

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18748

研究課題名（和文）光ファイバ通信ケーブルが拓く新しい活断層調査と構造のリアルタイムモニタリング

研究課題名（英文）Optic fiber cable measurement that pioneers new active fault survey and structural monitoring

研究代表者

宮澤 理稔（Miyazawa, Masatoshi）

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：80402931

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：1本の光ファイバケーブルそのものを振動センサーとする、分布型音響センシング（DAS）技術を用いて、京都府南部で振動測定を行った。光ファイバケーブルには、国道地下に埋設されているものを京都国道事務所から借用して利用し、京都駅から北西方向へ約50kmの区間について約5m間隔で測定を行った。これはすなわち1万か所で揺れを測定することに相当する。このような長区間で超高密度の振動測定を行うことにより、車両の移動や京都府南部で発生する地震を詳細に観測することに成功した。これらのデータから、交通量に関する調査や、地下構造に関する研究が行えることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地表の振動を測定するためには、その動きを知りたい場所に一つずつセンサーを設置する必要があった。これは大変な労力を要するために、詳細な調査を実施することが困難であった。しかし光ファイバセンシングの新技术により、既存の敷設ケーブルを活用すれば超高密度の観測が実現できることが示された。これまでにない詳細な揺れの分布を捉えられたことは、車両移動記録からは交通量調査が正確に行えたり、地震動からは地下構造の詳細な情報が得られることを意味しており、この分野において大きなブレイクスルーとなり得るばかりでなく、慢性的にマンパワーが不足する将来における観測のあり方を大きく改善することが期待される。

研究成果の概要（英文）：Using a distributed acoustic sensing (DAS) technique, which enables a single optic fiber cable as multiple sensors, we measured the ground motion in southern Kyoto. We used a 50 km long optic fiber cable to the NW from the Kyoto station, which was borrowed from the Kyoto Road office, and measured the strain changes along the cable every 5 m, corresponding to 10,000 sensor deployments. Such a high-density measurement along the long cable successfully measured traffic and earthquakes that occurred in southern Kyoto and at some distances. From these data, we could show the possibility of investigating the traffic counts and subsurface structures.

研究分野：地震学

キーワード：分布型音響センシング 光ファイバ 地震活動 歪み波動場 地盤増幅率 交通量カウント

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

光ファイバー分散型音響センシング（DAS : Distributed Acoustic Sensing）と呼ばれている技術が、近年実用化されつつある。これは光ファイバー通信ケーブルに光のパルスを連続的に発射し、ケーブル内で散乱して戻ってくる信号の解析から、ケーブルの任意の場所の伸び縮みを測定する手法である。数十 km あるようなケーブルのどの場所でも、その微小な伸び縮みを、ケーブル端から連続的に測ることができる。測定できる場所はケーブル内の一か所に限らず、ほぼ同時に約一万か所（数 m 毎）で測定できる。同様の観測を、これまでの機材を使った方法で実施しようと思うと、測りたい場所にセンサーを一つ一つ設置して行かねばならず、大変な労力を要する。しかし、この DAS 技術の進歩のおかげで、光ケーブルさえあれば、その必要がなくなろうとしている。

DAS を用いた測定に関し、地震学のおよび地震工学的実用可能性が見出せた暁には、同じ方法を全国に一気に広げる可能性を秘めている。例えば国の管理する河川・道路管理用光ファイバーは主要な道路や河川沿いに整備されているが、これを利用することができれば、観測網を新たに設置する必要もなく、全国規模の観測が可能となる。

2. 研究の目的

日本全国の主要道路沿いに敷設されている光ファイバー通信ケーブルを活用し、地球科学的な現象や、地下構造、インフラとしての橋梁等構造物の様子を、瞬時に捉えるための技術開発と実用化を行い、構造調査や構造物のモニタリングに新しい窓を開くことを目的とする。将来的には、以下の項目を実現することを目指す。

- (1) 新規観測点の整備を必要としない超高密度地震観測網整備・維持、突発災害時の緊急観測
- (2) 都市部などにおける活断層探査調査のための技術の活用
- (3) 橋梁等の構造物に対するモニタリング
- (4) 交通情報や気象状況のモニタリング

