

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24685026

研究課題名(和文) 明確な幾何的配置をもつ集積アセチレンの共同効果に基づく水素吸蔵材料の創成

研究課題名(英文) Creation of Hydrogen Storage Material Based on Cooperative Effects of Accumulated Acetylenes with Well-defined Geometry

研究代表者

久木 一郎 (Hisaki, Ichiro)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90419466

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,500,000円

研究成果の概要(和文)：不飽和度の高いアセチレンを集積させた多孔性材料は、物理的、化学的に水素を吸蔵できる可能性を秘めている。本研究では、アセチレンを明確な幾何配置に固定した環状共役分子(DBA)を用いて、多孔性の金属有機構造体(MOF)あるいは非共有結合性構造体を構築し、物理的および化学的な水素吸蔵が可能な材料の開発を目指した。まず、DBA分子と、各種ガス分子との親和性を計算化学によって定量的に評価した。さらに、DBAの一連のカルボン酸誘導体を配位子として用い、内部に空間を有したMOFの構築に成功した。また、水素結合によってDBAをネットワーク化した多孔質構造体の構築にも成功し、そのガス吸着挙動を確認した。

研究成果の概要(英文)：Porous materials composed of acetylenes, highly-unsaturated sterically-narrow chemical species, are expected to absorb hydrogen gas molecules physically and chemically. In this study, we aimed construction of such materials based on pi-conjugated macrocyclic molecules so-called dehydrobenzoannulene (DBA), possessing acetylene moieties preorganized with well-defined geometry. First, we elucidate quantitative intermolecular interactions between the DBA and gas molecules. Subsequently, we successfully constructed porous materials, in which DBA molecules are networked via coordination bonds or hydrogen bonds to form nano-meter pores surrounded by DBA. Some of them show good gas absorption property.

研究分野：超分子化学

キーワード：超分子化学 結晶工学 多孔質材料 ガス吸着 水素結合 デヒドロアヌレン ヘキサゴナルネットワーク 集積アセチレン

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日の震災と原発事故は、日本のエネルギー供給の構造的問題を露呈し、多様なエネルギー技術の開発に取り組む必要性を痛感させた。これを受けて、本研究では我々のこれまでの研究成果を発展させ、エネルギー源の一つとして有望な資源ガス(水素など)の吸蔵材料の開発に取り組むこととした。具体的にはアセチレン誘導体の集積化によって気体吸蔵材料の開発を目指した。本研究を開始した当時、例えば水素貯蔵量目標値(~6w%)を達成するために、sp²混成炭素を基盤とした軽量の炭素材料(グラファイト、ナノチューブ、フラーレンなど)が盛んに研究されていた。また、ナノグラフェン分子を用いた有機-金属ハイブリッド多孔性材料(PCP/MOF)でも気体吸蔵が検討されていた。我々は、有機分子を基盤とした気体吸蔵材には、非局在化したπ電子面をもつ大表面積の細孔を構築することが重要であると考えた。なぜなら、(1)誘起分極により気体分子を強く物理吸着でき、さらに(2)遷移金属をドーピングすることによって共役平面への化学吸着を促進できるためである。しかし、その性能は未だ十分ではなく、さらなる発展が不可欠であった。

