

2.5.1 分子技術

(1) 研究開発領域の定義

「分子技術」は、日本発の課題解決型の研究開発領域であり、目的を持って分子を設計・合成・操作・制御・集積することにより、所望の物理的・化学的・生物学的機能を創出し、応用に供するための一連の技術である。①分子の設計・創成技術、②分子の変換・プロセス技術、③分子の電子状態制御技術、④分子の形状・構造制御技術、⑤分子集合体・複合体の制御技術、⑥分子・イオンの輸送・移動制御技術の6つの横断的技術分野が相互に密接に連携することが重要である。分子技術によって創出される新物質、新材料、新デバイス、新プロセス等は応用分野のさまざまな研究開発領域において重要な役割を果たすものである。

分子技術は広範な技術分野に関連するものであるが、技術トピックスとしては、有機合成・触媒、有機エレクトロニクス、高分子・分子配向について重点的に取り上げる。

(2) キーワード

分子設計、分子科学、先端材料、高機能触媒、ソフトマテリアル、創薬、精密合成、自己組織化、高次構造、配列・配向制御、電荷輸送、先端計測、計算科学

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

分子技術は、環境・エネルギー・医療など、我々人間の社会活動において社会的・産業的課題の解決に貢献し、持続可能な社会の実現に対して重要な役割を果たす科学技術として期待されている。分子科学が、分子および分子集合体の構造や物性を解明し、化学反応や分子の相互作用およびその本質を、理論と実験の両面から理解することを目的とする学問であるのに対して、わが国において誕生した技術概念/研究開発領域である分子技術は、分子科学がもたらす知見・理解を基盤として所望の機能を新たに創出することを明確な目的とする工学的な技術概念である。

革新的かつ精密な分子や分子集合体を創出できれば、効果的で、しかも最終的な課題解決が可能になるので、より強力な国際的競争力の獲得につながる。材料に対する要求がますます高度化していく状況であり、分子技術はさらに重要性が増すと考えられる。

分子技術の基盤となるのは化学であるが、近年は、物理学・生物学・薬学・数学などの様々な科学的知見を取り入れるとともに、機械学習や人工知能など最先端のコンピュータ技術を活用することで、分子設計・合成化学に急速な進展が見られている。今後は、我が国の持続・発展を目指すうえでも、自然科学の学理に迫る伝統的な分子科学を追求しつつも、同時に、工学・産業に資する科学技術としての分子技術へのパラダイムシフトを加速することが求められる。

[研究開発の動向]

過去よりさまざまな分野で分子の設計・合成が行われてきたが、従来、普遍的な技術として分子技術が明確に意識されることはほとんどなかった。すなわち、化学的に構造レベルでは解明されていても、その構造式によってその化合物が作り出すさまざまな物性についての論理的説明ができることは稀であり、目的のためにその構造が最適であるという保証はほとんどなかった。

最適・最善な分子構造にいたっていない段階で製品化を進めてしまった場合には、その製品の機能がベストである保証はなく、その模倣・改良が比較的容易なものとなる。また、最適解でないがゆえに特許による技術の保護も十分とはいえないため、市場での成功が明らかになった段階にはさまざまな後発品が上市されると考えられる。分子技術によって、最適分子の設計と合成を進めることは極めて重要である。また、分子技術は日本発の概念であるが、フランスなど日本との分子技術に関する共同研究を実施し重要性を理解して

いる国も出てきており、世界的にさらに発展することが想定される。

分子技術は、精密合成技術と理論・計算科学との協働により新機能物質を自在に設計・創成する「分子の設計・創成技術」、分子の形状構造を厳密に制御することにより新たな機能の創出につなげる「分子の形状・構造制御技術」、分子レベルでの精密な構造設計にもとづく新たな触媒・システム開発につなげる「分子の変換・プロセス技術」、分子の電子状態を自在に制御する「分子の電子状態制御技術」、分子集合体・複合体の形成や機能解析・化学制御に関連する「分子集合体・複合体の制御技術」、膜物質を介した分子・イオンの輸送速度や選択性向上などの分子・イオンの輸送に関する「分子・イオンの輸送・移動制御技術」からなる6つの横断的技術に分類される。また、それぞれが相互に密接に連携することが重要である。

