

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04306

研究課題名(和文) 深層学習を用いた高精度・リアルタイム液体内3次元温度分布計測法の開発

研究課題名(英文) Development of high-precision and real-time three-dimensional temperature measurement method in a liquid using deep learning

研究代表者

鳥山 孝司 (Toriyama, Koji)

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号：50313789

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)：本研究は、感温液晶微粒子を用いて液体内の3次元温度分布計測する手法の開発である。まず最初に、レシオメトリ法による手法に取り組んだところ、同じ温度においても感温液晶微粒子からの散乱光強度が同程度の値とはならず、温度計測に向かないことが明らかとなった。そこで、照射光には青色LEDを用いてカラーカメラによる計測を行った結果、カメラの感度特性の結果から温度に対応したRGB値が観測された。このRGB値からHSI値に変換したところ、HS値を用いることにより、測定誤差はあるものの感温液晶微粒子の温度を得ることが可能となった。さらに感温液晶シートを用いた評価を実施し、本手法の計測能力についても明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、廉価なカメラと比較的安価で且つ扱いが容易な感温液晶を用いることで、固体表面や液体内の温度分布計測を可能にするためのものである。今回得られた成果は、液体内の3次元温度分布に対して温度検定する新たな手法を見出したものであり、今後研究が進めば、従来実現が困難であった3次元熱流動場における温度・速度場同時計測が非侵襲に可能となる。また、これまでのレシオメトリ法を用いた表面温度計測では、複数のカメラが必要であったものの、本手法であればカラーカメラ1台のみで実現可能であり、赤外線カメラよりも高解像度の温度分布計測が可能となる。

研究成果の概要(英文)：This research is the development of a method for measuring three-dimensional temperature distribution in liquids using thermo-chromic liquid crystal particles. First, a ratiometric method was applied, but it was found that the intensity of scattered light from the thermo-chromic liquid crystal particles was not similar even at the same temperature, making the method unsuitable for temperature measurement. Therefore, a color camera was used to measure the temperature using a blue LED as the irradiation light. The RGB values were converted to HSI values, and the HS values made it possible to obtain the temperature of the temperature-sensitive liquid crystal particles, although there was a measurement error. Furthermore, the measurement capability of this method was also clarified by conducting an evaluation using a thermo-chromic liquid crystal sheet.

研究分野：伝熱工学

キーワード：温度分布計測 感温液晶 非接触 感度特性 温度分解能

### 1. 研究開始当初の背景

伝熱を伴う機器の熱効率の向上は、省エネルギーなどの観点からも今後ますます要求され、それらの熱設計のための情報ソースとして、機器の表面や熱移動媒体となる気体・液体内の詳細な温度分布が必要となっている。そのような需要に対し、機器の表面温度計測手法として赤外線カメラが一般には普及している。しかしながら、赤外線カメラでは、熱交換・輸送の主要媒体である流体層の温度分布計測は原理的に困難である。従って、赤外線カメラに替わる流体内部温度計測を可能にする手法について、これまでに多くの研究がなされている。また、近年、流体内部温度計測法としてはLIF法など、蛍光色素の蛍光強度から温度を得る手法が広く用いられているが、温度を得たい位置にレーザー光源による励起光を照射する必要があり、3次元温度分布計測法としては簡便な手法ではない。

過去に研究代表者は感温液晶シートを用い、可視光源での異なる狭帯域波長の散乱光強度比から温度を得る、レシオメトリー法を開発した。それにより、計測可能温度範囲を呈色温度範囲の3倍程度まで拡張させることが出来た。従来の感温液晶による温度計測法では、感温液晶の呈色温度範囲である10程度の範囲でしか温度計測ができなかったが、本手法では30程度の範囲での温度計測が可能になるため、伝熱機器などの温度分布計測に幅広く適用可能である。

本手法を液体内部の温度分布計測に適用するには、感温液晶微粒子を用いて、計測対象となる液体に散布し、温度分布を得たい断面に対してスリット光を照射してその画像を得て温度に換算するという形になる。従来手法では色と温度との対応であったため比較的容易に温度計測が可能であったが、感温液晶微粒子の形がいびつであり、このことが提案技術を確認する上でボトルネックとなる。すなわち、温度が等しい場合でも個々の微粒子の散乱光強度が等しくなるとは限らず、そのまま本手法に適用することは難しい。

