

光ファイバセンサの発展と地震観測への活用

田中 昌之¹

¹気象研究所地震津波研究部 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)

Development of fiber optic sensors and their use in earthquake observation

Masayuki TANAKA

Meteorological Research Institute., 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052

Abstract: Fiber optic sensor technology was first proposed about half a century ago. Today, fiber optic sensors are making serious commercial inroads, impacting applications as diverse as downhole oil well pressure sensors to intra-aortic catheters. There are various types of fiber optic sensors, one of which is Distributed Acoustic Sensing (DAS). DAS systems measure acoustic vibrations on the optical fiber based primarily on the principle of Coherent Optical Time Domain Reflectometry (C-OTDR). Highly coherent laser pulses are transmitted through an optical fiber, and the backscattered Rayleigh light is detected and analyzed by the instrument. The local position of the acoustic event is determined by measuring the temporal dependence of the returning light, similar to a radar echo. The DAS system is expected to be utilized for seismic observation because it enables real-time monitoring and can detect vibrations with extremely high sensitivity.

Key Words: DAS, optical fiber, laser pulses, backscattered Rayleigh light

1. はじめに

光ファイバセンサ技術の始まりは約半世紀前の 1970 年代で、現在、ダウンホール油井圧力センサから大動脈内カテーテルまで、さまざまな用途で商業的に本格的に進出して影響を与えている。¹⁾光ファイバセンサにはさまざまな種類があり、その一つとして分布型音響センシング (DAS, Distributed Acoustic Sensing) がある。DAS はリアルタイムモニタリングが可能で、非常に高感度に振動を検出できる光ファイバセンサである。

本発表では、光ファイバセンサ技術の歩みと地震観測への活用が期待されている光ファイバセンサの一つである DAS をご紹介する。

2. 光ファイバセンサの発展

光ファイバは光通信の伝送媒体として広く用いられており、光ファイバセンサ技術の始まりは低い伝送損失の光ファイバや光ファイバ通信に適した半導体光源が作られ始めた約半世紀前の 1970 年代である。1990 年代にコヒーレントな光源を用いたセンサ (C-OTDR) が実用化され、CO₂ 貯蔵時の地層変形監視等の微小な変位計測に用いられるようになり、2010 年代に入ってレイリー散乱光の位相を用いた技術が確立した。極めて高感度な振動が検出できることからこの技術を用いた DAS が自然現象の観測手段として注目されるようになった。^{1), 2)} 光ファイバセンサは光信号を送受信するインタロゲータと光ファイバケーブルで構成し、インタロゲータから光ファイバに入射した光パルスは、光ファイバ上の不純物や光ファイバの接続箇所などで散乱光が発生し、その一部は後方散乱光としてインタロゲータに戻る。インタロゲータから光パルスを発射し、インタロゲータに後方散乱光として戻る時間から散乱光が発生した位置と光量を知ることができる。後方散乱光には主にラマン散乱光、ブリルアン散乱光、レイリー散乱光があり、ラマン散乱光の強度を測定すると温度を測ることができ、また、ブリルアン散乱光は周波数の変化が分かるとひずみや温度を知ることができ、レイリー散乱光は強度や位相の変化が分かると光ファイバの断線、曲げ、伝送損失、外乱で受けた振動やひずみを測定できる。³⁾ 目的に合わせて適切な後方散乱光を用いることで、様々な用途で使われている。温度分布を対象としたセンサはトンネルや化学プラント、工場等の温度管理、火災検知などで、ひずみ分布を対象としたセンサは土木分野や、石油・ガスの採取現場、施設管理などで、振動分布を対象としたセンサは漏水、ケーブル障害、セキュリティ、交通、気象・地象の自然現象、宇宙作業などで使われている。

光ファイバセンサは電気式のセンサにはない以下の利点がある。⁴⁾

- ・センサ部への電源供給は不要
- ・センサ部は落雷や電磁誘導の影響は受けず、防爆性が高い
- ・センサ部は電気ノイズ源にならない
- ・センサ部は耐久性、耐腐食性に優れている
- ・センサ部を細く、軽量化できるので構造物との一体化が容易
- ・センサ部の光ファイバに沿って分布計測が可能
- ・センサ部に既設のダークファイバが使用可能

