

令和 6 年 4 月 30 日現在

機関番号：84431

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03826

研究課題名（和文）積層造形における製造要件を考慮した一気通貫型の高速最適設計法の構築

研究課題名（英文）Development of a one-stop, high-speed optimal design method that takes into account manufacturability of additive manufacturing

研究代表者

三木 隆生（Miki, Takao）

地方独立行政法人大阪産業技術研究所・和泉センター・主任研究員

研究者番号：80806753

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：金属積層造形を活用した高度なものづくりを目的として、金属積層造形の製造性を考慮した高速最適設計法の構築に取り組んだ。具体的には、レーザー粉末床溶融結合方式を対象として、造形時に生じる変形や積層角度の制限を考慮するための数理モデルと制約式を定式化した。そして、これらの制約をトポロジー最適化に組み込むことにより、変形や積層角度などの複数の製造性を同時に考慮可能な最適設計法を構築した。さらには最適化計算における感度解析の高速化手法を構築した。数値実証を通して、本手法で得られた最適構造は閾値角度以下の形状が創成されることなく、造形時に発生する変形を抑制できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでのトポロジー最適化は軽量・高剛性などの製品性能のみを考慮した最適設計であるため、力学的な観点では最適であっても製造の観点からは最適ではない形状が得られることが多かった。本事業では金属積層造形における造形時の変形や積層角度を考慮するための数理モデルを新たに定式化し、トポロジー最適化に組み込むことで金属積層造形の製造性を考慮した最適設計法を確立した。これにより、当該分野におけるものづくりの効率化・高付加価値化に大きく貢献することに成功した。

研究成果の概要（英文）：With the aim of advanced manufacturing using metal additive manufacturing (AM), we studied the development of a high-speed optimal design method that takes into account the manufacturability of the AM building process. Specifically, we formulated a mathematical model and constraint equations to take into account the deformation and overhang limitation, targeting the laser powder bed melt-combination method. By incorporating these constraints into topology optimization, we constructed an optimal design method that can simultaneously take into account multiple manufacturability factors such as deformation and overhang limitation. Furthermore, we developed a method to speed up the sensitivity analysis in the optimization calculation. Through numerical demonstrations, it was shown that the optimal structure obtained by this method can suppress the deformation without creating a shape below a threshold angle.

研究分野：最適設計

キーワード：トポロジー最適化 Design for AM 構造最適化 有限要素法 最適設計 金属積層造形 金属3Dプリンタ Additive Manufacturing

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

金属積層造形は、三次元の造形対象物を積層方向に一定の間隔で層状に分割した二次元形状に基づいて、一層ずつ金属材料を積み上げながら立体形状を作製する付加製造法(AM:Additive Manufacturing)である。従来の金属加工法として知られている機械加工・放電加工のような除去加工や、塑性加工・鋳造のような型を用いる変形加工では製造が難しい複雑形状を作製できる特長を有しているため、製品の更なる高性能化、軽量化など高付加価値なものづくりに繋がる製造法として期待されている。それに伴い、製品の形状を決定する設計の重要度が増している。

このような背景の中、近年、設計法であるトポロジー最適化と製造法である金属積層造形を組み合わせた高付加価値なものづくりが注目を集めている。トポロジー最適化は、製品の所望の性能(剛性などの物理学的な性能)が最大になるように数値計算によって形状を求める方法である。指定した形状パラメータを最適化する寸法最適化や、最適な外形形状を求める形状最適化と比較して、トポロジー最適化は外形形状の変更のみならず、構造物内部に境界が生成されるような形態の変更も許容するため、最も設計自由度が高く、製品性能の大幅な向上が期待できる方法である。

