

令和元年6月10日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H01797

研究課題名(和文)大規模天然ダム決壊危険度評価法の高度化と災害軽減対策への適用

研究課題名(英文)Risk assessment of large scale landslide dams and disaster mitigation

研究代表者

王 功輝 (WANG, Gonghui)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：50372553

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 27,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は天然ダムの内部構造を解明し、天然ダム安定性評価及び対策工法を開発する。高精度表面波や微動アレイ及び電気探査を行い、大規模天然ダムの内部構造を調べた。人工ダムを用いた室内と現地実験を行い、ダムの決壊機構及び急速な決壊を避ける対策工法について調べた。山地斜面における地震観測を行い、地震時天然ダムの形成危険度調査を実施した。天然ダムの形成と破壊を予測する数値シミュレーション手法をも開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ダム堤体に対する統合的な物理探査による堤体内部構造の調査及び撥水剤の注入によるダム堤体における急速な決壊過程を避ける手法の開発は、世界的に見てもバイオニアワークとしての独創性を有している。また、種々の条件下で形成された天然ダムの安定性及び決壊後の被害影響範囲などを事前分析してデータベース化しておくことは、緊急事態における的確な対応策の策定に貢献できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：This project aims at developing new techniques with higher reliability for the landslide dam stability assessment and disaster mitigation. To archive these, we made detailed field survey on some large landslide dams by using multichannel analysis of surface waves, microtremor array measurement, and electrical resistivity topography. We conducted laboratory and field experiments to examine the failure mechanisms of landslide dams, and we found that the failure mechanism depends greatly on the permeability of the dam, water head and also the water gradient within the dam. Adding water-repellent solution to the dam may retard the seepage within the dam and then lower the risk of speedy collapse. We also analyzed the potential landsliding body during earthquake in a large reactivated landslide for the risk assessment of large landslide dam during earthquake. Further, we developed a new simulation technique for predicting the formation and failure of landslide dams numerically.

研究分野：防災科学

キーワード：天然ダム 危険度評価 内部構造 決壊機構 物理探査 遠心載荷実験 地震動観測 対策工法

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

地すべりや大規模斜面崩壊等による崩壊土砂が河道を閉塞し、天然ダムを形成することが国内外問わず数多く存在している。このような天然ダムは構造的に脆弱であり、自重や越流水により容易に崩壊し、湛水した河川水とともに一気に流下し、甚大な二次災害を引き起す場合もある。時として地域の伝統物や歴史文化を廃滅することもある（例えば、1889年の十津川災害）。このような二次災害の発生を防止し、被害を最小限に局限するためには、天然ダム形成直後より、決壊危険度を的確に評価し、迅速かつ適切な緊急対策を実施することが不可欠である。

一方、これまで実際の天然ダムがどのように形成したか、またどんな状態で決壊したか、特に決壊する前のダムの挙動に関する詳しい研究がなかったため、天然ダムに対する決壊危険性を十分に認識したもの、応急対策が実施された天然ダム堤体においても決壊するケースが少なくない。また、最近の調査研究により、大規模天然ダムの決壊危険度を評価するためには、天然ダムの地域性や特異性および物性変化特性を考慮しなければならないことが分かった。しかし、大規模天然ダムの堤体物性を的確に把握するための現地調査や詳細な計測は希である。

また、天然ダム形成後に、越流侵食・決壊の防止対策として、排水路の設置が緊急対策工の工法として一般的に採用されているが、上述したように、排水路が設置されても、天然ダムが決壊するケースが少なくない。天然ダム堤体における越流侵食→決壊といった事態を回避し、ダム堤体が河川の営力により徐々に侵食されて消滅するといった全く新しい対策理念と工法の開発が必要となる。

2. 研究の目的

異なる地質・地形背景と形成原因および形成プロセスで形成された大規模天然ダムの堤体内部構造およびその変化機構を解明すると共に、より信頼性の高い天然ダム安定性評価および災害軽減手法を開発する。具体的には実施する研究は以下の通りである。

