

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04263

研究課題名(和文)磁性ナノロッド分散型磁気機能性ナノ流体による配向性利用に基づいた高度熱流動制御

研究課題名(英文)Advanced control of heat transfer and fluid flow by magnetic nano-rod dispersion type magnetic functional nanofluid

研究代表者

本澤 政明(Motozawa, Masaaki)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：50516185

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：磁気機能性ナノ流体に分散されている磁性ナノ粒子の配向性を積極的に利用すべく、アスペクト比を持つ棒状の磁性ナノロッドを合成し、この磁性ナノロッドを流体内部に分散させた磁性ナノロッド分散型磁気機能性ナノ流体を調製した。本研究では、この磁性ナノロッド分散型磁気機能性ナノ流体を用いて、流体の磁気特性、磁性ナノロッド配向時の磁気特性の異方性について、ナノロッド配向性が与える影響を調べた。また、磁性ナノロッド分散型磁気機能性ナノ流体の熱輸送への応用に向けて、ミニチャンネルにおける磁気機能性ナノ流体の熱流動特性を調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

作動媒体液にナノオーダーの金属・非金属ナノ粒子を分散させたナノ流体は、熱輸送流体として、提案当初、大きな注目を集め、現在に至るまで世界中で広く研究が繰り返されている。また、磁性ナノ粒子を分散させた磁気機能性ナノ流体では熱輸送だけでなく、シール技術や生体応用など広く研究が進められている。本研究は外部操作可能な磁性ナノ粒子として、棒状の磁性ナノロッドを利用し、ナノロッドの配向性、位置、回転を制御することで、磁気機能性ナノ流体の特徴の一つである粒子の配向を積極的に利用することで磁気特性の向上、高伝熱促進を目指している。

研究成果の概要(英文)：Magnetic functional nanofluid is the dispersion of the nano-order magnetic particles in liquid carrier, and such a fluid is popular as a magnetic fluid. It is well known that the clustering structure in magnetic functional nanofluid causes interesting features such as anisotropy and time-series change. Although inner magnetic particles in magnetic functional nanofluid are generally spherical in shape, if rod-shape magnetic particles are dispersed in magnetic nanofluid, it is expected to enhance anisotropic features by applying magnetic field. In this study, magnetic nano-rods dispersion fluid is prepared, and the anisotropic magnetic property caused by orientation of magnetic nano-rod are investigated. The results show that there are no hysteresis loops in magnetic functional nanofluid, whereas hysteresis appeared and small coercive magnetic force is generated in magnetic nano-rod dispersion fluid even when there is no orientation of the inner nano-rods.

研究分野：流体工学

キーワード：磁気機能性流体 磁性流体 磁性ナノロッド 磁気特性 異方性

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

次世代 CPU やスマートフォンに代表される電子機器の小型高集積化，電気自動車などのバッテリーの大容量化，燃料電池の実用化など，様々な機器において発熱が大きな課題となっており，従来の空冷・水冷冷却システムに替わる超高効率の冷却技術が求められている。

この冷却技術の一つとして，粒径がナノオーダーの超微粒子（ナノ粒子）を水等のベース流体に安定分散させた液体である「ナノ流体」を熱輸送媒体とした熱流動特性の研究が広く進められている。ナノ流体では，ナノ粒子の添加によりベース流体と比較した大きな熱伝導率の向上や熱物性以上に対流熱伝達が促進されるという異常伝熱の特徴等が報告されている。これに加えて，特有の機能を有するナノ粒子（機能性ナノ粒子）を液中に分散させることで，ナノ流体に様々な機能を持たせることも可能である。この流体は「機能性流体」と呼ばれ，温度，電磁場などの外部環境に反応してその性質が変化する流体として定義されている。特に磁性ナノ粒子を内部に添加することで磁場に反応する機能を付与した「磁気機能性ナノ流体」は，一般的には「磁性流体」としても知られており，外部磁場に反応して，見掛け粘度変化や流動特性に大きな変化が見られる。磁気機能性ナノ流体では，機能の発現方法が容易なため，古くからアクチュエーターやダンパーへの応用研究がなされており，スピーカーのボイスコイル保持などにも実用されている。近年では，磁気機能性ナノ流体を熱輸送媒体として用いることを目的として熱流動特性についても研究が進められている。

