

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14224

研究課題名(和文)狭バンドギャップ強磁性半導体を用いたスピン機能材料とデバイス

研究課題名(英文) Spin-functional materials and devices using narrow-gap ferromagnetic semiconductors

研究代表者

田中 雅明 (Tanaka, Masaaki)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：30192636

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：Fe-AsおよびFe-Sb正四面体構造をもつ狭ギャップIII-V族ベース強磁性半導体とそのスピン機能ヘテロ構造材料の作製、物性機能の探索と制御、デバイス応用の研究を行った。強磁性半導体とは、非磁性半導体に磁性元素を添加した混晶半導体であり、半導体と磁性体の両方の性質を持つため、固体物理学・材料科学上の課題を豊富に与えるととも次世代エレクトロニクス・デバイスを担う材料として期待できる材料である。新しいp型およびn型のFeベース強磁性半導体(Ga,Fe)Sb、(In,Fe)Sbを作製し、そのキュリー温度が室温を超えること、量子ヘテロ構造を作製し、スピントロニクスデバイス応用の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：We have successfully grown a new class of narrow-gap III-V based ferromagnetic semiconductors with zinc-blende crystal structures and their heterostructures. We have revealed their properties and functionalities, which can be applied to spintronics devices. Ferromagnetic semiconductors (FMS) are alloy semiconductors doped with magnetic atoms and have both the properties of semiconductors and ferromagnets, thus expected to be functional materials for next-generation electronics. We have created p-type (Ga,Fe)Sb and n-type (In,Fe)Sb whose Curie temperatures are higher than room temperature, and their quantum heterostructures. These new materials and heterostructures are shown to have unique and useful properties, which can be applied to future spintronics devices.

研究分野：スピントロニクス、電子材料物性、デバイス工学

キーワード：スピン 強磁性半導体 狭ギャップ (In,Fe)As (Ga,Fe)Sb (In,Fe)Sb キュリー温度 スピントロニクス

## 1. 研究開始当初の背景

トランジスタ・集積回路をはじめあらゆる半導体デバイスは電子の「電荷」を利用してきた。しかし、デバイスの微細化による高性能化には限界が見え始めている。そこで、電子のもう1つの自由度である「スピン」を活用して、半導体の高速制御性と磁性体の不揮発性を組み合わせた機能を実現しようとする「半導体スピントロニクス」に期待が集まっている。たとえば申請者が提案した「スピントランジスタ」では、ゲート電圧だけでなく強磁性ソース/ドレイン (or エミッタ/ベース) の磁化方向を制御することによって出力を制御し、低消費電力かつ再構成可能な電子回路を作ることができる。このようなスピン機能デバイスを実現するために、磁性体と半導体の両方の性質を持つ強磁性半導体の開発が最重要課題である。強磁性半導体を作製するために、様々な半導体に Mn、Cr、Co など磁性元素を添加して強磁性にする試みは数多く行われ、これまでで最も成功した例は Mn ドープ III-V 族強磁性半導体 GaMnAs、InMnAs である。しかし、これらの材料には次の大きな問題点がある：(1) 強磁性転移温度 (キュリー温度  $T_c$ ) が室温より低い (GaMnAs の最高値は 200K)、(2) III-V 族中では Mn がアクセプタであるため P 型しか実現できない、(3) 強磁性の発現機構は Mn の不純物バンドに由来するが不純物バンドの理解やバンド設計が困難であった。

## 2. 研究の目的

上述の問題点を解決するために、鉄 (Fe) を磁性不純物として III-V 族半導体に添加し、新しい強磁性半導体の作製を行う。狭ギャップ III-V 族半導体 (InAs や GaSb) 中で Fe は 3 価の状態 III 族サイトを置換して中性となり、キャリアと磁性の制御がしやすい。その結果、(1) 磁性不純物ドーピングとは独立にキャリア特性を制御可能であり、N 型も P 型も自在に作製可能、(2) 伝導キャリアは不純物バンドではなく、伝導帯や価電子帯に存在するのでデバイス設計がしやすい、(3) Fe を含む化合物の多くは交換相互作用が強く室温以上の  $T_c$  をもつ強磁性半導体の作製、が期待される。そこで、以下を目的とした研究を行う。

