

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400322

研究課題名(和文)幾何学的構造をもつ量子ドット系によるスピン電荷制御の理論

研究課題名(英文)Theory of Spin and Charge Distributions Controlled by Quantum Dot Systems with Geometric Structure

研究代表者

古賀 幹人(KOGA, Mikito)

静岡大学・教育学部・教授

研究者番号：40324321

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：量子ドットと呼ばれる人工原子を三角形に組み合わせた量子ドット構造体について、近藤効果という量子力学の効果を利用したスピン電荷制御の可能性を調べた。これは磁場によって電気分極を制御するマルチフェロイクスという視点をナノテクノロジーに導入するという点で新しい試みである。

主な研究成果として、(1)2つの量子状態の競合を利用した誘起電気分極の反転制御、(2)磁場による誘起電気分極の振動パターンの制御、(3)三角形ループ形状に由来する分子軌道による近藤効果を利用した誘起電気分極の反転制御など、近藤効果に関する研究の新たな領域を開拓した。

研究成果の概要(英文)：We studied the controllability of spin and charge distributions through a quantum effect called "Kondo effect", using a triangular triple-quantum-dot system in which each quantum dot is regarded as an artificial atom. In the field of nanotechnology, we introduce a new aspect of multiferroics, for instance, a magnetic-field control of electric polarization.

The main results are as follows: (1) a sign reversal of emergent electric polarization through a competition between two quantum states; (2) field control of oscillation patterns of emergent electric polarization; (3) a sign reversal of emergent electric polarization through the Kondo effect due to molecular orbitals of the triangular loop.

The above results would contribute to opening up a new area of the Kondo physics.

研究分野：物性理論

キーワード：量子ドット 近藤効果 スピン電荷制御 誘起電気分極 マルチフェロイクス アハラノフ・ボーム効果

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、強磁性および強誘電性を合わせもつマルチフェロイック物質が相次いで発見されており、磁場で電気分極を誘起する巨視的なスピン電荷制御としての応用が期待されている。一方、ナノ物性分野において量子ドットと呼ばれる人工原子による微細構造形成技術が急速に発展している。このようなバルクの新物質発見と微細加工技術の進歩を俯瞰して新奇物性の可能性を理論的に探索する過程で、ナノ構造を利用したスピン電荷制御の新しい機構を思いつくに至った。

(2) 本研究による新規なスピン電荷制御法の鍵となる概念は近藤効果である。量子ドットを複合的に組み合わせた量子ドット構造体では、複数の量子ドットにまたがる多様な量子状態が実現される。特にループ構造の場合に、近藤効果による誘起電気分極が可能であることが、我々の予備的研究で判明しつつあった。

(3) 本研究の立案にあたり、これまでに我々が行ってきた f 電子系の近藤効果に関する研究成果が生かされている。量子ドット構造体は f 電子系と同様に内部自由度という共通要素をもち、新しい近藤効果の可能性が考えられた。さらに、また本研究で提案するナノサイズの誘起電気分極は制御可能であり、ナノテクノロジー分野への発展が期待された。

### 2. 研究の目的

(1) 量子ドットを複合的に組み合わせた量子ドット構造体では、近藤効果を通じたスピン制御により電気分極を誘起する可能性があり、ナノスケールでの新しいスピン電荷制御技術への応用が期待される。特に、本研究で提案するループを形成する量子ドット系における誘起電気分極は、ドット上のスピンの制御と直接連動しており、マルチフェロイック性という新しい視点をナノテクノロジーに導入するという点で重要である。

(2) 本研究では、量子ドット構造体の幾何学的対称性と誘起電気分極との関係、量子ドットと超伝導体リードの接合によるスピン電荷制御、従来の横型接合から縦型接合に変えた場合への理論の拡張、量子ドット系のナノスケール電気分極の観測方法について明らかにし、ナノ系・メゾソコピック系分野における近藤効果を利用した応用を目指す基礎理論を確立する。

### 3. 研究の方法

(1) 全般的な研究方法として、内部自由度のある磁性不純物で定評のある解析法を量子ドット構造体に適用し、拡張アンダーソン模型に数値繰り込み群法などの数値的手法を適用することによって、スピンと電荷の相互関係を調べる。