2. 研究の目的

我々は、ガス吸着材を構築するための基本骨格として sp 混成炭素で構成されるアセチレンに着目した。アセチレンの直線形状のためグラフェン類よりも微細な吸着サイトを3次元状に飛躍的に拡張することができ、物理的吸着能が飛躍的に高まると期待した。また、直交した2種類の p 軌道により、指向性の高い配位サイトを金属に提供できる。さらに、複数のアセチレンを三角(60度)、四角(90度)等、明確な幾何構造へと集積させることによって、配位や吸着がアセチレン間で共同的に進行し、単独では見られない特異な挙動が期待できる。しかし、アセチレン部位を用いた PCP/MOF あるいは、有機分子のみからなる多孔質構造体は、上記の潜在力にもかかわらず当時はまれであった。それは、水素吸蔵機能をもつ材料へと展開する際、アセチレンの熱力学的な不安定性が問題となるためである。これに対し我々は、複数のアセチレン部位を安定なベンゼン環を介して分子内に組み込みこんだ環状共役分子(デヒドロベンゾアヌレン、以下 DBA と省略)を合成することによって、(1)アセチレンを明確な幾何構造へと配置する、(2)熱力学的な安定性を向上させるという2つの要求を同時に満足させることができると考えた。この DBA 誘導体の自己組織化により有機多孔質体を構築し、あるいは金属種との配位結合によって PCP/MOF を構築し、「アセチレン集積分子の共同効果」と「プログラムされた自己組織化」の相乗によって、高い水素吸蔵能を有する空間材料の創発を目的とした。

3. 研究の方法

- ① 標的とする分子(水素、メタンその他の気体)と種々の DBA 骨格との分子間相互作用を、高い精度の分子軌道計算を用いて定量的に評価した。
- ② 水素結合を形成する、あるいは金属と強い配位結合を形成する置換基(カルボキシル等)を周囲に導入した DBA 誘導体を合成した。
- ③ DBA 誘導体の基本的な物性を UV-vis, IR, 蛍光スペクトル等によって評価した。
- ④ DBA 誘導体と、種々の遷移金属とを用いて、PCP/MOF を構築した。
- ⑤ 合成した DBA 誘導体を、水素結合を用いてネットワーク化し、有機多孔質構造体を構築した。
- ⑥ 得られた多孔質構造体の構造を明らかにした。X 線単結晶構造解析、粉末回折測定、熱重量分析、元素分析、各種固体分光を行った。
- ⑦ 多孔質構造体の空間活性化を行うと共に、気体の吸着挙動について評価した。

4. 研究成果

(1) まず、ヘキサデヒドロトリベンゾ[12]アヌレン(以降、T12 と省略)の環中心ポケットにおける種々のガス分子との親和性を *ab initio* 計算(MP2/aug-cc-pVTZ level)によって評価した。図1のような配置に気体分子を置きその時の T12 と気体分子との間に働く分子間相互作用を求めた。また、参照構造として、ベンゼンおよびアセチレンと気体分子との親和性も合わせて求めた。その結果、T12 は、

