

	研究代表者	九州大学・情報基盤研究開発センター・准教授 樋口 祐次（ひぐち ゆうじ）	研究者番号：30613260
	研究課題情報	課題番号：26B206 キーワード：複雑系階層的力学、結晶性高分子、複合材料、高分子構造・物性、界面	研究期間：2026年度～2028年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

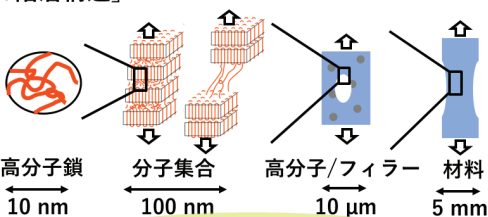
温室効果ガスの排出を実質ゼロにするカーボンニュートラル社会の実現に向けて、軽量高強度で加工性の高いプラスチックの電子・機械部品やモビリティ部材等の構造材料への利用が進んでいる。高強度化など所望の力学特性を発現させるために、結晶性高分子にフィラー（充填剤）を添加した複合材料が多く用いられている。

この高分子/フィラー複合材料の開発が進んでいるが、作製条件は多様化かつ複雑化している。高分子/フィラー複合材料は個々の作製条件からだけでは力学特性の理解が難しい「**複雑系**」であり、経験に基づく開発が行われている。一方で、**力学特性**を向上させる必要条件を解明する学理構築は取り残されたままである。

階層構造をもつ結晶性高分子は、スケール間の構造や物性の相関関係を解き明かす取り組みが古くから行われている。ナノとマクロの構造と力学特性が個別に解明されているものの、構造変化や力学特性のスケール間相互作用の理解には至っていないことが課題として残されている。また、ナノメートルスケールにおける高分子の配向性（高分子鎖が並んでいること）変化の理解を基盤とすることの重要性が指摘されているものの、解決には至っていない。これは、各空間スケールで個別に研究が行われており、力学特性の支配因子をナノメートルスケールに遡ることができないことを意味する。

本領域では、ボトムアップで**結晶性高分子/フィラー複合材料の力学特性**を理解する。界面のはく離・空孔生成（穴が生じること）、ナノ、マイクロ、マクロの各空間スケールにおける変形・破壊プロセスの解明と、各スケールの力学特性の相関を明らかにし、ナノスケールの力学特性からマクロな力学特性を予測する。異種材料の界面の特徴を解明・制御し、階層的構造に対してナノからマクロまで力学特性の相関をつなぐ学理構築に依拠しつつ、材料開発・設計に展開する「**複雑系階層的力学**」を創成する。計算科学、実験力学、材料創製が連携することで、世界に先駆けた物質・材料学における学術変革をもたらす。

「階層構造」

ナノからマクロスケールの力学特性をつなぐ
複雑系階層的力学

「複雑系」



図1 本領域で提案する「複雑系階層的力学」

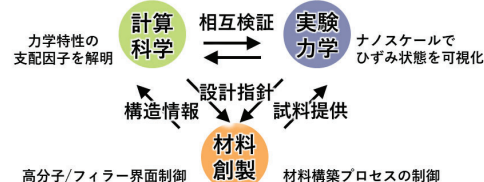


図2 本領域研究の連携

●用語の解説

結晶性高分子（半結晶性高分子）：階層的な構造をもつ結晶化する高分子。

ナノ、マイクロ（ミクロ）、マクロ：ナノメートルは十億分の一メートル、マイクロメートルは百万分の一メートル、マクロは我々の身の回りの大きさ。

●日常生活との接点

プラスチックの力学特性：現象としてプラスチックの割れやすさ、変形しやすさ、など。
軽量高強度で加工性の高いプラスチック：軽量な自動車部品など。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

結晶性高分子/フィラー複合材料における高分子の配向性やその変化プロセスに着目し、ナノからマクロスケールの構造・力学特性の相関を解明することで、複雑系階層的力学の学理を構築する。高分子の成形プロセスやフィラーの化学修飾を行う高分子科学・界面科学、巨視的性質を微視的な観点から研究する統計物理学、マイクロメートルとマクロスケールの力学特性の相関に着目した材料開発研究が連携・融合することで、結晶性高分子/フィラー複合材料の力学特性の支配因子をナノメートルスケールに遡る。これにより、学理不在の経験的な開発からの脱却と、別々の専門分野で個別に行われてきたナノからマクロスケールの研究の統合を実現し、世界に先駆けた物質・材料学における学術変革をもたらす。

●A01 計算科学

樋口 祐次（代表・九大）、上原 恵理香（分担・阪大）、大矢 豊大（分担・都立大）

分子シミュレーションを用いてナノスケールの変形・破壊プロセスを解明し、力学特性の支配因子を明らかにする。ナノミクロの構造と力学特性の相関を解明する分子シミュレーション技術を確立する。

●A02 実験力学

山本 剛（代表・東北大）、宮田 智衆（分担・東北大）

透過型電子顕微鏡（TEM）を用いてナノスケールでひずみ（変形の度合い）状態を可視化する技術を確立する。ミクロマクロ解析モデルを構築し、マクロスケールの力学特性を予測する。

●A03 材料創製

榊原 圭太（代表・産総研）、神内 直人（分担・産総研）、引間 悠太（分担・産総研）

高分子/フィラー複合材料の構造における界面や成形プロセスの影響を解明し、材料構築プロセスの制御技術を確立する。顕微鏡観察と散乱測定により、作製した試料の構造情報を明らかにする。



図3 研究体制

●期待される波及効果、発展性

ナノスケールにおける異種物質の界面相互作用が階層構造を経てマクロな物性へと影響を与える現象は、高分子材料やソフトマターに加え、セラミックスや金属に対しても普遍的であり、本領域の成果は、高分子科学・ソフトマター物理学だけではなく材料科学全般の発展へと寄与する。

経験的な開発が行われていた高分子/フィラー複合材料に対して、材料設計指針を提案することで、材料の耐久性向上、開発や資源のコストカット、廃棄木材の利用や廃棄物のリサイクルプロセスへの展開など将来の社会実装を行うための材料研究が格段に進歩する技術を提供できる。

複雑系階層的構造をより大きな言葉として再定義し、異種界面が存在し、階層的な構造をもつ細胞や人工細胞の変形プロセスに関して本研究領域で得られた知見との共通性や違いを明らかにする。

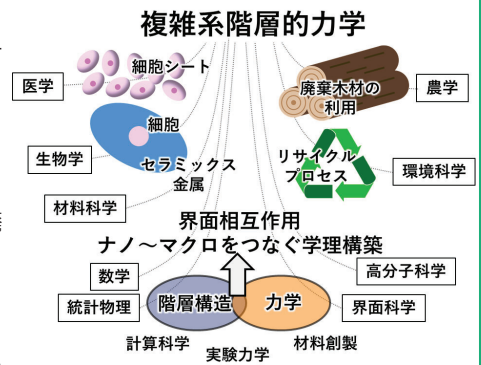


図4 より大規模な新興・融合領域の形成