

令和元年6月17日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06141

研究課題名(和文)宇宙機用放射率可変素子の性能向上に関する研究

研究課題名(英文) Study of Variable Emission Device for Spacecraft

研究代表者

太刀川 純孝 (TACHIKAWA, Sumitaka)

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：90470070

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)：

本研究の目的は、小惑星探査機「はやぶさ」に搭載された放射率可変素子(SRD: Smart Radiation Device)に比べ、高性能な材料を見つけ出すことである。SRDは、温度変化に伴い金属-絶縁体転移を示すペロブスカイト型Mn酸化物(ABO<sub>3</sub>)であり、それに伴い赤外放射率が変化する。AサイトおよびBサイトの同時置換を行い、放射特性の改良を試みた。

本研究の結果、一部の温度域で上回る性能を備える材料を発見できたが、全温度領域で凌駕する材料は残念ながら見つけることができなかった。しかし、本研究を通して、多くの知見を得ることができたとともに、今後の探索方針を確認することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SRDは、軽量で電力および可動部が不要な次世代宇宙機のための熱制御材料である。宇宙機の温度を自律的にコントロールできることから、将来の月面探査機や惑星探査機に使用することによって、ヒータ電力、および宇宙機の重量とコストの削減、さらに、宇宙機の信頼性向上や熱設計適応範囲の増大が期待できる。また、宇宙用熱制御材料としてではなく、地上用途、例えば、伝導および対流だけを考えた建築材料、エンジンルーム内の熱制御などに対し、新しい熱・エネルギー材料として直ちに実用化できるものであり、その波及効果は極めて大きいと言える。

研究成果の概要(英文)：

The purpose of this research is to find out new materials with higher performance for Smart Radiation Device (SRD) mounted on the asteroid probe HAYABUSA. The SRD is a thermal control material and changes its infrared emissivity depending its own temperatures. It is made of perovskite-type Manganese oxides (ABO<sub>3</sub>) that shows metal-insulator transition with increasing temperature. In order to improve its radiation properties, we have studied A- and B-site substitution in the perovskite structure.

As a result of this research, we could find out new materials with higher performance in a limited temperature range. But, unfortunately, we couldn't find out new materials with higher performance in a wide temperature range. However, from this research, we were able to extract plenty of valuable informations and confirm that we are on the right track of this research. We will make further efforts to seek the best material.

研究分野：熱物性

キーワード：強相関電子系 機能性材料 熱物性 放射率 セラミックス 宇宙機 ラジエータ

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

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは、これまで宇宙機の熱設計を行うとともに、熱設計に必要な各種材料の熱物性の測定、およびその測定技術の開発、また新しい熱制御材料の開発を行ってきた。このような背景のもと、超巨大磁気抵抗を示すペロブスカイト型 Mn 酸化物の電気抵抗が、強磁性転移温度を境に低温側で金属、高温側で絶縁体的であることに着目した。つまり、この現象に伴い、赤外放射率の温度特性が、転移温度付近を境に低温側で小さく、高温側で大きくなることを予想し、それをカロリメータ法により確認した。この放射率の温度依存性は、宇宙機用ラジエータに求められる特性であり、この温度依存性を利用した放射率可変素子を SRD (Smart Radiation Device) と命名し、開発を進めた。当初、焼結法により作製したバルク材を基本に、組成をチューニングし、性能の向上を図り、宇宙用熱制御材料として提供できるまでに至った。その結果、SRD は、2003 年に打ち上げられた小惑星探査機「はやぶさ」の送信機のラジエータとして試験的に搭載され、長期にわたる軌道上での動作、およびヒータ電力削減効果が実証された。

SRD と類似の技術としては、従来から使用されているサーマルルーバが挙げられる。これは、放射率の小さい金属製の薄板 (ベーン) をラジエータの表面に並べ、温度が高い時にはバイメタルを使って機械的にベーンを開け、ラジエータから宇宙空間への排熱を促し、温度が低くなると、ベーンを閉じてラジエータと宇宙空間とのふく射結合を弱めることによってラジエータの温度低下を妨げるものである。しかし、サーマルルーバは、重量が大きい大型の衛星にしか使用できず、また、ベーンの可動部があるため信頼性に欠けるという欠点がある。一方、SRD は、軽量で、可動部が無い、小型衛星にも適用可能な信頼性の高い熱制御デバイスであり。また、サーマルルーバ同様、電力を使わずに宇宙機の温度をコントロールできることから、将来の惑星探査機のラジエータとして期待される。SRD を使用することにより、ヒータ電力および熱サブシステム重量の削減、宇宙機の信頼性向上、熱設計の自由度の増加が可能である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、宇宙機熱設計の自由度、および信頼性を向上させることが可能な SRD の性能向上である。つまり、「はやぶさ」に搭載した SRD を上回る性能を備える材料を探し出すことである。

SRD は、自身の温度により放射率を自律的に変化させ、宇宙機の温度を自動的に一定化させることにより、低温時に必要となるヒータ電力を削減することが可能な新しい熱制御素子である。惑星探査のように、惑星周回軌道上と地球近傍での外部熱入力が大きく異なる場合、特にその効果が大きく、今後の惑星探査に必須の技術であると考えている。

