

令和元年6月11日現在

機関番号：37401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04561

研究課題名(和文) フラーレン包接結晶条件の最適化を利用したプロセス構築

研究課題名(英文) Process development by using the optimization of inclusion and crystallization of fullerene

研究代表者

草壁 克己 (KUSAKABE, Katsuki)

崇城大学・工学部・教授

研究者番号：30153274

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：多孔質ナノ孔結晶であるシクロデキストリン系金属有機構造体の親水性あるいは疎水性ナノ孔内に、それぞれ水溶性ポルフィリンと疎水性分子であるフルラーレンC60を導入する方法を確立した。蛍光性分子であるフルオレセインとローダミンBを同時に導入すると、蛍光共鳴エネルギー移動が観察され、両分子が高分散で近接していることが明らかになった。最後に、導入したチオフェン化合物の酸化重合を行うと、重合が進展せずに5量体以下のオリゴマーが生成することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子材料として注目されるC60の孤立、水溶化法としてCD-MOF内のナノ孔への導入法が確立され、今後C60の触媒分野や医薬分野への応用が期待できる。また、CD-MOFは欠陥がなく結晶性が高いので、物質合成のためのナノリアクターとして機能する。本研究では重合反応によりオリゴマーの合成を行ったが、サイズが2nm以下の貴金属ナノクラスターや非晶質金属酸化物ナノクラスターなどの超機能性材料の合成が可能である。

研究成果の概要(英文)：Cyclodextrin-based metal organic framework (CD-MOF) is a porous nanoporous crystal. In CD-MOF, advanced encapsulation methods were established to introduce water-soluble porphyrins into hydrophilic nanopores and fullerene C60 into the hydrophobic nanopores. Finally, oxidative polymerization of the thiophene compound in CD-MOF was carried out. It was revealed that oligomers of 5 or less were formed without further progress of polymerization.

研究分野：反応工学

キーワード：機能性材料 多孔質材料 結晶材料 両親媒性 ナノ孔 固体蛍光物質 ナノリアクター オリゴマー

1. 研究開始当初の背景

1985年、Krotoらによる黒鉛のレーザー蒸発の実験において、C₆₀が発見された。ダイヤモンドと黒鉛に加わったこの新しい炭素同素体のC₆₀は、20個の6員環と12個の5員環から成り、サッカーボール状の形を持つ。C₆₀のように炭素原子のみから成る閉じたカゴ型の形状を持つ分子は、フラレンと呼ばれ、C₆₀の他にも、高次フラレンとしてC₇₀、C₈₂、C₈₄などの多種類の分子が知られている。フラレンは半導体、磁性体、超伝導体、太陽電池などの新規材料、その抗酸化能を活かした医薬品、化粧品などへの応用が盛んに研究されている。フラレンの大量合成法の発達により混合フラレンの価格は低下したが、高純度のフラレンは依然高価格であり、各フラレンの高純度分離精製法が飛躍的に進歩すれば、フラレンの産業利用につながる。加えてフラレンは多くの溶媒に対して難溶であることがフラレンの活用を妨げる一因となっている。フラレンを溶媒として溶かす方法として官能基の付加が行われているが、このことでフラレン特有の電子的性質を損なうことも考えられる。フラレンの分離法として液体クロマト法は一般的な分離法であるが、フラレンをトルエンなどの溶離液に溶解して注入する不連続操作では大量分離に向かない。一般に使用される溶媒であるトルエンはC₆₀の溶解度が小さく、抽出法では溶媒1L当たりの回収できる量は溶解度で制限され、わずか2-3gであり、高純度分離は困難である。したがって、分離精製を行う場合にも溶解性が重要な因子となる。C₆₀の1分子が β -CDの2分子によって包接したバイキャップ型錯体は水を含めた極性溶媒への溶解性が大きくなることから注目され研究が進められている。このように研究開始当初はフラレンの利用を目的として研究を進めて開始したところ、 β -CDとC₆₀の錯体溶液にKOHを加え、メタノールを蒸気拡散することで結晶化する技術で完成することができたので、これを利用してC₆₀/C₇₀混合粉末からの分離実験を行ったが、十分な分離性を得ることができず、そのためにC₆₀の結晶化に関する研究を継続し、結晶化したシクロデキストリン系金属有機構造体(CD-MOF)への機能性分子の導入と、その応用に関する研究を進めた。

