

京都大学	博士 (工学)	氏名	三木隆生
論文題目	Topology optimization for metal additive manufacturing considering manufacturability (金属積層造形における製造性を考慮したトポロジー最適化)		

(論文内容の要旨)

本論文は、金属積層造形を活用した革新的なものづくりを目的として、金属積層造形時の留意点である変形や過熱、積層角度の制限などの製造要件を考慮したトポロジー最適設計法の構築について論じた結果をまとめたものであって、5章からなっている。

第1章は序論であり、トポロジー最適化と金属積層造形の特徴と課題について概観し、本論文の目的と構成について述べている。また、トポロジー最適化の基本的な考え方、最適化問題の定式化、そして最適化手法について概説している。

第2章では、金属積層造形プロセスにおける造形対象物の意図しない変形を抑制可能なトポロジー最適設計法について論じている。一般的な粉末床溶融結合方式では金属粉末の溶融凝固プロセスに起因する熱ひずみや塑性ひずみといった非弾性ひずみによって、造形物に残留応力や変形が生じる。したがって、造形物の形状によっては、変形により造形の失敗や形状精度の悪化を招くことが問題となっている。この問題の解決策として、造形時の変形量を予測し、その予測結果のもとに変形が生じにくい形状を導出する構造最適化の方法を提案している。具体的には、まず、固有ひずみ法を用いて、造形プロセスにおける変形量を解析するモデルを構築し、数値例と実験との比較からその妥当性を示している。この解析モデルは実験的に計測した造形物に生じる固有ひずみを用いることにより、線形解析のみで残留応力と変形の予測を可能にするため、非線形、非定常かつ連成解析が必要な熱構造連成解析と比較して、計算量が大幅に短縮できる特長を有しており、大規模な最適設計問題への適用を可能にしている。そして、解析モデルを用いた変形量推定法に基づき、造形中の変形を抑制しながら剛性最大化を行うトポロジー最適化法を構築し、さらに数値例を通じて、本方法により妥当な最適構造が得られていることを示している。

第3章では、金属積層造形中の過熱を回避可能なトポロジー最適設計法の構築について論じている。この過熱とは、レーザなどの熱源によって金属粉末を溶融凝固させる過程において、下層への熱拡散を遮る構造が存在することにより、成形部が異常な高温状態になることである。これは、表面性状の低下や空隙の発生原因となることから、回避することが望まれる。ここではこの問題を解決する方法として、造形物の熱散逸向上を目的としたサポート材の構造最適設計法を提案している。具体的には、まず、非定常熱伝導方程式を用いて、造形プロセスにおける熱履歴を評価できる熱解析モデルを構築している。この解析モデルは、熱源としてレーザ照射に相当する体積熱流束をレーザ照射層全体に一度に与えるという特徴を有しており、移動熱源を逐次与える従来のモデルと比べて、簡易に過熱状態が発生しやすい領域を特定する事が可能であり、かつ計算量を短縮できる特長をもつ。さらに、過熱状態を回避するための目的関数をレーザ照射層の温度分布の均一化として定式化し、サポート材のトポロジー最適設計法を構築している。さらに数値例により、提案法に基づき導出したサポート材の最適構造では、過熱を回避できることを示している。

京都大学	博士 (工学)	氏名	三 木 隆 生
<p>第4章では、金属積層造形における積層角度を考慮したトポロジー最適設計法の構築について論じている。積層角度が閾値角度を下回ると造形時に自重で崩壊する恐れがあるため、造形物を適切な形状のサポート材で支持する必要がある。しかしながら、サポート材は造形後に不要となるため、サポート材の増加は造形材料及びサポート除去などの製造コストの増加につながる。従って、設計段階でできるだけサポート材を必要としない形状が望まれる。この問題を解決するために、最適化の過程において閾値角度以下の構造を創成しない、積層角度を制約する方法を提案している。具体的には、まず、楕円型偏微分方程式に基づくフィルターを用いて、積層角度を制約する方法を提案している。しかしながら、この幾何学的な制約のみでは最適化の過程において実際には造形することのできない積層方向の反対向きの凸形状が創成される問題が発生する。この問題を解決するため、造形プロセスを模擬した定常熱伝導方程式に基づいた熱解析モデルを提案し、このモデルにより熱的な制約を付加することによって、下向きの凸形状の創成を抑制に成功している。そして、これらの制約条件下において剛性最大化を目的としたトポロジー最適化の方法論を構築している。そして、幾つかの数値例により、剛性の過度な低下を抑制しながら閾値角度を満足した構造が得られていることを示している。また、得られた角度制約を満足する形状は、造形時の熱散逸を向上させる効果も併せ持つことから、剛性最大化のみで得られた構造と比較して造形時の変形及び過熱を抑制できることも明らかにしている。さらにはこの角度制約の方法に、第2章で構築した造形時の変形抑制を加えた総合的な最適化問題を定式化することをも提案し、数値例により、造形時の変形を更に抑制する効果があることを確認している。</p> <p>第5章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

氏名	三木隆生
----	------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、金属積層造形を活用した革新的なものづくりを目的として、金属積層造形時の留意点である変形や過熱、積層角度の制限などの製造要件を考慮したトポロジー最適設計法について論じた結果をまとめたものである。得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 金属積層造プロセスにおける変形を抑制しながら最適な構造を導出できるトポロジー最適化の方法を構築した。すなわち、固有ひずみ法を用いて造形プロセスで発生する残留応力・変形を解析できるモデルを提案し、その解析モデルを用いて造形時の変形最小化と力学的な性能である剛性最大化を可能とするトポロジー最適設計法を開発した。さらに数値例において、造形時の変形を抑制しながら剛性が最大となる構造が得られることを明らかにした。

2. 金属積層造形における熱散逸を抑制可能なトポロジー最適化の方法を構築した。すなわち、まず非定常熱伝導方程式を用いて造形プロセスにおいて熱散逸現象を解析できるモデルを構築し、そのモデルにより熱散逸が小さい領域を特定できる方法を提案した。そして、その解析モデルに基づいて、サポート部の構造設計を対象とした、造形物の熱散逸最大化を図るトポロジー最適設計法を開発した。さらに数値例において、妥当な構造が得られていることを示した。

3. 金属積層造形における積層角度を考慮したトポロジー最適化の方法を構築した。すなわち、まず、幾何学的な制約を課すために偏微分方程式フィルターを用いて、積層角度を制約するための条件式を状態量の積分形として定式化する方法を提案した。次に、幾何学的な制約によって創成されてしまう積層方向に反対向きの凸形状を回避するため、造形プロセスを模擬した定常熱伝導方程式に基づく熱解析モデルを構築し、そのモデルに基づき制約条件を定式化した。そして、これらの制約条件下において剛性最大化を目的としたトポロジー最適設計法を開発した。さらに、数値例により、凸形状の創成を抑制しながら閾値角度を満足する最適構造が得られることを示した。また、得られた角度制約を満足する形状は、造形時の熱散逸を向上させる効果も併せ持つことから、造形時の変形及び過熱も抑制できることを示した。また2章で提案した変形抑制の制約式を最適化問題に加えることによって、造形時の変形を更に抑制できることを示した。

以上のように本論文は、金属積層造形における製造性を考慮したトポロジー最適設計法の構築を行い、さらに種々の数値例により提案手法の有効性を示しており、学術上、実際に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年6月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。