

高重量比特性部材のための CAE を活用した 3 次元中空構造の研究

機械情報システム課 中村陽文、金森直希 機械電子研究所 佐山利彦 ものづくり研究開発センター 山本貴文

1. 緒言

3次元中空構造は、構造内部の幾何形状を変化させることで、部材全体の幾何形状を変えことなく軽量かつ様々な機械的特性をもたせることができると考えられている。そのため、機械設計における多様なニーズに応え得る軽量・高性能部材を作製できるとして期待されている¹⁾。しかしながら、3次元中空構造の設計に関する研究はいまだ十分ではなく、設計指針の構築が望まれている。CAE を活用したトポロジー最適化は、寸法や形状だけでなくトポロジーを考慮可能な最も自由度の高い構造最適化の手法であり、構造探索のための有効な手段になると考えられる²⁾。積層造形装置は、従来の機械加工では困難であった複雑な形状を直接成形できることから、従来にはない新たな機能を有する製品の開発を期待されている。本研究では、トポロジー最適化を用いて、3次元中空構造の単位構造であるユニットセルの剛性最適化を行った。加えて、金属積層造形装置を用いて3次元中空構造の試作モデルを作製した。

2. 実験方法

2.1 ユニットセルのトポロジー最適化

トポロジー最適化は、設計領域において材料の有無を判断する材料分布問題として最適化計算を行うことで最適構造を求める。本研究では、密度法³⁾を用いてトポロジー最適化を行った。密度法は(1)式で示される、正規化された仮想的な材料密度 ρ_{design} を設計変数として導入する。

$$10^{-9} \leq \rho_{\text{design}}^p \leq 1 \quad (1)$$

ここで、 p は中間的な材料密度のペナルティ係数であり、本研究では 3 とした。目的関数は、平均コンプライアンス W_s を初期条件の平均コンプライアンス W_0 で正規化し設計領域 Ω で積分した関数である(2)式を用いた。

$$\int_{\Omega} \frac{W_s}{W_0} d\Omega \quad (2)$$

なお、平均コンプライアンスは剛性の逆数に対応する物理量である。体積制約は元の形状の 30%とした。解析は汎用解析ソフト(COMSOL、COMSOL Multiphysics 5.4)を用いた。

Fig. 1 にトポロジー最適化を行ったユニットセルの解析モデルの模式図を示す。ユニットセルは、1辺 5mm の正六面体とし、異なる荷重条件を想定した 2 つのモデルを作成した。Fig. 1a に示される圧縮荷重モデルは、各頂

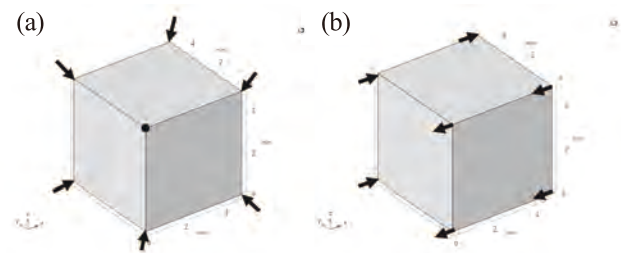


Fig. 1 Schematic diagrams of (a)the compression loads model and (b)the shear loads model; the black arrows indicate the load direction

点に対して 3 軸方向に 100N の等しい圧縮荷重が負荷する状態を想定したモデルである。Fig.1b に示されるせん断荷重モデルは、各頂点に対して X 軸方向に 100N のせん断荷重の負荷する状態を想定したモデルである。対称性および逆対称性を考慮して、各モデルはそれぞれ 8 分の 1 および 16 分の 1 の領域を解析対象とした。メッシュは要素数 3000 以上の 6 面体要素を用いて作成した。材質は、金属積層造形において広く用いられる AISi10Mg 合金(密度: $2.64 \times 10^3 \text{g/mm}^3$ 、ポアソン比: 0.33、ヤング率: 70GPa)を用いた。

2.2 金属積層造形装置による作製

3次元中空構造の造形可能性の評価を目的として、金属積層造形装置(EOS、EOSINT-M280)による試験片の作製を行った。材料は AISi10Mg 合金とし、造形パラメータは装置メーカー提供の標準条件を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 ユニットセルのトポロジー最適化

Fig. 2 に、トポロジー最適化で最適形状として出力された圧縮荷重モデルおよびせん断荷重モデルの形状を示す。同図は仮想的な材料密度が 0.1 以上の要素を表示することで出力している。圧縮荷重モデルおよびせん断荷重モデルの元の形状に対する変形量は、それぞれ約 116%および約 101%となった。圧縮荷重モデルでは 12 辺に断面が円形となる梁が存在する構造が認められる(Fig. 2a)。一方、せん断荷重モデルでは、せん断荷重の作用する 2 面にブレースのような構造が認められる(Fig. 2b)。本研究のモデルでは、1 方向のせん断荷重を想定したため、2 面のみにブレース形状が出力されたが、3 軸方向のせん断荷重を想定する場合は 6 面にブレースのある構造が有効だと考えられる。以上の結果より、圧縮荷重およびせん断荷重に対しては、それぞれ各辺に平行な梁ならびに各面のブレースが有効な形状であることがわかる。

