

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420128

研究課題名(和文) フェーズフィールドモデルに基づくマイクロ多孔質体内相変化二相流計算法の開発

研究課題名(英文) Development of a computational fluid dynamics method based on a phase-field model for simulation of microscopic two-phase flows with phase change through porous media

研究代表者

高田 尚樹 (Takada, Naoki)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究チーム長

研究者番号：60357358

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、空隙が不規則に連なる多孔質媒体の内部で二種類の液体が混在して流れる二相流現象のシミュレーションを行う計算法を開発した。本計算法は、様々な理工学分野の諸問題に共通して見られる、界面張力の効果が支配的で且つ固体表面の不均一な濡れ性や凹凸構造の影響が顕著なマイクロスケールの二相流現象を従来よりも高精度・高効率に予測可能であり、気体・液体・固体が混在して相変化を伴う混相流への適用に拡張できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed a novel computational fluid dynamics (CFD) method based on phase-field model (PFM) and lattice Boltzmann model (LBM) for direct numerical simulations of three-dimensional microscopic immiscible isothermal liquid-liquid two-phase flow through porous media with irregular structures in various science and engineering fields. For the complicated flows, where the interfacial-tension force is dominant over gravity force and the effects of solid surface with non-uniform wettability and textured shape on the fluid motions are so strong, the present CFD method can conduct the simulations more accurately and efficiently than other conventional CFD methods. It also can be extended for application to micro-fluidic problems of gas-liquid-solid multiphase flow with phase change.

研究分野：流体工学

キーワード：混相流 モデル 数値流体力学 格子ボルツマン法 数値シミュレーション 濡れ性 界面 テクスチャ表面 フェーズフィールド

1. 研究開始当初の背景

(1) マイクロ混相現象の解明・予測

国内外で課題となっている、メタンハイドレート等化石資源の回収、地球温暖化抑制のための二酸化炭素地層内隔離、原子力発電由来の放射性廃棄物の地層処分、凍土による地下汚染物質拡散防止等では、マイクロスケールの複雑な形状の空隙が不均一に分布する多孔質の地層内に混在する複数種類の気相や液相の流動制御が求められている。上記課題の解決には、蒸発沸騰・凝縮・融解・凝固等、相変化が伴う多孔質体内の混相流を徹視的観点に基づき解明することが必要である。

また、化学品製造や電子機器・情報通信設備管理では、マイクロスケールの多孔質媒体や多重流路網を通る気液・液液混相流を利用する様々な化学・伝熱プロセスとデバイス・システムが提案・開発されている。一層の環境負荷と消費エネルギーの低減の実現には、混相流の効率的な予測が不可欠である。

以上のように、不規則な空隙分布を持つ多孔質体や規則的な多重流路網を通るマイクロ混相流は様々な分野で共通的な現象である。しかし、界面張力・濡れ性・相変化等複数要因が影響する流動は複雑で、時間・空間スケールや周囲状況の制約から理論や実験による詳細解明・予測は困難なため、流体力学方程式を計算機で解いて流動現象を再現する数値シミュレーションが非常に有用となっている。

(2) 二相流数値シミュレーション技術

気液系や液液系の二相流の数値シミュレーションを実施するため、気液・液液界面を追跡可能な様々な計算法(詳細計算法)と計算コードがこれまでに提案・開発されている。それら従来法は、平坦または比較的単純な形状の固体壁面や界面で、蒸発・沸騰・凝縮を伴う水-蒸気系や融解・凝固を伴う水-氷系のような気液・固液流動に適用され、各種デバイス・機器・装置設計に多用されている。

しかし、複雑な表面形状の多数の空隙が不規則に繋がり屈曲性が高い流路網を持つ多孔質体の内部で相変化を伴う二相流動に関して、詳細計算法の提案・適用は国内外で少なかった。この理由は、従来法では①非圧縮性流動条件で圧力計算の負荷が大きい、②濡れ性(接触角)が不均一な固体壁面と二相界面の交差線(接触線)の移動計算や固体壁面境界条件の設定の複雑さ、③相変化で同時多発的に生成・消失する多数の界面の形成と移動の計算負荷が大きい、等により高精度・高効率計算が困難なためと考えられた。