1. InAs や GaSb をベースとする狭ギャップ強磁性半導体とヘテロ構造を MBE 法により作製する。
2. それらの物性探索と機能制御を行い、室温以上の高いキュリー温度  $T_c$  の実現を目指す。
3. 狭ギャップ強磁性半導体を用いたスピントランジスタなどのデバイスを試作し、その性能評価を行う。

## 3. 研究の方法

Fe-As や Fe-Sb の正四面体 (閃亜鉛鉱型) 共有結合を有する狭バンドギャップ・キャリア誘起 III-V 族強磁性半導体 [(In,Fe)As, (Ga,Fe)Sb, (In,Fe)Sb] とその超薄膜・量子井戸・ヘテロ構造・ナノ構造を作製しその物性機能を探査、制御する。

- ・ 分子線エピタキシー (MBE) 法による新しい鉄系強磁性半導体薄膜 [N 型 (In,Fe)As, P 型 (Ga,Fe)Sb, P 型 (In,Fe)Sb] の作製。
- ・ 鉄系強磁性半導量子ヘテロ構造の作製、構造・磁性・磁気輸送特性・磁気光学効果の評価、超薄膜による量子サイズ効果、低次元化の検出とその物性制御。
- ・ Fe 添加濃度の増加 (どこまで閃亜鉛鉱型結晶構造を維持できるかを検証) や成長条件の最適化による強磁性半導体薄膜の強磁性転移温度 ( $T_c$ ) の高温化 (室温を目指す)。
- ・ トンネル分光によるスピン分裂の観測と  $s, p-d$  交換相互作用の大きさの同定、キャリア濃度制御による強磁性の制御、キャリア誘起強磁性の検証。
- ・ 量子井戸構造をもつ電界効果トランジスタ (FET) における波動関数制御を用いた超低消費電力磁化制御技術の実証を行う。
- ・ バイポーラトランジスタ構造または FET 構造において 2 つの電極 (エミッタとベース、ソースとドレイン) を強磁性半導体に置き換えたスピントランジスタデバイス構造を作製する。トランジスタ動作と出力を磁化で変化させる可変出力特性を実現し、スピントランジスタとしての動作を実証する。
- ・ 半導体中のスピン注入、スピン輸送、スピン検出を含むスピントランジスタデバイスのデバイス物理と低消費電力性を明らかにする。

## 4. 研究成果

Fe-As および Fe-Sb 正四面体構造をもつ狭ギャップ III-V 族ベース強磁性半導体とそのスピン機能ヘテロ構造材料の作製、物性機能の探索、デバイス応用の研究を行った。強磁性半導体とは、非磁性半導体に磁性元素を添加した混晶半導体であり、半導体と磁性体の両方の性質を持つため、固体物理学・材料科学上の科学的課題を豊富に与えるとともに次世代スピントロニクス・デバイスを担う材料として期待されている。本研究により、以下の研究成果を得た。

- 1) p 型強磁性半導体 (Ga<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>)Sb (Fe 濃度  $x$  は最大 20%) の作製に成功し、様々な構造評価と物性評価から真性の強磁性半導体であること、キュリー温度  $T_c$  が 230K に達することを示した。
- 2) n 型強磁性半導体 (In,Fe)As / p 型 InAs からなるエサキダイオードを作製し、ト

ンネル分光により、(In,Fe)As の伝導帯に大きなスピン分裂 (30-50meV) を観測した。III-V 族強磁性半導体の伝導帯に大きなスピン分裂が見出されたのは初めてで、スピンバンドエンジニアリングに適した材料であることを示す結果である。(論文は Nature Communications に掲載され、東京大学からプレス発表されるとともに、いくつかのマスコミの記事に掲載された)

