

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03934

研究課題名(和文) 不純物を含む水中における気泡と壁面間相互作用に関する実験的研究

研究課題名(英文) Experimental investigation on the interaction between a bubble and wall in water containing impurities

研究代表者

小笠原 紀行 (Ogasawara, Toshiyuki)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00552184

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：連続相としての液相中に分散相として気体が存在する流れである気泡流においては、気泡気泡間や気泡壁面間の相互作用がその流動構造の決定に重要な因子となる。本研究では、複数の気泡や壁面間の相互作用の結果としてもたらされる気泡クラスター形成や気泡合体といった現象を対象とした実験を行うことで、主に水中に含まれる電解質や界面活性剤の影響を加味した上で解析した。その上で、気泡間相互作用や液膜の薄膜化の素過程を定量的に評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気泡流の流動予測は、工業分野における気泡流利用の最適化や新規手法の開発において不可欠なものである。今回の研究成果は、水中の不純物の影響を加味した上で流動構造の決定因子である気泡間相互作用や液膜の薄膜化に関する未知であった基礎的な知見を取得したことであることに学術的な意義がある。また、これらの成果は気泡流予測のモデリングにおいて貴重な情報であり、今後の予測精度の向上等に対する貢献が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In bubbly flow, which is a flow in which gas exist as a dispersed phase in a liquid phase as a continuous phase, the bubble-bubble and the bubble-wall interactions can be important factors in determining the flow structure. In this study, we conducted experiments targeting phenomena such as bubble cluster formation and bubble coalescence resulting from the interaction between multiple bubbles and walls, and mainly considered the effects of electrolytes and surfactants contained in water. Then, the bubble-bubble interaction and the thinning process of a thin liquid film were quantitatively evaluated.

研究分野：流体力学

キーワード：混相流 気泡 壁面 薄い液膜 気泡クラスター 電解質 界面活性剤

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

(1) 液体中に小胞体としての気泡が混在する流れである気泡流は、自然界から工業分野における流動現象として幅広く見受けられる。気泡流の性質を利用した応用技術は、化学プラントにおける反応器や水質浄化のための曝気槽などの既存の応用技術のみならず、近年ではドラックデリバリーシステムにおけるマイクロバブルの利用等の医療技術への適用や、船底への気泡混入による環境負荷の低い船舶抵抗低減技術においても多くの注目を集めており、様々な研究が行われている。これら液相と気相を含む流動現象においては、流体中に含まれる界面活性剤や電解質などの不純物の存在により、異相間界面に様々な影響が及ぼされる。

(2) 気泡流の流動構造は、個々の気泡の表面における界面活性剤の存在など分子スケールのミクロな現象から、流れ場全体のマクロな構造に到るまで、ミクロ・メゾ・マクロの様々なスケールの現象が複雑に干渉し合いながら流動構造が決定されることが明らかになった。既存の知見から、界面活性剤の存在する水中では気泡同士の合体が抑制されること、気泡表面に吸着した活性剤分子による濃度マランゴニ効果により抗力が急激に増大することが知られているが、さらに、大域的な流動構造の変化が見られる例も存在する。特に、気泡が局所的に集積することで形成される気泡クラスタは単相における乱流の秩序渦構造より数倍大きなサイズを有し、乱流構造そのものも大きく変化する。このように液相中の不純物の差異により大域的な流動構造に多大な影響が及ぼされることは、気泡流のマルチスケール性を顕著に現した一例であり、一連の素過程の途切れのない詳細な理解が重要となる。また、クラスタ化現象は揚力によって壁面近傍に集積した気泡群が二次元的な運動をするよう幾何学的な拘束条件を付加されることが要因であると考えられるが、詳細なメカニズムの解明には近接する気泡や壁面との相互作用を正確に反映した気泡運動のモデリングが不可欠である。