(3) フェーズフィールドモデル(PFM)と格子ボルツマン法(LBM)に基づく詳細計算法

従来型計算法の上記課題の解決策として、PFMとLBMが考えられた。

PFMは、非平衡系の自由エネルギー理論に従って相界面を有限厚さの領域と見なして自律的に形成するモデルである。また、LBMは、衝突・並進を繰り返す仮想粒子の

集団の動力学的方程式を解くことで連続体力学方程式を間接的に解く方法である。PFMとLBMを融合させた様々な詳細計算法がこれまで提案され、濡れ性が不均一な複雑形状固体壁境界を伴う二相流動を効率的に計算可能なことから近年普及が進んでいる。しかしながら、気液・固液系等で相変化を伴うマイクロスケールで多孔質体内を流れる混相流のPFM・LBMに基づく数値シミュレーション事例は見当たらなかった。

2. 研究の目的

上記背景を踏まえ、本研究の目的は、地質・環境・エネルギー・製造分野等の様々な問題で共通して見られる、マイクロスケールの空隙が不規則に連なる多孔質媒体の内部で気体・液体・固体等複数の相が相変化を伴って混在して流れる複雑な混相流動現象を、従来よりも高精度且つ高効率にシミュレーション可能な計算法を開発するとともにその計算コードを作製することとした。

3. 研究の方法

計算コードに実装する二相流の計算モデルと計算スキームに関しては、当該研究代表者が近年提案している二相流に適用可能な新しいPFMとLBMに関するこれまでの研究成果(引用文献①,②)を基礎として、研究代表者が連携研究者らと協力して研究・開発を進めた。

また、研究代表者は、数値シミュレーションを実施する主要設備としてPCワークステーションを使用して、FORTRAN言語に基づき計算コードを作製した後にベンチマークテストとして様々な二相流数値シミュレーションを実施して計算手法の適用可能性検討と計算コードの性能評価を行った。

上記研究開発で必要となる混相流の数値シミュレーション技術の最新情報を収集してその研究開発動向を把握するとともに本課題の研究成果を発表するため、研究代表者は流体工学や計算科学に関する国内外の学術講演会や学会主催の研究会等に出席した。

以上に加えて、国内大学の研究者らと情報交換を行うとともに、彼らと協力して本課題で得た知見を活用して発展的な計算法の構築やその適用可能性の検討も行った。

4. 研究成果

フェーズフィールドモデル(PFM)と格子ボルツマン法(LBM)に関する研究代表者らのこれまでの成果・知見を基に研究を進め、以下の主要な成果(1)~(13)を得た。

(1) PFMを導入する二相流の流体力学方程式を解くための計算スキームをLBMに基づき構築し、基盤となる計算コードを作製した。さらに、様々な条件下の二相流の数値シミュレーションを実施するため、計算領域の周囲境界面各々に対して固体壁・流入・流出・鏡面对称境界条件を設定できるように計算コ

ードを改良した。

(2) 粒子状触媒が充填されたマイクロリアクタ流路（引用文献③）の X 線 CT 計測結果から、二相流数値シミュレーションで固体壁境界座標に用いる 3 次元多孔質体構造データをマイクロメートルの空間解像度で作製できることを確認した。

(3) 上記(1)を使用して、平滑な固体表面及びマイクロスケールの 3 次元凹凸構造（テクスチャ形状）を持つ固体表面上での水・油のような液液系二相流体の挙動の数値シミュレーションを実施した。静的平衡接触角の値を変えて表面の不均一な濡れ性条件を設定し、テクスチャ形状による液滴の形状・見かけの接触角・移動速度の変化に関して理論・実験結果と比較して定性的に妥当な数値結果を得た。

(4) 固体表面に付着した液滴の浮力による離脱現象に関する数値シミュレーション結果と実験式との比較から、本課題で開発する計算法が外力下におけるマイクロスケールの液滴の挙動を適切に予測できることを確認した。

(5) プラスチック製ピペットの液体吸引力や食材容器内の液体滑落性の向上を図るための数値シミュレーションを本計算法により実施した。その数値結果が実験結果と定性的に一致することを確認するとともに、様々な条件下のシミュレーション結果から、濡れ機能性部材表面の接触角やナノ・マイクロスケールの凹凸加工形状の設計指針を提示した。