- 3) p型強磁性半導体(Ga<sub>1-x</sub>,Fe<sub>x</sub>)Sb (Fe 濃度 x は最大 25%) の作製に成功し、様々な構造評価と物性評価から真性の強磁性半導体であること、 $T_c$  が 340 K に達することを示した (Appl. Phys. Lett. の Featured Article に選ばれた。APL Articles in News にも掲載され、2016 年で最も読まれた論文にランクインした。AIP Scilight にも記事が掲載された)
- 4) n 型強磁性半導体(In,Fe)Sb を作製し、この材料ではキュリー温度  $T_C$  が 335 K に達し、室温での異常ホール効果が大きく現在最も感度の良い InSb の正常ホール効果によるセンサーよりも感度が良いセンサーデバイスが作製可能であることを示した。
- 5) n 型強磁性半導体(In,Fe)Sb をチャンネルとする電界効果トランジスタ(FET)を作製し、ゲート電界によって電子濃度を変調し、電気的手法で  $T_c$  を変調できることを示した。これにより、真性の電子誘起強磁性半導体であることが判明した。ただし、電子濃度に依存しない強磁性秩序の寄与もあり、これが近接 Fe 原子間の強磁性的超交換相互作用である可能性を示した。
- 6) 本研究によって、n 型と p 型の両方で室温以上の  $T_c$  をもつ III-V 族強磁性半導体を作製できることを示した。強磁性発現機構として、Fe の d-準位とホスト III-V 族半導体の価電子帯端あるいは伝導帯端のエネルギーが近い時に強磁性が発現しやすく  $T_c$  も上がるという、「共鳴バンドモデル」がよく当てはまることを示した。これによって半導体における強磁性発現機構の統一的理解に大きく貢献した。
- 7) N 型強磁性半導体(In,Fe)As を含む三層量子井戸構造をチャンネルとする電界効果トランジスタを作製し、ゲート電界によって量子井戸中の電子キャリアの波動関数を動かし(In,Fe)As 層との重なりを変えることによりキュリー温度( $T_c$ )を変えることに成功した(強磁性半導体ヘテロ構造による波動関数工学の実現)。さらにこれらの実験結果を、セルフコンシステントな波動関数と電子状態の理論計算で波動関数の分布を再現し、良く説明できることを示した。この電界によ

る波動関数制御によって磁性を制御する方法は、超高速かつ超低消費電力での磁化制御につながる新しい手法である。

- 8) n 型強磁性半導体(In,Fe)As からなるスピン江崎ダイオードを作製し、そのスピン依存バンド構造を用いて磁気伝導度(磁場による電流の変化)の大きさと符号を電圧で制御することに成功し、半導体デバイス(江崎ダイオード)に新たなスピン機能を加えた。(Appl. Phys. Lett. の Featured Article に選ばれ、AIP Scilight に記事が掲載された)

## 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 7 件)

Nguyen Thanh Tu, Pham Nam Hai, Le Duc Anh, and Masaaki Tanaka, "High-temperature ferromagnetism in heavily Fe-doped ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb", Appl. Phys. Lett. **108**, pp.192401/1-4 (2016). DOI: 10.1063/1.4948692 Featured Article in Applied Physics Letters.

Le Duc Anh, Pham Nam Hai, and Masaaki Tanaka, "Observation of spontaneous spin-splitting in the band structure of an n-type zinc-blende ferromagnetic semiconductor", Nature Communications **7**, 13810/1-8 (2016). DOI: 10.1038/ncomms13810

Le Duc Anh, Pham Nam Hai, and Masaaki Tanaka, "Electrical tuning of the band alignment and magnetoconductance in an n type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As-based spin-Esaki diode", Appl. Phys. Lett. **112**, pp.102402/1-4 (2018). Doi: 10.1063/1.5010020 Featured Article in Applied Physics Letters.

