

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360152

研究課題名(和文)形状効果によるラチェット挙動に基づく超伝導ナノブリッジダイオード開発とその応用

研究課題名(英文)Development of a superconducting nanobridge diode based on the ratchet behavior due to the shape effect and its application

研究代表者

井上 真澄 (Inoue, Masumi)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：00203258

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,000,000円、(間接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導回路用バイアス電流供給回路などへの応用を目指して、非対称高温超伝導体ナノブリッジのラチェット効果を利用した超伝導ダイオードの開発に関する研究を行った。作製プロセスの最適化を行い、単独ブリッジで臨界電流は数mA～十数mA、磁場による臨界電流変化率は9%程度のものが得られている。ブリッジ配置位置による特性の違いや、SQUID構造において見られた特性のヒステリシスは、デバイスの動作物理を検討するための有用な情報と考えられる。計算による特性解析では、膜中に設けた四角形の穴の周辺でのボルテックス挙動に場所依存性が見られ、電流分布の違いによるポテンシャル・バリアの違いによるものとして理解された。

研究成果の概要(英文)：We studied on the superconducting diode utilizing the ratchet effect of asymmetric high-temperature superconductor nanobridges, aiming at applications such as bias current supplies for superconducting circuits. Single nanobridges with critical current around ten milliamperes and 9% modulation of the critical current by the applied magnetic field have been obtained. Dependence of the bridge characteristics on the relative position of the bridge and wiring and hysteretic properties of SQUIDs composed of asymmetrical nanobridges are useful information for discussing the physics of these devices. Analysis of the properties by numerical calculation showed the position dependence of vortices around the rectangular hole in a superconducting film. It was understood as the difference of the potential barrier due to the difference of the current distribution.

研究分野：電気材料工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：高温超伝導体 ナノブリッジ 形状効果 ラチェット ダイオード ヒステリシス

1. 研究開始当初の背景

単一磁束量子(SFQ)回路は超伝導の特長を活かした超高速・低消費電力の回路として期待され、情報ネットワークのハイエンド・ルータ、マイクロプロセッサ・コンポーネントなどが実証されている。その設計技術の急速な進展による回路の大規模化に伴い、直流バイアス電流の大きさや、この大電流に伴う磁場による回路誤動作が問題となっている。その対策の一つが、整流回路を用いて交流電流を回路ブロック近傍で直流に変換し、回路ブロックに応じた直流バイアス電流を供給する方法である。閾値電圧がmV程度あるいはそれ以下の整流素子が必要となるが、半導体素子では数桁高い閾値電圧であるため使えない。非対称超伝導ナノブリッジは磁束のラチェットの挙動に基づく電流-電圧特性の非対称性を示し、要求されるSFQ回路用整流素子が実現できる可能性がある。また、非対称ナノブリッジに基づくこれまでにない新デバイス創出の期待もある。

2. 研究の目的

本研究では、これまでなかった超伝導ダイオードを開発し、その応用として高集積超伝導回路用直流バイアス電流供給回路を取り上げ、応用実証を目指す。この回路の実現により、超伝導単一磁束量子(SFQ)回路の大規模化に伴って生じている直流バイアス電流の大電流化の問題に対し、電流値を1/1000程度にした交流電流で供給することを可能にし、その実用化に向けた障害を取り除く。学術的には、従来作製技術の問題から難しかった超伝導ナノブリッジの特性への形状効果を上記基盤技術により実験・計算の両面から検討可能とし、その挙動の物理を解明するとともに、それをもとに、超伝導ナノブリッジに基づく新デバイス創出への基礎を作る。

3. 研究の方法

(1) ナノブリッジ・ダイオードの構造検討および作製

本研究で用いる非対称形状超伝導ナノブリッジの例を図1に示す。超伝導体には $YBa_2Cu_3O_x$ (YBCO)薄膜を用いる。非対称形状の単独ブリッジの構造および作製プロセスについては、ブリッジ側面の劣化を回復する手法の最適化など、作製プロセスの最適化を行うとともに、電流-電圧特性に大きな非対

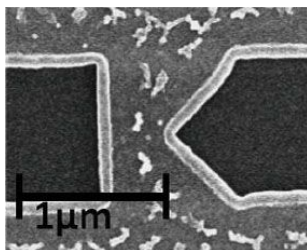


図1 作製したナノブリッジの例

称性を出現させるための指針を得るため、ブリッジ形状、膜厚等のブリッジ特性への影響を調べる。電流-電圧特性の非対称性はブリッジに磁場を印加することにより得られる。磁場によるブリッジ特性の変化について、ブリッジ形状やブリッジ位置に依存性を評価する。また、単独ブリッジに加えて、SQUID特性の磁場依存性も利用するため、ブリッジを2本並列にしたSQUID構造を作製し、その特性を調べる。

