

## 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 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360142

研究課題名（和文） 固有ジョセフソン接合超格子を利用したナノ超伝導スピントロニクスデバイスの創製

研究課題名（英文） Study on nano-spintronics devices utilizing intrinsic Josephson junction superlattices

研究代表者

入江 晃亘 (AKINOBU IRIE)

宇都宮大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90241843

研究成果の概要（和文）：ビスマス系高温超伝導体に内在する固有ジョセフソン接合と磁性体で構成される磁性体/固有ジョセフソン接合超格子ハイブリッド構造を作製し、同構造におけるスピン依存輸送特性について研究した。特に、マイクロマグネティクス解析により、観測された臨界電流の磁場依存性が、磁性体の磁区構造に密接に関係することかにした。これにより、同接合超格子の新しいスピントロニクスデバイス応用への可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：The hybrid structures of ferromagnet and intrinsic Josephson junctions in Bi 2212 high- $T_c$  superconductor were fabricated and spin dependent transport properties in them were studied. It was found by a micro-magnetics analysis that the observed magnetic field dependence of critical currents was strongly associated with a domain structure of ferromagnetic electrode formed on the intrinsic Josephson junctions. The obtained results indicates a potential for the novel spintorionics device application of such hybrid structures.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
2010年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2011年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2012年度	0	0	0
2013年度	0	0	0
総計	14,000,000	4,200,000	1,820,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：ナノ構造，スピントロニクス，高温超伝導体，超伝導材料・素子，固有ジョセフソン接合，トンネル現象，低温物性

## 1. 研究開始当初の背景

スピントロニクスは、電荷だけではなくスピンの自由度も利用し、従来のエレクトロニクスでは得られなかった機能や性能を実現する分野であり、磁性体、金属や半導体を含む非常に多岐に亘る研究が世界的規模で展開されている。

このような中、強磁性と超伝導はお互いに

競合する量子現象であるため、超伝導体/強磁性体ハイブリッド素子では様々な新しい量子現象が期待される。超伝導体内では、一般にスピンの逆向きの2つの電子が対(クーパー対)を形成しているが、磁性体から超伝導体へスピン偏極した電子が注入された場合、超伝導体内のスピンのバランスが崩れスピン非平衡状態となり、超伝導特性が変化しうる。

ところで、酸化物高温超伝導体の特徴は、超伝導性  $\text{CuO}_2$  層と非超伝導性ブロック層が交互に自然積層した超格子ナノ構造に起因して結晶構造自体がジョセフソン接合(固有ジョセフソン接合)として機能することであり、超伝導層の厚さが  $0.3\text{nm}$  と極めて薄い固有ジョセフソン接合系へスピンを注入した場合、大きな超伝導特性の変化が期待できる。

我々は、磁性体を電極とした固有ジョセフソン接合において、磁性体電極からのスピン注入により固有ジョセフソン接合の臨界電流が大きく減少することを見出したが、その詳細は未解明のままであり、同接合におけるスピン輸送特性を明らかにできれば、超伝導エレクトロニクスとスピントロニクスを融合した従来にない超伝導スピントロニクスデバイス創製の可能性が見出せう。

## 2. 研究の目的

本研究は、新しい動作原理に基づく超高性能の新基盤デバイスを実現するため、超高速動作・低消費電力の特徴をもつ超伝導エレクトロニクスと電子のもつ電荷とスピンを制御するスピントロニクスを融合したナノ超伝導スピントロニクスの創製を目指すものである。特に、銅酸化物高温超伝導体に内在するナノ構造に起因した固有ジョセフソン接合と強磁性体からなる積層構造を作製することにより、超伝導現象とスピン依存伝導現象の相関関係やスピンに依存した量子輸送の制御因子を明らかにすることにより、従来の超伝導素子やスピントロニクス素子にはない機能を探究するとともにそれを利用したデバイス開発を目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究は、高温超伝導体に内在する超格子ナノ構造を利用した新規な超伝導スピントロニクスの創製を目指すものであり、具体的には以下のような課題について研究を進めた。