3. 研究の方法

国土交通省が公共施設管理のために全国に敷設している河川・道路管理用光ファイバーの一部を利用することとした。このために京都大学防災研究所と近地地方整備局京都国道事務所との間で覚書を締結し、これに基づき一般国道 9 号沿いに敷設されたケーブルのうち、京都駅前にある京都国道事務所（京都府京都市下京区西洞院通塩小路下南不動堂町 808）を起点とし、北西方向約 50 km 先にある丹波 IC 付近を終点（京都府船井郡丹波町蒲生地先（国道 9 号 45.9kp））とする区間のシングルモード光ケーブル 1 芯を利用して、DAS 測定を行った。なお、計画当初は別の箇所での測定を想定していたが、利用可能な光ケーブルの範囲が限られていることや借用上の問題等により、調査対象領域を再考して、京都府南部を対象域とした。本調査地域の特徴から行える研究として、定常的に地殻内地震活動度の高い地域であるため数多くの地震観測事例を捉えることや、光ケーブルが跨いでいる京都西山断層帯のジオメトリ調査を行えること、橋梁等の構造物モニタリングが試みられること、交通量が多いためその調査が行えること、バックグラウンドノイズと気象現象との対応調査が行えること等が期待できる。本研究による測定調査は以下の通り 2 度実施した。なお、測定期間中に光ケーブル設置図面を基に、ハンドホール近くでタップテストを行い、ケーブルのチャンネルと、緯度経度とを対応させた。

2021 年 8 月 23 日に京都国道事務所内に AP Sensing 社の DAS システム（N5200A）を設置し、測定を開始した。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 か所での測定に対応する。測定時刻は GPS により同期を行い、誤差が時間サンプリング以下になるよう、精度を担保した。5 分毎に hdf5 形式のファイルに保存したが、一ファイルあたり Phase データでは約 2.87 GB、FBE データでは約 0.46 GB であった。このため一日あたり約 0.9 TB のデータが蓄積された。これらのファイルは、データ採取用ノート PC を用いて遠隔操作により、外付けの HDD に 1 日から数日毎にコピーした。約 1 か月間の観測を行い、9 月 24 日に機材を撤収したが、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。総容量は 31.3 TB であった。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 の三分短周期地震計を設置して、地表の振動を連続観測した。

2022 年 9 月 1 日から、ニューブレクス社の DAS システム（NBX-S4100）を設置した。2021 年の測定と比較可能とすることができるよう、測定条件を定めた。強い揺れでもサイクルスキップする事が無いよう、ゲージ長を 5.1 m とした。また空間サンプリングを 5.1 m、時間サンプリング 500 Hz とした。チャンネル数は 10,149 に延ばした。測定ファイルは 1 分毎に外付けの NAS に保存した。測定は 10 月 20 日までの間、50 日間連続で行い、欠測等はなかった。また、TW-COTDR (Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domain Reflectometry) による測定を、DAS の開始時、測定期間中、そして撤収時にそれぞれ 1 度行い、より詳細な歪みの変化の分布を測定した。全ファイルサイズは約 85.5 TB となった。

4. 研究成果

50 km の光ケーブル全体にわたり、振動が測定できることが確認された。橋梁部においては恒常的に振動が確認された。また主に大型車の移動による振動が捉えられ、日中と夜間の交通ノイズレベルの差も見られた。最も遠い約 50 km 先においてもレーザー光が充分届いており、振動が測定できていたことが確認された。また観測期間中に発生していた地震を気象庁一元化震源カタログから抽出して比較したところ、ケーブルが敷設されている京都府南部で発生した微小地震が数多くとらえられていた他、遠地で発生した地震も観測されていた。測定記録を用いた解析結果として、地震波動場の再現、詳細な地盤の増幅率の研究、交通量調査の可能性に関する調査がある。以下、それぞれの項目について紹介する。総じて、短周期から長周期の揺れに対して精度高く観測することができ、工学的・理学的分野の研究に応用可能であることが確認できた。

(1) 光ケーブルのジオメトリ

図 1 の京都府南部の地図に、図面調査とタップテストを通じて明らかにした DAS 測定時のチャンネルの場所を示す。約 50 km 長のケーブルは北西-南東方向に伸びており、始点は南東端の紫色の京都駅付近であり、終点は北西端の赤色の京丹波である。DAS 測定では観測点が約 10,000 か所存在する。一方で、この地図内では高感度地震観測網の観測点は 16 点あるが、DAS 測定では 3 桁も観測点が多い観測であった。

(2) 主として観測される信号

光ケーブルは国道沿いに敷設されているため、特に自動車の通行に伴う信号が多く観測された。橋梁部では常時振動が観測されており、特に区間中最も顕著な振動は、桂川に架かる西大橋で観測されていた。図 2 に 2021 年 9 月 8 日午後 9 時から、翌午前 6 時までの記録を示すが、上に述べた信号がよく見えている。また距離が遠くなるほどレーザー光のパワーが弱くなるため、S/N が悪くなり全体的にノイズが乗ってきている様子も分かる。

