3D プリンティング技術により積層造形されたアルミ合金ラティス構造の圧縮特性に関する研究

高野 直樹* 瀧澤 英男** 伊藤 幸太*
小高 研人*** 松永 智*** 阿部 伸一***

Study on Compressive Property of Aluminum Alloy Lattice Structure Additively Manufactured by 3D Printing Technology

by

Naoki TAKANO*, Hideo TAKIZAWA**, Kohta ITO*,
Kento ODAKA***, Satoru MATSUNAGA*** and Shinichi ABE***

In order to discuss the quality assurance of additively manufactured lattice structure made by aluminum alloy (AlSi10Mg) using 3D printing technology or selective laser sintering technique, compression test, micro-CT imaging and finite element analysis were carried out. The specimens were manufactured by 2 printing service companies with different expertise, which led to the choice of different process parameters such as the building direction, support structure, powder bed temperature and laser scanning speed. The largely scattered compressive peak loads were in good linear positive correlation with the weight, which is the easiest and convenient index for the quality assurance. On the other hand, the apparent density was almost the same. The reason why the weight of the products was largely scattered was investigated by micro-CT image analysis and finite element analysis. Also by comparison with the CAD data, the influence of manufacturer-dependent process parameters on the strength was discussed.

Key words:

Additive manufacturing, Selective laser sintering, Aluminum alloy lattice structure, Compression test, micro-CT imaging, Finite element analysis

1 緒 言

金属粉末の選択的レーザー焼結 (selective laser sintering, SLS) による 3D プリンティングあるいは積層造形 (additive manufacturing) は、工業界において軽量部品の製造や、医療用インプラントの患者個別の製作の分野において期待されている。たとえば、骨の支台 (scaffold) への応用¹⁾として、位相設計された種々のセル構造体の造形が可能であり²⁾, in-vivo あるいは in-vitro の実験結果が報告されている^{3),4)}。Arabnejad ら⁴⁾は実験結果を空隙寸法とストラット厚さと関連づけて論じている。工業用途では Maskery ら⁵⁾がアルミ合金 (AlSi10Mg) の特徴的な部品に対して圧縮強度を調査し、熱処理の影響を論じた。本論文でも、AlSi10Mg の基本的なラティス構造を対象とし、造形受託企業の経験とノウハウに基づき決定された多数の造形パラメータが圧縮時の構造強度に及ぼす影響を調査し、3D プリンティングによる造形品の品質保証について考察した。なお本論文では、圧縮試験において得られた最大荷重値を構造強度とよぶこととし、荷重-ストローク線図より得られる初期剛性を含

めた圧縮特性を議論する。

過去の研究において、造形パラメータとしてレーザー出力、レーザー走査速度と経路、積層方向、積層ピッチ、粉末ベッド温度などが取り上げられてきた⁶⁾⁻¹⁰⁾。たとえば、Aboulkhair ら¹⁰⁾は、レーザー出力と走査パターンが AlSi10Mg 部品のみかけの密度に及ぼす影響を調査した。現状、造形パラメータの組の決定は、経験とノウハウに基づき行われている。本研究では、同一の CAD データを用い、2 社の造形受託企業の経験とノウハウに基づき決定されたパラメータを用いた造形品の強度の比較を行い、その差の原因を調査するとともに、造形後に試験を行うことなく簡便な手段で強度予測を行い、品質保証に役立てることを考える。

具体的に、造形品の各種寸法、重量、みかけの密度の計測に加え、マイクロ CT 画像解析と有限要素解析を行った。過去にも、Ti6Al4V, SUS316L や樹脂製の部品について CAD データとの寸法の相違は指摘されている¹¹⁾⁻¹⁴⁾。本研究で取り上げるラティス構造では、内部のストラット寸法を造形前に予測することは困難であり、造形後の計測

† 原稿受理 平成 30 年 6 月 1 日 Received June 1, 2018 ©2019 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 慶應義塾大学 機械工学科 〒223-8522 横浜市港北区日吉
Department of Mechanical Engineering, Keio University, Kouhoku-ku, Yokohama 223-8522.

