

1. 氏名	高島 義徳
2. 所属機関	大阪大学 大学院理学研究科 高分子科学専攻
3. 研究題目	超分子特有の架橋とネットワーク構築による革新的高分子材料の創製
<p>4. 研究の目的:</p> <p>近年、資源やエネルギー、環境問題など、人類の存続に係る重大な問題が顕在化しており、高分子材料の耐久性・寿命の改善・環境負荷の低減などの重要な課題に直面している。このような課題の解決として、新たな高分子材料の設計が必要であり、従来型の共有結合のみの材料設計だけでなく、生体系に見られるような、非共有結合（可逆的な結合）を導入した材料設計が広く試行されている。シンプルに高分子を「ひも」と考え、架橋点はくっついたり離れたりする可逆的な架橋点、または架橋点が動くことができる可動性の架橋点と大きく分類した場合、これらを組み合わせることでもっと新しい架橋設計・ネットワーク設計はないのだろうか？、と考えた。正確に材料設計を突き詰めるには、各架橋点の緩和時間を分析し、複数を組み合わせることを計画し、複数の架橋点寿命を持った材料を生み出し、新たな機能創製に繋げることが、本研究課題の学術的なモチベーションにある。このような新しい高分子材料の架橋設計が非連続な革新を生み出し、引いては、社会的課題の一気に解決できると考える。</p> <p>架橋点の設計は高分子材料の機能創製のコアとなる。申請者は可逆的な架橋点を用いて、再結合による自己修復性材料を達成してきたが、さらなる機能向上には限界があり、新たな設計を必要としている。現在の可逆的な結合に加えて、可動性架橋の導入だけでなく、異なる高分子主鎖の導入、複数の相互作用点の導入など、超分子特有のクロスネットワークにより、新たな材料創製に挑戦する。</p> <p>可逆的架橋を用いた異種高分子の混合例は多数存在するが、相溶性の低い異種高分子鎖同士を超分子科学に基づいて、この高分子鎖間を可動性架橋にて繋ぐことができれば、分子レベルでの相溶化・混合が可能となり、ポリマーアロイ材料が構築できる。可逆性と可動性を組み合わせた異種高分子超分子クロスネットワーク材料は、応力・歪だけでなく自己修復機能も兼ね備えた材料が構築できる。本研究課題は単に実施されていなかった研究を展開するのではなく、得られた成果が人類を豊かにできるような新たなイノベーションができるように社会還元を目指して研究展開を行う。</p>	

<p>5. 研究の内容:</p> <p>本研究では、異種高分子間を可動性架橋によって結合する「超分子クロスネットワーク材料」の開発を行った。本材料は、環状多糖類であるシクロデキストリン(CD)で修飾された直鎖高分子の存在下において、異なる主鎖モノマーの重合を行うことで、異種高分子間に可動性架橋を形成することを目的としている。申請者らはこれまでに、エラストマー系材料において可逆性および可動性架橋材料の開発に成功しており(参考文献[1]-[3])、本研究はその成果をさらに発展させたものである。</p> <p>課題①:ヤング率の拡大に向けた分子設計の改良</p> <p>これまでの研究では、同種高分子間の材料を対象としていたが、さらなる力学特性(高靱性・破断応力)の向上には、異種高分子間での分子設計が求められた。高ガラス転移点(T_g)高分子と低 T_g 高分子との間に可動性架橋を形成することで、全体としての高ヤング率を維持しつつ、分子運動性の高い低 T_g ドメインにおいては応力分散が期待される。さらに、π-π 相互作用による可逆性架橋を導入することで、グラフェンなどのナノフィラーとの複合化を通じて電導性や機械特性の向上も図った。</p>
--

課題②: 可動性架橋と可逆性架橋の協奏による多機能化

異なる架橋手法(可動性および可逆性)を材料内に共存させることで、材料に複数の緩和時間をもたらし、高靱性・自己修復性・再接着性など多機能の付与を目指した。水素結合やホスト-ゲスト相互作用といった可逆性結合を導入することで、透明性の高い高性能材料の創出が可能となった。

総合的な解明計画

本研究では、以下の観点から可動性架橋の材料科学的特性の解明を目指した:

1. 環状分子のサイズを一定とし、高分子主鎖の太さを変化させた場合の影響の評価。
2. 高分子主鎖の太さを一定とし、環状分子のサイズを変化させた場合の力学特性への影響。
3. 高分子主鎖と環状分子間に働く化学的相互作用の解明。

これらは、マクロ視点で「紐と輪の摩擦」にも例えられるが、分子間では化学的相互作用として捉えることができ、いわば「分子摩擦」として評価可能である。この分子摩擦が応力緩和時間に及ぼす影響を追跡し、機能発現との関係性を明らかにした。さらに、応力印加下における構造変化、可動性および可逆性架橋の緩和成分の分離、緩和時間と力学特性・再接着性の相関についても評価した。

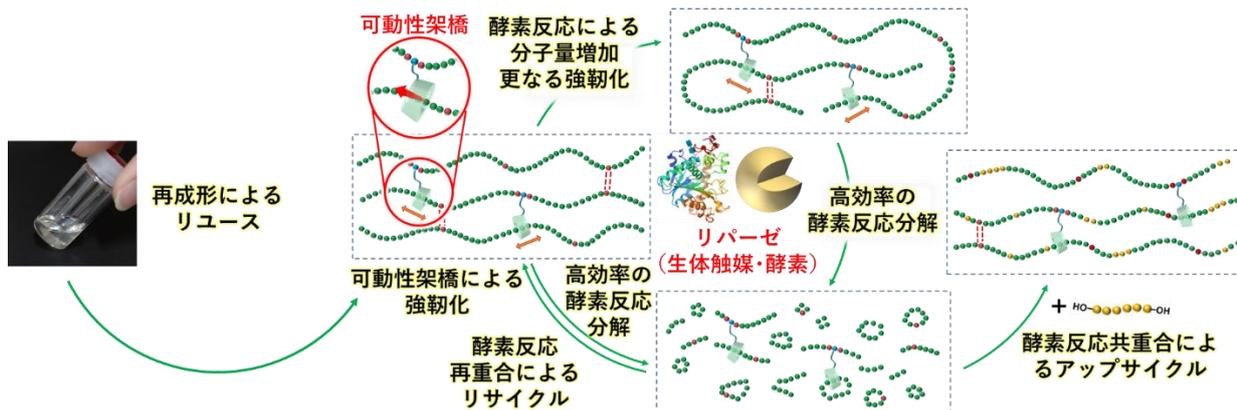
得られた知見を基に、応力緩和挙動を制御する材料設計の指針を確立し、「可動性架橋を基盤とした異種材料の高機能接合」へと展開可能な学理を構築した。

