



柔らかい物質と堅い物質を混ぜると 強靱な物質ができる理由を理論的・数値的に解明

～多様な強靱材料開発への貢献に期待～

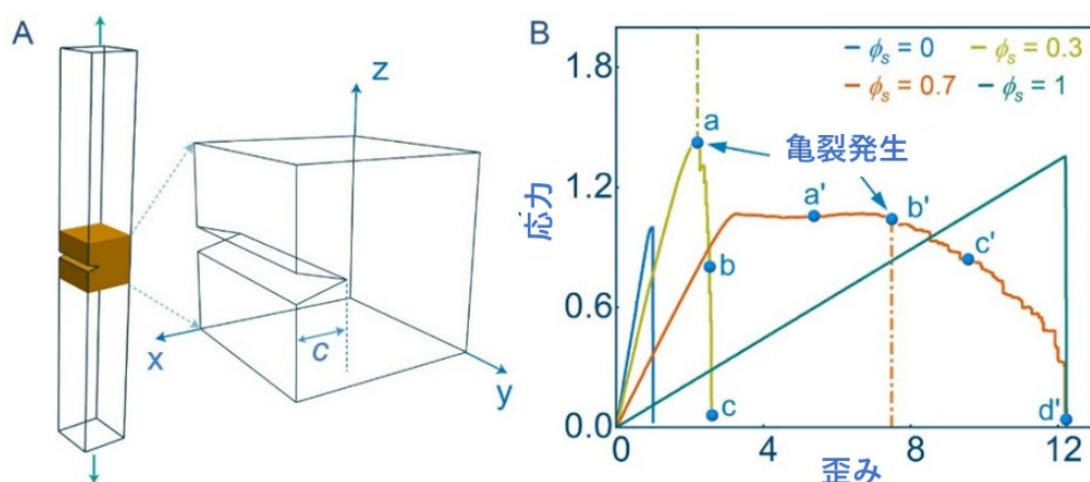
ポイント

- ・柔らかい物質と堅い物質を混ぜると、堅くて壊れづらい強靱な物質ができる仕組みを解明。
- ・強靱な物質を作るための最も有効な柔らかい物質と堅い物質の混合比を明らかに。
- ・強靱な人工軟骨、ゴム、セラミックスなどの多様な材料開発への貢献が期待。

概要

北海道大学大学院先端生命科学研究院 先端融合科学研究部門の田 富成研究員と龔 剣萍教授、富山大学学術研究部理学系数理情報学プログラムの佐藤勝彦特命教授らの研究グループは、物質が強度（堅さ）と靱性（壊れづらさ）とを同時に持つための仕組みを、線形弾性体モデルと数値計算とによって解き明かすことに成功しました。この理論によって、何故、柔らかい物質と堅い物質とを混ぜると強靱な物質^{*1}ができるのか、またどのような比で混ぜると最も強靱になるのかということが明らかになりました。得られた知見によって様々な強靱な物質を作成する工程が著しく簡略化される可能性があります。強靱な人工軟骨、ゴム、セラミックス材料などの作成に繋がり、再生医療から工業材料に至るまで、広範な分野への貢献が期待されます。

なお、本研究成果は日本時間 2025 年 7 月 3 日（木）公開の「The Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)」にオンライン掲載されました。



(A) 混合材料の破壊計算に用いるサンプル形状。

(B) 混合材料における柔らかい要素の体積分率 (ϕ_s) 変化による応力—歪曲線の変化。柔らかい要素の体積分率が 0.7 の混合材料が延性破壊^{*2}をしている。

【背景】

堅くて破壊にも強い強靱な物質を作ることは、材料科学において最も重要なテーマの一つですが、一般に物質を堅くすると亀裂に対して脆くなる傾向があり、強度がありかつ破壊にも強い物質を作ることは最も難しい課題の一つとなっています。これまでの経験や、また自然界にある強靱な物質（骨や真珠層）の解析によって、強靱な物質を作るには柔らかい物質と堅い物質とを混ぜることが有効であることが指摘されていました。しかしながら、何故、柔らかい物質と堅い物質とを混ぜると物質が強靱になるのか？柔らかい物質と堅い物質を混ぜるだけで強靱な物質ができるのか？各要素にどのような性質が必要なのか？どのような比で混ぜると最も強靱な物質になるのか？などの基礎的な問いに対する答えは得られていませんでした。

【研究手法】

本研究では、柔らかい弾性要素と堅い弾性要素がランダムに混合した線形弾性体モデルを構築しました。このモデルには、たった三つの重要な変数を設定するだけです。

- 柔らかい要素対堅い要素の弾性率比 (γ_E)
- 柔らかい要素対堅い要素の極限弾性エネルギー密度比 (γ_W)
- 柔らかい要素の全体に占める体積分率 (ϕ_s)

この三つの要素を様々に組み合わせ、大規模なコンピュータシミュレーションを行うことで、このような混合材料がどのように破壊していくのかを、網羅的に調査しました。

【研究成果】

結果は以下の通りです（図1を参照）。

(i) 堅い弾性要素の割合が多い場合には脆性破壊^{*3}が生じ、柔らかい弾性要素の割合を増やすと延性破壊が生じます。この脆性-延性遷移が起こる臨界的な柔らかい要素の体積分率 (ϕ_{s^c}) は、両弾性要素の物性値比 (γ_E 及び γ_W) から決定されます。

(ii) 延性破壊が支配的な領域において、混合物質を最も強靱にする柔らかい要素の体積分率 (ϕ_{s^m}) が存在し、その値は柔らかい要素と堅い要素の極限弾性エネルギー密度比 (γ_W) のみに依存します。