(2) 計算によるブリッジ特性の解析

幅の変化するブリッジでは磁束の挙動に大きく影響するポテンシャル・バリアを求めるのにも数値計算が必要である。本研究では、時間依存Ginzburg-Landau (TDGL)方程式を用いたシミュレーションにより、磁束の侵入・排出やポテンシャル・バリアとブリッジ形状の関係を調べる。また、ブリッジ内での磁束量子の移動の様子等の検討を行う。また、SQUID特性については両ブリッジの特性とSQUID特性の関係の理論計算も試みる。

(3) 整流回路の検討

整流回路はダイオードとともにトランス、インダクタンスおよびキャパシタンスを用いて構成される。そのため、ダイオードとともに整流回路を構成するトランス、インダクタンスおよびキャパシタンスの設計に必要なインダクタンス値、キャパシタンス値を等価回路を用いて求める。使用周波数は数百MHzを考える。いくつかの素子形状について電磁界シミュレータによりインダクタンスやキャパシタンスの評価を試みる。なお、ブリッジの作製が加工装置・製膜装置の不調のため予定よりも遅れたため、この項目については、最小限のデバイス値検討に止めた。

4. 研究成果

(1) ナノブリッジ・ダイオードの構造検討および作製

単独ブリッジ

まず、作製プロセス最適化について述べる。本研究では、YBCOナノブリッジの加工プロセスで生じるYBCO損傷層を回復させるYBCO再堆積プロセスを採用して高品質ナノブリッジを作製可能としている。このプロセスに用いるターゲット組成と再堆積時間についてMgO基板上YBCOブリッジを用いて検討し、従来よりCu過剰なターゲットを用いて8 min再堆積を行うことにより、従来よりもブリッジの特性およびそのばらつきを改善することができ、基礎的なナノブリッジ作製法はある水準に達したと考えられる。エッチング条件によりいくらかブリッジ側壁のテーパの抑制が可能であることがわかったが、そのブリッジ特性との相関は見られなかった。また、側壁テーパの影響を小さくする意図で作製したLSAT基板上のより薄い膜を用いたブリッジでは、微分抵抗の増加などの特性改

善が見られた。これは表面バリアによるボルトテックス制御性の改善の他、基板の違いによる膜質の改善などの影響によるものと考えられた。

次に、ブリッジの形成位置の影響を検討した。本研究では、フォトリソグラフィで配線パターンを形成した後、電子ビームリソグラフィにより配線の一部を細くしてブリッジを形成する。即ち、ナノブリッジ周辺にギャップ部分が存在する。ブリッジに接続する配線部分はブリッジよりもかなり幅が広く、マイスナー効果により排除された磁束がブリッジ付近に集中すると考えられ、これまでの実験で、その大きさは印加磁場の約12倍であることがSQUIDを用いた実験により確認されている。ブリッジ位置によりブリッジ周辺の磁場を不均一にできることから、図2に示すように、通常配線の中央に位置する非対称ナノブリッジ（図2中A）を、配線の端（図2中B, C）に作製して特性を調べた。

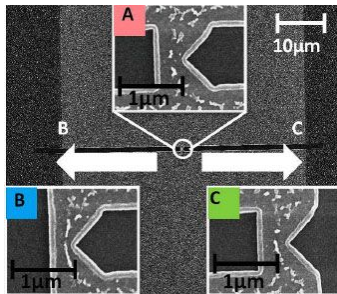


図2 配線中の異なる位置に作製したナノブリッジ

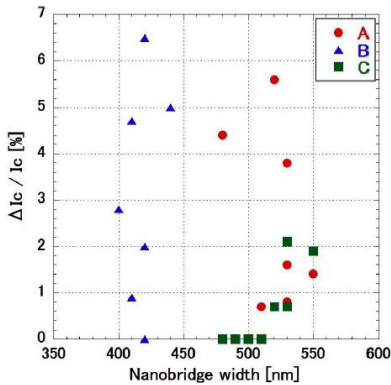


図3 配線中の異なる位置に作製したナノブリッジの I_c 変化率

図3は複数のチップにおけるA, B, C各位置に作製した非対称ナノブリッジの4.2Kでの臨界電流 I_c の変化率である。括れ部分が配線の端にあるCでは磁場による I_c の変化はほとんど観測できず、線幅の上昇に伴わずに変化率が上昇する傾向にあった。また、A, Bについてはばらつきが大きく議論しにくいですが、大きな傾向の違いは見られなかった。