(6) 基材表面の微細な溝構造で発現する液体の毛細管現象を利用する高精細スクリーン印刷技術の開発（引用文献④）に関して、本計算法を用いて印刷インクの溝内部への浸透の数値シミュレーションを実施し、その数値結果が実験結果と定性的に一致することを確認するとともに、被印刷基材表面の凹凸加工形状の設計指針を提示した。

(7) 本計算法における結果に対する計算空間解像度の影響を検討するため、液滴滑落などの数値シミュレーションを実施した。その結果、開発した計算法では、数値シミュレーション結果が空間解像度に依存して変化し得るが、変形する界面の曲率に応じて一定以上の解像度を界面近傍で確保すれば解像度に依存せずと同じシミュレーション結果が得られることを確認した。

(8) 本研究で主な対象としたマイクロスケールで粘性と界面張力の影響が大きい条件下の流動現象を高い数値安定性と且つ高精度に計算可能にするため、引用文献⑤に基づき LBM のモデルの改良を検討した。2 次元ベンチマークテスト計算を実施した結果、LBM の衝突演算においてこれまで使用していた単一緩和時間（SRT）モデルに代えて二緩和時間（TRT）モデルを採用することにより、計算コードの簡易な変更で数値安定性と計算精度を同時に向上できることを確認した。

(9) 固体表面上の液滴の滑落の数値シミュレ

ーションにおいて、微細凹凸構造を持つ表面部分で液滴の動きが遅くなる「ピン止め効果（Pinning Effect）」が定性的に再現された。この数値結果から、実際の現象で見られる「接触角ヒステリシス（Contact Angle Hysteresis）」（平衡状態で静止した液滴の接触角に比べて、動いている液滴の接触角（動的接触角）が前進側ではより大きくなり、逆に後退側ではより小さくなる事）に表面の微細凹凸構造が関与する可能性を示した。

(10) 深さと幅が各々 100 マイクロメートルの正方断面の流路が直交する混合デバイス内の水・油二相流の数値シミュレーションで、引用文献⑥の実験と同様に、流入する油が上下各方向から流入する水と合流後に下流へ押し切られて油滴が形成されることを確認した。

(11) 開発した二相流の計算モデルを発展させて、気体・液体・固体の任意の三相以上を含む混相流現象を従来よりも簡易なアルゴリズムでシミュレーション可能な新しい計算モデルを引用文献⑦を参考に構築し、簡易なベンチマークテスト問題の計算結果からその性能の妥当性を確認した。

(12) PFM に基づき、二相の密度比が大きい気液系・固気系や 1 に近い固液系各々に関して、相変化や溶解のように界面を横断する混相間熱・物質移動を予測・評価するための計算モデルについて文献調査を踏まえて検討した。その結果、本課題で開発したマイクロ二相流の計算手法を基礎にして、気相・液相・固相の三相以上の相変化を伴う混相流の数値シミュレーション手法を今後拡張的に構築できることを確認した。

(13) 本課題で使用した固体表面の濡れ性条件設定方法を拡張し、Immersed Boundary 法（IBM）の導入により計算空間格子に沿わない任意形状の固体表面で濡れ性条件を設定できる PFM に基づく気液二相流計算法を国内大学研究者らと協力して開発した。円柱回りの液滴の濡れ広がり現象や平板間の毛細管現象の 2 次元ベンチマークテストシミュレーションを通して、当該計算法が PFM に基づく従来計算法よりも高精度に気液界面の挙動を予測できることを確認した。

上記のように、本課題で開発した二相流計算法は従来計算法よりも優れた適用性を有することが実証された。

今後、従来は困難だった、界面張力の効果が支配的で且つ固体表面の不均一な濡れ性や微細凹凸構造の影響が顕著に働くマイクロスケールの二相流現象の高精度・高効率な数値シミュレーションによる解明・予測が、本計算法によって幅広く実施されることが期待できる。また、上記成果を活用して本課題で開発した二相流計算法を拡張することにより、気体・液体・固体の任意の三相以上が混在して相変化を伴う混相流の数値シミュレーションのための計算法を容易に構築できると考えられる。

