

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560594

研究課題名(和文)土水連成土石流モデルを用いた砂防構造の耐衝撃性照査法の高度化

研究課題名(英文)Improvement of the impact resistant verification method of Sabo structures by debris flow particle models

研究代表者

別府 万寿博(Beppu, Masuhiro)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工・その他部局等・教授)

研究者番号：90532797

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、土石流を受ける砂防えん堤の破壊挙動を評価するため、粒子法を用いた土石流モデルの提案および構造モデルの衝撃応答解析の高度化を試みたものである。粘性型および石礫型土石流については、それぞれ粘塑性体であるビンガム流体および水と礫粒子でモデル化する方法を提案した。また、乱流型土石流による衝撃荷重を再現するため、乱流モデルを考慮したMPS法を開発した。これらの衝撃的荷重を解析的に評価するとともに、土石流荷重を砂防堰堤へ作用させて耐衝撃性を検討した。

研究成果の概要(英文)：This study evaluated impulsive and impact loads generated by debris flow and interactive behavior of sabo dam wings by using particle method and finite element analysis. The mudflow and gravel cobble flow including large rocks are modeled by bingham fluid and particle method with fluid and rigid particles, respectively. In addition, a particle method considering the turbulent flow was developed. The impulsive and impact loads due to the debris flows were assessed by the numerical models. Sabo structures were modeled by finite elements and simulated their impact resistant performance by acting the impulsive and impact loads.

研究分野：衝撃工学

キーワード：耐衝撃設計 土石流 粒子法 衝撃荷重

1. 研究開始当初の背景

急峻な山岳地帯の多い日本では、土石流が発生する危険性のある溪流が約8万箇所と非常に多いだけでなく、昨今の温暖化や気候変動による集中豪雨の発生頻度の増加にともない、土石流による深刻な被災が跡を絶たない。これまで、土石流の発生・流動メカニズムの解明は精力的に行われてきたが、土石流防災構造(砂防堰堤)の設計では、流体力と巨礫の衝突力を静的荷重に置き換えて行われており、土砂や礫・岩石を含む複雑な土石流を考慮した実現象に忠実なモデルによる砂防堰堤の構造性能照査法の検討はほとんど試みられていなかった。この数年、集中豪雨の多発や深層崩壊の発生など、土石流が大規模化する傾向が顕在化しており、衝撃的荷重を考慮した土石流荷重を受ける砂防堰堤の応答を解明し、合理的な設計手法を確立することが求められていた。

2. 研究の目的

本研究は、砂防堰堤の合理的な性能照査法を高度化することを目指し、土砂や岩石・礫を含む複数種類の土石流を粒子法でモデル化し、衝撃的流体力や礫衝突力の評価を行う。また、土石流荷重を砂防堰堤に入力して衝撃応答解析を行い、砂防堰堤の耐衝撃性能照査法を構築するものである。

3. 研究の方法

(1) 土砂と大小の礫を含む土石流の固液混相流解析法を開発し、粘性型土石流、乱流型土石流および石礫型土石流の流動シミュレーションを行い、衝撃荷重を評価する手法の構築を行う。

(2) 数値解析で得られた土石流荷重特性に基づいて、砂防堰堤の破壊シミュレーションを行い、砂防堰堤の耐衝撃性に関する性能照査法を確立する。

4. 研究成果

(1) 対象とした土石流の種類は、粘性型、乱流型および石礫型土石流とし、いずれも複雑な挙動を再現可能な粒子法(MPS法)によってモデル化した。粘性型土石流は、ビンガム流体を用いてモデル化した。図-1に、ダムブレイク問題に対して、ビンガム流体を適用した例を示す。図から、ビンガム流体をMPS法へ適用することで、粘塑性挙動を再現できることがわかる。図-2は、ビンガム流体でモデル化した土石流の流動解析結果を示す。図から、土石流が斜面に沿って流下し、最終的に下流側に設置した荷重出力用の壁に衝突している様子を確認することができる。図-3は、荷重出力用の壁で得られた荷重～時間関係を示している。図から、土石流が壁へ衝突すると瞬時に荷重が立ち上がり、その後一定の荷重へ収束していることがわかる。

