

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04097

研究課題名（和文）光ファイバーケーブルを用いた高密度観測による構造推定：活断層から微小亀裂まで

研究課題名（英文）Estimation of the subsurface structure using the fiber optic cable from the fault to the crack

研究代表者

江本 賢太郎（Emoto, Kentaro）

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：80707597

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：Distributed Acoustic Sensing（DAS）観測を宮城県の国道4号・47号沿いの光ファイバーケーブルを用いて実施することで、数十kmの測線に沿って数m間隔という従来の観測より1桁以上の超高密度な振動データを取得した。地震記録から地盤増幅特性を推定することにより、長町利府断層を境に構造が異なる様子が確認され、雑微動を用いた解析では、地下100mまでの構造を詳細に求めた。波形のばらつきに着目することで、統計的に数十m以下の微細不均質の存在、空間変化を明らかにした。DAS観測により、数kmスケールの構造変化から、メートルスケールの微細不均質にまでアプローチできることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

新しい技術であるDAS観測が、地震学の観測手法の一つになり得ることを示すことができた。超高密度観測は、浅部構造の理解や断層帯付近における微細不均質の推定に役立てることができ、不均質形成の理解に貢献する。加えて、大地震発生時に建物被害の分布は、細かいスケールでばらつくものであるが、これを理解するため、また将来の大地震に対する被害予測の観点で、浅部構造や地盤増幅率を詳細に推定することは社会的に重要であり、これからの地震学においてDAS観測が普及していく大きな意義になるとと思われる。

研究成果の概要（英文）：Very high dense observation based on the distributed acoustic sensing (DAS) technique was conducted using fiber optic cables along national routes 4 and 47. The number of measurement points is larger than one order than that of conventional seismic observation. From the analysis of the site amplification, different response across the Nagamachi-Rifu Fault was estimated. By statistically analyzing the variation of waveforms between channels, the spatial variation of the small-scale heterogeneity, whose scale is less than the order of one meter, was estimated along the fiber optic cable. DAS can be used to reveal the velocity structure along the fiber optic cable from meter to several tens of kilometers.

研究分野：地震学

キーワード：DAS 光ファイバー 微細不均質構造 超高密度地震観測

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

光ファイバーケーブル自体をセンサーとして、ケーブルに沿った複数箇所で振動(歪)を計測する **Distributed Acoustic Sensing (DAS)** と呼ばれる技術が地震学・地球科学分野で広まりつつあった。数十 km の光ファイバーケーブルを用いて、数 m 間隔で振動を計測、つまり数千点以上の箇所地震動を記録することが可能で、地震観測に革命をもたらすものと期待されていた。しかし、従来の地震計とは観測される物理量や設置状況が異なることもあり、その実用性の検証が必要とされていた。特に、DAS 観測には、既存の光ファイバーケーブルを利用できることが利点の一つとなっているが、道路下に敷設された既存の通信用ケーブルを用いた場合に地震動が正しく記録されるのか、ケーブルの真上を通過する交通ノイズが地震学の解析にどこまで影響するのかはまだ事例も少なくわかっていなかった。

### 2. 研究の目的

DAS 観測の長所である超高密度地震観測を行うことで、通常地震観測よりも細かい空間分解能で地下の地震波伝播速度の不均質構造を明らかにすることができると考えた。長町利府断層が存在し、特徴的な不均質が予想される宮城県の国道4号沿いの光ファイバーケーブルを主な研究対象地域とし、数 km から数 m スケールの不均質構造を推定することを目的とした。

### 3. 研究の方法

DAS 観測を実施した国道4号・47号沿いの光ファイバーケーブルの位置を図1に示す。国土交通省古川維持出張所に計測装置を設置し、北西側の47号および南側の4号に向けて計測を行った。ケーブル長は4号が50km、47号が31kmである。振動の計測点(チャンネル)間隔は、6.4mと設定したため、合計で12,000箇所以上という大量の振動データが得られた。計測期間は2022年3月28日から4月21日までである。このデータに加えて、この前年度に国道4号沿いで行なったDAS観測、翌年に熊本県の国道3号沿いで行なったDAS観測記録も併せて解析した。

これらのデータから、(1)自然地震を用いた地盤増幅特性の推定、(2)常時微動・交通ノイズを用いた浅部構造の推定、(3)波形のばらつきに着目した統計的な微細不均質構造の推定を行なった。加えて、(4)歪データに対する理論モデルの拡張も行なった。

