

平成 21 年 4 月 30 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18350026
 研究課題名（和文） 新しい機能性有機超分子化学を用いるマテリアルサイエンスの新展開
 研究課題名（英文） NEW DEVELOPMENTS OF NOVEL FUNCTIONAL ORGANIC SUPRAMOLECULAR CHEMISTRY IN MATERIALS SCIENCE
 研究代表者
 伊與田 正彦（IYODA MASAHIKO）
 首都大学東京・大学院理工学研究科・教授
 研究者番号：50115995

研究成果の概要：

近年、ナノスケールの共役系に関する研究が急速に発展している。このようなナノ分子は、溶液中で自己組織化して多量体を形成したり、その分子内の空孔に小さな π 共役分子を取り込んで包接錯体を形成する。また、 π 電子系を鎖状につなげた系では、ナノスケールのらせん構造ができるので、大きな二次構造をもつ分子となり、非常に大きな旋光度も予想される。このようなナノスケールの分子には、上記の性質のほかに、磁性—伝導性—光物性という複合機能も発現する。そこで申請者らがこれまでに研究してきた比較的大きな π 共役系の機能の探求から始めて、徐々に分子サイズを大きくすることにより、ナノ π 共役系の新しい機能を調べることを目的として研究を行った。

まず、共役 π 電子系の化学に基づいて合成反応を組み立てることによって、環状ポリフェニレン、環状ポリヘテロアレンおよび放射状ドナー分子を合成した。次いで、大きな π 電子系化合物の自己組織化と機能を調べ、これらの系から得られる分子ワイヤーの構造と機能を解明した。環状ポリフェニレンおよび環状ポリヘテロアレンは、ドーナツ型分子であり、内部に空孔を持つので、その環サイズによって小分子から大きなフラーレンのような分子を包接することが期待できる。また、放射状 π ドナーは、ほぼ平面構造を持った分子であるから、溶液中および結晶中で自己組織化して多量体を形成したり、カラム構造を作ると予想される。そこで、このような新規積層構造を持つ分子のスイッチ機能および光化学材料としての可能性を検討した。さらに、環状ポリヘテロアレンおよび放射状 π ドナー分子に関しては、これらの分子の中性状態における物性を調べたのち、そのCT錯体とラジカル塩を調製して、伝導性と磁性についても調べた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2007年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2008年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：基礎化学・有機化学

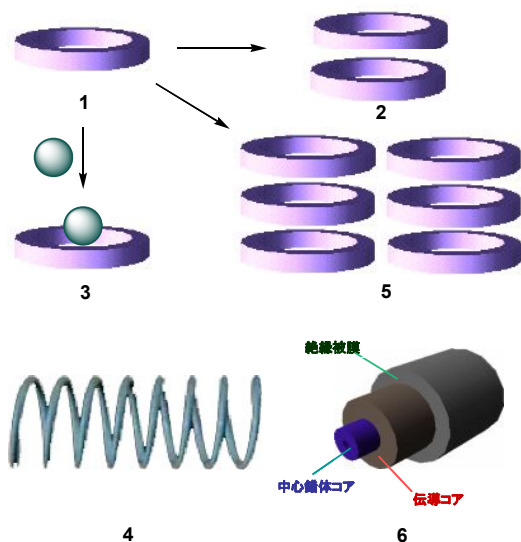
キーワード：構造有機化学

1. 研究開始当初の背景

私共は、本基盤研究(B)の開始前に基盤研究(A)「新しい機能性有機超分子化学の創製」を始めていたので、本研究「新しい機能性有機超分子化学を用いるマテリアルサイエンスの新展開」は、先の基盤研究(A)をさらに発展させる形で始まった。新しい機能性有機超分子の研究によってナノサイズの集積体の構造物性が明らかとなったので、本研究ではさらに進めて、マテリアルサイエンスでの新領域の創生を目ざした。

2. 研究の目的

近年、ナノスケールの π 共役系に関する研究が急速に発展している。このようなナノ分子 **1** は、溶液中で自己組織化して二量体 **2** を形成したり、その分子内の空孔に小さな π 共役分子を取り込んで包接錯体 **3** を形成する。また、 π 電子系を鎖状につなげた系では、ナノスケールのらせん構造 **4** が出来上がるので、大きな二次構造を持つ分子となる。このようにナノスケールの π 共役系分子には新しい超分子機能材料への展開が期待されている。さらに、ナノスケールの分子には、磁性-伝導性-光物性という複合機能の発現も期待されている。本研究では、申請者がこれまでに研究してきた大きな π 共役系の合成とその新しい機能の解明をもとにして、ナノスケールの π 電子系をマテリアルサイエンスの鍵物質として利用する基礎を築くことを目的とした。



