

# 軽量・高性能部材のための 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\*1 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ずに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。加えて、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、機械設計における多様なニーズに応え得る軽量・高性能な3次元中空構造を構造部材に適用する道が開かれつつある。しかしながら、3次元中空構造の設計に関する研究はまだまだ十分ではなく、設計指針の構築が望まれている。そこで、CAEを活用した構造最適化は、構造探索のための有効な手段になると考えられる。本研究では、均質化法を用いたユニットセルの弾性係数の評価ならびに、構造最適化計算を用いた3次元中空構造の単位構造であるユニットセルの最適分布の計算を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 ユニットセルの弾性特性解析

均質化法によりマイクロ構造の応答からマクロ構造における等価な特性を求めることで、最適化計算における計算コストを大幅に削減することが可能である。ユニットセルのX方向およびXY方向に単位量のひずみを与え、ひずみを与えていない方向の境界は周期境界条件を与えて有限要素解析を行う。その後、各方向の応力の積分値を計算し、体積で割り平均値を求める。この値は等方弾性体の均質化弾性係数と呼ばれ、マイクロ構造のマクロ構造における等価な物性値とみなせる。ユニットセルの弾性特性解析を目的として、異なる見かけ密度における均質化弾性係数を求め、見かけ密度と均質化弾性係数の関係を、補間関数を用いて表現した。有限要素解析に用いる物性値は、金属積層造形において広く用いられるAlSi10Mg合金(密度： $2.64 \times 10^3 \text{ g/mm}^3$ 、ポアソン比：0.33、ヤング率：

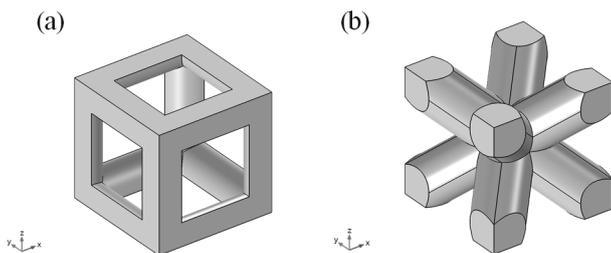


Fig. 1 Schematic diagrams of (a)the Cube and (b)the Bcc type unit cell

70 GPa) とした。

### 2.2 ユニットセルの最適配置

ユニットセルの見かけ密度と均質化弾性係数の補間関数を、3次元中空構造の物性値と設計変数の関係として導入し、最適化計算を行うことでユニットセルの最適な分布を求める。最適化問題は式(1)で示される。

$$\text{minimize: } c(\rho) = \mathbf{f}^T \mathbf{u}$$

$$\text{subject to: } \mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{f}$$

$$\int_{\Omega} v dV \leq V^U \quad (1)$$

$$0 \leq d_i \leq 1 (i = 1, \dots, n)$$

ここで、 $\mathbf{f}$ 、 $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{K}$  および  $v$  は、それぞれ荷重ベクトル、変位ベクトル、全体剛性マトリクスおよび体積である。 $V^U$  は制約条件となる体積である。目的関数はコンプライアンスであり、コンプライアンスの最小化は荷重が一定の場合は荷重点の荷重方向変位の最小化に等しく、構造の剛性を最大化することにつながる。 $d$  はユニットセルの見かけ密度と関係付けられる設計変数である。最適化計算のプログラム実行および有限要素解析はそれぞれ、数値計算ソフト (MATLAB, The MathWorks) および汎用解析ソフト (COMSOL Multiphysics, COMSOL) を用いて行った。最適化の反復回数が150回に達した段階で計算を終了した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 ユニットセルの弾性特性解析

Fig. 1 に、評価対象とした Cube 型および Bcc 型のユニットセルを示す。ユニットセルの形状は、先行研究<sup>1)</sup>で得られたトポロジー最適化の形状を基に造形性を考慮し

