

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：82108

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：25104011

研究課題名（和文）精密分子設計による光応答を指向した超分子材料の開拓

研究課題名（英文）Development of Photo-Responsive Supramolecular Materials with Precise Molecular Design

研究代表者

中西 尚志（NAKANISHI, TAKASHI）

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・グループリーダー

研究者番号：40391221

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 45,900,000 円

研究成果の概要（和文）：本新学術の領域内、創成班の一角を担う本研究提案では、有機化学・分子材料化学の分野に軸足を置きつつ、理論、計測の要求を満たすことのできる「柔らかな分子系」の構築を目指した。ナノサイズの閉じた分子系とした様々なゲスト分子を内包し、特異機能を発現するπ-スタッキングまたは配位結合を利用したナノカプセルの創成に成功した。一方、バルクサイズの液体素材で有りながら、緻密な機能性共役コア周りの制御により、そのバルクの光電子物性が支配される分子系を見出した。これらの研究を進める上で、分子動力学計算、電子構造計算、高速分光、固体NMR、共鳴ラマン測定など、領域内での多くの共同研究に発展した。

研究成果の概要（英文）：For studying the “Function of Soft Molecular Systems” in one of the “Creation” research groups, we have approached from organic and materials chemistry by the concerted use of “theory” and advanced spectroscopic “experiments”. Our target systems are mainly photo responsive supramolecular materials at different length scale from discrete capsule-like self-assemblies at nanometer scale to molecular liquid materials at bulk scale. The optical information/properties were positively utilized for understanding the formation mechanism of assemblies and the unique function.

We have achieved (i) multifunctional molecular capsules and tubes, and (ii) optoelectronically-active molecular liquids. And many collaborations with theory and advanced experiments were successfully conducted in the KAKENHI project.

研究分野：機能性分子材料

キーワード：超分子 共役系 分子間相互作用 光機能 分子カプセル 常温分子液体 高速分光 理論計算

## 1. 研究開始当初の背景

分子間相互作用を精密に制御し、単一成分もしくは複数成分の分子を自己組織化させる超分子化学の分野は、分子集合体の形成、生体模倣構造体の構築など、ある一定の成熟された研究分野となりつつある。一方、その形成ダイナミクスの理解やバルクスケールレベルでの材料創製の面では、未探索、未解決な問題も多く、超分子化学を基盤とするサイエンスは、最先端分析技術の充実と共に、一切滞ることなく発展し続けている。近年では、分子設計の多様性、元素間結合様式の多様性など分子固有の「柔らかさ」故に、熱力学的に最安定なかご型やカプセル型構造体など離散的・有限系組織構造から、同一分子から組織化条件の選択のみで様々な形状・モルフォロジーを示す系まで設計可能となって来た。つまりナノメートルからミリ・センチメートルにおよぶ分子性材料創製が、分子間相互作用の精密制御・超分子的発想より達成されている。

超分子集合・組織体の形成、材料応用へのアプローチは、昨今のレアメタルを必要としない省エネ対応・軽量有機素材のデバイス応用研究の潮流もあり、多くの新たな分子系、超分子材料系が提案されている。しかしながら、それらの研究は構造と機能面の重視に偏り、最も重要な分子組織化のダイナミクスや、分子間相互作用の理論的解釈からの集合・組織構造の予知へのアプローチを可能にする実験系の構築は注視されていない。「精密解析系」と「理論計算系」と「合成実験系」が協力して一つの解決課題に取り組むことは、最終的にフィードバックされる超分子材料を創製する上で極めて重要となる。

## 2. 研究の目的

本新学術領域「柔らかな分子系」内における当研究グループの目的は、元来、固い分子骨格を分子間相互作用の精密制御（自己組織化）により、「柔らかい」集合体として仕立てる戦略の基、領域研究に貢献することとした。超分子集合体形成に関して、有限系ナノ組織体から無限系バルクスケールの分子性材料の設計・合成・材料創製まで、一貫して対応可能な実験系の確立を目指した。特に強みとなる点は、自己組織化過程のダイナミクス等の理解を理論計算（A01 班）および分光解析（A02 班）の研究者等と連携して行うことにある。

