

単点微動計測と遺伝的アルゴリズムを用いた ボーリング調査地点におけるせん断波速度構造の評価 ～2016年熊本地震で被災した益城町を例として～

Evaluation of depth distribution of shear wave velocity at original sites for SPT test
in central Mashiki Town, Kumamoto Prefecture, Japan,
based on microtremor measurement and genetic algorithm

○秦吉弥¹
Yoshiya HATA¹

¹大阪大学 大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka University

At an SPT site, since only distribution of N-value is obtained, profile of shear wave velocity including many errors is estimated based on the empirical relationships. On the other hand, calculation of the theoretical H/V spectrum for microtremor based on 1-D profile of shear wave velocity is possible without difficulty. In this paper, evaluation method for distribution of shear wave velocity at original sites for SPT test is proposed based on single-site measurement for microtremor and genetic algorithm. I applied the proposal procedure to some boring sites in central Mashiki Town, Kumamoto Prefecture, Japan. As a result, distribution of shear wave velocity based on the proposal procedure was agree well with actual results of PS logging test, indicating application for the proposal procedure.

Keywords: Microtremor measurement, H/V spectrum, Shear wave velocity, Genetic algorithm, Central Mashiki Town

1. はじめに

大規模地震による強震動の作用によって被災した地域(いわゆる被災地)では、被災メカニズムの解明¹⁾や被災地の復旧・復興などを目的としたボーリングを伴う地盤調査がしばしば行われる。図-1に示すように、ボーリング調査として一般的な標準貫入試験の実施により、工学的基盤以浅の土層構成やN値分布などが明らかとなる。一方で、被災メカニズムの解明において有効なツールの一つである地盤地震応答解析²⁾ではせん断剛性の設定が必要不可欠であり、ボーリング調査の内容にPS検層が含まれる場合には得られたせん断波速度の値を転用することが可能となるが、PS検層が含まれない場合にはN値とせん断波速度に関する各種経験式³⁾に基づいて土層ごとにせん断波速度を推定するのが一般的である。さらに、一般に公開されている既存のボーリング調査結果^{4),5)}においてもPS検層が含まれていない地点が大多数を占めているのが現状である。一般的にせん断波速度はN値との間に相関関係を有するものの、バラツキが非常に大きいことが知られている⁶⁾。地盤地震応答解析において一定の推定精度を確保するためには、入力パラメータを精度良く設定する必要⁷⁾があり、その中でもせん断剛性(せん断波速度)は非常に重要なパラメータの一つである。

工学的基盤以浅の表層地盤におけるせん断波速度を評価する手法としては、表面波探査⁸⁾・微動アレイ探査⁹⁾・単点微動計測¹⁰⁾などが挙げられるが、本稿では、単点微動計測を利用する方法(以後、提案手法と呼ぶ)¹¹⁾を取り上げる。この方法は、図-1に示すように、対象サイト(ボーリング調査地点など)において単点微動計測を行うことで得られるH/Vスペクトル(計測)に対して、土層構成やN値分布から得られる理論H/Vスペクトル(レイリー波基本モードの楕円軌道の縦横比)¹²⁾を初期解群とし

