

異方的な力学特性を示す超分子材料の開発に成功

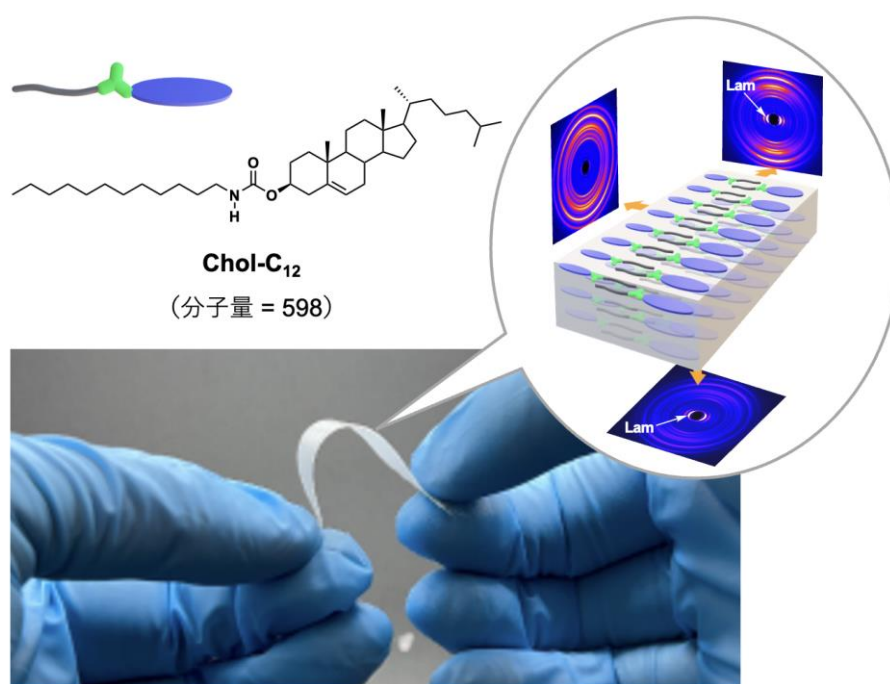
—分解性やリサイクル性に優れた新材料の創出へ、新しいアプローチ—

概要

現代社会はプラスチックやゴムなどに代表される高分子材料に支えられています。一方で、持続可能な社会の実現に向けて、従来の高分子材料を補完する新たな材料の開発が求められています。近年、分子量の小さな低分子化合物のみから構成される「超分子材料」が、分解性やリサイクル性に優れた次世代材料として注目を集めています。しかし、これまでの超分子材料の多くはアモルファス性（非晶質）の物質であり、高分子材料のように結晶構造や分子配向を利用して材料特性を制御することは困難でした。

今回、京都大学大学院工学研究科の Cheng Chia-Hsin（チェン チャーシン）博士課程学生、渡邊雄一郎 助教、杉安和憲 教授らの研究グループは、東京科学大学リサーチインフラ・マネジメント機構の梶谷孝 上席技術専門員、物質・材料研究機構の佐光貞樹 主幹研究員との共同で、コレステロール由来の低分子化合物からなる結晶性超分子材料を開発しました。さらに、液晶状態を利用した成形加工によってセンチメートルスケールの分子配向を実現し、力学特性に異方性を付与することに成功しました。本成果は、低分子のみからなる超分子材料において、加工による高次構造と物性の制御を可能にする新たな設計指針を示すものであり、持続可能な次世代材料の開発への貢献が期待されます。

本研究成果は、2026 年 9 月 11 日に国際学術誌「*Nature Communications*」にオンライン掲載されました。



分子量の小さな低分子化合物のみから構成される、結晶性の「超分子材料」

（杉安研究室 Cheng Chia-Hsin 作成）

1. 背景

近年、環境負荷低減の観点から、石油由来の高分子材料に代わる持続可能な材料の開発が求められています。なかでもリサイクル性や自己修復性に優れた超分子材料[注 1]が大きな注目を集めています。従来の高分子材料は、強い共有結合で構築されています。一方、超分子材料は、可逆的な非共有結合性の分子間相互作用によって形成されており、容易に分解・再構築できるため、材料の回収や再利用が可能です。

実用化されている高分子材料の多くは結晶性の物質であり、材料内部における結晶ドメインの分布や配向を制御することによって、優れた力学特性や異方的な機能を発現します。一方、これまでに報告されてきた超分子材料の多くは、ゴム状やガラス状のアモルファス性（非晶質）の物質でした。高分子材料と同様に超分子材料で結晶構造や高次構造を制御できれば、材料特性を大きく向上できると期待されます。

