

## 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 6月 1日現在

機関番号：13302

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2011

課題番号：20241034

研究課題名（和文） 酸化半導体表面に構築した共役系単分子膜の電気物性計測と単分子発光素子への展開

研究課題名（英文） Characterization of conjugated molecule monolayer chemically bonded on semiconductor surface and its application to single molecular light emitting devices

研究代表者

村田 英幸 (MURATA HIDEYUKI)

北陸先端科学技術大学院大学・マテリアルサイエンス研究科・教授

研究者番号：10345663

研究成果の概要（和文）：本研究では、共役系高分子の化学構造と秩序構造を精密に制御可能な合成法を開発し、これらの構造制御が共役系高分子の光学物性と電気物性に及ぼす影響を評価することを目指した。その結果、酸化半導体（Indium-Tin-Oxide：ITO）表面上に芳香族アルデヒド化合物をアセタール化反応によって化学的に固定化できることを見出すと共に、芳香族アルデヒドとジアミンとの反応によって分子鎖長を精密に制御した共役系高分子を合成することに成功した。さらに独自に開発したエレクトロスピンニング法によって作製した共役系高分子ナノファイバを延伸することによる分子鎖の配向性向上に伴う導電率の増加を観測することができた。

研究成果の概要（英文）：In this study, we demonstrated an acetalization reaction as a versatile method to immobilize aromatic aldehyde molecules on surfaces of metal oxide semiconductor such as indium tin oxide. A terephthalaldehyde (TPA) immobilized on the ITO surface readily react with aromatic diamines to form azomethine oligomers with controlled molecular length. We have successfully developed a simple method to produce electrospun fibers of conjugated polymers with controlling their number and diameter. We observed large optical anisotropy and enhancement of electrical conductivity as increasing molecular orientation by mechanical stretching of nanofiber.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	13,100,000	3,930,000	17,030,000
2009年度	16,100,000	4,830,000	20,930,000
2010年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2011年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
総計	37,500,000	11,250,000	48,750,000

研究分野：有機エレクトロニクス

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・マイクロ・ナノデバイス

キーワード：分子デバイス

## 1. 研究開始当初の背景

有機分子の示す機能性は分子内で非局在化した $\pi$ 電子の電場応答に由来し、非局在化長の増加と共に増大する。従って分子鎖に沿って一次的に非局在化した $\pi$ 電子を持つ共役系高分子は、低分子に比べてさらに優れ

た機能性が期待される。ところが現実には、共役系高分子の分子構造から予想されるような機能をマクロな特性として実現した例はほとんど報告されていない。その主な理由には以下の三点にあると考えられる。

(1) 材料の化学的純度が不十分。

(2) 完全な伸び切り分子鎖が達成されておらず実効共役連鎖長が短い。

(3) 分子鎖の配向や配列といった秩序構造制御が厳密に行われていない。

これらの問題点は、一般に用いられている溶液重合法を使う限り解決は困難である。何故なら溶液重合によって得られた共役系高分子の分子量は分布を持ち分子鎖はランダムコイル構造を取る。溶液中で一旦生成したランダムコイル構造を直鎖状の伸び切り構造へ分子鎖を再配列させることは熱力学的観点からも容易ではない。例えば、ケンブリッジ大のグループは溶液重合によってレジオレギュラリティを制御したポリチオフェンを合成し、薄膜状態で自己組織的にラメラ構造が形成されることを報告した。(Nature, 401, 685 (1999)) この自己組織性ポリチオフェン薄膜は、共役系高分子としては大きな電界効果移動度 ( $0.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) を示すものの、その値は共役連鎖 6 個程度のチオフェンオリゴマー単結晶が示す移動度に比べて 1/10 程度と小さい。このことは重合後に自己組織性を付与して規則性を向上させたとしても、共役系高分子が潜在的に有する物性を十分に引き出すには到らないことを暗示している。最近、導電性高分子として古くから知られていたポリアニリンにおいて金属的な導電性が初めて報告された。(Nature, 441, 65 (2006)) 金属的導電であると結論付けられた根拠は導電率が  $1,000 \text{ S/cm}$  を越える大きな値を示すに加え、温度の低下と共に導電率が增加する温度依存性が確認されたからである。このような金属的な挙動が得られた最大の理由は、化学的欠陥が非常に少ないポリアニリンの合成法（自己組織化分散重合法）が見出されたためである。しかし、この金属的ポリアニリンにおいてさえ“分子間”の電子移動が律速しており、完全な“分子内”電子伝導は未だ実現されていない。共役系高分子において究極の物性を実現するためには、化学構造と秩序構造をより精密に制御できる合成法の開発が不可欠である。さらに、得られた物性をデバイスへと展開するためには、分子と基板あるいは分子と電極間を原子レベルで規整された接合界面で連結させることが必要と考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、共役系高分子の化学構造と秩序構造を精密に制御可能な合成法を開発し、これらの構造制御が共役系高分子の各種物性(光学物性、電気物性)に及ぼす影響を評価することを目的とした。具体的には以下の 3 つの課題について検討した。