分子技術の概念は、研究開発プログラムにおいて明示的に言及されているもの以外にも、さまざまな応用分野において新物質、新材料、新デバイス、新プロセス等の創出に重要な役割を果たしている。

最適・最善な分子の設計と合成を進めるためには、圧倒的に高い水準の技術力が必要となるが、この基盤技術の育成に必要な基礎科学を持ち、かつ十分な資金を継続的に提供できる国・企業は世界的に少ない。世界的な経済環境が大きく変化する中、材料創製においても、日本発の技術をグローバル展開することを目指し、注意深く育成し製品化へ結びつける戦略的な取り組みが一層求められる。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• 有機合成・触媒

光酸化還元触媒を利用した反応開発がきわめて盛んになっている。これを従来の遷移金属触媒と組み合わせることによって革新的な有機合成反応、特に二酸化炭素固定など熱的反応では進行しない反応が開発されている(京大・村上正浩ら)。また、貴金属触媒を安価な第一遷移金属触媒で代替する手法も着実に進展した(東大・中村栄一ら)。

有機合成反応を生体内、特にタンパク質の特定の位置で行わせる手法も大きく進展して、標的タンパク質の精密ラベル化(京大・浜地格ら)や患部での医薬合成(東工大・田中克典ら)が達成された。

窒素を活性化してアンモニアを得る触媒反応においては、不均一系(東工大・細野秀雄ら)、均一系(東大・西林仁昭)の金属触媒双方で顕著な活性向上が達成されている。

一方、量子化学計算や人工知能の活用によって新反応や新触媒を予測ベースで開発する手法が確立されつつある。代表的な成果として、AFIR法(人工力誘起反応法)による反応経路探索を応用した新反応開発(北大・前田理ら)や、機械学習による酸化触媒の最適化(産総研・矢田陽ら)が挙げられる。

• 有機エレクトロニクス

電荷輸送を担う π 共役系分子や π 共役系高分子の開発を中心に、その機能を制御するためのドーパント分子やデバイス応用技術の研究など、多岐に渡る研究が、継続的かつ盛んにおこなわれている。高性能エレクトロニクスデバイス応用のためには、 π 電子系分子の電子状態や集合体構造の制御を両立することが重要である。

近年の特筆すべき国内の研究動向としては、分子技術と有機合成技術の融合的研究の展開がある。例えば、 π 共役系骨格への窒素元素の導入による高性能なn型有機半導体分子(東大・岡本敏宏ら、名大・忍久保洋ら)、複数の分子軌道が伝導に関わるミックスオービタル分子(東大・岡本敏宏ら)、新奇な置換基により集合体構造を制御したp型有機半導体分子(東北大・瀧宮和男ら、東大・井上 悟・長谷川達生ら)などが挙げられる。また、スーパーコンピュータによる効率的な分子選定を基に、理研・宮島大吾らは、新機軸な有機発光材料を開発した。

世界的には π 共役系高分子の研究が主に行われ、導電性高分子、有機熱電変換素子、有機シナプストランジスタなどの研究分野の発展が著しい。

・高分子・分子配向

合成高分子の配列を制御することは、より高度な物理的・化学的・生物学的機能の創出に向けて重要である。リビング重合により多種多様の官能基を一本の高分子鎖に精密に導入し、それらが協調することで従来の高分子とは一線を画する高分子機能の発現を目指す研究(京大・大内誠ら)が実施されており、自己組織化、温度応答性、自己修復性など興味深い成果が報告されている。

