

12 - 5 海域での光ファイバーを用いた広帯域地震・地殻変動観測の現在と展望 Current Status and Future Prospects of Broadband Seismic and Crustal Deformation Observation Using Optical Fiber in the Sea Area

荒木 英一郎 (海洋研究開発機構)

Eiichiro Araki (JAMSTEC)

1. はじめに

海洋研究開発機構では、南海トラフを中心として地震発生帯の現状把握を目的とした海底地震・地殻変動のリアルタイム観測を進めている。中心的課題としては、海域でのゆっくり滑り・ゆっくり滑りの発生状況の把握や、地震発生時の地震のメカニズムや周辺での地殻変動量の把握があり、掘削孔内での観測などを進めているところであるが、南海トラフの現状の正しい把握のためには、海域での高感度な観測網を広域に展開することが必要である。そのため、最近では海域での光ファイバーの伸縮を計測することによっても、このような課題に対応すべく、研究開発を進めている。

2. 光ファイバーを用いた歪観測手法と実施例

光ファイバーを伝わる光波の、複数点からの反射波やレイリー散乱波の位相を比較計測することにより、複数点間の光路長を計測することができる。その光路長は、光ファイバーの長さ方向の歪・軸方向の圧力・温度によって変化するため、歪・圧力・温度を計測することが可能となる。

光路長位相変化計測の原理から一般的に得られる線形性によって、原理的に高ダイナミックレンジ・広帯域性を持つという利点があるため、機構では、海底に 200m 程度展張した光ファイバーの光路長を計測する 1)「光ファイバー歪計」や、長い海底ケーブルの長さ変化を計測する 2)「長基線光ファイバー計測」、海底ケーブルのレイリー散乱波の位相評価を行う DAS や TW-COTDR 等の 3) 光ファイバーセンシング技術を使った海底計測を行っている。

光ファイバー歪計は、海底に伸張したファイバー (200m) と等長の reference 光ファイバーの長さをマイケルソン干渉計によって比較計測するものである。マイケルソン干渉計では、干渉光の位相はレーザー波長の変化で変化するが、ほぼ等長の比較であるため、レーザー波長の変化の影響が小さい。光路長は地震・地殻変動計測として適切な長さを設定しており、また、光ファイバーの種類を複数同時に計測することにより、温度変化の影響を判別しうるものとしている。機構では、スクリプス海洋研究所の成果 (Zumberge et al., 2018)¹⁾ を基に 2019 年に 1 点 DONET-2 に設置・接続 (第 1 図) し、観測を行っている (Araki et al., 2019; Araki et al., 2021)²⁾。この観測では、遠地を含む地震・VLFE を広帯域に観測できているほか、海洋潮汐によく同期した歪変動や浅部ゆっくり滑りと考えられるゆっくりとした海底歪変動が検出されている。

長基線光ファイバー計測は、展開された海底光ファイバーの全長や中継器で戻ってくる光位相の計測を行うもので (Marra et al., 2018; Marra et al., 2022)^{4), 5)}、地震などの計測に成功している。この計測手法の特徴は、基線長が非常に長く (~50km)、計測範囲も広い (~大西洋横断) ことである。一方、光ファイバー歪計と比べると、比較する光路差が大きいため、レーザーの波長変動の影響が大きく、高安定・狭線幅なレーザーが計測実施には必要となる。また、

基線長が長いことから、光位相変化が速く、高速の計測系が必要となる。機構も、同様の計測を北海道一本州間の海底ケーブル（～50km 長）で実施し（荒木他, 2022）⁶⁾、2021/10/6 青森沖 M5.6 地震時に振幅数 mm のケーブル光路長変化を計測した。広域の地震や地震時地殻変動の計測に非常に有望と考えられるが、長期変動の検出には、温度変化の影響が非常に大きいため、注意が必要である。

光ファイバーセンシングは、光ファイバーに入射した光に対応して、レイリー散乱光が光ファイバーのありとあらゆる地点から散乱して戻ってくるため、入射光と多数の散乱光の光位相を比較計測することで、ケーブルの歪分布計測を行うものである。ケーブル上のありとあらゆる点が計測対象となり、ゆえに稠密な計測が可能である。機構では現在、DAS や TW-COTDR と呼ばれる複数の計測方式による海底光ファイバーの歪計測にかかわる研究開発を行っている。