(2) 初年度は、三角形量子ドット系での研究を基礎としてより複雑な量子ドット系にも理論を拡張し、弱相関から強相関まで近藤効果による誘起電気分極の出現条件を調べる。次年度以降は、量子ドットと超伝導体との接合系や、量子ドット系に対して金属リードを縦型に接合する系へと研究を発展させる。さらに、ナノサイズの電気分極の観測について、最適な実験条件を明らかにする。

### 4. 研究成果

(1) 強相関極限での近藤効果による誘起電気分極の振る舞いについて、スピン相関と電気分極との理論関係式が適用可能であることを示した。これは、もともと三角格子の絶縁体における誘起電気分極の新しい機構として 2008 年にアメリカ・ロスアラモス国立研究所の研究グループによって提案されたものである(文献)。本研究によってバルク物質系での理論が量子ドット系に拡張され、マルチフェロイックスとしての幅広い応用への道が開かれことになる。

(2) 研究期間前半の 1 つの成果として、三角形三重量子ドット系における、外磁場と近藤効果との競合による誘起電気分極の反転制御が可能であることを示した(論文)。これは 2 つの量子状態の転移の境界である量子臨界点と密接に関係する。量子臨界点の実験的探索はバルク物質でも盛んであるが、量子ドット系では量子臨界点を利用したスピン電荷の精密制御の可能性も期待できる。

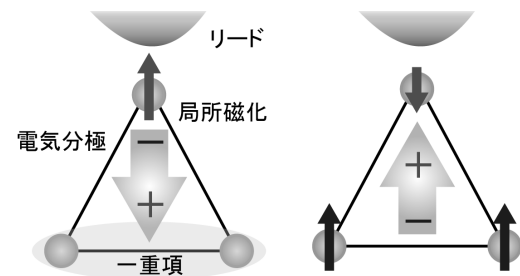


図 1: 弱磁場領域(左)と中磁場領域(右)

また、量子ドット系のスピン状態と電気分極が強く相関している点について、誘起電気分極の反転によるとびの大きさが、量子ドット系の局所磁化過程のとび、すなわちメタ磁性的振る舞いと連動していることが分かった。これは、ナノ系におけるマルチフェロイック性を観測するための有用な情報になると期待される。

(3) 三角形三重量子ドット系の電荷分布の精密制御について、韓国の研究グループによる新たな進展が報告された(文献)のを受けて、研究期間後半も三角形三重量子ドット系の研究を集中的に行った。主に、磁場による三角形ループの軌道効果として、誘起電気分極のアハラノフ・ボーム (AB) 型振動パタ

ーンの多様な形状変化とその実験的制御の可能性を明らかにした(論文、 )

数値線り込み群法による定量的な解析の結果、この多様な形状変化は、基底状態について異なる2つの対称性の混合に注目することによって統一的に理解されることが分かった。具体的には、三角形の鏡映操作に関する波動関数の偶奇パリティの混合であり、ドット・リード接合によって混合の度合いを精密に制御することが可能である。特に、接合の強さが弱い場合、誘起電気分極の振動パターンがスパイク状になり、将来の実験での観測が期待される。

(4) 2015年、カーボン・ナノチューブを利用した量子ドット系デバイスにおけるSU(4)近藤効果に関する研究について総合報告が出版され(文献 )。ここ10年で国内外(特に、オランダ)での研究が急速に進展していることに改めて気づかされた。これを受けて最終年度では、本研究が対象とする三角形量子ドット系についてSU(4)近藤効果に関する検討を行うことにした。従来の研究と異なる新たな試みとして、量子ドット系と金属リードを縦型に接合した系を扱い、近藤効果による誘起電気分極を明らかにした。特に、量子ドット系の分子軌道の偶奇パリティによる反転制御と、SU(4)近藤状態からSU(2)近藤状態へのクロスオーバーとの関係性について詳細に調べた(論文 )。

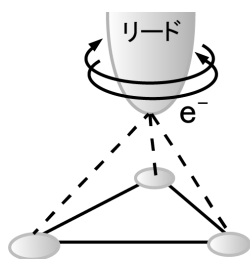


図2：縦型接合三重量子ドット系

軌道縮退のある系で期待されているSU(4)近藤効果は、通常のスピンによるSU(2)近藤効果の理論的拡張として興味深く、軌道自由度の場合もスピン自由度と同様のダイナミクスを示す顕著な例として重要である。本研究の独自の視点は、SU(4)対称性と三角形量子ドット系の幾何学的対称性を関連づけていることである。当初の研究計画では、これを三角形以外の複雑な量子ドット構造体へと理論を拡張する予定であったが、今後の研究課題として引き続き探求していく。