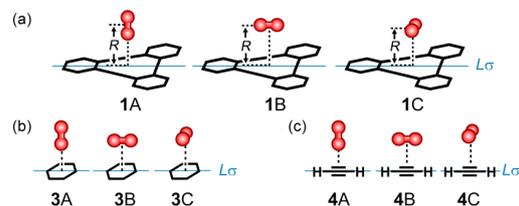


図1. 理論計算に用いたモデル構造。(a) T12、(b) ベンゼン、(c) アセチレン

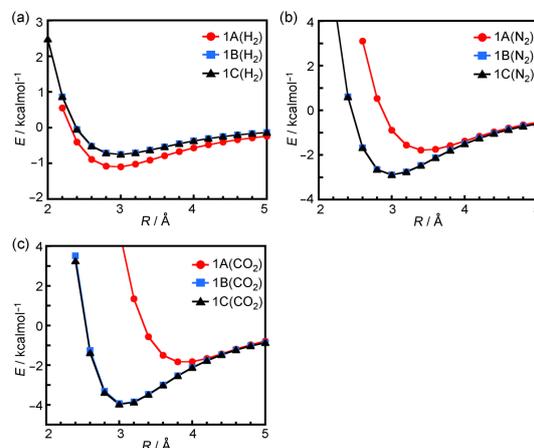


図2. 上記モデルを用いて計算した T12 と (a) 水素、(b) 窒素、(c) 二酸化炭素とのポテンシャル曲線。

いずれの気体分子との相互作用においても、極小値をもつポテンシャルカーブを与えたことから、引力が働いていることがわかった(図2および表1)。水素、窒素、および二酸化炭素に対して、それぞれ 0.84、1.70、および 3.07 kcal/mol の親和性を示した。さらに、T12の部分構造と気体分子との相互作用を計算し、アセチレンの共同効果について検討した。その結果、3つのアセチレンが三角状に配列することによる誘起効果については比較的顕著な共同性が認められたが($E_{\text{coop}}(\text{IE}_{\text{HF}}) = -0.087$ kcal/mol)、立体反発が同時に生じるために($E_{\text{coop}}(\text{IE}_{\text{CORR}}) = 0.076$ kcal/mol)、全体としては共同効果によって生じる親和性は非常に小さいことがわかった。

表 1. CCSD(T)/CBS レベルで計算したポテンシャルミニマムにおける相互作用エネルギー。

π system	Gas	$E^a/\text{kcal mol}^{-1}$ (R/Å)		
		Cluster A	Cluster B	Cluster C
1	H ₂	-0.841 (3.0)	-0.606 (3.0)	-0.604 (3.0)
	N ₂	-0.847 (3.4)	-1.697 (3.0)	-1.696 (3.0)
	CO ₂	-0.916 (3.5)	-3.045 (3.0)	-3.066 (3.0)
3	H ₂	-0.985 (3.2)	-0.693 (3.2)	-0.694 (3.2)
	N ₂	-0.756 (3.8)	-1.426 (3.4)	-1.438 (3.4)
	CO ₂	-0.512 (4.4)	-2.229 (3.4)	-2.232 (3.4)
4	H ₂	-0.373 (3.6)	-0.037 (4.2)	-0.085 (4.2)
	N ₂	-0.448 (4.3)	-0.507 (3.8)	-0.595 (3.8)
	CO ₂	-0.006 (5.2)	-1.971 (3.4)	-1.112 (3.4)

^a The distance between the π systems and gas molecule.

(2) 次に PCP/MOF を合成するための有機配位子として、カルボキシル基、カルボキシフェニル基、およびイソフタル基を周囲3カ所にもつ C₃ 対称性の T12 誘導体(1、2、3)の合成を行った。得られたリンカーを用いて、既に報告されている水熱合成法を基に条件を最適化することによって、DBA-MOF の合成を行った。このうち、1と亜鉛(II)から構成される PCP/MOF、2と亜鉛(II)から構成される PCP/MOF、3と亜鉛(II)あるいは銅(II)から構成される PCP/MOF の単結晶X線構造解析に成功した(図3)。T12 誘導体 1-3 から構成される PCP/MOF は、いずれも異なる配位環境を形成し、その SBU (Secondary building unit) の構造は全く異なることが明らかとなった。一方、いずれの PCP/MOF も結晶内部には、DBA の環状アセチレン平面が露出した大きな空孔が存在し、その空孔はチャンネルによって連結されている。このような構造は、ガス吸蔵には適した構造である。しかし一方で、その高い多孔性のためにこれらの PCP/MOF は空孔に包接されている溶媒などの分子を除去することによって、容易に構造変化を起こすことが明らかとなった。これらの構造体の活性化(配位ポリマーの構造を維持したまま、構造内の空孔に取り込まれた溶媒などの分子を除去し、ガスなどの吸着が可能な状態にすること)を検討した。例えば、配位ポリマーの合成の際に包接された高沸点極性分子を、低沸点分子に置き換えるために、

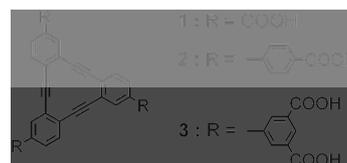


図 3. T12 誘導体 1、2、3.

