

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360169

研究課題名(和文) サブテラヘルツ回路ブロック実装による超伝導デジタルRF受信機の開発

研究課題名(英文) Development of a superconductive digital RF receiver by the sub-Terahertz circuit block implementation

研究代表者：

藤巻 朗 (FUJIMAKI AKIRA)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：20183931

研究成果の概要(和文)：無線信号を直接デジタル化するデジタルRF受信機をより高感度化、広帯域化するため、サブテラヘルツ動作が可能な高温超伝導体小規模回路をNb超伝導集積回路にオンチップブロック実装し、受信機の核となるA/D変換器の構成を試みた。高温超伝導体回路については、変調器の要素回路の120GHzまでの動作を確認した。一方、Nb単一磁束量子集積回路では、間引きフィルタならびにその評価のためのA/D変換器を作製し、冷凍機での動作実証に成功した。ブロック実装技術については、その基盤技術の開発を終えた。

研究成果の概要(英文)：We tried to implement high-temperature-superconductor (HTS) circuits on Nb single flux quantum (SFQ) integrated circuits (ICs) with a block implementation technique for a digital RF receiver having wider band widths and higher sensitivity. The key component is an analog-to-digital converter (ADC) in such a receiver. In this study, we demonstrated 120-GHz operation of a modulator, the front-end part of an ADC, based on an HTS circuit. We also successfully demonstrated decimation filters and ADCs based on the SFQ ICs under a cryocooler. We have already finished development of a block implementation technique.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2009年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2010年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：超伝導エレクトロニクス

科研費の分科・細目：電気・電子工学 通信・ネットワーク工学

キーワード：単一磁束量子、高温超伝導、ブロック実装、アナログ-デジタル変換器

## 1. 研究開始当初の背景

デジタルRF受信機では、アンテナから入力された無線信号が直接デジタル信号に変換され、復調はデジタル信号処理回路によって行われる。デジタル化することで、通信方式の変更などがソフトウェアの変更だけで対応可能となる。また、信号処理能力を上げることで異なる通信方式の電波を並列に処理することも可能となる。柔軟性や機能を高めるには、無線機として、より広いバンド幅

と大きなダイナミックが求められる。無線搬送波周波数は10GHz程度にまでわたって割り当てられていることから、上の要求を満たすには受信機初段のバンドパス-オーバーサンプリング-アナログ-デジタル変換器(以降、単にADCと記す。)は100GHz以上でサンプリングすることが望ましい。しかしながら、そのようなADCを既存の技術で実現することは困難な状況にある。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、デジタル RF 受信機に必要な広帯域大ダイナミックレンジ ADC を実現することにある。具体的には、ADC フロントエンド部 (変調器) に向けて、サブテラヘルツ動作が可能な高温超伝導デバイス、ならびにそれを用いた回路を開発する。また、ADC 後段に該当する間引きフィルタを Nb 単一磁束量子大規模集積回路 (SFQ-LSI) によって開発し、ADC としての性能を評価する。さらに、高温超伝導デバイスをはじめとする異種基板上に形成された回路を Nb 集積回路に埋め込み、Nb による広帯域配線を実現するブロック実装の基盤技術を開発する。

## 3. 研究の方法

上述のように、本研究は大きく分けて、「高温超伝導デバイスならびに回路の開発」、「Nb-SFQ-ADC の開発」、「異種基板上回路のブロック実装」の3つの研究項目からなる。図1はそれぞれの開発項目がデジタルRF受信機向けのADCとしてどのように使われるかを示したものである。以下、その3つの項目に対し研究方法を述べる。

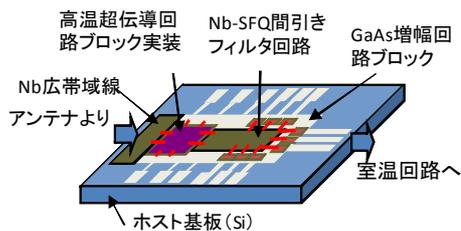


図1 最終的に構成されるADCのイメージ図。高温超伝導回路とGaAs増幅回路はブロックに加工され、ホスト基板であるSiに埋め込まれる。

### (1) 高温超伝導デバイス・回路の開発

本研究では、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (YBCO) を電極とした積層型ジョセフソン接合によって、回路の構成を試みた。積層型ジョセフソン接合は、我々のグループのみがこれまで作製に成功している。回路化には、層間絶縁層をYBCOと同様の結晶構造を持つ材料に変更し、その上にYBCOを再度結晶成長させ、配線層として用いる必要がある。そこでさまざまな材料を実験的に検討した。最終的には $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (PBCO) のCuをGaに一部置換したGaドープPBCO (Ga-PBCO) を採用した。

