

## 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

山本 宗範<sup>1</sup> 井上 真澄<sup>2</sup> 藤巻 朗<sup>1</sup>

1 名古屋大学大学院 工学研究科 〒464-8601 名古屋市千種区不老町

2 名城大学 理工学研究科 〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501

E-mail: yamamoto\_mune@super.nuqe.nagoya-u.ac.jp

**あらまし** 単一磁束量子 (Single Flux Quantum, SFQ) 回路の大規模化に向けて、電源供給回路における消費電力の低減が必要不可欠である。これを解決する方法の一つとして超伝導整流回路の構成が挙げられる。我々はこれまでに、その実現を目指して  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) を用いた非対称ナノブリッジを作製してきた。非対称ナノブリッジは外部磁場下において、ラチェット効果により非対称な電流-電圧 ( $I$ - $V$ ) 特性を示す。今回、我々は磁場変調量の増大化を目指して、2並列の非対称ナノブリッジによる超伝導量子干渉計 (Superconducting Quantum Interference Device, SQUID) を作製した。その臨界電流 ( $I_c$ ) の外部磁場依存性 ( $I_c$ - $B$  特性) において、ラチェット効果による  $I_c$  の変化と SQUID による  $I_c$  の変調をそれぞれ確認できた。

**キーワード** 高温超伝導, 非対称ナノブリッジ, SQUID

## The Properties of High-Temperature Superconducting Devices with Asymmetrical Nanobridges

Munenori YAMAMOTO<sup>1</sup>, Masumi INOUE<sup>2</sup>, and Akira FUJIMAKI<sup>1</sup>

1 Department of Quantum Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 4648603, Japan

2 Department of Mechatronics Engineering, Meijo University, 1-501 Shiogamaguchi, Tempaku-ku, Nagoya 468-8502, Japan

E-mail: yamamoto\_mune@super.nuqe.nagoya-u.ac.jp

**Abstract** For practical applications of SFQ circuits, it is necessary to decrease power consumption at the current-limiting resistors placed after the power supply. One of the candidates for the solutions is using rectifiers based on asymmetrical nanobridges. The vortex ratchet effect arises in asymmetrical nanobridges, causing asymmetrical  $I$ - $V$  characteristics for asymmetrical nanobridges. By utilizing this ratchet effect, semiconductor-like diodes can be made with zero threshold voltage, which make it possible to form rectifiers applicable to SFQ circuits. In this study, we report the properties of high-temperature superconducting (HTS) devices with asymmetrical nanobridges. The SQUIDs fabricated exhibit periodic behavior in magnetic field dependence of critical currents and that of voltages.

**Keyword** HTS, asymmetrical nanobridge, SQUID

## 1. はじめに

ジョセフソン接合 (JJ) をスイッチング素子とする SFQ 回路は磁束量子  $\Phi_0$  の伝搬によって情報を伝達する。JJ を含む超伝導ループ内の  $\Phi_0$  の有無を、デジタルの 2 値に対応させた論理演算方式となっている。JJ のスイッチング時の消費電力は JJ の臨界電流 ( $I_c$ ) と  $\Phi_0$  の積で決定され、その大きさは  $10^{-19}$ J 程度と非常に小さい。現在、世界最大規模で約 3 万接合の SFQ 回路が動作実証されており [1], マイクロプロセッサ等への応用が期待されている。

しかしながら、SFQ 回路の大規模化に伴う課題の一つとしてバイアス電流の増大による消費電力の増加が挙げられる。直流バイアス電流を必要とする SFQ 回路

では、消費電力の大部分が電源自身または電流源とみなすために直列に挿入された抵抗で消費される。これは、バイアスが供給される SFQ 回路内のブロックの入力インピーダンスが数十  $\text{m}\Omega$  と、電源の出力インピーダンスに比べて非常に小さいためである。従って、SFQ 回路の構成ブロックの数に比例して電源の数や消費電力が増大し SFQ 回路の低消費電力性を帳消しにしてしまう。先述した 3 万接合規模の SFQ 回路においては、バイアスポート数 37 本、総バイアス量 3.34A となる。

これらの問題は、インピーダンス変換と整流器を用いた電源回路を構成する事で解決する事ができる。特にこの整流器には、SFQ 回路の安定動作のために 1mV 以下の閾値電圧という、半導体ダイオードでは実現できない特性が求められる。我々はこの整流素子の実現に向けて高温超伝導体  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) を用いた

