

令和 2 年 5 月 13 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01308

研究課題名(和文) 三次元の波動伝播を考慮した広域表層地盤モデルの高精度化に関する研究

研究課題名(英文) A study on high accuracy of surface layer model considering three-dimensional wave propagation

研究代表者

高橋 広人(高橋広人)(Takahashi, Hirohito)

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号：00650821

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：三次元の波動伝播を考慮した広域表層地盤のモデル化手法の確立を目的として3点の成果を得た。列状に配置したセンサーを用いた微動記録に基づく二次元地盤情報を抽出する手法を構築した。三次元有限差分法に基づく模擬微動記録に基づき位相速度に及ぼす周辺地盤の影響範囲と波長との関係を明らかにした。表層地盤モデルをPC画面上で三次元表示し、一般市民に居住地域の土地利用と表層地盤構造の関係を通じた防災対策意識の向上をはかる表層地盤モデル可視化システムを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で構築した交通振動から二次元地盤情報を抽出する仕組みは、実務で用いられている表面波探査に比べて長い波長の分散性、さらに40～50m程度まで構造を捉えることが可能となり、人工震源なしで不整形地盤の把握が期待できる。

表層地盤モデル可視化システムは、地盤構造になじみの薄い一般市民の方に、新旧地形図や空中写真と併せて立体的に表示することで土地の履歴や地形改変を学習しながら防災啓発につながることを期待される。今後、防災啓発施設等に設置して学習効果について調査していきたい。

研究成果の概要(英文)：We obtained three results for the purpose of establishing a modeling method for wide-area surface ground considering three-dimensional wave propagation.

(1) We constructed a method for extracting two-dimensional ground information based on microtremor records using sensors arranged in rows. (2) We clarified the relationship between the wavelength and the influence range of the surrounding ground on the phase velocity based on the simulated microtremor using the three-dimensional finite difference method. (3) A surface layer model visualization system was constructed to display the surface layer model three-dimensionally on a PC monitor and to raise awareness of disaster prevention measures for publics.

研究分野：地震工学

キーワード：表層地盤モデル 交通振動 微動 地震波干渉法 不整形地盤 表層地盤モデル可視化システム

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

兵庫県南部地震以降、日本は度重なる地震に見舞われ被害を被ってきた。地震被害は震源からの距離のほか、地盤条件によるところが大きい。S波速度が小さい軟弱な土層の存在による一次元の波動論で説明される例がある一方で、地形や表層地盤構造の不整形により局所的な地盤増幅がおこったと推定された事例もある。地震被害の予測には強震動予測の適切な評価が必要であり、地震動強さに及ぼす地盤特性の評価が重要となる。

強震動予測のための表層地盤モデルは、自治体等の被害予測調査を目的としてボーリング資料を用いて構築されるが、一般に地盤モデルに基づく地盤増幅特性は、対象範囲内の各地点における一次元の地震応答解析により評価される。このため、局所的な地盤増幅の説明は難しい。

研究代表者は名古屋市域を対象に表層地盤モデルを構築し、1944年昭和東南海地震を想定した地震動分布を一次元地震応答解析により評価したが、被害震度の大きかった地域の忠実な再現には至らなかった。この地域は沖積層基底面の埋没谷の先端部に該当することから、被害震度が大きくなった要因のひとつとして表層地盤の不整形による波動の集中・干渉が考えられる。これを明らかにするには、三次元有限差分法等による地震応答シミュレーションが必要である。このためには三次元の波動伝播を考慮した表層地盤モデルの構築手法の確立が求められるが、表層地盤モデルのチューニングには、短周期域のH/Vスペクトルや微動アレイ探査による分散曲線が用いられるが、評価地点の地盤構造は平行成層地盤と仮定し行われているのが現状である。

一方で、地下構造を把握する手法として地震波干渉法を適用し反射法断面を求める試みがなされている。都市部においては高速鉄道網や道路が発達しており、これらの振動を用いることで都市部での地下構造探査が簡便に実施、かつ常に安定した記録の取得が期待できる。これを表層地盤モデルのチューニングに反映することにより三次元の波動伝播効果を考慮したモデル化手法の確立につながる。