回路化に向けては、オーバーサンプリングADCの基本となるデルタ変調器の構成を目指し、SQUIDとトグルフリップフロップを作製、評価した。

一方、ここで開発を目指すSFQ-ADCは、負の信号を取り扱うことが出来ない。そこで、

オフセットを加えるか、もしくは無線信号を半波整流する必要がある。ここでは、新しいデバイスとしてYBCO薄膜をベースとしたナノブリッジの研究を行った。ナノブリッジは、幅と長さが磁場侵入長以下の細線である。本研究では非対称構造のナノブリッジ (非対称ナノブリッジ) を構成することで、電流-電圧特性に非対称性を発現させ、ダイオード特性を取得することを試みた。

### (2) Nb-SFQ-ADC の開発

Nbを用いたデルタ型オーバーサンプリングSFQ-ADCのプロトタイプは既に開発済みであった。本研究では、ADCの高度化に向け、従来半導体回路で行っていた積分をSFQ間引きフィルタ回路内で行うことを試みた。また、実際に用いることを想定し、GM冷凍機下で性能評価を試みた。

### (3) 異種基板上回路のブロック実装

図1に示すように、最終的にはNb-SFQ回路を構成するSi基板上に、高温超伝導回路ブロックならびに室温へ信号を送るためのGaAs増幅回路ブロックを埋め込む必要がある。埋め込まれるブロックは厚さを数マイクロメートルにまで薄くすることが求められる。さまざまな検討の結果、現時点では高温超伝導基板であるMgOを薄くすることは困難と判断した。そこで、GaAs増幅回路ブロックの埋め込み実装を試みた。SFQ回路とGaAs増幅回路ブロックは広帯域配線で結線される。なお、ADCの具現化には高温超伝導回路ブロックとNb-SFQ間引きフィルタ回路も広帯域実装する必要がある。幸い高温超伝導回路ブロックは大きいことから、ここにはフリップチップ技術を用いることとした。

## 4. 研究成果

研究成果についても、同様に3つの項目について分けて記載する。

### (1) 高温超伝導デバイス・回路の開発

回路応用のためには、同一チップ内での接合特性の均一性が求められる。当初、YBCO/人工障壁層/YBCOの三層構造を試みたが、チップ内の接合の中に必ずフラックスフロー的な特性を示すものが含まれ、十分な均一性を得ることができなかった。そこで、より広い成膜温度幅を持つ $\text{YbBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (YbBCO) を上部電極として用いることとした。また、層間絶縁層にはGa-PBCOを用いた。図2が得られた電流-電圧特性の例である。臨界電流密度 $2.5 \text{ kA/cm}^2$ 、 $I_c R_n$ 積 $1 \text{ mV}$ と評価パラメータ上は概ね良好な特性が得られている。なお、ここで $I_c$ は臨界電流値、 $R_n$ は接合抵抗を指す。

