

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04133

研究課題名(和文) 微動場のモデリングによる3次元S波速度構造推定手法の開発と都市部への適用

研究課題名(英文) Modeling of ambient noise wavefield for constructing 3D S-wave velocity structure and applications to urban areas

研究代表者

池田 達紀 (Ikeda, Tatsunori)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：00736845

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、都市部において三次元S波速度構造を推定できる微動解析手法の開発および都市部への適用を目的とし、研究を行った。都市部での複雑な微動をモデリングするために、微動のエネルギー分布を考慮しながら表面波速度分布を推定できる手法を開発した。福岡市の都市部(薬院)で取得した微動データに開発した手法を適用したところ、観測アレイ内部を横断する警固断層を境界とし、急激な表面波速度変化が推定された。これは警固断層に起因する基盤深度の違いを反映していると考えられる。提案手法は微動源が複雑な都市部においても柔軟な地震計配置で不均質構造を推定できる手法となりうると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

都市部において高精度な3次元S波速度構造を推定することは、地震時の揺れやすさを評価したり、液状化のポテンシャルを評価したりする上で重要である。微動探査は人工震源を必要しないため、都市部においても有効なS波速度構造の推定手法であるが、都市部では地震計の設置場所が限定的かつ複雑な微動源の分布により、探査結果の解像度が制約されてしまう可能性がある。そこで本研究では、柔軟な地震計配置で取得した微動データから、複雑な微動のエネルギー分布を考慮しながら不均質な速度構造を推定できるトモグラフィ手法を開発した。開発した手法を福岡市の都市部で取得した微動データに適用することで、その有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is development of ambient noise data analysis to estimate 3D S-wave velocity structure in urban areas, and its applications to urban areas. To achieve this purpose, we developed a modeling method to estimate surface wave velocity distribution considering complicated ambient noise energy distribution in urban areas. By applying the developed method for ambient noise data acquired at the urban area in Fukuoka city (Yakuin), we found that the estimated velocities show lateral variation along the Kego fault across the study area. The velocity variation can be explained by change in basement depth associated with the Kego fault. Thus, our proposed method can be useful to estimate heterogeneous structure using flexible seismometer distribution in urban areas where ambient noise sources can be heterogeneously distributed.

研究分野：地球物理学、地震学

キーワード：微動探査 トモグラフィ 表面波 S波速度 地震波干渉法

1. 研究開始当初の背景

地震時の地盤の揺れやすさや液状化のポテンシャル評価などの工学的問題に取り組む上で、都市部における表層の S 波速度構造を高分解能に推定する手法を確立することは重要な課題である。微動に含まれる表面波を利用した微動探査は、その汎用性の高さから表層の S 波速度構造の推定に広く利用されている。微動探査により表層の 3 次元 S 波速度構造を推定する際は、規則的な間隔で設置した地震計を用いたアレイ解析手法 (Hayashi et al., 2021) が適用されているが、アレイ解析をベースとするため空間解像度に限界がある。

一方、深部の地殻スケールの構造推定を対象とする微動を用いた解析では、密な地震計を用いたトモグラフィ解析手法が確立されてきており、これにより高解像度な 3 次元 S 波速度構造の推定が可能である (例えば Nimiya et al., 2020)。この方法は、月単位の長期間の微動の相互相関を重合することにより、微動源の偏りの影響を低減できる短波長の表面波を抽出し、観測点間の表面波の位相速度や群速度を推定するものである。

しかしながら、物理探査スケールの浅部探査では、長時間の微動を取得することは現実的ではないため、短時間の微動データに対して適用可能な手法であることが望ましい。短時間のデータを利用する場合、微動源の偏りの影響が大きい長波長を利用する必要があり、さらに都市部では微動源が空間的に複雑に分布していると考えられることから、浅部探査において高解像度なトモグラフィ解析を適用するには、微動の到来方向やエネルギー分布を考慮したモデリング方法の開発が必要となる。また、都市部では地震計を設置できる箇所に制約があることから、柔軟な地震計配置で探査可能な手法であることが望ましい。