非対称ナノブリッジに関する研究を行ってきた。

今回は、外部磁場による  $I_c$  の変化量の増大を目的とし、2並列の非対称ナノブリッジによる SQUID を作製した。JJ による SQUID の閾値特性が単接合のフラウンホーファーパターンを包落線とするのと同様に、非対称ナノブリッジのラチェット効果による  $I_c$ - $B$  特性が包落線になると考えられる。本稿ではその測定結果を述べる。

## 2. 非対称ナノブリッジ

### 2.1 形状効果

非対称ナノブリッジはナノブリッジの方側が「K」のように括れた、非対称な構造となっている。この括れた構造により、バイアス電流密度の線幅方向の分布が不均一になる事が数値計算により明らかになっている[2]。

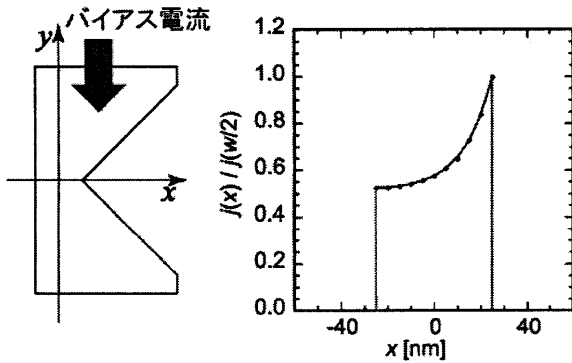


図1 非対称ナノブリッジの電流分布[2]

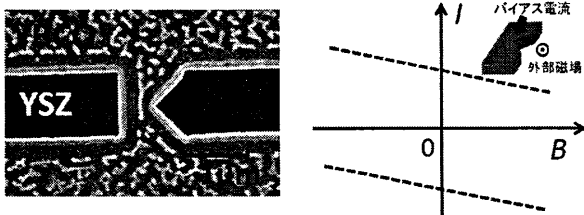


図2 非対称ナノブリッジ(左)と  $I_c$ - $B$  特性(右)

非対称ナノブリッジでは、バイアス電流密度の分布が線幅方向に不均一になる。更に、外部磁場下においてボルテックスのラチェット効果により正負で  $I_c$  が異なる非対称な  $I$ - $V$  特性となる[3]。この特性を利用することで、ゼロ閾値電圧での整流が可能であると考えられる。

図3は以前に得られた  $I_c$  変化率 ( $\Delta I_c/I_c$ ) の線幅及び膜厚依存性である[4]。我々はこれまでに最大で膜厚 100nm, 線幅 200nm の非対称ナノブリッジにおいて 8.7% の  $I_c$  の変化率を得た。 $I_c$  の変化率は線幅や膜厚の

増加に伴い大きくなるが、ナノブリッジが単一ボルテックスゲートとして機能するためには、線幅と長さが共に実行的磁場進入長 ( $\lambda_{\perp} = \lambda^2/d$ ,  $\lambda$ : 磁場進入長,  $d$ : 膜厚) の2倍以下という制限があり、非対称ナノブリッジ単体で更なる非対称性の向上を目指す事は難しい。

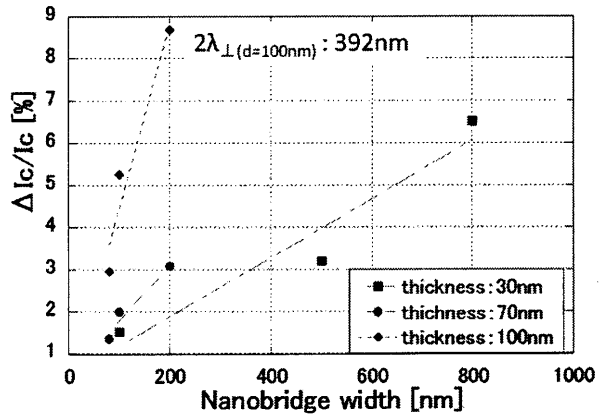
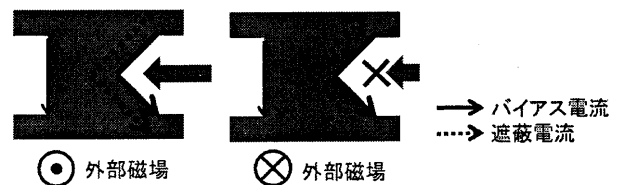
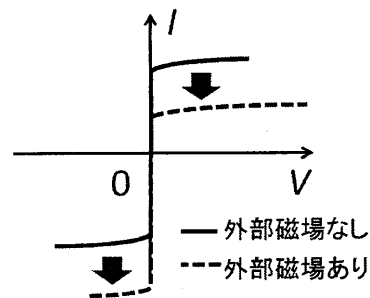


