12 － 6　光ファイバーケーブルを用いた DAS 観測 －地震学での応用－
DAS observation using fiber optic cable: Application in Seismology

江本　賢太郎（東北大学）
Kentaro Emoto (Tohoku University)

光ファイバーケーブルにセンサーを接続する，もしくはケーブル自体としセンサーとすることで，温度・ひずみ・圧力・振動などの物理量が測定でき，インフラや地盤のモニタリングとして活用されている[1)]．ケーブル全体をセンサーとし，任意の場所でのひずみ時系列を測定する手法は一般に Distributed Acoustic Sensing（DAS）と呼ばれ, 2011 年頃から物理探査の分野で使用されるようになった．近年，地震学や火山学などの地球物理の分野でも急速に利用が広まっている[2)]．DAS 観測では，既存の通信用光ファイバーケーブルが使用でき，光パルス送信機と，ケーブル中のわずかな不純物から反射される反射波を解析するサーバをケーブルの一端に接続することで計測が可能である．数十 km のケーブルを用い，数 m 毎にひずみを計測することが可能であるため，従来の地震計を用いた観測と比較し，非常に高密度な観測を低コストで行うことが可能となる．現在，DAS を用いて地震学で何ができるかの検証や，地震学向けの装置開発が進んでいるところである．地震学での DAS 計測としては，内陸での余震観測[3)]，海底ケーブルを用いた断層調査[4)]，雑微動を用いた地震波干渉法による地下構造推定[5)] といった報告例があり，従来の地震学の手法･解釈を DAS に応用できる．DAS で計測されるのは，ひずみテンソルのうちケーブルに沿った方向の 1 成分のみである．これを克服するために，光ファイバーケーブルの近くに設置した地震計の上下動成分と組み合わせることで，H/V スペクトル解析[6)] やレシーバー関数解析[7)] を行うアイデアも提案されている．また，鉛直ボアホールに沿って設置した光ファイバーケーブルも利用できることから，鉛直方向の波動伝播を捉えられることも DAS 観測の利点である[8)]．

我々は，福島県吾妻山において，火山における DAS 観測の有用性を検証した．光ファイバーケーブルは，国土交通省が火山監視用に敷設した既存のケーブルを借用し，麓側の一端に計測装置である hDVS（シュルンベルジェ社製）を設置した．ケーブルは磐梯吾妻スカイラインの道路沿いの深さ数十 cm に設置してあり，全長 14km を 10m 間隔（1400 チャンネル）でひずみ速度の時系列を取得した．道路を走る自動車ノイズが多く記録されたものの，火山性地震，近地地震，遠地地震といった自然地震も十分な S/N 比で観測することができた（第 1 図）．DAS 記録を用いて，火山性地震の震源決定を行った．震源決定にとって理想的なケーブルの配置ではないものの，地震計の観測から推定される場所の近くに推定することができた[9)]．また，遠地地震を用いて地下の不均質構造推定も行えることを示した[10)]．

このように，DAS の稠密観測データに従来の地震学の手法を適用し，主に浅部構造を推定することが可能であることが示されてきている．しかし，DAS で計測されるひずみは，従来の地震計で記録される変位・速度・加速度といったものの空間微分に相当する物理量であり，波の到来方向に対する感度も異なる[2)]．そのため，従来の手法をそのまま使用するのではなく，より厳密にはひずみに拡張した手法や解釈を行う必要がある．連続観測ではデータ量も多く，機械学習を利用した自動処理も必要であると考えられる．また，DAS の計測装置は，高周波を想定して設計されたものが一般的であるが，地震学ではさらに低周波まで計測できる装置が必要とされる場面が多い．既存のケーブルを利用する際の注意点としては，地面とケーブルのカップリングも波形に影響することが挙げら

れる．このような課題はあるものの，近いうちに手法や装置開発が進み，DAS 観測ならではの結果が多く得られると期待される．光ファイバーケーブルを用いた DAS 観測は，従来の地震計による観測に置き換わるものではなく，観測手法の一つの選択肢として地震学に定着していくと考えられる．

