



京都大学 防災研究所

Disaster Prevention Research Institute

Kyoto University

拠点研究 (一般推進)

2021A-06

光ファイバ通信ケーブルをセンサーとする
革新的技術を用いた自然地震観測と
活断層調査、インフラ構造のモニタリング
Seismicity Observation, Active Fault Survey,
and Structural Monitoring by Innovative
Technology Using Optical Fiber Cable Sensing

令和4年5月

May 2022

研究代表者

宮澤理稔

Principal Investigator Masatoshi MIYAZAWA

1. はじめに

分布型音響センシング (Distributed Acoustic Sensing; 以降「DAS」と呼ぶ) 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、長い期間かつ多くの地震観測事例が欠かせない。

本研究では、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総延長 15,800 km にも及ぶ河川・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 2021 年 2 月 16 日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「光ケーブルをセンサーとした観測の共同研究に関する覚書」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、北西方向に約 50 km 先にある丹波 IC 付近を終点 (京都府船井郡京丹波町蒲生地先 (国道 9 号 45.9kp)) とする区間の光ケーブル 1 芯を利用して、DAS 測定を行った。なお本調査地域の特徴から行える研究として、(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があり、この他にも (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が行えること等が挙げられる。

2. DAS による測定

2021 年 8 月 23 日に京都国道事務所内に DAS 機材を設置した (図 1-3 参照)。国道事務所側の光ケーブルの端子は SC であり、シングルモード光ファイバーケーブルの #253 を利用した。これは利用を許可されていたケーブルの内、事前に行った OTDR 測定において最も S/N が良好であったものである。機材には AP Sensing 社の DAS システム (N5200A) 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、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 である。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



図 1. 測定に利用した SM ケーブル #253 への接続。



図 2. 光成端架への接続風景。利用したケーブル #253 が収納されている引き出しを出した状態で撮影。

一した。機材の撤収は 9 月 24 日に行い、約 1 か月間の観測を行ったが、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。



図 3. 測定に利用した DAS 機材一式。

また DAS による測定期間中、測定値を検証する目的で、国道 9 号沿いの京都市と亀岡市の境付近の峠に位置する老ノ坂スノーステーション付近の路肩に、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（図 4， 5）。

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る。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、終端点においても振動に伴う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。

3. 1. ケーブルのジオメトリ

測定された各チャンネルに対応する、緯度、経度、標高の情報を調べることが、その後の解析にあたって極めて重要な作業となる。光ケーブルは国道沿いに敷設されているため、そのどこかの位置であることには間違いない。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。また歩道橋等の構造物の揺れや、交差点も参考になる。地震が発生した



