

量子限界への扉を開くジョセフソン効果

——発見から 50 年，その基礎と応用——

小特集編集にあたって

編集チームリーダー 日高睦夫

ジョセフソン効果は、1962年にB. Josephsonにより発見された。彼は1973年にこの発見により33歳の若さでノーベル賞を受賞している。ジョセフソン効果発見50周年を記念して、ジョセフソン効果を実現するための素子であるジョセフソン接合の物理的意味、50年間の応用の広がり、今後の展望を理解して頂くために、本小特集を企画した。

ジョセフソン接合は一般には超伝導回路におけるスイッチとして理解されていると思われる。もちろんそういう側面もあるが、単なるスイッチではなく超伝導現象における巨視的量子効果の位相を取り出す現在のところ唯一の手段であるということがより本質的である。第1章では、ジョセフソン接合を位相という側面から眺めることにより、ジョセフソン効果の本質に迫っている。

ジョセフソン接合を単純化して言う、「二つの超伝導体が弱く結合した素子」となる。超伝導体の種類と弱く結合させる方法によって様々な種類のジョセフソン接合が今までに開発されてきた。第2章では、代表的な金属系接合であるNb/AlO_x/Nb接合と、酸化物系接合であるランプエッジ接合を中心に、ジョセフソン接合の種類、特徴と開発の歴史が概説されている。

第3章では、センサへの応用が述べられている。ジョセフソン接合を1個若しくは2個含む超伝導ループは超伝導量子干渉素子(SQUID)と呼ばれており、僅かな磁界の変化で超伝導の位相が大きく変化することを利用して最高感度の磁界センサとして利用されている。既に脳磁計、心磁計、非破壊検査等の応用製品が開発されている。ジョセフソン接合から派生した準粒子トンネル素

子は、半導体と比べて3桁小さい~1mVの超伝導エネルギーギャップを巧みに利用したミクスや高感度センサとして利用されている。

ジョセフソン接合をデジタル回路のスイッチとして用いる応用には長い歴史がある。第4章では、その歴史と現在の到達点、今後の展望について解説する。ジョセフソン接合は当初は単なるスイッチとして用いられていたが、現在では超伝導ループに単一磁束量子(SFQ)を出し入れする、より超伝導の巨視的量子効果と深く結び付いた形で用いられている。SFQを用いるデジタル回路は、超高速・低消費電力であることが知られているが、量子限界に迫る更なる低消費電力化を目指した研究が行われている。

比較的新しい応用として、ジョセフソン接合を含む超伝導回路を量子コンピュータの基本構成要素である量子ビットに利用する研究が進められている。第5章に超伝導量子ビットの実現方法とジョセフソン接合の役割が解説されている。量子ビットは離散化したエネルギーを持つ量子力学的二状態を利用する。このとき、調和振動子のように等間隔なエネルギー準位を持つものでは、特定の二準位を利用することができない。ジョセフソン接合は非散逸の非線形インダクタとして働くため、ジョセフソン接合を用いて設計を工夫することにより、特定の二準位を他から分離することができる。

本小特集で全てを網羅することはできなかったが、超伝導現象とジョセフソン効果の持つ意味は深く、様々な応用において究極の性能を極めることができる。本小特集によって、その一端に触れて頂ければ幸いである。

最後に、お忙しい中執筆をお引き受け頂いた執筆者の皆様、編集メンバーの皆様、学会事務局の皆様へ深く感謝する。

小特集編集チーム 日高 睦夫 吉川 信行 松永 高治
原市 聡 丸山 道隆 八木 英樹