

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：82658

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05039

研究課題名（和文）高サンプリングのボアホール・データを利用した地震動増幅の時空間変動メカニズム解明

研究課題名（英文）Investigation on spatial-temporal variation mechanism of earthquake ground motion amplification using high-sampling borehole data

研究代表者

津野 靖士 (Tsunno, Seiji)

公益財団法人鉄道総合技術研究所・鉄道地震工学研究センター・主任研究員

研究者番号：50644738

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）：熊本駅観測点の高サンプリングの重錘落下と地震データから求めたP波速度に明らかな差が認められ、地震動の震央方向に対する地震動増幅と推定した不整形地盤との関係性を検討した。その結果、震央方向が異なる地震動が不整形地盤に入射することにより地震動の地表/地中スペクトル比が異なることを明らかにした。北見市での地震データから通常期と凍結期の地表/地中スペクトル比を算出し、通常期の地表/地中スペクトル比は凍結期のそれに比べて20 Hz以上で地震動が増大することを示した。このことは、凍結により表層と基盤のS波速度コントラストが小さくなったあるいは表層と基盤のS波速度が逆転したことが要因である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震動や物理探査に対する高サンプリングの実測データを通じて、表層地盤の不整形性のみならず、その方向依存性が地震動評価に重要であることを示した本研究成果は、現状の地震動予測のばらつきを減少させることができることを示した。また、凍結地盤に対する研究成果では、凍結により表層と基盤のS波速度コントラストが小さくなるあるいは表層と基盤のS波速度が逆転することを明らかにし、凍結期と通常期に区別して地震動増幅を評価することが重要であることを示した。

研究成果の概要（英文）：We recognized a clear difference between P-wave velocities from the high-sampling weight drop and seismic data at the temporary earthquake observation station, Kumamoto. Therefore, we investigated the relationships between earthquake ground motion amplifications depending on epicentral azimuth and irregularities of subsurface structure. As a result, it was clarified that the surface/borehole spectral ratios of earthquake ground motions differ when those with different epicentral azimuths are incident on the irregular subsurface structure. Also, we calculated ground/surface spectral ratios for the normal and frozen seasons in Kitami City and showed that the ground/surface spectral ratios during the normal season increased at more than 20 Hz compared to that during the frozen season. We concluded that the S-wave velocity contrast between the surface and basement layers was reduced by freezing, or the S-wave velocity between the surface layer and the basement was reversed.

研究分野：地震工学、強震動地震学、地盤震動特性

キーワード：高サンプリング 重錘落下 地震 地震波速度 地震動増幅 スペクトル比 不整形地盤 凍結

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

対象サイトの地震動を予測する際には、サイト直下の地下構造による地震動増幅を把握することが重要である。そのため、強震観測網の K-NET・KiK-net など取得された地震データや PS 検層・アレー微動観測などの物理探査による調査結果を利用して、サイトの地盤震動特性を評価することが国や地方自治体が主導する調査・研究(例えば、文部科学省「平成 28 年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査」)で広く実施されている。一方で、地震データ群による地震動増幅の変動や物理探査による推定地下構造の精度に関する議論は少なく、地震データ群による地震動増幅の平均値や物理探査から推定された単独の地下構造による地震動増幅からサイト固有の地盤震動特性を評価することに留まっているのが現状である。また、全国の KiK-net 観測点を対象に地震データから 1 次元地盤モデルの最適化を行った笠松ほか(2011)の研究事例では、地震データに対して良好な最適化結果が得られた地点は全体数の 4 割程度であると報告されている。要因として傾斜構造など周辺地盤の不整形により地震動増幅が変動することが指摘されるが、その要因を明確に示した研究事例はない。また、数 10m の表層地盤においては、周辺地盤の不整形以外にも、大振幅加速度による地盤の非線形化や地下水位の季節変動などから地盤の地震波速度や個々の地震に対する地震動増幅が顕著にあるいは微細に変動する。その表層地盤において、諸要因より時空間的に変動する地盤の地震波速度や地震動増幅を波形ベースで精緻に抽出するためには、通常観測で設定する 100Hz などのサンプリング周波数では不十分であり、数百 Hz 以上の高サンプリングでボアホール地震観測を行うことが非常に効果的である。