Nguyen Thanh Tu, Pham Nam Hai, Le Duc Anh, and Masaaki Tanaka, "Electrical control of ferromagnetism in the n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)Sb with high Curie temperature", Appl. Phys. Lett. **112**, pp.122409/1-5 (2018). Doi:10.1063/1.5022828

Cong Tinh Bui, Christina A. C. Garcia, Nguyen Thanh Tu, Masaaki Tanaka, and Pham Nam Hai, "Planar Nernst Effect and Mott Relation in (In,Fe)Sb Ferromagnetic Semiconductor", J. Appl. Phys. **123**, pp.175102/1-7 (2018). Doi: 10.1063/1.5026452

田中雅明, “強磁性半導体とスピントロ

ニクス", パリティ 2018年6月号.

Pham Nam Hai, Le Duc Anh, Nguyen Thanh Tu, 田中 雅明, "鉄系強磁性半導体の創製とデバイス応用", 応用物理 第87巻第9号(2018年9月号).

[学会発表](計66件)

国際会議30件、国内学会・研究会等36件

1. Nguyen Thanh Tu, Pham Nam Hai, Le Duc Anh, and Masaaki Tanaka, "High-temperature ferromagnetism in heavily Fe-doped ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb", The 43rd International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS), 2016 Compound Semiconductor Week (CSW2016), Toyama, June 26-30, 2016.
2. Masaaki Tanaka (invited), "Epitaxial Ferromagnetic Semiconductor Heterostructures: Control of Ferromagnetism by Wavefunction Engineering", 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18), Tu3-G01-1, Nagoya, August 7-12, 2016.
3. Le Duc Anh, Pham Nam Hai, and Masaaki Tanaka, "Spontaneous spin-split band structure of n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As observed by tunneling spectroscopy", 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids, P1-1, Kobe International Conference Center, Kobe, August 8-11, 2016.
4. Nguyen Thanh Tu, Pham Nam Hai, Le Duc Anh, and Masaaki Tanaka, "High-Temperature Ferromagnetism in Heavily Fe-doped Ferromagnetic Semiconductor (Ga,Fe)Sb", 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids, O-25, Kobe International Conference Center, Kobe,
5. Kohei Okamoto, Yuki K. Wakabayashi, Wataru Ashihara, Yoshisuke Ban, Shoichi Sato, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya, "Tunneling magnetoresistance in trilayer structures composed of group-IV ferromagnetic semiconductor Ge<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>, MgO, and Fe", 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids, P1-10, Kobe International Conference Center, Kobe, August 8-11, 2016.
6. T. Nakamura, Y. Iwasaki, L. D. Anh, Y. Hashimoto, S. Ohya, M. Tanaka, and S. Katsumoto, "Josephson effect in Nb/(In,Fe)As/Nb junctions", 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids, P1-9, Kobe International Conference Center, Kobe, August 8-11, 2016.
7. S. Sakamoto, Y. K. Wakabayashi, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, H. Suzuki, Y. Ban, H. Yamagami, M. Tanaka, S. Ohya and A. Fujimori, "Electronic structure of the ferromagnetic semiconductor Ge<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub> revealed by soft x-ray angle-resolved photoemission spectroscopy", 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids, P2-6, Kobe International Conference Center, Kobe, August 8-11, 2016.
8. Duong Dinh Hiep, Masaaki Tanaka, Pham Nam Hai, "Spin transport in nanoscale silicon channels", 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids, P1-15, Kobe International Conference Center, Kobe, August 8-11, 2016.
9. Tomohiro Ostuka, Yuto Arakawa, Masaaki Tanaka, and Pham Nam Hai, "Giant spin-valve effect in (Ga,Fe)Sb/(In,Fe)As ferromagnetic p-n junctions", 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids, O-18, Kobe International Conference Center, Kobe, August 8-11, 2016.
10. Nguyen Thanh Tu, Pham Nam Hai, Le Duc Anh, and Masaaki Tanaka, "High-Temperature Ferromagnetism in Heavily Fe-doped Ferromagnetic Semiconductor (Ga,Fe)Sb", 19th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Tu-C4, Montpellier, France, September 4-9, 2016.
11. Masaaki Tanaka, Le Duc Anh, Nguyen Thanh Tu, Pham Nam Hai, Shinobu Ohya (invited), "Recent Progress in Ferromagnetic Semiconductors and Heterostructures: Control of Ferromagnetism by Material Growth and Wavefunction Engineering", EU-JAPAN Workshop on Computational Materials Design and Realization for Spintronics, Moltronics, Quantronics, Superconductivity and Topotronics, Peter Grünberg Institute, Jülich Research Centre, Jülich, Germany, September 18-30, 2016.
12. Le Duc Anh, Pham Nam Hai, and Masaaki Tanaka (invited), "N-type carrier-induced ferromagnetic semiconductor and electrical

