

超伝導と磁性の融合による新物質・新物性開拓



研究代表者	京都大学・化学研究所・教授 小野 輝男 (おの てるお)	研究者番号：90296749
研究課題情報	課題番号：24H00007 キーワード：超伝導、磁性、ダイオード、スピントロニクス	研究期間：2024年度～2028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

本研究では、研究代表者らが見出した超伝導ダイオード効果およびゼロ磁場超伝導ダイオード効果の知見をもとに、超伝導と磁性の融合による新物質・新物性開拓および応用展開を目指す。多層構造による反転対称性の破れと磁性による時間反転対称性の破れを組み合わせることで新規な超伝導体を創成し、超伝導ダイオード効果の特性向上や応用展開に加えて、磁化によって超伝導体の位相を制御するなどの新しいコンセプトによって新規物性開拓を試みる。

● 本研究の着想に至った経緯

研究代表者らは、ニオブ (Nb) 層、バナジウム (V) 層、タンタル (Ta) 層から構成される非対称構造を有した人工格子において (図1(a))、測定電流と垂直に外部磁場を印加すると (図1(b))、超伝導の臨界電流の大きさが電流方向に依存することを見出した (図1(c))。図1(c)の結果は、順方向の臨界電流と逆方向の臨界電流の間の電流値では、順方向では超伝導状態でゼロ抵抗であるが、逆方向では常伝導状態で抵抗が有限となることを示し、超伝導ダイオード効果と呼ぶべき現象が観測されたことを意味する (図1(d))。さらに、この超伝導ダイオード効果は、極性が外部磁場で切り替え可能であるという、従来のダイオードにはない特徴を持つ。

研究代表者は、スピントロニクスに軌道自由度を加えるとの観点から特別推進研究「スピノールトロニクスの学理構築とデバイス展開 (平成27～31年度)」を実施した。ここで得られた重要な知見の一つが、元素 A, B, C を積層した ABC 人工格子の非対称構造によるラッシュバ分裂した電子バンド構造の誘起とスピノール軌道物性の増強効果である。この手法によって、スピントロニクスデバイスで重要となる磁気異方性、ジャロシンスキー守谷相互作用、スピノールトルクなどのスピノール軌道物性が増大することを見出した。

本研究提案のきっかけとなった超伝導ダイオード効果は、ABC人工格子構造による反転対称性の破れた超伝導体創成とのアイデアから見出された。超伝導ダイオード効果発見後、挑戦的研究 (開拓)「超伝導ダイオード効果の機構解明と不揮発性超伝導ダイオード素子の創出 (令和3～5年度)」によって、不揮発性超伝導ダイオード素子の創出にも成功した (図2)。

