

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560017

研究課題名(和文) 面間トンネルスペクトロスコピーによる高温超伝導銅酸化物の擬ギャップ相の研究

研究課題名(英文) Study of interlayer tunneling spectroscopy on the pseudogap phase in cuprate superconductors

研究代表者

北野 晴久 (Kitano, Haruhisa)

青山学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：00313164

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：擬ギャップ相は高温超伝導銅酸化物の複雑な超伝導相図を特徴づける電子相として注目されている。本研究では、集束イオンビームで微細加工された銅酸化物単結晶の微小接合素子に対する面間微分伝導度スペクトル測定を行い、擬ギャップ的挙動の観測とスペクトルへの影響が問題となった自己発熱効果の低減に取り組んだ。接合面積が1平方マイクロメートルかつ接合数が10個以下の微小な少数接合素子を集束イオンビーム加工のみで作製することに成功し、微分伝導度スペクトルの温度変化から擬ギャップの観測に成功した。さらに、ギャップサイズの精密測定に向けて微分伝導度測定の短パルス化を検討し、1桁以上短縮できる見通しを得た。

研究成果の概要(英文)：The pseudogap state in cuprate superconductors has been attracted, since it is an unusual electronic phase characterizing the complex phase diagram in them. In this study, we measured the interlayer tunneling spectra for small intrinsic Josephson junctions (IJJs) fabricated from crystalline cuprate superconductors by using focused ion beam (FIB) techniques, and tried to observe the pseudogap in the differential conductance spectra and to reduce the self-heatings giving serious influences to the measured spectra. We succeeded in fabricating small IJJs with lateral area of 1 micrometer squared and a small number of junctions less than 10, by using only FIB techniques, and in observing a clear signature of the pseudogap in the measured spectra. We also obtained a prospect on a short pulse method, which can more effectively reduce the self-heatings to obtain more precise spectra.

研究分野：物性物理、特に超伝導の基礎と応用

キーワード：高温超伝導 固有ジョセフソン接合 トンネルスペクトロスコピー 自己発熱効果 擬ギャップ 超伝導ギャップ 集束イオンビーム

1. 研究開始当初の背景

本研究代表者は、平成15年度より19年度にかけて高温超伝導銅酸化物の超伝導転移温度近傍における臨界揺らぎ現象をマイクロ波精密ブロードバンドスペクトロスコピーの手法を用いて測定し、擬ギャップの起源が超伝導揺らぎだけでは説明できないことを見出した (H. Kitano et al. Phys. Rev B 73 (2006) 092504)。さらに、広い組成範囲における臨界揺らぎの系統的研究から臨界現象の普遍性クラスが超伝導相内部で突然変化する挙動を発見した (T. Ohashi et al., Phys. Rev. B 79 (2009) 184507)。この挙動は超伝導とは別の秩序相 (おそらく、擬ギャップ相) に対する隠れた量子臨界点の存在を強く示唆したが、擬ギャップを直接検知するには別の実験手段を開発する必要があった。この研究と並行し、本研究代表者は Bi 系高温超伝導銅酸化物などの固有ジョセフソン接合 (以下、IJJ) 素子における巨視的量子トンネル (以下、MQT) 現象の観測実験にも取り組み (K. Ota et al., Phys. Rev. B 79 (2009) 134505)、集束化イオンビーム (以下、FIB) による微細加工技術を用いた微小接合素子の作製や電流電圧特性などの実験環境を整備してきた (基盤研究 C 一般 21560020、平成 21~23 年度、研究代表者)。

擬ギャップの直接検出は、走査型トンネル顕微鏡 (STM) や角度分解光電子分光 (ARPES) など表面の電子状態に敏感な測定手段がよく利用されてきたが、物質のバルクの性質を真に検出しているのかどうかに関して不安が残る。一方、バルクの測定手段として、メサ型微小 IJJ 素子への面間トンネルスペクトロスコピーが試みられたが、STM や ARPES とは必ずしも一致しない実験結果について、有限電圧状態における自己発熱効果の影響などが議論されていた。