6. 研究の成果と結論、今後の課題:

以下に、代表的な研究成果について、紹介する。

1) 「可動性架橋ポリウレタンの酵素分解と再資源化」 (Chem 2025, 11, 102327)

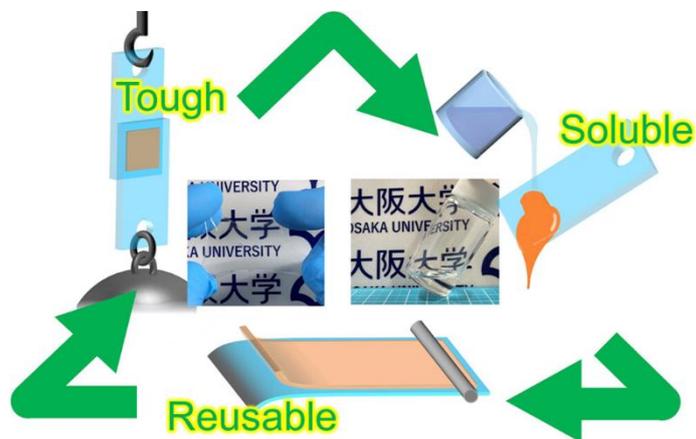
本研究では、可動性架橋を有するポリエステル-ポリウレタン(PCL-PU)の酵素分解、強化、リサイクル、アップサイクルの可能性を探求しました。Novozym 435(固定化リパーゼ)を用いて、さまざまな反応条件下でPCL-PUの酵素反応を検討し、環境に優しいポリウレタン資源の循環利用を目指しました。この研究は、持続可能なポリウレタン資源の開発と、循環型プラスチック経済の推進に貢献するものです。



2) 「可動性架橋を導入した再利用可能な高靱性アクリル系粘着シートの開発」 (ACS Applied Materials & Interfaces 2024, 16, 25393-25403)

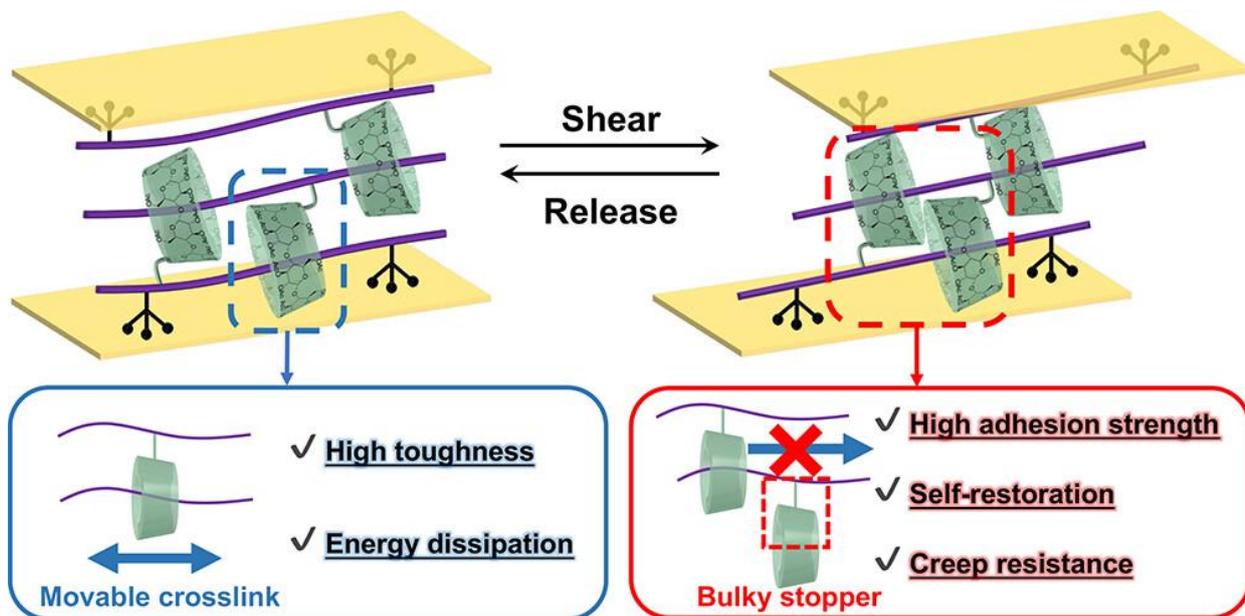
本研究では、再利用可能で高靱性を備えたアクリル系粘着シートを開発するため、可動性架橋を導入したポリマー設計を行った。シクロデキストリンを含むモノマーを用いた重合により、物理的に可動性を持つ架橋構

造を形成し、優れた粘着特性とクリープ抵抗性を実現した。得られた粘着シートは、有機溶媒で容易に溶解し、再加工が可能であり、再成形後も初期性能を維持した。本成果は、粘着材料の高機能化と持続可能性の両立を可能にする新たなアプローチを示すものである。



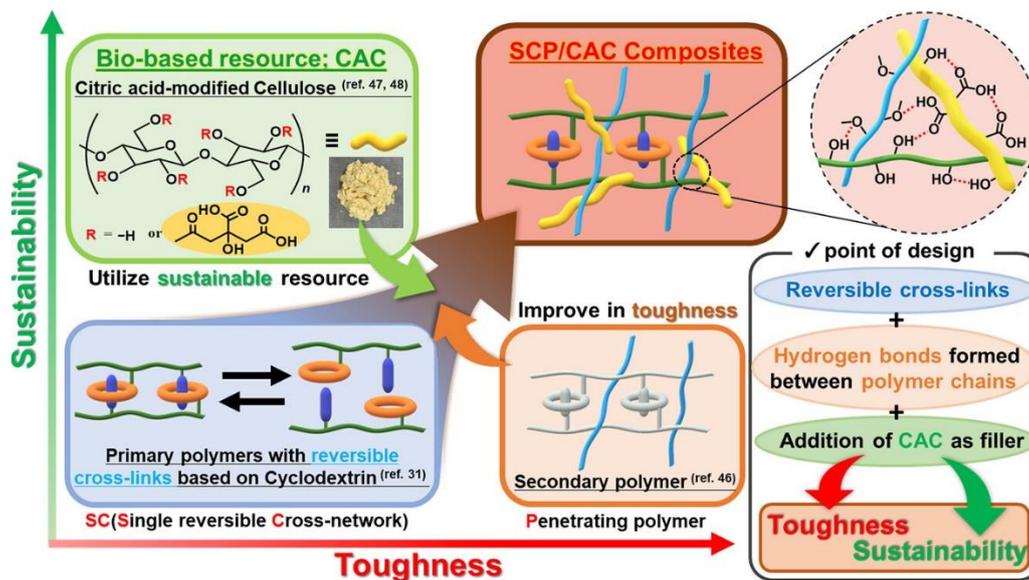
3)「可動性架橋を導入した粘着システムの応力緩和特性の向上」(ACS Applied Materials & Interfaces 2024, 16, 3935–3943)