2. 研究の目的

本研究の目的は、都市部において高分解能な 3 次元 S 波速度構造モデルを推定可能な手法の開発と都市部への適用を目的とする。具体的には、不規則で柔軟性の高い地震計配置で得られた微動データから、微動の到来方向やエネルギー分布を考慮したトモグラフィ手法を開発し、福岡市内の都市部で取得した微動データへ適用することで、その有効性を示す。

3. 研究の方法

(1) 微動源がアレイ外にあるデータ

まず、主な微動源から地震計アレイから離れている九州大学伊都キャンパス周辺で取得した微動データの解析を行なった。微動データの解析においては、方位方向に変化する微動のエネルギーを考慮した解析 (Ikeda et al., 2021a) を適用し、位相速度の空間分布を推定した。この方法では、微動源は地震計アレイの遠方に存在していると仮定される。

(2) 微動源がアレイ近傍にあるデータ (都市部)

本研究の目的である都市部 (薬院など) で微動データ観測を行い、データ解析を行なった。都市部で取得した微動データに対し、(1) の方位方向に変化する微動のエネルギーを考慮した解析を適用したところ、観測した微動データの相互相関をうまくモデリングできなかった。これは地震計の近傍やアレイ内部にも微動源が存在していたため、(1) の解析手法における仮定が成立しなかったことに起因すると考えられる。そこで、微動源がアレイ内にも分布していることを許容しながら位相速度の空間分布を推定できるトモグラフィ解析手法を開発した。

4. 研究成果

(1) 微動源がアレイ外にあるデータ

九州大学伊都キャンパス周辺で取得した微動データに対し、すべての地震計ペアの相互相関を計算し拡張 SPAC 法により推定した平均的な分散曲線および微動エネルギーの方位分布を図 1 に示す。2-9 Hz の周波数帯で分散性の位相速度が得られており、表面波が卓越していることがわかる (図 1a)。また、微動エネルギーの方位分布から (図 1b) 主要な微動源の到来方向は主要道路の位置と整合的であることから、交通振動に起因するノイズが卓越していると考えられる。さらに推定した微動のエネルギー分布を固定し、観測点間の位相速度を推定し、トモグラフィ解析を適用することで位相速度分布を推定した。3 Hz における観測点間の位相速度とそのトモグラフィ解析により推定した位相速度マップを図 2 に示す。位相速度分布を見ると東側の位相速度が遅い傾向がわかる。対象地域周辺は、現在は陸地であるものの、以前は今津干潟が広がっていた海域の境界付近である。そのため、図 2 で得られた位相速度の空間変化は、干潟の境界の影響を反映している可能性がある。

(2) 微動源がアレイ近傍にあるデータ (都市部)

薬院周辺で取得した微動データを解析するために、微動源がアレイ内にも存在することを許容するトモグラフィ手法を開発した。この手法は、各グリッドの相対的な微動エネルギーと位相速度、群速度を未知数として微動の相互相関波形をモデリングし、観測データから推定した微動の相互相関波形との比較から未知数をアップデートしていくものである。

その結果得られた 3.5 Hz、5.5 Hz の位相速度および微動のエネルギー分布を図 3、4 に示す。

推定した位相速度分布を見てみると、警固断層を境に位相速度が急激に変化する傾向が見られる。この地域ではボーリングデータにより警固断層による基盤深度の違いが明らかにされており（下山ほか、2005）、警固断層の西側で位相速度が増加する傾向は、西側で基盤の上面深度が浅くなっていることに対応していると考えられる。また、推定した微動のエネルギーは一部で負の値をとっているため、非負の制約条件を付加する必要がある。

