

光ファイバー変位計の開発

高 森 昭 光*†

Optical Fiber Transducer with High Power LED

Akiteru TAKAMORI*†

はじめに

地震計や傾斜計など、地球科学をはじめ様々な物理計測で用いられる機器には、物体の変位を検出する必要があるものが多数ある。高精度の位置測定を行うためには、対象となる物体の運動状態を乱さない非接触検出法が適しており、静電容量型トランスデューサやレーザー干渉計などが広く用いられている。光ファイバー変位計も、光を用いた非接触高精度位置検出を目的として開発されたものである。この技術の原理は従来から存在するものであるが(例: Suganuma *et al.*, 2000)、高輝度光源を用いるなど、近年利用可能になった技術と組み合わせているところに特色がある。本稿は、開発中の光ファイバー変位計の原理や特徴を他の検出法と比較し、また、開発の現状と将来展望について述べる。

光を用いた位置検出

通常、光を用いて物体の位置を検出するには、光源から発した光を測定対象となる物体に投射し、反射光を光検出器(PD)で検出することによって物体の位置や姿勢の情報を得ている。光源やPDと測定対象との間には機械的接触は不要なので、非接触測定を行うことができるのが最大の特徴である。また、対象物は光を反射しさえすればよいので、位置検出器用の極板やコイルなどを取り付ける必要も無く、装置を単純化することが容易である。さらに、比較的高感度化(高ゲイン化)しやすいことも現実的な利点である。

光による高精度位置検出法の例として、レーザー干渉計が挙げられる。レーザー干渉計では、2本の光路の長さの差の変動を検出する。その際、光の波動性を利用して、2つの光路からの反射光の位相差を、干渉光の強度に変換して

いる。光の位相を直接測ることは不可能なので、干渉を利用している。つまり、実際に得ている信号は干渉光の強度であるが、この信号(I)と、光路長差(dL)との間には、

$$I \propto \cos\left(4\pi \frac{dL}{\lambda}\right) + \text{const.}$$

なる関係が成り立つ(λ は光の波長)ので、干渉光強度から物体の変位を逆算することが可能である。また、測定対象や、基準となる鏡の位置を制御して、干渉光強度が光路長差に比例するような線形領域内に固定すれば、変位に比例した信号を得ることもできる。レーザー干渉計の測定精度を極限まで追求したものが重力波検出器である。現在稼働している重力波検出器での変位測定精度は 10^{-19} mに達している。また、地震研究所のレーザーひずみ計でも、 10^{-12} というひずみ感度を達成している(Takemoto *et al.*, 2004)。このような高精度測定を行うにあたっては、様々な雑音を低減しなくてはならない。

レーザー干渉計では光の波動性を利用して位置の検出を行うが、一方で光の粒子性から、光強度の測定には強度の平方根に比例したショット雑音が原理的に発生する。これによる相対誤差は光強度の平方根に逆比例することになるので、ショット雑音を低減するためには、入射する光の強度を増加させればよい。また、上記の干渉計の例からわかるように、他にも光強度や波長の揺らぎも光位置検出固有の雑音源となる。これらは一般に、制御によって揺らぎを抑制したり、干渉計の場合は同相除去比を改善することによって低減している。

光ファイバー変位計の原理

図1に光ファイバー変位計の模式図を示す。原理的には、入射用・集光用の2本の光ファイバーがあればよい。光源から発して、入射用光ファイバーを通った光はファイバー先端Aから出て測定対象に取り付けられた鏡に当たり、反射する。集光用光ファイバーに入射した光は、ファイバー端Bから出射し、光検出器によってその強度が測定される。入射用光ファイバーに入射する光線がファイバー

2005年8月22日受付, 2005年11月1日受理.

† takamori@eri.u-tokyo.ac.jp

* 東京大学地震研究所地球計測部門.

* Division of Monitoring and Computational Geoscience, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo.

端に対して角度を持っていると、先端から出る光はその角度を持って出射する。そのため、ある角度で入射する光線に着目すると、ファイバー端 A と測定対象となる物体との距離が非常に近いとき（極端には、ファイバーと鏡が接

触しているとき）、反射光は集光用ファイバーに入射しない（図 2A）が、距離が大きくなるに従い、一部または全部の光が集光されるようになる（図 2B, C）、さらに光ファイバーと鏡が離れると、再び反射光は集光用ファイバーを