2. 研究の目的

CD-MOFへの機能性分子の導入を目的として、水溶性分子については同時包接結晶化法について検討し、C₆₀などの不溶性の分子については、はじめに β -シクロデキストリン(β -CD)を用いて、包接錯体を生成し、水溶化した後に結晶化する方法について検討した。機能性分子としてフラレンC₆₀およびC₇₀、水溶性ポルフィリン、およびC₆₀と水溶性ポルフィリンの同時包接について研究した。さらに蛍光色素であるローダミンBとフルオレセインとの同時導入を行い、機能性分子/CD-MOF複合体の蛍光挙動について調査した。また、発展研究として、CD-MOF内のナノ孔を反応場とすることで、ナノリアクターとしての展開を目的として、CD-MOF内に導電性高分子のモノマーであるEDOTを導入した後、その重合挙動について明らかにした。

3. 研究の方法

(1) CD-MOF内への機能性分子の導入

CD-MOFは β -シクロデキストリン(β -CD)とKOHを溶解した水溶液中にメタノールの蒸気拡散を行うことで結晶化を行った。CD-MOF結晶は、1対の β -CDが樽状の構造をとり、その内部空間は疎水性であり、約1nmの空間が存在する。結晶化と共に6個の β -CDが集積して、新たに径1.7nmのナノ孔が生成する。このナノ孔の内部は β -CDの6位のOH基が存在するために親水性ナノ孔となる。水溶性の機能性分子は、CD-MOFの原料水溶液に水溶性の機能性分子を溶解させた状態で蒸気拡散法により結晶化させると、水溶性分子は親水性ナノ孔に孤立して存在する。一方、C₆₀は水に溶けないので、始めに2分子の β -CDと錯体を形成させることで、樽状内部にC₆₀が包接できる。この包接錯体を原料として蒸気拡散法で結晶化させることで、疎水性ナノ孔にC₆₀が充填した複合結晶となる。

(2) 蛍光分子/CD-MOFの蛍光特性

蛍光分子を導入したCD-MOF(蛍光分子/CD-MOF)の蛍光特性の測定には分光蛍光光度計を用いた。本研究では色素分子としてローダミンBとフルオレセインを同時にCD-MOF内に導入することに成功した。この2分子はドナー分子とアクセプター分子として振る舞い、ドナー分子の吸収スペクトルとアクセプター分子の蛍光スペクトルが重なり合う関係にあり、しかも両分子が近接した場合にエネルギー移動が起こり、ドナー分子の蛍光エネルギーが低下し、アクセプター分子が蛍光を発する現象(蛍光共鳴エネルギー移動、FRET)が起こることが知られている。本研究ではローダミンBとフルオレセインを同時に導入したCD-MOFのFRET現象について調査した。

(3) CD-MOF内の重合

強塩基性条件で合成したCD-MOF結晶は残留する塩基によって酸化剤である塩化鉄(III)が水酸化物となるために、新規に中性条件でのCD-MOF結晶化法を開発した。このCD-MOFに導電性高分子のモノマーである3,4-エチレンジオキシチオフェン(EDOT)を含浸し、乾燥させて

EDOT/CD-MOF を得た。次に EDOT/CD-MOF を塩化鉄(III)のアセトニトリル溶液に添加することで重合を開始した。

4. 研究成果

(1) CD-MOF 内へのフラーレン C60 の導入

水溶性ポルフィリン(TCPP)は γ -CD と KOH の原料水溶液中に溶解させることで、図 1 に示す様に TCPP が CD-MOF 内の親水性ナノ孔に導入できることがわかった。元素分析の結果から、TCPP の導入量は親水性ナノ孔当たり 2.13 個であった。一方、C60 については、機械的粉碎法と超音波法を組み合わせることで C60/ γ -CD 包接錯体溶液を調製し、結晶化させることができたが、C60 の導入量は疎水性ナノ孔当たり約 0.1 個であり、電子物性を発現するためにはさらなる導入量の増大が必要であることがわかった。

C60 及び TCPP を導入した C60/CD-MOF および TCPP/CD-MOF について BET 比表面積を測定した結果、BET 比表面積は CD-MOF (970.3 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) に比べて、C60/CD-MOF では導入量が小さいので 950.3 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ と少し低下したに過ぎなかった。一方、TCPP/CD-MOF はすべての親水性ナノ孔に 2 分子の TCPP が導入されているにも関わらず、718.5 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ であった。

