

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 9 月 26 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04189

研究課題名（和文）超伝導テラヘルツ波発振デバイスの実用化に向けた基盤技術開発

研究課題名（英文）Development of fundamental technologies for practical superconducting terahertz oscillation devices

研究代表者

中島 健介（Nakajima, Kensuke）

山形大学・大学院理工学研究科・客員教授

研究者番号：70198084

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ビスマス系高温超伝導体の結晶構造に由来する固有ジョセフソン接合は、1 THzを超えるギャップ周波数を活用できることからテラヘルツ波源へ応用する研究が進められている。中でもジョセフソン接合として機能している高温超伝導体単結晶の立体構造にテラヘルツプラズマを共鳴させて接合からテラヘルツ波を放射させる共鳴励起型テラヘルツ波源は有望なテラヘルツ波源の一つとして期待されている。本研究は、共鳴励起型テラヘルツ波光源の実用化に向けて独自に開発した薄膜型固有ジョセフソン接合を用いてテラヘルツ波共鳴励起放射を実現するとともにデバイスを最適な動作温度に保つために不可欠な放熱特性の評価方法を考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

未開拓の周波数資源であるテラヘルツ波は、電波の特徴である物質透過性と光波の特徴である直進性を併せ持つことや指紋スペクトルと呼ばれる物質固有の吸収スペクトルがテラヘルツ波帯に多く存在していることから、情報通信分野だけでなく非侵襲イメージングやセキュリティセンシングなど幅広い分野への応用が期待されている。既存の発振デバイスの性能が十分でないなか、液体窒素温度で動作可能な高温超伝導固有ジョセフソン接合をはじめとする新しいテラヘルツ波源の開発が急務となっている。本研究で得られた固有ジョセフソン接合デバイスの薄膜化と放熱特性に関する知見は、高温超伝導テラヘルツ波発振デバイスの実用化に資すると期待される。

研究成果の概要（英文）：The intrinsic Josephson junction, which is derived from the crystal structure of bismuth-based high- T_c superconductors, has been studied for terahertz wave sources because it can utilize gap frequencies above 1 THz. Among them, the resonant excitation type terahertz wave source, in which terahertz waves are emitted from the junction by resonance of terahertz plasma with the three-dimensional structure of a high- T_c superconductor single crystal functioning as a Josephson junction, is expected to be one of the most promising terahertz wave sources. In this study, we realized resonant terahertz-wave excitation radiation using a thin-film intrinsic Josephson junction, which was originally developed for the practical application of resonant excitation terahertz-wave sources, and proposed a method for evaluating heat dissipation characteristics, which is essential for maintaining the device at an optimum operating temperature.

研究分野：超伝導デバイス

キーワード：高温超伝導デバイス 固有ジョセフソン接合 テラヘルツ波発振器 周波数資源

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ラジオ通信波長帯の上限であるマイクロ波(電波)と赤外線から可視光、紫外線に至る(光波)の境界に相当する凡そ周波数が 0.1THz ~ 10THz、波長が 3mm~30 μ m の範囲の電磁波であるテラヘルツ波は、高速大容量のワイヤレス通信を支える未利用の周波数資源として注目されるだけでなく、【透過性】、【物質識別性】、【非侵襲性】といった特長をもつことから危険物や製品の透過検査といったセキュリティ、農業・工業製品検査から医療診断や創薬など幅広い分野への応用が期待されている。しかしながら従来の固体デバイスでは発振周波数 1THz 前後の出力が弱く、高性能な発振デバイスの開発が課題となっている。超伝導デバイスの場合、エネルギーギャップ周波数がトランジスタの最高動作速度を表す遮断周波数に相当する。エネルギーギャップ周波数が 1THz を超える銅酸化物超伝導体の結晶構造自体に内在する固有ジョセフソン接合を使ってテラヘルツ波を発振させる様々な研究が進められた結果、2007 年に筑波大学とアルゴンヌ国立研究所(米国)の共同研究グループが Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+ δ} (Bi-2212) 単結晶上に形成した大きなサイズのメサ型構造固有ジョセフソン接合に電圧を印加することで強いテラヘルツ波放射を得ることに成功した。単結晶上に形成したメサ型の立体構造に交流ジョセフソン効果によって励起されたテラヘルツプラズマがキャビティ共鳴することで強いテラヘルツ波放射が得られると説明されているが、ジョセフソンプラズマの共鳴励起にデバイス構造が与える影響や効率的にテラヘルツ波を放射するためのデバイス設計など解決すべき問題が数多く残されていた。また、テラヘルツ波放射が報告されていたデバイスは何れも Bi-2212 のバルク結晶を出発材料として手作業による加工を必要としており、実用化にはデバイスの薄膜化も強く求められていた。研究代表者らは、Capped-LPE 法という独特な方法で育成した高品質 Bi-2212 薄膜を使った固有ジョセフソン接合の作製技術を有していたことから、薄膜化をはじめとする共鳴励起型テラヘルツ波発振器の実用化に向けた研究に取り組むこととした。

