

報告番号	甲 第 14529 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 材料界面の強度を考慮したマルチマテリアルトポロジー最適化に関する研究
(Study on Multi-material Topology Optimization considering Strength of Material Interfaces)

氏 名 渡邊 大貴

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、複数材料で構成された構造を対象に、各固体材料およびその界面の応力値がそれぞれの材料強度および界面強度を満足するようなマルチマテリアルトポロジー最適化手法の開発を目的とするものである。力学的挙動を評価するための構造解析と実際の最適化計算には、有限要素法を用いている。本論文で提案する手法の妥当性や信頼性を確認するために実施した主な検証項目は、1) 解析的に計算される目的関数および制約条件式の設計変数に関する勾配（感度）の精度、2) 顕著な非凸性を有する最適化問題に対する勾配基本法アルゴリズムの有用性、3) パラメータやメッシュ解像度、材料界面の物性の変化に対する最適計算結果の変化、4) 得られた最適構造の性能比較などが挙げられる。いくつかの典型的な最適化計算例を通して、上述した項目について検証を行い、種々の設計問題に対する本手法の適用可能性を確かめるとともに、提案手法の妥当性および信憑性を示した。また、提案手法の適用範囲や現状の問題点、克服すべき課題や今後の展望についても明らかにした。上記の項目について検証を行うことで、本論文で提案する手法の実設計への展開が期待でき、同分野のみならず工学分野全般に対して非常に有用なものになり得る。本論文は全5章で構成される。

第1章では、本研究の背景および研究目的を述べた。航空宇宙および機械、建設、医工学など、工学分野全般において異種材料を組み合わせた構造（マルチマテリアル化）によるものづくりは、構造のさらなる高強度化や軽量化を実現する技術として注目されている。

しかし、マルチマテリアル構造設計においては、「どの材料をどこに配置するか」という問題に対し無限数の設計パターンがあるため、それを帰納的なアプローチで対処することは容易ではない。そこで、数理的な設計シミュレーション技術であるマルチマテリアルトポロジー最適化を、マルチマテリアル構造設計に適用する「マルチマテリアルトポロジー最適化」は、工学的に有効であると言えよう。しかし、マルチマテリアルトポロジー最適化は、理論上未だに多くの課題を抱えている。その主たる課題の一つは、複数材料を組み合わせることで生じる材料界面を数理的に取り扱うことが困難である点である。材料界面は熱破断、腐食など構造の弱点となりやすく、また応力集中が発生し、それが原因で剥離が生じるなど力学的な問題を起こしやすい。このことから、材料界面の特性、ひいては界面の物性や強度を考慮することは工学的に有意義である。しかし、材料界面を考慮したマルチマテリアルトポロジー最適化に関する既往研究の中で、実用性を伴って確立されたものは、著者の知る限りほとんど見られない。

以上のような背景から、本論文における研究目的を、各固体材料およびその界面の応力値が各々の材料強度および界面強度を満足するようなマルチマテリアルトポロジー最適化手法の開発と位置づけた。上述した研究背景、課題および目的については、関連する先行研究を交えながら議論を行っている。

第 2 章では、一般的なトポロジー最適化の基礎理論についてまとめ、後に続く応用的なマルチマテリアルトポロジー最適化理論を記述するための準備とした。具体的には、本研究の基盤となる密度法による材料表現法と設計空間の緩和法、最適化理論およびフィルタリング手法について概説した。トポロジー最適化は、構造の最適なかたちを見出す方法であり、それを表現する方法として、幾何学的表現法と材料表現法に分類することができる。本論文では、有限要素法と親和性の高い材料表現法を基本とし、それに準じて複数材料を表すための方法を示した。材料表現法を基本としたトポロジー最適化問題においては、材料の有無はそれぞれ 1, 0 の整数で表される。すなわち、このトポロジー最適化問題は、'0-1' の整数値問題とみなすことができ、数学的には不良設定問題となる。この不良設定問題を正則化してするために、これまでに様々な手法が提案されていることを説明した。また、本研究でも用いるマルチマテリアル最適化材料モデルである DMO 型材料内挿関数について説明を行った。最適化理論においては、トポロジー最適化で一般的に解かれる問題を掲示し、目的関数および制約関数の設計変数に対する勾配（感度）が必要になることを説明した。設計変数を更新するためのアルゴリズムは、Lagrangian から導かれる KKT 条件をもとにしていることを概説した。また、フィルタリングが、チェッカーボードパターンやメッシュ依存性などといった、トポロジー最適化における諸問題を回避するための手法であることを説明し、フィルタリングが最適化計算結果に与える効果について確認した。また、Helmholtz 型偏微分方程式密度フィルタと呼ばれる、本研究の基盤にもなっている特殊なフィルタリング手法について説明し、この手法の長所や離散化手続きについても記した。

第 3 章では、固体材料および界面の物性を考慮するためのマルチマテリアルトポロジー

最適手法を提案し、手法の妥当性および性能の検証を行った。ここでの提案手法は、DMO型材料内挿関数をベースにした界面表現法である。具体的には、隣接する要素間に生じる設計変数の空間勾配を用いて、材料界面の界面体積比率を表現した。この提案手法によって、材料界面の物性を考慮しながら個々の材料に等価な重みを与えることで、固体材料間の可換性を完全に満足することができるものであることを明らかにした。提案手法による最適化計算例から、提案する材料モデルが、材料定義の可換性・独立性を担保しつつ材料界面を考慮できることが明らかになった。また、他の最適化計算例からは、材料界面の剛性が小さいと仮定した場合は、材料界面の表面積が小さくなり、構造上の弱点を減少させるようなレイアウトが得られた。一方で、材料界面の剛性が母材よりも大きいという仮想的な条件下で計算を行うと、界面の表面積を大きくするようなレイアウトが得られることが分かった。

第4章では、各固体材料および材料界面の強度を考慮したマルチマテリアルトポロジー最適化手法を開発し、その性能検証を行った。最適化計算で用いるYoung率の正規化に対して、第3章で挙げたDMO型材料内挿関数を採用し、第3章で提案した材料界面の仮想的な界面体積比率を定義することで、材料界面の応力の評価を行った。固体材料の等価応力にはvon-Mises応力、各材料界面には引張/圧縮非対称応力規準を用いて、より現実に近い界面を再現した状態で最適化計算を行った。また、応力制約付きトポロジー最適化問題で生じ得る特異点問題を緩和するために、DMO型材料内挿関数に適応した緩和手法を新たに提案した。本提案手法で得られる形状は、界面および固体材料の最大応力値を制御し、構造の安定性を向上させるのに有効であることが確認できた。また、固体材料や界面の許容応力度を考慮することで最大応力値を制御できるが、その代わりに構造の全体剛性が下がることが明らかになった。一方で、本研究で提案する手法は、問題設定によっては中間密度を残したまま、あるいは目的関数の性質上、最大応力値が許容応力度を超過した状態で最適化計算が収束する場合もあることが明らかとなり、これは今後取り組むべき課題であると結論づけた。

第5章では、本論文で得られた知見を総括するとともに、更なる研究課題についても言及し、マルチマテリアルトポロジー最適化理論の発展に繋がる検討事項について言及した。

以上のとおり、本研究では、固体材料および材料界面の強度を考慮したマルチマテリアルトポロジー最適化手法の提案およびその検証を行った。本研究の成果は、実設計で最も考慮されるべき指標の1つである強度に着目し、それを適切に評価するための指針となることで、将来のマルチマテリアル構造設計手法の確立に貢献するものである。