### 2. 研究の目的

これまでに開発してきた表面温度計測用のレシオメトリー法を液体内部温度分布計測に拡張することが本研究の目的である。しかしながら、感温液晶微粒子から得られる散乱光強度が等しいとは限らないため、感温液晶微粒子のサイズや形状ごとに温度に対応する散乱光強度を計測し、それらのデータベースを作成するとともに、そのデータベースから適切に温度に換算する手法を確認することを目的とする。具体的には

- (1) 感温液晶微粒子の大きさ・幾何学形状ごとに温度に対する散乱光強度のデータベースを作成する
- (2) 得られたデータベースから、より温度に換算しやすいように深層学習を用いて分類を行い、粒子ごとに温度に換算するアルゴリズムを構築する
- (3) 粒子画像からDLT法により3次元分布を取得し、温度分布を3次元に展開するアルゴリズムを作成する

を順次進め、液体内部の3次元温度分布計測を実現する。

### 3. 研究の方法

まず、感温液晶微粒子の形状およびサイズが確認できるように十分な解像度で撮影するため、対物レンズを取り付けたカメラにて撮影するための装置を作成した。なお、バンドパスフィルターを通しての撮影では感温液晶微粒子が小さすぎて散乱光強度が弱く、撮影ができなかったため、必要となる波長のみを発生する光源を作成して計測を実施した。

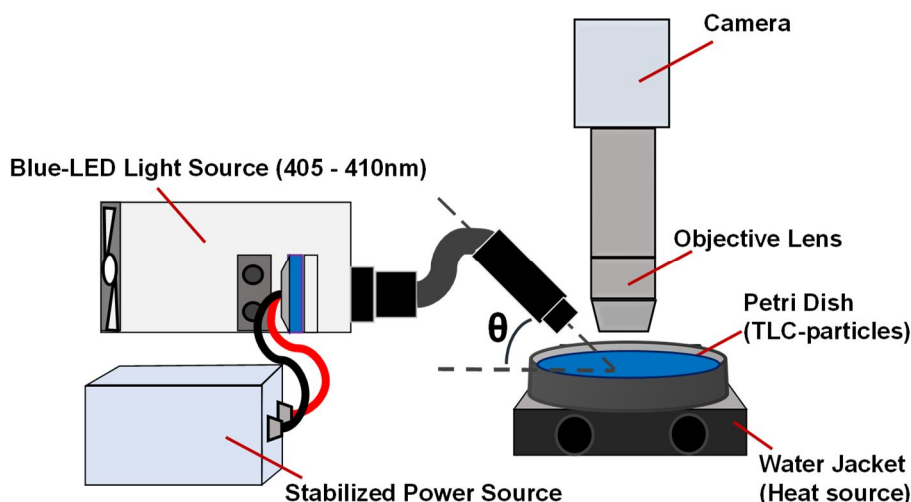


図1 対物レンズを用いた計測装置と計測対象

本装置を用いて、温度に対する散乱光強度を画像から得るとともに、その値を感温液晶微粒子の大きさ・幾何学形状ごとに分類してデータベースを作成する。その後、温度換算する際に適切な幾何学形状などの特徴量を見出すとともに、機械学習を導入して、粒子ごとに温度換算し、その計測精度を評価する。

さらに、3次元 PIV 法のように異なる角度から粒子画像を取得することで、3次元温度分布計測に拡張する。

#### 4. 研究成果

2020年度は、図1で示した対物レンズを用いた計測装置を作成し、日本カプセルプロダクツ社製の呈色温度範囲が 23°C~33°Cのコレスティック液晶の感温液晶微粒子をシリコンオイルに懸濁させ、その散乱光強度の計測を行った。しかしながら、感温液晶微粒子からの散乱光強度をモノクロカメラで撮影して値として取得した際に、図2のように微粒子内においても散乱光分布が存在するとともに、同じ温度の同サイズ程度の微粒子の散乱光強度の値も、同程度の値とならないことが明らかとなった。さらには、粒子毎の最大輝度値にも大きなばらつきがあることが観察された。そこで、OpenCVを用いた処理プログラムを作成して整理を行った結果、粒子の面積と真円度を用いた重回帰分析により最大輝度値との強い相関が確認され、これらをパラメータとすることで温度計測の可能性が見出された。

