

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04615

研究課題名(和文)地震時崩壊性地すべり発生地点の微動特性と火山灰土壌の物理・力学特性との相関

研究課題名(英文)Correlation between microtremor characteristics of collapsing landslide sites and physical and mechanical properties of weathered volcanic ash soils

研究代表者

飛田 哲男(Tobita, Tetsuo)

関西大学・環境都市工学部・教授

研究者番号：00346058

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、地震による火山砕屑物の崩壊メカニズムを明らかにし、それに基づく土砂災害ハザードマップ作成法を提示することである。そこで、火山灰質粘性土の動的応答特性に着目し、原位置試験並びに室内試験を行い物理的・力学的性質を明らかにした。さらに、地震時の火山砕屑物の崩壊について、常時微動による振動特性から表層地盤の動特性を評価するための機械学習モデルの構築を行い、土質柱状図の推定が可能であることを示した。SPH法を用い単純な斜面モデルに対し、過去に現地調査から得られた地盤の強度定数を入力した弱層を設定したところ、弱層を境に直線的なすべりが発生した。しかし、すべり速度は大幅に過小評価となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、崩壊性地すべりの発生機構を力学的に解明し、さらに地形・地質を考慮した広域的観点からとらえる点にある。現在、斜面傾斜角30度以上の地点については、土砂災害防止法により「急傾斜地崩壊危険区域」に指定するなど法的な網がかけられている。しかし、本研究で対象とする大地震時の火山砕屑物の急激な崩壊性地すべりは、斜面の傾斜角が20度以下の緩傾斜面でも発生する。このため、これまでの大規模な地すべり発生地点は、国や都道府県で進められている土砂災害警戒区域指定基準から外れた地点となっている。本研究は、現在の斜面防災上の問題点を指摘し、それを克服する手段を提供するものである。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to clarify the collapse mechanism of volcanic debris caused by earthquakes, and to propose a method to create a landslide hazard map based on the mechanism. In this study, we focused on the dynamic response of volcanic ash cohesive soils, and conducted in-situ and laboratory tests to clarify the physical and mechanical properties of volcanic ash cohesive soils. The machine learning model was developed to evaluate the dynamic response of the surface soil based on the vibration characteristics of the volcanic debris during earthquakes, and it was shown that the model can estimate the surface soil profile. The SPH method was applied to a simple slope model with a weak layer, in which strength constants obtained from previous field investigations were input. However, the slip rate was significantly underestimated.

研究分野：地震地盤工学

キーワード：火山灰質粘性土 SPH法 地震 H/Vスペクトル比 原位置試験 機械学習

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、火山砕屑物が堆積する地域において大地震に伴う大規模な地すべり被害が発生している。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震では、福島県白河市葉ノ木平の地すべりで13名が犠牲になった[1]。また2016年熊本地震では、阿蘇カルデラ周辺で発生した大規模な地すべりで16名が犠牲となった[2]。2018年北海道胆振東部地震では、一回の地震では過去最大の広い範囲で地すべりが発生した。この地すべりでは、36名が犠牲となった[3]。また、厚真町の富里浄水場が被災した[4]。大地震時の火山砕屑物の崩壊については、これまでも多くの研究事例があり、詳細な調査がなされてきた。上に挙げた事例以外にも、同様の地すべりは世界各地で発生している[5-9]。

(2) その後の調査によって、これらすべての地すべりは、粘土化した火山降下火砕物をすべり面としていることが明らかにされている。この粘性土は、ハロイサイトに富み自然含水比が高いという特徴がある。このタイプの地すべりの特徴は、斜面の傾斜角が20度以下と緩傾斜であること、また、すべり土塊が移動中に崩壊するため、滑落崖からすべり末端までの距離が非常に長いことが挙げられる。こうした特徴から、このタイプの地すべりは「崩壊性地すべり」と呼ばれる。

2. 研究の目的

(1) 原位置試験、室内土質実験を通じてすべり面を構成する粘性土の物理的・力学的性質を明らかにし、崩壊性地すべりに対する数値実験に資する物理、工学的パラメータを得る。

(2) 粒子法の一つであり地盤の大変形挙動をシミュレーションできる SPH 法[10-11]について、実験より得られた物理パラメータを用いた解析を通して適用性を検討する。

