

二国間交流事業 共同研究報告書

令和4年4月20日

独立行政法人日本学術振興会理事長 殿

[日本側代表者所属機関・部局]
東北大学・材料科学高等研究所
[職・氏名]
名誉教授・谷垣勝己
[課題番号]
JPJSBP 120205001

1. 事業名 相手国: スロベニア (振興会対応機関: MESS) との共同研究

2. 研究課題名

(和文) 遍歴反強磁性系物質における磁性と伝導の交換交差にもとづく新しい物性発現

(英文) New electronic states emergent via cross-coupling between magnetism and electrical conduction in itinerant antiferromagnetic systems

3. 共同研究実施期間 令和2年4月1日 ~ 令和4年3月31日 (2年 0ヶ月)

4. 相手国側代表者(所属機関名・職名・氏名【全て英文】)

Jozef Stefan Institute・Professor・Denis P. Arcon

5. 委託費総額(返還額を除く)

本事業により執行した委託費総額		3,800,000	円
内訳	1年度目執行経費	1,900,000	円
	2年度目執行経費	1,900,000	円
	3年度目執行経費		円

6. 共同研究実施期間を通じた参加者数(代表者を含む)

日本側参加者等	5名
相手国側参加者等	4名

* 参加者リスト(様式 B1(1))に表示される合計数を転記してください(途中で不参加となった方も含め、全ての期間で参加した通算の参加者数となります)。

7. 派遣・受入実績

	派遣		受入
	相手国	第三国	
1年度目	0	0	0
2年度目	0	0	0
3年度目			0

* 派遣・受入実績(様式 B1(3))に表示される合計数を転記してください。

派遣: 委託費を使用した日本側参加者等の相手国及び相手国以外への渡航実績(延べ人数)。

受入:相手国側参加者等の来日実績(延べ人数)。カッコ内は委託費で滞在費等を負担した内数。

8. 研究交流の概要・成果等

(1)研究交流概要(全期間を通じた研究交流の目的・実施状況)

概要

磁性は磁場に応答する物性で、電気伝導は電場に対応して観測される電子物性であるが、本二国間共同研究では、2つの物理量の間には存在する交換交差現象(電気磁気効果)により新しく発現する電子状態に関して、物性科学の進展をはかる事を趣旨とした。また同時に、双方の教育研究機関に所属する若手研究者および学生に対して、学際的ならびに国際的研究の重要性と意義を理解する機会を与える事を趣旨とした。

一般に、磁性は磁場に応答する物理量であり、電気伝導は電場に対する応答である。しかし、2つの物理量空間の間に交差結合(カップリング)が存在する場合には、電場で磁性を制御する、あるいは逆に磁場で電気伝導を制御する事が可能となる。このような効果は、1894年にP. Curieにより予言され、1959年にI. Dzyaloshinskiによって Cr_2O_3 に対して実際に観測された。現在では多くの物質に関して同様の効果が発見されて、電気磁気効果:Electromagnetic Effect: MEとして知られている。磁気と電荷という二つの物理量は、スピン軌道相互作用(ζ_{SO})を介して強く結びついている。電子状態の局在系リミットでは、電場(E)に対する線形応答である誘電率(ϵ)は磁場(B)に対する線形応答である磁化率(χ)と交差して結びつく。このような現象は、静的電気磁気効果(SME: Static Magnetoelectric)効果として知られる。一方このような状況に対して、電子が局在性極限から遍歴性極限に移行した際の動的ME効果(Kinetic ME: KME)に関しては、依然として十分には理解されていない。最近そのような一つの例として、反強磁性相互作用を基本とする遍歴反強磁性金属に注目が集まっている(P. Wadley et al., Science, 2016)。本研究では、遍歴系反強磁性物質において、空間反転対称性(Space Inversion Symmetry:SI)と時間反転対称性(Time Reversal Symmetry: TR)が同時に破れている($\text{PT}=\text{SI}\times\text{TR}$ が保存されている)を有する一連の物質群を対象として、新しい動的電気磁気効果(kinetic KME)を探求する事を目指した。その対象物質として、東北大学がJozef Stefan研究所と共同で新しく発見した BnMn_2Pn_2 (Pn:P, As, Sb, Bi)(PRB, 2019に発表)を中心に研究を進展させた。

研究に用いた遍歴反強磁性物質において、結果として、普遍的な新しい動的電気磁気効果の発現と理解を目指した研究を、二国間共同研究としてより高い研究レベルへと促進できた。本研究の結果は、2020-2021年度の二年間に2報の論文として、Phys. Rev. Bに掲載された[1,2]。また、得られた理解の詳細をまとめて、共同研究として投稿した[3]。若手の育成に関しては、小笠原氏(D3)が本研究により東北大学・大学理学研究科物理専攻より博士号を取得した。その際、二国間共同研究のスロベニア側共同研究代表者であるDenis Arcon教授が、海外指導教員として加わった。

