

公益財団法人JKA 令和5年度 公設工業試験研究所等が主体的に取り組む共同研究補助事業
事業項目名：

金属3D造形の製造性を考慮したトポロジー最適化法の開発

共同研究者：

京都大学大学院 工学研究科 西脇眞二 教授

背景と目的

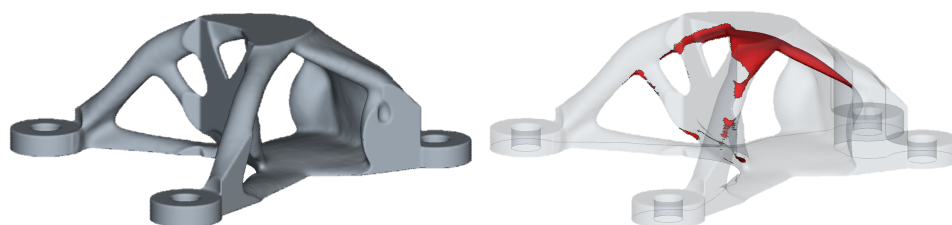
金属3D造形は複雑形状の作製が可能な製造方法であり、これまでにない機能を有する製品が実現できます。この製造法の特長を活かす設計手法として、高性能な形状を数値計算により自動的に求めるトポロジー最適化が注目されていますが、造形時に発生するひずみや積層角度の制限によって、得られた形状が製造できないことが多くありました。

そこで、本事業では金属3D造形を活用した高度なものづくりを目的として、金属3D造形の製造性を考慮したトポロジー最適化法の開発に取り組みました。

実施内容

(1) 積層角度を考慮したトポロジー最適化

積層角度を考慮するために、形状データから積層角度などの幾何学的な特徴量を抽出する数理モデルの定式化に取り組みました。具体的には積層方向ベクトルと形状面の法線ベクトルを用いて積層角度の評価を行いました。図1は数理モデルを使って、設定した閾値角度を下回る形状を評価した結果です。図1(b)から閾値角度を下回る領域（赤色）を適切に評価できていることを確認しました。



(a) 入力形状

(b) 出力結果

図1：入力形状の積層角度の評価（閾値角度は45度に設定）

この数理モデルをトポロジー最適化に組み込み、積層角度を考慮したトポロジー最適化法を開発しました。トポロジー最適化は京都大学西脇研究室で開発された手法を用いました。図2に開発したトポロジー最適化の検証に使用した最適化モデルを示します。

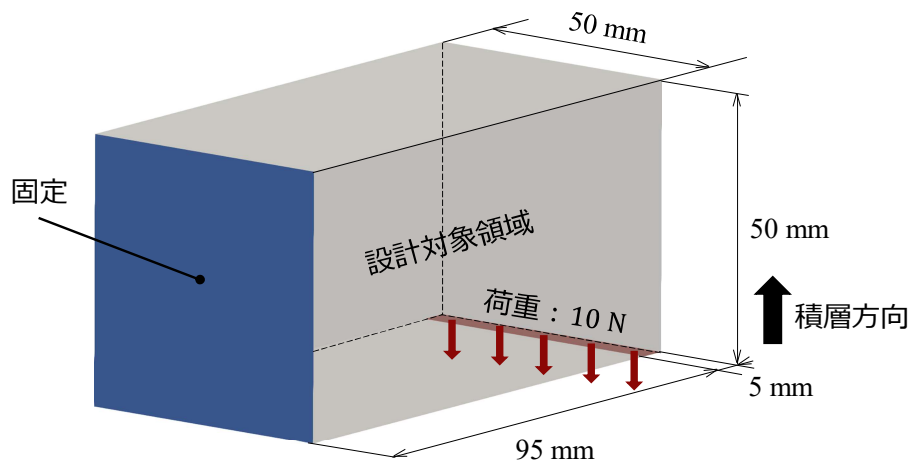
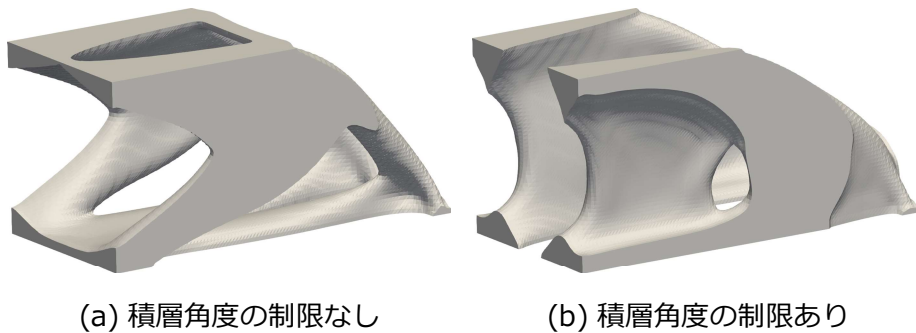


図 2 : 検証用の最適化モデル

図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いました。図3(a)に積層角度を制限しなかった場合の最適形状、図3(b)に積層角度を制限した場合の最適形状を示します。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が得られていることが分かります。



(a) 積層角度の制限なし

(b) 積層角度の制限あり

図 3 : 最適形状の比較

(2) 積層角度及び変形・残留応力を考慮したトポロジー最適化

金属3D造形で発生する残留応力・変形を数値計算によって求めるための数理モデルの定式化に取り組みました。具体的には溶接プロセス解析で用いられてきた固有ひずみ法を拡張し、金属3D造形プロセスへの適用を可能にしました。定式化した数理モデルの妥当性を検証するために、実際に造形物を作製し、数値計算結果と測定結果の比較を行いました。図4に造形後の形状と設計形状（CADモデル）との偏差を示します。図4(a)は数理モデルによる数値解析での結果、図4(b)は造形物を光学式三次元計測器で測定した場合の結果です。数値解析での結果と測定した場合の結果がよく一致することから、定式化した数理モデルは精度良く変形を予測できることを確認しました。