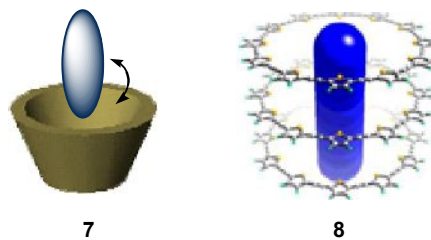
大きな π 電子系の自己組織化に関しては、主に溶液状態での性質が調べられているが、このような系をさらに会合させれば、積層構

造をとることによって大きな分子カラム **5** が出来上がり、電導性-磁性という複合機能が発現することが期待される。これまでに知られている磁性-電導性-光物性という複合機能を持った機能材料は「安定なラジカルを組み込んだ π 電子系化合物」および「有機-無機複合系における d-p 電子相互作用の可能な分子」を基本単位とする分子集合体の電子物性を基本としており、ナノスケールの π 共役系を用いると、従来からの系とは違った観点から研究を進めることが出来るので、新しい機能の発見にも寄与できると考える。また、**5** の1つのカラム構造は電導性分子ワイヤーとしての機能を示すので、その外側をアルキル置換基で包むことによって絶縁被膜でおおわれた“分子導線 **6**”を作ることも可能となる。

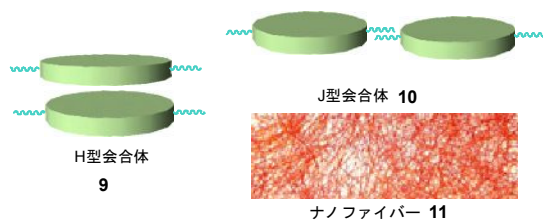
上記の研究目的を達成するために、本研究を行った。

3. 研究の方法

我々が第一に合成した系はベルト状 π 電子系である。6-10個のベンゼンを環状に結んだ環状ポリフェニレンは、フラーレンの中心ベルト構造として注目を集めているばかりでなく、それ自身が溶液中で自己組織化したり、小分子を取り込むホスト分子として働き、**7**のような会合体を作る。また、環状ポリフェニレンは結晶状態で n-型または p-型ドーピングを行うことによりフラーレンのような電導性を示し、さらに強磁性相互作用も期待できる。このような複合機能は、我々がナノスケールの π 共役系の研究から予想したものであり、新しい展開を計画中である。また、チオフェンなどのヘテロ芳香族分子を環状につなげた分子は、比較的平面性が高く、会合しやすいので、このような分子は棒状のヘテロ原子や金属を取り込んで **8** のような超分子会合体を形成すると予想される。さらに、ヘテロ芳香族分子は酸化によってカチオンを生成するから、電導カラムの形成と中心の磁性金属との相互作用を組み合わせると、電導性と磁性を併せ持つ機能性超分子が構築でき、新しいマテリアルサイエンスの発展に大きく寄与できるものと考えた。

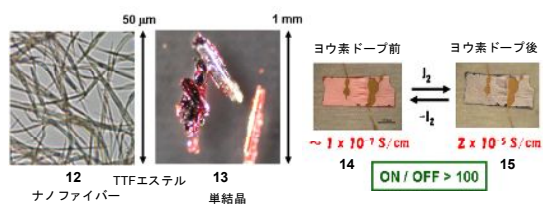


第二に我々が合成を計画した化合物は、基本単位はそれほど大きな分子ではないが、超分子構造をとることによってナノ構造が組みあがる分子性化合物である。この研究目的に関しては、これまで全く研究されていない放射状に広がった分子から出発して、弱い相互作用によってH会合体 **9** またはJ会合体 **10** のような構造を溶液中および結晶構造で構築する。**9** および **10** のような構造は、イオン性有機色素の自己組織化によって生成することが知られており、非局在化した一次元励起子による超高速非線形光学特性を持つことも報告されているので、マテリアルサイエンスに広範囲な応用が可能である。また近年、申請者らは幾つかの有機ドナー分子が繊維状の高次構造をつくることを見いだしている（顕微鏡写真 **11** を参照）、この現象を用いてナノサイズの電子回路を作る基礎となる導線を設計した。**11** に示した繊維状構造は、**9** のような会合体が集合することにより生成すると考えられ、100-1000 nm の太さをもつことから 500-5000 のカラム構造がより集って出来ているものと予想している。

