

ハイスループット熱画像計測による外場駆動熱制御材料探索の革新

研究代表者

内田 健一 物質・材料研究機構 グループリーダー

共同研究者

井口 亮 物質・材料研究機構 主任研究員



1. 研究の背景と達成目標

磁気熱量効果に代表される外場駆動型熱量効果は、次世代の冷凍技術として期待される現象である。外場の印加/除去に伴うエントロピーの変化に応じて、材料が加熱もしくは冷却される。現在主流のガス圧縮・熱交換に基づく冷却方式と比べて、機械動作部品を減らして省電力化が図れること、地球環境に悪影響を及ぼす温暖化ガスを含む冷媒を用いる必要がないこと、動作音が小さいことから注目を集めている。このような魅力的な特性を示す外場駆動型熱量効果であるが、その材料探索には様々なハードルが存在する。第一に、外場駆動型熱量効果による温度制御能を評価するためには、試料の秩序変数や熱特性の温度依存性を測定する必要があり、多大な時間と労力を要することが挙げられる。加えて、従来予想と異なる温度変化を示す材料が近年多く報告されており、熱力学的な関係式に基づく間接的な評価・推定ではなく、直接的に断熱温度変化を測定することが求められている。これまでも温度変化の直接計測は報告されていたが、接触式の熱測定が主流であり、手間がかかる上に定量性や測定感度の問題があった。本研究では、熱イメージング技術とフーリエ解析を組み合わせた動的サーモグラフィ法を外場駆動型熱量効果の評価法に適用することで、上記の課題解決を目指した。サーモグラフィは非接触による直接温度測定法であることから信頼性・再現性が高く、画像解析による線形応答成分の抽出による高感度測定、およびイメージングによる多試料の同時計測も可能であることから、外場駆動型熱量効果のハイスループット計測を実現できる。また、温度変化の空間分布・時間応答観察による動作解析も可能であり、デバイス実装に向けた熱伝達や素子欠陥の評価を簡便に行うことができる。

以上の背景に基づき、本研究では次に示す3つの目標を設定した。

- ① 磁気熱量効果の動的サーモグラフィ計測法を拡張し、電気熱量効果・弾性熱量効果のイメージング計測技術（温度分解能 $<1\text{mK}$ 、空間分解能 $<15\mu\text{m}$ ）を確立する。
- ② 多数の試料（試料数 >4 ）における外場駆動型熱量効果を同時計測し、ハイスループット材料・原理探索を $270\sim 350\text{K}$ の温度域で実現すると共に、動作周波数 $0.1\sim 15\text{Hz}$ で熱輸送特性を評価する。
- ③ 誘電体において発現する新奇熱制御現象の発現機構・物質依存性を解明する（2019年5月追加課題）。

2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

・動的サーモグラフィ法に基づく外場駆動型熱量効果のハイスループット計測・評価基盤の確立

磁気熱量効果に加えて、電気・弾性熱量効果の熱イメージング計測技術およびその解析手法を確立した。本成果により、外場駆動型熱量効果に関する物理・材料研究が加速され、様々な分野・スケールで省エネルギー化に資する熱マネジメント技術への貢献が期待される。

・外場駆動型の新奇熱制御現象の観測

誘電体において発現する非自明な熱応答を観測し、その発現機構の解明や物質依存性の検証を進めた（特許出願予定であるため詳細は割愛する）。本成果は、新たな熱変換・冷却原理を提供するものであり、次世代熱制御技術の創出に向けた第一歩となる発見である。

3. 研究成果

電気熱量効果の熱イメージング計測技術の確立に向けて、高電圧源との同期・誘電分極評価を組み込んだ計測システムを構築し、実際に誘電体材料における断熱温度変化を計測してその機能を実証した。さらに、取得熱画像のフーリエ解析を非線形応答まで行い、外場印加に伴う損失発熱を断熱温度変化と同時に評価することに成功した(図1、特許出願済)。本手法を用いれば、電気熱量効果の材料探索のみならず、熱制御デバイスの最適動作条件の決定も行うことができる。

