

令和元年6月24日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H05649

研究課題名(和文) 微動観測及び連続地震動観測によるミャンマーの地震危険度評価

研究課題名(英文) Seismic Hazard Assessment of Myanmar based on the microtremor and continuous earthquake observations

研究代表者

川瀬 博 (Kawase, Hiroshi)

京都大学・防災研究所・特定教授

研究者番号：30311856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では主たる対象としてサガイン市とヤンゴン市を選定し、まず常時微動観測に基づいて面的地下構造を明らかにし、それを用いた強震動予測を実施した。その結果、サガイン市およびヤンゴン市でのアレーおよび単点で観測された常時微動観測に基づき地表から地震基盤までの詳細な速度構造を明らかにした。サガイン市北部のサガイン断層180kmの区間の不均質断層モデルを構築し、統計的波形合成法により強震動を予測したところ、その特性は専ら断層の不均質性に支配されることがわかった。ヤンゴン市東部のサガイン断層区間に対して三次元FDMで強震動を予測したところ、最大速度で15cm/s程度の揺れとなることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

サガイン市とヤンゴン市の表層から地震基盤までの面的地下構造はこれまで全く明らかになっておらず、今回それを初めて明らかにすることができた。その結果サイト増幅特性においてはサガイン市では2Hzの、ヤンゴン市では1Hz～2Hzの卓越振動数となっていることから、その周波数帯域の構造物には共振する危険性があることが指摘できる。また求めた地下構造を用いて強震動予測を実施したところ、サガイン市では断層直近のためその近傍では加速度が震度6強レベルとなること、一方ヤンゴン市では距離があり壊滅的な揺れとはならないことがわかった。これらの知見は今後の地震ハザード・地震リスク評価に活用できる。

研究成果の概要(英文)：In this research, Sagaing City and Yangon City were selected as the main targets. First the surface underground structure was investigated based on the microtremor observation, and strong ground motion prediction was performed by using the obtained structures. As a result, we clarified the followings: 1) the detailed velocity structure from the ground surface to the seismic bedrock based on the array and the single-station microtremor observations in and around Sagaing City and Yangon City; 2) A heterogeneous fault model was constructed for the 180km section of the Sagaing fault in the northern part of Sagaing City, and strong motions were predicted by statistical waveform synthesis method to find that the characteristics of ground motions are controlled primarily by the fault heterogeneity; 3) Strong motions were predicted by three-dimensional FDM for the Sagaing fault section in the eastern part of Yangon City to find that the maximum peak ground velocity was about 15 cm/s.

研究分野：地震工学

キーワード：強震動予測 地盤構造 微動 地震観測 不均質断層モデル アスペリティ 水平上下比 アレー観測

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ミャンマーでは過去に被害を引き起こした規模の大きな地震が多く発生している。特に国の中央を貫く大活断層である Sagain 断層沿いでは多くの M7 以上の地震が発生している。しかしミャンマーでは全国規模での観測網は未だ敷設されておらず、都市直下の地下構造も十分に把握されていない。

我々はこれまでミャンマーの Yangon 大学地質学部と連携して主として Yangon 市および Mandalay 市の微動観測による地下構造モデルの構築を行ってきた。その結果、日本とは大きく異なるミャンマー固有の地盤構造を明らかにすることができた。しかしここ3年間に渡る努力の結果にもかかわらず、これらの都市の深部地下構造を明らかにするには至っていない。これは主として浅層表面波からなる短周期微動を用いることによる探查限界があるからである。また、Sagain 断層が市内を貫いている歴史都市 Sagain 市においても、その地下構造を明らかにするとともに、断層の正確な位置を求め、その強震動を定量的に予測することが必要である。

2. 研究の目的

本調査研究の対象はミャンマー連邦共和国で、その目的はミャンマーの震源特性を把握するとともに強震動特性に見られる地域性を考慮することにより、その首都を含む主要都市の地震ハザードを定量的に評価することである。ミャンマーの置かれている地震環境は日本のそれと共通する点が多い。現時点ではミャンマー国内には国家規模の地震観測網が敷設されておらず、地震発生層の同定や発生確率の評価、強震動特性の定量的把握ができていない。そこで本研究ではミャンマー国内の主要都市に配置する地震計の連続観測データとその都市域での微動観測データを用いてその震源特性と強震動特性を求め、その特徴を明らかにする。