** 日本工業大学 機械工学科 〒345-8501 埼玉県南埼玉郡宮代町
Department of Mechanical Engineering, Nippon Institute of Technology, Minamisaitama-gun, Saitama 345-8501.

*** 東京歯科大学 解剖学講座 〒101-0061 東京都千代田区三崎町
Department of Anatomy, Tokyo Dental College, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0061.

Fig. 1 CAD data of lattice structure.

Fig. 2 Support structures determined by 2 printing service companies.

も容易ではないとの指摘がある¹⁵⁾。また、Weismannら¹⁶⁾はTi6Al4V部品について、CADデータと造形品の体積が異なる問題点を指摘した。ラティス構造に関して、理論的に考えても体積は重要な因子である。本研究においても、体積が異なる点を再確認しつつ、みかけの密度が造形パラメータにより大きな変動がなかったことから、計測が容易な重量を用いて強度を簡便に見積もる手順を提案する。

2 アルミ合金ラティス構造の3D積層造形

対象とする基本的なラティス構造をFig. 1に示す。ストラットの断面は1mm四方である。圧縮時の構造強度を検討する際の荷重方向もあわせて示す。本研究では、2社の造形受託企業（A社、B社と称する）が保有する3Dプリンター（EOS M290）を用い、EOSの標準材料の一つであるAlSi10Mgを用いた。EOSデータシートではAlSi10Mgのバルク造形品の密度は2.67 g/cm³である。

SLS方式の3D積層造形では、ラティス構造の内部にはサポート構造が不要であるが、粉末ベッドと造形品とのサポート構造は不可欠である。2社が独自に各社の経験、

Table 1 List of manufactured lattice structures using EOS M290 by 2 printing service companies.

Company	EOS license	Building direction and support type in Fig. 3	Bed temperature (°C)	Laser scanning speed
A	Performance	1, 2, 3	35, 200	Slower, Faster
B	Speed	4	200	Standard

(a) Schematic illustration

(b) Setup of lattice structure specimen

Fig. 3 Testing apparatus.

ノウハウに基づき決定したサポート構造と積層方向をFig. 2に示す。B社が選択したタイプ4は、ストラットが水平になるため造形が困難と予想されるが、積層高さが他のサポート構造タイプより低く、短時間・低コストな造形が可能である。積層ピッチは両者とも0.03 mmである。A社は3通りのサポート構造を試したが、Fig. 2(a)のタイプ1が最初に決定されたサポート構造であり、残り2通りのサポート構造は挑戦的に試したものであり、サポート構造の体積がきわめて小さい。また、Table 1に示す通り、基本的なパラメータ設定はEOSライセンスに基づくが、2社が保有するライセンスは異なる。粉末ベッド温度は、A社は35°C、B社は200°Cを選択したが、比較のためA社には200°Cの条件でも造形委託した。レーザ走査速度はA社のみ標準の速度の±10%の値に設定した。A社は、各条件につき試験片は1個ずつ、計12個を造形し、B社は2個を造形した。

造形されたラティス構造には、視認可能な顕著な造形不良¹⁷⁾は後述のマイクロCT撮像においても無いことを確認した。

Fig. 4 Typical load and stroke curves and fracture mode.

Table 2 List of tested specimens in following figures.

	Company	Building direction and support type	Laser speed	Bed temperature (°C)
■ (#1)	A	1	Slower	200
●	A	2	Slower	200
◆	A	3	Slower	200
■	A	1	Faster	200
●	A	2	Faster	200
◆	A	3	Faster	200
●	B	4	Standard	200
■	A	1	Slower	35
●	A	2	Slower	35
◆	A	3	Slower	35
■ (#2)	A	1	Faster	35
●	A	2	Faster	35
◆	A	3	Faster	35

3 圧縮試験結果

圧縮試験には 100 kN タイプの AUTOGRAPH (島津製作所) を用い, Fig. 3 のように設定した. 典型的な荷重とストロークの関係図および破壊モードを Fig. 4 に示す. 初期破壊後はせん断力が発生するため Fig. 3 において球座を用いた. Fig. 4 の 2 ケースは粉末ベッド温度のみが異なる. 本論文では, Fig. 4 の最大荷重値を各試験片に対する構造強度とよぶこととする.

