

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26288062

研究課題名(和文) 分子認識に基づいた革新的超分子アクチュエータの創製とそのストレス特性の評価

研究課題名(英文) Creation of innovative supramolecular actuators via molecular recognitions and its evaluation of mechanical stress properties

研究代表者

高島 義徳 (Takashima, Yoshinori)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：40379277

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は分子認識と高分子を基盤学問として、新たな刺激応答性材料の構築を試みた。研究代表者は筋肉の様に刺激に応じて、高分子とホスト-ゲスト相互作用を用いて芯づく機能を実現した。具体的には、高速応答性を示す超分子アクチュエータの作製、高靱性超分子材料の作製、靱性と刺激応答性を兼ね備えた超分子アクチュエータの作製を行った。いずれの目標についても、可動性の架橋と可逆的な結合に基づいた架橋をキーワードに超分子材料を構築した。これら特有の架橋構築は高分子材料に多彩な機能を付与した。特に光刺激応答性アクチュエータについて、新たな分子設計に基づいた光応答性と高靱性を兼ね備えた材料構築に成功した。

研究成果の概要(英文)：The research project focused on a construction of innovative stimuli-responsive supramolecular materials based on molecular recognition chemistry and polymer science. This project reader created stimuli-responsive polymeric materials with construction-expansion via host-guest interactions. The polymeric materials remind us the movement of smooth muscle fiber. The project reader investigated (1) creation of supramolecular actuator with effective responsiveness, (2) creation of highly-tough supramolecular materials, and (3) supramolecular actuator with tough and stimuli-responsiveness. To realize each supramolecular materials, a movable cross-linking and a reversible cross-linking were important keyword to achieve innovative functions. Especially, based on new molecular design, a photo-stimuli-responsive supramolecular actuator constructed in this project demonstrated effective photo-responsiveness and toughness.

研究分野：高分子科学

キーワード：高分子材料 超分子材料 刺激応答性 分子認識 力学特性 アクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

生体系においては様々な分子が非共有結合を通して、緻密な組織体を構築している。特に生体物質は軟組織体(ヒドロゲル)であるにも関わらず、特異的な分子間相互作用によって規則的な構造を形成し、筋繊維に代表されるようなマクロスケールの運動機能を発現している。特に**分子認識はこれら組織体を形成する上で重要な構成要素**である。生体系に見られるような**高機能マテリアルの構築に分子認識の科学を取り入れて研究を行うことは学術的にも興味深い**。一方、21世紀に入ってからヒドロゲルに関する研究はますます活発に展開され、刺激応答性、分離機能性、医用材料、細胞培養、人工関節など様々な再生医療応用へ展開で熾烈な競争となっている。一方、積極的に分子認識を取り入れた刺激応答性ゲルは宮田先生らによって精力的に行われ(*Nature*, 1999)、最近ではLeiblerらによって高分子側鎖の水素結合能を利用したゴム状の自己修復性超分子集合体(*Nature*, 2008)への展開も報告されている。一方で、**これまで超分子化学は分子認識の現象をスペクトロスコピックな解析により理解が深まったが、実際のマクロレベルで分子認識を利用したマテリアルの作製は非常に難易度が高かった**。

近年、Stoddartらは、ロタキサンの軸に、輪と相互作用する部位を複数個導入したロタキサンを合成した。Sauvageらは環状ホスト分子と軸分子との間に金属-配位子相互作用を介して機械的な結合を形成させた[c2]Daisy chainを合成した。さらに金属イオンを組み替えることによって配位状態を変化させることにより[c2]Daisy chainを伸縮させ、これを分子筋肉と名付けた。Stoddartらはクラウンエーテルを輪として含む[c2]Daisy chainを合成している。CDを輪に持つ[c2]Daisy chainも報告されている。

2. 研究の目的

本応募課題にて作製する**超分子マテリアルの中心的な特徴である可逆的なホストゲスト相互作用を巧みに利用**する。

形態制御には光制御と酸化還元制御を選択する。さらに材料に応力を掛けた場合に、**包接錯体の解離や組み換えが起こることにより、優れた靱性の材料作製を目的とした**。

3. 研究の方法

ストレスとして選択性・応答性が高い、光刺激や酸化還元刺激を用いた。これまでに開発した超分子アクチュエータから可能な限り応答速度の迅速化を図る。光応答性分子として、スチルベンやアゾベンゼンを使用する。これらのゲスト分子はこれまでの超分子錯体形成の経験から *cis-trans* 光異性化に応じて、シクロデキストリン(CD)との会合解離が明確に進行することを確認した。また酸化還元応答性ゲスト分子としてフェロセンの使用においても低分子モデル実験にてフェロセ

