

令和元年5月21日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04039

研究課題名(和文) 加速するマグマは硬くなるか軟らかくなるか 流体の脆性破壊過程の解明と火山への応用

研究課題名(英文) Does magma harden or soften with accelerating deformation? - Clarifying brittle fracture process of fluid for application to volcano dynamics

研究代表者

市原 美恵 (ICHIHARA, Mie)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：00376625

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：流体であるマグマが固体的に破壊する現象の解明を目的とし、理論研究・数値計算・模擬物質の変形実験の3つを進めた。理論的考察の結果、既存のマグマレオロジーモデル式の問題が明らかになり、非線形項(場の変形・回転効果と変形による散逸効果)を正確に記述する必要があることが分かった。一方、線形粘弾性モデルを用いて、フェーズフィールド法と有限要素法を組み合わせる粘弾性流体の破壊シミュレーションを行い、実験で見られている現象の特徴を再現することに成功した。発泡・硬化過程のポリウレタンフォームをマグマ模擬物質として用いた変形実験を行い、マグマ破碎直前の変形履歴を噴出物の気泡変形度から読み取る方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

流体の破壊という未解明の問題について、理解が大きく進んだ。この問題は、火山噴火の爆発性を決める要因を明らかにするための基礎である。また、複雑な流体の製造・加工・応用を行う様々な工学分野でも重要である。本研究で得られた理論的知見や、数値計算手法は、まだ不完全であるが、今後進めるべき方向性について明らかになった。また、マグマ模擬物質としてポリウレタンフォームの変形実験を行ったが、実験手法や得られた結果は、火山学のみならず、ポリマーの分野でも新規性のあるものである。地球科学と工学の連携により、流体の破壊力学という新しい連続体力学への第一歩を踏み出すことができた。

研究成果の概要(英文)：To elucidate brittle fracture of fluid magma, theoretical, numerical, and experimental studies were performed. As a result of theoretical consideration, problems in the existing magma rheology constitutive equation are clarified. It is necessary to adequately describe nonlinear terms (field deformation / rotation effect and dissipation effect due to deformation). On the other hand, using a linear viscoelastic model, we performed a fracture simulation of the viscoelastic fluid by combining the phase-field method and the finite element method. We successfully reproduced the feature of the phenomenon seen in the experiment. A deformation experiment was performed using polyurethane foam in the foaming and solidification process as a magma analogue. A method was proposed to capture the deformation history just before magma fracture from the deformation degree of bubbles in products of volcanic eruptions.

研究分野：火山物理学

キーワード：レオロジー マグマ 噴火 流動 破壊 気泡 粘弾性

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

1. 研究開始当初の背景

火山噴火の様式の変化を支配する素過程として、流動と破壊の間を遷移するマグマの挙動が重要である。1990年代に、マグマの変形特性が定量的に計測され始め、温度・組成と歪速度に依存した流動と破壊の遷移について、基本的な描像が提案された (Dingwell, 1996)。以来、多くの火山現象のモデリングでは、流動するマグマの歪速度が臨界値を超えた時に流動から破壊へと遷移し、その臨界値はマグマの粘性によって決まる、という破壊条件が使用されている。しかし、マグマは歪速度が増加すると流動しやすくなる性質 (シアーシニング) を持つとされ、これと加速による固体的挙動の発生を結び付けようとすると混乱が生じる。この矛盾を抱えたまま、歪速度破壊条件は火山噴火の数値モデルにおいて便宜的に応用され続けていた。

Ichihara and Rubin (2010)は、弾性エネルギーの変化率と散逸から、局所的・局時的な各変形状態がどのくらい脆性的 (弾性的) かを定量化する「脆性度」というパラメータを用いて、流動から破壊への遷移を表現することを提案した。この「脆性度」は、マグマ模擬物質を用いた破碎実験の爆発性を決めていることも確認された (Kameda et al., 2013)、また、先行するプロジェクト (挑戦的萌芽研究 26630047・2014-2015・代表: 亀田) によって、粘弾性流体のき裂進展を連続体力学の枠組みで計算する手法が開発された。これらの方法を結びつけ、発展させることによって、マグマの流動から破壊への遷移の実像を明らかにすることができると考えた。

