The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Studies of Bi/Ni bilayer superconductor in nanoscale devices
Author(s)	徳田, 将志
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/92161
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　　徳田　将志　　）	
論文題名	Studies of Bi/Ni bilayer superconductor in nanoscale devices (ナノスケールデバイスにおけるBi/Ni薄膜超伝導体の研究)

論文内容の要旨

BiおよびNiの薄膜はそれぞれ単独では超伝導を示さないにもかかわらず、MgO基板上にエピタキシャル成長したBi/Ni薄膜はおよそ4 Kで超伝導を示す。その超伝導の発現機構は未だ解明されておらず、超伝導秩序変数も同定されていない。これまでの研究で、Bi/Ni薄膜は超伝導状態でもNi層の強磁性が保たれているだけでなく、超伝導ギャップの異方性や時間反転対称性が破れた状態が報告されてる。それらに加えて、Bi層が強いスピン軌道相互作用を持つことから、Bi/Ni薄膜はトポロジカル超伝導体の候補、中でもスピン三重項状態を持つカイラルp波超伝導体の候補となっている。Bi/Ni薄膜の利点は、薄膜という形状が微細加工を用いたナノスケールのデバイス作製に適していることである。そのようなデバイスでは、電気輸送測定から超伝導秩序変数を評価することが可能である。

本研究の目的は、ナノスケールデバイスに特有の方法を用いてBi/Ni薄膜の超伝導秩序変数を評価することである。まず着目したのは、リング状の超伝導体で観測されるLittle-Parks (LP)振動である。LP振動は、超伝導体リングに磁場を印加しながら抵抗を測定すると、抵抗が磁場に対して磁束量子の周期で振動する振る舞いとして観測できる。その位相は超伝導秩序変数の内部自由度を反映するため、LP振動の位相から超伝導秩序変数の評価が可能である。本研究ではBi/Ni薄膜と従来型超伝導体であるNbを用いてナノスケールのリング型デバイスを作製した。 両方のデバイスのLP振動を同時に測定したところ、印加する磁場が十分小さい場合、Bi/Ni薄膜のLP振動はNbと同様の位相を示した。しかし、印加する磁場を増加させると、Bi/Ni薄膜においてのみ約8 mTを境に振動の位相が磁束量子の半分だけシフトする振る舞いを観測した。このような位相シフトの観測は前例が無く、どのような秩序変数を仮定しても、既存の理論では説明できない現象であった。そこで理論計算によって位相シフトの再現を試みたところ、Ni層に由来する面内磁場成分と双極子型のスピン軌道相互作用、そしてカイラルp波超伝導体の秩序変数を仮定することで、LP振動の位相シフトの再現に成功した。この結果は、Bi/Ni薄膜が超伝導秩序変数にスピン三重項成分を持つ可能性を示すものである。

LP振動の測定によって、Bi/Ni薄膜の超伝導秩序変数がスピン三重項成分を持つことが強く示唆されたことを受け、スピンバルブ素子と呼ばれる微小なデバイスを用いたスピン輸送測定も行った。スピン三重項超伝導体は従来型超伝導体とスピンの性質が大きく異なる。従来型超伝導体においては、超伝導状態では常伝導状態に比べて逆スピンホール効果（ISHE）信号が2000倍程度増幅されたことや、スピン緩和時間が増大したことが報告されているが、非従来型超伝導体では未だそのようなスピン輸送測定は行われていない。本測定では、Bi/Ni薄膜においてスピン三重項超伝導体に特有のスピン輸送現象を観測することを目的とした。常伝導状態におけるスピン輸送測定では、Bi/Ni薄膜のスピンホール角0.8 %とスピン拡散長2.7 nmが得られ、Bi/Ni薄膜のスピンに関する物理量の定量的な評価に成功した。一方、超伝導状態においては、ISHE信号の1000倍程度の増幅に加えて、Ni層の強磁性を反映するような磁場依存性が得られ、常伝導状態や先行研究とは定性的に異なるスピン輸送現象が観測された。

