

光ファイバセンサによる 駿河湾での地震観測

新藤 雄吾

吉川 隆

日々数多くの地震が起きる“地震国”日本には全国1,000箇所以上に地震計が設置され、地震観測が行われている。しかし、観測点の大部分は陸域にあり、海域への地震計整備は大幅に遅れている。多くの地震は海底下の大陸プレートの境界で起きることから海域での地震観測は非常に重要である。

また、数年後には地球構造の解明に向けて海洋科学技術センターを中心とし国際海底掘削プロジェクト（IODP：Integrated Ocean Drilling Program）がスタートする。そのプロジェクトでは高温の地球深部掘削孔内で地震観測の計画もあり、海底または高温下での長期観測可能な地震計開発が必用不可欠となっている。

一方、我々は微小物理量を検出する方法として干渉型光ファイバセンサの開発を行ってきた。光ファイバセンサは、物理計測量の変化を光ファイバの伸縮に変換して検出することが可能であり、

- 光の波長を利用した高精度計測
- 耐環境性（水中、高温等）に優れる
- 信号の長距離伝送性

等のメリットがある。これらの特徴は陸域・海域を問わず観測網を構築でき、地球深部など高温領域での観測をも可能とすると考える。

以上の背景を踏まえ、我々は地震観測向けとして光ファイバ加速度センサを開発してきた¹⁾。また、開発した光ファイバ加速度センサを用いて駿河湾での地震観測を海洋科学技術センターと共同で行った²⁾。この観測を通して数多くの地震記録（微小地震から、例えば三宅島噴火に伴う大地震まで）を得ており、記録データは光センサを用いた地震観測の有効性を示すものであると結論付けられた。

本報では、光ファイバ加速度センサの構成および駿河湾で行った地震観測のシステム構成について述べ、観測した地震データの考察を行う。

光ファイバ加速度センサの構成

図1に光ファイバ加速度センサのシステム構成を示す。本システムは、マイケルソン干渉計のセンサヘッドを光バルスと遅延ファイバの組み合わせで時分割多重化した

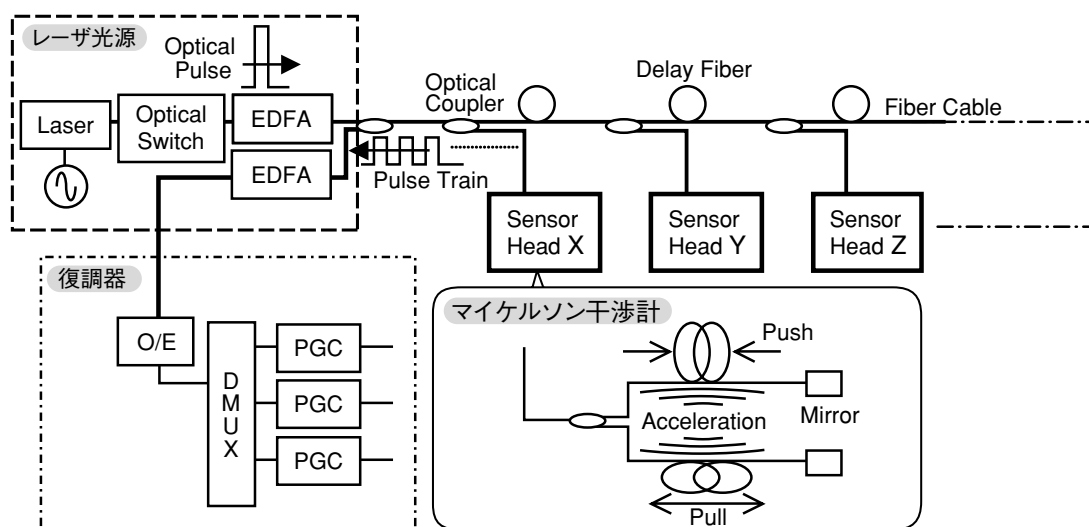


図1 光ファイバ加速度センサシステム

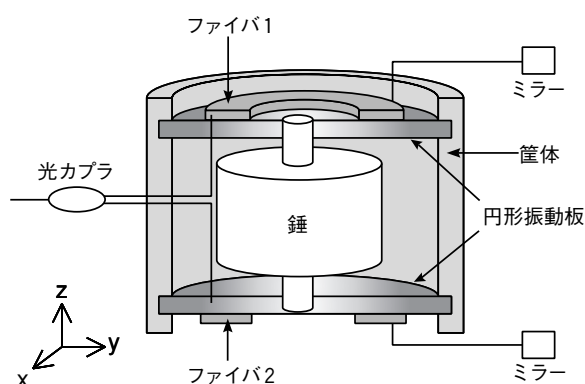


図2 センサヘッドの構造

アレイ構成である。光源部はFM変調したレーザ光源、それをパルス化するための光スイッチからなり、伝送距離、センサ数に応じてEDFA（Erbium Doped Fiber Amplifier）等の光増幅器を設置する。