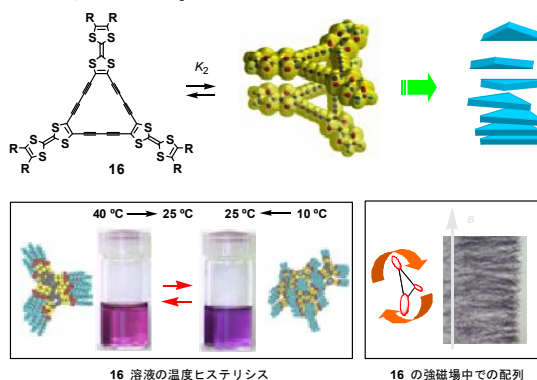


4. 研究成果

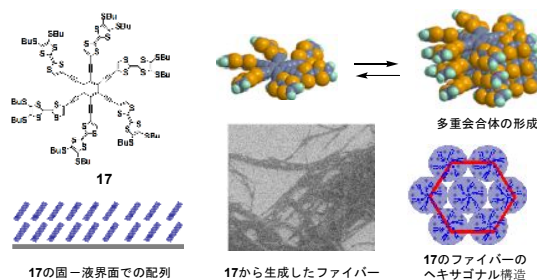
(1) 各種のアルキルチオ TTF エステルを合成して、そのナノ構造を調べた（下図）。ドデシルチオ基およびテトラデカチオ基を導入したメチルエステルのヘキサソル溶液はゲル化し、そのキセロゲルはナノファイバー**12**の形成を示した。**13** に示したメチルチオ誘導体の単結晶と比べて、ナノファイバーは細く一次元に伸びた構造を持つ。特徴的であるのは、ヨウ素ドーピングによる電導度のスイッチングであり、ヨウ素ドーピング前に比べると電導度が100倍以上増加した。さらに、このスイッチングはドーピングと脱ドーピングを行うことにより、50回以上繰り返すことができる。また、磁性金属を結合させたTTF誘導体を合成して、その導電性と磁氣的性質を調べた。



(2) 中央に大きな環状[18]アヌレン環を有するTTF三量体**16**は、容易に超分子会合して、ソルバトクロミズム、サーモクロミズム、溶液の色の温度ヒステリシスを示す（右上図）。また、THF-水溶液を強磁場中に置くと、生成するナノファイバーは磁場配列を示すことがわかった。通常、ナノファイバーを配列させることは非常に難しいが、我々の方法を用いると、高度な配列の制御が可能となる。

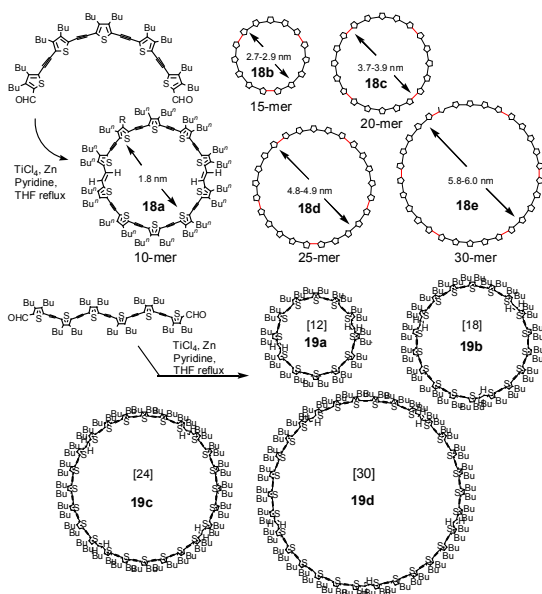


(3) 放射型TTF六量体**17**は、ディスク型分子であり、溶液中および固体状態で会合して超分子集合体を作る。この分子の特徴は、固-液界面からできる超分子構造と溶液中でできるナノ構造が違うことであり、固-液界面からは表面に垂直に並んだラメラ構造を作るが、溶液からは細いナノファイバーが形成される（下図）。固-液界面にできるラメラ構造は、その構造を反映して弱いながらもFET特性を示した。また、ラメラ構造およびナノ構造の形成は、対応するカチオンラジカルにおいても可能であり、ラメラ構造が $3.1 \times 10^{-5} \text{ Scm}^{-1}$ という電導度を示すのに対して、ヘキサゴナル構造は $4.4 \times 10^{-3} \text{ Scm}^{-1}$ という電導度を示し、モルフォロジーの違いが電導度に大きく反映するという結果を得た。