この結果について、非対称ナノブリッジの特性に重要な役割を果たす括れ側に注目すると、Cの位置では括れ側で磁束集中効果のない配置のため、Cの位置に作製した非対称

ナノブリッジは、括れ部分の遮蔽電流が弱く、そのため臨界電流の変化率 $\Delta I_c / I_c$ が小さいと考えられる。

また、パターンに関わらず I_c が低いほど変化率 $\Delta I_c / I_c$ が大きい傾向が見られた。ことが分かる。この原因としては、ブリッジを流れるバイアス電流と遮蔽電流のうち、 I_c が小さくなることで遮蔽電流の割合が相対的に増加することや、バイアス電流が大きくなるほどそれに伴う自己磁場も大きくなり、外部磁場を打ち消すことにより遮蔽電流は小さくなることなどが考えられる。これらの結果より、 I_c を低減することでより非対称性が大きくできる可能性があると考えられる。

単独ブリッジの臨界電流は数mA～十数mA、磁場による臨界電流の変化率は9%程度のものが得られている。一方で、ブリッジの電流-電圧特性において、電圧状態での発熱が特性に支配的影響を及ぼしていることが考えられた。ブリッジの本来の確認するため、特性ナノブリッジに電子ビームを照射して臨界電流密度を制御して低減化する試みを行った。試料数は少ないが、電子ビーム照射により臨界電流密度の減少を示す結果は得られている。

SQUID構造

I_c の磁場変調量の増大を目指して、非対称ナノブリッジのラチェット効果とdc-SQUIDにおける臨界電流 I_c の周期的な変調とが重畳した特性を得ることを目的として、非対称ナノブリッジによるSQUIDの特性を作製し、その特性を調べた。作製した2並列非対称ナノブリッジによるSQUIDの例を図4に示す。測定は4.2 Kにおいて行った。

作製したSQUIDの電圧-磁場(V-B)特性においては発生電圧の周期的変調だけでなく包絡線も確認できた。これは、SQUIDの変調と同時にラチェット効果が発生している可能性があることを示唆している。続いて臨界電流-磁場(I_c -B)特性では低 I_c の試料において I_c の周期的な変調を確認し、その変調周期はV-B特性のものと同じであったことから、磁束量子1個単位での応答であることが確認できた。

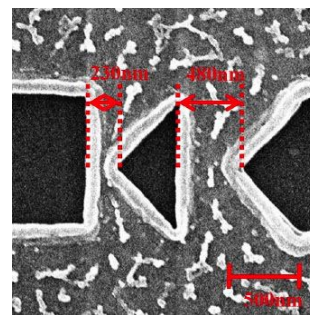


図4 2つの異なる線幅の非対称ナノブリッジによるSQUIDのSEM写真

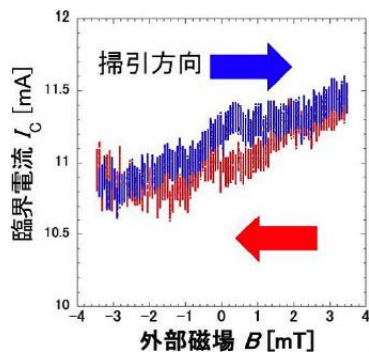
ナノブリッジ間の穴の面積をSQUIDループの面積として変調周期を計算したところ、磁束量子 $\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15}$ [Wb]と比べて2桁小

さいことが分かった。この原因は、磁束量子による周回電流がナノブリッジ面内に広がりを持って流れているため、実効的なループ面積は大きくなることや磁束集中効果の他、遮蔽電流の流れる場所によって均一実効的磁場侵入長が均一でないことなどが関係していると考えられる。

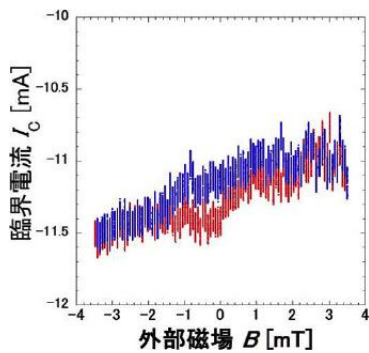
さらに、異なる試料の I_c - B 特性においては4%程度のラチェット効果が確認された。この試料ではSQUIDによる変調は見られなかったが、これは $L I_c$ 積が大き過ぎたために測定することができなかったと考えられた。