復調部では、O/E変換器にてレーザ光を電気信号に変換し各センサヘッドからの信号をDMUX（Demultiplexer）によりチャンネル分離した後、PGC（Phase Generated Carrier）方式³⁾の復調処理を施す。

センサヘッドの構造および原理

図2にセンサヘッドの構造を示す。センサヘッドの光学系の構成は、片端にミラーを取り付けた2本の光ファイバ（ファイバ1、2）を光カプラで結合したマイケルソン干渉計とした。

振動加速度を光ファイバの伸縮に変換する機械系の構成は、図2のように錘を2枚の円形振動板で支えるマス-スプリング系とした。ファイバ1、2はそれぞれ2枚の円形振動板の外側面に渦巻き状に巻き付け接着してある。

センサヘッドが縦方向（図2のZ軸）に振動すると、錘に振動加速度に比例した慣性力が加わり、振動板が屈曲振動する。このときファイバ1、2を取り付けた振動板の各面は互いに逆相の振動モードとなり、ファイバ1、2はそれぞれ逆相で伸縮し、干渉計の光路差が変化する。マイケルソン干渉計は光路差の変化をレーザ光の位相変化として検出するもので、干渉光に復調処理を施すことによりセンサヘッドに加わった振動加速度を得ることできる。

一方、温度等の外乱に対しては、ファイバ1、2が同相で伸縮するため、干渉計の光路差がほとんど変化せず、影響を受けない。

写真1に開発した光ファイバ加速度センサの外観を示す。通常の地震観測帯域（1～50Hz程度）では $1\mu g$ （g:重力加速度）以下の振動加速度を検出するものとなっている²⁾。

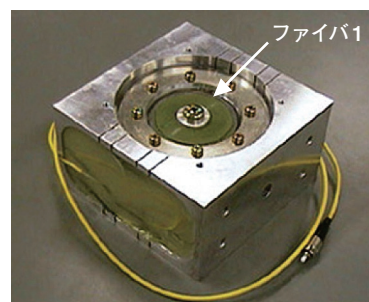


写真1 光ファイバ加速度センサ

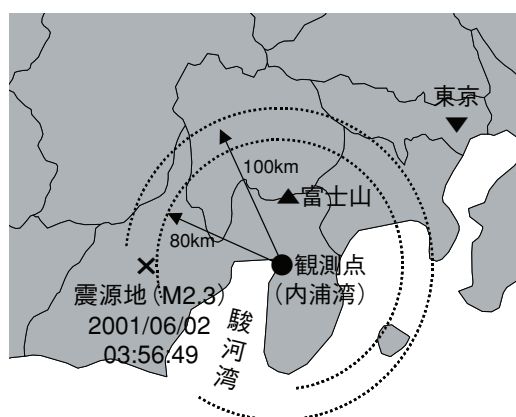


図3 観測点と震源地

駿河湾での地震観測

光ファイバ加速度センサを海底に設置し地震観測を行った²⁾。観測点は駿河湾東部に位置する内浦湾（静岡県沼津市）である（図3）。

図4に海底地震観測の概観を示す。陸上部（レーザ光源、復調器、GPS時計および記録器）は（株）オキシテックの計測バージSeatec II（写真2）に設置した。

海底部は、圧力容器に“東西”・“南北”・“上下”に向けた3個のセンサヘッドを入れ、海底に設置した。また、観測を3ポイントのアレイ観測とし、圧力容器3台をそれぞれ図4のS・W・Cの各ポイントに設置し、“L”字型アレイ（間隔：50m）を構成した。