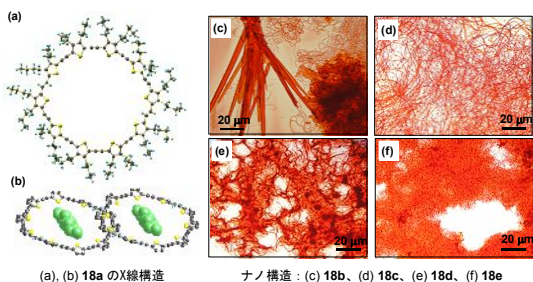


(4) 巨大環状オリゴチオフェン**18**, **19**の合成とナノ物性に関しては、これまで全く研究されてこなかった。大環状共役化合物は、それ自身が末端のない無限共役系となり、内部に大きな空孔を有する場合は、大きなゲスト分子を取り込むことが可能である。また、オ

リゴチオフェンの光物性である大きな二光子吸収特性も発現できる可能性を持つので、非常に興味深い分子であると言える。我々はチオフェン数が5個の前駆体を用いて **18a-e** を合成し、また、チオフェン数が6個の前駆体を用いて **19a-d** を合成した（次ページ図）。

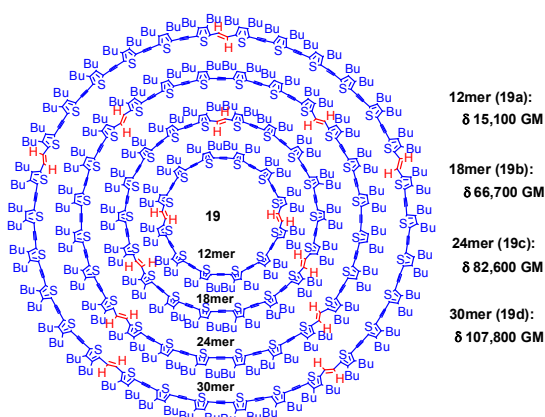


18a-e に関しては、その構造とナノ構造を調べたところ、**18a** はほぼ円形をしており、内部にアルカン分子を取り込んだ積層構造を作っていた。また、特徴的であるのは、これらの分子が同じ基本単位からできていることは無関係に種々のモルフロジーをとることである。先に示したように、**18a** は結晶化し、ほぼ円形構造をとるのに対して、**18b** は小さな結晶とナノファイバーの形成を示し、**18c** は均一なナノファイバーを形成する。また、**18d** と **18e** はナノパーティクルを作ることも分かった（下図）。



19a-d に関しては、巨大環状オリゴチオフェンの系統的な二光子吸収断面積を測定した。通常の環状共役系と比べると、**19a-d** ではその形と配座が溶液中で保たれやすい。そこで、非常に大きな二光子吸収の値を予測した。結果は次ページの図に示すようにこれまで知られていた値と比べて、一桁大きい二光子吸収の値が得られ、巨大環状オリゴチオ

フェンが光機能材料として有用な分子であることが分かった（下図）。



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 31 件）

- ① T. Nishiuchi, Y. Kuwatani, T. Nishinaga, M. Iyoda, “Dynamic Molecular Tweezers Composed of Dibenzocyclooctatetraene Units: Synthesis, Properties, and Thermochromism in Host-Guest Complexes,” *Chem. Eur. J.*, in press.
- ② M. Iyoda, “Copper-Mediated Aryl-Aryl Couplings for the Construction of Oligophenylenes and Related Heteroaromatics,” *Adv. Synth. Catal.*, in press.
- ③ M. Hasegawa, K. Takeda, Y. Kuwatani, M. Yoshida, H. Matsuyama, M. Iyoda, “Synthesis, Properties, and CT complex Formation of Highly Polarized Thiocyanotetrathiafulvalenes,” *J. Sulfur Chem.*, in press.
- ④ M. Hasegawa, K. Hara, K. Tokuyama, and M. Iyoda, “Synthesis and Properties of Thienylene-Ethynylene-Tetrathiafulvalene Oligomers,” *Phosphorus, Sulfur and Silicon*, in press.
- ⑤ M. Iyoda, M. Takase, and T. Nishinaga, “Supramolecular Structures and Nanoassemblies of Oligothiophenes and Tetrathiafulvalenes,” *Topics Heterocyclic Chem.*, in press.
- ⑥ M. Iyoda, “Giant Macrocycles Composed of Thiophene, Acetylene, and Ethylene Units,” *Comptes Rendus Chimie*, **2009**, *12*, 395-402.
- T. Minari, Y. Miyata, M. Terayama, T. Nemoto,
- ⑦ M. Hasegawa, Y. Kobayashi, K. Hara, H. Enozawa, M. Iyoda, “Synthesis and Electrochromic Properties of Bis(2-tetrathiafulvalenylethynylphenyl)ethynes,” *Heterocycles*, **2009**, *77*, 837-842.
- ⑧ M. Fujii, T. Nishinaga, M. Iyoda, “Synthesis of Thiophene-Pyrrole Mixed Oligomers End-Capped with Hexyl Group for Field-Effect