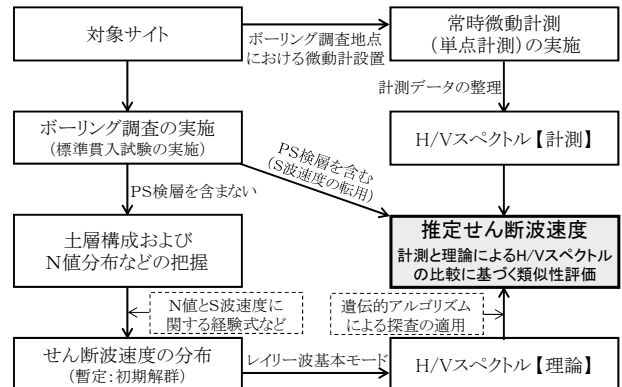


図-1 せん断波速度推定手法に関するフロー

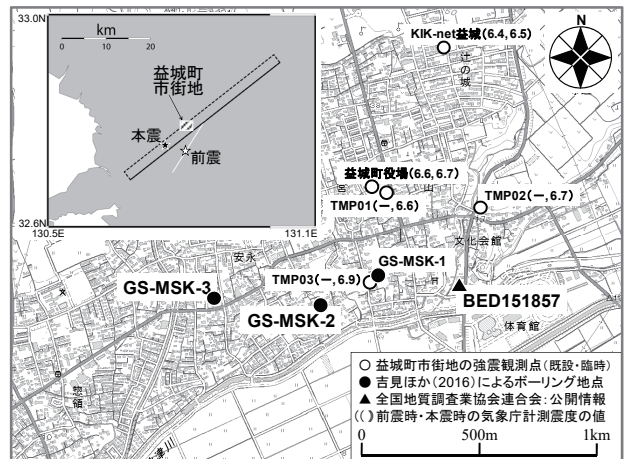


図-2 益城町のボーリング調査地点と震度観測点の分布

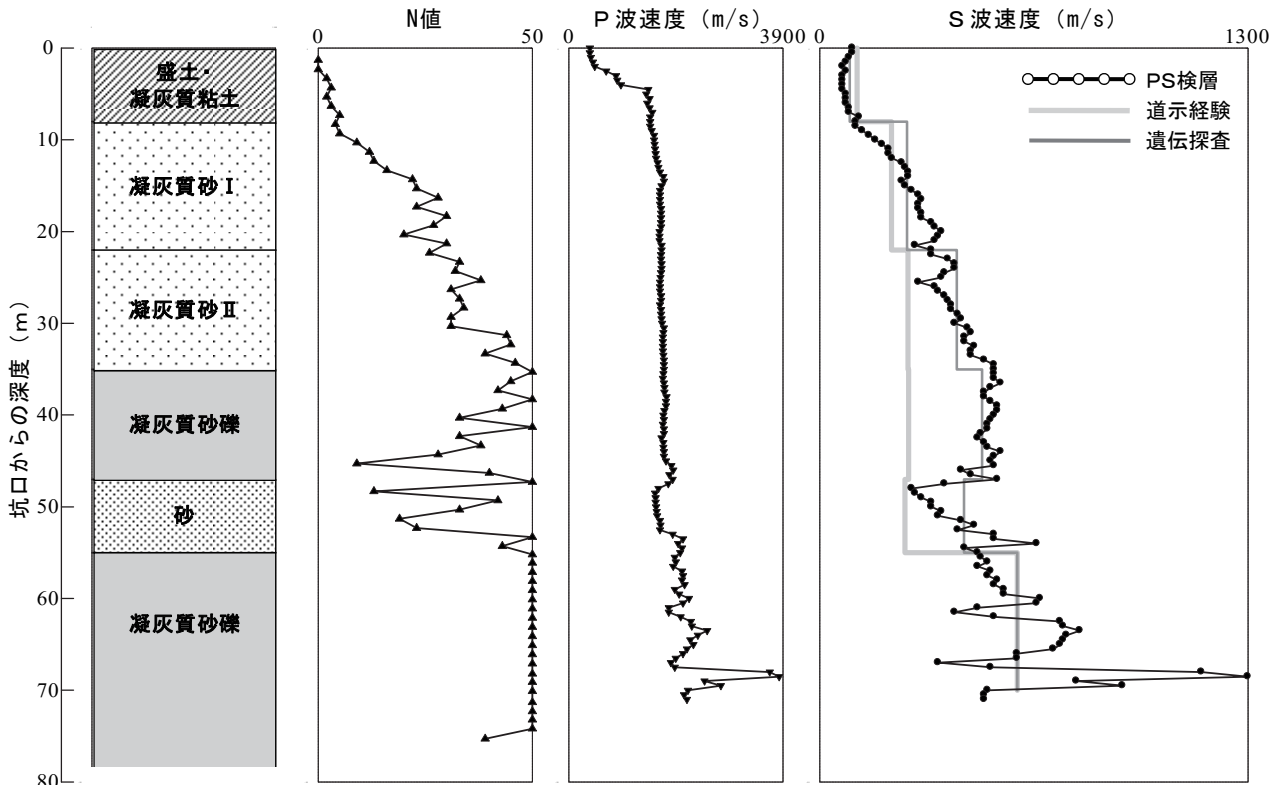


図-3 ボーリング調査地点でのN値・P波速度・S波速度に関する深度分布と、提案手法によるS波速度の評価(GS-MSK-2)

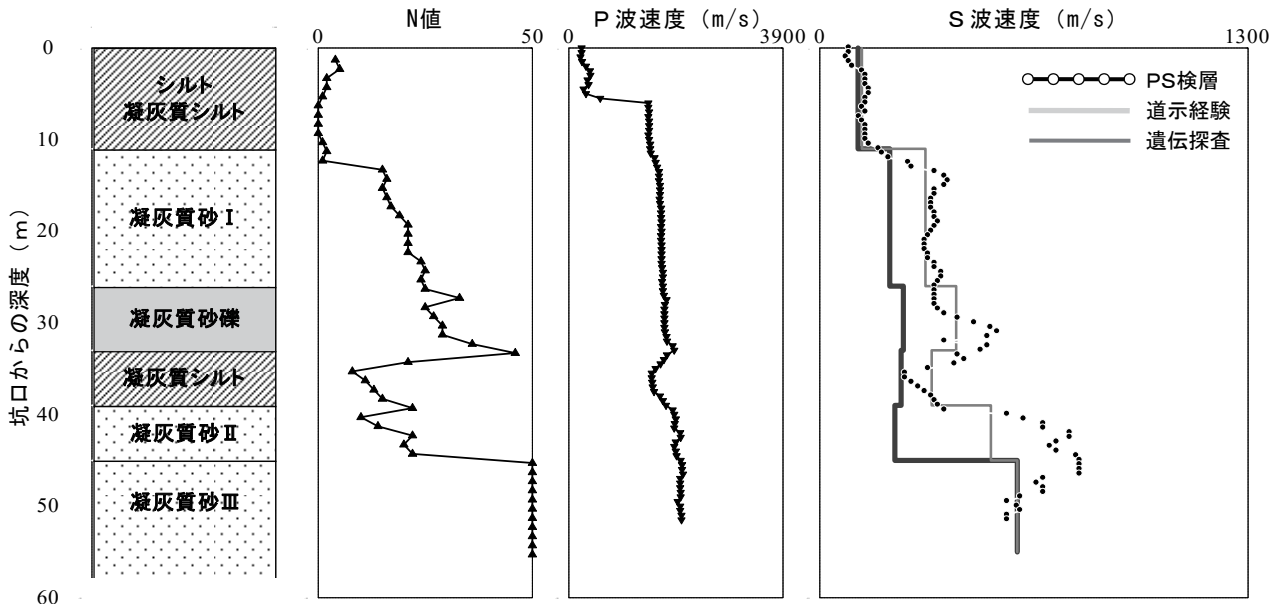


図-4 ボーリング調査地点でのN値・P波速度・S波速度に関する深度分布と、提案手法によるS波速度の評価(GS-MSK-3)

て遺伝的アルゴリズム¹³⁾を適用し、H/Vスペクトル(計測)との整合性が比較的高い理論H/Vスペクトルを探索し、そのH/Vスペクトルが探索された際のせん断波速度に関する深度分布を評価することを目的としている。本稿では、この提案手法を、2016年熊本地震による一連の強震動の作用によって甚大な被害が発生した益城町の市街地(図-2参照)におけるボーリング調査地点^{5),14),15)}に適用し、せん断波速度を評価した結果を紹介する。

