

論文の要旨

題目 積層造形を用いた高性能構造開発のためのトポロジー最適化に関する研究
(Topology Optimization for High Performance Structure Development in Additive Manufacturing)

氏名 西津 卓史

機械設計において、剛性などの性能向上や、一定の性能を満足した上での軽量化は重要な課題である。このため、数値計算により与えられた条件の下で最適な形状を設計する方法及び複雑形状であっても設計された形状を製造する方法が求められている。これらのような要求に対する有力な手段として、構造最適化と積層造形技術が注目されている。本研究では、高性能構造の設計手法としてのトポロジー最適化を提案し、数値例を用いて妥当性・有効性を示した。さらに、積層造形を用いて、実際に製造し性能検証することで、積層造形による製造を前提とした設計手法の知見を得た。

本論文は6章で構成されている。

第1章の「緒論」では、近年の機械設計における構造最適化と積層造形の分類について述べ、本研究で取り扱うトポロジー最適化と粉末焼結方式の積層造形の現状と今後の期待について示した。また、筆者が実際に積層造形を実施した内容から、積層造形における基本的なノウハウや造形前後に生じる問題点などの知見を述べた。

第2章の「非破壊検査におけるトポロジー最適化を用いた損傷同定手法」では、積層造形により製造される周期セル構造の破壊挙動の特殊性や、粉末焼結方式の造形精度の問題点に対する非破壊検査の重要性について述べた。また、損傷の検出精度が技術者の技量に依存するという、一般的な非破壊検査の手法の問題点と、その解決策の一つとしての、力学モデルに基づいて構造物の損傷を解析的に求める方法について述べた。本研究では、解析的に損傷を検出する手法として、非破壊検査において固有値解析とトポロジー最適化を用いて損傷を同定する手法を構築した。本研究の提案手法は、損傷を有する構造の固有値と同等の固有値を有する構造をトポロジー最適化により導出する。最適化の結果、得られた構造が先の損傷を有する構造と近い形状となり、損傷を検出するという手法である。しかし、損傷構造の固有振動モードと最適化する構造の固有振動モードが、各次数ごとに一致していない場合、固有値を一致させたとしても、目標とする損傷構造とは全く異なる構造が得られると予測される。提案手法ではモードトラッキング法を用いて固有値を用いてこの問題点を回避した。そして、3つの数値例を用いて構築した手法の妥当性を示した。固有振動モードに影響を与えない様な小さな損傷に関しては、損傷位置・形状ともに検出可能なことを確認した。固有振動モードが入れ替わってしまうような大きな損傷の場合に対しても、モードトラッキング法を用いることで、損傷位置の特定をすることは可能な手法であることを確認した。

第3章の「熱伝導制約下における熱変形最小化」では、粉末焼結方式の積層造形における熱変形は、造形物の寸法誤差や、造形中断といった問題を生じることについて述べた。このような熱変形が起因となる問題に対し、本研究では線形熱伝導問題と線形弾性問題に基づく最適化問題を定式化した。熱変形・熱伝導性能の指標となる構造コンプライアンス及び熱コンプライアンスを定義し、これらに対する感度解析を実施し、熱変形最小化を目的とした最適設計手法を構築した。そして、数値例を用いて構築した設計手法の妥当性を示し、高い熱伝導性能を有した上で熱変形を抑制することが可能な構造を導出した。さらに、熱伝導性能の目標を変更して最適化を行うことで、構造コンプライアンスと熱コンプライアンスにはトレードオフの関係があることを確認し、本手法の有効性を確認した。また、本研究で取り扱った線形熱伝導問題と線形弾性問題に基づく最適化問題では、熱変形には影響を与えるが、熱伝導性能には寄与しない部材が生じるような局所最適解が生じることを確認し、最適化の初期解の決定に関する重要性についての知見を得た。

第4章の「積層造形を考慮した熱拡散性能最大化」では、ヒートシンクのような小型の冷却構造の設計方法の現状と課題について述べた。それに対する解決策として、トポロジー最適化を用いて、高性能な冷却構造を設計する方法を提案した。この際、最適化により設計された形状を、積層造形による製造を前提とすることで、トポロジー最適化において最適解が複雑形状となる可能性の対策とした。また、積層造形を用いた製造の検討を行えるようにするため、本研究では最適化問題を2次元問題から3次元問題へ拡張した。そして、数値例を用いて、高い熱伝導性能を有する構造を導出し、最適化形状と一般的なヒートシンクの形状と性能比較を行うことで、本研究における提案手法の妥当性と有効性を示した。また、積層造形を用いて最適構造を製造する際の、水平な部材の造形が困難であることなどの課題について検討した。

第5章の「高性能ラティス構造の開発と性能検証」では、周期セル構造のひとつであるラティス構造の有用性について述べた。ラティス構造の最適設計手法として、構造最適化を用いた設計手法と積層造形を用いた製造手法の組み合わせを提案した。また、金属材料を用いた場合の粉末焼結方式の積層造形における、レーザ方式と電子ビーム方式について述べ、造形後の粉末除去の課題について示した。本研究では、設計した形状を電子ビーム方式の積層造形で実際に造形することを前提とし、造形後の粉末除去を考慮したトポロジー最適化による体積弾性率最大化問題を定式化した。そして最適化により実際に高い体積弾性率を有する形状を得た。最適化により得られたラティス形状を積層造形により実際に造形し、粉末除去を実施して提案手法の妥当性を確認した。さらに、製造したラティス構造に対して圧縮試験を実施した。本研究ではラティス形状のユニットセル単位での剛性を評価するため、局所的なひずみを計測するひずみゲージ法ではなく、デジタル画像相関法を用いた。解析により得られた剛性との比較を行い、測定による剛性との差は積層造形の造形誤差によるものと判断した。また、ラティス構造は破壊の挙動に特異性があることを踏まえ、圧縮破壊試験により検証した。実験により得られた破壊の挙動を、造形に用いたモデルに対して解析を行

うことで、同等の破壊結果を得られるような解析手法を検討した.

第 6 章の「結論」では、本論文で獲得した知見を総括した.