

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 （共通）

科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 6 年 6 月 1 2 日現在

機関番号：8 2 6 4 5

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：2 1 H 0 1 5 3 6

研究課題名（和文）熱スイッチング機能を有する宇宙機用放熱材料のふく射特性向上に関する研究

研究課題名（英文）Research of spacecraft's radiator material with thermal switching for improvement of thermal radiation characteristics

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・宇宙科学研究所・研究領域サプリーダ

研究者番号：9 0 4 7 0 0 7 0

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000 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）を超える高性能な熱光学特性を備える材料を探索することである。「はやぶさ」に搭載されたSRDの組成を中心に、組成比を微調整し、放射特性を測定した。その結果、わずかであるが、熱光学特性が向上している組成を見つけることができた。本研究を通して、様々な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。引き続き、探索を行い、高性能化を目指したい。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SRDは、電力や可動部を必要とせず、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のラジエータとして使用することにより、ヒータ電力の低減、探査機の重量およびコストの削減、さらに、探査機の信頼性向上などが期待できる次世代の熱制御デバイスである。また、宇宙用熱制御材料としてだけでなく、伝導および対流だけを考えてきた建築材料、自動車や航空機などの動力機構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考える。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to find out new materials with higher thermo-optical properties for Smart Radiation Device (SRD). As a result of this research, we succeeded in finding a new composition with a little higher performance. From this research, we were able to extract plenty of valuable information about these materials and confirm that we are on the right track of this research. We will make further efforts to seek the best materials for SRD.

研究分野：熱物性、熱工学

キーワード：宇宙機 ラジエータ 熱制御材料 熱光学特性 放射率 強相関電子 金属-絶縁体相転移

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

申請者は、これまでに宇宙機の熱設計を行うとともに、熱設計に必要な各種熱制御材料の熱物性の測定、および、その測定技術の研究、また次世代の熱制御材料の開発に関する研究を行ってきた。これらの研究背景の上に、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的、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、それをカロリリーメータ法により確認した。この放射率の温度依存性は、次世代宇宙機用のラジエータに求められる特性であり、この温度特性を利用した放射率可変素子（以下、SRD: Smart Radiation Device と呼ぶ）を開発した。当初、焼結法により作成したバルク材を基本に、組成をチューニングすることによって、機能・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」の送信機用電源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動作が実証されている。

SRD と類似の技術としては、従来からあるサーマルルーバが挙げられるが、以下のような欠点を持つ。

- ・アクチュエータにバイメタルを使用しているため、温度に対する応答性が悪い。
- ・デバイスが大きく、質量も大きいので、大型の宇宙機にしか適用できない。
- ・可動機構があるため、長期信頼性が低い。また、小惑星等へのタッチダウン時に舞う微粒子によって、可動機構が故障する可能性があり、そのようなミッションには適用できない。
- ・低放射率を得るため、金属を利用していることから、 α/ε が高く、太陽光入射面には適用できない。

一方、SRD は物性により放射率が変化することから、温度に対する応答性が高く、また、小型軽量であることから、小型の宇宙機にも適用可能である。さらに、可動機構が無いため、長期信頼性が高く、小惑星等にタッチダウンするようなミッションにも適用可能である。加えて、SRD 表面に誘電体多層膜を付加することにより、 α/ε を小さくする研究も行われており、太陽光入射面に使用することも可能となっている。

サーマルルーバ以外には、エレクトロクロミックを使用した放射率可変材料も研究されているが、これらは電力を必要とするのに対し、SRD は電力を必要としない点が特徴である。

SRD は、可動部が無く、電力も必要とせず、自律的に自身の温度を一定に保つようにコントロールできることから、将来の宇宙機のラジエータ材料として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、熱設計の自由度を高めることが可能である。

2. 研究の目的

本研究では、宇宙機のヒータ電力をさらに削減することを目的とした SRD の開発を行う。つまり、小惑星探査機「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が本研究の目的である。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と言える。

3. 研究の方法

図 1 に、従来から使用されているラジエータ材料 (OSR: Optical Solar Reflector) と小惑星探査機「はやぶさ」に搭載した放射率可変素子 (SRD) の全半球放射率の温度依存性を示す。OSR が温度によらず高い放射率 (0.8 弱) を示しているのに対し、SRD は高温で高放射率 (0.63)、低温で低放射率 (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することが SRD に使用する材料に求められる性質であり、本研究では金属—絶縁体相転移を備えるペロブスカイト型 Mn 酸化物 ($\text{La}_{1-x-y}\text{Sr}_x\text{Ca}_y\text{MnO}_3$) を基本とし、組成比を変えて探索する。その際、系統的に試料を作成し、その電気特性、磁化特性、熱光学特性を測定することによって、評価を行う。具体的には、組成比を制御することによって、キャリア濃度およびバンド幅を制御する。これにより、図 1 における低温時 (173K) と高温時 (373K) における赤外放射率の放射率比 ($\varepsilon_{\text{ratio}}$) および放射率差 ($\Delta \varepsilon$) の増加を目指す。測定に供するサンプルは FZ (Floating Zone) 法を用いて作成した単結晶試料であり、性能を評価するための電気特性および磁化特性は PPMS を用いて測定、反射スペクトルの温度依存性は FTIR を用いて測定し、そこから垂直放射率を算出した。