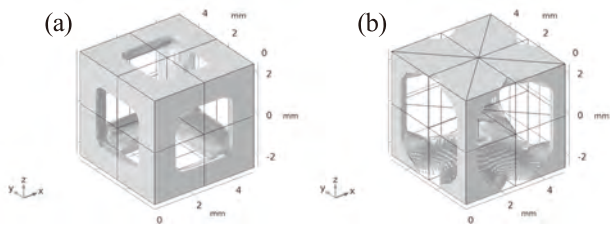


Fig. 2 Optimized shapes of (a)the compressive loads model and (b)the shear loads model for volume fractions of 30%

3.2 金属積層造形による試作モデルの作製

3次元中空構造の造形可能性の評価を目的として、金属積層造形を用いた作製を行った。金属積層造形装置で作製した試験片の外観を Fig. 3 に示す。Lattice1 は、Fig. 2a の形状を 3 軸方向に 4 個配列し造形したものである(Fig. 3a)。Lattice2 は、CAD ソフトで Fig. 2a の形状の各面にブレースを加え 3 軸方向に 4 個配列したものを作図した後、造形したものである(Fig. 3b)。Lattice2 のブレースは、せん断荷重モデルの最適形状を参考に、3 軸方向のせん断荷重に対する強度を加えることを目的とした。Lattice2 の梁の直径は、体積が元の形状の 30%となるように 1.06mm とした。Fig. 3 に示すように、造形物の表面には余剰固化に起因する微細な凹凸が認められる。レーザーの照射される垂直方向には、特に厚い(0.5mm 程度)余剰固化が認められた。表面の余剰固化は、造形物の質量増加に影響すると考えられる。X線 CT 装置(島津製作所、inspeXio SMX-225CT FPD HR)を用いて、作製した試験片の形状および欠陥を評価した。その結果、各試験片は設計データと比較して大きく形状の異なる部分は認められなかった。加えて、内部に空隙等の欠陥は認められなかった。

以上の結果より、金属積層造形を用いて、特に大きな変形および欠陥なく、トポロジー最適化で得られた形状を基にした 3 次元中空構造を作製することができた。今後、

キーワード : CAE、トポロジー最適化、3D プリンター、格子構造

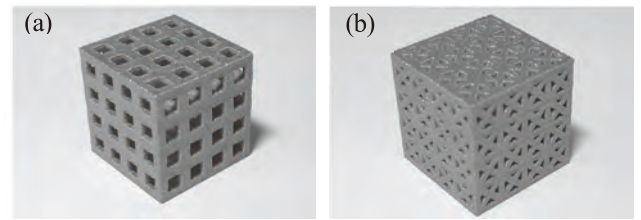


Fig. 3 Lattice structures formed by 3D-Printing (a)Lattice1. (b)Lattice2

作製した試験片の圧縮試験を行う予定である。加えて、実構造部材を想定したユニットセルの特性分布の最適化を行う予定である。

4. 結言

本研究では、3次元中空構造の単位構造であるユニットセルを、トポロジー最適化を用いて剛性の最適化を行った。その結果、6面体の各頂点に3軸等方圧縮荷重の負荷するモデルおよび1軸方向にせん断荷重の負荷するモデルで、体積を元の形状の30%とした際の最適形状を得ることができた。金属積層造形を用いて、トポロジー最適化で得られた形状を基にした3次元中空構造の成形性を評価した結果、変形および欠陥なく成形することができた。

参考文献

- 1) 牛島他:日本機械学会論文集(A 編), **79**, (2013), pp. 620-632
- 2) 西脇他:計算力学レクチャーコース トポロジー最適化, 丸善出版(2013)

謝辞

本研究推進にあたり計測エンジニアリング株式会社にご多大なご協力を頂きました。深く感謝致します。

Study on Lattice Structure Design Using CAE for Lightweight and High-performance Applications

Mechanics and Digital Engineering Section; Takafumi NAKAMURA, Naoki KANAMORI,
Mechanics and Electronics Research Institute; Toshihiko SAYAMA,
Monozukuri Research and Development Center; Takafumi YAMAMOTO

Lattice structures are generally used inside a structural member in order to reduce a weight, and it is important to design shapes of unit cells for high-performance lattice structure. In this study, we tried to optimize the unit cells using a topology optimization method for a designing methodology. In conclusion, the optimal shapes of the unit cells were derived with 30% solid material constraint for the compressive and shear loads situations respectively, and the lattice structures were successfully fabricated using selective laser melting.