- ① 大規模天然ダムに対する現地調査と現地計測を実施し、発生条件・運動プロセスが異なる天然ダム堤体の内部構造およびその時間的変化を解明する。
- ② 室内および現地実験を実施し、異なる内部構造を有するダム堤体の安定性および決壊過程を解明する。
- ③ ダム堤体の越流→決壊を防ぐため、越流→侵食→穏やかな堤体の自然消滅過程を辿る新たな対策工法を開発する。
- ④ 現地観測・調査の結果に基づいて、地域特性を考慮した天然ダムに適用できる新しい危険度予測法および災害軽減対策を開発し、実用化させる。

3. 研究の方法

本研究に用いた方法は以下である

- ① 日本国内外で発生した大規模天然ダムに関する現地調査及び事例研究を実施し、高精度表面波探査、微動アレイ探査および電気探査を用いて、異なる地質・地形背景および運動条件下で発生する地すべりにより形成された天然ダムの内部構造を調べる。
- ② 遠心載荷試験および大規模現地試験による天然ダムの決壊実験を行い、異なる幾何特徴および土層構造を持つダムの決壊機構を解明する。
- ③ 高撥水性地盤改良剤の注入によるダム越流侵食決壊防止対策効果の検証および手法の開発を行う。

4. 研究成果

1) 高密度物理探査による天然ダム堤体の内部構造に関する調査研究

2011年十津川豪雨災害時に発生した長殿大規模天然ダムにおいて、地質調査、高精度表面波探査、微動アレイ調査及び高密度電気探査を実施し、ダム堤体の内部構造を調べた。

ダム堤体の天端において高精度表面波探査を実施した結果、堤体上層5-15mの土層がそのVs値が低く、軟質なシルトや礫混じり粘土から成ると推測される。それより下部の土層は、Vs

が大きいと推測される。堤体の表層部では対策工事が実施されており、速度構造がほぼ水平であることより、上流側から下流側にかけて水平な土層構造を呈していると考えられる。また、ダム堤体の縦横断方向計4測線に沿って電気探査を行った。得られた比抵抗分布図（図1）と表面波探査の結果が既存のボーリング調査の結果と調和的であり、これらの物理探査を用いた統合的な調査方法の有効性

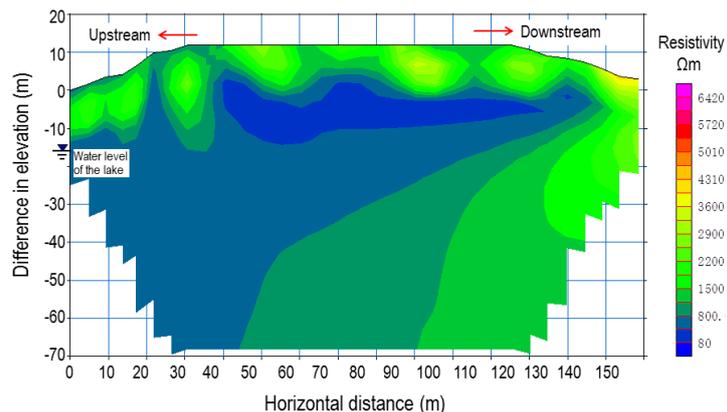


図1 ダム堤体において実施した電気探査の結果

を検証した。

上記した統合的な調査方法を用いて、2008年中国四川大地震時に形成された唐家山および東河口天然ダムに対して、ダム堤体の内部構造を調べた。また、地すべり土塊の運動過程と内部構造との関係を分析した。

2) 急勾配河川に形成された天然ダムの決壊機構に関する実験的研究

急勾配河川に形成された天然ダムの破壊機構を解明するために、堤体模型を水槽内に作成し、この堤体を構成する材料、堤体内部の初期飽和度、および水槽傾斜角度を変化させ、ダム上流部の水位上昇による堤体の破壊実験を実施した。これにより、湛水池の水位の上昇やダム堤体の破壊に伴う堤体内部における水分・水圧の変化、堤体土層の変位、および破壊様式の関係から、天然ダムの破壊機構について検討した。本研究を通じて以下の点が解明された。