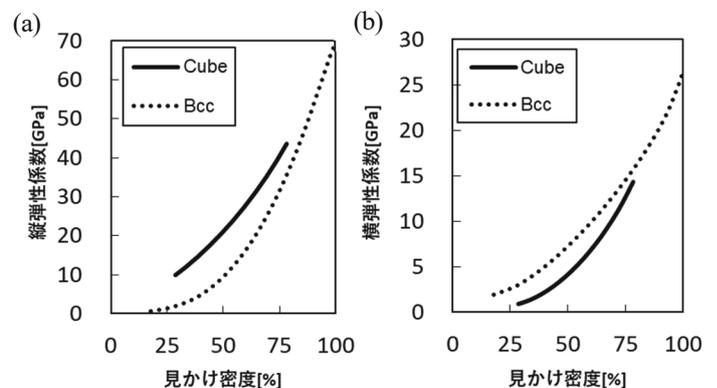


Fig. 2 (a)Young's modulus and (b)shear modulus of the unit cells as a function of the relative density

\*1 現 (公財)富山県新世紀産業機構

て創作したものである。ユニットセルを構成する梁の径を変化させることで、ユニットセルの見かけ密度を変化させた。Fig. 2 に、各ユニットセルの、縦弾性係数および横弾性係数と見かけ密度の補間関数をプロットした図を示す。なお、同図の縦弾性係数および横弾性係数は均質化弾性係数から導出したものである。同図に示されるように、Bcc 型のユニットセルは、Cube 型と比較して縦弾性係数は低いものの、横弾性係数は高い値を示すことがわかる。これは、鉛直方向の梁は縦弾性係数に、斜交する梁は横弾性係数にそれぞれ効果が高いことに起因するものと考えられる。

### 3.2 ユニットセルの最適配置

3次元中空構造の適用対象として、設計領域が  $20 \times 35 \times 15$  mm の片持ち梁のモデルを想定した。片方の側面を完全固定し反対側の側面の一部に 1000 N の等分布荷重を -Z 方向に与えた。制約条件は全体の体積が 50%以下と

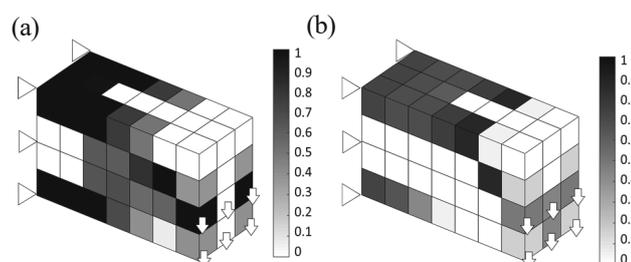


Fig. 3 Distribution of the relative density of (a)the Cube and (b)the Bcc type unit cell

Table 1 Calculated compliance of the lattice structures

ユニットセル	コンプライアンス[J]	
	最適配置	均一配置
Cube	0.073	0.099
Bcc	0.057	0.153

るよう設定した。Fig. 3 に最適化後のユニットセルの見かけ密度分布を示す。Table 1 に最適化後の目的関数（コンプライアンス）ならびに見かけ密度 50%の均一なユニットセルを配置させた場合のコンプライアンスの計算値を示す。最適化後のコンプライアンスは、Bcc 型と比較して Cube 型の方が大きいことから、今回のモデルでは Bcc 型のユニットセルが適していると考えられる。Cube 型および Bcc 型のユニットセルは共に見かけ密度 50%のユニットセルを均一に配置させた場合に比べてコンプライアンスはそれぞれ約 26%および約 63%減少した。

今後、本研究の手法を用いて、構造部材を想定したユニットセル分布の最適化、ならびに金属積層造形装置を用いた作製と評価、計算値との比較を行う予定である。

### 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の均質化弾性係数を求め、構造最適化計算を用いてのユニットセルの最適な分布を求めた。その結果、体積を元の形状の 50%とした際に剛性最大化したユニットセルの分布を得ることができた。Bcc 型のユニットセルを最適に分布させた 3次元中空構造は、見かけ密度 50%のユニットセルを均一に配置させた 3次元中空構造に比べてコンプライアンスは約 63%減少した。

### 参考文献

- 1) 中村陽文他, 富山県産業技術研究開発センター研究報告, **33**, (2019)93-94.

### 謝辞

本研究推進にあたり早稲田大学理工学術院の竹澤晃弘准教授に多大なご協力を頂きました。深く感謝致します。

キーワード : CAE、最適化、3D プリンター、ラティス構造

## 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\*1,  
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 lattice structure for high-performance applications. In this study, homogenization and structural optimization was performed to capture the effective mechanical properties of the unit cells and optimize distribution of the unit cells for the part being optimized. In conclusion, compliance of the optimal lattice structure composed by Bcc type unit cells decreases 63% compared to un-optimized lattice structure.