

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05036

研究課題名(和文)大規模数値シミュレーションによる沸騰伝熱機構の解明

研究課題名(英文)Large-scale simulation of boiling heat transfer mechanisms

研究代表者

大西 順也(Onishi, Junya)

東京大学・生産技術研究所・特任助教

研究者番号：20376495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：様々な分野での応用が期待される沸騰伝熱促進技術の発展、高度化を実現するには、気泡運動と、それによって誘起される流動、伝熱を総合的に理解することで、沸騰全体における伝熱機構を解明していくことが必要である。そこで、本研究では、複合的な現象に対して個別のパラメータ(物性値、流路形状など)を独立的に評価できること、実験的計測の難しいデータを補完できることなどから、沸騰現象に対する数値シミュレーション手法を開発し、その妥当性について検証した。また、開発したシミュレーション手法を用いて、キャビティ内の気泡挙動に関する解析を実施し、接触角の影響について明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した沸騰のシミュレーション手法では、孤立沸騰における気泡の生成、壁面離脱、上昇、再生成といった過程を統一的に扱うことができる。したがって、従来はそれぞれの過程に対する個別の解析が中心であったのに対して、本手法を用いることで、複数の過程を考慮した複合的な解析が可能となる。その結果、マイクロ液膜の生成過程や、それによる熱輸送への影響等を調査することが可能になる。

研究成果の概要(英文)：In order to improve the efficiency of boiling heat transfer techniques, it is highly required to understand the entire system of boiling phenomena, including not only bubble motion but also fluid flows and heat transfer induced by it. In this study, considering the advantages of numerical simulation, such as easiness for tuning physical parameters independently, a numerical method is developed for simulating boiling heat transfer and is validated through some test cases. Then, by simulating the bubble growth in a cavity using the developed method, the effects of contact angle on the bubble growth is clarified.

研究分野：数値流体工学

キーワード：ハイパフォーマンス・コンピューティング 混相流 相変化 流体工学 熱工学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

優れた伝熱特性を持つ沸騰は、小型化かつ高性能化する電子機器の冷却をはじめとして、様々な分野での応用が期待されている。そのため、表面微細加工による沸騰核生成促進、特殊冷媒使用による濡れ制御、サブクール液導入による気泡微細化など、数多くの伝熱促進技術が国内外で研究開発されている。これらの技術で中心となる課題は沸騰時に生じる気泡の制御である。したがって、沸騰伝熱促進技術の発展、高度化を実現するには、戦略的な気泡制御が必要であり、そのためには、気泡運動と、それによって誘起される流動、伝熱を総合的に理解することで、沸騰全体における伝熱機構を解明していくことが必要である。一方で、沸騰伝熱機構の解明が難しい理由としては、沸騰が多くの要素過程で構成された複合的な現象であること、要素過程の時間・空間スケールが小さく従来の技術では詳細な計測が難しいことなどが挙げられる。

以上のような状況のもと、複合的な現象に対して個別のパラメータ(物性値、流路形状など)を独立的に評価できること、実験的計測の難しいデータを補完できることなどから、沸騰現象に対する数値シミュレーションの実現が期待されており、気泡成長過程に対する過熱液層の影響や、気泡核生成過程におけるキャビティ内の気液界面挙動に関する解析が行われてきた。しかしながら、従来の数値シミュレーションは、沸騰を構成する要素過程を対象としたものであり、沸騰の全体像を捉えたものではない。そのため、気泡下部に生じる薄い液層(マイクロ液膜)内の熱伝導や、壁面から離脱した気泡による攪拌効果など、沸騰伝熱機構を解明する上で重要な性質を調査できる段階には至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、数値シミュレーションにより、沸騰伝熱機構を解明することを目的とする。ただし、現状の計算技術、計算資源等の制約を考慮し、比較的単純な沸騰様式を対象とする。具体的には、低熱流束域で見られる孤立気泡の沸騰サイクルに着目する。

