	研究代表者	物質・材料研究機構・磁性・スピントロニクス材料研究拠点・グループリーダー 内田 健一（うちだ けんいち） 研究者番号:50633541
	研究課題情報	課題番号：22H04965 キーワード：強誘電体、スピントロニクス、熱電変換、熱輸送 研究期間：2022年度～2026年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

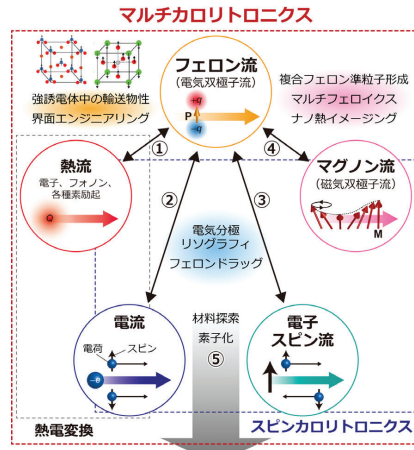
●研究の全体像

輸送現象に関する物性科学は、電気・熱・磁気などの“流れ”を駆動する新たな自由度や輸送キャリアを導入することによって発展してきた。例えば、次世代電子技術の有力候補であるスピントロニクス分野においては、電流とスピン流（磁気の流れ）の相互作用が主な研究対象であった状況に、局在磁気モーメントの集団運動であるマグノンという新たな輸送キャリアや、温度勾配という新たな流れの駆動力が導入されることによって爆発的に研究の幅が広がり、新現象・新原理・新機能が次々と見出された。スピントロニクスと熱輸送・熱電物性の融合によりスピントロニクスと呼ばれる分野が誕生し、わずか数年で国際的に研究される学際領域へと成長を遂げたことは記憶に新しい。

本研究では、スピントロニクス分野でこれまで用いられてこなかった強誘電体を舞台として、新たな輸送現象の科学を開拓する。強誘電体における自発電気分極の集団運動「フェロン」をエネルギーキャリア、フェロン流（電気双極子流）の熱力学的一般化力である電場勾配を駆動力として導入し、その輸送現象や電子・マグノンとの相互作用を解明する。これにより、スピントロニクスと強誘電体物理の異分野融合領域「マルチカルロリトニクス」を創出する（図1）。

- 本研究で明らかにする学術的「問い」は
- フェロンはどのような熱輸送・熱電変換特性を示すのか？
 - フェロンと電流・スピン流は相互に変換できるのか？
 - フェロンと他準粒子の複合化によってどのような物理現象・機能が現れるのか？

の3点である。物性物理学、特にスピントロニクス分野の歴史が示すように、新たな輸送キャリアや流れの駆動力の導入は、新たな物理現象の発見・解明や機能性の創出に繋がる。フェロンが電流・熱流・スピン流と相互作用すること、及び電場勾配で各種フェロン輸送現象を駆動できることを示せば、拡張された輸送行列における各非対角成分に対応した多くの輸送現象の発見、延いては革新的なエネルギー変換・制御技術の創出に繋がることが期待される（図2）。



フェロンを取り込んだ輸送物性科学・機能性の開拓
革新的エネルギー輸送・変換・制御技術の創出

図1 本研究の概念図（番号は次頁の項目に対応）

$$\text{流れ} \begin{pmatrix} \text{電流} \\ \text{スピン流} \\ \text{熱流} \\ \text{フェロン流} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{j}_c \\ \mathbf{j}_s \\ \mathbf{j}_q \\ \mathbf{j}_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\nabla V \\ -\nabla H \\ -\nabla T \\ -\nabla E \end{pmatrix}$$

スピントロニクス
スピントロニクスによる拡張 (2007-)
電位勾配 (電場)
有効磁場勾配 (外部磁場 / スピン流)
温度勾配
有効電場勾配 (外部電場 / フェロン蓄積)

駆動力

理論予測 G. E. W. Bauer, R. Iguchi, and K. Uchida, Phys. Rev. Lett. 126, 187603 (2021).