磁気機能性ナノ流体では，磁場印加という外部環境により熱流動特性を制御できる特徴に加えて，内部の磁性ナノ粒子が磁場印加により凝集し，磁場方向に配列することで磁場印加時に熱伝導率などの物性値が変化し，異方性が生じることが知られている。本研究では，この磁性ナノ粒子の配向性を積極的に利用することで，磁気機能性ナノ流体における磁場印加下の熱特性の向上・異方性強化，伝熱促進効果の向上を目指した。配向性積極利用の方法として，流体内部にアスペクト比を有する棒状の磁性ナノロッドを分散させることで磁場による内部粒子の配向性強化・配向性制御を試みた。従来の球状のナノ粒子が分散されている磁気機能性ナノ流体では磁場印加により磁場方向にナノ粒子が鎖状に並ぶことで，熱伝導率が向上し，異方性を持つことが知られているが，本研究で試みる磁性ナノロッド分散型の磁気機能性ナノ流体では，ナノ粒子がアスペクト比を持つことから配向性が強化されるため更なる熱物性の向上，異方性の強化が期待できる。流動化においてもナノロッドが流れ方向に対して磁場により垂直・もしくは水平に配列することによって，球状粒子が分散されている磁気機能性ナノ流体よりも磁場印加下における熱流動の特徴が顕著に表れる可能性が有る。

2. 研究の目的

上記の背景に基づき，本研究では，磁気機能性ナノ流体の内部磁性ナノ粒子として，棒状の磁性ナノロッドを用いることで，磁性ナノロッド分散型磁気機能性ナノ流体（Magnetic Nano-Rod-Magnetic Fluid，以下，MNR-MF と記す）を独自で調製し，MNR-MF における磁場印加下の磁場方向に対する磁気特性等の物性の異方性の強化度合いを調べた。加えて，MNR-MF における配向性制御に基づいた高度熱流動制御として，MNR-MF の熱流動特性・磁場印加による影響を調べ，従来の球状粒子が分散されている磁気機能性ナノ流体（以下，MNP-MF と記す）と比較することを目的とした。

3. 研究の方法

前項の目的を達成するため，開始当初は次の事項を実施するものとした。

磁性ナノロッドの作成，MNR-MF の調整・分散方法の検討

MNP-MF，MNR-MF の磁場印加による磁性ナノ粒子・磁性ナノロッド配向構造の可視化

磁性ナノ粒子・磁性ナノロッドの異方性磁気特性・発熱特性の計測

MNP-MF，MNR-MF の熱流動特性の計測

しかしながら，研究を進めていくうえで，磁性ナノロッドの収率を上げることが困難であった。このため，熱流動特性の研究については，ミニチャネルで行うこととしたが，それでも十分な MNR-MF を調製することは出来ず，MNP-MF のミニスケールの熱流動特性を調べるにとどまった。

次項に，～ の研究成果をまとめる。

4. 研究成果

4.1 磁性ナノロッドの作成，MNR-MF の調整・分散方法の検討

磁性ナノロッドは Zhu ら（T. Zhu et al., *J. Phys. Chem. C*, 115, 2011, pp. 9814-9820.）によって記されたワンポット合成法に基づき合成を行った。図 1 に合成した磁性ナノロッドの SEM 画像を示す。作成したナノロッドのサイズは，直径は 30-40 nm，長さは 200-300 nm であった。本研究では，合成方法を調整することで，ナノロッドのアスペクト比を変えることも試みたが，緻密な粒形制御までは至らなかった。

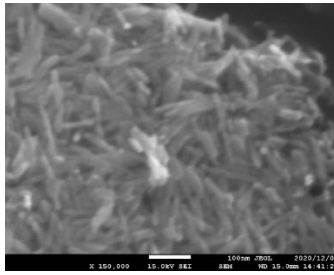


Fig. 1 SEM images of hand-made magnetic nano-rods.