造形品の重量は電子天秤にて, 体積はアルキメデス法で計測し, みかけの密度を算出した. 以降の図表で使用する各試験片の記号を Table 2 に示す. 試験片 #1 と #2 は, 第 4 章, 第 5 章で考察する試験片である. Fig. 5 に圧縮時の構造強度と体積の関係を, Fig. 6 にはみかけの密度との関係を示す. みかけの密度は EOS データシートよりは約 4.5% 程度低い, 大きなばらつきはない. Fig. 5 より構造強度は, 体積と非常によい相関があることがわかったため, 重量ともよい相関があると推察され, これについては後述する. Fig. 7 には初期剛性と構造強度の関係を示す. 前報¹⁷⁾では同じラティス構造をマルエージング鋼で造形し, 初期剛性のみ論じたが, 本研究では材料が異なるものの, 初期剛性のみならず非線形挙動を呈した後の最大荷重に焦点をあてる.

Fig. 5 Correlation between strength and volume.

Fig. 6 Correlation between strength and apparent density.

Fig. 7 Correlation between initial stiffness and strength.

上述の考察をふまえ, 構造強度と重量の相関を論じる際, データ数は少ないものの, 疲労試験手順¹⁸⁾⁻²⁰⁾にならない, 信頼性評価を行った. すなわち, Fig. 8(a)の手順でデータを集め²¹⁾, Fig. 8(b)のように平均と標準偏差を求めて, 正規分布を仮定した. 得られた結果を Fig. 8(c)に示す. 図には 95%信頼性区間もあわせて示す.

造形品の重量は, 造形後に電子天秤で簡単に計測できる. Fig. 8(c)を用いれば, 限られた造形パラメータの範囲であるが, 2 社のノウハウにより選択された妥当と思われる

Fig. 8 Correlation between strength and weight.

Fig. 9 Reconstruction of lattice structure from binarized Micro-CT images.

る造形パラメータを用いても生じる大きなばらつきのデータは、確率論的に整理され、新たな造形を行った際にも構造強度の予測ができると期待される。造形受託企業において、構造強度の抜き取り検査を行うことはコスト、時間の点で困難であるが、本論文で示した手順で予備試験データを整理すれば、品質保証の有力な目安となるといえる。

一方で、構造強度の最大値と最小値は、ともに A 社による造形品であり、約 40%もの開きがあった。粉末ベッド温度の影響が最も大きく、粉末ベッド温度が高い造形品の方が重量も大きく、強度も高かった。本論文では、造形受託企業のノウハウに基づき造形した場合の性能や品質を、他社による造形品、および、ノウハウに沿わない挑戦的なパラメータ設定で造形した造形品と比較している。A 社の粉末ベッド温度に関しては、粉末散布に用いるカーボンブラシに対する負荷を考慮して、35°C が推奨温度であったが、挑戦的に実施した 200°C の粉末ベッド温度の結果が良好であった。重量の差については次章で考察を加えるが、粉末ベッド温度の違いが重量、構造強度の違いにつながった焼結メカニズムと理由に

ついては、今後の課題の一つとしたい。次に、サポート構造による差は認められるものの、起こりうるばらつきの範囲内と考えられた。レーザ走査速度の影響は予想通りで、遅い方がストラットの断面積が大きくなるために体積がやや大きく、強度もやや高い。B 社の構造強度が低い点については、ブラックボックスである EOS ライセンスの影響と推測される。

造形受託企業によらず一定の品質が保証されるような 3D プリンティングの実現は理想的かもしれないが、現実的には本論文で明らかにした差があることを前提に、アルミ合金ラティス構造に対して重量のみで強度を予測する品質保証の手法論は工業的価値があるものといえよう。

4 マイクロ CT 画像解析による考察

圧縮時の構造強度の差異が、重量の差異と相関があり、みかけの密度がほぼ同じであることから、Fig. 5 の通り、体積に大きな差異があるといえる。この原因を探るためマイクロ CT 撮像を行い、3D モデルの再構築、2 値化を行った後、ストラット断面積の計測を行った。使用したマイクロ CT 装置は HMx-225-Actis4 (Tesco) であり、2

Fig. 10 Measurement of cross-sectional area of strut.

