

京都大学	博士 (工学)	氏名	松島 真之
論文題目	Study on spin-charge conversion in Bi-based systems (Bi を基軸とする材料系におけるスピン変換現象の研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、非放射性元素の中で最大のスピン軌道相互作用(SOI)を有するビスマス(Bi)を対象に、Bi を基軸とする材料系におけるスピン角運動量から電荷への変換物性現象に関する先駆的研究内容がまとめられている。</p> <p>第1章と第2章では、本研究の位置づけが述べられている。近年、固体物理学、特にスピン軌道相互作用(SOI)を積極的に活用するスピントロニクスやスピンオービトロニクス分野では、情報担体としてのスピン角運動量が非保存量であることから、スピン角運動量と保存量である物理量との間の効率的な変換(スピン変換)の実現とその背景学理の理解が主要な研究対象となっている。SOIの大きさは変換効率を決定する主要な因子の1つであり、その大きさは大凡原子番号Zの4乗に比例することから、非放射性元素の中で最も重いビスマス(Bi)はこの文脈の中で重要な材料と位置づけられる。これらの章では、Biを用いたスピン変換物性物理における重要な先行研究や本研究で用いる評価手法の背景学理を紹介しながら、本研究の先進性と意義をまとめている。</p> <p>第3章からが研究成果のまとめとなる。</p> <p>第3章ではBiとAgからなる二層構造における、Biの大きなSOIに起因する界面Rashba場をもたらすスピン変換物性について研究結果がまとめられている。Bi/Ag界面には、スピン分解光電子分光によりRashba場による巨大なスピン分裂が生じることが先行研究で知られている。本研究では、同じBi/Ag系を用いたスピン変換を報告した先行研究では精査されていなかったBi/Agのスタック順序を変えることによるRashba場の方向変換がスピン変換にもたらす影響、及び先行研究では無視されていたBiおよびAgの中でのスピン緩和が、Bi/Ag界面のスピン変換効率にいかなる影響を与えるかを精密な実験から明らかにし、先行研究で主張されている変換効率がoverestimateされていることと、本研究によってより正確なスピン変換効率を得ることができること、の2点を報告している。</p> <p>第4章と第5章ではBi単体のスピン変換を定量的に決定する試みについて述べられている。</p> <p>Biは上記のように非放射性元素の中で最も大きなスピン軌道相互作用(SOI)を有することが知られているが、スピン=電荷変換は第3章で記載された界面Rashba場を用いない場合には基本的に対象元素のSOIの大きさでその効率が決定されるため、重い元素であるBiは大きなスピン変換効率の実現されることが期待されてきた。一方で実験的にはその期待を裏切る結果しか得られておらず、報告されている値は効率「0」を含めて軒並み小さく、さらに効率の符号も正負いづれも報告されており、統一的な理解が可能な結果が得られている状況から程遠かった。第4章ではこの混乱した状況を解決すべくスピン変換効率評価実験で最も標準的に用いられるNiFe(Py)をスピン源とした菱面体(111)構造を主要な要素として含む多結晶Biとの二層構造を作製し、スピントルク強磁性法(ST-FMR)というこれも最も標準的な手法を用いてBiのスピン変換効率を精査することで、その値として0.03-0.06を得た。これは従来報告された値の中で絶対値としては最も大きな値の1つであり、さらに負の効率が観測されない、とい</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	松島 真之
<p>う 2 点で意義ある結果である。</p> <p>続く第 5 章では Bi の結晶性の違いがスピン変換に与える影響を精査する、という観点から、単結晶 Bi を対象としたスピン変換物性研究の成果がまとめられている。従来の Bi スピン変換研究では、Bi の融点が低いことなどの理由から基板上の良質な Bi 単結晶成長が困難であり、それがスピン変換物性の正確な理解を阻んでいる 1 つの理由となっていた。本章では MgO(001) 基板の上に Fe(001) 単結晶を成長できるという技術を基軸に、その Fe 上に Bi の菱面体 (110) 結晶を成長させ、そのスピン変換効率を同じく ST-FMR 法によって測定した。その結果、最大で 0.3 程度の巨大変換効率を実現しやが、この値は他の単一元素で重い物質である白金 (Pt)、タングステン (W)、タンタル (Ta) らのスピン変換効率と比較しても最大級であり、Bi スピン変換研究における大きなブレイクスルーとなる業績である。</p> <p>第 6 章では本研究で得られた成果のまとめが述べられている。</p>			

氏名	松島 真之
----	-------

(論文審査の結果の要旨)

本論文ではビスマス(Bi)を基軸として、銀(Ag)、パーマロイ(NiFe=Py)、単結晶鉄(Fe)との複合材料系の中での Bi のスピン=電荷変換現象の物性理解をスピントロニクス・スピンオービトロニクスの視点から目指した研究成果がまとめられている。得られた成果は以下の通りである。

1. Bi と Ag からなる二層構造では、Bi/Ag 界面に Rashba 場による巨大なスピン分裂が生じることが知られている。このスピン分裂は効率的なスピン流=電流変換を可能とするために世界的に盛んに研究されている。本研究では、先行研究では精査されていなかった Bi/Ag のスタック順序を変えることによる Rashba 場の方向変換がスピン変換にもたらす影響、及び先行研究では無視されていた Bi および Ag の中でのスピン緩和が、Bi/Ag 界面のスピン変換効率にいかなる影響を与えるかを精密な実験から明らかにし、先行研究で主張されている変換効率が *overestimate* されていることと、正確なスピン変換効率を得ることの 2 点を報告することができた。

2. Bi は非放射性元素の中で最も大きなスピン軌道相互作用(SOI)を有することが知られている。スピン=電荷変換は 1. で述べた界面 Rashba 場を用いない場合は基本的に対象元素の SOI の大きさでその効率が決定される。それゆえ Bi は理論的には最も高効率のスピン変換が実現可能な単一元素として長く期待されている。一方で実験的にはその期待を裏切る結果しか得られておらず、報告されている値は効率「0」を含めて軒並み小さく、さらに効率の符号も正負いづれも報告されており、統一的な理解が可能な結果が得られている状況から程遠い。本研究ではこの混乱した状況を解決すべく、スピン変換効率評価実験で最も標準的に用いられる Py と Bi の二層構造を作製し、スピントルク強磁性法(ST-FMR)というこれも最も標準的な手法を用いて Bi のスピン変換効率を精査し、その値として 0.03-0.06 を得た。これは従来報告された値の中で絶対値としては最も大きな値の 1 つであり、さらに負の効率が観測されない、という 2 点で意義ある結果である。

3. 従来の Bi スピン変換研究では、Bi の融点が低いことなどの理由から基板上の良質な Bi 単結晶成長が困難であり、それがスピン変換物性の正確な理解を阻んでいる 1 つの理由となっていた。本研究では MgO(001)基板上に Fe(001)単結晶を成長できるという技術を基軸に、その Fe 上に Bi(110)結晶を成長させ、そのスピン変換効率を測定したところ、最大で 0.3 程度の巨大変換効率を実現した。この値は他の単一元素系のスピン変換効率と比較しても最大級であり、Bi スピン変換研究における大きなブレイクスルーとなる業績である。

本論文について、令和 4 年 2 月 21 日に、博士学位論文調査委員の 3 名（白石誠司・竹内繁樹・浅野卓）の前で申請者である松島真之氏による論文内容の説明、および論文内容とそれに関連した物性物理学に関する事項について試問を行い、申請者の研究が世界的に当該研究分野において優れた内容と先進性を有しており、また申請者が本研究に関する物理的知見を有していることを確認できたことから、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は京都大学学位規定第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。