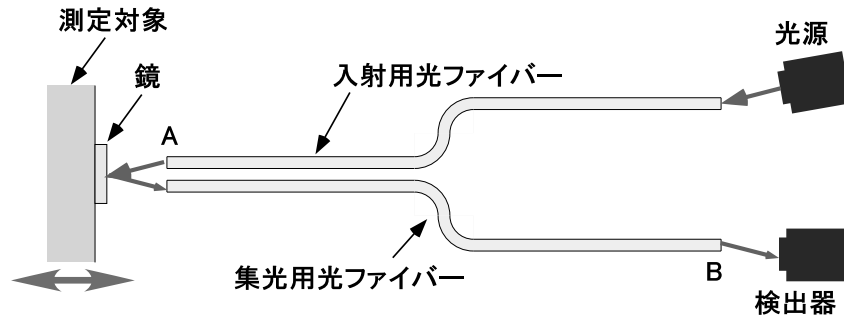


図 1. 光ファイバー変位計模式図

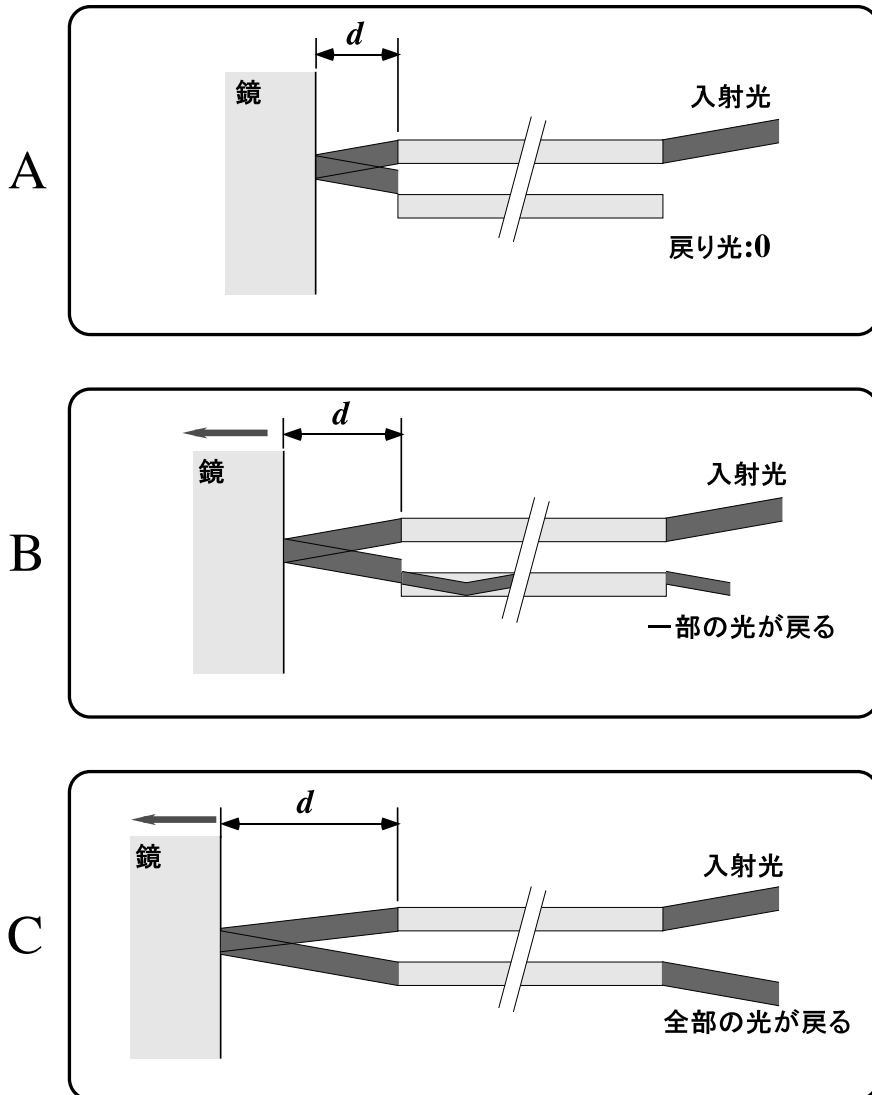


図 2. 光ファイバー変位計動作原理

かすめることなく失われる。したがって、ファイバー端 A と鏡との距離 (d) と戻り光強度との間には、図 3 に示すような極大をもつ関係が成り立つ。この特性曲線は、極大付近を除く微小区間で直線近似できるので、そのような区間では戻り光強度は d と線形の関係にある。

実際の変位計では、光量を増加してショット雑音を低減するために、2本だけでなく、入射・集光ともに多数の光ファイバーを束にしたものを用いる。これによって、センサーが並列化されるだけでなく、入射・集光効率も改善されるので、感度を向上させることができる。また、距離 d と戻り光強度の比例係数（感度）は、光ファイバーの本数やコア直径、隣合うファイバー同士の間隔や光の入射角度などの幾何的因子（Cook and Hamm, 1979, Johnson and Goodman, 1985 など）と、入射光量や入射光の可干渉性な

