

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13928

研究課題名(和文)熱設計制約を低減するループ型自励振動ヒートパイプの熱輸送機構と設計自由度の解明

研究課題名(英文)Thermal Performance of Circular Oscillating Heat Pipe for Highly Adaptable Tube Layout and Arrangement of Heated and Cooled Sections

研究代表者

岡崎 峻 (Okazaki, Shun)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主任研究開発員

研究者番号：00747751

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：高機能で低質量なシステム構築を目的とし、従来の自励振動ヒートパイプ(OHP)で用いられる蛇行配管を展開した逆止弁付き円形配管OHPを構築し、管の経路と加熱部と冷却部の数が性能に与える影響を評価した。水平設置条件で、蛇行配管OHPと円形配管OHPの双方で圧力進行波を観測し、熱輸送性能も同等であった。さらに、OHPの駆動には最低2セットの加熱部と冷却部が必要であり、セット数の増加で熱輸送性能は変化しなかった。よって、高自由度な配管構成、かつ、熱源と冷却部の構成でOHPの駆動が可能である。応用として、高熱抵抗の面間にOHPを適用し、アルミと比較して1/5の質量で熱抵抗低減と面内への熱拡散を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来研究される自励振動ヒートパイプ(OHP)は主に蛇行配管で構成されており、実利用において管構成の制約は応用を制限する要因になる。本研究では、配管レイアウトと加熱部と冷却部の配置に対してOHPが高い適応性を有していることを実証し、OHPを用いた空間分布する複数熱源とラジエータの熱結合やハニカムパネルへの適用など、低リソースでの高度な熱制御システム構築や新しいOHPの適用先を切り開くと期待される。また、複数点の圧力計測による圧力進行波の観測、加熱部と冷却部の数が動作に与える影響は、従来の蛇行配管OHPではほとんど評価されておらず、OHP動作原理の解明に資するデータである。

研究成果の概要(英文)：Oscillating Heat Pipe (OHP) with a check-valve was investigated to make a high-performance and low-mass system. We compared the thermal performance of the conventional configuration of closed-loop multiple-serpentine routing OHP (Serpentine OHP) and circular ring configuration OHP (Circular OHP) to investigate the adaptability of heat transfer routing and arrangement of heated and cooled sections. In a horizontal position, traveling pressure waves were observed, and the thermal performance was almost the same for both types of OHPs. OHP needs more than two sets of the heated and cooled sections for operation, and the thermal performance was not changed by increasing the number of sets. From these results, OHP has high adaptability of tube layout and arrangement of heated and cooled sections. As an actual application, OHP was applied between the surfaces with high thermal resistance like a Honeycomb panel. OHP reduced the thermal resistance with a mass of 1/5 compared with aluminum.

研究分野：熱制御

キーワード：熱制御 自励振動ヒートパイプ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

放熱面や断熱面を適切に設けるなど熱設計が宇宙機設計に課す制約は大きい。特に、新技術の実証や未踏環境にチャレンジするミッションでは、機器配置など熱設計が課す制約が少ない高自由度な設計、かつ、低リソースでの設計が望まれる。一方で、宇宙機の構体に用いられるハニカムパネルの面外と面内方向の熱抵抗は高く、軸方向グループヒートパイプ (HP) を用いた熱輸送やアルミニウムの熱伝導により熱抵抗を低減している。さらに、搭載機器が空間に分散する条件では、3次元の HP 配置やポンプループの適用などが必要であり、大きなリソースを要する。よって、既存の技術では“低リソース”と“高度な要求”の双方を満たす設計は困難である。

この状況を打破する熱制御デバイスとして、自励振動ヒートパイプ (OHP) の駆動原理と特徴に注目した。OHP は熱源と冷却部を複数回往復する配管経路によって流体の流動が励起され、二相流による熱輸送に流体駆動にポンプなど外部電力を要さない(低電力)、内部にウイック構造の無い細管で構成可能(低質量)、熱輸送能力が加速度環境の影響を受けにくい(耐環境性)、などの優れた特徴を有している。しかし、研究されているほとんどの OHP は加熱部と冷却部を往復する蛇行管を用いた OHP (蛇行配管 OHP) である。OHP の動作原理は、配管のレイアウトに制約を課さないと考えられるが、配管レイアウトや熱源と冷却部の配置に関する研究はほとんど行われていない。そこで、現在の宇宙機熱設計の課題である“低リソース”で“高度な要求に応える”熱設計を実現するために、OHP の熱輸送経路(配管レイアウト)と熱源と冷却部への適応性を評価し、熱設計制約を低減させるシステム構築が可能なデバイスへと発展させるための研究を着想した。

