

令和元年6月24日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06113

研究課題名(和文) スペクトル強度比を用いた3次元温度分布計測システムの開発

研究課題名(英文) Development of the three-dimensional temperature distribution measurement method using the ratio of the spectrum intensity

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は感温液晶の異なる散乱光強度比を利用した新しい三次元温度分布測定法の開発である。まず最初に、ハーフミラーを用いる手法に取り組んだところ、計測の不確かさが大きくなることが分かった。また、異なる種類の感温液晶について評価した所、本手法ではカイラルネマティック液晶よりもコレステリック液晶の方が良い事が明らかになった。次に、シャインブルー配置による手法に取り組み、不確かさが非常に小さくなる事が確認された。また、仰角と計測可能温度範囲の関係についても調べ、本計測法の適用可能範囲を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的特色は、比較的安価でかつ扱いが容易な感温液晶を用い、感温液晶の呈色範囲を大きく超える温度範囲で温度計測が可能となることにある。また、モノクロカメラと安価なフィルタ・光学系のみで機器構成で測定系が容易に実現可能であるという特徴がある。

シャインブルー配置による計測では、非常に高い精度での温度計測が可能であることが本成果により示された。また、液体内部の温度分布計測にも適用可能であり、その基盤となる技術は確立された。これにより、従来実現が困難であった3次元熱流動場における瞬時温度・速度場計測が非侵襲・非接触的に可能となった。

研究成果の概要(英文)：This study is to develop a novel three-dimensional temperature distribution measurement method utilizing thermo-chromic liquid crystal (TLC). In this study, the temperature was determined using the intensity ratio of scattered light on TLC at two different wavelengths. At first, the method using a half mirror was evaluated. However, it has been found that this method has large uncertainty. Moreover, when the difference in TLC was also evaluated, it became clear that the cholesteric liquid crystal was more suitable for this measurement method than the chiral-nematic liquid crystal. Next, the method by a Scheimpflug arrangement was evaluated. In this method, the uncertainty became a very small value. In addition, the relation of the elevation angle and measurable temperature range was examined, and the application range of this measurement method was clarified.

研究分野：伝熱工学

キーワード：温度分布計測 感温液晶 散乱光強度比 シャインブルー配置 不確かさ解析 非接触

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

1. 研究開始当初の背景

伝熱を伴う機器の熱効率を向上させることは今後ますます要求されるものであり、そのような熱設計を行うためには、機器表面や熱移動媒体となる気体・液体内の温度分布を時間・空間的に詳細に把握する必要がある。そのような背景のもと、これまでに研究代表者らは蛍光色素を用いた温度分布の面計測法である2色LIF法を用いた3次元温度分布計測手法の開発を行ってきた。例えば、面計測法を3次元計測に拡張する方法として、レーザーシート光を奥行方向に移動させるスキヤニングLIF法や、W型スキヤニング法が挙げられる。しかしながら、瞬時的での3次元空間分布計測ではないこと、温度分布計測の空間分解能が低い、などの問題点が残されている。また、2色LIF法は伝熱体表面温度の計測には適用が困難である。これらのことから、伝熱体内部・表面温度共に高速・高精度に測定可能な、新しい3次元温度分布計測法の開発が必要とされる。

一方、2色LIF法以外の温度分布の面計測手法としては、感温液晶を用いる方法がある。感温液晶は波長毎の反射率が温度に依存するため、可視光照射により温度を色彩として可視化できる。感温液晶を用いた従来の計測法では、この色彩変化をそのまま温度に換算するため、呈色温度範囲(温度によって色が変わる温度範囲)の狭い範囲でしか温度を計測することが出来ない。そこで研究代表者らは、まずこの問題を解決するため、450nm以下の狭域波長の散乱光強度から相対反射率を求め、それを温度に換算することで、計測可能温度範囲が最大で従来の3倍程度にまで拡張できることを見出した。また、本手法では測定機器に一般的なモノクロカメラを用いるだけでよいため、安価で容易に空間分解能を高めることが可能である。

しかしながら、照射光の強度は時間的に変動するとともに空間的にも分布が存在するため、同じ温度であっても、散乱光強度分布は様とはならない。このことは、本手法のより広範囲な温度場計測技術への適用を目指す場合、大きな障害となる。

