

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月18日現在

機関番号：32644

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：16H05651

研究課題名(和文) 噴火が迫るタールおよびマヨン火山のマグマ・熱水システムの解明

研究課題名(英文) Elucidation of magmatic and hydrothermal systems of the highly eruptive Taal and Mayon volcanoes

研究代表者

長尾 年恭 (Nagao, Toshiyasu)

東海大学・海洋研究所・教授

研究者番号：20183890

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：フィリピンのタール火山およびマヨン火山の総合的な研究を行い、特にタール火山について地震学・電磁気学・測地学・地球化学分野で総合的な観測・解析を実施した。その結果、タール火山の浅部に、大きな熱水だまりあるいはマグマだまりと思われる構造がある事が判明した。

また複数地点における火山ガスの観測から、噴気の化学組成は協調して変動していることが見いだされた。さらにフィリピンでは1990年代に重力測定が行われて以降、重力の専門家が存在しない状況であり、そのため、タール火山で重力測定を実施し、重力基準点を再設定した。電磁気観測では、群発地震活動に伴う見かけ比抵抗変化を確認する事に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

タール火山は国際火山学及び地球内部化学協会(IAVCEI)によりdecade volcanoと呼ばれる極めて活動的な活火山であり、首都マニラにも近く、多くの観光客が訪れており、観光客の安全という意味からも極めて重要な火山である。今回の海外学術調査で極めて大きなマグマあるいは熱水だまりが確認され、また脱ガスのメカニズムについても火山ガスの成分モニタリングで一定の知見を得る事に成功した。さらに現地に専門家がほとんどいない分野であった重力測定・解析や火山ガスのサンプリングに関する技術移転も行い、フィリピンの火山監視における人材育成に大きく貢献できたと考えている。

研究成果の概要(英文)：We conducted multidisciplinary research on Taal Volcano and Mayon Volcano in the Philippines and carried out comprehensive observation and analysis in the fields of seismology, electromagnetics, geodesy, and geochemistry, in particular, for Taal Volcano.

As a result, we found that there was a large hydrothermal reservoir or a magma reservoir in the shallow part of Taal Volcano. In addition, from the observation of volcanic gas at multiple sites, it was found that the chemical composition of the gas is changing in coordination.

In the Philippines, there is no expert of gravity survey which was performed in the 1990s. Therefore, gravity measurement was carried out at Taal Volcano and a gravity reference point was re-established. In electromagnetic observation, we succeeded in confirming the apparent resistivity change associated with the swarm activity.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：タール火山 フィリピン 地震活動 電磁気観測 火山ガス マヨン火山

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

1. 研究開始当初の背景

タール火山は火山学で最大の国際組織である IAVCEI (国際火山学及び地球内部化学協会)により Decade Volcano と呼ばれる世界で最も活発な火山の一つと指摘されている。

このような背景もあり、IUGG 傘下の「地震・火山に関する電磁現象ワーキンググループ(EMSEV)」では 2005 年からフィリピン火山学・地震学研究所(PHIVOLCS)をカウンターパートとして実施された国際共同研究を推進してきた。さらに平成 21(2009)年度に JST と JICA が共同で実施する SATREPS も採択された(研究代表者:井上 公)。

2. 研究の目的

本研究では近い将来に噴火の可能性が高いフィリピンのタール火山およびマヨン火山のマグマ・熱水溜りの 3 次元構造を地震学的・測地学的・電磁気学的・火山化学的手法を駆使して解明し、噴火準備過程の理解と噴火予測精度の向上を図る事を目的とした。

3. 研究の方法

SATREPS での研究により、タールのマグマ・熱水システムに関して 2 つの仮説が提案されている。一つは熱水溜りが火口の直下に発達しているというもの、もう一つは火口の東斜面浅部に脱ガスを起こしているマグマが存在するというものであった。前者は電磁気学的な比抵抗構造探査から、後者は地震波の S 波減衰構造から推定されたものである。これらの結果はタールの次の噴火を予測する上で重要な意味を持つ。前者は火口からの水蒸気噴火の可能性、後者は側面からのマグマ噴火の可能性を示唆するからである。タールのこの 2 つの仮説に関して、地震・重力・GPS・電磁気学、火山化学的手法を用いて検証を進めた。