ンが酸化還元に応じて、CDとの会合解離が明確に進行することが知られている。これらのゲストポリマーを合成した後、CDホストポリマーと混合し、超分子ヒドロゲル形成を確認した。

4. 研究成果

4-1. CD-アゾベンゼン修飾ポリマーゲルを用いた光刺激応答性超分子アクチュエータ

α CDおよびアゾベンゼン(Azo)を側鎖に修飾したポリマーからなる光刺激応答性超分子ヒドロゲルの形成を利用して、光刺激応答性超分子アクチュエータの作製を試みた。包接錯体の形成と解離を外部刺激により制御することで、高分子鎖同士が化学架橋されていない場合には、刺激に反応してゲル状態とゾル状態を可逆的にスイッチングできる。このゾル状態では相互作用部位は解離し、個々のポリマーはいわば無限遠に離れた状態となる。研究代表者らは、もし高分子同士を化学的に架橋した場合、高分子同士は有限の大きさまでしか広がらず、ゾル化ではなく架橋点数の減少に伴う膨潤として応答が現れると考えた。今回の研究課題では、さらに応答性が向上する分子設計を施した。

4-2. 光刺激応答性超分子アクチュエータの合成。

ホストモノマーとして α CDアクリルアミド、ゲストモノマーとしてアゾベンゼンアクリルアミド、化学架橋剤にはメチレンビスアクリルアミド、また主鎖成分モノマーとしてアクリルアミドを用いた。ラジカル重合開始剤として、アゾビスイソブチロニトリル(AIBN)を用い、熱開始ラジカル重合を行った。一方でさらに応答速度を高めるために、ゲル内部にポーラス構造の導入を行った。**Oleyl Alcohol**をオイル層として加え、エマルジョン重合を行うことで、ポーラス構造を導入した。いずれのゲルも化学架橋剤の仕込み mol%は 2mol%に統一し、DMSOにて洗浄後、さらに水にて洗浄を行うことでヒドロゲルとして、 α CD-Azo gelの光刺激応答性を評価した。

4-3. マクロポーラスを導入した超分子アクチュエータの光応答性。

先の α CD-Azo gelの光刺激応答性はゲルの膨潤収縮によって生み出されており、如何に効率よく、ゲルの吸水と離水を機能させるか膨潤収縮率の向上と応答性の改善に繋がると考えた。そこでゲルの作成方法をこれまでの均一溶媒系から水層とオイル層からなるエマルジョン系にて重合を行い、ゲル内部にマクロポーラスを導入することで膨潤収縮機能の向上を試みた。

作成方法はこれまでのアクリルアミド骨格に対して、さらにアクリル酸成分を組み込み、マクロポーラス構造を構築した後、アミノアゾベンゼンテトラエチレングリコールを縮合反応にて導入することにより、光刺激応答性マクロポーラスゲルを作製した。

その結果、従来の均一系から構築した α CD-Azo gel よりもマクロポーラス構造を導入することで、応答速度も変化率も向上することが明らかと成った。

4-4. 挿し違い二量体構造を架橋点として有するポリマーゲルを用いた光刺激応答性超分子アクチュエータ

前項の架橋密度の変化を駆動力とするアクチュエータに対して、ポリマー鎖が機械的に伸縮することで駆動するアクチュエータの作製も検討した。まず、我々は [c2]Daisy Chain をモノマー単位とするポリマーを合成することにした。しかし、[c2]Daisy chain の両端をアミンにして、この分子とジカルボン酸との界面重合を試みたが、自立性のポリマーを得られなかった。そこで、[c2]Daisy chain を架橋部位に持つポリマー、すなわち架橋ポリマーを合成した。この [c2]Daisy chain での架橋では、ポリマー鎖同士は共有結合で結合しているわけではなく、機械的な絡み合いで結合している。実際に、[c2]Daisy chain 構造を用いて、ポリマー鎖を架橋することにより、ヒドロゲルの作製を試みた。主査ポリマーとしてポリエチレングリコール (PEG) を用いることにした。中でも 4 本鎖の PEG は [c2]Daisy chain の CD ユニットスライドするレールのような役割を果たし分子の動きを有効に伝えることができると考えた。また、PEG は各種ポリマーの中でも比較的ガラス転移点が高いことから、ヒドロゲルだけではなくバルクでのポリマー材料としても伸縮性を示すのではないかと考えた。そこで機械的架橋されたポリマーを合成し、水中で紫外光 ($\lambda = 365 \text{ nm}$) を照射したところ、ゲルは収縮した。