Table 3 Summary of the differences between 2 specimens.

	Strength (kN)	Volume (mm ³)	Outside dimension, <i>L</i> (mm)	Cross-sectional area, <i>c</i> ² (mm ²)	
				End	Center
CAD data	—	2376	26.0	1.0	1.0
Specimen #1	8.16	2297 (0.97, -)	26.09 (1.003, -)	0.996±0.044 (-, -)	0.987±0.039 (-, -)
Specimen #2	5.06 (-, 0.62)	1662 (0.70, 0.72)	25.92 (0.997, 0.993)	0.710±0.033 (-, 0.71)	0.699±0.034 (-, 0.71)

In (a, b), *a* indicates the ratio against CAD data and *b* indicates the ratio against Specimen #1.

値化では計測した体積を基準としてしきい値を決定した。なお、画像解析にはソフトウェア Simpleware (JSOL) を使用した。

分析は、A 社のタイプ 1 のサポート構造を用いた場合で、レーザ走査速度が遅く、ベッド温度が 200°C の造形品 (Fig. 5 と Table 2 の試験片#1) とレーザ走査速度が速く、ベッド温度が 35°C の造形品 (Fig. 5 と Table 2 の試験片#2) について行った。Fig. 9 に両者の再構築されたモデルを示す。ラティス構造の各ストラットについて Fig. 10(a) に示す中央位置と端部で断面積を計測した結果を Fig. 10(b) に示す。中央位置と端部の断面積に有意差はないが、試験片#1 と #2 の間には約 30% の明白な差があることがわかった。

強度と各種の幾何的パラメータの差を Table 3 にまとめる。表中、() 内には CAD データとの差、試験片#1 に対する比を示している。ラティス構造の外形寸法 (Fig. 1 の *L*, CAD データでは 26 mm) を計測したところ、試験片#1 では 26.09 mm、試験片#2 では 25.92 mm であり、CAD データに対する誤差はわずか 0.3% であった。両試験片の体積の相対誤差は 28% であったが、この原因は Fig. 10(b) のストラット断面寸法にあると結論づけられる。今回の圧縮試験において荷重を支持するストラット断面寸法が強度と相関をもつことは理論的にも説明で

き、ストラット断面積の差が主たる要因であるといえる。しかし強度の差は 38% あり、ストラット断面積の約 30% の差より大きい。この点について、次章では数値解析を行い、さらに検討する。

5 有限要素解析による考察

マイクロ CT 画像に基づくイメージベース有限要素解析を実施した。使用したソフトウェアは VOXELCON (く いんと) である。境界条件は圧縮試験と同じとし、下部を拘束し、上面に 0.01 mm の強制変位を与えた線形弾性解析を行った。物性値としてヤング率 70 GPa, ポアソン比 0.33 を使用した。ボクセル要素寸法は 0.1 mm とし、要素数は試験片#1 で 2,298,307、試験片#2 では 1,662,321 である。線形弾性解析で予測できる範囲は、Fig. 7 で構造強度とよい相関が見られた初期剛性に限られるが、前述のようにストラット断面積だけで説明が困難であった強度低下の要因につながると推察される応力集中について以下に論じる。

まず、初期剛性の計算結果は、前章で述べた断面積の差と線形理論から予測される通り、両試験片間で 27% の差があった。次に変形モードを調査した。圧縮荷重を支持するストラットだけを表示し、圧縮荷重と直角方向 (Fig. 1 の *x* 方向) の変位の値をカラー表示した変形モ

Fig. 11 Results of finite element analysis.

ード図を Fig. 11(a)に示す. なお, z 方向変位は 10 倍に, x, y 方向変位は 1000 倍に拡大して変形図を描いた. これより, 荷重方向のストラットは波打っており, 局所的に曲げ変形が生じていることがわかる. これは, Fig. 9 から明らかな通り, 表面が粗いためだと考えられる.