2. 研究の目的

本研究では、良質な接合特性を有する Bi-2212 固有ジョセフソン接合を用いた完全薄膜型テラヘルツ波発振デバイスの実用化に向けて次の基盤技術を確立することを目的とした。

- (1) 高品質 Bi-2212 超伝導薄膜の作製
- (2) 完全薄膜固有ジョセフソン接合の作製とプラズマ共鳴励起テラヘルツ波放射の実現ならびに放射特性評価
- (3) プラズマ共鳴励起テラヘルツ波放射の温度依存性と接合放熱特性の評価

3. 研究の方法

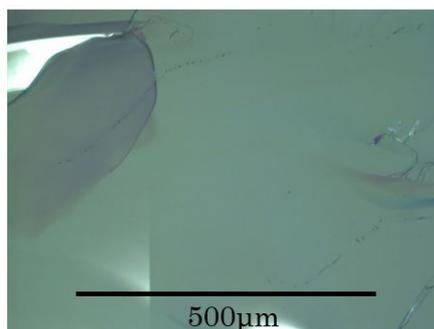
(1) Capped-LPE 法による Bi-2212 薄膜作製手順を見直し結晶粒径を大型化した上で、テラヘルツプラズマの共鳴励起に十分なサイズ(~300 μ m \times ~60 μ m \times ~1 μ m)の完全薄膜型固有ジョセフソン接合を作製する。

(2) 完全薄膜型固有ジョセフソン接合を用いてテラヘルツ波放射を実現し、テラヘルツ放射条件を解明する。

(3) 形状の異なる完全薄膜型、薄膜メサ型とバルク結晶メサ型それぞれの固有ジョセフソン接合の電圧 - 電流特性とテラヘルツ放射特性の温度依存性を比較検討することにより放射に最適な接合温度を明らかにするとともに接合の放熱特性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) Capped-LPE 法による大結晶粒径 Bi-2212 薄膜の作製と完全薄膜型固有ジョセフソン接合による共鳴励起テラヘルツ放射デバイスの作製



↑基板段差(~1 μ m)

図 1 Capped-LPE 法で MgO 段差基板上に作製した Bi-2212 膜単結晶粒の光学顕微鏡写真

図1は、Capped-LPE法で作製したBi-2212薄膜の単結晶粒を撮影した光学顕微鏡写真である。共鳴励起型テラヘルツ波放射デバイスを作製するのに十分な0.5mmを超えるサイズの結晶粒がMgO基板の段差(～1μm)を横断して成長させることに成功した。