2. 研究手法・成果

研究グループは、天然に存在するコレステロール[注 2]をもとに液晶性の化合物を合成しました（**Chol-C₁₂**：図 1a）。**Chol-C₁₂**を溶融状態から冷却すると準安定な液晶相を形成し、その後 10 分程度かけて結晶化することを見いだしました（図 1c）。この結晶構造は、カルバメート[注 3]部位の間に働く水素結合[注 4]によって安定化されていることがわかっています。

準安定な液晶状態は室温で十分な流動性を有しており、圧縮成形や押出し成形が可能です（図 1d）。この際、液晶状態のまま一定時間室温で保持して、結晶化をある程度まで進行させた後に成形加工を行うと、形成された結晶核が成形の過程で流動配向することを見いだしました。その後、この配向を維持したまま材料全体が結晶化することで、自立性のシート状物質が得られました（図 1e,f）。得られたシートの弾性率（ヤング率）[注 5]は 270 MPa に達し、低分子のみから構成される超分子材料として優れた力学特性を示しました。また、分子配向を反映して異方的な力学特性を示すことも明らかとなりました（図 1b）。一方、結晶核の形成前に成形加工を行った場合には、このような配向構造や異方的な力学特性は確認されませんでした。このことから、超分子材料においても、結晶構造や高次構造の制御が材料特性に影響することが明らかとなりました。

本研究は、高分子材料の創出で用いられてきた成形加工プロセスを、超分子材料に適用することで新しい材料を開発できる可能性を示しています。分解性やリサイクル性に優れた次世代超分子材料の創出につながることを期待されます。

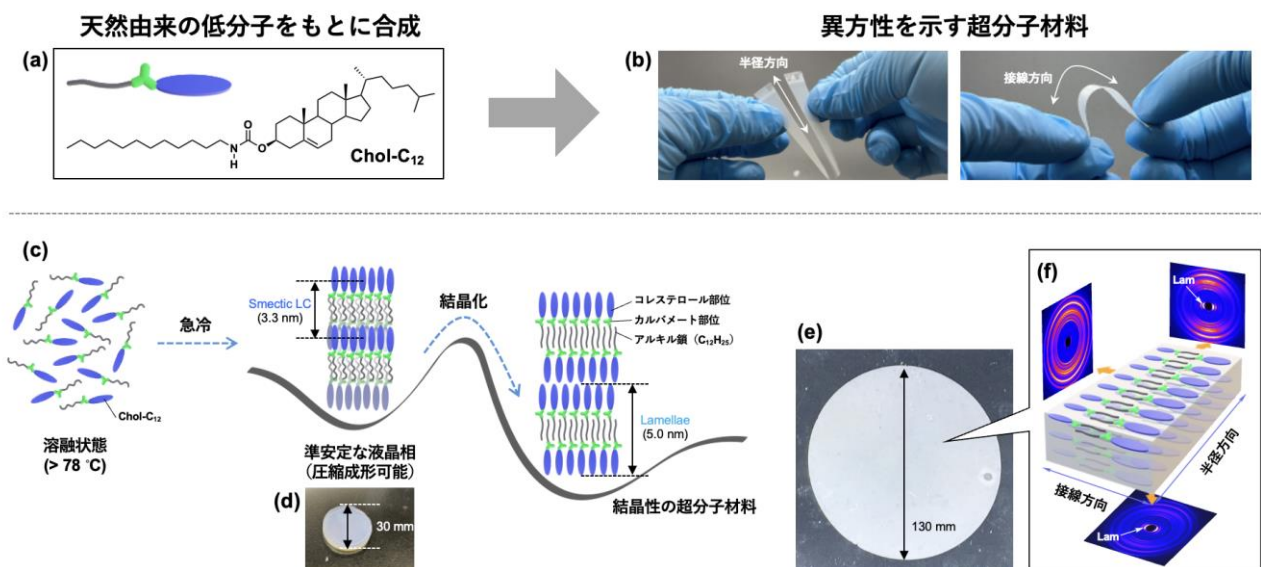


図 1 今回開発した結晶性の超分子材料

3. 波及効果、今後の予定

本研究は、高分子を用いることなく、低分子化合物のみからなる超分子材料においても、成形加工の条件を最適化することで高次構造や力学特性を制御できることを示したものです。準安定液晶状態を経由する成形加工プロセスの活用は、さまざまな超分子材料への展開が見込まれます。また、材料の再成形や再利用が可能であることから、持続可能な次世代材料の創出への貢献も期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、科学技術振興機構（JST） 戦略的創造研究推進事業 CREST（JPMJCR23L2）、ACT-X（JPMJAX23DM）、文部科学省 科学研究費助成事業（JP23K17941, JP23K23402, JP24H01712）の支援を受けて実施しました。