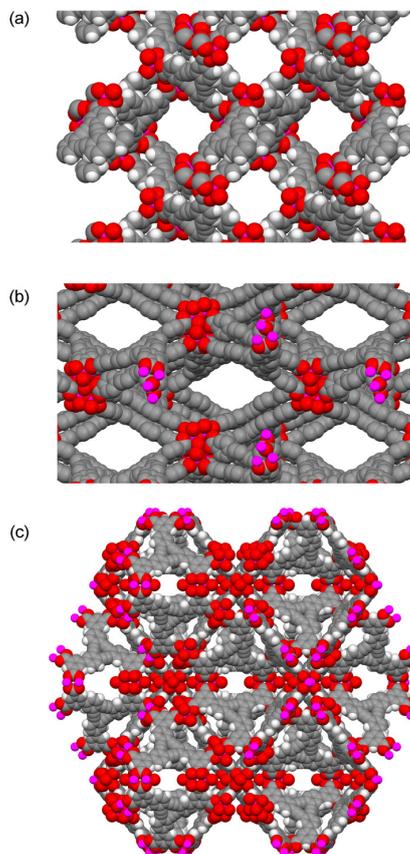


図 4. T12 を基盤とした PCP/MOF 構造(a) 1(Zn)、(b) 2(Zn)、(c) 3(Zn).

PCP/MOF をエタノールに浸漬させて構造変化をX線回折や固体蛍光分光によって追跡した。その結果、T12 誘導体 3 と亜鉛イオンから構成される MOF は、構造を保ったまま溶媒が交換できることを明らかにした。しかし、これに続く加熱・減圧による活性化では、いずれの PCP/MOF もその構造が崩壊することがX線回折より明らかとなった。

(3) 一方、金属配位結合を用いることなく安定で大きな空間をもつ集積アセチレン構造体の構築を行うために、DBA 類の周囲に6つのカルボキシフェニル基を導入した誘導体を合成し、これらを水素結合によってネットワーク化し、多孔質構造体を構築することを検討した。我々は、*o*-ターフェニルジカルボン酸部位を DBA に組み込むことによって、水素結合性の環状超分子ユニット(以下、フェニレントライアングル: Phenylene triangle (PhT)と呼ぶ)が形成すると考えた。これにより多孔性の2次元ヘキサゴナルネットワークが構築でき、これを相互貫入することなく積

層させれば、金属を用いない有機分子のみからなる多孔質構造体が構築できる(図5)。また、このヘキサゴナルネットワークは、面内に大きさや形が異なる複数の空孔(ここでは3種類)を組み込むことが可能である。

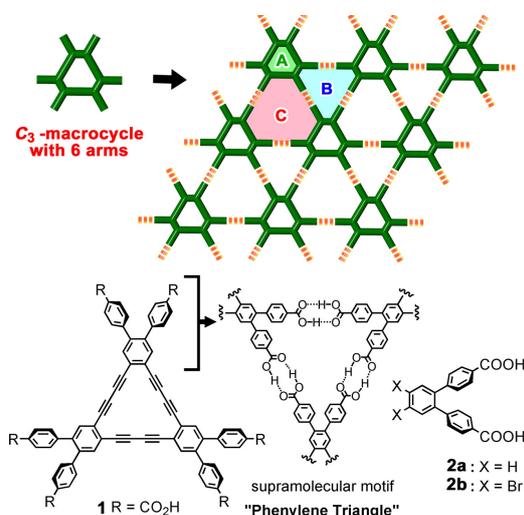


図5. 6つのカルボキシフェニル基をもつC₃対称DBA **1**の、水素結合性環状モチーフ(PhT)の形成による多孔性2次元ヘキサゴナルネットワークの構築. ネットワークは、3種類(A、B、C)の空孔をもつ。

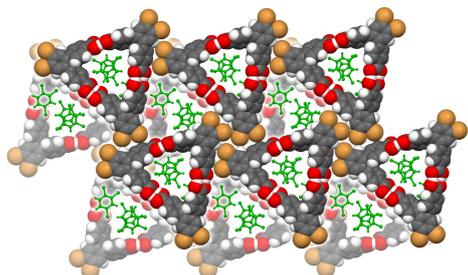


図6. *o*-ターフェニルジカルボン酸誘導体 **2b**の結晶構造.