図 2 に示す様に、C60/TCPP では波長 470 nm の励起光を照射すると、緑色の発光を観察できた。一方、TCPP 粉体は濃度消光のために発光しないが、TCPP/CD-MOF では、TCPP が孤立して存在するために強いオレンジ色の発光が観察できた。最後に C60 と TCPP を同時に CD-MOF 内に導入することに成功したが、この C60/TCPP/CD-MOF の発光は、TCPP の励起状態から C60 への電子注入が起こるために、消光が起こるために発光強度が大きく減少した。

本研究では親水性分子と疎水性分子を同時に CD-MOF 内に導入する方法を確立したが、C60 の導入率が低いので、この状態では電子デバイスへの応用は困難であり、高純度 C60/ γ -CD 錯体を作成して CD-MOF への導入を行う予定である。

(2) 蛍光分子/CD-MOF の蛍光特性

メタノール蒸気拡散法により蛍光分子であるフルオレセイン(Flu)あるいはローダミン B(RhB)を導入した CD-MOF を合成することができた。Flu および RhB は分子サイズが大きいので CD-MOF 形成後にナノ孔内を拡散することができないことから、 γ -CD と蛍光分子間の相互作用により分子対を形成した状態で結晶化するので、CD-MOF 内の蛍光分子濃度は溶液中の原料濃度比べて高く、蛍光分子が濃縮して結晶化することがわかった。これらの蛍光分子は CD-MOF のナノ孔内に孤立して存在するので強い発光を示した。図 3 に示す様に濃度消光により Flu あるいは RhB を導入した CD-MOF の蛍光強度は CD-MOF 内の蛍光分子濃度の増加と共に減少した。

励起波長 494 nm において、RhB (アクセプター色素) を Flu (ドナー色素) と共存させた Flu-RhB/CD-MOF の最大蛍光波長 523nm における蛍光強度は、Flu を含む Flu/CD-MOF の蛍光強度に比べて大きく減少した。一方、最大蛍光波長 585 nm における RhB/CD-MOF の蛍光強度に比べ

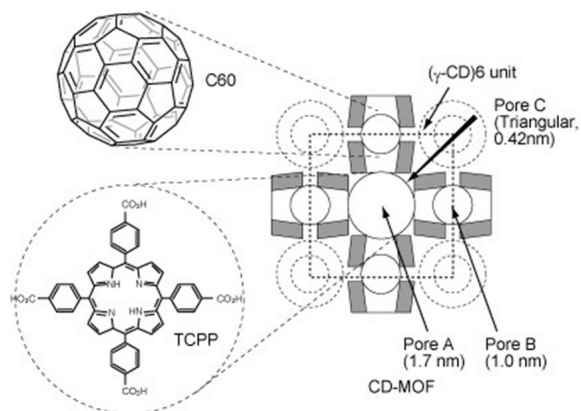


図 1 CD-MOF の細孔構造

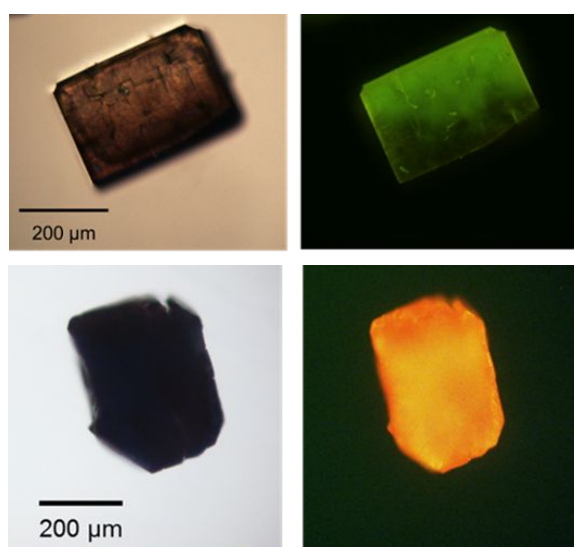


図 2 C60/CD-MOF(上図)および TCPP/CD-MOF (下図)の蛍光顕微鏡像(左側は光学像)