本研究では、可動性架橋を有するポリマー材料を用いて、粘着システムの接着性と応力緩和特性の向上を図った。具体的には、N,N-ジメチルアクリルアミド(DMAAm)を主鎖モノマーとし、 γ -シクロデキストリン(γ -CD)単位を可動性架橋点として導入した単一可動性架橋ネットワーク(SC)材料を設計した。この構造により、エネルギー散逸性が高まり、靱性、自己修復性、クリープ抵抗性が向上した。さらに、ポリマー鎖の移動性を調整するために水分含有量を制御し、最適な含水状態での機械的特性を評価した。その結果、SC材料は従来の均一ポリマーや共有結合による架橋ポリマーと比較して、優れた機械的性能を示した。本研究は、可動性架橋を活用した粘着システムの設計が、持続可能で高性能な接着材料の開発に寄与することを示した。



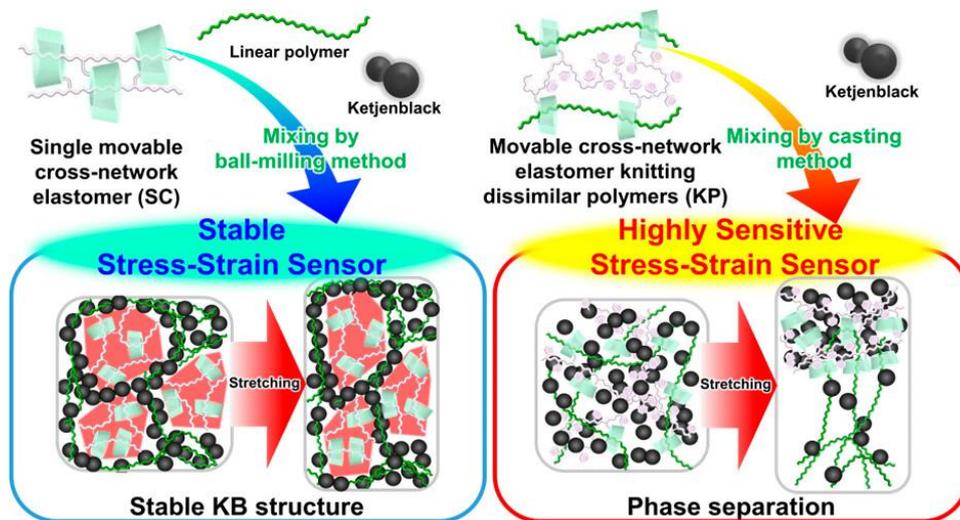
4)「クエン酸修飾セルロース複合ポリマーの非共有結合による高靱性と持続可能性の向上」 (ACS Applied Polymer Materials 2023, 5, 10334–10341)

本研究では、クエン酸で修飾したセルロース(CAC)をポリマー複合材料に導入し、複数の非共有結合(主に水素結合)を利用して、機械的強度と持続可能性の両立を図った。CAC の導入により、ポリマー鎖間の相互作用が強化され、引張強度や破断エネルギーが向上した。さらに、CAC の高い親水性と生分解性により、環境負荷の低減が期待される。このような設計により、従来のセルロース強化材料と比較して、優れた機械的特性と環境適合性を兼ね備えた複合材料の開発が可能となった。本研究は、持続可能な高性能ポリマー材料の設計に新たな指針を提供するものである。



5)「可動性架橋エラストマーによる柔軟導電センサー材料の開発」 (ACS Polymers Au 2023, 3, 394–405)

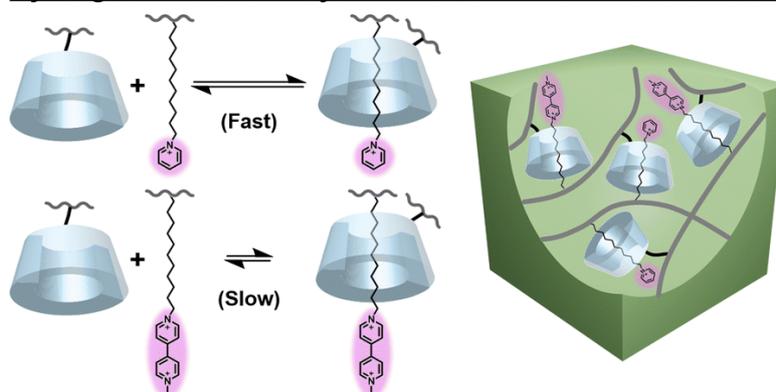
本研究では、可動性架橋を有するエラストマーと導電性カーボンフィラー(Ketjenblack)を組み合わせ、高伸縮性と応力-ひずみ応答性を持つセンサー材料を開発しました。この材料は、柔軟性と導電性を兼ね備え、ウェアラブルデバイスやソフトロボティクスなどへの応用が期待されます。この研究は、次世代の柔軟電子材料の設計に新たな指針を提供するものです。



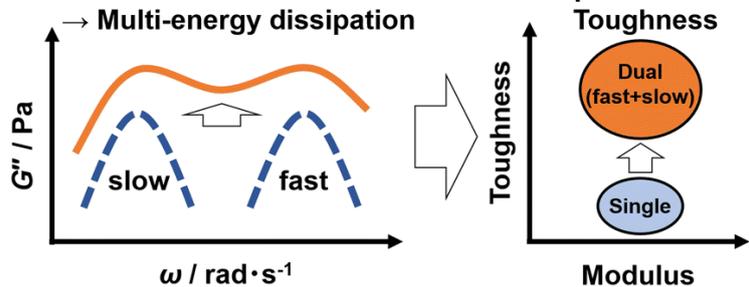
8) 「異なる緩和モードを持つ超分子水素ゲルにおける多重エネルギー散逸機構」 (*Soft Matter*, 2022, 18, 7369–7379.)