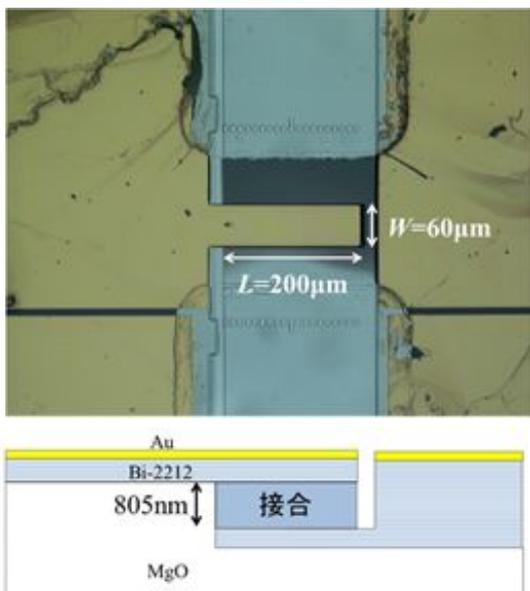


図2 図1の結晶粒上に作製した共鳴励起型Bi-2212固有ジョセフソン接合テラヘルツ波放射デバイス

図2は、この結晶粒を利用して標準的なフォトリソグラフィ法で作製した共鳴励起型テラヘルツ波放射デバイス(サンプルB24 接合サイズ $W=60\mu\text{m}$, $L=200\mu\text{m}$, $D=0.8\mu\text{m}$)の光学顕微鏡写真、図3は作製したデバイスの模式図である。このようにあらかじめ表面に段差を形成した基板を用いることで初めて超伝導四端子型のデバイスを作製した。

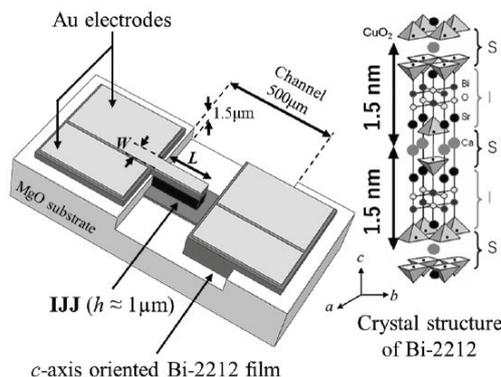


図3 四端子型共鳴励起型Bi-2212固有ジョセフソン接合テラヘルツ波放射デバイスの模式図

(2) 完全薄膜型固有ジョセフソン接合によるテラヘルツ波放射の実現と、テラヘルツ放射条件の解明

図4に作製した測定温度 $T=80\text{K}$ で測定したデバイス(サンプルB24)の(a)電流 - 電圧特性、(b)テラヘルツ放射強度 - 接合電圧依存性、(c)放射テラヘルツ波スペクトルを示す。液体窒素温度 77K を超えるデバイス温度でジョセフソンプラズマ共鳴によるテラヘルツ波放射を実現できたことはこの超伝導デバイスの実動作温度が液体窒素温度を超えることを実証するとともに、完全薄膜型デバイスの放熱特性が極めて優秀であることを示唆している。液体窒素温度以上のテラヘルツ発振動作を立証したことは、実用化に向けて画期的な成果である。

図5は異なる温度で測定されたテラヘルツ波周波数と接合電圧との関係を示している。四端子型デバイスであることから電圧の測定値はきわめて正確であり、全ての測定点が $2e/hN$, $N=730$ の直線に回帰することから全ての測定温度範囲においてテラヘルツ波放射時に730個の接合がコヒーレント動作していることを確認した。また、全ての測定点における発振周波数は、接合幅 $W=60\mu\text{m}$, $L=200\mu\text{m}$ の接合サイズに対して次式(K. Kadowaki et al. Journal of

