The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Nonlinear Electrical Transport Phenomena Derived from Magnetic Toroidal Moment in Antiferromagnetic Metal UNi4B
Author(s)	多田, 勝哉
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/88108
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

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　多　田　勝　哉　）	
論文題名	Nonlinear Electrical Transport Phenomena Derived from Magnetic Toroidal Moment in Antiferromagnetic Metal UNi_4B （反強磁性金属UNi_4Bにおける磁気トロイダルモーメントに由来した非線型電気輸送現象）

論文内容の要旨

結晶中の電子には電荷，軌道，スピンといった自由度が存在し，これらの自由度が織りなす多彩な電子状態により様々な物性が現れる．これらの多種多様な物性に対し，これまでは各自由度ごとの個別な問題として扱われてきた．ところが最近，電子の自由度を表す完全基底が整備され，従来の多極子の概念を多軌道・多原子に拡げた拡張多極子という概念を導入することで結晶中の様々な電子状態や物性現象を統一的に理解しようとする試みがなされている．この拡張多極子を用いた従来の様々な秩序状態の再検討により，従来の観点では説明困難であった現象の自然な理解や，奇パリティ多極子に基づいた交差相関応答などの新奇物性現象の予見もできるようになってきた．しかしながら，目覚ましい理論的進展がみられるものの，交差相関物性の微視的な理解はまだ進んでいない．さらに実験的に，拡張多極子を直接観測する手法や交差相関応答を測定する手法は少なく，まだ十分な知見が得られる状況にはない．特に金属における拡張多極子の視点に立った交差相関応答の実験例はほとんどない．本研究対象のUNi_4Bは古くから知られた反強磁性金属だが，奇パリティ多極子である磁気トロイダルモーメントが活性な金属として再注目され，新展開を迎えている．実際UNi_4Bの反強磁性相において磁気トロイダルモーメントに由来すると考えられる電気磁気効果が生じることが理論，実験の両面から報告されている．本研究では，磁気トロイダルモーメントが活性な金属における交差相関応答の微視的理解を進めるため，そういった金属特有の現象と考えられる電流誘起Hall効果および非相反伝導に注目した．電流誘起Hall効果では，Hall電圧は印加電流の2乗に比例することが期待される．試料に周波数ωの交流電流j_{AC}を印加すると，Hall電圧は2倍周期の2ωで振動することが予想される．実験の結果，Néel温度T_N以下でj_{AC}^2に比例した明確な2ω成分を観測することに成功した．これに加え独立に，周波数ωの定電流を流しつつ，直流電流j_{DC}の大きさを変化させながらHall電圧のω成分を測定した結果，電流誘起Hall効果から期待されるj_{DC}に比例した結果を得た．これら独立した2つの測定から別々に見積もられるHall電圧の電流2乗の係数αの温度依存性は定量的によく一致することが明らかになった．また，αはT_N以下でのみ有限な値をとり，温度降下とともに絶対値が急激に増大することも明らかになった．さらに，αは先行研究の電流誘起磁化の温度依存性とスケールすることも明らかになった．これらの結果から，本研究により電流誘起Hall効果の観測に初めて成功し，その起源が磁気トロイダルモーメントであることを示すことができた．一方，強トロイダル絶縁体では強トロイダルドメインが存在し，そのドメインは電場と磁場で制御されることから，係数αは磁場中では電流と磁場の関数になると予想される．そこで磁場中で電流誘起Hall効果を測定すると，ゼロ磁場では現れない3ω成分を含め，全ての結果が強トロイダルドメインの存在を仮定した表式で再現できることが判明した．この結果は金属においても，強トロイダルドメインが存在し，電流と磁場で制御できる可能性を示唆している．さらに，c軸方向に電流を流し，縦電圧V_{cc}を測定することで非相反伝導の観測を試みた．その結果，V_{cc}の2ω成分がT_N以下でj_{AC}の2乗に比例し，V_{cc}のω成分がj_{DC}に比例するという非相反伝導で期待される結果が得られた．電流依存性の係数γをそれぞれ見積もると，両者の温度依存性は定量的によく一致することがわかった．さらに，γはT_N以下でのみ有限な値をとり，温度降下とともに絶対値が急激に増大する．加えて，電流を磁気トロイダルモーメントと平行に印加した場合にのみ非相反伝導が観測されることと，γと先行研究の電流誘起磁化の温度依存性がスケールすることから，本研究で観測した非相反伝導は磁気トロイダルモーメントに由来することが示唆される．