申請者らはこれまでに、同一分子を基材として様々な形状・モルフォロジーの超分子組織構造を構築してきた（超分子モルフォロジー概念の提唱）。また、発光機能を司る共役系コアを柔軟性側鎖により隔離し、分子固有の光学機能をバルク材料機能に反映できる、全く新しい常温液状分子材料の開発を行った。更には、特殊空間を保持する有限系超分子ナノ組織体の創製にも至っている。従って、本研究グループは本領域研究実施のため

に十分な予備的知見と実験技術を持ち合わせる。

本領域研究は、光機能を予めプログラムした共役系分子を基材とする超分子材料の創製のみならず、自己組織化過程の *in situ* 界面時間分解分光解析やエネルギー移動過程の解明、モデル計算等、様々な研究局面において「理論計算系」、「最先端の精密解析系」との協力体制のもと遂行した。それらの理論・物性解析の結果をフィードバックし、より優れた光機能が付与されたソフト分子材料の創製を目指すした。

## 3. 研究の方法

精密に分子設計された共役化合物の分子間相互作用を巧みに制御し、自己組織的に形成する新規な「柔らかい」集合体を構築すると共に、それらを活用したユニークな光応答材料を開発した。特に、これまで合成化学的および分光学的に未開拓であったソフトな共役分子集合体群、具体的には、フラレンなどの非平面性共役骨格を含む分子の無限集合体、アントラセンなどの平面状共役骨格を含む分子の有限集合体などを研究対象とした。本研究では (i) 分子固有光機能の保持が指向された分子液体材料、および (ii) 特殊空間に閉じられた分子系などを積極的に創製し、共役分子集合体群の光機能の更なる理解を目指した。合成化学を基盤として、材料応用を指向するマクロスケール無限系から基礎原理を追求するナノスケール有限系集合体まで、分光解析評価のための新たな実験系を提供した。言い換えると、自己組織化過程や分子運動のダイナミクスを最先端分光解析技術にて評価し、光応答性の超分子材料創製の設計指針へとフィードバックさせ、研究の推進を図った。

## 4. 研究成果

(i) アルキル化 液体分子の創成と真の柔らかさの解明

有機分子材料の光電子機能を司る共役系分子の自己組織化のタイミングおよび得られる構造・機能を容易に制御できる新技術を開発した。その制御方法は、自己組織化させたい共役系分子（代表的例： $C_{60}$ ）に柔らかな分岐アルキル鎖を導入し常温液状化させておき、同アルキル化共役分子の一部パーツ（アルキル鎖もしくは  $C_{60}$ ）を添加するのみで達成でき、自己組織化後には  $C_{60}$  組織化構造由来の光導電性を活性化できた。また、アルキル化  $C_{60}$  分子がグラファイト骨格上に優れた親和性を示すことを利用し、グラフェンとのハイブリッド化を行った。アルキル化  $C_{60}$ /グラフェン修飾デバイスでは、グラフェンなしのデバイスと比較して 270 倍の光電変換機能を示すことを明らかにした。この結果は、 $C_{60}$  電極デバイスの電荷移動効率ならびに光電流発生効率の向上に関して、アルキル鎖を糊として見立てたグラフェンとのハイブ

リッド化が大きく寄与したことを意味している。

液状分子中で隔離された機能性コアの置かれる環境・相・反応場としての理解を目的として、ピレン色素の発光特性をプローブとするアルキル化液状ピレン分子を合成した。導入する分岐アルキル鎖の置換配置により、モノマー/エキシマー間の発光制御が可能となり、領域内協同研究による励起状態ダイナミクス計測、分子構造計算、固体 NMR 構造解析も同時に行い、深い理解に繋がった。さらに、ナフタレン環の 1- と 2- に分岐アルキル鎖を導入したアルキル化ナフタレン液体の位置異性体と発光メカニズムの相関関係を検討した結果、両分子群が溶液中ではモノマー発光を示すのに対し、溶媒フリーの液体状態では、1- 異性体のエキシマー形成効率が 2- 異性体よりも顕著に高いことが分かった。また、励起状態ダイナミクス計測、分子構造計算による解析も同時に行い、分子構造と発光機能の相関解明を明らかにした。