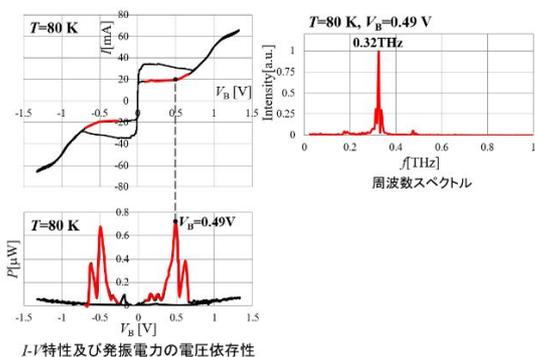


図4 測定温度80Kで測定したサンプルB24の(a)電流 - 電圧特性、(b)テラヘルツ放射強度 - 接合電圧依存性、(c)放射テラヘルツ波スペクトル

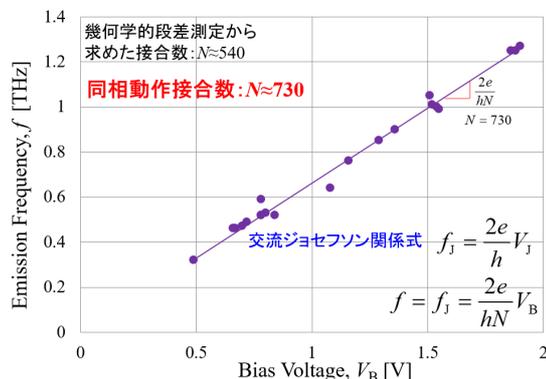


図5 発振周波数のバイアス依存性と同相動作接合数(サンプルB24)

the Physical Society of Japan Vol.79, No. 2, February (2010)) で与えられ、図 6 に示す接合共鳴モードの周波数の何れかに一致することを明らかにした。

$$f_{mp} = \frac{c_0}{2\sqrt{\epsilon}} \sqrt{(m/L)^2 + (p/W)^2}$$

ただし、 m, p は整数、 c_0 は光速、 ϵ は Bi-2212 の誘電率

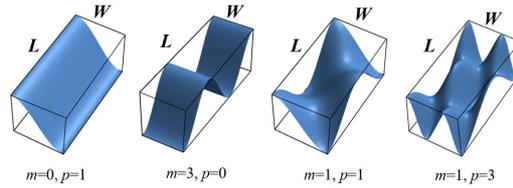


図 6 キャビティ共鳴モードの電界分布模式図

(3) テラヘルツ放射に最適な接合温度と接合の放熱特性

図 7 は固有ジョセフソン接合 (サンプル B24) のプラズマ共鳴励起によって得られたテラヘルツ波の周波数と電力の接合温度依存性を示している。この結果から、接合温度が 55K から 80K の範囲にあるときに $m=0, p=1$ の基本共鳴モードで最大発振強度約 6mW が得られることが明らかとなった。

テラヘルツ放射デバイスは真空中のコールドヘッドに取り付けて使用することが想定される。その場合、電圧状態にあるため固有ジョセフソン接合で発生するジュール熱をいかにしてコールドヘッドの冷熱浴へ伝導させ最適な動作温度範囲に保つかが実用化の鍵を握っている。そこで本研究では、図 8(a), (b) に示すように接合数がほぼ同数で構造の異なる完全薄膜型とバルクメサ型の固有ジョセフソン接合を同じコールドヘッド冷却の条件下で電圧 - 電流、テラヘルツ放射特性を測定、比較することでそれぞれの熱伝導特性がそれらの特性に与える影響を評価とした。

図 9 から両者には最大強度のテラヘルツ放射が観測される温度範囲の違いだけでなく、バックベンディングと呼ばれる、電流 - 電圧特性上で電流が接合臨界電流を超えたときに発生する電圧が電流の低下と共に上昇する負性抵抗特性に大きな違いが見てとれる。

この見かけ上の負性抵抗は、電流が接合臨界電流を超えて電圧状態となったことで接合に発生するジュール熱によって接合温度が上昇し、ギャップ電圧が低下することを示しています。バックベンディングは放熱性が低いほど大きくなることから、我々は放熱性の指標としてバックベンディングに着目した。サブギャップ領域カーブ上での最大電圧 V_{max} と電圧状態に移した直後の電圧 V_{jump} の差をバックベンディング量 V として定義すると、 V をその点のジュール損 ($P_j = IV$) で除した値 V/IV を接合からコールドヘッドへの放熱抵抗を表す指標として、また、 $I - V$ 特性上の最大電圧 V_{max} は、温度に依存したギャップ電圧変化を反映していることから、接合温度を間接的に表す指標として解析を進めた接合温度を間接的に表す指標として解析を進