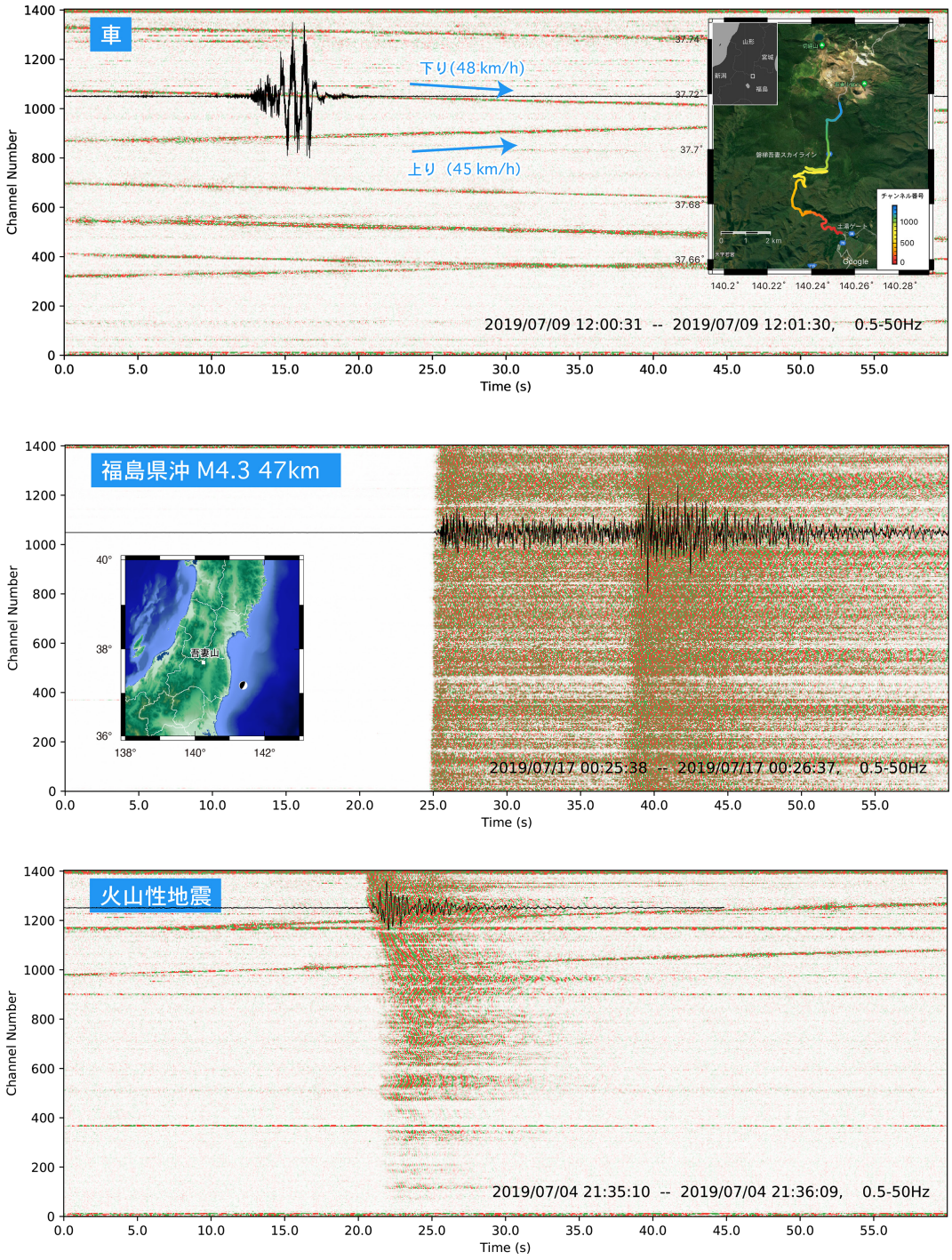
（江本　賢太郎）
EMOTO Kentaro

謝辞

吾妻山での DAS 観測では，国土交通省福島河川国道事務所の方々に便宜を図っていただいた．地震波伝播シミュレーションには，東京大学地震研究所の EIC 計算機システムを使用させていただいた．

