

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540358

研究課題名（和文）多ギャップ固有ジョセフソン接合におけるジョセフソン効果とレゲット・モード

研究課題名（英文）Josephson effect and Leggett mode in multi-gap intrinsic Josephson junctions

研究代表者

小山 富男 (KOYAMA TOMIO)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：30153696

研究成果の概要（和文）：多ギャップ超伝導体を用いて作られるジョセフソン接合系におけるレゲットモードの理論を構築した。この理論を、固有接合に応用し、ジョセフソン振動とレゲット・モードとの共鳴から生じる共鳴効果を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：A theory for the Leggett mode in Josephson junctions made of multi-gap superconductors has been constructed. The effect originating from the resonance between the Leggett mode and the Josephson oscillations has been clarified in intrinsic Josephson junction stacks on the basis of this theory.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：固有ジョセフソン効果、多ギャップ超伝導体

1. 研究開始当初の背景

複数のギャップパラメーターが定義できる多ギャップ超伝導体では、レゲット・モードと呼ばれる位相モードが存在する。しかし、長波長領域でこのモードは電氣的に中性なため、実験的に観測するのは容易ではない。このため、このモードをクリアーに観測する実験はこれまで行われてこなかったのが現状である。しかし、2008年に発見された、高い超伝導転移温度を持つ鉄系超伝導体が多ギャップ超伝導体であることが認識され、状況は大きく変わり、レゲット・モードに関す

る研究が活発化した。本研究は、2009年に発見された巨大な異方性を持つ鉄系超伝導体の発見に端を発している。この超伝導体の異方性は、極めて大きく、ビスマス系銅酸化物超伝導体を凌ぐほどであり、従って、固有ジョセフソン効果が期待できることを示していた。固有ジョセフソン系では、その電圧状態で、ナノスケールで空間変化する非一様な電場分布が実現する。したがって、この状態では、レゲット・モードは電磁場と結合することが期待できる。さらに、ジョセフソン振動とレゲット・モードの間の共鳴現象も

期待できるので、レゲット・モードのクリアな検出がジョセフソン効果の観測により可能となるものと考えられる。しかし、これまでに、レゲット・モードを取り入れたジョセフソン効果の理論は構築されていない。したがって、多ギャップ超伝導体におけるジョセフソン効果の理論的研究が重要課題となってきた。

2. 研究の目的

本研究では、複数の超伝導ギャップを持つ超伝導体に存在する集団励起モードであるレゲット・モードを取り入れた固有ジョセフソン効果の理論を構築する。さらに、この理論に基づき、レゲット・モードを明瞭に検出できる実験法を提案する。本研究で構築される理論は、最近発見された大きな異方性を持ち、かつ、固有ジョセフソン効果を示すことが期待される鉄系超伝導体に適用される。特に、ジョセフソン振動とレゲット・モードの共鳴に起因する共鳴現象の全様を明らかにすることを主要な目標とする。

3. 研究の方法

本研究では、固有ジョセフソン接合を形成する鉄系超伝導体に対する微視的モデルから出発し、この接合系の超伝導位相が従う低エネルギー有効理論を導出する。この有効理論は、超伝導位相差に対する古典的ラグランジアンを与える。さらに、このラグランジアンから導かれる非線形連立微分方程式を数値的に解くことにより、固有ジョセフソン接合系のジョセフソン特性を明らかにする。特に、ジョセフソン振動とレゲット・モードの共鳴現象から現れるジョセフソン特性が計算できる理論を構築する。

4. 研究成果

多ギャップ超伝導体と従来型超伝導体を用いて形成されるヘテロ接合系のジョセフソン特性の解明：この課題では、多ギャップ超伝導体のギャップの対称性の違いによりジョセフソン磁束の構造、臨界電流の温度変化、及び、シャピロステップの構造に明瞭な違いが現れることを明らかにした。さらに、多結晶試料の臨界電流に対するグレイン境界の効果も解明した。

多ギャップ超伝導体におけるレゲット・モードの研究：ギャップパラメーターの数が3以上の超伝導体の場合のレゲット・モードを考察し、バンド間結合の符号の違いによる分散関係の変化を解明した。この符号の集合に対して、レゲット・モードは明瞭にダイナミカルクラスに分類されることを明らかにした。また、ヘテロ接合系に対するレゲット・モードの効果も解明した。