以上の背景より、三次元の波動伝播を考慮した表層地盤モデル構築手法を考究するに至った。

2. 研究の目的

三次元の波動伝播を考慮した広域表層地盤のモデル化手法の開発研究を実施する。微動計測と三次元有限差分法シミュレーションを用いて表層地盤モデルの高精度化の方法を検討する。微動計測では、地震波干渉法及び微動アレイ探査に適用するための多点同時計測を行い、表層地盤の不整形性を捉える手法の確立を目指す。三次元有限差分法シミュレーションでは模擬微動に基づいて、表層地盤モデルの不整形性との関係を整理する。両者を踏まえ三次元の波動伝播を考慮した表層地盤モデルの高度化手法の確立を図る。

3. 研究の方法

三次元の波動伝播の影響を考慮した表層地盤モデルを構築するため、次の3つの検討を行う。
①短周期域の微動計測に基づく不整形地盤構造を捉えるための計測手法を整理し、微動計測に基づく地盤構造の空間変動の把握手法の検討を行う。
②三次元有限差分法による模擬微動に基づいて地下構造と地盤震動特性との関係を整理し、表層地盤モデルの高度化手法の確立について考究する。
③三次元波動伝播の影響と地盤構造との対応をビジュアルに確認するための表層地盤モデル可視化システムを構築し、一般に公開することで人が自宅と直下の地下構造の関係について理解を助け防災意識の向上を図る仕組みとする。

4. 研究成果

(1) 微動を用いた不整形地盤構造把握の試み

地下構造を把握する手法として地震波干渉法の適用の試みが増えている。都市部においては高速鉄道網や道路が発達しており、これらの振動を用いることで都市部での地下構造探査が簡便に実施、かつ常に安定した記録の取得が期待できる。そこで、交通振動による地表記録から地震波干渉法を適用してグリーン関数の合成を試みた。本研究課題では、グリーン関数の合成にあたっては振動源の時間特性を除去するため Vasconcelos and Snieder (2008) のデコンボリューション型の相互相関関数を用いた。分母は、点Aのパワースペクトルをバンド幅0.05 HzのParzenウィンドウ $W(\omega)$ で平滑化した。

$$R(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}_A, \mathbf{x}, \omega) = \frac{G^*(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}, \omega)G(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}, \omega)}{[G^*(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}, \omega)G(\mathbf{x}_A, \mathbf{x}, \omega)] * W(\omega)} \quad (1)$$

なお、グリーン関数は水平動では明瞭に現れず上下動の方が良好な結果が得られた。以降に示す図1～図3は上下動のグリーン関数である。

①地下鉄の列車走行振動によるグリーン関数の作成

振動源が地下にある場合として、地下鉄の列車走行振動を計測した。名古屋市営地下鉄名城線の名古屋大学駅～本山駅間の一部区間において、線路のほぼ直上となる位置に5m間隔でセンサーを配置した。白山工業株式会社製の微動観測キットJU210とJU410を使用し、サンプリング頻度200 Hzで北・中・南測線に分けて2017年9月の日中に各測線に対し1日6時間の計測を2日ずつ計6日行った。グリーン関数の合成に用いた列車走行サンプルの数は74である。

図1に北測線の地点1、9を震源としたときのグリーン関数を示す。地点1を震源とするものにおいて明瞭に波動の伝播が観察されるが、地点9を震源とするものではやや不明瞭となっ

ている。これは、測線の南端に名古屋大学駅が位置しており、測線内で北側ほど列車の走行速度が高く、加振力が大きくなるためと考えられる。

②新幹線の列車走行振動によるグリーン関数の作成

振動源がほとんど地表に近い位置にある場合として、2018年8月の日中に新幹線の高架橋に沿う測線での振動計測を2日間かけ計12時間実施した。名古屋市南区の明治小学校の敷地において、5m間隔で21点のセンサーを配置した。使用した機材、サンプリング頻度は地下鉄振動と同じである。グリーン関数の合成に用いた列車走行サンプルの数は324である。

