

生物に倣うスクラップ&ビルドの超分子建築

—進行波による人工ソフト材料の空間制御—

概要

京都大学大学院工学研究科 浜地格 教授（研究当時、現：同大学エネルギー理工学研究所 特任教授）、同 窪田亮 講師（研究当時、現：九州大学大学院工学研究院 教授）、同 生田優力 修士課程学生（研究当時）同 鳥越祥吾 博士課程学生（研究当時）らの研究グループは、生物の細胞が自ら組織や器官を作り出す形態形成の仕組みに倣い、人工分子が「スクラップ&ビルド（分解と再構築）」を繰り返しながら、自律的に複数種類のマクロ（ミリ～センチメートル）スケールの複雑な空間構造を組み上げる超分子建築の新技术を開発しました。従来の分子自己組織化は、熱力学的に、安定な均一で静的な構造を作るのが限界でした。本研究では、ペプチドファイバーからなるヒドロゲル内に界面活性剤を拡散させることで、濃度勾配に応じた非平衡な分解・再構築サイクルを誘発しました。このサイクルが「進行波」としてゲル内を繰り返し伝播することで、性質の異なる複数種のファイバーが年輪状に分化配置された、マクロな空間パターンを自律的に制御構築することに成功しました。本成果は、複雑で高度な機能を持つ次世代ソフトマテリアル創製に向けた新たな設計指針となることが期待されます。本研究成果は、2026年8月24日午前10時（英国夏時間）に英国の国際学術誌「*Nature Communications*」にオンライン掲載されます。



ファイバー構造の破壊と再構築からなる「スクラップ&ビルド」によるマクロスケールでの構造体形成

作成者：窪田亮（ハンマーとドライバーの絵は Google Gemini 3.5 Flash）。

背景の葛飾北斎の浮世絵：public domain,

<https://www.metmuseum.org/art/collection/search/39799> から引用

1. 背景

ナノスケールの分子をボトムアップで組み立てて目的の構造を作る「分子の自己組織化^{注1}」は、次世代材料開発において不可欠な戦略です。しかし、従来の人工システムは熱力学的な制御に頼って作られるため、均一な構造になりやすく、生物の組織のように複雑な空間配置（空間複雑性）を持つ材料を自律的に構築することは困難でした。

生物の発生プロセス（形態形成^{注2}）では、シグナル分子（モルフォゲン^{注3}）の濃度勾配と、エネルギーを消費しながら動的に変化する「非平衡プロセス」を巧みに組み合わせることで、細胞を適切な場所に分化・配置させて、ミクロからマクロスケールの高度に秩序立った組織や器官を形成します。このように生物に倣い、ヒドロゲルのような人工の柔らかい材料（ソフトマテリアル）において、複数の異なる超分子構造体をマクロスケール（ミリ～センチメートル単位）で自在に空間制御配置するボトムアップの手法は、これまで広く未開拓のままでした。

2. 研究手法・成果

本研究グループは、生物の形態形成から着想を得て、「超分子形態転移（Supramolecular morphological transition）」という新たな概念を実証しました。具体的には、アニオン性の低分子ペプチドモノマーがあらかじめ自己組織化したヒドロゲルを構築し、その中心からカチオン型界面活性剤（DTAC）を拡散させました。界面活性剤が拡散する過程で、その濃度勾配に応じて、元のペプチドファイバーが一度完全に「分解」され、その後界面活性剤を巻き込みながら組成の異なる新たなファイバーへと「再構築」されるという、非平衡な「スクラップ&ビルド^{注4}」ダイナミクスが生じることを発見しました(図 a)。

このスクラップ&ビルドのダイナミクスが界面活性剤の拡散と結びつくことで、波紋のように外側へ伝わる「進行波^{注5}」が繰り返し発生します(図 b, c)。この進行波の伝播にともない、組成や太さの異なる複数種のファイバーが自律的に分化し、最終的に4重の不連続な年輪状の同心円パターン（直径約14ミリメートル）として美しく空間配置（超分子建築）されることを突き止めました。

