

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 5 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2012～2015

課題番号：24404010

研究課題名(和文)メラピ火山2010噴火に伴う流域の水文環境変化と土砂災害に関する調査研究

研究課題名(英文) Study on change in hydrological response of catchment to deposition of pyroclastics and occurrence of sediment disaster after 2010 eruption of Mt. Merapi in Indonesia

研究代表者

権田 豊 (GONDA, Yutaka)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：10303116

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：2010年の噴火後に土石流(ラハール)が頻発したインドネシア・メラピ火山において、現地調査を実施した。現地調査の結果と数値解析による予測結果を比較した結果、ラハールの氾濫箇所を予測するためには、精度の高い地形データの取得とラハールの流量の適切な予測が重要であることが分かった。噴火後は流域の地表の状態の変化にともなってラハールを発生させる降雨の条件や、発生するラハールの流量が経年的に変化する。ラハールの流量を適切に予測するためには、ラハールの流出率と流域の地表の状態の関係を定量的に評価することが必要である。

研究成果の概要(英文)：Field surveys were conducted around Mt. Merapi, where lahars occurred frequently after the 2010 eruption. Results of numerical simulation of lahar inundation conducted by changing combination of data set component and those of field survey were compared. As a result, it was confirmed that the resolution of the DEM is the most important factor to estimate inundation area by lahar simulation and that the peak discharge and total volume of lahar hydrograph at inflow point of numerical simulation is the second most important factor. It was observed that the rain fall intensity causing lahar and magnitude of lahar changes as time passed after the eruption. Therefore, to estimate appropriate magnitude lahar for the lahar inundation simulation, relationship between ground surface condition of the drainage area and runoff ratio of lahar to rainfall should be quantified

研究分野：砂防工学

キーワード：火山 ラハール 河床変動 インドネシア メラピ火山 シミュレーション 火砕流 水文観測

1. 研究開始当初の背景

(1)2010年の10月から11月にかけてインドネシア・メラピ火山は1872年以來という大規模噴火 (VEI=4) を起こした。その結果、これまで380人近くの人命が失われ、一時40万人近い人々が避難し、現在も雨期の土石流災害 (2次災害) の発生が懸念されていた。

(2)火山噴火の際には、火砕流の流下、火砕物の堆積による火山帯の地形・水文特性の変化、土石流 (ラハール) の発生などの現象が複合的に発生する。従来、個別の現象に着目した基礎研究がすすめられ、各現象のシミュレーション手法が開発されてきたが、火砕物の運搬・堆積過程と堆積火砕物の流域水文特性や堆積土砂の再移動過程に及ぼす影響が明らかにされておらず、各現象のシミュレーションを連携させ、火山噴火後に複合的に発生する土砂災害を予測するのが困難な状況にある。

(3)近年、自然災害研究、土砂災害研究の中で複合災害に関する研究の重要性が認識されつつある。その中で複合性の評価と災害予測、その防災情報化が課題となっている。

2. 研究の目的

(1)本研究では、2010年のインドネシア・メラピ火山噴火に伴う火砕物の堆積分布、流域水文特性の変化、土石流の発生と流下・堆積、河床変動の調査を経年的に実施し、流域モデルでそれらの結果を再現することにより、災害予測に必要な情報と、その情報を取得する時期、手法について検討する。

(2)災害発生時に発信された防災情報と住民の避難行動、火砕流、土石流・洪水による住民被害の実態を調査し、適切で効果的な警戒避難に必要な防災情報のあり方を検討する。

3. 研究の方法

(1)2010年の噴火で火山灰が降下堆積し、ラハールによる砂防施設等の被害が大きく、その上1990年代の平穏期に水文調査が実施されているPutih川流域と、2010年の噴火で火砕流が流下し多数の被害者を出し、流域に大量の火砕物が残されているGendol川流域を、調査対象地とした。

(2)噴火後の流域の水文特性、火砕性堆積物の侵食と土砂流出、河床変動の経時変化、及びそれらの相互関係を知るため、①噴火直後の火砕物の堆積状況、②降雨流出過程、③河床・河道形状の時系列変化を調査した。さらに火山噴火による水文特性の変化を明らかにするため、④1984年～1993年にPutih川流域で実施された水文観測結果と比較した。また、これらの現象の時系列変化を総合的に理解するため、⑤2流域の流域モデルを構築し諸現象の時系列変化の再現を試みた。