2. 遺伝的アルゴリズムに基づく手法の適用性

吉見ほか^{14),15)}は、2016年熊本地震後に益城町の市街地の三地点(GS-MSK-1, -2, -3: 図-2参照)においてボーリング調査(PS検層を含む)を実施している。図-3および図-4

は本稿において対象サイトとするGS-MSK-2およびGS-MSK-3での調査結果である。GS-MSK-1での調査結果は別稿¹⁶⁾を参照されたい。図-5および図-6は、GS-MSK-2およびGS-MSK-3における常時微動計測に基づくH/Vスペクトル¹⁰⁾である。図-5(a)および図-6(a)に示すように、PS検層結果に基づく理論H/Vスペクトル¹²⁾と微動計測に基づくH/Vスペクトルが非常に良い一致を示しており、理論H/Vスペクトルの適用性が示唆される。

一方で、図-3および図-4に示すせん断波速度の深度分布には、PS検層の結果のほかに、道路橋示方書によるN値とせん断波速度の経験式³⁾に基づくせん断波速度についても同時に示しているが、両者の間には有意な差異が確認できる。この道示経験式によるせん断波速度に基づ

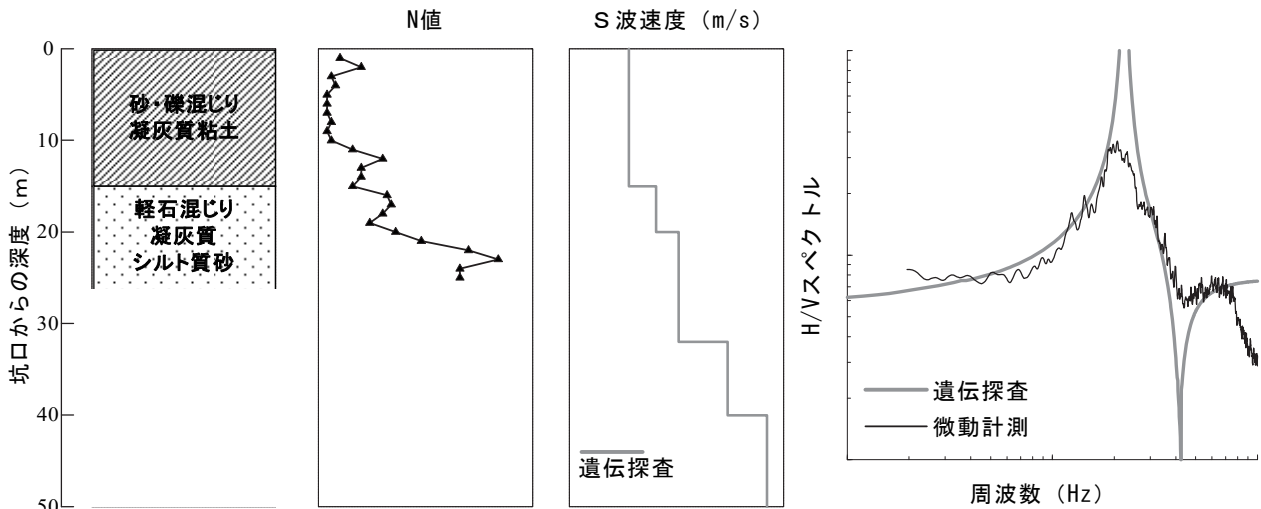