- (1) 共役系高分子の精密合成法の探索
- (2) 共役系高分子の配向制御方法の開発
- (3) 共役系高分子の物性評価

(1) 共役系高分子の精密合成法の探索と(2) 配向制御方法の開発においては、酸化物半導体 (Indium-Tin-Oxide : ITO) 基板上で分子鎖長を制御した共役系高分子を逐次重合可能な反応を探索することとした。そして (3) 共役系高分子の物性評価については、次の 2 項目について実施することを計画した。① ITO 基板と分子あるいは分子と STM 探針を結ぶ化学結合種が、分子の電気伝導性にどのような影響を与えるかをトンネル分光法によって解析する。② 共役系分子の分子長を変えた際に、このナノ構造体を流れる電流-電圧特性が受ける影響を実験的に計測する。

さらに上記の評価を踏まえたうえで共役系分子の化学構造を制御した単一分子発光ダイオードのような新規な有機量子デバイスの創出を図ることを目指した。

## 3. 研究の方法

酸化物半導体上に垂直配向させて固定化した  $\pi$  共役系分子の合成。

ITO 基板上への共役系分子の固定化と配向評価のための試料を合成するために、酸化物半導体表面の水酸基と効率よく反応する化学構造の分子を探索した。具体的には、水酸基とアルデヒド基のアセタール化反応や水酸基とリン酸基とのリン酸エステル化反応を検討した。表面に固定化する分子にはアルデヒド基を官能基として含めておき、アルデヒド基とアミン基との脱水縮合を交互に起こさせることによってアゾメチンオリゴマーを形成させる。次に、合成したアゾメチンオリゴマーの分子配向性を吸収スペクトルの角度依存性、原子間力顕微鏡 (AFM) あるいは STM を用いて評価する。

上記のボトムアップ的な手法に加え、溶液重合で合成した共役系高分子をナノファイバに加工した後に機械的延伸を行うことで分子の配向性と電気伝導性の向上を狙った実験を計画した。

## 4. 研究成果

- (1) 共役系高分子の精密合成法の探索及び
- (2) 配向制御方法の開発

ITO 表面の水酸基とアルデヒド基との反応によってアセタール化合物が生成する点に着目し、芳香族アルデヒド化合物(テレフタルアルデヒド : TPA) をアセタール化することによって ITO 表面へ固定化する反応条件を検討した。各種の検討の結果、金属酸化物表面の水酸基をまずトリメチルシリル化した後に、TPA と反応させる 2 段階反応を行うことで収率よく TPA を ITO 表面に固定化できることを見出した。単結晶 ITO 基板表面に固定化した TPA の FM-AFM 観察を行ったところ、TPA 分子の配列に相当するとみなされる規則的な凹凸が観察され、隣接した TPA のベンゼン

環同士が face-to-face でスタック配列していることが分かった。

次に TPA の末端アルデヒド基を芳香族ジアミン誘導体 (フェニレンジアミン:PDA) と反応させることで基板に化学結合したアゾメチンオリゴマーの逐次反応による合成を試みた。TPA を固定化した石英基板を PDA のジクロロメタン溶液と TPA のジクロロメタン溶液に、交互に浸漬することで縮合反応を進行させアゾメチンオリゴマーを合成した。浸漬回数を変えた試料の吸収スペクトルを測定したところ、TPA の示す最大吸収(250nm)に比べ120nm以上長波長シフトした370nm付近に新たな吸収が観測された。この吸収は浸漬回数の増加と共に吸収強度が増大したことから反応によりアゾメチンユニット数が増加したと考察した。偏光吸収スペクトルの入射光角度依存性によってアゾメチンオリゴマーの配向性を評価した結果、アゾメチンオリゴマーは基板の平面方向に対して約24°の角度で配向しており基板に対してほぼ水平配向していることが分かった。

