

光ファイバを用いたセンシング技術

佐藤 憲史*

Sensing Technologies Using Optical Fibers

Kenji Sato*

Abstract: Transmitted light through optical fibers is sensitive to the state of fibers. The velocity of light, the loss, and the polarization depend on the physical conditions of the fiber. It can be used to measure temperature, pressure, strain, and other physical parameters. Optical fiber sensors have a high potential as a monitor of environment and the weather because of distribution sensing and robustness. An anemometer using optical fibers is proposed and demonstrated. A Mach-Zehnder interferometer with polarization-maintained fibers is used for the sensor. Wind velocity is estimated from the theory based on the vibration of the Karman vortex. The measured spectrum shows the beat signals due to the vibration.

Key Words: Optical fiber sensor, Mach-Zehnder interferometer, anemometer.

1. はじめに

光を応用したセンサには多種多様な製品があり、赤外線センサなど広く使われている。光ファイバは長距離通信用に開発されたが、実用的なファイバが出現した 1970 年代当初から、光ファイバをセンシングに応用することが検討されてきた。このようにして光ファイバセンサが登場したことで光センサの機能が高度化し、適応領域が拡大している。光ファイバに回折格子を形成する技術や光ファイバの加工技術が進歩してきたことから、光ファイバセンサの可能性が広がっている。一方で、光ファイバの特殊性や比較的高いコストから、光ファイバセンサが一般的に普及しているとは言い難い。

本稿では、光ファイバセンサについて、その原理や種類を概観し特徴を明らかにする。次に、著者らが取り組んでいる風速計測応用について述べる。

2. 光ファイバセンサの特徴

石英系光ファイバは、 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯の光に対し、損失係数が $0.2\ \text{dB/km}$ と極めて低損失であり、太平洋横断海底ケーブルなど長距離光ファイバ通信に用いられている。光ファイ

バによる光伝搬はきわめて安定であるが、ファイバを $1\ \text{cm}$ 程度の曲率半径で曲げると伝搬光強度が大きく変動する。また、光の位相や偏波面は、光ファイバの状態に敏感に反応し変化する。これらの現象は、通信応用上問題となるが、同時にセンシングへの応用という視点からは、感度の高いセンサの可能性を持っている。

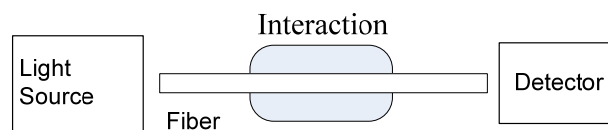


図 1. 光ファイバセンサの基本的な構成。

光ファイバセンサの構成は、図 1 に示すように、基本的には光ファイバ通信と同じである。通信では光源から出射される光を変調し、信号を送信し、光検出器で光信号を検波する。光信号は光ファイバを伝搬中に散乱などによる損失や外部からの相互作用で影響を受け変化するが、通常は信号の受信に問題のない条件で通信が行われる、あるいは、信号処理によって外乱は除去される。光ファイバを伝搬する光と外部との相互作用として、図 2 に示すようなメカニズムがあげられる。光は、通常、レーザから出射されるコヒーレント光であり、ファイバのコアに閉じ込められ、ある伝搬モードで伝搬する。ファイバの形状が変化するとモ

* 電気電子工学科 Department of Electrical and Electronics Engineering

一の伝搬定数や損失が変化する。ファイバの形状を変化させるパラメータとして温度 T がある。温度変化でファイバが伸縮するため、遅延時間（位相）が変化する。圧力 P や機械的な引っ張り歪み ε によっても同様な効果が出現する。光ファイバの曲げにより損失が増大し、光強度が減少する。これは、曲げ損として解析されており、通信ではある規定の曲率半径以上になるようにしている。半導体レーザから出射された光は直線偏波であるが、光ファイバ中ではファイバの歪みによって偏波面が回転する。以上の現象は光ファイバを透過する光について述べたが、図 2 に示すように、散乱光や反射光にも変化が観測される。特に、光ファイバにおける反射光を時間軸上で測定し、光ファイバの長手方向での損失や反射状態をモニタする技術は OTDR (Optical time-domain reflectometry) と呼ばれている。OTDR は通信用に敷設された光ファイバの状態モニタ用に使用されている。光ファイバ内で起こるブリルアン散乱は、その周波数シフトが温度や歪みによって変化するため、温度や歪み計測に応用されている。

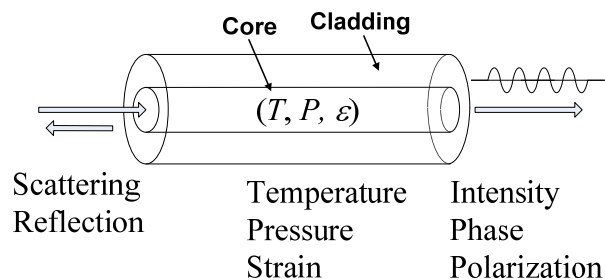


図 2. 光ファイバセンサの原理.