どの光学的因子によって決定される。例えば、レーザーは入射効率の面では有利な光源であるが、非常に長いコヒーレント長をもつため、複数の入射用光ファイバーから出た光同士が干渉してしまう。この干渉のパターンもまた測定距離 d に依存するので、集光される光の強度は単なる足し算ではなく、干渉の効果も加わった複雑な関数となる。レーザー干渉計では原理的に必要であった光の干渉性が、このような光強度のみを利用した変位計では邪魔になってしまうこともある。

そこで、通常この種のセンサーでは発光ダイオード（LED）が用いられている。LED は集光効率の面ではレーザーに劣るが、10万時間程度の長寿命（レーザーでは1万時間程度が目安）であり、またコスト面でも非常に有利である。

光ファイバー変位計試作機

今回試作した光ファイバー変位計（図 4）では、三菱電線工業製の低損失マルチモードファイバ（石英製、コア径 200 ミクロン、長さ 2 m）61 本（入射用 13 本、集光用 48 本）からなるファイバーバンドルを用いた。ファイバーは SUS 製の 2 分岐フレキシブルチューブに納められており、両端部のみ接着されているので、全体としては非常にしなやかで取り回しが容易である。

光源には高輝度 LED（Lumileds 社製）を用いている。この LED は近年急速に普及している 1W クラスの出力を持つものと同系統のもので、今回用いたモデルはピーク波長 630 nm、トータル光出力 500 mW のものであった。しかし、実際に出力端に達した光量は 1 mW 程度に過ぎなかった。これは、今回用いた集光用レンズでは LED の大きな発光面積（約 3 mm 四方）と拡がり角を、入射用光

