

令和 2 年 4 月 17 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K12999

研究課題名(和文) 拡散波動場理論に基づく地盤構造同定

研究課題名(英文) ground structure identification based on diffuse field concept

研究代表者

長嶋 史明(nagashima, fumiaki)

京都大学・防災研究所・特定助教

研究者番号：70793537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、日本国内の観測記録に基づき実証された地震動の拡散波動場理論に基づく地盤構造同定手法をFranceのGrenobleやItalyのAmatriceに対して適用し、本手法がテクトニックな環境が日本と異なる海外の地盤に対しても適応でき先験情報が少なくとも高精度の地盤構造同定が可能であることを示した。本手法において重要なパラメータであるS波速度とP波速度に関して深さや密度も合わせてそれらの関係を日本の膨大なボーリング調査記録に基づき調べ、新たな回帰式を提案した。また、2016年Amatrice地震の強震動予測や建物被害予測を行い本手法の実務上での有用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、地震動の拡散波動場理論に基づく地盤構造同定手法が先験情報のない地域でも有効であり、地震観測記録から推定される地盤増幅特性を再現する地盤構造を高精度で同定できることが示された。発展途上国などの経済的や技術的な理由から地盤調査がまだまだ十分でない地域でも高精度な地盤構造同定や強震動予測については建物被害予測が可能であり、ハザードマップ作成などの防災計画策定に寄与するものと考えられる。また、既往研究で報告のないP波速度の遅い範囲でのS波速度とP波速度の関係などを日本の膨大なボーリング調査記録に基づき調査できたことは学術的にも意義は大きく、今後の地盤調査にも寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate the applicability of the subsurface structure identification method based on the diffuse field concept for earthquake, which was substantiated by using earthquake records in Japan, to the subsurface structure with the different tectonic environment from Japan, we applied the method to the earthquake records in Grenoble, France, and Amatrice, Italy, and showed that the method could identify the subsurface structure without a priori information. We investigated the relationship between S-wave velocity, P-wave velocity, density and depth based on a large amount of the boring survey data in Japan, and supposed new conversion formulae of P-wave velocity. We estimated the strong motions and the building damage at Amatrice during 2016 Amatrice earthquake, and showed the usefulness of the method in practice.

研究分野：地盤構造

キーワード：拡散波動場理論 地盤構造同定 強震動予測 被害予測

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地震防災を考える上で高精度の強震動予測や被害予測は重要な役割を果たし、地震動予測に大きな影響を及ぼし局地的に変化する浅部地盤構造のサイト増幅特性を推定することは予測精度を向上させひいては適切な防災計画の策定へとつながると考えられる。我々は浅部地盤構造およびサイト増幅特性を推定するために、日本国内で得られたデータをもとに地震動の拡散波動場理論 (Kawase et al., 2011) に基づく推定法を構築・実証してきた (Nagashima et al., 2014)。本手法は観測地震動の水平上下スペクトル比 (EHVR) を地震基盤以錢のサイト増幅特性の水平上下比として解釈し、観測記録から比としてではあるが増幅特性を直接的に推定できる手法である。EHVR のピークや谷の振動数のみでなく全体の形状を用いて同定結果を拘束できるので、観測 EHVR 上に表れている増幅特性をよく再現するものを直接的に得ることができる。また、広い周波数帯のデータを用いて同定結果を拘束することができるので、深い地盤から浅い地盤まで地震基盤以錢の構造を同定することができる。日本のように先験情報となる多数の地盤調査記録のない海外においても、地震動を観測することができれば、本手法の高い拘束力により観測 EHVR から推定される増幅特性を先験情報なしで推定できると期待される。そこで、日本とは地盤環境・地震発生環境 (テクトニック環境) の異なる諸外国での本手法の適用可能性を証明しまた適用限界を把握することで、いまだ地震ハザードマップなどの災害対策策定に必要な資料が不十分な地域において、技術的および経済的な事情などによりボーリング調査などの地盤調査が行われていなくとも、高い精度で地盤構造や増幅特性を推定することが期待され、実際に適用してそれを検証する必要がある。