また、マイクロプラスチックの問題解決や脱炭素社会の構築に向けて、ケミカルリサイクル可能な循環型高分子への関心も高まっており、開環重合触媒の研究が活発化している。開環重合は逐次重合に比べて高分子量が容易な連鎖重合であり、また、生成ポリマーの主鎖にヘテロ原子を導入できるため、生成ポリマーへの分解性の付与や解重合による完全モノマー化が期待できる。開環重合と付加重合を融合した共重合も発展している。構造転移、分解、再結合、交換などが可能な共有結合を高分子材料に組み込むことで、応力、破壊、結晶化、接着などの過程を測定あるいは観測するための分子設計の技術が進んでいる。国内では、大塚英幸(東工大)らが力学的刺激によって蛍光性のラジカルを与える分子骨格を、斎藤尚平(京大)らは環境に応じて骨格を変化させる柔軟な π 共役構造を組み込んだ高分子材料を開発し、当該分野を先導している。今後、このような共有結合に加えて、非共有結合も組み合わせた設計によって、より高機能な材料が開発されると予想される。

高分子を複雑かつ精密な構造を築くクリップケミストリーの概念が2021年に提唱されている(J. A. Johnson (MIT))がこれは、2001年にSharplessによって提唱されたクリックケミストリーの概念を高分子鎖の結合の切断や組み換えにまで発展させたものである。

ハイドロゲルの設計・制御による医療用材料の創製の研究も注目すべき分野である。酒井崇匡(東大)らは、水を多く含み生体に似た材料であるハイドロゲルの構造を精密に制御することで、新たな機能性を有する医療材料の開発を目指し、臨床応用研究にも積極的に取り組んでいる。

分子集合体の配置や配向を結晶構造や液晶配向の視点から制御・解析し、材料物性の飛躍的向上を実現する研究も進んでいる。宍戸厚(東工大)らは、フィルム状の高分子が湾曲する挙動をリアルタイムに解析する手法と装置を開発し、次世代スマートフォンやフレキシブルデバイスに資する材料の設計指針を提案している。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

2012年にスタートしたJST-CREST「新機能創出を目指した分子技術の構築」(研究総括:山本尚)からは多くの成果が得られており、社会や産業の課題解決のブレークスルーにつながる事が期待される。また、同じくJSTさきがけ「分子技術と新機能創出」(研究総括:加藤隆史)でも6技術領域全体にわたって多数の研究テーマが展開され、2017年度に終了したが、一部の成果は新たな研究開発プロジェクトへと発展している。

分子技術(Molecular Technology)は、国際的な広がりもみせている。2014~18年に実施されたJST-SICORP(戦略的国際共同研究プログラム)日本-フランス共同研究「分子技術」分野(研究主幹:山本尚、副研究主幹:加藤隆史)では、触媒・ケミカルバイオロジー、エネルギー、材料、センシング、界面制御などに関する研究が展開された。

これら「分子技術」をプログラム名に明示的に含んでいるものは終了しているが、分子技術の概念を活かした研究課題は、以下に挙げるプログラムなどにおいて推進されており、分子技術の適用範囲が広がっていることが見てとれる。

- ・新学術領域研究「ハイブリッド触媒」(領域代表:金井 求、2017~21年度)
- ・新学術領域研究「水圏機能材料」(領域代表:加藤隆史、2019~23年度)
- ・学術変革領域研究(A)「高密度共役の科学:電子共役概念の変革と電子物性をつなぐ」(領域代表:関修平、2020~24年度)

- ・学術変革領域研究 (A)「2.5次元物質科学:社会変革に向けた物質科学のパラダイムシフト」(領域代表:吾郷浩樹、2021~25年度)
- ・学術変革領域研究 (A)「デジタル化による高度精密有機合成の新展開」(領域代表:大嶋孝志、2021~25年度)
- ・学術変革領域研究 (B)「精密高分子進化学による次世代医薬開拓」(研究代表:星野友、2022~24年度)
- ・世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)「化学反応創成研究拠点」(拠点長:前田理、2018年度~)
- ・文部科学省 データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト事業「バイオ・高分子ビッグデータ駆動による完全循環型バイオアダプティブ材料の創出」(研究代表者:沼田圭司、2022年度~)
- ・JST-CREST「実験と理論・計算・データ科学を融合した材料開発の革新」(研究総括:細野秀雄、2017~23年度)
- ・JST-CREST「革新的力学機能材料の創出に向けたナノスケール動的挙動と力学特性機構の解明」(研究総括:伊藤耕三、2019~25年度)
- ・JST-CREST「原子・分子の自在配列・配向技術と分子システム機能」(研究総括:君塚信夫、2020~26年度)
- ・JST-CREST「未踏探索空間における革新的物質の開発(未踏物質探索領域)」(研究総括:北川宏、2021~27年度)
- ・JST-CREST「分解・劣化・安定化の精密材料科学」(研究総括:高原淳、2021~27年)
- ・JST-未来社会創造事業「界面マルチスケール4次元解析による革新的接着技術の構築」(研究代表:田中敬二、2018~27年度)
- ・ERATO「ニューロ分子技術」(研究総括:浜地格、2018~23年度)
- ・ERATO「化学反応創製知能」(研究総括:前田理、2019~24年度)
- ・ERATO「野崎樹脂分解触媒プロジェクト」(研究総括:野崎京子、2021~26年度)