参考文献

1） 光ファイバセンシング振興協会（2019），光ファイバセンサ入門，＜ http://www.phosc.jp/cms/index.html?c=4>（参照 2020-09-10）
2） Zhan, Z. (2020), Distributed Acoustic Sensing Turns Fiber-Optic Cables into Sensitive Seismic Antennas, *Seismol. Res. Lett.*, **91**, 1-15.
3） Zhan, Z., Z. Li, Z. Shen, Y. Yang, E. F. Williams, X. Wang, J. B. Muir, A. Klesh, and M. Karrenbach (2020), A rapid response Distributed Acoustic Sensing (DAS) array after the 2019 Ridgecrest earthquakes, 2020 SCEC Annual Meeting.
4） Lindsey, N.J., T.C. Dawe, and J.B. Ajo-Franklin (2019), Illuminating seafloor faults and ocean dynamics with dark fiber distributed acoustic sensing, *Science*, **366**, 1103-1107.
5） Ajo-Franklin, J.B., S. Dou, N.J. Lindsey, I. Monga, C. Tracy, M. Robertson, V.R. Tribaldos, C. Ulrich, B. Freifeld, T. Daley, and X. Li (2019), Distributed Acoustic Sensing Using Dark Fiber for Near-Surface Characterization and Broadband Seismic Event Detection, *Scientific Reports*, **9**, 1328.
6） Spica, Z.J., M. Perton, E.R. Martin, G.C. Beroza, and B. Biondi (2020), Urban Seismic Site Characterization by Fiber‐Optic Seismology, *J. Geophys. Res.*, **125,** e2019JB018656.
7） Yu, C., Z. Zhan, N.J. Lindsey, J.B. Ajo-Franklin, and M. Robertson (2019), The potential of DAS in teleseismic studies: Insights from the Goldstone experiment, *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 1320-1328.
8） Galybin, K., T. Kimura, and F. Exton (2018), Fibre-Optic Vsps: Borehole Seismic Revolution in Australia, ASEG Extended Abstracts, 1-3.
9） 西村太志, 江本賢太郎, 中原恒, 三浦哲, 山本希, 杉村俊輔, 植田尚大, 石川歩, 木村恒久（2020），光ファイバーと DAS の記録を用いた吾妻山の火山性地震の震源決定，JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SVC45-30.
10） Emoto, K., T. Nishimura, H. Nakahara, S. Miura, M. Yamamoto, S. Sugimura, T. Ueda, A. Ishikawa, and T. Kimura (2020), Effect of complex topography on the wavefield recorded by DAS and buried fiber optic cable at Azuma volcano, Northeast Japan, EGU General Assembly 2020, EGU2020-9825.



第 1 図　吾妻山で行った DAS 観測の記録例．チャンネルの位置は，上段の図中の地図に示す通りであり，0 が土湯（麓側），1400 が浄土平（山頂側）である．上段，中段，下段は，それぞれ自動車ノイズ，近地地震，火山性地震の 1 分間の記録である．自動車ノイズでは，自動車の移動を追跡することができ，移動速度がわかる．近地地震では P 波と S 波が十分な振幅で記録されている様子がわかる．火山性地震の複雑な波動場も DAS による稠密観測により明らかになった．

Fig. 1　Examples of waveforms recorded by the DAS observation at Azuma volcano. The location of the channel is indicated in the inserted map in the top figure. The fiber optic cable is installed along the road and channel number 0 is located at the Tsuchyu side. Top, middle and bottom figures show 1-minute records of the traffic noise, local earthquake and the volcanic earthquake, respectively. We can track the moving vehicle from the noise record and clear P and S wavefronts of the local earthquake are recognized. The complex wavefield of the volcanic earthquake is revealed by the dense record of the DAS observation.