

金属粉末レーザ積層造形により作製された Al-10Si-0.3Mg 合金ラティス構造体の異方性圧縮挙動

北 蘭 幸一

東京都立大学 大学院システムデザイン研究科 航空宇宙システム工学域

1. 緒 言

近年、付加製造(Additive Manufacturing: AM)法の飛躍的な発展により、金属 AM 法で作製された金属部品が実用化されつつある[1]。本研究で取り扱う金属ラティス構造体[2]は、3次元の周期的または非周期的な格子によって形成された材料であり、3D-CAD により任意のセル形状を設計可能である。特徴的な 3D セル構造を従来の発泡プロセスで作製することは非常に難しいため、多くの金属ラティス構造体の作製に AM 法が用いられている[3]。オープンセル型ポーラス材料の一種である金属ラティス構造体は、人工骨[4]や熱交換器[5]として注目されているが、衝撃吸収材料としても魅力的な材料である。著者[6]は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)による小型月着陸実証機(SLIM: Smart Lander for Investigating Moon)の着陸脚用衝撃吸収材料として、金属粉末レーザ積層造形(PBF-LB)法によるアルミニウム合金ラティス構造体を開発した。SLIM は 2023 年 9 月に打ち上げられ、2024 年 1 月に月面へのピンポイント着陸に成功した。

アルミニウム合金ラティス構造体の衝撃吸収特性は、合金の機械的特性とセル構造によって決まる。衝撃吸収のためには、大変形による高いエネルギー吸収能が必要であるため、合金には高延性が必要となる。著者[7]は、PBF-LB 法による造形ままの Al-10Si-0.3Mg 合金ラティス構造体を焼なまし処理することにより、飛躍的にエネルギー吸収能が向上することを明らかにした。一方、アルミニウム合金ラティス構造体における規則セル構造と機械的特性の関係については、不明な点が多い。その理由は、研究者によって合金、造形プロセス、ユニットセル構造がばらばらであり、得られた実験結果の比較が難しいからである。本研究では、同じアルミニウム合金、同じ造形プロセス、同じユニットセル構造の規則セル型ラティス構造体を用いて、機械的特性に及ぼす相対密度と圧縮方向の影響を明らかにする。そのため、アルミニウム合金として Al-10Si-0.3Mg 合金、造形プロセスとして PBF-LB 法、ユニットセル構造として菱形十二面体を選択した。

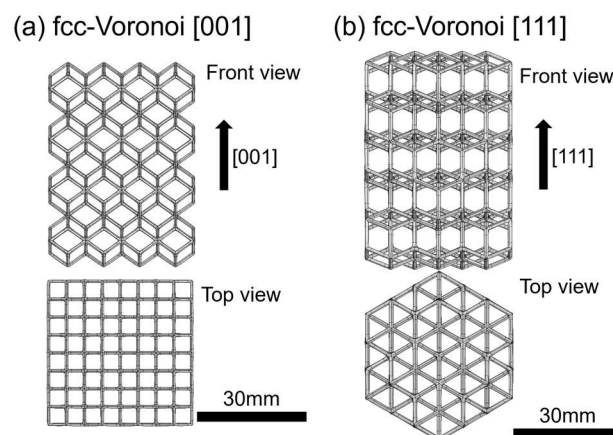


Fig. 1 3D-CAD models of (a) fcc-Voronoi [001] lattice with the relative density of 0.039 and (b) fcc-Voronoi [111] lattice with the relative density of 0.040.

2. 実験方法

ラティス構造体試験片の 3D-CAD モデルは、市販の 3D-CAD ソフトウェア Rhinoceros 8 を用いて作成された。3D-CAD モデルを Fig. 1 に示す。ユニットセル形状は菱形十二面体であるが、fcc 格子点を母点とした 3D-Voronoi 分割によって作成されたため、ここでは fcc-Voronoi セルと呼称する。圧縮方向は fcc 格子における[001]および[111]方向と平行とした。回転対称性を考慮して、[001]方向試験片は正四角柱、[111]方向試験片は正六角柱とした。なお、[001]方向、[111]方向試験片の相対密度とストラット直径は、それぞれ 0.039, 0.7 mm, 0.040, 1.0 mm とした。

PBF-LB 法による試験片の造形を日本積層造形(株)および(株) NTT データザムテクノロジーに依頼した。Al-10Si-0.3Mg 合金粉末から、[001]方向試験片は EOS M 400-4, エネルギー密度 50 J/mm³, [111]方向試験片は EOS M 290, エネルギー密度 41 J/mm³ で造形された。試験片の軸方向と造形方向は平行である。試験片のかさ密度 ρ^* と Al-10Si-0.3Mg 合金の密度 ($\rho_s = 2.67 \text{ Mg/m}^3$) から相対密度を算出した。造形後、電気炉を用いて大気中、803 K, 8 h の焼なまし処理を行った。島津製作所製万能試験機 AUTOGRAPH AGX-50kNVD を用いて、圧縮速度 1 mm/min (初期ひずみ速度 $3.4\sim 4.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) で室温圧縮試験した。