2. 研究の目的

“低リソース”、かつ、“高度な要求に応える”熱設計を実現するデバイスへと OHP を発展させるために、蛇行配管で構成される従来型 OHP の U 字部を展開したレイアウトの円形配管 OHP を構築する。従来型の蛇行配管 OHP と今回提案する円形配管 OHP の比較により、OHP の配管レイアウトと、熱源と冷却部の分布が動作に与える影響の評価を行う。従来の蛇行配管 OHP の研究において、U 字部の管断面形状(流路)を急激に変化させることで、水平姿勢での性能が向上することが報告されており、圧力損失が OHP の動作促進に寄与する可能性が示唆されている。一方で、U 字部での圧力損失は性能を劣化させる要因としても考えられる。しかし、多くの従来型 OHP は蛇行管で構成されるため、U 字部の排除が OHP の熱輸送に与える影響の評価を行った研究はない。そこで、U 字型の急峻なターンの影響を削減した円形配管 OHP を用いて、配管レイアウトが OHP の熱輸送性能に与える影響を評価する。次に、熱源と冷却部の組み合わせ数(ループ内での偏り)が熱輸送に与える影響を評価することで、熱源と冷却部の分布に対する適応性を評価する。最後に、実利用を想定したハニカムパネルの表裏スキムパネル間の熱抵抗低減を目的として本研究成果を利用した OHP を構築し、その有用性を示す。これら、配管レイアウトと熱源と冷却部のループ内での偏りに対する適応性を示すことで、低リソースで高度な要求に応える熱制御デバイスへと OHP を発展させる。本研究成果は、小型探査機などリソース制約の厳しいシステムで熱制御が生む設計制約を緩和し、限られたリソースを前衛的ミッションや優先度の高い要素へと分配を可能にする技術であり、堅牢性の高いシステム構築に貢献する。

3. 研究の方法

(1) 従来型の蛇行配管 OHP と円形配管 OHP の比較

U 字型のターン部を有することで、加熱部と冷却部を複数回往復する配管レイアウトの蛇行配管 OHP と、1つの大きな円を描く経路で構成した円形配管 OHP を構築し性能の比較を行った。加熱部、断熱部、冷却部、逆止弁付き断熱部を 1 セットと定義し、10 セットで構成する OHP を用いた。各部の配管表面温度の計測と、配管レイアウトが OHP 内の流体挙動に与える影響を評価するために、加熱部の入り口における流体の絶対圧力を複数個所で計測した。OHP を水平設置とし、作動流体には HFC134a を利用した。さらに、ループ型 OHP 内部に封入する流体の割合が熱輸送能力に与える影響を評価した。

(2) 加熱部、冷却部の分布の影響評価

円形配管 OHP を用いて熱源の分散状況の違いが熱輸送特性に与える影響を評価した。円形配管 OHP の管全長と各部の長さは変化させずに、加熱部と冷却部の組み合わせ(セット)をループ中に 10 箇所交互に配置させた条件から、5 箇所、3 箇所、2 箇所、1 箇所と加熱部と冷却部の分散を変化させた条件で実験を実施した。各セット数での熱源と冷却部間のコンダクタンスと、流体の圧力計測から流体の状態を評価することで、熱源と冷却部の分布に対する OHP の適応性を評価する。

(3) OHP を適用したハニカムパネルの構築と動作実証

円形配管 OHP の研究結果から、逆止弁付き OHP が、配管レイアウトと、熱源と冷却源位置に対して高い設計自由度を有していることを応用し、ハニカムパネル表裏の温度差低減と面方向の熱輸送の双方を実現可能な OHP を構築し評価を行った。また、発熱源分布を変化させた実験によって、OHP を用いた低質量高熱伝導率パネルの性能を評価した。