図3 異なる線幅・膜厚の非対称ナノブリッジにおける臨界電流の変化率



(a) 非対称ナノブリッジに流れるバイアス電流と遮蔽電流



(b) 非対称ナノブリッジの  $I$ - $V$  特性

図4 ラチェット効果

### 2.2 ラチェット効果

非対称ナノブリッジに対して垂直方向の磁場を印加した場合、超伝導体の完全反磁性の効果によりナノブリッジには遮蔽電流が流れる。図4にその様子を示す。括れ部分において、バイアス電流と遮蔽電流が同じ向きに流れる場合、ボルテックスのナノブリッジへの侵入は促進される。反対にバイアス電流と遮蔽電流

が逆向きに流れる場合、両者は打ち消しあうこととなりボルテックスの侵入は抑制される。この時、バイアス電流と遮蔽電流が強めあうナノブリッジの直線側よりも、括れ側の方が形状効果により電流密度が大きくなっているため、ボルテックスは常に括れた側からのみ侵入する事になる（ラチェット効果）。このように、形状効果と外部磁場による遮蔽電流を組み合わせることで、正側と負側で異なる  $I_c$  と発生電圧を持つ非対称な  $I-V$  特性を実現する事ができる。

### 3. 作製プロセス・測定方法

今回の実験で用いた YBCO 薄膜は全て THEVA 社製の膜厚 70nm のものを使用し、基板は YSZ を採用した。ナノブリッジのパターニングは電子線リソグラフィ [図 5(a)] と Ar イオンビームエッチングにより行った。エッチングの際には、間欠エッチング (ON : 30s OFF : 90s) を行い、ブリッジ側壁における熱によるダメージを軽減している [図 5(b)]。保護層で用いた Au を除去後、酸素雰囲気中 760°C でアニールを行う [図 5(c)]。その後、アモルファス状態となったブリッジ側壁の損傷を回復するために、通常よりも Cu の組成比が多い Cu-rich ターゲット (Y : Ba : Cu = 1 : 2 : 3) を用いて数 nm 程度 YBCO 薄膜を再堆積する [図 5(d)] [5]。その後、ナノブリッジをその後のプロセスや水分から守る保護層として SiO<sub>2</sub> を堆積する [図 5(e)]。最後に Au で電極 Pad を形成し測定を行う。

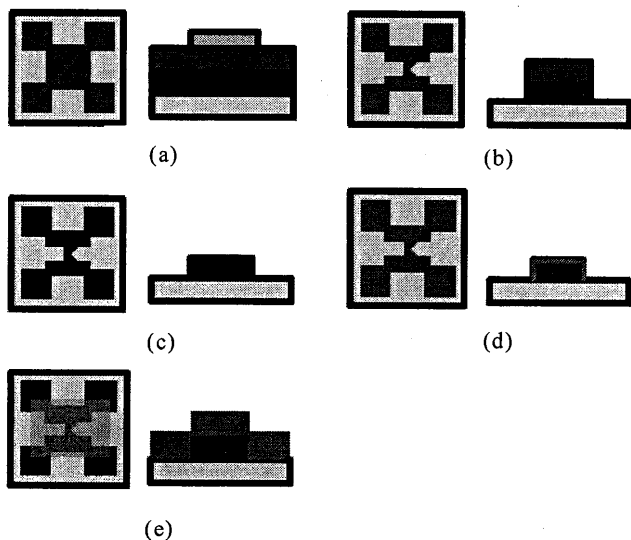


図 5 ナノブリッジ作製プロセス : (a) 電子線リソグラフィでパターニング, (b) エッチングでパターン形成, (c) 保護層 Au 除去, 酸素アニール, (d) YBCO 再蒸着, (e) SiO<sub>2</sub> 堆積

図 6 は線幅 600nm の非対称ナノブリッジを並列化して作製した SQUID の走査型電子顕微鏡 (Scanning electron microscope, SEM) 像である。作製した SQUID のループ面積は 0.02 $\mu\text{m}^2$ ~0.2 $\mu\text{m}^2$  であり、ナノブリッジの最も細い部分を線幅とし、括れ角度はすべて 90° である。

