

平成 30 年 9 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25110008

研究課題名(和文)分子アーキテクニクスの土台となるヘテロシステムの構築と量子物性の探索

研究課題名(英文) Exploring quantum properties of heterosystems for molecular archtechtonics

研究代表者

高木 紀明(Takagi, Noriaki)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：50252416

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 72,500,000円

研究成果の概要(和文)：分子-電極からなるヘテロシステムにおいて、分子スピンと電極電子系が織りなす量子物性を探索した。金表面における金属フタロシアニン分子について、トンネル顕微鏡(STM)を用いた分子操作により近藤効果とスピン軌道相互作用における量子相転移を制御することを実現した。ヘテロシステムの電極として有望である2次元トポロジカル絶縁体の候補であるシリセンやワイル半金属の候補である遷移金属カルコゲナイドMoTe<sub>2</sub>やWTe<sub>2</sub>の原子構造と電子状態を明らかにした。また、レーザー光電子分光を使って非占有の表面状態についてスピン分裂やスピントクスチャを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We explored quantum properties caused by the interplay of molecular spins and conduction electrons in hetero-systems consisting of magnetic molecules and metal electrodes. We controlled the quantum phase transition between Kondo resonance state and an anisotropic spin state derived from the spin-orbit interaction in an iron phthalocyanine molecule on a Au(111) electrode surface. We elucidated the geometric and electronic structures for silicene, MoTe<sub>2</sub> and WTe<sub>2</sub> which are topologically unique materials; silicene is a strong candidate of two-dimensional topological insulator and MoTe<sub>2</sub> and WTe<sub>2</sub> are candidates of Weyl semimetal. In addition, we determined by using laser photoemission spectroscopy the spin texture of unoccupied image potential surface state on Au and graphene-covered Ir electrodes.

研究分野：表面科学

キーワード：表面 近藤効果 トンネル顕微鏡 スピン軌道相互作用 分子磁性 単原子層物質

## 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、有機デバイス実現へ向けた基礎研究が、電極分子からなるナノ接合系や電極表面に吸着した分子系について盛んになされていた。分子の電気伝導に関しては、分子軌道の役割など実験・理論から明らかにされつつあった。また、分子スピンの役割は、スピントロニクスなどと密接につながるため広く興味を持たれ、電極系における分子スピンの物性に関して注目が集まっていた。単分子レベルでの精密スピン物性計測に基づいて、有機分子無機材料電極からなるヘテロ電極系において発現する新奇量子物性の開拓が強く望まれる状況にあった。また、グラフェンの研究に端を発したトポロジカル物質研究が非常に活発になり、新奇2次元原子層物質の創成研究にも注目が集まっていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、分子-電極の相互作用と分子の接合位置を適切に設計したヘテロシステムにおいて「分子本来の機能や特徴を際立たせる」「ヘテロ系において初めて顕在化するユニークな物性を発現させる」ことを目指す。有機金属分子や新奇分子を、金属電極をはじめシリセンなどの多様な基板に展開し分子アーキテクトニクスを支える土台となるヘテロシステムを構築する。構築したヘテロシステムについて、接合が分子の電子準位、伝導特性、磁性などに及ぼす影響を明らかにし、接合エンジニアリングによる新奇量子物性を開拓する。

## 3. 研究の方法

超高真空において、極めてクリーンな電極表面を用意し、そこに磁性分子などの分子を吸着して電極と分子からなるヘテロ系を構築する。吸着構造や電子状態およびスピン物性を極低温・強磁場走査トンネル顕微鏡(LT-SM-STM)および顕微分光(STS)を用いて単分子レベルで調べる。また、電極材料として有望となるシリセンなどの新物質をAgなどの基板表面に材料原子を蒸着することにより作製し、原子構造と電子状態をSTM・STSにより調べる。さらに実験結果を第一原理計算により解析する。

## 4. 研究成果

研究成果は、(A)電極分子ヘテロ系の電気伝導やスピン物性に関するものと(B)新奇低次元物質の開拓に関するものの二つに大別される。

### (A-1)分子の電子輸送特性

超伝導基板(Pb)電極に接合したC60分子に超伝導STM探針(Nb)を接触させることで、二つの電極に挟まれた分子系を構築した。この構造は、分子デバイスの基本単位であり、分子を電子がどのように輸送されるかを調べる非常に良い基本構造である。従来、分子の輸