2. 研究の目的

歪速度の増加によって粘性が低下することと固体的な破壊を起こすこと。この一見相反する現象が、粘弾性流体の流動と破壊過程に与える役割を明らかにする。両方の挙動を統合的に表現する巨視的構成方程式、局所的・局時的な変形の「脆性度」に基づく流体の固体的な破壊を評価する数理モデル、および、これらを実装するための数値計算手法を確立する。時間とともに硬化する粘弾性発泡物質を用いて流体から固体への遷移に伴う粘弾性挙動の連続的变化を計測し、理論構築に役立てる。また、加速的に変形する実験を行い流動から破壊への挙動を観察する。本計画では特に、一般的な応用力学の問題としてのこれらの研究を、火山学の具体的な問題に応用することを重視する。構築した数理モデルに基づき、火道をマグマが上昇する際に作られる噴出物の流動と破壊の痕跡に新たな解釈を与える。

3. 研究の方法

(1) 変形加速による流体から固体への挙動遷移の理論構築

火山噴火のモデリングにおいて広く用いられている線形粘性モデルや線形マクスウェル粘弾性モデルでは、加速にともなう粘性変化と破壊を矛盾無く表現することができない。非定常・大変形をとともなうマグマの流動から破壊への遷移を表現するために、非線形構成方程式を確立する。研究代表者らによってすでに提案されているモデル (市原, 2007; Rubin & Ichihara, 2010) を出発点として、物理学分野で用いられている分子レベルの構成方程式との整合性を確認しつつ進める。そして、変形加速に伴って生じうる応答変化について整理する。

(2) 粘弾性流体の破壊の数理モデルと数値計算手法の開発

先行プロジェクトによって開発された、フェーズフィールド法と有限要素法を組み合わせたき裂進展シミュレーションコードを発展させ、精度向上を図る。そして、より火山現象に近い設定として、多孔質粘弾性流体の急減圧に伴い発生・進展するき裂のシミュレーションを行う。

(3) 時間とともに硬化する粘弾性物質を用いた実験

実際の火山現象においては、冷却や脱水により固化しつつあるマグマが、さらに大きな歪速度を受けて破壊に至る。これまで実験試料として用いてきた水あめは、マグマの一定温度・組成条件下での粘弾性を模擬する物質としては理想的なものであるが、静的固化の影響を含めることが難しい。そこで、本研究では硬質ポリウレタンフォーム (PUF) を模擬材料として用いる。回転式レオメータによって粘弾性の時間変化を計測し、マグマとの類似点・相違点を明らかにする。さらに、火道内でマグマが加速し破碎する過程を想定した変形実験を行い、硬化後の試料の気泡構造を解析する。申請当初は、減圧破碎実験を想定していたが、流動 - 破碎 - 硬化の一連のプロセスを制御して行うことが難しかったため、引張り試験に変更した。

(4) 火山現象への応用

構成方程式の構築、数値計算、モデル実験の結果を統合し、火道内を上昇するマグマの中で生じる流動から破壊への遷移過程について再検討を行う。

4. 研究成果

(1) 非定常・非線形の粘弾性構成方程式の検討

これまでに提案されている数多くの非線形マクスウェル型構成方程式について、その物理的意味を含め整理した。そして、Rubin and Ichihara (2010) による2つのモデル (RIL, RIW と呼ぶ)、Doi and Edwards (1979) によるモデルを一般化した Larson (1984) の定式化を参考に RIL を変更した2つのモデル (DE1, DE5 と呼ぶ) を候補とした。いずれのモデルも、弾性歪の時間発展の形で表現しているが、それは、移流・場の回転・場の変形・内部緩和の4つの効果からな

る。RIWは、RILに対し、場の変形の寄与を無視したもので、DE1とDE5は、RILに対し、内部緩和の時定数が変形による仕事によって減少する非線形効果が異なる重みで含まれている。この効果は、内部摩擦による温度上昇の効果とも解釈できる。それぞれのモデルについて、定常解に対する粘性率の歪速度依存性を調べた(図1)。多くのポリマー流体やマグマに対して成り立つとされている、Cox-Merzの経験則(定常流における粘性率の歪速度依存性と、微小振動下での動的粘性率の周波数依存性の相似性)を表現できるのはDE5であった。また、DE5以外の定常解は、単純せん断と伸張変形によって大きく異なっていた。多くのモデルは、歪速度の増加に伴って柔らかくなるが、伸張変形においてRILは硬くなりRIWは変化しない。実際のマグマに対して、どのモデルが適当であるか判断するためには、3次元の複数の変形場において実験をする必要があり、現段階では十分なデータが存在しない。