可逆的な非共有結合架橋を利用した超分子水素ゲルは、高靱性かつ機能的な材料として広く研究されていますが、機械的・機能的特性を自在に制御できる汎用的な設計指針は未だ確立されていません。本研究では、ホスト-ゲスト相互作用によって形成される動的に異なる 2 種類の可逆架橋を有する水素ゲルを設計し、分子運動性と靱性の関係を調査しました。架橋の分子運動性は二次平均緩和時間 $\langle \tau \rangle_w$ により定量化され、速い架橋 (1.8 または 18 秒) と遅い架橋 (6.6×10^8 または 9.5×10^8 秒) を組み合わせることで、単一の架橋タイプを用いた水素ゲルよりも高い靱性を示すことが明らかになりました。これは、幅広い時間スケールでの緩和過程が複合的に機能した結果であり、超分子水素ゲル設計の新たな指針となります。

(a) Hydrogel with kinetically distinct dual reversible cross-links



(b) Relaxations on wide timescale

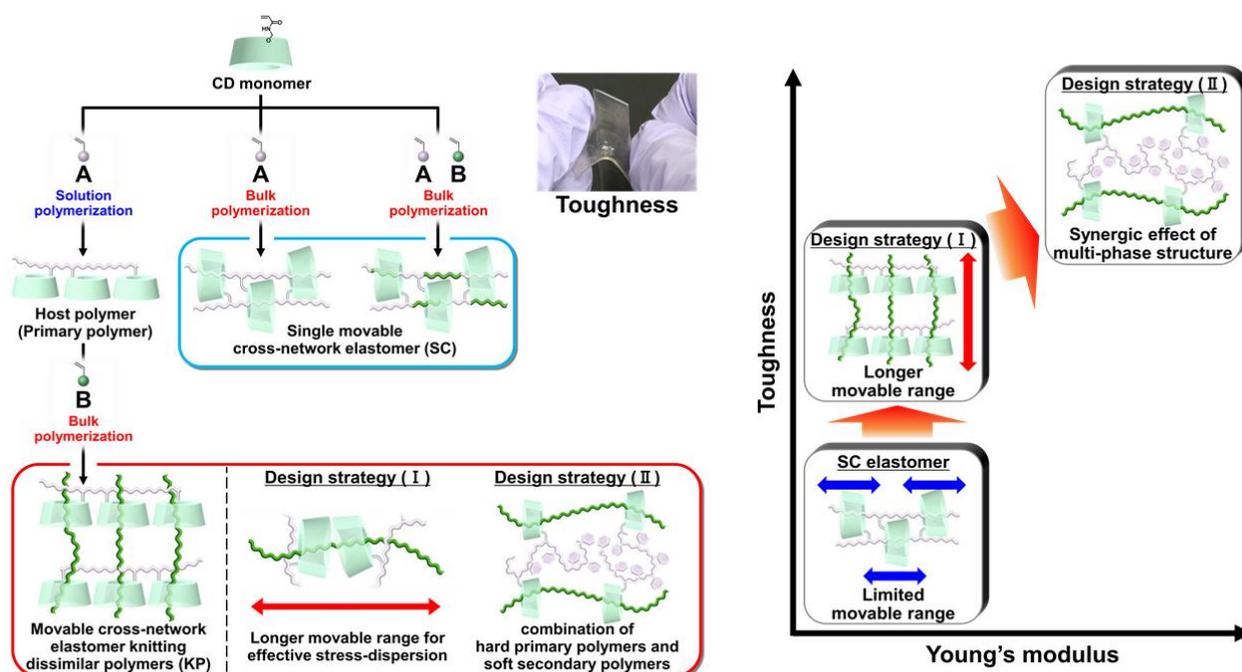


9) 「可動性架橋と水素結合によるポリウレタンの機械的特性の相乗的改善」 (*Soft Matter* 2022, 18, 5027–5036.)

アセチル化 γ -シクロデキストリン (TAc γ CD) を用いた二段階合成により、可動性架橋を有するポリウレタン (PU) 材料が作製された。ソフトセグメントにはポリテトラヒドロフラン (PTHF)、ハードセグメントにはヘキサメチレンジイソシアネート (HDI) と 1,3-プロピレングリコール (POD) が用いられた。得られた PU は、可動性架橋による柔軟性と、ウレタン結合に由来する水素結合による剛性を兼ね備え、両者の相乗効果によりヤング率が向上しながらも靱性を維持した。FT-IR および X 線散乱測定により、TAc γ CD のカルボニル基が PU 鎖と水素結合を形成し、可動性架橋が PU ハードセグメント間の水素結合を弱めることが明らかとなった。さらに、引張試験では可動性架橋により分子鎖の配向 (shish-kebab 構造) が抑制された。本材料は高い機械的性能を持ち、今後の産業応用が期待される。

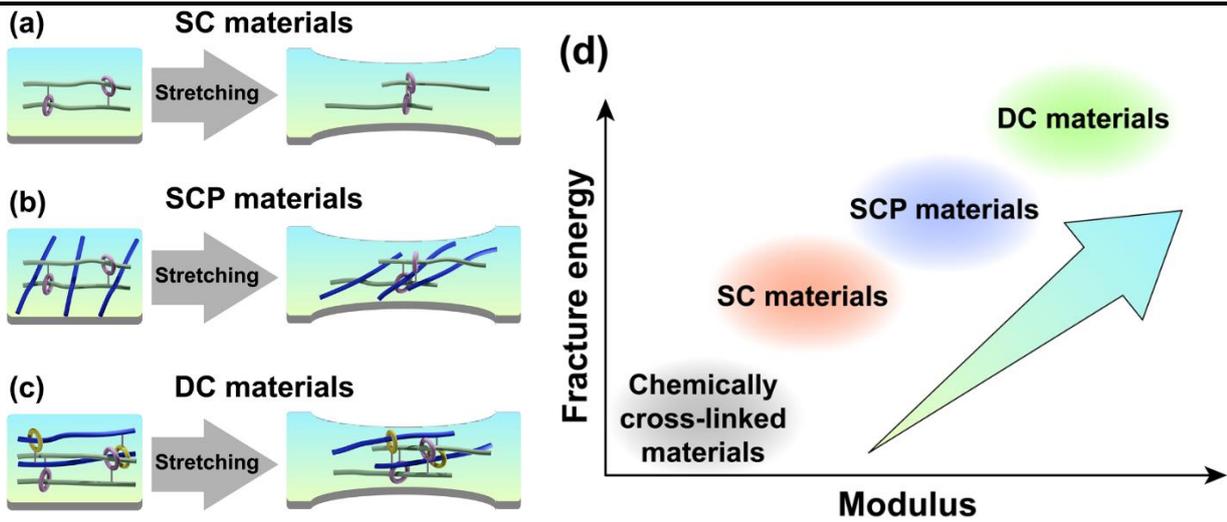
10) 「可動性架橋を有する異種高分子材料の編み込みによる作製とその機械的特性」 (*Molecular Systems Design & Engineering* 2022, 7, 733–745.)