2. 研究の目的

- 1) 日本の地震記録に基づき構築した地盤構造同定手法を海外の地震記録へ適用しその適用可能性を検証する。近年イタリアやフランスなどのヨーロッパで観測された地震動を収集・公開する強震観測網 (Engineering Strong Motion database, ESM) が整備され一般での利用が可能となっており、そのデータベースを活用して地震動記録を取得して当該手法を適用する。
- 2) 先験情報のない地域でも地盤震動特性を説明できる地盤構造を同定できることを示す。ESM では地震動記録のほかに表面波探査などにより求めた地盤構造が存在すれば公開されているが浅い地盤構造のデータしか存在しない。地盤の増幅特性には浅部地盤構造のみでなく深部地盤構造も大いに影響し、この浅部地盤の先験情報だけでは増幅特性を十分に再現することはできない。よって当該手法を用いて広い周波数帯の EHVR を対象として同定し地震基盤以錢の地盤構造を同定できることを示す。
- 3) 地盤構造および増幅特性の推定の目的は強震動予測および被害予測を実施して防災計画の策定に役立てることである。よって同定した構造を用いてヨーロッパで発生した地震を用いて強震動予測および被害予測を行い観測被害率を再現できるかどうか検討する。

3. 研究の方法

- 1) 拡散波動場理論では EHVR を増幅特性の水平上下比として解釈しているため、既往研究で主に探査され水平方向の増幅特性に関連する S 波速度 (V_s) のみでなく上下方向の増幅特性に関連する P 波速度 (V_p) も重要なパラメータとなる。多くの既往研究では V_p は固定値か V_s から換算され同定変数として考えられていない。そこで、日本全国に敷設されている K-NET や KiK-net で行われたボーリング調査結果を用いて $V_s \cdot V_p \cdot$ 密度・深さの分布や関係を調べ、それらのばらつきも考慮した関係式を求めるとする。
- 2) ESM から France の Grenoble 盆地で観測された地震動を取得し、EHVR を求めた後に地盤構造同定手法を適用し EHVR をよく再現する地盤構造を同定する。Grenoble 盆地では地盤構造探査に関していくつか既往研究があり、また現在も Alp 大学の研究者らが精力的に調査を行っているため、それらの研究結果と合わせて同定結果の妥当性を検討する。
- 3) 2016 年に Italy の Amatrice で大きな被害をとまなう地震が発生し、その後臨時余震観測点が Amatrice の台地上に設置された。そこで得られた観測記録を用いて地震基盤以錢の地盤構造を同定し先験情報がない場合の手法の適用可能性を検討する。
- 4) 2016 年の Amatrice 地震では、Amatrice の台地上の大被害が発生した地域の外に設置されていた常設観測点で地震記録が得られており、被害発生域内での本震記録は存在しない。よって 2) で求めた地盤構造を用いて本震時の強震動予測を行い、予測波を用いた建物被害予測を行って本震地震動の建物破壊能や Amatrice に建っていた被害住宅の耐震性能に関して検討を行う。

4. 研究成果

- 1) K-NET や KiK-net で実施されたボーリング調査結果をもとに、 V_s と V_p の関係や $V_s \cdot V_p$ の深さ分布、密度との関係を求めた。 V_s - V_p 間では V_s の遅い領域で V_p が 500m/s と 1500m/s に集中する結果が得られた。 $V_s \cdot V_p$ の深さ分布ではおよそ深さ 4m 以浅で V_p が 500m/s に集中しそれ以深では 1500m/s になる傾向がみられ、K-NET の地下水位を調べたところ 4m から 5m に位置している事例が最も多かったことから、この V_p の 2 つの集合は地盤が地下水で飽和しているか否かに関連があることが分かった。よってデータセットを深さ 4m を境

に2つに分け、 V_s から平均 V_p と標準偏差を求める回帰式を作成した(図1)。既往の V_s から V_p を換算する式では $V_p > 1500\text{m/s}$ の飽和土しか考慮されておらず、深さ 4m 以深の回帰式は既往の式とよく対応する。本研究で求めた式を用いれば不飽和土の場合でも観測記録に基づいた換算式を適用することが可能となる。

