

15D17

3D プリンタ製インバーによる高形状安定性断熱プレート

High Shape Stability Insulation Plate with Invar Made by 3D Printer

○学 須永 大介^{*1}, 石村 康生^{*1}蓮見 侑士^{*2}, 朝比奈 允暉^{*2}, 大山 伸幸^{*2}Daisuke SUNAGA^{*1}, Kosei ISHIMURA^{*1},Yuji HASUMI^{*2}, Mitsuki ASAHINA^{*2}, and Nobuyuki OYAMA^{*2}^{*1} 早稲田大学 Waseda University^{*2} 日本鑄造 (株) Nipponchuzo K.K.

In recent years, the demand for satellite structures with high dimensional stability is becoming severer as space mission becomes more advanced. For example, the telescope is one of the structures that require the highest dimensional stability. To prevent deterioration of observation performance caused by thermal deformation, low thermal expansion materials such as CFRP, glass, and low thermal expansion metals are applied. Especially for the interface parts of such structures, low thermal expansion metals are applied for their strength and machinability. However, there is a problem that these metals such as Invar alloys have high specific gravity. In addition, these interface parts often require thermal insulation as well. Therefore, in this study, we design and develop an interface plate made of Invar, which is light, and has both low thermal expansion and low thermal conductivity. To achieve this goal, we focused on the lattice structure, which can be manufactured by making use of metal additive manufacturing technology. We manufactured 4 types of lattice specimens with Invar, and examined their weight, thermal conductivity, and compression stiffness. It was confirmed that the lattice structure reduced the weight by 70 % or more, and the thermal conductivity by 90 % or more compared to solid member. However, it was identified that there is room for more improvement in compressive stiffness.

Keywords: Invar, Additive manufacturing, Lattice, Thermal expansion, Thermal conductivity

1. 緒 言

近年の宇宙ミッションの高度化に伴い、衛星構造の安定化に対する要求が厳しくなっている。例えば、望遠鏡構造は最も高い寸法安定性が求められるミッション機器の一つである。軌道上の温度変化によって熱変形が生じると機器の位置アライメントが劣化し、性能が低下する。そのため、各部材には低熱膨張性に優れた金属やCFRP、ガラスなどを適用している。特にそれらの機器の締結部には、強度や機械加工性の観点から金属が適用されることが多いが、インバー合金など低熱膨張性を有する金属は、比重の大きさが課題となる⁽¹⁾⁽²⁾。さらに、締結部には断熱性能が要求されることもある⁽³⁾。インバー合金の軽量化および熱伝導率の低減を両立する手法として、部材をラティス構造とすることが考えられる。ラティス構造はその形状の複雑さから従来の加工方法では造形が困難であったが、近年発達している積層造形技術によって造形が可能となる。そこで本研究では、金属積層造形技術をインバー合金に適用し、ラティス構造を用いて低熱膨張性、軽量性、低熱伝導性を備えたプレートを実現する。

2. 3D プリンタ製インバーによる高形状安定性断熱プレート

2.1 設計指針

ラティス構造において単位格子の幾何形状や素線の直径を変化させると、構造全体としての機械的特性も様々なに変化させることができる。一般に、構造を疎なものとしていけば軽量化および熱伝導率の低減は実現できるが、

剛性とはトレードオフの関係となる。そのため本研究では、剛性を損なわずに所望の軽量化および熱伝導率の低減が達成できるよう、単位格子の寸法を変化させて試験片を設計し、その特性を評価することとした。

2・2 試験片

本研究では図 1(a)に示す BCC 構造の単位格子を用いた。素線の直径 d は安定して造形可能な範囲で最小の 1 mm とし、他の寸法を表 1 のように変化させた。それぞれの単位格子を繰り返し組み合わせ、上下に $\square 40$ mm、厚さ 1 mm の板を配置することにより、全体で $\square 40$ mm、厚さ 12 mm の試験片とした。図 1(b)に 4 種類の試験片の形状を示す。Lattice 1 と Lattice 3、および Lattice 2 と Lattice 4 を比較することで素線の角度による試験片の特性の変化を、Lattice 1 と Lattice 4 を比較することで素線の疎密による試験片の特性の変化を確認することができる。

試験片は低熱膨張合金 LEX-ZERO®の造形粉末を用い、パウダーベッド方式により造形した。実際に造形された試験片の様子を図 2 に示す。LEX-ZERO®の物性を表 2 に、試験片の質量、および試験片が均一材であると仮定した場合のみかけの比重を表 3 に示す。内部をラティス構造とすることで、中実の場合に対して約 70 %から 80 %程度比重が小さくなることが確認できた。