### 3. 研究の方法

従来から宇宙機に使用されている一般的なラジエータ材 (OSR) と、「はやぶさ」で使用した放射率可変素子 (SRD) の半球放射率の温度依存性を図 1 に示す。OSR はガラス製で温度によらず高い放射率 (0.8 程度) を示しているのに対し、SRD は高温で高い放射率 (0.63)、低温で低い放射率 (0.22) を示している。このように、放射率を自身の温度で変化させることが重要であり、そのため、金属 - 絶縁体転移を備える材料、すなわちペロブスカイト型 Mn 酸化物を基本に探索する。その際、系統的に試料を作成し、その電気特性・熱光学特性を測定することによって、適用可能な材料か否かを判断する。具体的には、(Re, Ae) MnO<sub>3</sub> (Re: 希土類, Ae: アルカリ土類) において、以下の手法を実施した。

- (1) A サイト (Re, Ae) の組み合わせ・組成比を制御することで、キャリア濃度およびバンド幅を変化させる。
- (2) B サイト (Mn) への不純物 (Ga, Ti) 置換により、キャリア濃度を変化させる。
- (3) アニール処理による酸素量の調整により、キャリア濃度を変化させる。

以上の方法により、図 1 に見られる低温側と高温側の赤外放射率の変化量 ( $\Delta\varepsilon$ )、さらに、転移温度付近における赤外放射率の変化率 ( $\Delta\varepsilon/\Delta T$ ) の増加を目指す。

例えば、B サイト置換 (Mn サイトの Ga 置換) によって、高温側の電気抵抗率の上昇が低温側の電気抵抗率の上昇より大きいことがわかっている。これにより、SRD の性能向上 ( $\Delta\varepsilon$  の増加) が期待できる。しかし、B サイト置換だけの場合、 $\Delta\varepsilon$  は増加するが、同時に転移温度

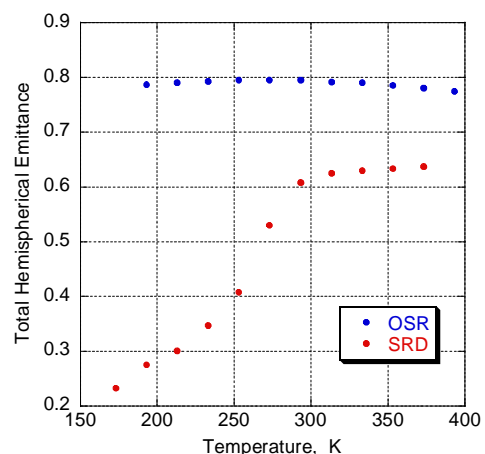


図 1 従来のラジエータ材 (OSR) と放射率可変素子 (SRD) の半球放射率の温度依存性

も低くなってしまいうため、A サイト置換によって金属的にする必要がある。

#### 4. 研究成果

金属相の低温側放射率の低下と絶縁体相の高温側放射率の増加によって放射率変化量 ( $\Delta\varepsilon$ ) を増加させることを狙い、「A サイト置換で金属相を安定化、B サイト置換で絶縁相を安定化」する方法と「A サイト置換で金属相を安定化、還元アニールで絶縁相を安定化」する方法を実施した。図 2 にこれまでに作成した代表的な組成を示す。

試料作成後、電気伝導度測定、熱光学特性測定、硬 X 線放射光の光電子分光による電子構造測定等を行った。電気・熱光学特性については、「はやぶさ」搭載の SRD 材料に近いが、部分的にはこれを越える材料を見出すことはできているが、全温度領域で十分に上回る性能には至っていない。電子構造測定からは、B サイト置換による電気伝導度変化が強磁性転移温度によって整理できること、すなわち強磁性秩序を通じて電気伝導度が制御されていることを示唆する結果が得られた。

また、従来、イオン半径が大きく、結晶材料を得ることが困難であると考えられていた  $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_3$  結晶の作成にも取り組んだ。これは、イオン半径が大きな Ba を使用することによって、バンド幅が大きく、さらに少ないキャリア濃度領域の試料を作成できることから、SRD の性能向上を期待した試みである。比較的良質の単結晶試料を得ることができ、現在、本試料の熱光学特性測定を行っている。

さらに、A サイト秩序型二重ペロブスカイトの作成を行った。従来問題となっていた試料の脆さを改善するために、ホットプレス法によって焼結密度を上げ、試料の加工強度の向上を試みた。その結果、作成条件を最適化することによって従来約 50% だった焼結密度を約 80% 程度まで向上させることに成功した。今後、この系統の試料の探索も行っていく予定である。

現在まで、「はやぶさ」搭載の SRD 材料をわずかに上回る熱光学特性を持つ材料が 2013 ~ 2015 年度の研究期間に見つかっているが、今回の研究期間 (2016 ~ 2018) では部分的には上回る材料を見出したものの大幅な改善には至らなかった。