以上，本研究では磁気トロイダルモーメントに由来した応答を検出する手法を確立し，その結果UNi_4Bにおける強トロイダル金属特有の3つの現象の観測に成功した．特に，電流誘起Hall効果と非相反伝導という一見異なる現象が磁気トロイダルモーメントという観点から見通しよく整理できることを示したことは，今後の研究の展開において非常に重要である．また，本研究により，広く適用できる電気輸送測定に基づいた磁気トロイダルモーメントに関わる応答の検出手法を確立したことは，今後他の強トロイダル候補金属を調べる上でも有用である．そして得られた結果と理論の定性的・定量的な比較により，磁気トロイダルモーメントの活性な金属の交差相関応答，さらには拡張多極子に基づく新奇交差応答の微視的理解のさらなる進展に貢献できると考えられる．

様式７

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名	（　多　田　勝　哉　）	
論文審査担当者	（職）	氏　名
	主 査　教 授	井 澤　公 一
	副 査　教 授	藤 本　聡
	副 査　教 授	関 山　明

論文審査の結果の要旨

本学位論文は，反強磁性金属UNi_4Bを研究対象とし，強トロイダル金属特有の現象である非線型電気輸送現象を観測すること，さらにその結果から金属における磁気トロイダルモーメントに由来した応答を実験的に解明することを目的としている．近年，電子の自由度を表す完全基底が整備され，従来の多極子の概念を多軌道・多原子に拡げた拡張多極子という概念を導入することにより，結晶中の様々な電子状態や物性現象を統一的に理解しようとする試みがなされている．これにより，従来の観点では説明困難であった現象の自然な理解や，新たな交差相関応答などの新奇物性の予見もできるようになってきた．UNi_4Bは古くから反強磁性金属として知られてきたが，奇パリティ多極子である磁気トロイダルモーメントが強的に秩序化した金属とみなせることから，交差相関応答である電流誘起磁化の存在が理論的に指摘され，それが実験で確認されることとなった．これにより，これまでそのほとんどが絶縁体であった研究対象に金属が加わり，交差相関現象の研究が新たな展開を迎えることとなった．本学位論文では，強トロイダル金属特有の現象として，次の(1)電流誘起Hall効果，(2)電流及び磁場による強トロイダルドメイン制御，(3)非相反伝導の3つの現象の観測に成功した．

(1) 電流誘起Hall効果では，電流により誘起されるHall電圧が印加電流の2乗に比例することが期待される．多田氏は，独立した2つの実験によりそれを観測するのに成功しただけでなく，その比例係数が定量的に一致すること，さらには先行研究で報告されている電流誘起磁化とスケールすることを明らかにした．そして，これらの結果に基づき，電流誘起Hall効果が強トロイダルモーメント由来の現象であることを結論づけている．この成果は，この現象の微視的理解に重要な貢献となると期待される．

(2) 強トロイダル物質では，トロイダルドメインが存在すると考えられ，それらは電流と磁場を同時に印加することにより制御できると期待される．磁場中で電流誘起Hall効果の実験を行ったところ，ゼロ磁場では観測されなかった電流依存性を観測した．この磁場中での特異な電流依存性は，磁場と電流による強トロイダルドメインの変化を仮定した式で説明できることを明らかにした．このことは，金属においても強トロイダルドメインが存在し，それらを磁場と電流により制御できる可能性を示唆している．

(3) 磁気トロイダルモーメントに平行な方向に非相反伝導が現れることが期待される．多田氏は，磁気トロイダルモーメントに平行あるいは垂直に電流を流したときに電流方向に生じる電圧を詳細に調べた結果，非相反伝導で期待される非線型応答を観測することに成功し，しかもそれが磁気トロイダルモーメントに平行な電流の場合にのみ観測されることを明らかにした．さらに，得られた結果がトロイダルモーメントに由来する電流誘起磁化とスケールすることも見出し，磁気トロイダルモーメントに由来する非相反伝導の観測例を初めて示した．

以上のように，本学位論文により，これまで困難であった磁気トロイダルモーメントなどの拡張多極子に由来した応答を検出する手法を確立し，他の実験や理論結果と定性的・定量的に比較可能な結果を得ることが可能となった．これにより，磁気トロイダルモーメントの活性な金属の交差相関応答，さらには拡張多極子に基づく新奇交差応答の微視的理解のさらなる進展に貢献できると考えられる．これらの点から，審査委員会では，本論文の学術的価値が非常に高いことが全員一致で認められた．

以上の理由により，博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める．