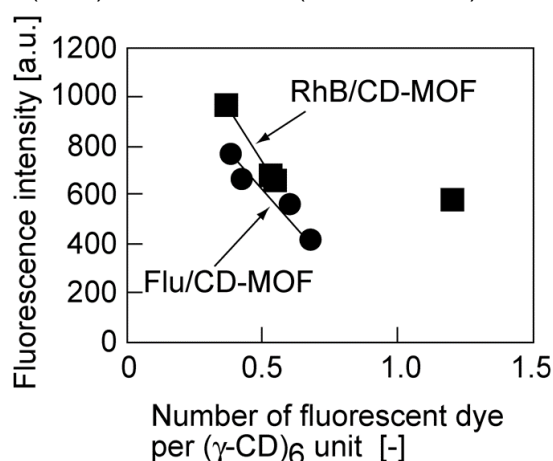


図 3 $(\gamma\text{-CD})_6$ ユニット中の蛍光分子の分子数と蛍光強度との関係

て、Flu-RhB/CD-MOF 発光強度が増加した。2つの蛍光分子が近接している場合に励起された蛍光分子が蛍光を発する替りに2つめの蛍光分子にエネルギーを渡し、エネルギーを受け取った方の分子から蛍光が発せられることがあり、これを蛍光共鳴エネルギー移動(FRET)と呼ぶ。FRETは2つの蛍光分子間の距離が近いほど起こりやすく、10 nm以下まで近接するとFRETが可能である。以上の結果からCD-MOF内のFluからRhBにFRETが起こっていると考えられる。従ってこれらの蛍光分子は高分散しているが、分子同士はナノオーダーで近接して存在することがわかった。

(3) CD-MOF 内の重合

CD-MOF内の親水性ナノ孔に吸着法によって導電性高分子のモノマーとして使用される3,4-エチレンジオキシチオフェン(EDOT)を吸着法によって導入した。本研究ではFe(III)の酸化的重合を利用するために、強塩基性条件(pH>12.5)で合成されるCD-MOF結晶では結晶内で鉄の水酸化物の生成が予測されるので、ギ酸アンモニウムを用いた新規結晶化法で合成したCD-MOFを使用した。このEDOT/CD-MOFをDMSOで溶解させ、溶液中のEDOT濃度を紫外可視分光により測定した結果、親水性ナノ孔に平均して6.4個のEDOT分子が存在することがわかった。このEDOT/CD-MOFのX線回折を行った結果、導入したEDOTの硫黄原子による散乱が影響して、CD-MOF結晶ピークが小さくなった。EDOT/CD-MOFをFe(III)を用いて酸化的重合反応を行った。重合で生成したPEDOT/CD-MOFを硝酸溶液で完全に溶解させた後、ICP-AESを用いて硫黄原子濃度を測定した結果、90%の反応率で重合が進行することがわかった。このPEDOT/CD-MOFについて窒素の吸着等温線を測定したところ図4に示す様に、BET比表面積が657 m²·g⁻¹から、12.9 m²·g⁻¹と大きく減少した。

次に重合後のPEDOT/CD-MOFの質量をMALDI-TOF-MSを用いて測定したところ、5量体のEDOTオリゴマーを確認した。このことから図5に示す様にCD-MOFは疎水性ナノ孔を挟んで親水ナノ孔が存在する両親媒性多孔質結晶であるために、親水性ナノ孔内に存在するEDOT分子でのみ重合し、高分子化が抑制できることを明らかにした。

本研究により結晶性が高く、欠陥の少ないCD-MOFは単分散オリゴマー合成のためのナノリアクターとして機能することが明らかになった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

- (1) T.K. Yan, A. Nagai, W. Michida, K. Kusakabe, S. Yusup, Crystal Growth of Cyclodextrin-based Metal-organic Framework for Carbon Dioxide Capture and Separation, *Procedia Engineering*, 査読有, 148 (2016) 30-34, DOI:10.1016/j.proeng.2016.06.480.
- (2) A. Nagai, W. Michida, M. Sakuragi, M. Nishida, G. Guan, K. Kusakabe, Adsorption behavior of aromatic carboxylic acids on a cyclodextrin-based metal-organic framework, *International Journal of Biomass & Renewables*, 査読有, 1 (2018) 17-23, <https://ijbr.utp.edu.my/>.
- (3) 道田 航, 永井杏奈, 酒村知至, 櫻木美菜, 水城圭司, 草壁克己, シクロデキストリン系金属有機構造体中のフルオレセインとローダミン B の蛍光特性, *化学工学論文集*, 44 (2018) 161-165, DOI:10.1252/kakoronbunshu.44.161.
- (4) W. Michida, A. Nagai, M. Sakuragi, K. Kusakabe, Discrete Polymerization of 3,4-Ethylenedioxythiophene in Cyclodextrin-Based Metal-Organic Framework, *Crystal*