(5) 科学技術的課題

分子技術を開発する目的は、社会や産業の重要課題に対する効果的かつ最終的な解決法の提供にある。今後さらに複雑化、高度化すると予想される諸課題に対して、既存の科学技術の延長で対応することは困難である。したがって、研究開発テーマには、現在の科学技術では到達できない「夢の目標」と、従前の研究開発の延長ではない新規な研究開発プランが必須である。さらに、プランを進めるための明確で独創的な分子技術の「イメージ・ストーリー」を描き、それを実現することが求められる。そのためには、研究開発に対する姿勢を根本的に変えていく必要がある。すなわち、分子レベルからの課題解決をめざし、化学を基盤として、物理学、生物学、薬学、数学、工学などに加えて各種の技術も融合し「最適・最善の解」を得ることが求められる。

成功には、基礎科学者、工学者および企業技術者が、分子技術という共通の土台に立ち、協働することが重要となる。一方、本研究開発領域においては、研究者の意識変革もまた重要である。研究者は、自らの研究開発により社会や産業の重要課題を解決するという強い意志を持たなければならない。「現行品より良いモノを作る」という考え方から「最適・最善なモノを創る」という考え方への転換も求められる。これらの目標は一朝一夕に解決するものではないが、その目標は従来のトライアルアンドエラーの世界から、論理的にベスト分子を探索するアプローチが要求される。

各技術概念について、必要となる研究課題には以下のようなものが挙げられる。

a) 分子の設計・創成技術

機能から分子を創出するための計算化学にもとづく理論創成とシミュレーション技術の開発、機能設

計・予測にもとづく最終目的物をめざす精密合成法の開発、分解・リサイクルを実現する分子設計、反応開発（高分子分解、骨格変性反応など）など

b) 分子の変換・プロセス技術

酵素インスパイアードモレキュラーインプリンティング触媒の開発、多酵素の配列による高度な分子設計手法の開発、金属フリー有機合成触媒の開発、触媒・生成物の in situ キャラクターゼーション法の開発、マイクロ反応装置などによるフロー型システムケミストリーの開拓、原料転換プロセスの開発（未利用化石資源、バイオマスなどの利用）、室温稼働化学プロセスの開発、細胞内など狭雑系での精密有機合成反応、材料の分解・劣化・安定化の精密制御など

c) 分子の電子状態制御技術

電極-有機分子間（電荷注入）、有機分子同士（電荷輸送）の電荷授受の機構解明、高純度化によるキャリアトラップの解消、分子性物質の純度測定評価技術の開発、デバイス上での分子配列技術・階層性構築制御技術の確立、液体半導体などによる自己修復可能なデバイスの開発、分子性物質・分子材料の劣化機構の解明など

d) 分子の形状・構造制御技術

自己組織化などビルドアップおよびトップダウン手法による空間空隙構造形成技術、ナノからマクロ構造への規模拡大技術・高強度化・高速合成・低コスト化、マクロ構造を持つ材料における物理的諸現象（貯蔵、物質・エネルギー変換など）の観測・解析技術、計算機シミュレーションによるマクロ構造の合成および構造・機能の設計・解析など