写真3は圧力容器の外観で、海底設置の様子を示す。圧力容器はコンクリートブロックに固定して設置している。

なお、陸上部と海底部は光ファイバケーブルで接続し、合計9個のセンサ部は時分割方式により多重化を行った。

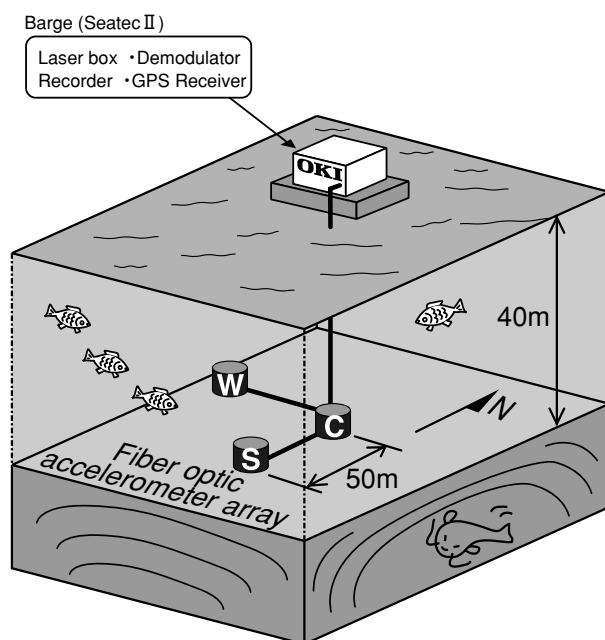


図4 海底地震観測

観測結果

1999年12月～2001年8月まで地震観測を行い、その間に駿河湾内の微小地震や三宅島の噴火に伴う地震をはじめとして等数多くの記録を得ることができた。

以下に、2001年6月頃に多発した静岡県中部（図3の×部周辺）を震源とする地震の記録を紹介する。

図5に観測記録を示す。図は2001.06.02 03:57頃の1分間の記録である。図の上段より、Sポイント、WポイントおよびCポイントの結果であり、また図の左列より南北成分、東西成分および上下成分を示す。図の横軸は時間 [sec] で、0 [sec] が03:56:50.00を、縦軸は加速度レベル [mg] を示す。図より、全てのセンサで明瞭に地震のP波およびS波を記録しており、P波・S波の到達時間差は約10秒であることが分かる。

PS波の到達時間差から震源までの距離を概算する大森公式⁴⁾を用いれば、観測点と震源までの距離は約80kmと見積もられる。

図6は上下成分のP波到達時付近の拡大図（図5の点線部）である。図より、地震波はWポイントに到達した後、S、Cポイントにほぼ同時に到達していることが分かる。これは、震源は観測点のほぼ真西に位置することを意味する。以上より、震源は観測点の西方約80kmと推定される。

一方、防災科学研究所の高感度地震観測網（Hi-Net）によれば、P波到達時刻とほぼ同時刻の3:56:49に静岡中



写真2 Seatec II

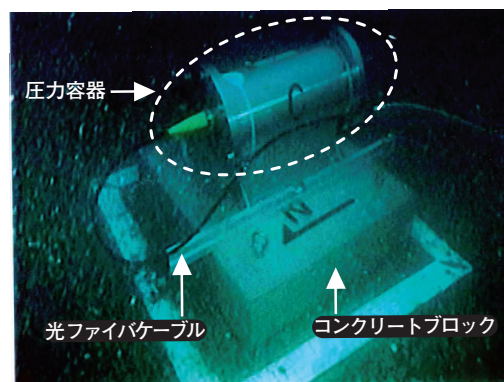


写真3 海底での設置状態
(3つのセンサヘッドを内蔵)

部を震源とする地震が報告されている。

したがって、図5の地震記録は、Hi-netの記録と比較して、震源までの距離、方位および同時性より、静岡県中部を震源とする地震であると確定できる。

なお、この地震はマグニチュード2.3の微小地震であり、80km離れた内浦湾周辺での有感地震記録はない。したがって、今回の地震記録は、低雑音場である海底において、高感度な光センサを用いたことによって取得しえたものであることになる。これは本試験の有益性を示す実績に他ならない。