図4. 老ノ坂スノーステーション付近の国道9号沿いの通信ハンドホールの蓋。光ファイバーケーブルはこの下を通っている。



図5. 国道9号老ノ坂スノーステーション脇での地震計による並行観測。地震計は、左写真のクリーム色の円筒の中に設置された。

際には短時間に多チャンネルでシグナルが観測されるため、ケーブルの向きと地震の波の位相との対応することを利用し、カーブのある道などではチャンネル位置の特定に

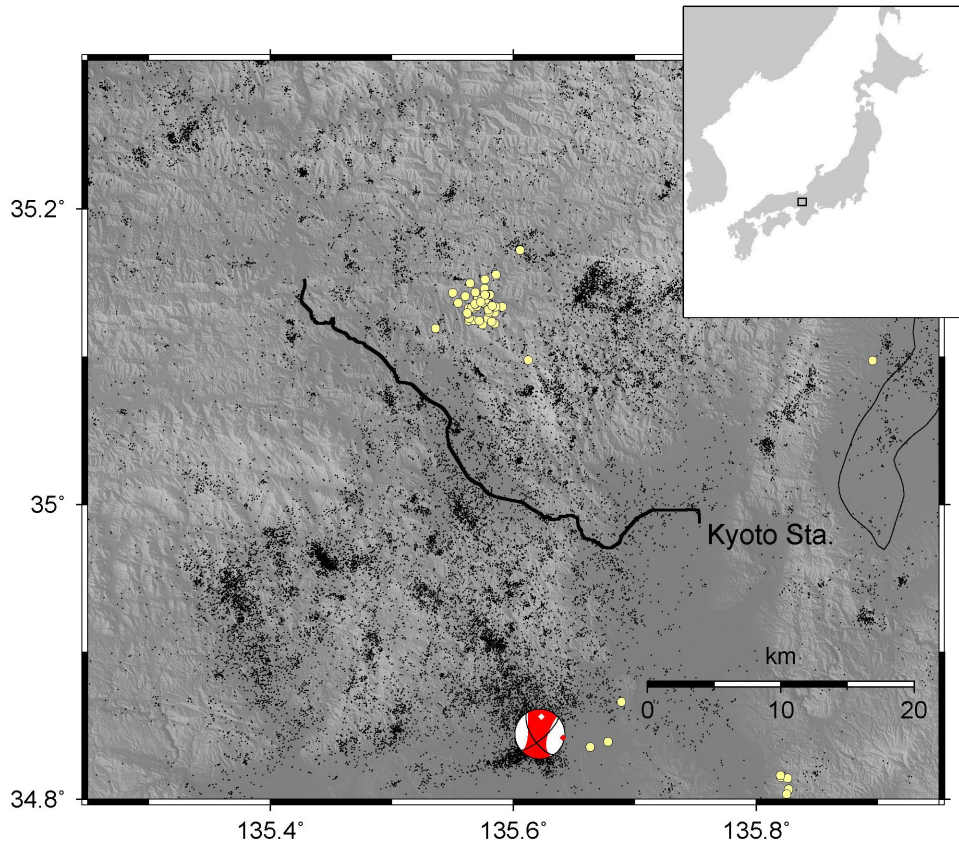


図6．利用したケーブルのジオメトリ。京都駅(Kyoto Sta.)から西、北西方向に延びる黒太線がケーブルの位置。ただし対応する観測時のチャンネルは表示していない。赤色のメカニズム解は2018年大阪府北部地震のものである(F-netメカニズム解)。黒色点は地震、黄色丸は低周波地震の震央である(気象庁一元化カタログ; 1997年10月~2018年)。

利用可能である。そうでない場所は、1チャンネルで約5m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、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が、桂川以遠では位置の特定が比較的容易に行えたものの、桂川より手前の京都市街地では特定が困難であった場所が複数か所あった(図6)。

3. 2. 地震の記録

測定期間中の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、気象庁震源検測と併せて震源再決定を行うための暫定システムも構築した。