(3)噴火による直接的災害と二次災害の時系列変化に着目し、⑥火砕流災害と警戒避難、⑦噴火以降の雨期の土石流・洪水災害と警戒避難の実態を調査した。また、警戒避難に関しては、その基となる⑧災害予測に着目し、手法を含む実態を調査し、①～⑤の結果と合わせ、災害予測と防災情報化、伝達方法上の問題点を抽出した。

4. 研究成果

(1)噴火の際に、火砕流が流下したGendol川の中～上流域では、河道内は20m程度の厚さで火砕物が堆積したが、河道兩岸の段丘部では火砕物の堆積厚は数10cmから1m程度であった。噴火の際に、Putih川の下流～中流部では数cm、上流部では10cm以上の火山灰が堆積した。Gendol川、Putih川の双方で噴火直後には、堆積物の表面に透水性の低いクラストが形成されたものと推測されるが、2012年の乾期 (5月～9月) の調査時には、既に堆積物の表面には地表流によりリル・ガリーが形成されていた。微高地にはクラストが残存していたが、Putih川ではクラストを貫通するようにススキ類が目を出し始めていた。残存したクラスト表面、クラストが浸食された地表面、噴火前の地表面で透水試験を実施した結果、両河川ともクラストが浸食された地表面と噴火前の地表面の透水性は同程度であり、クラストの透水性はそれらの約1/10と小さかった。2013年の9月の調査時には、Putih川上流域ではススキ類が繁茂しクラストが残存する箇所はわずかであった。Gendol川ではススキ類はあまり生えていなかったがクラストが残存する箇所はほとんど無かった。クラストが浸食された地表面の透水性は2012年と同程度で、その値は2013年以降も変化しなかった。

(2)Putih川では、上流のG. Maronに2011年12月に再設置された雨量計、中流のNgeposのPUC11砂防堰堤付近に2011年1月に設置されたIPカメラの画像、2012年11月にNgepos橋付近に設置された超音波水位計のデータを手直しし、降雨の特性、土石流の発生頻度、規模を解析した。Gendol川については、上流のKaliademに2012年1月に設置された雨量計、下流のTempuran付近に2012年12月に設置された超音波水位計のデータを手直し・解析したが、測器の不調によりデータの信憑性が低かったため、新聞記事を収集し土石流の発生頻度を調べた。その結果、両河川ともに雨期 (10月～4月) には、1ヵ月で約400-600mmの降雨があること、降雨は2時間～4時間程度の短い時間に降雨が集中する特徴があり、最大降雨強度は40-60mm/hであることがわかった。また、Putih川、Gendol川ともに噴火直後の雨期 (2010年10月～2011年4月) には土石流が頻発し、その規模も大きかったが、年々、土石流の頻度・規模が減少し、噴火から3年後の雨期 (2013年10月

-2014年4月)には土石流はほぼ発生しなくなった。

(3)Putih 川、Gendol 川において 2013 年～2015 年の乾期 (8 月～9 月) に電子コンパス内蔵レーザレンジファインダーを用いて縦横断測量を実施した。2010 年以前に撮影された ALOS Prism センサーで撮影された衛星画像から作成した DEM (15m メッシュ)、2012 年に実施された航空レーザ測量成果から作成した DEM (5m メッシュ) から縦・横断面を作成し、河床縦・横断形の経年的に比較した。その結果、Putih 川では噴火前と比べ、2012 年は平均 4.5m 河床が低下、2012 年～2013 年は平均 4.3m 河床が低下しているが、2013 年～2015 年ではほとんど変化はなかった。噴火前後特に変化が大きかったのは、測量区間の上流端から約 1km 下流までと、PU-C9 から PU-D2 の区間であった。上流については、この周辺の土砂がラハールとして下流へ流出したためと考えられる。下流については PU-C9 から PU-D2 の間の堰堤が連鎖的に破壊されたためであり、この時に約 90 万 m³ の土砂が流出した。2012 年～2013 年にかけて砂利採取により河床は低下したが、2013 年から 2015 年にかけてはあまり砂利採取が行われなかったようで、目立った河床変動は見られなかった。Gendol 川では噴火前と比べ、2012 年は平均して約 8m 河床が上昇している。2012 年～2013 年では平均して約 7.3m 河床が低下しており、特に 2010 年の火砕流により埋没した GE-D5 砂防堰堤周辺から上流側が 8～20m と大きく河床が低下していた。2013 年～2015 年では全区間で平均すると約 2.1m と河床低下は小さいが、上流域では 10m 以上河床が低下している箇所もあった。この期間にラハールがほとんど発生しておらず流水による土砂移動量も多くないことから、多くないと推測されることから、河床変動を引き起こした主要因は砂利採取であると推測される。