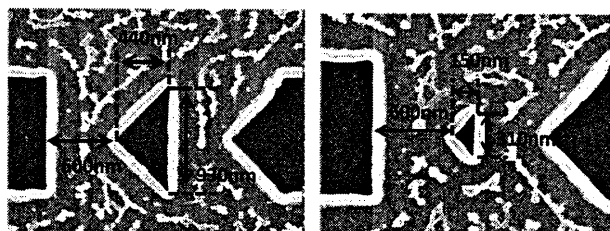


図 6 2 並列非対称ナノブリッジによる SQUID の SEM 像。

作製されたナノブリッジは 4.2K の液体ヘリウム中で測定した。外部コイルで制御された直流磁場をナノブリッジに対して垂直方向に印加し発生電圧や臨界電流の外部磁場依存性を測定した。

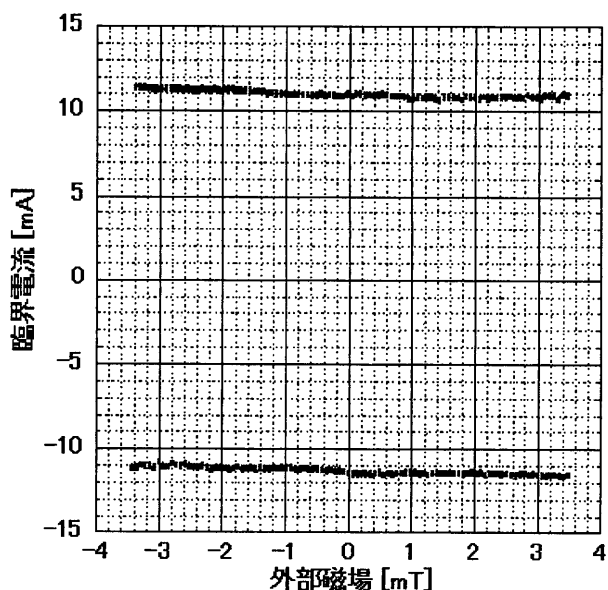


図 7 2 並列非対称ナノブリッジの  $I_c$ - $B$  特性

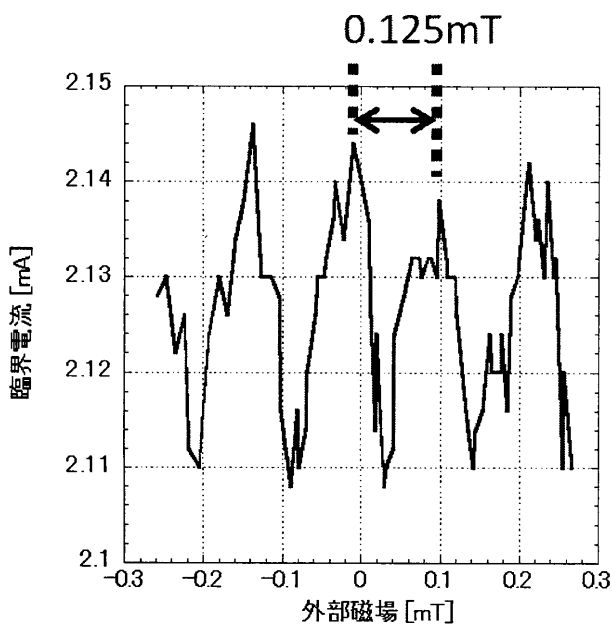
### 4. 実験結果・考察

#### 4.1 臨界電流及び発生電圧の外部磁場依存性

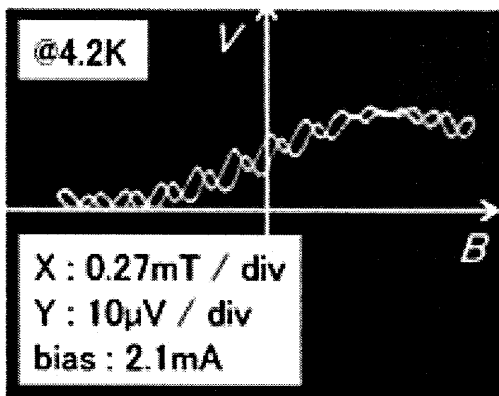
図 7 に 2 並列非対称ナノブリッジの  $I_c$ - $B$  特性を示す。外部磁場の向きは図 2 中の挿入図の向きを正とする。ナノブリッジの線幅は左右どちらも 300nm である。外部磁場の印加に伴い正負の  $I_c$  が非対称に変化する事が確認できた。 $I_c$  の変化は最大で約 500 $\mu\text{A}$  であり、ゼ