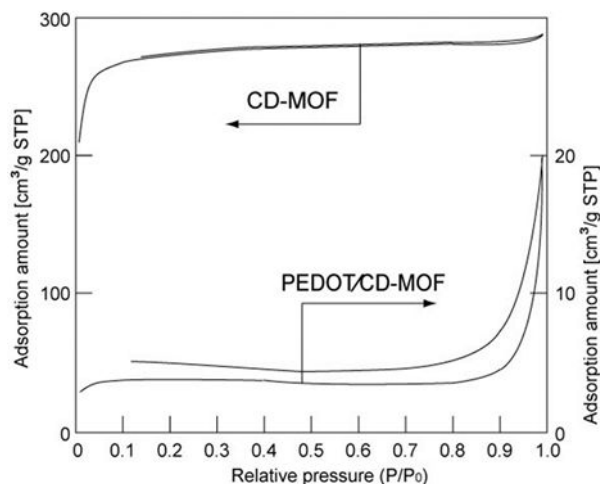


図4 PEDOT/CD-MOFの吸着等温線

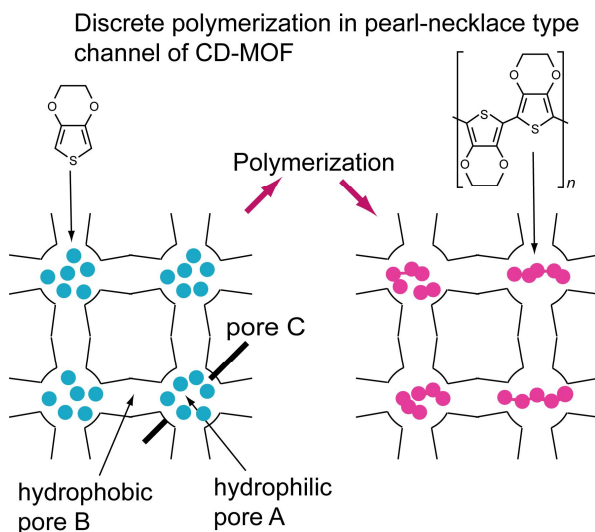


図5 CD-MOF内でのEDOTの重合

Research & Technology, 53 (2018) 1700412/1-4, DOI:10.1002/crat.201700142.

- (5) A. Nagai, S. Tsutsumi, W. Michida, M. Sakuragi, K. Mizuki, K. Kusakabe, Encapsulation of Isolated C60 Molecules in Cyclodextrin-based Metal-Organic Framework, Journal of Chemical Engineering Japan, 51 (2018) 615-619, DOI:10.1252/jcej.17we333.

〔学会発表〕(計35件)

