

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 16 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540387

研究課題名(和文)異なる秩序状態の融合による高感度伝導制御

研究課題名(英文)Highly sensitive transport by merging different ordered states

研究代表者

森 道康(Mori, Michiyasu)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 先端基礎研究センター・研究主幹

研究者番号：30396519

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：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曲線を導いた。特徴的なのは、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、電流電圧曲線が階段状に変化しうることである。その比例係数は、高精度で決められた基礎物理定数のみで与えられ、電圧も9桁という極めて高い精度で決まるので、磁壁の振動数自体も高精度で観測が可能になると分かった。磁壁の幅が変化する場合や、接合の形状効果などについても電流電圧曲線に同様の変化が現れることも分かった。

研究成果の概要(英文)：We have studied the current-voltage (I-V) curve of a superconducting junction separated by a ferromagnet, in which a magnetic domain-wall oscillates. It is surprising that the I-V curve shows step-wise structures at voltages proportional to an oscillation frequency of the domain wall. Its coefficient is determined by fundamental constants, which are precisely determined. The voltage is also accurately measurable up to the 9th digit. Therefore, our equation shows that the oscillation frequency of the domain-wall is also precisely observable. Also in other cases as an oscillation of the width of domain-wall and the effect of device geometry, the I-V curve shows the similar changes.

研究分野：物性理論

キーワード：ジョセフソン効果 超伝導 強磁性 シャピロステップ 磁壁 フィスケ共鳴

1. 研究開始当初の背景

電子は様々な秩序状態を示す。超伝導状態や強磁性状態はその代表例である。これらの秩序状態は様々な形で応用されエレクトロニクスの根幹を担っている。その典型がジョセフソン接合である。超伝導体を絶縁体や金属で隔てたジョセフソン接合は、1990年1月1日以降、世界の電圧標準として我々の生活を根本から支えている。量子ホール効果を用いた抵抗標準と共に直流低周波の電気標準を与え、科学技術の基盤を支えている。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ない。

一方、電子のスピンをエレクトロニクスに応用するスピントロニクスが近年注目を集めている。磁性体における伝導現象は、スピンの流れであるスピン流に関する基礎理論の構築と微細加工技術を両輪として、急速に発展している研究分野である。そして、強磁性体内の磁壁を電流で直接制御することが現実のものとなっている。このような磁化制御は、磁気ランダムアクセスメモリや、高周波発振などへの応用が可能であり、スピントロニクス分野における重要な研究課題となっている。

上記のように磁壁を電流で駆動することは現実に可能となっているが、その運動学については未解明の部分が多くある。その理由のひとつは、磁壁そのものが内部構造を持つからである。実際の磁壁は多くのスピンによって構成されているため、あたかも膜のように変形することが出来る。それらの運動を理論的に解析することは、磁壁をデバイスへ応用する際に重要な問題であり、理論的解析が精力的に進められている。

2. 研究の目的

本研究では、異なる秩序状態を融合させることで、超高感度な電流やスピン流などの伝導制御もしくは観測方法の提案を目的とする。特に、強磁性体を介したジョセフソン接合を用いて、磁性体に含まれる磁壁の運動状態を観測する手段を与える。

3. 研究の方法

まずジョセフソン接合の輸送特性に関して概略を述べた後、研究の方法について説明する。ジョセフソン接合にマイクロ波を照射すると、電流電圧特性に図1のようなステップが現われる。これはシャピロステップと呼ばれている。ステップが現われる電圧

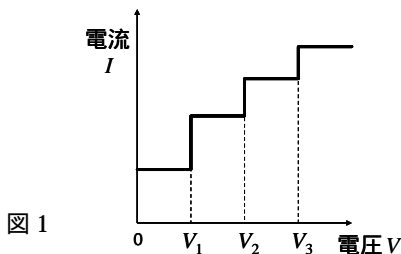


図1

$V_n(n=1,2,3,..)$ は、外部から与えたマイクロ波

$$V_n = n \frac{\hbar}{2e} \omega \quad (1)$$

の周波数と式(1)の関係で結ばれている。ここで、 \hbar はプランク定数、 e は電荷素量を表し、各々普遍定数であるため、電圧がマイクロ波の周波数のみで決まることになる。この関係を利用して世界の電圧標準が決められている。マイクロ波の周波数は12桁という高精度で制御が可能であり、そのとき電圧は9桁という驚異的な精度で規定することが出来る。超伝導接合は、抵抗とコンデンサーとコイルで構成された並列回路と考えることができ、式(1)の結果はこの等価回路模型を用いて導くことが出来る。ただし、コイルの部分は超伝導接合と磁場との結合を表すものに置き換える。