2. 研究の目的

本研究では、IJJ 系における MQT 現象の研究で培った微小素子作製技術とパルス測定技術を駆使し、メサ型 IJJ 素子とは異なる素子構造の IJJ 素子による面間トンネルスペクトロスコピーの実現に取り組み、自己発熱効果の影響の検証と擬ギャップの精密観測を目指す。さらに、超伝導相だけでなく反強磁性秩序相も含めた広い組成範囲の面間トンネルスペクトロスコピーから上述した状況の打開を目指す。また、本研究で開発された実験技術を IJJ 系の MQT 現象やその他の研究対象にフィードバックさせて、新たな研究展開を図る。

3. 研究の方法

(1) 単結晶試料の作製と IJJ 素子の作製

超伝導転移温度が最大となる最適ドーブ組成から不足ドーブ組成および超伝導が消失する反強磁性秩序相までの広い組成範囲を調べるために、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2(\text{Ca}_{1-x}\text{Y}_x)\text{Cu}_2\text{O}_y$ (以下

Y-Bi2212) 単結晶試料を作製し、FIB 加工技術を用いて微小接合素子を作製する。

(2) パルス法による電流電圧特性の測定と自己発熱効果の検証

印加電流パルスのパルス幅を系統的に変えた電流電圧特性の測定から有限電圧状態における自己発熱効果の影響を定量的に検証すると共に、自己発熱効果の低減に有効な素子構造とパルス測定手段を調べる。

(3) 面間トンネルスペクトロスコピーの実施と擬ギャップ状態の観測

微小かつ少数接合の IJJ 素子に対する面間トンネルスペクトロスコピーから、超伝導ギャップや擬ギャップを決定し、その温度依存性を調べる。

(4) 本研究で得られた実験技術による新たな研究展開

自己発熱効果を低減するために開発する少数接合 IJJ 素子の作製技術とパルス法による電流電圧特性の測定技術を IJJ 系の MQT 現象及び鉄系超伝導体における固有ジョセフソン効果に関する以下の研究 (①と②) にフィードバックさせ、新たな展開を図る。

① 高次スイッチ事象における MQT 的挙動の検証

少数接合の微小 IJJ 素子を作製する実験技術を応用し、IJJ 系の MQT 現象で未解決の第 2 スイッチ事象など高次スイッチ事象における MQT 的挙動の起源を調べる。

② 鉄系超伝導体 $\text{Fe}(\text{Se},\text{Te})$ における固有ジョセフソン効果の検証

Fe 原子層と (Se,Te) 原子層が交互に積層した結晶構造を持ち、鉄系超伝導体の中で最も単純な層状超伝導体と見なせる $\text{Fe}(\text{Se},\text{Te})$ 単結晶を Bi 系銅酸化物の IJJ 素子と同様に FIB で微細加工し、固有ジョセフソン効果について検証する。

4. 研究成果

(1) 単結晶試料の作製と IJJ 素子の作製

これまでに作製した最適ドーブ組成の $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 単結晶に加え、Y 置換量の増加により CuO_2 面へ注入されるキャリアドーブ量を系統的に減少させた 4 種類の Y-Bi2212 単結晶試料 ($x=0.1, 0.2, 0.3, 0.6$) を、浮遊帯溶融法を用いて作製した。特に、 $x=0.6$ の単結晶試料は絶縁体的な電気伝導性を示し、絶対温度 5 K まで超伝導を示さないことを確認した。これより不足ドーブ組成 ($x=0.1\sim 0.3$) から最適ドーブ組成 ($x=0.0$) までの超伝導相および反強磁性秩序相 ($x=0.6$) の広い組成範囲を含む単結晶試料を得ることに成功した。