ロ磁場での  $I_c$  に対しての変化率は最大で 4.3% である。このようにナノブリッジの  $I_c$  が磁場の印加により増加する領域が存在する事は、ラチェット効果を反映していると考えられる。

また、図 8 は別のチップのサンプルにおける 2 並列非対称ナノブリッジの  $I_c$ - $B$  特性と発生電圧の外部磁場依存性 ( $V$ - $B$  特性) である。それぞれ外部磁場に対して周期的な変調を示し、その周期は 0.125mT と一致し、変調量はそれぞれ約 30 $\mu$ A と約 5 $\mu$ V である。



(a)



(b)

図 8 2 並列非対称ナノブリッジの (a)  $I_c$ - $B$  特性と (b)  $V$ - $B$  特性

このように、非対称ナノブリッジを用いた SQUID の  $I_c$  において、ラチェット効果による変化と SQUID

の効果による変調が観測できたのは初めてであり、ボルテックス 1 個単位でなお且つ特定の方向を持たせて制御できている状況であると言える。

#### 4.2 $I_c$ 変化率の増大に向けた取り組み

今回観測できた SQUID による  $I_c$  の変調周期は、0.125mT とラチェット効果が十分に現れる数 mT 程度と 1 桁の差がある。より効率的に  $I_c$  の変調率を増大するためには、SQUID による変調周期を大きくする必要があるのである。

そこで図 6 のように SQUID ループの面積を縮小し、より小さなループインダクタンスを持つサンプルの作製を行った。しかし、 $I_c$  と発生電圧共に明確な外部磁場に対する変調は観測できなかった。原因として考えられるものとして、ナノブリッジの高い発熱密度がある。測定できなかったサンプルの  $I_c$  の多くが、20mA を超えるものであった。ナノブリッジが電圧状態にあるときに発熱する面積は、ボルテックスが通過する長さ  $2\lambda_{\perp}$  と線幅で囲まれた部分である。仮に  $I_c$  が 20mA のサンプルで 10 $\mu$ V の電圧を発生したとすると、発熱密度は以下の式で求めることができる。

$$\frac{P}{S} = \frac{I_c \cdot V}{2\lambda_{\perp} \cdot w} = \frac{20 \times 10^{-3} [\text{A}] \times 10 \times 10^{-6} [\text{V}]}{2 \times 280 \times 10^{-7} [\text{cm}] \times 1200 \times 10^{-7} [\text{cm}]}$$

$$\approx 30 [\text{W}/\text{cm}^2]$$

これは液体ヘリウムの冷却能力 1W/cm<sup>2</sup> を大幅に超えている事が分かる。この発熱が、ナノブリッジや SQUID の特性に関わるボルテックスの運動に影響を及ぼす事を考慮し、今後は低い  $I_c$  のナノブリッジを作製して特性を得ることとする。また、非対称ナノブリッジの括れ部分を流れる遮蔽電流は  $I_c$  の大きさに依存しないために、相対的に  $I_c$  の変化率が増大する事も期待できる。

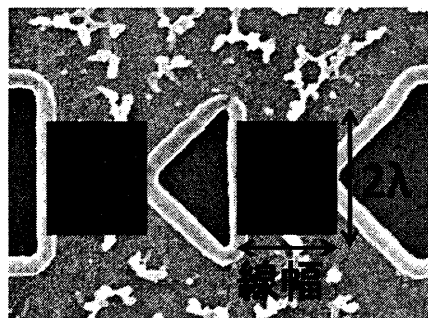


図 9 ナノブリッジの発熱

更に、 $I_c$ の変調が  $30\mu\text{A}$  であることより見積る事のできる SQUID のインダクタンス  $L$  は以下ようになる。

$$L = \frac{0.5\Phi_0}{I_{\text{cir}}} = \frac{0.5 \times 2.07 \times 10^{-15} [\text{Wb}]}{30 [\mu\text{A}]} = 34\text{pH}$$

ここで、 $I_{\text{cir}}$ とは SQUID ループを流れる周回電流である。ここにおける  $L$ はループインダクタンスとカイネティックインダクタンスの和であるが、今回の我々の構造からではその2つを区別する事は出来ない。従って、今後はコントロール電流を用いた直接注入型の SQUID を作製して、ループの配線のインダクタンスを求めておく必要がある。