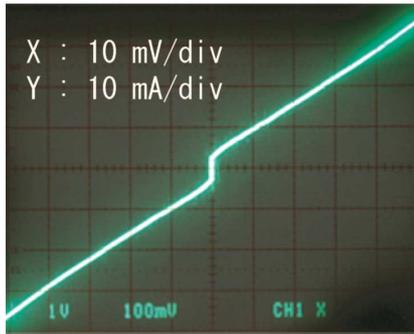


図2 YbBCO/人工障壁層/YBCO 積層型ジョセフソン接合の電流-電圧特性。

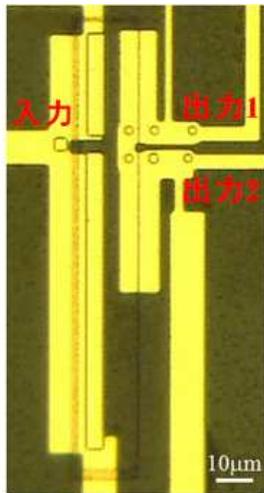


図3 試作したトグルフリップフロップ回路。120GHz までの動作を確認した。

比較的均一なジョセフソン接合が得られたことから、変調器を構成する SQUID ならびにトグルフリップフロップを試作した。SQUID は 2-3 接合で構成可能であることから、研究の重点はトグルフリップフロップ回路に絞った。図 3 が試作したトグルフリップフロップ回路の顕微鏡写真である。合計 7 個のジョセフソン接合から成る。平均電圧法によって評価した結果、120GHz まで動作することが確認された。この動作周波数は、当面は要求条件を満たすもの的高温超伝導体のポテンシャルから考えると 1/5 程度にとどまっている。この原因は、図 2 に見られるように接合特性上に依然として余剰電流が見られることに関連している。すなわち、人工トンネル障壁層が不完全であり、ジョセフソン接合のスイッチング時間が回路内で不均一になっていることが高速動作を妨げていると考えている。

ジョセフソン接合の作製と並行して非対

称ナノブリッジの作製も行った。図 4 は試作した 200nm 幅のナノブリッジである。YBCO の膜厚は 30nm である。図から分かるように、ブリッジは片側が直線、その反対側にはくびれ構造を有している。バイアス電流は、この非対称ナノブリッジ内を均一に流れることはなく、くびれに集中して流れるようになる。ナノブリッジの特性はアブリコソフボルテックスがブリッジ内に侵入し、横断する振舞いで大まかには説明できる。くびれに集中したバイアス電流によって、アブリコソフボルテックスの侵入を妨げていた表面バリアの高さが低くなる。侵入したボルテックスは、バイアス電流からのローレンツ力を受け、逆側へと走行する。ボルテックスがナノブリッジ内に存在している間は、ボルテックス間の斥力のため、新たなボルテックスの侵入はない。これらの結果、図 4 でバイアス電流が上から下に流れている場合、1 個のボルテックスが必ず右から左へ走行する。

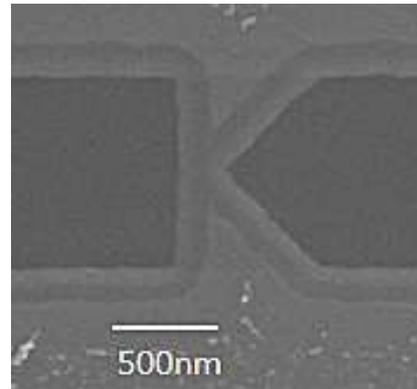


図4 幅 200nm の非対称ナノブリッジ

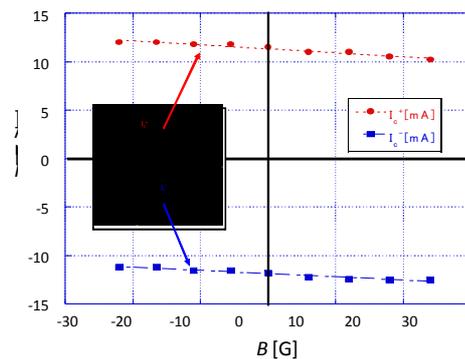


図5 非対称ナノブリッジの臨界電流値の磁場依存性。

この状況下で外部磁場を紙面の表から裏方向に印加すると遮蔽電流がさらに表面バリアの高さを下げる。その結果、ナノブリッジの臨界電流が低下する。逆方向の磁場に対しては表面バリアの高さが上がり、臨界電流値は上昇する。これは物理的にはラチェット効果と呼ばれ、ナノブリッジとしては本研究で初めて観測された。図5は、非対称ナノブリッジの臨界電流値の外部磁場依存性を調べて結果である。-22G から+34G まで外部磁場を変化させると一定の割合で臨界電流値が下がっている。これは、この範囲でラチェット効果が働いていることを示している。単独の非対称ナノブリッジでダイオード特性を得ることは現実的には困難である。したがって、今後は非対称性を増すために並列化することが求められる。整流素子に使う場合にはより大きな電圧を急峻に発生させる必要がある。そのためには、直列化も求められる。