2. 研究の目的

研究代表者らはこれまでの研究で、狭域波長の反射光を用いることで、感温液晶の呈色温度範囲を大きく上回る温度範囲での温度計測手法を開発することに成功した。しかしながら本手法では光の強度変動の影響を避けるため画像の加算平均を解析に用いているとともに、空間的な照明光の広がり影響を消去するため白板からの散乱光強度分布を予め得ておく必要があるなど、簡便ではなく、応用への展開が難しいものであった。そこで本研究では、2台のカメラを同時に使用して異なる狭域散乱光強度を取得し、瞬時値で温度を得る技術の確立を目的とした。また、感温液晶は構造的に異なるコレステリック液晶とカイラルネマティック液晶の2種類があるため、本計測法に用いる上でどちらが良いかについても明らかにする。具体的には、

- (1) 2台のカメラを同時に用いた際の最適な狭域波長の組合せの決定、
- (2) 加算平均に用いる画像の枚数が及ぼす計測可能温度範囲及び計測精度への影響、
- (3) コレステリック液晶とカイラルネマティック液晶の違いによる計測可能温度範囲及び計測精度への影響、

を明らかにし、応用として本手法の液体内部3次元温度分布の測定法への拡張に取り組むことを目的とした。

3. 研究の方法

まず2台のカメラを同時に使い同じ画角かつ異なる狭域散乱光強度分布を取得できる装置を作成する。具体的には図1に示すようなハーフミラーを用いた装置を作成した。

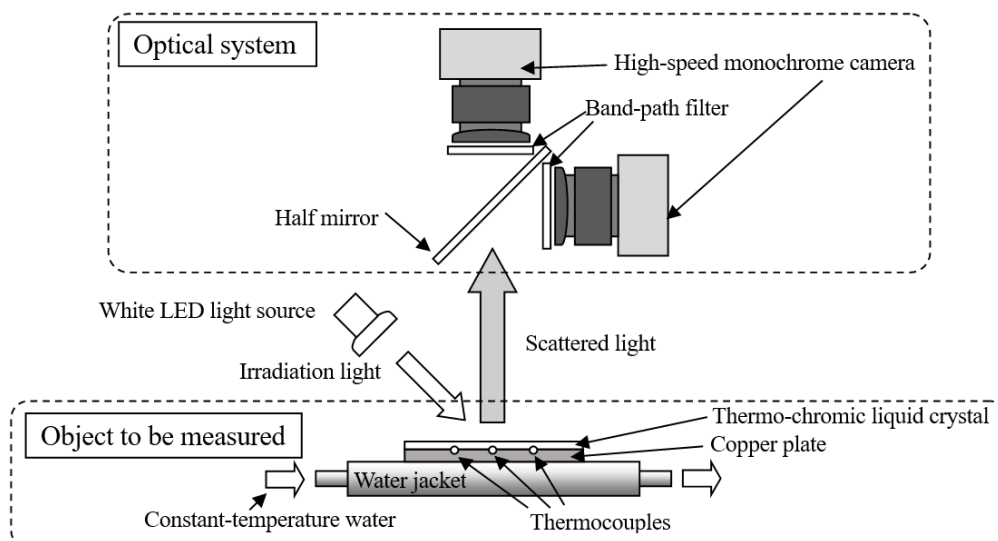


図1 ハーフミラーを用いた計測装置と計測対象

本計測装置を用いて、複数種類のバンドパスフィルタ(405,420,436,442nm:半値全幅 10nm)を通して得られる狭帯域散乱光分布をモノクロカメラで取得し、その比から求められる温度分布を求める。その値から計測可能温度範囲、温度分解能、95%不確かさ調べ、本手法にとって最も適切なフィルタの組み合わせを明らかにする。また、その際の加算平均に用いる画像枚数が上述の項目に与える影響についても評価する。

また、同一温度範囲のコレステリック液晶とカイラルネマティック液晶について上述と同様な評価を行い、本計測により適切な液晶の種類及び計測精度の限界などについても明らかにする。

さらに、3次元計測のため、図2に示すような2台のカメラをシャインプルフ配置にした計測装置を作成し、感温液晶微粒子を液体中に分散させた粒子の像を撮影する。その画像から粒子の位置を換算し、液体内の温度分布を得られるよう本手法を拡張する。

