	研究代表者	物質・材料研究機構・磁性・スピントロクス材料研究拠点・拠点長 三谷 誠司 (みにた せいじ)	研究者番号:20250813
	研究課題 情報	課題番号：22H04966 キーワード：トンネル効果、磁気抵抗効果、電子軌道、界面、量子デバイス	研究期間：2022年度～2026年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

●研究の全体像

トンネル磁気抵抗効果とは、ナノスケールの厚さの絶縁体層の両側を強磁性金属で挟んだトンネル接合において観測される物理現象である。強磁性体の磁気モーメントの向きに応じて量子力学的な電子のトンネル確率 (この素子構造における電気抵抗) が大きく変わる現象であり、ハードディスクのリードヘッドや高性能磁気センサ、不揮発磁気メモリ等において実用化されている。すでに情報化社会において必要不可欠となっているが、今後の社会におけるデジタルトランスフォーメーション(DX)推進の必要性を考えると、トンネル磁気抵抗素子の一層の高性能化が強く望まれるところである。

研究代表者らはトンネル磁気抵抗素子の高性能化のための研究を続けてきたが、理想に近いと思われる素子試料を作製しても理論が予測する性能は得られず、さらには理論では説明できない現象(トンネルバリアの厚さに対する磁気抵抗効果とトンネル抵抗の振動的変化)が顕著に観測されるようになってきた。

電子のトンネル効果は教科書に載るほど良く知られているが、上記振動現象は理解の糸口もつかめていない。そもそも我々は量子力学的な電子のトンネル効果を本当に理解しているのだろうか?と考えるをせず、本研究を着想し、基礎まで遡ってトンネル磁気抵抗効果を研究することで、その新展開を図ることとした。

トンネル磁気抵抗効果

- ハードディスクや磁気センサで実用化 (情報化社会に不可欠)
- 今後の社会のDXのために高性能化が重要課題

着想に至った研究結果 (理論と実験の不一致)

- 理想的な試料をつくっても理論値が得られない
- トンネルバリアの厚さに対する未解明の振動現象が顕著に

そもそも、我々は教科書にも載っている量子力学的な電子のトンネル効果を本当に理解しているのか?

トンネル磁気抵抗効果の研究の新展開(本研究)が必要



図1 研究全体のイメージ図

●研究の目的

トンネル磁気抵抗効果に関する抜本的な基礎研究を行い、トンネル磁気抵抗効果の真のメカニズムを明らかにする。トンネルバリアが結晶性絶縁体である場合には、コヒーレントトンネル効果と呼ばれる「電子軌道の対称性」が支配的な役割を担うトンネル現象が発現するため、電子の軌道対称性に着目して研究を進める。

トンネル効果は、バリア層を介した一方の界面から他方の界面への電子の量子力学的な輸送現象であるので、界面における軌道対称性が特に重要である。「界面軌道物理」という学術領域の創成を基軸とすることで、新展開を図り、大きな研究成果を狙う。具体的には、界面軌道物理に基づく真のメカニズムの理解に加えて、これまでない大きさのトンネル磁気抵抗効果の実現や、それによる新規不揮発磁気メモリの基盤技術の構築、さらには量子コヒーレンスを利用した新規デバイスの開発などを行う (図1右)。

●研究のアプローチ

研究代表者らが有する原子レベルの界面構造制御技術を駆使し、軌道対称性という観点で高品位かつ良く構造制御された多彩な強磁性トンネル接合試料を作製・評価する。さらに、磁気分光・軌道分光を行うことにより、トンネル磁気抵抗効果の微視的機構解明に資する実験を推進する。なお、磁気分光・軌道分光は主に放射光施設で行う実験であり、X線等を試料に当てることで飛び出してくる光電子を種々の方法・手順で分析する最先端研究である。「軌道」が本研究のキーワードであるため、軌道磁性体と呼ばれる特殊な磁性体の創製と輸送現象を調べることも行い、界面軌道物理の分野創成を進める。界面軌道物理はトンネル磁気抵抗効果と不可分であるため、その分野創成自体も本研究で狙いとするところである。

