

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：13901
研究種目：若手研究
研究期間：2021～2023
課題番号：21K14229
研究課題名（和文）ゴム・樹脂・金属を含む複合材料の耐衝撃・制振性能を制御するトポロジー最適設計
研究課題名（英文）Topology optimization to control dynamic performance of composite materials including rubber, resin, and metal
研究代表者
干場 大也（Hoshiya, Hiroya）
名古屋大学・工学研究科・助教
研究者番号：80847038
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：ゴム・樹脂・金属を含む複合材料の耐衝撃性・制振性といった動的応答の制御を目的として、既往のトポロジー最適化理論を拡充した。はじめに、複合構造物の動的応答、特に材料由来の減衰特性を制御するという目的のもと、最適化問題設定および感度解析の定式化を行った。次に樹脂・金属の特徴である塑性変形を含む材料構成則を導入するため、弾塑性材料と非弾塑性材料を組み合わせた仮想的な材料モデルを提案し、異種複合材料のためのトポロジー最適化のフレームワークを構築した。最後に滑らかでない応力-ひずみ関係に由来する収束計算の不安定問題に対処するため、下負荷面モデルを応用した安定化手法について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、これまでのトポロジー最適化の枠組みで扱えなかった非線形複合材料の複雑な動的挙動を考慮した最適設計の実現に向けて前進した。弾塑性材料を含む異なる非線形材料を合わせた仮想混合材料モデルの提案と、同仮想材料のグレースケール下の応力-ひずみ関係の滑らかさを補完する下負荷面モデルの適用はこれまでにないアプローチであり、他の異種複合材料に対しても拡張性・汎用性を有している。

研究成果の概要（英文）：This study extends the existing topology optimization theory to control the dynamic response of composite structures containing rubber, resin, and metal in terms of impact resistance and vibration-damping properties. First, an optimization problem and sensitivity analysis were formulated for the purpose of controlling the dynamic response of composite structures, especially the damping properties derived from the materials. Next, a virtual material model combining elastoplastic and other materials was proposed, and a topology optimization framework for heterogeneous composite materials, including resins and metals, was developed. Finally, a stabilization method based on a subloading surface model was introduced to address the instability problem in convergence calculations caused by non-smooth stress-strain relationships.

研究分野：土木工学

キーワード：トポロジー最適化 材料非線形 複合材料 弾塑性材料

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 新たな積層造形技術によって、自由形状かつ異種材料の複合造形が可能になりつつある。特に、ゴム・樹脂・金属といったエネルギー散逸を生じる非線形材料の造形技術の発展が著しく、これらの材料をうまく組み合わせることで、荷重の大きさや速度に応じた耐衝撃性能や、特定の振動外力に対して制振性能を発揮するような複合材料の開発が期待できる。

(2) (1)のような動的問題および各種非線形性を合わせて考慮したトポロジー最適化手法についてはいまだ研究段階にあり、手法の枠組みが確立していない。

2. 研究の目的

(1) ゴム・樹脂・金属を含む複合材料の耐衝撃性・制振性といった動的応答の制御を目的として、複合材料内部の個々の材料配置・形状を決定する数値シミュレーションの枠組みを構築する。

3. 研究の方法

(1) 既往のトポロジー最適化理論を拡張し、数値計算アルゴリズムの性質を踏まえて、ゴム・樹脂・金属が混在する複合材料領域を設計空間として定義し、要求性能に応じて目的関数、制約条件および境界値問題を定義し最適化問題を設定する。

(2) 得られた最適解の性能、数値計算コスト、計算精度および最適解の収束性について検証し、手法の妥当性・実用性を根拠づける。

4. 研究成果

(1) ゴム系材料、すなわち粘弾性材料からなるマルチマテリアル構造を対象に、その動的性能性能のためのトポロジー最適化のフレームワークを構築し、基礎的な定式化および性能検証を行った。具体的には、一般化 Maxwell モデルをトポロジー最適化における材料表現法の一つである SIMP 法について適用し、周期荷重あるいは周期強制変位のもとで散逸エネルギーを最大化するような問題設定を踏まえて、感度解析プロセスの定式化を行った。数値最適化例あるいは数値検証例において、本問題を解くことで応力-ひずみ応答の位相のずれすなわち粘性散逸を制御できることが示された。

(2) 塑性変形や損傷の進展によるエネルギー散逸現象を扱うために、弾塑性材料および損傷材料を含む複合構造物を対象としてトポロジー最適化問題を拡張した。基本的なアプローチとして、(1)のフレームワークとの融合を見据えて SIMP 法をベースとした材料表現を行った。一例として、延性材料と脆性材料という性質の異なる 2 種類の材料を組み合わせた構造物に対し、そのエネルギー吸収(散逸)性能を最大化するような問題設定を行った(図1)。これに際し、数理的特徴を異なる材料モデルを部分的に統合し、設計変数と関連付けるようなモデル化を行うことで、トポロジー最適化に特化した仮想混合材料モデルを構築した。