3. 研究の方法

研究は具体的には以下の6ステップに従って進めた。

ステップ1) 強震観測点を、Sagain 断層を中心にその近傍に位置する主要都市に設置した。用いる観測機器は防災研究所所有の ITK データロガーで、センサーはサーボ加速度計である。

ステップ2) 地震観測は、できるだけ早く開始した方がよいのでまず5点を設置した。その観測実績を観察し、必要なバージョンアップを加えて残りの5点を設置する予定としていたが、初期調査の結果から地方では電源喪失頻度が高く、環境も過激なため、実際の稼働率が非常に低く、現状では継続して地震観測を行うことは容易ではないことが判明したので、各種の微動観測(長周期アレー微動を含む)・表面波探查を研究の中心にすることに変更した。

ステップ3) 対象都市の市街地全域を対象とした格子状の微動観測を実施し、面的地盤震動特性を把握した。特に Sagain 断層が市内を貫いている Sagain 市および都市化が急速に進んでいる Yangon 市、さらに2016年の地震で被害が発生した Bagan 市を重点的に調査した。Bagan 市では被害を受けたパゴダ内部の微動を観測、その共振振動数が2~5Hzであることを明らかにした。

ステップ4) 地震動のS波部分および微動の水平スペクトルと上下スペクトルの比、いわゆるH/V比を用いて Sanchez-Sesma et al. (2011)および Kawase et al. (2011)が提案した拡散波動場理論により、その地点直下の地震基盤から地表までのS波速度構造を同定した。また長周期速度型微動計によるアレー微動観測や本研究費で整備した10点の上下動センサーを用いたアレー微動およびハンマーによるMASW表面波探查を実施し速度構造同定を行った。

ステップ5) 得られた地下構造を用い、地震本部の強震動予測で標準的に用いられているレシピに従って震源モデルを設定し、Sagain 断層の Sagain 市北部区間が活動した場合の Sagain 市内の強震動および Yangon 市に近い区間が活動した場合の Yangon 市内の強震動を予測した。

4. 研究成果

各ステップにおいて様々な検討を行っているが、ここでは整理の都合上、地域別に主な成果を取りまとめたサガイン市内とヤンゴン市内での検討結果を報告する。

(1) サガイン市内での地盤構造調査と強震動予測

本研究では、これまで全く調べられたことのないサガイン市内の三次元地下構造(特にそのS波速度構造)を同定することに注力した。そのため単点微動・アレー微動(短周期・長周期)に加え、表面波探查(MASW)および地質情報・ボーリング情報を利用して三次元地下構造モデルを構築した。単点微動に関しては2つのアプローチを使用してS波速度の逆算を行った。

常時微動観測

常時微動観測のデータは数回に分けて現地観測した。図1.1に観測した単点微動観測点とアレー微動観測点(短周期加速度計と長周期速度計によるもの)の位置図を示す。赤線はサガイン断層のおおよその位置を示している。市街中心部は図の南東(右下)方向に位置している。

地下構造の同定

各地点直下の一次元S波速度構造モデルを構築するために3ステップの解析を行った。まずアレー微動観測記録から Tada et al. (2007)の方法 BIDO 2.0 により Rayleigh 波の位相速度を抽出した。5地点で実施した各アレイサイトの Rayleigh 波速度を求めた後、それから Ballard

の方法で初期モデルを構築し、さらに水平・上下比 MHVR も求めてそれも含めてターゲットにして構造同定を行い、もう一つは MHVR と地震動と微動の HVR の比 EMR を用いて地震動 HVR に換算して同定する森・他(2016)の方法で構造を同定した。2つの方法で得られた構造はよく類似していた。図 1.2 には、あるアレー地点 (ARRAY1) に対して推定された一次元の S 波速度構造モデルとそれから計算された理論 MHVR (黒線) および観測 MHVR (赤線) を例として示す。