4. 研究成果

現地調査等

地震学分野では、振幅情報を用いた震源決定(ASL)法によるタール火山の監視システムの高度化を進めた。また ASL 法で用いられている S 波の等方輻射の仮定が、火山における非常に強い構造不均質性による地震波散乱によって成り立っていることを、タール火山の観測点配置を用いた波形シミュレーションおよび理論的考察から明らかにした。さらにこれらの考察に基づき、タール火山の散乱構造の推定を行った。重力分野では、日本からラコスト・ロンバーグ重力計を持ち込み、タール火山島での重力測定を実施した。また重力異常を求めるためには地形補正を行う必要があり、そのために 3 次元地形データの作成を開始した。地球化学分野では、水蒸気、炭酸ガス、硫化水素ガスなどの多成分計測のための噴気のサンプリングを実施した。今後採取法を含め、現地観測者への技術移転も視野に入れて今後の計測を実施した。

平成 30 年 1 月の訪問時にはマヨンの噴火が開始し、日本が本科学研究費採択の前に実施していた SATREPS で整備した GNSS 地殻変動データに典型的な山体の膨張が捉えられていた。

地震学的な進展としては、火山においては流体の移動を伴う火山活動によって短波長の散乱特性が変化しやすい。そこで高周波の地震波形を解析し散乱構造の推定をタール火山で初めて試みた。その結果、タール火山の散乱特性が時間的にも空間的にも一様ではないことを示唆する結果が得られた。火山ガス測定から窒素とヘリウムの比は典型的な沈み込み帯の火山に特有な値である事が分かった。また硫化水素の濃度が増加する傾向のある事が判明した。

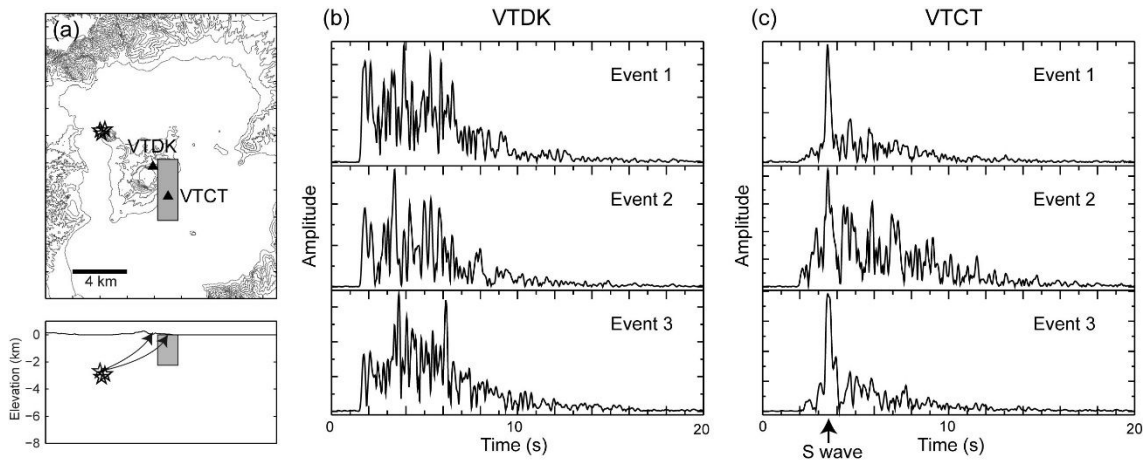
平成 30 年度には、地震学的研究ではタール火山で発生した火山構造性地震の高周波エンベロープ波形を用いて同火山の散乱構造を推定した。火山ガス観測では噴気の化学組成は協調して変動していることが見いだされた。特に噴気に含まれる H₂O の安定同位体比から噴気の形成モデルを推定した。1: マグマから放出された高温のガスと海水が混合し 300 度 C の一次蒸気が生成する。2: 一次蒸気はタール山の火口湖水と混合し、100 度 C の二次蒸気を生成する。3: 二次蒸気の一部が地表に現れて火口湖の岸に見られる噴気を形成、また火口湖の岸から外輪山側に向かって離れた場所で放出している勢いの強い噴気は一次蒸気の可能性が存在する。電磁気観測においては、繰り返し磁気測量を行うとともに、2015 年初頭に、タール火山で発生した群発地震の間に火山島南西部の 3 成分磁力計によって顕著な比抵抗変化が確認され、この変化を過去の事例と比較解析を実施した。群発地震は電磁気学的に求められていた熱水貯留層と考えられる地域で発生していた事が判明した。