### (1) 試料作製及びその特性評価

Bi 系高温超伝導体単結晶を用いた接合面積、接合形状の異なる磁性体/固有ジョセフソン接合超格子ハイブリッド構造を作製し、その電流-電圧特性、臨界電流の磁場特性について評価した。

### (2) スピン注入効果の解明

磁性体の磁気特性と臨界電流の磁場依存性の関連性をマイクロマグネティックス解析を用いて検討した。

## 4. 研究成果

得られた研究成果を以下に示す。

### (1) 磁性体/固有ジョセフソン接合超格子

## ハイブリッド構造における輸送特性

### ① 結晶成長並びに磁性体/固有ジョセフソン接合超格子構造の作製

固有ジョセフソン接合を内含する Bi 系高温超伝導体 (BSCCO) 単結晶を自己フラックス法により作製した。作製した単結晶の臨界温度は、約  $85\text{K}$  であった。得られた単結晶の表面をへき開し、真空蒸着、RF スパッタリングにより  $\text{Co}(20\text{nm})/\text{Au}(10\text{nm})/\text{BSCCO}$  三層構造を形成後、電子ビームリソグラフィ技術、フォトリソグラフィ技術、Ar イオンミリングを用いて図 1 に示すメサ構造の試料を作製した。作製したメサ構造の面内面積は、 $5 \times 5\mu\text{m}^2$ ,  $8 \times 8\mu\text{m}^2$ ,  $12 \times 12\mu\text{m}^2$ ,  $2 \times 13\mu\text{m}^2$  である。本研究で作製した試料形状を図 1 に示す。

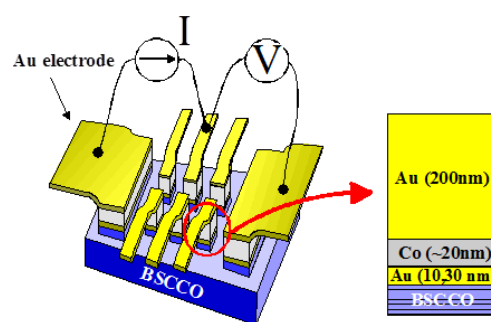


図 1 作製した試料の構造

### ② 電流-電圧特性

図 1 に作製した試料(面積  $25\mu\text{m}^2$ , 接合数 37)の  $77\text{K}$  における典型的な電流-電圧特性を示す。これよりハイブリッドメサ構造における固有ジョセフソン接合の電流-電圧特性は、通常の固有ジョセフソン接合のそれと同様にヒステリシスを伴う臨界電流の揃ったブランチ構造を示すことがわかる。異なる接合面積、形状、接合数の試料に対しても同じような特性が観測されており、再現性良く試料を作製することに成功した。