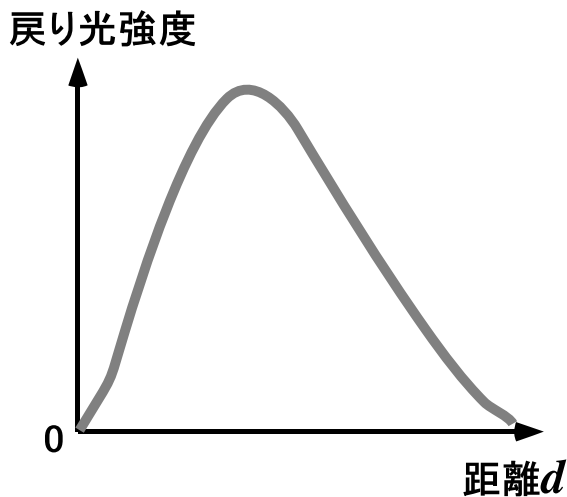


図 3. 光ファイバー変位計特性曲線

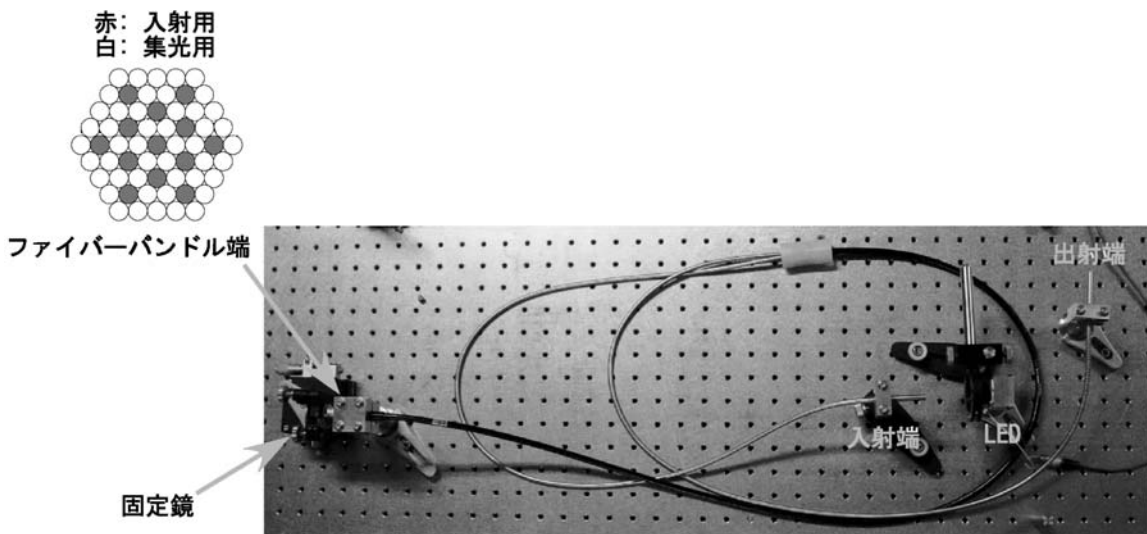


図 4. 光ファイバー変位計試作機

ファイバーの実効的な半径(約0.5mm)まで絞り込むことができなかつたため、今後の改善が必要である。LEDはオーディオ用のハイパワーアンプ(National Semiconductor LM3886)で駆動した。また、受光には標準的なSiフォトダイオードを利用した。

このような構成の光ファイバー変位計の先端を光学ステージに取り付け、光学定盤に固定した誘電多層膜ミラーとの距離を変化させながら反射光強度信号を記録したものが図5である。図からわかるように、ピークを挟んで鏡に近い方(左側のスロープ)、遠い側に2つの線形領域を取ることができ、高感度なのは鏡に近い方の動作領域だということがわかる。高感度領域の中心は、鏡表面から約1mm離れた点であり、線形レンジは約0.5mmである。低感度

側の線形レンジは約1.5mmであり、大変位の測定にも利用できることがわかる。

次に、変位計先端を高感度領域の中心に固定して、鏡との距離を一定に保ったままセンサー出力の周波数スペクトルを測定した(図6)。図から、数百Hz以上でセンサーの分解能が 3×10^{-11} [m/ $\sqrt{\text{Hz}}$]に達していることがわかる。これは、典型的な小型レーザー干渉計の感度には1,2桁及ばないが、多くの用途で十分な分解能である。また、レンジが0.5mmであるから、波長の1/10程度(波長1ミクロンの場合0.0001mm)の線形レンジしか持たない干渉計に比べると扱いやすいと言える。また、長時間動作時のドリフト量は十分に評価されていないが、0.01ミクロン程度と推定される。