(3) H/V スペクトル比のピーク周期と地盤の卓越周期が良い一致を示すことが知られている[12]。本研究では、浅部地盤構造が公開されている多数の K-NET 観測点[13]における 50gal 以下の地震動記録から地震動 H/V スペクトル比を求める。次に、求めた地震動 H/V スペクトル比と観測点を分類するための深層学習モデルを構築する。

(4) 複数の K-NET 観測点で常時微動単点観測を行い、微動 H/V スペクトル比を求め、上で作成した学習モデルに入力し、観測点が一定の精度で分類、特定できることを示す。これにより、常時微動観測結果から間接的に表層の地盤構造を推定できることを示す。

(5) 地震による火山砕屑物の崩壊メカニズムを明らかにし、火山砕屑物崩壊危険区域の広域的なマッピング手法の構築に資する基礎的検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 原位置試験、室内要素試験

北海道厚真町と福島県白河市西郷村の切土斜面において、針貫入試験（厚真町）、土検棒による貫入試験（白河市）とベーンコーンせん断試験（白河市）、常時微動観測（白河市）、原位置試料採取を実施した。室内試験は、自然含水比試験、密度試験、粒度試験、コンシステンシー試験と圧密試験（厚真町）、三軸圧縮試験（CUB）（厚真町）、定圧一面せん断試験（厚真町）、一軸圧縮試験（白河市）、光学顕微鏡による観察を行った。

(2) SPH 法の適用性検討

SPH 法はラグランジュ的手法の 1 つであり、連続体を有限個の粒子に分割し、粒子間の相互関係を数値的に解く手法である[10]。この際、粒子間の相互関係を評価するために、平滑化近似（Kernel ap-proximation）と粒子近似（Particle approximation）の二種類の近似計算を行う。本研究では、地震による緩傾斜地の地すべりに対する数値解析法として SPH 法の適用性を検討する。

まず、乾燥砂の円柱引抜き試験を行い、それに対する内部摩擦角に関する解析感度を検証した。次に、単純な斜面モデル（長さ 88m、高さ 44m、奥行き 40m）に対し、現地調査から得られた地盤の強度定数を入力した弱層を設定し、これを斜面と並行になるよう導入し自重による地すべりを再現する。さらに、北海道胆振東部地震で発生した厚真町の地すべり、および東北地方太平洋沖地震で発生した福島県白河市葉ノ木平の地すべりの再現を試みる。

(3) 機械学習による常時微動 H/V スペクトル比を用いた地盤構造推定

常時微動計測結果からすべり面を特定するための試みとして、加速度 H/V スペクトル比をカラースペクトル[14]に変換し、深層学習によって地盤を分類する新しい方法を提案する。まず、8 地点の K-NET 観測点で計測された 50gal 以下の地震動 1,667 波のカラースペクトルを用いて観測点の地盤構造を分類できることを示す。次に、観測点数を増やし 87 地点の K-NET 観測点で観測された 50gal 以下の地震動記録 13,150 個についてカラースペクトルを作成し、学習モデルを

構築する。また、土質柱状図が得られている関西大学構内の10地点で得られた微動H/Vスペクトル比を深層学習モデルに与え、類似するH/Vスペクトル比を持つK-NET観測点を抽出し、両地点の柱状図を比較する。さらに、大阪府と福島県の41地点のK-NET観測点で観測された8042個の50gal以下の地震動による地震動H/Vスペクトル比を作成し、カラースペクトルではなく振幅スペクトル比（一般的なH/Vスペクトル比）を用いた学習モデルを構築する。このモデルを用いK-NET観測点で観測した常時微動による微動H/Vスペクトルを分類できることを示す。

4. 研究成果

(1) 原位置試験結果

① 厚真町における原位置調査結果

試料採取した地点（北緯42度45分15.31秒，東経141度51分32.39秒）における土壌硬度計による貫入試験結果より，地表から深度2.1mでの支持強度は128kN/m²であった（図1，図2）。この深度の土質は白色で風化した粘性土（図3⑧）であり，手で練り返すと容易に液体状になる。自然含水比は240%，湿潤密度は1.23g/cm³であった。これより上載圧を25.3kN/m²とした場合の圧密試験から圧密降伏応力は220kN/m²，過圧密比OCR=8.7と推定される。過圧密比がやや大きいのは，試料採取地点が地すべりによって露出した地点であったため，上載圧を過小評価した可能性がある。