図2に地点10、20を震源としたときのグリーン関数を示す。地点10を震源とするもので波動伝播が比較的明瞭に観察されるが、地点20を震源とするものでは不明瞭である。新幹線の列車振動は地下鉄のそれと比較してS/N比が高いが、必ずしもそれがグリーン関数のS/N比の大小につながってはいない。

③道路交通振動によるグリーン関数の作成

名古屋市港区土古公園の西を南北に延びる産業道路に沿って2019年8月の日中に2日間かけ計18時間の微動観測を実施した。センサーはジオメトリクス社のATOMを用い、全長210mの区間に5m間隔で43点を設置した。また、公園にて白山工業製JU210を使用して微動アレイ観測を行った。道路交通振動の速度波形を65.536sの長さに分割して半分ずつ重複させながら1605個のサンプルを抽出し、グリーン関数を求めた。

図3に、測線南端と中央の地点を震源とするグリーン関数を示す。列車走行振動を利用する場合と比較して明瞭な波群がみられ、震源から遠い地点においては初動の後に分散性の波群がみられる。そこで、得られたグリーン関数に表面波多チャンネル解析(MASW)を適用した。

図4に、測線ほぼ中央の102.5m地点を中心位置(CMP)とするグリーン関数の組合せに対してMASWを適用した分散曲線を示す。同時に行った微動アレイ観測により得られた分散曲線を重ねて示した。MASWによる分散曲線は微動アレイ観測の結果とよく一致しており、地震波干渉法に基づくレイリー波の分散性の検出は妥当と考えられる。図5に、測線上の各CMPについて同様の処理を行った結果の分散曲線を断面状に並べて示す。表面波多チャンネル解析ではCMPごとに一次元構造を仮定しているが、対象地域は干拓地であり図5でも平行成層構造に近いイメージが得られ、二次元速度構造を得るためのフレームワークを確立することができた。