Table 1 Experimental result of the dispersion test of nano-particles.

	界面活性剤		分散結果		
	A	B	分散直後	2 時間後	磁場印加時
1	OA	-	分散しない	-	粒子凝集
2	SO	-	分散	沈殿	粒子凝集
3	SDS	-	分散	沈殿	粒子凝集
4	OA	SO	分散しない	-	粒子凝集
5	OA	SDS	分散しない	-	粒子凝集
6	SO	SDS	分散	沈殿	粒子凝集
7	SO	OA	分散	沈殿	粒子凝集
8	SDS	OA	分散	沈殿	粒子凝集
9	SDS	SO	分散	沈殿しない	粒子凝集しない
10	SL	-	分散	沈殿しない	粒子凝集しない
11	PC	-	分散	沈殿	粒子凝集

液中への粒子の分散は、粒径がナノオーダーになるとナノ粒子が表面力で凝集してしまうため、安定分散が難しくなり、その分散には界面活性剤等が用いられている。本研究では、MNR-MF は、上記の自作磁性ナノロッドを水へ分散させることで調製し、その比較として、MNP-MF においては、市販の磁性ナノ粒子を同じ方法で水へ分散させて調製した物と市販の磁性流体を用いた。

MNP-MF, MNR-MF の調製のため、磁性ナノ粒子の水への分散方法の検討を行った。磁性ナノ粒子として市販の Fe_3O_4 ナノ粒子を用い、水への分散に有効と考えられる種々の界面活性剤を用いて磁性ナノ粒子を水へ分散させ、分散直後、分散後 2 時間後、磁場印加時の粒子の沈殿・凝集状態を観察した。分散方法の検討では磁性ナノ粒子は約 5 wt%，界面活性剤は 1~2% の濃度とした。代表的な結果を表 1 に示す。表 1 中の界面活性剤、OA, SO, SDS, それぞれオレイン酸、オレイン酸ナトリウム、ドデシル硫酸ナトリウムであり、SL, PC はそれぞれポリアクリル酸ナトリウム、ポリビニルピロリドンをそれぞれ主成分とする界面活性剤である。磁性ナノ粒子の分散試験は、界面活性剤 A を水に添加した後、磁性ナノ粒子を加えて超音波撹拌を 2~4 時間施し、界面活性剤 B を添加することで行った。

表 1 に記されるように、界面活性剤 A に SDS, 界面活性剤 B に SO を添加した場合と、界面活性剤 A に SL を添加した場合の分散性がよく、磁性ナノ粒子の水分散に適したものであると判断した。表 1 中の#9 の分散方法は 12 時間経過しても沈殿が確認されないものの、自前での安定分散は達成できなかった。本研究では、MNR-MF も表 1 中の#9 の方法で、自作の磁性ナノロッドを水へ分散させた。しかしながら、MNR-MF は MNP-MF と比べて分散性が悪く、2 時間ほどでわずかな沈殿が見られた。

4. 2 MNP-MF, MNR-MF の磁場印加による磁性ナノ粒子・磁性ナノロッド配向構造の可視化

粒径が 10 nm 程度の球状の磁性ナノ粒子を水に分散させた水ベース磁気機能性ナノ流体では、磁場を印加すると、磁性ナノ粒子が凝集し、一次クラスターを形成し、これらが磁場方向に配列し、鎖状クラスターを形成することが知られている。本研究では、磁場印加下における内部粒子の配向性を調べるため、調製した MNR-MF, MNP-MF, 市販の水ベース磁性流体 (MSGW10, フェローテックマテリアルテクノロジー製) について、マイクロスコブを用いて磁場印加時に形成される内部クラスターの可視化を行い、クラスター形成に対する粒子形状の違いの影響について調べた。