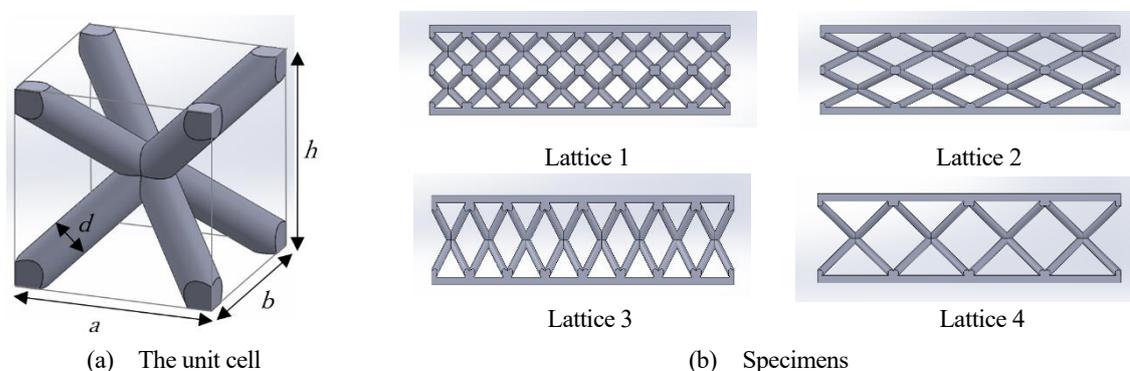


Fig. 1 3D-CAD models

Table 1 Dimensions of each unit cell

Symbol	a [mm]	b [mm]	h [mm]	d [mm]
Lattice 1	5	5	5	1
Lattice 2	10	10	5	1
Lattice 3	5	5	10	1
Lattice 4	10	10	10	1

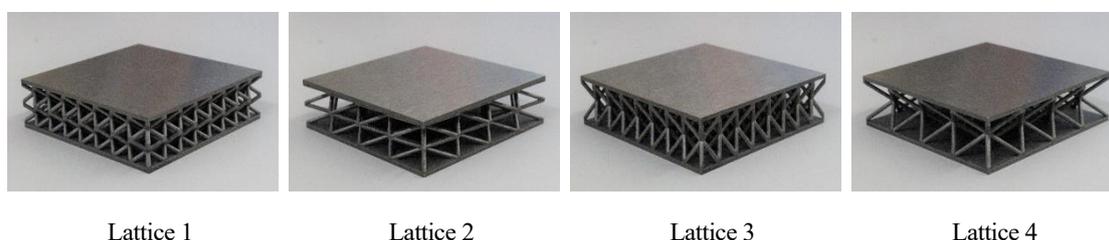


Fig. 2 Manufactured specimens

Table 2 Physical property of LEX-ZERO®

Average thermal expansion coefficient [ppm/K]	Young's modulus [GPa]	Thermal conductivity [W/(m·K)]	Specific gravity
0.00±0.19	131	13.9	8.10

Table 3 Mass and apparent specific gravity of each specimen

Symbol	Mass [g]	Apparent specific gravity
Lattice 1	46.6	2.43
Lattice 2	34.5	1.80
Lattice 3	39.8	2.07
Lattice 4	30.7	1.60

3. 熱伝導率評価

3・1 解析方法

LEX-ZERO®の熱伝導率を $13.9 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 試験片下面の温度 T_0 を 100°C , 試験片上面の対流係数 h を $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 雰囲気温度 T_∞ を 30°C とし, 有限要素法解析 (NASTRAN) により, 定常状態で試験片上面の温度 T を求めた. そして試験片の厚み L を用いて, 試験片が均一材であると仮定したときのみかけの熱伝導率 λ を式(1)により算出した.

$$\lambda = \frac{Lh(T - T_\infty)}{T_0 - T} \quad (1)$$

3・2 実験方法

熱伝導率の測定は, 解析により最も優位な差が出ると考えられた Lattice 1 および Lattice 4 について行った. 図 3 に示す温度傾斜法により測定した. 測定温度は室温 (約 30°C), 接合界面圧力は約 30 kPa とした. 接触熱抵抗を低減するため, 界面には熱伝導グリースを塗布した.

3・3 結果

解析により求められた Lattice 1 の温度分布を図 4 に, それぞれの試験片の熱伝導率の解析結果および Lattice 1, Lattice 4 についての実験結果を表 4 に示す. 解析結果より, 材料の熱伝導率 $13.9 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ に対し, すべての試験片において 90% 以上の熱伝導率の低減が可能であることが示された.