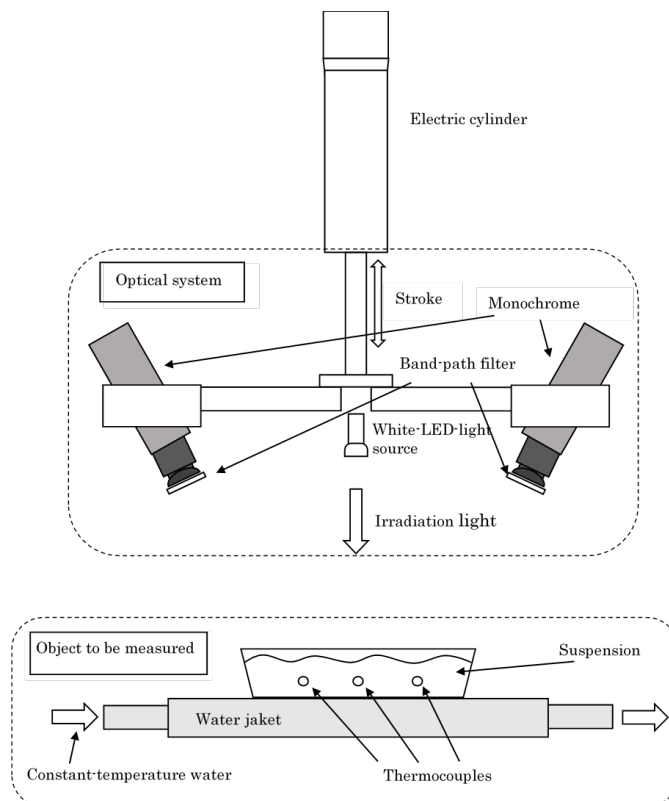


図2 シャインプルフ配置による液体内温度分布計測装置と測定対象

4. 研究成果

2016年度は図1で示したハーフミラー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同じ呈色温度範囲(10~20)のコレステリック液晶(RX1020)とカイラルネマティック液晶(KX1020)について計測可能温度範囲及び不確かさの評価を行った。実験結果の代表例として散乱光強度比と計測可能温度範囲を図3に示す。