収縮したゲルに ($\lambda = 430 \text{ nm}$) を照射すると、ゲルは膨潤し、もとの大きさに戻った。この挙動は、前項の架橋密度の増減が駆動力となっているゲルアクチュエータとは対照的な挙動である。その理由として、[c2]Daisy chain により架橋されたヒドロゲルは、[c2]Daisy chain がスライドすることによってポリマー鎖の長さ自体が変化しているためであると考えられ、新しい駆動原理のアクチュエータとして機能することが示唆された。[c2]Daisy chain により架橋されたゲルの伸縮挙動はヒドロゲル状態だけではなく、乾燥したキセロゲル状態でも観察された。架橋密度変化を利用したゲルアクチュエータは溶媒の出入りが必要なため、乾燥状態では応答しないが、[c2]Daisy chain で架橋されたキセロゲルは溶媒の出入りがほとんど影響しないため、空気中でも伸縮挙動を示した。

4-5. フェロセンを利用した可逆的結合からなる架橋点として有する酸化還元応答性超分子アクチュエータ

本研究では、複数の機能を兼ね備えた材料を構築することを目的に、2 種類のホスト-ゲスト相互作用部位をもつ高分子を設計し、多機能性超分子ヒドロゲルの作製を行った。

ホスト分子としては β -シクロデキストリン (β CD)、ゲスト分子としてはフェロセン (Fc) とアダマンタン (Ad) を選択した。還元状態の Fc は β CD と包接錯体を形成する一方、Fc を酸化してフェロセニウムカチオン (Fc^+) とすると β CD に包接されなくなる。Ad は β CD と高い会合定数を持ち、包接錯体を形成しやすい。これらの分子からなる包接錯体を超分子的な架橋部位として用い、それを介した材料形成と機能評価を行った。

アクリルアミド (AAm)、 β CD を修飾したホストモノマー (AAm- β CD)、Fc を導入したゲストモノマー (AAm-Fc)、Ad を導入したゲストモノマー (AAm-Ad) を Water/DMSO = 95/5 (v/v) の混合溶媒中へ溶解させ、モノマー同士の包接錯体形成を行った後に、開始剤 2,2'-ビス(2-イミダゾリン-2-イル)[2,2'-アゾビスプロパン]2 塩酸塩(VA-044)を加え、ラジカル共重合させ、ヒドロゲル (β CD-Fc-Ad gel) を作製した。

β CD-Fc-Ad gel に競争剤(アダマンタンカルボン酸ナトリウム(AdCANa), α CD, β CD, γ CD) 水溶液浸漬したところいずれのゲルにおいても膨潤が観察された。また競争ホストを比較した場合、 β CD に対する突出した反応性が観測され、競争分子に対する選択性を確認した。これにより、ゲル化が各ポリマー側鎖間での包接錯体形成に起因することが示唆された。このヒドロゲルを半分に切断し再接触させ、2 時間静置後に持ち上げるとゲル同士の接着が認められた。同条件において切断面に会合体形成を阻害する競争分子を添加したところ、接着は認められなかった。このことから、切断した際には結合力の弱い包接錯体部位が解離し、再び接触させた際には切断面上の β CD とゲスト分子が会合体を再形成し、自己修復したと考えられる。

β CD と Fc の包接錯体形成が酸化還元に依存していることを利用し、Fc 部位の酸化状態を変化させることでゲルの膨潤収縮制御を試みた。 β CD-Fc-Ad gel について、25 mM 酸化剤(硝酸セリウム(IV)アンモニウム) 水溶液への浸漬による酸化時にはゲルの約 6% の膨潤が観測された。その後、0.1 M Tris/HCl buffer(pH 7) 浸漬による還元時には約 2% の収縮が観測された (Figure 5(a)(b))。 β CD-Fc による超分子的な架橋密度の変化に伴いゲルが膨潤収縮したと考えられる (Figure 5(c))。以上のように、自己修復性と酸化還元応答性を兼ね備えた機能性超分子ヒドロゲルの作製に成功した。