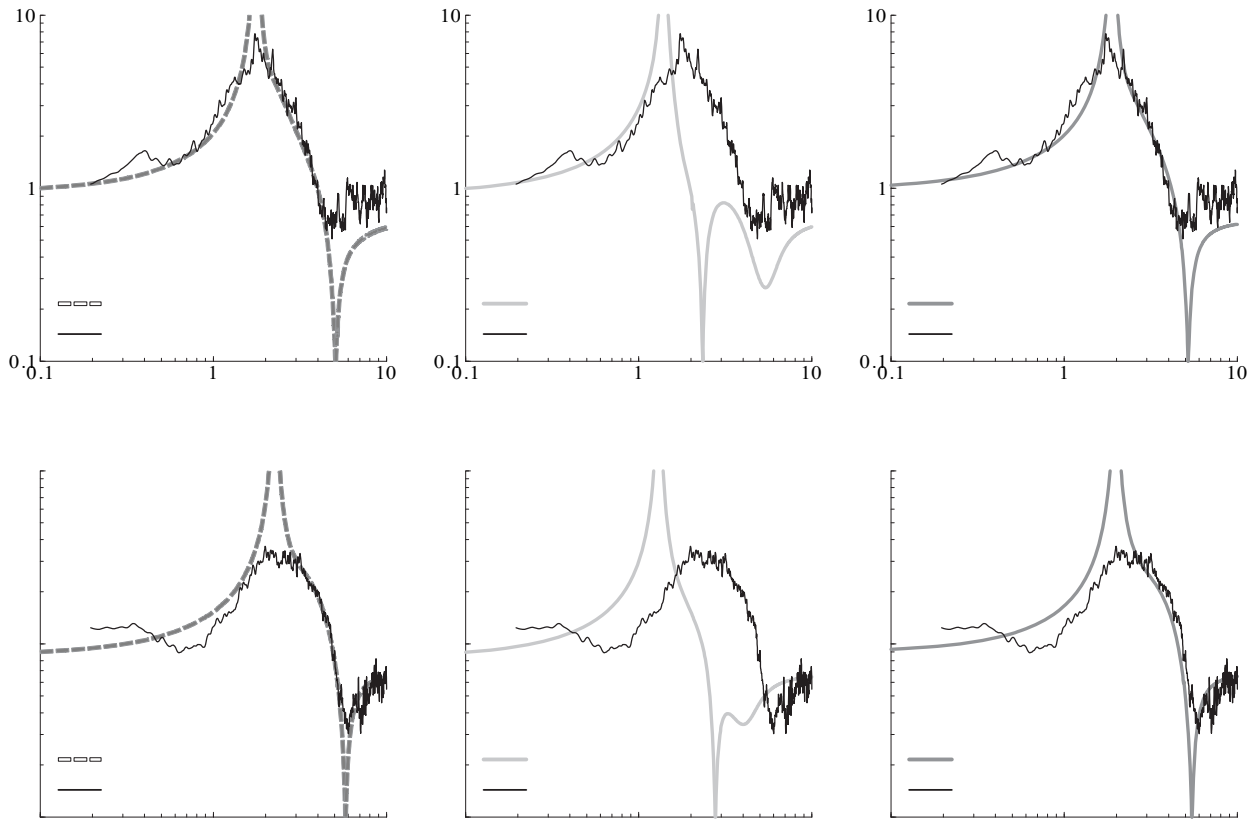


図-7 既存ボーリング地点(BED151857)における公開情報⁵⁾と、提案手法に基づく推定せん断波速度の分布

いて理論 H/V スペクトルを計算すると、図-5(b)および図-6(b)に示すように、微動計測に基づく H/V スペクトルに対して類似しているとは言い難い結果が得られた。

そこで、道示経験式に基づくせん断波速度分布とその理論 H/V スペクトルを初期解群として遺伝的アルゴリズム¹³⁾を適用し、微動計測に基づく H/V スペクトルに対する類似性が比較的高い理論 H/V スペクトルを、図-5(c)および図-6(c)に示すように探索した。その際、遺伝的アルゴリズムの適用諸元(試行回数、個体数、世代数など)は KiK-net 益城(図-2 参照)を対象とした先行研究¹³⁾を参考に設定し、各土層内のせん断波速度(ならびに密度や P 波速度)として同一の値をそれぞれ仮定した。図-3 および図-4 に示すように、両対象サイトともに、PS 検層結果に対して遺伝的アルゴリズムの適用により探索されたせん断