- (1) 永井杏奈、道田 航、櫻木美菜、草壁克己, -シクロデキストリンと共役電子系分子で合成したナノ孔結晶, 第51回化学関連支部合同九州大会, 北九州国際会議場(北九州), 2016.6.28
- (2) 永井杏奈、草壁克己, 共役電子系分子で合成したナノ孔結晶, 第27回化学工学会九州支部若手エンジニアリング討論会, 休暇村志賀島(福岡市) 2016.7.22
- (3) T.K. Yan, A. Nagai, W. Michida, K. Kusakabe, S. Yusup, Crystal growth of cyclodextrin-based metal-organic framework for carbon dioxide capture and separation, International Conference of Process Engineering and Advanced Materials, Kuala Lumpur (Malaysia), 2016.8.16
- (4) K. Kusakabe, T. Sakemura, W. Michida, M. Sakuragi, Fluorescence characteristics of fluorescein and rhodamine B in cyclodextrin-based metal-organic framework, 6th SOJO-UTP Joint Seminar on Nano and Bio Research, Perah (Malaysia), 2016.8.19
- (5) A. Nagai, W. Michida, M. Sakuragi, K. Kusakabe, Inclusion of conjugated molecules in cyclodextrin-based nanoporous crystal, 6th SOJO-UTP Joint Seminar on Nano and Bio Research, Perah (Malaysia), 2016.8.19
- (6) 永井杏奈、道田 航、櫻木美菜、草壁克己, シクロデキストリン系 MOF へのフラーレンとポルフィリンの固定化, 化学工学会第48回 秋季大会, 徳島大学(徳島市), 2016.9.7
- (7) 道田 航、酒村知至、永井杏奈、櫻木美菜、草壁克己, 蛍光分子を包接したシクロデキストリン系 MOF の合成, 化学工学会第48回 秋季大会, 徳島大学(徳島市), 2016.9.7
- (8) W. Michida, A. Nagai, M. Sakuragi, K. Kusakabe, Polymerization of 3,4-ethylenedioxythiophene in CD-MOF, 29th International Symposium on Chemical Engineering, フェニックス・シーガイア(宮崎市)2016.12.3
- (9) A. Nagai, W. Michida, M. Sakuragi, K. Kusakabe, Synthesis and Characterization of double-doped CD-MOF, 29th International Symposium on Chemical Engineering, フェニックス・シーガイア(宮崎市)2016.12.3
- (10) S. Tsutsumi, A. Nagai, W. Michida, M. Sakuragi, K. Kusakabe, Crystallization of fullerene-doped CD-MOF, 29th International Symposium on Chemical Engineering, フェニックス・シーガイア(宮崎市)2016.12.3
- (11) K. Nagao, T. Sakemura, A. Nagai, W. Michida, M. Sakuragi, K. Kusakabe, Fluorescent emission from dye-doped CD-MOF at solid state, 29th International Symposium on Chemical Engineering, フェニックス・シーガイア(宮崎市)2016.12.3
- (12) W. Michida, A. Nagai, M. Sakuragi, K. Kusakabe, Polymerization of 3,4-ethylenedioxythiophene in CD-MOF, 253rd ACS National Meeting & Exposition, San Francisco (USA) 2017.4.3
- (13) 堤 信介、永井杏奈、道田 航、櫻木美菜、草壁克己, 深共晶溶媒中でのゾルゲル法によるメソポーラスチタニアの調製, 第52回化学関連支部合同九州大会, 北九州国際会議場(北九州), 2017.7.1
- (14) 長尾啓史、永井杏奈、道田 航、櫻木美菜、草壁克己, 蒸気拡散法による -CD/KOH/H₃BO₄ 水溶液からの結晶析出, 第52回化学関連支部合同九州大会, 北九州国際会議場(北九州), 2017.7.1
- (15) 道田 航、草壁克己, シクロデキストリン系金属有機構造体を鋳型とした金ナノ粒子への選択的修飾, 第28回化学工学会九州支部若手エンジニアリング討論会, ホテル湯の見 海と夕やけ(水俣市)2017.7.14
- (16) 長尾啓史、道田 航、草壁克己, CD-MOF 内の規則的なナノ構造を利用した terthiophene と EDOT の重合, 第28回化学工学会九州支部若手エンジニアリング討論会, ホテル湯の見 海と夕やけ(水俣市)2017.7.14
- (17) W. Michida, A. Nagai, M. Sakuragi, K. Kusakabe, Polymerization of 3,4-Ethylenedioxythiophene in Cyclodextrin-based Metal-Organic Framework, Asian Pacific Conference on Chemical Engineering 2017, Hong Kong (China) 2017.8.24
- (18) K. Nagao, A. Nagai, W. Michida, M. Sakuragi, K. Kusakabe, Crystallization of a-CD/KOH/H₃BO₃ solution by vapor diffusion method, 7th SOJO-UTP Joint Seminar on Nano and Bio Research, 崇城大学(熊本市), 2017.8.24
- (19) 道田 航、永井杏奈、櫻木美菜、草壁克己, シクロデキストリン系金属有機構造体中での3,4-エチレンジオキシチオフェンの重合, 化学工学会第49回 秋季大会, 名古屋大学(名古屋市) 2017.9.21
- (20) K. Kusakabe, W. Michida, A. Nagai, M. Sakuragi, Encapsulation of large molecules in cyclodextrin-based metal-organic framework, 2017Korea/Japan/Taiwan Chem. Eng.