地下水位より深い地盤は飽和土となり V_p は 1500m/s 以上になると考えられる。よって、実際のデータの分布を考慮し、 $V_p = 1200\text{m/s}$ を境としてデータを分けそれぞれの V_s - V_p 換算式も求めた(図2)。 $V_s > 1200\text{m/s}$ の換算式は深さ 4m 以深や既往の式と同様のものとなった。K-NETのみ密度が公開されているので、深さ 20m までの浅部構造に関してではあるものの密度と V_s や V_p の相関を調べたところ、 V_s -密度関係は密度の平均が既往の換算式と同程度となり、 V_p -密度関係も既往研究では考慮されていなかった $V_p < 1500\text{m/s}$ も含めて V_p の増加に対し密度が単調増加する傾向がみられた。

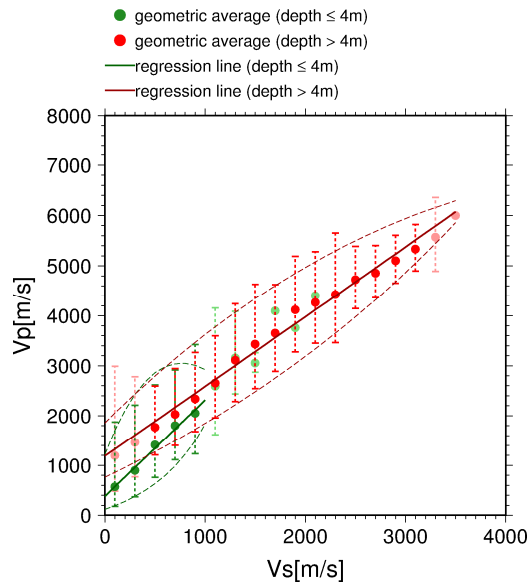


図1 深さ 4m を閾値とした V_p 回帰直線

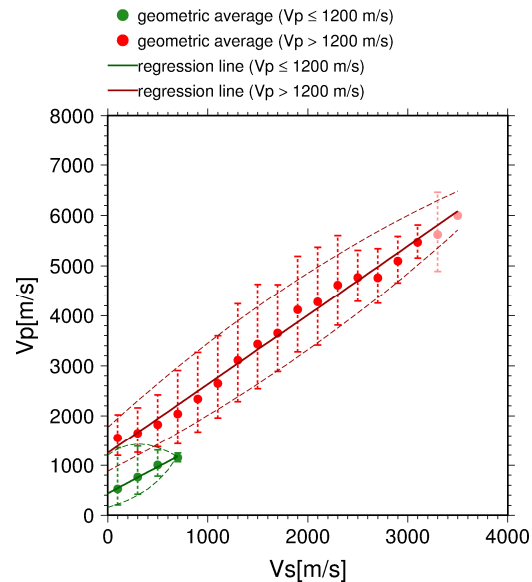


図2 $V_p = 1200\text{m/s}$ を閾値とした V_p 回帰直線

- 2) Grenoble 盆地内外の複数の観測点で得られた地震動を ESM からダウンロードし観測 EHVR を求めた。観測 EHVR のピーク振動数分布と既往研究で推定された盆地構造 (Philippe et al., 2007) は対応しており、EHVR と地盤構造の相関が示唆される。その観測 EHVR を拡散波動場理論に基づき再現する地盤構造を同定した。図3に Grenoble 盆地中央の観測点の OGDH での例を示す。EHVR をよく再現する地盤構造を同定できている。Fabrice et al., (2017)はフランスの地震動観測点で微動探査を行い、微動探査より得られた位相速度を再現する地盤構造を推定している。彼らの同定構造と比較して我々の同定構造は彼らと比較的近いものが得られているが、我々の同定構造から求めた位相速度は彼らの位相速度とややずれがあり、一方で彼らの同定構造から求めた理論 EHVR は観測 EHVR と一致しなかった。この EHVR と位相速度の双方向にみられる差の一因として用いた観測記録の違いが考えられ、EHVR を計算に用いた地震動は主に実体波を含むが位相速度には表面波を多く含む微動が用いられ、それぞれの波動場が反映する地盤構造の特性が異なるためこのような差が生じたものと考えられる。以上、既往研究と位相速度や EHVR の観点では差がみられるものの既往研究と近似した地盤構造を同定できた。