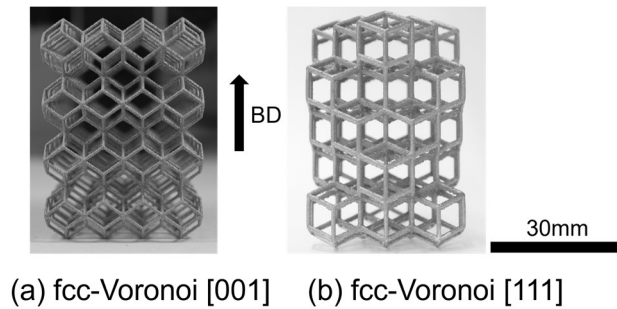


Fig. 2 Photographs of additively manufactured Al-10Si-0.3Mg alloy lattice structures. (a) fcc-Voronoi [001] with the relative density of 0.034, (b) fcc-Voronoi [111] with the relative density of 0.043.

3. 結果

造形後の試験片写真を Fig. 2 に示す。[001]方向試験片は 4 種類の相対密度、[111]方向試験片は 3 種類の相対密度とした。すべての試験片外観に欠陥は観察されなかった。Table 1 に 3D-CAD モデルと造形された試験片の相対密度を示す。3D-CAD モデルに対して試験片の相対密度はやや低かった。また、[001]方向試験片の造形誤差が[111]方向試験片に比べて大きい傾向があったが、これは[001]方向試験片は全てのストラットが造形方向に対して斜めになっており、造形が難しかったためと考えられる。

Table 1 Relative densities of as-designed and as-built specimens.

fcc-Voronoi [001]		fcc-Voronoi [111]	
ρ^*/ρ_s as-designed	ρ^*/ρ_s as-built	ρ^*/ρ_s as-designed	ρ^*/ρ_s as-built
0.16	0.15	0.14	0.13
0.13	0.11	0.090	0.088
0.079	0.064	0.040	0.043
0.039	0.034		

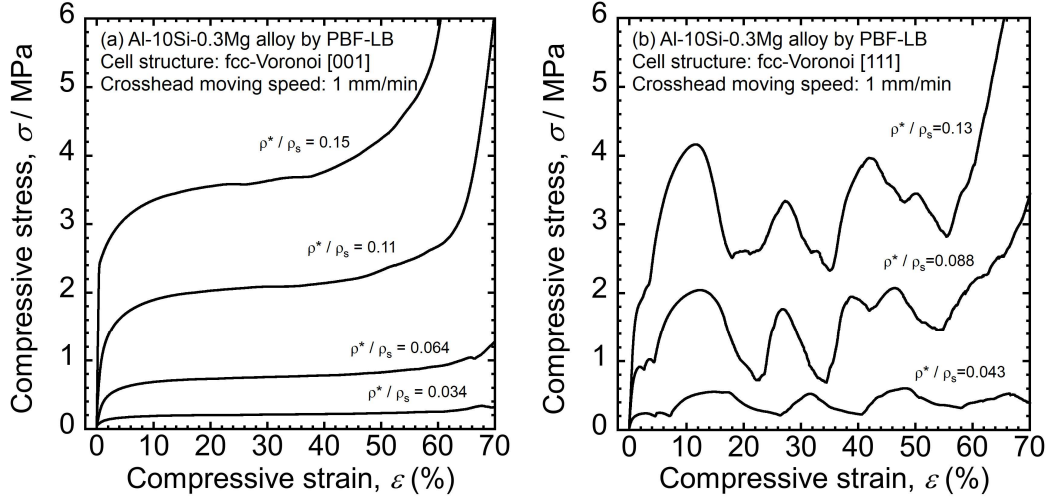


Fig. 3 Results of compression tests of (a) fcc-Voronoi [001] lattice structures and (b) fcc-Voronoi [111] lattice structures.