- (1) 天然ダムの崩壊形式は、越流による侵食破壊、後退性崩壊による地すべり性破壊、及びダム堤体が一体となって滑る一体型地すべり性崩壊の3種類であった。そのうち後退性崩壊による地すべり性破壊は粒径が粗い珪砂7号とテフラの場合に認められ、一体型地すべり性崩壊は粒径が細かい珪砂8号の場合のみ認められた現象であった。このような違いは透水係数あるいは細粒分の含有量の違いによるものと推察した。
- (2) テフラを使用した実験において、水槽の傾斜角度を10°と15°の2ケースの変位計データを検討したところ、前者より後者の場合における崩壊土塊の移動速度が速かった。
- (3) 破壊面の発達過程を堤体内部における間隙水圧の変化から解明した。即ち、後退性崩壊および一体型崩壊において、間隙水圧の上昇が開始するとともに、せん断変形が発生し、下部へ変形が伝達された後に上部へ転じ、天端にクラックが生じた。その後、地すべり性崩壊が発生することが見いだされた。
- (4) 特に、先行して発生した崩壊によりダム堤体内部では新たに別の箇所の間隙水圧の上昇が開始され、これが次の崩壊を引き起こす原因であることが解明された。このことは、崩壊域の拡大を検討するうえでは、新たに間隙水圧が上昇する箇所の有無を把握することが重要であることを意味する。

3) 模型実験による天然ダムの耐侵食性に関する検討

本研究では、模型水路内で疎水処理条件を変えた天然ダム堤体に対する破壊実験を行い、堤体の破壊形態および侵食状況の違いについて検討した。実験には、傾斜を5°に設定した土層に、砂質の堤体を作成し、堤体には、ひずみ計や変位計および間隙水圧計を設置した。また、水路の下流側で容器を用いて流量と流出土砂量の計測を実施した。堤体は、異なる濃度の撥水剤で疎水処理を行った珪砂で作成された。堤体が作成された後に、天端の上流側から注水を行い、ダム湖の水位の上昇や越流の発生などに伴うダム堤体の変形・決壊過程を計測した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 疎水処理なしの実験に比べて疎水処理を行った実験では、崩壊までに要する時間が長くなるが、土砂の流出量多くなる傾向が認められる。
- (2) 疎水処理の溶剤濃度が高いほど越流開始から崩壊発生までに要する時間が長く、実験開始から流出終了までに要する時間が長い。
- (3) 疎水処理なしの堤体では、越流水の流下直後より法肩が侵食され、その後、階段状に侵食され短時間で崩壊に至る。また、疎水処理を施した実験において、すべりによる崩壊現象が確認された。すなわち、図2のように、点線で記した部分がすべり面となり、矢印の方向へ動いた。



図2 堤体におけるすべり現象

4) 遠心模型実験による天然ダムの決壊実験

研究には、京都大学防災研究所の遠心力載荷装置を利用した。また、一定の流量でダム湖に水を供給し、ダム堤体における崩壊土層の運動や越流による侵食過程をも観察できるように、新しい遠心土槽を設計した(図3)。ダム堤体は、異なる地すべり地域から採取した試料で作成された。

遠心力場は50gになった後に、ダムの上流側へ一定の流量で水を供給し、ダムの決壊実験を実施した。各種の土試料を用いて作成したダム堤体に対して、異なる給水流量下で行った実験の結果を下記に纏められる。

- (1) 細粒分の少ない珪砂7号と8号を用いた実験では、ダム湖の水位の上昇に伴って、ダム堤体内において浸透流が発生し、堤体の末端から、パイピング浸食およびそれに伴う崩落現象がゆっくりと繰り返して発生した。崩壊した土砂は短

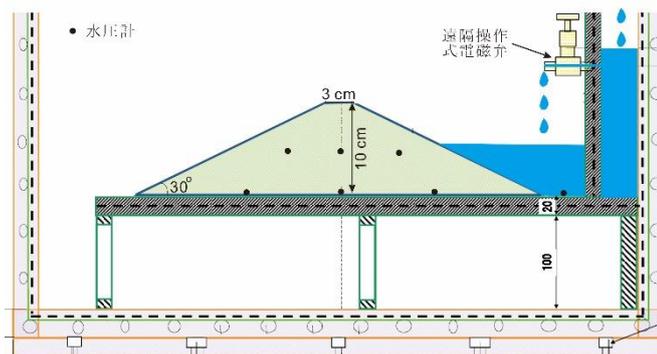


図3 天然ダム決壊過程の遠心模型実験

い距離を移動した後に、堆積した。それによって、斜面の末端から緩い斜面が形成され、斜面の安定性を上昇させたと考えられる。最後には、越流が発生し、ダム堤体が急速に浸食され、決壊した。