Transistors,” *Tetrahedron Lett.*, **2009**, *50*, 555-558.

⑨ T. Nishinaga, T. Uto, R. Inoue, A. Matsuura, N. Treitel, M. Rabinovitz, K. Komatsu, “Antiaromaticity and Reactivity of the Planar Cyclooctatetraene Fully Annulated with Bicyclo[2.1.1]hexane Units” *Chem. Eur. J.* **2008**, *14*, 2067-2074.

⑩ Y. Miyake, S. Watanabe, S. Aono, T. Nishinaga, A. Miyazaki, T. Enoki, H. Miyasaka, H. Otani, M. Iyoda, “Long-distance ferromagnetic coupling through spin polarization in a linear heterotrinary iron(III)-copper(II)-iron(III) complex derived from 5-ferrocenyl-2-aminotropone” *Chem. Commun.* **2008** 6167-6169.

⑪ K. Nakao, T. Nishiuchi, and M. Iyoda, “Syntheses, Structures, and Properties of Bithiophenophanes Bridged at 1,8-Positions of Naphthalenes” *Heterocycles* **2008**, *76*, 727-745.

⑫ M. Hirama, Y. Kato, C. Seki, H. Matsuyama, N. Oshikiri, M. Iyoda, “Asymmetric cycloaddition of 1,2-dihydropyridine derivatives in the presence of Lewis acids” *Chem. Lett.* **2008**, *37*, 924-925.

⑬ M. J. Rahman, J. Yamakawa, A. Matsumoto, H. Enozawa, T. Nishinaga, K. Kamada, M. Iyoda, “Synthesis of Nonaphenylenes and Dodecaphenylenes Using Electron-Transfer Oxidation of Lipshutz Cuprates and Formation of Nanostructural Materials from Hexadodecyloxynonaphylene” *J. Org. Chem.* **2008**, *73*, 5542-5548.

⑭ J. Yamakawa, M. Ohkoshi, F. Takahashi, T. Nishiuchi, Y. Kuwatani, T. Nishinaga, M. Yoshida, M. Iyoda, “Synthesis and Properties of Cyclic [5]meta-Phenyleneacetylene and Its Corresponding Cyclophane Polyone, [25](1,3)-Cyclophanedecaone” *Chem. Lett.* **2008**, *37*, 784-785.

⑮ M. Williams-Harry, A. Bhaskar, G. Ramakrishna, T. Goodson, III, M. Imamura, A. Mawatari, K. Nakao, H. Enozawa, T. Nishinaga, M. Iyoda, “Giant Thienylene-Acetylene-Ethylene Macro-cycles with Large Two-Photon Absorption Cross Section and Semishape-Persistence” *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, *130*, 3252-3253.

⑯ A. Miyazaki, H. Yamazaki, M. Aimatsu, T. Enoki, R. Watanabe, E. Ogura, Y. Kuwatani, M. Iyoda, “Crystal structure and physical properties of conducting molecular magnets with a halogen-substituted donor: (EDO-TTFBr₂)₂FeX₄ (X = Cl, Br)” *Inorg. Chem.* **2007**, *46*, 3353-3366.

⑰ Y. Miyata, M. Terayama, T. Minari, T. Nishinaga, T. Nemoto, S. Isoda, K. Komatsu, “Synthesis of Oligo(thienylfuran)s with

Thiophene Rings at Both Ends and their Structural, Electronic, and Field-Effect Properties” *Chem. Asian J.* **2007**, *2*, 1492-1504.