## (2) Nb-SFQ-ADC の開発

本研究で想定している ADC はデルタ型オーバーサンプリング ADC となる。したがって、間引きフィルタには積分器が必要となる。そこで従来開発済みであった1次間引きフィルタ内に積分器を搭載することを試みた。この新しい間引きフィルタ自身は正常動作しているが、変調器と合わせて ADC を構成したところ、現時点ではダイナミックレンジの向上には至らなかった。変調器から間引きフィルタへのデータの受け渡しが正常になされていない可能性があり、今後改善していく必要がある。

これまで本研究では、液体ヘリウム内で ADC の評価を行ってきた。しかしながら、実際は冷凍機で用いられることになる。冷凍機は振動を発生するほか、簡易な磁気シールドしか用いることが出来ない。さらに外来雑音強度も大きい。こういった環境でも開発した ADC が動作するかどうかの検証を試みた。

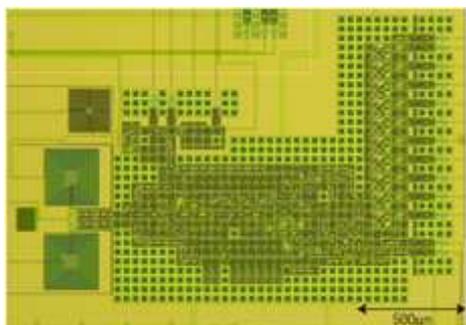


図6 Nb-SFQ 回路によるデルタ型オーバーサンプリング ADC の顕微鏡写真。写真のいちばん左が変調器となる。

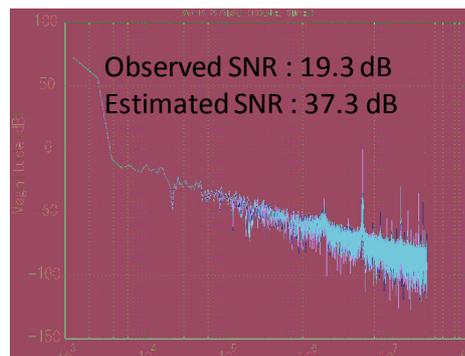


図7 冷凍機下での ADC のパワースペクトル。5MHz の参照信号を入れている。

図6はNb/AlO<sub>x</sub>/Nb ジョセフソン接合集積回路によるデルタ型オーバーサンプリング ADC の顕微鏡写真である。この ADC は変調器も搭載している。地磁気のような均一な外部磁場をキャンセルするようにして雑音の影響を低減している。図7に冷凍機下で測定した ADC のパワースペクトラムを示す。参照信号として 5MHz の信号をちょうどフルスケールになるように入力している。バンド幅を 10MHz とするとダイナミックレンジ（この場合、信号対雑音比 SNR と等価）は 19.3dB となる。ただし、この実験では LSB から 2 ビット目の出力信号 bit2 の出力が、プローブでの接触不良のため計測できなかった。すなわち下位 3 ビットの出力が図7には反映されていない。仮にこれが正常に動いていたとするとダイナミックレンジは 37.3dB となる。この値は、液体ヘリウム下での実験に比べ 3dB 劣化している。冷凍機では振動などの雑音が増加しているためと考えられるが、全体の ADC の動作には特に問題を与えないことが分かった。

さらなるダイナミックレンジの増加には、前述した積分器の内臓が効果的である。これだけで約 20dB ダイナミックレンジが向上することが数値解析によって分かっている。さらに間引きフィルタを 2 次にすることで、80dB 以上のダイナミックレンジを達成できると考えている。なお、現時点では ADC の実験はバンドパス型にはなっていない。バンドパス型にするには、現在の変調器で採用している磁気結合を LC 結合に変更する必要がある。このパラメータの最適化も今後の課題となる。

## (3) 異種基板上回路のブロック実装

開発する最終形態の実現には、ブロック実装技術の開発が求められる。基盤技術を開発するため、GaAs 増幅回路ブロックの供給を受け、それをういて開発を進めた。GaAs 増幅回路ブロックは、長さ 128 μm、幅 74 μm、厚さ 2 μm となっている。