その他、アルキル化 機能性液体の機能性コアにフタロシアニンおよびダブルデッカー型ルテチウムフタロシアニン ( $Pc_2Lu$ ) を採用し、酸化還元電位制御による  $Pc_2Lu$  の有するスピン活性、それに同調するエレクトロクロミック特性のスイッチングを達成した。本結果は、機能性液体の高機能化、多機能化へ有用な知見を提供する。

#### (ii) 動的自己組織化による高機能ナノカプセルの創成と応用

多環芳香族骨格を利用した三次元ナノ構造体の精密構築と機能開発を目指した。3つのアントラセン環を含む cis 型の両親媒性分子を合成し、これらが水中でカプセル状集合体を形成し、蛍光性の分子レセプターとして機能することを明らかにした。また、巨大分子の内包と放出を目指して、配位結合性のナノチューブを構築した。それがフラーレン  $C_{60}$  類を内包すると共に、光刺激により内包された  $C_{60}$  を放出できることを見出した。さらに、8つのアントラセン環に囲まれたナノ空間を有する配位結合性ナノカプセル内で、汎用的なラジカル開始剤が光照射および加熱に対して、顕著に安定化されることを明らかにした。また、安定化された開始剤を利用して、ポリマー合成を達成した。

4つのアントラセン環に囲まれたナノ空間を有する共有結合性ナノチューブを新規に構築した。このチューブは、ひも状生体分子のメチル基や不飽和結合を認識して、選択的に捕捉できることを見出した。

2つのアントラセン環を含む V 型両親媒性分子は、水中でカプセル状集合体を形成する。本研究で、その芳香環をナフタレン環またはフェナントレン環に換えることで、それらの自己集合で生成するナノカプセルが、分散状態より高い蛍光性を示すことを明らかにした。

遷移金属イオンを含む配位結合性カプセルは、内包した色素分子の蛍光を阻害する。一方、本研究では、ある種の色素はその空間内でも、高い蛍光性を維持することを見出した。また、その空間に芳香族分子をペア内包することで、色素の蛍光色を変化させることに成功した。また、アントラセン環を含むカプセル状集合体にマンガンポルフィリン錯体を内包して、水中・室温でスチレンのエポキシ化反応を検討した。その結果、軸配位子のイミダゾールを必要とせずに、触媒反応が高効率 (1350 触媒回転数, 1 時間) で進行することを明らかにした。

複数のラジカル種で囲まれたナノ空間の構築は困難である。ジヒドロフェナジン環を有する金属架橋カプセルの合成に成功した。それが電気化学的酸化および試薬酸化により可逆的にポリラジカル空間を生成することを見出した。また、糖は水分子と強く溶媒和し、複数の異性体が存在するため、水中での分子レセプターによる識別は困難である。本研究で、金属架橋カプセルが水中でスクロースを内包できることを見出した。他の天然の二糖との混合物からも、水中で 100% の選択性でスクロースが識別された。さらに、中性の硫黄クラスターは質量分析条件で分解するため、MS による構造決定が未解決であった。金属架橋カプセルに環状硫黄クラスターが定量的に内包され、通常の ESI-TOF MS 分析で、目的とするクラスター内包体の質量ピークを明確に観測することに成功した。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 73 件)

- 1) Agnieszka Zielinska, Atsuro Takai, Hiroya Sakurai, Akinori Saeki, Marcin Leonowicz, Takashi Nakanishi, "A Spin-Active, Electrochromic, Solvent-Free Molecular Liquid Based on Double-Decker Lutetium Phthalocyanines Bearing Long Branched Alkyl Chains", *Chem. Asian J.*, 査読有, 13(7), 770-774 (2018). DOI: 10.1002/asia201800175
- 2) Bhawani Narayan, Kazuhiko Nagura, Tomohisa Takaya, Koichi Iwata, Akira Shinohara, Hideyuki Shinmori, Hao Wang, Quan Li, Xiaofeng Sun, Hongguang Li, Shinsuke Ishihara, Takashi Nakanishi, "The effect of regioisomerism on the photophysical properties of alkylated-naphthalene liquids", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 査読有, 20(5), 2970-2975 (2018). DOI: 10.1039/C7CP05584F
- 3) Fengniu Lu, Naoki Kitamura, Tomohisa Takaya, Koichi Iwata, Takashi Nakanishi, Yuki Kurashige, "Experimental and theoretical