この等価回路模型を、図2に示すような超伝導体が強磁性体で隔てたジョセフソン接合に応用して、強磁性体中の磁壁の運動状態を高精度に観測する方法を提案する。図2の赤矢印は磁化を表す。

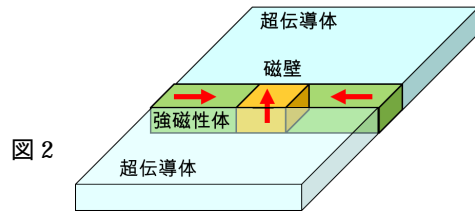


図2

4. 研究成果

まず、図2に示したような単一の磁壁の運動を、超伝導体を用いて高精度で観測する原理に取り組んだ[発表論文]。強磁性体で隔てられた超伝導体の接合(強磁性ジョセフソン接合)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、等価回路模型を用いて導いた。磁壁の振動運動は、強磁性体に電流を流すことで誘起することが可能で、確立した実験技術である。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、コイルに相当する素子は、超伝導体間を流れる超伝導電流成分に対応する。超伝導電流成分は磁気との結合があるため、超伝導電流成分を通して磁壁の振動運動の寄与が理論式に取り込まれる。その

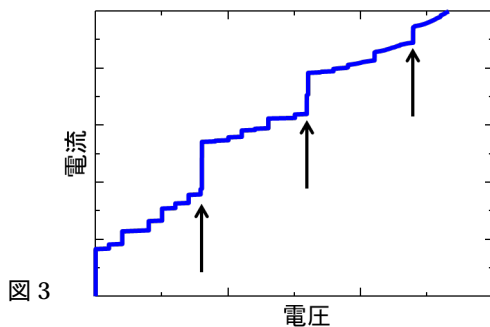
$$V_n = n \frac{\hbar}{2e} \Omega \quad (2)$$

結果、式(2)のように、磁壁の振動数の整数倍に式(1)と同じ比例定数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見出した。ただし、式(1)のシャピロステップの場合と異なるのは、外部磁場の周波数が、磁壁の振動数に置き換わっている点である。従って、磁壁の振動数自体が高精度で観測が可能になる。

次に、磁壁の幅が振動する状態(ブリージングモード)を、高精度に検出する方法と取り組んだ[発表論文]。磁壁は多くの電子スピンの集合であり、粗視化された微小磁化の集まりである。磁壁の運動が集団座標で記述されることは良く知られている。一次元系の場合、磁壁の位置と磁壁面の傾きが集団座標に相当する。これらの変数は、困難軸異方性やピン止めポテンシャルに対して、磁壁の厚みが一定と見なせる場合に成り立つ。しかし、磁壁の運動には、常にエネルギーの散逸が伴う。この散逸まで含めて磁壁の運動を考察すると、磁壁の幅も時間と共に変化して良いことが分かる。特に、磁壁がポテンシャルに束縛されている場合、ブリージングモードが数値計算を用いて示されており、それをマイクロ波発信に応用しようとする提案もある。磁壁の位置の振動と、ブリージングモードの両者が存在する場合について、再び等価回路模型を用いて電流電圧特性を計算した。その結

$$V_n = \frac{\hbar}{2e}(n\Omega + mv) \quad (3)$$

果、式(3)のように磁壁の振動数 の整数倍に加え、ブリージングモードの振動数 の整数倍にも同じ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が分かった。特徴的な点は、磁壁の位置が振動している場合に比べ、ブリージングモードの方が、変化が遥に大きいことである。図3にその一例を示す[発表論文]。階段状の変化が多くみられるが、矢印で示した大きなステップの部分ブリージングモードに対応する。



ブリージングモードは、理論的に存在が指摘されているが、実験で確認されていない。一方、磁壁駆動の臨界電流の大きさを決めると主張する研究もあり、ブリージングモードの存在を確認することは重要である。この成果は、磁壁のブリージングモードを観測する有力な手段になり得るものである。

ここまで、強磁性体中の磁壁の振動や、磁壁の幅が振動する状態(ブリージングモード)が、階段状の電流電圧特性となって現れることを示した。このような特性が得られる背景には、超伝導秩序変数が振幅と位相によって定まり、この位相が電磁場と結合する事実がある。一方、接合の大きさが超伝導体の磁場侵入長より大きくなると、接合内に電磁

