

令和元年6月22日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06076

研究課題名(和文)電気流体力学ポンプの特性解明と宇宙用熱輸送デバイスへの適用検討

研究課題名(英文) Investigation into the characteristics of electrohydrodynamic pumps and their applications to space heat transport devices

研究代表者

柳田 秀記 (Yanada, Hideki)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90166554

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)：絶縁性液体中の電荷に作用するクーロン力を駆動力とする電気流体力学(EHD)ポンプの特性に及ぼす注入電荷と解離電荷の影響を明らかにするとともに、両電荷のシナジー効果により、電極形状によっては比較的大きな圧力が生成されることを明らかにした。また、EHDポンプ特性に及ぼす作動液体の温度の影響を明らかにし、熱輸送デバイス用途に適した作動液体の選定に際し有益な情報を提供できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、注入電荷と解離電荷のいずれかのみを取り上げ、イオンドラッグポンプ、純伝導ポンプと呼ばれるEHDポンプの研究が別々に行われて来た。しかしながら、両電荷は同時に存在するのが通常であり、両電荷の存在を考慮してEHDポンプを設計する必要があることを示したことは極めて意義深い。また、作動液体の温度の影響について明らかにし、EHDポンプの宇宙用熱輸送デバイスへの適用に向けて有益な情報を提供できた。

研究成果の概要(英文)：This study investigates the effects of the two charge generation mechanisms, charge injection and dissociation, and liquid temperature on overall EHD pump characteristics. It is shown that when the mechanisms of charge injection and dissociation act in concert, the total developed pressure is augmented to be larger than the sum of the pressures developed by each mechanism separately. This synergistic augmentation is caused by the interactions between the injected and dissociated charges. It is also found that the degree to which the pressure is synergistically augmented depends on the configuration of electrodes in the EHD design. In addition, it is shown that the pressure developed by the EHD pump at a zero flow rate increases with decreasing temperature and the slope of pressure-flow rate characteristics is steeper with lower temperature. The results obtained in the study will contribute to designing EHD pumps suited to heat transport devices used in space.

研究分野：流体工学，フルードパワー

キーワード：電気流体力学 EHDポンプ 電荷注入 解離 イオンドラッグ コンダクション

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

1. 研究開始当初の背景

絶縁性液体中に挿入した電極間に高電圧を印加すると電荷注入現象により単極性の電荷(イオン)が生成され、反対極性の電極に向けて泳動する。また、解離性分子の解離により生じた正負の電荷が反対極性の電極に向けて泳動する。電荷の泳動に伴い周囲の中性分子が引きずられることから液体に流動が生じる。これらの現象は電気流体力学(Electrohydrodynamics, EHD)現象と呼ばれ、流動現象は冷却システム、マイクロ液圧システム、 μ TAS などへの応用が有望であり、EHD 現象の利用により可動部を持たない小型・軽量で電氣的に制御ができる送液システム(ポンプ)の実現が可能となる。EHD ポンプの主要部は電極であり、電極の形状と電極設置部の流路形状はポンプ性能に強く影響するが、それらは主として実験により試行錯誤的に決定され、ポンプ特性も主として実験的に調べられている。そのため、ポンプ特性に及ぼす諸因子の影響を十分に考察できておらず、EHD ポンプとして最適な形状が見出されているとは言い難い。また、電荷生成量は温度に依存すると考えられるが、EHD ポンプ特性の温度依存性はほとんど調べられておらず、EHD ポンプ特性の経時変化(耐久性)に関する報告も見当たらない。さらに、将来の衛星は大電力化(現状 10kW \rightarrow 25kW \rightarrow 50kW)する見込みであり、搭載機器の総発熱量は増加する。排熱システムに EHD ポンプが導入されると配置の自由度が高まるが、EHD ポンプを利用した熱輸送デバイスは NASA においても研究が開始された段階であり、研究の余地が多くある。