4. 研究成果

(1) 従来型の蛇行配管 OHP と円形配管 OHP の比較

従来多く研究されている蛇行配管 OHP と、本研究で提案する高自由度な配管レイアウトを目的とした円形配管 OHP を図 1 に示す. 蛇行配管 OHP は、加熱部と冷却部の中央に曲げ半径 3.75 mm の U 字型のベント部を有し、加熱部と冷却部を交互に通過する蛇行する経路で構成される. 円形配管 OHP は、蛇行配管 OHP のような局所的な曲げを有さず、曲げ半径 1289 mm を有した曲率の配管で構成した 1 つの大きな円形状に管を配置した. これら配管レイアウトの異なる 2 つの OHP の性能比較によって、配管レイアウトが OHP の動作性能に与える影響を評価した.

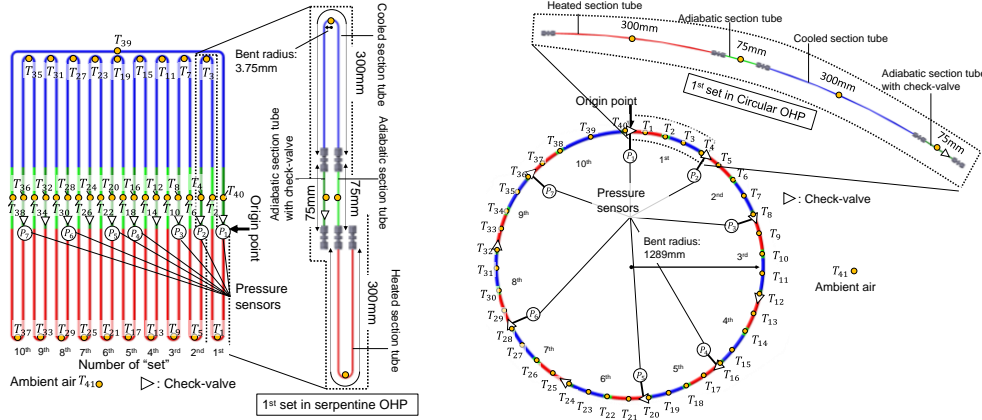


図 1 従来型の蛇行配管 OHP (Serpentine OHP) と円形配管 OHP (Circular OHP)

OHP を構成する管には外径 1.6 mm, 内径 1 mm のステンレス管を利用した. 試験姿勢は重力の影響を排除するために水平設置とした. 水平条件で安定した動作を得るために流体流動を一方向に強制する逆止弁を設置した. 加熱部, 断熱部, 冷却部, 逆止弁付きの断熱部を 1 セットと定義し (図 1), 蛇行配管 OHP と円形配管 OHP は 10 セットで構成した. 各部の管長はそれぞれ同様である. 加熱部に巻き付けたテープヒータに電力を供給することで熱源とした. 冷却部は、配管表面から大気圧下で周囲空気に放熱した. 作動流体封入率を (10%, 30%, 50%, 70%) と変え, 最大熱輸送量が最も大きかった封入率 50 % を目標に HFC134a (1, 1, 1, 2-Tetrafluoroethane) を封入した.

図 2 に蛇行配管 OHP と円形配管 OHP それぞれの圧力計の有無での OHP のコンダクタンスの比較を示す. 封入する作動流体の量を正確に管理することで, 圧力計の有無で OHP のコンダクタンスは変化しなかった. よって, 複数の圧力計導入の影響は OHP の基本性能に影響を与えていないことを確認した. 蛇行配管 OHP と円形配管 OHP の比較では, 加熱部と冷却部管の全体の温度分布から定義した熱コンダクタンスはほとんど同等の値となっている. 図 3 に円形配管 OHP に熱負荷 25W を印加した条件で測定した各部の圧力を示す. 円形配管 OHP において, 各セットで異なる位相を有する圧力波が観測された. 本研究の蛇行配管 OHP においても同様の圧力進行波を観測し, 理論モデルや従来の蛇行型 OHP で観測される圧力進行波 (Yoshida et al, Joint 18th IHPC and 12th IHPS, 2016) であると考えられる. 円形配管 OHP の熱輸送機構は蛇行配管 OHP から大きな変化がないことが確認され, 局所的な曲げ部をなくす設計において OHP の性能は大きく変化しないことを実証した. 本研究の結果, OHP を用いることでポンプなどの外部駆動力を用いずに, 高自由度な熱輸送経路 (配管レイアウト) での熱輸送が可能であることが示唆される.

