

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 9 月 10 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06668

研究課題名(和文) 建築土木構造物の外壁全面検査を可能にする偏光赤外線サーモグラフィ法の確立

研究課題名(英文) Establishment of Reduction Method of Background Reflection on Infrared Thermographic Testing with Polarizer for Building Wall

研究代表者

小笠原 永久(Ogasawara, Nagahisa)

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)・システム工学群・教授

研究者番号：60262408

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、建築土木構造物の表層部に生じる剥離欠陥を対象とした赤外線サーモグラフィ試験において、誤差要因となる背景反射を、偏光理論を応用して分離・削除することである。偏光理論の赤外線領域での成立を実験で確認した後、MATLABによる背景反射分離プログラムを作製した。平板や曲面に対する偏光子付きの赤外線サーモグラフィ試験を行い、本プログラムの有効性を確認している。また、反射が0.0になるBrewster角でのラインスキャン計測による広大面積の屋外構造物への応用方法も提案している。これらの技術は、建築土木構造物の広大面積の検査を可能にするものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建築基準法改正により建築物外壁の全面検査が義務化され、2次元画像により効率よく検査できる赤外線サーモグラフィ試験が注目を浴びている。しかし、太陽や高温背景の反射の影響を受けることから、その背景反射の除去が課題の一つとなっていた。本研究では、赤外線偏光子を赤外線カメラに取り付けることで、S偏光とP偏光の赤外線計測を行い、得られた赤外線画像から、反射成分のみを除去、放射成分のみを抽出する方法を開発した。本手法により、建物外壁は勿論のこと、滑走路や高速道路などの広大面積を持つ土木構造物の検査が効率よく行えることになった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to establish a reduction method of background reflection by using Infrared thermographic testing with a polarizer for large area of building wall. First, we confirmed the theoretical relationship between the face angle and the polarized emissivity by the experiments. Then we made the program based on the polarization theory with MATLAB in order to distinguish the reflection component from obtained infrared energy. Finally, we applied the program to the infrared images of the flat plate and the tube including the background reflection, and obtained quantitatively only emitted infrared image by removing the reflection component. Moreover, we proposed new line-scanning technique for large structure, which is based on the Brewster angle. Therefore, these methods are very effective to the infrared thermographic testing for large area of building wall.

研究分野：非破壊検査

キーワード：保全技術 非破壊検査 赤外線サーモグラフィ 背景反射 偏光 画像処理

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

建築基準法改正により、建築物外壁の全面検査が義務化され、単点検査である打音検査の欠点を補完する手法として、赤外線サーモグラフィ試験が注目を浴びている⁽¹⁾。試験対象物の制限を受けにくいとされる本手法であるが、光沢タイルのような低放射率すなわち高反射率の試験対象物では、周辺背景反射の影響を受けやすく、剥離欠陥等の誤検知につながる致命的な欠点を有している。

2. 研究の目的

可視光域では偏光フィルターを利用した反射低減技術が日常的に使われており、同じ電磁波である赤外線域でも、その反射低減効果は期待される。そこで、本研究の目的を、偏光技術を赤外線域に応用することで、反射率の高い光沢タイル仕上げ構造物等の剥離欠陥検査時に、太陽光や背景構造物から受ける反射の影響を低減・削減することとした。

3. 研究の方法

本研究は、(1)赤外線域における偏光理論の確認、(2)背景反射の定量的除去プログラムの構築、(3)実計測へのプログラムの適用と主に3段階で進めた。以下に、それぞれの研究方法と結果について示す。

(1)赤外線域における偏光理論の確認

直線偏光は、光の電場の振動方向が入射面に対して平行になっているP偏光と、垂直になっているS偏光に区別できる⁽³⁾。ある絶縁物質の境界面で反射される赤外線のP偏光反射率 $\rho_P(\lambda, \theta)$ とS偏光反射率 $\rho_S(\lambda, \theta)$ は、以下の式で表すことができる⁽²⁾。

$$\rho_P(\lambda, \theta) = \left(\frac{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right)^2 \quad (1)$$

$$\rho_S(\lambda, \theta) = \left(\frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 λ は波長、 θ は対面角、 n は屈折率を表す。屈折率が波長依存性を有しているため、反射率も波長の関数となる。