断速度の深度分布が良い一致を示しており、上述した提案手法の適用性を確認することができる。

3. 既存ボーリング公開地点への応用

1. で述べたとおり、一般公開されている既存のボーリング地点において標準貫入試験のほか PS 検層が実施していることは稀である。そこで本章では、益城町の市街地において唯一公開されている既存のボーリング地点(BED151857: 図-2 参照)⁵⁾を対象に、2. で適用性を確認した提案手法に基づいてせん断波速度の分布を推定した結果について報告する。図-7(左側)は、BED151857 の公開情報⁵⁾である土層構成と N 値の深度分布であるが、工学的基盤までの地盤情報が得られていない。そこで、

深度 25m 以浅は BED151857 での N 値に基づいた経験的なせん断波速度を採用，ならびに深度 25m 以深は近隣の GS-MSK-1 での PS 検層¹⁶⁾に基づいたせん断波速度を採用した複合型深度分布に対して理論 H/V スペクトルを計算し，これを初期解群として遺伝的アルゴリズム¹³⁾を 2. と同様の要領で適用した．その結果，図-7(右側)に示すように，BED151857 で単点計測された微動 H/V スペクトル¹⁰⁾に対して非常に良い一致を示す理論スペクトルが得られるせん断波速度分布を推定することができた．

4. まとめ

本稿では，土層構成と N 値からの経験的せん断波速度分布に基づく理論 H/V スペクトルを初期解群とした遺伝的アルゴリズムを，同地点において単点微動計測を行うことで得られる H/V スペクトルに対して適用することで，類似性が比較的高い理論 H/V スペクトルを探索し，その H/V スペクトルが探索された際のせん断波速度分布を評価する手法を提案した．そして，提案手法を熊本県益城町の市街地で実施された PS 検層地点に適用したところ，両者が比較的良好な一致を示した．さらに，得られた知見を踏まえ，PS 検層の非実施地点についても同様に提案手法を適用し，当該地点のせん断波速度分布を推定した．

今後は，本提案手法の適用実績(2016 年熊本地震および 2016 年鳥取県中部の地震による被災地)以外の地域¹⁷⁾を対象に同様の検討を行うことで，適用性を更に高めていきたいと考えている．

謝辞：常時微動計測の実施では，益城町の住民・関係者の皆様などにお世話になりました．湊文博氏・大川雄太郎氏・山内政輝氏(ともに大阪大学学生)には，常時微動の計測支援を仰いだ．本研究の成果を取り纏めるにあたって，後藤浩之准教授(京都大学)・吉見雅行主任研究員((国研)産業技術総合研究所)・池田隆明教授(長岡技術科学大学)・盛川仁教授(東京工業大学)・香川敬生教授(鳥取大学)から貴重なご助言をいただきました．また，本研究の遂行において，科学研究費補助金・若手研究 A [JP 15H05532]の一部を使用しました．本研究は，(公社)土木学会地震工学委員会地形に残された地震痕跡データの集約と活用に関する研究小委員会(委員長：小長井一男(横浜国立大学教授・東京大学名誉教授))，(公社)土木学会地震工学委員会断層帯近傍における地震動メカニズム検討小委員会(委員長：香川敬生(鳥取大学教授))，(公社)土木学会地震工学委員会 2016 年熊本地震による被害調査・分析小委員会(委員長：池田隆明(長岡技術科学大学教授))の活動の一環としてそれぞれ実施させていただきました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

- 1) 例えば，秦吉弥，野津厚：被害地震の揺れに迫る一地震波形デジタルデータ CD 付き一，大阪大学出版会，ISBN: 978-4-87259-565-9, 2016.
- 2) 例えば，吉田望：地盤の地震応答解析，鹿島出版会，ISBN: 978-4-30602-424-3, 2010.
- 3) 例えば，(公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説一V 耐震設計編，丸善出版(株)，2012.
- 4) 大井昌弘，藤原広行：地盤情報の統合化と提供一ジ

オ・ステーション一，地盤工学会誌，Vol.61, No.6, pp.8-11, 2013.