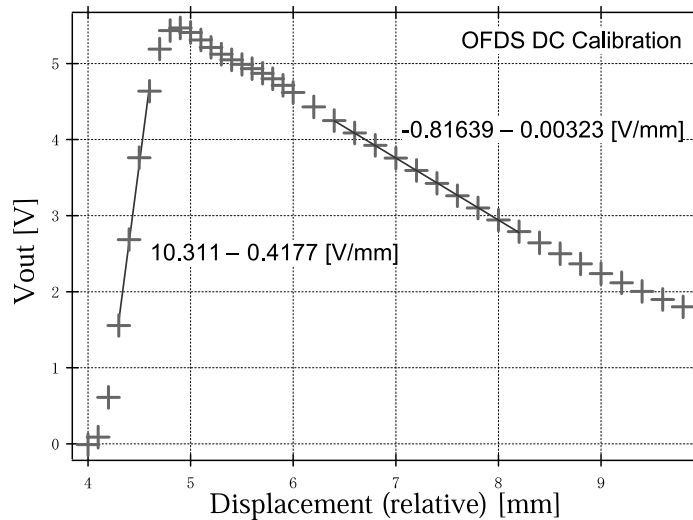


図 5. 試作機の特特性曲線

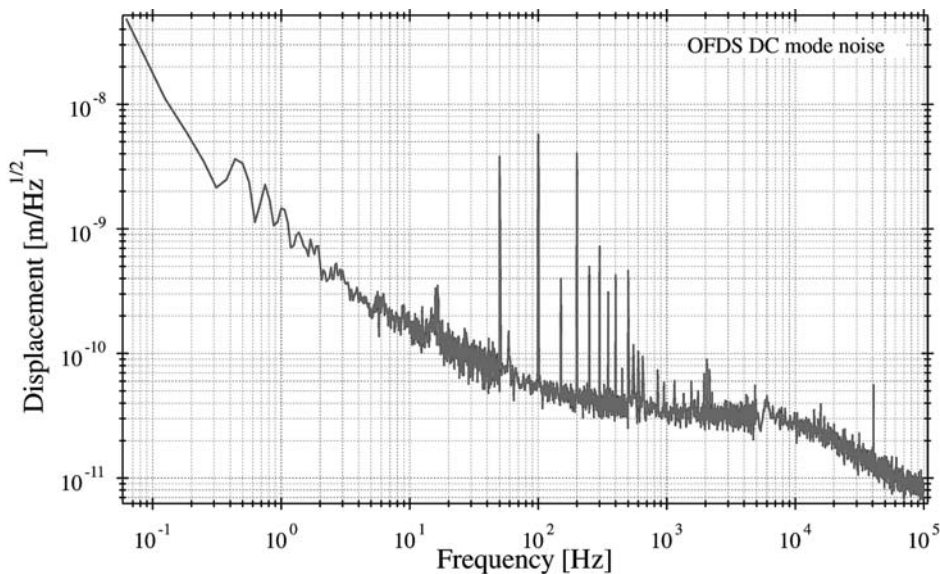


図 6. 試作機の分解能

また、各種の雑音について、実測または見積りを行い、分解能を制限しているのはショット雑音と光の強度揺らぎであることがわかった。

今後の改良としては、まず現在分解能を制限しているショット雑音とLED発光量の揺らぎを低減する。ショット雑音を改善するには入射光量を増やせばよい。このためには(1)非球面レンズ系を導入して集光効率を上げる、(2)LED表面の組み込みレンズを平面研磨して、LEDの発光面とファイバー入射端を密着する、(3)SLDやコリメータつきLEDなど、別の光源を用いる、などの方法を検討している。これらの光源では、トータルの発光量では今回用いたような高輝度LEDよりも劣るが、依然レーザーに比べて長寿命性、コスト面での利点がある。発光量の揺らぎに関しては、より低ノイズのドライバを用いたり、入射光の一部をサンプルして強度安定化の制御を行うことなどで改善できる。SLDには強度モニター用PDが組み込まれたモデルもあるので、そのようなものを使用して、発光強度の安定化に活用することも検討している。

まとめと将来的な展開

光ファイバーとLEDを組み合わせた変位計の特徴として、

- ・信頼性の高い非接触測定が可能
- ・試作機で得られた分解能は多くの応用で十分な値であると考えられる。また、線形レンジが1mm近く取れる。(ファイバー本数に依存する。)
- ・光源として高輝度LEDを用いることによって、高い分解能を保ちつつ、レーザーと比較して大幅な低コスト、長寿命化が図れる。
- ・発光、受光などの電気系(発熱素子)を測定対象である機械系と離せるため、例えば低周波振子を用いた地震計や傾斜計など、温度に敏感な計測に適している。などの利点がある。一方で、
- ・レーザー干渉計と比べて、究極の分解能では劣る。
- ・光強度のみに依存した検出法なので、光ファイバーやLED、反射面の劣化などの影響を受けやすい。また、レーザー干渉計のように、光の波長を基準とした自己

較正が行えない。

といった弱点もある。したがって、これらの要素を考慮すると、光ファイバー変位計は、ある程度大きな現象(10^{-9} mクラス)を、多点展開して長期観測するような応用に向いていると言える。具体的には、ボアホール内や海底で運用する地震計や傾斜計への組み込みが考えられる。これらの場所はメンテナンスが事実上行えないので、長期に渡って安定に動作することは利点である。なお、長期間の運用に際しては較正係数の安定度が重要であるが、光ファイバー変位計単体では較正係数を検証する手段が無い。この問題を克服するには、レーザー干渉計を併用(ただし、こちらは常時動かすわけではなく、較正時のみに動作させる)して定期的に較正を行ったり、光の輻射圧を利用して地震計などの振子を加振して光ファイバー変位計への応答を使って較正する方法などが考えられる。このような較正方法は、重力波検出器で既に試みられている(Sigg and Goetz, 2004)。他の応用として、マイクロフォンのダイアフラム変位の検出などにも適していると考えられる。

謝辞: 光ファイバー変位計開発の立上げは、東京大学21世紀COEプログラム「多圏地球システムの進化と変動の予測可能性—観測地球科学と計算地球科学の融合拠点の形成—」のサポートを受けて行われました。ここに感謝いたします。

文 献

- Cook, R.O. and C.W. Hamm, 1979, Fiber optic displacement transducer, *Appl. Opt.*, **18**, 3230-3241.
- Johnson, M. and G. Goodman, 1985, One- and two-dimensional, differential, reflective fiber displacement sensors, *Appl. Opt.*, **24**, 2369-2372.
- Sigg, D. and E. Goetz, 2004, LIGO Internal Document T04196-00-D, <http://www.ligo.caltech.edu> で入手可能.
- Suganuma, F., A. Shimamoto and K. Tanaka, 2000, Development of a differential, optical, reflective displacement sensor by use of multilayered waveguide, *Appl. Opt.*, **39**, 5745-5749.
- Takemoto, S., A. Araya *et al.*, 2004, A 100 m laser strainmeter system installed in a 1 km deep tunnel at Kamioka, Gifu, Japan, *Journal of Geodynamics*, **38**, 477-488.