また、本研究の対象物は透過率が0.0と考えることができ、よって、エネルギー保存則より、P偏光放射率 $\varepsilon_P(\lambda, \theta)$ とS偏光放射率 $\varepsilon_S(\lambda, \theta)$ は、以下の式で表すことができる。

$$\varepsilon_P(\lambda, \theta) = 1 - \left(\frac{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right)^2 \quad (3)$$

$$\varepsilon_S(\lambda, \theta) = 1 - \left(\frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right)^2 \quad (4)$$

これら式(1)-(4)が赤外線域でも成立しているかを確認するために、偏光子を赤外線サーモグラフィ装置に設置し、実験的に偏光反射率と偏光放射率を求めた。偏光子は本科学研究費で購入したものであり、ゲルマニウム製のワイヤーグリッド偏光子である。偏光方向に約80%、偏光直交方向に約0.2%の赤外線を透過する。

図1に測定に使用した偏光子付赤外線サーモグラフィ装置を、図2に偏光放射率測定の大略図を、図3に偏光放射率と対面角度の関係について実験値と理論値を示す。実験値と理論値はおおむね一致しており、偏光理論が赤外線域でも成立することを示すことが出来た。

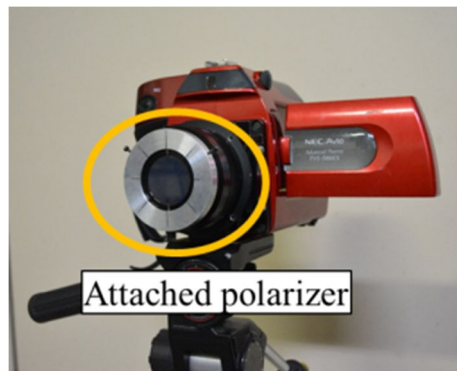


図1 偏光子付赤外線サーモグラフィ装置

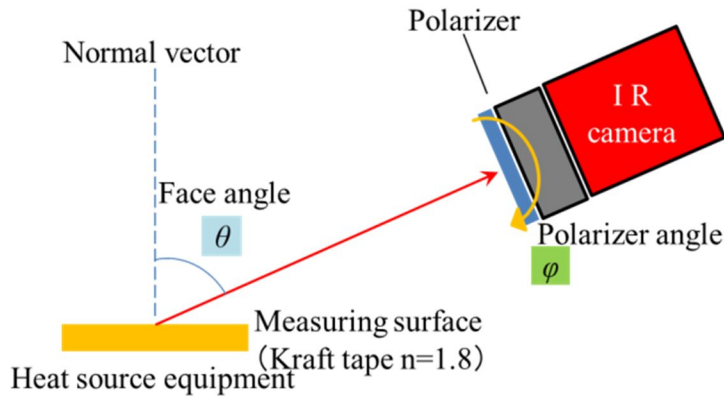


図2 偏光放射率測定の概略図

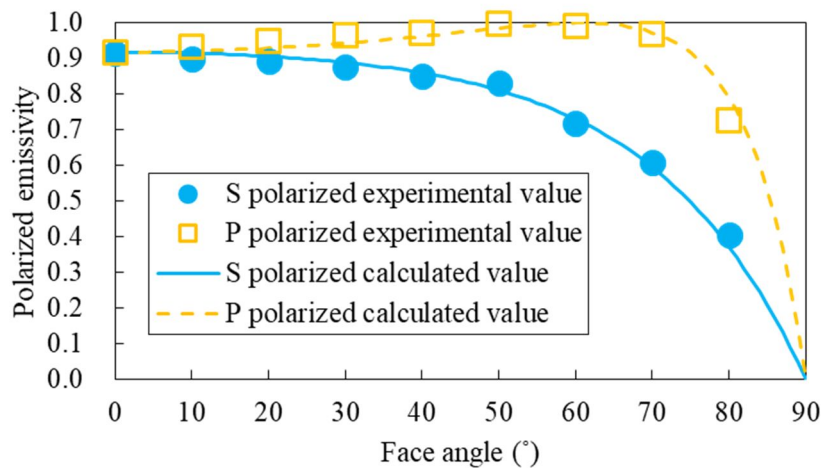


図3 偏光放射率と対面角度の関係
(実験値と理論値の比較)

(2)背景反射の定量的除去プログラムの構築

赤外線サーモグラフィ試験時に撮像した熱画像の中には、測定面から放射された赤外線エネルギー E_e と、背景の放射赤外線が測定面で反射された反射赤外線エネルギー E_r が含まれている。偏光子付赤外線サーモグラフィ装置で計測した赤外線エネルギーは、P 偏光、S 偏光それぞれ以下の式で示される。

$$E_p(\theta) = \varepsilon_p(\theta) \times \frac{E_e}{2} + \rho_p(\theta) \times \frac{E_r}{2} \quad (5)$$

$$E_s(\theta) = \varepsilon_s(\theta) \times \frac{E_e}{2} + \rho_s(\theta) \times \frac{E_r}{2} \quad (6)$$