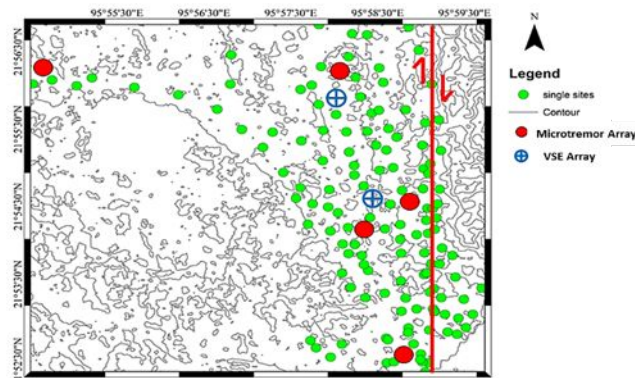


図 1.1 単点微動観測点(●)とアレー微動観測点(●)、速度計アレー(⊕)の分布

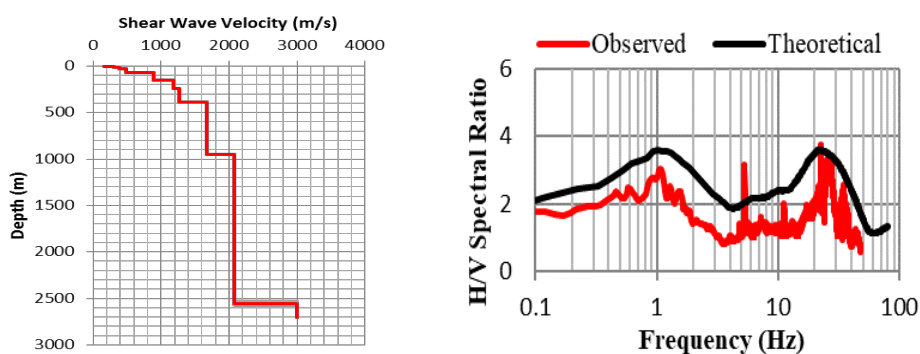


図 1.2 Array1 地点で同定した一次元 S 波速度構造 (左) と理論と観測 MHVR の比較 (右)

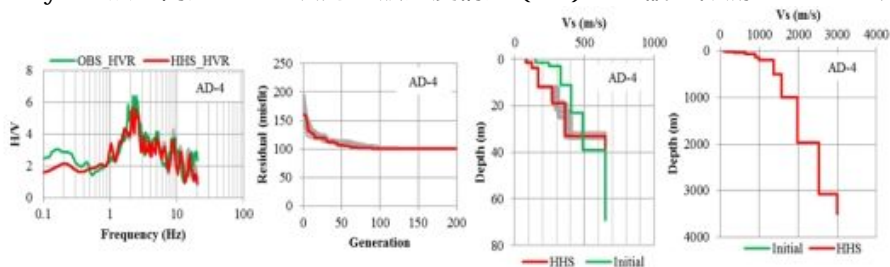


図 1.3 単点微動地点で疑似 EHVR (左の緑線) から同定した一次元 S 波速度構造 (右) の例

アレー微動観測から参考とすべきモデルが 5 地点で得られたので、それを初期モデルとして森・他(2016)の方法で単点微動地点での一次元 S 波速度構造を求めた。その一例を図 1.3 に示す。右側に示した赤線の構造でターゲットとした疑似 EHVR がうまく説明できていることがわかる。最終的に求めた三次元地下構造を表層 30m までの平均 S 波速度として図 1.4 に示す。サガイン断層の東側で速度が大きい傾向にあることがわかる。

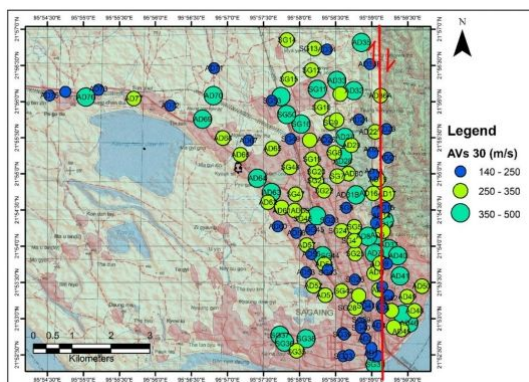


図 1.4 同定した一次元 S 波速度構造から求めた Vs30 の分布

サガイン市でのサガイン断層が活動した際の強震動予測

図 1.5 には Sagain 断層の一部 Sagain 区間(180km)が破壊すると想定したときの断層面上のアスペリティ分布を示す。セグメントは3分割しそれぞれに $M_{JMA}7.7$ の規模を想定した。震源パラメタの設定は断層のサイズや幅(16km)に関しては既往活断層調査結果や微小地震の分布から設定した。アスペリティのサイズや応力降下量、滑り量、短周期成分等に関しては地震本部の強震動予測レシピを用いた。ここでの計算は、サガイン市の表層が極めて薄く、1秒以上の長周期成分を増幅させる可能性が低いこと、対象構造物も低層構造物がほとんどで長周期構造物が含まれていないことから、短周期成分を的確に評価できる統計的グリーン関数法とした。