さらに、この進行波が伝播している最中に、一時的な低温（4℃）パルスを与えて特定の位置に新しい年輪模様を刻み込んだり、性質の異なる2種類のカチオン型界面活性剤を別々の場所から同時に拡散させて2つの進行波を衝突させることで、衝突境界に全く新しい複雑な融合パターンを構築したりすることも実証しました。これにより、外部刺激や因子の干渉によって超分子建築の空間パターンを柔軟に制御・変調できる可能性が示されました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究は、非平衡なスクラップ&ビルドの進行波を利用することで、ナノ分子の設計をマクロスケールな柔らかい超分子材料の空間制御構築へと直結させる新たな道を拓きました。

この自律的な超分子建築技術を発展させることで、将来的に生体組織のように微視的な細胞（分子）の分化と巨視的な配置が高度に制御された、次世代の複雑で機能的なバイオマテリアルや、スマートソフトマテリアルの創製へと波及することが期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

科学技術振興機構（JST） 戦略的創造研究推進事業 ERATO

課題名：浜地ニューロ分子技術プロジェクト

課題番号：JPMJER1802

科学技術振興機構（JST） 創発的研究支援事業

課題名：離合集散を繰り返す超分子ヒドロゲル材料

課題番号：JPMJFR2328

日本学術振興会（JSPS） 科学研究費助成事業 特別推進研究

課題名：生体分子夾雑の有機化学の開拓

課題番号：JP23H05405

日本学術振興会（JSPS） 科学研究費助成事業 基盤研究(B)

課題名：階層的自己組織化を鍵とする生き物のような超分子マテリアル創発

課題番号：JP22H02195

日本学術振興会（JSPS） 科学研究費助成事業 基盤研究(B)

課題名：アニオン超分子ワールド：細胞質に学ぶ多成分系自己組織化と協働機能の学理

課題番号：JP26K01632

<用語解説>

^{注1} 自己組織化：分子が水素結合などの非共有結合性の弱い相互作用によって自発的に集まり、特定の規則正しい構造を作り出す現象。

^{注2} 形態形成：生物の発生過程において、幹細胞などが位置情報に基づいて分化し、複雑かつ秩序立った組織や器官を作り上げるプロセスのこと。

^{注3} モルフォゲン：モルフォジェネシスにおいて、濃度勾配を形成することで細胞の分化やパターンニングに位置情報を提供するシグナル分子。本研究では陽イオン性界面活性剤がその役割を担った。

^{注4} スクラップ&ビルド：本研究においては、既存の構造（ペプチドファイバー）が環境の変化に応じて自発的に「分解（スクラップ）」され、別の構成成分を取り込んで新たな構造へと「再構築（ビルド）」される非平衡な動的プロセスのこと。

^{注5} 進行波：空間を一定の速度で伝わっていく波のこと。本研究では、界面活性剤の拡散にともなってファイバーの分解と再構築の境界が波紋のようにゲル内を伝播していく現象を指す。

<研究者のコメント>

「本研究は、生きた細胞の複雑な『かたちづくり』に魅了され、それを人工的な分子の集まりで再現したいという思いからスタートしました。実験中に予想外の美しい同心円模様が現れ、動的にパターンが変化していく様子を顕微鏡で観察した時の驚きは今でも忘れられません。この発見が、将来的に生体組織のように精巧で機能的な新しいソフトマテリアルの開発へと繋がるよう、今後も研究を続けます。（窪田 亮）」

<論文タイトルと著者>

タイトル：Supramolecular Morphological Transition Driven by Nonequilibrium Break-and-Build Self-Organisation (「壊して作る」非平衡自己組織化によって駆動される超分子形態転移)

