



Title	Current-Induced Responses in Magnetic Toroidal Metals
Author(s)	宮本, 大輝
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/105541
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 (宮本大輝)	
論文題名	Current-Induced Responses in Magnetic Toroidal Metals (電流誘起応答による磁気トロイダル秩序状態の解明)
論文内容の要旨 空間反転および時間反転対称性の破れは、交差相関応答をはじめとする様々な現象を誘起することから、これまで盛んに研究が行われてきた。このような対称性の破れに伴う物理現象を体系的に理解・記述する上で、多極子は有効なツールとして機能しており、とりわけ複雑な結晶構造や磁気構造をもつ系に対して巨視的な対称性を議論できる「クラスター多極子」の導入は、多様な物質の秩序状態を再検討する重要な契機となっている。これら多極子はそれ自体が系の秩序変数として機能するため、その幾何学的配列は物性を特徴付ける。例えば、磁気双極子が強的に配列する強磁性体は、ドメインやヒステリシスといったフェロイクス特性を示す一方、反強的に配列する系では、スピン液体に代表される特異な量子磁性状態が発現する。本研究では、空間・時間反転対称性を同時に破る磁気トロイダル(MT)双極子に着目し、これが強的に配列するUNi₄Bと反強的に配列するHoAgGeの2種の金属において、電流誘起応答を用いて各秩序状態を解明することを目的とした。 UNi₄Bは、MT双極子が活性な金属として早くから注目され、MT双極子に起因する電流誘起磁化(CIM)が実験的に報告された。しかし、従来の単純なMT秩序では、観測されたCIMを完全には説明できず、実験と理論の間に矛盾が生じていた。この問題を解決するべく、最近、磁気構造への電気四極子自由度の関与を考慮した「トライフォース秩序」が理論的に提案された。この新秩序は、MT双極子を含む複数の多極子が結合した秩序相だが、予想される自発磁化が依然として未観測であり、複数秩序が共存する系のドメイン構造やその応答も未解明であった。そこで本研究では、(1)走査型SQUID顕微鏡による局所磁化観察、(2)非相反伝導測定によるMTドメイン応答観測という2つの手法から、この秩序状態の検証を試みた。(1)では、転移温度以下で有限の自発磁化を観測し、そのドメイン構造の可視化に成功した。また、MT双極子由来の電流誘起磁化を観測できる配置での測定を行い、電流誘起磁化の空間分布を可視化した。さらに、対称性に基づいて、これら2つのドメイン構造を重ね合わせることで、時間反転に対してEvenな極性ベクトル成分のドメインも同定・可視化した。(2)では、MT双極子の向きに符号が依存する非相反伝導測定を用い、試料内の場所ごとで異なる符号の信号を得た。これはMTドメインの空間分布を示唆し、(1)の結果と整合する。また、磁場印加に対して信号が偶関数的に減少する振る舞いも観測した。これは磁場に対して奇関数で振る舞う通常の非相反伝導と本質的に異なる性質である。さらに強磁場下では非相反伝導が消失しており、MT構造が破壊されたことと考えられる。以上の(1)(2)から、UNi₄BがMT構造を有するトライフォース秩序を示すとともに、さらには複数秩序が共存してドメインを形成する金属であることを明らかにした。 次にMT双極子が反強的に配列する系としてHoAgGeに着目した。本物質は、2段階の磁気構造転移を示し、中間相ではHo³⁺の2/3が秩序化する部分秩序状態、低温相では全スピンの秩序化した状態をとる。先行研究では、中間相で強MT秩序、低温相で反強MT秩序の実現が提案されていた。しかしながら、本研究の非線形横伝導測定の結果、両相で得られた応答は既存モデルの予想に反し、強MT相とされた中間相で信号が消失し、逆に反強MT相とされた低温相で信号が発現するという矛盾が生じた。これを受け、クラスター多極子理論に基づきMT構造を再検討した結果、先行研究のモデルは磁気構造の対称性と理論的に不整合であり、正しくは中間相が反強MT、低温相がフェリMT構造であることを明らかにした。この再考したモデルは本実験結果を定性的に説明しており、実験・理論の両面からHoAgGeの秩序状態を正しく同定することに成功した。 以上、本研究では、3つの電流誘起応答を用いて、UNi₄BおよびHoAgGeの秩序状態を解明した。UNi₄Bでは磁気・MTドメインの可視化を行い、さらにそれらにより3種類目の強秩序のドメインも同定した。HoAgGeでは非線形横伝導と理論的再考により反強・フェリMT配列を決定した。本成果は、電流誘起応答が多極子の幾何学的配列や空間分布を記述・検証する上で有効な手法であることを示すものである。このように、実験的検証と理論的再考を通じた本知見は、対称性の破れに起因する現象の理解を深め、多極子を主役とした新たな物性物理学の展開に大きく寄与する。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 （宮本大輝）			
	（職）	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教 授	関 山 明
	副 査	教 授	藤 本 聡
	副 査	教 授	石 渡 晋 太 郎
	副 査	准教授	下 澤 雅 明