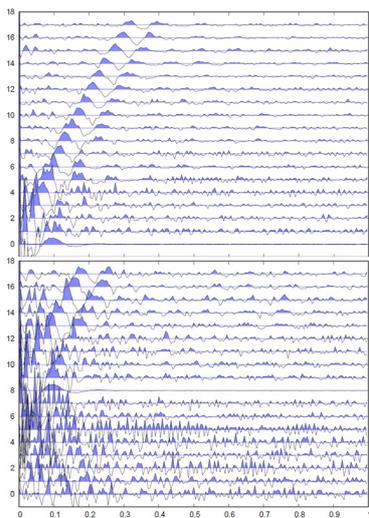


図1 地下鉄の列車走行振動によるグリーン関数

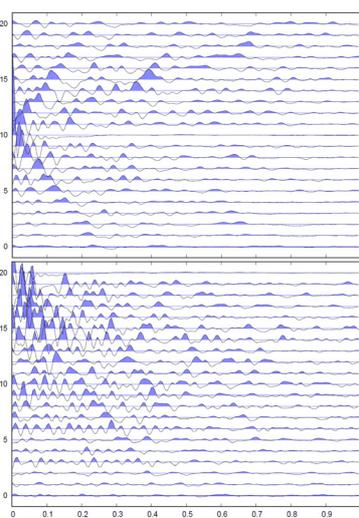


図2 新幹線の列車走行振動によるグリーン関数

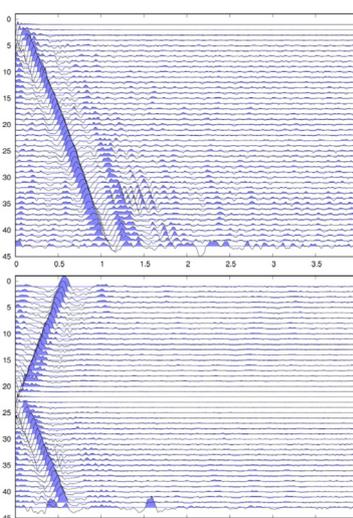


図3 道路交通振動によるグリーン関数

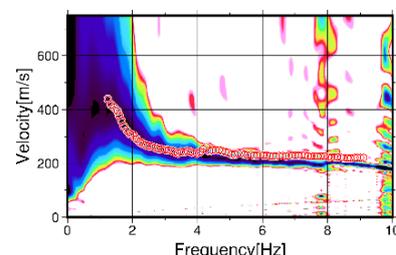


図4 MASWによる分散曲線

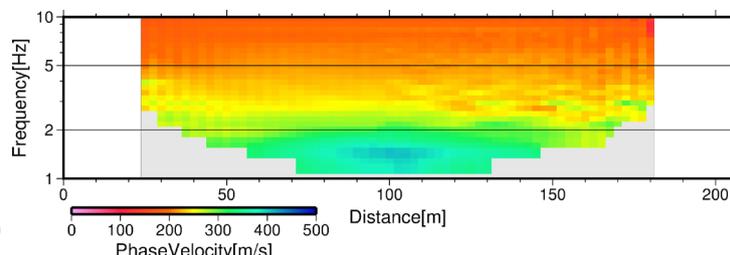


図5 位相速度断面

(2) 模擬微動に基づく地下構造と地盤震動特性との関係の検討

列車の走行振動を用いた計測では、当初S波の反射法地震探査を模擬することを期待したが、明瞭に得られたグリーン関数は上下動であり水平動のグリーン関数は明瞭に得られなかった。そこで上下動からS波速度構造と関係するレイリー波の分散性を捉えることを考えた。一方で、表面波の分散性を捉えるためには対象とする周期(波長)が長いほど計測地点間の距離は広くなる。従ってMASWにより得られる地点の分散性はその周辺の地盤の影響を受けるため、模擬微動に基づき地下構造と地盤震動特性との関係、特に周辺地盤の影響範囲に着目し検討した。

検討に用いたデータは、上林・他(2017)による三次元有元差分法による模擬微動記録である。

模擬微動作成に用いられた地盤モデルは $V_s=3\text{km/s}$ の基盤と 1km/s の堆積層からなる 2 層地盤であり、堆積層厚が 450m と 1350m の 2 通りの地盤構造が x 軸方向に並びこれらの間を基盤の傾斜構造もしくは基盤の段差構造で接続した三次元構造となっている。本研究課題では観測される微動の震動特性に対する周辺地盤の影響範囲の把握を目的とするため、地下構造が $X=42\text{km}$ を境に堆積層厚が 450m から 1350m へと急変する段差構造に対する模擬微動記録を用いた。

地盤震動特性の評価には空間自己相関法 (SPAC 法) による位相速度を用いた。各点 0.08 秒間隔で 530 秒間の模擬微動記録のうち、定常状態とみなせる 450 秒間に対して、 163.84 秒間のタイムウィンドウを 40.96 秒ずつずらしながら 7 サンプル抽出した。各サンプルに対して波形処理を施した後、アンサンプル平均して位相速度を求めた。なお、空間自己相関係数に対してはバンド幅 0.05Hz の Partzen Window による平滑化を行った。

空間自己相関係数を求める 2 地点 (アレイ長は 1600m 、 800m 、 400m 、 200m) の中点を $X=42\text{km}$ とした場合を基本として、アレイ配置を x 軸方向に移動させ、方位別に位相速度を求めた。図 6 には、基盤段差から x 軸方向に最も離れたアレイ ($X=41.2\text{km}$ 、 42.8km) と基盤段差から x 軸方向に 400m 離れたアレイ ($X=41.6\text{km}$ 、 42.4km) よりそれぞれ求めた位相速度を各アレイ中心直下の地盤構造に対応する理論位相速度と重ねて示した。図 6 より、SPAC 法による位相速度は基盤段差からの距離とともに変化し、離れたアレイほど理論位相速度と対応していることがわかる。