2 つの試験片の強度差の主要因はストラット断面積にあるが, 加えて, 表面粗さに起因する応力集中が強度に影響を及ぼしたものと推察される. そこで, Fig. 11(b)のミーゼス応力分布をヒストグラム表示した上で, 最大の圧縮応力値を両試験片で比較したところ, 実験による圧縮時の構造強度比は, 線形有限要素解析で得られた最大圧縮応力比と反比例していた. 体積, 外形寸法, ストラット断面積, 表面粗さのすべての幾何的因子をすべて含んだマイクロ CT イメージベース有限要素解析から, 上記の推察のように予期せぬ応力集中が強度比を増長したものと考察される.

より深い検討には, 応力集中による局所的な微小き裂の観察や, 材料非線形性および微小き裂の発生・進展を考慮した非線形有限要素解析が必要になる. 一方で, 応力集中につながる表面の粗さや, わずかな造形不良は, 造形前に予測することは現状では不可能である. 品質保証の手段として, 既報¹⁷⁾のような顕著な造形不良があれば確率的に事前のシミュレーションを実施することは可能であるが, 造形後に重量を計測して Fig. 8 により強度のおよその見積もりをすることを本論文の結論とする.

6 結言

アルミ合金 (AlSi10Mg) を用いたラティス構造を SLS 方式の 3D プリンティング技術により積層造形し, その圧縮時の構造強度を調査した. 同一の CAD データから 2 社の造形受託企業において造形し, 各社のノウハウに基づく造形パラメータの設定の違いの影響の評価, ならびに強度差の要因の調査を通して, 造形品の品質保証の手法論について論じた. ストラットの屈折¹⁷⁾や内部空孔²²⁾などの顕著な造形不良が無い場合は, 本研究で示したように, みかけの密度は期待通りの値が得られると考え

られる. 一方, ラティス構造のストラット断面積は, 粉末ベッド温度, レーザ走査速度の影響を強く受け, その結果, ラティス構造の構造強度は体積, 重量と正の強い相関があることを示した. したがって, 造形後に計測が容易な重量を用いて, 時間とコストがかかる圧縮試験を行うことなく, 強度のおよその見積もりが可能であることを示した. なお, 試験本数が十分であるとは言い難いが, 試験データを追加した際には, Fig. 8 の信頼性評価を更新すれば確度が向上する上, 各試験データに重みを乗じる²¹⁾ことも可能であることを付記する. 今後はさらにインプラントとして使用可能なチタン合金を用い, かつ材料組織観察²³⁾などを行う必要があると考える.

本研究の一部は, 日本学術振興会 科研費基盤研究(B) 16H04239 の支援を受けて実施したものである. また, データの整理やマイクロ CT 画像処理において慶應義塾大学理工学部学生 Yuhang Song 君, 村田知優君の協力をいただいたので感謝する.

参 考 文 献

- 1) X.P. Tan, Y.J. Tan, C.S.L. Chow, S.B. Tor and W.Y. Yeong, "Metallic powder-bed based 3D printing of cellular scaffolds for orthopaedic implants: A state-of-the-art review on manufacturing, topological design, mechanical properties and biocompatibility", *Materials Science and Engineering C*, Vol.76, pp.1328-1343 (2017).
- 2) X. Wang, S. Xu, S. Zhou, W. Xu, M. Leary, P. Choong, M. Qian, M. Brand and Y.M. Xie, "Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review", *Biomaterials*, Vol.83, pp.127-141 (2016).
- 3) R. Wauthle, J. van der Stok, S.A. Yavari, J. Van Humbeeck, J.-P. Kruth, A.A. Zadpoor, H. Weinans, M. Mulier and J. Schrooten, "Additively manufactured porous tantalum implants", *Acta Biomaterialia*, Vol.14, pp.217-225 (2015).