まず、*o*-ターフェニルジカルボン酸誘導体 **2a** および **2b** を種々の条件下で結晶化し、所望の水素結合三量体(PhT)の形成を確認・評価した。DMF/1,2,4- および 1,3,5-トリクロロベンゼン混合溶媒を用いて結晶化を行ったところ、**2a** のカルボキシル基は水素結合性の2量体を形成して一次元状のジグザグ鎖を構築した。一方、**2b** は、カルボン酸の相補的な2量化によって3分子が環状構造を形成したPhTモチーフを形成することが明らかとなった(図6)。

次にDBA **1** を熱DMFより結晶化したところ、**1** の6つのカルボキシル基のうち2つが1次元ネットワーク構造の構築に寄与するものの、残りの4つがDMF分子と水素結合することによって2次元状のネットワーク化が阻害された高密度な結晶を与えた(空間占有率: 88%)。そこで、**1** のDMF溶液に芳香属性の非極性溶媒を加えて結晶化を行うと、**1**

の2次元状ヘキサゴナルネットワーク構造が得られた。この構造は、DBA **1** が水素結合性のPhTモチーフを形成することによって形成されており、3種類の空孔を有する。DBA **1** 自体が与える最小の空孔には、何も包接されず、一辺が11 ÅのPhTの空孔には、溶媒分子が1分子包接されている。5 Åと14 Åの辺を交互にもつ六角形の空孔は、我々が知る限り、カルボン酸ダイマーで構成される既報のヘキサゴナルネットワークの中では最大であるが、6分子の溶媒分子が包接されていた。また、ネットワークは相互貫入することなく積層していた。さらに興味深いことに、用いる溶媒を変えることによって(例えば1,2,4-trichlorobenzeneとmethyl benzoateなど)、異なる積層様式を与えることがわかった(図7aと7b)。

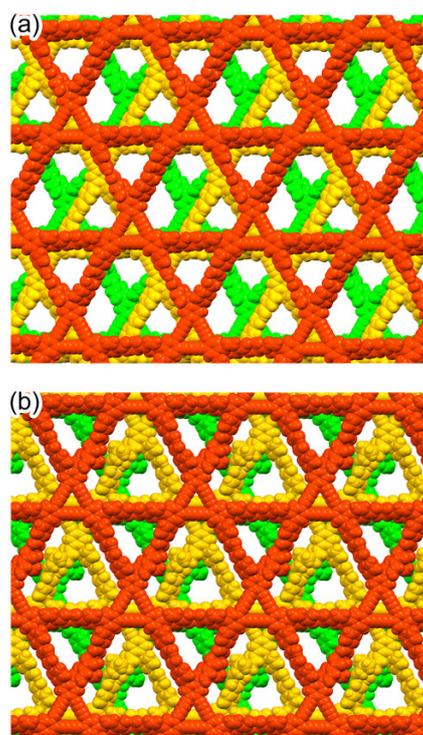


図7. DBA **1** の2次元ヘキサゴナルネットワークの積層体の単結晶X線構造(3層分を表示). (a)安息香酸メチルを用いて結晶化した構造(b) 1,2,4 トリクロロベンゼンを用いて結晶化した構造. 空孔には結晶化に用いた溶媒が包接されているが、ここでは省略している。

包接されているゲストを除いたDBAのフレームが結晶体積に占める占有率は約50%であり、非常に低密度な構造体であることがわかる。この構造体の活性化は、得られた結晶を一旦ベンゼンに浸漬させた後に減圧下で置くことで達成された。粉末X線回折測定の結果、活性化前後で若干の構造変化はあるものの、構造内部には空孔が維持されていることが二酸化炭素の吸着実験より明らかになった。

以上の結果は、PhTモチーフによって、環

状の集積アセチレン分子をネットワーク化する本研究の手法が、多孔性ヘキサゴナルネットワーク構造の構築に有用であることを示しており、今後、動的な資源ガスやその他の化学種を吸蔵するプラットフォームとして展開できる。

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 18 件)