- investigation of fluorescence solvatochromism of dialkoxyphenyl-pyrene molecules”, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 査読有, 20(5), 3258-3264 (2018). DOI: 10.1039/C7CP06811E
- 4) Martin J. Hollamby, Catherine F. Smith, Melanie M. Britton, Ashleigh E. Danks, Zoe Schnepf, Isabelle Grillo, Braian R. Pauw, Akihiro Kishimura, Takashi Nakanishi, “The aggregation of an alkyl-C<sub>60</sub> derivative as a function of concentration, temperature and solvent type”, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 査読有, 20(5), 3373-3380 (2018). DOI: 10.1039/C7CP06348B
  - 5) Avijit Ghosh, Takashi Nakanishi, “Frontier of solvent-free functional molecular liquids”, *Chem. Commun.*, 査読有, 53(75), 10344-10357 (2017). DOI:10.1039/C7CC05883G
  - 6) Masahiro Yamashina, Munetaka Akita, Taisuke Hasegawa, Shigehiko Hayashi, Michito Yoshizawa, “A Polyaromatic Nanocapsule as a Sucrose Receptor in Water”, *Science Adv.*, 査読有, 3(8), e1701126 (2017). DOI: 10.1126/sciadv.1701126
  - 7) Sho Matsuno, Masahiro Yamashina, Yoshihisa Sei, Munetaka Akita, Akiyoshi Kuzume, Kimihisa Yamamoto, Michito Yoshizawa, “Exact Mass Analysis of Sulfur Clusters upon Encapsulation by a Polyaromatic Capsular Matrix”, *Nature Commun.*, 査読有, 8, 749 (2017). DOI: 10.1038/s41467-017-00605-5
  - 8) Kohei Kurihara, Kohei Yazaki, Munetaka Akita, Michito Yoshizawa, “A Switchable Open/closed Polyaromatic Macrocyclic that Shows Reversible Binding of Long Hydrophilic Molecules”, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 査読有, 56(38), 11360-11364 (2017). DOI: 10.1002/anie.201703357
  - 9) Kohei Yazaki, Munetaka Akita, Soumyakanta Prusty, Dillip Kumar Chand, Takashi Kikuchi, Hiroyasu Sato, Michito Yoshizawa, “Polyaromatic Molecular Peanuts”, *Nature Commun.*, 査読有, 8, 15914 (2017). DOI: 10.1038/ncomms15914
  - 10) Fengniu Lu, Tomohisa Takaya, Koichi Iwata, Izuru Kawamura, Akinori Saeki, Masashi Ishii, Kazuhiko Nagura, Takashi Nakanishi, “A Guide to Design Functional Molecular Liquids with Tailorable Properties using Pyrene-Fluorescence as a Probe”, *Sci. Rep.*, 査読有, 7, 3416 (2017). DOI: 10.1038/s41598-017-03584-1
  - 11) Keisuke Jono, Akira Suzuki, Munetaka Akita, Ken Albrecht, Kimihisa Yamamoto, Michito Yoshizawa, “A Polyaromatic Molecular Clip That Enables the Binding of Planar, Tubular, and Dendritic Compounds”, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 査読有, 56(13), 3570-3574 (2017). DOI:10.1002/anie.201612489
  - 12) Kohei Yazaki, Shogo Noda, Yuya Tanaka, Yoshihisa Sei, Munetaka Akita, Michito Yoshizawa, “An M2L4 Molecular Capsule with a Redox Switchable Polyradical Shell”, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 査読有, 55, 15031-15034 (2016). DOI: 10.1002/anie.201608350
  - 13) Shoya Sekiguchi, Kei Kondo, Yoshihisa Sei, Munetaka Akita, Michito Yoshizawa, “Engineering Stacks of V-Shaped Polyaromatic Compounds with Alkyl Chains for Enhanced Emission in the Solid State”, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 査読有, 55, 6906-6910 (2016). DOI: 10.1002/anie.201602502
  - 14) Takumi Omagari, Akira Suzuki, Munetaka Akita, Michito Yoshizawa, “Efficient Catalytic Epoxidation in Water by Axial N-Ligand-Free Mn-Porphyrins within a Micellar Capsule”, *J. Am. Chem. Soc.*, 査読有, 138, 499-502 (2016). DOI:10.1021/jacs.5b11665
  - 15) Masahiro Yamashina, Matthew M. Sartin, Yoshihisa Sei, Munetaka Akita, Satoshi Takeuchi, Tahei Tahara, Michito Yoshizawa, “Preparation of Highly Fluorescent Host-Guest Complexes with Tunable Color upon Encapsulation”, *J. Am. Chem. Soc.*, 査読有, 137, 9266-9269 (2015). DOI:10.1021/jacs.5b06195
  - 16) Yusuke Okazawa, Kei Kondo, Munetaka Akita, Michito Yoshizawa, “Well-defined Aqueous Nanoassemblies from Amphiphilic meta-Terphenyls and Their Guest Incorporation”, *Chem. Sci.*, 査読有, 6, 5059-5062 (2015). DOI:10.1039/C5SC01545F
  - 17) Fengniu Lu, Takashi Nakanishi, “Alkyl-engineering in state control toward versatile optoelectronic soft materials”, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 査読有, 16, 014805 (2015). DOI: 10.1088/1468-6996/16/1/014805
  - 18) Yanfei Shen, Akinori Saeki, Shu Seki, Jeong-O Lee, Junko Aimi, Takashi Nakanishi, “Exfoliation of Graphene and Assembly Formation with Alkylated-C<sub>60</sub>: A Nanocarbon Hybrid towards Photo-Energy Conversion Electrode Devices”, *Adv. Optical*