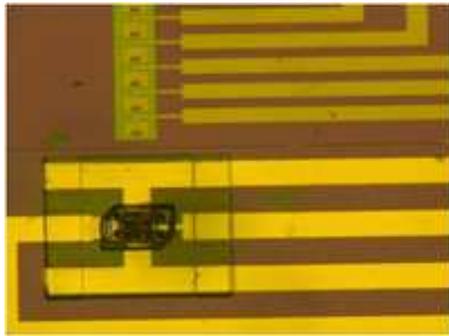


図 8 Si 基板上に作製したリセス（くぼみ）に GaAs 増幅回路ブロックをフルイディックセルフアセンブリ技術を用いてはめ込み、その後、銀および Nb によって配線した様子。写真上部はジョセフソン接合。

ブロック実装の手順は以下のとおりである。まず SFQ 回路を形成する。この研究では、第一段階として SFQ 回路ではなく、ジョセフソン接合を用いた。その後、GaAs 増幅回路ブロックを Si 基板上に埋め込むために、Si に深さ約  $3\mu\text{m}$  のリセスを形成した。さらに、フルイディックセルフアセンブリ技術を用いて、リセスに GaAs 増幅回路ブロックを落とし込み、それをレジストで固定した。その際、ジョセフソン接合が破壊されないように、プロセス温度を  $170^\circ\text{C}$  以下に抑える工夫をした。GaAs 増幅回路ブロックにプラズマが直接触れないように保護膜を形成したのち、銀ならびに Nb を用いて SFQ 回路との接続を行った。図 8 がブロック実装後の顕微鏡写真である。左下に GaAs 増幅回路ブロックが見える。その上には、ジョセフソン接合が配置されている。

プロセスを通しての GaAs 増幅回路とジョセフソン接合の影響を測定した。GaAs 増幅回路ブロックの特性は僅かに劣化が見られた。これはトランジスタ本体はプラズマから守られているものの、比較的近くにある電極がプラズマに晒され、それが何らかの悪影響を与えたものと考えられる。一方、ジョセフソン接合は、特に大きな劣化は見られなかった。以上の実験より、異種基板上に形成した複数の回路ブロックを Si 基板上に実装する基盤技術は取得したものと考えている。

#### (4) 総括

上述のように、本研究はさまざまな技術の上で成り立っている。ここには問題点もあるが、それぞれの回路の特徴を生かし、それを 1 チップに収めることが近い将来可能になるものと考えられる。この技術は、超伝導エレクトロニクスの応用の幅を大きく広げたものと考えている。

## 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)

- ① K. Kajino, T. Kimura, Y. Horii, M. Watanabe, M. Inoue, and A. Fujimaki, “Preparation of Narrowed  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  Nanobridges Down to 30 nm with Reduced Degradation,” IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19 (3), pp. 178-182, 2009, 査読有

[学会発表] (計 22 件)

- (1) 安保宇, “高温超伝導体ナノブリッジの特性における熱効果の検討,” 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 2011. 3. 9, 要旨集
- (2) 藤田圭佑, “高温超伝導非対称ナノブリッジの電流-電圧特性の膜厚依存性,” 第 71 回応用物理学学会学術講演会, 2010. 9. 14-17, 長崎大学, 長崎
- (3) A. Fujimaki, “Event-driven dual channel oversampled analog-to-digital converter for detector system,” Applied Superconductivity Conference 2010, 2010. 8. 1-9, the Omni Shoreham Hotel, Washington DC, USA
- (4) K. Kajino, “Ratchet Effect of Vortex Motion in Asymmetrical Nanobridges with a Magnetic Field,” Applied Superconductivity Conference 2010, 2010. 8. 1-9, the Omni Shoreham Hotel, Washington DC, USA
- (5) M. Inoue, “Numerical Calculation Study on the Current Distribution of YBCO Nanobridges and its Application to the Control of the Characteristics of Asymmetric Bridges,” Applied Superconductivity Conference 2010, 2010. 8. 1-9, the Omni Shoreham Hotel, Washington DC, USA
- (6) 藤田圭佑, “超伝導整流素子に向けた非対称ナノブリッジの作製,” 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 2010. 3. 17-20, 東海大学, 神奈川
- (7) 奥村崇之, “HEMT 埋め込み超伝導回路におけるデバイス間配線プロセスの評価,” 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 2010. 3. 17-20, 東海大学, 神奈川
- (8) 楠本哲也, “検出器アレイに向けた 2 チャンネルイベント駆動型アナログ-デジタル変換機の動作実証,” 電子情報通信学会 2010 年総合大会, 2010. 3. 16-19, 東北大学, 宮城
- (9) A. Fujimaki, “Oversampled analog-to-digital converter with an