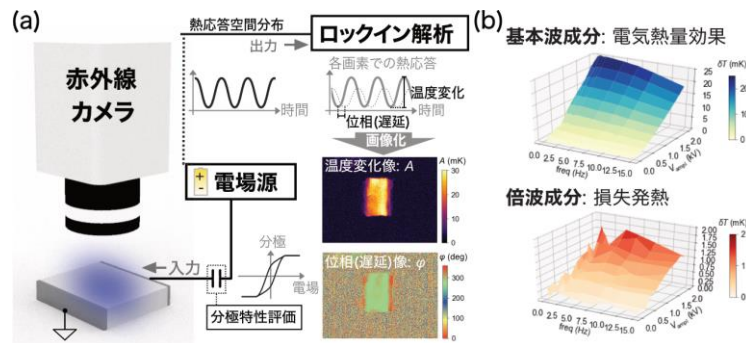


図1 (a) 電気熱量材料の評価システム。(b) 断熱温度変化および損失熱の駆動周波数、駆動電場依存性の系統的評価の例(論文準備中)。

初期に計測技術を確立した磁気熱量効果に関しては、材料のハイスループット探索のモデルケースとして、異なる磁気相転移特性を示す4種のホイスラー合金を用いて断熱温度変化を様々な温度で同時に評価した(図2、論文掲載受理)。通常とは逆符号の温度変化を示す逆磁気熱量効果のイメージング計測に初めて成功し、一次相転移材料における逆磁気熱量効果を継続的駆動条件下で利用するためには、磁気・電子・格子エントロピー変化の競合や熱ヒステリシスの影響を考慮した複雑な材料・駆動条件の最適化が必要であることを示した。

弾性熱量効果については、動的サーモグラフィシステムと組み合わせるための専用の自動引張試験機を導入し、これを用いて変位・圧力制御による温度変化の観測を実現した。すでに広範な物質に対して熱制御特性評価を行える状況にあり、引き続き断熱温度変化の系統的な評価を進めていく予定である。

以上の成果に加え、マイルストーンとして設定した熱計測の適用温度領域の拡張にも取り組んだ。動的サーモグラフィシステムに温度可変機構と真空チャンバーを組み込み、ターゲットとしていた高温領域における測定プロセス・解析法を確立した。低温下での計測や薄膜素子の評価に拡張するための新方式の検討も行った。

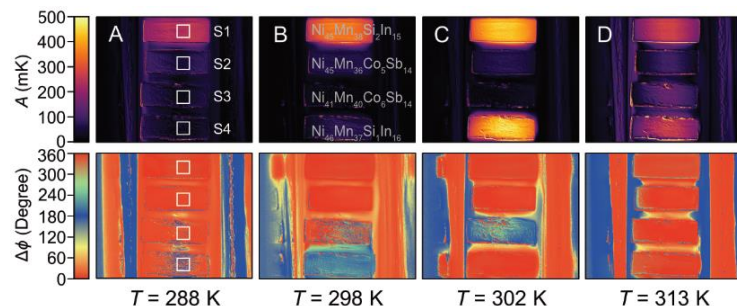


図2 ホイスラー合金における磁気熱量効果のハイスループット評価。

4. 今後の展開

本研究で確立した外場駆動型熱量効果の計測・解析手法は、オートメーション化や最先端の画像解析技術との融合により、計測スループット・感度・汎用性をさらに向上させることができる。近年、様々な分野において熱マネジメント技術の重要性が高まっており、今後ますます外場駆動型熱量効果に関する基礎・応用研究が活発化していくことが予想される。本成果が契機となり、各種熱制御現象の研究開発が加速していくことを期待する。

5. 発表実績

- [1] R. Modak and K. Uchida, Appl. Phys. Lett. **116**, 032403 (2020).
- [2] T. Yamazaki, R. Iguchi, T. Ohkubo, H. Nagano, and K. Uchida, Phys. Rev. B **101**, 020415(R) (2020).
- [3] R. Modak, R. Iguchi, H. Sepehri-Amin, A. Miura, and K. Uchida, AIP Advances (accepted).
- [4] 井口亮、福田大介、狩野旬、寺西貴志、内田健一 「ロックインサーモグラフィ法による電気熱量効果計測」 第67回応用物理学会春季学術講演会(東京), 2020年3月14日(他 国内学会発表2件)
- [5] 特願 2019-136550 「電気熱量材料の特性評価装置、その方法、及びそのプログラム」 井口亮 他3名