- ① Hajime Shigemitsu, Ichiro Hisaki, Eriko Kometani, Norimitsu Tohnai, Mikiji Miyata, "Guest-Dependent Structural Transformation of Dehydrobenzoannulene Inclusion Crystals Composed of π -Stacked Parallelogram Columnar Motifs" *Chem. Lett.* 査読有 **2012**, 41, 1535–1537. DOI: 10.1246/cl.2012.1535
- ② Toshiyuki Sasaki, Ichiro Hisaki, Seiji Tsuzuki, Norimitsu Tohnai and Mikiji Miyata, "Halogen Bond Effect on Bundling of Hydrogen Bonded 2-Fold Helical Columns" *CrystEngComm* 査読有 **2012**, 14, 5749–5752. DOI: 10.1039/C2CE26081F
- ③ Ichiro Hisaki, Eri Hiraishi, Toshiyuki Sasaki, Hideo Orita, Seiji Tsuzuki, Norimitsu Tohnai, and Mikiji Miyata, "Crystal Structure of Quinine: Unignorable Affects of Vinyl and Methoxy Groups on Molecular Assemblies of Cinchona Alkaloids" *Chem. Asian J.* 査読有 **2012**, 7, 2607–2614. DOI: 10.1002/asia.201200566
- ④ Chuandong Dou, Shohei Saito, Kyohei Matsuo, Ichiro Hisaki, Shigehiro Yamaguchi, "A Boron-Containing PAH as a Substructure of Boron-Doped Graphene" *Angew. Chem. Int. Ed.* 査読有 **2012**, 51, 12206–12210. DOI: 10.1002/anie.201206699
- ⑤ Ichiro Hisaki, Daisuke Yasumiya, Hajime Shigemitsu, Seiji Tsuzuki, Norimitsu Tohnai, Mikiji Miyata, "Interactions Between Dehydrobenzo[12]annulene (DBA) and Gas Molecules: Do the Preorganized Acetylenes Work Cooperatively?" *Phys. Chem. Chem. Phys.* 査読有 **2012**, 14, 13918–13921. DOI: 10.1039/c2cp43091f
- ⑥ Shunpei Nobusue, Akihiro Shimizu, Kenji Hori, Ichiro Hisaki, Mikiji Miyata, Yoshito Tobe, "Oxidative Cyclodimerization that Follows Tandem Cyclization of Dehydrobenzo[14]annulenes Induced by Alkylolithium" 査読有 *Angew. Chem. Int. Ed.* **2013**, 52, 4184–4188. doi: 10.1002/anie.201210233
- ⑦ Akihiro Shimizu, Ryohei Kishi, Masayoshi Nakano, Daisuke Shiomi, Kazunobu Sato, Takeji Takui, Ichiro Hisaki, Mikiji Miyata, Yoshito Tobe, "Indeno[2,1-*b*]fluorene: A 20- π -Electron Hydrocarbon with Very Low-Energy Light Absorption" *Angew. Chem. Int. Ed.* 査読有 **2013**, 52, 6076–6079. DOI: 10.1002/anie.201302091
- ⑧ Hajime Shigemitsu, Ichiro Hisaki, Eriko Kometani, Daisuke Yasumiya, Yuu Sakamoto, Keisuke Osaka, Tejender S. Thakur, Akinori Saeki, Shu Seki, Fumiko Kimura, Tsunehisa Kimura, Norimitsu Tohnai and Mikiji Miyata, "Crystalline Supramolecular Nanofibers Based on Dehydrobenzoannulene Derivatives" *Chem. Eur. J.* 査読有 **2013**, 19, 15366–15377. DOI: 10.1002/chem.201301967
- ⑨ Hajime Shigemitsu, Ichiro Hisaki, Hirofumi Senga, Daisuke Yasumiya, Tejender S. Thakur, Akinori Saeki, Shu Seki, Kazunori Nakano, Norimitsu Tohnai and Mikiji Miyata, "Ultrasound Triggered Structural Conversion of Supramolecular Nanofibers Associated with Drastic Change of Electric Property" *Chem. Asian J.* 査読有 **2013**, 8, 1372–1376. DOI: 10.1002/asia.201300258
- ⑩ Chunxue Yuan, Shohei Saito, Cristopher Camacho, Stephan Irle, Ichiro Hisaki, Shigehiro Yamaguchi, "A π -Conjugated System with Flexibility and Rigidity That Shows Environment-Dependent RGB Luminescence" *J. Am. Chem. Soc.* 査読有 **2013**, 135, 8842–8845. DOI: 10.1021/ja404198h
- ⑪ Kazuhiro Mouri, Shohei Saito, Ichiro Hisaki, and Shigehiro Yamaguchi, "Thermal 8 π Electrocyclic Reaction of Heteroarene Tetramers: New Efficient Access to π -Extended Cyclooctatetraenes" *Chem. Sci.* 査読有 **2013**, 4, 4465–4469. DOI: 10.1039/c3sc52232f
- ⑫ Hirokazu Miyoshi, Shunpei Nobusue, Akihiro Shimizu, Ichiro Hisaki, Mikiji Miyata and Yoshito Tobe, "Benz[*c*]indeno [2,1-*a*]fluorene: a 2,3-naphthoquinodimethane incorporated into an indenofluorene frame" *Chem. Sci.* 査読有 **2014**, 5, 163–168. DOI: 10.1039/c3sc52622d
- ⑬ Ichiro Hisaki, Noriko Manabe, Keisuke Osaka, Akinori Saeki, Shu Seki, Norimitsu Tohnai, Mikiji Miyata "Effects of ortho-Phenyl Substitution on Molecular Arrangements of Octadecahydrodibenzo[12]-annulene" *Bull. Chem. Soc. Jpn.* 査読有 **2014**, 87, 323–333. DOI: 10.1246/bcsj.20130279
- ⑭ Ichiro Hisaki, Keisuke Osaka, Hajime Shigemitsu, Norimitsu Tohnai, and Mikiji Miyata "Crystal Structure of Hydrogen-Bond Assisted Coaxially π -Stacked Dimer of Hexadecahydrotribenzo[12]annulene ([12]DBA) Derivative" *Chem. Lett.* 査読有 **2014**, 43, 1104–1106. DOI: 10.1246/cl.140250