次に、一定歪速度での定常解から、より大きな一定歪速度へと、ある時間で加速するときの応答を調べた。加速に伴う変形の脆性度をIchihara and Rubin (2010)に従って計算し、脆性破壊の発生可能性について検討した。その結果、脆性破壊の発生を決めるのは、歪速度の大きさではなく、歪加速の時間であることが示された。従来の議論では、歪速度と歪加速度の効果が混同されていた。歪速度とともに柔らかくなる物質であっても、十分短時間に歪加速を受けることで弾性的に応答し、脆性破壊をするのだと考えられる。

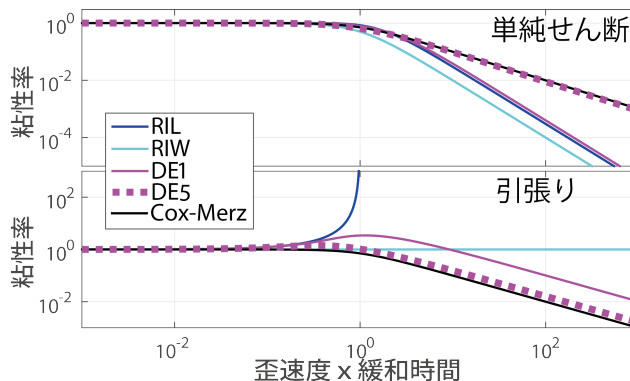


図1. 各モデルの定常解. 粘性率の歪速度依存性.

(2) 粘弾性流体の破壊の数理モデルと数値計算手法の開発

フェーズフィールドモデルでは、いわゆる「秩序変数」と呼ばれる連続変数によって、マグマと気泡(またはき裂)とを分別する。秩序変数の時間発展を決めるのは、弾性歪と表面エネルギーの秩序変数依存性の数学的記述にある。これまで提案されている2つのモデル(Karma et al., 2001; Kuhn et al., 2015)の比較を行った。気泡を含む2次元半円の計算領域を設定し、減圧によって載荷した(図2)。粘弾性緩和時間10msに対して、5msの特性時間で減圧した計算の結果、Kuhnモデルでは、減圧直後に弾性歪エネルギーが鋭く局在化して急上昇、すなわち、脆性度の急上昇が見られた。そして、気泡間にき裂が急速に発達した。一方、Karmaモデルでは、流体的な気泡合体に近い現象が見られた。理論および実験(Kameda et al., 2017)と整合的な結果を与えたのは、Kuhnモデルであった。

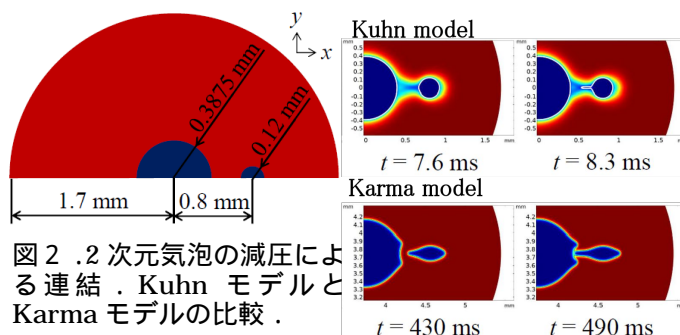


図2. 2次元気泡の減圧による連結. KuhnモデルとKarmaモデルの比較.

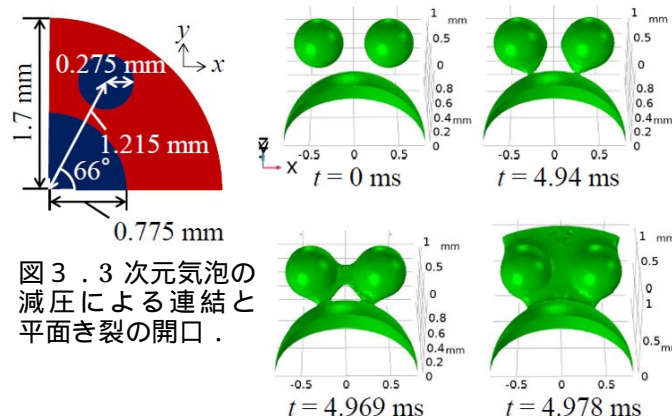


図3. 3次元気泡の減圧による連結と平面き裂の開口.