この手法の適用にあたり計算時間はかかるものの、相互相関波形を直接比較してモデルをアップデートすることから、従来の微動トモグラフィ解析で必要な適切な位相速度をペアごとに選択する処理が必要ないという利点がある。この提案手法の有効性の検証のため感度解析等を進める必要があるが、提案手法は微動源の複雑な都市部においても不均質な速度構造を推定可能な手法となりうると考えられる。

<引用文献>

- Koichi Hayashi, Mitchell Craig, Shunjia Tan, Chisato Konishi, Haruhiko Suzuki, Michitaka Tahara, Kent Falkenstein, Bin He, Daxiang Cheng (2021) Common-midpoint spatial autocorrelation analysis of seismic ambient noise obtained from spatially unaliased sensor distribution, *Geophysics*, 86(4), EN51-EN62.
- Tatsunori Ikeda, Takeshi Tsuji, Chisato Konishi, Hideki Saito (2021a) Spatial autocorrelation method for reliable measurements of two-station dispersion curves in heterogeneous ambient noise wavefields, *Geophysical Journal International*, 226, 1130-1147.
- Tatsunori Ikeda, Takeshi Tsuji, Chisato Konishi, Hideki Saito (2021b) Characterization and utilization of heterogeneous ambient noise field for imaging subsurface structure in the Itoshima Peninsula, Japan, *Proceedings of the 14th SEGJ International Symposium*, 190-193.
- Hiro Nimiya, Tatsunori Ikeda, Takeshi Tsuji (2020) Three-Dimensional S Wave Velocity Structure of Central Japan Estimated by Surface-Wave Tomography Using Ambient Noise, *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, e2019JB019043.
- 下山 正一, 磯 望, 松田 時彦, 市原 季彦, 千田 昇, 岡村 眞, 茂木 透, 鈴木 貞臣, 落合 英俊, 長沢 新一, 今西 肇, 川畑 史子, 矢ヶ部 秀美, 樗木 政昭, 松浦 一樹 (2005) 警固断層, 薬院地区(福岡市)でのトレンチ調査報告, *活断層研究*, 25, 117-128.

