

地震計を使わないで地震を超高密に観測する —光ファイバーセンシング技術で捉えた京都府南部の地震の発生メカニズム—

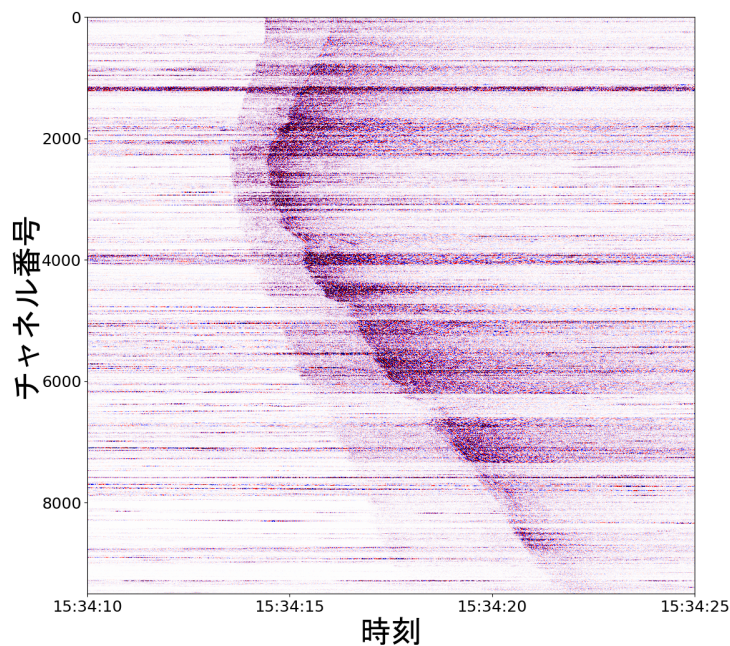
概要

船曳祐輝 理学研究科博士後期課程学生、宮澤理稔 防災研究所教授らの研究グループは、光ファイバーセンシング技術を用いて京都府南部で発生した地震を捉え、次世代型の地震観測の有効性を実証しました。

光ファイバーセンシングの一つ、分散型音響センシング（DAS）では、一本の光ファイバーケーブルのどこで、どのくらいの伸縮があったかを、高精度に測定できます。研究グループは地震観測を目的に、この技術を京都の国道沿いに敷設されている約 50km の光ファイバーケーブルに対して用いました。従来の地震観測では、観測装置を一つ一つ地表に設置するという大変な労力が必要でした。しかしこの技術では、既設の光ファイバーケーブルの端に装置を取り付けるだけで、ケーブル沿いの約 1 万か所もの場所で、地震の揺れを捉える事ができました。さらに地震波の振幅に関する大量のデータを活用し、小地震の発生過程を求めることに、世界で初めて成功しました。これにより地震計を使わなくても、地震に関する観測研究が進められることを実証しました。

現在、光ファイバーケーブルは日本中や海底に張り巡らされているため、この DAS 技術を使えば、従来の地震観測網を観測点数で凌駕し、より詳細に地震現象を調べられるようになる可能性を秘めています。

本成果は、2025 年 5 月 3 日に国際学術誌「*Geophysical Research Letters*」にオンライン掲載されました。



光ファイバーケーブルが捉えた小地震に伴う揺れの広がり

1. 背景

地震という現象を調べるためには、地震によって生成された地震波を観測する必要があります。そのための観測装置として地震計が存在し、100年以上の歴史があります。時代とともに技術開発が進み、小型化や高精度化、デジタル化などに伴い、長期間に及ぶ大量の良質な記録が蓄積されてきました。このような記録の解析を通じて、地震に伴う様々な現象や地球内部の様子が調べられてきました。一方で地震の観測のためには、地震計というセンサーを設置する必要があることには変わりないため、詳細な調査を行うためには、大量の感度の高い地震計を設置する必要があります。しかしこのような地震計を超高密に設置する作業は現実的ではなく、地震波がどのように伝わっているかを測定するには限界がありました。

2. 研究手法・成果

超高密な地震観測を実現するために、光ファイバーセンシング技術の一種である、分散型音響センシング (Distributed Acoustic Sensing; DAS) を利用しました。近年実用化が進められた技術であり、1本の光ファイバーケーブル沿いの伸縮 (ひずみ) を分布的に捉えることができます。測定器をケーブル端に接続するだけで済むため、最近では光海底ファイバーケーブルや陸上で地中埋設された光ファイバーケーブルを用い、地震の揺れを高密度に捉えられることが報告され、注目を集めてきました。本研究では、定常的に地震活動が起きている京都府南部の調査を対象とし、京都駅から京丹波町までの国道沿いに敷設されている約 50km の光ファイバーケーブル 1 本を使いました。この際 DAS 技術により、5m 間隔で光ファイバーケーブルのひずみを測定しました (図 1)。これは光ファイバーケーブルに沿って、約 10,000 万か所に地震の揺れを測定するセンサーを設置したことに対応します。なおこの地域の高感度地震観測点数は 10 余であり、文字通り桁違いに測定の多い観測を実現させました。