次に FIB 微細加工の各工程を再検討し、単結晶試料の固定位置最適化やイオンミリング加工時のチャージアップ対策の徹底化に

より、接合面積が1平方マイクロメートルかつ接合数が10以下の微小なIJJ素子を作製することに成功した。さらに、走査型イオン顕微鏡の観察像から決定した見かけの接合部厚みとパルス法で得られた電流電圧特性から決定した接合数から求めた真の接合部厚みに100ナノメートル程度の差異があることを見出した(図1参照)。この原因を検証するため、透過型電子顕微鏡を用いてFIB加工部の電子回折像を解析し、FIB加工のダメージにより形成されるアモルファス層の厚みが50~60ナノメートルであることを発見した。この結果は図1の結果とよく整合しており、Bi系高温超伝導銅酸化物に対するFIB加工の影響が初めて定量的に評価されたことを意味する。

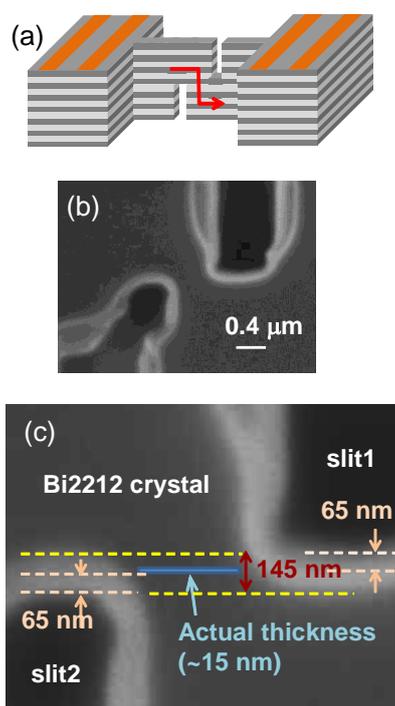


図1: (a) IJJ素子の模式図, (b) 接合部の走査イオン顕微鏡写真, (c) 接合部の拡大図

(2) パルス法による電流電圧特性の測定と自己発熱効果の検証

(1) で述べた微小IJJ素子に電流パルスを印加し、入力電流パルスの振幅を系統的に変化させて出力電圧パルスの振幅を測定することにより、微小IJJ素子の電流電圧特性を測定した。全ての接合が電圧状態にスイッチし、かつ超伝導ギャップを超えて常伝導状態に移ったことによる電流電圧特性の凸カーブ的特性を観測し、微小IJJ素子に含まれる接合数が10であることを確認した(図2参照)。その後、同様な手法で接合数が6個の微小IJJ素子の電流電圧特性の測定にも成功した。これにより、接合数が10以下の微小IJJ素子をFIB加工だけで作製できることが実証された。また、電流電圧特性から評

価されたゼロ電圧状態からの第一スイッチング電流密度およびゼロ電圧状態への再補足電流密度は、それぞれ2.65 kA/cm²および83 A/cm²であり、本手法で高品質の微小かつ少数接合のIJJ素子が作製できることが示された。

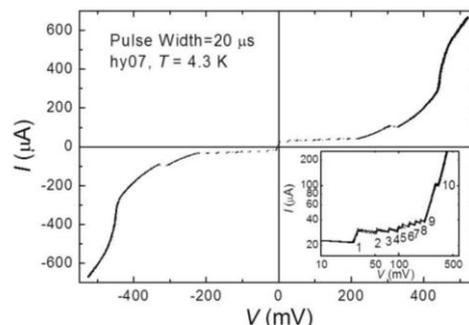


図2: パルス法で測定された電流電圧特性

次に、印加電流パルスのパルス幅(5~200マイクロ秒)を系統的に変えた測定から、接合部の面積が1平方マイクロメートルかつ接合数10の微小なIJJ素子ならば、超伝導ギャップよりも小さい電圧領域ではパルス幅増大に伴う電流電圧特性の変化はほぼ観測されず、自己発熱効果の影響が無視できることが確認された(図3参照)。しかしながら、超伝導ギャップよりも大きい電圧領域ではパルス幅増大と共に微分伝導度が減少する振舞いが観測され、自己発熱効果の影響が微分伝導度スペクトルに影響することが確認された。このため、スペクトルから得られる超伝導ギャップが過去の文献値よりも小さい値を示すことが判明した。一方、接合面積が5平方マイクロメートルかつ接合数が50以上のIJJ素子の場合、低温の電流電圧特性に負性抵抗的挙動が観測され、顕著な自己発熱効果を示すことが判明した。