e) 分子集合体・複合体の制御技術

分子集合体の精密設計による力学・光学・電気・熱物性の向上、創薬開発を目指した分子集合体の動的構造変化と機能制御の解析、タンパク質への非天然アミノ酸導入による人工酵素の構築、液体分子の構造と機能制御の解析とシミュレーションなど

f) 分子・イオンの輸送・移動制御技術

不純物の選択的移送と捕捉を目指した超高性能分離膜の開発、効率の薬物輸送を実現する高度 DDS の開発など

(6) その他の課題

今後、分子技術は、さらに中長期的視点に立った次世代の分子技術の開発と集積を戦略的に進める必要がある。6つの横断的技術に分類されるように分子技術は多様であるため、その構築は継続的な戦略・投資なしには実現しない。社会や産業の課題には終わりが無いなかで、新しい挑戦的な目標を掲げた研究開発チームを適時に立ち上げ続けるのが、分子技術の推進に必要な姿である。分子技術には、新物質、新材料、新デバイス、新プロセス等のブレークスルーの創出が期待されている。しかし、これらは、分野単独の科学技術から生み出すことは困難であり、多様な分野の科学技術の融合により初めて可能となる。したがって、高い志を持った分野融合型の研究開発チームが組織され、また効率的に活動できることが重要である。

分子技術の発展と深化に伴い、近年では応用研究やそれを志向した分子開発が広まっているものの、学術研究レベルを超えた、社会との関連は未だ十分ではない。今後は、文部科学省・JST だけでなく、経済産業省や産業界とのさらなる緊密な連携により、新産業につなげてゆくことが期待される。

(7) 国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|------|---------|----|------|---|
| 日本 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | <ul style="list-style-type: none"> 分子技術の重要性が世界で初めて日本で認識されたことは極めて重要な点。日本の高いレベルの分子科学が競争力ある分子技術の開発基盤となる。化学を中心に、物理学・生物学・数学・データ科学など他分野との連携が、大学間連携を含めて高まっており、各分野での基礎研究力の高さが相乗的に世界を牽引している。 分子技術の概念を活かした研究課題が、様々な研究プログラムにおいて推進されており、分子技術の適用範囲が広がっている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | → | <ul style="list-style-type: none"> 環境・エネルギー・資源、医療・健康、水・食料など分子技術が鍵となる応用分野は多い。産業化については、持続的イノベーションを志向した研究開発が多く、上記分野への応用展開を企図した先端材料で優位にある。 しかし、米国に比べると、全体として必ずしも十分な競争力はなく、さらに、中国、韓国などに追い上げられつつある。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | <ul style="list-style-type: none"> 米国でも、近年、分子工学の重要性が認識され始めている。しかし、バイオやマテリアルなど応用末端の分野にその研究が集中しており、化学というよりも工学が前面に出ている。従って、分子レベルまで掘り下げた設計、合成や制御をめざす研究は多くない。 機械学習による触媒探索や光酸化還元触媒において先導的成果がある。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | <ul style="list-style-type: none"> 応用研究は非常に強い。特に資金が集中しているライフサイエンスは圧倒的なレベルにあり、今なお向上し続けている。産業化については、ベンチャーが中心となって諸課題への対応を図っている。 エレクトロニクス分野でも、ヘルスケア分野を志向したベンチャー企業などが中心になっている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | → | <ul style="list-style-type: none"> EU枠内でのグラント（ERC）が有力研究者に行き渡り、特にイギリス、ドイツ、スイスは質・量ともに高いレベルを維持している。 ドイツは、分子科学の基礎研究は高いレベルにあり、分子技術においても光化学や超分子化学などにおいて高い水準が保たれている。 英国は、ライフサイエンス分野の分子技術が進んでいる。 フランスは、フッ素化学などの限定された分野では優れているが、全体としては低調である。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | → | <ul style="list-style-type: none"> ライフサイエンス分野の応用研究では、ドイツ、英国が非常に優れている。 エレクトロニクス分野では、英国、ドイツやベルギーなどで優れているが、各国とも一部の組織が牽引している状況である。 産業化を促進する制度的バックアップは優れているが、分子技術という視点では若干手薄い。 |
| 中国 | 基礎研究 | ○ | ↗ | <ul style="list-style-type: none"> 米欧日で成功した研究者が本国に招聘されており、潤沢な資金と相まって、成果をあげ始めている。 欧米や日本の後追的な研究が依然として多い一方で、研究成果の量は群を抜いており、なかにはかなりオリジナリティの高い成果も見られるようになった。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | <ul style="list-style-type: none"> 大学や公的研究機関に多くの研究費が投入され、応用研究が進展している。 米国と似た制度の下で、ベンチャー企業が誕生しやすい環境にある。産業化についても、今後ベンチャーが重きをなす可能性がある。 |
| 韓国 | 基礎研究 | △ | → | <ul style="list-style-type: none"> 米国型の研究スタイルであるが、最近、大学や政府研究機関で外国人研究者が十分な雇用・処遇を得られないケースがみられる。欧米からの帰国者を優遇する点は中国と似ているが、研究レベルは中国にやや遅れている。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | <ul style="list-style-type: none"> 製品化を目指した応用研究・開発に強みがある。 分子技術というより、エンジニアリング的アプローチが中心である |