(4)1990 年代初頭の火山活動の平穏期に Putih 川中流に前出の PU-C11 砂防堰堤の直上流の PU-D1 砂防堰堤で観測されている水位データと、Putih 川上流の G. Maron で観測されている雨量データを比較し、ラハールが発生しなかった場合の一連続降雨のデータを抽出し、連続降雨内の 10 分間雨量 R10 と当該の R10 までの累加雨量 $\Sigma R10$ の関係をグラフにプロットした。同様に、噴火翌年の雨期 (2011 年 12 月～2012 年月) の PU-C11 砂防堰堤の IP カメラの画像と、G. Maron で観測されている雨量データを比較し、R10 と $\Sigma R10$ の関係をグラフにプロットし、平穏期と噴火直後のラハールの非発生降雨を比較した。その結果、1990 年代初頭と比べ、噴火直後はデータの分布の上限が低くなっていた (図 1)。これは、2010 年の噴火後は、噴火前と比べ小さな雨量で土石流・洪水流が発生するようになったことを意味している。噴火後の降雨の

流出率の経年変化の傾向を明らかにするために、Putih 川上流に火砕流が流下しラハールが頻発した 1985 年～1990 年の期間を対象に、G. Maron における降水量と PU-D1 における水位データから、一雨毎の流出率を算出した。その結果、年間の最大流出率は 85 年の 11.7 から 8.5, 4.4 と年々減少し 88 年以降はほぼ 0.0 となった (図 2)。流出率が 1 以上ということは、流域に降った雨水の量よりも流域から流出する雨水の量が大いことを意味している。流出率がこのように著しく大きくなる現象は、メラピ山の他の河川でも観測されているものの (例えば、泰ら (1997))、その原因は解明されていない。

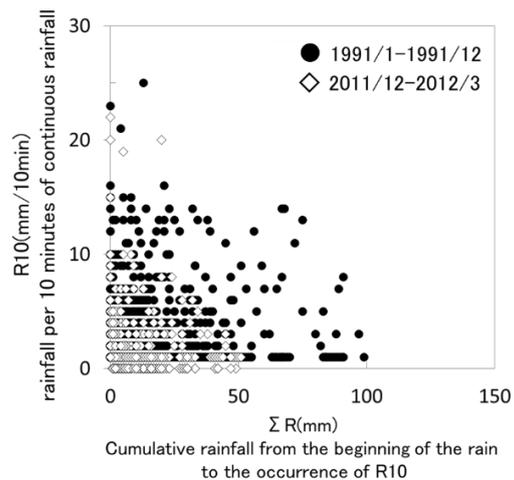


図 1 ラハールの非発生降雨の比較

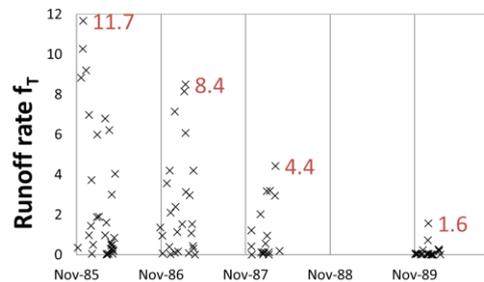


図 2 ラハールの流出率 f_r の経年変化

(5)Putih 川上流の縦横断測量の開始地点から下流の主要幹線道路であるジョグジャカルターマゲラン国道付近までの区間と、Gendol 川上流の縦横断測量の開始地点から下流の Opak 川との合流地点付近までの区間を対象に、2010 年の噴火直後の雨期を想定したラハールの氾濫計算を一次元および二次元の二通りの数値計算手法により実施し、氾濫予測に適した計算手法について考察した。なお、地形データには、2012 年の航空レーザ測量のデータより作成した DEM を用いた。また、既往研究をもとに想定した簡易な降雨波形を、繰り返したハイトグラフを作成した。これを合理式により変換したものを河道上流端からの流入ハイドログラフとして用いた。Gendol 川では、Opak 川と Gendol 川の合流地点でラハールが氾濫する結果が 1 次元、