次に、3次元計算を、同様の条件で実施した(図3)。大気泡に近接して小気泡を配置した。その結果、小気泡と大気泡の間に応力集中が生じ、両者が連結した。その後、平面状のき裂が進展し、計算空間表面に到達した。この挙動や時間スケールは、マグマ模擬物質を用いた減圧破碎実験の結果(Kameda et al., 2017)とよく似ている。

以上の計算は、線形マクスウェル粘弾性モデルを仮定して実施された。(1)で得られた、非線形Maxwellモデルの実装は、今後の課題として残された。

(3) ポリウレタンフォーム(PUF)を用いた実験

回転式レオメータを用いて、膨張・硬化過程におけるPUFのレオロジー変化の測定を行った。繰り返し周波数を変化させ、試料の粘弾性の時間変化を計測した。その結果、低温でゆっくり硬化反応を進めた場合、線形マクスウェルモデルで表現できるレオロジーを示し、緩和時間は

時間と共に指数関数的に増加した。一方、高温で反応速度が速い場合には、マクスウェルモデルのように一つの緩和時間ではスケール化できず、冪乗則に従う緩和スペクトルが現れる「ゲル化」という現象が見られた。ゲル化は、今まで、マグマのレオロジーとしては考えられていなかったが、そのメカニズムを考えるとマグマの硬化過程でも十分に発生しうること気づいた。マグマの破壊について、ガラス転移のみに注目したこれまでの破碎シナリオを考え直す必要がある。本研究において、当初、予期しなかった発見の一つである。

次に、微小振動における動的粘性率と一定速度の変形における粘性率の関係を調べた。その結果、両者は同等であり、大局的には Cox-Merz の経験則と整合的であった。厳密には、定常変形の粘性率は、微小振動の動的粘性率よりも最大で数十%小さかった。一部は気泡流の振舞いとして説明できたが、硬化の進んだ領域では、気泡の合体による内部構造の変化が影響していると考えられる。これは、硬化後の試料に対する X 線 CT 解析によってもサポートされた。

PUF を用いて、マグマの流動から破碎への遷移を調べる急減圧実験を試みた。しかし、期待した現象を発生させることが出来なかった。そこで、火道の中でマグマ破碎が発生する場において重要な純粋せん断の変形を、制御して加える実験を行うことに変更した。PUF の硬化過程における引張り試験は、先例がなく、独自に実験方法を考案した(図4)。また、硬化後に残される気泡の変形度を支配するパラメータとして、粘性力と表面張力の比である Capillary 数(Ca)と歪量()に加え、新たに、硬化の時間スケールと変形気泡が球形に戻ろうとする形状緩和の時間スケールの比として Quench 数(Qu)を定義した。これらのパラメータを変化させて実験を行った結果、Qu が十分に大きい場合には、単一気泡に対する変形モデル(Ohashi et al., 2018)で説明できること、Qu が小さい場合には、形状緩和効果が見られることが確認された。

