

## 光ケーブルを利用した京都国道9号沿いにおける超高密度地震観測 Super-Dense Seismic Observation Using Optical Fiber Sensing along Route 9 in Kyoto

○宮澤理稔・江本賢太郎・中原恒・辻健

○Masatoshi MIYAZAWA・Kentaro EMOTO・Hisashi NAKAHARA・Takeshi TSUJI

Distributed acoustic sensing (DAS) is a new technique to measure spatio-temporal strain changes along an optical fiber cable utilizing Rayleigh scattering. The advantages of its application to seismic observations include that a pre-existing optical fiber cable can be used as a sensor, providing a high-density seismic array, and the data can be acquired at a high sampling rate. Using the DAS system, we measured the strain rates using a 50 km-long optical fiber cable along Route 9 from Kyoto station to Kyotamba town that extends in an NW-SE direction, during the period from Aug 23 to Sept 24, 2021. The spatial sampling was 5.1 m, corresponding to the total number of channels of 9,788, and the temporal sampling was 500 sps. We observed local earthquakes with magnitudes from 0.4 to 3.2 and some moderate earthquakes that occurred several hundreds of km far from the cable, e.g., the M5.1 Noto earthquake (Sept 16) and the M5.3 and M4.9 Hida earthquakes (Sept 19).

### 1. はじめに

分布型音響センシング (Distributed Acoustic Sensing; DAS) は、光ファイバー通信ケーブルの伸縮測定に用いられる、近年実用化された技術である。ケーブル内で生じるレーザー光のレイリー散乱現象を利用し、ケーブル内の任意の場所におけるゲージ長に対する位相変化量、即ち歪み速度に相当する物理量を測定することができる。地表や地下に敷設された光ケーブルを利用すれば、地震による弾性波動場を捉えることも可能であるため、単点毎にセンサーを設置する必要のあるこれまでの地震観測をチャンネル数で凌駕する観測が可能である。これまでに、陸域や海域に敷設された光ケーブルを測定した研究結果が報告されているが、地震観測において実用化されるためには、長い期間の観測事例が欠かせない。

本研究では一般国道9号沿いに敷設されたケーブルのうち、京都駅前にある近畿地方整備局京都国道事務所から北西に約50 km先の地点までの区間を利用してDAS測定を行った。なお国土交通省は、公共施設管理のために総延長15,800 kmにも及ぶ河川・道路管理用光ファイバーを全国に敷設しており、この一部を利用する。本研究の調査地域の特徴として、(i) 定常的に地殻内地震活動度の高い丹波地域であるため地震観測事例が数多く期待されること、(ii) ケーブルが京都西山断層帯を跨いでおり未だ明確でない断層の深部ジオメトリ

の調査に貢献できること、(iii) 橋梁の構造モニタリングが試みられること、(iv) バックグラウンドノイズと気象現象との対応調査等が挙げられる。本発表では主に地震観測の結果について紹介する。

### 2. DAS測定条件

測定にはAP Sensing社のDASシステムを利用した。測定の条件は、ゲージ長40.8 m、空間サンプリング5.1 m、時間サンプリング500 Hzである。これは利用した50 kmのケーブル区間に対して9,788ヶ所での測定に対応する。測定時刻はGPSにより同期を行い、精度を担保した。場所は、京都駅前の京都国道事務所から丹波IC辺りまでの区間である。測定期間は2021年8月23日から同9月24日までの33日間である。この間、DASシステム自体に大きな問題はなく順調に記録収集が行えた。記録容量は一日当たり約0.9 TBであり、外付けHDDに都度移動保存させた。また並行観測のため、国道9号沿いの老ノ坂スノーステーション付近に固有周期2 Hzの三成分短周期地震計を設置して、地表の振動を連続観測した。

### 3. 測定結果

振動は、各チャンネルにおける位相変化として観測されており、歪み速度に相当する。主に大型車の移動による振動、桂川に架かる西大橋の振動、老ノ坂トンネルの振動が明瞭に捉えられており、

交通量に応じた振動が昼夜で異なる様子も捉えられていた。事前の ODTR 測定により、ケーブルの 50 km 先までレーザー光が十分届いていることが確認されていたが、近地点に比べると S/N は悪いものの、終端点においてもシグナルを捉えられた。以下、測定された特徴について紹介する。