アセチル化 γ -シクロデキストリン (TAc γ CD) を導入した直鎖高分子 (一次ポリマー) 存在下で、液状主鎖モノマーをバルク重合することで、異なる高分子鎖を編み込んだ新たな可動架橋ネットワークエラストマー (KP エラストマー) が作製された。重合後に形成された二次ポリマー鎖は、TAc γ CD の空間に侵入して一次ポリマーと結合し、可動性架橋を形成する。KP エラストマーは、一次・二次ポリマー間に共有架橋がないため、長い可動範囲を持ち、高い応力分散性により優れた靱性を示す。また、ポリ(エチルアクリレート) (PEA) とポリスチレン (PS) という相溶性の低いポリマー間にも架橋を可能にし、PEA・PS・混合相の三相構造を形成する。この三相構造の相乗効果により、靱性と剛性の両立が実現された。異種高分子の編み込みによる構造設計は、新たな高性能材料の創出に寄与する。



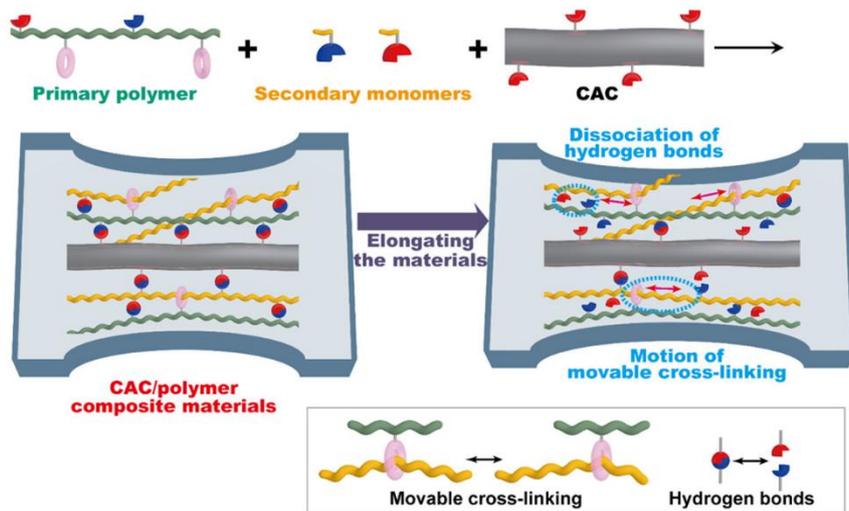
11) 「編み込み法による二重架橋ネットワークポリマーの作製とその機械的特性の評価」 (*NPG Asia Mater.* 2022, 14:32, 1–11)

アルキルアクリレートとシクロデキストリン (CD) ホストモノマーのバルク共重合により、可動性架橋点を持つ単一ネットワークエラストマー (SC) が得られ、高い靱性 (Gf) と応力分散性を示した。本研究では、SC 中に液状アルキルアクリレートを膨潤させて再度重合させることで、貫通型可動性ネットワーク (SCP) を作製し、さらに SC の存在下で CD モノマーを含むアルキルアクリレートを重合することで、二重架橋ネットワーク (DC) エラストマーを作製した。DC エラストマーは、適切な二次ネットワークの疎水性とガラス転移特性を組み合わせることで、SCP や SC よりも高い靱性を示した。SAXS 測定により、DC エラストマーはナノスケールで不均一性を持ち、緩和時間の分布も広いことが確認され、これらの特徴が靱性向上に寄与することが示唆された。本手法は従来の高分子材料の靱性改善にも応用可能である。



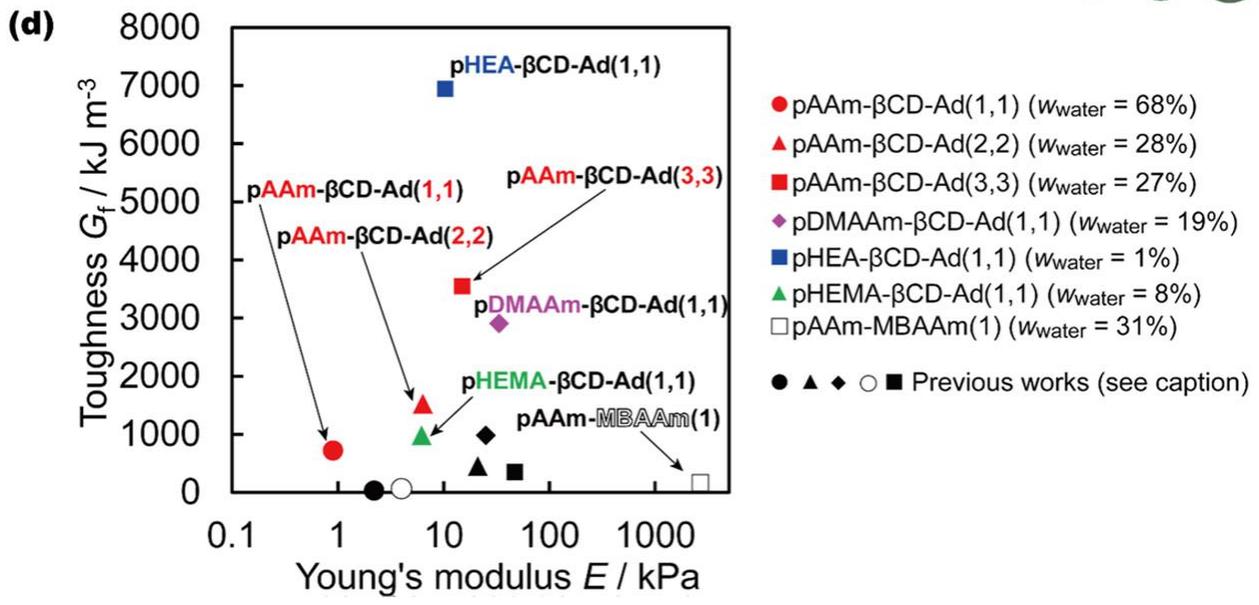
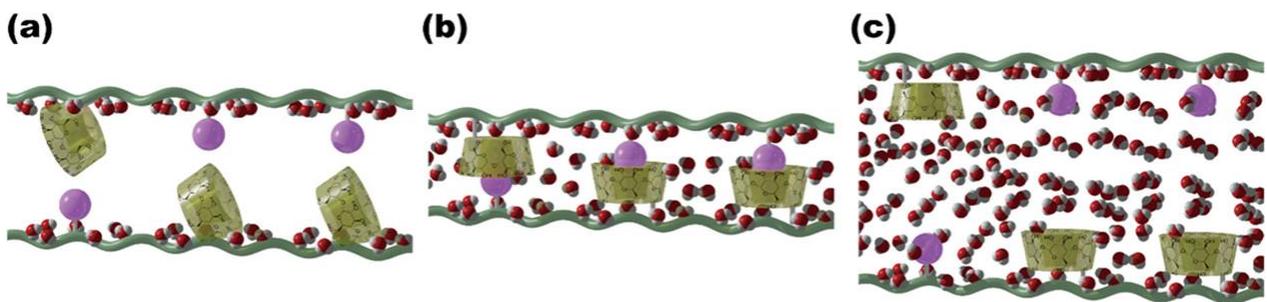
12) 「可逆的かつ可動性架橋をもつセルロースナノファイバー複合高分子材料とその機械的特性評価」
(*ACS Appl. Polym. Mater.* 2022, 4, 403–412.)