- 5) (一社)全国地質調査業協会連合会：平成 28 年(2016 年)熊本地震 復興支援ボーリング柱状図緊急公開サイト，地質情報整備活用機構ホームページ，2016. (最終閲覧日：2017 年 4 月 30 日)
- 6) 例えば，(社)地盤工学会：設計用地盤定数の決め方，丸善(株)，pp.185-225, 2007.
- 7) 例えば，秦吉弥，門田浩一，吉田武，常田賢一，一井康二，酒井久和：有効応力解析及び微動模擬解析に基づく造成宅地を対象とした被災に大きな影響を及ぼす地震動の周波数帯域と固有周波数の関係，地盤工学会誌，Vol.64, No.10, pp.10-13, 2016.
- 8) 例えば，釜井俊孝，土井一生：益城町における地盤構造探査：被害との関係，京都大学防災研究所斜面災害研究センターホームページ，2016. (最終閲覧日：2017 年 4 月 30 日)
- 9) 例えば，山田雅行，山田真澄，羽田浩二，藤野義範，Mori, J., 坂上啓：2016 年熊本地震における益城町での被害メカニズムの解明～地盤特性の影響～，第 36 回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会，Paper No.960, 2016.
- 10) 秦吉弥，湊文博，後藤浩之，吉見雅行，古川愛子，宮本崇，飯山かほり，野口竜也，盛川仁，池田隆明，香川敬生：熊本県益城町の造成宅地での高密度常時微動計測の広域実施による H/V スペクトルと地震被害の関係，物理探査，Vol.70, pp.35-41, 2017.
- 11) Hata, Y., Noguchi, T., Kagawa, T. and Yoshida, S.: Ground motion estimation in Shirakabe-Dozo Area, Kurayoshi City, Japan, damaged by the 2016 Mid Tottori Prefecture Earthquake based on the site-effect substitution method, *Earth Planets Space*, Vol.69, 2017.
- 12) Haskell, N. A.: The dispersion of surface waves on multi-layered media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 43, No.1, pp.17-34, 1953.
- 13) 後藤浩之，秦吉弥，吉見雅行，吉田望：KiK-net 益城サイトの非線形地盤応答特性，第 36 回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会，Paper No.903, 2016.
- 14) 吉見雅行，秦吉弥，後藤浩之，細矢卓志，森田祥子，徳丸哲義：熊本県益城町の 2016 年熊本地震被害集中域におけるボーリング調査結果(速報)，日本活断層学会 2016 年度秋季学術大会予稿集，Paper No.P17, 2016.
- 15) 吉見雅行，後藤浩之，秦吉弥，吉田望：益城町市街地の 2016 年熊本地震被害集中域における非線形地盤応答特性，平成 28 年度京都大学防災研究所研究発表講演会資料，Paper No.A05, 2017.
- 16) 秦吉弥，吉見雅行，後藤浩之，細矢卓志，盛川仁，香川敬生：常時微動 H/V スペクトルに基づく 2016 年熊本地震によって被災した益城町の市街地の軟弱地盤におけるせん断剛性の回復過程に関するモニタリング，地盤工学会誌，Vol.65, No.8, 2017. [掲載決定]
- 17) 例えば，Hashimoto, H., Hata, Y. and Kawamura, K.: Estimation of oil overflow due to sloshing from oil storage tanks subjected to a possible Nankai Trough earthquake in Osaka bay area, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol.44, 2016.