光ファイバーセンシングのうち、DAS は、レイリー散乱光の gauge length だけ離れた 2 点の光位相差の時間変化を計測する方式である。500Hz 以上の高サンプルレートで観測できることから、地震の観測で広く用いられている。一方、地震の振幅が大きい場合、位相変化を追い切れず、計測歪に誤差が生じる。また、現在の市販製品は使用しているレーザーの波長揺らぎが大きいことが主要因とする大きな長周期の観測ノイズがみられ、超低周波地震などの長周期地震動計測が行えない。そこで、機構では、高安定レーザーと改良した DAS 処理アルゴリズムによって短周期～長周期の DAS 観測限界を拡大した。これによって、これまでの DAS では観測ができなかった Infragravity wave (0.005~0.05Hz 長周期の海洋重力波) などの長周期地震動が DAS で明瞭に観測されるようになっている（第 2 図）。

光ファイバーセンシングのうち TW-COTDR は、光ファイバーからのレイリー散乱光の波長依存（Rayleigh Intensity Pattern）が歪によって波長シフトをすることを利用した計測方式によるものである。時間変化を連続的に追跡する必要がないため、原理的に長期間の変動を安定に計測できる。機構では、光ファイバーセンシング技術開発を科研費学術変革領域研究 (a) (Slow-to-Fast 地震学) で実施しており、そのなかで海底地殻変動の観測に適した TW-COTDR 観測機器を開発し、開発した機器を用いて室戸沖ケーブルでの長期観測を 2022 年 4 月より開始している。室戸ケーブルの観測では、局所的に歪日変動が数 μ strain に達する地域があるが、多くは 1μ strain 程度で周期的に変動する観測データが得られた（第 3 図）。観測された歪変動の多くは、実際の地殻歪変動ではなく、水温変動に起因しているものと考えられ、今後、日変動の小さい領域の現場温度を同時計測することで、より高い精度で沖合の地殻変動を観測する予定である。

3. 課題と展望

光ファイバーによる長周期観測については、光ファイバー歪計や長基線観測が有効である他、光ファイバーセンシング DAS についてもレーザー光の安定化などによって観測限界を拡大してきた。

他の光ファイバーを使った観測の課題としては、海底と光ファイバーケーブルのカップリングがある。地殻の変形がカップリングによって光ファイバーの変動に繋がり、初めて観測されるからである。カップリングの状態が場所により大きく異なることが多くみられ、それは、光ファイバーセンシング等の特長である多点計測により一定解決されるものの、カップリングの

不十分なところでは、海底の水流の影響や、地震時のケーブルの動きが実態と合わない等の可能性が考えられる。そのような問題を解決するため、機構では、海底光ファイバーケーブルの地中埋設や固定等についても検討している。

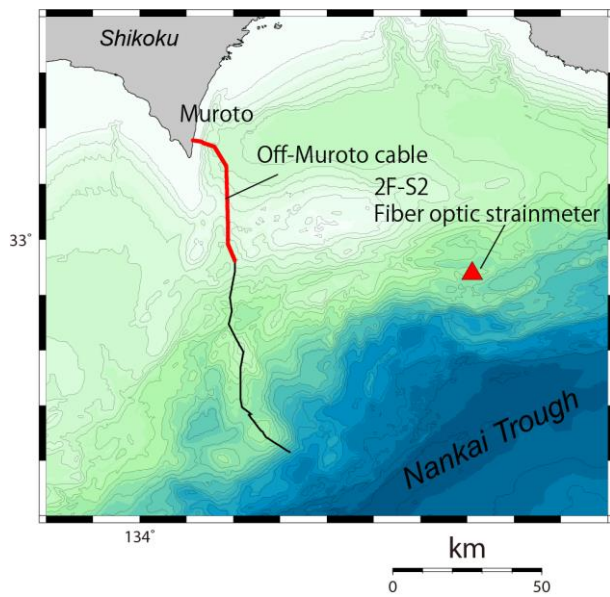
光ファイバーセンシングでの、沖合遠距離での観測を行うことについても現状では課題である。これに関しては、現在、海底設置の光ファイバーセンシング観測装置の開発を検討しているが、観測装置の観測距離の遠距離化等によっても解決されるものと考えられる。