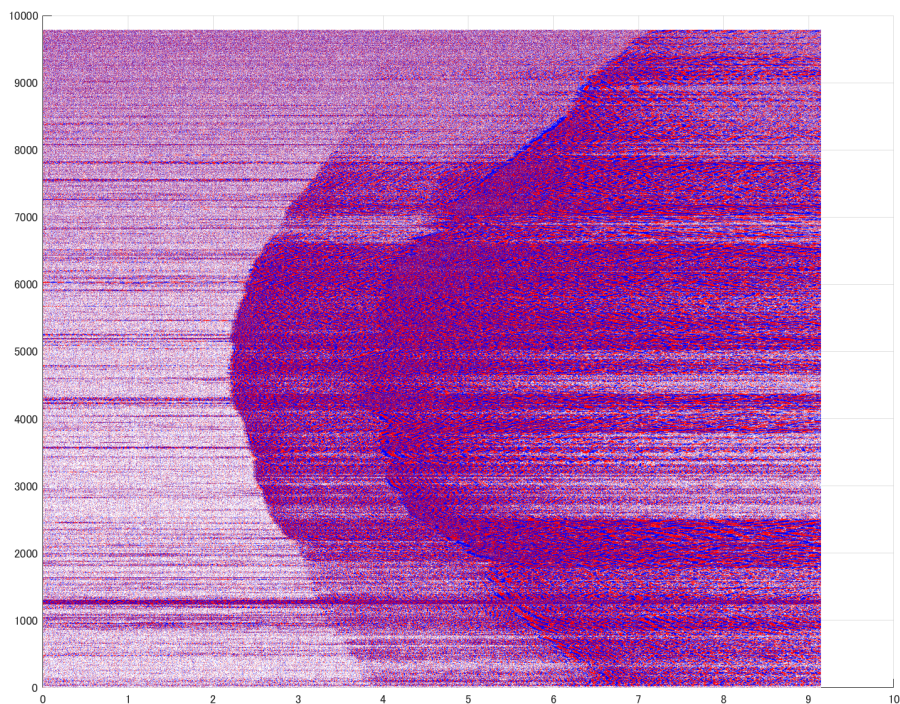


図7. 9月18日に発生したM2.8の地震波形記録。横軸単位は秒、縦軸はチャンネル番号。時刻0を震源時刻としている。色の濃さは振幅の大きさに対応する。

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（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（図7）。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。7000チャンネル以遠では、堆積層によるSP変換の出現が空間的に捉えられた。また図に示した範囲外として、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他、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波の到達も直後に認められた。

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、二例観測されていた（図8）。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