本研究で得られた成果は、Bi/Ni薄膜の超伝導秩序変数に関する新しい情報を与えただけでなく、非従来型超伝導体のLP振動の理論研究にも進展をもたらした。また、超伝導体を用いた量子デバイスの研究にも波及効果を与える可能性を秘めたものである。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　徳田　将志　）		
論文審査担当者	（職）	氏　名
	主 査　教授	新見　康洋
	副 査　教授	黒木　和彦
	副 査　教授	松野　丈夫
	副 査　教授	工藤　一貴
	副 査　准教授	酒井　英明

論文審査の結果の要旨

超伝導は、発見から 100 年以上経った現在でもなお物理学の研究対象であり続ける。最近では、超伝導体で構成される微小リング内に閉じ込められた量子化磁束の有無を、量子ビットの 1 及び 0 として取り扱う量子コンピュータも実売されるようになった。このような背景から、従来型超伝導体（*s* 波スピン一重項超伝導体）とは異なる特性を有する非従来型超伝導体の発見、及びそれを薄膜化して超伝導量子コンピュータへ応用する研究が、基礎及び応用の両面で注目を集めている。

そこで徳田氏が着目したのが、Bi と Ni 薄膜から成る超伝導体である。Bi 及び Ni の薄膜は単独では超伝導を示さないが、MgO 基板上にエピタキシャル成長した Bi/Ni 薄膜は約 4 K で超伝導を示す。最近の研究によれば、Bi/Ni 薄膜は超伝導状態でも Ni 層の強磁性が保たれているだけでなく、超伝導ギャップの異方性や時間反転対称性が破れた状態であることも報告されている。さらに Bi 層が強いスピン軌道相互作用を持つことから、Bi/Ni 薄膜はトポロジカル超伝導体の候補、中でもスピン三重項状態を持つカイラル *p* 波超伝導体の候補となっている。Bi/Ni 薄膜の利点は、薄膜という形状が微細加工を用いたナノスケールのデバイス作製に適していることである。そのようなデバイスでは、電気輸送測定から超伝導秩序変数を評価することが可能である。そこで徳田氏は、ナノスケールデバイスに特有の方法を用いて Bi/Ni 薄膜の超伝導秩序変数を評価した。

まず始めに、リング状の超伝導体で観測される Little-Parks（LP）振動に着目した。LP 振動とは、ナノメートルサイズの微小な超伝導体リングに磁場を印加しながら抵抗を測定すると、抵抗が磁場に対して磁束量子の周期で振動する現象である。従来型超伝導体では磁束量子がリング内に入ると抵抗が極小を示す。一方、Bi/Ni 薄膜からリング型デバイスを作製し、LP 振動を測定したところ、約 8 mT を境に振動の位相が磁束量子の半分だけシフトする振舞い、つまり磁束量子がリング内に入ると抵抗が極大を示すことを発見した。このような磁場による LP 振動の位相シフトは前例が無く、既存の理論では説明できなかった。そこで青山らが構築した理論モデルと比較したところ、Ni 層に由来する面内磁場成分と双極子型のスピン軌道相互作用、そしてカイラル *p* 波超伝導体の秩序変数を仮定することで、LP 振動の位相シフトを再現することに成功した。

次に Bi/Ni 薄膜を細線状に加工し、スピン輸送測定を行った。常伝導状態では、Bi/Ni のスピン拡散長（3 nm）やスピンホール角（0.8%）を算出できただけでなく、超伝導状態では常伝導状態では観測されなかった大きな信号の増大だけでなく、通常の BCS 超伝導体では観測されなかった複雑な逆スピンホール効果を観測した。

本研究で得られた成果は、Bi/Ni 薄膜が従来型超伝導体の範疇を超えた新しい薄膜超伝導であることを示しただけでなく、微小磁場を印加するだけで、LP 振動の位相を磁束量子の半整数分シフトできており、超伝導量子デバイスの機能化という観点でも十分に波及効果を与えられるものである。以上の理由から、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。