また、 V - B 特性や I_c - B 特性にはヒステリシスが観測された。図5に I_c - B 特性のヒステリシス部分を示す。(a)は正側の I_c 付近の、(b)は負側の I_c 付近の拡大図である。外部磁場を正から負へ掃引した時の特性を青色で、負から正へ掃引した時の特性を赤色でそれぞれ示している。両者とも右上がりの特性で、ラチェット効果による変化が詳細に見て取れる他、 V - B 特性でも観測できたヒステリシスが観測できた。これは当初予想していなかった特性である。ジョセフソン接合によるSQUIDではこのような特性は現れず、非対称ナノブリッジを用いたもの特有の現象であるといえる。

ヒステリシスが発現する原因について、図6の模式図を用いて考察する。矢印の長さはそれぞれの電流の大きさを示している。



(a)



(b)

図5 非対称ナノブリッジSQUIDの I_c - B 特性における正負それぞれの I_c 付近の拡大図((a) 正の I_c , (b) 負の I_c)

図6(a), (b)に左右対称構造のナノブリッジによるSQUIDにおいて、バイアス電流を負方向、外部磁場を正方向に印加し、再びゼロ磁場まで戻す場合を示す。初めに、外部磁場を正方向に加えていった場合、磁束量子は図6(a)のように、バイアス電流と遮蔽電流が同じ方向を流れる部分が先に I_c に達するため、この部分より侵入する。次に図中(b)のように磁束量子が保持された状態で外部磁場をゼロに戻していく場合、ループ周辺には保持された磁束量子により緑色で示す周回電流が流れ、バイアス電流、遮蔽電流、周回電流、の総量が I_c を超えた部分から磁束量子はループの外へ排出される。

非対称ナノブリッジの場合、磁束量子の侵入は対称構造のナノブリッジと同様に、図6(c)のようにバイアス電流と遮蔽電流の総量が I_c を超えることで磁束量子が侵入する。続いて(d)に示すように、磁束量子が排出される場合は、磁束量子の侵入部と逆側の端は対称構造とは異なり直線になっているため、直線側を流れるバイアス電流や遮蔽電流は侵入部に比べて十分小さいと考えられる。さらにそれが磁束量子の排出部となる括れ部分へ広がるため、そこに流れる電流の総量は磁束量子の侵入部と大きな差があることになる。つまり、流れる電流が少ない分 I_c を超えるためにより大きな電流が必要となる。これらのことから、ヒステリシスの原因は磁束量子の侵入部と排出部である左右それぞれの括れ部分に流れる電流の総量の差を表していると考えられる。非対称ナノブリッジの場合、その差が顕著に現れるため、対称構造のナノブリッジに比べてヒステリシスが観測されやすい。これは非対称ナノブリッジSQUID特有の現象であり、非対称性向上に向けた新たな知見となるといえる。

I_c - B 特性から算出したインダクタンス L と臨界電流 I_c から、SQUIDの変調深さの指標で

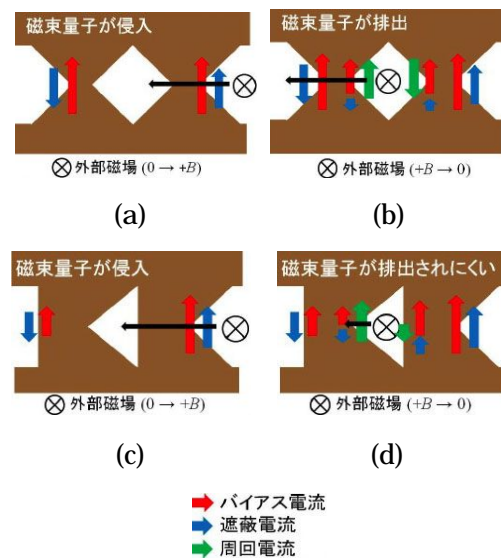


図6 対称ナノブリッジ((a), (b))および非対称ナノブリッジ((c), (d))を用いたSQUIDにおける磁束量子の挙動

ある $\beta = LI_c / \Phi_0$ を求めると $\beta = 34.5$ という大きな値であり、 I_c の変調が観測し辛く、ループ内に磁束が保持されやすい状況であったと考えられた。今後は SQUID の変調とラチェット効果を同時に得ることで非対称性を向上させるために、より小さな LI_c 積の SQUID を作製することが重要と考えられる。