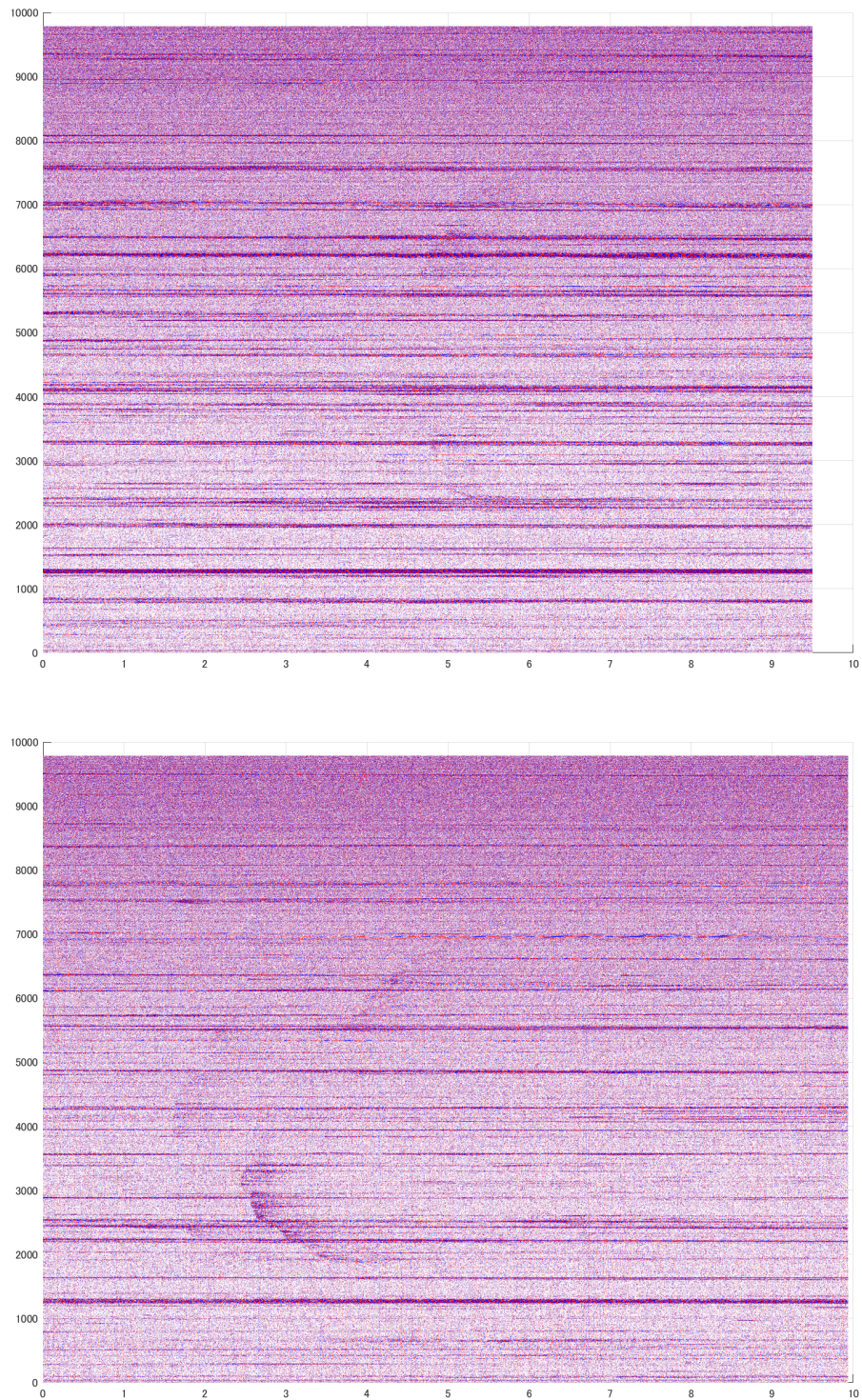


図8. M0.4地震記録例。(上)8月26日の地震、(下)9月23日の地震。

シグナルが見えない事もあったほか、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。

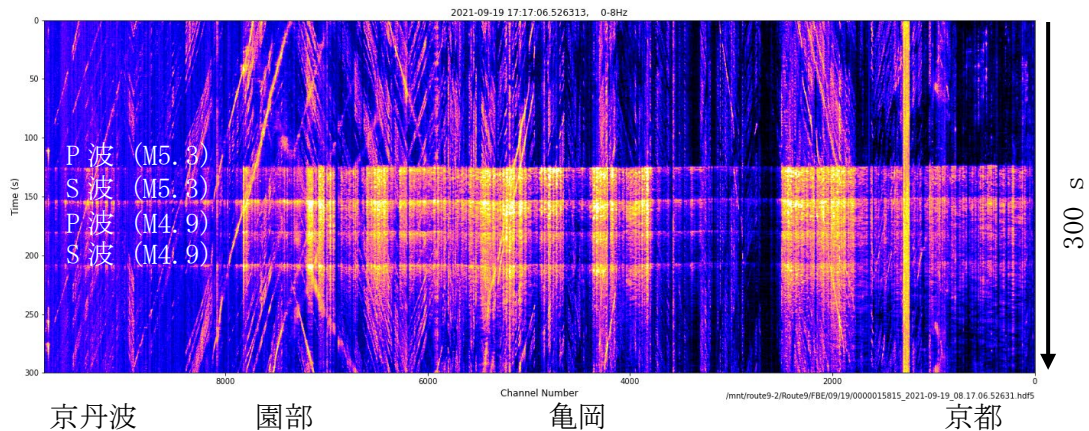


図9. FBE データ(0-8 Hz)による 9 月 17 日の北アルプスの群発地震。横軸はチャンネル番号を示し、左に向かい大きくなっている。右が京都、左が丹波方面に対応する。縦軸は時間軸を示し、上から下に向かって時刻は 300 秒進む。北アルプスで発生した M5.3 地震の P 波、S 波、またその M4.9 余震の P 波、S 波が順に観測された。

敷設されたケーブルより離れた場所で発生した地震についても調査を行った。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 月 16 日の 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 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 (図 9)。この他日本列島周辺で観測された M5 を超える地震についても、特段信号処理をしていないひずみ速度そのままの記録を用いて調べたところ、不明瞭ながらも地震波が観測された事例があった。一方で 9 月 8 日に発生した 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。

