

2026年7月7日

長岡技術科学大学

多孔質材料の弱点である低い変形能力を克服

－「空隙ネットワーク」の制御手法を新開発、医療・航空分野への応用に期待－

ポイント

- 金属材料の内部にある微小な穴（空隙）のつながりをネットワークとして捉え、その配置を最適化する独創的な設計手法を提案。
- 空隙ネットワークの制御により、破壊せずに引き伸ばしできる性質（延性）を向上。
- 空隙の「量」ではなく「配置」による機械的特性の制御手法として、材料設計の常識の変革に期待。

概要

長岡技術科学大学工学研究科システム安全系の大塚雄市准教授、大学院工学研究科技術科学イノベーション専攻の豊場亮太（5年一貫制博士課程 5年大学院生、岐阜工業高等専門学校出身）らの研究グループは、材料内部に分散する空隙クラスター（集団）の相互作用を「ネットワーク」としてモデル化し、その接続特性を最適化することで延性を向上させる新設計手法を開発しました。

空隙間の応力集中の干渉をネットワークの近接性として定義し、数値解析と実証実験を組み合わせた結果、特定のネットワーク指標を制御する空隙配置の最適化によって、空隙率を変動させることなく延性を最大40%向上させることに成功しました（図1）。本成果は、3Dプリンティング材料に代表される多孔質材料の低い変形能力を克服し、材料設計の常識を「欠陥（空隙）の排除」から「欠陥ネットワークの最適配置」へと転換させる学術的意義を有しています。

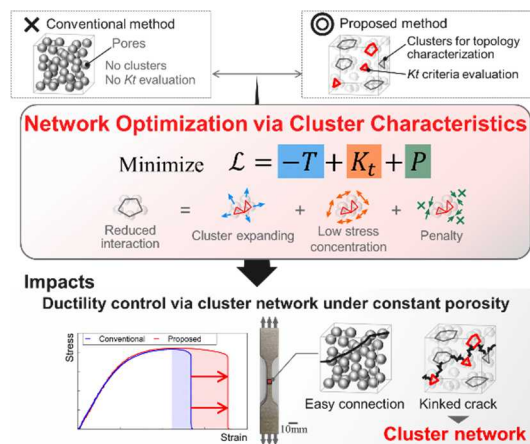


図1 新開発した空隙ネットワーク最適化手法と延性向上メカニズム。応力集中の干渉をネットワークの近接性として捉え、特定のネットワーク指標を制御するように空隙配置を最適化した。

詳細

【研究の背景】

3D プリンティング技術の普及により、人工関節などの医療用インプラントや軽量の産業部材には、内部に無数の微小な穴（空隙）を持つ「多孔質材料」が広く使われています。弾性率を調整し骨との結合を促す効果や材料を軽くする効果がある一方で、多孔質材料には「脆くて壊れやすい」という弱点がありました。これは、材料に力がかかる際に空隙周辺で応力集中が生じるためです。特に、空隙同士が不規則に密集した「空隙の集まり（クラスター）」が存在すると、応力集中が干渉し合い、一気に損傷がつながり、突然壊れてしまいます。これまで、多孔質材料の空隙評価はその総量（空隙率）に限定されてきました。空隙の密集度やつながり方を評価、さらには制御して材料の寿命を延ばす設計手法は確立されておらず、軽さと「破壊せずに引き伸ばしできる性質（延性）」を両立させる技術の開発が望まれていました。

【研究の内容と成果】

本研究グループは、材料内部の「空隙のクラスター」をジグザグ状などに空間配置し、空隙どうしの距離やつながり方を最適化する、「空隙ネットワーク」の設計手法を開発しました。

この手法では、パーシステントホモロジー（注1）を用いることで、空隙どうしのつながりをネットワークで表現するモデルを構築しました。ネットワーク特性は、クラスター平均サイズやクラスターの近接性、フラクタル次元に基づき、定量的に評価しました。勾配法に基づく最適化解析によって、クラスター間の接続性を抑制するジグザグ状の配置が得られました。

この手法の効果を検証する実験では、金属3Dプリンターを用いて、最適化されたジグザグ状の空隙クラスター配置を持つ試験片と、最適化されていないランダムな空隙配置を持つ試験片を作製し、引張試験にて力学特性を比較しました。その結果、最適化された構造では空隙クラスター間をつなぐ損傷は抑制され、延性は最大で40%向上させることに成功しました。特筆すべき点は、通常トレードオフとなる強度と延性に対して、材料の強度を維持したまま延性を改善できた点です。本成果は材料の壊れ方（損傷進展プロセス）を構造的に設計できることを証明しました。

【今後の展開】

本研究の学術的意義は、多孔質材料の機械的特性を空隙の「量」ではなく、ネットワークで表現される「配置」によって評価・制御できた点にあります。これは固体力学とネットワーク科学を融合させた新たな設計指針に位置づけられます。今後は、医療用インプラントや航空宇宙・自動車分野における「しなやかで壊れにくい」安全性の高い次世代材料の開発への応用が期待されます。

【研究成果の公表】

本研究成果は、Wiley社が発行する論文雑誌「Advanced Materials Technologies」（CiteScore Top10%誌）に掲載されました。また、本論文は同雑誌のInside Back Coverに選出されました（図2）。

論文タイトル：Ductility Tuning via Cluster Network Characteristics of Porous Components

著者名：Ryota Toyoba, Yuichi Otsuka, Ian J. Davies, Naritoshi Aoyagi, and Yukio Miyashita.

掲載誌：Advanced Materials Technologies

巻・号：Vol.11(10)

公開日：2026年5月22日（早期公開日 2026年1月31日）

DOI：<https://doi.org/10.1002/admt.202501991>

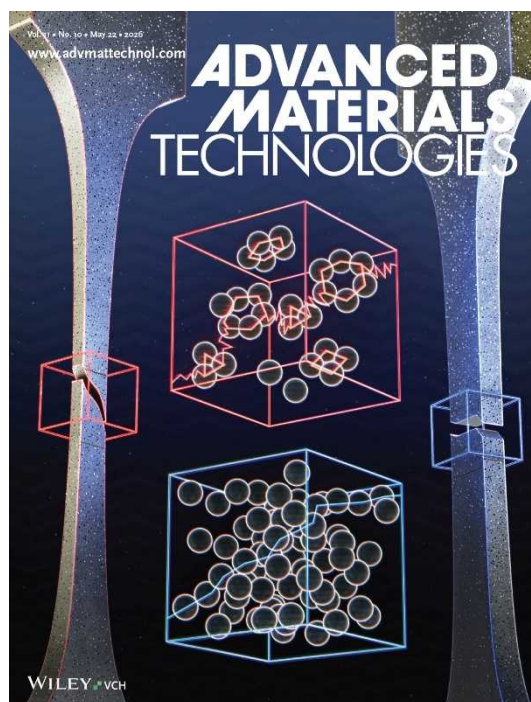


図2 Inside Back Cover

【助成・謝辞】

本研究は、科学研究費助成事業 基盤研究(B)（課題番号：21H01208、24K00756）および卓越大学院プログラムの支援を受けて実施されました。

【用語解説】

※1 パーシステントホモロジー

データの要素間の距離を少しずつ変化させながらクラスター（つながり）を構築し、現れては消えるクラスターの構造的特徴を可視化する手法。