

スピン・電荷・光結合系の新機能開拓
Systematic investigation of optical and
electronic features of spin-charge-photon coupled systems



五神 真 (Gonokami Makoto)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究の概要

スピンと電荷が強く結合した系に着目し、磁性と光学応答の相関に起因する特異な機能の発現を引き出すことを目的として、物質設計、光機能の増強、外場による物質相の切り替えなどの観点から、新しいデバイスの原理を探る研究をメンバーの密接な連携の元で理論実験両面から進めた。新しい現象の予言と検証、物質開拓、分光技術開拓が進められた。

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：強相関電子系、非線形光学効果、異常ホール効果、磁気光学効果

1. 研究開始当初の背景・動機

科研費中核的拠点(COE)形成プログラム「スピン-電荷-光結合系の相制御」(H8-H14)で物性科学と光科学を横断する領域で集中的に展開した研究の成果を踏まえ、強相関電子系とその制御の学理の深化と応用展開の道筋をつけることを狙いとしました。

2. 研究の目的

物質開発、先端分光・物性計測、理論を互いに連携させ、強相関電子系の新しい機能を開拓する。テーマは(1)光誘起相制御と強相関エレクトロニクス(2)スピン・電荷・光結合系の物質設計と機能(3)分子性物質における新機能開拓(4)量子場の理論によるスピン・電荷・光結合系の新機能設計(5)強相関電子材料の光制御機能の開拓。

3. 研究の方法

COE プログラムによる実験設備共用体制を維持活用し研究を進めた。また研究室間のバリアなくアイデアを常時共有し、5項目を密接に連携させた。本研究費において、高額の設定導入は行わなかった。

4. 研究の主な成果

光誘起相制御と強相関エレクトロニクス(宮野健次郎)：光誘起相転移などの特異物性のデバイス応用を念頭に、薄膜試料作製技術の開拓を進めた。薄膜では基板との共有結合により、構造変化を伴う相転移が

阻害され、外場に対する巨大応答を引き出すことが困難であった。そこで、特定の表面对称性を持った基板を用い、薄膜中で構造相転移を許容できる事を発見した。この原理に基づく試料において永続的光誘起絶縁体・金属転移(図1)や新しいタイプのCMR(図2)を見出す事に成功した。この手法は、直ぐに他の薄膜研究者に採用され、薄膜作製法のスタンダードになった。

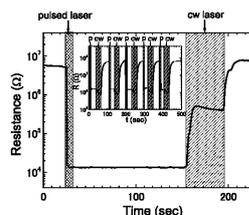


図1：
永続的かつ可逆的な
全光スイッチング
(光誘起絶縁体・金属転移)。

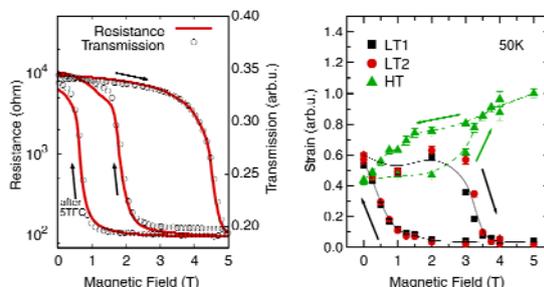


図2: 薄膜試料で初めて観測された磁場誘起構造転移(右パネル: X線構造解析)とこれに伴う光透過率・電気伝導度の巨大応答(左パネル)。新しいタイプのCMR。

量子場の理論によるスピン・電荷・光-結合系の新機能設計 (永長直人): スピン流の物理を現象に即して理論的に開拓した。熱の発生を本質的には伴わないスピン流が波動現象特有の幾何学的ベリー位相により駆動されることを発見した。スピンと電場、光の結合をターゲットとして (1) 電場によるスピン流生成、つまりスピホール効果を絶縁体に拡張した。(2) ベリー位相により光の経路が曲げられる効果—光のホール効果などを予言し、ナノ光学にベリー位相という新しい観点を導入した。(3) 励起子のスピホール効果の理論を、五神グループとの議論の下に発展させ、 Cu_2O についてその観測条件を決定した。(4) モット絶縁体におけるスピン流誘起電気分極という新しい機構を提唱し、マルチフェロイック物質の基本的機構を確立した。