⑱ H. Enozawa, Y. Honna, M. Iyoda, “Self-assembly and Solvatochromic Fiber Formation of 4,5-Bis(dodecylthio)tetrathiafulvalene-4'-carboxylic Acid and its Derivatives” *Chem. Lett.* **2007**, *36*, 1434-1435.

⑲ M. Iyoda, M. Hasegawa, H. Enozawa, “Self-assembly and Nanostructure Formation of Multi-functional Organic π -Donors” *Chem. Lett.* **2007**, *36*, 1402-1407.

⑳ M. Iyoda, “Syntheses, Structures, and Supramolecular Properties of Giant π -Expanded Macrocyclic Oligothiophenes” *Heteroatom Chem.* **2007**, *18*, 460-466.

㉑ E. Isomura, K. Tokuyama, T. Nishinaga, M. Iyoda, “Synthesis and Properties of 4',5'-Bis(methylthio)-4,5-bis(2-pyridylethynyl)tetrathiafulvalene and its Copper Complexes” *Tetrahedron Lett.* **2007**, *48*, 5895-5898.

㉒ Y. Kobayashi, M. Hasegawa, H. Enozawa, M. Iyoda, “Electroactive Nanowires based on Simple 4,5-Bis(dodecylthio)- and 4,5-Bis(octadecylthio)-4',5'-bis(methoxycarbonyl)tetrathiafulvalenes” *Chem. Lett.* **2007**, *36*, 720-721.

㉓ S. Sirinintasak, Y. Kuwatani, S. Hoshi, E. Isomura, T. Nishinaga, M. Iyoda, “Short-Step Syntheses and Complexation Properties of Z,Z-tribenzodidehydro- and all-Z-tribenzo[12]annulenes” *Tetrahedron Lett.* **2007**, *48*, 3433-3436.

㉔ M. Hasegawa, H. Enozawa, Y. Kawabata, M. Iyoda, “Hexagonally Ordered Nanostructures Comprised of a Flexible Disk-like Molecule with High Self-Assembling Properties at Neutral and Cationic States” *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 3072-3073.

㉕ D. Yamazaki, T. Nishinaga, N. Tanino, K. Komatsu, “Terthiophene Radical Cations End-Capped by Bicyclo[2.2.2]octene Units: Formation of Bent π -Dimers Mutually Attracted at the Central Position,” *J. Am. Chem. Soc.*, **2006**, *128*, 14470-14471、査読有り。

㉖ T. Nishinaga, K. Komatsu, S. Isoda, “Alkyl chain length dependent mobility of organic field-effect transistors based on thienyl-furan oligomers determined by the transfer line method,” *Appl. Phys. Lett.*, **2006**, *88*, 083514/1-083514/3、査読有り。

㉗ K. Nakao, M. Nishimura, T. Tamachi, Y. Kuwatani, H. Miyasaka, T. Nishinaga, M. Iyoda, “Giant Macrocycles Composed of Thiophene, Acetylene, and Ethylene Building Blocks,” *J. Am. Chem. Soc.*, **2006**, *128*, 16740-16747、査読有り。

㉘ A. Miyazaki, M. Aimatsu, T. Enoki, R. Watanabe, E. Ogura, Y. Kuwatani, M. Iyoda, “Physical properties of pi-d interaction-based

molecular conducting magnet (EDO-TTFBr₂)₂·FeCl₄ under pressure,” *J. Low Temp. Phys.*, **2006**, *142*, 477-480、査読有り。

⑳ Y. Miyake, E. Isomura, M. Iyoda, “Selective hydrosilylation of 1-alkynes using iridium catalyst with biphosphinine ligand,” *Chem. Lett.*, **2006**, *35*, 836-837、査読有り。

㉑ Y. Miyake, M. Wu, M. J. Rahman, Y. Kuwatani, M. Iyoda, “Efficient Construction of Biaryls and Macrocyclic Cyclophanes via Electron-Transfer Oxidation of Lipshutz Cuprates,” *J. Org. Chem.*, **2006**, *71*, 6110-6117、査読有り。

㉒ H. Enozawa, M. Hasegawa, D. Takamatsu, K. Fukui, M. Iyoda, “Synthesis of Tris(tetrathiafulvaleno)dodecahydro[18]annulenes and Their Self-Assembly,” *Org. Lett.*, **2006**, *8*, 1917-1920、査読有り。