2.5

俯瞰区分と研究開発領域
物質と機能の設計・制御

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考・引用文献

- 1) 国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センター「分子技術“分子レベルからの新機能創出”～異分野融合による持続可能社会への貢献～」<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2009-SP-06.html>, (2022年12月22日アクセス) .
- 2) Peyton Shieh, et al., “Clip Chemistry: Diverse (Bio) (macro) molecular and Material Function through Breaking Covalent Bonds,” *Chemical Reviews* 121, no. 12 (2021) : 7059-7121., <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c01282>.
- 3) Toshihiro Okamoto, et al., “Robust, high-performance n-type organic semiconductors,” *Science Advances* 6, no. 18 (2020) : eaaz0632., <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz0632>.
- 4) Keita Tajima, et al., “Acridino [2,1,9,8-klmna] acridine Bisimides: An Electron-Deficient π -System for Robust Radical Anions and n-Type Organic Semiconductors,” *Angewandte Chemie International Edition* 60, no. 25 (2021) : 14060-14067., <https://doi.org/10.1002/anie.202102708>.
- 5) Kazuo Takimiya, et al., “‘Manipulation’ of Crystal Structure by Methylthiolation Enabling Ultrahigh Mobility in a Pyrene-Based Molecular Semiconductor,” *Advanced Materials* 33, no. 32 (2021) : 2102914., <https://doi.org/10.1002/adma.202102914>.
- 6) Shohei Kumagai, et al., “Nitrogen-Containing Perylene Diimides: Molecular Design, Robust Aggregated Structures, and Advances in n-Type Organic Semiconductors,” *Account of Chemical Research* 55, no. 5 (2022) : 660-672., <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.1c00548>.
- 7) Satoru Inoue, et al., “Emerging Disordered Layered-Herringbone Phase in Organic Semiconductors Unveiled by Electron Crystallography,” *Chemistry Materials* 34, no. 1 (2022) : 72-83., <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.1c02793>.
- 8) Craig P. Yu, et al., “Mixed-Orbital Charge Transport in N-Shaped Benzene- and Pyrazine-Fused Organic Semiconductors,” *Journal of the American Chemical Society* 144, no. 25 (2022) : 11159-11167., <https://doi.org/10.1021/jacs.2c01357>.
- 9) Naoya Aizawa, et al., “Delayed fluorescence from inverted singlet and triplet excited states,” *Nature* 609, no. 7927 (2022) : 502-506., <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05132-y>.
- 10) Geoffrey W. Coates and Yutan D. Y. L. Getzler, “Chemical recycling to monomer for an ideal, circular polymer economy,” *Nature Reviews Materials* 5 (2020) : 501-516., <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0190-4>.
- 11) Yuki Kametani, et al., “Unprecedented Sequence Control and Sequence-Driven Properties in a Series of AB-Alternating Copolymers Consisting Solely of Acrylamide Units,” *Angewandte Chemie International Edition* 59, no. 13 (2020) : 5193-5201., <https://doi.org/10.1002/>

anie.201915075.