これらの光ファイバセンサは、光ファイバの長手方向の分布を測定可能であり、数 km から数十 km にわたる測定範囲を持つ。光ファイバ自体が低損失であり、長距離にわたって敷設することで広域のモニタが可能になる。これは、光ファイバセンサの大きな特徴である。具体的には、トンネルや海底などで、温度などの環境モニタに使用されている。

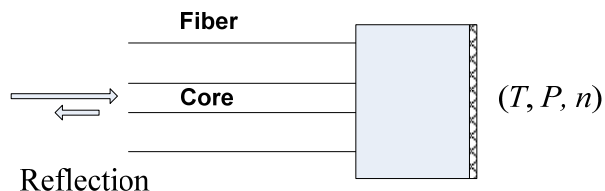


図 3. 端面に構造を持つ光ファイバセンサの構成.

また、光ファイバセンサは、さまざまな悪条件下で使用可能であるという特徴を持つ。電気的な回路を用いていないことから、電磁ノイズの発生する環境や、高温、高湿度においても動作可能である。これは防爆性を持つことにも

つながる。これらの特徴を生かし、光ファイバの先端を加工した各種のプロープが開発されている。図 3 に示すように、光ファイバ端面に異なる物質や空洞を設け共振器構造を形成すると、液体の屈折率 n や圧力などが計測可能になる。光ファイバの加工技術によりさまざまな構造が可能であるが、図 4 に示す回折格子を組み込んだ光ファイバが開発されている。回折格子は波長フィルタとして機能し、そのブラッグ波長 λ_B が温度や圧力、歪みによって変化することを応用する。

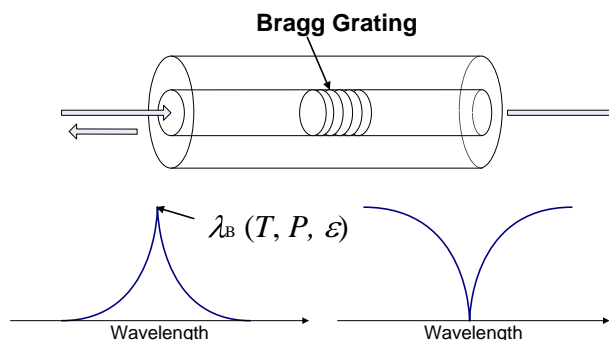


図 4. 光ファイバグレーティングと反射および透過スペクトルの模式図.

温度や歪みをモニタする光ファイバセンサが製品化されているが、他に磁場や振動なども計測可能である。磁場の測定にはメタルコートされた光ファイバをコイル状に形成している。他に光ファイバリングを用いたジャイロスコープがあり、角速度を測定することができる。

3. 光ファイバを用いた風速計

光ファイバセンサは、過酷な環境下で使用可能であり、長距離にわたって分布計測ができることから、環境モニタとしての応用が進展している。例えば、海洋中の温度や振動 [1] などをモニタする光ファイバセンサが開発されている。しかし、風速を計測する提案や試みはほとんど見当たらなかった。我々は、高温下や有害なガスが流れる環境下での風速測定を目的として、光ファイバを用いた風速計を考案し、実験を試みている。

実験の構成を図 5 に示す。光源には、 $1.5 \mu\text{m}$ 帯の分布帰還型半導体レーザ(LD)を用いている。レーザ光は、スペクトル測定における周波数変換のため、変調されている。レーザから出射された光は、単一モード光ファイバを通して光結合器(3 dB Coupler)によって、2つの経路に分岐される。これらの光は再び光結合器で結合される。これは、マッハツェンダ(Mach-Zehnder)干渉計を構成している。1 m 程度の長さを持つ片方の光ファイバに風を当てる。片方の光路に風が当たることで光の位相が変化すると、干渉