(3) また、電解質溶液中では、気液界面の表面張力の僅かな上昇があるものの、マクロな流体物性は純水と比べて大きくは変わらず、気液界面の境界条件も同様にフリースリップ条件として扱われる。しかしながら、界面活性剤溶液中と同様に、電解質溶液中においても気泡合体が防止されることが知られている。これは、液相中の不純物の影響により、著しく近接した界面間における相互作用においては、従来の連続体としての流体力学における境界条件の表現のみでは問題設定が不十分であることを意味する。さらに、自然界や実機に見られる気泡流では、液相に含まれる不純物の影響は無視できない要素であり、この知見が流動予測の向上に寄与できる点においても工学的に意義深いものである。

2. 研究の目的

(1) 気泡の合体や気泡と構造体との干渉などの気泡流現象に内在する素過程は、近接する二つの界面間に形成される薄膜(液膜・気膜)の動的挙動として一般化されると考える。したがって、本研究においては、第一に、薄膜の動的挙動に対する液相に含まれる不純物の影響に関する知見を得ることを目的とした実験を行い、界面間相互作用の詳細を明らかにする。

(2) 第二に、以上の液膜の解析結果から得られる界面間相互作用に関する知見と、平板下を上昇する気泡群のクラスタ化現象をもたらす気泡間相互作用の知見から、気泡流のマルチスケール性に対する不純物の影響の一端を明らかにする。液膜の解析においては、気泡壁面間に形成される液膜を対象とした実験を行う。その際、従来の液膜研究で計測されてきた液膜の幾何形状のみならず、気泡に働く非定常力を直接かつ同時に取得することを目指し、従来の流体力学で扱われる薄い液膜の排水現象と表面科学で扱われる界面間相互作用の双方の視点から液膜の流体力学の理解に努める。また、斜め平板下を上昇する気泡群のクラスタ化は、気泡表面の境界条件(フリースリップ条件やノースリップ条件)によらず生じる一方、その定量的な挙動には相違があることを明らかにしている。そこで、少数の気泡群による実験を行い、二気泡間相互作用力の定量値をより正確に評価することを目指す。

3. 研究の方法

(1) 斜め平板下を上昇する球形気泡群における気泡間相互作用の評価

高さ 980 mm, 横幅 300 mm, 奥行き 40 mm のチャンネル内において、下部から 1mm 程度の群を発生する。チャンネルの傾斜角を調整することで、壁面に沿って上昇する気泡の上昇速度を変化し、気泡レイノルズ数を条件として設定して実験を実施する。液相には、電解質水溶液である 0.1 M 硫酸マグネシウム水溶液および、界面活性剤水溶液である 10 ppm Triton X-100 水溶液を用いることで気泡の合体を抑制しつつ、気泡界面の境界条件を硫酸マグネシウム水溶液中では free-slip 条件を実現し、Triton X-100 水溶液中では十分なマランゴニ効果によって気泡表面にせん断応力が発生することで no-slip 条件を実現する。気泡発生部から計測領域の中心までの距離を 150 mm, 350 mm, 550 mm, 750 mm の範囲で変化させることで、気泡が壁面下を上昇した距離の変化が気泡間相互作用に及ぼす過渡的な影響を解析する。実験では、高速度カメラにより気泡群の影絵を取得し、画像解析により気泡中心座標を算出し、その中心座標の時系列データから、各気泡の速度及び角速度を評価する。特に、加速度の評価においては座標データの平滑化を適切

に施すことで誤差の低減に努めた。

(2) 気泡が固体平板に接近する際に形成される液膜の動的挙動

劈開したマイカ平板を設置したアクリル容器内において、ステンレス製パイプが直動ステージに固定されており、マイカ平板に対して垂直方向に可動できる装置を作成した。気相には空気を用い、先端内径が2mmおよび3mmのパイプ先端に半球状の気泡を生成させ、パイプを動かすことによりマイカ平板に一定速度で接近する気泡を再現する。その際に平板と気泡間に形成される薄い液膜に対して、単色の青色LED光源を光源として用いた落射型顕微鏡により、液膜による干渉画像を高速度カメラにより取得する。その干渉縞のデータから液膜厚さ分布の算出を行った。また、液相には、超純水、気泡合体阻害効果の異なる二種類の50mM電解質水溶液（酢酸ナトリウム水溶液、硫酸マグネシウム水溶液）と10ppm界面活性剤水溶液（Triton X-100水溶液）を用いることで、液相中の不純物の影響について比較する。接近速度は10から1000 $\mu\text{m/s}$ の間で設定した。