[001]方向試験片の圧縮試験結果を Fig. 3(a), [111]方向試験片の圧縮試験結果を Fig. 3(b)に示す。どちらの方向も、相対密度が高いほど変形応力は上昇した。[001]方向試験片の場合、S-S 曲線はなめらかに単調増加し、ひずみ 60%程度で緻密化領域に入った。一方、[111]方向試験片は、高い初期最大圧縮応力を示し、S-S 曲線に顕著な応力振動が観察された。

4. 考察

圧縮試験結果から、ひずみ 20%から 30%までの平均応力であるプラトー応力、エネルギー吸収量 W を以下の式、

$$W = \frac{1}{100} \int_0^{\epsilon_0} \sigma d\epsilon \quad (1)$$

から求めた[Fig. 4]。ここで $\epsilon_0 = 50\%$ とした。[111]方向試験片の方が初期最大圧縮応力は高かったが、プラトー応力、エネルギー吸収量で比較すると、圧縮方向による差はほとんどなかった。また、圧縮方向に関係なく、プラトー応力およびエネルギー吸収量は、それぞれ、

$$\sigma_P = 171 \left(\frac{\rho^*}{\rho_S} \right)^2 \text{ [MPa]} \quad (2)$$

$$W = 87 \left(\frac{\rho^*}{\rho_S} \right)^2 \text{ [MJ/m}^3\text{]} \quad (3)$$

という相対密度の 2 乗に比例した。相対密度指数の値は、過去の金属ラティス構造体の圧縮試験結果[8]とよく一致した。したがって、規則セルで形成されたラティス構造体においては、セル構造、圧縮方向に関係なく、プラトー応力の相対密度依存性が 2 乗則になることは間違いないと考えられる。一方、不規則セルで形成されたオープンセル型ポーラス金属では 2 未満の相対密度指数が報告されており[9]、これらの違いについては今後の研究が必要である。

fcc-Voronoi ユニットセル中の 24 本のストラットと z 軸(圧縮方向)とのなす角度 θ の模式図を Fig. 5 に示す。[001]方向試験片ではすべてのストラット角度が $\theta = 55 \text{ deg}$ であるのに対し、

[111]方向は、6本が0 deg (平行), 18本が71 degである。ストラットに生じる曲げモーメント M は、圧縮力を F , ストラット長さを a とすると、

$$M = \frac{1}{2} Fa \sin \theta \quad (4)$$

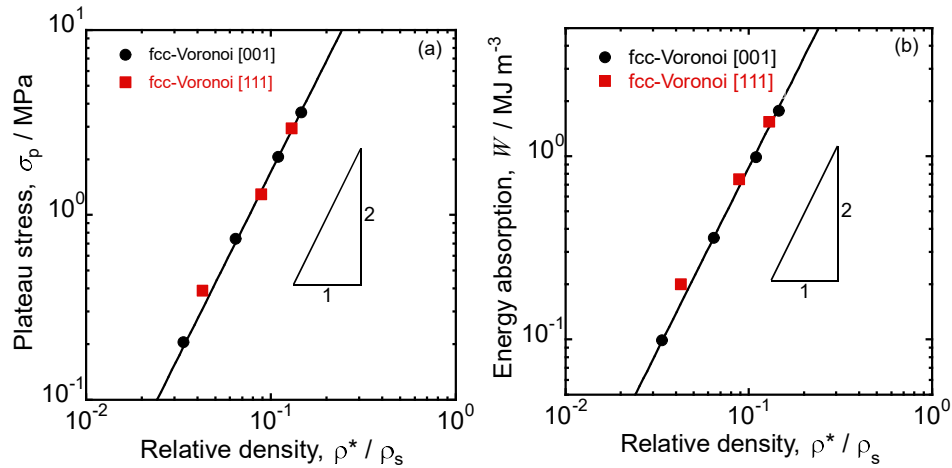


Fig. 4 (a) Plateau stress and (b) energy absorption are plotted as a function of relative density.

と記述できる[10]ので、[001]方向試験片では全てのストラットに等しい曲げ応力が発生していることがわかる。一方、[111]方向試験片では、18本のストラットに曲げ応力が生じているが、 z 軸と平行な6本のストラットには曲げ応力が生じず、軸力が発生している。圧縮試験中のその場観察により、[111]方向試験片における応力振動は、 z 軸に平行なストラットの座屈変形に対応して生じていることがわかった。同様の現象は hcp 格子点を母点とした Voronoi 分割により作製された台形菱形十二面体セル構造体でも報告されている[11]。したがって衝撃吸収を目的とする規則セル構造体においては、応力振動の原因となる z 軸に平行なストラットを避けた方がよいと言える。

5. 結 言

Al-10Si-0.3Mg 合金粉末から PBF-LB 法により菱形十二面体ユニットセルの規則セル型ラティス構造体を作製した。圧縮挙動の相対密度および圧縮方向の影響を実験的に調べ、以下の点を明らかとした。

- ・ アルミニウム合金ラティス構造体のプラトー応力、エネルギー吸収量は、セル構造や圧縮方向に関係なく、相対密度の2乗に比例した。この関係は、過去の規則セル構造体の結果とよく一致した。
- ・ fcc-Voronoi セルは、[001]方向からの圧縮ではなめらかな S-S 曲線を示したが、[111]方向からの圧縮では、顕著な応力振動を示した。
- ・ 応力振動の主な原因は、ラティス構造体を構成するストラットと圧縮方向とのなす角度と考えられ、圧縮方向と平行なストラットが多い規則セル構造体の場合、座屈変形による応力振動が生じやすい。