送特性については複数チャンネルの総和としてのコンダクタンス測定が多数報告されていたが、本研究では、超伝導STM探針・分子・超伝導電極接合における多重アンドレフ反射を測定し、輸送に関わるチャンネル数と各チャンネルの透過係数を決定することに成功した。C60分子のLUMOが電子輸送に深く関わり、透過係数が分子の配向と密接に関わることが明らかとなった(文献20および図書2)。

また、Ag(111)電極表面に接合した鉄フタシロアニン(FePc)について、単分子層とバイレイヤー層では、電子輸送特性における非弾性過程に大きな違いがあることを見出した。バイレイヤー構造では、輸送電子が分子の軌道に捕獲された負イオン状態の寿命が延び、電子輸送において分子振動を励起する非弾性トンネル過程の寄与が驚くほど増強されることを見出した(文献26)。これと関連して、輸送電子が電極のフォノンを励起する過程が起きていることを明らかにした(文献13)。

### (A-2)磁性分子-電極系におけるスピン物性

STM非弾性トンネル分光により、Cu(110)電極基板に吸着したFePc単分子の磁気異方性を3次元(分子面に水平方向および垂直方向)で決定することに成功した。電極との接合により分子の対称性が低下し、磁化困難軸・容易軸が方向を変化することを明らかにした(文献14)。

Au(111)電極に接合したFePcが引き起こす近藤効果について、NO分子やCO分子をFe原子に配位させることで近藤状態を制御することに成功した(文献22)。また、STM探針を使ってFe原子の位置を分子面に対して垂直方向に変異させることで、電極基板とFe原子との混成相互作用を変化させ、近藤共鳴状態とスピン軌道相互作用による異方的なスピン状態の間の量子クロスオーバーを制御することに成功した(文献5)。

### (B)新奇低次元物質の開拓

#### (B-1)シリセンの構造と電子状態の決定

Ag(111)電極表面にSi原子を蒸着することで単原子層膜を合成した。STM観察、第一原理計算、電子線回折による構造解析からSi原子がバクセルしたハニカム構造を作ることが明らかにした(文献23,29)。強磁場下でのSTS測定によるランダウ準位分光から、Ag電極上のシリセンは、電極Agとの相互作用が強くディラック電子が存在しないことを明らかにした(文献18,28)。多層シリセンの構造と電子状態も明らかにした(文献11,12,27)。シリセンの結果をまとめて総説論文や図書を発表した(文献19、図書1,3)。

#### (B-2)ワイル半金属の電子状態決定

遷移金属カルコゲナイドの仲間であるMoTe<sub>2</sub>やWTe<sub>2</sub>は、傾いたディラックコーンを持つ2型のワイル半金属であると言われているが、ワイル点の位置やトポロジカルな表面

状態について不明であった。本研究で、STM準粒子干渉を解析することでワイルド点の位置やトポロジカルな表面状態のバンド分散を決定することに成功した(文献1,3,6)(B-3)非占有電子状態におけるRashba分裂レーザー光電子分光を用いて、これまで測定が行われていなかった鏡像表面状態のスピン軌道相互作用による準位分裂を測定することに成功し、スピントクスチャを明らかにした(文献7,9,10)