(5) 最近、走査トンネル顕微鏡(STM)による量子ドットの幾何学的配置の精密操作や、電荷密度分布のイメージによる波動関数の対称性の同定などの実験の進展が顕著である(文献 )。したがって、本理論研究結果の実験的検証が現実的なものとなってきており、今後さらに実際の実験に必要な条件を

検討する予定である。

(6) 研究目的の1つとして掲げた量子ドット系と超伝導体リードからなる接合系の研究について、三角形三重量子ドット系に誘起される電気分極が超伝導ギャップによってどのように抑制されるかについて詳細に調べた。この結果については、さらなる検討を重ねた上で論文として発表する予定である。

#### <引用文献>

L. N. Bulaevskii et al., Phys. Rev. B, Vol. 78, 2008, 024402

M. Seo et al., Phys. Rev. Lett., Vol. 110, 2013, 046803

E. A. Laird et al., Rev. Mod. Phys., Vol. 87, 2015, 703

S. Fölsch et al., Nat. Nanotechnol., Vol. 9, 2014, 505

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

M. Koga, M. Matsumoto, H. Kusunose, SU(2)-SU(4) Kondo Crossover and Emergent Electric Polarization in a Triangular Triple Quantum Dot, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol. 85, 2016, 063702/1-5  
DOI:10.7566/JPSJ.85.063702

M. Koga, M. Matsumoto, H. Kusunose, Kondo-induced electric polarization modulated by magnetic flux through a triangular triple quantum dot, Journal of Physics : Conference Series 592, 査読有, Vol. 592, 2015, 012142/1-6  
DOI:10.1088/1742-6596/592/1/012142

M. Koga, M. Matsumoto, H. Kusunose, Magnetic Flux Effect on a Kondo-Induced Electric Polarization in a Triangular Triple Quantum Dot, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol. 83, 2014, 084707/1-5  
DOI:10.7566/JPSJ.83.084707

M. Koga, M. Matsumoto, H. Kusunose, Triangular Triple Quantum dot: A Multiferroic Kondo System, JPS Conference Proceedings, 査読有, Vol. 3, 2014, 012020/1-6

DOI:10.7566/JSPC.3.012020

M.Koga, M. Matsumoto, H. Kusunose,  
Field-Controlled Spin and Charge  
Distributions in Kondo System with a  
Triangular Triple Quantum Dot、  
Journal of the Physical Society of  
Japan、査読有、Vol. 82、2013、  
093706/1-4  
DOI:10.7566/JPSJ.82.093706

〔学会発表〕(計6件)

古賀幹人、三角形三重量子ドットループ  
内磁束による近藤誘起電気分極の制御、  
日本物理学会、2015年3月22日、早稲  
田大学早稲田キャンパス(東京都・新宿  
区)

古賀幹人、Kondo and magnetic flux  
controlled electric dipole in a  
triangular triple quantum dot、The  
International Conference on Strongly  
Correlated Electron Systems、2014年  
7月9日、グルノーブル(フランス)

古賀幹人、近藤効果と外場による三角形  
三重量子ドット内スピン・電荷分布の制  
御、日本物理学会、2013年9月27日、  
徳島大学常三島キャンパス(徳島県・徳  
島市)

古賀幹人、Triangular Triple Quantum  
Dot: A Multiferroic Kondo System、The  
International Conference on Strongly  
Correlated Electron Systems、2013年  
8月6日、東京大学本郷キャンパス(東  
京都・文京区)

〔その他〕

ホームページ等

<https://tdb.shizuoka.ac.jp/RDB/public/default2.aspx?id=101028&l=0>

<http://www.ed.shizuoka.ac.jp/688/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

古賀 幹人 (KOGA, Mikito)  
静岡大学・教育学部・教授  
研究者番号: 40324321

### (2) 研究分担者

松本 正茂 (MATSUMOTO, Masashige)  
静岡大学・理学部・教授  
研究者番号: 20281058

楠瀬 博明 (KUSUNOSE, Hiroaki)  
明治大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 00292201