4. 研究成果

(1) 相互作用しながら斜め壁面下を上昇する気泡群の運動

Free-slip, No-slip 両条件において、水平方向の気泡列が形成され、上昇距離の増加に伴い気泡列の気泡数は多くなる傾向が見られた。気泡発生部から350mmの観察位置では縦並びから横並びに遷移する二気泡が多く見られた（図1）。当初縦並びである二気泡は、後続気泡が先行気泡に縦並びを維持したまま接近し、気泡中心間距離が気泡径程度になるまで近づく。その後、縦並びの配置が横並びの配置に変化するが、その後は横並びの配置を維持しつつ気泡間距離はゆっくりと広がる。

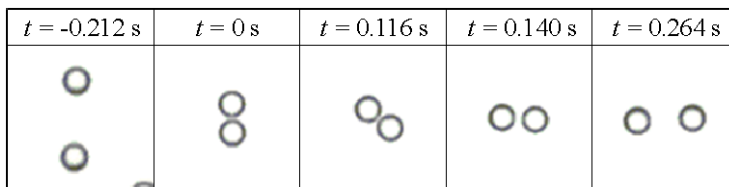


図1 二気泡の相互作用の様子

(2) 二気泡間相互作用力の評価

複数の気泡対をサンプリングし、二気泡間相互作用について統計的に解析した。基準とする気泡に対して最も近い気泡の座標、相対速度、相対加速度を算出し、相対座標を区切った領域内において平均することで、二気泡間の相対速度分布ならびに相対化速度分布が求まる。図2および図3が各々の例である。相対速度分布より、二気泡が縦方向に並んでいるとき、先行気泡の影響は気泡径の5倍以上に及び、お互いが接近する方向の相対速度が生じている。二気泡が接近するにしたがってこの接近速度は増加する。これは、先行気泡の後流の影響によるものと考えられる。二気泡が真っすぐ縦並びまたは横並びを形成する場合、偏角方向の相対速度はほとんど生じていない。一方、二気泡が斜めに位置するときには気泡間距離が気泡径の1.5倍程度以下の領域において二気泡が横並びになる方向に偏角方向速度が生じており、気泡間距離が気泡径の1.5倍程度以上の領域では横並び列が崩れる方向の偏角方向速度が生じている。

図3に二気泡の相対座標と相対加速度との関係を示す。図中の黒い線は図1に示した二気泡の相互作用時の軌跡を示している。二気泡が縦並びのとき、二気泡間距離が小さくなるほど後流による接近方向加速度の絶対値が大きくなる。横並び時では、気泡間距離が気泡径の1.5倍よりも小さい領域では二気泡間に斥力が働き、気泡間距離がそれよりも大きい領域では引力が働く。二気泡が横並びのとき、二気泡間距離がごく近く気泡径の0.3倍以下の領域で不安定点が存在している。一方、少し気泡間距離が離れた範囲では、横並び列形成を誘起する方向の偏角方向加