- (2) 細粒分の多い試料で作成したダム堤体において、浸透流によってダム堤体の下流斜面において後退性崩壊が繰り返して発生した(図4)。場合によって移動した土砂が高い水圧の発生によって流動化した現象も観測された。また、越流が発生した場合には、いずれの実験においては、ダム堤体が急速に浸食され、決壊に至った。

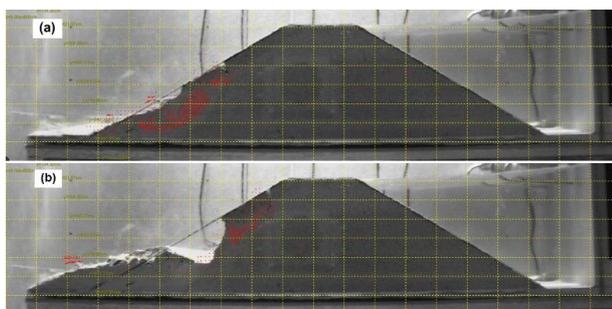


図4 遠心力場での堤体裏法における後退性地すべり。(a)と(b)の時間差: 1100s. →: 移動速度

5) 現地実験

2008年中国四川大地震時に生じた大規模地すべりの堆積域において天然ダム越流決壊の現地実験を実施した。地すべり移動土塊を用いて、溪流にダム堤体を作成した。ダム湖水位の上昇および越流の発生によるダム堤体の決壊過程を調べた結果、以下の結論が得られた。

- (1) ダム堤体の作成に用いた土砂は、石灰岩に起源したものであり、細粒分が少ないため、ダム堤体の透水係数は高い。そのため、ダム湖の水位の上昇に伴って、ダム堤体内において浸透流が発生し、堤体の末端から、パイピング浸食およびそれに伴う局所的な崩落現象が繰り返して発生した後に、大きな崩壊が発生した(図5)。また、大きな崩壊が発生する直前にダム堤体において著しい沈下変動が観察された。これは、ダム堤体の沈下変動に基づいて、ダム堤体の決壊時刻を的確に予測できるとのことを意味する。
- (2) 崩壊した土砂において、過剰間隙水圧が瞬間的に上昇し、移動土塊の流動性を高めた。それにより、崩壊土砂が一定の距離を移動した後に、斜面の末端に堆積し、緩い斜面が形成した。最後には、越流が発生し、ダム堤体が急速に浸食され、決壊した。
- (3) 現地での実験現象は、遠心力場での実験現象は調和的であり、今後は遠心力場での実験を実施し、異なる堤体特性を有する天然ダムの決壊過程について調べて行く必要がある。

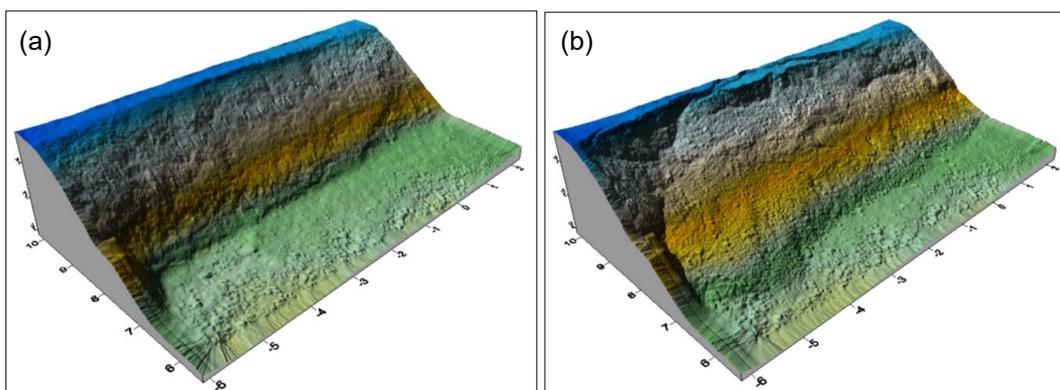


図5 ダム湖水位の上昇に伴うダム堤体における崩壊現象。(a)湛水前；(b)ダム堤体において大きな崩壊が発生した

6) 地震時の斜面安定特性および大規模天然ダムの形成危険度調査

2004年に徳島県那賀町阿津江地区で発生した大規模地すべり地にて、高感度地震計を設置して稠密な地震観測を行い、地震時の斜面安定特性および大規模天然ダムの形成危険度を調査した。これにより以下の結果が得られた。