### 4. 研究成果

#### (1) 地盤増幅特性の推定

国道4号沿いの光ファイバーケーブルを用いたDAS観測で取得したデータの中で、比較的規模が大きく、交通ノイズの影響が少ない13個の地震を選んだ。これらの各地震に対し、S波部分でRMS振幅を計算し、全チャンネル平均で規格化したのち、全イベントでの中央値を各チャンネルにおける地盤増幅率とした。求めた地盤増幅率を図2に示す。おおまかな傾向としては、J-SHIS(防災科学技術研究所)で公開されている微地形区分に基づいて推定された地盤増幅率と整合的であった。また、橋梁部においては、地震時に揺れやすい箇所とそうでない箇所があることがわかった。さらに細かいスケールの変動も見られ、これらはチャンネル近傍の数十m程度の不均質が現れているものだと考えられた。また、推定された地盤増幅率に対して、クラスター解析を適用した結果、地盤増幅率は、後背湿地や台地・谷底低地といった地質構造に対応している様子が見られるとともに、長町利府断層を挟んだ南部と北部で異なるクラスターに分類されることが確認され、断層を挟んだ構造の違いが反映された結果となっていることが明らかになった。

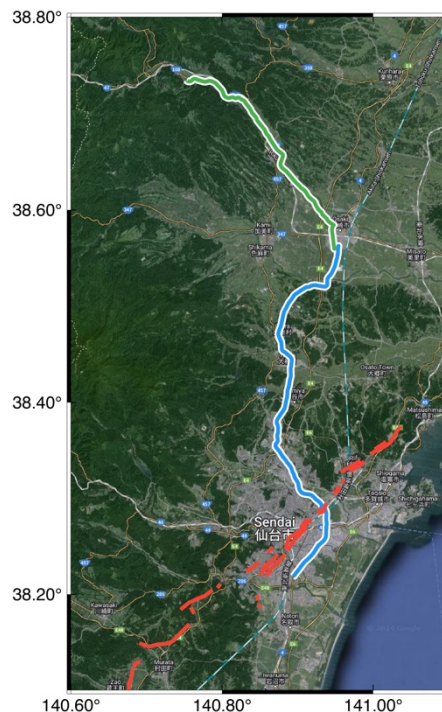


図1 国道4号(青)と国道47号(緑)沿いの光ファイバーケーブルの位置。赤線は長町利府断層を示す。

### (2) 常時微動・交通ノイズを用いた浅部構造の推定

DAS 記録の大部分は交通ノイズに支配されていたため、交通ノイズを含めた雑微動の連続記録を用いて地震波干渉法解析を行うことで、チャンネル間を伝播する表面波を抽出した。この表面波の分散性を利用することで、浅部の地震波伝播速度構造を推定することができる。1-8Hz においてレイリー波の基本モードの分散曲線を得ることができた。区間によって周波数ごとの速度が異なっており、浅部地下構造がケーブルに沿って変化している様子を捉えることができた。

上記の地震波干渉法の原理としては、雑微動源が等方的に分布していることが要求されている。しかし、道路下の光ファイバーケーブルでの DAS 観測では、観測点直近でケーブルに沿った方向に偏った交通ノイズ源が存在する影響は避けられない。そこで、地震波干渉法ではなく、橋梁部分が車の通行によって振動され、その振動から励起される表面波を用いた浅部構造のモニタリング方法を提案し、国道 47 号の DAS データに適用した。新岩出山大橋から励起される地震波の相互相関関数を計算することにより、2 チャンネル間を伝播する波を抽出することができた。ここから分散曲線を推定して浅部構造をインバージョンすることも可能であるが、今回は抽出した波の時間変化に注目した。浅部構造は、1 日の中で 0.1% 程度の速度変化をしていることが確認されたが、この解釈にはさらなる解析が必要である。

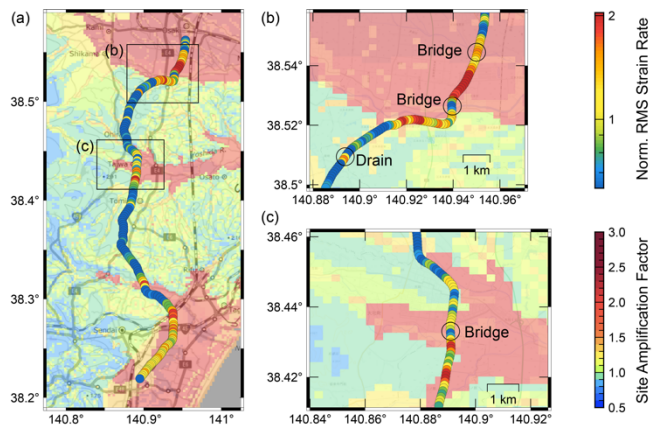


図 2 DAS 観測 (丸印) と微地形区分 (J-SHIS, 背景色) から推定された地盤増幅特性の比較。

### (3) 統計的な微細不均質構造の推定

(2) の地震波干渉法で抽出した 2 チャンネル間を伝播する波のばらつきに着目した解析を行なった。もし構造が均質であれば、どのチャンネルペアでも同じ波形になるはずであるが、実際には異なる波形を示す。この波形の違いは 2 チャンネル間の間隔が大きくなるほど、大きな違いとなる。いくつかの区間における波形のコヒーレント成分のチャンネル間隔依存性を図 3 に示す。どの区間でも 100m 程度で減少する様子が見られ、これは 100m 以下のスケールの不均質 (数 m まで) が強く影響しており、DAS による超高密度観測だからこそ見られた現象である。この減少の仕方もケーブルに沿った区間で変化しており、微細不均質構造の空間不均質分布が示唆されるとともに、DAS 観測によって、チャンネル間隔 (数 m) 以下の不均質情報にアクセスできることが示された。