以下に個別の項目に関する研究成果を列記する。

地震

タール火山で発生した火山構造性地震の高周波(5-10 Hz)エンベロープ波形を用いて同火山の散乱構造を推定した。その結果、散乱の強い層は地表から深さ約 1 km までという薄い表層のみに存在し、それ以深では通常の地殻とほぼ同様の構造を持つことが分かった。さらにタール火山島に存在する地震波の減衰領域を通過する散乱波が、一ヶ月という短時間で変動することを発見した。先行研究から、この減衰領域には脱ガスを起こしているマグマが存在すると考えられている。散乱波シミュレーション波形と観測波形を比較した結果、この散乱波の変動は脱ガスに伴うマグマの不均質性の変動を捉えていると解釈できることを示した。マヨン火山は 2018 年 1 月に噴火が発生した。これらの噴火に伴う微動を収録することができ、噴火規模

と微動との関係を探るデータが得られた。

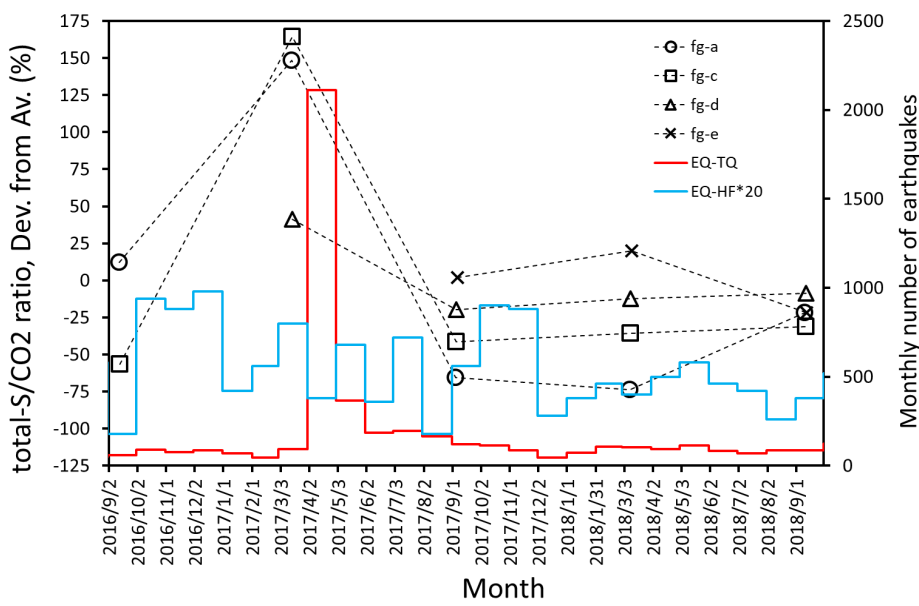


(a) タール火山における地震波減衰領域(灰色)と地震観測点(VTDKとVTCT)の位置。星は3つの地震(Event 1: 2012年5月15日、Event 2: 2012年6月25日、Event 3: 2012年11月25日)の震源位置。(b) VTDK と(c) VTCT における3つの地震の高周波数帯(702 Hz)のエンベロープ波形。VTDKでは3つの地震で似た波形を示すのに対して、減衰領域を伝播したVTCTではEvent 2で波形の特徴が大きく異なっていることが分かる。