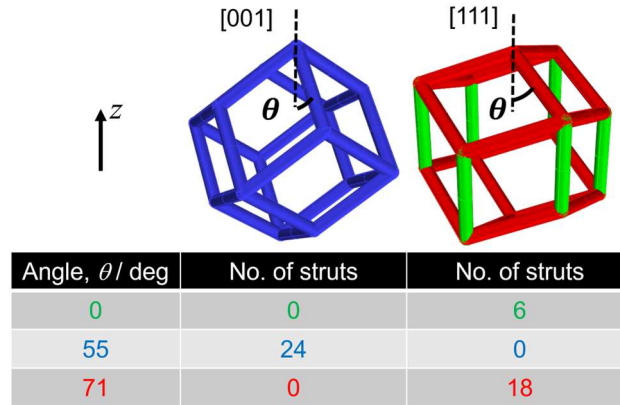


Fig. 5 Strut angles in fcc Voronoi [001] and [111] lattice structures against the compressive

謝辞

本研究は、2023年度に採択された公益財団法人軽金属奨学会の統合的先端研究の助成により行われた。多大なるご支援に心より感謝を申し上げる。また、研究に協力してくれた東京都立大学大学院生の小幡勇太郎君に謝意を表する。

参考文献

- [1] 小泉雄一郎, 千葉晶彦, 野村直之, 中野貴由: まてりあ, **56** (2017), 686-690.
- [2] M. F. Ashby: *Philos. Trans. R. Soc. A*, **364** (2006), 15-30.
- [3] L. Mullen, R. C. Stamp, W. K. Brooks, E. Jones and C. J. Sutcliffe: *J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater.*, **89B** (2009), 325-334.
- [4] D. K. Pattanayak, A. Fukuda, T. Matsushita, M. Takemoto, S. Fujibayashi, K. Sasaki, N. Nishida, T. Nakamura and T. Kokubo: *Acta Biomater.*, **7** (2011), 1398-1406.
- [5] A. Takezawa, M. Kobashi, Y. Koizumi and M. Kitamura: *Int. J. Heat Mass Transfer*, **105** (2017), 564-571.
- [6] 北薮幸一, 多田雷泰, 杉山嘉一, 三浦汀桜子: 航空宇宙技術, **17** (2018), 115-119.
- [7] 北薮幸一: 軽金属, **72** (2022), 350-354.
- [8] X. Liu, K. Sekizawa, A. Suzuki, N. Takata, M. Kobashi and T. Yamada: *Materials*, **13** (2020), 2902.
- [9] C. S. Marchi and A. Mortensen: *Acta Mater.*, **49** (2001), 3959-3969.
- [10] L. J. Gibson, M. F. Ashby, G. S. Schajer and C. I. Robertson: *Proc. Royal Soc. London A*, **382** (1982), 25-42.
- [11] S. Guo, Z. Teng and K. Kitazono: *Mater. Today Comm.*, **33** (2022), 104842.

金属粉末レーザ積層造形により作製された Al-Mg-Sc 合金ラティス構造体の圧縮挙動に及ぼす温度とひずみ速度の影響

北 蘭 幸一

東京都立大学 大学院システムデザイン研究科 航空宇宙システム工学域

1. 緒 言

ポーラス金属は、内部に多数の気孔を含んだセル構造体であり、軽量性、衝撃吸収性、吸音性、断熱性等の多くの優れた特性を有する多機能性材料である[1]。近年、ポーラス金属の新たな作製プロセスとして、付加製造(Additive Manufacturing: AM)法的一种である金属粉末レーザ積層造形法が注目されている[2]。AM 法では、従来型の製造プロセスでは困難であった気孔率、セル形状の制御が可能であるため、目的に応じた金属セル構造体が開発されている。当初、積層造形に使用できるアルミニウム合金粉末として、主に Al-10Si-0.3Mg 合金粉末が用いられた[3]。しかし、この合金は積層造形における形状再現性に優れるが、造形物の機械的特性はあまり高くなかった。近年、積層造形に特化された新しい高強度アルミニウム合金粉末として Al-Mg-Sc 系合金が開発され[4]、東洋アルミニウム(株)から商標「Scalmalloy」として発売されている。この合金は造形後の熱処理により Al_3Sc 相を析出強化させている。本研究では、Al-Mg-Sc 合金粉末からラティス構造体を積層造形し、圧縮特性に及ぼす温度とひずみ速度の影響を調べた。