Lattice 1 と Lattice 3, および Lattice 2 と Lattice 4 を比較すると, 素線の角度を変化させたことによる有意な差は見られない. しかしながら Lattice 1 および Lattice 4 の比較により, 素線を疎にすることにより熱伝導率が 76.8% 低減されていることが分かる. このことより, BCC 構造のラティス構造については素線の疎密が熱伝導率に対する支配的なパラメータであるといえる.

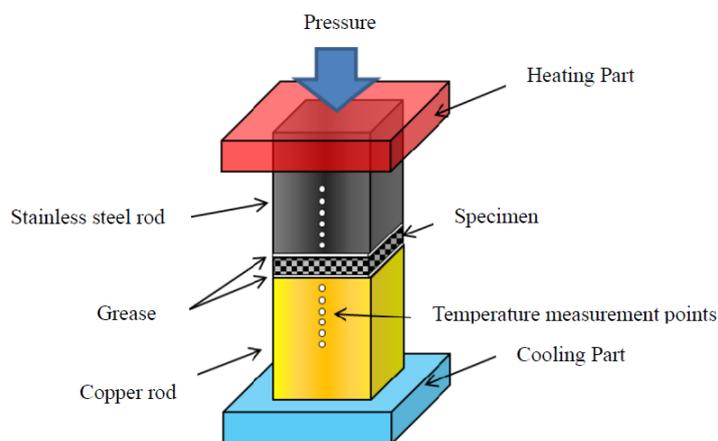


Fig.3 Experimental apparatus for measuring thermal conductivity

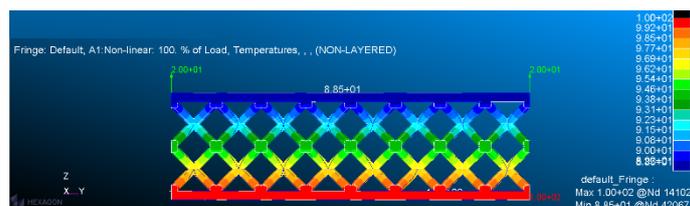


Fig.4 Analysis model of thermal conductivity

Table 4 Experimental and analysis result of thermal conductivity

Symbol	Analysis value [W/(m·K)]	Experimental value [W/(m·K)]	Relative error [%]
Lattice 1	1.22	1.3	+6.6
Lattice 2	0.204	-	-
Lattice 3	1.15	-	-
Lattice 4	0.283	0.37	+31

4. 圧縮剛性評価

4・1 解析方法

LEX-ZERO®のヤング率 131 GPa, ポアソン比 0.3 を用いた。試験片下面の変位は図 6(a)のように拘束した。試験片上面は拘束せず 1 kN の荷重を付加し, 有限要素法解析 (NASTRAN) により変位を求めた。荷重, 試験片上面の中央の変位, 試験片の断面積, 厚みを用いて圧縮剛性を算出した。

4・2 実験方法

万能試験機 (島津製作所: オートグラフ AG-IS-100kN) による圧縮試験を行った。Lattice 1 および Lattice 3 については 100 kN ロードセル, Lattice 2 および Lattice 4 については 10 kN ロードセルを用い, どちらも試験速度 1 mm/min で行った。試験片の変位は, 上端および下端に付けた標点の様子をビデオカメラで撮影し, 動画解析ソフト DIPP-Motion によりその変位を解析することで求めた。得られたデータにより応力-ひずみ曲線を作成し, 圧縮剛性を算出した。

