

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13699

研究課題名（和文）近接場界面における金属－絶縁体相転移現象の解明と熱スイッチへの展開

研究課題名（英文）Metal-Insulator Phase Transition at the Near-Field Interface and its Application to Thermal Switching

研究代表者

上野 藍（Ueno, Ai）

名古屋大学・工学研究科・講師

研究者番号：50647211

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究期間における研究の成果を以下にまとめる。
新たな宇宙用熱制御デバイスとして、金属絶縁体相転移物質(LSMO, LPMO, VO₂)に着目し、その放射率可変機能、熱伝導率可変機能、蓄熱機能の3つの機能を有する多機能熱制御デバイスの提案を行った。バルク試料の製作方法を確立し、各種熱物性値を独自の熱物性計測装置で明らかにした。今後の展開として、熱スイッチの性能向上のため、近接場効果を導入することも検討しているが、デバイス作製上、VVO₂の薄膜化などを検討する必要がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究における結果は、単独の熱物性変化のみに着目していた従来の転移材料の応用事例に対し、3つの熱物性変化を効率的に利用するものであり、社会実装として新規熱マネジメント技術の創出となり、波及効果は大きい。さらに、相転移と近接場効果という新しい熱輸送現象を融合させて外部装置や電力不要が一切不要でかつ、必要なときには熱を排熱し、不要なときには保温するシート型熱スイッチの実現は前例がなく、独創性が極めて高い。また、基礎学理の深化として未解明であった遷移金属酸化物の転移点付近の熱物性変化に寄与する機構を明らかにするものであり、学術的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：A novel thermal control device focused on metal-insulator phase transition materials (LSMO, LPMO, VO₂, VVO₂) for space applications was proposed. The proposed device has three functions: variable emissivity, variable thermal conductivity, and thermal storage as a multifunctional thermal control device. The methods for fabricating bulk materials were established and various thermophysical properties of prepared samples were clarified by using our original thermophysical property measurement system. In order to improve the performance of the thermal switch, we are also considering the introduction of the near field effect, although it is necessary to consider the fabrication process of thin film of VVO₂ for the device application.

研究分野：伝熱工学，MEMS微細加工

キーワード：金属－絶縁体相転移 蓄熱 比熱 熱伝導率 全半球放射率 熱スイッチ

1. 研究開始当初の背景

近年、IoT(Internet of Things)などの普及に伴いハード技術としてエレクトロニクス分野における高機能化および電子機器からの排熱量の増加は必須である。一方、省エネルギーの観点からも、蓄熱機能などを代表とする必要なときには排熱を抑制できるようなスマート熱制御が要求されており、熱の流れを ON/OFF 制御できる熱スイッチは重要な役割を果たす。しかし、既存のアクティブな熱スイッチは、メカニカルな機構が必要であり、駆動部が大きく微小領域への適用が難しく、また省電力、信頼性の観点からも限界がある[1-2]。

そこで、本研究で提案するデバイスでは、遷移金属酸化物の金属-絶縁体相転移 (MIT : metal-insulator transition) 時の物性変化およびサブミクロン領域で発現する近接場効果を用いることで、パッシブとアクティブ制御の双方の課題を克服する。また、本研究で着目する遷移金属酸化物の代表例である Mn 酸化物は、磁場誘起構造相転移や電荷整列相転移など多様な物性を示すことが知られており、実験的・理論的研究が積極的に進められている。しかし、その多彩な物性変化を利用した応用に関しては研究が少ないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では遷移金属酸化物の金属-絶縁体相転移と近接場効果を融合させたシート型高機能熱スイッチの実現を最終目標とする。特に申請期間中には、近接場効果と金属-絶縁体転移による物性変化のメカニズムの本質を理解し、それらを高度に設計、制御することで既存の熱スイッチとは一線を画す機能的熱スイッチを構築することを目指す。

3. 研究の方法

本申請期間中では、本研究の核心となる近接場効果および金属-絶縁体転移の物理現象の本質的な理解のため、材料選定・作製、物性評価装置の構築および測定を一貫してインハウスで取り組む。以下、各項目の詳細を述べる。

【項目①：遷移金属酸化物の材料選定およびバルク材の作製】本研究では、宇宙用の熱制御デバイスとして知られている $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ (LSMO)をはじめ、相転移材料として $\text{La}_{0.8}\text{Pb}_{0.2}\text{MnO}_3$ (LPMO), VO_2 (VO2), $\text{V}_{0.98}\text{W}_{0.02}\text{O}_2$ (VWO2)を選定し、バルク材の作製手法として単純焼結法または放電プラズマ焼結法(SPS 法)を用いて密度が 90%程度の緻密なバルク材の作製手法を確立する。

【項目②：遷移金属酸化物の相転移過渡現象における基本特性の解明】では、界面熱輸送に寄与する相転移付近の各種熱物性変化を計測し、未解明であった相転移過渡現象を明らかにする。具体的な測定手法としては、DSC 法により比熱、周期加熱法により熱拡散率および熱伝導率、そして、カロリメトリー法から放射率を研究室所有の装置を利用して測定する。