2. 実験方法

ラティス構造体の設計には Voronoi 分割法を用いた。3D 空間上に母点を配置し、最隣接母点間距離 d を二等分する面により一辺 a の菱形十二面体セルが形成される。ここで d と a の関係は、

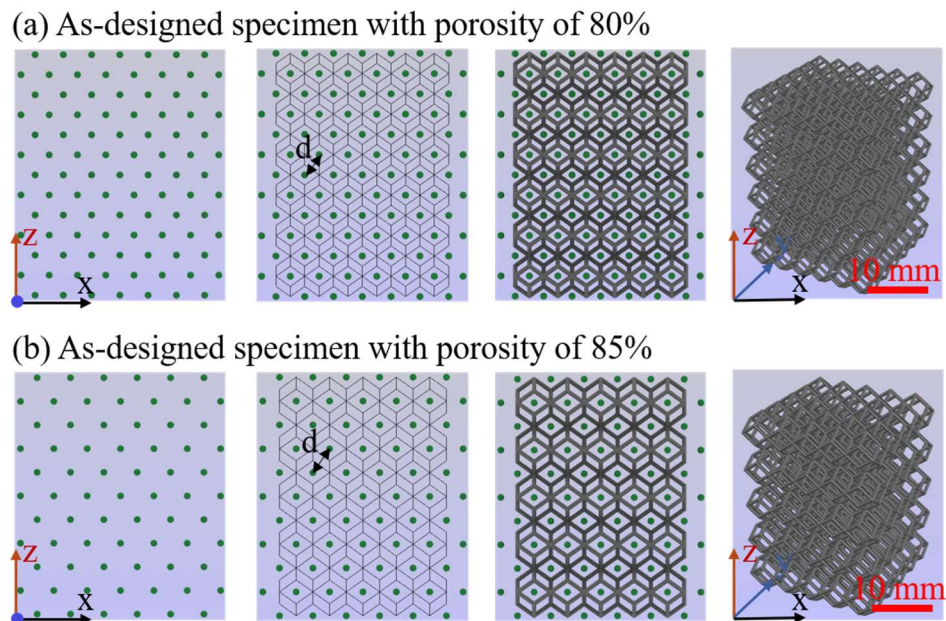


Fig. 1 (a) fcc-Voronoi [001] with porosity of 80%; (b) fcc-Voronoi [001] with porosity of 85%.

Table 1 Chemical composition (mass%) of the Al-Mg-Sc alloy powder.

Element	Mg	Sc	Zr	Mn	Fe	Si	Ti	Al
Mass %	4.6	0.75	0.31	0.45	0.14	0.05	0.04	Bal.

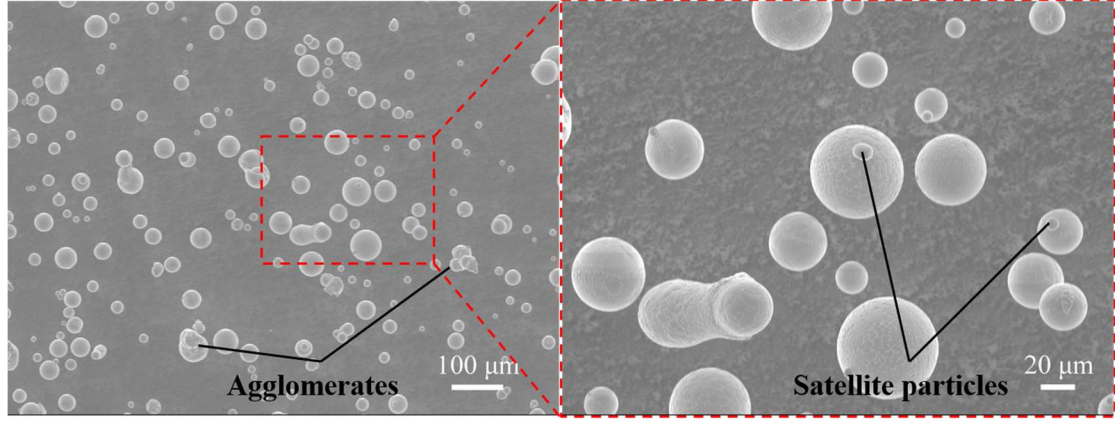


Fig. 2 SEM images of the Al-Mg-Sc alloy powder.

$$d = \frac{2\sqrt{6}}{3} a \quad (5)$$

となる。また、ストラットを直径 t の円柱とすると、ラティス構造体の気孔率 P_N は、

$$P_N = 1 - \frac{3\sqrt{3}\pi}{16} \left(\frac{a}{t}\right)^{-3} \left(\frac{2a}{t} - \frac{4}{3}\right) \quad (6)$$