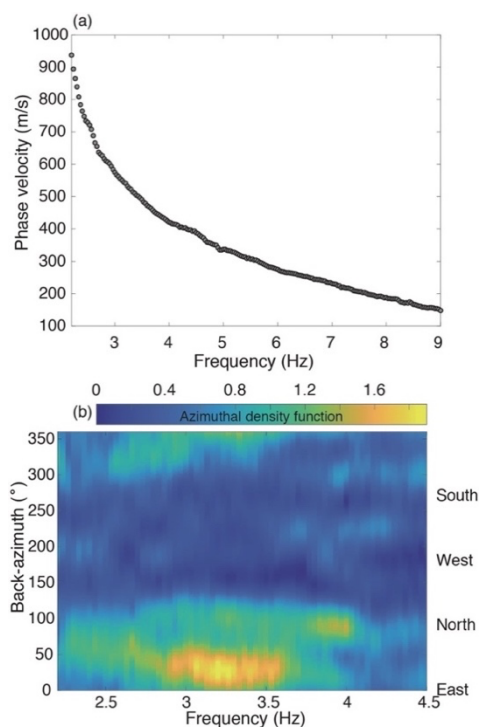


図1. (a) 推定した平均的な分散曲線。(b) 推定した方位ごとの微動のエネルギー (Ikeda et al., 2021b)。

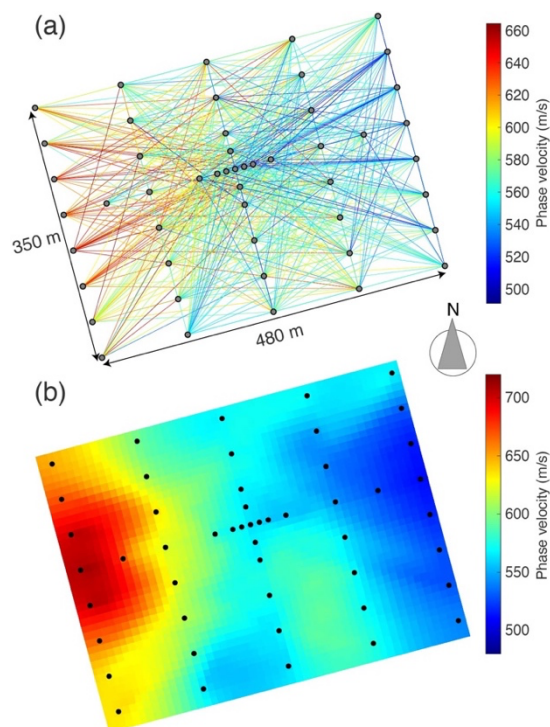


図2. 3Hzにおける(a) 推定した観測点ペアごとの位相速度分布および(b) トモグラフィによる位相速度マップ。黒の丸およびドットは地震計の位置を示す (Ikeda et al., 2021b)。