- (1) 大規模地すべりにおいて、場所によって、震動の加速度や周波数特性などが異なる。
- (2) 海拔の差が大きいものの、地すべり地外の基盤岩においては、地震動の増幅は弱い。また、地すべり末端の崩壊土砂の堆積域においては、増幅が著しく大きい。これは、崩壊堆積物と基岩との間の材料特性のコントラストによるものだと考えられる。
- (3) 地すべり土塊における地震動に及ぼす影響は、地形より地質特性の方が大きい。
- (4) 地震時における深い地すべりは、観測された地震波不連続面で発生し、必ずしも地質境界に沿って発生しない可能性がある。

7) 天然ダム形成過程に関する数値シミュレーション技術の開発

本研究は不連続変形法 (DDA) と、粒子法 (SPH) を組み合わせた三次元固体・流体連成解析手法を用いて、天然ダムの形成と破壊を予測する技術を下記の通り確立しようとするものである。

まず、天然ダム形成における解析モデルは、対象となる危険斜面、河川およびその間の区間から構成されるが、河川の長さは危険斜面から河川までの距離より遥かに大きいことや、コンピュ

一タのメモリ容量、計算時間などを考慮すると、河川流域全体をモデリングすることは困難であるため、土石の河川への流入箇所を含んだ河川の一部をモデリングする方法を提案した。

次に、自然河川の流れは定常流とし、崩壊土石が河川に流れ込むと固体と流体のインタラクションによりその付近の水流は非定常流となるが、ダムの上流側の河川の流れには影響がないことを踏まえ、モデルの上流域の水をタンクに貯留する定常流開水路モデル(OCMSF)を提案し、一定の水深と流速を有する定常流河川モデルを作成した。

また、計算機のメモリ容量と計算時間を節約するために、モデル下方に流出した粒子をタンクに戻す粒子リサイクル法(PRM)を提案し、タンクに貯留水の粒子を必要最小限にすることができた。さらに、パラメーターの感度分析を行い、モデルの対象域の大きさとタンクの水位が開水路の水深と流速に及ぼす影響を調べ、4段階のステップによるアプローチを提案し、実際の河川に適用できるモデルのパラメーターを同定する方法を確立した。最後に、事例解析を行い、解析解の結果と比較することにより、提案手法の有効性を検証した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件) (査読有)