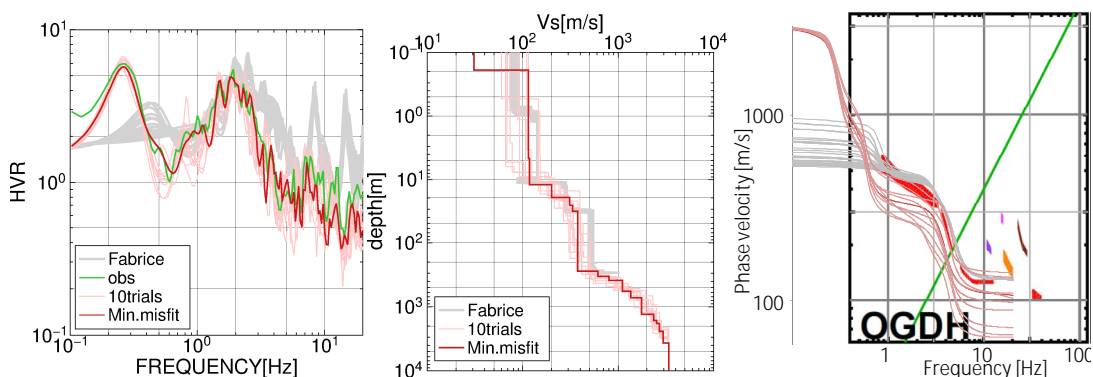


図3 Grenoble での同定結果と Fabrice et al. (2017) との比較

3) 2016/08/24 に発生した Amatrice 地震以降に大被害が生じた Amatrice 台地や周辺などのイタリア中部地域に臨時余震観測点網が設置され、その余震記録が ESM で公開されているので、この余震記録を用いて Amatrice 台地上での地盤構造を拡散波動場理論に基づいて推定する。各観測点で EHVR を計算し Grenoble と同じ手法で同定を行い、観測 EHVR をよく再現する地盤構造が得られた。

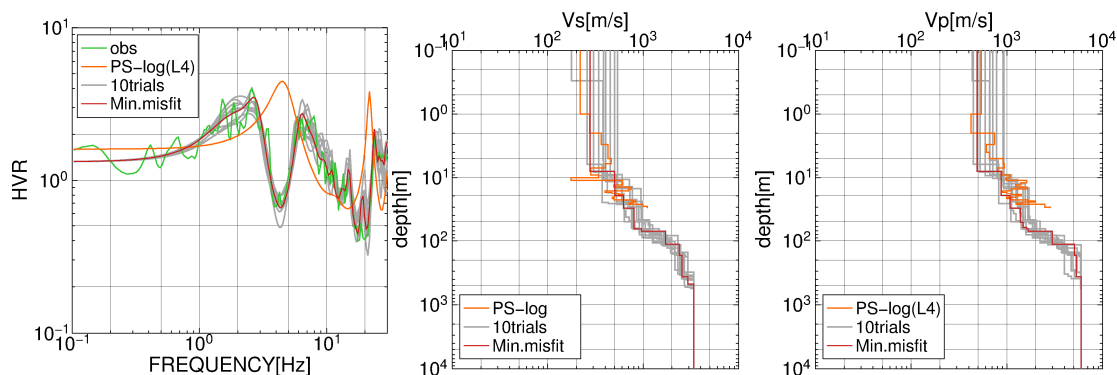


図 4 Amatrice での同定結果と PS 検層との比較

4) 3)で得られた地盤構造を用いて Amatrice 地震本震の強震動予測を行った。2016/10/30 にも Amatrice 近傍で大きな地震が発生しており、その地震では台地上の余震観測点でも地震動が記録されているので、その地震動を用いて地盤構造等パラメータの妥当性を検証した。本震時の地震動が記録された台地外の観測点 (AMT) で観測された 10/30 の地震動から同定構造を用いて表層地盤の影響をはぎ取って地震基盤レベルでの地震動を予測し、台地上の観測点での同定構造を用いて地表での地震動を予測し観測記録と比較した。予測は等価線形解析 (DYNEQ) によって行い、ボーリング調査記録を参考に砂地盤の動的変形特性を表層 10m ほどに適用した。図 5 に示す予測波形は観測波形とよく一致し、用いたパラメータの妥当性を確認できた。