- control of ferromagnetism by wavefunction engineering", 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (2016 MMM), New Orleans, USA, October 31 - November 4, 2016.
13. Munehiko Yoshida, Akihide Nagamine, Masaaki Tanaka and Pham Nam Hai, "High Temperature Ferromagnetism In (In,Fe)As Grown On Vicinal GaAs Substrates", 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (2016 MMM), New Orleans, USA, October 31 - November 4, 2016.
  14. Tomohiro Otsuka, Yuto Arakawa, Masaaki Tanaka, and Pham Nam Hai, "Giant spin-valve effect in (Ga,Fe)Sb/(In,Fe)As spin diodes", 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (2016 MMM), New Orleans, USA, October 31 - November 4, 2016.
  15. Pham Nam Hai, Le Duc Anh, Nguyen Thanh Tu, Masaaki Tanaka (invited), "High-performance Fe-doped ferromagnetic semiconductors", International Workshop on Advanced Materials and Nanotechnology 2016 (IWAMN 2016), November 3-5, 2016, Ha Noi, Vietnam.
  16. Masaaki Tanaka, Le Duc Anh, and Pham Nam Hai (Invited, Keynote presentation), "Recent Progress in Spintronics with Ferromagnetic Semiconductors: Control of Ferromagnetism by Wavefunction Engineering", 13th Asian-Pacific Physics Conference and 22nd Australian Institute of Physics Congress (APPC-AIP), Brisbane Convention and Exhibition Centre, Brisbane, Australia, December 4-8, 2016.
  17. Le Duc Anh, Pham Nam Hai, and Masaaki Tanaka, "Observation of large spin splitting in the conduction band of n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As", American Physical Society (APS) March Meeting 2017, paper E42.00008, New Orleans, March 13-17, 2017.
  18. Masaaki Tanaka (invited), "Recent topics in semiconductor spintronics and ferromagnetic semiconductors", Spintronics and Core-to-Core Workshop 2017, Osaka, March 21-22, 2017.
  19. Masaaki Tanaka (invited), "Recent progress and topics in semiconductor spintronics and ferromagnetic semiconductors", Sweden-Japan International workshop on Quantum Nanophysics and Nanoelectronics, PACIFICO Yokohama, Japan, March 23 and 24th, 2017.
  20. Le Duc Anh, Pham Nam Hai, and Masaaki Tanaka, "Tuning of Magnetoconductance by Electrical Control of Band Alignment in n<sup>+</sup>-(In,Fe)As/p<sup>+</sup>-InAs Esaki Diodes", 9th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (Spintech IX), A25, Fukuoka, June 4-8, 2017.
  21. Nguyen Thanh Tu, Pham Nam Hai, Le Duc Anh, and Masaaki Tanaka, "High-temperature ferromagnetism in n-type and p-type Fe-doped ferromagnetic semiconductors", 9th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (Spintech IX), B76, Fukuoka, June 4-8, 2017.
  22. Le Duc Anh, Nguyen Thanh Tu, Pham Nam Hai, and Masaaki Tanaka (invited), "Fe-based narrow-gap ferromagnetic semiconductor: New materials for high-performance spintronic devices", Collaborative Conference on Materials Research (CCMR) 2017, Jeju Island, Korea, June 26-30, 2017.
  23. Pham Nam Hai, Tomohiro Otsuka, Munehiko Yoshida, Nguyen Thanh Tu, Le Duc Anh, and Masaaki Tanaka (invited), "Fe-doped ferromagnetic semiconductors for high-performance semiconductor spin devices", 29th International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS 2017), Matsue, Japan, July 31 - August 4, 2017.
  24. Masaaki Tanaka (invited), "Control of Ferromagnetism and Transport by Material Growth and Wavefunction Engineering in Ferromagnetic Semiconductors and Heterostructures", Spintronics X, Symposium: OP17N SPIE Nanoscience + Engineering, Paper No.: OP115-21, San Diego, USA, August 6-10, 2017.
  25. Taketomo Nakamura, Le Duc Anh, Yoshiaki Hashimoto, Yu Iwasaki, Shinobu Ohya, Masaaki Tanaka, and Shingo Katsumoto, "Proximity-Induced Superconductivity in a Ferromagnetic Semiconductor (In,Fe)As", 28th International Conference on Low Temperature Physics, Gothenburg, Sweden, August 9-16, 2017.
  26. Masaaki Tanaka (invited), "Recent progress and topics in semiconductor spintronics and ferromagnetic semiconductors", Junjiro Kanamori Memorial International Symposium –New Horizon of Magnetism–, Koshiba Hall at the University of Tokyo, September 27-29, 2017.