#### 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40件)

1. C.-L. Lin, R. Arafune, E. Minamitani, M. Kawai, N. Takagi, “Quasiparticle Scattering in Type-II Weyl semimetal MoTe<sub>2</sub>”, *J. Phys. Condensed Matters* **30**, 105703 (7pages) (2018). 査読有り
2. N. Kawakami, C.-L. Lin, K. Kawahara, M. Kawai, R. Arafune, \*N. Takagi, “Structural Evolution of Bi Thin Films on Au(111) Revealed by Scanning Tunneling Microscopy”, *Phys. Rev. B* **96**, 205402 (9 pages) (2017). 査読有り
3. C.-L. Lin, R. Arafune, R.-Y. Liu, M. Yoshimura, B. Feng, K. Kawahara, Z. Ni, E. Minamitani, S. Watanabe, Y. Shi, M. Kawai, T.-C. Chiang, I. Matsuda and N. Takagi, “Visualizing Type-II Weyl Points in Tungsten Ditelluride by Quasiparticle Interference”, *ACS Nano* **11**, pp. 11459–11465 (2017). 査読有り
4. R. Hiraoka, C.-L. Lin, K. Nakamura, R. Nagao, M. Kawai, R. Arafune, and N. Takagi, “Transport Characteristics of a Silicene Nanoribbon on Ag(110)”, *Beilstein J. Nanotechnol.* **8**, pp.1699-1704 (2017). 査読有り
5. R. Hiraoka, E. Minamitani, R. Arafune, N. Tsukahara, S. Watanabe, M. Kawai and N. Takagi, “Single Molecule Quantum Dot as a Kondo Simulator”, *Nat. Commun.* **8**, 16012 (7 pages) (2017). 査読有り
6. K. Kawahara, Z. Ni, R. Arafune, T. Shirasawa, C.-L. Lin, E. Minamitani, S. Watanabe, M. Kawai and N. Takagi, “Surface Structure of Novel Semimetal WTe<sub>2</sub>”, *Appl. Phys. Express* **10**, 045702 (4 pages) (2017). 査読有り
7. R. Arafune, T. Nakazawa, N. Takagi, M. Kawai, and H. Ishida, Comment on “Rashba Spin-Orbit Coupling in Image Potential States”, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 239701 (2 pages) (2016). 査読有り
8. E. Minamitani, N. Takagi, S. Watanabe, “Model Hamiltonian Approach to Magnetic Anisotropy of Iron Phthalocyanine on Solid Surface”, *Phys. Rev. B* **94**, 205402 (15 pages) (2016). 査読有り
9. T. Nakazawa, N. Takagi, M. Kawai, H. Ishida, R. Arafune, “Rashba Splitting in Image Potential State Investigated Using Circular Dichroism Two-Photon Photoemission Spectroscopy”, *Phys. Rev. B* **94**, 115412 (9 pages) (2016). 査読有り
10. T. Nakazawa, R. Arafune, N. Takagi, M. Kawai, “Linewidth Analysis of Image Potential States on Noble Metal Surfaces with High-Energy Resolved Two-Photon Photoemission Spectroscopy”, *Surf. Inter. Anal.* **48**, pp.1194-1198 (2016). 査読有り
11. K. Kawahara, T. Shirasawa, C.-L. Lin, R. Nagao, N. Tsukahara, T. Takahashi, R. Arafune, M. Kawai, N. Takagi, “Determination of the Geometric Structure of “Multilayer Silicene” Grown on Ag(111) by Dynamical Low Energy Electron Diffraction and Scanning Tunneling Microscopy”, *Surf. Sci.* **651**, pp.70-75 (2016). 査読有り
12. C.-L. Lin, T. Hagino, Y. Ito, K. Kawahara, R. Nagao, M. Aoki, S. Masuda, R. Arafune, M. Kawai, N. Takagi, “Spectroscopic Identification of Ag-Terminated “Multilayer Silicene” Grown on Ag(111)”, *J. Phys. Chem. C* **120**, pp.6689–6693 (2016). 査読有り
13. E. Minamitani, R. Arafune, N. Tsukahara, Y. Ohda, S. Watanabe, M. Kawai, H. Ueba and N. Takagi, “Surface Phonon Excitation on Clean Metal Surfaces in Scanning Tunneling Microscopy”, *Phys. Rev. B* **93**, 085411 (7 pages) (2016). 査読有り
14. N. Tsukahara, M. Kawai, N. Takagi, “Impact of Reduced Symmetry on Magnetic Anisotropy of a Single Iron Phthalocyanine Molecule on a Cu Substrate”, *J. Chem. Phys.* **144**, 044701 (6 pages) (2016). (selected as a 2016 Editors’ Choice article) 査読有り
15. N. Kawakami, C.-L. Lin, M. Kawai, R. Arafune and N. Takagi, “One-Dimensional Edge State of Bi Thin Film Grown on Si(111)”, *Appl. Phys. Lett.* **107**, 031602 (4 pages) (2015). 査読有り
16. K. Kawahara, R. Arafune, M. Kawai and \*N. Takagi, “Pragmatic Application of Abstract Algebra to Two-Dimensional Lattice Matching”, *e-J. Surf. Sci. Nanotech.* **13**, pp.361-365 (2015). 査読有り
17. C.-L. Lin, R. Arafune, M. Kawai and N. Takagi, “Comparison between Electronic Structures of Monolayer Silicenes on Ag(111)” (invited article), *Chin. Phys. B* **24**, 087307 (5 pages) (2015). 査読有り
18. H. Ishida, Y. Hamamoto, Y. Morikawa, E. Minamitani, R. Arafune and N. Takagi, “Electronic Structure of the 4x4 Silicene