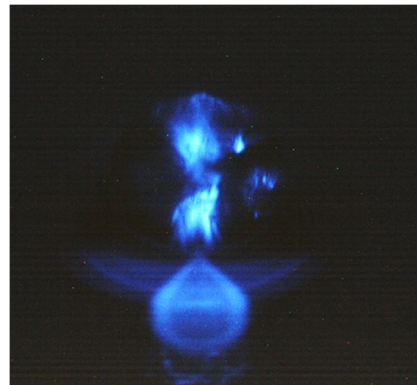


図2 青色 LED 照射時の感温液晶微粒子の散乱光の様子（写真は粒子1粒）

別の取り組みとして、モノクロカメラの代わりにカラーカメラで観察を行った所、カメラの感度特性により、青色のみでなく、赤色や緑色の素子から値が得られ、その割合が温度によって異なることが確認された。その値を HSI 値に変換したところ、Hue 値と温度とに呈色温度より高い温度範囲において単調減少するような傾向が確認された。したがって、カラーカメラを用いることで温度を換算できる可能性が見いだされた。

2021年度は、深層学習による温度計測に対して理想的な輝度値となるデータベースの構築が目的であった。そこで、前年度に得られた知見をもとに、さらに詳細な評価及び検討を実施した。モノクロカメラを用いた計測結果のデータベース化については、画像にノイズが映り込みやすく、温度計測には不向きであることが明らかとなった。一方、カラーカメラと青色波長域の単色の LED 発光素子の光源を用いた手法では、感温液晶微粒子内の RGB 値のうち、最も明るくなる値を HSI 値に変換すると、温度との特徴的な関係が得られることが分かった。この関係について図3に示す。図からも分かるように、呈色温度範囲内である 23°C~30°C では一旦温度とともに上昇して下降するという変化を示すが、30°C以上の温度域では、単調増加もしくは単調減少をするといった結果が得られた。そこで、Leave-One-