Conf. Pusan (Korea) 2017.11.13

- (21) A. Nagai, K. Nagao, W. Michida, M. Sakuragi, K. Kusakabe, Recrystallization behavior of CD-MOF in methanol, 29th International Symposium on Chemical Engineering, Daejeon (Korea) 2017.12.2
- (22) 千本皓祐, 永井杏奈, 道田航, 櫻木美菜, 草壁克己, 多孔質結晶のナノ孔内でのパラジウムの合成とその複合触媒を用いたスズキカップリング反応, 第 55 回化学関連支部合同九州大会, 北九州国際会議場(北九州), 2018.6.30
- (23) 永井杏奈, 道田航, 櫻木美菜, 草壁克己, 共役電子系分子で合成したナノ孔結晶, 第 29 回化学工学会九州支部若手エンジニアリング討論会, 阿蘇プラザホテル(阿蘇市)2018.7.14
- (24) 長尾啓史, 道田航, 櫻木美菜, 草壁克己, CD-MOF 内での導電性ポリマーの合成, 第 29 回化学工学会九州支部若手エンジニアリング討論会, 阿蘇プラザホテル(阿蘇市)2018.7.14
- (25) 千本皓祐, 道田航, 櫻木美菜, 草壁克己, Pd ナノクラスター/CD-MOF によるスズキカップリング反応, 第 29 回化学工学会九州支部若手エンジニアリング討論会, 阿蘇プラザホテル(阿蘇市)2018.7.14
- (26) K. Kusakabe, New Porous Materials for Nano-chemical Engineering, 8th SOJO-UTP Joint Seminar on Nano and Bio Research, Perah (Malaysia), 2018.8.16
- (27) 草壁克己, 道田航, 永井杏奈, 櫻木美菜, ナノリアクターとしての有機ナノ孔結晶, 化学工学会第 50 回 秋季大会, 鹿児島大学(鹿児島市) 2018.9.19
- (28) 道田航, 永井杏奈, 櫻木美菜, 草壁克己, 金システイン錯体を導入した CD-MOF の蛍光特性, 化学工学会第 50 回 秋季大会, 鹿児島大学(鹿児島市) 2018.9.19
- (29) 永井杏奈, 道田航, 櫻木美菜, 草壁克己, 機能性分子を導入した CD-MOF を用いた有機反応の特性, 化学工学会第 50 回 秋季大会, 鹿児島大学(鹿児島市) 2018.9.19
- (30) 長尾啓史, 道田航, 櫻木美菜, 草壁克己, CD-MOF 内での導電性ポリマーの合成, 化学工学会第 50 回 秋季大会, 鹿児島大学(鹿児島市) 2018.9.19
- (31) 千本皓祐, 道田航, 櫻木美菜, 草壁克己, Pd ナノクラスター/CD-MOF によるスズキカップリング反応, 化学工学会第 50 回 秋季大会, 鹿児島大学(鹿児島市) 2018.9.19
- (32) K. Kusakabe, The flow reactor finally stopped flowing, KICHe 2018 Autumn Meeting, Daegu (Korea) 2018.10.25
- (33) K. Nagao, W. Michida, M. Sakuragi, K. Kusakabe, Polymerization of thiophene compounds in nanochannel of CD-MOF, 31st International Symposium on Chemical Engineering, Chiang Mai (Thailand), 2018.12.1
- (34) A. Nagai, W. Michida, M. Sakuragi, K. Kusakabe, Reduction of nitrobenzene over Ni/C60@CD-MOF composite catalyst, 31st International Symposium on Chemical Engineering, Chiang Mai (Thailand), 2018.12.1
- (35) W. Michida, A. Nagai, M. Sakuragi, K. Kusakabe, Synthesis of Au nanocluster in CD-MOF for detecting aromatic nitro compounds, 31st International Symposium on Chemical Engineering, Chiang Mai (Thailand), 2018.12.1

[その他]

ホームページ等 <https://sites.google.com/site/katsukikusakabelab/home>

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：櫻木美菜

ローマ字氏名：SAKURAGI Mina

所属研究機関名：崇城大学

部局名：工学部

職名：准教授

研究者番号 (8 桁) : 90646829