本二国間共同研究は、厳しいコロナウイルスの影響下というこれまでに無い困難な状況で実施されたが、様々な工夫をする事で、共同研究を押し進める事ができ、今後の発展につなげる事ができた。

(2)学術的価値(本研究交流により得られた新たな知見や概念の展開等、学術的成果)

本二国間共同研究では、反強磁性遍歴電子系物質の遍歴領域において、空間反転対称性(Space Inversion Symmetry:SI)と時間反転対称性(Time Reversal Symmetry: TR)が同時に破れている(空間パリティ-時間対称性である $\text{PT}=\text{SI}\times\text{TR}$ が保存されている)物質群において、新奇な動的電気磁気効果(Kinetic Electromagnetic Effect: KME)を探求する目的をもって実施された。研究は、東北大学材料科学高等研究所で合成された BnMn_2Pn_2 (Pn: As, Sb, Bi)物質群を中心に研究が進められて、磁気輸送特性を系統的に研究する事により特

異なる巨大正負磁気抵抗 (GNMR) が電子系と正孔系バンドに存在する事が共同研究により見いだされた。この巨大磁気抵抗効果の現象を追求するために、高磁場下における電子輸送実験ならびに核磁気共鳴・電子スピン共鳴による詳細な物性研究を遂行し、巨大磁気抵抗効果の詳細な現象と機構を明白にする事ができた。実際の実験では、電気輸送測定技術は、東北大材料科学高等研究所ならびに強高磁場・極低温施設 (東北大金研) で遂行し、NMR 局所プローブ法 (NMR/ESR) による伝導電子物性は Jozef Stefan 研究所で実施されて、興味ある電子物性が発現する原因を解明する事ができた。

2 年間の共同研究結果として、 BnMn_2Pn_2 (Pn: As, Sb, Bi) で観測される正負の異なる巨大磁気抵抗効果が、Pn の有するスピン軌道相互作用 (ζ_{so}) の大きさに依存して系統的に変化する実験証拠が厳密な実験で確認された。この事は、 ζ_{so} を介して、与えられた磁場 (B) が電気伝導度 (σ) を大きく変化せる可能性を示唆する。この実験事実は、1985 年に Levitov 等によって理論的に予測された鏡面对称を有する導体における ME 効果の理論 (Sov. Phys. JETP, 1985) を強く彷彿させる実験結果である。この理論の発展として、空間非対称物質において電流誘起されるスピン分に関する Edelstein 理論 (Solid State Communications, 1990) があり、最近の実験としては、反強磁性金属 CuMnAs における電流誘起スピントルクの動的 ME 効果の観測 (P. Wadley et al., Science, 2016) が、世界的に大きな話題となっている。本研究で得られた遍歴反強磁性金属である BnMn_2Pn_2 物質系を対象とした研究結果は、磁場 (B) 誘起電気輸送という動的 ME (KME) の観点から重要な研究であり、新しい研究の芽となる可能性を秘める意義のある研究である。

さらに本共同研究グループは、現象の本質が軌道選択性物性を特徴として、アンダーソン局在という観点から理解できる事を指摘した。金属絶縁体転移であるアンダーソン局在は、物質中に存在する乱れに起因する電子量子干渉効果により発現する物性物理における基本的な物性の一つである。この現象は、真性半導体であるシリコンやゲルマニウムに、不純物を添加していく過程で見いだされた金属・絶縁体転移現象で、スケーリング解析によりその本質が理解されている。アンダーソン局在の重要性は、今日では広く認識されている。一方、電子相関が強い場合には、強い電子相関のためにバンドにギャップが開き絶縁化する場合があります。モット金属・絶縁体転移として現在では重要な物性として知られている。本研究では、遍歴反強磁性体である BaMn_2Pn_2 (Pn= As, Sb, Bi) が示す巨大磁気抵抗効果は磁場誘起の金属・絶縁体転移であり、その本質が 3d 軌道選択的強相関電子状態において、局在反強磁性秩序の乱れと遍歴電子の相互作用に起因する、遍歴反強磁性物質における初めてのアンダーソン局在の例である事を、様々な実験とスケーリング解析により検討した。スケーリング則により求められる臨界指数は、アンダーソン局在における時間反転対称性が破れた場合に対応するユニタリー・ユニバーサルクラスに属する現象である事を確認する事ができた。

(3) 相手国との交流 (両国の研究者が協力して学術交流することによって得られた成果)

二国間共同研究の期間 (2020-2021 年度) は、コロナウイルス (Covid-19) の世界的な感染が広まった為に、予定していた相互の訪問を全てキャンセルせざるを得ない状況となった。このような環境下ではあったが、高品質の BnMn_2Pn_2 (Pn: P, As, Sb, Bi) 物質群を東北大学側で合成して、これらの物質群に対して、高磁場下における電子輸送実験 (東北大学) ならびに核磁気共鳴・電子スピン共鳴 (Jozef Stefan 研究所) を実施する事により、詳細な物性研究を遂行し、巨大磁気抵抗効果の機構を明白にする事ができた。また、コンピュータや Wi-Fi 器具を購入する事で、相互の研究結果に対する議論やその他のコミュニケーションを促進して、二国間共同研究を遂行した。本研究の結果は、研究期間内に 2 報の論文として、Phys. Rev. B に掲載された。また、巨大磁気抵抗に対する軌道選択性を特徴とするアンダーソン局在詳細な解釈に関しては、議論をまとめて研究誌に投稿する事ができた。