論文審査の結果の要旨

本学位論文は、電流誘起磁化、非相反伝導、非線形横伝導といった電流誘起応答をプローブに用いて、金属磁性体における磁気トロイダル（MT）双極子秩序とその空間分布を実験的に解明することを目的としている。

近年の物性物理学においては、電子の電荷・軌道・スピン自由度が織りなす多彩な電子状態や、それらに起因する交差相関応答を体系的に理解・記述する枠組みとして、MT双極子を含む多極子の概念が整備され、大きな注目を集めている。特に、複雑な結晶構造や磁気構造を有する系においても、対称性の破れを秩序パラメータとして議論可能なクラスター多極子の導入により、従来は理解が困難であった秩序状態の再検討が進められてきた。このように理論的な進展が目覚ましい一方で、金属系における多極子ドメインの空間分布の直接観察や、多極子の幾何学的配列が電気輸送現象に与える影響については依然として未解明な点が多く、特定の物質においては実験結果と既存理論との間に無視できない不整合も指摘されるなど、まだまだ実験的検証が不足している。このような背景のもと、宮本氏は、空間反転対称性および時間反転対称性を同時に破るMT双極子に着目し、それが強的に配列するUNi₄Bと、反強的に配列するHoAgGeという、磁気構造の異なる二種類の金属磁性体を対象として研究を行った。

UNi₄Bにおける研究では、近年理論的に提案された、MT秩序、電気秩序、および自発磁化が結合したトライフォース秩序の存在を実験的に検証した。その結果、局所磁気分布を高感度に評価可能な走査型SQUID顕微鏡を用いることで、従来のバルク測定では未観測であった微小な自発磁化とそのドメイン構造の可視化に成功した。さらに、MT双極子に由来する電流誘起磁化からMTドメイン分布を特定すると共に、多極子間の結合関係に基づいて、直接観察が困難な電気秩序ドメインを間接的に導出することに成功した。また、本研究で得られた非相反伝導の空間分布がSQUID顕微鏡により観測されたドメイン構造と整合すること、ならびに外部磁場印加によってこれらの応答が抑制されることを捉えたことは、UNi₄Bがトライフォース秩序を示す金属であることを実験的に支持する重要な成果である。これらの結果は、金属における多極子秩序およびドメイン構造の物理的理解を大きく深化させるものとして高く評価できる。

HoAgGeにおける研究では、非線形横伝導測定を通じて、既存の磁気構造モデルの妥当性を検証した。具体的には、本論文で得られた実験結果が、先行研究に基づくモデル予測と矛盾していることを明らかにし、この不整合を契機として、クラスター多極子理論に基づく磁気構造の対称性の再検討が行われた。その結果、中間相が反強MT構造、低温相がフェリMT構造であることが同定され、非線形横伝導の実験結果を定性的に説明することに成功した。この成果は、非線形横伝導が多極子の幾何学的配列に対して極めて高い感度を有するプローブであることを実証すると同時に、HoAgGeにおける秩序状態を実験・理論の両面から正しく同定した点で重要である。

以上のように、本学位論文は、三種類の電流誘起応答を相補的に用いることで、金属磁性体におけるMT秩序を代表とする多極子秩序相とそのドメイン分布を実空間において記述・検証するための確固たる実験的手法を確立している。本研究で得られた知見は、対称性の破れに起因する交差相関現象の微視的理解を大きく前進させるものであり、物性物理学における学術的価値は極めて高い。よって、本審査委員会では本論文が博士（理学）の学位を授与するにふさわしいものと認める。