3. 3. その他の記録

国道 9 号を通る大型車の揺れや構造物の揺れは明瞭に捉えられていた。図 10 は 9 月 8 日の 9:00 pm から翌 9 月 9 日の 6:00 am までの記録について、時空間サンプリングを間引いてプロットした物である。桂川に掛かる西大橋の揺れは常に捉えられていた。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。斜めに見える線は、右下がりの場合、京都方面に向かう車両による揺れ、右上がりの場合、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。深夜の時間帯は、一日の中でもトラフィックノイズレベルが低い。西大橋を始め橋梁区間はそれ以外の場所に比べて強い揺れが観測されていることが分かる。日付が変わる頃から、園部では 1 時間あたり 20 mm という強い雨が

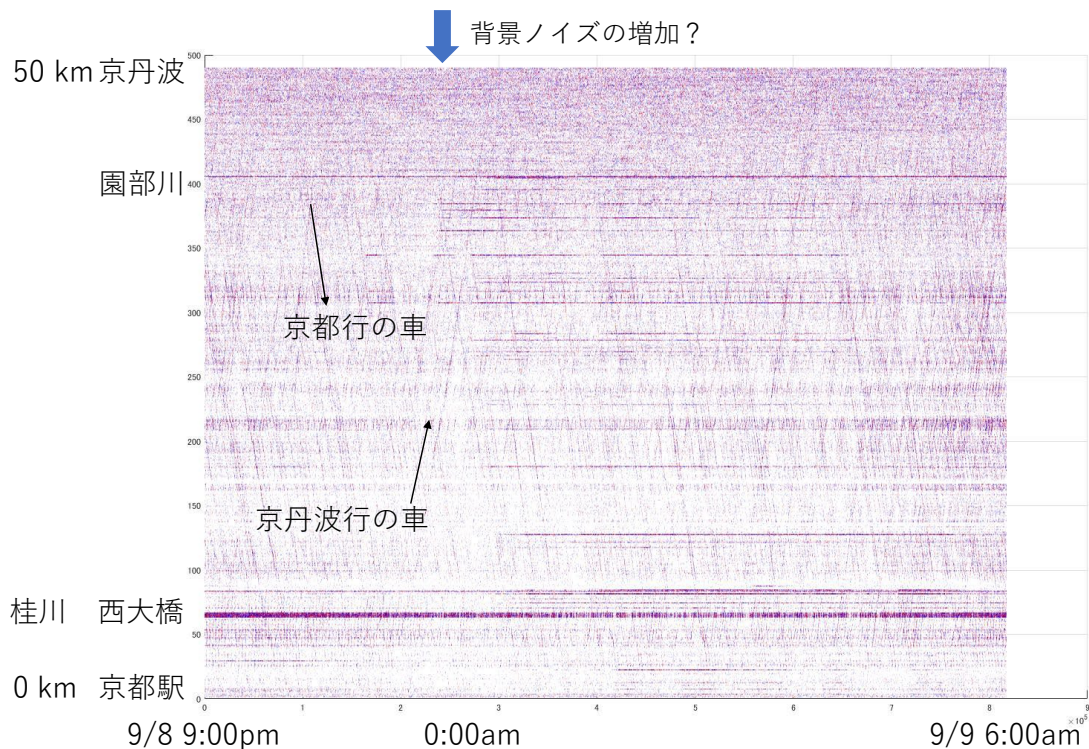


図 10. 9月8日 9pm から 9月9日 6am までの連続記録。横軸は時間、縦軸はチャンネル。但し空間方向には 20 チャンネル毎に、また時間方向には 25 Hz にダウンサンプルしたデータをプロットしている。

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信号が増加していた。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。

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 か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。しかし現時点では測定記録の中でも限られた情報しか活用できていない。また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、今後行うべき課題である。

最も大きな課題として、30TB にも及ぶデータは、その膨大さ故に全体を活用しきれていない。今後は所内外を中心にこれまで取り組んでこなかったテーマでの解析のためにデータを提供していく用意がある。

謝辞

一般国道9号の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。

研究成果の公表

宮澤理稔・江本賢太郎・中原恒・辻健. 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, B206, 令和3年度京都大学防災研究所研究発表講演会, 2022年2月22日