が強くでている。図2の一番下の曲線は、ファイバー干渉計で測定された結果と通常のレーザー干渉計で測定された結果との差を示し、これがファイバー干渉計のドリフトに相当している。ドリフトの大きさは140日で約 5×10^{-7} であるので1年当り約 1.3×10^{-6} と見積られる。

4.2 温度特性

一般に長さを正確に測定しようとする場合、温度の影響を受けることは避けられない。尺を用いて測定する場合には尺そのものの線膨張係数による影響を受け、レーザーの波長を基準にして測定する場合には媒質の屈折率の変化と波長の温度変化の影響を受ける。光ファイバーの場合も同様に温度変化の影響を大きく受けることが予

想される。この場合、ファイバーの線膨張係数による伸縮とファイバーの材質の屈折率の変化の両方によって光路長が変化する。ファイバーの温度係数についてはいくつか測定された例があるが^{10,11)}、屈折率の変化の影響のみを分離して測定した Zumberge らによる結果²⁾を表1に示す。

ここでは、5種類のファイバーについて調べられており、そのうちの二つは互いに直交する偏光面をもったものである。各ファイバーを約1mの長さで両端を張力をかけて固定し、温度制御できる容器の中に入れ、約15°Cから35°Cまでの間を周期的に変化させ光路長の変化をファイバー干渉計で測定することによって温度係数を求めている。箱の中の温度は5個所に置かれたサーミスタ温度計で測定されているが、箱の中の温度分布は一般的に複雑であるので、温度係数の高精度の測定はかなり困難である。この実験では、まず、1種類のファイバーについて時間をかけて温度係数の絶対値を測定し、他のファイバーについては2種類ずつ同じ箱の中に並べて張り、それぞれの温度係数の差を相対的に測定する方法をとっている。この方法では2本のファイバーの温度条件がほとんど同じになるので、高精度の実験が期待できる。

この実験で使用されたファイバーのなかでは、温度係数の最大値が $12.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、最小値は $11.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であり、すべて5%以下の範囲に収まっている。地殻歪をレーザーを用いて測定しようとする場合、温度や気圧

表 1 光ファイバーの温度係数と歪係数²⁾

種 類	温度係数 ^{b)} ($\times 10^{-6}$)	歪係数 ν^c
Newport	11.8	1.163
Lightwave Tech. F 1506 C	11.7	1.159
Lightwave Tech. F 1506 E	11.4	1.162
York 0.9-mm X polarization ^{a)}	12.1	1.169
York 0.9-mm Y polarization	11.4	1.157
York 1.3-mm X polarization	12.1	1.170
York 1.3-mm Y polarization	11.4	1.159

^{a)} York 社のファイバーには互いに直交する二つの偏光面があり、それぞれを X と Y で示してある。また、mm 単位の数字はビート長である。

^{b)} 温度係数の単位は $(\Delta l/l)/^{\circ}\text{C}$ である。

^{c)} 歪係数 ν は 2×10^{-3} の歪に対する値を示す。

の変動からくる屈折率変化の影響を補正するために、波長の大きく異なった二つのレーザーを用いることができる。温度係数の大きく異なるファイバーを用いれば同様のことをより容易に行うことができる。表1の結果では、屈折率変化を補正するのに十分な温度係数の異なるファイバーはいまのところ見つかっていないということができる。

4.3 歪 特 性

光ファイバーの両端を固定し、その間の長さの変化を光ファイバー干渉計で測定しようとする場合、観測される変位は真の変位とは少し異なる。光ファイバーが伸びると、その内径は小さくなるので、その内部を伝播する光の経路の長さの変化量はファイバーの両端の伸びにある係数を掛けた値になる。これはヤング率とポアソン比に関係した量であることが想像できる。さらに、ファイバーが伸びることによって媒質の屈折率も変化するので、その影響も係数に入ってくる。ここでは、これらをひとまとめにして光ファイバーの歪係数と呼ぶことにする。歪係数を ν とすると、真の変位 Δl と光路長の変化 Δl_{op} との関係は、

$$\Delta l_{\text{op}} = \nu \cdot \Delta l \quad (1)$$

と表される。光ファイバー干渉計で変位を測定するためには、歪係数もあらかじめ正確に知っておかなければならない。また、長距離の歪をファイバーを用いて測定しようとする場合に、中継のしかたによっては場所によってファイバーにかかる張力が異なることが懸念される。もしそのようなことが起これば、歪係数も場所によって異なることになるので、正確な歪の測定ができないことになる。そのような場合には、温度特性と同様に歪係数の異なった複数のファイバーを用いて並行に測定すれ