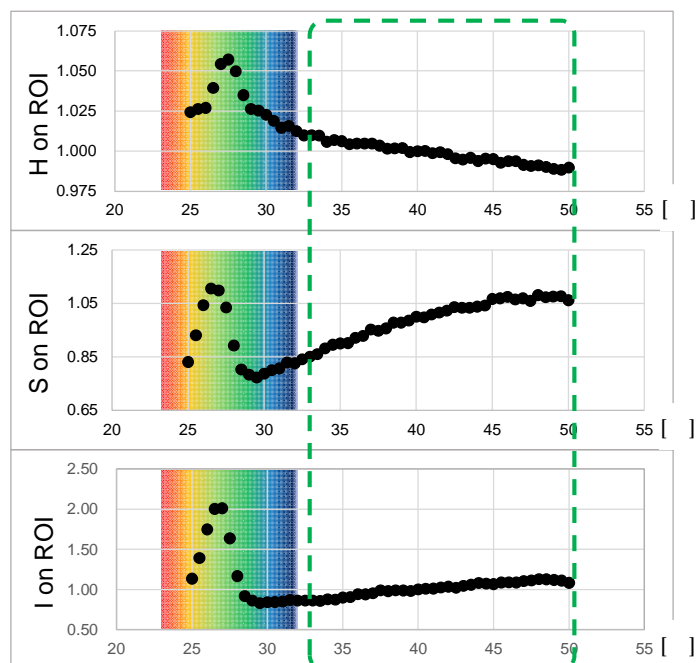


図3 散乱光強度を HSI 変換した値と温度との関係

Out method (LOO 法)を用いてそれらの HSI 値から得られた換算データ(計測温度)と実際の温度との誤差を評価した。図4にその結果を示す。図の横軸が液体の温度、縦軸が HS の値から換算した温度である。なお、I についてはカメラから得られた RGB 値の最大値であり、照射光強度分布に依存する値であり、温度分布計測に用いるのには不適切であるため、I 以外の値を用いた HS 検定とした。また、各温度におけるエラーバーも併せて表示している。25°C~33°Cあたりや 43°C以上ではやや誤差が大きいものの、実際の温度と計測温度とで比較的良好一致が見られた。表1に温度区間別に対象物の実際の温度とのどれぐらいの温度差以内に換算されたか(識別率)についての結果を示す。±1.0°C以内で検定された感温液晶微粒子は、40°C~50°Cの範囲では 28%程度であったが、他の区間では概ね 55%程度の値を示した。よって、半分程度の

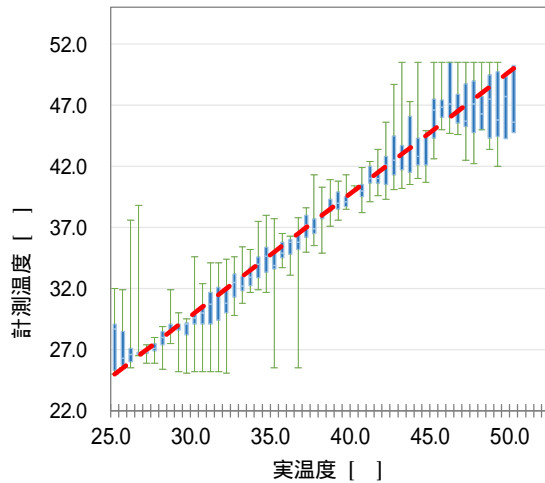


表1 粒子ごとの計測温度の識別率

	識別率 [%]	
	±1.0[ ]	±2.0[ ]
25.0-33.0 [ ]	53.7	72.1
33.5-40.0 [ ]	56.4	88.1
40.0-50.0 [ ]	28.2	57.7
全体	45.1	71.4

図4 HS 検定による実温度と計測温度の関係

感温液晶微粒子が $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 以内で検定できたことになる。なお、 $\pm 2.0^{\circ}\text{C}$ 以内であれば、さらにその割合は増えるが、温度分布計測に用いるための感温液晶微粒子温度としては誤差が大きすぎるといえる。そのため、より検定精度を向上させる手法の開発と、実際の温度とは大きく異なる結果となった感温液晶微粒子の温度データを除外するアルゴリズムの構築が必要になる。この結果から、当初予定していた深層学習についてはそのまま導入できないことが明らかとなった。

2022年度は、前年度に得られたカラーカメラによるRGBデータから温度を換算する手法の精度を向上させるための取り組みを行った。具体的には、感温液晶微粒子の撮影では多くの誤差要因が入り込む可能性が多いため、感温液晶シートを用いた実験を行った。そのため、図5に示す実験装置にて評価実験を行った。