マルチカルロリトニクスによる拡張

図2 本研究で開拓する輸送現象（線形応答領域の場合）

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

フェロンが誘起する輸送物性の本質を解き明かし、新現象の観測・解明と機能性の実証を相補的に進めることで、サイエンスとエンジニアリングの両面において本研究終了後も継続的に発展し続ける学術体系の礎を築く。本研究では、以下の5課題に取り組む。

- ① 強誘電キャパシタ構造におけるフェロン熱輸送・熱電変換の実験的観測
- ② 強誘電体/金属複合構造におけるフェロン-電流相互作用の観測と解明
- ③ 強誘電体/強磁性体複合構造におけるフェロン-スピン流相互作用の観測と解明
- ④ フェロン-マグノン相互作用や複合フェロン準粒子の観測と解明
- ⑤ フェロン輸送・変換現象の高性能化に向けた物質探索及び素子構造最適化

研究分担者のBauer教授（東北大学）と研究代表者らはこれまでに、(A) 強誘電体中の熱伝導率にはフェロンによる寄与が含まれていること、(B) 伝導電子/ホールが存在しない強誘電体においてもフェロン輸送により熱電変換現象が発現することを理論的に示しているが、これらは未だ実証されていない（図3）[1-3]。既に基礎理論を構築している(A), (B)を実験的に観測することが、本研究のスタートアップ課題である（項目①）。その後、強誘電体と金属・強磁性体との複合構造へと対象を拡張し、フェロン自体が誘起する輸送物性のみならずフェロンと電子スピン・マグノン物性の交差相関に関する基礎原理・技術を確立し、スピントロニクスをマルチカルロリトニクスに昇華させる（項目②-④）。研究代表者らが有する熱計測技術を基盤として、原理・機能の開拓のみならずフェロン輸送・変換現象の高性能化に向けた物質探索や素子構造の最適化にも取り組む（図4, 項目⑤）。これらの研究を通じて、スピントロニクスの枠組みを超えた世界的研究ネットワークを構築に貢献したい。

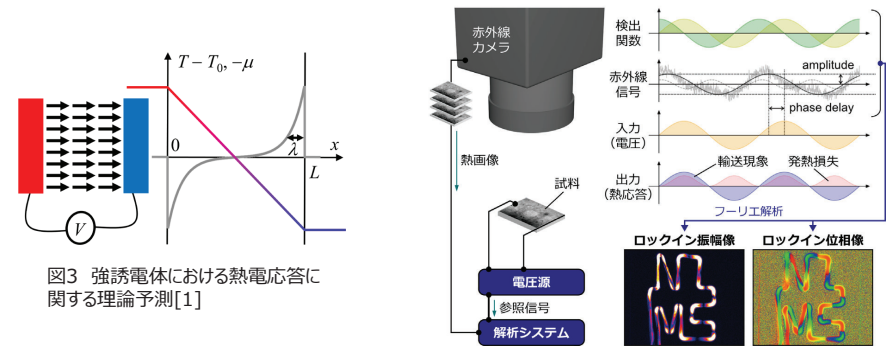


図3 強誘電体における熱電応答に関する理論予測[1]

図4 本研究で用いる熱計測技術の例：ロックインサーモグラフィ法

研究体制

研究代表者：内田健一（物質・材料研究機構）
研究分担者：Gerrit E. W. Bauer（東北大学）、関真一郎（東京大学）、小塚裕介（物質・材料研究機構）、井口亮（物質・材料研究機構）

参考業績

- [1] G. E. W. Bauer, R. Iguchi, and K. Uchida, Phys. Rev. Lett. **126**, 187603 (2021).
- [2] G. E. W. Bauer, P. Tang, R. Iguchi, and K. Uchida, J. Magn. Magn. Mater. **541**, 168468 (2022).
- [3] P. Tang, R. Iguchi, K. Uchida, and G. E. W. Bauer, Phys. Rev. Lett. **128**, 047601 (2022).