となる。本研究ではストラット直径 1 mm の菱形十二面体セルを設計した。気孔率 80%, 85% のラティス構造体 3D-CAD モデルを Fig. 1 に示す。fcc 格子の [001] 方向が z 軸と平行であるため、これらのラティス構造体を fcc-Voronoi [001] と呼ぶ。

東洋アルミニウム(株)製 Al-Mg-Sc 合金粉末から角柱状の試験片を造形した。合金粉末の化学組成を Table 1 に示す。合金粉末の形状は、Fig. 2 に示される SEM 写真より真球であり、粒度分布は $D_{10} = 29.8 \mu\text{m}$, $D_{50} = 43.9 \mu\text{m}$, $D_{90} = 65.0 \mu\text{m}$ であった。

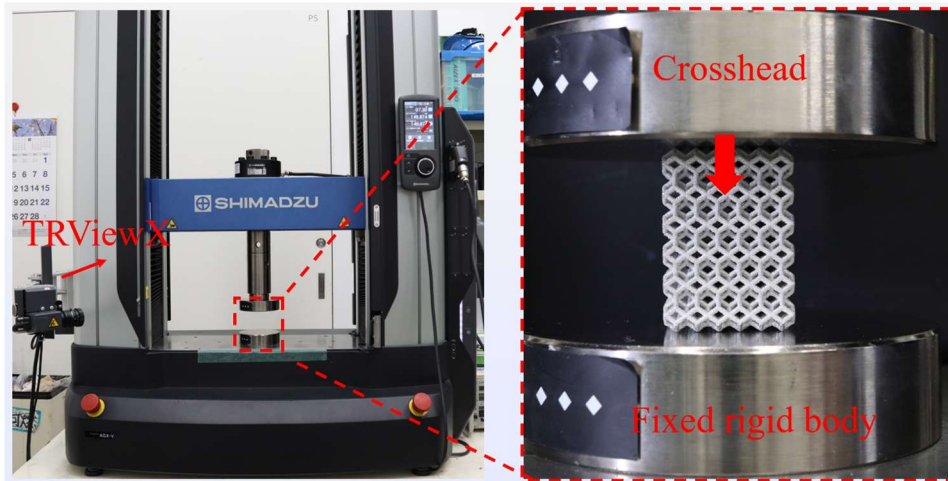


Fig. 3 Schematic diagram of compression testing equipment at room temperature.

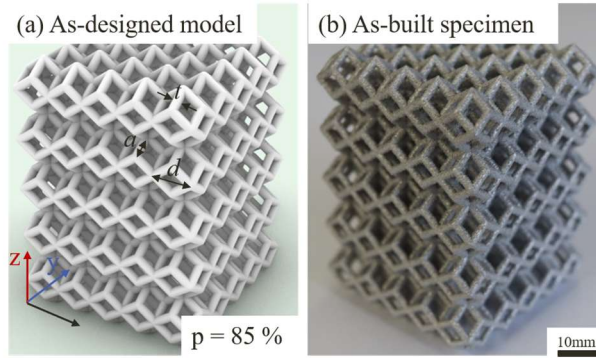


Fig. 4 Photographs of (a) as-designed and (b) as-built Al-Mg-Sc alloy lattice structures with the porosity of 85%.

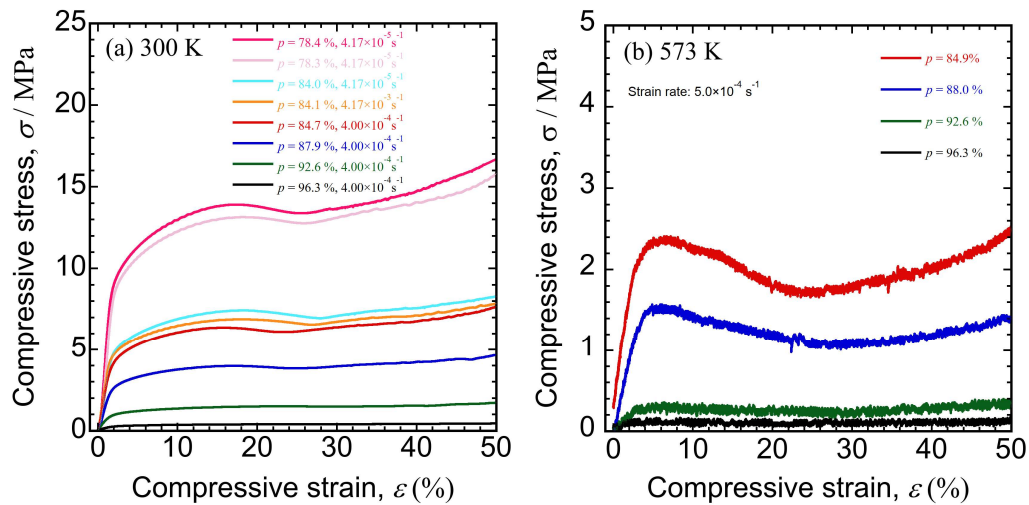


Fig. 5 Compressive stress-strain curves of Al-Mg-Sc alloy lattice structures at (a) 300 K, and (b) 573 K.