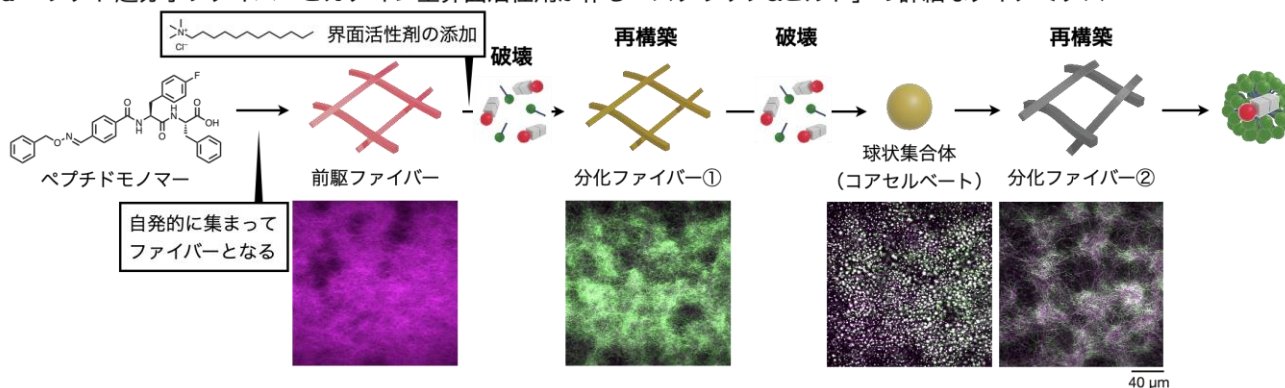
著者：Ryou Kubota (窪田亮), Yuriki Ikuta (生田優力), Shogo Torigoe (鳥越祥吾), Naoki Kanazawa (金澤直輝), Itaru Hamachi (浜地格)

掲載誌：Nature Communications

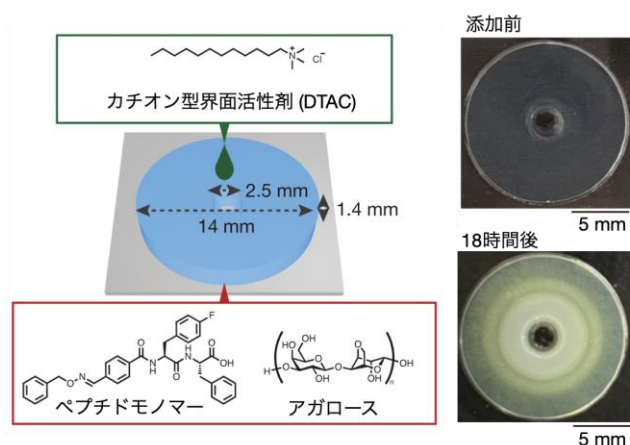
DOI：10.1038/s41467-026-76336-3

<参考図表>

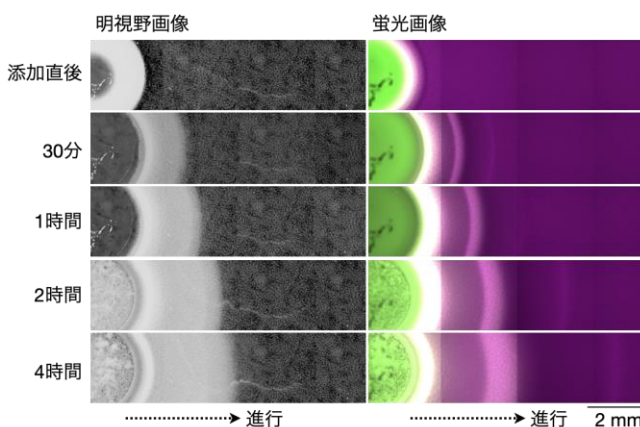
a ペプチド超分子ファイバーとカチオン型界面活性剤が作る「スクラップ&ビルド」の詳細なダイナミクス



b ヒドロゲルの空間模様作成の実験手順と写真



c 空間模様が進行波のように伝播する様子



a. 「スクラップ&ビルド」の詳細なダイナミクスと各状態における共焦点顕微鏡画像。**b.** ヒドロゲルの空間模様形成の実験手順と写真。**c.** 空間模様が進行波となって形成する様子。ペプチドをピンク、界面活性剤を緑で蛍光染色して表示している。