

負のポアソン比を有するセルベース構造

明治大学 理工学部 機械情報工学科 ○田中智大, 明治大学 理工学部 機械情報工学科 ◎館野寿丈

要旨

負のポアソン比という特殊な機械的性質を有する内部構造の評価を行い、その内部構造を用いた熱膨張を防ぐ構造の設計方法の提案を目的とする。単一のユニットセルのみではなく、複数材料を適用したいくつか異なる形状のユニットセルを組み合わせそれぞれ適切な位置に配置することにより一つの構造を作成し、構造全体としての熱膨張を防ぐことを可能にした。

1. 序論

近年、急速な AM (Additive Manufacturing) 技術の発展により従来の加工方法では製造することが容易ではなかった複雑な形状のものを作成することが可能となった。負のポアソン比 (Negative Poisson's Ratio) を有する構造はその構造の複雑さゆえに従来の加工方法で再現するのは非常に難しく、AM 技術発展の恩恵を大きく受けた構造の中の一つであると言える。

自然界に存在する均質で様な物質で負のポアソン比を有するものの量は限られているが、均質で様な物質の代わりに 3 次元単位格子構造 (ユニットセル) を用いることで特殊な機械的性質を有する構造を再現することは可能とされている。

本論では、負のポアソン比の機械的性質を有する内部構造を用いて構造の熱膨張を抑制することを行う。近年、熱膨張率の異なる複数材料を用いて熱による膨張を防ぐ単一のユニットセルが開発されてきているが、ここでは単一のユニットセルのみで熱膨張を防ぐのではなく、いくつか異なる形状のユニットセルを組み合わせ適切な位置に配置することにより一つの構造を作成し、構造全体としての熱膨張を防ぐ設計方法の提案を目的とする。

2. 解析モデルの作成

2.1. ユニットセルの作成

以下の図 1 と図 2 に従来の負のポアソン比を有するユニットセルの内部に熱膨張率の異なるリブを搭載したモデルを示す。なお、ユニットセルの大きさは 13mm×13mm×13mm とする。

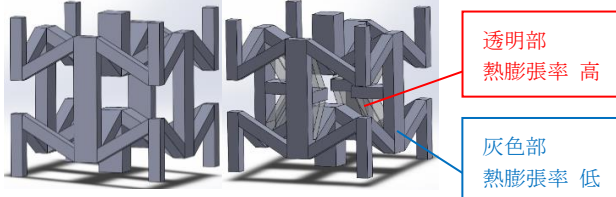
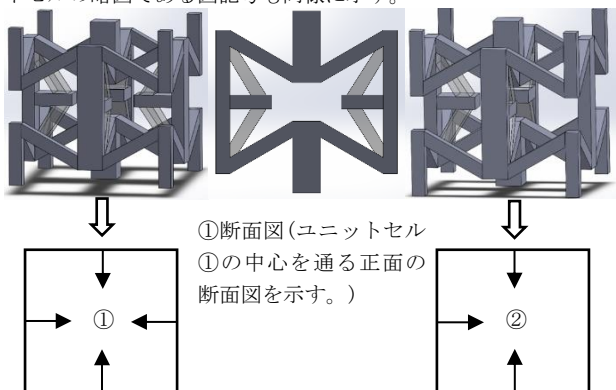


図 1. 従来モデル 図 2. リブ搭載モデル

リブを搭載する位置を変えたユニットセルを各種作成し、以下の図 3 に示す。また、搭載したリブの位置を矢印で示したユニットセルの略図である図記号も同様に示す。



①断面図 (ユニットセル①の中心を通る正面の断面図を示す。)

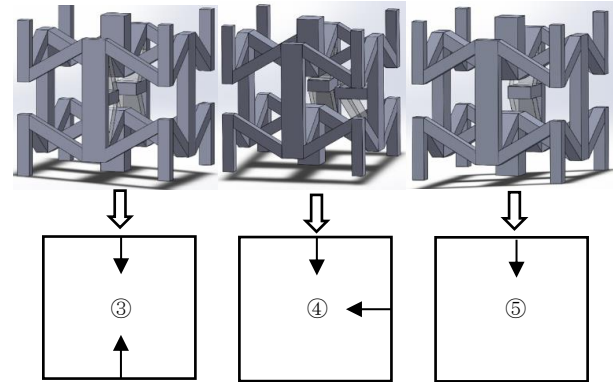


図 3. 各種ユニットセル

2.2. 解析モデルの作成

ユニットセルを x,y 軸方向にそれぞれ 3 ユニットずつ、計 9 つのユニットセルで一つの構造を作成する。その際セルの配置は以下の図 4 で示した図記号に従う。

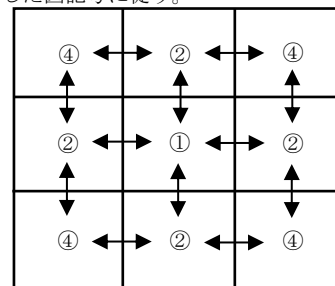


図 4. 解析構造の図記号

比較検討のため (A) 中が一樣に詰まったブロック、(B) 従来の負のポアソン比を有するユニットセルで作成された構造、(C) 内部にリブを搭載した負のポアソン比を有するユニットセルで作成された構造の 3 つを作成する。(C) は先に作成された図 4 である。なお (A)、(B)、(C) 3 つの構造は同体積である。以下の図 5~7 に作成した解析構造を示す。