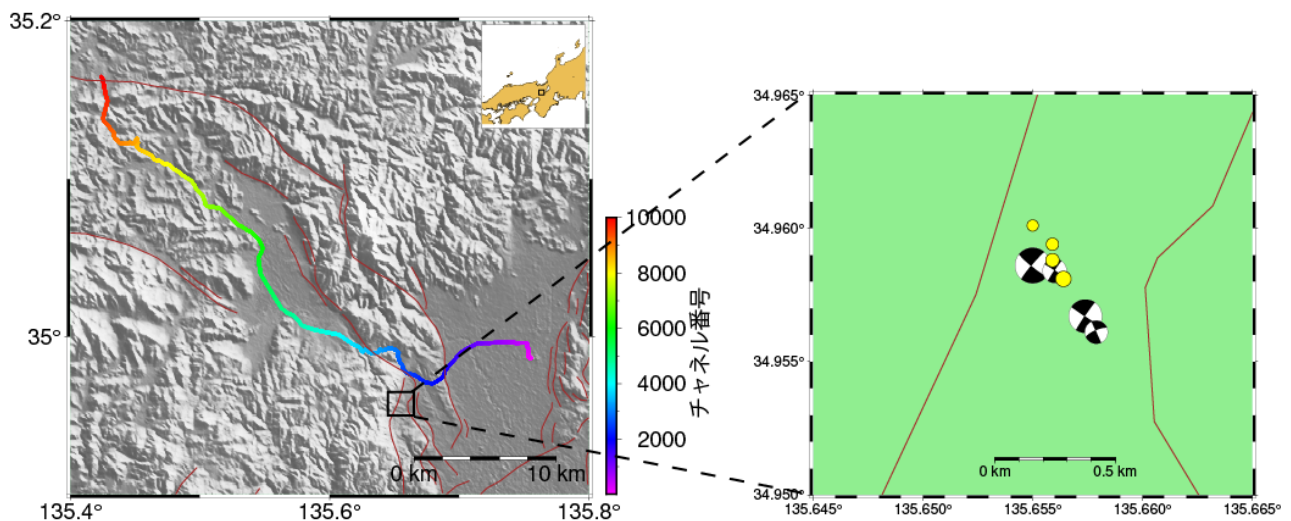


図1 本研究に用いた光ファイバーケーブル (左) および解析した地震の震源分布・メカニズム解 (右)。

2022 年 9 月から 2 か月弱かけて行った DAS 測定中、10 月 19 日に、京都と大阪の府境付近で M1.0 から M3.4 の一連の地震活動があり、最大震度 3 を記録しました。本研究では、この一連の地震の発生過程について調査を行いました。DAS 測定の超多点観測という特徴を活用し、P 波と S 波の振幅比から地震のメカニズムを決める手法を提案し、実際に M2.2-M3.4 の 4 つの地震のメカニズム解 (注 1) を求めることに成功しました (図 2)。M3 クラスの地震については、既存の地震の観測網の記録だけから、別の方法を使ってメカニズ

ム解を求めることができますが、DAS 記録を使った結果もこれに整合的でした。さらに M2 クラスの 2 つの地震に至っては、現在の高感度地震観測網では規模が小さくデータが少ないため、メカニズムの推定ができませんでしたが、DAS 記録からは求めることができました。このように、DAS 記録の振幅比を利用して地震のメカニズム解を決定したのは世界で初めて、個別に安定的に求められることも確かめられました。これまでに DAS 記録の P 波の初動極性を用いてメカニズムを決めた研究がありましたが、個別に求めることはできず、ケーブルの配置にも制限があるなどデメリットがありましたが、これらを克服した方法でもあります。一連の地震活動の震源を精度良く決め直した結果と、4 つの地震のメカニズム解から、一連の地震活動は京都西山断層帯で、左横ずれ断層が運動することにより発生した地震であることが分かりました (図 1)。

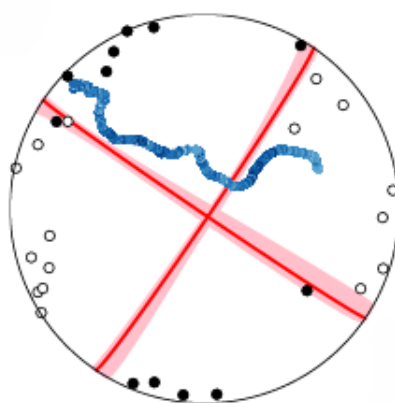


図 2 M2.3 地震のメカニズム解の推定例。光ファイバーケーブル (中央青曲線) を用いて得た DAS 記録の S/P 振幅比から推察される 2 節線 (中央部に示された 2 本の赤い曲線)。従来の地震計から得られた、P 波初動の正負分布 (黒が正、白が負)。P 波初動は節線を境に正負で分かれて分布することが知られており、DAS 記録から得られた節線と、P 波初動分布は、独立に得られたものであるにもかかわらず、驚くほど整合的であることが分かる。