図 2 に可視化実験装置、可視化試験サンプルの概略を示す。可視化実験装置はオリンパス製の光学顕微鏡 BX50 とキーエンス製 CCD カメラにより構成されている。試験サンプルへの磁場印加は、電磁石を用いて行い、磁場印加強度は光学顕微鏡ステージ中心で約 10 mT となるよう調節した。試験サンプルは図に示されるように 10 μm のシムテープをスライドガラスで挟み込み、真ん中の領域に試験流体を満たすことで、均一の厚さの試験可視化試料を作成した。

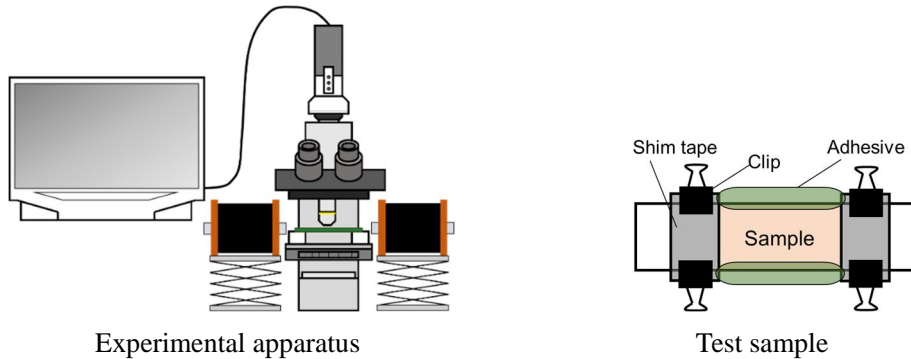


Fig. 2 Experimental apparatus and test sample for visualization of clustering structure.

Sample	no mag	1 min	5 min	15 min	60 min
MNR-MF					
MNP-MF					
MSGW10					

Fig. 3 Typical results of visualization of clustering structure.

図 3 に結果の一例として、MNR-MF、MNP-MF、MSGW10 の試験サンプルへ 60 分間磁場を印加した時に形成される内部クラスター成長過程の可視化画像を示す。MSGW10 では、磁場印加後時間が経過するとともに線状の鎖状クラスターの成長が見られた一方で、MNP-MF では粒子の分散性の問題もありクラスターの成長がわずかに確認されたのみで、60 分後は MNP-MF が磁場方向に流れてしまい観察ができなかった。また、成長速度については、MNR-MF の方が MSGW10、MNP-MF に比べクラスターの成長速度が速く、磁場方向に対して垂直方向にもクラスターが太く成長することが確認された。これらの取得画像に対して、画像処理により時間経過に対するクラスター成長過程の定量化などを試みた。

4. 3 磁性ナノ粒子・磁性ナノロッドの異方性磁気特性・発熱特性の計測

磁性ナノ粒子に交流磁場を印加すると発熱することが知られており、ハイパーサーミア（温熱療法）といったバイオ分野への応用を目指し、広く研究が進められており、磁性ナノロッドにおいても異方性磁気特性・発熱特性を調べることは重要である。本項では、本研究で得られた磁気特性の代表的な結果を示す。磁気特性の試験は、振動試料型磁力計（VSM: Vibrating Sample Magnetometer）を用いて、磁性ナノ粒子・磁性ナノロッドの磁気特性と粒子配向性が磁気特性に及ぼす影響を調べた。試験サンプルは、5wt% で調整した試験流体をエポキシ樹脂で 10 倍に希釈し、50 μ L 採取し硬化させて作成した。硬化時に磁場を印加することでサンプル内の粒子を配向させることが出来る。試験流体として、調製した MNP-MF、MNR-MF、市販の水ベース磁性流体（MSGW10、フェローテックマテリアルテクノロジーズ製）を用いた。