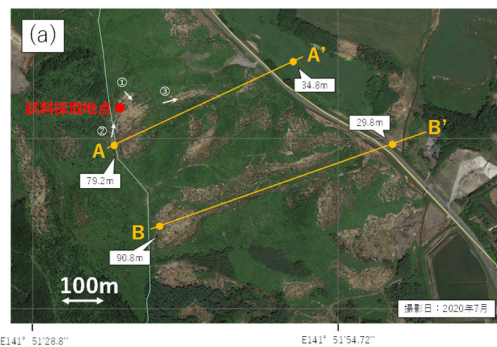


図1 (a)試料採取地点と地すべり被害の状況 (Google Earth Pro に加筆)，(b)A-A'断面図，(c)B-B'断面図

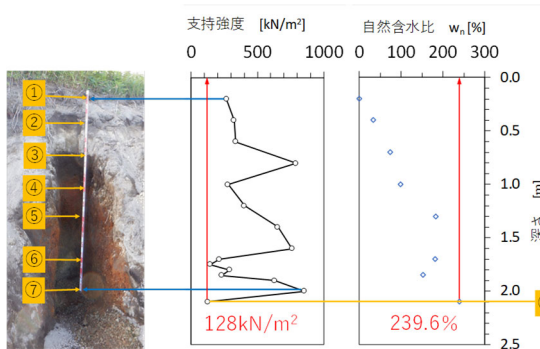


図2 貫入試験による推定支持力結果と自然含水比の深度分布

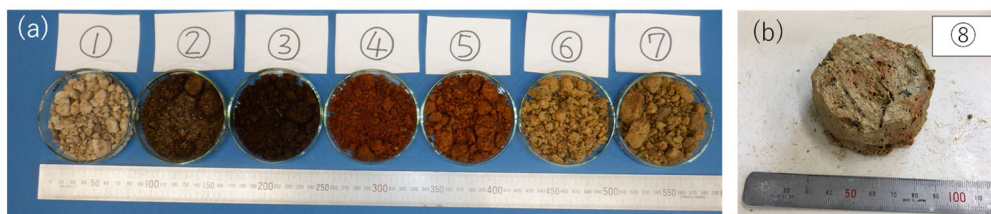


図3 原位置採取試料 (a) 採取試料①～⑦，(b) 採取試料⑧

② 白河市における原位置調査結果

試料採取した地点（北緯37度9分14.3650秒，東経140度6分20.5786秒）は福島県白河市周辺の切土斜面のSr10～TkP層である。原位置試験として土層強度検査棒を用いたサウンディング試験を3回行い，換算N値と土の強度定数を算定した。その結果，換算N値の平均は地表から深度40cmで4.5であり，粘着力cはほぼゼロ，せん断抵抗角は $\phi=13.9^\circ$ と推定される。

(2) 室内試験結果

① 厚真町試料

試料採取した地点の深度2.1mから原位置採取した白色に強風化した粘性土試料（図2，図3の⑧）に対して室内試験を行った。同粘土は，塑性図による分類ではMH（高液性限界シルト），粒度試験により細粒分含有率は70%であった。定圧一面せん断試験では，せん断速度1.46%/minで得られた強度定数は，粘着力25.0kN/m²，内部摩擦角23.7度であった。三軸圧縮試験（CUB）で得られた強度定数は，軸ひずみ速度0.084%/minでは粘着力6.6kN/m²と内部摩擦角11.8度であり，軸

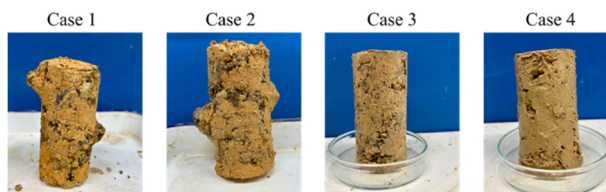


図4 一軸圧縮試験供試体（採取地：白河市）

ひずみ速度 1.476%/min では粘着力 6.4kN/m^2 と内部摩擦角 11.0 度であった。今回行った軸ひずみ速度程度では、強度定数にひずみ速度依存性は見られなかった。