本研究で実現を目指す単一分子発光ダイオードでは電子伝導を担う主鎖としてポリアゾメチン骨格を用い、発色団としてはポルフィリンを用いる。そこで共役系アゾメチン骨格中に組み込む発色団としてアミノフェニル基を二つ有するポルフィリン誘導体を合成した。合成したポルフィリン誘導体を石英基板上に結合させたアゾメチンオリゴマーの末端に反応させて固定化した。固定化反応の進行を吸収スペクトルから確認したところ、アゾメチンオリゴマーには見られなかった新たな吸収が435nmに観測された。このことから、発光性のポルフィリン骨格を電子伝導性のアゾメチン骨格中に導入できたことを確認した。

### (3) 共役系高分子の物性評価

コレクター切替式エレクトロスピンニング装置を新たに開発し、配向と本数を正確に制御した共役系高分子を含むサブマイクロファイバーを作製することに成功した。エレクトロスピンニング法を用いた共役系高分子の配向制御と電気伝導性の関係に着目して検討を行った結果、一軸配向後のサブマイクロファイバーは、延伸率2倍時では平均径490nm、長さ50mm(アスペクト比約 $1.0 \times 10^5$ )であった。延伸したサブマイクロファイバー中における高分子鎖の配向評価を偏光蛍光測定から行い、共役系高分子鎖が高度に一軸配向している事を確認した。一方、楕型電極を用いた電気伝導性測定の結果、延伸率2倍のファイバーは未延伸のファイバーに比べ導電率が26倍向上し、 $30 \text{ A/cm}^2$ を超える極めて大きな電流密度を得ることに成功した。

## 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21件)

1. Y. Ishii and H. Murata, True photoluminescence spectra revealed in electrospun light-emitting single nanofibers, *J. Mater. Chem.*, 22, 4695-4703 (2012), 査読有
2. T. Matsushima, K. Shiomura, S. Naka, H. Murata, Optical, morphological, electrical, and electroluminescence characteristics of organic semiconductor films prepared at various deposition rates, *Thin Solid Films*, 520, 2283-2288 (2011), 査読有
3. H. Yamamoto, J. Brooks, M. S. Weaver and J. J. Brown, T. Murakami and H. Murata, Improved initial drop in operational lifetime of blue phosphorescent organic light emitting device fabricated under ultra-high vacuum condition, *Appl. Phys. Lett.*, 99, 033301 (2011), 査読有
4. V. Vohra, U. Giovanella, R. Tubino, H. Murata, C. Botta, Electroluminescence from Conjugated Polymer Electrospun Nanofibers in solution processable OLEDs, *ACS Nano*, 5, 5572-5578 (2011), 査読有
5. T. Matsushima and H. Murata, Enhanced charge-carrier injection caused by molecular orientation, *Appl. Phys. Lett.* 98, 253307 (2011), 査読有
6. Y. Ishii, H. Sakai and H. Murata, Fabrication of a submicron-channel organic field-effect transistor using a controllable electrospun single fibre as a shadow mask, *Nanotechnology*, 22, 205202-205207 (2011), 査読有
7. T. Matsushima, G.-H. Jin, Y. Kanai, T. Yokota, S. Kitada, T. Kishi and H. Murata, Interfacial charge transfer and charge generation in organic electronic devices, *Organic Electronics*, 12, 520-528 (2011), 査読有
8. A. B. EL Basaty, Y. Miyauchi, G. Mizutani, T. Matsushima and H. Murata, Optical second harmonic generation at heterojunction interfaces of a molybdenum trioxide layer and an organic layer, *Appl. Phys. Lett.*, 97, 193302 (2010), 査読有
9. V. Ervithayasuporn, J. Abe, X. Wang, T. Matsushima, H. Murata and Y. Kawakami,