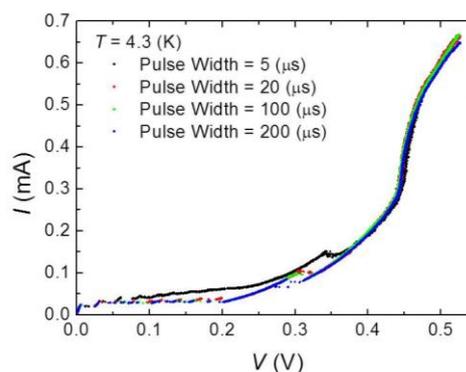


図3: 電流電圧特性のパルス幅依存性

以上のことから、自己発熱効果の影響を抑制するには、接合面積1平方マイクロメートル以下かつ接合数が10以下の微小かつ少数接合のIJJ素子作製が有効であること、および超伝導ギャップや擬ギャップの評価など高電圧領域の微分伝導度スペクトルを精密

に測定するには、IJJ 素子に印加する電流パルスのパルス幅を1マイクロ秒以下にする必要があること、などの知見が得られた。その後、パルス幅の制限要因を突きとめるため、素子形状や測定回路について再検討した結果、測定回路に使用されていた差動増幅器の高周波応答特性が制限要因であることが判明した。改善方法を IJJ 素子と同程度の電気抵抗を持つチップ抵抗を用いて検討した結果、差動増幅器を用いず、標準抵抗と測定素子に対する入出力波形を直接デジタルオシロスコープに取り込んでから差動化することにより、少なくとも室温から液体窒素温度までの温度領域で1マイクロ秒以下の短パルス測定が実施できることを確認した。さらに、市販の10×プローブなどを用いてデジタルオシロスコープへの入力インピーダンスを増大させると、パルス立ち上がり時間を短縮できることも見出した。以上の検証結果を踏まえ、測定回路の4チャンネル化と入力インピーダンスの10倍化専用回路の試作を行った。今後、IJJ 素子への測定に適用し、パルス幅を1マイクロ秒以下に短縮した微分伝導度スペクトルの測定から自己発熱効果の低減効果を検証していく予定である。

(3) 面間トンネルスペクトロスコピーの実施と擬ギャップ状態の観測

パルス法によって測定された電流電圧特性を直接数値微分すると滑らかな微分伝導度スペクトルが得られないため、超伝導ギャップや擬ギャップの観測が困難であることが判明した。このため、ロックイン検出の手法を用いて1階微分成分を直接得る方法などを検討したが、電流電圧特性を電圧の多項式でデータフィッティングし、その数値微分から滑らかな微分伝導度スペクトルを得る方法がより実効的であることを確認した。この方法により、超伝導ギャップに起因する明瞭なコヒーレンスピークを示す微分伝導度スペクトルを得ることに成功した(図4参照)。さらに、同様な手法を超伝導転移温度以上の常伝導状態で得られた電流電圧特性に適用し、擬ギャップの形成に伴う微分伝導度の減少を観測した。また、その温度依存性から最適ドープ組成では絶対温度約200 Kで擬ギャップが閉じることも確認した。