多ギャップ固有ジョセフソン接合系にお

けるレゲット・モードの研究： $\text{Sr}_2\text{SeFeP}_3$ 等の鉄系超伝導体は超伝導層間の間隔が広いいため、層間結合が弱くジョセフソン結合になっていることが期待される。このような多ギャップ固有ジョセフソン接合系における超伝導位相差が従う運動方程式を微視的理論から導出した。さらに、この運動方程式を数値的に解くことにより、電流-電圧特性の計算を行った。ジョセフソン振動とレゲット・モードの間の共鳴効果に起因するステップ状のアノマリーが、電流-電圧特性に現れることを示した。

多ギャップ超伝導体ヘテロ接合系における巨視的量子トンネル効果 (MQT) の研究：多ギャップ系で存在するレゲット・モードがジョセフソン接合系のMQTに与える効果を調べ、理論的定式化を与えた。この系のクーバー対のトンネルレートはレゲット・モードとの相互作用により、顕著に増大することを明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 19 件)

- ① T. Koyama and M. Machida, "Nonlocal Ginzburg-Landau Theory for Superconductors", (査読有), *Physica C* 484 (2013) 100-103. doi:10.1016/j.physc.2012.02.019
- ② T. Koyama, "The Electric Field Effect and Electromagnetic Emission in Intrinsic Josephson Junctions", (査読有) *Supercond. Sci. Technol.* 26 (2013) 045018. doi:10.1088/0953-2048/26/4/045018
- ③ M. Machida, Y. Ota, T. Koyama and M. Matsumoto, "Electromagnetic Wave Emission from Intrinsic Josephson Junction Stacks: A Review of Theory and Simulation", (査読有), *J. Phys. Conf. Ser.* 393 (2012) 012013. doi:10.1088/1742-6596/393/1/012013
- ④ Y. Ota, K. Kobayashi, M. Machida, T. Koyama and F. Nori, "Direct Numerical Simulation for Non-Equilibrium Transport Phenomena in Superconducting Detectors", (査読有), *Physics Procedia*, 27 (2012) 352-355. doi:10.1016/j.phpro.2012.03.483
- ⑤ T. Koyama, H. Matsumoto, Y. Ota and M. Machida, "Numerical Study for Electromagnetic Wave Emission in Thin Samples of Intrinsic Josephson Junctions", (査読有), *Physica C* 471 (2011) 1202-1205.