次いで、空間自己相関係数を求める 2 点を、アレイ長別に x 方向に 200m ずつ平行移動させ位相速度を求めた。図 7 に一例としてアレイ長 200m 、 400m の場合の位相速度の x 方向の変化を示す。図 7 より、位相速度は段差の周辺で緩やかに変化しており、基盤段差を境に急変していないことが確認できる。また、アレイ直下に基盤段差がない場合でも直下の地盤構造の理論位相速度に対応しない地点 (図 7 (1d), (2c) (2d)) が確認できる。これより、位相速度はアレイ直下の地盤の影響のみではなく周辺地盤の影響を受けると考えられる。

SPAC 法による位相速度が基盤深さ 450m (A) の地盤構造の理論位相速度に対応する地点 (グラフの背景を薄赤で示す)、または基盤深さ 1350m (C) の地盤構造の理論位相速度と対応する地点 (同、薄青で示す) では、理論位相速度に対するアレイ直下の地盤構造がアレイの中心から波長の最小値に相当する範囲内の大部分またはすべてを占めている。また図 7 (1d), (2d) など最小波長範囲内に A と C の地盤が同程度の割合で混在する場合には、位相速度は A と C の各理論位相速度の間にプロットされる。これより不整形地盤上の位相速度は最小波長範囲内の地盤構造と関係するものと考えられる。