<引用文献>

- ① Takada, Naoki; Matsumoto, Junichi; Matsumoto, Sohei. Phase-field model-based simulation of motions of a two-phase fluid on solid surface. *Journal of Computational Science and Technology*. 2013, Vol. 7, No. 2, p. 322-337. (DOI: 10.1299/jcst.7.322)
- ② Takada, Naoki; Matsumoto, Junichi; Matsumoto, Sohei. A diffuse-interface tracking method for the numerical simulation of motions of a two-phase fluid on a solid surface. *The Journal of Computational Multiphase Flows*. 2014, Vol. 6, No. 3, p. 283-298. (DOI: 10.1260/1757-482X.6.3.283)
- ③ Inoue, Tomoya; Adachi, Jiro; Ohtaki, Kenichiro; Lu, Ming; Murakami, Sunao. Sun, Xu; Wang, Dong F. Direct hydrogen peroxide synthesis using glass microfabricated reactor - Paralleled packed bed operation. *Chemical Engineering Journal*. 2015, Vol. 278, p. 517-526. (DOI: 10.1016/j.cej.2014.11.019)
- ④ Hokari, Ryohei; Kurihara, Kazuma; Takada, Naoki; Matsumoto, Junichi; Matsumoto, Sohei; Hiroshima, Hiroshi. Fine and high-aspect-ratio screen printing combined with an imprinting technique. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2016, Vol. 26, No. 3, 035005, 8pp. (DOI: 10.1088/0960-1317/26/3/035005)
- ⑤ Seta, Takeshi; Rojas, Roberto; Hayashi, Kosuke; Tomiyama, Akio. Implicit-correction-based immersed boundary-lattice Boltzmann method with two relaxation times. *Physical Review E*. 2014, Vol. 89, 023307, 22pp. (DOI: 10.1103/PhysRevE.89.023307).
- ⑥ Hirama, Hirotada; Torii, Toru. One-to-one encapsulation based on alternating droplet generation. *Scientific Reports*. 2015, Vol. 5, 15196, 8pp. (DOI: 10.1038/srep15196)
- ⑦ Lee, Hyun Geun; Kim, Junseok. An efficient numerical method for simulating multiphase flows using a diffuse interface model. *Physica A*. 2015, Vol. 423, p. 33-50. (DOI: 10.1016/j.physa.2014.12.027)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Takada, Naoki; Matsumoto, Junichi; Matsumoto, Sohei; Kurihara, Kazuma. Phase-field model-based simulation of two-phase fluid motion on partially

wetted and textured solid surface. *Journal of Computational Science*. 2016, Vol. 17, p. 315-324, 査読有. (DOI: 10.1016/j.jocs.2016.05.009)

- ② Takada, Naoki; Matsumoto, Junichi; Matsumoto, Sohei; Kurihara, Kazuma. CFD simulation of microscopic two-phase fluid motion on solid body with edges and heterogeneously-wetted surface using phase-field model. *Proceedings of the 6th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering (Coupled Problems 2015)*. 2015, p. 625-634, 査読無. (<http://congress.cimne.com/coupled2015/Admin/Files/FilePaper/p320.pdf>)
- ③ Inoue, Yasuhiro; Ishida, Kazuki; Takada, Naoki; Hojo, Masaki. Reductions in anisotropic errors from implementation of phase-field wetting boundary condition for off-grid objects. *International Journal of Computational Methods*. 2015, Vol. 12, No. 6, 1550042, 15pp., 査読有. (DOI: 10.1142/S0219876215500425)
- ④ Takada, Naoki; Matsumoto, Junichi; Matsumoto, Sohei. Numerical simulation of two-phase fluid motion in microchannel based on phase-field model. *Proceedings of the 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI - ECCM V - ECFD VI)*. 2014, p. 3895-3903, 査読無. (<https://pdfs.semanticscholar.org/a95a/05ee9bdb5d01fea6b2593d31bc24dd94072a.pdf>)

[学会発表] (計 24 件)