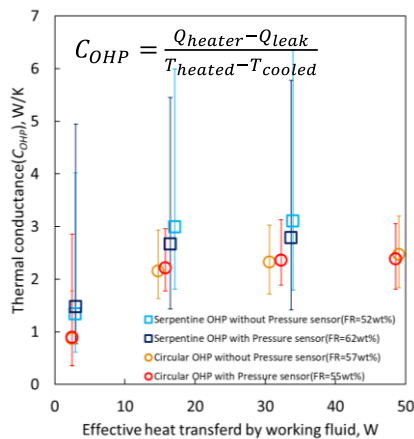


図 2 加熱部と冷却部間のコンダクタンス

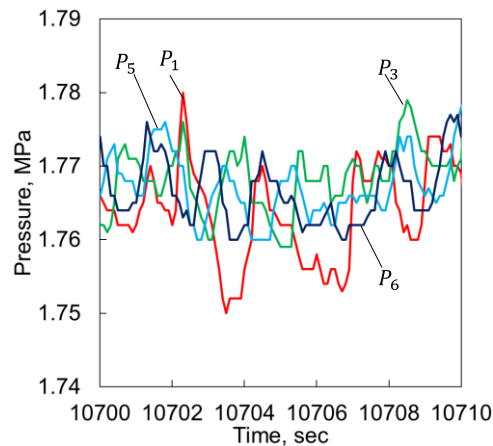


図 3 円形配管 OHP で観測された圧力波

(2) 加熱部と冷却部の分布の影響評価

OHP は、空間に分散した複数の熱源と冷却部の熱結合を行う二相流体ポンプルーブと同様の使用も可能であると考えられる。そこで、円形配管 OHP において、図 4 に示すように加熱部と冷却部の分散状況を変化させ、ループ内における加熱部と冷却部の偏りが動作に与える影響を評価することで、熱源と冷却部の位置に対する適応性を評価した。円形配管 OHP を構成する管の全長は変化させずに、セットと定義した加熱部、冷却部の組み合わせをループ中に 10 箇所交互に配置させた条件(図 1)から、図 4 に示すように 5 箇所、3 箇所、2 箇所、1 箇所と加熱部と冷却部の分散条件を変化させた。

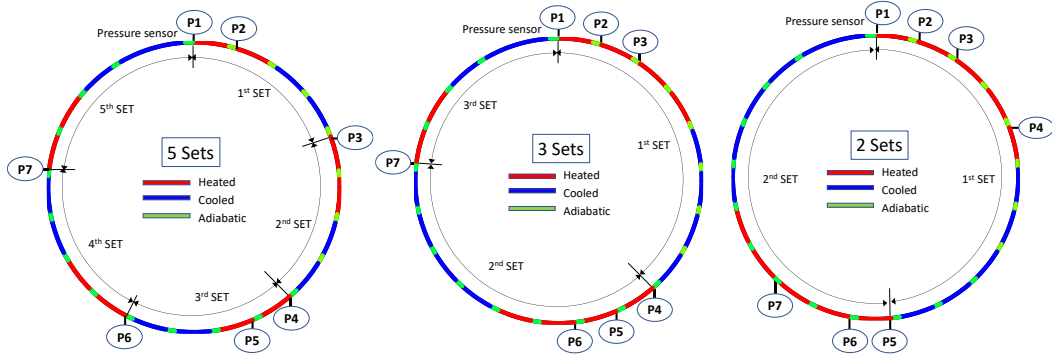


図 4 セット数を変えた円形配管 OHP の構成 (代表として 5set, 3set, 2set を示す)