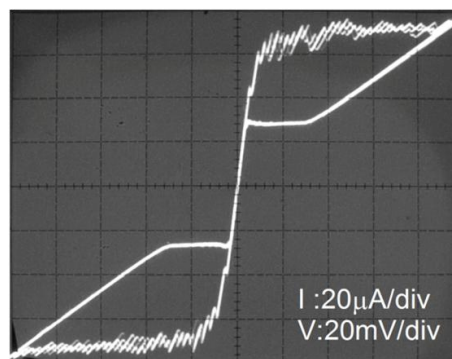


図 2  $77\text{K}$  における試料の電流-電圧特性例

### ③ 正方形メサにおける臨界電流

接合面積の異なる試料の臨界電流の磁場

依存性について調べた。図3は図2に示した試料の臨界電流の磁場依存性である。磁場印加後の臨界電流の最大値は、磁場印加前の臨界電流に比べ若干小さくなっていることがわかる。これは、磁場印加により磁性体が磁化され、スピン偏極電子が固有接合に注入されたことに起因すると考えられる。また、通常、ジョセフソン効果により臨界電流は磁場印加に対して変化するが、その場合、接合の大きさに依存して振る舞いに変化することが知られている。しかしながら、図4に示すように接合面積が $64\mu\text{m}^2$ 並びに $144\mu\text{m}^2$ の試料に対する77Kにおける測定結果も図3と同様な振る舞いをしており、臨界電流の磁場依存性は、ジョセフソン効果に加えスピン注入効果の影響が強く反映されていると解釈できる。また、試料の磁化特性の比較したところ臨界電流が最大になる磁場は磁化が0になる磁場とほぼ一致しており、磁区構造と臨界電流に相関があることが確認された。

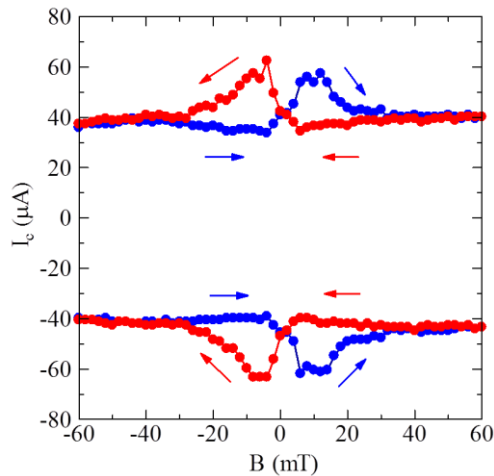


図3 面積  $25\mu\text{m}^2$  の試料の臨界電流の磁場依存性

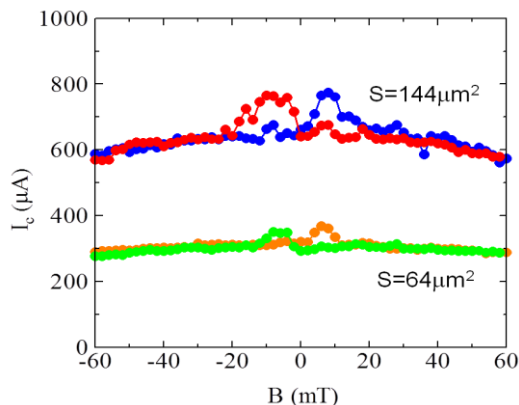


図4 面積  $64\mu\text{m}^2$  並びに  $144\mu\text{m}^2$  の試料の臨界電流の磁場依存性

#### ④長方形メサにおける臨界電流

磁性体電極の磁区構造が臨界電流に与える影響を明らかにするために、長方形メサ構

造を作製し、磁場印加方向を変えたときの臨界電流の磁場依存性を測定した。図5に接合面積が $2\times 13\mu\text{m}^2$ のメサ構造において観測された臨界電流の磁場依存性（測定温度：77K）を示す。(a)は長辺に平行に磁場を印加した場合、(b)は長辺に垂直に印加した場合の結果を示しており、臨界電流の磁場依存性に大きな差異がみられた。