乱流型土石流に関する実験や解析的な検

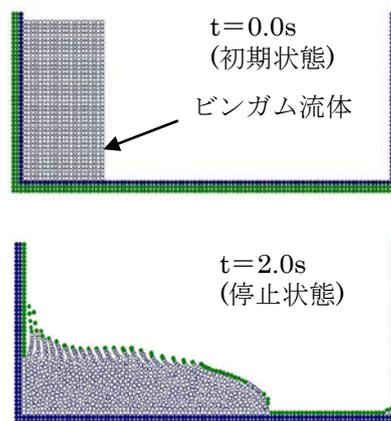


図-1 ビンガム流体の挙動
(粘着力 10kPa, 内部摩擦角 30°)

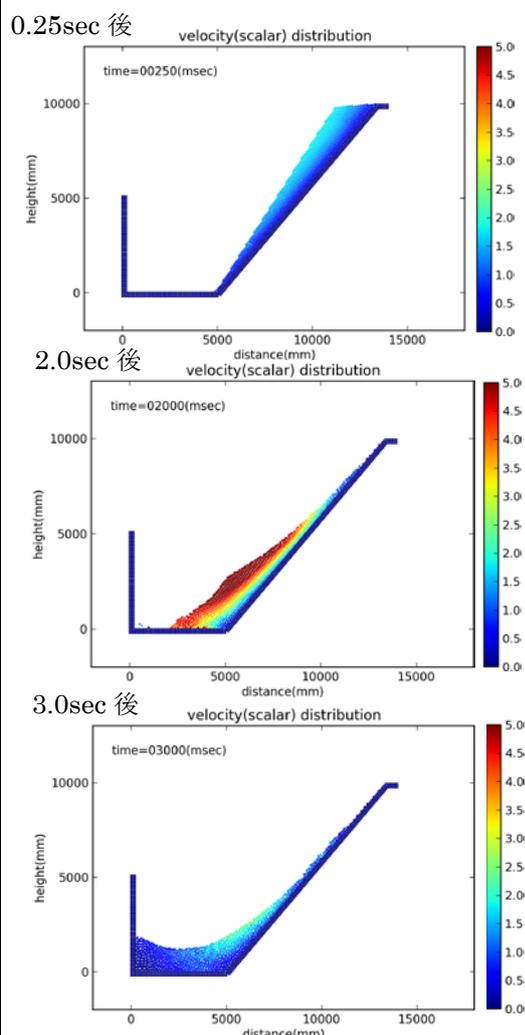


図-2 粘性型土石流の解析結果

討は少ないため、まず実験を行い衝撃荷重や乱流の特徴を調べた。実験装置は、図-4に示す長さ約4m、幅0.3m、高さ0.5mの勾配可変の直線水路である。なお、底面はステンレス製であり、側面はガラス製である。貯水槽内の水量は5.5ℓとし、三角形に貯留した後、ゲートを開放して流下させた。図-4に示すように、ゲートから下流側へ3.7mの位置に水平方向の荷重を測定できるロードセルを垂