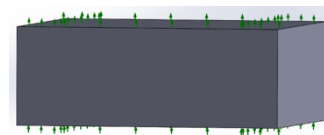


図 5. (A) ブロック

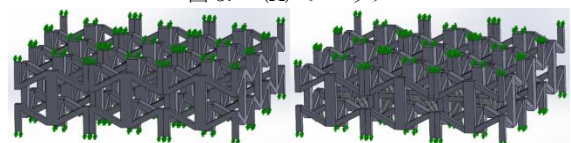


図 6. (B) リブなし

図 7. (C) リブあり

3 コンピュータシミュレーション

3.1. 解析条件

作成された構造の3つを同条件で比較するため全てに以下の解析条件を適用し、各構造間の最大合成変位の比較を行う。熱膨張率の高いものとしてアクリル、低いものとしてナイロン101をそれぞれ適用する。

使用ソフト:	SOLIDWORKS simulation 2016 Edition
解析方法:	有限要素法
解析種類:	熱伝導解析、熱応力解析
材料:	アクリル (熱膨張率 5.2×10^{-5}) ナイロン 101 (熱膨張率 1.0×10^{-6})
温度荷重:	全体表面に 70°C

3.2. 解析結果

以下の表1に各構造の最大合成変位をまとめたものを示す。(A)と(B)の構造は構造の側面が最大合成変位となったが、(C)の構造のみ内部のリブが構造全体の最大合成変位となった。したがって、同条件で構造間の比較をするため(C)の構造は構造の側面の変位を最大合成変位として選定し比較を行う。なお収縮方向の変位をマイナス、膨張方向の変位をプラスとする。

表1 各構造の最大合成変位

構造名	(A)	(B)	(C)
熱膨張[mm]	0.00114	0.00062	-0.00250

上記の表1より、(C)内部にリブを搭載した負のポアソン比を有するユニットセルで作成された構造のみが構造全体の熱膨張を抑制することができるという結果となった。

3.3. 考察

以下の図8に(C)の構造の解析結果の表示画面を示す。なお、表示変形スケールは200倍となっている。

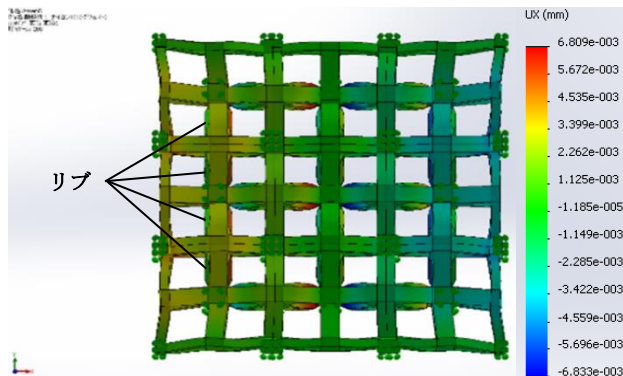


図8 解析結果(C)構造

この解析結果は構造の上面から見たものであり、右方向がX軸の正の方向で上方がY軸の正の方向となっている。図8は構造の左側が赤色、右側が青色を示している。これは構造の左側はX軸の正の方向に変形し、構造の右側はX軸の負の方向に変形しているということである。したがって、構造は全体的には膨張せず収縮したという結果を示している。

この結果を示した理由として、図8を見てみると熱膨張率の高いものを適用したリブがほかの部分よりも大きく変形していることが分かる。

内部にリブを搭載することによってリブが大きく変形しユニットセルの側面を内部に引き込むことが可能となった。これにより各自ユニットセルごとの膨張を抑制し、さらに各ユニットセルの接続を考慮し構造の適切な位置にユニットセルを配置することで構造全体の膨張を抑制することができたと考えられる。

今回解析した構造は3x3の9ユニットセル分の構造であったが、それ以外の構造ではどうなるのか。さらに考察を行うため、追加の解析を行った。図4に作成した構造を踏まえ、ユニットセルの隣接する面にリブをそれぞれ搭載するようにし以下の図9~11の構造を作成、先に行った解析と全て同じ解析条件で解析を行った。

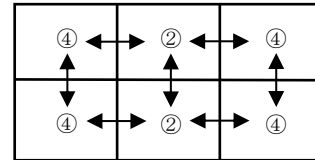


図9 6ユニットセル

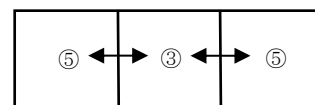


図10 3ユニットセル

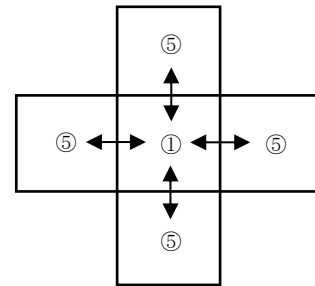


図11 5ユニットセル

図9の構造の解析結果は構造全体の熱膨張の抑制に成功したのに対し、図10と11は構造全体の熱膨張の抑制には失敗してしまった。この結果を踏まえると構造全体の熱膨張を抑制したい場合、構造を作成する際に全てのユニットセルが接触面を2面以上持たなくてはならないということが分かった。実際、ここには掲載されていないが4x4の16ユニットセル分の構造は全てのユニットセルが接触面を2面以上持っていたため、構造全体の熱膨張の抑制に成功している。

4. 結論

表1より、一般的な負のポアソン比を有するユニットセル構造の内部に熱膨張率の異なる複数材料で作成されたリブを搭載し、作成されたユニットセルを適切な位置に配置し構造を作成することで、構造全体の熱膨張を防ぐことを可能にした。

5. 参考文献

- (1) Li Yang, et al., Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive Manufacturing, International Journal of Solids and Structures, 69-70, May 2015, 475-490
- (2) Hang Xu, et al., Structurally Efficient Three-dimensional Metamaterials with Controllable Thermal Expansion, SCIENTIFIC REPORTS, October 2016, 1-8
- (3) Qiming Wang, et al., Lightweight mechanical Metamaterials with Tunable Negative Thermal Expansion, PHYSICAL REVIEW LETTERS, 175901, October 2016, 1-6