### 2. 研究の目的

本研究は、上述した高サンプリングのボアホール地震観測や周辺地盤の稠密な物理探査による実測データと波動伝播理論・地震動シミュレーションに基づき、諸要因による地震動増幅の時空間変動メカニズムを解明し、現行の地盤震動特性評価の精度を向上させるあるいは信頼性を保有した成果を新たに創出することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究のテストサイトとして選定する JR 熊本駅のボアホール地震観測点(KM04; 地表と地中 42.5m の 2 点)は、振幅に対する地震動増幅の相違や大振幅地震動に対する NS 成分の卓越など、本研究課題の対象である地震動増幅の時空間変動に影響を及ぼす表層地盤の非線形化や周辺地盤の不整形に起因する地震動の偏向性が確認されたサイトであり(津野ほか, 2017)、1000Hz の高サンプリングでデータ収録を行った観測点でもある。それら諸現象を解明するためには、リファレンスとなる物理探査結果が必要であり、本テストサイトで実施した土質ボーリングや PS 検層による地下構造情報を利用する。また、表層地盤の地震波速度に対して連続性のある時間変動を検出するためには、定常的な加振源による測定データが必要であるが、本テストサイトでは地表面の定常加振が平日 1 回の割合で 1 年間行われている。高サンプリングで収録された定常加振データを精緻に分析することで、地下水位の季節変動や地震動の程度に対する表層地盤の地震波速度の微細な変動を検出することが可能となる。さらに、発生日時や入射方向が異なる地震データ群による地震動増幅からその時空間変動を抽出し、時間変動・空間変動の大小関係や空間変動の方向依存性を検討する。

### 4. 研究成果

#### 4. 1 地盤の不整形性および地震の震央方位による地震動増幅の時空間変動

連続地震観測点 (KM04) の地中と地表で観測された 42 個の地震データを利用して、震央方位に対する S 波の地表/地中スペクトル比を算出した。図 1 に、震央方位に対する S 波スペクトル比の周波数毎の平均値を示す。この図から、全震央方位において周波数帯 20~50 Hz のスペクトル比が他の周波数帯のスペクトル比と大きく異なることが明瞭に示されていることがわかる。また、南 (170°) ~北西 (340°) から入射する地震動は、それ以外の地震動と比較して、ばらつきが大きいことがわかる。このことは、熊本駅近傍の観測点 KM04 において地震動を正確に予測するためには、観測点に対する地震動の震央方位を適切に考慮することが重要であることを示している。

微動アレー探査(図 2)により得られた上下動成分の観測記録に SPAC 法を適用し、レイリー波の位相速度を推定した。また、表面波探査データには F-K 解析 (MLM 法) を適用して表層のレイリー波位相速度を算出した。山地部(万日山の A06、A08、A11 および花岡山の A13)では 10 Hz 以下の低周波数で位相速度が 500m/s 以上、万日山・花岡山と平地の境界部に位置する A05 では、A06 等と同様に 10 Hz 以下の周波数帯域で位相速度が 600m/s 以上となっており、浅部まで高速度層が分布していることが推察できた。一方で、A05 を除く観測点では、A10、A17 では 7~9 Hz 以上、それ以外の観測点では 4~5Hz 以上の高周波域で 200 m/s 程度の遅い位相速度を示している。さらに平地部の観測点では、4Hz 以上の周波数帯域で境界部の観測点と同様に位相速度が 200 m/s 以下となっていることがわかった。