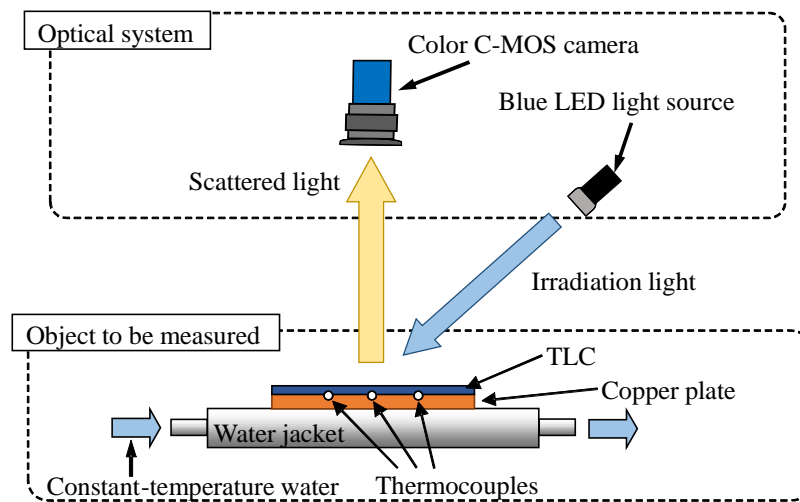


図5 感温液晶シートを用いた実験装置

カラーカメラには ImagingSource 社製の 10 bits カラーC-MOS カメラ DFK33UP1300 を使用した。また、感温液晶シートには日本カプセルプロダクツ社製のコレステリック液晶(呈色温度範囲が $10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ )のものを用いた。この実験装置で得られた温度に対応するRGB値を図6に示す。図からも分かるように、呈色温度範囲内では温度が上昇するとともに各RGB値は一度増加し、その後減少して再び増加するという現象が見られる。これは、感温液晶微粒子の観察においても確認されたものである。さらに温度が上昇すると、各RGB値は増大し $40^{\circ}\text{C}$ で極大値を取ったのち、再

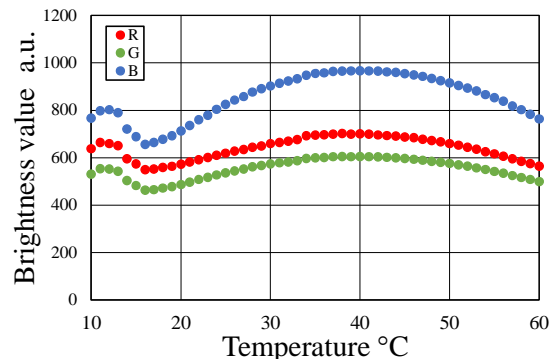


図6 温度に対応するRGB値の関係

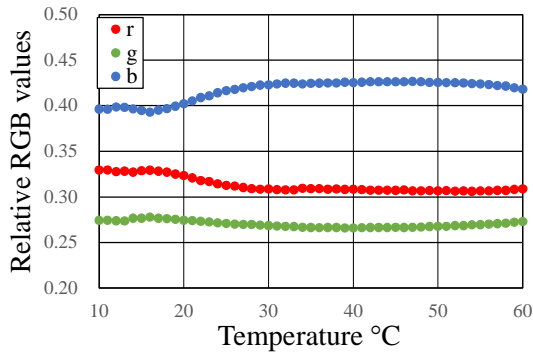


図7 温度に対応する相対輝度の関係

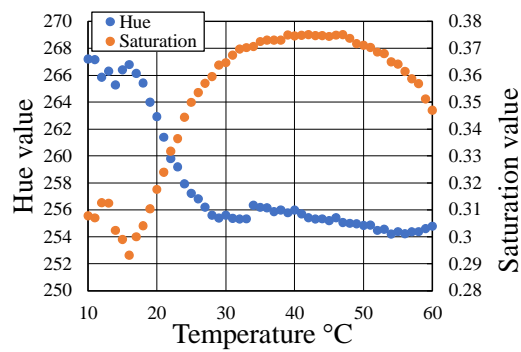


図8 温度に対応するHS値の関係

び減少するといった傾向を示す。これは、可視光線を用いた分光器による観察において 405nm の波長に見られた現象で、このコレステリック液晶の特性であるといえる。照射光強度分布の影響を削除するため、図7に温度に対応する相対輝度（ピクセル毎にRGB値の総和でRGB値それぞれを除いたもの）の関係を示す。図からも分かるように、単純に色として得られているのではなく、温度に対応して数値が変化している様子が分かる。実際に 20°Cより高温側では、青色は一旦増加してその後減少、赤色と緑色は一旦減少してその後増加する。これらの関係を用いれば温度に換算することは可能になるが、3色とのマッチングを行うのは計算負荷が大きい。そこで、円柱モデルのHSV値に換算し、そのうちのHS値を利用することを考える。その結果を図8に示す。円柱モデルを選択した理由としては、彩度が輝度値の最大値で除されていることで、照射光強度の違いの影響を取り除くためである。色相を見ると、呈色温度範囲では乱れがみられるものの、温度の上昇に伴い減少の様子が分かる。34 から 35 にかけて連続性が途切れるものの、54 あたりで最小値を取り、さらに温度が上昇すると増加する。従って、この単調減少の範囲を利用すれば温度計測が可能になることが分かる。一方、彩度を見ると、呈色温度範囲の高温側から単調増加を示し、38 でピークを取った後、減少することが分かる。これらの2つの値は互いに特徴があるため、HS両方を用いて温度検定を行うことで、より幅広い温度計測が可能になることが推測される。HS値を用いた温度検定の温度分解能について図9に示す。RGB値のピークを取る40度付近では著しく温度分解能が低下するが、10 から 35 あたりと 45 から 60 あたりでは0.2の温度分解能を有することが分かる。本研究では10bitのカラーC-MOSカメラを使用しているが、それよりも高い階調を有するカメラを使用すれば、より高い温度分解能が実現できる。