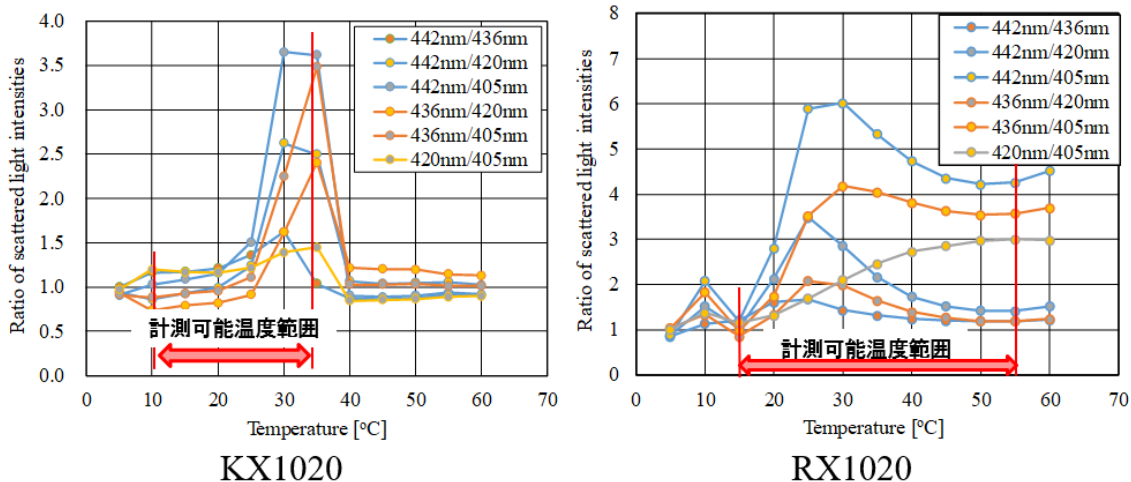


図3 ハーフミラー式による散乱光強度比と計測可能温度範囲の関係

図における単調増加もしくは単調減少する温度範囲が計測可能温度範囲となり、最も範囲の広い組み合わせでは、カイラルネマティック液晶では 10 ~35 の 25 の温度幅、コレステリック液晶では 15 ~55 の 40 の温度幅であり、コレステリック液晶を使用した方が、本計測法に対してより広い温度範囲を計測できることが明らかになった。また、カイラルネマティック液晶の場合、呈色温度範囲よりも 20 以上になると、反射率の温度依存性が無くなるといった現象が確認できた。なお、この温度に依存しない状態は温度が低下しても続くため、実際の計測には不向きであることも明らかとなった。図 4 に一様な温度分布を取得し、その分布として得られた温度について 95%不確かさの結果を示す。なお、温度分布として換算できる温度範囲は図 3 の結果よりも狭くなる。また、不確かさとしては 1 ~3 程度あり、十分な計測精度を有していないことが分かった。この原因の検証のため、本装置で得られた校正板の画像を図 5 に示す。ハーフミラーにより反射した像を撮影しているカメラでは、ミラーの表と裏の面で反射された像が 2 重に写り込んでおり、その結果、著しく不確かさを大きな値にしてしまうことが明らかとなった。

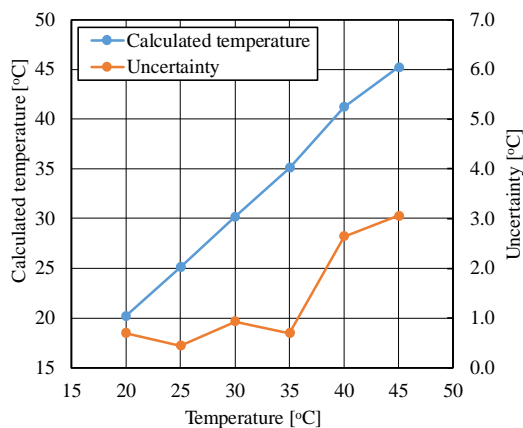


図 4 不確かさ解析

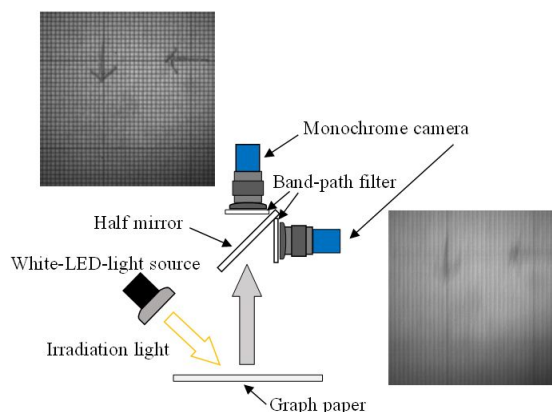


図 5 カメラと撮影した画像の関係

2017 年度は、前年で明らかになった問題の対応のため、図 2 に示すシャインプルーフ配置による計測装置を作成し、その測定対象物を図 1 のものを用いて計測可能温度範囲などについて評価を行った。なお、カメラの配置位置は測定対象物の中心から見て仰角が 75° に設置した。カメラから得られる画像は測定対象物を斜めから撮影したものとなり、そのまま散乱光強度分布の比にすることができないため、一旦校正板を撮影して正面から得た画像に変換する変換行列を作成し、それを用いて正面から見た分布比を算出し、温度換算を行った。この際の不確かさ解析の結果を図 6 に示す。

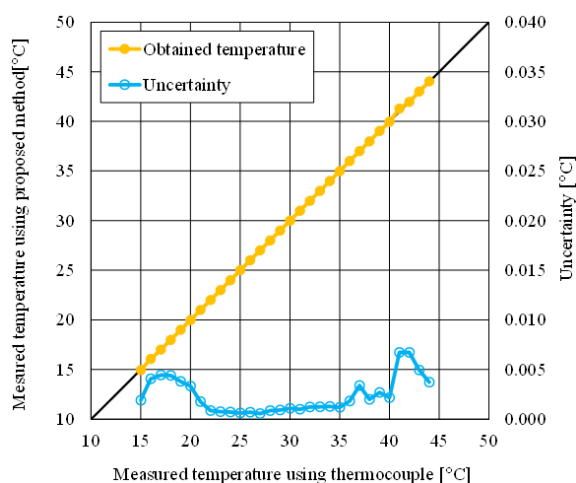


図 6 シャインプルーフ配置での不確かさ解析

本結果は 436nm/405nm の組み合わせによるものであり、計測可能温度範囲は 15 ~44 の 29 であり、不確かさはその範囲内で 0.007 以下であることが明らかになった。なお、最も計測可能温度範囲が広がるバンドパスフィルタの組み合わせはハーフミラーを用いた手法とは異なることも分かった。また、加算平均に用いる画像の枚数は 10~20 枚程度で良い事も明らかになった。