27. Taiki Hayakawa, Le Duc Anh, Kohei Okamoto, and Masaaki Tanaka, "Transport and magnetic properties of n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As co-doped with Mn: (In,Fe, Mn)As", Junjiro Kanamori Memorial International Symposium –New Horizon of Magnetism–, Koshiba Hall at the University of Tokyo,
28. M. Kobayashi, L. D. Anh, P. N. Hai, Y. Harada, T. Schmitt, A. Fujimori, M. Tanaka, M. Oshima, and V. N. Strocov, "Valence-Band Electronic Structure of n-type Ferromagnetic Semiconductor (In,Fe)As", Junjiro Kanamori Memorial International Symposium –New Horizon of Magnetism–, Koshiba Hall at the University of Tokyo, September 27-29, 2017.
29. Masaaki Tanaka (invited), "Recent progress and topics in semiconductor spintronics and ferromagnetic semiconductors", 5th International Meeting on Frontiers of Physics (IMFP2017), Pullman Kuala Lumpur Bangsar, Kuala Lumpur, Malaysia, December 3(Sun) - 7(Thur), 2017.
30. Le Duc Anh, Pham Nam Hai, and Masaaki Tanaka, "Realization of spontaneous spin splitting in the conduction band of n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As for spin-dependent band engineering", 4th International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications (ISAMMA), Phu Quoc, Vietnam, December 10-13, 2017.

その他、国内学会・研究会等の発表が 36 件ある

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1 件)

名称：スーパー高感度異常ホール効果磁気センサー

発明者：ファミナムハイ、田中雅明、グエンタントゥ

権利者：東京工業大学、東京大学

種類：特許

番号：特願 2017-109044

出願年月日：平成 29 年(2017 年)6 月 1 日

国内外の別：国内

○取得状況(計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cryst.t.u-tokyo.ac.jp/>

<http://www.csrn.t.u-tokyo.ac.jp/>

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

田中 雅明 (TANAKA, Masaaki)  
 東京大学・大学院工学系研究科・教授  
 研究者番号：30192636

(2)研究分担者 なし  
 ( )

研究者番号：

(3)連携研究者 なし  
 ( )

研究者番号：

### (4)研究協力者

レ デウック アイン (Le Duc Anh)  
 東京大学・大学院工学系研究科・助教

グエン タン トゥ (Nguyen Thanh Tu)  
 ベトナム ホーチミン師範大学・講師  
 東京大学・大学院工学系研究科・博士研究員

ファミナムハイ (Pham Nam Hai)  
 東京工業大学：工学院・准教授