(荒木 英一郎)

ARAKI Eiichiro

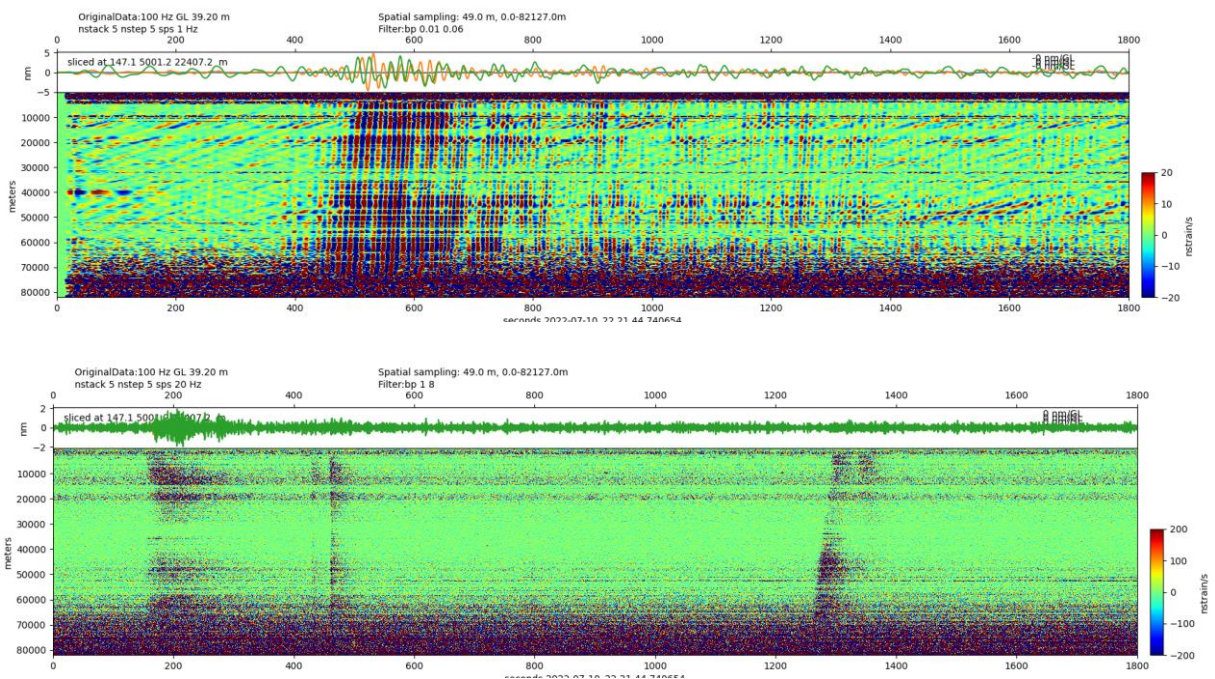
参考文献

- 1) Zumberge, M. A., Hatfield, W., & Wyatt, F. K. (2018), Measuring seafloor strain with an optical fiber interferometer. *Earth and Space Science*, **5**, 371–379.
- 2) Eiichiro Araki, Mark Zumberge, Takashi Yokobiki, Shuhei Nishida, Toshinori Kimura, Yuya Machida, Shuichi Kodaira (2019), Observation of slow crustal deformation by seafloor fiber optic strainmeter connected to DONET seafloor cable observation network, AGU fall meeting.
- 3) Eiichiro Araki, Shuhei Nishida, Takashi Yokobiki, Matthew James Cook, Mark Zumberge, Toshinori Kimura, Yuya Machida, Shuichi Kodaira (2021), Seafloor fiber optic strainmeter performance with different cable laying condition, JpGU.
- 4) Giuseppe Marra, Cecilia Clivati, Richard Luckett, Anna Tampellini, Jochen Kronjager, Louise Wright, Alberto Mura, Filippo Levi, Stephen Robinson, Andre Xuereb, Brian Baptie, Davide Calonico (2018), Ultrastable laser interferometry for earthquake detection with terrestrial and submarine cables, *Science*, **361**, 486-490.
- 5) G. Marra, D. M. Fairweather, V. Kamalov, P. Gaynor, M. Cantono, S. Mulholland, B. Baptie, J. C. Castellanos, G. Vagenas, J.-O. Gaudron, J. Kronjager, I. R. Hill, M. Schioppo, I. Barbeito Edreira, K. A. Burrows, C. Clivati, D. Calonico, A. Curtis (2022), Optical interferometry-based array of seafloor environmental sensors using a transoceanic submarine cable, *Science*, **376**, 874-879.
- 6) 荒木 英一郎, 横引 貴史, 川真田 桂, 内山 敬介 (2022), 海底光ファイバーケーブルを用いた津軽海峡での地震観測, JpGU.