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) "Supramolecular Polymeric Materials via Cyclodextrin-Guest Interactions." Harada, A.; Takashima, Y.; Nakahata, M. *Acc.*

- Chem. Res.*, **2014**, *47* (7), 2128–2140. (DOI: 10.1021/ar500109h)
- (2) “Redox-Responsive Macroscopic Gel Assembly Based on Discrete Dual Interactions.” Nakahata, M.; Takashima, Y.; Harada, A. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2014**, *53* (14), 3617-3621. (DOI: 10.1002/anie.201310295)
- (3) 刺激に応じて形態の変化する超分子ゲルアクチュエータ. 原田明・高島義徳・中畑雅樹・岩曾一恭・島中省伍. 精密工学会誌, 2014, 80 (8), 722.
- (4) “刺激応答性超分子材料の機能とその動向”. 高島義徳・中畑雅樹・関根智子・原田明. 塗装工学, 2015/VOL.50 NO.4, 120 (20).
- (5) “超分子構造に基づく自己修復”. 中畑雅樹・高島義徳・原田明. 日本画像学会誌 **2015**, 213-220. (DOI: 10.11370/isj.54.213)
- (6) “高分子側鎖におけるホスト-ゲスト相互作用を利用した酸化還元応答性超分子材料の創製”. 中畑雅樹・高島義徳・橋爪章仁・山口浩靖・原田明. 高分子論文集 **2015**, 72(10), 573-581. (DOI: 10.1295/koron.2015-0019)
- (7) “Adhesion between Semihard Polymer Materials Containing Cyclodextrin and Adamantane Based on Host-Guest Interactions”. Kakuta, T.; Takashima, Y.; Sano, T.; Nakamura, T.; Kobayashi, Y.; Yamaguchi, H.; Harada, A. *Macromolecules* **2015**, *48*(3), 732–738. (DOI: 10.1021/ma502316d)
- (8) “Macroscopic Self-assembly Based on Complementary Interaction between Nucleobase Pairs”. Nakahata, M.; Takashima, Y.; Hashidzume, A.; Harada, A. *Chem. Eur. J.* **2015**, *21*(7), 2770-2774. (DOI: 10.1002/chem.201404674)
- (9) “Self-healing, Expansion-Contraction, and Shape-Memory Properties of Preorganized Supramolecular Hydrogel through Host-Guest Interactions”. Miyamae, K.; Nakahata, M.; Takashima, Y.; Harada, A. *Angew. Chem. Int. Ed* **2015**, *54*, 8984-8987. (DOI: 10.1002/anie.201502957)
- (10) “Radical polymerization by supramolecular catalyst: cyclodextrin with a RAFT reagent” Koyanagi, K.; Takashima, Y.; Nakamura, T.; Yamaguchi, H.; Harada, A. *Beilstein J. Org. Chem.* **2016**, *12*, 2495-2502. (doi:10.3762/bjoc.12.244)
- (11) “Self-healing materials formed by cross-linked polyrotaxanes with reversible bonds”. Nakahata, M.; Mori, S.; Takashima, Y.; Yamaguchi, H.; Harada, A. *Chem.* **2016**, *1*, 766-775. (doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.chempr.2016.09.013)
- (12) “Fast response dry-type artificial molecular muscles with [c2]daisy chains”. Iwaso, K.; Takashima, Y.; Harada, A. *Nat. Chem.* **2016**, *8*, 625-632. (doi:10.1038/nchem.2513)
- (13) “Highly Flexible, Tough, and Self-Healing Supramolecular Polymeric Materials Using Host-Guest Interaction”. Nakahata, M.; Takashima, Y.; Harada, A. *Macromol. Rapid Commun.* **2016**, *37*, 86-92. (DOI: 10.1002/marc.201500473).
- (14) “Multifunctional Stimuli-Responsive Supramolecular Materials with Stretching, Coloring, and Self-Healing Properties Functionalized via Host-Guest Interactions”. Takashima, Y.; Yonekura, K.; Koyanagi, K.; Iwaso, K.; Nakahata, M.; Yamaguchi, H.; Harada, A. *Macromolecules*, **2017**, ASAP (DOI:10.1021/acs.macromol.7b00875)
- (15) “Supramolecular Materials Cross-Linked by Host-Guest Inclusion Complexes: The Effect of Side Chain Molecules on Mechanical Properties”. Takashima, Y.; Sawa, Y.; Iwaso, K.; Nakahata, M.; Yamaguchi, H.; Harada, A. *Macromolecules* **2017**, *50*(8), 3254-3261. (DOI:10.1021/acs.macromol.7b00266)
- (16) “Functioning via host-guest interactions”. Takashima, Y.; Harada, A. *J. Incl. Phenom. Macrocycl. Chem.* **2017**, *87*, 313-330. (DOI:10.1007/s10847-017-0702-z)
- (17) “光に応答する超分子マテリアル”. 原田明・高島義徳. 化学と工業 2017, 70, 333-335.
- (18) “Supramolecular Polymeric Materials Containing Cyclodextrins”. Nakahata, M.; Takashima, Y.; Harada, A. *Chem. Pharm. Bull.* **2017**, *65*(4), 330-335.(doi: 10.1248/cpb.c16-00778)
- [学会発表] (計 76 件)
- (1) Polymer Society Conference Korea 2014 [Apr. 9th - 11th, Daejeon Convention Center, Daejeon, Korea] 1L5-3. Yoshinori Takashima, "Stimuli Responsive Supramolecular Materials Formed from Host and Guest Polymers and Its Functions"
- (2) 1Pe103. 岩曾一恭・高島義徳・山口浩靖・原田明. [c2]ロタキサンドイマーを架橋部位とした光刺激応答性超分子ヒドロゲルの作製. 第 63 回高分子学会年次大会. [2014年5月28日(水)-30日(金), 名古屋国際会議場, 愛知県名古屋市]
- (3) 1Pe107. 島中省伍・高島義徳・原田明. ホスト-ゲスト相互作用に基づいた架橋を有する超分子材料の作成と評価. 第 63 回高分子学会年次大会. [2014年5月28日(水)-30日(金), 名古屋国際会議場, 愛知県名古屋市]
- (4) Yoshinori Takashima. "Supramolecular polymerization catalyst by CD derivatives in