試験片は NTT データザムテクノロジーズ(株)の EOS-INT-M290 により造形された。エネルギー密度は 64.7 J/mm^3 ，レイヤー厚さは $30 \mu\text{m}$ であった。造形後，電気炉を用いて大気中 803 K ， 8 h の焼なまし処理を行った。

島津製作所製万能試験機 AGX-50kNVD を用いて室温(300 K)圧縮試験を行った。変位をビデオ式非接触変位計 TRViewX で測定した。試験機と試験片の写真を Fig. 3 に示す。また， 573 K での圧縮試験は，島津製作所製疲労試験機 Servopulser で行われた。

3. 結果

造形された Al-Mg-Sc 合金ラティス構造体試験片写真を Fig. 4 に示す。外観にストラットの破損は見られなかった。重量から気孔率を測定した結果，全ての試験片の気孔率は 3D-CAD モデルの値より約 1% 低かった。SEM 観察によりストラット表面に未熔融粉末が付着しており，これによりストラット直径がやや増加したためと考えられる。

初期ひずみ速度を変化させた圧縮試験で得られた S-S 曲線を Fig. 5 に示す。 300 K ， 573 K 共に気孔率が高いほど変形応力は低下した。S-S 曲線はどちらもなめらかであり，応力振動は観察されなかった。また， 573 K で S-S 曲線に顕著なセレーション， 300 K でわずかなセレーションが観察された[5]。

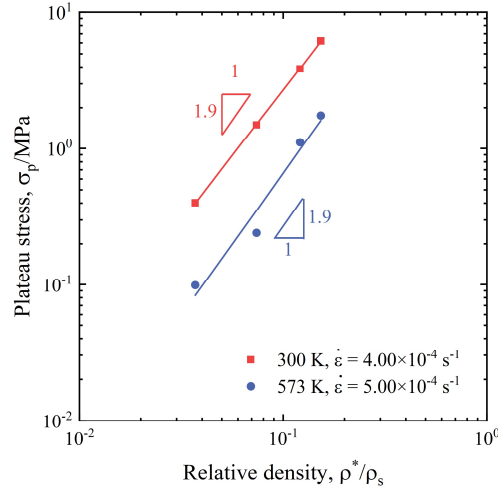


Fig. 6 Relationship between the plateau stress and the relative density.

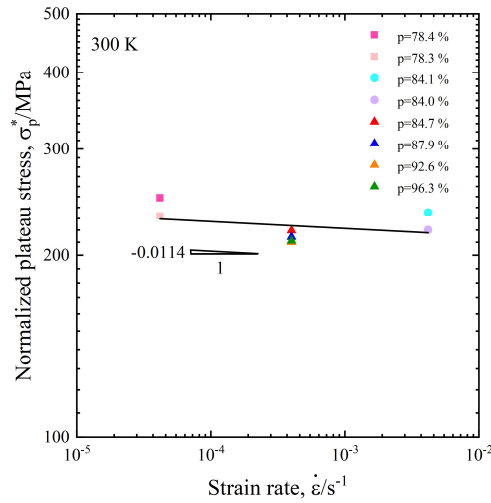


Fig. 7 Negative strain rate sensitivity m-value of normalized plateau stress.

4. 考察

573 K の S-S 曲線に現れたセレーションは、Mg 原子の固溶強化による Portevin-Le Chatelier (PLC)効果[6]と考えられる。圧縮試験結果から各温度におけるプラトー応力を算出し、相対密度に対してプロットした[Fig. 6]。多くのポーラス金属でプラトー応力と相対密度は、

$$\sigma_p = C \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^n \quad (7)$$

というべき乗則で記述できる[7]。ここで C は温度に依存する定数、 n は相対密度指数である。Fig. 6 より相対密度指数は温度に関係なく $n = 1.9$ となった。この値は、同じ菱形十二面体セルを持った Al-10Si-0.3Mg 合金ラティス構造体の値($n = 2.0$)[8]とほぼ等しく、相対密度指数は合金の種類や温度に依存しないことが明らかとなった。

ひずみ速度依存性を考察するため、相対密度の 1.9 乗で規格化した 300 K でのプラトー応力を初期ひずみ速度に対してプロットした[Fig. 7]。その結果、ひずみ速度の増加に対してプラトー応力はわずかに減少し、Al-Mg-Sc 合金ラティス構造体が負のひずみ速度感受性を示すことが明らかとなった。一般に変形応力 σ とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係は