- 4) S. Arabnejad, R.B. Johnston, J.A. Pura, B. Singh, M. Tanzer and D. Pasini, "High-strength porous biomaterials for bone replacement: A strategy to assess the interplay between cell morphology, mechanical properties, bone ingrowth and manufacturing constraints", *Acta Biomaterialia*, Vol.30, pp.345-356 (2016).
- 5) I. Maskery, N.T. Aboulkhair, A.O. Aremu, C.M. Tuck and I.A. Ashcroft, "Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattice", *Additive Manufacturing*, Vol.16, pp.24-29 (2017).
- 6) W.E. Frazier, "Metal additive manufacturing: A review", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol.23, pp.1917-1928 (2014).
- 7) P. Hanzl, M. Zetek, T. Baksa and T. Kroupa, "The influence of processing parameters on the mechanical properties of SLM parts", *Procedia Engineering*, Vol.100, pp.1405-1413 (2015).
- 8) E. Brandl, U. Heckenberger, V. Holzinger and D. Buchbinder, "Additive manufactured AlSi10Mg samples using selective laser melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior", *Materials and Design*, Vol.34, pp.159-169 (2012).
- 9) T. Gustmann, A. Nevers, U. Kuhn, P. Gargarella, C.S. Kiminami, C. Bolfarini, J. Eckert and S. Pauly, "Influence of processing parameters on the fabrication of a Cu-Al-Ni-Mn shape-memory alloy by selective laser melting", *Additive Manufacturing*, Vol.11, pp.23-31 (2016).
- 10) N.T. Aboulkhair, N.M. Everitt, I. Ashcroft and C. Tuck, "Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting", *Additive Manufacturing*, Vol.1, pp.77-86, (2014).
- 11) S. Van Bael, G. Kerckhofs, M. Moesen, G. Pyka, J. Schrooten and J.P. Kruth, "Micro-CT-based improvement of geometrical and mechanical controllability of selective laser melted Ti6Al4V porous structures", *Materials Science and Engineering A*, Vol.528, pp.7423-7431 (2011).
- 12) C. Yan, L. Hao, A. Hussein, P. Young and D. Raymont, "Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting", *Materials and Design*, Vol.55, pp.533-541 (2014).
- 13) M.R.K. Ravari, M. Kadkhodaei, M. Badrossamay and R. Razaee, "Numerical investigation on mechanical properties of cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.88, pp.143-161 (2014).
- 14) S. Lohfeld, S. Cahill, H. Doyle and P.E. McHugh, "Improving the finite element model accuracy of tissue engineering scaffolds produced by selective laser sintering", *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, Vol.26, pp.1-12 (2015).
- 15) M. Smith, Z. Guan and W.J. Cantwell, "Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.57, pp.28-41 (2013).
- 16) V. Weismann, R. Bader, H. Hansmann and N. Laufer, "Influence of the structural orientation on the mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V open-porous scaffolds", *Materials and Design*, Vol.95, pp.188-197 (2016).
- 17) N. Takano, H. Takizawa, P. Wen, K. Odaka, S. Matsunaga and S. Abe, "Stochastic prediction of apparent compressive stiffness of selective laser sintered lattice structure with geometrical imperfection and uncertainty in material property", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.134, pp.347-356 (2017).
- 18) The Japan Society of Mechanical Engineers, "Standard method of statistical fatigue testing JSME S 002", (1994), Maruzen.
- 19) M. Zako, N. Takano and S. Hanaki, "Development of design margin decision system considering fatigue limit", *Journal of the Society of Materials Science*, Vol.47, pp.90-94 (1998).
- 20) S. Hanaki, M. Yamashita and H. Uchida, "On stochastic evaluation of S-N data based on fatigue strength distribution", *International Journal of Fatigue*, Vol.32, pp.605-609 (2010).
- 21) P. Wen, K. Yokota and N. Takano, "Probabilistic prediction of homogenized property and update of prediction for spherical porous material considering microstructural uncertainties", *Journal of Multiscale Modelling*, Vol.6, Paper No.1550011 (2015).
- 22) S.L. Campanelli, N. Contuzzi, A.D. Ludovico, F. Caiazzo, F. Cardaropoli and V. Sergi, "Manufacturing and characterization of Ti6Al4V lattice components manufactured by selective laser melting", *Materials*, Vol.7, pp.4803-4822 (2014).
- 23) T. Morita, C. Tsuda, H. Sakai and N. Higuchi, "Fundamental properties of Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting method", *Materials Transactions*, Vol.58, pp.1397-1403 (2017).