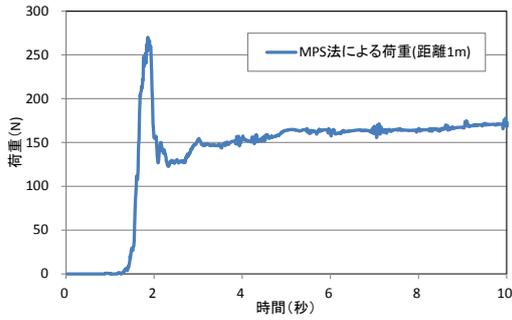


図-3 壁粒子における荷重～時間関係

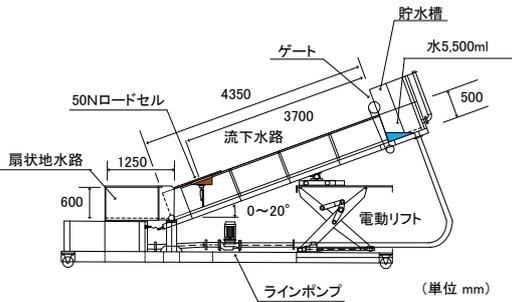


図-4 実験装置

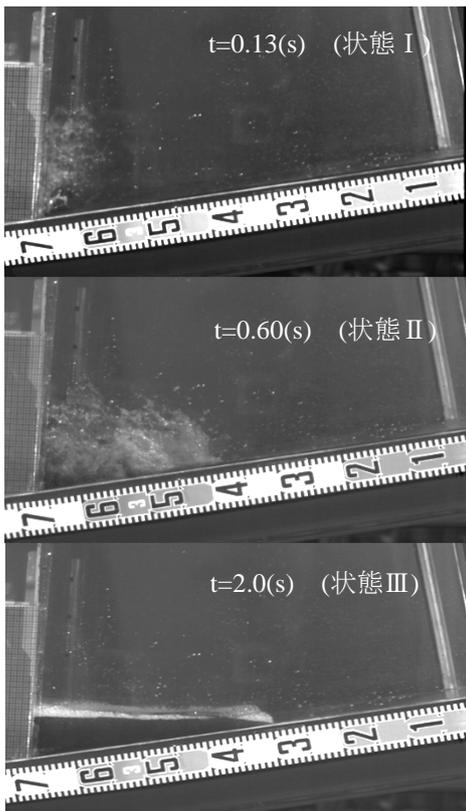


図-5 流水の挙動 (勾配 10°)

直に設置して荷重を測定した。また、流水の流速および水深を高速ビデオカメラで計測した。実験では、水路勾配を 5° から 20° まで 5° 刻みで変化させた。図-5 は、斜面勾配 10° の場合の流水の挙動を示している。図からわかるように、ある勾配以上になると流水が壁に衝突すると流水が向きを変化して乱れ場を形成することがわかる。

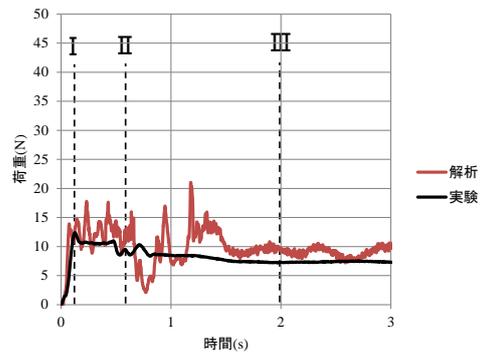


図-6 荷重～時間関係の比較

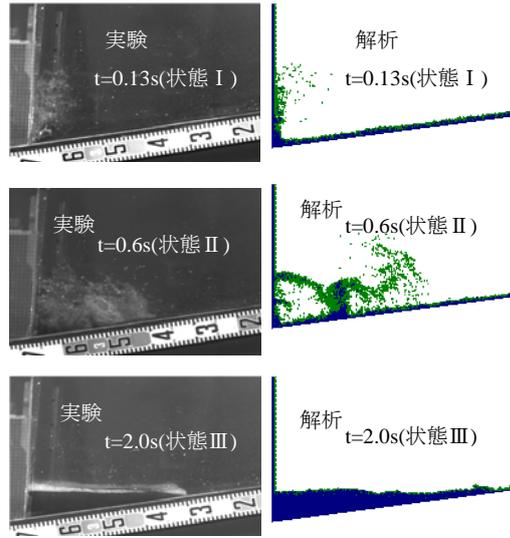


図-7 流動性状

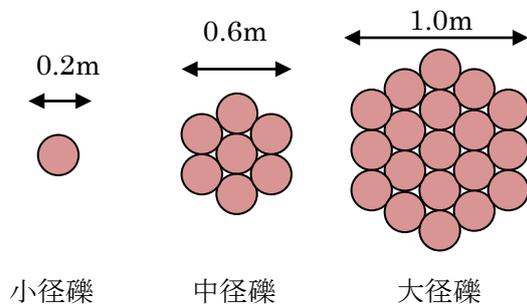


図-8 剛体の集合による礫のモデル化

図-6 は、乱流モデルとして LES (Large Eddy Simulation) の一つである Smagorinsky 渦粘性モデルを用いた場合の荷重～時間関係を示している。図から、提案した手法によって荷重～時間関係を良好に再現していることがわかる。図-7 は、解析で得られた流動状況を実験と比較している。この図からも、乱流モデルを用いることで、非常に複雑な流れを再現可能であることがわかる。