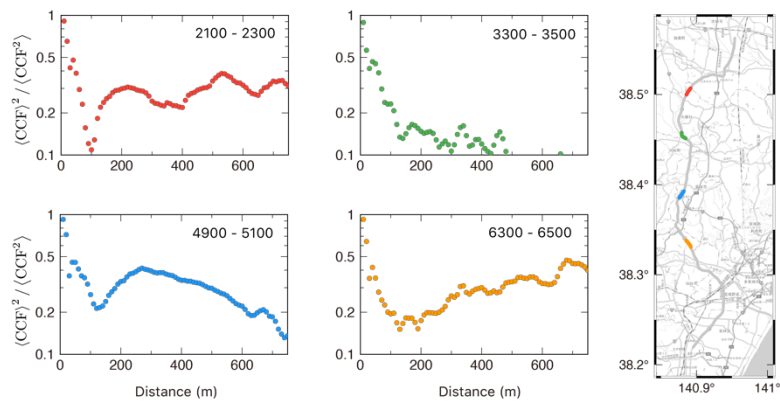


図 3 国道 4 号沿いにおける相互相関波形のコヒーレント成分の距離依存。色は地図上の各区間に対応している。数 100m から数 m 以下の不均質の影響で、100m 程度離れると波形が大きく異なる様子がわかる。

### (4) 歪エンベロープの導出

DAS 観測では、通常の地震計とは異なり、歪が記録される。歪は変位の空間微分量であり、地下の不均質に敏感であると思われる。この違いを定量的に見積もるために、多重前方散乱理論に基づいて、微細不均質媒質中における歪エンベロープの導出を行なった。定式化の結果、歪エンベロープは、変位エンベロープの単純な射影にはならないことがわかった。これに基づいてエンベロープを計算した結果、例えば、P 波の場合は伝播方向と同じ成分のエンベロープは変位と同様の傾向を示すが、それと直交する方向の成分は、変位に比べて歪の方が不均質の影響を強く受けることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nakahara Hisashi, Haney Matthew M	4. 巻 230
2. 論文標題 Connection between the cross correlation and the Green's function: strain and rotation of surface waves	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1166 ~ 1180
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggac094	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nishimura Takeshi, Emoto Kentaro, Nakahara Hisashi, Miura Satoshi, Yamamoto Mare, Sugimura Shunsuke, Ishikawa Ayumu, Kimura Tsunehisa	4. 巻 11
2. 論文標題 Source location of volcanic earthquakes and subsurface characterization using fiber-optic cable and distributed acoustic sensing system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 6319
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-85621-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 江本賢太郎、中原恒、西村太志
2. 発表標題 多重前方散乱近似を用いた2次元ランダム不均質媒質における歪エンベロープ合成
3. 学会等名 地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江本賢太郎
2. 発表標題 2次元ランダム不均質媒質中での歪エンベロープの特徴
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 矢武克啓、中原恒、江本賢太郎、西村太志
2. 発表標題 国道4号線におけるDAS, ビデオカメラ, 広帯域地震計による通過車両の同時観測
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 江本 賢太郎, 中原 恒, 西村 太志, 山本 希
2. 発表標題 分布型音響計測 (DAS) による国道4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 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hisashi Nakahara, Kentaro Emoto, Takeshi Nishimura
2. 発表標題 Formulation of the SPAC method for strain, rotation, and tilt
3. 学会等名 IAGA-ISAPEI 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Katsuhiko Yabu, Hisashi Nakahara, Kentaro Emoto, Takeshi Nishimura
2. 発表標題 Enhancing the Extraction of Surface-wave Dispersion Curves from the Traffic Signal in DAS Data
3. 学会等名 IAGA-ISAPEI 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kentaro Emoto, Hisashi Nakahara, Takeshi Nishimura, Mare Yamamoto, Kodai Sagae, Gigi Ganefianto, Katsuhiro Yabu
2. 発表標題 Estimation of the shallow small-scale heterogeneity by using the dense DAS data
3. 学会等名 IAGA-ISAPEI 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 矢武 克啓, 中原 恒, 江本 賢太郎, 西村 太志
2. 発表標題 国道4号線沿いのDAS観測により捉えられた移動車両が励起する表面波を直接利用した浅部S波速度構造の推定
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江本賢太郎, 中原恒, 西村太志, 山本希, 寒河江皓大, Gigi Ganefianto, 矢武克啓
2. 発表標題 市街地における光ファイバーケーブルを用いた DAS観測による高密度データの解析
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2020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)	

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
---------	---------