孤立気泡の沸騰サイクルは、(1) 加熱面上の微小空隙(キャビティ)に残留した気相による気泡核の生成、(2) 気泡の成長、(3) 加熱面からの離脱、(4) 液中への上昇の各要素過程により構成される。キャビティの大きさは自然面で数 μm 、人工面(研究用に人工的に加工されたもの)でも数十から数百 μm のオーダーであり、非常に小さい。また、加熱面から離脱する気泡の大きさは、水-水蒸気系で約2-3 mmである。したがって、気泡離脱過程と核生成過程との間には 10^3 程度の大きさのスケール乖離が存在することになる。

本研究では、孤立気泡の沸騰サイクルの全要素過程を統合的に解析できるような数値シミュレーション技術を開発する。また、それを活用することで、気泡やマイクロ液膜の構造、生成・消滅過程、それに伴う熱輸送機構を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、沸騰サイクルを構成する要素過程を統合することで、沸騰サイクル全体の数値シミュレーションを実現することを目指す。そのために、まずは、個別の要素過程に関する数値シミュレーションの精度、速度について妥当性を検証する。次に、要素過程の統合に向けた階層型格子を導入し、その妥当性を検証する。そして、開発した数値シミュレーション技術を用いて、沸騰サイクル全体のシミュレーションを実行し、その妥当性を検証する。それぞれにおける具体的な方法は以下の通りである。

沸騰伝熱において重要な役割を持つのは気泡運動である。その気泡運動を正確に予測するためには、気液界面の移動・変形、気液界面における物理量変化・保存則等を精度よく扱えるような計算手法が必要である。本研究では、先行研究を参考に、計算精度、計算効率、計算プログラムの開発コスト等の観点から、次のような計算手法を採用する。まず、気液界面の追跡にはレベルセット法(Level-set method, LSM)を採用する。LSMはスカラー関数を用いて界面の位置・形状を陰的に表現する手法の1つであり、気液二相流解析に限らず多くの分野で活用されている。利点としては、移動・変形する気液界面の運動を、固定格子の上で扱うことができることなどが挙げられる。一方、特に気液二相流解析の分野においては、質量保存則を満足しないことが問題となることが多い。この点については、基本的には十分に小さな格子幅、時間刻み幅を用いることで対処することとする。また、必要に応じて、レベルセット関数の微分値から体積変化を評価することで、レベルセット関数の値を補正するといった方法を用いることとする。次に、気液界面における境界条件の処理にはGhost Fluid法(GFM)を採用する。GFMは、気液界面と格子が一致していなくても、境界条件を精度よく課することができる手法であり、Dirichlet条件、Neumann条件、Jump型条件等の各種境界条件に対して適用することができる。GFMの特徴は界面における物理量の不連続な変化をsharpに扱えることである。そのため、GFMは、界面における物理量に人工的な緩衝領域を設ける手法、つまり、拡散界面モデル(Diffuse-interface model, DIM)に対して、sharp界面モデル(Sharp-interface model, SIM)と呼ばれる。SIMは一般に、計算精度、計算効率の観点からDIMに対して優位性があると考えられる。なお、本研究では、GFMと同様の手法を固体表面における境界条件(例:速度の粘着条件)等にも適用する。

沸騰を構成する要素過程を統合する際に、スケール乖離問題を解決するために、階層的な構造を持つ計算格子を導入し、局所的に細かい計算格子を配置できるようにする。計算格子の作成に

においては、再帰的細分化法を用いる。具体的には、解析領域全体を1つのブロックで表現した上で、キャピティ近傍のブロックを8つのサブブロックに細分化するといった処理を、所定の解像度を満たすまで再帰的に行う。なお、計算精度および安定性の観点から、隣り合うブロックの細分化レベルの差は最大でも1という制約を課す。

以上の通り、本研究では、階層型直交格子の採用による格子生成の自動化・効率化と、LSMとGFMの採用による直交格子計算の高精度化・高効率化の両立を実現することで、沸騰の数値シミュレーション技術を開発する。また、開発した数値シミュレーション技術を活用し、核沸騰時の熱輸機構構について、特に、熱輸送形態やマイクロ液膜挙動に着目し、壁面の過熱度や濡れ性など関係すると考えられるパラメータに対して感度解析を実施し、それらの影響を明らかにする。