図 4、図 5 に MNP-MF、MNR-MF における磁化特性測定結果をそれぞれ示す。それぞれの図において、縦軸は測定された磁化を最大飽和磁化で割ることで正規化し、さらに中心部分を拡大したものを示している。図中凡例の「No mag」はサンプル硬化時に磁場印加せず作製したもので、内部粒子の配向がない試料による測定結果である。一方、「Vertical」と「Parallel」はサンプル硬化時に磁場を印加して内部粒子を配向させた試料において、VSM 計測時の外部磁場方向に対する試料内部粒子の配向方向の関係を示している。図 4 に示す MNP-MF では、No-mag、Vertical、Parallel においてほぼ同様の傾向の磁化曲線を示し、内部粒子の配向による磁化特性の変化は見られなかった。一方、図 5 に示す MNR-MF では、保磁力が確認され、磁化率がわずかであるが Vertical、No-mag、Parallel の順で大きくなっていることが分かる。これは、ロッド状粒子では球状粒子よりも、内部粒子の磁場配向させることによる磁化特性への影響が大きく、特にロッド状粒子を平行配向させることで磁化率が向上することを明確に示している。

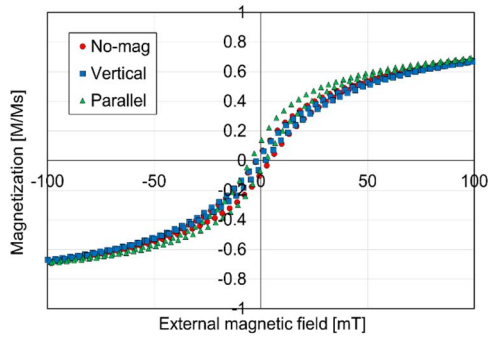


Fig. 4 Magnetization curve for MNP-MF with / without orientation of inner particles.

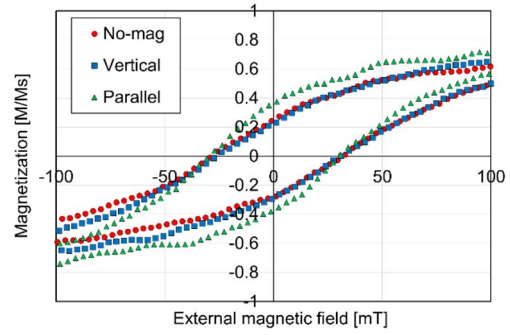


Fig. 5 Magnetization curve for MNR-MF with / without orientation of inner particles.

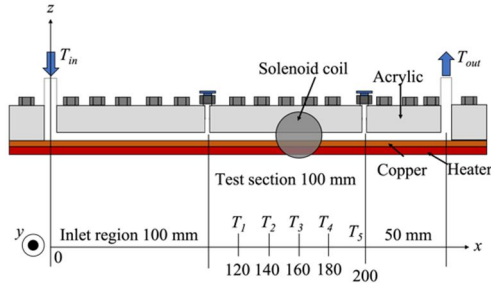


Fig. 6 Schematics of mini-channel

Table 2 Dimensions of mini-channel

Channel	Height[mm]	Width[mm]
Channel0.5	0.5	10
Channel1.0	1.0	
Channel2.0	2.0	
Channel5.0	5.0	

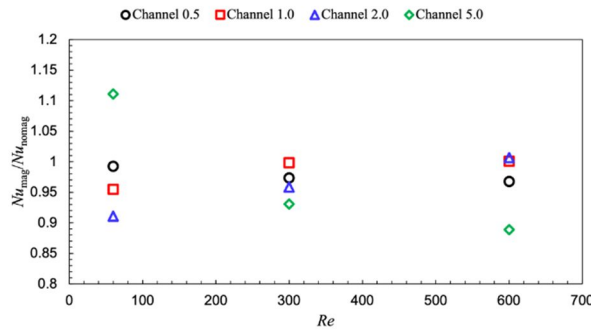


Fig. 7 Influence of magnetic field on heat transfer of magnetic fluid flow in mini-channels.