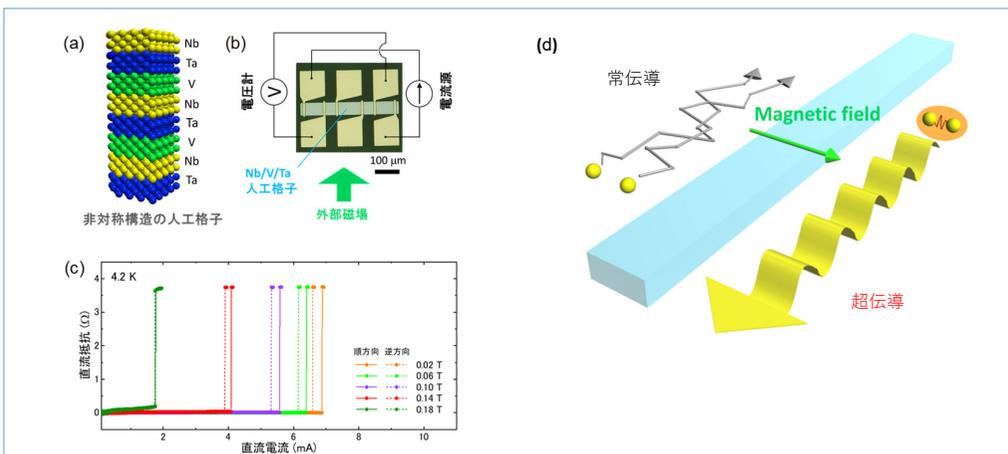


図1 超伝導ダイオード効果の説明

● 不揮発性超伝導ダイオード効果

図1で使用した素子では、超伝導ダイオード効果を得るために外部磁場の印加が必要であったが、応用上は無磁場でダイオード効果が得られる方が好ましい。研究代表者らは、強磁性体である鉄 (Fe) 層を挿入した素子によって無磁場での超伝導ダイオード効果を得ることに成功した (図2)。図2は電気抵抗率 ( $\rho$ ) の電流密度 ( $J$ ) 依存性であり、ゼロ磁場において大きな超伝導ダイオード効果が得られていることを示している。図2では正方向の電流の方が超伝導が壊れにくい、鉄の磁化の向きを逆にすると、負方向の電流の方が超伝導が壊れにくくなる。このことは、鉄の磁化方向で超伝導ダイオードの極性を制御できることを示している。つまり、鉄の磁化の向きを情報とした記録が可能であり、このような素子を複数用いることで、書き換え可能な超伝導論理回路が作製可能であると考えられる。

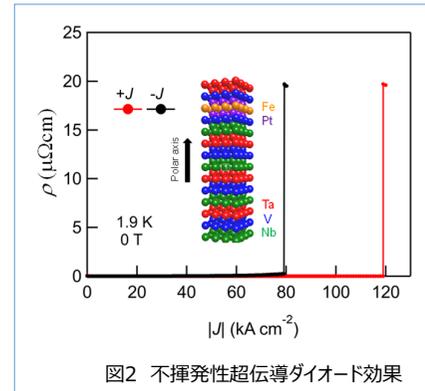


図2 不揮発性超伝導ダイオード効果

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

● 研究計画

- ・既に超伝導ダイオード効果が得られている物質を使って超伝導ダイオード素子の整流特性の周波数依存性を測定することで、応用上の可能性を明らかにするとともに、超伝導ダイオード効果のメカニズムを解明する。
- ・さらに、組成等を最適化することで超伝導ダイオード素子の特性を向上させる、ゼロ磁場超伝導ダイオード素子を組み合わせる論理回路の動作実証を行う。
- ・反強磁性体を用いることで漏れ磁場ゼロのゼロ磁場超伝導ダイオード素子の創製を目指す。
- ・順方向は超伝導で逆方向は絶縁体という究極のダイオード素子の可能性を理論的に考察し、その結果に基づき検証を試みる (図3)。
- ・超伝導/磁性/超伝導多層膜によってジョセフソン接合超伝導体を作製し、磁化による超伝導位相の制御を試みる。

● 学術上の意義・インパクト

本研究では、分野を開拓した研究代表者らが、超伝導ダイオード効果研究で得られた磁性と超伝導の新たな融合の視点に基づき、独自コンセプトによる新物質創成と独創的理論に支えられた新規物性開拓を行う点に学術上大きな意義がある。超伝導ダイオード効果の整流素子や論理回路への展開は、工学的に意義があるだけでなく、量子コンピュータをはじめとする将来の超伝導回路一般への大きなインパクトが期待される。多層構造による反転対称性の破れと磁性による時間反転対称性の破れを組み合わせることで新規な超伝導体を創成する点は、新たな物質創成手法の開拓という点からも波及効果がある。磁化によって超伝導体の位相を制御するなどの新しいコンセプトによる新規物性開拓によって、現在からは想像もできないような社会にインパクトを与える新物性が生み出したい。

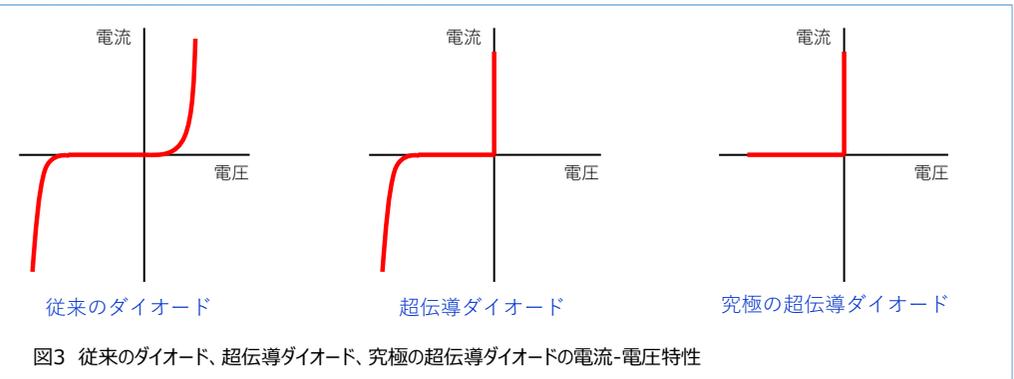


図3 従来のダイオード、超伝導ダイオード、究極の超伝導ダイオードの電流-電圧特性