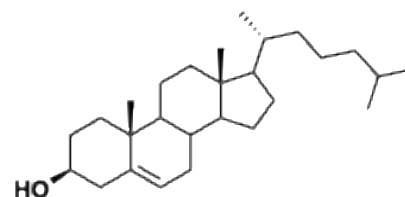
<用語解説>

[注 1] 超分子材料：

分子間の弱い相互作用に基づいて設計される材料で、対象とする物性や機能は多岐にわたる。リサイクル性の高さなどからサステイナブルな次世代材料として期待されている。有名な例として自己修復材料がある。これは、材料に生じた損傷が自発的に修復されるものであり、分子間相互作用の可逆性を利用して実現された材料である。

[注 2] コレステロール（右図）：

生体膜の必須構成物質であり、細胞内のさまざまなプロセスに関わる主要生体分子の一つ。液晶や医薬品などに広く利用されている。

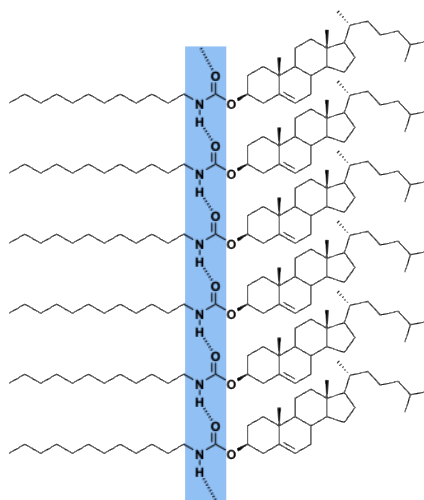


[注 3] カルバメート：

カルバミン酸エステル（ $R_1NH-CO-OR_2$ ）のことであり、ウレタンとも呼ばれる。

[注 4] 水素結合：

水素原子を介した相互作用。電気陰性度の大きな原子に結合した水素原子と、近傍に位置する窒素原子や酸素原子などが引力的に相互作用する。**Chol-C₁₂** の場合、下図のようにカルバメート部位を介して水素結合する（下図の青色の部分）。



[注 5] 弾性率（ヤング率）：

材料を引っ張ると伸長する。このときの力を材料の断面積で割って得られる値を「応力」といい、もとの長さに対して伸長した長さの割合を「歪み」という。弾性率（ヤング率）は、応力を歪みで割った値として求められ、この値が大きいほど材料が変形しにくいことを示す。

<研究者のコメント>

（Cheng Chia-Hsin（チェン チャーシン） 博士課程学生） 杉安先生から「分子性結晶の高次階層構造を制御する」という研究計画を伺った当初は、どのように実現すればよいのか見当が付きませんでした。杉安先生、渡邊先生と議論を重ね、佐光先生（物質・材料研究機構）とも相談しながら、さまざまな分子構造と加工法を検討しました。その過程で、急冷後に 4 分間静置してからプレスした **Chol-C₁₂** の自立膜が、静置せずにプレスした膜とは異なり、竹が縦に裂けるように特定の方向に沿って破壊されることに気づきました。梶谷先生（東京科学大）のご協力のもと、X 線回折測定を行った結果、膜の内部に巨視的な分子配向が実現されていることを突き止めました。わずかな加工条件の違いから予想外の結果が生まれたことに強い興奮を覚え、その要因を一つずつ解き明かしていく過程に、研究の魅力を感じました。今後は、本研究で提案したプロセス技術を多様な分子系へと展開し、超分子材料の階層構造制御と物性向上に取り組んでいきたいと考えています。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Macroscopically anisotropic supramolecular materials prepared from an undercooled liquid-crystalline phase of a cholesterol-based low-molecular-weight compound

著 者：Cheng Chia-Hsin, 渡邊雄一郎, 梶谷孝, 佐光貞樹, 杉安和憲

掲 載 誌：Nature Communications DOI：10.1038/s41467-026-77392-5