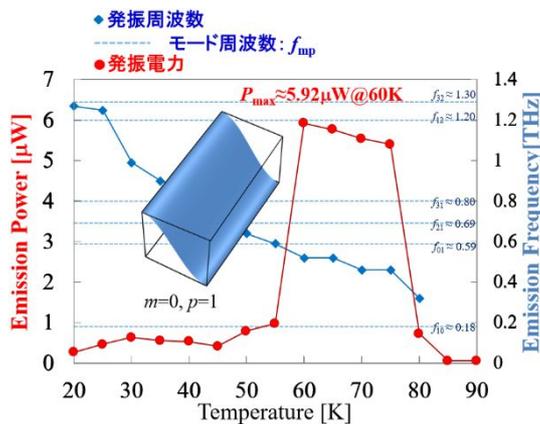


図 7 発振周波数・電力の温度依存性と共鳴モード (サンプル B24)

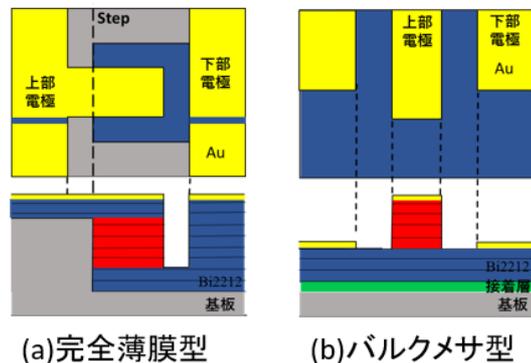


図 8 完全薄膜型とバルクメサ型固有ジョセフソン接合の構造比較

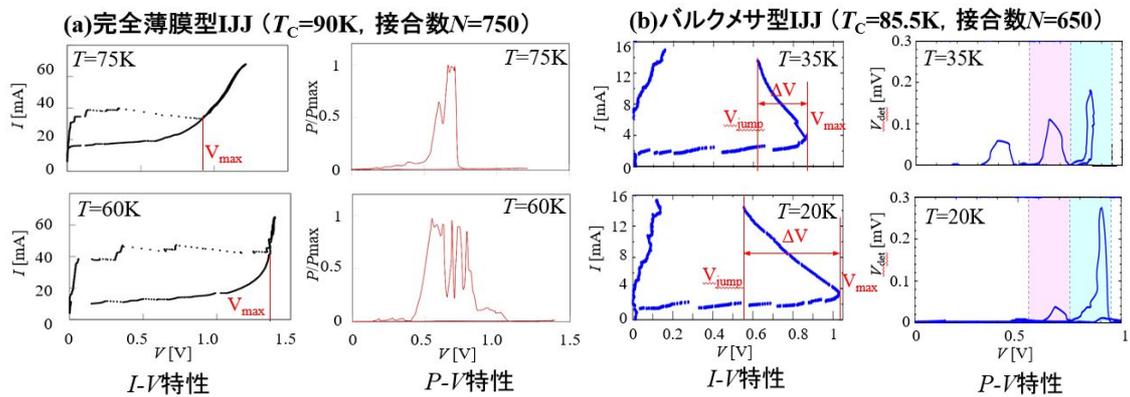


図9 接合構造の違いが I - V 特性と P - V 特性に与える影響

すめた。その結果、完全薄膜型とバルクメサ型固有ジョセフソン接合の両者ともテラヘルツ波放射が観測される接合の実温度領域に差はなく何れも $60\text{K} \sim 80\text{K}$ であるという物理的に矛盾のない結論を得た。このことは、電圧 - 電流特性上の V/I が放熱抵抗を最大サブギャップ電圧 V_{max} が接合の実温度を表す指標として有効であることを示している。この研究成果は、固有ジョセフソン接合を用いたプラズマ共鳴励起型テラヘルツ波発振デバイスの放熱設計に欠かせない極めて有用な知見である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nakajima Kensuke, Yamada Hironobu, Takeda Mihoko	4. 巻 E106-C
2. 論文標題 Flux modulation enhancement of dc-SQUID based on intrinsic Josephson junctions made of Bi ₂ Sr ₂ CaCuO ₈₊ thin films	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 289-292
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transele.2022SEI0003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Seiichiro Ariyoshi, Hikaru Mikami, Atsushi Ebata, Satoshi Ohnishi, Takeshi Hizawa, Saburo Tanaka, Kensuke Nakajima	4. 巻 8
2. 論文標題 Design evaluation of microwave transmission properties of YBa ₂ Cu ₃ O ₇ -based kinetic inductance detectors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Research Express	6. 最初と最後の頁 116001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/2053-1591/ac3693	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A. Saito, F. Shimada, T. Sato, K. Kiyooka, M. Shibata, S. Ono, M.Takeda, Y. Narita, K Nakajima	4. 巻 2323
2. 論文標題 Design and fabrication of microwave transmitting antenna using HTS thick disk for wireless power transfer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12031
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Takahiro Fujita ¹ , Akihiro Komatsuda ¹ , Kensuke Nakajima, Takashi Tachiki, Takashi Uchida
2. 発表標題 Experimental study on the heat dissipation of THz emitting Bi-2212 intrinsic Josephson junction