また、同時に数値解析によりインダクタンスや SQUID の閾値特性を見積り実験値との比較を行う必要がある。非対称ナノブリッジはその非対称な電流分布から図 10 (a)のように  $I_{c1} < I_{c2}$  とすることで JJ による非対称な SQUID に近似する事ができ、このような非対称 SQUID の閾値特性に関する数値解析は古くから行われている [6][7]。更に、このモデルを並列化し図 10 (b)のように 4 並列 JJ による SQUID にすることで、非対称ナノブリッジによる SQUID に近似する事ができる。この際  $I_{c1} < I_{c2}$ ,  $I_{c3} < I_{c4}$  とすることでそれぞれのループを非対称ナノブリッジと見立て、 $L_1, L_3 \ll L_2$  とすることで中央のループを SQUID のループと近似する。

今後は図 10 のモデルによる数値計算を行い、非対称ナノブリッジによる SQUID の閾値特性を求めるとともに、インダクタンスや閾値特性の実験値との比較を行う。

## 5. まとめ

2 並列の非対称ナノブリッジによる SQUID を作製し、その臨界電流及び発生電圧の外部磁場依存性を測定した。その特性において、ラチェット効果による  $I_c$  の変化と SQUID による  $I_c$  の変調を確認する事が出来た。

また、 $I_c$  変化率の増大に向けて SQUID のループ面積を縮小したが、外部磁場に対する周期的な変調は得られなかった。原因はナノブリッジの発熱密度が大きすぎる事であると考えており、今後は  $I_c$  の低いサンプルを作製し特性を評価していく予定である。

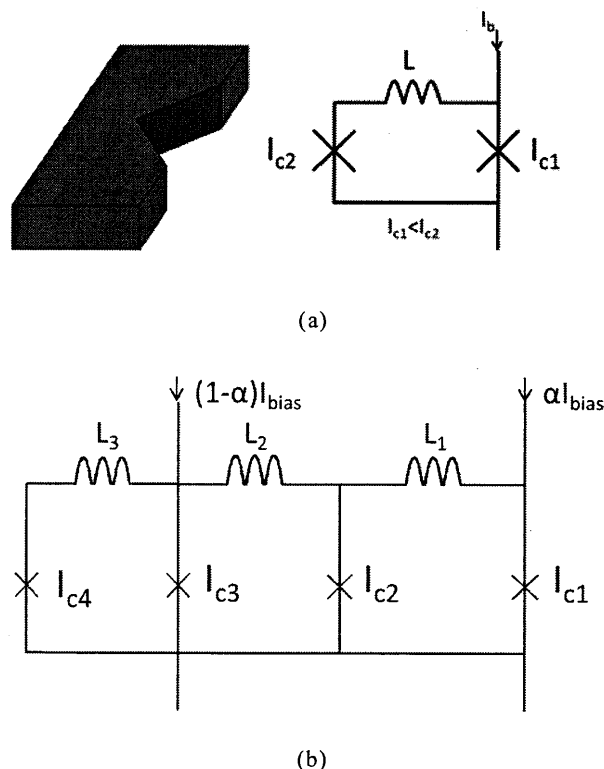


図 10 (a) JJ の SQUID による非対称ナノブリッジの近似モデルと (b) 非対称ナノブリッジによる SQUID の近似モデル

## 謝辞

本研究は、JST-ALCA、科研費挑戦的萌芽研究 (課題番号 23656238) および基盤研究(B) (課題番号 23360152)によって支援されている。

## 文献

- [1] Y. Hayakawa, et al. "Low Frequency Test of 4x4 Reconfigurable Data-Path Processors" *The 5th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2012)* P-21, 2012.
- [2] M. Inoue, et al. "Simulation Study on the Properties of YBCO Nanobridges for Circuit Applications." *12th International Superconductive Electronics Conference. (ISEC2009)* TD-P16, 2009.
- [3] K. Kajino, et al. "Demonstration of Vortex Ratchet Effect in Y-Ba-Cu-O Asymmetrical Nanobridges." *2012 Applied Superconductivity Conference (ASC2012)* 2EPC-07, 2012
- [4] 藤田他：第 57 回応用物理学関係連合講演会 20a-P15-1(2010).
- [5] K.Kajino, et al. "Preparation of Narrowed  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  Nanobridges Down to 30nm Width Reduced Degradation." *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 19 (3), pp.178-182, 2009.

- [6] W. T. Tsang and T. VanDuzer, "d. c. analysis of parallel arrays of two and three Josephson Junctions," J. Appl. Phys., vol. 46, pp4573-4580, Oct. 1975
- [7] Bernard S. Landman, "CALCULATION OF THRETHOLD CURVES FOR JOSEPHSON QUANTUM INTERFERENCE DEVICES," IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-13, No.1, Jan. 1977.