計の出力が変化する. その変化は, 干渉計の出力側に結合されたホトダイオード(PD)により検波される. ここで, 光ファイバにはすべて偏波保持ファイバ (PANDA ファイバ) を使用しており, 偏波の回転は無視できるようにしている. 風が当たる光ファイバは樹脂で被覆されており, 0.25mm の直径を持つ. 風が当たることで, 光ファイバはたわみ振動する. わずかなたわみによっても光ファイバの光路長が変化する. レーザ光のファイバ内波長は 1.0 μm 程度であるから, 0.1 μm 程度の光路長差を干渉計を用いて十分に検知できる. ここで, 光ファイバを風に対してどのように配置するかが問題となるが, 30 cm 程度の長さでたるみなく張り, 風向きに直交するように配置して実験した. 風は扇風機を用いて発生させている. センサ以外の部分に風が当たるとノイズとなる. そのため風が当たらないようにカバーをかけ, 保護している.

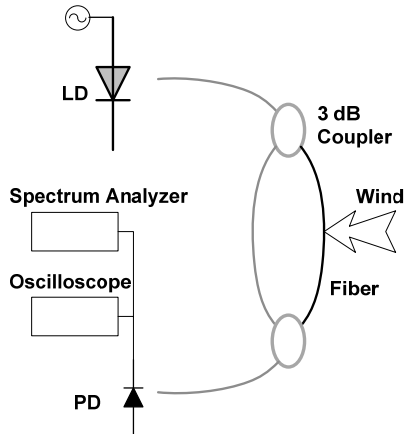
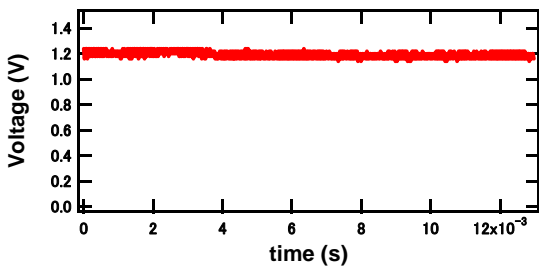
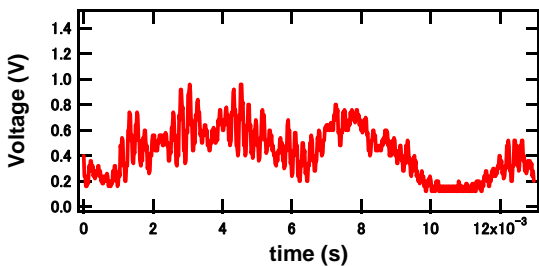


図 5. 光ファイバを用いた風速計の構成.



(a)



(b)

図 6. オシロスコープで観測した風速計の出力波形.

(a). 風速 0 m/s. (b). 風速 5.5 m/s.

光出力をホトダイオードで検波しオシロスコープで観測した結果を, 図 6 に示す. 図(a) は風がない状態の出力波形であり, 図(b) は風速 5.5m/s での出力波形である. ここで, 風速はピトー管を用いた市販の装置を用いて測定された. これらの図をみると, 風によって細かい変動とミリ秒程度のゆっくりした振動が確認できる. 図 7 に示すように, 数秒程度のさらにゆっくりした変動も観測されている. マッハツエンダ干渉計を構成する, センサ部分以外の光ファイバが風のまわりこみや温度変動などの影響を受けるため, 干渉計の出力を変動させる. また, マッハツエンダ干渉計では, 2つの光路の位相差に応じて光出力が正弦波関数で変化するので, 動作点の制御が問題となる. このような出力波形から, 風速を定量的に計測するためには, 風速と光出力の関係を明確にする必要がある.

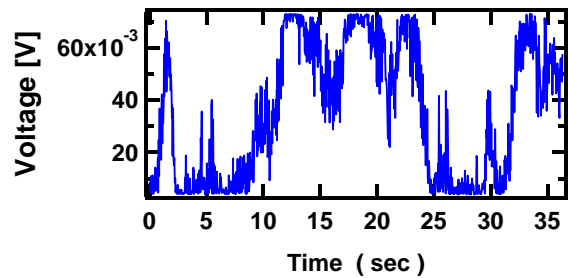


図 7. 37 秒間観測した風速計の出力波形. 風速 4.5 m/s.