- doi:10.1016/j.physc.2011.05.159
- ⑥ Y. Ota, M. Machida and T. Koyama, “Theory of Phase Dynamics in Intrinsic Josephson Junctions with multi-gap superconducting layers” (査読有), *Physica C* 471 (2011) 760–762. doi:10.1016/j.physc.2011.05.047
- ⑦ Y. Chizaki, H. Kashiwaya, S. Kashiwaya, T. Koyama and S. Kawabata, “Macroscopic Quantum Tunneling Induced by a Spontaneous Field in Intrinsic Josephson Junctions”, (査読有), *Physica C* 471 (2011) 758–759. doi:10.1016/j.physc.2011.05.046
- ⑧ T. Koyama, H. Matsumoto, M. Machida and Y. Ota, “Multi-scale Simulation for Terahertz Wave Emission from the Intrinsic Josephson Junctions”, (査読有), *Supercond. Sci. Technol.* 24 (2011) 085007. doi:10.1088/0953-2048/24/8/085007
- ⑨ T. Koyama, Y. Ota and M. Machida, “Resonant Effect in the Voltage State of Intrinsic Josephson Junction Stacks with Multiple Tunneling Channels”, (査読有), *Phys. Rev. B* 83 (2011) 220501(R)/1–4. doi:10.1103/PhysRevB.83.220501
- ⑩ Y. Ota, M. Machida and T. Koyama, “Variety of c-Axis Collective Excitations in Layered Multigap Superconductors”, (査読有), *Phys. Rev. Lett.* 106 (2011) 157001/1–4. doi:10.1103/PhysRevLett.106.157001
- ⑪ Y. Ota, M. Machida, T. Koyama and H. Aoki, “Collective Modes in Multiband Superfluids and Superconductors”, (査読有), *Phys. Rev. B* 83 (2011) 060507/1–4. doi:10.1103/PhysRevB.83.060507
- ⑫ Y. Ota, M. Machida and T. Koyama, “Macroscopic Quantum Tunneling in Multigap Superconducting Josephson Junctions: Enhancement of Escape Rate via Quantum Fluctuations of the Josephson-Leggett Mode”, (査読有), *Phys. Rev. B* 83 (2011) 060503/1–4. doi:10.1103/PhysRevB.83.060503
- ⑬ M. Tachiki, K. Ivanovic, K. Kadowaki and T. Koyama, “Emission of Terahertz Electromagnetic Waves from Intrinsic Josephson Junction Arrays Embedded in Resonance LCR Circuits”, (査読有), *Phys. Rev. B* 83 (2011) 014508/1–7. doi:10.1103/PhysRevB.83.014508
- ⑭ Y. Ota, M. Machida, T. Koyama and H. Matsumoto, “Collective Modes and Josephson Vortices in a Heterotic Josephson Junction between Single- and Two-gap Superconductors”, (査読有), *Physica C* 470 (2010) S882–S883. doi:10.1016/j.physc.2009.10.023
- ⑮ Y. Ota, M. Machida and T. Koyama, “Inter-grain Josephson Currents in Two-gap Superconductors”, (査読有), *Physica C* 470 (2010) S489–S490. doi:10.1016/j.physc.2009.11.016
- ⑯ T. Koyama, H. Matsumoto and M. Machida, “Numerical Simulations for THz Wave Emission from High-Tc Intrinsic Josephson Junctions”, (査読有), *Physica C* 470 (2010) S230–S231. doi:10.1016/j.physc.2009.11.021
- ⑰ Y. Ota, M. Machida and T. Koyama, “Theory of Josephson Effects in Iron-based Multi-gap Superconductor Junctions”, (査読有), *J. Phys. Conf. Ser.* 248 (2010) 012040/1–8. doi:10.1088/1742-6596/248/1/012040
- ⑱ M. Machida, Y. Ota, N. Sasa, T. Koyama and H. Matsumoto, “Theory and Simulation of Electromagnetic Wave Emission from Intrinsic Josephson Junctions”, (査読有), *J. Phys. Conf. Ser.* 248 (2010) 012037/1–8. doi:10.1088/1742-6596/248/1/012037
- ⑲ Y. Ota, M. Machida, T. Koyama and H. Matsumoto, “Shapiro Steps as a Direct Probe of pm s-wave Symmetry in Multi-gap Superconducting Josephson Junctions”, (査読有), *Phys. Rev. B* 82 (2010) 140509/1–4. doi:10.1103/PhysRevB.82.140509
- [学会発表] (計 6 件)
- ① 小山富男、固有ジョセフソン接合からの T z 発振の新機構、(招待講演)、日本物理学会第 68 年次大会、2013 年 3 月 26 日、広島
- ② 小山富男、固有ジョセフソン接合における電界効果とテラヘルツ波発振、(招待講演)、第 20 回渦糸物国内会議、2012 年 12 月 9 日、岡山
- ③ 小山富男、” Numerical Study for Electromagnetic Wave Emission from Intrinsic Josephson Junction Stacks with a Dielectric Cove”, (招待講演), The 8th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and Plasma Oscillations in Tc Superconductors, 2012 年 6 月 11 日、トルコ
- ④ 小山富男、” Numerical Simulations for

THz Emission in IJJ's", (招待講演),
Path breaking Phase Sciences in
Superconductivity 2012, 2012年1
月13日、大阪

⑤ 小山富男、" Numerical Simulations for
THz Emission in IJJ's", (招待講演),
2nd JST-DFG Workshop on Terahertz
Superconductor Electronics, 2011
年10月18日、ドイツ

⑥ 小山富男、" Numerical Simulations for
Electromagnetic Emission from a Thin
Film Device of Intrinsic Josephson
Junctions", (招待講演), The 7th
International Symposium on Intrinsic
Josephson Effects and Plasma
Oscillations in High temperature
Superconductors, 2010年5月1日、
青森

[図書] (計 1件)

M. Kato, T. Ishida, T. Koyama and M.
Machida, InTech 社, "Composite structures
of d-wave and s-wave superconductors" in
Superconductors - Materials, Properties
and Applications" 2012年, .319-342
ページ.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小山 富男 (KOYAMA TOMIO)
東北大学・金属材料研究所・助教
研究者番号: 30153696

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

町田 昌彦 (MACHIDA MASAHIKO)
日本原子力研究開発機構・計算科学技術
センター・研究主幹
研究者番号: 60360434