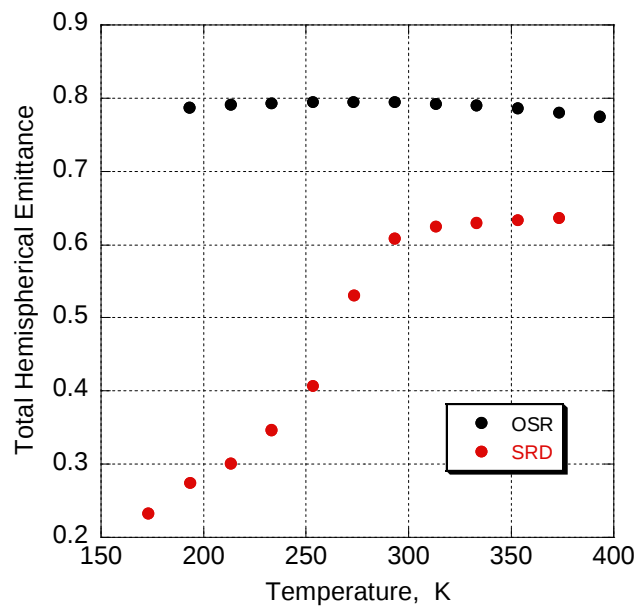


図1 従来のラジエータ材（OSR）と放射率可変素子（SRD）の全半球放射率の温度依存性（カロリーメータ法で測定）

4．研究成果

2021年度は $0.205 \leq x+y \leq 0.23$ の範囲で5種類の単結晶サンプル、2022年度は $0.19 \leq x+y \leq 0.25$ の範囲で4種類の単結晶サンプル、2023年度は $0.225 \leq x+y \leq 0.325$ の範囲で4種類の単結晶サンプルを作成した（計13種類）。表1に垂直放射率の算出結果と転移温度を示す。（SR21-37は、小惑星探査機「はやぶさ」に搭載されたSRDと同じ組成のサンプル）なお、 $x+y$ が同じ数値のサンプルは、 x と y の比率を変更している。

表1 作成したサンプルの垂直放射率と転移温度

Sample	$x+y$	ε_{Nlow}	ε_{Nhigh}	ε_{Nratio}	$\Delta \varepsilon_N$	T_c
SR21-37	0.225	0.161	0.633	3.932	0.472	278
#231	0.225	0.171	0.623	3.643	0.452	274
#223	0.225	0.131	0.593	4.527	0.462	293
#221	0.225	0.141	0.586	4.156	0.445	316
#222	0.190	0.162	0.635	3.920	0.473	275
#214	0.205	0.173	0.640	3.699	0.467	275
#213	0.210	0.154	0.634	4.117	0.480	275
#212	0.215	0.172	0.638	3.709	0.466	275
#211	0.220	0.164	0.630	3.841	0.466	275
#215	0.230	0.169	0.627	3.710	0.458	275
#233	0.250	0.142	0.554	3.901	0.412	307
#224	0.250	0.120	0.551	4.592	0.431	323
#232	0.250	0.103	0.540	5.243	0.437	335
#234	0.325	0.102	0.456	4.471	0.354	350

表1より、 $x+y=0.210$ となる#213において、「はやぶさ」組成のSR21-37と比べ、転移温度および高温での放射率を維持したまま、低温での放射率を低下させることができた。その結果、放射率比（ ε_{ratio} ）と放射率差（ $\Delta \varepsilon$ ）ともに「はやぶさ」組成のサンプルより高い値を持つサンプルを見つけることができた。また、「はやぶさ」組成周辺の放射特性に関する様々な知見を得ることができ、今後の探索方針を確認することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 森谷龍之介、太刀川純孝、桑原秀樹、齋藤智彦
2. 発表標題 誘電体多層膜による放射率可変素子（SRD）の性能向上
3. 学会等名 第67回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森谷龍之介、太刀川純孝、桑原秀樹、齋藤智彦
2. 発表標題 誘電体多層膜を付加した放射率可変素子（SRD）のふく射特性（2） ー金属的なSRDを基板とした設計ー
3. 学会等名 第44回日本熱物性シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤京介、太刀川純孝、齋藤智彦、星野遼、遠藤楓、桑原秀樹
2. 発表標題 組成制御した放射率可変素子（SRD）の電気抵抗率の評価
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 星野遼、太刀川純孝、桑原英樹、齋藤智彦
2. 発表標題 微少な組成変化に対する放射率可変素子（SRD）の熱放射特性評価
3. 学会等名 第43回日本熱物性シンポジウム
4. 発表年 2022年

1．発表者名 澤田晏伯、平井雄大、芝田悟朗、浜田典昭、齋藤智彦
2．発表標題 タイトバインディングモデルによるCE型反強磁性 $\text{La}_{2-2x}\text{Sr}_{1+2x}\text{Mn}_{2\text{O}7}$ ($x=0.50$) のバンド構造計算
3．学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4．発表年 2022年

1．発表者名 田平百佳、太刀川純孝、齋藤智彦、芝田悟朗
2．発表標題 第一原理計算による $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ の転移温度の推算
3．学会等名 第42回日本熱物性シンポジウム
4．発表年 2021年

1．発表者名 澤田晏伯、平井雄大、宮林麟太郎、芝田悟朗、白崎巧、堀場弘司、桑原英樹、齋藤智彦
2．発表標題 異方的移動積分を考慮したタイトバインディングモデルによるCE型反強磁性 $\text{La}_{2-2x}\text{Sr}_{1+2x}\text{Mn}_{2\text{O}7}$ のバンド構造計算と角度分解光電子分光スペクトルとの比較
3．学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4．発表年 2021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	齋藤 智彦	東京理科大学・先進工学部物理工学科・教授	
	(Saitoh Tomohiko)		
	(30311129)	(32660)	

6．研究組織（つづき）

	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	桑原 英樹 (Kuwahara Hideki) (90306986)	上智大学・理工学部・教授 (32621)	

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