2次元の両方の数値計算で再現された。しかしPutih川では、二次元計算では下流域の国道周辺(計算区間の下流端から5000m付近)およびSirahan地域(下流端から1500m付近)が計算開始約1ヶ月後までに河床上昇しラハールが氾濫する現象を再現できたものの、1次元計算では両地域で氾濫の原因となる河床上昇が再現できなかった(図3, 4)。国道およびSirahan地域でPutih川の河道は屈曲しているが、一次元計算ではこういった平面的な河道の線形は考慮できないことが、両地点で河床変動が生じなかった主な原因と考えられる。一次元計算と二次元計算を比較すると計算に必要なデータ数は一次元計算のほうが少なく、地形データの取得が容易ではない途上国においては有効な手法と考えられる。しかし一方で、一次元計算では湾曲部等の河道の線形の影響を考慮出来ないため、河床変動の正確な予測ができない場合があり、このような箇所では二次元計算が有効である。したがって、全区間を一次元または二次元で計算するのではなく、どちらの長所も活かせるように、例えば谷部分を一次元計算とし、扇状地部分は二次元計算を行う結合モデルを用いることが必要と思われる。

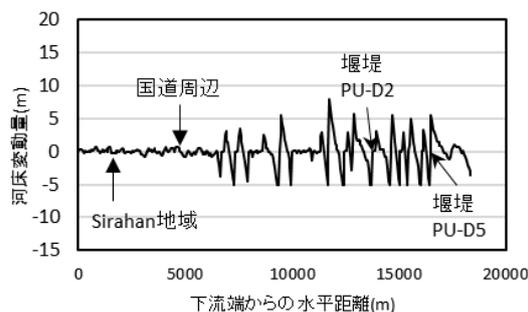


図3 一次元計算の一月後の河床変動

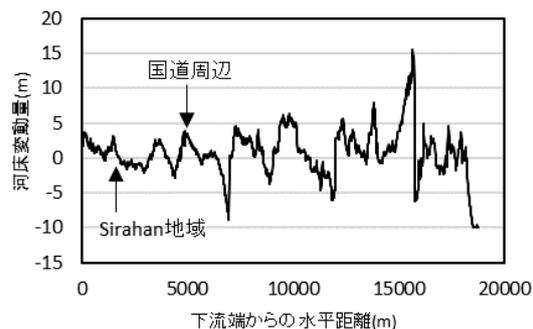


図4 二次元計算の一月後の河床変動

二次元計算モデルを用いて、各種計算パラメータや計算に用いるデータの種類の計算結果に及ぼす影響の大きさを検討したところ、二次元計算で特に重要となるのは地形データであり、次点では上流端からの流入流量であった。その他のパラメータについては、推定される氾濫範囲に多少の違いが生じるものの、上記二つに比べると与える影響は小さかった。これらの結果を受け、地形データとして2012年の航空レーザ測量のデータを与

え、二次元計算により2013年以降の河床変動や氾濫状況の再現を試みたが、Putih川、Gendol川ともに2013年以降はラハールが殆ど発生しておらず、数値計算では土砂移動量は非常に小さく、河床変動はほとんど生じない結果となった。これは2013年以降の河床変動が主に砂利採取であることを裏付ける結果と考えられる。

(6)火砕流や降灰による熱傷により約400名の犠牲者が出たが、いづれで何名が被災したのか記録が残されていない場合が大半であった。2010年10月26日に最初の火砕流が発生し、Gendol川に沿って7.5km流下した際には、26名の死者がでていた。この日は、火山危険度レベルが最高レベルのAWASに引き上げられ、避難開始直後であったことなどにより、避難が遅れ、災害に巻き込まれたものである。また、11月5日に今回の噴火で最大規模となる火砕流(火口から17km地点まで到達)が発生した際にも、スレマン県チャンクリンガン集落を中心に64名の死者、77名の重軽傷者がでていた。この集落は、11月3日に火口より10kmから15kmへと拡大された避難勧告地域にあり、住民は勧告地域外に一度は避難したものの、家畜の世話のため一時帰宅をしていた。火砕流の発生が深夜であり、住民は自宅で就寝中だったことも被害を大きくした原因と考えられる。