- Monolayer on Semi-Infinite Ag(111)", *New J. Phys.* **17**, 015013 (8 pages) (2015). 査読有り
19. N. Takagi, C.-L. Lin, K. Kawahara, E. Minamitani, N. Tsukahara, M. Kawai and R. Arafune, "Silicene on Ag(111): Geometric and Electronic Structures of a New Honeycomb Material of Si", *Prog. Surf. Sci.* **90**, pp.1-20 (2015). 査読有り
  20. R. Hiraoka, R. Arafune, N. Tsukahara, M. Kawai and N. Takagi, "Transport Characteristics of a Single C<sub>60</sub>-Molecule Junction Revealed by Multiple Andreev Reflections", *Phys. Rev. B* **90**, 241405(R) (5 pages) (2014). (selected as Editor's Suggestion). 査読有り
  21. M. Kanno, R. Arafune, C. -L. Lin, E. Minamitani, M. Kawai and N. Takagi, "Electronic Decoupling by h-BN Layer between Silicene and Cu(111): A DFT Based Analysis", *New J. Phys.* **16**, 105019 (10 pages) (2014). 査読有り
  22. N. Tsukahara, E. Minamitani, Y. Kim, M. Kawai and N. Takagi, "Controlling Orbital-Selective Kondo Effects in a Single Molecule through Coordination Chemistry", *J. Chem. Phys.* **141**, 054702 (9 pages) (2014). 査読有り
  23. K. Kawahara, T. Shirasawa, R. Arafune, C. -L. Lin, T. Takahashi, M. Kawai and N. Takagi, "Determination of Atomic Positions in Silicene on Ag(111) by Low-Energy Electron Diffraction", *Surf. Sci.* **623**, pp.25-28 (2014). 査読有り
  24. N. Ohta, R. Arafune, N. Tsukahara, N. Takagi and M. Kawai, "Adsorbed States of Iron(II) Phthalocyanine on Ag(111) Studied by High-Resolution Electron Energy Loss Spectroscopy", *Surf. Inter. Anal.* **46**, pp.1253-1256 (2013). 査読有り
  25. E. Minamitani, R. Arafune, M. Q. Yamamoto, N. Takagi and M. Kawai, Y. Kim, "Mode-Selective Electron-Phonon Coupling in Laser Photoemission on Cu(110)", *Phys. Rev. B* **88**, 224301 (7 pages) (2013). 査読有り
  26. N. Ohta, R. Arafune, N. Tsukahara, M. Kawai and N. Takagi, "Enhancement of Inelastic Electron Tunneling Conductance Caused by Electronic Decoupling in Iron Phthalocyanine Bilayer on Ag(111)", *J. Phys. Chem. C* **117**, pp.21832-21837 (2013). 査読有り