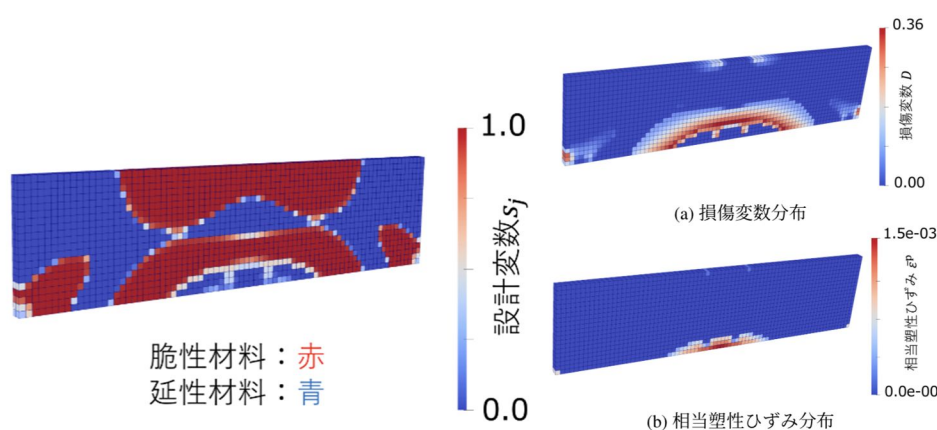


図1 脆性-延性材料を想定したトポロジー最適化計算例

(3) (1)(2)のように SIMP 法を拡張して非線形混合材料の力学挙動を表現する手法において、応力-ひずみ関係の滑らかさの欠如により、設計感度(設計変数の変動に対する評価関数の微分)を用いた設計変数更新によって良好な最適解に達しにくいという根本的な問題が兼ねてより懸念されていた。これに対処するために、下負荷面モデルを用いて応力-ひずみ関係の不連続な遷移を滑らかに定義することによって、設計関数空間の性質を緩和し、グレースケールなどの力学的に無用な局所解への停留や、反復計算における解の振動挙動を抑制できることを示した(図2)。

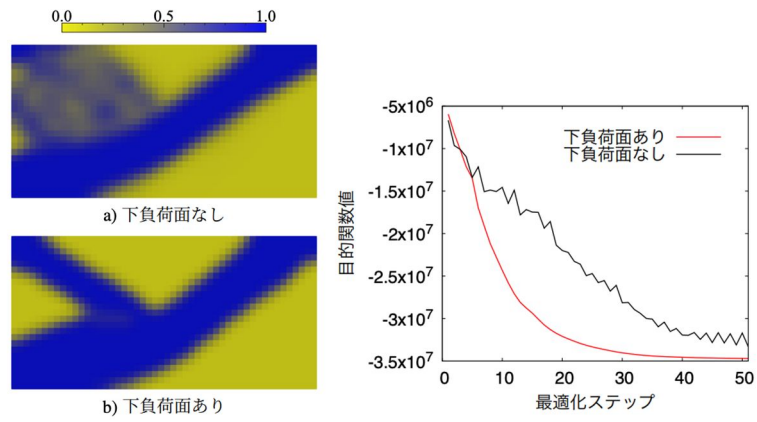


図 2 下負荷面弾塑性性モデルを用いたトポロジー最適化計算例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 FUJIWARA Mutsuki, HOSHIBA Hiroya, NISHIGUCHI Koji, KATO Junji	4. 巻 79(15)
2. 論文標題 AN EXTENDED SIMP MODEL AND SENSITIVITY FORMULATION FOR TOPOLOGY OPTIMIZATION OF BRITTLE-DUCTILE COMPOSITE STRUCTURES	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscej.22-15028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Hiroya Hoshiba
2. 発表標題 Stabilization of Topology Optimization of Elastoplastic Structures by Applying Subloading Surface Model
3. 学会等名 USNCCM17（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroya Hoshiba
2. 発表標題 Topology Optimization Using Brittle-ductile SIMP Composites
3. 学会等名 ACSMO 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤原睦樹
2. 発表標題 脆性-延性複合構造物のトポロジー最適化のための拡張SIMP法の提案
3. 学会等名 第25回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroya Hoshiba
2. 発表標題 A practicable two-material interpolation method for isotropic brittle-ductile topology optimization
3. 学会等名 WCCM-APCOM 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 干場大也
2. 発表標題 密度法に基づく複合材料の高強度・高靱性トポロジー最適化
3. 学会等名 第27回計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 干場大也
2. 発表標題 下負荷面モデルを応用した弾塑性トポロジー最適化の安定化に関する検討
3. 学会等名 第28回計算工学講演会 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 G. Liu, H. Hoshiba, K. Nishiguchi and J. Kato
2. 発表標題 Multi-material Dynamic Optimal Design based on Generalized Maxwell Model
3. 学会等名 ACSMO 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奈良俊輔
2. 発表標題 下負荷面モデルを応用したトポロジー最適化の材料パラメータに関する検討
3. 学会等名 第29回計算工学講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関