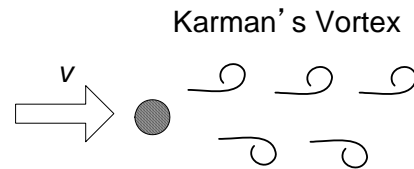


図 8. 流体中の障害物の背後に発生するカルマン渦.

図 6 (b)の出力波形に見られる微細な振動に注目する. 図 8 に示すように, 流体中におかれた障害物の背後にはカルマン渦と呼ばれる渦が発生する. これによって障害物が振動する. カルマン渦が発生する周波数 f は流体の速度 V に比例することが知られており, 以下のように表すことができる.

$$f = S_t \frac{V}{d} \quad (1)$$

ここで, d は障害物を円柱とした時の直径 (ここではファイバの直径), S_t はストロハル数と呼ばれ, 流体の粘性に関係した定数である. 障害物はカルマン渦周波数と同じ周波数で振動する. 障害物の振動を電子デバイスを用いて電気信号に変換し流量を測定する渦流量計が実用化されている. 図 9 は, 図 6 (b)の時間波形に対応した RF スペクトルである. 110 MHz でレーザ光を変調しているため, 中心に鋭いピークが見られる. これは, スペクトルアナ

イザの低域制限を避けるため周波数変換した結果である。図中に、A で示すサイドバンドが観測されるが、カルマン渦による光ファイバの振動と考えられる。このサイドバンド周波数と中心の変調周波数との差から、振動周波数は $f = 4.7 \text{ kHz}$ である。文献[2]よりストロハル数 $S_t = 0.211$ として、式(1)から $V = 5.6 \text{ m/s}$ の値が得られる。これは、ピトー管を用いた市販の装置で測定した値(5.5 m/s)とほぼ一致していることが確認された。このことから、カルマン渦による周波数が観測されており、渦周波数を測定すれば風速を導出できることがわかった。

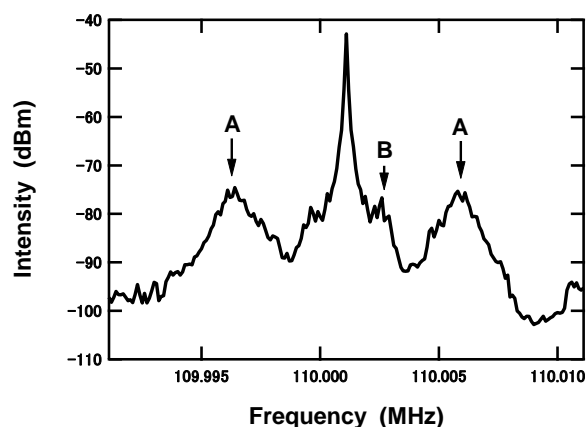


図 9. 風速計の出力の RF スペクトル。
図 6 (b)の時間波形に対応している。

図 9 には、B で示すように、低周波側に他のサイドバンドが見られる。また、スペクトルに現れるサイドバンドの周波数や強度は、風速や光ファイバの配置で変化することが観測された。センサ部分の光ファイバの長さやテンションについて、検討が必要である。また、センサ部以外の光ファイバでの機械的な振動なども出力に影響を与えるため、光ファイバの余長処理が重要である。

4. おわりに

光ファイバセンサについて、その原理や種類を概観し特徴を明らかにした。次に、光ファイバを用いた風速計測応用について、原理とその確認実験の結果を述べた。流体中にある障害物の背後にはカルマン渦が発生するが、その周波数から流速を計測する技術は、電気的なセンサを用いて実用化されている。本研究では、センサ部分に光ファイバを用いて光強度の変化により風速を計測している。光ファイバを用いる利点は、様々な環境下で使用可能になることにある。これを実証するためには、計測を安定化させる技術の開発が求められる。

謝辞

本研究は、豊橋技術科学大学の高専連携教育研究プロジェクトとして開始されたものである。ご指導いただき、同大学福田光男教授に深謝する。光ファイバを用いた風速計について、卒業研究として取り組んだ本校卒業生の内村遼太君と森田裕貴君に感謝する。

参考文献

- [1] 鎌田弘志, 「光ファイバセンサによる音響/環境センシング技術」, 沖テクニカルレビュー, 第 189 号, Vol.69, No.1. pp.80-83, 2002.
- [2] 飯高弘, 佐藤宗純, 村田吉和, 池田健治, 「海洋光ファイバ流速センサに関する基礎的研究」, 日本造船学会論文集, 第 173 号, pp. 237-245, 1993.