2. 研究の目的

注入電荷に関して申請者独自の決定方法を含む数値シミュレーション手法を用いて、注入電荷と解離電荷が EHD ポンプ性能に及ぼす影響を明らかにするとともに、EHD ポンプ特性に及ぼす液温の影響を実験的に明らかにする。EHD ポンプの耐久性について調べることに加え、ポンプの多段化・並列化による大容量化を行い、宇宙用熱輸送デバイスに適した EHD ポンプシステムの仕様を見出すことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では次の6項目について取り組むことを当初計画した。しかし、項目(1)、(2)で予定より多くの時間を要したこと、ならびに、最終年度に計画した多段化 EHD ポンプの製作が思うように進まず、結果として項目(4)~(6)については成果を得るには至っていない。

- (1)EHD ポンプ性能に及ぼす液体種類・物性値および電極形状の影響
- (2)EHD ポンプのポンピングメカニズムの解明
- (3)EHD ポンプ特性の経時変化(耐久性)
- (4)EHD ループを利用した熱輸送システムの性能検証
- (5)多段化・並列化による大容量化
- (6)衛星用熱輸送デバイスを想定した EHD ポンプループの性能評価

3.1 EHD ポンプ特性の計測(液体の種類と液温の影響)

項目(1)、(3)に関して、図1に示す2組の電極対を有する EHD ポンプを図2の閉回路に組み込んで、ポンプの圧力-流量特性を2種類のフッ素系溶剤(液体 A: Vertrel[™] XF ($C_3H_2F_{10}$), 液体 B: Novec[™] 7100 ($C_4F_9OC_2H_5$))を試験液体として用いて異なる温度で計測した。また、長時間電圧を印加したときのポンプ発生圧力と流量の経時変化を記録した。なお、印加電圧はエミッタ電極を負極として 1.5 kV に設定した。

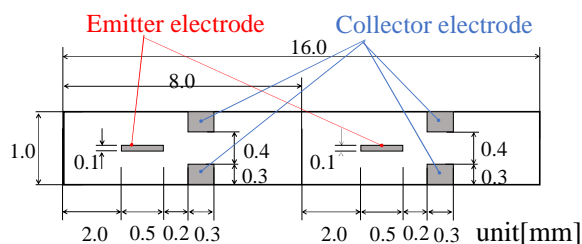


図1 EHD ポンプ概略(流路幅 5mm)

3.2 ポンピングメカニズムの解明

測定されたポンプ特性が数値シミュレーションで再現できるか否かが検討する。数値シミュレーションのためには注入電荷密度の値およびイオン移動度の値の決定が重要であり、申請者が提案している方法を利用して、これらの値を決定する。電荷注入現象に加えて解離電荷の影響を考慮し、さらに、解離の電界依存性(オンサガー効果)を考慮した数値シミュレーションを行い、電荷生成要因とポンプ特性の関係を明らかにする。

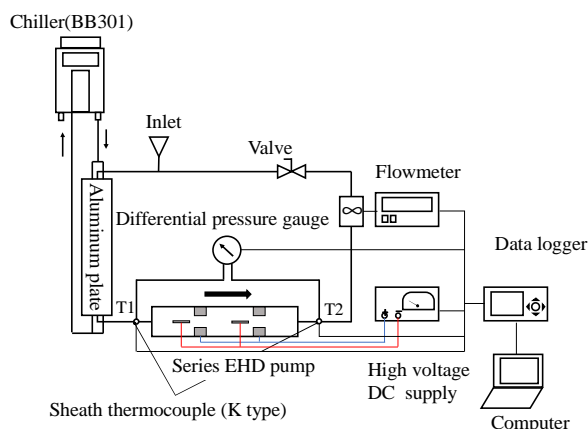


図2 実験装置概略

4. 研究成果

4.1 ポンプ特性の温度依存性

図3は、液温を 3 $^{\circ}$ C ~ 45 $^{\circ}$ C に変化させて測定した圧力-流量特性である。図4より、液

温が低いほど低流量時の圧力が高く、圧力 流量特性の傾斜が大きくなっている．逆に温度が高くなると、低流量時の発生圧力は低下するが最大流量は増加する傾向にあり、熱輸送デバイス用として適した特性であると思われる．一方、液体 B の圧力 流量特性は図 4 のようになった．液温が低いほど発生圧力が高くなる傾向は液体 A と同様であるが、液温の上昇に伴い、発生圧力だけでなく流量も低下し、熱輸送デバイス用作用流体としては適していない．

