

1. 背景

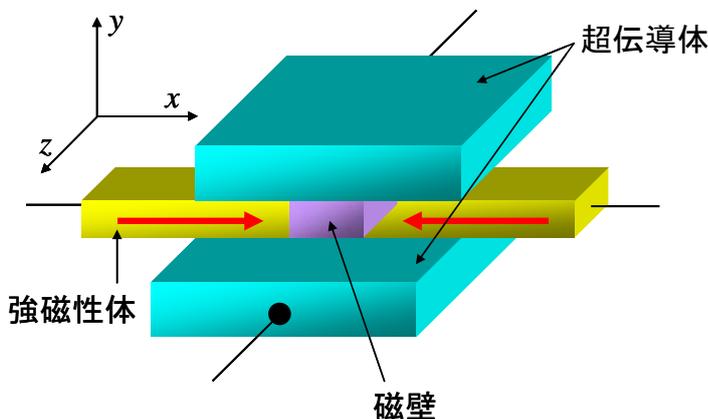
超伝導体とはある温度以下に冷やすと電気抵抗がゼロになる物質です。この超伝導体で絶縁体を挟んだ構造を持つ素子はジョセフソン接合と呼ばれ、極めて微小な磁場の測定などに用いられています。ジョセフソン接合にマイクロ波を照射すると、その振動数の整数倍の電圧で、シャピロステップと呼ばれる電流電圧特性が階段状に変化する現象が起こります。マイクロ波の振動数は9桁以上の高精度で決定できる技術があるため、電圧を同程度の高精度で決められることとなります。ジョセフソン接合のこの性質を利用して、1990年以降、世界の電圧標準が規定されています。あらゆる科学と技術において精度の高い計測技術が不可欠であることは言うまでもありません。ジョセフソン接合は、科学技術の基盤を支え、我々の生活を根本から支えていると言えるのです。

一方、電子の持つスピンを積極的に用いた新しい電子素子の開発が急速に進んでおり、こうした研究分野はスピントロニクスと呼ばれています。その中心となる材料は強磁性体(磁石)で、ハードディスクドライブの再生ヘッドや磁気ランダムアクセスメモリーなどに実用化されています。強磁性体は、小さな磁石が全て同じ向きに揃って並んでいるようなものです。しかし、実際の物質中では、部分的に小さな磁石の向きが反対に向いた方が安定になります。そのため、向きが反対になった小さな磁石の領域ができ、それらの境界が磁壁と呼ばれています。この強磁性体中に存在する磁壁をメモリーに応用しようとする試みは、数あるスピントロニクスデバイスの中でも最も有望視されているものの一つで、大変注目されています。そのため、磁壁を磁場や電場で制御する方法や、その変化を高精度で観測する手段が重要になってきています。

2. 研究手法と成果

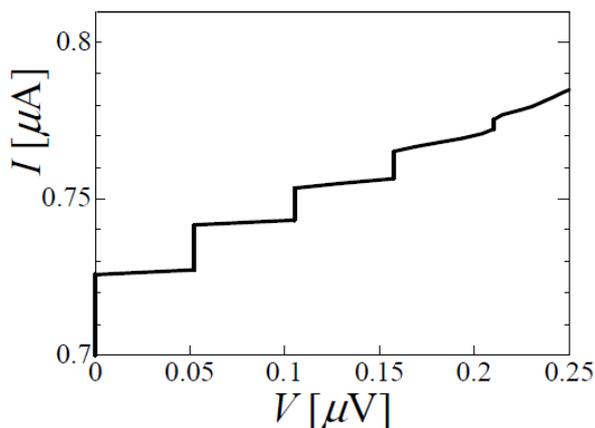
研究グループは、磁壁の運動を高精度で観測する原理を提案すべく、図1に示すような接合を考えました。これは、ジョセフソン接合中の絶縁体を強磁性体に置き換えたもので、「強磁性ジョセフソン接合」と呼ばれ盛んに研究が行われています。強磁性ジョセフソン接合を用いると、将来的には現在のコンピューターの性能を遥かに凌ぐ量子コンピューターの基本素子となる可能性があり注目されています。図1は、その強磁性ジョセフソン接合を構成する強磁性体が磁壁を含んでいるものです。

図1 強磁性ジョセフソン接合の模式図。超伝導体で挟まれた強磁性体中を磁壁が運動する。



今回の研究では、磁壁が振動運動をしているときの接合方向(y 方向)の電流電圧特性を、等価回路模型を用いて求めました。磁壁の振動運動は、図1のx方向に電流を流すことで誘起することが可能で、確立した実験技術になっていると言えます。我々の用いた等価回路模型は、抵抗とコイルに相当する素子の並列回路です。ここで、コイルに相当する素子とは、超伝導体間を流れる超伝導電流成分のことです。超伝導電流成分は、磁気との結合があるため、強磁性体中の磁壁が振動運動すると影響を受けます。

図2 磁壁が振動運動している場合の電流電圧特性



超伝導電流成分と磁気との結合を取り込んだ等価回路模型を解くと、図2に示す階段状の電流電圧特性が得られました。この結果は、磁壁の振動数の整数倍に比例定数をかけた電圧のところで、電流電圧特性が階段状に変化していることを示しています。そして、その比例係数は、プランク定数と素電荷という基礎物理定数のみで決まることが分かりました。電圧はジョセフソン接合を用いて9桁という極めて高い精度で規定されています。また、基礎物理定数も同様な精度で規定されています。磁壁の振動数は、これら超高精度で求まっている物理量のみで決まっているので、同様に高精度で観測が可能になると期待されます。

3. 今後の期待

今回、強磁性体で隔てられた超伝導体の接合を考え、その強磁性体中で磁壁が振動運動している場合の電流電圧特性を理論的に導きました。その結果、磁壁の振動数の整数倍に比例定数をかけた電圧のところで、電流電圧特性が階段状に変化しうることを見出しました。この結果は、磁壁の振動数を高精度で求める原理となり得るものです。今回検討した磁壁の運動は単振動でしたが、異なった振動数をもつ振動運動の重ね合わせの解析にも応用できる可能性があります。今後、この原理を応用して磁壁運動を高感度かつ高精度に測定することが出来るようになれば、磁壁を用いたデバイス開発を促進することが期待されます。

【発表論文】

“Towards precise measurement of oscillatory domain wall by ferromagnetic Josephson junction”

Shin'ichi Hikino, Michiyasu Mori, Wataru Koshibae, and Sadamichi Maekawa, Appl. Phys. Lett. 100, 152402 (2012)