- ⑮ Satoru Ito, Satoru Hiroto, Sangsu Lee, Minjung Son, Ichiro Hisaki, Dongho Kim and Hiroshi Shinokubo "One-Step Reaction that Yields Highly Twisted and Fully π -Conjugated Porphyrinic Oligomers" *J. Am. Chem. Soc.* 査読有 **2015**, 137, 142–145. DOI: 10.1021/ja511905f
- ⑯ Shunpei Nobusue, Hirokazu Miyoshi, Akihiro Shimizu, Ichiro Hisaki, Kotaro Fukuda, Masayoshi Nakano, and Yoshito Tobe, "Tetracyclopenta[def,jkl,pqr,vwx] tetraphenylene: A Potential Tetraradicaloid Hydrocarbon" *Angew. Chem. Int. Ed.* 査読有 **2015**, 54, 2090–2094. DOI: 10.1002/anie.201410791.
- ⑰ Ichiro Hisaki, Shoichi Nakagawa, Norimitsu Tohnai, Mikiji Miyata, "C₃-Symmetric Macrocyclic-Based, Hydrogen-Bonded, Multi-Porous Hexagonal Network as Motif of Porous Molecular Crystals" *Angew. Chem. Int. Ed.* 査読有 **2015**, 45, 3008–3012. DOI: 10.1002/anie.201411438
- ⑱ Ichiro Hisaki, Eriko Kometani, Hajime Shigemitsu, Norimitsu Tohnai, Mikiji Miyata, "Synthesis of Chiral Assembly from Achiral Octadecahydrotribenzo[14]annulene Derivative by Using Twofold Helical Hydrogen Bonding Template" *Synlett* 査読有 **2015**, in press. DOI: 10.1055/s-0034-1380688