- 12) Kentaro Shibata, et al., “Homopolymer-block-Alternating Copolymers Composed of Acrylamide Units: Design of Transformable Divinyl Monomers and Sequence-Specific Thermoresponsive Properties,” *Journal of the American Chemical Society* 144, no. 22 (2022): 9959-9970., <https://doi.org/10.1021/jacs.2c02836>.
- 13) Jinghui Yang and Yan Xia, “Mechanochemical generation of acid-degradable poly (enol ether) s,” *Chemical Science* 12, no. 12 (2021) : 4389-4394., <https://doi.org/10.1039/d1sc00001b>.
- 14) Benjamin R. Elling, Jessica K. Su and Yan Xia, “Degradable Polyacetals/Ketals from Alternating Ring-Opening Metathesis Polymerization,” *ACS Macro Letters* 9, no. 2 (2020) : 180-184., <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.9b00936>.
- 15) John D. Feist and Yan Xia, “Enol Ethers Are Effective Monomers for Ring-Opening Metathesis Polymerization: Synthesis of Degradable and Depolymerizable Poly (2,3-dihydrofuran),” *Journal of the American Chemical Society* 142, no. 3 (2020) : 1186-1189., <https://doi.org/10.1021/jacs.9b11834>.
- 16) Peyton Shieh, et al., “Cleavable comonomers enable degradable, recyclable thermoset plastics,” *Nature* 585, no. 7823 (2020) : 542-547., <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2495-2>.
- 17) Francis O. Boadi, et al., “Alternating Ring-Opening Metathesis Polymerization Provides Easy Access to Functional and Fully Degradable Polymers,” *Macromolecules* 53, no. 14 (2020) : 5857-5868., <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.0c01051>.
- 18) Yifei Liang, et al., “Degradable Polyphosphoramidate via Ring-Opening Metathesis Polymerization,” *ACS Macro Letters* 9, no. 10 (2020) : 1417-1422., <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.0c00401>.
- 19) Suong T. Nguyen, et al., “Depolymerization of Hydroxylated Polymers via Light-Driven C-C Bond Cleavage,” *Journal of the American Chemical Society* 143, no. 31 (2021) : 12268-12277., <https://doi.org/10.1021/jacs.1c05330>
- 20) Brooks A. Abel, Rachel L. Snyder and Geoffrey W. Coates, “Chemically recyclable thermoplastics from reversible-deactivation polymerization of cyclic acetals,” *Science* 373, no. 6556 (2021) : 783-789., <https://doi.org/10.1126/science.abh0626>.
- 21) Yi Lu, et al., “Mechanochemical Reactions of Bis (9-methylphenyl-9-fluorenyl) Peroxides and Their Applications in Cross-Linked Polymers,” *Journal of the American Chemical Society* 143, no. 42 (2021) : 17744-17750., <https://doi.org/10.1021/jacs.1c08533>.
- 22) Sota Kato, et al., “Crystallization-induced mechanofluorescence for visualization of polymer crystallization,” *Nature Communications* 12, no. 1 (2021) : 126., <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20366-y>.
- 23) Takuya Yamakado and Shohei Saito, “Ratiometric Flapping Force Probe That Works in Polymer Gels,” *Journal of the American Chemical Society* 144, no. 6 (2022) : 2804-2815., <https://doi.org/10.1021/jacs.1c12955>.
- 24) Ryota Kotani, et al., “Bridging pico-to-nanonewtons with a ratiometric force probe for monitoring nanoscale polymer physics before damage,” *Nature Communications* 13, no. 1 (2022) : 303., <https://doi.org/10.1038/s41467-022-27972-y>.
- 25) Maxim Ratushnyy and Aleksandr V. Zhukhovitskiy, “Polymer Skeletal Editing via Anionic

2.5

俯瞰区分と研究開発領域
物質と機能の設計・制御

Brook Rearrangements,” *Journal of the American Chemical Society* 143, no. 43 (2021) : 17931-17936., <https://doi.org/10.1021/jacs.1c06860>.

2.5

俯瞰区分と研究開発領域
物質と機能の設計・制御