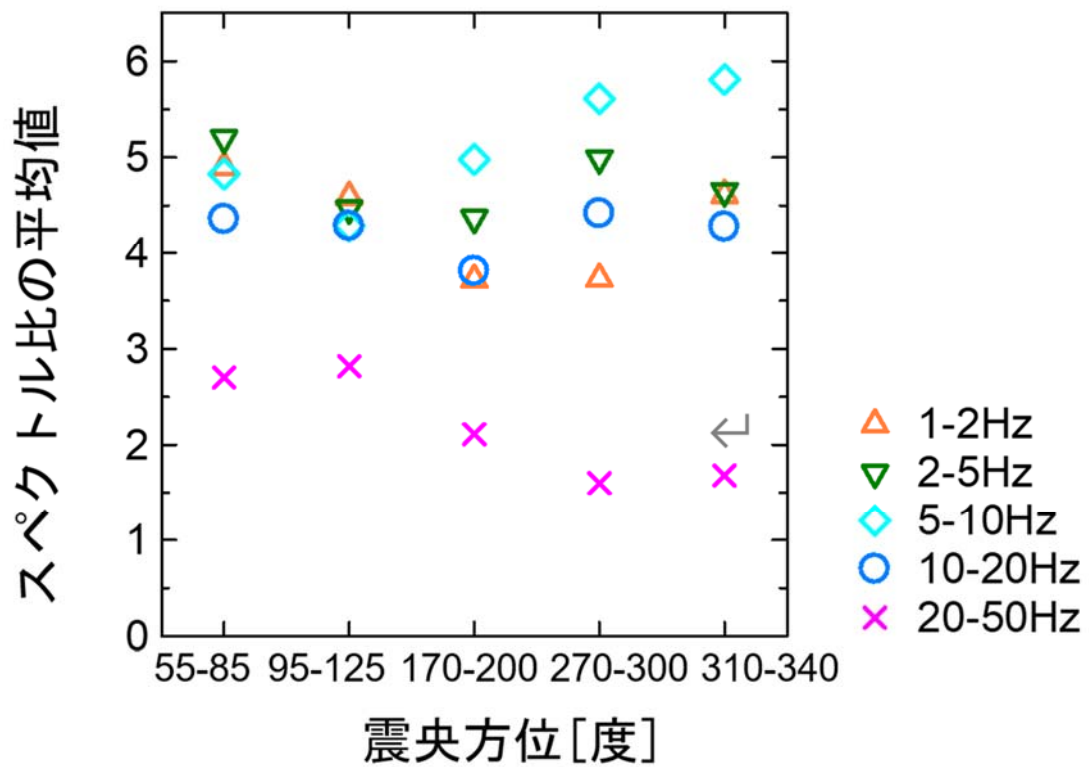


図1 地震観測点 KM04 の震央方位に対する地表/地中 S 波スペクトル比の周波数毎の平均値

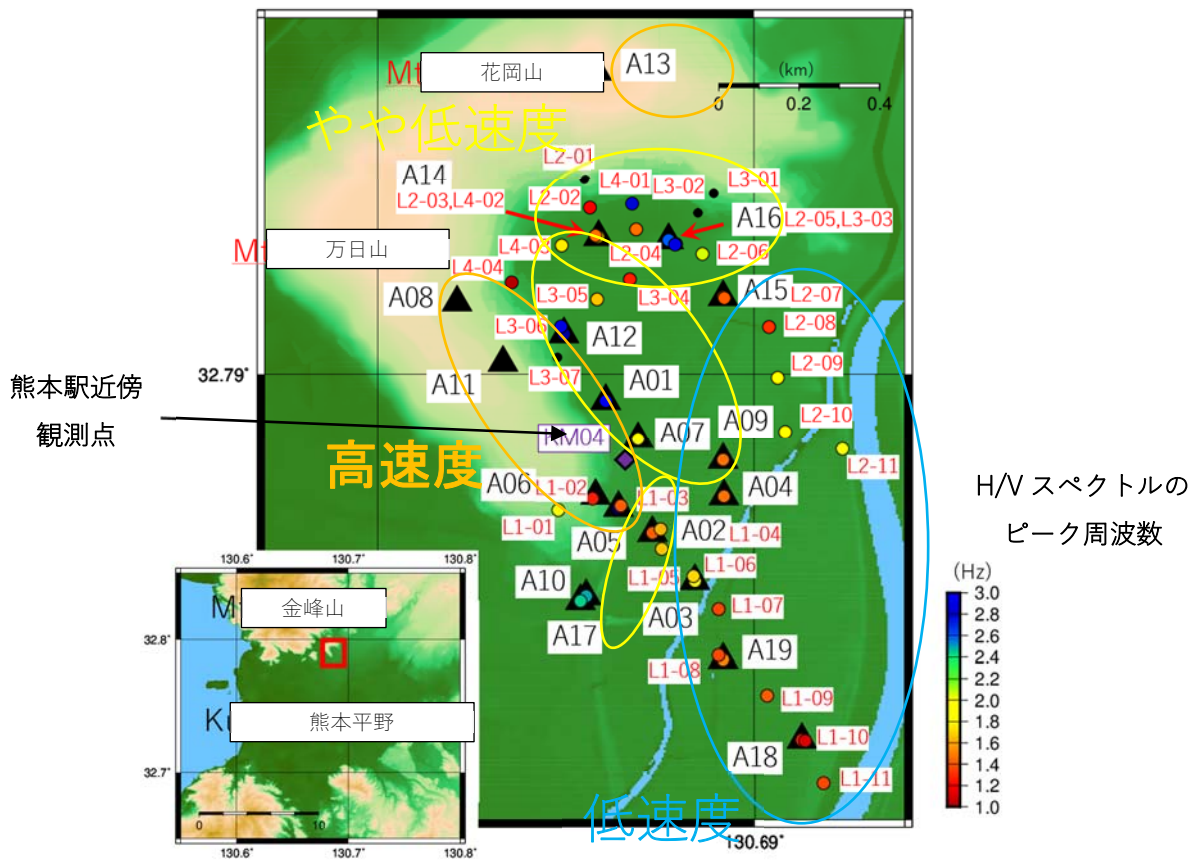


図2 観測点地図 (▲:微動アレー探索の位置、○:H/V スペクトルの算出位置とピーク周波数)

求められた微動の H/V スペクトルのピーク周波数を図 2 に示す。ただし、ピーク振幅の値が 2.5 以下の場合には明瞭なピークが見られないものとした。万日山・花岡山山地区および山地区に極めて近い境界部ではピークが明瞭ではない、もしくはやや高周波側の 2~3Hz に緩やかなピークが見られている。一方、平地部および山地区からやや離れた境界部の地点では 1~2Hz 付近にピークがあり、明瞭な違いが見られる。H/V スペクトルからも山地区から平地部にかけて S 波速度構造に急激な変化があることが示唆される結果となった。また、図 1 に示した南 (170°) ~ 北西 (340°) から入射する地震動について、それ以外の地震動と比較してばらつきが大きかったことは、熊本駅近傍の観測点 KM04 の西側がやや低速度や高速度の層が確認される不均質な表層地盤になっていることと対応している。

#### 4. 2 凍結地盤に対する地震動増幅の季節変動

地表 (GL) と GL-0.81 m の地震データを利用して、本サイトにおける通常 (未凍結) 期および凍結期、融解期の P 波 (UD 成分) と S 波 (NS 成分と EW 成分) に対する地表/地中スペクトル比を算出した。P 波については、地震計の故障のため、融解期のみ取得することができた。