4. 研究成果

まず、要素過程統合時のスケール乖離問題を解決するために、階層的な構造を持つ計算格子を導入し、局所的に細かい計算格子を配置できるような格子生成機能を実装した。図1に直径、深さともに100 μm のキャピティを持つ人工伝熱面に対し、解析領域を5.12 mm x 5.12 mm x 5.12 mmとしたときの計算格子の様子を示す。図1(a)は俯瞰図、図1(b)は側面図、図1(c)は上面図、図1(d)はキャピティ近傍の拡大図である。図1の例では、キャピティ近傍の解像度を4 μm 、ブロック内格子点数40x40x40としたところ、ブロックの細分化レベルは最小レベル2、最大レベル5となった。また、総ブロック数は736、総格子点数は47,104,000となった。なお、仮に4 μm の解像度で一般的な格子を作成すると、総格子点数は20億を超えることとなる。また、本研究で開発した計算コードにおいては、階層型格子を扱うためのツールとして、オープンソースソフトウェアであるBCMToolsを利用した。BCMToolsは階層格子を自動的に生成する機能だけでなく、分散メモリ環境下における負荷分散機能なども持っており、これを活用することで効率的な並列計算が可能となった。

次に、計算手法の検証を実施した。計算精度の検証(Verification and Validation, V&V)としては、まず、細管中を上昇する気泡(テイラー気泡)に関して、実験結果との比較をおこなった。図2(a)にはシミュレーションによって得られたテイラー気泡まわりの速度分布の様子を、図2(b)にはテイラー気泡の上昇速度について、実験結果とシミュレーション結果を比較した結果を示す。図に示す通り、テイラー気泡周囲の薄い液膜が再現できること、上昇速度が実験とシミュレーションでよく一致することなどが確認できる。

次に、凹凸面上に衝突する液滴の挙動に関して、実験結果との比較をおこなった。なお、ここでは、凹凸面として、幅0.3 mm、高さ0.3 mmの立方体上の突起物が、正方格子の上に配置された構造を持つものを考える。また、液滴の初期直径は2.99 mm、初期速度は1.96 m/sである。図3に結果の一例を示す。図3(a)は液滴が凹凸面に衝突した後のある時刻におけるスナップショットである。液滴は凹凸面上で非等方的に濡れ広がっていることがわかる。すなわち、紙面に向かって水平・垂直方向(赤で示した方向)と、それに対して45度傾けた斜め方向とでは、濡れ広がり速さが異なる。これは、表面に配置された突起構造によるものである。つまり、水平・垂直方向では液滴の進行方向と突起構造の配置方向が平行であり、液滴が突起構造の間を直線的に進行できるのに対して、斜め方向ではそれができない。実際、斜め方向においては、液滴は突起構造の上を通過する。なお、このような挙動は実験的にも観察されている。図3(b)は、水平・垂直方向、および、斜め方向における液滴の濡れ広がり長さを、時間に対してプロットした結果である。図において、シンボルは実験結果を、実線は数値シミュレーション結果を示している。両者が定量的にもよく一致することが確認できる。なお、数値シミュレーション結果が無次元時刻約1.6までしかなく、その辺りで実験結果からのずれが見られるのは、液滴の先端が計算領域の端に達したためであると考えられる。

次に、相変化現象のモデル化に関する検証として、1次元Stefan問題に関して、解析解と数値解の比較検証をおこなった。図4に結果の一例を示す。ここでは、固体が融解し、液体になる過程を考える。時刻0において $x=0$ に界面があり、 $x<0$ は液体、 $x>0$ は固体であるとする。また、系は平衡であり、温度は飽和温度で同様であるとする。時刻 $t>0$ において、液体温度($x<0$)を飽和温度より高くすることで、液体側からの熱流束が固液界面に伝わることで融解が起こり、固液界面が固体側に向かって移動する状況を考える。このような状況に対しては、解析解が存在することが知られており、本研究では、その解析解と本研究で開発したシミュレーションコードによる数値解とを比較した。図4は解析解と数値解の温度分布を比較したものである。それぞれ、実線とシンボルで示されており、同じ色のものは同じ時刻の温度分布を表している。解析解によれば、時間の経過とともに固液界面が固体側に移動し、その際の移動速度は時間の $-1/2$ 乗に比例する。また、温度分布は液相側にのみ存在し、固体側は飽和温度に保たれる。図からは、数値解がそれらの挙動を定性的かつ定量的によく再現できていることがわかる。