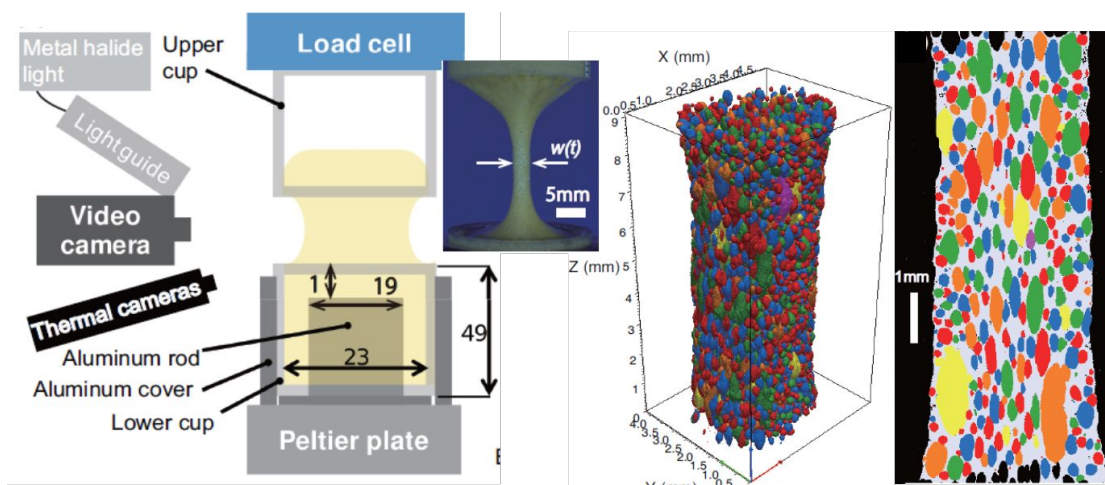


図4 . ポリウレタンフォームの引張り試験 . 装置と変形・硬化後の試料の X 線 CT 画像 .

(4) マグマの破碎現象への示唆

「加速するマグマは、硬くなるか軟らかくなるか?」,これが、本研究で掲げた問いである。本研究の理論的考察の結果、両方が起こりえること、それらを決めるのは歪加速の時間スケールと緩和時間の比であること、そして、定量的に評価するためには、マグマのレオロジー構成方程式の非線形項(場の変形・回転の効果と変形による散逸の効果)を正確に記述する必要があることが分かった。そして、それらを適切に表現するフェーズフィールドモデルを構築することで、流動から破壊の全過程がシミュレートできる可能性が見えてきた。また、アナログ物質を用いた実験からは、火山噴出物の気泡の変形度を解析することで、マグマの破碎直前の変形履歴と、破碎時の粘性が制約できる可能性のあることが示された。また、実験において、「ゲル化」という過渡的な固化現象に注目した。マグマの破碎を支配している固化現象は、ガラス転移ではなく、ゲル化である可能性もある。その場合には、これまでの破碎のシナリオを大きく修正する必要がある。

<引用文献>

- Dingwell (1996), Science, doi:10.1126/science.273.5278.1054.
 Doi and Edwards (1979) J. Chem. Soc. Faraday Trans. II, doi: 10.1039/f29797500038.
 Ichihara and Rubin (2010) J. Geophys. Res., doi: 10.1029/2010JB007820.
 市原(2007) 物性研究, 88, 2, 234-237.
 Kameda et al. (2013) J. Volcanol. Geotherm. Res., doi: 10.1016/j.jvolgeores.2013.04.008.
 Kameda et al. (2017) Sci. Rep., doi: 10.1038/s41598-017-16941-x.
 Karma et al. (2001) Phys Rev. Lett., doi: 10.1103/PhysRevLett.87.045501.
 Kuhn et al. (2015) Comput. Mat. Sci., doi: 10.1016/j.commatsci.2015.05.034.
 Larson (1984) J. Rheol., doi: 10.1122/1.549761.
 Ohashi et al. (2018) J. Volcanol. Geotherm. Res., doi: 10.1016/j.jvolgeores.2018.09.005.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

1. Ohashi, M., M. Ichihara, and A. Toramaru (2018) Bubble deformation in magma under transient flow conditions, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 364, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2018.09.005, 査読有.
2. 市原美恵・亀田正治 (2018) アナログ実験による爆発的噴火中の火道内現象の可視化, 可視化情報学会誌, 38, 69-73, 査読無.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jvs/38/149/38_25/_pdf.
3. 市原美恵 (2018) マグマのレオロジーと噴火のダイナミクス, *物性研究・電子版*, 7, doi: 10.14989/235555, 査読無.
4. Kameda, M., Ichihara, M., Maruyama, S., Kurokawa, N., Aoki, Y., Okumura, S. and Uesugi, K. (2017) Advancement of magma fragmentation by inhomogeneous bubble distribution, *Scientific Reports*, 7, doi: 10.1038/s41598-017-16941-x, 査読有.