2019 年度は、前年度に得られた結果から、感温液晶の散乱光強度が仰角にも依存していると

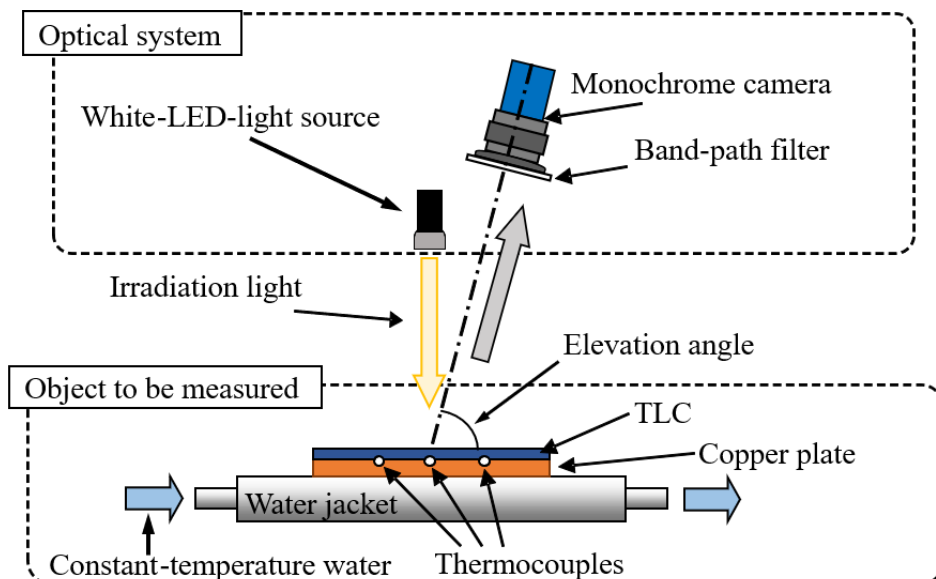


図7 仰角の違い計測のための実験装置

推測し、仰角と計測可能温度範囲との関係について評価した。この際に作成した実験装置の概略図を図7に示す。仰角は $5^{\circ} \sim 80^{\circ}$ の 5° 刻みで変えて測定した。代表的に計測可能温度範囲の広い $420\text{nm}/405\text{nm}$ と $436\text{nm}/420\text{nm}$ の組み合わせによる温度分解能の結果を図8に示す。

