

## 新奇的な超伝導現象、「強磁性ジョセフソン共鳴」の提案

厚さ数  $\lambda$  の絶縁体(I)を2つの超伝導体(SC)で挟んだジョセフソン接合において、超伝導中のクーパー対が量子力学的なトンネル効果により直流超伝導電流が流れる。これを直流ジョセフソン効果と言う。また、接合に電位差が生じている場合は交流超伝導電流が流れるため交流ジョセフソン効果と呼ばれる。近年、絶縁体を強磁性金属(FM)に置き換えた SC/FM/SC 接合が注目されている。この接合の特徴は、SC のペア振幅が FM へ侵入すると、FM 中の交換エネルギーのため、ジョセフソン電流の最大値(臨界値)が FM の厚さの関数として振動することである。その結果、ジョセフソン電流と、隔てられた二つの超伝導状態の位相(差)との関係が、従来のジョセフソン接合のもの(0-接合)から $\pi$ だけずれたもの( $\pi$ -接合)になる。 $\pi$ -接合は、量子計算における基本素子、いわゆる量子ビットの有力な候補としても注目されている。一方で、これまでの SC/FM/SC 接合に関する研究では、交流ジョセフソン効果などの SC の動的な性質に関する研究は多くあるが、FM に関しては、交換エネルギーのみに着目し、FM における磁化の動的な性質(スピン波)は無視されてきた。最近、東北大学金属材料研究所のグループ(挽野真一、森道康、高橋三郎、前川禎通)は、SC/FM/SC 接合において FM にマイクロ波を照射することにより生じる強磁性共鳴によって直流のジョセフソン電流が誘起される可能性を提案した。この研究は、日本物理学会発行の英文学術誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)の 2008 年 5 月号に掲載される。

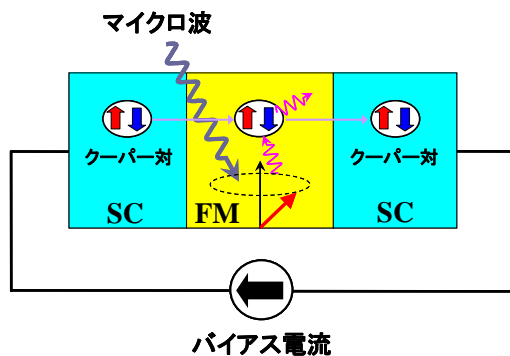


図 1. 超伝導/強磁性/超伝導接合における「強磁性ジョセフソン共鳴」の概念図

本研究では、図 1 に示すように FM を 2 つの  $s$ -波超伝導体で挟んだ SC/FM/SC 接合において、強磁性体にマイクロ波を照射して磁化( $M$ )の歳差運動(一様なスピン波モードの励起)が引き起こされている状況を考え、その場合のジョセフソン効果について調べた。磁化の歳差運動は、FM 内部に  $B=4\pi M$  の時間に依存した内部振動磁場を発生させるため、SC 側から FM 側へ侵入したクーパー対の位相は磁場の分だけ変更を受ける。従って、スピンの動的な性質は、内部振動磁場を通して位相の動的な性質と結合することになる。すると、一種の“うなり”現象がおこり、ジョセフソン電流は振動磁場の周波数とジョセフソン周波数(2つの SC 間に生じる電位差に比例する周波数)の差の周波数で振動する。この“うなり”

の周波数がゼロになったときに、ジョセフソン電流は直流成分のみが残る。この場合の電流-電圧特性を図2に示す。マイクロ波の周波数が強磁性共鳴(FMR)の周波数に等しいとき、図2の点線で示した非共鳴の場合とは異なり、電流-電圧特性はステップ構造を示す。この各ステップでは電流の変化に対して電圧降下がないため直流ジョセフソン電流が流れている。この新しい現象は「強磁性ジョセフソン共鳴」と名付けられた。このステップ構造の現れる電圧は、共鳴周波数の“偶数倍”に比例した電圧で現れることが分かった。

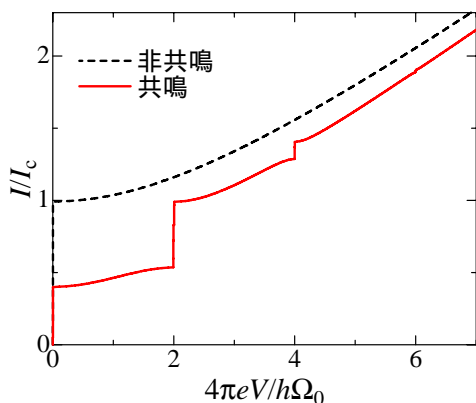


図2. 電流-電圧特性。  
 $I$ はバイアス電流、 $I_c$ はジョセフソン臨界電流、 $V$ は電圧、 $\Omega_0$ は強磁性共鳴周波数、 $e$ は素電荷、 $h$ はプランク定数である。

本研究の結果は、SC/FM/SC 接合が、スピン波を観測する新しい実験法や交流-直流超伝導コンバータ(超伝導電流の整流作用)に用いられる素子となりうることを示唆している。本研究で展開された「強磁性ジョセフソン共鳴」の理論は、今後のSC/FM/SC接合における動的な性質の研究の基礎になり、量子ビットの開発にも新たな指針を与えるものと大いに期待される。

論文掲載誌： J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) No. 5, p. 053707

電子版：<http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/77/053707> (5月12日公開)

<情報提供： 挽野 真一、森 道康、高橋 三郎、前川 禎通 (東北大学) >