ここで、 $E_p(\theta)$ は対面角 θ におけるP 偏光時の赤外線エネルギー、 $E_s(\theta)$ は対面角 θ におけるS 偏光時の赤外線エネルギーである。

赤外線サーモグラフィ試験の時、 $E_p(\theta)$ と $E_s(\theta)$ を計測すれば、式(5)、(6)を連立することで、測定対象物から放射された放射エネルギー E_e と測定対象物に反射した反射エネルギー E_r をそれぞれ分離取得することが出来る。このアルゴリズムに基づき、背景反射を除去した赤外線画像を再構成するプログラムを、MATLAB を用いて作製した。フローチャートを図4に示す。

(3)実計測へのプログラムの適用

構築したプログラムを用いて、実際に撮像した赤外線画像から、反射成分を分離除去し、放射成分のみを抽出できるか確認を行った。

図5に実験概略図を示す。測定対象物の一部を加熱し放射赤外線を発生させ、同じ位置に重なるように高温背景物の反射赤外線を配置している。偏光子を付けずに計測した赤外線画像を図6(a)に、提案プログラムを実行し背景反射を分離除去した赤外線画像を図6(b)に示す。(a)では、放射成分と反射成分が重なっており、赤外線サーモグラフィ試験時の誤検知に繋がってしまう。一方、(b)では放射成分のみの赤外線画像となっており、確実な検知が行えることが示された。