- ① 高田 尚樹. テクスチャ表面上マイクロ液体二相流体挙動のシミュレーション技術の開発. テクスチャリング表面のトライボロジー研究会第 24 回 (平成 29 年度第 2 回) 研究会, 2018-02-27.
- ② 高田 尚樹. 固体表面上のマイクロ液体挙動に関する拡散界面モデルシミュレーション. 日本機械学会 第 30 回計算力学講演会 (CMD2017), 2017-09-16.
- ③ 高田 尚樹. マイクロ流路内液体流れシミュレーションへの格子ボルツマン法の適用. 日本機械学会 第 25 回茨城講演会 (2017 茨城講演会), 2017-08-29.
- ④ Takada, Naoki; Kurihara, Kazuma; Hokari, Ryohei; Matsumoto, Sohei. Numerical simulation of motion of fine droplet on structured solid surface using phase-field model-based lattice-Boltzmann method. *The 3rd International Conference on Numerical Methods in Multiphase Flows*

- (ICNMMF-III), 2017-06-28.
- ⑤ 高田 尚樹. 格子ボルツマン法による多相流体運動のシミュレーションの概要. 公益社団法人高分子学会 第 22 回 高分子計算科学研究会講座 マルチスケールな高分子シミュレーション技術, 2017-06-20.
- ⑥ 高田 尚樹; 松本 壮平; 栗原 一真; 穂苅 遼平. 濡れ性が不均一な固体表面上の液滴挙動の拡散界面モデル数値解析. 日本機械学会関西支部 第 17 回秋季技術交流フォーラム, 2016-11-05.
- ⑦ 高田 尚樹; 栗原 一真; 穂苅 遼平; 松本 壮平; 松本 純一. 拡散界面モデルシミュレーションによるテクスチャ表面上の液滴挙動の研究. 日本機械学会第 29 回計算力学講演会 (CMD2016), 2016-09-22.
- ⑧ 高田 尚樹; 栗原 一真; 穂苅 遼平; 松本 壮平; 松本 純一. 数値流体力学シミュレーションによる微小スケール液滴挙動の予測. 2016 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2016-09-06.
- ⑨ 高田 尚樹; 栗原 一真; 穂苅 遼平; 松本 壮平. 微細テクスチャ表面上での液滴挙動に関する拡散界面モデル数値シミュレーション. 日本機械学会 2016 茨城講演会, 2016-08-26.
- ⑩ 高田 尚樹; 松本 壮平; 栗原 一真; 穂苅 遼平; 松本 純一. 微細溝付き表面を利用した液滴挙動制御のための数値シミュレーション. 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2016, 2016-08-08.
- ⑪ Takada, Naoki; Matsumoto, Sohei; Kurihara, Kazuma; Hokari, Ryohei. Numerical simulation of microscopic multiphase fluid motion on solid surface using diffuse-interface approach. The 12th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XII) and the 6th Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM VI), 2016-07-24.
- ⑫ 高田 尚樹. 混相流シミュレーションにおけるフェーズフィールドモデルと LBM について. 日本機械学会流体工学部門 第 25 回格子ボルツマン法の基礎と応用に関する研究会 (LBM 研究会), 2016-06-03.
- ⑬ 高田 尚樹; 松本 壮平; 栗原 一真; 穂苅 遼平; 松本 純一. 微小テクスチャ固体表面上混相流体挙動予測への拡散界面モデルの適用について. 第 21 回計算工学講演会, 2016-05-31.
- ⑭ Takada, Naoki; Matsumoto, Sohei; Kurihara, Kazuma; Hokari, Ryohei; Matsumoto, Junichi. Simulation of microscopic fluid particle motion on solid surface using a diffuse-interface model. The 9th International Conference on Multiphase Flow (ICMF 2016), 2016-05-22.
- ⑮ 高田 尚樹; 松本 純一; 松本 壮平; 栗原 一真; 穂苅 遼平. 固体表面上液滴挙動解析への保存型レベルセット格子ボルツマン法の適用. 日本流体力学学会 第 29 回数値流体力学シンポジウム (CFD2015), 2015-12-15.
- ⑯ Takada, Naoki; Matsumoto, Junichi; Matsumoto, Sohei; Kurihara, Kazuma; Hokari, Ryohei. Numerical simulation of microscopic two-phase fluid motion on solid surface using phase-field and lattice-Boltzmann models. The 3rd International Workshops on Advances in Computational Mechanics (IWACOM-III), 2015-10-12.
- ⑰ 高田 尚樹; 松本 純一; 松本 壮平; 栗原 一真; 穂苅 遼平. 微小テクスチャ表面上での液滴挙動のフェーズフィールドモデル数値シミュレーション. 日本機械学会 第 28 回計算力学講演会 (CMD2015), 2015-10-10.
- ⑱ 高田 尚樹; 松本 純一; 松本 壮平; 栗原 一真. 物体の形状と濡れ性が影響する微細二相流体挙動のシミュレーション. 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2015, 2015-08-04.
- ⑲ Takada, Naoki; Matsumoto, Junichi; Matsumoto, Sohei; Kurihara, Kazuma. Phase-field model-based simulation of two-phase fluid motion on partially-wetted and textured solid surface. The 24th International Conference on Discrete Simulation of Fluid Dynamics (DSFD2015), 2015-07-13.
- ⑳ 高田 尚樹; 松本 純一; 松本 壮平. フェーズフィールドモデルに基づく固体表面上のマイクロ二相流体挙動のシミュレーション. 第 20 回計算工学講演会, 2015-06-10.
- 21 高田 尚樹; 松本 純一; 松本 壮平; 栗原 一真. 物体の形状と表面濡れ性に起因する微小二相流体挙動の数値シミュレーション. 日本流体力学学会 第 28 回数値流体力学シンポジウム (CFD2014), 2014-12-09.
- 22 高田 尚樹; 松本 純一; 松本 壮平. テクスチャ表面上での流体粒子挙動のフェーズフィールドモデルシミュレーション. 日本機械学会 第 27 回計算力学講演会 (CMD2014), 2014-11-23.
- 23 高田 尚樹; 松本 純一; 松本 壮平; 魯健; 高木 秀樹. 拡散界面モデル計算法による物体角部での液滴挙動のシミュレーション. 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2014, 2014-07-30.
- 24 高田 尚樹; 松本 純一; 松本 壮平. 固体表面上の二相流体挙動の数値解析への Phase-field モデル格子ボルツマン法の適用. 第 19 回計算工学講演会, 2014-06-