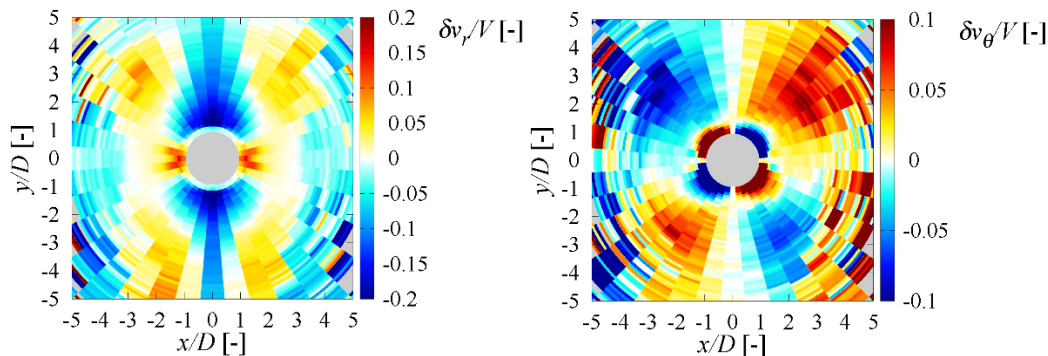


図2 斜め平板下を上昇する二気泡における相対速度分布（Free-slip条件）

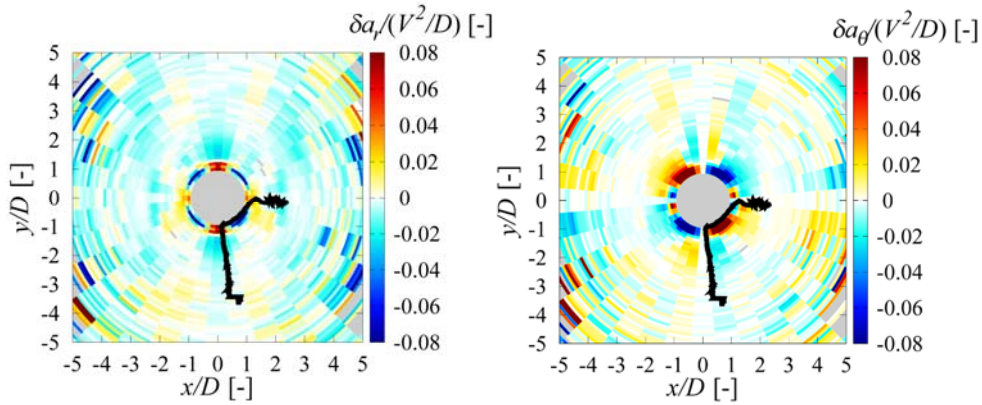


図3 斜め平板下を上昇する二気泡における相対加速度分布 (Free-slip 条件)

速度がはたらいており安定点となっている. 相対速度分布及び組閣度分布から, この条件では横並びとなった二気泡は気泡間距離がごく近いとき最も大きい斥力を受け, 慣性力の影響により気泡間距離の 2.5 倍程度まで離反するが, その後, 引力が生じ気泡間距離は減少し, 最終的には気泡径の 1.5 倍程度の距離を保って平衡状態になるだろうことが予想される. また, 気泡表面の境界条件の影響としては, 定性的には違いが見られないものの, No-slip 条件の場合の方が, 誘起される相互作用力が強くなる傾向があることがわかった.

(3) 薄い液膜の排水過程における液膜形状の変化に対する接近速度の影響

図 4 に, 超純水中においてマイカ平板に一定速度で接近する 3mm の気泡により形成される液膜厚さ分布の時間変化を示す. 上より 10 から 1000 $\mu\text{m/s}$ まで接近速度が増加する. 最も接近速度が遅い 10 $\mu\text{m/s}$ の条件においては, 液膜形状は平らになっている. 現状の膜厚の計測精度は光源の 1/4 波長程度 (100nm 程度) であり, それ以下の凹凸は計測されない. 接近速度が増加すると, 液膜中央部にくぼみが形成されディンプル形状となる. 接近速度の増加によりこのディンプル形状の厚みが増加する傾向がある. その後の液膜の破断過程を観察すると, 液膜の最薄部となるディンプル形状のリム部から液膜が破断する様子が観察されたが, 液膜の破断するタイミングについては実験条件においては, 破断時の厚さの基準等の絶対的な理由は見当たらなかった.