〔学会発表〕(計23件)

1. 亀田正治 (2019) フェーズフィールドモデルによるマクスウェル流体破壊挙動の数値解析, 日本地球惑星科学連合.
2. Ichihara, M. (2019) Rheological tests of polyurethane foam undergoing vesiculation-deformation-solidification as a magma analogue, EGU General Assembly.
3. Ichihara, M. (2018) Non-linear effects on stress and brittleness of viscoelastic fluids under transient deformation at large strain rate, Cities on Volcanoes 10 (招待講演).
4. 亀田正治 (2018) 気泡の不均質分布によるマグマ破碎の促進, 日本地球惑星科学連合(招待講演).
5. 武田志緒里(2018) マグマを模擬した発泡粘弾性流体のせん断変形, 混相流シンポジウム.
6. 武田志緒里(2018) 硬化反応におけるポリウレタンフォームのゲル化と粘弾性挙動, 日本流体力学会.
7. 山西溪太 (2018) 発泡マクスウェル流体における脆性的破壊のフェーズフィールドシミュレーション, 日本流体力学会.
8. 大橋正俊 (2018) Pure shear による気泡変形: 硬化するフォームの変形実験, 日本地球惑星科学連合.
9. Ichihara, M. (2018) Non-linear effects on stress and brittleness of viscoelastic fluids under transient deformation at large strain rate, The 2nd International Symposium on Crustal Dynamics.
10. 市原美恵 (2017) 流動から破壊に至る過渡的なマグマの挙動を表現するレオロジーモデルの考察, 日本火山学会秋季大会.
11. Ohashi, M. (2017) Shape evolution of bubble during solidification -exploring the history of tube pumice-, IAVCEI 2017 Scientific Assembly.
12. 大橋正俊 (2017) 硬化過程におけるフォームの変形実験 -Tube Pumiceの履歴を探る-, 日本地球惑星科学連合.
13. 武田志緒里 (2017) 固化過程におけるフォームの粘弾性特性とせん断変形挙動, 日本地球惑星科学連合.
14. 亀田正治 (2017) フェーズフィールド法による発泡マクスウェル流体内き裂進展過程の数値解析, 第22回計算工学講演会.
15. 山西溪太 (2017) マクスウェル流体におけるき裂の発生, 進展過程のフェーズフィールドシミュレーション, 第64回理論応用力学講演会.
16. 亀田正治 (2017) COMSOL による発泡粘弾性流体破壊の数値シミュレーション, COMSOL Conference 2017 Tokyo (招待講演).
17. Ichihara, M. (2016) A paradox of brittle/ductile transition in Maxwell viscoelastic model, International Symposium on Crustal Dynamics.
18. Kameda, M. (2016) Fragmentation of a porous viscoelastic liquid by rapid decompression: Implication to volcanic eruption, The 9th International Conference on Multiphase Flow.
19. Ichihara, M. (2016) Fragmentation of vesicular magma with non-uniform distribution of bubbles, The 26th Goldschmidt Conference.
20. Ohashi, M. (2016) Experiments with polyurethane foam toward simulating tube pumice, The 26th Goldschmidt Conference.
21. 丸山祥吾 (2016) 不均一な気泡分布をともなう発泡マグマ破碎過程の解明, 日本地球惑星科学連合.
22. 大橋正俊 (2016) 模擬 Tube pumice の生成を目指したポリウレタンフォームの粘弾性実験,

- 日本地球惑星科学連合.
23. 大橋正俊 (2016) 気泡構造の保存過程を理解するためのポリウレタンフォームの変形実験, 日本火山学会秋季大会.

〔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：亀田 正治

ローマ字氏名：(KAMEDA, masaharu)

所属研究機関名：東京農工大学

部局名：工学(系)研究科(研究院)

職名：教授

研究者番号(8桁): 70262243

研究分担者氏名：山中 晃徳

ローマ字氏名：(YAMANAKA, akinori)

所属研究機関名：東京農工大学

部局名：工学(系)研究科(研究院)

職名：准教授

研究者番号(8桁): 50542198

(2)研究協力者

研究協力者氏名：大橋 正俊

ローマ字氏名：(OHASHI, masatoshi)

研究協力者氏名：武田 志緒里

ローマ字氏名：(TAKEDA, shiori)

研究協力者氏名：山西 渓太

ローマ字氏名：(YAMANISHI, keita)

研究協力者氏名：丸山 祥吾

ローマ字氏名：(MARUYAMA, shogo)

研究協力者氏名：大槻 道夫

ローマ字氏名：(OTSUKI, michio)

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。