- Mater., 査読有, 3, 925-930 (2015). DOI:10.1002/adom.201400619
- 19) Yusuke Okazawa, Kei Kondo, Munetaka Akita, Michito Yoshizawa, "Polyaromatic Nanocapsules Displaying Aggregation-Induced Enhanced Emissions in Water", J. Am. Chem. Soc., 査読有, 137, 98-101 (2015). DOI:10.1021/ja511463k
- 20) Keita Hagiwara, Munetaka Akita, Michito Yoshizawa, "An Aqueous Molecular Tube with Polyaromatic Frameworks Capable of Binding Fluorescent Dyes", Chem. Sci., 査読有, 6, 259-263 (2015). DOI: 10.1039/C4SC02377C
- 21) Michito Yoshizawa, Jeremy. K. Klosterman, "Molecular Architectures of Multi-Anthracene Assemblies", Chem. Soc. Rev., 査読有, 43(6), 1885-1898 (2014). DOI: 10.1039/C3CS60315F
- 22) Kohei. Yazaki, Yoshihisa Sei, Munetaka Akita, Michito Yoshizawa, "A Polyaromatic Molecular Tube That Binds Long Hydrocarbons with High Selectivity", Nature Commun., 査読有, 5, 5179 (2014). DOI: 10.1038/ncomms6179
- 23) Masahiro Yamashina, Yoshihisa Sei, Munetaka Akita, Michito Yoshizawa, "Safe Storage of Radical Initiators within a Polyaromatic Nanocapsule", Nature Commun., 査読有, 5, 4662 (2014). DOI: 10.1038/ncomms5662
- 24) Yanfei Shen, Takashi Nakanishi, "Fullerene assemblies toward photo-energy conversions", Phys. Chem. Chem. Phys., 査読有, 16(16), 7199-7204 (2014). DOI: 10.1039/C4CP00221K
- 25) Martin J. Hollamby, Maciej Karmy, Paul H. H. Bomans, Nico A. J. M. Sommerdijk, Akinori Saeki, Shu Seki, Hiroyuki Minamikawa, Isabelle Grillo, Brain R. Pauw, Paul Brown, Julian Eastoe, Helmuth Möhwald, Takashi Nakanishi, "Directed assembly of Optoelectronically active alkyl- $\pi$ -conjugated molecules by adding n-alkanes or  $\pi$ -conjugated species", Nature Chem., 査読有, 6(8), 690-696 (2014). DOI: 10.1038/nchem.1977
- 26) Norifumi Kishi, Munetaka Akita, Michito Yoshizawa, "Selective Host-Guest Interactions of a Transformable Coordination Capsule/Tube with Fullerenes", Angew. Chem. Int. Ed., 査読有, 53(14), 3604-3607 (2014). DOI: 10.1002/anie.201311251
- 27) Norifumi Kishi, Munetaka Akita, Motoshi Kamiya, Shigehiko Hayashi, Hsiu-Fu Hsu, Michito Yoshizawa, "Facile Catch and Release of Fullerenes Using a Photoresponsive Molecular Tube", J. Am. Chem. Soc., 査読有, 135(35), 12976-12979 (2013). DOI:10.1021/ja406893y
- 28) Akira Suzuki, Kei Kondo, Munetaka Akita, Michito Yoshizawa, "Atroposelective Self-Assembly of a Molecular Capsule from Amphiphilic Anthracene Trimers", Angew. Chem. Int. Ed., 査読有, 52(31), 8120-8123 (2013). DOI:10.1002/anie.201302789
- 29) Sukumaran Santhosh Babu, Takashi Nakanishi, "Nonvolatile functional molecular liquids", Chem. Commun., 査読有, 49(82), 9373-9382 (2013). DOI: 10.1039/C3CC45192E
- 30) Martin J. Hollamby, Takashi Nakanishi, "The power of branched chains: optimising functional molecular materials", J. Mater. Chem. C, 査読有, 1(39), 6178-6183 (2013). DOI: 10.1039/C3TC31381F
- [学会発表](計 44 件)
- 1) Takashi Nakanishi, "Functional Molecular Liquids: Alkylated-Molecular Design, Liquid Physical and Optoelectronic Properties", GSS & AMLS Seminar (Hokkaido University, Japan, November 8, 2017)
- 2) Michito Yoshizawa, "Anthracene based Supramolecular Capsules: Unusual Host Capabilities in Water", International Conference on Porphyrins and Phthalocyanines (ICPP-9) (Ho Chi Minh City, Vietnam, June 8-10, 2017)
- 3) Takashi Nakanishi, "Solvent-free Functional Molecular Liquids with Alkyl-Engineering Concept", International Symposium on Polymer and Related Materials (Harbin Engineering University, Harbin, China, July 9 - 12, 2016)
- 4) Michito Yoshizawa, "Efficient Catalytic Epoxidation by Mn-Porphyrins within Polyaromatic Capsules", International Conference on Porphyrins and Phthalocyanines (ICPP-9) (Nanjing, China, July 3-8, 2016)
- [図書](計 5 件)
- 1) 中西尚志, "アルキル - エンジニアリ