分布計測が可能な点は、設置個所のみ測定できる一般的なセンサには無い注目すべき特徴で、光ファイバセンサの発展の大きな要因である。

3. DAS の地震観測への活用

一般に地震観測には錘とバネからなる振り子を用いた地震計が使われている。対して DAS はレイリー散乱光の位相から外乱によって光ファイバに生じるひずみを数 m 間隔で最長数十 km の光ファイバ上を一度に計測することができるので、近年、既設の通信用光ファイバを利用した地震観測への活用に関する研究が行われており、自然地震を捉えている (Fig. 1)。地震計は 1 台で点の観測しかできないが、DAS は 1 台で光ファイバの距離に応じて線の観測が可能で、観測点の少ない海域で既設の光海底ケーブルが使えれば観測点を増やすことができる。また、規制で人が立ち入ることができなくなっても、その地域内を通る光ケーブルに接続できれば、その地域内での揺れを観測することができる。注意すべき点は一度に 1 万地点超の観測データを生成できるので、特に長期連続観測を行う場合は、観測点間隔やサンプリング周波数などの観測方法とデータの保存や管理について事前に検討しておくといよい。

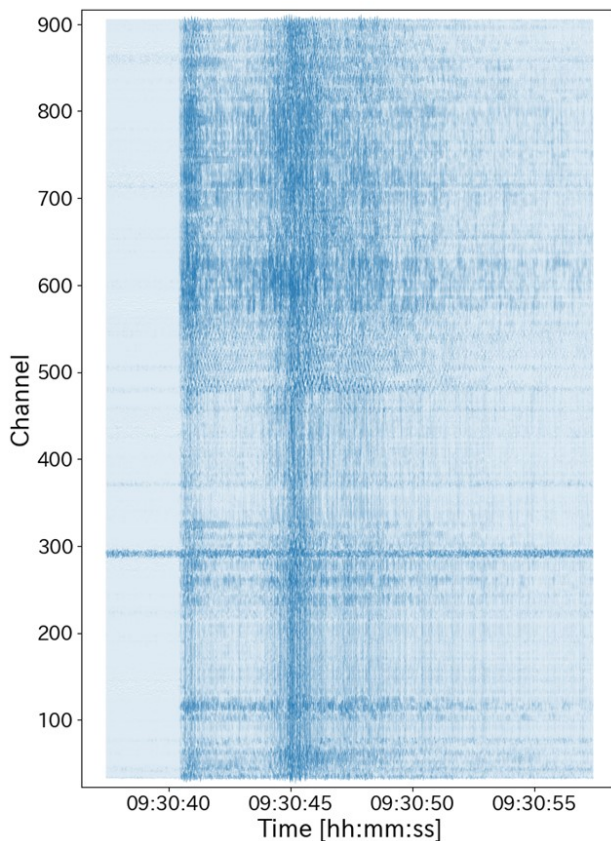


Fig. 1. Earthquake record observed by DAS.
This is an earthquake record that occurred near Lake Hamana on April 7, 2022, and was observed at Funagira Tunnel (D=918.3m) in Tenryu Ward, Hamamatsu City, Shizuoka Prefecture.

参考文献

- 1) 中村健太郎: 光ファイバセンサ技術の概要と研究動向(1), センサイト web ジャーナル, 特集 2021 年 1 月号.
- 2) Arthur H. Hartog: An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors, CRC Press p. 442.
- 3) 平 亨: Distributed Acoustic Sensing (DAS) 技術を活用した地震探査, 石油・天然ガス資源情報, 2023 年 2 月 21 日.
- 4) 小泉健吾, 村井 仁, 山口徳郎: 社会インフラを支える分布型光ファイバセンシング技術, 電気設備学会誌, 第 37 卷(2017 年) 10 月号 P. 736-739.