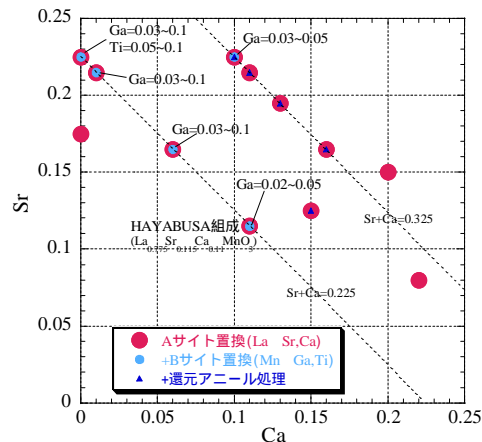


図 2 探索した代表的な組成 ( $\text{La}_{1-x-y}\text{Sr}_x\text{Ca}_y\text{Mn}_{1-z}\text{Ga}_z\text{O}_{3-\delta}$ )

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 0 件)

[学会発表](計 10 件)

H. Iio, M. Okawa, A. Yasui, E. Ikenaga, K. Takagi, H. Kuwahara, S. Tachikawa, and T. Saitoh, Mn 2p core-level electronic structure of a new material for a spacecraft radiator  $\text{La}_{0.775}\text{Sr}_{0.225-x}\text{Ca}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Ga}_y\text{O}_3$  studied by hard x-ray photoemission spectroscopy, The 1<sup>st</sup> International Workshop on Momentum Microscopy and Spectroscopy for Materials Science, 2019

大江日南子、中島優世、大川万里生、野田正亮、菱田智子、大林和重、保井晃、池永英司、桑原英樹、齋藤智彦、日本物理学会第 74 回年次大会、2019

飯尾大貴、大川万里生、保井晃、池永英司、高木康多、桑原英樹、太刀川純孝、齋藤智彦、硬 X 線光電子分光による  $\text{La}_{0.775}\text{Sr}_{0.225-x}\text{Ca}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Ga}_y\text{O}_3$  の電子構造研究、日本物理学会 2018 年秋季大会、2018

中谷俊介、飯尾大貴、大川万里生、太刀川純孝、桑原英樹、保井晃、高木康多、池永英司、齋藤智彦、宇宙機用ラジエータに応用するペロブスカイト型 Mn 酸化物の硬 X 線光電子分光による価電子帯電子構造研究、日本物理学会 2018 年秋季大会、2018

松田大樹、太刀川純孝、村上良明、小川将、桑原英樹、大川万里生、齋藤智彦、Perovskite 型 Mn 酸化物を用いた宇宙機用放射率可変素子 (SRD) の開発、第 79 回応用物理学会秋季学術講演会、2018

H. Matsuda, S. Tachikawa, H. Kuwahara, M. Okawa, and T. Saitoh, A variable emissivity radiator for spacecraft by making use of a metal-insulator transition material, The 34<sup>th</sup> International Japan-Korea Seminar on Ceramics, 2017

飯尾大貴、大川万里生、保井晃、池永英司、高木康多、桑原英樹、太刀川純孝、齋藤智彦、 $\text{La}_{0.775}\text{Sr}_{0.225-x}\text{Ca}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Ga}_y\text{O}_3$  の硬 X 線光電子分光スペクトル、2017 年度量子ビームサイエンスフェスタ・第 35 回 PF シンポジウム、2017

飯尾大貴、大川万里生、保井晃、池永英司、桑原英樹、太刀川純孝、齋藤智彦、硬 X 線光電子分光法による  $\text{La}_{0.775}\text{Sr}_{0.225-x}\text{Ca}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Ga}_y\text{O}_3$  の電子構造、第 31 回日本放射光学会・放射光科学合同シンポジウム、2018

M. Hata, S. Tachikawa, H. Kuwahara, and T. Saitoh, Improving Radiation Properties

of Smart Radiation Device by Reductive Annealing, The 11<sup>th</sup> Thermophysical Properties Conference, 2016

畑真尋、太刀川純孝、小田諒祐、野田正亮、桑原英樹、大川万里生、齋藤智彦、Mn 酸化物を用いた宇宙機用放射率可変素子 (SRD) の研究 - 還元アニールによる電気抵抗率・帯磁率・放射率の変化 -、第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、2016

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：齋藤智彦

ローマ字氏名：SAITO, Tomohiko

所属研究機関名：東京理科大学

部局名：理学部第一部 応用物理学科

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：30311129

研究分担者氏名：桑原英樹

ローマ字氏名：KUWAHARA, Hideki

所属研究機関名：上智大学

部局名：理工学部

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：90306986

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：畑真尋

ローマ字氏名：HATA, Mahiro

研究協力者氏名：松田大樹

ローマ字氏名：HATSUDA, Hiroki

研究協力者氏名：飯尾大貴

ローマ字氏名：IIO, Daiki

研究協力者氏名：中谷俊介

ローマ字氏名：NAKATANI, Shunsuke

研究協力者氏名：野田正亮

ローマ字氏名：NODA, Masaaki

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。