- ① Ning Ma, Gonghui Wang, Issei Doi, Toshitaka Kamai, Masahiro Chigira (2019): Amplification of seismic response of a large deep-seated landslide in Tokushima, Japan. *Engineering Geology* 249: 218-234.
- ② Issei Doi, Toshitaka Kamai, Ryokei Azuma, Gonghui Wang (2019): A landslide induced by the 2016 Kumamoto Earthquake adjacent to tectonic displacement - Generation mechanism and long-term monitoring. *Engineering Geology* 248(8): 80-88. 査読有
- ③ W. Hu, P.-Y. Hicher, G. Scaringi, Q. Xu, T. W. J. van Asch, and G. Wang (2018): Seismic precursor to instability induced by internal erosion in loose granular slopes. *Géotechnique* 68(11): 898-1001
- ④ William Schulz, Joel Smith, Gonghui Wang, Yao Jiang, Joshua Roering (2018): Clayey landslide initiation and acceleration strongly modulated by soil swelling. *Geophysical Research Letters* 45(4): 1888-1896
- ⑤ Guanghui Dong, Fanyu Zhang, Fengwen Liu, Dongju Zhang, Aifeng Zhou, Yishi Yang, Gonghui Wang (2018): Multiple evidences indicate no relationship between prehistoric disasters in Lajia site and outburst flood in upper Yellow River valley, China. *Science China Earth Sciences* 61(4): 441-449
- ⑥ Jianbing Peng, Gonghui Wang, Qiyao Wang, Fanyu Zhang (2017): Shear wave velocity imaging of landslide debris deposited on an erodible bed and possible movement mechanism for a loess landslide in Jingyang, Xi'an, China. *Landslides*, 14(4): 1503-1512
- ⑦ Shenghua Cui, Gonghui Wang, Xiangjun Pei, Runqiu Huang, Toshitaka Kamai (2017): On the initiation and movement mechanisms of a catastrophic landslide triggered by the 2008 Wenchuan (Ms 8.0) earthquake in the epicenter area. *Landslides* 14(3): 805-819
- ⑧ Wang, G., Furuya, G., Zhang, F.Y., Doi, I., Watanabe, N., Wakai, A., Marui, H. (2016): Layered internal structure and breaching risk assessment of Higashi-Takezawa landslide dam in Niigata, Japan. *Geomorphology* 267:48-58
- ⑨ Hong Zhang, Shuguang Liu, Wei Wang, Lu Zheng, Ying bin Zhang, Yan qiang Wu, Zheng Han, Yan-ge Li, Guangqi Chen (2018): A new DDA model for kinematic analyses of rockslides on complex 3-D terrain, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(2):555-571
- ⑩ Guangqi Chen, Manchao He, Fusong Fan (2018): Rock burst analysis using DDA numerical simulation, *International Journal of Geomechanics*, 18(3): 04018001.
- ⑪ Wei Wang, Guangqi Chen, Yingbin Zhang, Lu Zheng, Hong Zhang (2017): Dynamic simulation of landslide dam behavior considering kinematic characteristics using a coupled DDA-SPH method, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 80: 172-183
- ⑫ 古谷 元 (2018) : 富山県の地すべり災害—地すべり地の分布と南砺市利賀村で発生した事例について—, 特集 飛騨山脈とその周辺の自然災害リスクを考える, 自然災害科学, 37 巻 1 号, pp. 54-62

[学会発表] (計 6 件)

- ① Chen, G., Wang, W., Zhang, H., Zhang, Y., & Wang, G. (2018): Numerical simulation of landslide-dam using a 3D DDA and SPH coupled solid-fluid simulation technique. *Proceedings of the 7th China-Japan Geotechnical Symposium: New Advances in Geotechnical Engineering, CJGS 2018* (pp. 10-20). March 2018.
- ② 梅島 樹, 古谷 元, 王 功輝(2018): 模型実験による天然ダムの耐侵食性に関する検討, 日本応用地質学会北陸支部平成 30 年度研究発表会論文集, pp. 17-18
- ③ 王 功輝・土井 一生・釜井 俊孝 (2018) : 小野地区地すべりの発生・運動機構および二次災害. 2017年九州北部豪雨災害調査報告書. Pp:46-48.
- ④ 王 功輝 (2016) : 最近発生した大規模天然ダムの内部構造と安定性評価. (公)日本地すべり学会新潟支部・第44回地すべりシンポジウム「地震時地すべりの研究動向と対応計画」, 2016 年5月13日新潟県民会館, pp:14-25.
- ⑤ 阪本 さよ・王 功輝・釜井 俊孝(2016): 天然ダムの決壊機構に関する実験研究 (P-20). 第

5 5 回日本地すべり学会研究発表会講演集, p258.

- ⑥ Satake, R. and Wakai, A. (2016): Uncertainty of Mechanical Behavior of River Dikes Related to Material Spatial Heterogeneity, Proc. 6th Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications (APSSRA 2016), pp.606-611, Shanghai, May 28-30, 2016

〔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：釜井俊孝
ローマ字氏名：KAMAI Toshitaka
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)：10277379

研究分担者氏名：若井 明彦
ローマ字氏名：WAKAI Akihiko
所属研究機関名：群馬大学
部局名：理工学府
職名：教授
研究者番号 (8 桁)：90292622

研究分担者氏名：陳 光齊
ローマ字氏名：CHEN Guangqi
所属研究機関名：九州大学
部局名：基幹教育院
職名：教授
研究者番号 (8 桁)：50293882

研究分担者氏名：古谷 元
ローマ字氏名：FURUYA Gen
所属研究機関名：富山県立大学
部局名：工学部
職名：准教授
研究者番号 (8 桁)：80378926

研究分担者氏名：土井一生
ローマ字氏名：DOI Issei
所属研究機関名：京都大学
部局名：防災研究所
職名：助教
研究者番号 (8 桁)：00572976

※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。