(2) 計算によるブリッジ特性の解析

ブリッジ特性を計算により解析するため、時間依存 Ginzburg-Landau (TDGL) 方程式を用いた超伝導薄膜中のボルテックスの振る舞いの検討を行った。正方形格子を用いた差分法による計算では、実験と同様の非対称括れ形状で計算を試みたが、このような境界が格子の辺の方向と斜めに交差する系においては境界条件の設定に問題があることがわかった。差分法による計算では、代わりに類似の構造を持つ、膜中に設けた四角形の穴の周辺でのボルテックスの挙動について、その場所依存性について調べた。その結果、穴の角付近と角から離れた辺付近でボルテックス挙動に違いが見られ、角付近より辺付近の方がポテンシャルが低くなっていると考えられた。図7に示す計算モデル図で A, B, C, D の線上での遮蔽電流分布を比較した結果を図8に示す。図8の(a)では $\kappa = \lambda / \xi = 2$ (λ : 磁場侵入長, ξ : コヒーレンス長) のときに流れる遮蔽電流, (b) では $\kappa = 4$ のときに流れる遮蔽電流の結果を示した。それぞれ横軸は穴からの距離, 縦軸は規格化した電流密度を表している。これらの結果を見ると括れた部分に相当する線 D では、括れた部分から離れた直線状の境界の部分に比べて、遮蔽電流密度が境界近くにより集中していることが確認できる。この結果はボルテックス挙動から考えられ

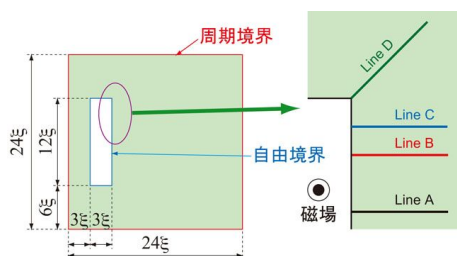


図7 計算モデル (ξ : コヒーレンス長)

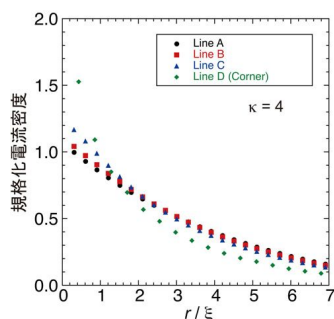


図8 遮蔽電流分布の計算結果 ($\kappa = 4$)

るポテンシャルの場所依存性を支持するものであり、ボルテックス挙動の場所による違いは電流分布の違いによるポテンシャル・バリアの違いによるものとして理解された。YBCO の場合 κ はさらに大きな値であるが、その場合計算が不安定であるため、長さの規格化単位を変更するなどして今後検討を進める予定である。

その他、ヒステリシスの解析を行うため、ブリッジの端でのボルテックス出入りをジョセフソン接合で模した計算を試みるために、多接合並列回路の特性の計算を行うための条件の検討を行った。

(3) 整流回路の検討

ダイオードとともに整流回路を構成するインダクタンスおよびキャパシタンスについて、それらの値と使用する交流周波数との関係を等価回路を用いて検討した。使用周波数は数百 MHz とした。また、インダクタンスやキャパシタンスを超伝導膜で実現するために、いくつかの素子形状について電磁界シミュレータによりインダクタンスやキャパシタンスの評価を試みた。なお、研究方法で述べたように、ブリッジの作製が加工装置・製膜装置の不調のため予定よりも遅れたため、この項目については、最小限のデバイス値検討に止めた。

(4) 総括

上記のように、装置の不調による遅れもあって、超伝導ダイオードを用いた整流回路の実証には至っていないが、一方で非対称ナノブリッジを用いた SQUID の特性でのヒステリシスのように当初予想していなかった現象が見られた。これは、非対称ナノブリッジを用いたもの特有の現象で、本研究で扱ったデバイスの動作物理を検討する有用な情報が得られたと考えられ、特性改善に向けて今後さらに詳しく検討して行きたい。

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 1 件)

K. Kajino, K. Fujita, B. An, M. Inoue, and A. Fujimaki, "Ratchet Effect of Single Vortex Motion in Superconducting Asymmetrical Nanobridges," Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 51, No. 5, 2012, Art.No. 053101 (4 pages), DOI: 10.1143/JJAP.51.053101