火山ガス

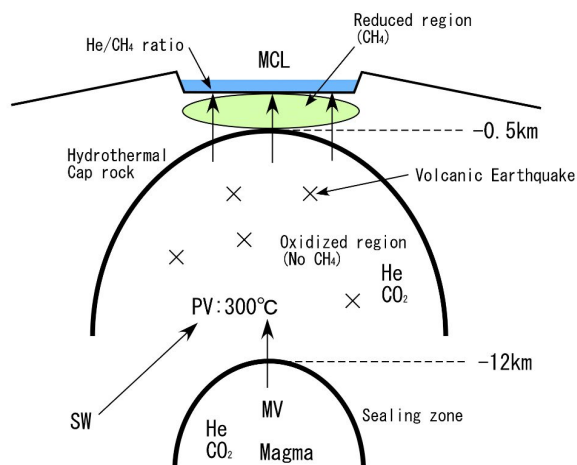
タール山において5ヶ所の噴気孔で噴気を繰り返し採取・分析した。その結果、噴気の化学組成は協調して変動していることが見いだされた。噴気に含まれるH₂Oの安定同位体比から噴気の形成モデルを以下の通り推定した。マグマから放出された高温のガスと海水が混合し300の一次蒸気が生成する。一次蒸気はタール山の火口湖水と混合し、100の二次蒸気を生成する。二次蒸気の一部が地表に現れて火口湖の岸に見られる噴気を形成する。火口湖の岸から外輪山側に向かって離れた場所で放出している勢いの強い噴気は一次蒸気かも知れない。

次の図は total-S/CO₂、He/CH₄ 比の時間変動を示す。これらの比は、各噴気孔で絶対値が大きく異なるため、これらの図では、各噴気孔の比の平均値からの偏差を%で表示している。ここで total-S は噴気に含まれる H₂S と SO₂ の合計で、SO₂ は H₂S に比較し顕著に少ないので実質的に H₂S に相当する。この図から、各噴気孔の比が協調して変動していることが注目される。これらの変動の協調性は、各噴気の起源となっているタール山のマグマ熱水系に変動が起因することを示唆する。



Total-S/CO₂ 比の時間変動。各噴気孔の比の平均値からの偏差(%)を縦軸に取る。赤線はタール山周辺で観測されたテクトニックな地震の月別回数、青線はタール山の直下で観測された火山性地震の月別回数(20倍)を示す。

次に示す図はタール山のマグマ熱水系の概念的なモデルである。タール山の直下では火山性地震は地下 12 km よりも深い場所ではほとんど起きておらず、12km 以深にマグマが存在するのではないかと推定される。既存の MT 法による比抵抗分布の研究を参考にすると、タール山の浅部にはキャップロックが存在する。マグマから放出された高温のガス (MV) が海水 (SW) と混合し、一次蒸気 (PV) を形成され、これがキャップロックにより保持されていると考えられる。PV はキャップロックの亀裂を通じて上昇し、湖水 (LW) と接触し噴気を形成すると考えられる。



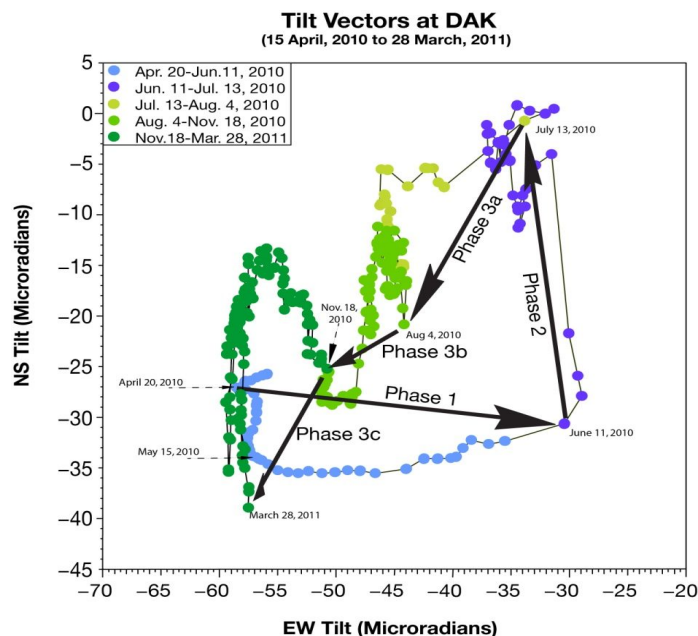
タール山のマグマ熱水系概念図

電磁気

電磁気観測はタール火山を対象として実施した。毎年繰り返し磁気測量を実施したほか、3次元インバージョン解析の技術移転を実施し、現地研究者で独自に解析できるよう人材育成を実施した。その結果、2015年の地震活動活発化に伴う、明瞭な見かけ比抵抗の変化を抽出する事に成功した。