- water". ICS17. [May 29th-31th, Saarland University, Saarbrücken, Germany]
- (5) PA59 Kazuhisa Iwaso, Yoshinori Takashima, Hiroyasu Yamaguchi, Akira Harada. "Preparation on Supramolecular [c2]Rotaxane Dimer Composed of Azobenzene and Cyclodextrin" ISMSC 2014 [June 7th - 11th, Shanghai Institute of Organic Chemistry, Shanghai, China]
- (6) Yoshinori Takashima. "Stimuli responsive and self-healing supramolecular materials through host and guest interactions" 5th Joint CSJ RSC Symposium on Supramolecular Chemistry. [July 1st, Chartered Accountants House, Dublin, Ireland]
- (7) D1-1. 岩曾一恭・高島義徳・山口浩靖・原田 明. c2 対称ロタキサン構造を有する超分子ヒドロゲルの作製と光刺激応答性評価. 第 60 回高分子研究発表会 [2014 年 7 月 24 日(木) -25 日(金), 兵庫県民会館, 兵庫県神戸市]
- (8) D1-2. 宮前宏平・中畑雅樹・角田貴洋・高島義徳・原田 明. 超分子錯体形成を利用した酸化還元応答性ヒドロゲルの合成と機能評価. 第 60 回高分子研究発表会 [2014 年 7 月 24 日(木) -25 日(金), 兵庫県民会館, 兵庫県神戸市]
- (9) Yoshinori TAKASHIMA "Stimuli Responsive Supramolecular Materials Formed from Host and Guest Polymers". IUMRS-ICA 2014 [Aug. 24th-30th, Fukuoka University, Fukuoka, Japan]
- (10) O-12 高島義徳・中畑雅樹・森 祥子・原田 明 分子認識を通じた選択的ゲル集積システムの構築とその刺激応答挙動. 31 回シクロデキストリンシンポジウム [2014 年 9 月 11 日(木) -12 日(金), 島根県民会館, 島根県松江市]
- (11) 2Q08 宮前 宏平・中畑雅樹・角田貴洋・高島義徳・原田 明 ホスト-ゲスト相互作用を利用した酸化還元応答性ヒドロゲルの作製と機能評価. 第 63 回高分子討論会 [2014 年 9 月 24 日(水)-26 日(金), 長崎大学文教キャンパス, 長崎県長崎市]
- (12) 2Q09 岩曾一恭・高島義徳・山口浩靖・原田 明 [c2]ロタキサンのスライド運動を利用した超分子ゲルアクチュエータの作製. 第 63 回高分子討論会 [2014 年 9 月 24 日(水) -26 日(金), 長崎大学文教キャンパス, 長崎県長崎市]
- (13) 1Pb050 岩曾一恭・高島義徳・山口浩靖・原田 明 ロタキサンをネットワーク構造に組み込んだ超分子ゲルアクチュエータの作製. 第 63 回高分子討論会 [2014 年 9 月 24 日(水) -26 日(金), 長崎大学文教キャンパス, 長崎県長崎市]
- (14) P8-076 岩曾一恭・高島義徳・原田 明 [c2]ロタキサンのスライドを利用した光刺激応答性超分子ヒドロゲルの作製. 第 4 回 CSJ 化学フェスタ 2014 [2014 年 10 月 14 日(火) -26 日(木), タワーホール船堀, 東京都江戸川区].
- (15) P22 高島義徳 非共有結合および共有結合を用いた材料間の直接接合. 第 15 回リング・チューブ超分子研究会シンポジウム [2014 年 10 月 27 日(月)-28 日(火), 東京工業大学 大岡山キャンパス, 東京都目黒区].
- (16) CT8a Yoshinori TAKASHIMA "Self-Healing Properties of Supramolecular Hydrogels Formed by Cyclodextrins and Hydrophobic Guest Groups" PN & G2014 (22nd Polymer Networks Group Meeting (PNG) and the 10th Gel Symposium) [Nov. 10th-14th, The University of Tokyo, Tokyo, Japan]
- (17) P26c Yoshinori TAKASHIMA "Photoresponsive Supramolecular Actuator Formed by Host - Guest Interactions" PN & G2014 (22nd Polymer Networks Group Meeting (PNG) and the 10th Gel Symposium) [Nov. 10th-14th, The University of Tokyo, Tokyo, Japan]
- (18) PST34c Kazuhisa Iwaso "Preparation of Supramolecular Hydrogel Composed of [c2]Rotaxane Dimer" PN & G2014 (22nd Polymer Networks Group Meeting (PNG) and the 10th Gel Symposium) [Nov. 10th-14th, The University of Tokyo, Tokyo, Japan]
- (19) PB-39 Kohei Miyamae, Masaki Nakahata, Takahiro Kakuta, Yoshinori Takashima, Akira Harada "Preparation and Function of Redox-responsive Hydrogel Using Host-guest Interaction" The 13th SANKEN Nanotechnology Symposium
- (20) 高島 義徳 "柔らかな分子認識を通じた界面認識システムと刺激応答性超分子材料の構築" 新学術領域研究「柔らかな分子系」第 7 回 ワークショップ [2014 年 12 月 12 日(金) -13 日(土), 自然科学研究機構 岡崎コンファレンスセンター, 愛知県岡崎市]
- (21) 高島 義徳 "ホスト-ゲスト相互作用を用いた刺激応答性超分子材料の創製". 第 17 回 生命化学研究会 [2015 年 1 月 8 日(木) -9 日(金), 三翠園, 高知県高知市]
- (22) 4B2- 13 岩曾一恭・高島義徳・原田明 "[c2]Daisy Chain の摂動を駆動力とする超分子ゲルアクチュエータの作製と機能評価". 日本化学会第 95 春季年会 [2015 年 3 月 26 日(木)-29 日(日), 日本大学理工学部 船橋キャンパス, 千葉県船橋市]
- (23) YS-04 Yoshinori Takashima "Stimuli Responsive Supramolecular Hydrogels Formed by Cyclodextrins and Hydrophobic Guest Groups and its functional properties" 8thACC/32thCDS [May 14th-16th