(3) 地震記録

(3.1) 2021 年測定

測定期間中にケーブル付近の領域で発生した地震のうち 116 個については、P、S 波の走時読み取りが可能な記録が得られた。これらの走時を自動で読み取り、気象庁震源検出と併せて震源再決定を行うためのシステムも構築した。精度の高い震源決定のためには、ケーブルのチャンネル毎に観測点補正値を求める必要があることが分かった。

観測された地震の記録例を紹介する。9 月 18 日に M2.8 の地震が、ケーブルの中央部周辺の深さ 11 km 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 (図 3 上)。明瞭な P、S 波の到達が見られており、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、メカニズムの影響、車両の通過に起因すると考えられる。並行観測を行っていた速度波形記録と、DAS 記録を一回積分した波形とを比較したが、後者は一ゲージ長の区間にカーブを有していたため、単純な処理では波形の高い相関は見られなかった。7,000 チャンネル以遠では、堆積層と基盤との境界が存在することによると考えられる SP 変換の出現が空間的に捉えられた。また北側チャンネル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部分 (12 秒から 15 秒) に明瞭に認められた。この様な反射波をたった 1 回の地震で空間的に捉えられたことは、DAS 観測でしかなしえない。この後続波を説明するために、大型計算機を用いた波動場シミュレーションを実施 (図 3 下) し

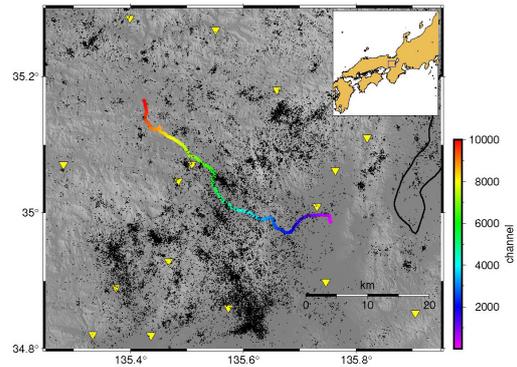


図 1 光ケーブルのジオメトリ

虹色の線は、ケーブル沿いのチャンネル番号を示す。黒点は気象庁による背景地震活動、黄色▽は高感度地震観測網の観測点を示す。

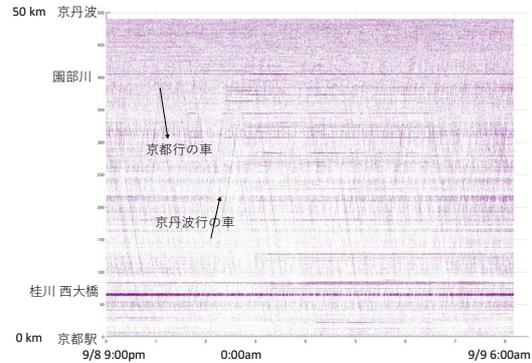


図 2 2021 年測定時の夜間の記録

横軸は時間 (9/8 9:00pm から 9/9 6:00am)、縦軸は京都駅からのチャンネルを示す。但し時空間共にデータを間引いて表示している。斜めに見える複数の線は、右下がり京都方面に向かう車両による揺れ、右上がり京丹波方面に向かう車両による揺れを、それぞれ示している。

て、それらの比較を行った。これまでに別の研究から指摘されていた下部地殻で北側に傾斜する低速度層を置くことで、波動場がおおよそ再現することができた。ただし震幅値については検討の余地がある。また、このM2.8地震の約20秒後には、気象庁一元化震源カタログには記載されていない規模の小さな余震のP、S波の到達も認められた。

上記の地震以外については、最小のものではケーブル測線付近で発生したM0.4地震であり、二例観測されていた。但し、これ以上の規模の地震であっても、震源がケーブルから少し離れてしまうとノイズレベルを優位に上回るシグナルが見えない事もあった。一方で、上に紹介したように気象庁一元化震源カタログに未記載の微小地震が捉えられていることもあった。

(3.2) 2022年測定

2021年と同様に、京都府南部で発生した地震活動を中心に捉えることができた。2021年のM2.8地震(図3)では振幅が大きな波に対してDASの記録がサイクルスキップを起こしてしまっていたが、2022年測定ではゲージ長を2021年測定時の1/8、即ち空間サンプリングと同じ約5.1mとしたため、その様な振幅が振り切れる現象を減らすことができた。例えば、10月19日に同地域で発生したM3.2の地震(最大震度2)とM3.4地震(最大震度3)が記録されていたが、一定数のチャンネルで振幅が振り切れずに測定することに成功した。

(3.3) 遠地地震

2020年末より活発化し始めている能登半島の群発地震について、DAS測線から震源域まで約300km離れているが、当時としては最大地震である2021年9月16日M5.1の地震を捉えられた。また約200km離れた飛騨・北アルプスの群発地震のうち、2021年9月19日の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。2022年9月18日に発生した台湾の地震(M6.9)についても、複数チャンネルの波形をスタックすることで、広帯域地震計による記録を再現することができた。