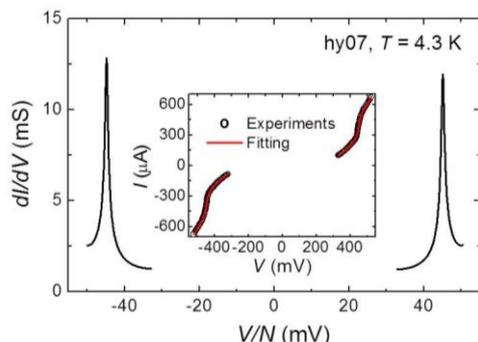


図4：微分伝導度スペクトル

しかしながら、(2)で詳述したように、超伝導ギャップや擬ギャップの絶対値やそのキャリア濃度依存性を詳細に議論するには、電流電圧特性の高電圧領域で無視できなくなる自己発熱効果をさらに低減する必要があり、パルス幅短縮の実現が急務であることが判明した。このため、不足ドープ組成のIJJ素子の作製やその電流電圧特性の測定などを一旦延期することに判断した。現在は1マイクロ秒以下のパルス幅実現への見通しが立ち、測定回路の改良準備もほぼ完了したので、今後、実験を再開していく予定である。

(4) 本研究で得られた実験技術による新たな研究展開

当初計画していた、反強磁性秩序相から超伝導相までの広い組成範囲のIJJ素子を用いた面間トンネルスペクトロスコピーの実験を延期してパルス幅の短縮化を最優先したこともあり、本研究で得られた少数接合の微小IJJ素子の作製技術とパルス法による電流電圧特性の測定手法を以下の2つの研究テーマにフィードバックさせ、新たな展開を目指した。

① 高次スイッチ事象におけるMQT的挙動の検証

IJJ系MQT現象については、複数のジョセフソン接合を含むIJJ素子の一つだけが電圧状態となる第1スイッチ事象に対するMQT現象とすべての接合が同時に電圧状態にスイッチする一斉スイッチ事象に対するMQT現象が実験的に確認されているが、第1電圧状態から第2電圧状態への第2スイッチ事象に対してはMQTと類似の挙動が報告されているにもかかわらず、第1スイッチ事象に比べてより高温(絶対温度約10 K)まで観測されること、および第一電圧状態で発生する散逸の影響などからMQTとは別の起源を持つ可能性が議論され、未だに収束しない状況が続いている。本研究で開発された接合数10以下の微小IJJ素子を作製する技術は、超伝導ギャップの観測実験に有効であるだけでなく、第3スイッチ事象や第4スイッチ事象など従来調べられていなかった高次スイッチ事象の実験にも有効なことが判明した。

我々は、パルス法による電流電圧特性から接合数が6と決定されたIJJ素子を用い、第1スイッチ事象から第3スイッチ事象までのスイッチング電流確率分布測定を行い、第1スイッチ事象で観測されていたマイクロ波照射に伴う共鳴現象が高次スイッチ事象でも観測されるかどうかを実験で検証した。その結果、第2スイッチ事象に対して類似のマイクロ波現象の観測に成功し、MQT的挙動が観測される温度領域とほぼ同じ温度領域(絶対温度約10 K以下の温度領域)で観測されること(図5参照)、およびスイッチング電流のマイクロ波照射強度依存性がMQT状態における離散化量子準位の形成に基づ

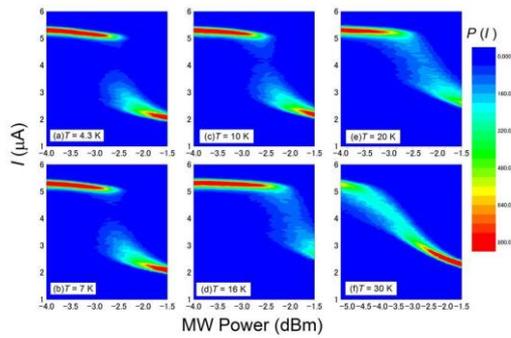


図5：第2スイッチ事象に対するスイッチング電流分布のマイクロ波照射強度依存性 ($f=40.5$ GHz)