② 白河市試料

試料採取した地点の火山灰質粘土は高液性のシルト (MH) と分類された。また白色粘土の混入量が多い粘土の液性指数は1に近い値を示し容易に液状になる性質を持つことがわかった。一軸圧縮試験 (図4, 図5) は、切土斜面からブロックサンプリングによる不攪乱試料を用いて行った。不攪乱試料 (Case 1) の一軸圧縮強度は約 20kN/m^2 であった。また鋭敏比は6.2であり、乱されると強度低下が大きい鋭敏な粘性土であることが分かった。

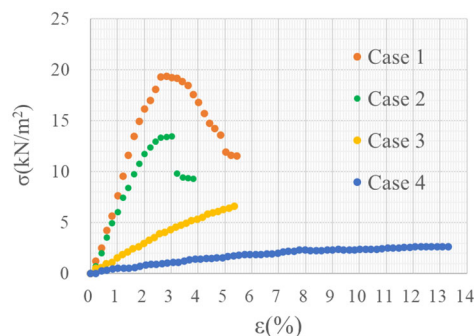


図5 一軸圧縮試験結果(採取地: 白河市)

(3) SPH法の適用性検討

① 乾燥砂を用いた円柱供試体に対する解析

傾斜角に対する流動距離と変形後の高さの変化傾向は再現できたが、傾斜角を 30° より小さくした場合、実験結果を過小評価した。

② 厚真町の地すべりに対する解析

解析対象範囲の地形は、国土地理院の5mメッシュDEMデータからGISソフトウェア(QGIS)によりベクタ変換して作成した(図6, 図7)。写真判読によるとこの地点では、土砂が約110m流動したものと推定される。SPH法による解析では、固定した基盤粒子の上に粒子間隔1mで3段の流動粒子を配置した。地震動を入力した場合、地すべりの流動変位は過小評価された。一方、設計水平震度(k)を流動粒子に加えた場合には、 $k=0.3$ 以上のときに大きなすべり量が得られた。流動粒子の上から1層目と2層目を粘土層(せん断抵抗角=0度)にした場合、もしくは3層目の強度定数を小さくした場合には、前者の方が大きく流動した。

③ 葉ノ木平の地すべりに対する解析

解析対象範囲の地形は、②と同様に作成した。本検討では、流動粒子を解析範囲全域に配置した。自重解析と地震動解析で大きく変位する地点の違いは見られなかった。これは、地震動入力以前に自重の影響により、傾斜角の大きなところに位置している粒子が変位しているためである。地すべり箇所周辺を含む解析と地すべり箇所のみでの解析では、流動変位が大きくみられる箇所に違いが見られた。これは、固定境界条件である壁粒子の反発によって流動しやすい粒子が斜面部分に出た影響と考えられる。

また、三軸圧縮試験(CUB)で得られた強度定数を入力パラメータとして自重解析すると、地すべりは発生しなかったが、強度定数を低減させることで地すべり発生を再現することができた。このことから、地震動による強度定数の低減が地すべり発生の引き金になった可能性がある。本検討を通じて、SPH法が、地すべりによる崩壊土砂挙動を調べる有効な方法であることが示された。しかし、本検討で再現された地すべりのすべり速度はわずか 4.8cm/s (0.172km/h) と過小評価となった。実現象では、すべり土塊がブロック状に崩壊し、流下するにつれてブロックが壊れることで速度の大きな地すべりが発生していると推定されているが、本解析では粒子が一様に流動するように変形している。この相違点については今後の課題である。

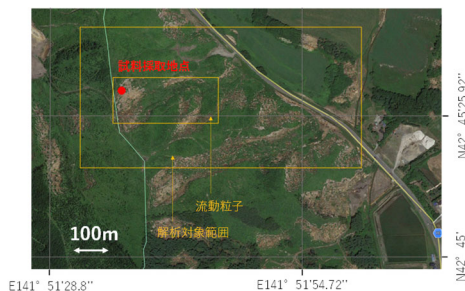


図6 厚真町の解析対象範囲

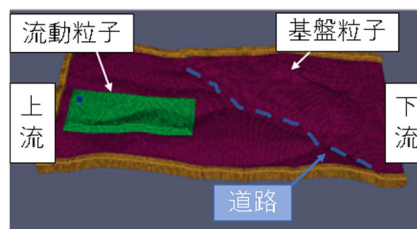


図7 厚真町の地すべり解析モデル

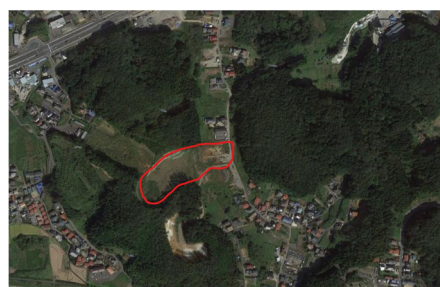


図8 葉ノ木平の地すべり箇所 (Google Mapに加筆)