#### ○ケーブルのジオメトリ

光ケーブルは国道沿いに敷設されているため、位置を調べる事は難しくない。しかしどのチャンネルがどこに位置するかを推定する事は、困難を伴った。橋梁やトンネルではそうでない場所に比べてケーブルの振動が明確に大きくなり、対応するチャンネルの位置推定は容易である。そうでない場所は、1 チャンネルで約 5 m 位置が異なる事を利用して推定した。しかしケーブルには余長があるため、必ずしもこの対応でうまく行くことはない。実際には地震の記録等も使いながら、試行錯誤によりケーブルのチャンネルの位置を推定した。

#### ○地震の記録

測定期間中の 9/18 に M2.8 の地震が、ケーブルの真ん中辺りの深さ 11 km (気象庁による) で発生した。この地震による振動は両ケーブル端まで観測されていた。明瞭な P, S の到達が見られたが、ケーブル方向に沿って異なる振幅値や S/N が断続的に観測された。これは地盤の違いや、ケーブルの地表カップリングの違いに起因すると考えられる。平行観測を行なった速度波形記録と、DAS 記録を一回積分した波形とを比較したが、後者はゲージ長の区間にカーブを有していたため、単純な方位回転では波形の一致は見られなかった。堆積層による SP 変換の出現が空間的に捉えられた他、北側では下部地殻内の構造に起因すると考えられる S 波の反射波が後続波に明瞭に認められた。この他にも気象庁一元化カタログには記載されていない小さな余震活動も認められた。

この他、気象庁一元化震源カタログを元に調べたところ、最小のものでは丹波地域で発生した M0.4 の地震でも観測されていた。約 300 km 離れた能登半島の群発地震のうち 2021 年で最大の 9/16 の M5.1 の地震を捉えた。また約 200 km 離れた飛騨・北アルプスの群発地震のうち、9/19 の M5.3 と M4.9 の地震はいずれも P, S 波の到来が最も遠いケーブル端でも明瞭に捉えられていた。ただし計測

期間中の 9/8 に発生した M7.0 アカプルコの遠地地震については地震波の到来は認められなかった。

#### ○DAS 記録の走時読み取りによる震源再決定

地震の記録において、P, S 波の到達が測線に沿って明瞭に記録されていることから、これらを用いて震源決定を試みた。但しケーブルは直線的な配置であるため、DAS 測定によって読み取られた走時だけで決定された震源は、ケーブルを中心軸とする方位方向に任意性を持つため、周囲の常時観測点における気象庁震源検測値も利用した。観測期間中に光ケーブルを含む矩形領域において記録されている 179 個の地震 (気象庁一元化震源カタログによる) を、震源再決定の対象とした。DAS 記録のようなビッグデータに対する震源決定に対応するために、並列化により高速処理可能な自動震源決定システムを構築した。ここでは平方根平均二乗レベルの変化 で P, S の走時を読み取り、気象庁震源検測値と併せて hypomh を用い震源再決定した。ケーブルの位置が不明確な桂川以東は利用しなかった。走時の読み取りはケーブル沿いで半ゲージ長毎に行った。S/N の良い M の比較的大きな地震の再決定震源は、気象庁一元化震源と良く一致するが、M の小さな地震は自動読み取りの精度の問題により震源決定誤差が大きくなった。

#### 4. まとめ

国道 9 号線の光ケーブルを用いて DAS 測定を行い、地震観測の可能性を検証した。約 1 ヶ月間の観測であったが、震源決定に十分な質の記録が得られることが分かった。しかし現時点では限られた情報しか用いていない。安定的に地震観測に適しているかどうかを検証するためには、より長期間の観測が必要であり、様々なタイプの揺れを地震計の記録と比較していくことも必要である。地下構造の調査や橋梁の振動記録の解析については、今後の課題である。

#### 謝辞

本研究は、防災研究所拠点研究 (一般推進)、及び JSPS 科研費 JP21K18748 の助成を受けました。光ファイバー通信ケーブルは、京都大学防災研究所と近畿地方整備局京都国道事務所間で締結した覚書に基づき、京都国道事務所より借用しました。