[学会発表] (計 20 件)

- ① 久木一朗, "アリアル置換によるオクタデヒドロ[12]アヌレンの積層構造制御" 日本化学会第 93 春季年会、2013 年 03 月 23 日、滋賀
- ② 久木一朗, "メチルエステル置換した非中心対称性アヌレンによる結晶性ナノファイバーの構築" 第 60 回応用物理学会春季学術講演会、2013 年 03 月 29 日、神奈川
- ③ 久木一朗, "Construction of One-Dimensionally π -Stacked Assemblies with Inclusion Channels via Symmetry Decreasing Crystallization of C₃ Discotic Molecules" 61st SPSJ Annual Meeting、2012 年 05 月 31 日、神奈川
- ④ 久木一朗, "アセチレンを明確な幾何配置に固定した環状共役分子の気体分子に対する親和性" 第 23 回基礎有機化学討論会、2012 年 09 月 21 日、京都
- ⑤ 久木一朗, "Porous Crystalline Architectures Based on Triangular Dehydrobenzoannulene Derivatives" Gordon Research Conference on Crystal Engineering、2012 年 06 月 11 日、NH USA
- ⑥ Hajime Shigemitsu 他, "Highly crystalline one-dimensional supramolecular assemblies based on oolar dehydrobenzoannulene derivatives" 第 61 回高分子学会年次大会、

2012 年 05 月 31 日、横浜

- ⑦ Ichiro Hisaki, "Crystalline Supramolecular Nanofibers Based on Dehydrobenzoannulene Derivatives" 94th Annual Meeting of The Chemical Society of Japan、2014 年 3 月 29 日、名古屋 [invited]
- ⑧ Ichiro Hisaki, Solid-state Supramolecular Assemblies Based on Dehydrobenzoannulene, China-Japan Joint Symposium on Functional Supramolecular Architectures、2013 年 10 月 27 日、蘇州、中国 [invited]
- ⑨ 安宮大祐 他, "アセチレンを集積した環状分子による多構成配位ポリマーの構築" 第 62 回高分子学会年次大会、2013 年 5 月 29-30 日、京都
- ⑩ 久木一朗他, "Structure and Property of π -Stacked Assembly of Thienyl-Substituted Octadecahydro[12]annulene" 日本化学会第 95 春季年会、2015 年 3 月 26-29 日、千葉
- ⑪ 久木一朗, "C₃ 対称性パイ共役環状分子を基盤とした結晶性超分子構造体の構築と機能" 有機結晶シンポジウム、2015 年 10 月 15-17 日、千葉
- ⑫ 久木一朗 他, "パイ共役環状分子を基盤とした水素結合性低密度ヘキサゴナルネットワークの構築" 第 63 回高分子討論会、2014 年 9 月 24-26 日、長崎
- ⑬ Ichiro Hisaki 他, "Metal Coordinated Supramolecular Architectures Based on Dehydrobenzoannulenes" International Conference on Organometallic Chemistry 2014 (ICOMC)、2014 年 7 月 13-18 日、北海道
- ⑭ Ichiro Hisaki 他, "Affirmative Polymorph Generation of Annulenes Using CH/O interactions" IUCr2014、2014 年 8 月 5-12 日、Montreal、Canada
- ⑮ Ichiro Hisaki, 他, "Twofold Helical Molecular Assembly in Organic Crystal" Molecular Chirality Asia 2014、2014 年 10 月 29-31 日、北京、中国 [invited]

[図書] (計 1 件)

- ① 久木一朗、藤内謙光、宮田幹二、ゲルの安定性と機能付与・次世代への応用開発、技術情報協会、2013、552.

[その他]

ホームページ等

http://www.mls.eng.osaka-u.ac.jp/~mol_rec/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久木一朗 (HISAKI ICHIRO)
大阪大学・工学研究科・助教
研究者番号：90419466