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \quad (8)$$

というべき乗則で記述される。ここで K は温度に依存する定数, m はひずみ速度感受性指数である。Al-Mg-Sc 合金ラティス構造体のひずみ速度感受性指数 m は-0.0114 であった。このような負のひずみ速度依存性は, Al-Mg 合金特有の動的ひずみ時効(DSA)[9]によると考えられる。

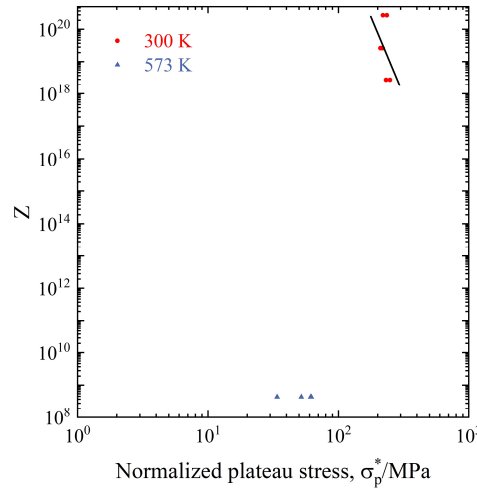


Fig. 8 Relationship between Z parameter and the normalized plateau stress.

温度依存性を調べるため, 高温変形分野で用いられる以下の Zener-Hollomon パラメータ [10]

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (9)$$

を用いて, Z と規格化したプラトー応力との関係をプロットした[Fig. 8]。その結果, 300 K と 573 K の実験データは同じ直線とならなかった。これは両方の温度域で m 値が大きく異なるためと考えられる。したがって, 本合金の温度依存性は, 負のひずみ速度感受性を示す低温域と, 正のひずみ速度感受性を示す高温域で分けて考察する必要がある。

5. 結 言

Al-Mg-Sc 合金粉末からレーザ積層造形により菱形十二面体セル構造のラティス構造体を作製した。圧縮試験で得られたプラトー応力は Al-10Si-0.3Mg 合金ラティス構造体よりも高かった。これは Al_3Sc 相の析出強化と Mg の固溶強化が原因と考えられる。圧縮試験で得られた S-S 曲線にほとんど応力振動は観察されず, 優れたエネルギー吸収性を有することがわかった。プラトー応力の相対密度依存性を示す相対密度指数は, 温度に依存せず, 1.9 であった。これは同じセル構造を有する Al-10Si-0.3Mg 合金ラティス構造体とほぼ同じであり, 相対密度指数は合金成分や温度に依存せず, セル構造によって決定されることが明らかとなった。

バルクの Al-Mg-Sc 合金は Mg 原子の固溶による PLC 効果が報告されていたが, Al-Mg-Sc 合金ラティス構造体でも同様の特徴が得られた。これにより, 300 K の低温域でプラトー応力の負のひずみ速度感受性が示された。

Al-Mg-Sc 合金で作製されたラティス構造体は強度, エネルギー吸収量が従来の Al-10Si-0.3Mg 合金ラティス構造体よりも優れており, 衝撃吸収材料として多くの分野での応用が期待される。

謝辞

本研究課題は、2023 年度に採択された公益財団法人軽金属奨学会の統合的先端研究の助成により行われた。多大なるご支援に心より感謝を申し上げます。なお、本研究に協力頂いた東京都立大学大学院生の R. Zhao 君に謝意を表する。

参考文献

- [1] B. Jiang, Z. Wang and N. Zhao, *Scr. Mater.*, **56** (2007), 169-172.
- [2] S. Guddati, A. S. K. Kiran, M. Leavy and S. Ramakrishna, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **105** (2019), 193-215.
- [3] Y. Sugiyama, T. Miura and K. Kitazono, *Mater. Sci. Forum*, **933** (2018), 142-147.
- [4] M. Awd, J. Tenkamp, M. Hirtler, S. Siddique, M. Bambach and F. Walther, *Materials*, **11** (2018), 17.
- [5] R. Zhao and K. Kitazono, *Mater. Today Comm.*, **49** (2025), 113728.
- [6] P. G. McCormick, *Acta Metall.*, **20** (1972), 351-354.
- [7] M. F. Ashby, *Philos. Trans. R. Soc. A*, **364** (2006), 15-30.
- [8] 北藺幸一, 小幡勇太郎, *AM フューチャー*, **1** (2025), 81-84.
- [9] R. C. Picu, G. Vincze, F. Ozturk, J. J. Gracio, F. Barlat, A. M. Maniatty, *Mater. Sci. Eng. A*, **390** (2005), 334-343.
- [10] Y. Sun, Q. Pan, Z. Huang, W. Wang, X. Wang, M. Li and J. Lai, *Prog. Nat. Sci.:Mater. Int.*, **28** (2018), 635-646.