  27. R. Arafune, C.-L. Lin, R. Nagao, M. Kawai and N. Takagi, Comment on "Evidence for Dirac Fermions in a Honeycomb Lattice Based on Silicon", *Phys. Rev. Lett.* **110**, 229701 (1 page) (2013). 査読有り
  28. C.-L. Lin, R. Arafune, K. Kawahara, M. Kanno, N. Tsukahara, E. Minamitani, Y. Kim, M. Kawai and N. Takagi, "Substrate-Induced Symmetry Breaking in Silicene", *Phys. Rev. Lett.* **110**, 076801 (5 pages) (2013). (selected as Editor's Suggestion). 査読有り
  29. R. Arafune, C.-L. Lin, K. Kawahara, M. Kanno, N. Tsukahara, E. Minamitani, Y. Kim, N. Takagi and M. Kawai, "Structural Transition of Silicene on Ag(111)", *Surf. Sci.* **608**, pp.297-300 (2013). 査読有り
  30. 高木紀明, "プローブ顕微鏡による原子・分子操作" (依頼原稿), 現代化学 2月号 (No. 563) pp. 26-31 (2018).
  31. 高木紀明, C.-L. Lin, 荒船竜一, "Ag(111)基板に創成したシリセンの構造と電子状態", 応用物理 **86**, pp.658-661 (2017). 査読無し
  32. 川合眞紀, 金有洙, 高木紀明, "走査トンネル顕微鏡/分光法で観る表面局所状態" (依頼原稿), 触媒 **59**, pp.56-62 (2017).
  33. 高木紀明, C.-L. Lin, 荒船竜一, "Ag 基板に成長させたシリセンの幾何構造と電子状態", 固体物理 **51**, pp.357-369 (2016). 査読無し
  34. 荒船竜一, 南谷英美, 高木紀明, "レーザー励起光電子放出における電子-格子相互作用", 光アライアンス **25**, pp.35-39 (2014). 査読無し
  35. 荒船竜一, C.-L. Lin, 高木紀明, "銀単結晶表面に成長したシリセン", Journal of Surface Analysis **21**, pp.63-70 (2014). 査読無し
  36. 塚原規志, 川合眞紀, 高木紀明, "最近の研究から-走査トンネル顕微鏡で捉えた単一磁性分子の磁気異方性スイッチング", 日本物理学会誌 **69**, pp.777-782 (2014). 査読無し
  37. 南谷英美, 荒船竜一, 山本真祐子, 高木紀明, 川合眞紀, 金有洙, "光電子放出における電子-フォノン非弾性相互作用: Cu 表面におけるレーザー光電子スペクトルの解析" (依頼原稿), 表面科学会誌 **35**, pp.409-414 (2014).
  38. 荒船竜一, C.-L. Lin, 高木紀明, "Ag 上のシリセンの構造と電子状態", 真空 **57**, pp.428-433 (2014). 査読無し
  39. 中澤武夫, 荒船竜一, 森田和孝, 高木紀明, 川合眞紀, "高エネルギー・高波数分解能二光子光電子分光: 鏡像準位の純位相緩和測定", 表面科学会誌 **34**, pp.421-425 (2013). 査読無し
  40. 南谷英美, 塚原規志, 金有洙, 高木紀明, "最近の研究から-分子骨格と吸着構造が生み出す新奇な近藤効果", 日本物理学会誌 **68**, pp.162-166 (2013). 査読無し
- [学会発表](計 112 件)  
招待講演 21 件
1. N. Takagi, "Quantum transition in a single molecule by STM manipulation",