なお、図 3 A には申請者の提案が含まれているモデルを用いた数値解析結果も示されている．低温になるほど注入電荷密度（図 4 中の w_e ）が増大すると仮定した数値解析結果であるが、低温（液体 A の 3°C、液体 B の 6°C）の特性を除くと実験結果と数値解析結果は良好に一致しており、本研究で用いたモデルは低温域を除くと良好にポンプ特性を予測できると判断できる．

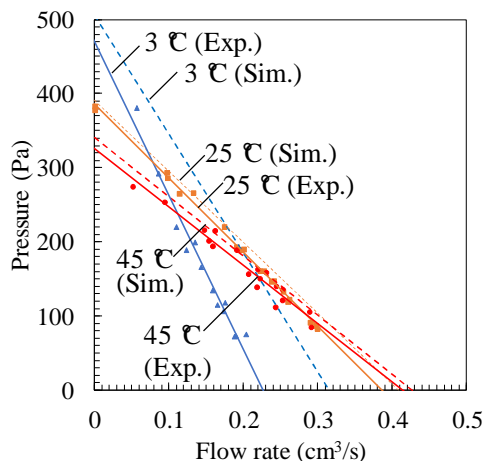


図 3 圧力 流量特性に及ぼす温度の影響（液体 A，実験と数値解析）

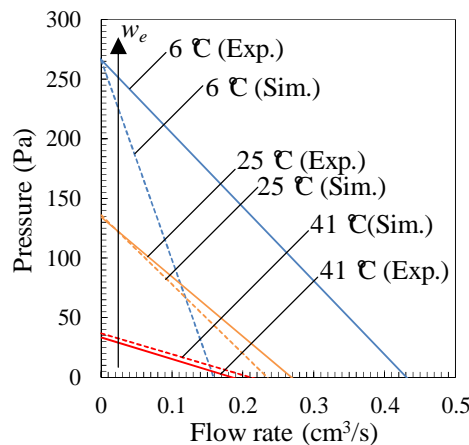


図 4 圧力 流量特性に及ぼす温度の影響（液体 B，実験と数値解析）

4.2 ポンプメカニズムの解明

本研究で用いた数値解析の基礎式は、流れ場を記述する連続の式と Navier-Stokes の式、電場を記述する電荷保存則とガウスの式である．電荷保存則中の電流密度には対流項が含まれ、Navier-Stokes の式には駆動力となるクーロン力が含まれるため、流れ場と電場を連成させて解いている．また、電荷は 3 種類、すなわち、負（または正）の注入電荷、正と負の解離電荷であり、それぞれの電荷について離散化した電荷保存式を解き、総電荷密度を用いてクーロン力を計算した．また、正負の解離電荷の生成密度は電界強度の増加に伴って増大するというオンサガーのモデルを組み込んだ．

図 5 は、数値解析で用いた 3 種類の電極形状であり、(a)は図 1 の電極と同じで、上下対称のため上半分のみを示している．(b)、(c)は流路壁面に長さの異なる平板電極を配置したもので、下側半分のみを示している．図(b)は電極が流路内部に突き出ている形状、(c)は流路壁面と電極表面が同一面にある形状である．