まとめ

これまで開発を行ってきた光ファイバ加速度センサを駿河湾内の海底に設置し、海底での地震観測を海洋科学技術センターと共同で行った。

光ファイバ加速度センサは $1\mu\text{g}$ 以下の微弱な振動を検出でき、長期間の海底地震観測を行った結果、数多くの微小地震を観測することに成功した。

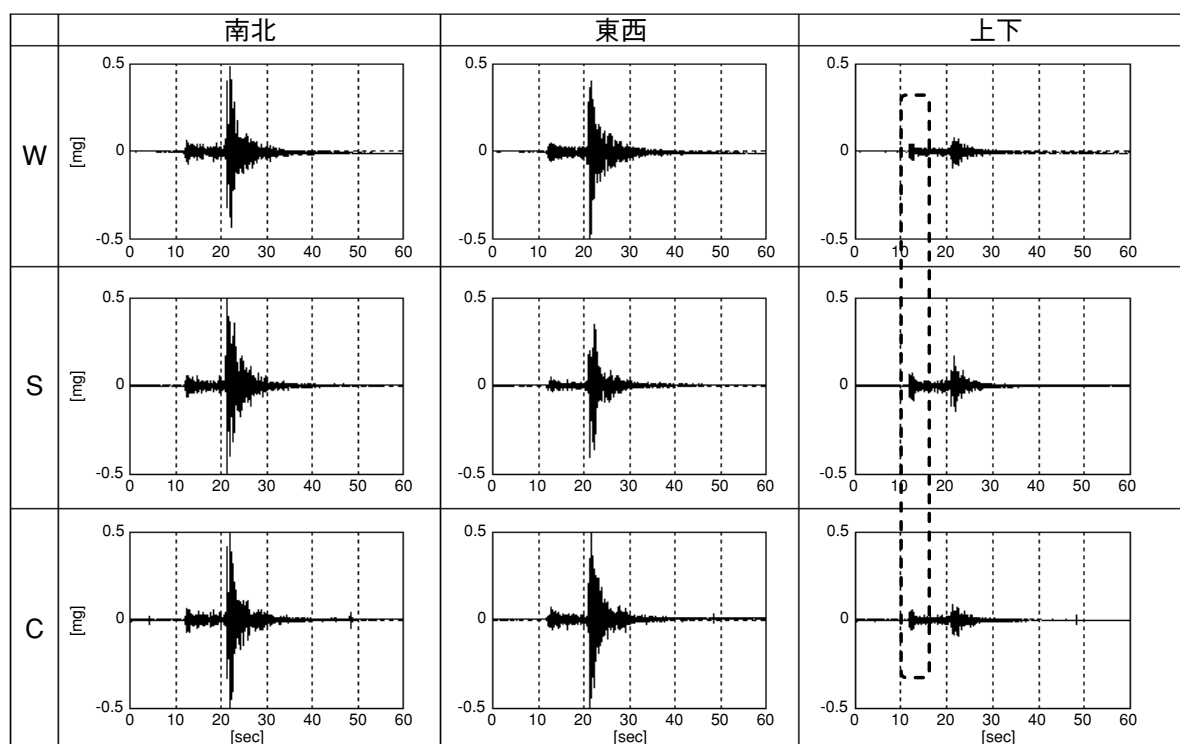


図5 地震記録 (2001年6月2日 3時56分頃)

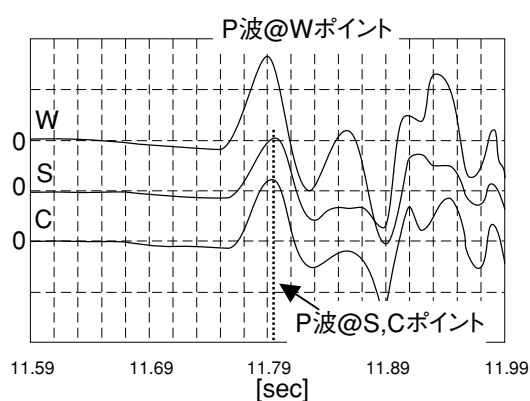


図6 P波到達時 (上下方向)

現在は、さらに小さな地震を観測するためのセンサ部の高感度化、および広範囲の地震観測を行うためのセンシングネットワーク広域化の検討を行っている。 ◆◆

参考文献

- 1) 新藤他：沖電気研究開発177号，“光ファイバ加速度センサ”，Vol.65 No.1，pp.91-94，1998年1月

- 2) Y.Shindo : "A Large Scale Seismic Sensing Array on the Seafloor with Fiber Optic Accelerometers", Proc.IEEE Sensors2002, Vol. II, pp.1767-1770, 2002
- 3) A.Dandridge, et al. : "Homodyne Demodulation Scheme for Fiber Optic Sensors using Phase Generated Carrier", IEEE J.Quantum electron Vol.QE-18, pp.1647-1653, 1982
- 4) 宇津徳治編：“地震の事典”，朝倉書店，p.43，1995年

筆者紹介

新藤雄吾：Yugo Shindo.システムソリューションカンパニー ディフェンスシステム本部 技術第三部 音響第二チーム
 吉川隆：Takashi Yoshikawa.システムソリューションカンパニー ディフェンスシステム本部 研究開発部 センサシステム研究チームリーダー