ング：自己組織化と非組織化”，編集代表；中西尚志，フロンティア出版，自己組織化マテリアルのフロンティア，2015，pp.188-196.

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：30644067

〔産業財産権〕

出願状況（計 7 件）

名称：電子装置  
発明者：吉田学，末森浩司、中西尚志，ゴッシュ アビジット  
権利者：産業技術総合研究所，物質・材料研究機構  
種類：特許  
番号：特願 2017-124302  
出願年月日：2017 年 6 月 26 日  
国内外の別：国内

名称：分子カプセル、ステロイドの水溶化方法及び水溶化ステロイド  
発明者：吉沢道人，山科雅裕，穂田宗隆  
権利者：東京工業大学  
種類：特許  
番号：特願 2014-088505  
出願年月日：2014 年 4 月 22 日  
国内外の別：国内

取得状況（計 6 件）

名称：常温液状有機材料およびその用途  
発明者：中西尚志  
権利者：物質・材料研究機構  
種類：特許  
番号：特許第 5660470 号  
取得年月日：2014 年 12 月 12 日  
国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等  
[http://www.nims.go.jp/funct\\_mol\\_g/](http://www.nims.go.jp/funct_mol_g/)  
[http://www.res.titech.ac.jp/~smart/A\\_yoshizawa01.html](http://www.res.titech.ac.jp/~smart/A_yoshizawa01.html)

6. 研究組織

(1)研究代表者

中西 尚志 (NAKANISHI, Takashi)  
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・グループリーダー  
研究者番号：40391221

(2)研究分担者

吉沢 道人 (YOSHIZAWA, Michito)  
東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授  
研究者番号：70372399

(3)連携研究者

石原 伸輔 (ISHIHARA, Shinsuke)