2020 年 10 月~2021 年 10 月の期間中に観測された 27 地震 ( $M_j$  3.5~6.1、深さ 5~170 km) のデータを使用した。P 波と S 波の初動から 10.24 秒のタイム・ウィンドウを解析区間とした。重錘落下振動のレイリー波位相速度と同様に、0°C 線 (凍結線) から、2020 年 12 月初旬~2021 年 3 月終旬を凍結期、3 月末~4 月中旬を融解期、それ以外を通常 (未凍結) 期とした。図 3 に、通常 (未凍結) 期および凍結期、融解期の地表/地中スペクトル比の対数平均を示す。通常 (未凍結) 期と融解期の地表/地中スペクトル比は 20 Hz 以上の周波数帯で 1 倍以上の増幅を示し、40 Hz 以上の周波数帯で卓越していることは類似している。相違点としては、通常 (未凍結) 期は周波数 40~90 Hz で卓越しているのに対して、融解期は周波数 40~60 Hz で卓越し、増幅度は通常 (未凍結) 期よりも大きい。一方で、凍結期の地表/地中スペクトル比は水平動において 20 Hz 以上の周波数帯で減衰を示し、周波数 40~90 Hz で 0.5 以下となる。凍結期において、地表/地中スペクトル比が水平動において減衰を示した理由として、凍結により表層と基盤の S 波速度コントラストが小さくなったあるいは表層と基盤の S 波速度が逆転したためと解釈できる。ただし、7 月終旬~8 月初旬の表層地盤の体積含水率が大きく低下する時期は、地震動においても地表/地中スペクトル比の増幅が低下することがわかる。なお、S 波において、NS 成分と EW 成分で顕著な違いは見られなかった。また、P 波は S 波の結果とは異なり、凍結期においても 1 倍以下の減衰を示していないが、それ以外の期間のデータが欠如したため、相対的な変化を把握することができなかった。