これらの結果 (i)、(ii) は本研究により初めて明らかにされたものです。本モデルは、シンプルな弾性要素から構成される混合材料においても脆性-延性遷移が生じることを示し、強靱材料の破壊機構を理解するための強力なツールとなります。また、混合材料の合理的な設計に向けた重要な知見を提供します。

【今後への期待】

強靱な物質を作るということはこれまでは研究者の経験や勘によってなされてきていましたが、今回の研究によって、どのような性質の物質をどのような比で混ぜれば強靱な物質ができあがるのかに関する理論的な指標が与えられました。その情報によって強靱な物質を作る工程が劇的に簡略化される可能性があります。再生医療では強靱な物質で作られた人工軟骨などが必要ですが、その作成プロセスも劇的に進む可能性があります。今回の研究は線形弾性体に限ったものですが、現実の物質をより反映した非線形弾性体に拡張することは可能であり、破壊現象に関するより精度の高い理論的予想を可能にしています。

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費 (JP23KF0002、JP22H04968、JP22K21342、JP21H05310) の助成を受けたものです。

論文情報

論文名 Fundamental toughening landscape in soft-hard composites: Insights from a minimal Framework (ソフト-ハード複合材料における基本的な強化メカニズム：最小限のフレームワークからの洞察)

著者名 田 富成¹、佐藤勝彦^{2,*}、Yong Zheng³、Feixue Lu⁴、龔 劍萍^{1,4*} (¹北海道大学大学院先端生命科学研究院、²富山大学学術研究部理学系数理情報学プログラム、³西安交通大学機械工程学院、⁴北海道大学総合イノベーション創発機構化学反応創成研究拠点(WPI-ICReDD)、*責任著者)

雑誌名 The Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS、米国科学アカデミー紀要)

D O I 10.1073/pnas.2506071122

公表日 2025 年 7 月 3 日 (木) (オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院先端生命科学研究院 教授 龔 劍萍 (ぐんちえんぴん)

T E L 011-706-9011 メール gong@sci.hokudai.ac.jp

富山大学学術研究部理学系 特命教授 佐藤勝彦 (さとうかつひこ)

T E L 076-445-6558 メール ksato@sci.u-toyama.ac.jp

配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

富山大学総務部総務課広報・基金室 (〒930-8555 富山市五福 3190)

T E L 076-445-6028 F A X 076-445-6063 メール kouhou@u-toyama.ac.jp

【参考図】

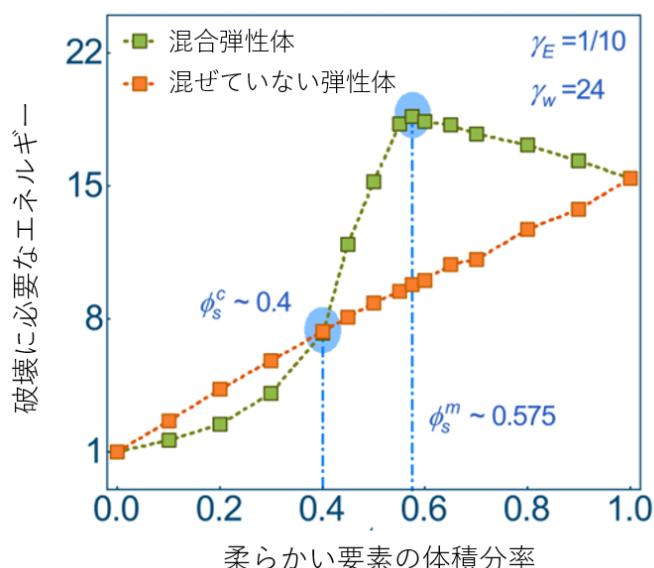


図 1. 混合物質の柔らかい要素の体積分率と破壊に必要なエネルギーの関係図。脆性-延性遷移が起こる臨界的な柔らかい要素の体積分率 ϕ_s^c は、両弾性要素の物性値比 (γ_E 及び γ_w) から決定されます。混合物質を最も強靱にする柔らかい要素の体積分率 ϕ_s^m は柔らかい要素と堅い要素の極限弾性エネルギー密度比 (γ_w) のみに依存します。

【用語解説】

- *1 強靱な物質 … 強度と靱性を兼ね備え、物質に亀裂が入ったとしても簡単には壊れない物質のこと。骨や真珠層などがこれに当たる。
- *2 延性破壊 … 材料に外力を掛けた時に、大きな塑性変形を伴って破壊に至る現象のこと。ビニール袋の破れなどはこれに当たる。
- *3 脆性破壊 … 材料が外力を掛けられた時に塑性変形をほとんど伴わずに、急激に破壊する現象のこと。ガラスの破壊などはこれに当たる。

【WPI-ICReDD について】

ICReDD (Institute for Chemical Reaction Design and Discovery、アイクレッド) は、文部科学省国際研究拠点形成促進事業費補助金「世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)」に採択され、2018年10月に本学に設置されました。WPIの目的は、高度に国際化された研究環境と世界トップレベルの研究水準の研究を行う「目に見える研究拠点」の形成であり、ICReDDは国内にある18の研究拠点の一つです。

ICReDDでは、拠点長の下、計算科学、情報科学、実験科学の三つの学問分野を融合させることにより、人類が未来を生き抜く上で必要不可欠な「化学反応」を合理的に設計し制御を行います。さらに化学反応の合理的かつ効率的な開発を可能とする学問、「化学反応創成学」という新たな学問分野を確立し、新しい化学反応や材料の創出を目指しています。