図 1.6 にはサガイン市南東部の1観測点における推定加速度波形3成分を示す。最北部セグメントの北端から破壊させているので、近いセグメントが破壊するまではほとんど大きな入射波形とはなっていない。加速度レベルは水平動で 400Gal~600Gal となっており、気象庁震度で言えば6強のレベルで、適切な靱性を与えられていない構造物では大半が崩壊する可能性の高いレベルである。ただし、今回は想定していないが、破壊がサガイン市側から開始した場合には backward directivity により、加速度レベルはずっと小さいものになると考えられる。

今後の課題として、長周期成分の寄与も含めるために3次元有限差分法とのハイブリッド解析を行い、事前の絞り込みが困難な破壊開始点に関してパラメトリック解析を実施したい。

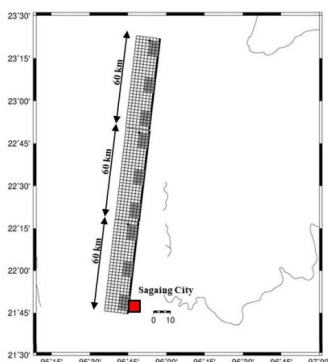


図 1.5 想定したサガイン断層区間の断層モデル

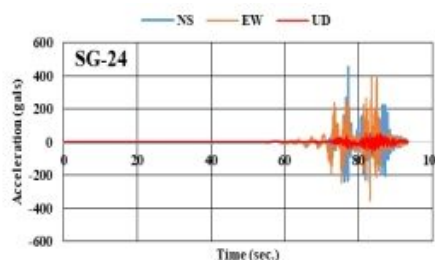


図 1.6 統計的グリーン関数法で計算された3成分加速度波形の例

(2) ヤンゴン市内での地盤構造調査と強震動予測

廣川・他(2016)はヤンゴン大学でのアレー観測によって $V_s=800\text{m/s}$ の層の下端深さまでの地下構造を推定した後、26地点の常時微動単点観測から得られた水平上下スペクトル比(MHVR)のピーク振動数とヤンゴン大学でのMHVRのピーク振動数の比を利用して $V_s=800\text{m/s}$ の下端深さまでの地下構造を求めた。また Tsutsumi and Sato(2009)は1930年にサガイン断層のBagoセグメントで発生した地震を調査し、断層長さや平均すべり量などの各種パラメタを求め、その M_w を7.3とした。本研究ではこの Tsutsumi and Sato(2009)が求めた震源パラメタと地震本部で利用している強震動予測レシピを参照し、1930年 Pegu 地震の強震動シミュレーションを行った。

常時微動単点観測

常時微動単点観測のデータは廣川らの結果を利用した。図 2.1 に廣川・他(2016)が単点微動観測を行った観測点 ns-3 と ns-17 での MHVR を例として示す。