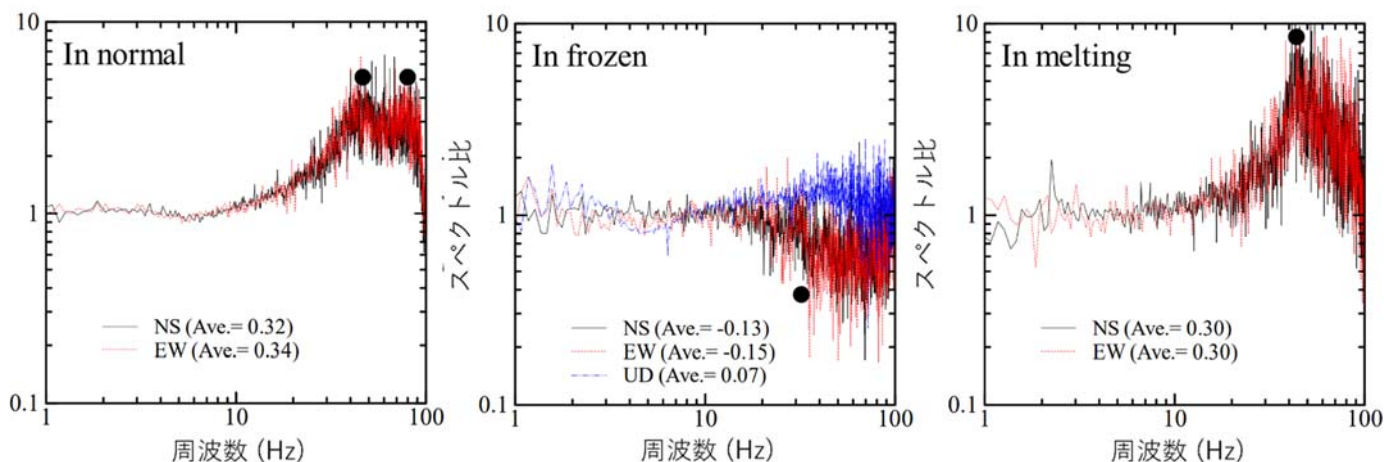


図 3 通常 (未凍結) 期および凍結期、融解期の地表/地中スペクトル比

地表 (GL) の地震データを利用して、微動の H/V スペクトルを算出し、1 年間のデータを通じて微動の H/V スペクトルの季節変動を抽出した。2020 年 10 月~2021 年 10 月の期間中に取得されたデータにおいて人工活動のノイズが比較的小さいと考えられる日毎の 0 時から 15 分間のデータを使用した。40.96 秒のタイム・ウィンドウを解析区間とし、20 サンプルのデータから算出された微動の H/V スペクトルを対数平均したものを最終的な H/V スペクトルとした。なお、NS 成分と EW 成分に対するフーリエ・スペクトルの相加平均を水平成分のフーリエ・スペクトルとし、バンド幅 1 Hz の Parzen window によりスムージングを施した。図 4 に、本サイトにおける 2020 年 10 月~2021 年 10 月の微動の H/V スペクトルを示す。1 年を通じたこの微動の H/V スペクトルは、3 つのグループに分類されることがわかる。5 Hz を境に上側のグループは通常 (未凍結) 期のものであり、真中のグループは融解期のものであり、下側のグループは凍結期のものである。融解期の微動の H/V スペクトルは凍結期と通常 (未凍結) 期の間にあることがわかる。このことは、凍結期における微動の H/V スペクトルの低下は、凍結により表層地盤のポアソン比が変化したことが要因であると考えられる。ただし、地震動の地表/地中スペクトル比の分析を通じて、凍結により表層と基盤の S 波速度コントラストが小さくなったあるいは表層と基盤の S

波速度が逆転したと推察され、微動の H/V スペクトルにおいてもそれら要因の影響を受けていると考えられる。なお、微動の H/V スペクトルの卓越周波数は 4.5 Hz 付近にあるが、季節ごとに 10 Hz 以上ほどの顕著な差は見られない。