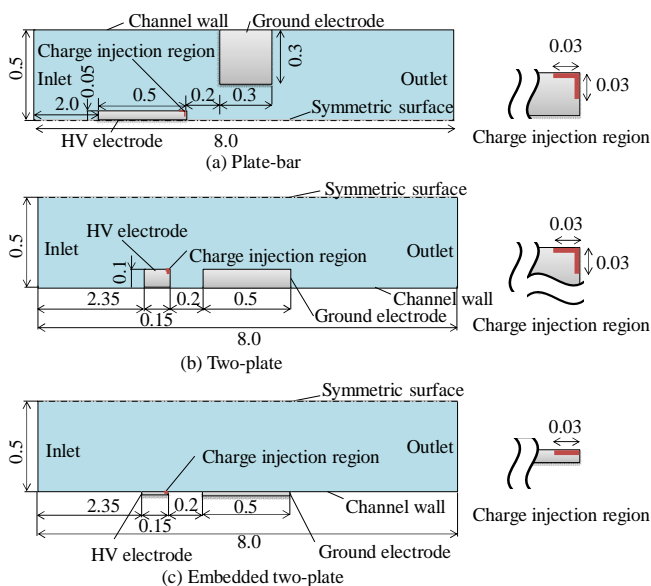


図 5 3 種類の EHD ポンプ

従来、注入電荷に作用するクーロン力を駆動力とするイオンドラッグポンプ (ion drag pump)、解離電荷に作用するクーロン力を駆動力とする純伝導ポンプ (conduction pump) は個別に研究され、注入と解離の両方の電荷生成機構を考慮した研究が行われるようになったのは比較的最近である．

本研究では、図 5 の電極を有する 3 種類の EHD ポンプを対象として、注入電荷のみ (Only ion drag)、解離電荷のみ (Only conduction)、注入電荷 + 解離電荷 (Ion drag + conduction) の 3 種類の条件について数値解析を行い、各電荷がポンプ特性にどのように影響するかを調べた．数値解析にはセバシン酸ジブチル (DBS) という可塑剤の物性値と実測圧力から推測した注入電荷密度の値を用いた．また、印加電圧はエミッタ電極 (HV electrode) を正極とし、その電極の右上部から電荷が注入されるとして数値解析を行った．印加電圧は 2 kV とした．

図 6 は数値解析結果である．図 6(a)は図 5(a)のポンプの特性であり、解離電荷のみ (Only

conduction) による発生圧力は小さく、注入電荷の影響が大きいことが分かる。流量 0 の場合と比較すると、解離電荷と注入電荷がそれぞれ単独で生成されたときの圧力の合計 (●印) よりも、両電荷がともに生成されることで発生圧力が大きくなること示された。このことは図 6(b), (c) に示すように、図 5(b), (c) の電極のポンプではより顕著に表れる。

図 7 は、図 5(b) のポンプ内のクーロン力分布を示している。図 7(a) は電荷注入のみを考慮したときのクーロン力分布であり、注入電荷の拡がりや薄くなるためクーロン力が作用する領域が狭くなる。図 7(b) は解離電荷のみが生成するとしたときの結果であり、解離電荷が両電極の周囲に広く分布するため、流路断面全体にクーロン力が作用するが、逆向きに作用する力により打ち消されるため、結果的には大きな圧力発生には至らない。図 7(c) は注入と解離の両方の電荷が生成するときの結果であり、左のエミッタ電極から注入される正電荷により解離のみに比べて両電極周囲の電荷分布に変化が生じ、右向きの力が増しており、これにより発生圧力が大きくなったと考えられる。

以上のように、注入電荷と解離電荷が同時に存在することにより、電荷密度分布に変化が生じることでクーロン力分布が変化し、結果として両電荷が単独で生成されたときの圧力の和よりもかなり大きな圧力が生成されると考えられる。