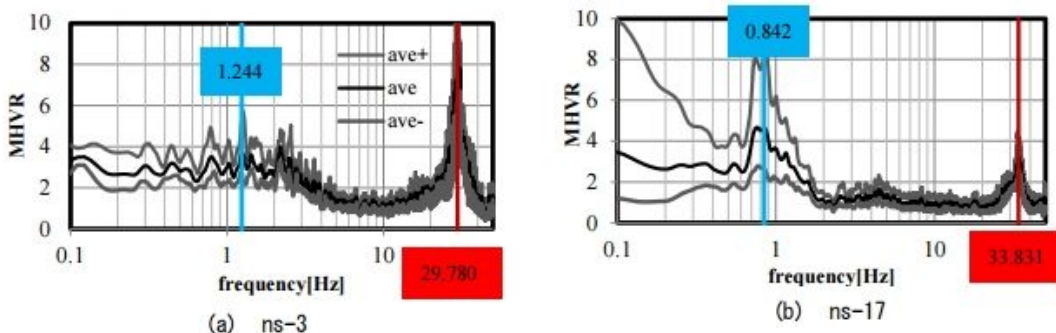


図 2.1 単点微動観測点の HVR の例

常時微動アレー観測

ヤンゴン市内で大アレー(300~1000m)を行い、深部構造の探査を行った。観測には東京測振の長周期微動用サーボ型速度計 VSE-11/12 を使用した。データの解析には BIDO2.0(Tada et al., 2010)を使用した。得られた Rayleigh 波位相速度分散曲線を図 2.2 に示す。

地下構造モデルの構築

Ballard の方法に従って Rayleigh 波位相速度から S 波速度構造を推定した。観測結果と得られた S 波速度構造モデルによる理論計算の MHVR および位相速度分散曲線の比較を図 2.3 と図 2.4 に示す。MHVR では理論と観測のピークの位置が合うようにフィッティングを行った。

最終的にヤンゴン市内の浅部 ($V_s=800\text{m/s}$ 以浅) は平面上で補間し、ヤンゴン市外は工学的基盤とみなせる $V_s=800\text{m/s}$ の層が露頭している盆地構造を仮定した。深部 ($V_s=1000\text{m/s}$ 以深) に関しては水平成層構造を仮定した。図 2.5 にヤンゴン市内を抜粋した $V_s=800\text{m/s}$ の層の下端深さコンタ、ヤンゴン大学を通る南北の浅部断面図を示す。

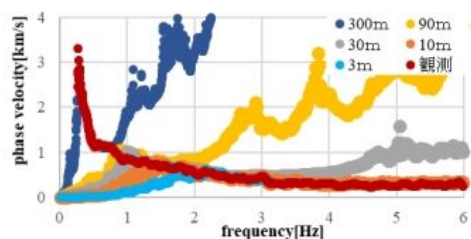


図 2.2 ヤンゴン大学でのレイリー波位相速度分散曲線

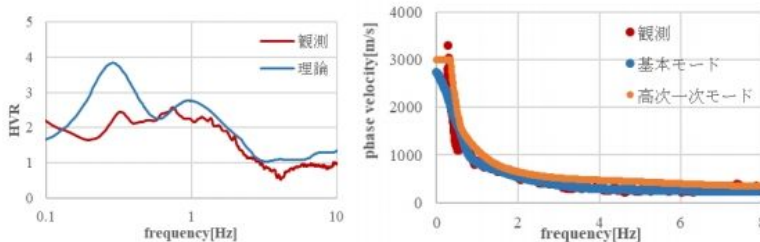


図 2.3 微動 HVR の理論と観測の比較 図 2.4 位相速度の理論と観測の比較

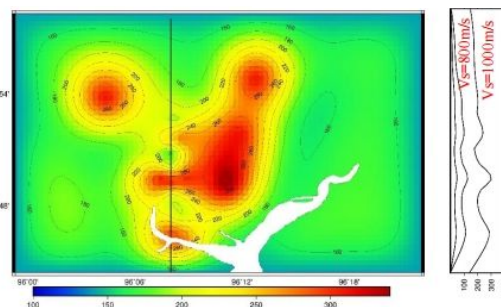


図 2.5 $V_s=800\text{m/s}$ の層の下端深さコンタ(右)と南北断面図(左)

震源モデルの作成と三次元有限差分法による強震動予測

ヤンゴン市近傍で発生した Bago 地震を調査した Tsutsumi and Sato(2009)と地震本部の強震動予測レシピを使用して震源モデルを作成した。

強震動波形の計算には防災科学技術研究所が公開している三次元有限差分法解析プログラム GMS を用いた。計算されたヤンゴン大学グラウンドでの速度波形とそのフーリエスペクトルを図 2.6 に示す。計算された速度波形の最大値は 15cm/s 程度であった。

今回のシミュレーションに使用した震源断層のアスペリティサイズが相対的に大きかったので、それだけ短周期地震動の発生が少なく、地震波があまり地盤の影響を受けなかった。今後は統計的グリーン関数法とのハイブリッドを行い広周波数帯域の予測を実施していきたい。