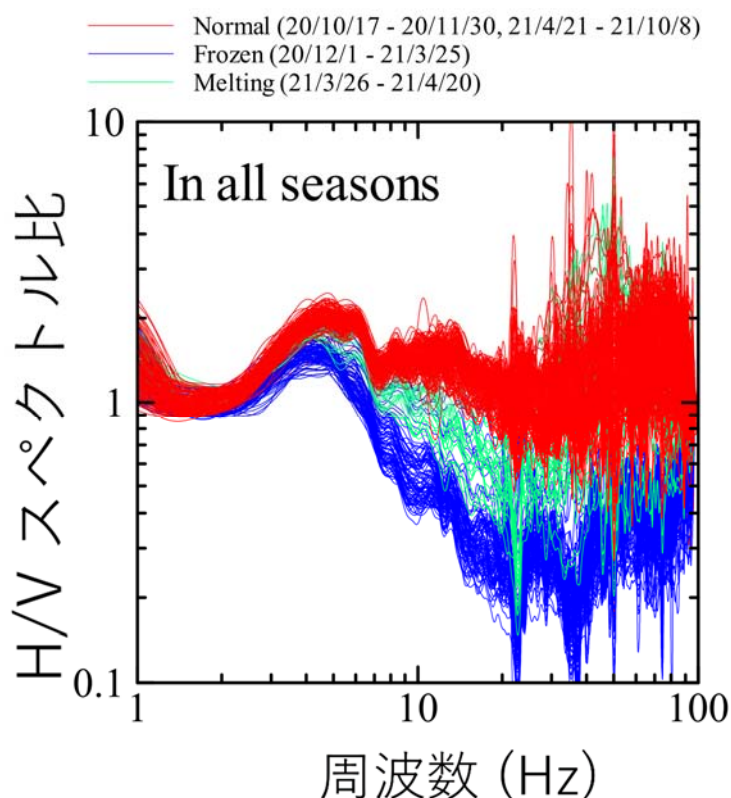


図4 微動の H/V スペクトルの季節変動

地震動増幅の推定精度向上を目的に、高サンプリングのボアホール地震観測および物理探査による実測データから、地震動増幅の時空間変動特性を明らかにした。

(1) 熊本駅近傍観測点の高サンプリングの重錘落下データから求めた P 波速度は 1075~1250 m/s、地震データから求めた P 波速度は 750~2000 m/s であった。この相違を受け、地震動の地表/地中スペクトル比を用いて震央方向に対する地震動増幅と物理探査から推定した不整形地盤との関係性を検討した。その結果、震央方向が異なる地震動が不整形地盤に入射することにより地震動の地表/地中スペクトル比が異なることを明らかにした。