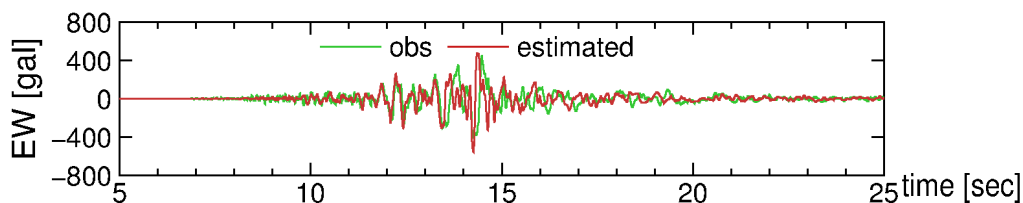


図 5 2016/10/30 の Amatrice 台地上での予測波形と観測記録との比較

同手法とパラメータで 08/24 の本震時の台地上での地震動を予測した。なお余震観測点は被害建物の倒壊の危険性等の理由から大被害の生じた歴史的地区には設置できず、そこから少し離れた場所に設置されており、臨時余震観測点と大被害発生地域には多少の差があるものと考えられる。予測の最大有効ひずみは 0.1% と等価線形解析の適用範囲内であり、予測波の PGA は 700gal 弱となった。

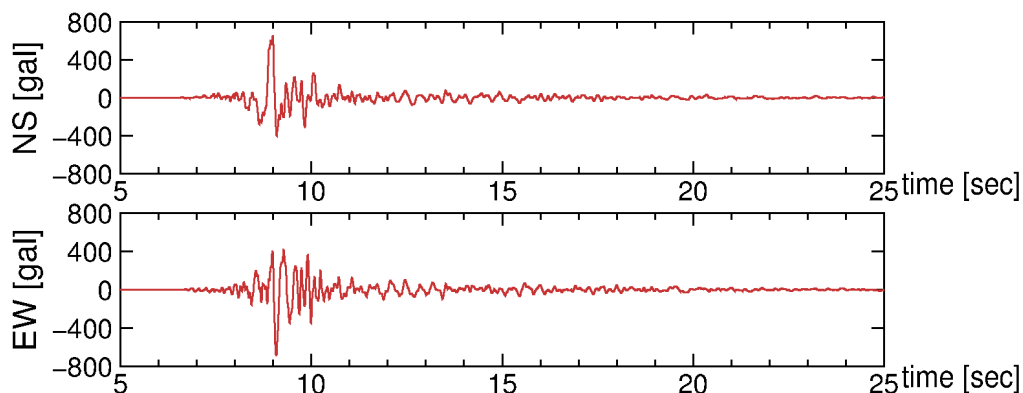


図 6 2016/08/24 の Amatrice 台地上での予測波形

最後に、本震時の予測波を用いて建物被害予測を行った。被害予測モデルには建物種別や建物の性能のばらつきを考慮して被害率を計算する長戸・川瀬モデルの使用する。Amatrice に多く存在した組積造と特性の近い RC 造の Trilinear 型特性を基準とし、耐力を基準モデルの 1 倍から 0.1 倍まで変化させながら被害予測を行った。長戸・川瀬モデルの RC 造建物は層間変形角が 1/30 を超える大破し被害が生じると仮定しており、その破壊クライテリアでは耐力を

0.1 倍にまで低下させても被害率は 0.009 とかなり小さく、被害が発生しない結果となった。イタリアでのいくつかの組積造壁を用いた実験結果を参考に最大層間変形角が 1/100 を超えたケースで建物被害が生じるとすると、体力が 1 倍の場合は被害率は 0.08 であるが、0.5 倍の時は 0.5、0.3 倍で 0.83 となった。Gabriele et al. (2018)による被災地域の現地調査によると組積造建物の大破率はおよそ 0.67 であり、Amatrice の歴史的地域に存在した建物の耐力は日本の RC 造建物の破壊クライテリアを 1/100 としたときの 0.4 倍から 0.3 倍程度の耐力を持っていたことが分かった。