〔学会発表〕(計 17 件)

伊藤雄記, 井上真澄, 他, "非対称ナノブリッジ SQUID におけるラチェット効果", 2014 年春季 第 61 回応用物理学会春季学術講演会

2014年3月17日～20日，青山学院大学，神奈川県相模原市

Y. Ito, M. Inoue, et al., “Ratchet Effect of the SQUID Composed of Two Parallel Asymmetrical Nanobridges,” Superconducting SFQ VLSI Workshop for Young Scientists (SSV 2014-YS)

2014年3月5日～7日，名古屋大学，名古屋市山本宗範，井上真澄，他，“非対称ナノブリッジを利用した高温超伝導デバイスの特性”，電子情報通信学会 超伝導エレクトロニクス研究会

2014年1月23日～24日，機械振興会館，東京都港区

M. Yamamoto, M. Inoue, et al., “Asymmetric-Nanobridge- SQUIDs Based on High-Temperature Superconductors,” 6th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2013)

2013年11月21日～22日，産業技術総合研究所，茨城県つくば市

山本宗範，井上真澄，他，“非対称ナノブリッジによるSQUIDの特性”，2013年秋季第74回応用物理学会秋季学術講演会

2013年9月16日～20日，同志社大学，京都府京田辺市

M. Inoue, et al., “Study on the vortex exclusion to the moat in superconducting films by numerical analysis,” 11th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013)

2013年9月15日～19日，Centro Congressi “Magazzini del Cotone”, Genova, Italy

溝口翔太，井上真澄，他，“モートの形状による磁束排除効果の数値解析”，電子情報通信学会 超伝導エレクトロニクス研究会 2013年1月24日，岡山大学，岡山県岡山市

M. Yamamoto, M. Inoue, et al., “Asymmetrical Current-Voltage Characteristics of YBCO Nanobridges in Ununiform Magnetic Field,” The 5th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV2012)

2012年12月6日～7日，名古屋大学，名古屋市 S. Mizoguchi, M. Inoue, et al., “Numerical Analysis on the Vortex Motion in Superconducting Thin Films with Various Types of Moat,” The 5th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV2012)

2012年12月6日～7日，名古屋大学，名古屋市 T. Fukuoka, M. Inoue, et al., “Fabrication of High-Temperature Superconductor Vertically-Stacked Josephson Junctions without Excess Currents,” The 5th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV2012)

2012年12月6日～7日，名古屋大学，名古屋市 溝口翔太，井上真澄，他，“モートにおける磁束排除効果の形状依存性の数値解析”，電子情報通信学会 超伝導エレクトロニクス研究会

2012年10月25日，機械振興会館，東京都港区

M. Inoue, et al., “Simulation study on the vortex behavior in asymmetrical superconducting films for developing nanobridge devices,” 2012 Appl. Supercond. Conf. (ASC2012)

2012年10月7日～12日，Oregon Convention Center, Portland, Oregon, USA

K. Kajino, M. Inoue, et al., “Demonstration of Vortex Ratchet Effect in $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Asymmetrical Nanobridges,” 2012 Appl. Supercond. Conf. (ASC2012)

2012年10月7日～12日，Oregon Convention Center, Portland, Oregon, USA

山本宗範，井上真澄，他，“磁束集中効果が非対称ナノブリッジに及ぼす影響”，第73回応用物理学会学術講演会

2012年9月11日～14日，愛媛大学・松山大学，愛媛県松山市

福岡賢明，井上真澄，他，“電子ビーム照射型高温超伝導体ナノブリッジの作製”，第73回応用物理学会学術講演会

2012年9月11日～14日，愛媛大学・松山大学，愛媛県松山市

溝口翔太，井上真澄，他，“超伝導薄膜上における磁束排除効果のモート形状依存性の数値解析”，第73回応用物理学会学術講演会

2012年9月11日～14日，愛媛大学・松山大学，愛媛県松山市

溝口翔太，井上真澄，他，“モートの形状による超伝導薄膜の磁束排除効果の数値解析”，第59回 応用物理学関係連合講演会

2012年3月15日（木）～18日（日），早稲田大学，東京都新宿区

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 真澄 (INOUE, Masumi)
名城大学・理工学部・教授
研究者番号：00203258

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

赤池 宏之 (AKAIKE, Hiroyuki)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：20273287