(4) 液膜の排水過程における電解質及び界面活性剤の影響

今回の研究においては液中の不純物として二種類の電解質溶液と一種類の界面活性剤溶液を用いて超純水と比較実験を実施した. まず, 電解質溶液としては硫酸マグネシウム水溶液と酢酸マグネシウム溶液を 50 mM の濃度のものを使用した. これらの電解質溶液では密度や表面張力といったマクロな流体物性は大きく変化しない一方, 既存の研究により気泡合体の阻害効果が報告されている. 特に硫酸マグネシウム水溶液は気泡合体阻害効果が強いものを言われている. 図 5 に液膜中央部の厚さを各接近速度 (レイノルズ数) の条件間で同一の無次元時刻において比較したものを示す. 超純水との比較を行った結果, 接近速度が速い場合には違いが見られなかったが, 接近速度が非常に遅い 20 $\mu\text{m/s}$ 以下の場合において, 液膜中央部の薄膜化が電解質溶液中においては鈍化することがわかった. このときの最薄部の絶対厚みは 100nm 程度になっているもの考えられるが, このように両界面が極接近した状況において電解質の効果があらわれることがわかった. ただ, 今回用いた二つの電解質の種類には依存しなかった. 次に, 界面活性剤溶液中においては接近速度の条件によらず超純水に比べて薄膜化が遅くなることで液膜形状も異なる様子が観測された. これは, マランゴニ対流により界面近傍の排水の流れが抑制されることで, 液膜中央部から外へ向かう排水が妨げられることが原因であるものと考えられる. 以上から, 気泡表面の境界条件が Free-slip 条件から No-slip 条件に変化した場合に生じる定量的な変化が評価できた上に, 連続