4.4 MNP-MF のミニスケールの熱流動特性

研究開始当初は、MNR-MF において熱流動特性を調べ、MNP-MF との比較を行う予定であったが、磁性ナノロッドの収率を上げることが困難であり、ミニチャンネルによる実験を行ったが、それでも十分な MNR-MF を調製することは出来なかった。従って、本研究の成果として、本項では MNP-MF のミニスケールの熱流動特性を報告する。

本実験で用いたミニチャンネルの概形を図 6 に、用意したミニチャンネルの寸法を表 2 に示す。ミニチャンネルはアクリル板、銅板およびミニチャンネル底部に取り付けたヒーターで構成され、表 2 に記す高さの異なる 4 種類のミニチャンネルを用意した。ミニチャンネルへの磁場印加は、30 mm の鉄芯を持つ 2 つのソレノイドコイルを用いて、T2-T4 の間で行った。試験流体は、市販の水ベース磁性流体 (MSGW10, フェローテックマテリアルテクノロジーズ製) を用いた。

図 7 に代表的な結果の一例として、各チャンネルにおける磁場印加領域中心部での伝熱変化率と Re の関係を示す。縦軸は、磁場印加による伝熱変化率として磁場印加時のヌッセルト数 Nu_{mag} と無磁場下のヌッセルト数 Nu_{nomag} の比 Nu_{mag}/Nu_{nomag} を取ったものである。図に示されるように、Channel 0.5 及び Channel 1.0 では Re 数を変化させても伝熱はほとんど変化が見られなかった。一方で、Channel 2.0 では $Re = 60$ で磁場印加により伝熱が抑制され、 Re の増加に伴い改善が見られ、1 に近づいていることがわかる。しかし、Channel 5.0 では $Re = 60$ で伝熱が促進されるものの、 Re の増加に伴い伝熱が無磁場下のそれよりも抑制が進んだ。このように、ミニスケールの磁気機能性ナノ流体の流れでは、同じ Re でもチャンネル高さによって伝熱傾向が異なり、伝熱の促成も生じることが示された。

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 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Wannarat Rakpakdee, Masaaki Motozawa, Mitsuhiro Fukuta, Weerachai Chaiworapuek	4. 巻 144
2. 論文標題 Characteristics of heat transfer and flow resistance of magnetic fluid flow through porous media combined with magnetic field effect	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Experimental Thermal and Fluid Science	6. 最初と最後の頁 110851
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.expthermflusci.2023.110851	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 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 W. Rakpakdee, M. Motozawa, M. Fukuta, W. Chaiworapuek
2. 発表標題 Heat Transfer of Magnetic Fluid Flow through Ceramic Foam Porous Media under Magnetic Field
3. 学会等名 The 31st International Symposium on Transport Phenomena（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水野喜隆, 本澤政明, 福田充宏
2. 発表標題 ミニチャンネルにおける磁性流体の伝熱と流動に及ぼす磁場の影響
3. 学会等名 第33回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Motozawa
2. 発表標題 Some characteristics of magnetic functional fluids
3. 学会等名 The 8th International Workshop on Fluid Flow, Heat Transfer and Turbulent Drag Reduction (IWFHT2021)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水野喜隆, 本澤政明, 福田充宏
2. 発表標題 ミニチャネルによる低Re数域の磁性流体の伝熱特性に関する実験的研究
3. 学会等名 2021年度磁性流体連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Motozawa, Y. Mizuno, M. Fukuta
2. 発表標題 Experimental Study on Heat Transfer Enhancement / Suppression Phenomena in Laminar Magnetic Fluid Flow in Mini-channel
3. 学会等名 20th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 澤島康裕, 本澤政明, 福田充宏
2. 発表標題 磁性ナノロッド分散流体への磁場印加による内部クラスター形成の可視化
3. 学会等名 第31回MAGDAコンファレンスin 鹿児島
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuhiro Sawahata, Masaaki Motozawa, Satoshi Ohta, Mitsuhiro Fukuta
2. 発表標題 Experimental Investigation of Anisotropic Magnetic Property of Magnetic Nano-rod Dispersion Fluid
3. 学会等名 16th International Conference on Magnetic Fluids (ICMF2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

静岡大学 福田・本澤研HP https://wfp.shizuoka.ac.jp/fluidmech-lab/ 静岡大学 教員データベース https://tdb.shizuoka.ac.jp/RDB/public/Default2.aspx?id=11077&l=0
--

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		
タイ	カセサート大学		