(2) 北見市での地震データから通常期と凍結期の地表/地中スペクトル比を算出し、通常期の地表/地中スペクトル比は凍結期のそれに比べて 20 Hz 以上で地震動が増大することを示した。一方で、凍結期は 20 Hz 以上で地震動が減少する。このことは、凍結により表層と基盤の S 波速度コントラストが小さくなったあるいは表層と基盤の S 波速度が逆転したことが要因である。地震動の正確な予測を行う際には、震央方位を考慮すること、また凍結地盤に対しては凍結期と通常期に区別して地震動増幅を評価することが重要であることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 津野靖士, 山中浩明, 川尻峻三, 小笠原明信, 高井伸雄, 中川尚郁, 重藤迪子, 野本真吾, 岸川鉄啓, 堀田淳	4. 巻 75
2. 論文標題 寒冷地における重錘落下測定と地震観測による地盤震動特性の季節変動	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 物理探査	6. 最初と最後の頁 56-63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3124/segj.75.56	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 堀田淳, 野本真吾, 岸川鉄啓, 山中浩明, 川尻峻三, 津野靖士, 高井伸雄, 中川尚郁, 重藤迪子	4. 巻 75
2. 論文標題 寒冷地における地盤震動評価を目的とした北海道北見市における電気探査結果の季節変動	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 物理探査	6. 最初と最後の頁 89-97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3124/segj.75.89	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 高井伸雄, 中川尚郁, 重藤迪子, 野本真吾, 岸川鉄啓, 堀田淳, 川尻峻三, 津野靖士, 山中浩明	4. 巻 75
2. 論文標題 寒冷地における地盤震動評価を目的とした北海道北見市における表面波探査および微動アレー探査結果の季節変動	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 物理探査	6. 最初と最後の頁 98-104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3124/segj.75.98	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14件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 津野靖士, 山中浩明, 高井伸雄, 川尻峻三, 中川尚郁, 重藤迪子, 小笠原明信, 野本真吾, 岸川鉄啓, 堀田淳
2. 発表標題 寒冷地における不整形地盤の地盤震動特性評価を目的とした北見市での重錘落下測定とポアホール地震観測
3. 学会等名 第146回 学術講演会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高井伸雄, 中川尚郁, 岩崎桃子, 堀田淳, 野本真吾, 岸川鉄啓, 重藤迪子, 川尻峻三, 津野靖士, 山中浩明
2. 発表標題 寒冷地の精緻な表層地盤の季節変動把握のための北見市における高密度表面波探査
3. 学会等名 第146回 学術講演会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 津野靖士, 山中浩明, 是永将宏, 松島信一
2. 発表標題 熊本平野で観測された2016年熊本地震の強震動における表層地盤の非線形特性
3. 学会等名 日本建築学会, 学術講演梗概集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 津野靖士, 山中浩明, 長嶋史明, 川瀬博, 松島信一
2. 発表標題 2016年熊本地震の弱震動および強震動ブラインド予測結果のGOF分析への適用
3. 学会等名 京都大学防災研究所, 研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 津野靖士・山中浩明・重藤迪子・神野達夫・高井伸雄・是永将宏・松島健・地元孝輔・松島信一
2. 発表標題 2016年熊本地震の強震動ブラインド予測における堆積層および岩盤サイトにおけるS波速度構造探査
3. 学会等名 令和3年度 京都大学防災研究所研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山中浩明・津野靖士・是永将宏
2. 発表標題 レイリー波位相速度と見かけ比抵抗の同時逆解析による熊本市万日山周辺の表層地盤モデルの推定
3. 学会等名 日本地震工学会・大会 - 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 津野靖士・山中浩明・高井伸雄・川尻俊三・中川尚郁・野本真吾・岸川鉄啓・堀田淳・重藤迪子
2. 発表標題 寒冷地における重錘落下加振データと地震データから分析した地盤震動特性の季節変動
3. 学会等名 日本地震工学会・大会 - 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 津野靖士・山中浩明・高井伸雄・川尻俊三・中川尚郁・野本真吾・堀田淳・重藤迪子
2. 発表標題 寒冷地における地盤震動特性の評価を目的とした北見市での各種物理探査 -重錘落下加振データと地震データの季節変動特性-
3. 学会等名 第145回 物理探査学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山中浩明・津野靖士・重藤迪子・神野達夫・高井伸雄・松島 健
2. 発表標題 2016年熊本地震の強震動ブラインド予測の岩盤サイトにおけるS波速度構造探査
3. 学会等名 第145回 物理探査学会学術講演会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Nobuo Takai, Akari Tsukamoto, Naofumi Nakagawa, Michiko Shigefuji, Shingo Nomoto, Jun Horita, Tetsunori Kishikawa, Shunzo Kawajiri, Seiji Tsuno, Hiroaki Yamanaka
2. 発表標題 Seasonal variation on the results of surface wave analysis by multi-channel active source at the cold region in Japan
3. 学会等名 14th SEGJ International Symposium
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山中浩明・津野靖士
2. 発表標題 地震動評価のための表層地盤のモデル化への電気探査の活用
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林怜央・山中浩明・津野靖士・是永将宏
2. 発表標題 熊本平野北部の鉛直アレイ記録を用いた表層地盤における弾性波速度の時間変動
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山中浩明, 津野靖士, 重藤迪子, 神野達夫, 地元孝輔, 松島健, 松島信一
2. 発表標題 強震動ブラインド予測の熊本テストサイト周辺での臨時強震観測
3. 学会等名 日本地震工学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山内泰知, 津野靖士, 是永将宏
2. 発表標題 表面波探査データを利用したRayleigh波基本モードの減衰係数の推定
3. 学会等名 第143回学術講演会講演論文集
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	山中 浩明 (Yamanaka Hiroaki)  (00212291)	東京工業大学・環境・社会理工学院・教授  (12608)	

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