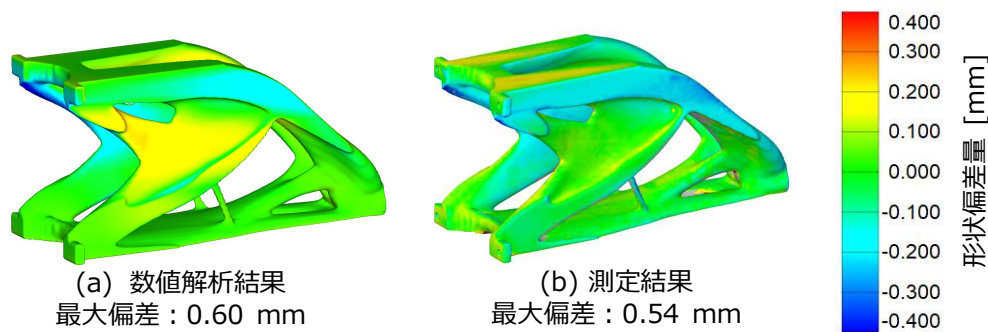


図4：数値モデルの妥当性の評価（設計形状からの偏差量）

この数値モデルを（1）で開発したトポロジー最適化に組み込み、積層角度及び造形時の変形を考慮するトポロジー最適化法を開発し、その検証を行いました。図5は得られた最適形状に対して、造形時の変形を数値計算により評価した結果です。図5(a)は積層角度のみを考慮した場合、図5(b)は積層角度及び造形時の変形を考慮した場合の結果を示しています。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40%低減できていることが分かります。

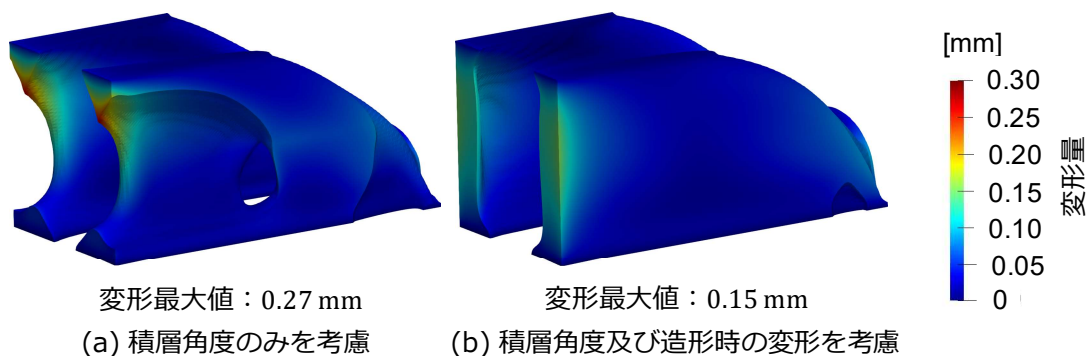


図5：数値解析による造形時の変形評価

また積層角度及び造形時の残留応力を考慮するトポロジー最適化法を開発し、検証を行いました。図6は得られた最適形状に対して、造形時の残留応力を数値計算により評価した結果です。図6(a)は積層角度のみを考慮した場合、図6(b)は積層角度及び造形時の残留応力を考慮した場合の結果を示しています。造形時の残留応力を考慮した場合は考慮しなかった場合と比較して、残留応力を30%低減できていることが分かります。

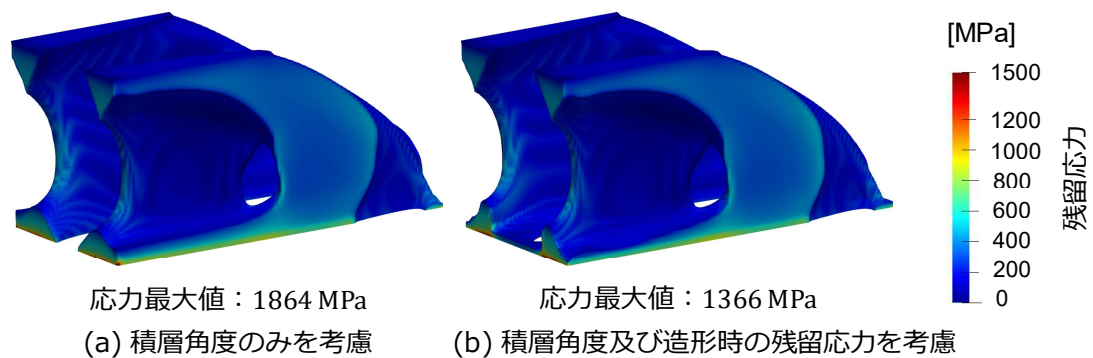


図 6：数値解析による造形時の残留応力評価

以上の結果から、本事業で開発したシステムは金属3D造形の製造性である造形時の積層角度及び変形・残留応力を考慮しながら、高性能な形状が得られることを示すことができました。今後は軽量・高剛性な形状を求める構造問題だけでなく、熱・流体問題に対象を広げ、幅広い産業分野に適用可能な最適設計システムを開発し、実用展開を目指します。

なお、本事業の成果の一部について、第33回設計工学・システム部門講演会で発表しました。