

# 積層造形における最大造形寸法の限界を 突破する複数部材トポロジー最適化

山田 崇恭

東京大学 大学院 工学系研究科

## 1 はじめに

積層造形法は、従来の機械加工と比較して高い造形自由度を持ち、これまでには生産が困難であった幾何学的に複雑な部分形状を持つ機械構造物が実現できる。このような特長を最大限に利用するためには、従来の機械加工を前提とする構造設計ではなく、積層造形を前提とする設計技術、いわゆる Design for Additive Manufacturing (DfAM) が注目を集めている。

DfAMの有望な手段として、トポロジー最適化が注目を集めている。トポロジー最適化は、力学的根拠と数学的根拠に立脚して、設計者の発想や従来の構造設計解にとらわれずに最適な構造形状を自動的に設計する方法である。この方法は、外形形状の変更のみならず、新たに境界が生成されるようなトポロジーの変更も許容しながら、最適な形状を探索する方法であるため、最も設計自由度の高い構造最適化手法として知られている。しかしながら、トポロジー最適化により設計された構造形状は、力学的には最適であっても、必ずしも積層造形による造形が容易ではない。例えば、パウダーベッド方式の金属積層造形や光造形法の場合、完全に閉じた空洞領域は、金属粉等の除去が困難になる。また、過度に張り出した部分構造、いわゆるオーバーハング構造も、造形精度を悪化させる原因となるため、極力避ける設計が望ましい。

このような課題を解決するために、著者らは、閉孔なし制約付きトポロジー最適化法<sup>1)</sup>やオーバーハング形状制約付きトポロジー最適化法<sup>2)</sup>を提案し、DfAMの基盤技術の開発を行ってきた。

本研究では、積層造形適用範囲をさらに拡大させるために、複数部材からなる構造物のトポロジー最適化において、各部材ごとに最大造形サイズ及びそれらの組立性を考慮した方法論の構築<sup>3)</sup>を行った。さらに、仕口や継手等を利用した複数部材の創成設計法<sup>4)</sup>への拡張を行った。これにより、積層造形機から要求される最大造形サ

イズより大きな機械構造物を設計可能とし、設計した複数の部材を個別に積層造形後に組立てることで、最大構造サイズに制限がなく高性能な機械構造物を積層造形法により実現できる。

## 2 研究の方法

本研究では、積層造形法により造形した複数部品を組立てることで、積層造形装置で許容する最大造形サイズより大きな機械構造物を対象としたDfAMを実現する。具体的には、最初に、2つ以上の複数の部材により構成されることを前提とし、各部材を包含する直方体領域の各辺の長さを制約条件として定式化する。

具体的には、図1に示すように、各部材を包含する最小の直方体（図は2次元であるため長方形）を考え、その各辺の長さが各部材の造形サイズと定義する。

次に、設計対象の機械構造物は、複数部材の組合せであることを想定し、各部材を個別に造形可能とするために、各部材が組立分解可能とする形状である必要がある。したがって、各部材が分解できることを前提とする制約条件を定式化する。定式化の方法として、独自に提唱している仮想的な物理モデルによる幾何学的制約条件の定式化法を用いることで、強い局所性を回避した設計探索手法を構築する。ここで、仮想的物理モデルの定式化において、所望の幾何学的条件を満たすための汎関数について、各方程式の特徴関係整理し、それらの比較検討を通して具体的に定式化していく。最終的な汎関数の妥当性については、有限要素法に基づいた偏微分方程