高分子材料における弾性と靱性の向上は重要な課題であるが、両者はトレードオフの関係にあり、両立は困難である。本研究では、クエン酸修飾セルロース(CAC)をフィラーとして導入し、ポリマー鎖に沿って環状分子が可動する可動性架橋構造と、CAC との間に形成される可逆的な水素結合による架橋構造を組み合わせた複合材料を作製した。この組み合わせにより、応力に対して高い靱性を実現した。特に、CAC を 3 wt% 添加した材料では、CAC なしのエラストマーに比べてヤング率が 1.6 倍に向上し、靱性も維持された。CAC や AA (アクリル酸) ユニートを欠いた材料ではこの効果は見られなかった。動的粘弾性測定により、緩和モードと靱性との関係が明らかとなり、可逆・可動架橋の適切な比率で最高の力学特性が得られることが示された。



13) 「ホスト-ゲストハイドロゲルにおける含水率と機械的特性の関係」 (*Macromolecules* 2021, 54, 8067-8076.)

本研究では、アクリルアミド修飾シクロデキストリン(ホスト)およびアダマンタン(ゲスト)を用いてホスト-ゲスト相互作用に基づくハイドロゲルを合成し、その含水率が機械的特性に及ぼす影響を調査した。これらのハイドロゲルは、高い靱性と再接着性を示し、可逆的なホスト-ゲスト架橋が重要な役割を担っている。機械的強度は含水率によって異なり、最大強度を示す水分量もポリアクリルアミド主鎖やホスト・ゲスト単位の量により異なった。再接着強度も水分量によって変化し、水の存在が特性に大きく影響することが示唆された。引張試験、接触角測定、DSC 測定により、水が非凍結結合水・中間水・自由水の3状態で存在することが分かり、特に非凍結結合水と中間水が靱性や再接着力に影響を与えることが明らかとなった。



7. 成果の価値

7.1_学術的価値:

本研究では、可逆性架橋に加えて、独自技術に基づく可動性架橋を高分子材料に導入することに成功した。この成果により、機能発現を目指した分子設計において、可逆性および可動性架橋点の寿命とガラス転移点を系統的に整理・データ化することが可能となった。これにより得られた蓄積データを基盤として、超分子構造を活かした新たな設計指針が確立され、異種高分子の複合化による「可動性異種高分子複合材料の新規学理構築」へと発展した。

本研究の成果は、可逆性および可動性架橋がそれぞれ持つ特性と利点を明確化し、これらを組み合わせた超分子架橋異種高分子複合材料の設計領域を大きく拡張するものである。特に、相溶性の低い異種高分子間を分子レベルで架橋する技術は、従来困難とされてきた材料間の融合を可能にし、さらに界面科学との学際的な融合により、新たな学問領域の創出に寄与した。

7.2_社会的価値:

本研究で確立した分子設計は、特定の高分子に限定されるものではなく、汎用高分子の機能改良にも広く応用可能である。実際に、本プロジェクトの協力企業により、アクリレート系一次ポリマーの量産が既に達成されている。この一次ポリマーに対し、企業ごとのニーズに応じた異種ポリマーを導入可能なモノマーを混合することで、異種超分子クロスネットワーク材料を容易に作製し、機能性の向上を図ることができる。

現在、特にニーズの高い「高ヤング率ポリマー」の破壊エネルギーの向上や再接着性の付与といった成果が実現しており、自動車用コーティング、電子機器の筐体、ディスプレイ関連の保護層、電池用バインダー材など、さまざまな製品への応用が期待されている。

なかでも、可動性と可逆性を併せ持つ架橋構造は、応力分散性に優れており、異なる線膨張率を持つ金属とプラスチックの接着といった、高度な異種材料接合への応用に大きな可能性を示している。

7.3_研究成果:

・「研究論文(原著)」

- [1] ○ “Exploring Enzymatic Degradation, Reinforcement, Recycling and Upcycling of Poly(ester)s-Poly(urethane) with Movable Crosslinks” Liu, J.; Ikura, R.; Yamaoka, K.; Sugawara, A.; Takahashi, Y.; Kure, B.; Takenaka, N.; Park, J.; Uyama, H.; Takashima, Y. *Chem* **2025**, *11*, 102327. (DOI:10.1016/j.chempr.2024.09.026)
- [2] “Recyclable Tough Adhesive Sheets with Movable Cross-links for Sustainable Use” Kosaba, S.; Ikura, R.; Yamaoka, K.; Arai, T.; Takashima, Y. *ACS Applied Materials & Interfaces* **2024**, *16*, 25393-25403. (DOI:10.1021/acsami.4c03806)
- [3] “Improvement in Cohesive Properties of Adhesion Systems using Movable Crosslinked Materials with Stress Relaxation Properties” Qian, Y.; Ikura, R.; Kawai, Y.; Park, J.; Yamaoka, K.; Takashima, Y. *ACS Applied Materials & Interfaces* **2024**, *16*, 3935-3943. (DOI:10.1021/acsami.3c13342)
- [4] “Material Design of Citric Acid-Modified Cellulose Composite Polymeric Materials with Both Tough and Sustainable Enhancement by Multiple Noncovalent Bonds” Wada, T.; Park, J.; Yamaoka, K.; Asaki, Y.; Sugawara, A.; Ikura, R.; Takahashi, Y.; Takenaka, N.; Uetsuji, Y.; Uyama, H.; Takashima, Y. *ACS Applied*