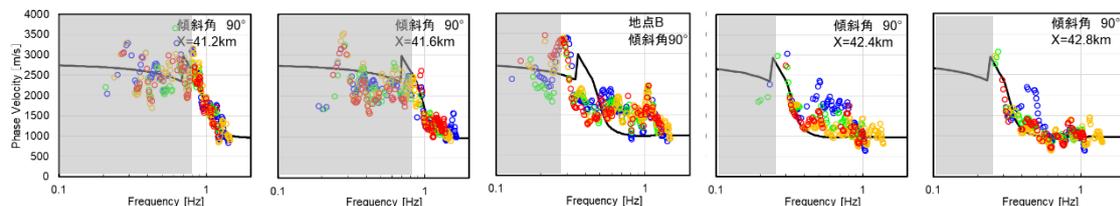


図 6 位相速度の x 軸方向の変化

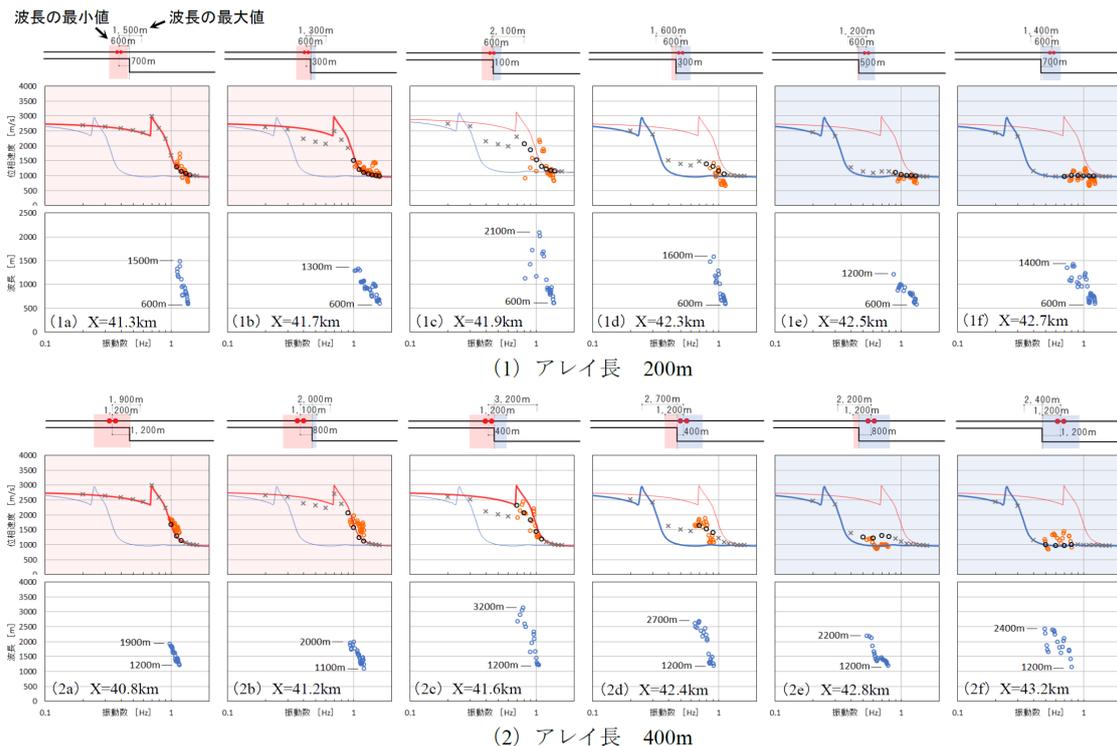


図 7 アレイ長別に x 軸方向に移動した場合の位相速度の変化

以上より、既知の地盤構造において微動の観測点及び相互相関を求める2点の距離に対する周辺地盤の影響範囲を模擬微動に基づいて検討することが可能であることが分かった。今後、周辺地盤の影響範囲を考慮した位相速度に基づく地下構造推定、さらに表層地盤のモデル化手法の高度化について検討を進める予定である。

(3) 表層地盤モデル可視化システムの構築

本研究課題で開発した可視化システムは、表層地盤構造モデルを PC 画面上で 3 次元表示し、専門家向けには表層地盤構造モデルのデータ妥当性の確認を行うとともに、一般市民向けには居住地域の土地利用と表層地盤構造の関係を通じた防災対策意識の向上をはかるためのものである。そのために必要な要件として、手軽に利用できること、直観的な理解が可能であること、表示視点や表示内容を柔軟に変更できることの3点を重視して開発を行った。

表層地盤構造モデルを格納したデータベースは Web サーバ上に格納されており、後述の表示ソフトウェア（クライアントサイド）は、Web サーバからデータを逐次取得する。取得されたデータは表示ソフトウェア内で東西 10m×南北 10m の四角柱形状のオブジェクトに集約され、それぞれが高さ方向に 1メートル解像度の属性値として地盤種別または N 値の値を持ち、これに応じた色分けがなされる。このオブジェクトを東西南北に 50 個四方（500m メッシュ相当の領域）で展開したものが、表示ソフトウェアの基本画面となる。表示ソフトウェアは Unity3D の SDK を用いている。この SDK は 3D コンテンツを中心にエンターテインメント分野において現在主流の一つであり、マルチプラットフォームに対応した実行ファイルが生成できることが開発上の利点である。本研究課題で開発した可視化システムは Web 上で動作する WebGL としてコンパイルされているため、利用に当たってソフトウェアのインストールは不要である。

表示ソフトウェアの利用イメージは次の通りである。まず名古屋市全域の地図をクリックして閲覧したい地点を選ぶ。データのダウンロードおよびオブジェクト構築が終了すると、3D の表層地盤構造モデルが表示され、属性値ごとに塗り分けがなされる（図 8）。このモデルは拡大縮小のほか、回転、移動が可能であり任意の方向から確認ができるほか、東西および南北の断面を自由に設定し、任意断面を確認することができる。さらに、地表の標高値を反映してより実際の地形に近い表現にしたり、地表面に旧版地形図や航空写真を表示して地形の改変を確認したりするなど、防災啓発向けの機能を搭載した（図 9）。表示ソフトウェアは Web ブラウザに URL を入力することで誰でも利用できることを想定しており、2020 年度からは防災啓発施設等において一般公開していく予定である。