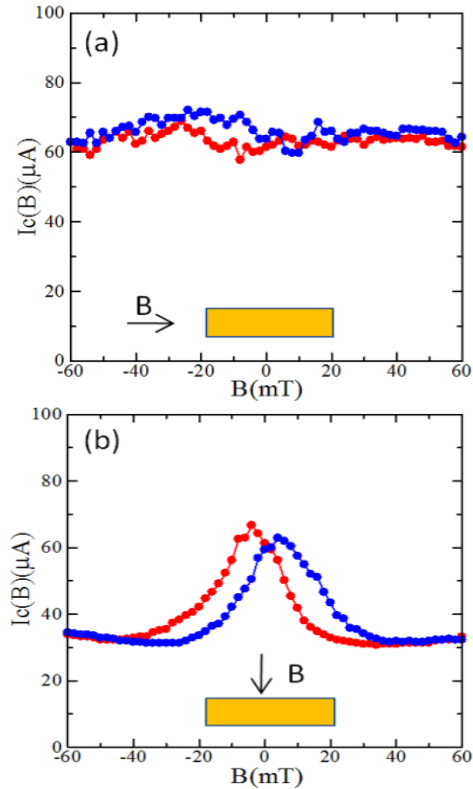


図5 長方形メサ試料における臨界電流の磁場依存性

#### (2) スピン注入効果の解明

臨界電流の磁場依存性と磁性体の磁区構造との関連性をより詳細に調べるため、磁区構造をマイクロマグネティクス解析により検討した。その結果、長方形試料において、長辺に平行に磁場を印加した場合は、磁区が一齐に回転する回転磁化過程であり、長辺に垂直に磁場を印加した場合は、磁壁が移動して磁化方向が反転する磁壁移動過程に対応することがわかった。これより、回転磁化過程においては、磁化が一齐に回転するためスピン偏極電子の固有ジョセフソン接合における量子位相へ与える空間的な影響が磁化回転前後で変化しない(図5(a))のに対し、磁壁移動過程においては、磁壁移動に依存してスピン偏極電子とクーパー対との相互作用が空間的に変化するため臨界電流の大きな変化が現れている(図5(b))と考えられる。

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 11 件)

- ① A.Irie, D.Oikawa, K.Yamada, G.Oya: "Generation and detection of THz radiation using intrinsic Josephson junctions" Physics Procedia (印刷中), 査読有
- ② G.Oya, T.Miyasaka, M.Kitamura, A.Irie: "Shapiro step response of intrinsic Josephson junctions of  $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$  at elevated temperatures" Physics Procedia (印刷中), 査読有
- ③ K.Yamaki, M.Tsujimoto, T.Yamamoto, T.Kashiwagi, H.Minami, A.Irie, K.Kadowak: "Magnetic field effects and dynamical control of terahertz electromagnetic wave emission from high-Tc superconducting  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  mesa structures" Journal Physics : Conference Series (印刷中), 査読有
- ④ D.Oikawa, A.Irie, K.Yamaki, G.Oya: "Terahertz electromagnetic radiation from  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$  intrinsic Josephson junction stack" Physics Procedia 27. 312-315 (2012), 査読有
- ⑤ N.Othman, G.Oya, M.Kitamura, A.Irie: "Shapiro step response of intrinsic Josephson junctions with high critical currents of  $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ " IEEE Trans. Supercond. 21. 176-179 (2011), 査読有
- ⑥ A.Irie, N.Arakawa, G.Oya: "Control of critical current of intrinsic Josephson junctions due to spin injection" IEEE Trans. Supercond. 21. 741-744 (2011), 査読有
- ⑦ M.Kitamura, A.Irie, G.Oya: "Numerical study of multi-hole SQUIDs using  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  intrinsic Josephson junctions" Physica C 470. 582-591 (2010), 査読有
- ⑧ A.Irie, N.Arakawa, H.Sakuma, M.Kitamura, G.Oya: "Magnetization-Dependent Critical Current of intrinsic Josephson junctions in  $\text{Co}/\text{Au}/\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$  mesa structures" Journal of Physics : Conference Series 234. 042015(1)-042015(6) (2010), 査読有
- ⑨ G.Oya, Y.Matsumoto, R.Hironaga, A.Irie: "The influence of inclination of magnetic field on Josephson-vortex flow in intrinsic Josephson junctions in  $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$  single-crystal mesas" Physica C 470. S827-S829 (2010), 査読有
- ⑩ A.Irie, G.Oya: "Simulation of the effect of temperature on flux-flow behavior in stacked intrinsic Josephson junctions" IEEE Trans. Supercond. 19. 730-733 (2009), 査読有