石礫型土石流については、礫は剛体粒子の集合体としてモデル化し、一例として図-8 に示すように直径 0.2m, 0.6m および 1.0m の 3 種類とした。これらの礫と流体粒子を混合することで、石礫型土石流モデルを作成した。図-9 に、石礫型土石流の解析モデルを示す。

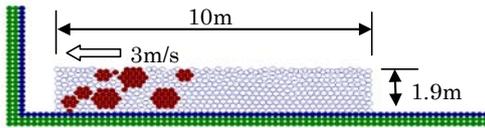


図-9 石礫型土石流モデル

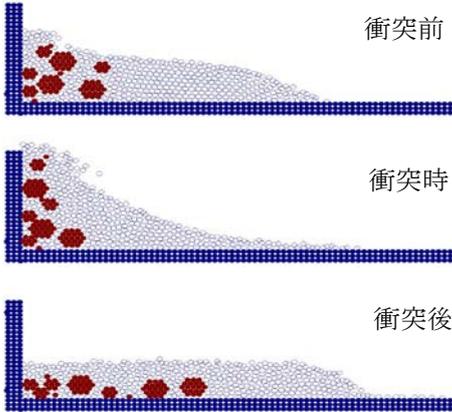


図-10 土石流の挙動

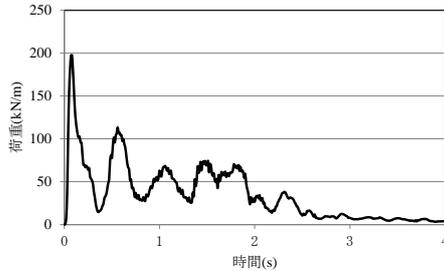


図-11 石礫型土石流の流体力(単位幅当り)

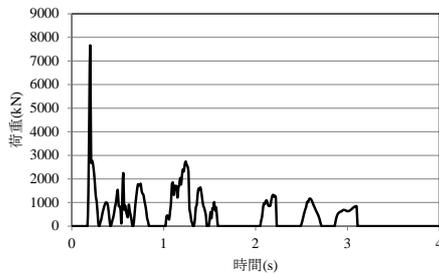


図-12 礫衝突荷重

泥流型土石流モデルは、幅 10m、高さ 1.9m の長方形でモデル化した。石礫型土石流モデルについては、泥流の先頭部に大径礫を 3 個、中径礫を 4 個、小径礫を 3 個の合計 10 個をランダムに配置した。図-10 に、石礫型土石流の挙動を示す。石礫群はほぼ同時に壁に衝突し、その後は逆流した泥流とともに流されている様子がわかる。図-11 に、石礫型土石流モデルの流体力～時間関係を示す。この荷重は、礫の衝突荷重を含んでいない流体力であり、壁の圧力から算出したものである。石礫型土石流モデルの場合、水深が高いことおよび流体が礫に拘束されるため、最大荷重が 200kN/m となった。図-12 に、石礫型土石流の礫衝突荷重～時間関係を示す。図の原点は、土石流が壁に衝突した時刻を示している。

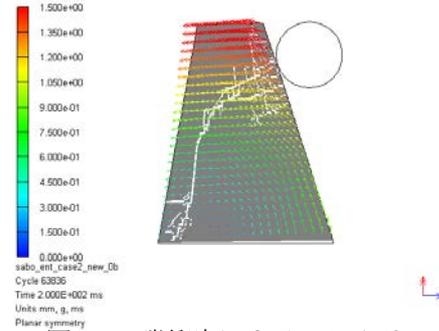


図-13 礫衝突によるコンクリート

堰堤の破壊状況

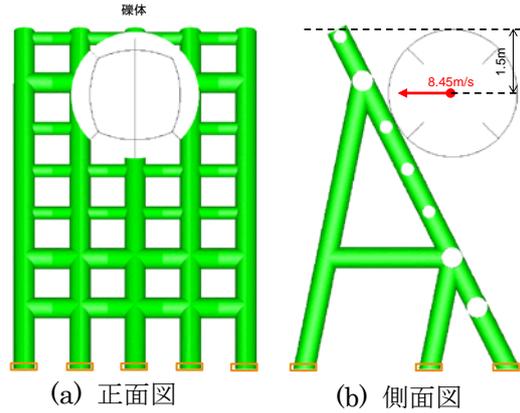


図-14 礫衝突に対する解析モデル

図-10 からわかるように、石礫群がほぼ同時に壁に衝突しているため、礫衝突荷重は初期に最大約 7500kN もの大きな値を示した。また、最初の衝突以降も礫同士が衝突や土石流の流れの影響によって 1000kN～3000kN の衝突荷重が生じていることがわかる。