これら一連の研究により、材料の熱物性、実験による実証からデバイス設計への指針を得ることが可能となり、ニーズとシーズをつなぐ包括的な研究の基礎として、実用化につながる継続発展的な研究につなげる。

4. 研究成果

本研究では、LSMO, LPMO, VO₂, VWO₂ のような相転移材料の蓄熱特性、熱伝導率変化、エミッタンス変化を利用した多機能熱制御デバイスを提案する。図1に提案する宇宙機用 MIT 材料を用いた多機能熱制御デバイスの概念を示す。高温の場合、相転移により、放射率と熱伝導率は温度の上昇とともに増加し、放熱が促進され、相転移中に熱が吸収・蓄積される。一方、低温の場合は、温度の低下とともに放射率と熱伝導率が低下し、放熱が抑制され、さらに相転移の際に熱が放出されることで保温機能を発現する。このように、熱物性を温度によって変化させることで、デバイスの温度をパッシブに制御することができる。

熱制御デバイスの開発には、蓄熱特性、熱伝導率変化、放射率変化などの正確な測定が必要である。そこで、本研究では、当研究室で MIT 材料を作製し、相転移温度、蓄熱量、比熱の温度依存性、熱伝導率、放射率変化を検討した。さらに、測定した熱物性データを基に、熱制御デバイスとしての応用の可能性を検討した。本研究では、MIT 材料として La_{0.8}Sr_{0.2}MnO₃ (LSMO)、La_{0.8}Pb_{0.2}MnO₃ (LPMO)、VO₂ (VO₂)、V_{0.98}W_{0.02}O₂ (VWO₂) を選定した。LSMO は放射率可変素子として宇宙利用実績があり、LPMO は転移温度付近で大きな放射率変化を示すことが知られている。また、VO₂ は蓄熱量が多いことが期待されるが、遷移温度が高いことも知られている。そこで、転移温度を下げるために、タングステンをドーブした VWO₂ も作製し、その熱物性を評価した。

これまでに、LSMO と LPMO 材料について、約 90% 程度の緻密なバルク材の作製に成功しており、各熱物性値の温度依存性を明らかにした。また、VO₂ については、相転移温度が 68°C と熱制御デバイスとして応用するには高すぎるため、SPS (Spark-Plasma Sintering) 焼結法を採用し、一般的には焼結が困難とされるタングステン(W)をドーブすることで転移温度が 17°C、密度が 90% を超える VWO₂ バルク材の作製に成功した。さらに、それらの比熱特性および熱伝導率特性を測定することに成功した (図 2)。本研究の成果は、放射率可変素子のみならず、新規の蓄熱デバイスやヒートスイッチとしても期待され、有益な研究成果として熱工学分野でトップレベルの雑誌 *International Journal of Heat and Mass Transfer* に掲載された。

今後の展開として、熱スイッチの性能向上のため、近接場効果を導入することも検討しているが、デバイス作製上、VWO₂ の薄膜化などの課題がある。

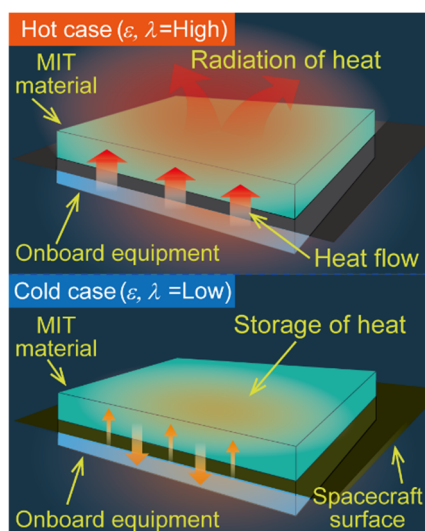


図1 本研究で提案する多機能熱制御デバイス

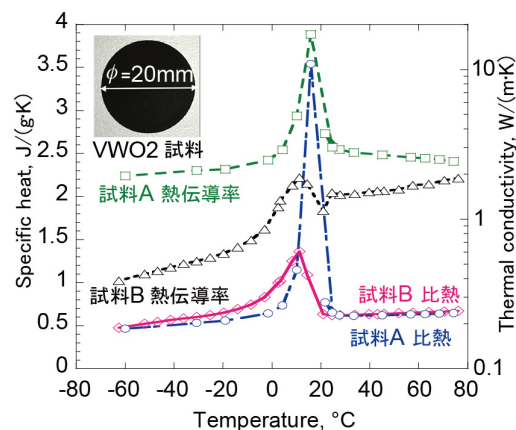


図2 VWO₂ バルク材と熱物性 (比熱・熱伝導率)

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 0件）

1. 著者名 Ueno Ai, Kim Jihoon, Nagano Hosei	4. 巻 166
2. 論文標題 Thermophysical Properties of Metal-Insulator Transition Materials During Phase Transition for Thermal Control Devices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 120631 ~ 120631
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120631	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1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Ai Ueno, Jihoon Kim, Hosei Nagano
2. 発表標題 Thermal Behavior of Metal-InsulationTransition Materials during Phase Transition
3. 学会等名 PRTEC2019（国際学会）
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----

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