- Synthesis, characterization, and OLED application of oligo(p-phenylene ethynylene)s with polyhedral oligomeric silsesquioxanes (POSS) as pendant groups, *Tetrahedron*, 66, 9348-9355 (2010), 査読有
10. T. Nishimura, A. Itabashi, A. Sasahara, H. Murata, T. Arai and M. Tomitori, Adsorption state of 4,4"-diamino-p-terphenyl through an amino group bound to Si(111)-7×7 surface examined by X-ray photoelectron spectroscopy and scanning tunneling microscopy, *J. Phys. Chem. C*, 114, 11109-11114 (2010), 査読有
  11. T. Matsushima, M. Takamori, Y. Miyashita, Y. Honma, T. Tanaka, H. Aihara, and H. Murata, High electron mobility layers of triazines for improving driving voltages, power conversion efficiencies, operational stability of organic light-emitting diodes, *Organic Electronics*, 11, 16-22 (2010), 査読有
  12. H. Sakai, H. Murata, M. Murakami, K. Ohkubo, S. Fukuzumi, Photoinduced change of dielectric permittivity in molecular doped polymer layer, *Appl. Phys. Lett.*, 95, 252901(3 pages) (2009), 査読有
  13. T. Matsushima and H. Murata, Observation of space-charge-limited current due to charge generation at interface of molybdenum dioxide and organic layer, *Appl. Phys. Lett.* 95, 203306(3 pages) (2009), 査読有
  14. Y. Honda, T. Matsushima, and H. Murata, Enhanced performance of organic light-emitting diodes by inserting wide-energy-gap interlayer between hole-transport layer and light-emitting layer, *Thin Solid Films*, 518, 545-547 (2009), 査読有
  15. K. Konno, H. Sakai, T. Matsushima and H. Murata, An organic nonvolatile memory using space charge polarization of a gate dielectric, *Thin Solid Films*, 518, 534-536 (2009), 査読有
  16. H. Sakai, K. Konno, and H. Murata, Control of threshold voltage of organic field-effect transistors by space charge polarization, *Thin Solid Films*, 518, 510-513 (2009), 査読有
  17. Y. Ishii, H. Sakai, and H. Murata, Fabrication of submicron patterned electrodes using a single electrospun fiber as a shadow-mask, *Thin Solid Films*, 518, 647-650 (2009), 査読有
  18. T. Nakayama, T. Matsushima and H. Murata, Immobilization of aromatic aldehyde molecules on indium tin oxide surface using acetalization reaction, *Thin Solid Films*, 518, 739-742 (2009), 査読有
  19. M. Campoy-Quiles, Y. Kanai, A. El-Basaty, H. Sakai and H. Murata, Ternary mixing: A simple method to tailor the morphology of organic solar cells, *Organic Electronics* 10, 1120-1132 (2009), 査読有
  20. J. J. Benson-Smith, J. Wilson, C. Dyer-Smith, K. Mouri, S. Yamaguchi, H. Murata and J. Nelson, Long-lived exciplex formation and delayed exciton emission in bulk heterojunction blends of silole derivative and polyfluorene copolymer: The role of morphology on exciplex formation and charge separation, *J. Phys. Chem. B*, 113, 7794-7799 (2009), 査読有
  21. H. Sakai, K. Konno and H. Murata, Tuning of threshold voltage of organic field-effect transistors by space charge polarization, *Appl. Phys. Lett.* 94, 073304(3 pages) (2009), 査読有
- [学会発表] (計 89 件)
1. 山岡靖明, 村田英幸, ITO 基板上の分子の配向性の違いが有機デバイスの電荷注入・取り出し効率に与える効果, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 2012. 3. 18, 東京
  2. 松島敏則, 村田英幸, ラビングにより分子を面内配向させた有機太陽電池, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 2012. 3. 18, 東京
  3. H. Murata and T. Matsushima, Enhanced charge-carrier injection caused by molecular orientation at organic/organic interface (招待講演), KJF International Conference on Organic Materials for Electronics and Photonics 2011 (KJF-ICOMEPEP 2011) 2011. 9. 15, Gyeongju, Korea
  4. V. Vohra, U. Giovannella, R. Tubino, H. Murata and C. Botta, Organic Light Emitting Diodes (OLED) having Conjugated Polymer Electrospun Nanofibers as the Active Electroluminescent Material, International Conference on Organic Electronics (ICOE 2011) 2011. 6. 22, Rome, Italy
  5. Y. Ishii, H. Sakai, Y. Furukawa, H.