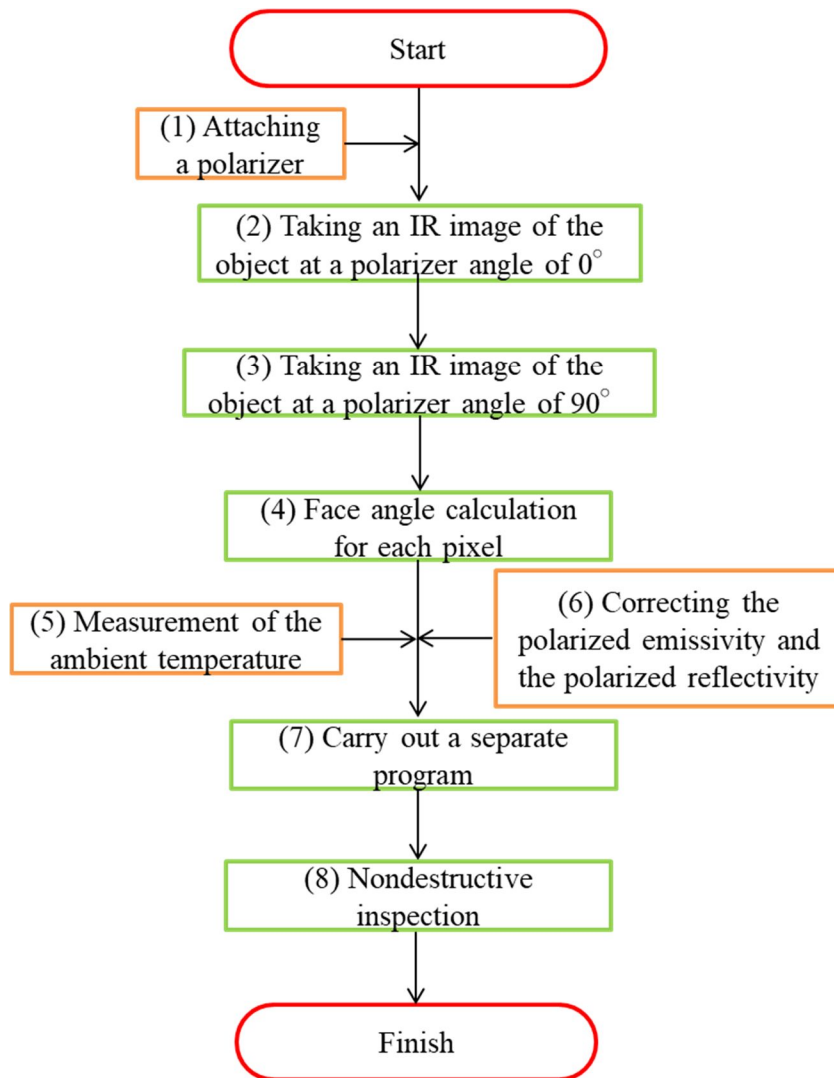


図4 背景反射分離除去プログラムのフロー

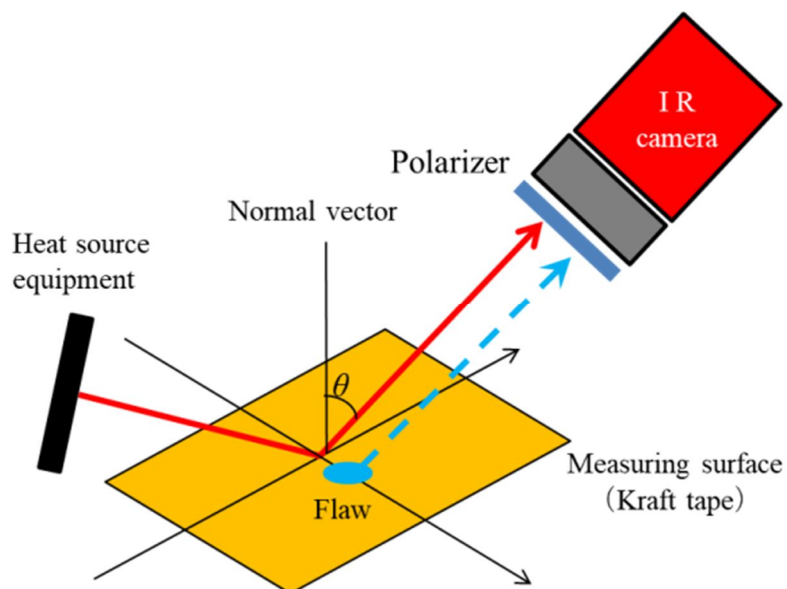
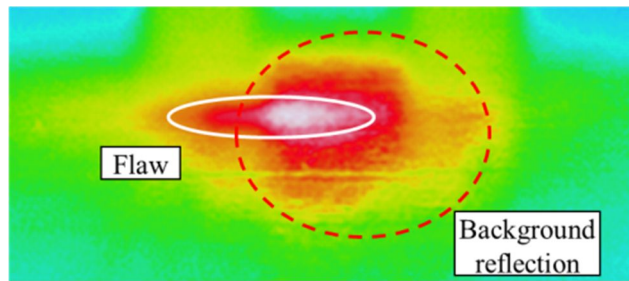
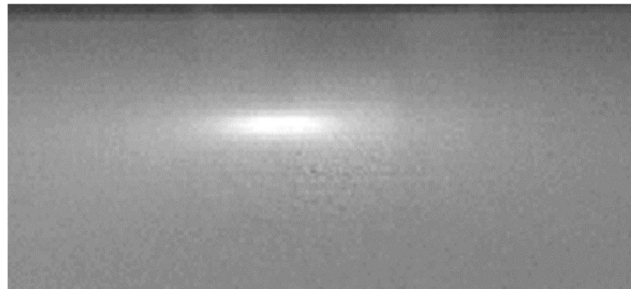


図5 背景反射分離除去実験の概略



(a) 分離除去処理前



(b) 分離除去処理後

図 6 分離除去前後の赤外線画像

4. 研究成果

偏光理論を赤外線サーモグラフィ試験に応用し、背景反射を除去するプログラムを構築、放射成分のみの赤外線画像を抽出することに成功した。本成果を利用することで、建築土木構造物の外壁全面検査を、確実に効率的に実施することが可能となった。また、その他の成果として、構築プログラムを利用しない定性的識別方法は、偏光子角度を変えた二度の計測画像から、ホットスポットが背景反射によるものか、きず指示による放射によるものか判断できる、反射率が 0.0 になる Brewster 角を利用したラインスキャン法では、滑走路や高速道路などの広大な面積を持つ土木構造物に有効である。

以上、本研究による偏光理論を応用した赤外線サーモグラフィ法は、社会の安心安全を担保できる意味で、社会的意義は大きいと言える。

<引用文献>

- (1) 日本非破壊検査協会：赤外線サーモグラフィ試験Ⅱ，(2012)
- (2) 増喜彰久，他 2 名：計装，17(6)，pp.1-7，(2003)
- (3) 藤原祐之：分光エリプソメトリー，丸善，(2003)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Soshi Suzuki, Nagahisa Ogasawara	4. 巻 103
2. 論文標題 Infrared thermographic test for removing background reflection based on polarization theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 NDT & E International	6. 最初と最後の頁 19-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.01.007	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 -