いた理論計算で再現可能なことを発見した。

さらに、第3スイッチ事象においてもマイクロ波照射に伴う共鳴現象を観測したが、第2スイッチ事象で観測された共鳴現象とは異なり、絶対温度 30 K 以上でも観測され (図6参照)、かつマイクロ波照射強度依存性が離散化量子準位の形成に基づく理論計算では説明できないことが判明した。これらの実験結果は、高次スイッチ事象でも MQT 現象が実現し、離散化量子準位が形成される可能性を強く示唆すると共に、IJJ 系におけるマイクロ波照射効果が従来の単一ジョセフソン接合系に比べて非常に複雑であることを示している。今回の成果は、超伝導多重接合系で重要になると期待される接合間相互作用の影響を解明する手がかりを含むものと期待され、現在、投稿論文の執筆準備中である。

② 鉄系超伝導体 Fe(Se,Te)における固有ジョセフソン効果の検証

Fe(Se,Te)単結晶に対する FIB 微細加工により、Bi 系銅酸化物の IJJ 素子と同様な素子構造を作製し、超伝導状態における電流電圧特性を測定したところ、低減衰型ジョセフソン接合に特徴的なヒステリシスのある電流電圧特性が得られた。その温度依存性から求

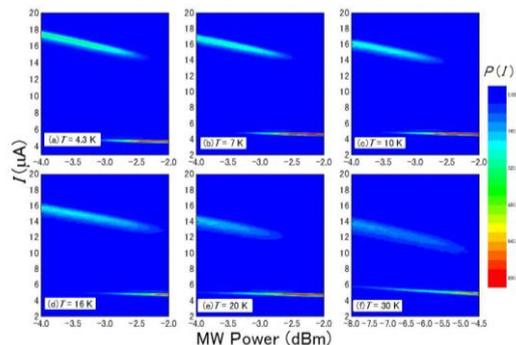


図6：第3スイッチ事象に対するスイッチング電流分布のマイクロ波照射強度依存性 ($f=40.5$ GHz)

めた有限電圧状態へのスイッチング電流の

温度依存性は、微小接合部に複数のジョセフソン接合を含むと仮定した従来理論で定量的に説明できることが判明し、最も構造が単純な鉄系超伝導体 Fe(Se,Te)ですら、固有ジョセフソン接合系と見なせる可能性が示唆された。

さらに、Fe(Se,Te)微小素子の電流電圧特性から得られるスイッチング電流密度は 100 kA/cm^2 を超え、電圧状態で顕著な自己発熱効果を示すことが判明した。そこで、本研究で開発されたパルス法による電流電圧特性の測定手法を応用し、印加パルス幅に伴う電流電圧特性の変化を調べた結果、電流電圧特性に生じるヒステリシスは自己発熱効果では説明できないことが分かった。また、本研究で再検討した FIB 加工技術を応用して、Fe 原子層に平行な電流に対する電気抵抗率と垂直な電流に対する電気抵抗率を分離して測定することに成功し、電気抵抗率の異方性が超伝導転移温度直上で高々100程度であると、および温度減少と共に異方性が增大することを発見した。

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 2 件)

- ① “C-axis I-V characteristics of Fe(Se,Te) single crystals as intrinsic Josephson junction stacks”, S. Ayukawa, H. Kitano, T. Noji, Y. Koike, JPS Conf. Proc. 1, 012123 (4 頁) (2014). 査読有 DOI: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSCP.1.012123>
- ② “Design and Experiment of a Microwave Cavity Resonator for the Imaging of Microwave Properties”, Y. Ota, Y. Sasaki, T. Kaneko, S. Takei, T. Okutani, H. Kitano, JPS Conf. Proc. 1, 012137 (4 頁) (2014). 査読有 DOI: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSCP.1.012137>

[学会発表] (計 15 件)

- ① “Bi2212 微小ジョセフソン接合のスイッチング電流確率分布におけるマイクロ波共鳴ダブルピーク構造の解析”, 高橋優作, 北野晴久(6 番目), 他 4 名, 日本物理学会第 70 回年次大会 (2015.3.22), 早稲田大学 (東京都新宿区)
- ② “鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ 単結晶における固有ジョセフソン効果の検証”, 鮎川晋也, 北野晴久(3 番目), 他 8 名, 日本物理学会第 70 回年次大会 (2015.3.22), 早稲田大学 (東京都新宿区)
- ③ “Possibility of macroscopic quantum tunneling in higher order switching events of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ intrinsic Josephson junctions”, H. Kitano(1 番目), 他 5 名, The 9th International

- Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High- T_c Superconductors (THz-Plasma 2014) (2014.12.3), Kyoto University (Kyoto, Japan)
- ④ “Phase Escape and Retrapping in Higher Order Switching Events of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ Intrinsic Josephson Junctions”, D. Kakehi, H. Kitano(6 番目), 他 4 名, The 9th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High- T_c Superconductors (THz-Plasma 2014) (2014.12.2), Kyoto University (Kyoto, Japan)
- ⑤ “Large Reduction of Number of Junctions in Bridge-type Intrinsic Josephson Junctions Using Focused Ion Beam Technique”, Y. Takahashi, H. Kitano(7 番目), 他 5 名, The 9th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High- T_c Superconductors (THz-Plasma 2014) (2014.12.2), Kyoto University (Kyoto, Japan)
- ⑥ “Study on Josephson effects along the c-axis of $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ single crystals using FIB milling technique”, S. Ayukawa, H. Kitano(8 番目), 他 6 名, The 9th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High- T_c Superconductors (THz-Plasma 2014) (2014.12.2), Kyoto University (Kyoto, Japan)
- ⑦ “Bi2212 微小ジョセフソン接合の高次スイッチング事象におけるマイクロ波共鳴効果”, 高橋優作, 北野晴久(6 番目), 他 4 名, 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014.9.9), 中部大学 (愛知県春日井市)
- ⑧ “スコッチテープ法による Bi2212 単結晶の作製と微細加工”, 池田裕太郎, 北野晴久(5 番目), 他 3 名, 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014.9.9), 中部大学 (愛知県春日井市)
- ⑨ “鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{0.3}\text{Te}_{0.7}$ 単結晶における微小接合作製”, 笥大輝, 北野晴久(3 番目), 他 6 名, 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014.9.9), 中部大学 (愛知県春日井市)
- ⑩ “Bi2212 微小固有ジョセフソン接合における高次スイッチング事象の解析”, 北野晴久(1 番目), 他 4 名, 第 21 回渦糸物理国内会議 (2013.12.13), 東北大学 (宮城県仙台市)
- ⑪ “Bi2212 微小固有ジョセフソン接合の高次スイッチング事象における MQT の可能性”, 北野晴久(1 番目), 他 4 名, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013.9.25), 徳

島大学 (徳島県徳島市)

- ⑫ “Bi2212 微小固有ジョセフソン接合のスイッチング電流分布における位相再捕捉効果”, 笥大輝, 北野晴久(4 番目), 他 2 名, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013.9.26), 徳島大学 (徳島県徳島市)
- ⑬ “C-axis I-V characteristics of $\text{Fe}(\text{Se},\text{Te})$ single crystals as intrinsic Josephson junction stacks”, S. Ayukawa, H. Kitano(2 番目), 他 2 名, The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12) (2013.7.15), 幕張メッセ (千葉県千葉市)
- ⑭ “鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{0.3}\text{Te}_{0.7}$ 単結晶を用いたジョセフソン接合の作製”, 鮎川晋也, 北野晴久(2 番目), 他 2 名, 第 60 回応用物理学関係連合講演会 (2013.3.27), 神奈川工科大学 (神奈川県厚木市)
- ⑮ “FIB 法による固有ジョセフソン接合素子の接合数制御”, 山口光, 北野晴久(4 番目), 他 2 名, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012.9.20), 横浜国立大学 (神奈川県横浜市)

[図書] (計 1 件)

“超伝導磁束状態の物理”, 門脇和男, 北野晴久, 他 30 名, 裳華房, 2015 年発行(確定), 約 400 頁(うち 8 頁執筆)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://www.phys.aoyama.ac.jp/~w3-kitano/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北野 晴久 (KITANO HARUHISA)

青山学院大学・理工学部・准教授

研究者番号: 00313164