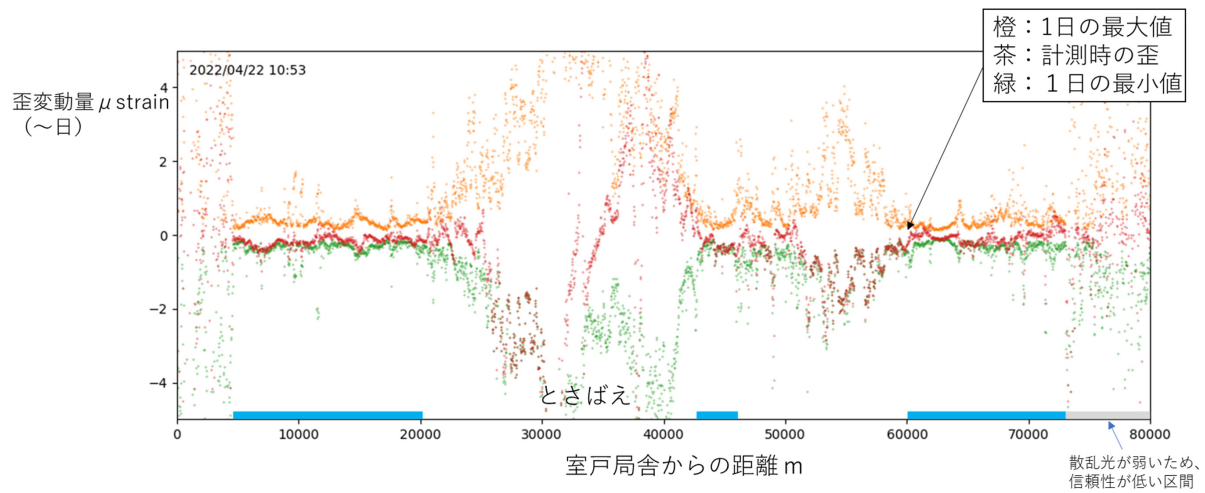
第 1 図 南海トラフ海底に設置された光ファイバー歪計 (2F-S2) および光ファイバーセンシング試験を行っている室戸沖ケーブルの位置 (赤線は、局舎から 50km の範囲)。

Fig. 1 Location of the optical fiber strainmeter (2F-S2) installed on the Nankai Trough seafloor and the Muroto-oki cable where the optical fiber sensing test is being conducted (red line indicates the area 50 km from the station).



第 2 図 長周期観測ノイズを改善した DAS で計測された遠地地震 (Mariana Islands region 18.772N, 147.046E M 5.6 Depth:10 km UTC: 10 Jul 2022 22:19:59) の記録 (上: 0.01-0.08Hz フィルター 下: 1-8 Hz) 横軸 1800 秒間、縦軸局舎から 0-80000 m 区間。

Fig. 2 Teleseismic earthquake (Mariana Islands region 18.772N, 147.046E M 5.6 Depth:10 km UTC: 10 Jul 2022 22:19:59) measured by DAS with improved long-period observation noise (top: 0.01-0.08 Hz filter bottom: 1-8 Hz) Horizontal Axis: 1800 s, Vertical axis: 0-80000 m section from the Muroto shore station.



第 3 図 室戸沖ケーブルで TW-COTDR により計測された局舎からの距離 (m) に対する日歪変化量 (μ 歪) の関係.

Fig. 3 Relationship between the daily strain variation (μ strain) and the distance from the station (m) measured by TW-COTDR in the Muroto-oki cable.