- Kumamoto Prefectural Community Center "PAREA", Kumamoto City, Japan]
- (24) 3C12 岩曾一恭・高島義徳・原田明 "[c2]Daisy Chain の滑走を利用した光刺激応答性ヒドロゲルの作製" 第 64 回高分子学会年次大会 [2015 年 5 月 27 日(水)-29 日(金), 札幌コンベンションセンター, 北海道札幌市]
- (25) PA-129 Kazuhisa Iwaso, Yoshinori Takashima, Akira Harada. "The macroscopic artificial muscle powered by the microscopic sliding motion of [c2]daisy chain" 10th ISMSC-2015 [June 28th - July 2nd, Palais des congrès, Strasbourg, France]
- (26) PB-70 Yoshinori Takashima, Akira Harada. "Supramolecular adhesion: direct bond formation between organic and inorganic materials" 10th ISMSC-2015 [June 28th - July 2nd, Palais des congrès, Strasbourg, France]
- (27) Pb-39 澤 友樹・岩曾一恭・高島義徳・原田明. [c2] Daisy Chain からなる光刺激応答性超分子アクチュエータの作製. 第 61 回高分子研究発表会 [2015 年 7 月 17 日(金), 兵庫県民会館, 兵庫県神戸市].
- (28) 2D12 岩曾一恭・高島義徳・原田明. [c2]daisy chain の滑走により駆動する超分子人工筋肉の作製. 第 64 回高分子討論会 [2015 年 9 月 15 日(火)-17 日(木), 東北大学 川内キャンパス, 宮城県仙台市].
- (29) 2D13 高島義徳・宮前宏平・中畑雅樹・原田明. ホスト-ゲスト相互作用を利用した刺激応答性超分子材料の作製と機能評価. 第 64 回高分子討論会 [2015 年 9 月 15 日(火)-17 日(木), 東北大学 川内キャンパス, 宮城県仙台市].
- (30) 2N04 高島義徳・関根智子・原田明. 分子認識および共有結合形成を通じた異種材料間の接着. 第 64 回高分子討論会 [2015 年 9 月 15 日(火)-17 日(木), 東北大学 川内キャンパス, 宮城県仙台市].
- (31) 3Pd028 澤 友樹・岩曾一恭・高島義徳・原田明. [c2]Daisy chain のスライド運動を利用した光刺激応答性超分子アクチュエータの作製. 第 64 回高分子討論会 [2015 年 9 月 15 日(火)-17 日(木), 東北大学 川内キャンパス, 宮城県仙台市].
- (32) MACR 559 Yoshinori Takashima, Akira Harada. "Stimuli responsive and self-healing supramolecular materials through host and guest interactions"
- (33) MACR 562 Kazuhisa Iwaso, Yoshinori Takashima, Akira Harada. "Macroscopic artificial muscle powered by the microscopic sliding motion of [c2]daisy chain"
- (34) MACR 1148 Yoshinori Takashima, Akira Harada. "Supramolecular adhesion: Direct bond formation between organic and