加熱部と冷却部が 1 セットの条件では、作動流体による連続的な熱輸送が行われなかった。2 セット以上の条件では加熱部から冷却部への熱輸送が確認された。水平姿勢において、2 セットで動作する OHP は他の研究では報告されておらず、逆止弁付き OHP が水平姿勢で動作する最小セット数であることを示す結果である。次に、2 セット以上の条件における、OHP の加熱部と冷却部間の熱コンダクタンスを図 5 に示す。セット数が少なくなると加熱部と冷却部の平均コンダクタンスが低下している。セット数が少ない構成では冷却部長が長いいため、同熱量では作動流体のサブクール度が増加する。よって、平均コンダクタンスが低下している。また、図 6 に OHP 全体に印加される総熱量と流体の圧力の関係を示す。熱輸送が行われている状態の流体圧力は、セット数の影響を受けずに、印加される総熱量に依存している。本結果は、各セット数の条件で OHP が二相流で熱輸送していることを示唆する。さらに、セット数を変えた実験における、圧力挙動の比較を図 7 示す。圧力の振幅は、セット数によって変化せず、発生する駆動力もセットの影響を受けてない可能性が示唆される。これら円形配管 OHP の結果から、逆止弁付きの OHP において、ループ内の熱源と冷却部の分布によって性能は大きく変化せず、OHP は高い適応性を有していることを実証した。また、管長や各部の熱環境は変えずに、熱源の偏りを変化させた OHP の評価はされておらず、OHP 自体の熱輸送機構を解明するのに貴重なデータである。

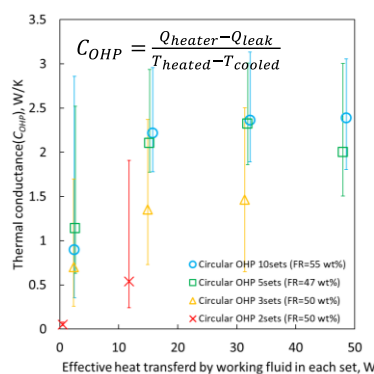


図 5 各セット数における熱コンダクタンス

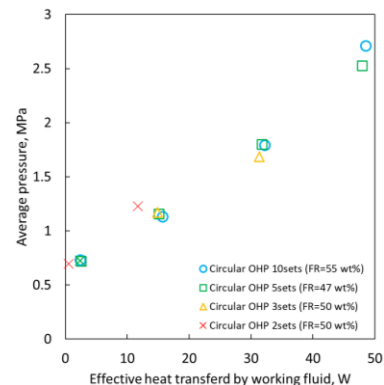


図 6 熱負荷と作動流体圧力の関係

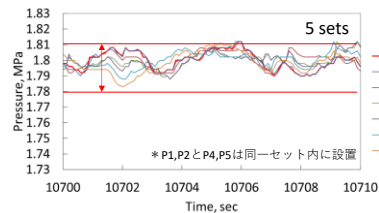
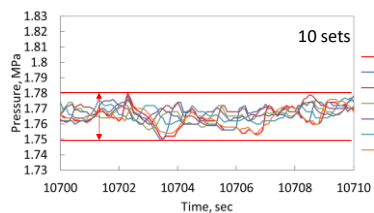
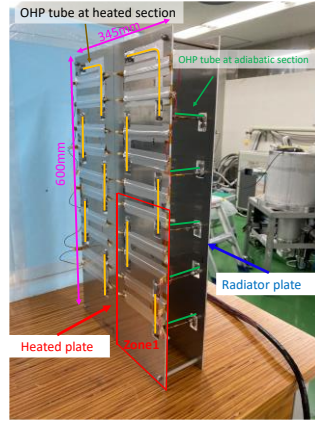


図 7 10 セットと 5 セットで観測された圧力の波

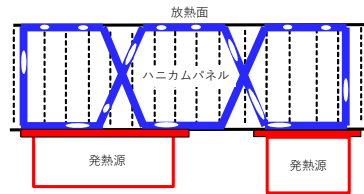
(3) OHP を適用したハニカムパネルの構築と動作実証

宇宙機の構体に利用されるハニカムパネル表裏の面は、それぞれ発熱機器を搭載する面と放熱面の役割を果たす。よって、スキン間の距離が長い(厚い)ハニカムパネルにおいては、スキンパネル間の熱抵抗が大きくなり、機器と放熱面の温度差が大きくなる。よって、スキンパネル間における熱抵抗の低減は、高発熱密度の搭載機器の排熱やラジエータ面積の低減を可能にする。そこで、OHP が配管レイアウトと、熱源と冷却部の分布に対する適応能力が高いことを利用し、ハニカムスキンパネルを模擬したアルミ板間を熱輸送する OHP を構築し、性能評価試験を実施した。製作した OHP の写真と、ハニカムパネルに OHP を搭載した場合のコンセプトを図 8 に示す。作動流体には、HFC134a を利用し、封入率は最大熱輸送量が最も大きくなる 50 % をターゲットとした。ハニカムパネル用の OHP の管内を完全に液で満たした質量の 4.91 g (100 wt%) に対して 2.38 g (48.5 wt%) 封入した。