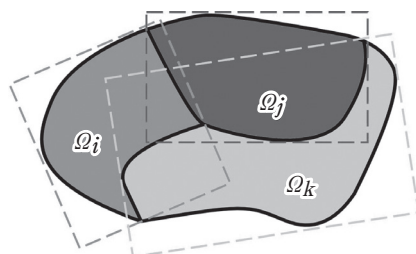


図1 各部材の造形サイズの評価<sup>3)</sup>

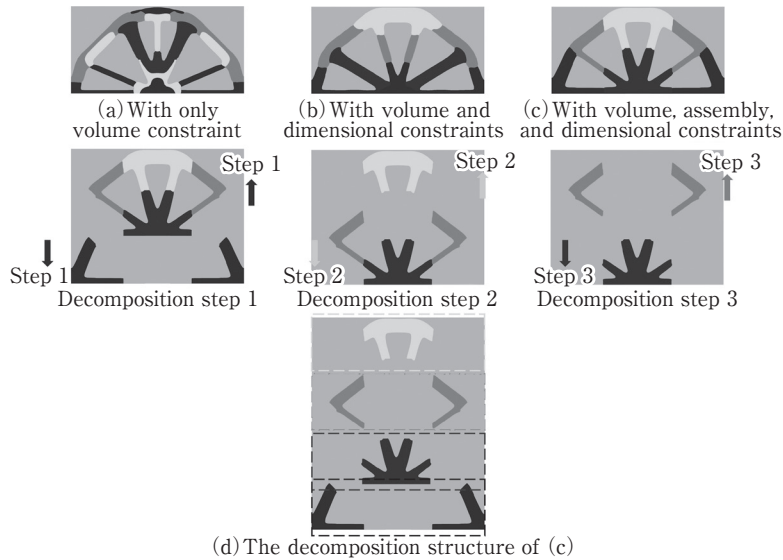


図2 2次元問題の設計例<sup>3)</sup>

式の数値解を用いて、所望の要件が満たされているか否かによって判断した。

そして、構築したこれらの数値モデルに基づいて幾何学的制約条件を考慮したDfAMシステムを構築した。そのために、独自に開発したトポロジー最適化法である、レベルセット法に基づくトポロジー最適化を用いた。

### 3 主な研究成果

前節の方法に基づき、具体的なDfAMシステムについて、汎用有限要素解析プラットフォームFreeFEMを用いて構築した。構築した環境を用いて、均質な等方性線形弾性体を対象として、体積制約付き剛性最大化問題に適用した例について紹介する。なお、提案する手法は、一般的な方法論であるため、剛性最大化問題に限定されず、構造力学関連の他の形状設計問題や熱流体、弾性波、音波等に関連する形状設計問題への展開が可能である。

図2に、2次元設計問題において、体積制約条件のみの場合 (a)、体積制約条件と最大寸法制約条件を考慮した場合 (b)、体積制約条件、最大寸法制約条件及び組立性制約条件を考慮した場合 (c) を示す。図に示すように、所望の目的を達成する構造設計となっていることを確認できる。次に、3次元問題の結果を図3に示す。

図3 (a) は、体積制約条件のみの場合の最適構造、(b) は、体積制約条件、組立性条件及び最大寸法制約条件を考慮した場合の最適構造を示す。

### 4 おわりに

本研究では、DfAMとしてトポロジー最適化を利用す

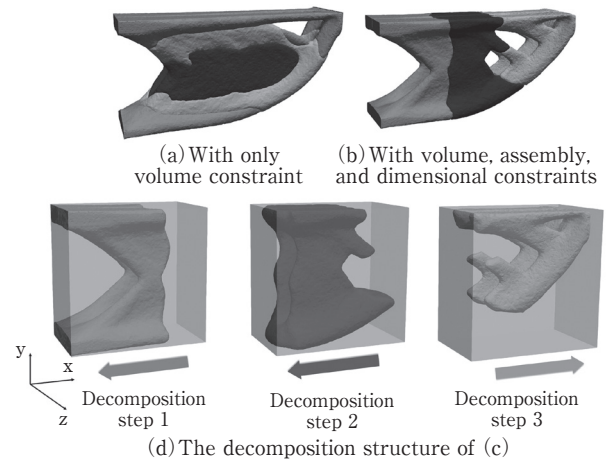


図3 3次元問題の設計例<sup>3)</sup>

る場合に、必要とされる幾何学的制約条件を明確にした。そして、それらの具体的な定式化と数値解析アルゴリズムを提唱した。

### 参考文献

- 1) Yamada, T., Noguchi, Y., Topology optimization with a closed cavity exclusion constraint for additive manufacturing based on the fictitious physical model approach, Additive Manufacturing, Vol.52, (2022), p.102630.
- 2) Tajima, M., Yamada, T., Topology optimization with geometric constraints for additive manufacturing based on coupled fictitious physical model, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.417, (2023), No.116415.
- 3) Feng, Y., Yamada, T., Multi-material topology optimization for additive manufacturing considering maximum build volume and assembly process, Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol.163, (2024), pp.616-640.
- 4) Feng, Y., Yamada, T., An assemblable interlocking joint generation method for multi-material topology optimization using interfacial partial stress constraints and dimensional constraints, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.433, (2025), No.117475