- inorganic materials"
- (35) es using covalent bond formation reactions"
- (36) O-13 Yoshinori Takashima, Akira Harada. "Photo stimuli responsive supramolecular actuators controlled by host-guest interactions" 11th International Gel Symposium [2017 年 3 月 7 日(火) - 9 日(木), 日本大学 津田沼キャンパス, 千葉県習志野市]
- (37) F-10 Shinji Ikejiri, Kazuhisa Iwaso, Yoshinori Takashima, Akira Harada, Hiroyasu Yamaguchi. "Polymeric actuator based on topological crosslink by rotaxane" 11th International Gel Symposium [2017 年 3 月 7 日(火) - 9 日(木), 日本大学 津田沼キャンパス, 千葉県習志野市]
- (38) IS6- 02 高島義徳. 超分子を用いた材料作製とマクロスケールでの空間制御による機能制御. 特別企画講演 日本化学会第 97 春季年会 [2017 年 3 月 16 日(木) - 19 日(日), 慶應義塾大学 日吉キャンパス, 神奈川県横浜市]
- (39) 1A3- 17 池尻伸治・高島義徳・原田明・山口浩靖. 分子鎖のスライドを駆動力とした光刺激応答性超分子ゲルアクチュエータの作製. 日本化学会第 97 春季年会 [2017 年 3 月 16 日(木) - 19 日(日), 慶應義塾大学 日吉キャンパス, 神奈川県横浜市]

[図書] (計 1 件)

- (1) 分子認識ゲル 原田明・高島義徳・中畑雅樹 ゲルテクノロジーハンドブック 中野義夫(東京工業大学) 監修, 第 7 章 第 2 節, 209, NTS 出版, 2014. ISBN 978-4-86469-074-4.

[その他]

ホームページ等 : <http://www.chem.sci.osaka-u.ac.jp/lab/yamaguchi/member/research-theme.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高島 義徳 (TAKASHIMA YOSHINORI)
大阪大学・大学院理学研究科・講師
研究者番号 : 40379277

(2) 連携研究者

原田 明 (HARADA AKIRA)
大阪大学・理学研究科・特任教授
研究者番号 : 80127282