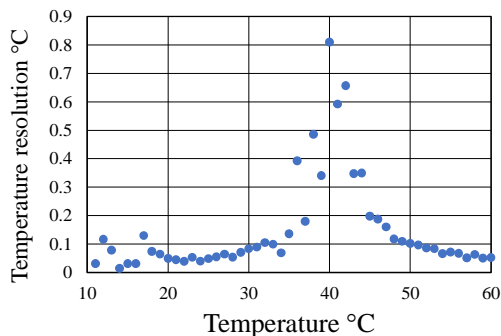


図9 温度分解能

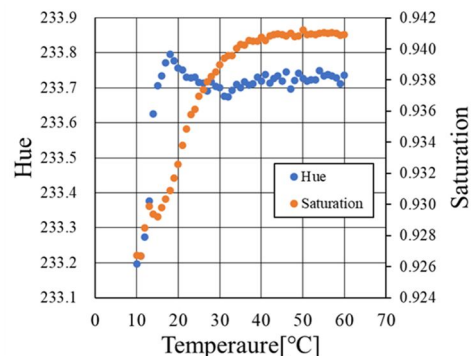


図10 RG値の感度の低い14bitカラーカメラのHSとの関係

カメラの感度特性や階調の関係を調べるため、青色近傍のRGの感度の低い14bitカラーカメラ Allied Vision 社製の 10 bits カラーC-MOSカメラ Stingray F-201Cを使用した際の結果を示す。RGの値が小さいため、HSの関係も図8とは大きく異なり、Hue値は大きく変動している。温度検定には適さないことが分かる。Saturationのみでも温度検定は可能であるが、純粋に階調の大きなカメラを使用すればよいわけではないということが確認された。

以上より、当初の予定であったレシオメトリー法では感温液晶微粒子の温度を特定できず、液体内の温度分布を得ることはできなかったが、青色LEDの照射光による散乱光強度をカラーカメラにて撮影し、HS検定をすることで温度換算するという新たな手法を開発し、感温液晶微粒子の温度特定に使用できる可能性が見いだせた。さらに評価を進め、精度の良い温度検定法を確立し、液体内の3次元温度計測へと発展させる予定である。

## 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 1件）

1. 著者名 Toriyama Koji, Tada Shigeru, Ichimiya Koichi, Funatani Shumpei, Kokui Daisuke	4. 巻 59
2. 論文標題 Surface temperature measurement using thermochromic liquid crystals and ratiometric analysis of spectral intensities of scattered light	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 1049 ~ 1058
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00231-022-03310-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 野木光, 鳥山孝司
2. 発表標題 青色波長照射時の感温液晶粒子の過渡特性に関する研究
3. 学会等名 関東学生会61回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鳥山孝司, 木内優作
2. 発表標題 青色LED光源下での感温液晶粒子からの散乱光を用いた液体内の温度計測法に関する研究
3. 学会等名 第59回 日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鳥山 孝司, 多田 茂, 一宮 浩市, 船谷 俊平, 長屋 樹
2. 発表標題 青色LEDを光源とする感温液晶シートからの散乱光を用いた温度計測法の研究
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長屋樹, 鳥山孝司, 多田茂, 一宮 浩市, 船谷 俊平
2. 発表標題 カラーカメラの感度特性を利用した温度分布計測に関する研究
3. 学会等名 関東学生会62回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023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
研究分担者	船谷 俊平  (Funatani Shumpei)  (50607588)	山梨大学・大学院総合研究部・准教授   (13501)	
研究分担者	多田 茂  (Tada Shigeru)  (70251650)	防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・応用科学群・教授   (82723)	

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
---------	---------