研究期間中には全磁力および3成分地磁気の連続観測を良好な状態で維持するとともに、2010年4月の地震活動活発化に伴う各種解析を実施した。具体的には2010年4月にタール火山において突然地震活動が高まり、全島民が島外に避難する事件があった。地震活動は翌年3月頃まで3回のピークを観測した。我々のグループでは自然電位と地温、傾斜および全磁力の連続観測を実施していた。

次の図は火山島の北中部の DAK における傾斜ベクトルの変化である。



この図から、フェイズ 1 (2010年4月20日から6月11日まで)の時期に DAK では大きく東へ傾動し、フェイズ 2 (6月11日から7月13日まで)では北に傾き、フェイズ 3 (7月11日から2011年3月28日まで)ではほぼ元の位置に回復している事がわかる。しかしこの時期には2回南北に大きな傾動の繰り返しがみられた。この地殻変動の力源の水平位置を次に示した。

フェイズ 1 では DAK の西の深さ 5km に回転楕円体状の膨張力源が発生、フェイズ 2 で DAK の南深さ 2.5km の位置に上昇した。さらに主火口直下の深さ 2.5km を中心に直径約 3km の熱水溜

り存在する (MT 観測によって判明) ので、地殻変動の原因である火山性流体が熱水溜りに流入して膨張・収縮を繰り返して、最後には主火口湖から放出されたと考えられる。このフェイズ 3 の時期における膨張・収縮に対応して、主火口湖の湖面から大量の CO₂ ガスが放出されたことが観測されている。熱水溜りの膨張・収縮は非凝縮性の CO₂ ガスが原因と考えられる。

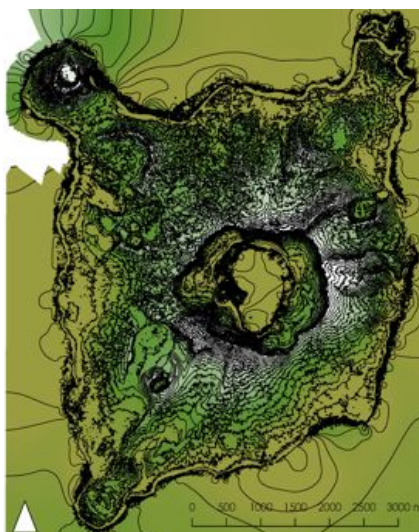
重力・地形

平成 28 年度には、ラコスト・ロンバーグ地震計を日本から持ち込み、重力測定を実施した。同時に地形探査も実施した。

現在、フィリピンには重力測定の専門家がおらず、今回の科研費では人材育成のための重力セミナーも平成 29 年度にケソンシティの PHIVOLCS で実施した。そのため、今回の測定では、重力基準点の確立も大きな目的であった。

今回重力測定を実施するにあたり、地形補正に必要な精密な地形図の入手が困難である可能性が存在した。そのため独自にプロジェクトとして地形図の作成を試みた。

今日、複数の視点から撮影された画像から、撮影場所ならびに被写体の三次元形状を復元する SfM-MVS (Structure-from-Motion Multi-View Stereo: 多視点ステレオ写真測量) 技術が確立され、様々な分野で利用されてきている。近年では操縦が容易になり、また安価な小型 UAV (small Unmanned Aerial Vehicle, 通称ドローン) が登場し、ドローンの機動性と SfM-MVS 技術を組み合わせた地形測量が頻繁に行われるようになってきた。本研究では、重力探査を実施する際に必要となる地形データの取得を目的として、Taal 火山においてドローンを用いた地形測量を行った。



5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

Morioka, H., H. Kumagai, and T. Maeda, Theoretical basis of the amplitude source location method for volcano-seismic signals, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, 6538-6551, 2017. DOI 10.1186/s40645-017-0130-0.