(2) 上記で求めた極めて大きな土石流荷重については、解析では各種条件で算出することが可能であるが、統計的データが不足しているため、現行の設計の中で考慮することが難しい。そこで、安定計算による安全限界程度の極めて大きな土石流荷重（流体力および礫衝突）を設定し、コンクリートおよび鋼製透過型砂防堰堤の耐衝撃性について数値シミュレーションを行った。以下では、解析の例として、大規模土石流発生時の礫衝突に対する砂防堰堤の破壊性状を示す。

安定計算により安全限界となるような荷重として、土石流流体力は 583.5kN/m と設定した（土石流のピーク流量 638m³/s、土石流の流れの幅 15m、土石流径深 5.04m、土石流水深 5.04m、流速 8.45m/s）。また、礫衝突については、礫の直径を 3m、衝突速度は 8.45m/s とした。

図-13 に、礫衝突を受けるコンクリート堰堤の破壊状況を示す。図から、安定限界時の礫衝突荷重の場合、堰堤基部が引張破壊することで抵抗力を失うとともに、堰堤全体にせん断破壊が発生していることがわかる。鋼製堰堤については、図-14 に示すような実規模の堰堤をモデル化した。解析結果を図-15 に

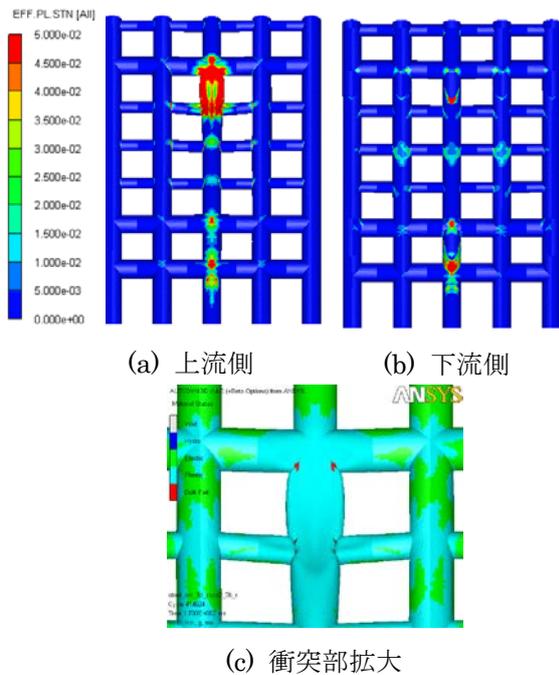


図-15 礫衝突に対する塑性ひずみ分布

示す。図から、礫衝突部において大きな塑性ひずみが発生することがわかる。また、下流側の斜材と上流側の部材が交差する位置や斜材が支えている点が支点となつてたわみ変形が大きい位置に、ひずみが集中することがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ①金子鉄兵、別府万寿博、MPS法による衝撃的流体力の数値シミュレーションに関する検討、構造工学論文集、査読有、60A巻、2014、pp. 1074-1081
- ②浅井光輝、藤本啓介、田邊将一、別府万寿博、階段状の非適合境界を有する粒子法解析における仮想マーカーを用いたすべり・非すべり境界処理法、査読有、2013、No. 20130011
- ③金子鉄兵、別府万寿博、香月智、急勾配水路実験による流体衝撃力特性に関する基礎的研究、構造工学論文集、査読有、59A巻、2013、pp. 1056-1064

[学会発表] (計16件)

- ①M. Beppu, T. Kaneko, N. Ishikawa, T. Mizuyama, Numerical simulation of debris flow model by using DEM-MPS method, Proceedings of 6th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, 2015. 6. 25, Tsukuba (Japan)
- ②J. Shima, I. Takeda, R. Matsuzawa, M. Beppu, N. Ishikawa, T. Mizuyama, Failure mechanism of concrete Sabo Dam by rock impact, Proceedings of 11th International

Conference on Shock and Impact Loads on Structures, 2015. 4. 15, Ottawa (Canada)