- German-Japanese Symposium “Molecular Architectonics for Advanced Information Processing”, Institute of Nanotechnology (INT), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Germany, March 14 (2018).
2. N. Takagi, “Exploring of 2D materials from silicene to Weyl semimetal”, 6th International Meeting on Silicene, SOLEIL, Paris, France, December 13-15 (2017).
  3. N. Takagi, “Manipulation of Kondo effect in single magnetic molecule on Au(111)”, Tsinghua-University of Tokyo Joint Workshop on Recent Topics in Materials Physics, Science and Engineering, Tokyo, Japan, March 9-11 (2016).
  4. N. Takagi, “Exploring Nano World with Scanning Tunneling Microscopy”, World Congress on Microscopy: Instrumentation, Techniques and Applications in Life Sciences and Materials Sciences (WCM 2015), Kottayam, India, October 9-11 (2015).
  5. N. Takagi, “Structural evolution of silicene on Ag(111)”, Workshop “Silicene, Germanene, Stanene, Phosphorene: Novel Elemental 2D Materials” in 4th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences (IC-MSQUARE), Mykonos, Greece, June 5-8 (2015).
  6. N. Takagi, “Silicene Grown on Ag Substrates”, The 17th International Symposium on the Physics of Semiconductors and Applications (ISPSA 2014), Jeju, Korea, Dec. 7-11 (2014).
  7. N. Takagi, “Single Molecule Magnetism”, HAYASHI Conference : Next Decades of Surface Science, Hayama, Japan, July 16-20 (2013).
  8. N. Takagi, “Struggle to Realize Dirac Fermion Silicene on Ag(111)”, Euro-Mediterranean Conference on Materials and Renewable Energies, Third International Meeting of Silicene (IMS-3), Istres, France, June 10-14 (2013).
  9. 高木紀明, “新奇二次元原子層物質の創製-シリセンを中心に”、応用物理、早稲田大学、2018年3月17日。
  10. 高木紀明, “新奇二次元原子層物質の創製-シリセンを中心に”、科学技術交流財団「次世代デバイス実現に向けた先端二次元物質の物理と化学」研究会、科学技術交流財団研究交流センター、名古屋市、2017年7月18日。
  11. 高木紀明, “2次元単原子・分子層系表面物質-シリセンから2次元近藤格子-”、SPRING-8 ユーザー協同顕微ナノ材料研究会 / 日本表面科学会放射光研究部会合同研究会、東京理科大学葛飾キャンパス、2017年3月2~3日。
  12. 高木紀明, “STM-IETS 振動・スピン励起による局所分析”、2016年真空・表面科学合同講演会：合同シンポジウム「単原子、単分子レベルに挑む局所分析」、名古屋国際会議場、2016年11月29日~12月1日。
  13. 高木紀明, “吸着分子が示す近藤効果について”、東京大学物性研究所短期研究会「走査トンネル顕微鏡による物性研究の現状と展望」、東京大学物性研究所、2016年10月31日~11月1日。
  14. 高木紀明, “表面分子磁性”、第35回表面科学学術講演会、つくば国際会議場、2015年12月1~3日。
  15. 高木紀明, “Single magnetic molecule in STM junction as a Kondo simulator”、フロンティア表面科学2015、東京大学物性研究所、2015年3月2日。
  16. 高木紀明, “表面分子による近藤効果・近藤格子”、東京大学物性研究所短期研究会「強相関電子系における局所対称性の破れと量子物性」、東京大学物性研究所、2014年11月27~29日。
  17. 高木紀明, “Structural transition of silicene on Ag(111)”、励起ナノプロセス研究会第9回研究会、筑波大学東京キャンパス、2013年12月19~20日。
  18. 高木紀明, “表面分子による近藤効果・近藤格子”、東京大学物性研究所短期研究会「強相関電子系における局所対称性の破れと量子物性」、東京大学物性研究所、2014年11月27~29日。
  19. 高木紀明, “分子-電極ヘテロ系における分子スピンの振舞”、第3回分子アーキテクトニクス研究会、大阪市中央公会堂、2013年10月1日。
  20. 高木紀明, “Ag(111)上に作製したシリセンの電子状態”、2013年日本物理学会秋季大会、領域4,6,7合同シンポジウム、徳島大学、2013年9月27日。
  21. 高木紀明, “単一分子の伝導とスピン分子アーキテクトニクスに向けて”、第2回分子アーキテクトニクス研究会、東京大学山上会館、2013年5月13日。
  22. 高木紀明, “銀表面のシリセン、現状と可能性”、ナノプロブテクノロジー第167委員会 第70回研究会、産業技術総合研究所 臨海副都心センター別館、2013年4月18日。
- 一般口頭・ポスター発表 91件 (国内 58件、国際 33件)
- 〔図書〕(計 3件)
1. N. Takagi, C.-L. Lin and R. Arafune, “Silicene on Ag(111)”, in *Encyclopedia of Interfacial Chemistry - Surface Science and Electrochemistry*, Ed. F. Netzer, Elsevier, 312-317 (2017).

2. N. Takagi and R. Hiraoka, “Electron Transport through a Single Molecule in Scanning Tunneling Microscopy Junction”, in *Molecular Architectonics The Third Stage of Single Molecule Electronics*, Ed. T. Ogawa, Springer, pp.355-379 (2017).
3. N. Takagi, C.-L. Lin, R. Arafune, “Silicene on Ag(111): Structure Evolution and Electronic Structure”, in *Silicene - Structure, Properties and Applications*, Eds. M. J. S. Spencer, T. Morishita, Springer, pp.143-165 (2016).

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 紀明(TAKAGI NORIAKI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・  
准教授

研究者番号:50252416

(2) 研究分担者

荒船 竜一 (ARAFUNE RYUICHI)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・  
国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・  
主任研究員

研究者番号：50360483