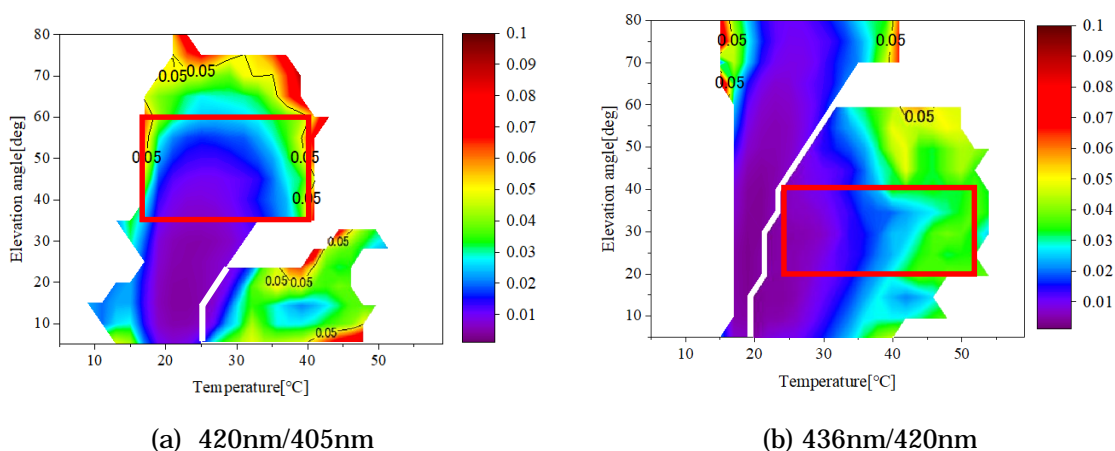


図8 仰角及び温度に対する温度分解能の関係

図における左側は散乱光強度比が単調増加する範囲、右側が単調減少する範囲をそれぞれ用いた場合のものであり、温度分解能が0.1以下のものを表示している。また、最も広い計測可能温度範囲となる領域について赤線で示した。この仰角が大きいと温度分布計測に対して空間的に広い領域を計測することが可能になる。 $420\text{nm}/405\text{nm}$ の組み合わせでは、仰角が $35^{\circ} \sim 60^{\circ}$ の範囲において $17 \sim 41$ の 24 の温度幅で計測可能ではあるが、その低温側と高温側の両端では温度分解能がやや低いことが分かる。一方、 $436\text{nm}/420\text{nm}$ の組み合わせでは、仰角が $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ の範囲において $25 \sim 51$ の 26 の温度幅であり、その低温側と高温側の両端においても温度分解能がそれほど大きくなることが明らかになった。なお、仰角の幅が 20° あれば比較的広い空間を計測可能になるため、 $436\text{nm}/420\text{nm}$ の組み合わせが計測には有利であると考えられる。

また、液体内部の温度分布計測のため、シリコンオイル内にコレステリック系の感温液晶微粒子を懸濁させ、液体内に分散しているの画像撮影し、DLT法により3次元位置を取得するアルゴリズムを構築した。以上より、3次元温度分布計測のための基盤となる技術を確認できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

[雑誌論文](計1件)

小久井大將、鳥山孝司、多田茂、一宮浩市、船谷俊平、Temperature Distribution Measurement Using Ratio of Scattered Light Intensities From Thermo-Chromic Liquid Crystal: Uncertainty Evaluation, The 16th International Heat Transfer Conference, IHTC-16、

[学会発表](計5件)

鳥山孝司、多田茂、一宮浩市、船谷俊平、権宰暁、「目視角度の影響を考慮した感温液晶からの散乱光強度比を用いた温度計測法」、第56回日本伝熱シンポジウム講演論文集、G134、査読無、2019年5月29日、徳島県・あわぎんホール

小久井大将、鳥山孝司、多田茂、一宮浩市、船谷俊平、「狭帯域波長のスペクトル強度を用いた感温液晶の新しい温度分布計測法 - シェインプルーフ配置による測定法の改善 - 」、熱工学コンファレンス 2018 講演論文集、J212、査読無、2018年10月21日、富山県・富山大学

鳥山孝司、多田茂、一宮浩市、船谷俊平、浅野佳祐、Effects of the Type of TLCs for Measurable Temperature Range of Temperature Distribution Measurement Method Using Ratio of Scattered Light Intensities、The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference、TFEC9-1484、査読有、Okinawa, Japan, October 27-30, 2017

鳥山孝司、多田茂、一宮浩市、船谷俊平、浅野佳祐、「感温液晶の狭域散乱光強度比を利用した新しい温度分布計測法」、第54回日本伝熱シンポジウム講演論文集、C333、査読無、2017年5月26日、埼玉県・大宮ソニックシティ

ドゥマ・ジョン・ンガンガ、鳥山孝司、多田茂、船谷俊平、小林拓也、Instantaneous Measurement of Temperature Distribution Using Thermo-Chromic Liquid Crystals Based on Spectral Intensity in Narrow Band Wavelengths、The 27th International Symposium on Transport Phenomena、ISTP27-157、査読有、Honolulu, Hawaii, USA, September 21-23, 2016

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：多田 茂

ローマ字氏名：TADA, Shigeru

所属研究機関名：防衛大学校

部局名：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

職名：教授

研究者番号(8桁)：70251650

(2) 研究分担者

研究分担者氏名：一宮 浩市

ローマ字氏名：ICHIMIYA, Koichi

所属研究機関名：山梨大学

部局名：大学院総合研究部

職名：名誉教授

研究者番号(8桁)：30037923

(3) 研究分担者

研究分担者氏名：船谷 俊平

ローマ字氏名：FUNATANI, Shumpei

所属研究機関名：山梨大学

部局名：大学院総合研究部

職名：准教授

研究者番号(8桁)：50607588

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。