1. 著者名 鈴木総司, 小笠原永久	4. 巻 69
2. 論文標題 金属に対する偏光理論を利用した赤外線サーモグラフィ試験における背景反射の除去	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 非破壊検査	6. 最初と最後の頁 300-305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Soshi Suzuki, Nagahisa Ogasawara	4. 巻 3
2. 論文標題 Quantitative Evaluation of Polarized Emissivity and Polarized Reflectivity using Infrared Thermographic Instrument	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advanced Experimental Mechanics	6. 最初と最後の頁 167-172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Soshi Suzuki, Nagahisa Ogasawara
2. 発表標題 Separation of Defects and Background Reflections Using Polarization Theory for Metal
3. 学会等名 QIRT-Asia 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木総司, 小笠原永久, 松田裕行
2. 発表標題 透明黒体塗料およびフィルムを用いた赤外線サーモグラフィ試験
3. 学会等名 第24回神奈川県非破壊試験技術発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小笠原永久, 鈴木総司, 松田裕行
2. 発表標題 PVA黒体化処理を施した赤外線サーモグラフィ試験
3. 学会等名 日本機械学会2019年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木総司, 小笠原永久
2. 発表標題 絶縁物に対するBrewster角を用いた背景反射の除去
3. 学会等名 日本非破壊検査協会2019年度秋季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木総司, 増田敬助, 鷲頭健一, 山田浩之, 小笠原永久
2. 発表標題 位相解析赤外線サーモグラフィ法による内部欠陥深さの評価
3. 学会等名 日本機械学会2019年山梨講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木総司, 小笠原永久, 松田裕行
2. 発表標題 PVAを用いた可視光透明な高放射率フィルムおよび塗料の開発
3. 学会等名 日本非破壊検査協会2020年度非破壊検査総合シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小笠原 永久, 鈴木 総司
2. 発表標題 逐次処理による位相解析赤外線サーモグラフィ法
3. 学会等名 日本非破壊検査協会平成30年度非破壊検査総合シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木 総司, 小笠原 永久, 松田 裕行
2. 発表標題 背景反射除去と簡易黒体化処理
3. 学会等名 日本非破壊検査協会平成30年度非破壊検査総合シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木 総司, 小笠原 永久, 松田 裕行
2. 発表標題 偏光理論を用いた背景反射除去と透明薄膜による簡易黒体化処理
3. 学会等名 神奈川県非破壊試験技術交流会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Soshi Suzuki, Nagahisa Ogasawara
2. 発表標題 Reflection Removal Infrared Thermographic Test using Polarization Theory for Dielectrics
3. 学会等名 13th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木 総司, 小笠原 永久
2. 発表標題 金属に対する偏光理論を用いた反射除去赤外線サーモグラフィ
3. 学会等名 日本非破壊検査協会平成30年度秋季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小笠原 永久, 鈴木 総司, 松田 裕行
2. 発表標題 透明黒体塗料を用いた赤外線サーモグラフィ法
3. 学会等名 日本非破壊検査協会平成30年度秋季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木 総司, 小笠原 永久
2. 発表標題 金属材料に対する偏光理論を用いた欠陥と背景反射の識別
3. 学会等名 日本非破壊検査協会赤外線サーモグラフィ部門合同ミニシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木 総司, 小笠原 永久
2. 発表標題 表面粗さを考慮した偏光放射率と偏光反射率の定量的評価
3. 学会等名 日本実験力学会2017年度年次講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小笠原 永久, 小林 千恵, 山田 浩之,
2. 発表標題 背景反射赤外線除去のための画像処理
3. 学会等名 日本実験力学会2017年度年次講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鈴木 総司, 小笠原 永久
2. 発表標題 偏光子を用いたきずと背景反射の定量的分離
3. 学会等名 日本非破壊検査協会平成29年度秋季講演大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小笠原 永久, 鈴木 総司, 斉藤 順哉, 松田 裕行
2. 発表標題 水溶性黒体フィルムによる赤外線サーモグラフィ法
3. 学会等名 日本非破壊検査協会平成29年度秋季講演大会
4. 発表年 2017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	山田 浩之 (Yamada Hiroyuki) (80582907)	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)・システム工学群・准教 授 (82723)	