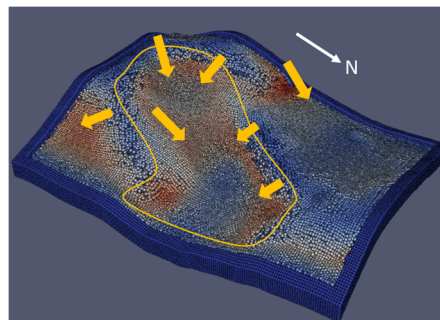


図9 葉ノ木平の地すべり解析結果 (矢印は粒子の移動方向)

(4) 機械学習による常時微動 H/V スペクトル比を用いた地盤構造推定

①K-NET8 地点（大阪 5 地点，北海道 3 地点）で観測された最大加速度 50gal 以下の地震動を基に作成したカラースペクトルから，CNN による各地点の地盤構造の分類精度を検証した（図 10）. その結果，平均の学習精度は 95.6%であり，最も精度の良い学習結果では 96.4%であった. また明らかに誤分類が生じたものには，震源深さ 333km である深発地震や，震源距離が 505km 遠方で生じた地震が含まれていることが分かった.

②87 地点の K-NET 観測点から得られた最大加速度 50gal 以下の観測地震動の H/V スペクトルをカラースペクトル化して，CNN による深層学習により観測点を分類した. 10 回の学習を行った結果，平均正解率は 77.9%であり，地震動 H/V スペクトルから観測点を分類することができた.

③関西大学構内のボーリング調査が行われた 10 地点で微動 H/V スペクトルを求め，上記と同様に検討した. その結果，N 値の深度分布，土質区分は，定性的に近い傾向を持つ地点に分類できた（図 11）.

以上の成果から，H/V スペクトル比の形状から常時微動観測点の地盤構造を推定できることが示された. 今後，実用化に向けて本手法の推定精度の検証が必要である.

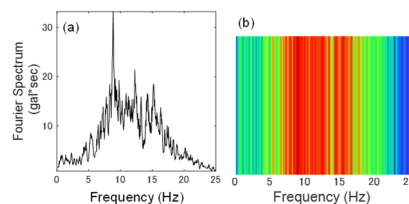


図 10 カラースペクトルの作成手順：
(a)算術目盛りで表示したフーリエスペクトル，(c)カラースペクトル

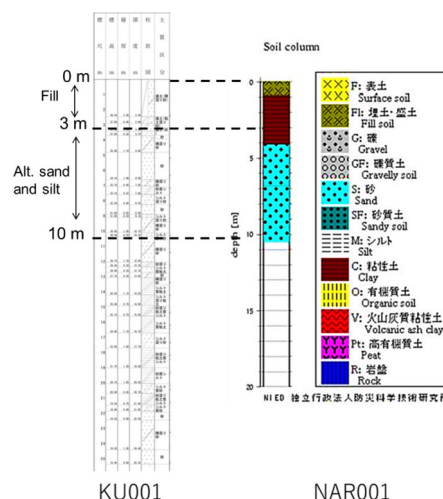


図11 微動観測点KU001とK-NET観測点(NAR001)の土質柱状図.

<引用文献>

[1] 千木良雅弘・中筋章人・藤原伸也・阪上雅之：2011年東北太平洋沖地震による崩壊・地滑り（福島、栃木）および地震断層（福島）調査結果,pp.1-5, 2011. https://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web_j/saigai/tohoku2011/jiban_20110426.pdf (閲覧日 2021.1.23)

[2] 佐藤達樹，千木良雅弘，松四雄騎：テフラ層の風化メカニズムと地震時のすべり面形成に関する研究 -2016年熊本地震により発生したテフラ斜面の崩壊を例に，京都大学防災研究所年報(60)，431-452，2016.