(7)Gendol川は、現地での聞き取り調査、新聞記事からの情報収集結果によれば、噴火から数ヶ月間はあまりラハールが発生せず、2011年1月過ぎからラハールの発生頻度が高くなった。Opak川とGendol川の合流地点付近では2月中旬にはラハールが氾濫した。Putih川では、2010年11月以降、雨が降る度にラハールが頻発した。両河川の中流から下流にかけては、ラハールの氾濫による被害を受けている。特にPutih川の国道との交差点、その下流のSirahan地区では、12月末から河床上昇が著しくなり、1月には複数回にわたりこれらの地点でラハールが氾濫した。また上流域では、11基の砂防施設が被災し、そのうち3基は主堰堤が破壊された。2011年の雨期(2011年10月~2012年4月)のラハールの発生件数はGendol川では前年の雨期よりも増加し、Putih川では減少し、両河川がほぼ同数となったが、2012年の雨期以降は両河川とも数回程度に急減し、2014年の雨期にはラハールは発生しなかった。2010年の噴火以降中~下流域で護岸堤防の嵩上げや河道掘削、地域住民による砂利採取が急速に実施されたため2011年の雨期以降は顕著な氾濫は生じなかった。

(8)数値計算による氾濫範囲の予測には精度の高い地形データ(DEM)とラハールの流量の設定の仕方が重要であることが示された。途上国においては経済的な理由により航

空レーザ測量等の高精度の測量を頻繁に行うことが難しい。さらに、火山噴火時には火砕物の堆積により、平穏期には地域住民の砂利採取により河床形が短時間に大きく変化する可能性があることを考えると、噴火前のある時点で精密な地形測量を実施し、その後は河道内を中心に地形測量を定期的に行い、地形データを更新するのが現実的な方法だと考えられる。また、地形測量の範囲を減らしデータ収集の省力化を図るために、計算区間を一次元および二次元の区間に分割し計算する結合モデルを用いることが望ましいが、そのためには一次元と二次元の計算領域を合理的に決定する方法を確立する必要がある。ラハールの流量と流域に降った降雨の比である流出率が1よりも大幅に大きくなる場合があること、流出率が経年的に減少していくことが本研究により示された。流出率が過大になる現象については、流出率がどの程度の値になるのか観測データを蓄積するとともに、そのメカニズムを解明していくことが必要である。また、流出率の変化と上流域の地表の状態の変化(クラストの形成、植生の繁茂等)には相関があると考えられ、その定量的な評価が今後の課題である。

(9) メラピ火山南側の3県(Sleman県、Klaten県、Megelan県)を対象に、火山噴火の際の警戒避難情報とその後に引き起こされるラハールによる災害に関する警戒避難情報の伝達経路について調査を行った。火山噴火の際の警戒避難情報については、火山観測所(BPPTKG)が発信する情報に基づいて住民へ警戒避難命令を出すという点は3県で共通していたが、命令を出す主体がSleman県とMegelan県では区長、Klaten県では地域防災局(BPBD)と異なっていた。またそれぞれの県で情報が複数の仲介者を経て伝達されるため、情報の伝達が遅滞する、伝達過程で情報の変質が生じるといった危険性があることがわかった。ラハールによる災害に関する警戒避難情報については、各県のBPBDが警戒避難命令を出すという点は3県で共通しているが、BPBDが警戒避難命令を発令するために参考としている情報源が異なっており、県によっては命令を発令する明確な基準が存在しなかった。客観的で統一された判断基準の確立が望まれる。またKlaten県では命令が住民に伝達される経路が2重に存在するため、Megelan県では、BPBDの他に、BPPTKGからも避難命令が伝達されるため、住民に混乱を引き起こす可能性があることがわかった。発令された警戒避難情報に対して住民がどのように対応したのかについては、火山噴火、ラハール災害ともに十分な記録が残っていなかった。適切な情報発信のあり方を検討するためにもこういった記録を残す必要がある。

<引用文献>

①秦耕二, 杉浦信男, 笹原克夫 (1997) 1997

年1月17日のメラピ火山噴火について(速報), 砂防学会誌, Vol. 50 No. 1, p. 81-83

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計9件)

①山田孝, 佐野泰志, 三重県藤原岳西之貝戸川における土石流発生プロセスとメカニズムを解明するための現地観測, 砂防学会誌, 査読有, 68(5), 2016, 69-75

②Mizumoto, T., Gonda, Y., The effect of calculation condition on the results of the two-dimensional simulation, Journal of the Taiwan Disaster Prevention Society, 査読有, 7(1), 2015, 43-50