しかしながら、これまでのトポロジー最適化では、製造性を考慮することができなかつたため、製品性能の観点からは最適であっても製造が困難であることが多かつた。例えば、金属積層造形の方式で最も汎用的なプロセスであるレーザ粉末床溶融結合方式では、レーザの入熱により金属粉末を溶融・凝固するプロセスを繰り返すため、形状によっては大きな残留応力・変形が生じる。また、レーザからの熱を遮る形状は過熱と呼ばれる現象が生じ、表面粗さの低下や欠陥を引き起こす。さらには、積層可能な角度の制限があるため、材料を積層する際に下層に支える構造がないと自重で崩壊する恐れがある。従って、これらの製造性を設計時に考慮可能なトポロジー最適化が求められている。

2. 研究の目的

本研究では前述の課題を解決するため、金属積層造形における残留応力・変形及び積層角度などの製造性を考慮したトポロジー最適化法を構築する。これにより金属積層造形で製造可能な形状の設計を容易にし、金属積層造形を活用した革新的なものづくりの実現を図る。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために以下の項目に取り組んだ。

(1) 積層角度を考慮するための数理モデル及び条件式の定式化

積層角度の制限を考慮するため、幾何学的な特徴量の評価を可能にする楕円型偏微分方程式に基づいた数理モデル、及び角度を制約する条件式を定式化した。この幾何学的な制約式のみでは、実際には造形できない形状が創成される問題を持つ。そこで本研究では積層造形における熱プロセスを模擬した数理モデルを定式化し、熱的な制約を加えることによって、上記の問題を解決する手法を構築した。

(2) 変形を考慮するための数理モデル及び条件式の定式化

溶接プロセスの残留応力・変形解析で用いられてきた固有ひずみ法を拡張し、金属積層造形プロセスに適応した数理モデルを定式化した。また造形を行い、三次元測定機による測定結果と解析結果の比較を通して、数理モデルの妥当性を確認した。さらに積層造形プロセスで発生する変形を抑制するための条件式を定式化した。

(3) 積層角度及び変形を考慮したトポロジー最適化と計算高速化手法の構築

上記の項目で定式化した数理モデルと条件式をトポロジー最適化に組み込むことにより、積層角度や造形時の変形などの複数の製造性を同時に考慮可能な最適設計法を構築した。また最適解を高速に導出するための計算量削減手法を検討した。具体的には積層造形プロセスの最終状態を表す数理モデルを定式化することで、これまで層数分行っていった感度解析に係る計算を、一度の計算に置き換える手法を構築した。数値例により構築した方法論の有効性を確認した。

4. 研究成果

本研究では、金属積層造形における変形及び積層角度の考慮が可能なトポロジー最適化法を構築した。はじめに積層角度を考慮したトポロジー最適化の計算例を示す。図1に示す条件下で積層角度を制限しながら80%軽量化したときに、剛性が最大となる最適化を行った。図2(a)は積層角度を制限しなかった場合の最適構造、図2(b)は積層角度を制限した場合の最適構造である。積層角度を制限した最適形状は支持構造(サポート)なしで造形可能な自己支持形状であることが分かる。