- ⑪ H.Kaneoya, A.Irie, G.Oya: "The behavior of subgap structures of intrinsic Josephson junctions in  $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$  under magnetic field and microwave irradiation" IEEE Trans. Supercond. 19. 195-198 (2009), 査読有

[学会発表] (計 29 件)

- ① 青木康太, 及川 大, 田村晃一, 入江晃亘, 八巻和宏, 大矢銀一郎: "メサ構造固有ジョセフソン接合のテラヘルツ波発振" 第59回応用物理学関係連合講演会 (2012年3月16日) 早稲田大学
- ② 今井佑貴, 宮坂貴広, 大矢銀一郎, 北村通英, 入江晃亘: "ジョセフソンボルテックス・フロー抵抗を伴う BSCCO のシャピロステップ応答" 第59回応用物理学関係連合講演会 (2012年3月16日) 早稲田大学
- ③ 伏木亮介, 八巻和宏, 及川大, 入江晃亘, 大矢銀一郎: "Te 添加法を用いた BSCCO 系高温超伝導体ウイスキーの成長における Bi 濃度依存性" 第2回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会 (2012年2月29日) 桐生市市民文化会館
- ④ 田村晃一, 及川大, 入江晃亘, 八巻和宏: "高温超伝導体 BSCCO 微小メサ構造を用いた高周波電磁波検出" 第2回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会 (2012年2月29日) 桐生市市民文化会館
- ⑤ 米山憂, 及川大, 入江晃亘, 八巻和宏: "高温超伝導体 BSCCO メサ構造を用いたサブテラヘルツ波発振器の作製" 第2回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会 (2012年2月29日) 桐生市市民文化会館
- ⑥ D.Oikawa, A.Irie, K.Yamaki, G.Oya: "Terahertz electromagnetic radiation from  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$  intrinsic Josephson junction stack" 第24回国際超電導シンポジウム (ISS2011) (2011年12月4日) タワーホール船堀
- ⑦ D.Oikawa, A.Irie, K.Yamaki, G.Oya: "Terahertz electromagnetic wave emission and detection using mesa-type intrinsic Josephson junctions" The 6th East Asia Symposium on Superconductor Electronics (EASSE 2011) (2011年10月27日) 山形大学
- ⑧ A.Irie: "Transport properties in ferromagnet/intrinsic-Josephson-junction-stack heterostructures" The 6th East Asia Symposium on Superconductor Electronics (EASSE 2011) (2011年10月27日) 山形大学
- ⑨ A.Irie, D.Oikawa, K.Yamada, G.Oya:

- "Generation and detection of THz radiation using intrinsic Josephson junctions" Superconductivity Centennial Conference (2011年9月20日) ハーグ(オランダ)
- ⑩ G.Oya, T.Miyasaka, M.Kitamura, A.Irie: "Shapiro step response of intrinsic Josephson junctions of  $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$  at elevated temperatures" Superconductivity Centennial Conference (2011年9月20日) ハーグ(オランダ)
- ⑪ 及川 大, 山田清孝, 入江晃亘, 八巻和宏, 大矢銀一郎: "メサ構造固有ジョセフソン接合のテラヘルツ波発振" 第71回応用物理学学会学術講演会 (2011年8月31日) 山形大学
- ⑫ 荒川直大, 青木康太, 入江晃亘, 八巻和宏, 大矢銀一郎: "メサ構造固有ジョセフソン接合のテラヘルツ波発振" 第71回応用物理学学会学術講演会 (2011年8月31日) 山形大学
- ⑬ K.Yamaki, M.Tsujimoto, T.Yamamoto, T.Kashiwagi, H.Minami, A.Irie, K.Kadowaki: "Magnetic field effects and dynamical control of terahertz electromagnetic wave emission from high-Tc superconducting  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  mesa structures" The 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26) (2011年8月12日) 北京(中国)
- ⑭ 荒川直大, 入江晃亘: "磁性体/層状高温超伝導体ハイブリッド構造における固有ジョセフソン接合特性" 第1回電気学会栃木支所・群馬支所合同研究発表会 (2011年3月3日) 足利工業大学
- ⑮ 及川大, 山田清孝, 入江晃亘: "固有ジョセフソン接合によるテラヘルツ発振と検出" 第1回電気学会栃木支所・群馬支所合同研究発表会 (2011年3月3日) 足利工業大学
- ⑯ A.Irie, N.Arakawa, G.Oya: "Control of critical current of intrinsic Josephson junctions due to spin injection" The Applied Superconductivity Conference (ASC 2010) (2010年8月4日) Washington DC
- ⑰ N.Othman, G.Oya, M.Kitamura, A.Irie: "Shapiro step response of intrinsic Josephson junctions with high critical currents of  $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ " The Applied Superconductivity Conference (ASC 2010) (2010年8月4日) Washington DC
- ⑱ 齊藤優, 入江晃亘, 大矢銀一郎: "固有ジョセフソン接合を用いた電磁波の発振と検出(II)" 第57回応用物理学関係連合講演会 (2010年3月18日) 東海大学
- ⑲ 山田清孝, 入江晃亘, 大矢銀一郎: "固有ジョセフソン接合のヒステリシスの磁場依存性" 第57回応用物理学関係連合講演会 (2010年3月18日) 東海大学
- ⑳ 広長隆介, 大矢銀一郎, 入江晃亘: " $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  単結晶ジョセフソンボルテックスフロー素子の開発" 第57回応用物理学関係連合講演会 (2010年3月18日) 東海大学
- ㉑ 宮坂貴広, 大矢銀一郎, 入江晃亘: "高臨界電流  $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$  固有ジョセフソン接合のマイクロ波応答特性" 第57回応用物理学関係連合講演会 (2010年3月18日) 東海大学
- ㉒ 荒川直大, 入江晃亘, 大矢銀一郎: "固有ジョセフソン接合へのスピン注入(III)" 第57回応用物理学関係連合講演会 (2010年3月18日) 東海大学
- ㉓ A.Irie: "Spin-polarized Quasiparticle Injection Effects in Intrinsic Josephson Junctions" East Asia Symposium on Superconductive Electronics (EASSE) 2009 (2009年10月12日) 南京大学(中国)
- ㉔ 荒川直大, 入江晃亘, 大矢銀一郎: "固有ジョセフソン接合におけるスピン注入効果" 第64回応用物理学学会東北支部学術講演会 (2009年12月4日). 日本大学工学部
- ㉕ 藤野雅俊, 山田清孝, 入江晃亘, 大矢銀一郎: "固有ジョセフソン接合におけるヒステリシスの抑圧" 第70回応用物理学学会学術講演会 (2009年9月9日) 富山大学
- ㉖ 齊藤優, 入江晃亘, 大矢銀一郎: "固有ジョセフソン接合を用いた電磁波の発生と検出" 第70回応用物理学学会学術講演会 (2009年9月9日) 富山大学
- ㉗ 広長隆介, 入江晃亘, 大矢銀一郎: "固有ジョセフソン接合への印加磁場傾斜効果(II)" 第70回応用物理学学会学術講演会 (2009年9月9日) 富山大学
- ㉘ 入江晃亘, 山田清孝, 藤野雅俊, 大矢銀一郎: "固有ジョセフソン接合スタックにおける結合効果" 電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会 (2009年7月21日) 機械振興会館

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

入江 晃亘 (AKINOBU IRIE)  
 宇都宮大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：90241843

### (2) 研究分担者

大矢 銀一郎 (GIN-ICHIRO OYA)  
 宇都宮大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：00006280

### (3) 研究分担者

北村 通英 (MICHIHIDE KITAMURA)  
宇都宮大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：90161497

(4) 研究分担者

佐久間 洋志 (HIROSHI SAKUMA)  
宇都宮大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：40375522