③鈴木拓郎, 堀田紀文, 土石流の構成則に基づいた粒子法モデルの構築と堆積過程への適用, 砂防学会誌, 査読有, 68(1), 2015, 13-24

④経隆悠, 堀田紀文, 鈴木拓郎, 地形条件が土石流の数値シミュレーションに及ぼす影響, 砂防学会誌, 査読有, 68(1), 2015, 3-12

⑤Miyata, S., Fujita, M., Teratani, T., Tsujimoto, H., Flash flood due to local and intensive rainfall in an alpine catchment, Proceedings of the INTERPRAEVENT2014 in the Pacific Rim, 査読有, 0-33, 2014, 1-8

⑥Gonda, Y., Legono, D., Sukatja, B., Santosa, U., B., Debris flow and flash flood at Putih river after the 2010 eruption of Mt. Merapi, Indonesia, International Journal of Erosion Control Engineering, 査読有, 7(2), 2014, 63-68
DOI: <http://doi.org/10.13101/ijece.7.63>

⑦Miyata, S., Fujita, M., Teratani, T., Tsujimoto, H., Osaka, T., Application of rainfall radar and runoff model to volcanic mountain watersheds, Proceedings International Seminar on Water Related Disaster Solutions, 査読有, 1巻, 2013, 1-6

⑧Gonda, Y., Legono, D., Sukatja, B., Santosa, U., B., Debris flow and flash flood at Putih river after the 2010 eruption of Mt. Merapi, Indonesia, Proceedings International Seminar on Water Related Disaster Solutions, 査読有, 1巻, 2013, 471-480

⑨宮田秀介, 藤田正治, レーダ雨量を用いた流出シミュレーションと桜島における土石流発生溪流への適用, 京都大学防災研究所年報, 査読有, B, 2013, 457-464

[学会発表] (計5件)

①水本智博, 権田豊, 火山噴火後に降雨を起因として発生するラハールの被害予測手法に関する研究, 平成28年度砂防学会研究発表会, 2016年5月18日-2016年5月19日, 富山県民会館(富山県・富山市)

②Mizumoto, T., Gonda, Y., Study on minimum data set required for debris-flow

and flood hazard assessment after a volcanic eruption using numerical simulation, 6th International conference on debris-flow hazards mitigation; Mechanics, Prediction and assessment, Tsukuba, Japan, 2015年6月22日-2015年6月25日, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市)

③ Yamada, T., House damage due to hot ash clouds from pyroclastic flow main body occurred at the Cangkringan district of Kuning river basin, Mount Merapi Volcano in 2010, CITIES ON VOLCANOES 8, Living in Harmony with Volcano: Bridging the will of nature to society, 2014年9月9日-2014年9月13日, Yogyakarta (Indonesia)

④ Gonda, Y., Legono, D., Sukatja, B., Santosa, U., B., Debris flow and flash flood at Putih river after the 2010 eruption of Mt. Merapi, Indonesia, International symposium on sediment disaster under the influence of climate change and tectonic activity (3rd), 2013年9月26日-2013年9月27日, 京都大学防災研究所 (京都府・宇治市)

⑤ Miyata, S., Fujita, M., Teratani, T., Tsujimoto, H., Osaka, T., Application of rainfall radar and runoff model to volcanic mountain watersheds, International Seminar on Water Related Disaster Solutions, 2013年9月5日-2013年9月7日, Yogyakarta (Indonesia)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

権田 豊 (GONDA, Yutaka)
新潟大学・自然科学系・准教授
研究者番号: 10303116

(2) 研究分担者

堀田 紀文 (HOTTA, Norifumi)
筑波大学・生命環境科学研究科 (系)・准教授
研究者番号: 00323478

山田 孝 (YAMADA, Takashi)
三重大学・生物資源学研究科・教授
研究者番号: 20333635

沼本 晋也 (NUMAMOTO, Shinya)
三重大学・生物資源学研究科・准教授
研究者番号: 60324555

宮田 秀介 (MIYATA, Shusuke)
京都大学・防災研究所・助教
研究者番号: 80573378

(3) 連携研究者

宮本 邦明 (MIYAMOTO, Kuniaki)

筑波大学・生命環境科学研究科 (系)・教授

研究者番号: 00263492

藤田 正治 (FUJITA, Masaharu)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号: 60181369