「研究論文(原著)」(つづき)

- [5] “Supramolecular Photoresponsive Polyurethane with Movable Crosslinks Based on Photoisomerization of Azobenzene” Zhou, X.; Ikura, R.; Jin, C.; Yamaoka, K.; Park, J.; Takashima, Y. *Aggregate* 2023, e457. (DOI:10.1002/agt2.457)
- [6] “Highly Stretchable Stress-Strain Sensor from Elastomer Nanocomposites with Movable Cross-links and Ketjenblack” Ikura, R.; Kajimoto, K.; Park, J.; Murayama, S.; Fujiwara, Y.; Osaki, M.; Suzuki, T.; Shirakawa, H.; Kitamura, Y.; Takahashi, H.; Ohashi, Y.; Obata, S.; Harada, A.; Ikemoto, Y.; Nishina, Y.; Uetsuji, Y.; Matsuba, G.; Takashima, Y. *ACS Polymers Au* 2023, 3, 394-405. (DOI:10.1021/acspolymersau.3c00010)
- [7] “Leaf-Inspired Host-Guest Complexation-Dictating Supramolecular Gas Sensors” Park, J.; Sasaki, Y.; Ishii, Y.; Murayama, S.; Ohshiro, K.; Nishiura, K.; Ikura, R.; Yamaguchi, H.; Harada, A.; Matsuba, G.; Washizu, H.; Minami, T.; Takashima, Y. *ACS Applied Materials & Interfaces* 2023, 15, 39777-39785. (DOI:10.1021/acsami.3c04395)
- [8] “Tough Citric Acid-Modified Cellulose-Containing Polymer Composites with Three Components Consisting of Movable Cross-Links and Hydrogen Bonds” Park, J.; Asaki, Y.; Fujiwara, Y.; Wada, T.; Ikura, R.; Sugawara, A.; Konishi, T.; Matsuba, G.; Uetsuji, Y.; Uyama, H.; Takashima, Y. *Polymer Journal* 2023, 55, 1151-1164. (DOI:10.1038/s41428-023-00823-3)
- [9] “Hybridizing a Dual-Cross Network and a Linear Glassy Polymer for Dynamic Contributions to High Mechanical Toughness Based on Phase-Separated Structures” Kawai, Y.; Park, J.; Murayama, S.; Ikura, R.; Osaki, M.; Konishi, T.; Matsuba, G.; Takashima, Y. *Macromolecules* 2023, 56, 4503-4512. (DOI:10.1021/acs.macromol.3c00178)
- [10] “Multi-Energy Dissipation Mechanisms in Supramolecular Hydrogels with Fast and Slow Relaxation Modes” Konishi, S.; Park, J.; Urakawa, O.; Osaki, M.; Yamaguchi, H.; Harada, A.; Inoue, T.; Matsuba, G.; Takashima, Y. *Soft Matter* 2022, 18, 7369-7379. (DOI:10.1039/D2SM00735E)
- [11] “Synergetic Improvement in the Mechanical Properties of Polyurethanes with Movable Crosslinking and Hydrogen Bonds” Jin, C.; Park, J.; Shirakawa, H.; Osaki, M.; Ikemoto, Y.; Yamaguchi, H.; Takahashi, H.; Ohashi, Y.; Harada, A.; Matsuba, G.; Takashima, Y. *Soft Matter* 2022, 18, 5027-5036. (DOI:10.1039/D2SM00408A)
- [12] “Supramolecular Nylon-Based Actuators with a High Work Efficiency Based on Host-Guest Complexation and Mechanoisomerization of Azobenzene” Park, J.; Tamura, H.; Yamaguchi, H.; Harada, A.; Takashima, Y. *Polymer Journal* 2022, 54, 1213-1223. (DOI:10.1038/s41428-022-00666-4)
- [13] “Fabrication and Mechanical Properties of Knitted Dissimilar Polymeric Materials with Movable Cross-Links” Ikura, R.; Murayama, S.; Park, J.; Ikemoto, Y.; Osaki, M.; Yamaguchi, H.; Harada, A.; Matsuba, G.; Takashima, Y. *Molecular Systems Design & Engineering* 2022, 7, 733-745. (DOI:10.1039/D2ME00016D)
- [14] “Preparation of Dual Cross-Network Polymers by Knitting Method and Evaluation of Their Mechanical Properties” Kawai, Y.; Park, J.; Ishii, Y.; Urakawa, O.; Murayama, S.; Ikura, R.; Osaki, M.; Ikemoto, Y.; Yamaguchi, H.; Harada, A.; Inoue, T.; Washizu, H.; Matsuba, G.; Takashima, Y. *NPG Asia Materials* 2022, 14, 32. (DOI:10.1038/s41427-021-00348-2)

「研究論文(原著)」(つづき)

- [15] “Cellulose Nanofiber Composite Polymeric Materials with Reversible and Movable Crosslinks and Evaluation of Their Mechanical Properties” Tsuchiya, H.; Asaki, Y.; Sinawang, G.; Asoh, T.; Osaki, M.; Park, J.; Ikemoto, Y.; Yamaguchi, H.; Harada, A.; Uyama, H.; Takashima, Y. *ACS Applied Polymer Materials* 2022, 4, 403-412. (DOI:10.1021/acsapm.1c00223)
- [16] “Material Adhesion through Direct Covalent Bond Formation Assisted by Noncovalent Interactions” Osaki, M.; Sekine, T.; Yamaguchi, H.; Takashima, Y.; Harada, A. *ACS Applied Polymer Materials* 2021, 3, 2189-2196. (DOI:10.1021/acsapm.1c00223)