[3] 田近淳，千木良雅弘，小池明夫，金秀俊，石丸聡，雨宮和夫：2018年北海道胆振東部地震によるテフラ層すべりと人的被害，日本地すべり学会誌，2020.

[4] 福山正彦，宮本勝利，飛田哲男：北海道胆振東部地震における上水道被害に関する考察，第10回，インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集，pp.112-118，2020.1.

[5] Chigira, M. 1982. Dry debris flow of pyroclastic fall deposits triggered by the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake: the "collapsing" landslide at Nanamawari, Mitaka-Iriya, south-ern Izu Peninsula. Journal of Natural Disaster Science, 4: 1-32.

[6] Ishihara, K. & Nagao, A. 1983. Analysis of landslides during the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake. Soils and Foundations, 23: 19-37.

[7] Chigira, M. 2014. Geological and geomorphological features of deep-seated catastrophic landslides in tectonically active re-gions of Asia and implications for hazard mapping. Epi-sodes, 37: 284-294.

[8] Nakano, M., Chigira, M., ChounSian, L. & Sumaryono, G. 2015. Geomorphological and geological features of the col-lapsing landslides induced by the 2009 Padang earthquake. 10th Asian Regional Conference of IAEG. Kyoto.

[9] Chigira, M. & Suzuki, K. 2016. Prediction of earthquake-induced landslides of pyroclastic fall deposits. In: al., A.e. (ed.) Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice. Associazione geotecnica Italiana, Rome: 93-100.

[10] Liu, G. R. and Liu, M. B. 2003. Smoothed Particle Hydrodynamics -A Meshfree Particle Method, World Scientific Publishing.

[11] 小野祐輔：SPH法による斜面の地震応答と崩壊挙動の解析，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 69, No. 4（地震工学論文集第32巻），pp. I_653-I_659, 2013.

[12] Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, Quarterly Report of RTRI, 30(1): 25-33.

[13] National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. 2021. NIED K-NET, KiK-Net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi:10.17598/NIED.0004.

[14] Endo, R. 2016. Definition of a function to calculate RGB of light, Incorporated nonprofit organization natural science, <https://www.natural-science.or.jp/article/20160513143413.php> (last accessed 2022.11.1.).

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 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tetsuo Tobita, Hitomi Onishi, Susumu Iai & Masyhur Irsyam	4. 巻 -
2. 論文標題 Numerical Study on Delayed Failure of Gentle Sloping Ground	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PBD-IV 2022: Proceedings of the 4th International Conference on Performance Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering (Beijing 2022)	6. 最初と最後の頁 1362-1376
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-11898-2_118	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 該当する

1. 著者名 TOBITA Tetsuo, YAMAMOTO Wataru	4. 巻 79
2. 論文標題 深層学習を用いた微動スペクトルの分類手法の提案	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 22-13014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.22-13014	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9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山本航, 飛田哲男
2. 発表標題 地盤震動スペクトルと機械学習による地盤構造推定
3. 学会等名 2022年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上野友彰, 飛田哲男, 小野祐輔
2. 発表標題 地震による緩傾斜地の地すべりに対するSPH法の適用性
3. 学会等名 2022年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飛田哲男, 山本航
2. 発表標題 機械学習を用いたカラスペクトルによるH/Vスペクトル比の同定
3. 学会等名 2022年度土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本航, 飛田哲男
2. 発表標題 機械学習を用いたカラスペクトルによるH/V スペクトル比の同定
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tetsuo Tobita and Wataru Yamamoto
2. 発表標題 Machine Learning for Estimation of Surface Ground Structure by H/V Spectral Ratio
3. 学会等名 2nd International Conference on Construction Resources for Environmentally Sustainable Technologies
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 飛田 哲男, 山本 航
2. 発表標題 深層学習による地動観測点の特定
3. 学会等名 第42回地震工学学研究発表会(2022年度)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tetsuo Tobita and Taichi Taniguchi
2. 発表標題 Machine Learning for Site Identification with H/V Spectral Ratio
3. 学会等名 The 8th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (8ICEGE)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 飛田哲男, 谷口大智
2. 発表標題 微動H/Vスペクトルと深層学習による観測点の分類
3. 学会等名 第16回日本地震工学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高田大晴, 飛田哲男
2. 発表標題 H/Vスペクトル比を用いた機械学習による地盤構造推定
3. 学会等名 2024年度土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2024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
---------	---------