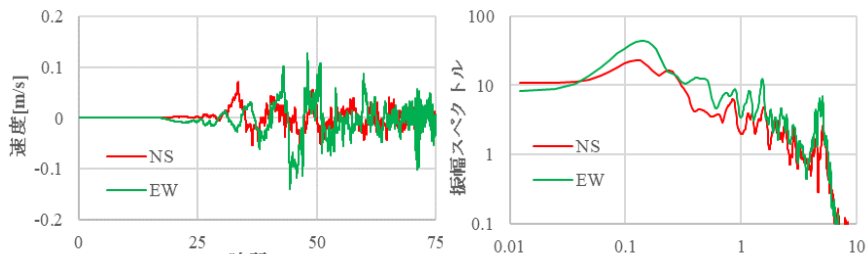


図 2.6 ヤンゴン大学グラウンド地点で計算された強震動波形とそのフーリエスペクトル

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Phyoe Swe Aung, H. Kawase, S. Matsushima, F. Nagashima, Tun Naing, and Myo Thant (2018). Evaluation of Deep S-wave Velocity Profiles in Sagaing City, Myanmar from Long-Period Microtremor Array Records, DPRI Annual Report, No.61B (CD-ROM) (査読なし).

〔学会発表〕(計 7 件)

Phyoe Swe Aung, 川瀬博, 松島信一: Single and Array Microtremor Measurements to Estimate the Shear Wave Velocity Structures in Sagaing City, Myanmar, 2016 年日本建築学会大会, 2016 年 8 月 1 日 ~ 8 月 1 日, 札幌, 構造 II, 1103-1104, 2016.08.

Myo Thant, (他 5 名略), H. Kawase, S. Matsushima, (他 2 名略): The Updated Seismic Models of Myanmar, GeoMyanmar 2018 3rd International Congress on Geology, Resources, Geo-hazards of Myanmar and surrounding regions, Yangon, Myanmar, 2018.1.

松下隼人・松島信一: ヤンゴン市における推定地下構造モデルの再検討, 日本建築学会 2018 年度大会 (東北) 学術講演梗概集, B-2, 597-598, 2018.9.

Matsushita, H., S. Matsushima, (他 2 名略), H. Kawase, (他 2 名略): Estimation of the Three-Dimensional Subsurface S-wave Velocity Structure in Yangon City, Myanmar, using Microtremor Data, International Workshop on Geohazard Risk Mitigation in Myanmar, 15-16 October 2018, University of Yangon, Myanmar, 2018.10.

松下隼人・松島信一・川瀬博・Tun Naing・Myo Thant・Phyoe Swe Aung: ヤンゴン市において再推定した地盤構造を利用した強震動予測, 日本地震学会 2018 年度秋季大会講演予稿集, S15-02, 2018.10.

松下隼人, 松島信一, 川瀬博, Phyoe Swe Aung, Tun Naing, Myo Thant: ヤンゴン市における推定地盤構造を考慮した強震動予測, 第 15 回日本地震工学シンポジウム, 2018.12.

松下隼人, 松島信一, 川瀬博: ヤンゴン市における推定三次元地盤構造と震源の不確実性を考慮した強震動予測, 日本建築学会大会, 2019/9/16 ~ 18, 金沢, 2019.09 (掲載確定).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 松島 信一

ローマ字氏名: Shinichi Matsushima

所属研究機関名: 京都大学

部局名: 防災研究所

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 30393565

研究分担者氏名: 長嶋 史明

ローマ字氏名: Fumiaki Nagashima

所属研究機関名: 京都大学

部局名: 防災研究所

職名: 特定助教

研究者番号 (8 桁): 70793537

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: ミョ・タント (Yangon 大地質学部)

ローマ字氏名: Myo Thant

研究協力者氏名: ツン・ナイン (Yangon 工科大応用地質学科)

ローマ字氏名: Tun Naing

研究協力者氏名: ピョー・スウエ・アウン (East Yangon 大地質学部)

ローマ字氏名: Phyoe Swe Aung

研究協力者氏名: 伊藤恵理 (京都大学防災研究所)

ローマ字氏名: Eri Ito

研究協力者氏名: 松下隼人 (京都大学工学研究科)

ローマ字氏名: Hayato Matsushita

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。