ば、歪係数の不均一の影響を打ち消すことも可能である。

表1に温度特性と同様に、Zumberge らによって測定された5種類のファイバーの歪係数をまとめた²⁾。歪係数の測定は、測定しようとする約 2m のファイバーの片側を固定し、もう一方は微動台の上に固定する。微動台を少しずつ変位させ、その変位量は差動トランスで測定し、光ファイバー干渉計で測定された光路長の変化とを比較することにより歪係数を求める。ファイバーに与えた歪の最大値は約 5×10^{-3} であり、与えた歪が大きいほど歪係数も大きくなる傾向が見られる。表には 2×10^{-3} の歪を与えたときの係数を示してある。それによると、最も大きい値が 1.170、最も小さい値が 1.157 であり、相対的に 1% 以内に分布していることがわかる。温度特性と同様に、ファイバーの種類による歪係数の差はあまり大きくない。

5. お わ り に

光ファイバーを用いて地殻歪を測定しようとする場合、水平方向の歪観測への応用が残された問題であると思われる。鉛直方向の歪測定の場合には、ファイバーを垂らすだけでファイバー自身にある程度の張力がかかり、重力の方向とファイバーの方向が一致しているのでたわみの問題も生じない。水平方向にファイバーを張る場合には、温度係数や歪係数の実験で行ったような 2m 程度の短距離の場合にはそれほど問題とならないが、100 m や 1 km 程度の長距離の場合には自重によるたわみの問題を解決する必要がある。たわみがあると真の歪と測定された歪との関係が複雑になることが予想されるからである。

光ファイバーの長期安定性, 温度特性, 歪特性についていままで行われてきた実験結果から判断して, ファイバーは地殻歪計測に十分耐えられる性能をもっていると思われる. 測定方法を工夫すれば, 他の方法以上の結果を出すことも不可能ではない.

文 献

- 1) F. Wyatt, K. Beckstrom and J. Berger: "The optical anchor—A geophysical strainmeter," Bull. Seism. Soc. Am., **72** (1982) 1701-1715.
- 2) M. A. Zumberge, F. K. Wyatt, D. X. Yu and H. Hanada: "Optical fibers for measurement of earth strain," Appl. Opt., **27** (1988) 4131-4138.
- 3) 佐藤忠弘, 大江昌嗣, 佐藤範雄: "江刺地球潮汐観測施設における潮汐歪の観測", 測地学会誌, **26** (1980) 35-49.
- 4) W. E. Carter, D. S. Robertson and J. R. MacKay: "Geodetic radio interferometric surveying: Applications and results," J. Geophys. Res., **90** (1985) 4577-4587.
- 5) J. Berger and R. Lovberg: "Earth strain measurements with a laser interferometer," Science, **170** (1970) 296-303.
- 6) 志知龍一, 岡田義光: "坑内における歪観測", 測地学会誌, **25** (1979) 101-134.
- 7) 福留篤男: "ボアホール計器による地殻変動連続観測", 測地学会誌, **31** (1985) 25-33.
- 8) 柳沢道夫: "歪ゲージによる地殻歪の測定—室内実験と鋸山観測所における観測—", 測地学会誌, **30** (1984) 274-286.
- 9) D. C. Agnew: "Strainmeters and tiltmeters," Rev. Geophys., **24** (1986) 579-624.
- 10) M. Tateda, S. Tanaka and Y. Sugawara: "Thermal characteristics of phase shift in jacketed optical fibers," Appl. Opt., **19** (1980) 770-773.
- 11) G. B. Hocker: "Fiber-optic sensing of pressure and temperature," Appl. Opt., **18** (1979) 1445-1448.