③松澤遼、別府万寿博、嶋丈示、石川信隆、水山高久、極めて大きな礫衝突を受けるコンクリート砂防堰堤の耐衝撃性に関する解析的検討、平成 27 年度砂防学会研究発表会、平成 27 年 5 月 20 日、栃木県総合文化センター (栃木県・宇都宮市)

④別府万寿博、松澤遼、嶋丈示、石川信隆、水山高久、極めて大きな土石流荷重を受ける鋼製透過型堰堤の耐衝撃性に関する解析的検討、平成 27 年度砂防学会研究発表会、平成 27 年 5 月 20 日、栃木県総合文化センター (栃木県・宇都宮市)

⑤N. Ishikawa, R. Matsuzawa, T. Shibata, T. Kaneko, M. Beppu, T. Mizuyama, The effects of low velocity impact on concrete dams, Proceedings of 3rd International Conference on Protective Structures, 2015. 2. 4, Newcastle (Australia)

⑥石川信隆、金子鉄兵、別府万寿博、コンクリート砂防堰堤への礫衝突に関する一考察、第 11 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム、平成 26 年 10 月 21 日、土木学会 (東京都・新宿区)

⑦石川信隆、金子鉄兵、別府万寿博、水山高久、土石流中の巨礫を受けるコンクリート砂防堰堤袖部の衝突荷重と破壊について、平成 26 年度砂防学会研究発表会、平成 26 年 5 月 29 日、朱鷺メッセ (新潟県、新潟市)

⑧別府万寿博、金子鉄兵、石川信隆、水山高久、DEM-MPS法による石礫型土石流の荷重評価に関する検討、平成 26 年度砂防学会研究発表会、平成 26 年 5 月 29 日、朱鷺メッセ、(新潟県、新潟市)

⑨金子鉄兵、別府万寿博、松澤遼、伊東雅晴、低速度衝突を受ける鉄筋コンクリート版の局部損傷シミュレーション、土木学会第 41 回関東支部技術研究発表会、平成 26 年 3 月 13 日、まちなかキャンパス長岡 (新潟県、長岡市)

⑩金子鉄兵、別府万寿博、MPS法による衝撃的流体力の評価に関する基礎的検討、土木学会第 68 回年次学術講演会、平成 25 年 9 月 5 日、日本大学 (千葉県、船橋市)

⑪ T. Kaneko, M. Beppu, Numerical simulation of the impulsive fluid force of steep slope channel test by MPS method with turbulent model, Proceedings of 10th International Conference on Shock and Impact Loads on Structures, 2013. 10. 26, Singapore (Singapore)

⑫館澤寛、別府万寿博、後藤公輔、MPS法による法面崩壊シミュレーション、平成 25 年度砂防学会研究発表会、平成 25 年 5 月 30 日、静岡市民文化会館 (静岡県、静岡市)

⑬別府万寿博、石川信隆、水山高久、斜面崩壊による天然ダム段波津波に関する粒子法シミュレーション、平成 25 年度砂防学会研究発表会、平成 25 年 5 月 30 日、静岡市民

文化会館（静岡県、静岡市）

⑭井上隆太、石川信隆、別府万寿博、水山高久、土石流モデルによる鋼製砂防堰堤モデルへの動的応答シミュレーション、平成 25 年 5 月 30 日、静岡市民文化会館（静岡県、静岡市）

⑮金子鉄兵、別府万寿博、香月智、急勾配水路実験による衝撃的流体力の粒子法シミュレーション、平成 25 年 5 月 30 日、静岡市民文化会館（静岡県、静岡市）

⑯金子鉄兵、別府万寿博、香月智、MPS法による流体衝撃力の評価に関する基礎的研究、土木学会第 40 回関東支部技術研究発表会、平成 25 年 3 月 15 日、宇都宮大学（栃木県、宇都宮市）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

別府 万寿博 (BEPPU MASUHIRO)

防衛大学校・システム工学群・教授

研究者番号：90532797

(2) 研究分担者

園田佳巨 (SONODA YOSHIMI)

九州大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：40304737

(3) 研究分担者

前田健一 (MAEDA KENICHI)

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：50271648

(4) 研究分担者

浅井光輝 (ASAI MITSUTERU)

九州大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：90411230