- Murata, Characterization of a post-drawn single electrospun nanofibers, International Conference on Organic Electronics (ICOE 2011) 2011.6.22, 2011 (Rome, Italy)
6. 石井佑弥, 酒井平祐, 古川行夫, 村田英幸, 一軸配向した共役系高分子ナノファイバーの物性評価, 平成 23 年度繊維学会年次大会, 2011. 6. 8, 東京
  7. 石井佑弥, 村田英幸, 共役系高分子ナノファイバー束における自己吸収の影響, 平成 23 年度繊維学会年次大会, 2011. 6. 8, 東京
  8. 石井佑弥, 酒井平祐, 古川行夫, 村田英幸, 一軸配向したシングルサブミクロン共役系高分子ファイバーの物性評価, 第 58 回 応用物理学関係連合講演会, 2011. 3. 9, 神奈川(震災のため講演予稿集の発行のみ)
  9. 米内洋貴, 馬場 愛, 松島敏則, 村田英幸, 金属酸化物表面に化学結合した共役系アゾメチンオリゴマーの形成, 第 58 回 応用物理学関係連合講演会, 2011. 3. 9, 神奈川(震災のため講演予稿集の発行のみ)
  10. 馬場 愛, 米内洋貴, 村上 達也, 松島敏則, 村田英幸, 金属酸化物表面に構築した共役系自己組織化単分子膜の作成と評価, 第 58 回 応用物理学関係連合講演会, 2011. 3. 9, 神奈川(震災のため講演予稿集の発行のみ)
  11. 山谷 寛, 山村隆介, 鶴飼洋平, 川江 健, 森本章治, 米内洋貴, 村田英幸, 大田昌弘, 粉川良平, 新井豊子, ITO/YSZ(111)上のテレフタルアルデヒド分子の雰囲気制御 FM-AFM による観察, 第 58 回 応用物理学関係連合講演会, 2011. 3. 9, 神奈川(震災のため講演予稿集の発行のみ)
  12. 高田真希, 中村 翔, 山谷 寛, 山村隆介, 鶴飼洋平, 川江 健, 森本章治, 米内洋貴, 村田英幸, 新井豊子, 透明電極基板上  $\pi$  共役分子 TPA の STM による微視的解析, 第 58 回 応用物理学関係連合講演会, 2011. 3. 9 神奈川(震災のため講演予稿集の発行のみ)
  13. Y. Ishii and H. Murata, Self-absorption within light emitting submicron fibers, The sixth international conference on molecular electronics and bioelectronics, 2011. 3. 16, Sendai, Japan
  14. H. Yonai and H. Murata, Fabrication of Conjugated Azomethine Compounds on Metal Oxide Surface, The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2010), 2010. 12. 15, Honolulu, USA.
  15. H. Murata, Highly Oriented  $\pi$ -Conjugated Polymer Chains in Electrospun Nanofiber, (招待講演) International Symposium on Advanced Soft Materials, 2010. 11. 26, Kumamoto, Japan.
  16. T. Matsushima, and H. Murata, Enhancement of hole injection at organic/organic heterojunction interface due to control of molecular orientation, The 7th International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific and JAIST International Symposium on Nano Technology, 2010. 9. 30, Ishikawa, Japan.
  17. H. Yamatani, T. Arai, T. Kawael, A. Morimoto, H. Yonai, H. Murata, N. Oyabu, M. Ohta, R. Kokawa,  $\pi$ -conjugated molecules on metal oxide surfaces analyzed by FM-AFM in an environment-controlled atmosphere, The 13th International Conference on Non-Contact Atomic Force Microscopy, 2010. 7. 31, Kanazawa, Japan.
  18. 西村高志, 村田英幸, 笹原 亮, 新井豊子, 富取正彦, Si(100)と(111)表面上のジアミノパラターフェニル分子の吸着状態の比較, 第 57 回 応用物理学関係連合講演会 2010. 3. 17, 神奈川
  19. 山谷 寛, 新井豊子, 村田英幸, FM-AFM によるテレフタルアルデヒド分子の結合特性評価, 第 57 回 応用物理学関係連合講演会 2010. 3. 17, 神奈川
  20. 米内洋貴, 村田英幸, 金属酸化物表面に化学結合した共役系アゾメチン化合物の形成, 第 57 回 応用物理学関係連合講演会 2010. 3. 17, 神奈川
  21. H. Murata, Y. Ishii, M. Campoy-Quiles, and H. Sakai, Highly oriented MEH-PPV/polyethyleneoxide nanofibers fabricated by electrospinning method (招待講演), The 1st Asian Conference on Organic electronics, 2009. 9. 3, Fukuoka, Japan
  22. Y. Ishii, H. Sakai and H. Murata, Significant Increase in Electrical Conductivity of Electrospun MEH-PPV/PEO/LiCF<sub>3</sub>SO<sub>3</sub> Submicron Fibers by Post-stretching, Material Research Society 2009 Fall Meeting, 2009. 11. 30, Boston, USA.
  23. H. Murata, Highly Oriented MEH-PPV/Polyethyleneoxide Nanofibers Fabricated by Electrospinning Method(招待講演), The 1st International Symposium on Emergence of Highly Elaborated  $\pi$ -space and its