〔学会発表〕(計 147 件)

2008 年度

①伊与田正彦「有機 π 電子系の作る超分子構造とナノ集積体」第 4 回機能性分子シンポジウム招待講演(2008. 12, 筑波)。

②伊与田正彦「有機 π 電子系を用いるナノ集積体の構築」第 2 回有機 π 電子系シンポジウム招待講演(2008. 12, 宮島)。

③ M. Iyoda, “Supramolecular Structures and Unique Properties of Organic π -Donors” Workshop on Information, Nano and Photonics Technology 2008 招待講演(2008. 11, 神戸)。

④ M. Iyoda, “Functional Nanoscopic and Mesoscopic Architectures of Self-Assembled Organic π -Donors” KCIST 招待講演 (2008. 10, Seoul)

⑤ M. Iyoda, “Multi-Functional π -Conjugated Giant Thiophene-Acetylene-Ethylene Macrocycles” π 8 (2008. 7, Graz)。

⑥ M. Iyoda, “Electroactive Supramolecular Architectures Based on TTF Oligomers” 23rd ISOCS (2008. 6, Moscow)。

⑦伊与田正彦「有機分子を重ねてつくるナノワイヤー」液晶化学研究会シンポジウム 招待講演(2008. 6, 東京)。(他 4 8 件)

2007 年度

①伊与田正彦「有機 π 電子系をもちいるナノサイズの分子導線とリングの構築」電気通信大学講演会 (2007. 8, 調布)。

② M. Iyoda, “Nanostructures of Self-Assembled TTF Oligomers and Giant π -Expanded Macrocyclic, Oligothiophenes” BCS 招待講演(2007. 3, バングラデシュ)。

③ M. Iyoda, “Nanostructures Composed of Redox-Active Organic π -Donors” ISOETC 招待講演 (2007. 1, 横浜)。(他 4 3 件)

2006 年度

①伊与田正彦、「巨大有機 π 電子系からできるナノサイズの分子導線とリング」化学プラットホーム@関西シンポジウム 2006 招待講

演 (2006, 12, 大阪)。

②伊与田正彦、「有機 π 電子系からナノサイズの分子導線とリングを作る」有機合成化学ミニシンポジウム招待講演 (2006, 11, 千葉)。

③ M. Iyoda, “ π -Expanded Macrocyclic Oligothiophenes with Nanoscale Inner Cavities” ISOCS 招待講演 (2006. 8, 大宮)。(他 4 2 件)

〔図書〕(計 8 件)

① 伊与田正彦、横山泰、西長亨「マテリアルサイエンス有機化学」東京化学同人 (2007)。

②伊与田正彦、西長亨「第 8 章 チオフェンと電子材料」サルファーケミカルズのフロンティア (中山重蔵 監修) シーエムシー出版 (2007)。

③西長亨、伊与田正彦「炭素の事典、第一章 はじめに」(伊与田正彦、榎敏明、玉浦裕編) 朝倉書店 (2007)。

④山本学、伊与田正彦、豊田真司「有機化学演習」東京化学同人 (2008)。

⑤江野澤英穂、伊与田正彦、分担執筆、「電子共役系有機材料の創製・機能開発・応用」シーエムシー出版 (2008)。

⑥ M. Iyoda, “Radialenes” In *Compounds with All-Carbon Functions: Arenes, Annulenes and Conjugated Polyenes, Volume 45A, Science of Synthesis*, Georg Thieme Verlag KG, pp 507-541, (2008)。

⑦ T. Nishinaga, “8-Membered Rings, Cyclooctatetraenes” In *Compounds with All-Carbon Functions: Arenes, Annulenes and Conjugated Polyenes, Volume 45A, Science of Synthesis*, Georg Thieme Verlag KG, (2008)。

⑧ T. Nishinaga, “9-Membered Rings and Higher” In *Compounds with All-Carbon Functions: Arenes, Annulenes and Conjugated Polyenes, Volume 45A, Science of Synthesis*, Georg Thieme Verlag KG, (2008)。

〔その他〕

ホームページ:

<http://www.sci.metro-u.ac.jp/chem/org/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊与田 正彦 (IYODA MASAHIKO)

首都大学東京・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 50115995

(2) 研究分担者

西長 亨 (NISHINAGA TOHRU)

首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 30281108

高瀬 雅祥 (TAKASE MASAYOSHI)

首都大学東京・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 90516121