「国際会議発表」

- [1] **Takashima, Y.** “Design and Functions of Supramolecular Materials Formed by Reversible and Movable Cross-Links.” *Design and Preparation of Stimuli Responsive Polymeric Materials 2023*, Osaka University (Toyonaka Campus), Osaka, Japan, December 21, 2023.
- [2] **Takashima, Y.** “Design and Functionalization of Dual Cross-Network Polymeric Materials Formed by Reversible and Movable Cross-Linkers.” *The Grand Meeting MRM&ICA2023*, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, December 14, 2023.
- [3] **Takashima, Y.** “Design and Functions of Polymeric Materials Formed by Reversible and Movable Cross-Linkers.” *2023 Japan-US Seminar on Polymer Chemistry*, Okinawa Institute of Science and Technology (OIST), Okinawa, Japan, November 1, 2023.
- [4] **Takashima, Y.** “Design and Functions of Polymeric Materials Formed by Reversible and Movable Cross-Linkers Using Cyclodextrins.” *HeKKSaGOn WGI Meeting*, Georg August University of Göttingen (Alte Mensa), Göttingen, Germany, September 21, 2023.
- [5] **Takashima, Y.** *Invited Lecture at University of Münster*, University of Münster, Münster, Germany, September 20, 2023.
- [6] **Takashima, Y.** “Design and Functions of Polymeric Materials Formed by Reversible and Movable Cross-Linkers.” *The 8th International FAPS Polymer Congress 2023*, Bahçeşehir University (Beşiktaş South Campus), Istanbul, Turkey, September 12, 2023.
- [7] **Takashima, Y.** *The 13th SPSJ International Polymer Conference (IPC2023)*, Sapporo Convention Center, Hokkaido, Japan, July 18–21, 2023.
- [8] **Takashima, Y.; Konishi, S.; Park, J.; Urakawa, O.; Inoue, T.; Matsuba, G.** “Multi-Energy Dissipation Mechanisms in Supramolecular Hydrogels with Fast and Slow Relaxation Modes.” *Physics of Soft and Active Matter in Different Spatio-Temporal Domains*, Kyoto University (Institute for Advanced Study), Kyoto, Japan, March 9, 2023.

「特許」

- 1) 高島 義徳、宇山 浩、菅原 章秀、朴 峻秀、以倉 峻平、竹中 直巳、久禮 文章、高橋 佑弥 “接着剤組成物”, 特願 2023-105083 (2023/6/27)
- 2) 高島 義徳、朴 峻秀、以倉 峻平、松村 優成“高分子材料およびその製造並びに高分子材料の分解方法”, 特願 2023-050042 (2023/3/27)
- 3) 高島 義徳、宇山 浩、朴 峻秀、朝木 佑貴、和田 拓真、麻生 隆彬、竹中 直巳、久禮 文章、高橋 佑弥 “樹脂組成物及びその製造方法”, 特願 2023-001809 (2023/1/10)
- 4) 高島 義徳、朴 峻秀、以倉 峻平、中川 秀夫、五十嵐 実、加藤 野歩、亀井 正直、小倉 健太郎 “複合ポリマー材料及びその製造方法並びに光学材料”, 特願 2022-201533 (2022/12/16)
- 5) 高島 義徳、朴 峻秀、以倉 峻平、奈良 早織、東田 和樹“複合構造体、複合体の製造方法、成形体および成形体の製造方法”, 特願 2022-190353 (2022/11/29)
- 6) 高島 義徳、原田 明、大崎 基史、シナワン ガリー、宇山 浩、麻生 隆彬、「高分子複合材料、重合性単量体組成物及び高分子複合材料の製造方法」国立大学法人大阪大学、特許第 7337377 号 (2023/8/25)
高島 義徳、原田 明、大崎 基史、畑中 悠子、平賀 健太郎、山崎 穰輝、野村 孝史、杉山 明平、「樹脂組成物、重合体、重合体の製造方法、電気化学デバイス用結着剤、電極合剤、電極、電気化学デバイス及び二次電池」国立大学法人大阪大学、ダイキン工業株式会社、特許第 7304593 号 (2023/6/29)
高野 慎司、松野 幸也、長森 吉紀、原田 明、高島 義徳、大崎 基史、井上 勝成、「ポリロタキサン複合成形体及びその製造方法」豊田合成株式会社、国立大学法人大阪大学、株式会社ASM、特許第 7109021 号(2022/7/21)
- 7) 原田 明、高島 義徳、小林 裕一郎、山下 浩平、小林 定之、「修飾ポリロタキサンおよびその製造方法並びに樹脂組成物」国立大学法人大阪大学、東レ株式会社、特許第 7088491 号(2022/6/13)
- 8) 原田 明、高島 義徳、鄭 永太、小林 裕一郎、「高分子材料及びその製造方法」国立大学法人大阪大学、特許第 7074375 号(2022/5/16)
原田 明、高島 義徳、岩曾 一恭、「高分子材料及びその製造方法、並びに重合性単量体組成物」国立大学法人大阪大学、特許第 7054244 号(2022/4/5)
- 9) 原田 明、高島 義徳、中畑 雅樹、田中 求、ホールニング マルセル、「培地用高分子ゲル、培地、細胞の培養方法及びキット」国立大学法人大阪大学、国立大学法人京都大学、特許第 6975427 号: (2021/11/10)
- 10) 高島 義徳、小林 裕一郎、田村 洋樹、徳原 智子、中畑 雅樹、阪脇 綾子、中島 毅彦、高橋 宏明、高田 智司、茅野 健吾、波多野 和宏、「自己修復性導電性材料、導電性高分子化合物及び重合性単量体」国立大学法人大阪大学、トヨタ自動車株式会社、特許第 6953362 号(2021/10/1)
- 11) 原田 明、山口 浩靖、高島 義徳、呑村 優、荒本 光、以倉 峻平、小林 裕一郎、中満 幸恵、「ホスト基含有重合性単量体、高分子材料及びその製造方法、並びに、包接化合物及びその製造方法」国立大学法人大阪大学、特許第 6950984 号(2021/9/28)
- 12) 原田 明、山口 浩靖、高島 義徳、平賀 健太郎、山崎 穰輝、山口 史彦、杉山 明平、「電気化学デバイス用結着剤、電極合剤、電極、電気化学デバイス及び二次電池」国立大学法人大阪大学、ダイキン工業株式会社、特許第 6913916 号(2021/7/15)

- 13) 原田 明、山口 浩靖、高島 義徳、呑村 優、荒本 光、以倉 峻平、中畑 雅樹、岩曾 一恭、平賀 健太郎、杉山 明平、山口 史彦、野村 孝史、「高分子材料」ダイキン工業株式会社、国立大学法人大阪大学、特許第 6903669 号(2021/6/25)
- 14) 原田 明、山口 浩靖、高島 義徳、徳原 智子、呑村 優、荒本 光、以倉 峻平、岡野 七海、「重合用組成物及びその重合体並びに重合体の製造方法」国立大学法人大阪大学、特許第 6841530 号(2021/2/22)

・「受賞」: 無し

※本研究にもっとも関係の深い研究論文 1 編または国際会議発表 1 件(また、あれば特許 1 件にも)に○を付け、その別刷(コピー可)1 編を添付して下さい。)

⇒ 添付ファイルにて提出しました。