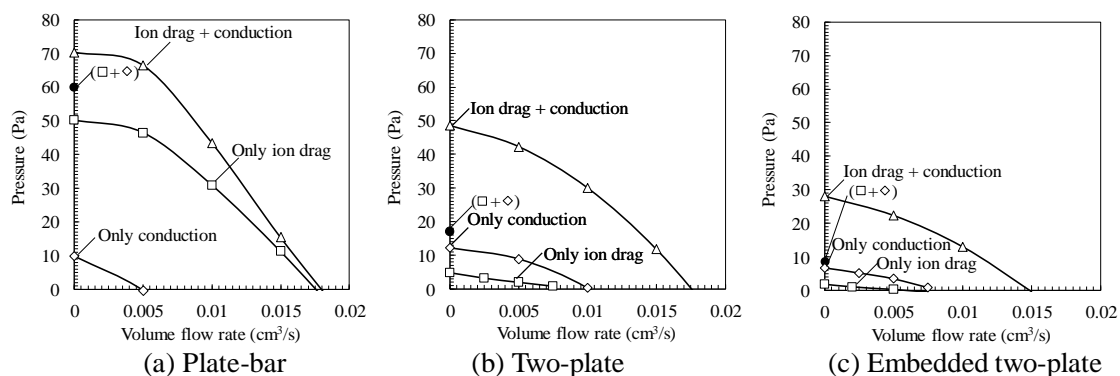


図 6 EHD ポンプの圧力 流量特性

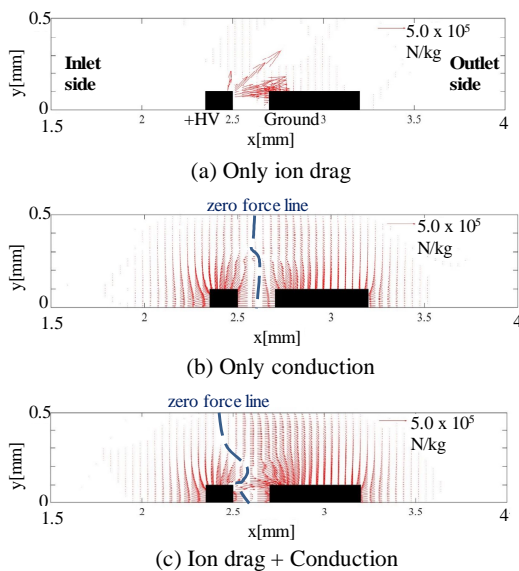


図 7 Two-plate 型電極を有する EHD ポンプ内のクーロン力分布

4.3 EHD ポンプの耐久性

図 8 は、図 1 に示す 2 組の電極対を有する EHD ポンプと液体 A を用いて、1.5 kV 印加したときのポンプの発生圧力と流量の時間変化を測定した 1 例である。特に圧力は細かく変動し、電圧印加開始後 80 時間以内はかなり大きく変動している。圧力が急激に大きくなると流量が急激に低下しており、図 3 の圧力 流量特性の関係とは対応している。時間の経過とともに圧力、流量ともに低下し、400 時間を経過した後で動作が停止した。電極部を分解して調査した結果、コレクタ電極の矩形隙間が塞がれるほどの堆積物があり、元素分析した結果、電極材料や作動液体の構成元素が検出された。イオン化しにくい電極材料の選定を行うことが一方法であると思われるが、これについては引き続き検討する必要がある。

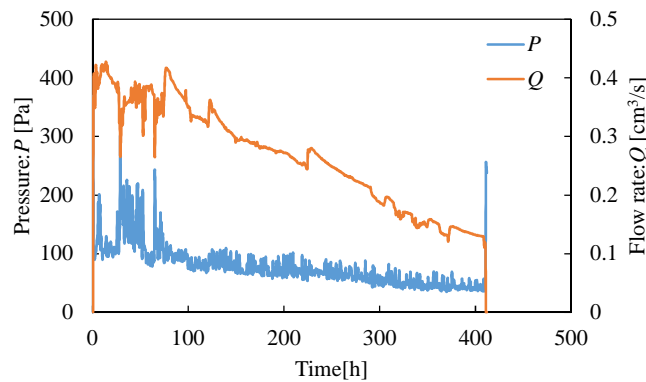


図8 EHDポンプの耐久性(図1のポンプ, 液体A, 1.5 kV, 室温)

4.4 本研究結果の意義

従来, 注入電荷と解離電荷のいずれかのみを取り上げ, イオンドラッグポンプ, 純伝導ポンプと呼ばれる EHD ポンプの研究が別々に行われて来た。しかしながら, 両電荷は同時に存在するのが通常であり, 両電荷がポンプ特性に及ぼす影響を明らかにしたことが, また, 両電荷のシナジー効果により, 電極形状によっては比較的大きな圧力が生成されることを明らかにしたことは EHD ポンプの設計に有益な知見をもたらしたと考えている。また, EHD ポンプ特性に及ぼす作動液体の温度の影響は従来報告例が見当たらず, 熱輸送デバイス用途に適した作動液体の選定に際し有益な情報を提供できたと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- (1) [M. Nishikawara](#), K. Shomura, [H. Yanada](#), Synergy between injection and dissociation mechanisms in electrohydrodynamic pumps modeled numerically, *Journal of Electrostatics*, 93 (2018), 137-145. doi: 10.1016/j.elstat.2018.04.009 (査読有)
- (2) [Nishikawara M.](#), Shimada M., Saigo M., [Yanada H.](#), Numerical investigation of the characteristics of an ion drag pump, *Journal of Electrostatics*, Vol.84 (2016), 23-31. doi: 10.1016/j.elstat.2016.08.001 (査読有)