共同研究の成果の一部は海外の American Physical Society March meeting で、発表した。残念ながら、国際会議は、コロナウイルスの影響のために、Virtual Meeting として開催された。また、日本でも、日本物理学会(2000年9月、2021年3月)で発表する事ができた。日本の会議もコロナウイルスの感染状況のために、on-lineのVirtual会議であった。

以上記載したように、二国間共同研究にもとづいて、遍歴反強磁性物質を対象とした新しい動的電気磁気効果の発現と理解に関する研究を、普遍的な観点から高い研究レベルへと促進する事ができた。

[Publications]

1. N. Janša, K.-K. Huynh, T. Ogasawara, M. Klanjšek, P. Jeglič, P. Carretta, K. Tanigaki, and D. Arčon, Electron correlations and charge segregation in layered manganese pnictide antiferromagnets showing anomalously large magnetoresistance, *Phys. Rev. B* 103, 064422 (2021).
2. Takuma Ogasawara, Kim-Khuong Huynh, Time Tahara, Takanori Kida, Masayuki Hagiwara, Denis Arčon, Motoi Kimata, Stephane Yu Matsushita, Kazumasa Nagata, and Katsumi Tanigaki, Large negative magnetoresistance in the antiferromagnet BaMn_2Bi_2 , *Phys. Rev. B* 103, 125108 (2021).
3. Takuma Ogasawara, Kim-Khuong Huynh, Stephane Yu Matsushita, Motoi Kimata, Time Tahara, Takanori Kida, Masayuki Hagiwara, Denis Arčon and Katsumi Tanigaki, \uparrow Magnetic-field induced Anderson localization in orbital selective antiferromagnet BaMn_2Bi_2 , (2022), submitted under being refereed.

[Meetings]

1. Kim-Khuong Huynh, Takuma Ogasawara, Stephane Yu Matsushita, Motoi Kimata, Time Tahara, Takanori Kida, Masayuki Hagiwara, Katsumi Tanigaki, The large magnetoresistance in BaMn_2Bi_2 antiferromagnets and its possible origins, 日本物理学会, 2020年秋季大会, 2020/9/10.
2. 小笠原拓磨, Khuong Kim Huynh, 松下ステファン悠, 谷垣勝己, BaMn_2Bi_2 における伝導率の磁場・温度に対するスケール, 日本物理学会第76回年次大会(2021年), 2021/3/13.
3. Katsumi Tanigaki, Yuki Matsuda, Satoshi Heguri, Electron-phonon and electron-electron interactions in electron doped aromatic carbon materials viewed from electrical transport, APS March Meeting, 2021/3/18.

(4)社会的貢献(社会の基盤となる文化の継承と発展、社会生活の質の改善、現代的諸問題の克服と解決に資する等の社会的貢献はどのようにあったか)

東北大学材料科学高等研究所は物質創製技術が優れている。一方、スロベニア Jozef Stefan 研究所の有する磁気共鳴実験技術は世界有数である。この二つの特徴を国際共同研究として融合して実施する事より、このような研究は、遍歴極限の電気磁気効果に関して、基礎科学を発展させることができた。このような研究は、新しいエネルギー変換の観点から社会に資する事ができる。また教育面においては、学生を含めて若い研究者に、相互の国の研究者と一連托生して研究を進める中で、国際性を身に付けて将来活躍する経験の場を与える事ができたと考えている。

(5)若手研究者養成への貢献(若手研究者養成への取組、成果)

東北大学 AIMR 側からは、小笠原(博士課程後期学生)が本二国間共同研究に携わる機会を得た。本研究内容で、小笠原氏は、東北大学理学研究科物理専攻から博士号を得る事ができた。また、その際に、共同研究相手国の Denis Arcon 教授が、海外研究アドバイザーとして助言を与える事ができた。

(6)将来発展可能性(本事業を実施したことにより、今後どのような発展の可能性が認められるか)

遍歴反強磁性金属を対象とした遍歴極限における電気磁気効果による発現する現象とその詳細な理解は、今後の物性物理分野の重要な課題の一つである。本二国間共同研究による研究成果は、その発展に貢献するものである。また、巨大磁気抵抗効果の原因の一つとして得られた、磁場誘起による軌道選択性アンダーソン局在効果の発見は、アンダーソン局在物理における新しい現象の発見となった。

(7)その他(上記(2)～(6)以外に得られた成果があれば記載してください)

例:大学間協定の締結、他事業への展開、受賞など

該当なし。