ヒータに印加した熱量と対流や配管の伝導によって伝わる熱量の差分が OHP 内の作動流体が実効的に輸送する熱量である。OHP が実効的に輸送する熱量を用いて、加熱板と冷却板の間の熱抵抗を計測した結果を図 9 に示す。OHP を適用したパネル間の熱抵抗は約 1.1 K/W である。円形配管 OHP の結果から熱抵抗を推定すると、総熱抵抗は 1.08 K/W と予測され、実験結果と一致する。熱抵抗の内訳は OHP 自体の熱抵抗が 0.42 K/W、OHP 管とパネルの接触コンダクタンスが加熱部と冷却部の合計で約 0.66 K/W となり、総熱抵抗において、配管とパネルの接触熱抵抗が総熱抵抗の半分以上を占めている。よって、接触熱抵抗を向上させることで、総熱抵抗の低減が可能であると考えられる。また、この接触熱抵抗を考慮した OHP の総熱抵抗 (1.1 K/W) を A7075 のアルミで実現するには、約 150 g の質量を要する。OHP の管と作動流体の質量は約 35 g であり、OHP によって低質量で低熱抵抗のハニカムパネル実現の可能性を示した。さらに、面の一部を加熱した結果を図 10 に示す。Zone 1 と記載した加熱面の一部を加熱した条件においても OHP は動作し、OHP を搭載しない条件と比べて加熱部は 10℃ 以上低温化され、OHP の配管が通過する冷却部の温度が広範囲で上昇している。よって、ハニカムパネルに適用した OHP が動作し、局所的な熱源に対して面外方向と面内方向の熱輸送を行うことで、高熱抵抗パネルに搭載された機器の低温化と放熱能力の増大を実証した。本研究から、逆止弁を有した OHP が、全体の配管レイアウトと、熱源と冷却部の分布に対して高い適応性を有し設計自由度が高いことを実証した。実証された特徴は、実利用において非常に有用なメリットであり、ハニカムパネルへの適用のみならず、低リソースで高度な熱制御を担うデバイスとして期待される。



a) ハニカムパネルに適用した OHP



b) OHP の適用コンセプト

図 8 低熱伝導パネル間に適用する逆止弁付き OHP

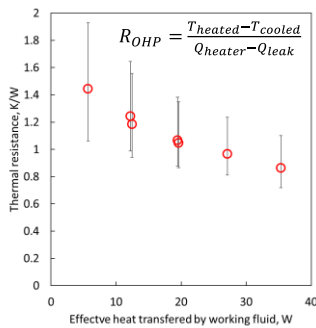


図 9 OHP を搭載したハニカムパネル間の熱抵抗

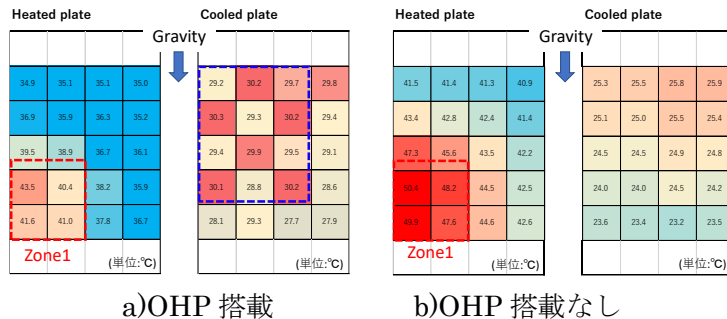


図 10 面の一部を加熱した条件における加熱面と冷却面の温度分布 (Zone 1 のヒータ入力熱負荷 25 W)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------