〔学会発表〕(計 11 件)

- (1) 品川裕次・[西川原理仁](#)・[柳田秀記](#), EHD ポンプ特性に及ぼす注入電荷と解離電荷の影響, 日本設計工学会東海支部平成 30 年度研究発表講演会講演論文集, (2019), 36-37.
- (2) [M. Nishikawara](#), R. Yoneda, [H. Yanada](#), [T. Miyakita](#), K. Sawada, Temperature dependence of the characteristics of an electrohydrodynamic pump with plate-bar electrodes, 2018 Joint Electrostatic Conference, Boston, Massachusetts, USA, June 18-20 (2018) (CD 全 10 頁)
- (3) [柳田秀記](#)・[西川原理仁](#)・[米田涼](#)・[宮北健](#)・[澤田健一郎](#), EHD ポンプ特性の温度依存性に関する研究, 平成 30 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, (2018), 47-49.
- (4) [中村裕朔](#)・[西川原理仁](#)・[柳田秀記](#), EHD ポンプ特性に及ぼす電極形状と寸法の影響, 日本設計工学会東海支部平成 29 年度研究発表講演会講演論文集, (2018), 51-52.
- (5) [H. Yanada](#), [M. Nishikawara](#), K. Shomura, Effects of Charge Injection and Field-Enhanced Dissociation on Electrohydrodynamic Flow and Pumping, The 14th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2017), Sendai, Japan (2017), 460-461.
- (6) [M. Nishikawara](#), K. Shomura, M. Saigo, and [H. Yanada](#), Effects of liquid physical properties and charge generation mechanism on electrohydrodynamic flow and pumping, 10th JFPS International Symposium on Fluid Power, Fukuoka, Oct., 2017, (2017), 全 6 頁.
- (7) [澤田健一郎](#)・[宮北健](#)・[西川原理仁](#)・[柳田秀記](#)・[岡本篤](#)・[杉田寛之](#), 電気流体力学現象を用いた能動熱制御技術の実現可能性検討, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, 3F16, 新潟, (2017 年 10 月), 全 6 頁.
- (8) [M. Nishikawara](#), K. Shomura, and [H. Yanada](#), Effect of interaction between ion drag and conduction on electrohydrodynamic pumping, Proceedings of the 45th International Summer School-Conference Advanced Problems in Mechanics 2017, St. Petersburg, (Jun. 2017), 316-325.
- (9) [柳田秀記](#)・[正村孝太](#)・[西川原理仁](#), EHD ポンプ特性に及ぼす電荷生成機構の影響, 平成 29 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, (2017), 31-33.
- (10) [磯村鷹弥](#)・[松村純宏](#)・[西川原理仁](#)・[柳田秀記](#), 空気用 EHD ポンプの特性に関する研究, 日本設計工学会東海支部平成 28 年度研究発表講演会講演論文集, (2017), 32-33.
- (11) [正村孝太](#)・[西川原理仁](#)・[柳田秀記](#), 電気流体力学流動現象に関する研究, 日本設計工学会東海支部平成 28 年度研究発表講演会講演論文集, (2017), 30-31.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等：<http://ec.me.tut.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：西川原 理仁
ローマ字氏名：Nishikawara Masahito
所属研究機関名：豊橋技術科学大学
部局名：大学院工学研究科
職名：助教
研究者番号(8桁)：50757367

研究分担者氏名：宮北 健
ローマ字氏名：Miyakita Takeshi
所属研究機関名：国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
部局名：研究開発部門
職名：研究員
研究者番号(8桁)：00748121

(2)研究協力者

研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

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。