京都国道で行った DAS による地震観測研究は今回が初めてではありません。2021 年 8 月下旬から 1 か月間、京都国道で初めて行った DAS 測定では、同地域で発生が報告されている小地震の殆どが捉えられることが確認されました。国道沿いの光ファイバーケーブルを用いているため、交通ノイズが大きいという影響もありました。その中でも M2.8 の地震は、光ファイバーケーブルのほぼ真下で発生し、P 波、S 波の広がりをケーブル全体にわたって明瞭に捉えることができました。特に S 波到達の 8-14 秒後に、特徴的な後続波が観測されました。これは下部地殻に存在する構造によって反射した S 波と考えられます。これまでも同様の反射波が地震計による観測で捉えられており、100 個以上の小地震を用いて調査されてきましたが、光ファイバーケーブルを使った観測では、たった一つの地震で反射波の分布を捉えることができました。またこの M2.8 地震の余震と考えられ、気象庁の地震カタログにすら掲載されていないごく微小な地震も、観測することができていました。さらに DAS 記録として観測された波動場を、数値シミュレーションで再現することで、反射波を生成した構造を推定しました。下部地殻に北側に傾斜する反射面の存在は以前から指摘されてきていましたが、1km 程度の薄い低速度層であること、南側に浅くなるに従い傾斜が急になり有馬高槻断層帯に繋がる可能性があること、北側の深部延長では低周波地震の発生域を横断していることが分かりました。つまり地下深部から上昇してきた流体が低周波地震の発生に関わり、緩やかに傾斜する境界を通過することで低速度層を作り出し、有馬温泉として湧出している可能性が示唆されました。(Miyazawa, M. (2024) "Inclined bending seismic reflection layer in the crust illuminated by distributed fibre-optic-sensing measurements in western Japan",

このように、既存の地震観測網を使った地震の震源分布やメカニズム調査、地下構造調査が、光ファイバーケーブルを使った DAS 観測によっても行えることが確かめられたばかりでなく、既存の観測網よりも詳細な調査が行えることが実証されました。

3. 波及効果、今後の予定

地震活動が活発な日本において、地震の基盤観測網を維持することは、防災上の観点からして、地震活動を監視するために欠かせません。日本では国のプロジェクトとして、1995 年兵庫県南部地震後には陸域で、2011 年東北地方太平洋沖地震後には海域で、高感度地震観測網の高密度化が進められてきました。日本全国の大学でも、1960 年代から 70 年代にかけて地震観測点を整備し、今日まで日本の高感度地震観測網の一端を担ってきました。しかし全国的に人手不足や予算の削減等により、基盤観測網の維持管理が困難となっており、必要な機器更新なども大きな課題となっております。

このような状況において、地震計を用いず、地震を観測することができる DAS 技術は、大きな変革となることが期待されています。一方で、地震計では上下方向、東西方向、南北方向と言った 3 次元的な揺れを記録することができますが、DAS ではケーブル方向の動きしかわからないことや、揺れの感度などについて、解決しなければならない問題もたくさん残されています。一方で、地震計でこれまで行えたことやそれ以上のことを、DAS 記録を使っても行えることが、本研究から示されました。このような実績を積み上げていくことが、光ファイバーケーブルを使った次世代型の地震観測網の実現への足掛かりとなります。

光ファイバーケーブル網は、現代社会のインフラ設備として欠かせないものとなっています。国が管理する河川・道路における光ファイバーケーブルの総延長は、約 39,000km あるとされています。さらに民間通信業者のケーブルを合わせると、国内の光ファイバーケーブルは全国を網羅することができます。仮にこれらの光ファイバーケーブルを地震観測に活用することができれば、既存の地震観測の省力化を進めることができます。そしてより詳細な地震観測や、地震の調査が行えるようになり、緊急地震速報などの防災対策にも役立てられることが期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は JSPS 科研費 JP21K18748 の助成を受けたものです。

<用語解説>

(注 1) 地震のメカニズム解

地震の起こり方を表現したもの。地震を引き起こした断層面の形状や、その運動方向を知ることができます。今回の場合、北西―南東に向いた断層が、左横ずれ運動をしたことが分かりました。

<研究者のコメント>

「私が DAS を用いた研究を開始したのは修士課程からです。DAS は新たな観測技術であり、地震学分野におけるブレイクスルーを担うことが期待される一方、DAS 記録を用いた地震波解析は発展途上にあります。そのため、まず着手したのは、観測記録の扱い方の模索でした。その後、様々な試行錯誤の末、DAS 記録の特性を活かした発震機構推定手法の開発に至りました。現象を『見る』手段が変われば、問いの立て方も変わります。今後も DAS がもたらす新たな視点で、地震の理解を深めていきたいと考えています。」(船曳祐輝)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Estimating focal mechanism of small earthquakes using S/P amplitude ratios of Distributed Acoustic Sensing records

(分散型音響センシング記録の S/P 振幅比を用いた小地震のメカニズム解推定)

著 者：FUNABIKI Yuki & MIYAZAWA Masatoshi

掲 載 誌： *Geophysical Research Letters* DOI : 10.1029/2024GL113963