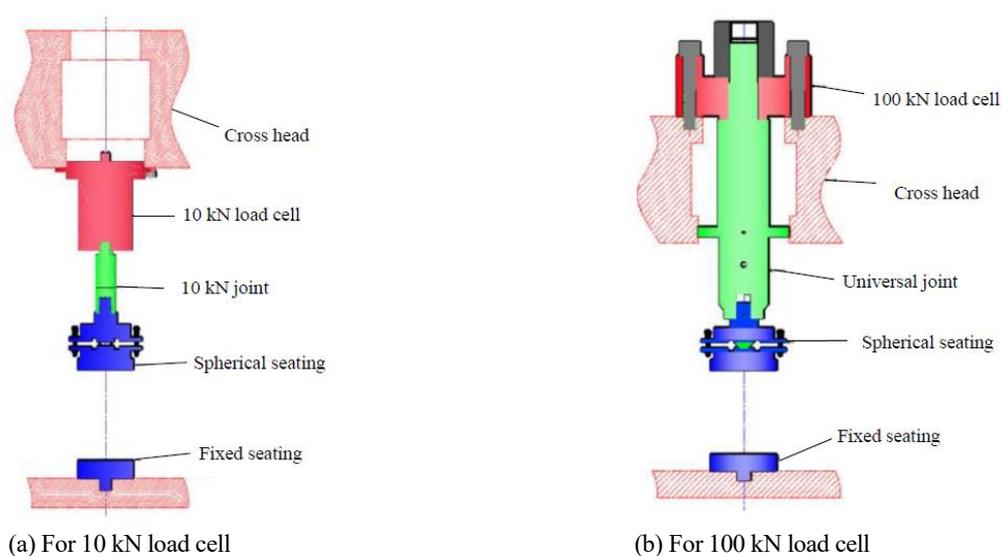


Fig.5 Experimental apparatus for measuring compression stiffness

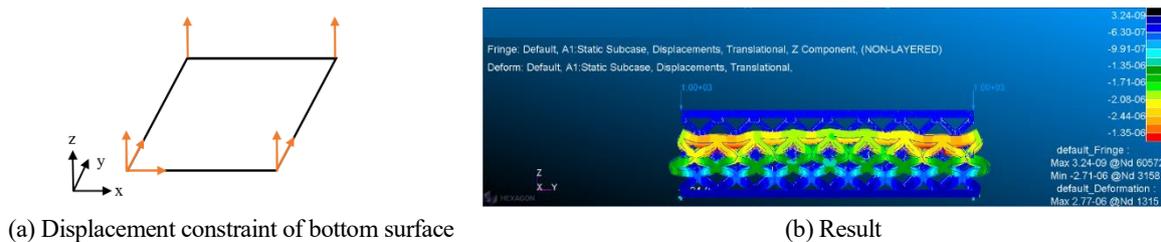


Fig.6 Analysis model of compression stiffness

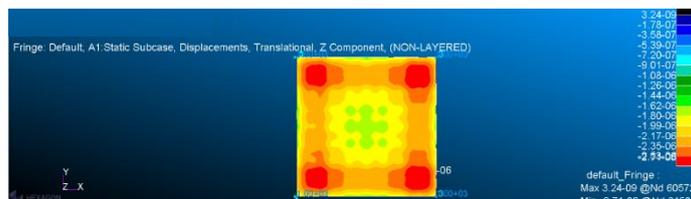


Fig.7 Displacement distribution of top surface

4・2 結果

解析により求められた Lattice 1 の変位の様子を図 6 に、上面の変位分布を図 7 に、それぞれの試験片の圧縮剛性の解析結果および実験結果を表 5 に示す. Lattice 1 と Lattice 3, および Lattice 2 と Lattice 4 の比較により, 素線の角度と圧縮方向のなす角が大きいほど圧縮剛性が低下することが確認された. また Lattice 1 と Lattice 4 の比較により, 素線を疎にすると圧縮剛性が 84.9%低下することが確認された.

Table 5 Analysis and experimental result of compression stiffness

Symbol	Analysis value [MPa]	Experimental value [MPa]	Relative error [%]
Lattice 1	5629	4915	-12.7
Lattice 2	120	129	+7.50
Lattice 3	9047	8484	-6.22
Lattice 4	852	753	-11.6

5. 結 言

本研究では 3D プリンタ製インバーによる高形状安定性断熱プレートについて, ラティス構造を取り入れることにより中実の場合に対して 70%以上の軽量化および 90%以上熱伝導率の低減ができることを確認した. しかしながら, 圧縮剛性についてはさらなる改善の余地があることが識別された.

文 献

- (1) 北本和也, 長田泰一, 内田英樹, 住田泰史, 畠中龍太, “宇宙機への金属 Additive Manufacturing の適用・研究事例”, 非破壊検査第 70 巻 7 号(2021), pp.254-260.
- (2) 神谷友裕, 菅原潤, 水谷忠均, 安田進, 北本和也, 清水隆三, “超高安定アサーマル構造を目指したゼロ膨張セラミックスの適用について”, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会講演集.
- (3) 岩田直子, 小川博之, 高橋忠幸, 臼井隆, 三木明彦, 池田瑞穂, 飯田浩, 湯本隆宏, 小野ゆかり, 阿部和弘, 立川清隆, “X 線天文衛星 ASTRO-H の熱制御システム”