次に、沸騰サイクルにおいて人工キャピティから生成される気泡の挙動に関する数値シミュレーションを実施した。図5に結果の一例を示す。ここでは、円筒状の人工キャピティから気泡が生じる際に、特に人工キャピティの出口における接触線の挙動に着目した。これは、人工キャピティの出口には角部が存在するが、そこで接触線がピンギングすることが、気泡挙動や液膜形成にどのような影響をもたらすかを明らかにするためである。図5には、気泡生成量を一定として、静的接触角を30°、60°、90°と変化させたときの、気泡挙動の様子を示す。図において、上段は気泡を上から見た様子、下段は気泡を側面から見た様子である。図からは、気泡形状は上

から見ると大きな違いはないが、側面から見ると特にキャビティ出口付近で大きく異なることがわかる。この違いはキャビティ出口の角部におけるピンングの強さによるものと考えられる。特に興味深いのは接触角が 30° の場合で、ピンングの影響が強いため、水平方向に伸展する傾向が見られる点である。この強いピンングによる水平方向への気泡成長が継続されれば、気泡と過熱面の間に液膜が形成されることが期待される。しかしながら、今回実施した数値シミュレーションの条件の範囲ではそのような傾向は見られなかった。今後は、気泡生成量を大きくしたり、長時間の現象をシミュレーションしたりすることで、気泡の成長過程をより詳細に調査し、液膜の形成過程等の解明につなげていく予定である。