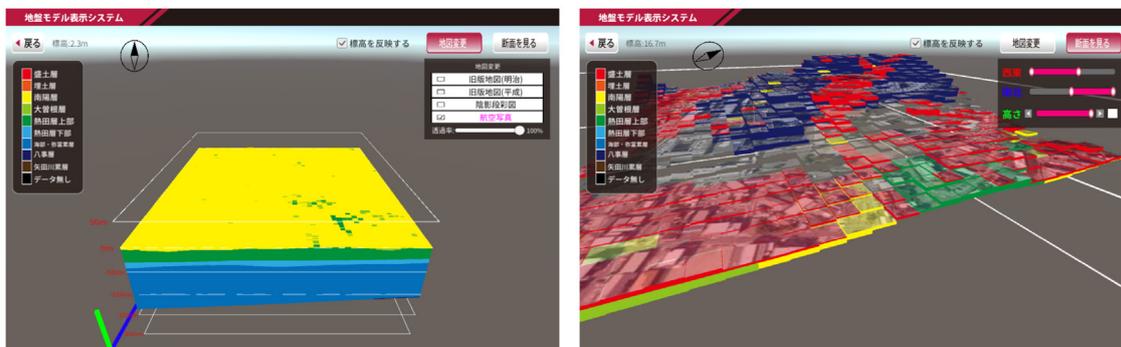


図 8 3D 表示ソフトウェア上に展開された表層地盤構造モデル 図 9 表層地盤構造モデルに航空写真を重ね、標高に応じて地形を表現した例

<引用文献>

- Vasconcelos, I. and R. Snieder : Interferometry by deconvolution, Part 1— Theory for acoustic waves and numerical examples, *Geophysics*, Vol.73, No.3, pp.S115-S128, 2008.
- Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J. : Multi-channel analysis of surface waves, *Geophysics*, Vol.64, No.3, pp.800-808, 1999
- 上林宏敏, 長 郁夫, 大堀道広, 永野正行, 新井 洋 : 微動アレイ解析ベンチマークテスト その 1 全波動場における見かけ位相速度, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, B2, pp.337-338, 2017
- 横井 俊明, Sos Margaryan : 地震波干渉法理論に基づく SPAC 法の再検討, *物理探査*, 第 61 巻, 第 2 号, pp.87-99, 2008.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 平井 敬、高橋 広人、護 雅史、鈴木 晴彦 |
| 2. 発表標題 道路交通振動を利用した地震波干渉法による地下構造探査の試み |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 高橋 広人、石川 舞花、佐藤 玲菜 |
| 2. 発表標題 模擬微動記録に基づく地盤震動特性と不整形地盤との対応に関する研究 その1 位相速度とH/Vスペクトルの空間変動 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石川 舞花、高橋 広人、佐藤 玲菜 |
| 2. 発表標題 模擬微動記録に基づく地盤震動特性と不整形地盤との対応に関する研究 その2 不整形地盤における位相速度合成の試み |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 平井 敬、高橋 広人、護 雅史 |
| 2. 発表標題 交通振動を利用した地震波干渉法による地下構造探査の試み その1 列車走行振動の利用に関する検討 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高橋 広人、平井 敬、護 雅史 |
| 2. 発表標題 交通振動を利用した地震波干渉法による地下構造探査の試み その2 自動車走行振動の利用に関する検討 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 高橋 広人、平井 敬、護 雅史 |
| 2. 発表標題 地下構造推定を目的とした地震波干渉法による地下鉄振動の分析 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 高橋 広人 |
| 2. 発表標題 名古屋市域における表層地盤のモデル化と強震動予測 |
| 3. 学会等名 日本建築学会 第45回地盤震動シンポジウム |
| 4. 発表年 2017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 | 平井 敬 (Hirai Takashi) (00708373) | 名古屋大学・環境学研究科・助教 (13901) | |

6. 研究組織（つづき）

| | 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 | 倉田 和己 (Kurata Kazumi) (50579604) | 名古屋大学・減災連携研究センター・特任准教授 (13901) | |
| 研究分担者 | 飛田 潤 (Tobita Jun) (90217521) | 名古屋大学・災害対策室・教授 (13901) | |