以上のように、大被害発生域外ではあるが予測された本震地震動の建物破壊能は日本の建物の耐震性能を基準に考えた場合は小さく、Amatrice の建物は日本の建物と比べてかなり弱かった可能性が高いことが分かった。今回の予測地点と実際の大被害発生域との間には多少の距離があり、大被害地域では微動観測等により地盤構造の推定が進められているので、今後はそれらの結果も踏まえながら被害を評価していく。

表 1 3 階建 RC 造建物の被害率 (NS 方向)

耐力	1 倍	0.5 倍	0.4 倍	0.3 倍	0.2 倍	0.1 倍
クライテリア 1/30	0	0	0	0	0.002	0.009
クライテリア 1/100	0.08	0.504	0.504	0.83	0.876	1

表 2 3 階建 RC 造建物の被害率 (EW 方向)

耐力	1 倍	0.5 倍	0.4 倍	0.3 倍	0.2 倍	0.1 倍
クライテリア 1/30	0	0	0	0	0	0.009
クライテリア 1/100	0	0	0	0	0	0.009

< 引用文献 >

- Kawase, H., F. J. Sánchez-Sesma and S. Matsushima (2011). The Optimal Use of Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of Earthquake Motions for Velocity Inversions Based on Diffuse-Field Theory for Plane Waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **101** 2001-2014.
- Nagashima, F., Matsushima S., Kawase H., Sánchez-Sesma FJ, Hayakawa T, Satoh T, and Oshima M. (2014). Application of horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratios of earthquake ground motions to identify subsurface structures at and around the K-NET site in Tohoku, Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **104** 2288-2302, doi: 10.1785/0120130219.
- Luzi L, Puglia R, Russo E & ORFEUS WG5 (2016). Engineering Strong Motion Database, version 1.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Observatories & Research Facilities for European Seismology. doi: 10.13127/ESM
- National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (2019). NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi:10.17598/NIED.0004
- Gueguen, P., Cornou, C., Garambois, S. and Banton, J. (2007). On the Limitation of the H/V Spectral Ratio Using Seismic Noise as an Exploration Tool: Application to the Grenoble Valley (France), a Small Apex Ratio Basin. *Pure appl. geophys.* **164**, 115-134. <https://doi.org/10.1007/s00024-006-0151-x>
- 吉田望(2008). DYNEQ A computer program for DYNAMIC response analysis of level ground by EQUIVALENT linear method, 東北学院大学工学部, <http://boh0709.ld.infoseek.co.jp/>
- 長戸健一郎、川瀬博(2001). 建物被害データと再現強震動による RC 造建物群の被害予測モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第 544 号, 31-37.
- Fiorentino, G., Forte, A., Pagano, E., Sabetta, F., Baggio, C., Lavorato, D., Nuti, C. and Santini, S. (2018). Damage patterns in the town of Amatrice after August 24th 2016 Central Italy earthquakes. *Bull Earthquake Eng* **16**, 1399-1423. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0254-z>

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 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 長嶋史明、川瀬博、松島信一	4. 巻 64B
2. 論文標題 地震動水平上下スペクトル比及び地表地中スペクトル比を用いた地盤構造同定	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 613-620
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 長嶋 史明, 川瀬 博	4. 巻 72
2. 論文標題 K-NET・KiK-netのPS検層記録に基づくVs・Vpおよび深さの関係	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 物理探査	6. 最初と最後の頁 78-100
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.3124/segj.72.78	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Fumiaki Nagashima and Hiroshi Kawase
2. 発表標題 S-wave and P-wave velocity structure identification based on Horizontal to Vertical spectral ratio and Surface to Borehole spectral ratio of earthquake
3. 学会等名 European Seismological Commission (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nagashima, Fumiaki and Kawase, Hiroshi
2. 発表標題 Subsurface structure identification based on H/V ratio and surface to borehole ratio
3. 学会等名 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長嶋史明, 川瀬博
2. 発表標題 地震動の拡散波動場理論に基づく地震基盤入射波の推定とその適用限界
3. 学会等名 日本地震工学会大会
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----