スピン・電荷・光-結合系の物質設計と機能 (十倉好紀): 結晶が極性を持つフェリ磁性体 GaFeO_3 や人工的に極性を持たせた 3 色超格子強磁性体において、非自明な方向二色性である光学的電気磁気効果や巨大な非線形カー回転効果を発見した。また、 TbMnO_3 においては、サイクロイド型磁気構造においてジャロシンスキー守谷相互作用の逆効果を通じて分極が生じた、磁性誘起強誘電性を発見した。これらにより、スピンの幾何学配置による空間相関の誘電特性への寄与を明らかにし、それらがトロイダルモーメントやスピカイラリティといった量で特徴付けられることを示した。

分子性物質における新機能開拓 (鹿野田一司): (1) 三角格子モット絶縁体のスピンの量子液体状態にあることを発見した。このスピン液体がゼロ又は極めて小さな電荷ギャップを持つ特異な絶縁体であることを見いだした。さらに、スピン液体を加圧することにより発現する超伝導が、異方的な電子対機構によるものであることを明らかにした。(2) 精密に制御された圧力下で有機伝導体の電気抵抗を測定することにより、2次元モット転移が有限温度に臨界終点を持ち、その臨界性が非従来型のユニバーサリティークラスに属することを見出した。(3) 一連の有機物質系の中性-イオン性転移を核四重極共鳴で調べ、量子相転移近傍にお

いて電荷移動と格子変調が結合した量子臨界揺らぎを観測することに成功した。

強相関電子材料の光制御機能の開拓 (五神真): 多体の電子相関によって電荷や分極の自由度と磁性が強く結合する例として、磁性半導体に注目し、その磁性の超高速ダイナミクスや光による磁性の制御の研究を進めた。中赤外領域での時間分解分光法と時間分解磁気光学分光法を組み合わせ、磁性半導体 GaMnAs において磁化とバンドギャップ内アクセプター準位による中赤外領域の吸収が呼応することを突き止め、強磁性発現が磁気ポーラロンを媒介として発現している可能性を見いだした。また、テラヘルツ領域の高感度エリプソメトリー法を開拓し、非接触ホール効果測定などへの応用を拓いた。さらに、強磁性半導体に光パルス照射すると、磁化に起因するテラヘルツが高効率に発生することを発見した。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

メンバーの連携協力により、強相関系におけるスピンと電荷の結合に起因する多くの新奇な現象の予言と検証、マルチフェロイクスと呼ばれる新分野の創成、分子系での新しいスピン状態の発見、構造相転移を許容できる薄膜形成、テラヘルツ領域エリプソメトリー法などの分光計測手法の開拓など世界に先駆けた成果が多数得られた。

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者には下線)

- Iwase, K. Miyagawa, S. Fujiyama, **K. Kanoda**, S. Horiuchi, and Y. Tokura, J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 073701-1-4, (2007).
- N. Takubo, Y. Ogimoto, M. Nakamura, H. Tamaru, M. Izumi, and **K. Miyano**, Phys. Rev. Lett. **95**, 017404-1-4 (2005).
- Y. Uozu, Y. Wakabayashi, Y. Ogimoto, N. Takubo, H. Tamaru, N. Nagaosa, and **K. Miyano**, Phys. Rev. Lett. **97**, 037202-1-4 (2006).
- Y. Kurosaki, Y. Shimizu, K. Miyagawa, **K. Kanoda**, and G. Saito, Phys. Rev. Lett. **95**, 177001-1-5 (2005).
- J.B.Héroux, Y.Ino, **M. Kuwata-Gonokami**, Y. Hashimoto and S. Katsumoto, Appl. Phys. Lett. **88**, 221110-1-3 (2006).
- E. Kojima, J. B. Héroux, R. Shimano, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, Y. Iye and **M. Kuwata-Gonokami**, Phys. Rev. B **76**, 195323-1-11 (2007).