(4) 地盤増幅率の推定

2021年の測定記録のうち、測線から80kmから120km程度離れたM2.5からM4.9の6個の自然地震を用いて、ケーブル沿いの地盤増幅率の推定を試みた。なお、この距離を選んだ理由は、震源距離と輻射パターンによる影響を低減するためである。震源は主に京都-大阪府境界付近、和歌山付近に分布している。0.1-16Hzまでの異なる周波数帯で求められた地盤増幅率は、山間部では値が小さく、盆地では大きい傾向が見られた。また活断層を跨ぐと地盤増幅率の値が変化するなどの特徴があった。一方で、ケーブルと地面とのカップリングの違いの可能性も考えられる。

(5) 交通量カウントとの比較

国道9号で交通量カウントが設置されている箇所において、上り車線と下り車線との車両をDAS記録の波群から抽出することで推定し、交通量カウントと比較を行った。推定値は、合計台数および上下線の推定値が、実測値と非常に良い相関を示していた。しかし、推定値全体にバイアスが乗ることや、下り車線で過小評価する傾向にあった。

(6) その他の信号

図2では降雨や増水に伴う影響が観測されている。日付が変わる0:00頃から、園部では1時間あたり20mmと言う強い雨が降り始めていたが、それに伴い園部川を渡る光ケーブルの振動の振幅値が増加していた。この他にも、降雨に対応した信号レベルの増加は、西大橋やその他の橋でも認められた。

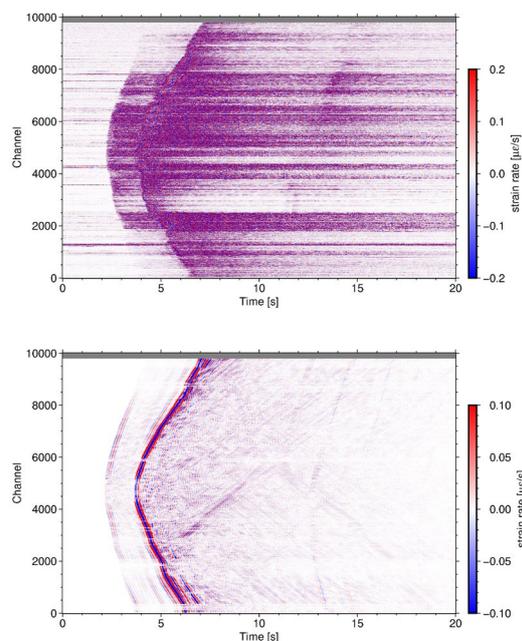


図3 京都府南部M2.8(2021/9/18)地震

横軸は時間、縦軸は京都駅からのチャンネルを示す。(上) DASによる観測記録。振幅値は歪みレートである。(下) DASの記録を波動場シミュレーションで再現(OpenSWPC利用)した結果。初動であるP波と主要動のS波の到来はよく再現されているほか、12秒から15秒の間に見られる後続波の出現も再現されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宮澤理稔・江本賢太郎・中原恒・辻健
2. 発表標題 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
3. 学会等名 令和3年度京都大学防災研究所研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮澤理稔、江本賢太郎、中原恒、辻健
2. 発表標題 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
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 熊木健人、中原恒、江本賢太郎、宮澤理稔、辻健
2. 発表標題 分散型音響計測(DAS)による国道9号線沿いのサイト増幅特性の稠密な空間分布の推定
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 熊木健人、中原恒、江本賢太郎、宮澤理稔、辻健
2. 発表標題 分散型音響計測(DAS)により推定した国道 9号線沿いのサイト増幅特性のクラスター分析
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮澤理稔
2. 発表標題 光ファイバケーブルを用いた国道9号沿いの振動観測
3. 学会等名 関西地震観測研究協議会 地震防災フォーラム2022 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮澤理稔
2. 発表標題 京都国道9号における光ファイバセンシングで観測された反射S波から推定される下部地殻構造
3. 学会等名 令和4年度京都大学防災研究所研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 後藤浩之, 宮澤理稔, 楸田泰子
2. 発表標題 既設光ファイバケーブルのDAS観測データを用いた交通量カウントの試行
3. 学会等名 令和4年度京都大学防災研究所研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮澤理稔
2. 発表標題 京都国道9号における光ファイバセンシングで観測された反射S波から推定される下部地殻構造
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	中原 恒 (Nakahara Hisashi) (20302078)	東北大学・理学研究科・准教授 (11301)	
研究 分担者	辻 健 (Tsuji Takeshi) (60455491)	九州大学・工学研究院・教授 (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------