Kumagai, H., J. Makario Londno, Y. Maeda, C. Mauricio Lopez Velez, and R. Lacson Jr, Envelope widths of volcano seismic events and seismic scattering characteristics beneath volcanoes, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 9764-9777, 2018. doi:10.1029/2018JB015557

Zlotnicki, J., G. Vargemezis, M. J. S. Johnston, Y. Sasai, P. Reniva, P. Alanis, Very-low-frequency resistivity, self-potential and ground temperature surveys on Taal volcano (Philippines): Implications for future activity, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 340, 180-197, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.04.020>

Zlotnicki, J., Y. Sasai, M. J. S. Johnston, F. Fauquet, E. Villacorte and J. M. Cordon Jr., The 2010 seismovolcanic crisis at Taal Volcano (Philippines), *Earth, Planets and Space*, 70:159, 1-23, 2018, <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0925-2>

[学会発表] (計 18 件)

熊谷博之, ロペス・クリスチャン, 前田裕太, 森岡英恵, ロンドニョ・ジョン, 火山性地震のエンベロープ幅から推定される火山の散乱・減衰特性, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 05 月 22 日~2016 年 05 月 26 日, 幕張メッセ, 千葉.

新納美穂, 熊谷博之, 高周波地震波振幅を用いた震源決定法の適用条件: タール火山における平均自由行程・非弾性減衰と S 波等方輻射の関係性, 日本火山学会秋季大会, 2017.

新納美穂, 熊谷博之, タール火山(フィリピン)における地震波散乱特性の時空間分布とマグマ活動との関係, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018.

Kumagai, H., J. M. Londono, Y. Maeda, Cristian M Lopez, Rudy Lacson, Characterization of the envelope widths of volcano-seismic events and their use to investigate scattering structures beneath volcanoes, AGU Fall Meeting 2018 (国際学会), 2018.

Niino, M. H. Kumagai, Temporal variations in seismic scattering characteristics in a shallow S-wave attenuation region at Taal volcano, Philippines, AGU Fall Meeting 2018 (国際学会), 2018.

笹井洋一, ポール・アラニス, 長尾年恭, ジャック・ズロトニツキ, マルコム・ジョンストン, フィリピン・タール火山における最近の静穏状態と電磁気観測から推測される新たな活動?, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張メッセ, 千葉.

Sasai, Y., P.K.B. Alanis, T. Nagao, J. Zlotnicki, M.S.S. Johnston, PHIVOLCS EM team, Monitoring of Taal volcano, Philippines, by geomagnetic observations, EMSEV 2016 (国際学会), 2016 年 08 月 25 日~ 2016 年 08 月 29 日, Lanzhou, China.

Zlotnicki, J., Y. Sasai, M. Johnston, G. Vargemezis, PHIVOLCS EM (E. Villacorte, P. Reniva, P. Alanis, Juan M. Gordon Jr) Team, Taal volcano in Philippines: What is the future?, IAVCEI2017 (国際学会), 2017.

大場武, 火山ガスの化学組成および安定同位体比の変動から火山活動を評価する試みについて 箱根山, 霧島硫黄山, 草津白根山, タール山の事例, 気象研談話会, 2018.

大場武, 沼波望, 笹井洋一, M. C. L. Barairo, P. Alanis, 楠本成寿, 長尾年恭, フィリピン・タール火山の噴気組成から推測される最近の火山活動, 日本火山学会 2017 年秋季大会, 2017.

Ohba, T., M. Yaguchi, M. Numanami, M. C. L. Barairo, P. Alanis, M. A. Bornas, S. Kusumoto and T. Nagao, Time variation in the chemical and isotopic composition of fumarolic gases at Taal volcano, Philippine, IAVCEI-CVL10 Workshop, 2019.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 大場 武

ローマ字氏名: (OHBA, Takeshi)

所属研究機関名: 東海大学

部局名: 理学部

職名: 教授

研究者番号(8桁): 60203915

研究分担者氏名: 熊谷 博之

ローマ字氏名: (KUMAGAI, Hiroyuki)

所属研究機関名: 名古屋大学

部局名: 環境学研究

職名: 教授

研究者番号(8桁): 10343758

研究分担者氏名: 楠本 成寿

ローマ字氏名: (KUSUMOTO, Shigekazu)

所属研究機関名: 富山大学

部局名: 大学院理工学研究部(都市デザイン学)

職名: 教授

研究者番号(8桁): 50338761

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 笹井 洋一

ローマ字氏名: (SASAI, Yoichi)