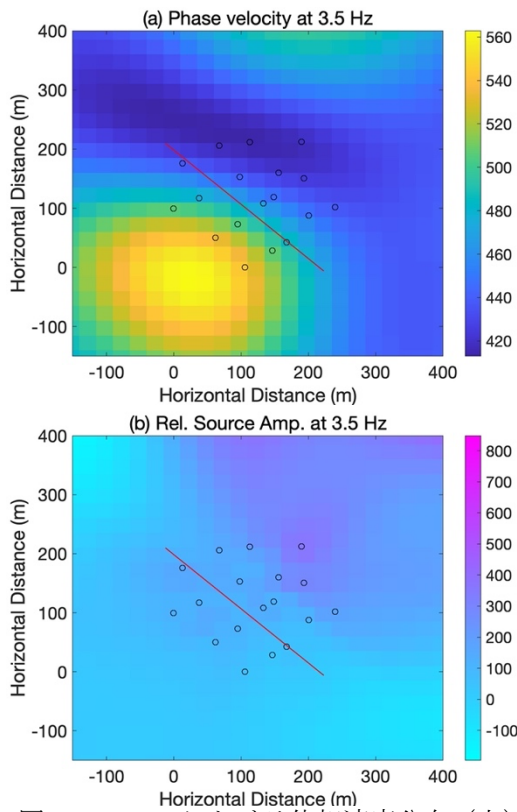


図3. 3.5 Hz における位相速度分布 (上) および微動のエネルギー分布 (下)。黒丸は地震計の位置、赤線は警固断層の位置を示す。

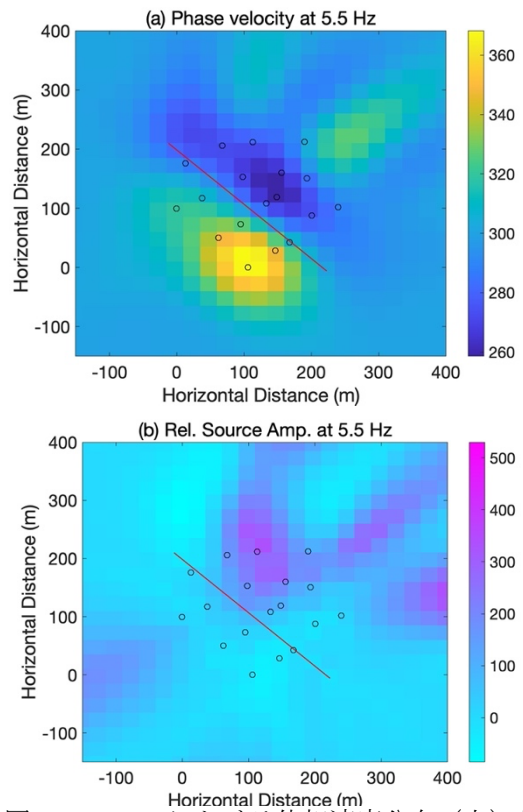


図4. 5.5 Hz における位相速度分布 (上) および微動のエネルギー分布 (下)。黒丸は地震計の位置、赤線は警固断層の位置を示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Ikeda Tatsunori, Tsuji Takeshi, Konishi Chisato, Saito Hideki | 4. 巻 226 |
| 2. 論文標題 Spatial autocorrelation method for reliable measurements of two-station dispersion curves in heterogeneous ambient noise wavefields | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Geophysical Journal International | 6. 最初と最後の頁 1130 ~ 1147 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggab150 | 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 - |
| 1. 著者名 Tsuji Takeshi, Ikeda Tatsunori, Matsuura Ryosuke, Mukumoto Kota, Hutapea Fernando Lawrens, Kimura Tsunehisa, Yamaoka Koshun, Shinohara Masanao | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Continuous monitoring system for safe managements of CO2 storage and geothermal reservoirs | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Scientific Reports | 6. 最初と最後の頁 19120 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-97881-5 | 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 - |
| 1. 著者名 Nimiya Hiro, Ikeda Tatsunori, Tsuji Takeshi | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Temporal changes in anthropogenic seismic noise levels associated with economic and leisure activities during the COVID-19 pandemic | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Scientific Reports | 6. 最初と最後の頁 20439 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-00063-6 | 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 - |
| 1. 著者名 Imam Tarek S., Ikeda Tatsunori, Tsuji Takeshi, Uesugi Jiro, Nakamura Takeshi, Okaue Yoshinori | 4. 巻 n/a |
| 2. 論文標題 Extracting high resolution P wave reflectivity of the shallow subsurface by seismic interferometry based on autocorrelation of blast mining signals | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Geophysical Prospecting | 6. 最初と最後の頁 n/a |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/1365-2478.13308 | 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 - |

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 池田 達紀, 辻 健, 小西 千里, 斎藤 秀樹 |
| 2. 発表標題 糸島半島の不均質な微動場から抽出された表面波と実体波 |
| 3. 学会等名 物理探査学会第144回学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Tatsunori Ikeda, Takeshi Tsuji, Chisato Konishi, Hideki Saito |
| 2. 発表標題 Characterization and utilization of heterogeneous ambient noise field for imaging subsurface structure in the Itoshima Peninsula, Japan |
| 3. 学会等名 14 th SEGJ International Symposium (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Bokani Nthaba, Tatsunori Ikeda, Takeshi Tsuji, Hiro Nimiya, Yoshihisa Iio |
| 2. 発表標題 Three-dimensional S-wave velocity structure of the Kinki Region, southwestern Japan with ambient seismic noise tomography using a dense seismic array |
| 3. 学会等名 14 th SEGJ International Symposium (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Bokani Nthaba, Tatsunori Ikeda, Takeshi Tsuji, Hiro Nimiya, Yoshihisa Iio |
| 2. 発表標題 The Use of High-resolution Ambient Noise Surface Wave Tomography to Map Sedimentary and Tectonic Structures in the Kinki Area, Southwestern Japan |
| 3. 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 池田達紀, 辻健, 小西千里, 斎藤秀樹 |
| 2. 発表標題 微動の非等方なエネルギー分布を考慮した 2 観測点間の表面波分散曲線の推定 |
| 3. 学会等名 物理探査学会第143回学術講演会論文集 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 二宮啓, 池田達紀, 辻健 |
| 2. 発表標題 ラブ波を用いた表面波トモグラフィによる 関東平野の 3 次元 S 波速度構造の推定 |
| 3. 学会等名 物理探査学会第143回学術講演会論文集 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Tatsunori Ikeda, Takeshi Tsuji, Chisato Konishi, and Hideki Saito |
| 2. 発表標題 Extracting surface wave dispersion curves from two-station microtremor analysis in heterogeneous ambient noise wave field |
| 3. 学会等名 SEG 2020 annual meeting (国際学会) |
| 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 |
|---------------------------|-----------------------|----|
| | | |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|