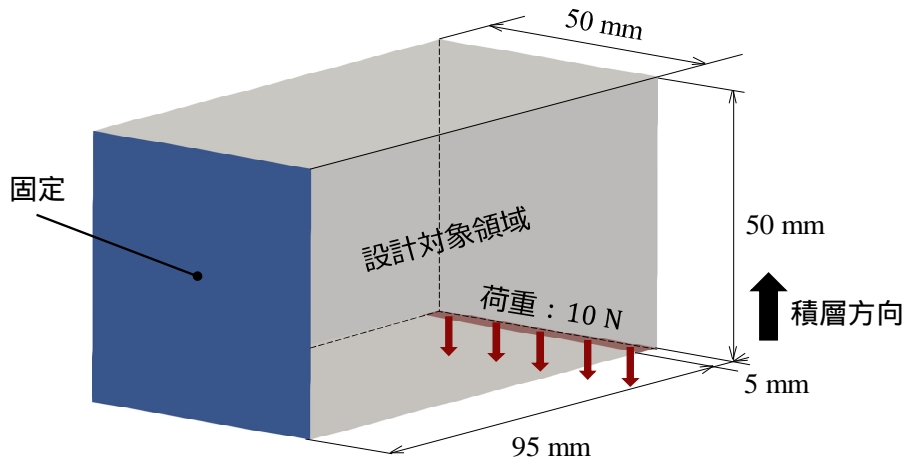


図 1 : 問題設定

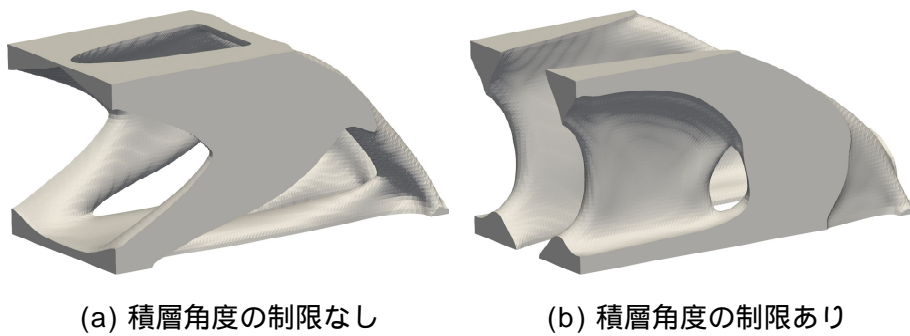


図 2 : 最適化結果

次に積層角度及び造形時の変形を考慮したトポロジー最適化の計算例を示す。問題設定は、図 1 の条件に変形の制約を加えた。図 3 は得られた最適構造に対して、造形時の変形を数値計算により評価した結果である。図 3(a)に積層角度のみを考慮した場合、図 3(b)に積層角度及び造形時の変形を考慮した場合の結果を示す。造形時の変形を考慮した場合は考慮しなかった場合と比較して、変形を低減できていることが分かる。

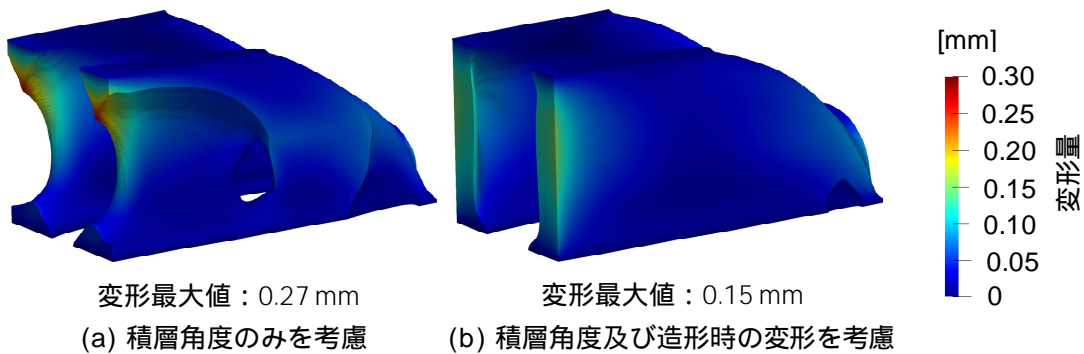


図 3 : 数値解析による造形時の変形評価

以上の結果から、構築した最適設計法は金属積層造形の製造性である造形時の積層角度及び変形を考慮しながら、高性能な形状が得られることを示すことができた。なお、この成果の一部については、*Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*(Vol. 404,(2023), p.115821)に掲載された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Miki Takao	4. 巻 404
2. 論文標題 Self-support topology optimization considering distortion for metal additive manufacturing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering	6. 最初と最後の頁 115821 ~ 115821
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cma.2022.115821	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 -

1. 著者名 Miki Takao, Nishiwaki Shinji	4. 巻 203
2. 論文標題 Topology optimization of the support structure for heat dissipation in additive manufacturing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Finite Elements in Analysis and Design	6. 最初と最後の頁 103708 ~ 103708
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.finel.2021.103708	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1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 三木隆生
2. 発表標題 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高速度化
3. 学会等名 第33回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2023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
研究分担者	山田 崇恭 (Yamada Takayuki) (30598222)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授 (12601)	

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
---------	---------