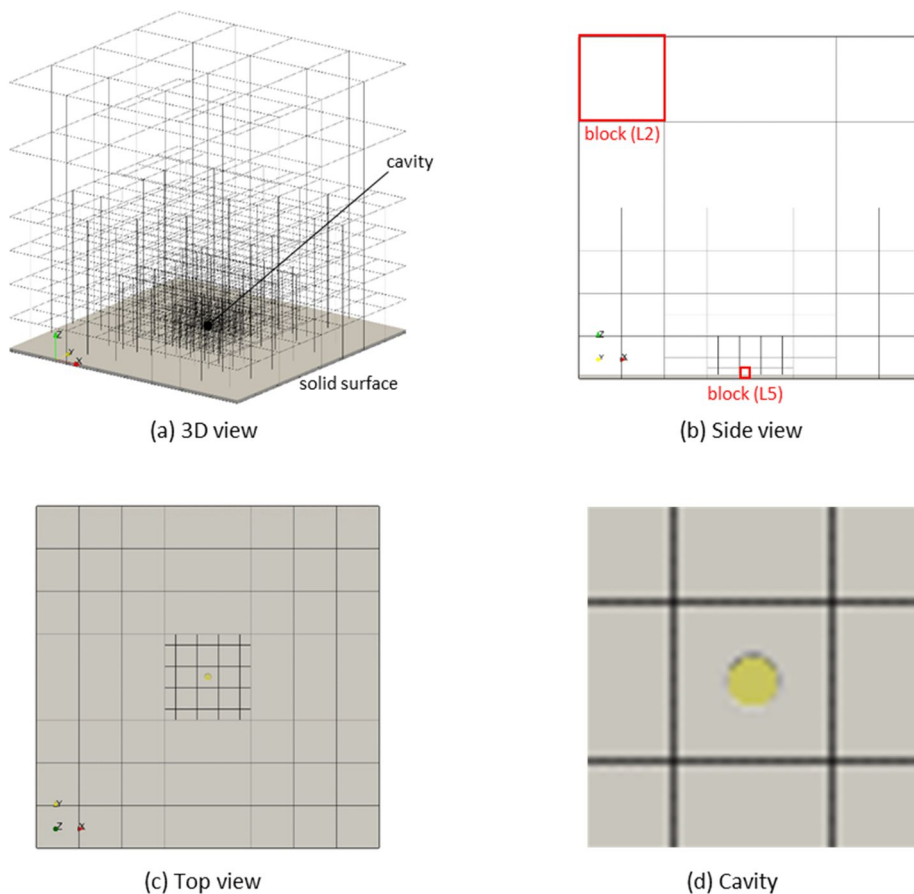


図1 計算格子の例

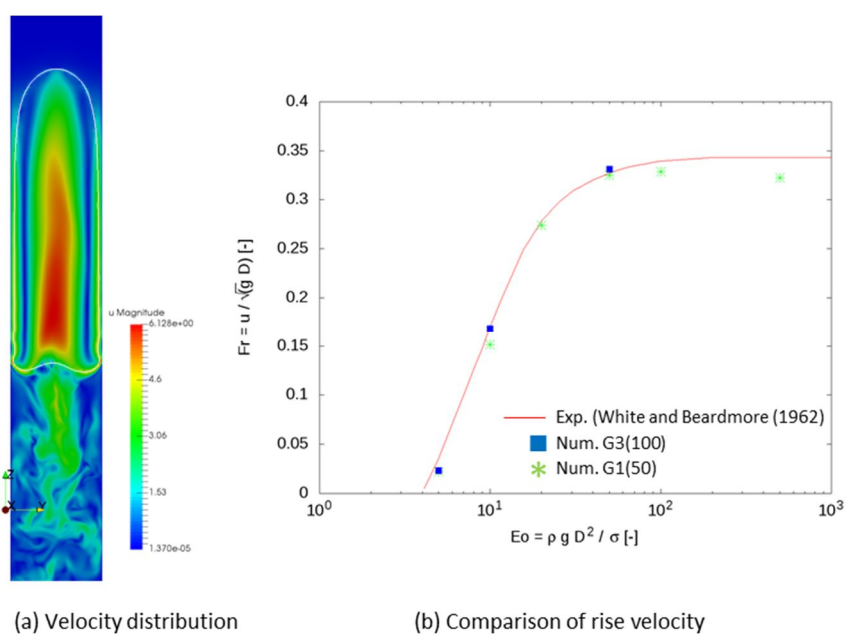


図2 テイラー気泡に関する検証

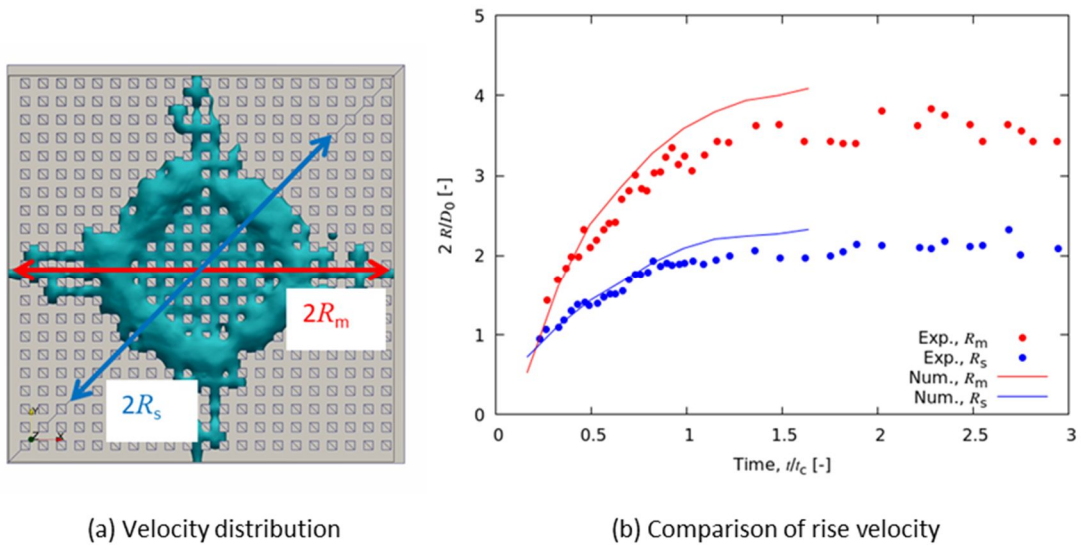


図3 凹凸面上の液滴挙動に関する検証

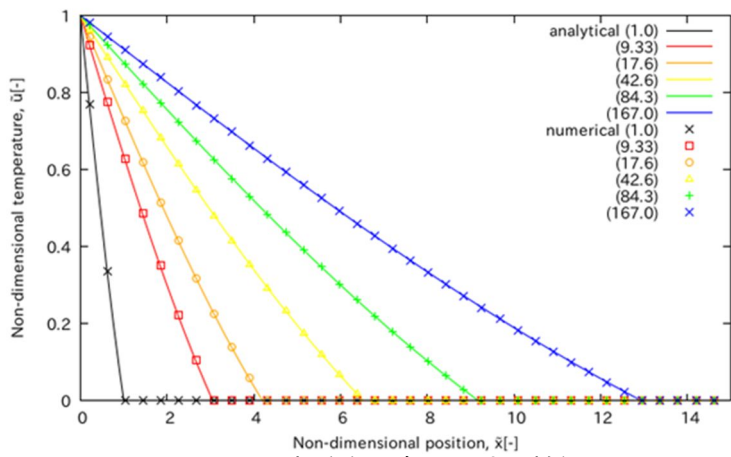


図4 相変化現象に関する検証

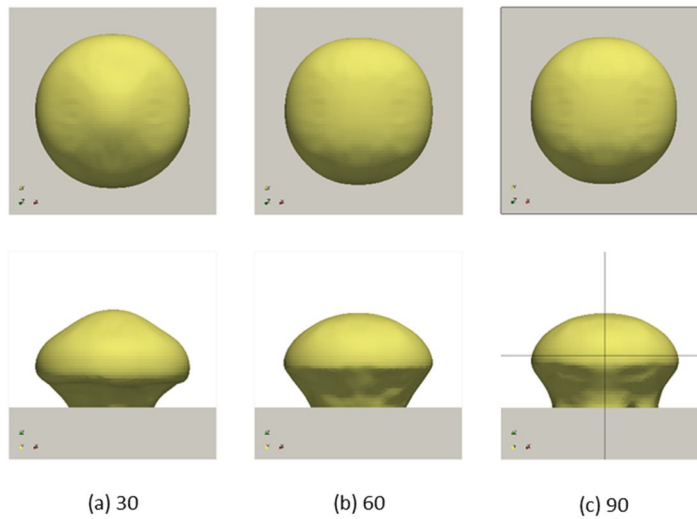


図5 キャビティ内気泡生成過程に関する解析

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Junya Onishi, Masashi Saito, Naoki Shikazono
2. 発表標題 A CARTESIAN GRID METHOD FOR NUMERICAL SIMULATION OF TWO-PHASE FLOW IN A CAPILLARY TUBE WITH ARBITRARY GEOMETRY
3. 学会等名 Asian Conference on Thermal Sciences (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大西 順也, 阿部 圭晃, 野々村 拓, 青野 光
2. 発表標題 LW-ACMにおける物体壁面境界の取り扱い方法に関する比較検討
3. 学会等名 第30回計算力学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Junya Onishi, Yoshiaki Abe, Taku Nonomura, Hikaru Aono
2. 発表標題 Performance analysis and tuning of the link-wise artificial compressibility method on multi-/many-core platforms
3. 学会等名 14th International Conference for Mesoscopic Methods in Engineering and Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大西順也, 阿部圭晃, 野々村拓, 青野光
2. 発表標題 LWACM (link-wise artificial compressibility method)のマクロ変数での計算機への実装とそのアルゴリズム理解
3. 学会等名 第29回計算力学講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 齊藤正士, 大西順也, 鹿園直毅
2. 発表標題 細管内二相流の数値計算における気泡形状の精度評価
3. 学会等名 第30回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Junya Onishi, Naoki Shikazono
2. 発表標題 Validation of Numerical Simulation of Drop Motion on Surfaces with Micro Patterns
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考