- Function, 2009.12.18, Osaka, Japan
24. 西村高志, 板橋 敦, 笹原 亮, 村田英幸, 新井豊子, 富取正彦, アミノ化 p-terphenyl 誘導体の Si(111)7x7 表面上の結合状態の STM と XPS による評価, 第 56 回応用物理学関係連合講演会 2009.3.30, 茨木
25. T. Nakayama and H. Murata, Immobilization of aromatic aldehyde on ITO surface using an acetalization reaction, The 8th International Conference on Nano-Molecular Electronics, 2008.12.16, Kobe, Japan.
26. T. Nakayama and H. Murata, Immobilization of organic monolayer on metallic oxide surface using an acetalization reaction, JAIST Nano Technology 2008 International Symposium on Novel Nano-electro-Mechanical 3D Structures: Fabrication and Properties, 2008.10.23, Ishikawa, Japan
27. 西村高志, 板橋 敦, 笹原 亮, 村田英幸, 新井豊子, 富取正彦, Si(111)7x7 表面上に室温蒸着した 4,4'-diamino-p-terphenyl の熱処理効果, 第 69 回応用物理学学会学術講演会 2008.9.2, 愛知
28. 中山智裕, 村田英幸, アセタール化反応を用いた金属酸化物電極表面への有機単分子膜の固定化, 第 69 回応用物理学学会学術講演会 2008.9.2, 愛知
29. T. Nishimura, A. Itabashi, A. Sasahara, H. Murata, and M. Tomitori, STM and XPS Studies of 4,4'-diamino-p-terphenyl adsorbed on Si(111)-(7x7), International Conference on Nanoscience + Technology, 2008.7.20, Colorado, USA.

〔図書〕(計1件)

1. 村田英幸, グローバルネット株式会社, 有機EL技術体系 第一章 有機EL素子の基礎, 2012年, pp.10-25

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 有機EL素子  
発明者: 村田英幸, 松島敏則  
権利者: 国立大学法人 北陸先端科学技術大学院大学  
種類: 特許権  
番号: 特願 2009-541137  
出願年月日: 2010年5月6日  
国内外の別: 国内

○取得状況(計1件)

名称: 有機材料含有デバイスに適した基板とその製造方法, およびこれを用いた有機材料含有デバイス  
発明者: 村田英幸  
権利者: 独立行政法人 科学技術振興機構  
種類: 特許権  
番号: 特許第 4706047 号  
取得年月日: 2011年3月25日  
国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村田 英幸 (MURATA HIDEYUKI)  
北陸先端科学技術大学院大学・マテリアルサイエンス研究科・教授  
研究者番号: 10345663

(2) 研究分担者

富取 正彦 (TOMITORI MASAHIKO)  
北陸先端科学技術大学院大学・マテリアルサイエンス研究科・教授  
研究者番号: 10188790

高村 由起子 (TAKAMURA YUKIKO)  
北陸先端科学技術大学院大学・マテリアルサイエンス研究科・准教授  
研究者番号: 90344720

(3) 連携研究者

該当なし。