微視的メカニズムの解明には、精緻な輸送特性の測定や、電子構造・電子輸送に関する理論計算も行う。現実的なヘテロ構造における伝導度の理論計算が研究推進の羅針盤となる。

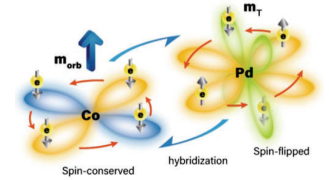


図2 電子の磁気分光・軌道分光によって物性発現メカニズムを解明するイメージ図。この例はCoPd合金の垂直磁気異方性に関するものであり、電子のスピントラッキングを分離して評価することで磁気異方性メカニズムの概念図を与えることに成功している。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●トンネル磁気抵抗効果の振動現象の解明

トンネル磁気抵抗効果の振動現象は理想構造に近い高品位の単結晶接合試料で特に顕著になり、結晶性バリアにおけるトンネル効果の本質に関わると考えられる。図3に例示したように、理想的な界面構造を有するスピネルバリア (MgAlO) では、トンネル接合抵抗の対数プロットにおいても振動が明瞭に見られており、まさに劇的な効果である。この解明なくしては、電子の量子力学的トンネル効果という物理・ナノテクノロジー分野の基礎問題を理解したとはいえない。

本研究における中心課題として、この振動現象のメカニズムを明らかにし、電子のトンネル効果の真の理解を得る。それに基づき、数1000%というマイルストーンとなるトンネル磁気抵抗効果の実現を目指す。

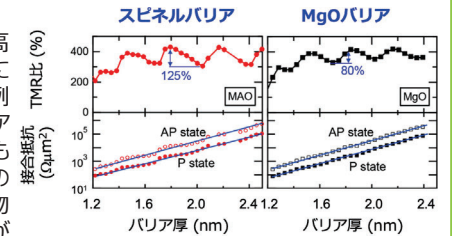


図3 トンネル磁気抵抗効果とトンネル接合抵抗のバリア層厚に対する振動現象の観測例。MgAlOバリアでは特に大きな接合抵抗の振動が現れている。現在のトンネル効果の理論では説明できない。詳細は、Appl. Phys. Lett. **120**, 032404 (2022)。

●界面の磁気分光・軌道分光による界面軌道物理

界面軌道物理の分野創成は、バリア両側界面の間の磁気的輸送現象であるトンネル磁気抵抗効果のメカニズムの解明のための基軸となる。そのため、最先端の磁気分光・軌道分光を駆使し、界面軌道物理の研究を推進する。トンネル接合素子と同一の界面を作製して界面での電子の軌道対称性を調べることも、種々のヘテロ構造界面のスピントラッキングおよび軌道分解した電子構造のデータを取得し、理論計算との比較により界面固有の電子の軌道物理を明らかにしていく。

●界面磁性体・軌道磁性体の創製と物性制御・解明

界面軌道物理の分野創成には、従来ない切り口での研究アプローチが不可欠であり、そのために界面磁性体、軌道磁性体と呼ばれる特殊な磁性体の創製を行う。このような明確な特徴を持つ磁性体の物理的性質を分光法その他によって調べ、軌道物理の理解を深めて分野としての確立を目指す。

●数1000%の室温トンネル磁気抵抗比の実証と新規量子デバイスの創成

上述の研究の応用分野への展開として、室温数1000%のトンネル磁気抵抗比の実証を行う。また、軌道対称性の効果から新規量子効果の発現が期待されるため、それによる量子デバイスの創成を目指す。これらの成果が得られた場合には、現在の不揮発磁気メモリの動作原理、その結果として、集積構造が大きく進歩し、メモリとしての性能向上が図られる(スマホの省電力化等に期待)。新規量子デバイスは、新たなコンピューティングハードウェア(エッジAI等の重要技術)の開発に寄与し得る。