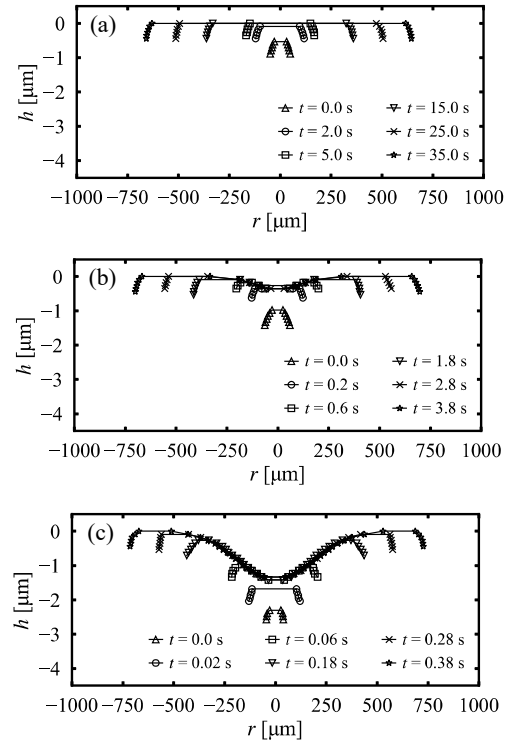


図4 液膜形状の経時変化

体力学としての流体力学的な境界条件を変化しない電解質溶液においても界面間隔が非常に薄くなる条件において相違が生じることが明らかとなった。

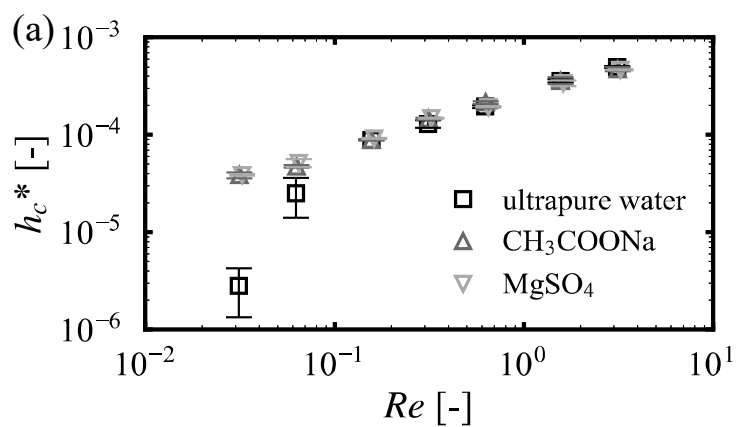


図 5 液膜中心部の厚みの接近速度（レイノルズ数）に対する依存性と電解質の影響

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Ogasawara, H. Takahira	4. 巻 337
2. 論文標題 The effect of contamination on the bubble cluster formation in swarm of spherical bubbles rising along an inclined flat wall	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 141-147
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nucengdes.2018.06.019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 本西泰大, 古結慶幸, 小笠原紀行, 高比良裕之
2. 発表標題 接近する気泡とマイカ平板間に形成される液膜変形に対する接近速度と液相中の不純物の影響
3. 学会等名 混相流シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村大亮, 山本草太, 小笠原紀行, 高比良裕之
2. 発表標題 斜め壁面下を上昇する球形気泡群による気泡群のクラスタ化挙動の統計的解析
3. 学会等名 日本機械学会 第98期 流体工学部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古結慶幸, 本西泰大, 小笠原紀行, 高比良裕之
2. 発表標題 気泡とマイカ平板間に形成される液膜挙動に対する水中の不純物及び接近速度の影響
3. 学会等名 日本機械学会第98期流体工学部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本草太, 中村大亮, 小笠原紀行, 高比良裕之
2. 発表標題 斜め平板下を上昇する球形気泡群における過渡的な気泡間相互作用
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshiyuki Ogasawara, Daiki Tanaka, Yasuhiro Motonishi, Hiroyuki Takahira
2. 発表標題 Effect of Electrolytes on the Drainage and Rupture of the Thin Liquid Film Formed Between a Bubble and a Solid Surface
3. 学会等名 ASME - JSME - KSME Joint Fluids Engineering Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiyuki Ogasawara, Shohei Goda, Daisuke Nakamura, Hiroyuki Takahira
2. 発表標題 The interaction among spherical bubbles rising along an inclined flat wall
3. 学会等名 10th International Conference on Multiphase Flow (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小笠原紀行, 合田昌平, 中村大亮, 高比良裕之
2. 発表標題 斜め平板下を上昇する気泡群における気泡間相互作用
3. 学会等名 第65回理論応用力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 合田昌平, 中村大亮, 小笠原紀行, 高比良裕之
2. 発表標題 斜め平板下を上昇する球形気泡群による横並びの気泡列形成
3. 学会等名 混相流シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiyuki Ogasawara
2. 発表標題 Effect of impurities in water on bubbly flow and bubble-bubble interaction
3. 学会等名 3rd Transport Phenomena Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本西泰大, 小笠原紀行, 高比良裕之
2. 発表標題 マイカ平板と気泡間に生じる液膜の排水に対する不純物の影響
3. 学会等名 日本機械学会第97期流体工学部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村大亮, 合田昌平, 小笠原紀行, 高比良裕之
2. 発表標題 斜め壁面下を上昇する球形気泡群による気泡クラスタ形成に対する界面活性剤の影響
3. 学会等名 日本機械学会第97期流体工学部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Ogasawara, N. Okubo, D. Tanaka, H. Takahira
2. 発表標題 Influence of electrolytes on the liquid film rupture and the interaction force between a bubble and a glass surface
3. 学会等名 8th European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 合田昌平, 高比良裕之, 小笠原紀行
2. 発表標題 斜め平板下を上昇する少数気泡群における気泡間相互作用の実験的解析
3. 学会等名 混相流シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小笠原紀行, 合田正平, 高比良裕之
2. 発表標題 斜め平板下を沿って上昇する球形気泡群によるクラスタ挙動の解析
3. 学会等名 日本機械学会第96期流体工学部門講演会
4. 発表年 2018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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------