3. 学会等名 The 15th European Conference on Applied Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke Nakada, Yoshiki Kato, Masafumi Saito, Kensuke Nakajima, Atsushi Saito
2. 発表標題 NbN-based two-step MKIDs using ultra-thin resonators and thick coplanar waveguide
3. 学会等名 14th European Conference on Applied Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Saito, Fumiya Shimada, Takehiro Sato, Kazushi Kiyooka, Masafumi Shibata, Satoshi Ono, Masanori Takeda, Yuzuru Narita, Kensuke Nakajima
2. 発表標題 Design and Fabrication of Microwave Transmit Antenna Using HTS Thick Disk for Wireless Power Transfer
3. 学会等名 34th International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Koyama, M. Saito, S. Suzuki, X. Wang, K. Nakajima, Y. Narita, T. Oto, A. Saito
2. 発表標題 Investigation of the fabrication process for two-step MKID using the niobium nitride film
3. 学会等名 The 11th East Asia Symposium on Superconductor Electronics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kensuke Nakajima, Yoshiki Waku, Atsushi Saito
2. 発表標題 Growth and characterization of BSCCO high TC superconductor thin films for possible terahertz device applications
3. 学会等名 7th World Congress on Materials Science & Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齋藤雅史、加藤圭起、仲田優介、小山八起、中島健介、齊藤 敦
2. 発表標題 MKIDs アレイ用コプレナー線路の設計と通過特性に及ぼすワイヤボンディングの影響
3. 学会等名 第76回応用物理学会東北支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 仲田優介、齋藤雅史、小山八起、中島健介、齊藤 敦
2. 発表標題 Two-step MKIDs の設計・作製と周波数特性解析
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 5) 鈴木俊哉、小山八起、須賀裕哉、秋元大輝、中島健介、成田克、大音隆男、齊藤敦
2. 発表標題 MKIDs アレイの周波数特性の改善に向けたCPW の設計及び作製と評価
3. 学会等名 第78回応用物理学会東北支部学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	齊藤 敦 (SAITO Atsushi) (70313567)	山形大学・大学院理工学研究科・教授 (11501)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	山田 博信 (YAMADA Hironobu) (50400411)	山形大学・大学院理工学研究科・助教 (11501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関