- event-driven decimation filter,” 9<sup>th</sup> European Conference on Applied Superconductivity, 2009. 9. 13-17, Dresden, Germany
- (10) 堤早希, “HEMT 埋め込み超伝導回路作製プロセスの評価,” 第 70 回応用物理学会学術講演会, 2009. 9. 8-11, 富山大学, 富山
- (11) 藤田圭佑, “ナノブリッジ作製における再蒸着プロセスに用いるターゲット材料の変更とその電気特性への影響,” 第 70 回応用物理学会学術講演会, 2009. 9. 8-11, 富山大学, 富山
- (12) 梶野顕明, “高温超伝導ナノブリッジにおける表面バリア効果の実験の評価,” 第 70 回応用物理学会学術講演会, 2009. 9. 8-11, 富山大学, 富山
- (13) Y. Higasgi, “Delta Analog-to-digital Converters with Event-driven Decimation Filters for a Detector Array,” 12<sup>th</sup> Int. Superconductive Electronics Conference, 2009. 6. 16-19, Fukuoka, Japan
- (14) K. Hayakawa, “High-temperature-superconductor vertically-stacked Josephson junctions with high reproducibility using  $\text{PrBa}_2\text{Cu}_{2.9}\text{Ga}_{0.1}\text{O}_{7-x}$  as an insulating layer,” 12<sup>th</sup> Int. Superconductive Electronics Conference, 2009. 6. 16-19, Fukuoka, Japan
- (15) T. Okumura, “Fabrication of HEMT-Implanted Superconductor Circuit with Broadband Interconnects,” The 2<sup>nd</sup> Superconducting SFQ VLSI Workshop, 2009. 6. 15-17, Fukuoka, Japan
- (16) 早川桂太, “ $\text{PrBa}_2\text{Cu}_{2.9}\text{Ga}_{0.1}\text{O}_{7-x}$  を層間絶縁層に用いた高温超伝導積層型ジョセフソン接合の作製,” 第 56 回応用物理学会関係連合講演会, 2009. 3. 30-4. 2, 筑波大学, 茨城
- (17) 梶野顕明, “超伝導ナノブリッジの特性改善に向けた微細ラインパターンの断面形状の調査,” 第 56 回応用物理学会関係連合講演会, 2009. 3. 30-4. 2, 筑波大学, 茨城
- (18) 東陽介, “イベント駆動型セレクタを組み込んだ超伝導アナログ-デジタル変換器の開発,” 第 56 回応用物理学会関係連合講演会, 2009. 3. 30-4. 2, 筑波大学, 茨城
- (19) 東陽介, “超伝導検出器のアレイ化に向けたイベント駆動型セレクタ回路の開発,” 電子情報通信学会 2008 年エレクトロニクスソサ

- イエティ大会, 2008. 9. 16-19, 明治大学, 神奈川
- (20) 奥村崇之, “HEMT デバイスブロックの超伝導回路への広帯域オンチップ実装技術の提案,” 第 69 回応用物理学会学術講演会, 2008. 9. 2-5, 中部大学, 愛知
- (21) 梶野顕明, “損傷層回復プロセスによる高温超伝導ナノブリッジの特性評価,” 第 69 回応用物理学会学術講演会, 2008. 9. 2-5, 中部大学, 愛知
- (22) K. Kajino, “Preparation of Narrowed  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  Nanobridges Down to 30 nm with Reduced Degradation,” Applied Superconductivity Conference 2008, 2008. 8. 17-22, Hyatt Regency Chicago, USA

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤巻 朗 (FUJIMAKI AKIRA)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 20183931

### (2) 研究分担者

井上 真澄 (INOUE MASUMI)  
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 00203058  
赤池 宏之 (AKAIKE HIROYUKI)  
名古屋大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 20273287

### (4) 連携研究者 なし