場の共振モードが生まれ、フィスケ共鳴と呼ばれる共鳴構造が電流電圧特性中に現れる。このフィスケ共鳴では、接合に与える静磁場の大きさによって、共鳴構造が現れる電圧の値が変わる。このような接合内における電磁場の共振モードは、形状によって敏感に変化する可能性がある。強磁性体で隔てられた超伝導体の接合を考え、強磁性体の厚みが不均一な場合の電流電圧特性を計算した[発表論文]。等価回路模型を用い、与えられた接合形状における接合内の超伝導秩序変数の位相に対する運動方程式と、強磁性体の線形化した運動方程式を連立させて解くことで、電流電圧特性を求めた。その結果、通常知られているフィスケ共鳴以外に、複数のフィスケ共鳴構造が表れることが分かった。これら複数のフィスケ共鳴は、強磁性共鳴に対応するものであり、磁化の運動に起因するものである。そして、強磁性共鳴と接合内の電磁場モードは、互いに結合した複合モードになっていることが、電圧依存性から分かった。また、接合面に垂直な面に対して完全反対称な形状の場合、フィスケ共鳴構造が一部制限されることも分かった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計20件)

Z. Xu, B. Gu, M. Mori, T. Ziman, and S. Maekawa, "Sign change of the spin Hall effect due to electron correlation in non-magnetic CuIr alloys", *Phys. Rev. Lett.* **114**, 017202 (2015) 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.017202
T. Sugimoto, M. Mori, T. Tohyama, and S. Maekawa, "Magnetization Plateaux by Reconstructed Quasi-spinons in a Frustrated Two-Leg Spin Ladder under a Magnetic Field", *Phys. Rev. B* **92**, 125114 (2015) 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevB.92.125114
W. Koshibae and N. Nagaosa, "Theory of antiskyrmions in magnets", *Nat. Commun.* **7**, 10542(1-8) (2015) 査読有

DOI: 10.1038/ncomms10542
M. Mori, A. Spencer-Smith, O. P. Sushkov, and S. Maekawa, "Origin of the Phonon Hall Effect in Rare-Earth Garnets", *Phys. Rev. Lett.* **113**, 265901 (2014) 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.265901
S. Hikino, M. Mori, and S. Maekawa, "Zero-field Fiske Resonance Coupled with Spin-waves in Ferromagnetic Josephson Junctions", *J. Phys. Soc. Jpn.*, **83**, 074704 (2014) 査読有

DOI: 10.7566/JPSJ.83.074704
M. Mori, W. Koshibae, S. Hikino, and S. Maekawa, "Possible method to

observe the breathing mode of a magnetic domain wall in the Josephson junction", J. Phys.: Condens. Matter **26**, 255702 (2014) 査読有
DOI: 10.1088/0953-8984/26/25/255702
W. Koshibae and N. Nagaosa, "Creation of skyrmions and antiskyrmions by local heating", Nat. Commun. **5**, 5148(1-11) (2014) 査読有
DOI: 10.1038/ncomms10542
O. P. Sushkov, A. I. Milstein, M. Mori, S. Maekawa, "Relativistic effects in scattering of polarized electrons", EPL, **103**, 47003 (2013) 査読有
DOI: 10.1209/0295-5075/103/47003
T. Sugimoto, M. Mori, T. Tohyama, and S. Maekawa, "Effects of frustration on magnetic excitations in a two-leg spin-ladder system", Phys. Rev. B **87**, 155143 (2013) 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.87.155143
S. Hikino, M. Mori, W. Koshibae, and S. Maekawa, "Towards precise measurement of oscillatory domain wall by ferromagnetic Josephson junction", Appl. Phys. Lett. **100**, 152402 (2012), 査読有
DOI: 10.1063/1.3701782

[学会発表](計 31 件)

M. Mori, W. Koshibae, S. Hikino, and S. Maekawa, "A possible way to observe the breathing mode of magnetic domain wall", The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems, 2014 年 7 月 7 日 ~ 14 日, Grenoble (France)

森道康, 小椎八重航, 挽野真一, 前川禎通, "ジョセフソン接合を用いた磁壁振動モードの測定方法", 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 27 日 ~ 30 日, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)

M. Mori, S. Hikino, W. Koshibae, and S. Maekawa, "Magnetic characteristics of Josephson junctions with ferromagnetic layer", The 12th Asia Pacific Physics Conference, 2013 年 7 月 14 日 ~ 19 日, 幕張メッセ(千葉県・美浜区)

M. Mori, S. Hikino, W. Koshibae, and S. Maekawa, "Josephson effect involving magnetic domain wall motion", Materials and Mechanisms of Superconductivity 2012, 2012 年 7 月 29 日 ~ 8 月 3 日, Washington DC(USA)

[その他]

ホームページ等

<http://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/spine>

[energy/morimichi/morihome.html](http://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/spine/energy/morimichi/morihome.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 道康 (MORI, Michiyasu)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 先端基礎研究センター・研究主幹

研究者番号: 30396519

(2) 研究分担者

小椎八重 航 (KOSHIBAE, Wataru)

国立研究開発法人理化学研究所 創発物性科学研究センター・上級研究員

研究者番号: 20273253