[その他]

ホームページ等

- ① 高田 尚樹、フェーズフィールド法による混相流計算、日本機械学会計算力学部門(JSME-CMD) 計算力学部門ニューズレター、No. 53、p. 9-11、2015年4月。  
(<https://www.jsme.or.jp/cmd/japanese/newsletter/PDF/nl53.pdf>)
- ② 研究成果一覧 Web ページ (日本語版) :  
<https://staff.aist.go.jp/naoki-takada/index.html>
- ③ 研究内容紹介 Web ページ (日本語版) :  
[https://staff.aist.go.jp/naoki-takada/phase\\_field\\_cfd.htm](https://staff.aist.go.jp/naoki-takada/phase_field_cfd.htm)
- ④ 研究成果一覧 Web ページ (英語版) :  
[https://staff.aist.go.jp/naoki-takada/index\\_en.html](https://staff.aist.go.jp/naoki-takada/index_en.html)
- ⑤ 研究内容紹介 Web ページ (英語版) :  
[https://staff.aist.go.jp/naoki-takada/phase-field\\_cfd\\_en.html](https://staff.aist.go.jp/naoki-takada/phase-field_cfd_en.html)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

高田 尚樹 (TAKADA, Naoki)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・  
エレクトロニクス・製造領域  
集積マイクロシステム研究センター・  
研究チーム長  
研究者番号：60357358

### (2)研究分担者

#### (3)連携研究者

松本 純一 (MATSUMOTO, Junichi)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・  
材料・化学領域  
機能材料コンピューテーショナルデザイン  
研究センター・  
研究チーム長  
研究者番号：90392662

井上 朋也 (INOUE, Tomoya)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・  
エレクトロニクス・製造領域  
集積マイクロシステム研究センター・  
研究チーム長  
研究者番号：20392590

竿本 英貴 (SAOMOTO, Hidetaka)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・  
地質調査総合センター  
活断層・火山研究部門・  
主任研究員  
研究者番号：60421848

#### (4)研究協力者