

Al-10Si-0.4Mg 合金ラティス構造体の圧縮特性に及ぼす ヘテロ凝固核粒子添加の影響

大久保 智¹⁾, 渡辺 義見²⁾

1) 東京都立産業技術研究センター

2) 名古屋工業大学 大学院工学研究科 工学専攻材料機能分野

1. 緒 言

アルミニウム合金 Al-10Si-0.4Mg (以下 AlSi10Mg) は Al-Si-Mg 系合金の中でもレーザー粉末床溶融結合 (Laser Powder Bed Fusion, LPBF) による付加製造 (Additive Manufacturing, AM) に対する適性が高く、現在広く利用されている AM 用アルミニウム合金の一つである。高い Si 含有量に起因する良好な溶融流動性および凝固割れ感受性の低さにより、比較的高密度かつ安定した造形が可能であることが報告されている[1]。近年、AM を用いた軽量構造設計への要求の高まりに伴い、AlSi10Mg を用いたラティス構造体の研究が進められている。ラティス構造は軽量性と機械的機能性を両立できる構造として注目される一方で、細径ストラト部における欠陥形成や材料充填状態のばらつきが、圧縮特性やエネルギー吸収特性の再現性に影響を及ぼす要因となり得る[2]。このような課題に対し、AM プロセス中の溶融・凝固挙動を制御する手法として、ヘテロ凝固核粒子を導入するアプローチが検討されている。SiC や TiC は高融点であり溶融池中に固相として存在可能なため、凝固時に核生成サイトとして作用し、結晶粒径や凝固組織の形成に影響を及ぼす可能性があることが報告されている[3]。一方で、これらの粒子の導入は凝固組織の微細化をもたらす可能性があるものの、同時に粒子の凝集や反応相の生成、あるいは空隙の増加など、造形性に影響を与える要因ともなり得ることが知られている[4]。そのため、ヘテロ凝固核粒子の導入効果は単純な材料強化としてではなく、造形過程における欠陥形成や材料充填状態の変化を含めて評価する必要がある。特にラティス構造体においては、圧縮特性やエネルギー吸収特性が材料固有の特性のみならず、造形後に得られる相対密度や欠陥状態に強く依存することが知られているため、粒子添加の影響を議論する際には、これらの因子との関係を整理する必要がある。

以上の背景から、本研究では、AlSi10Mg を母材とし、SiC および TiC を添加した材料を用いて AM によりラティス構造体を作製し、相対密度、欠陥特性および圧縮特性の観点から、その影響を評価することを目的とする。

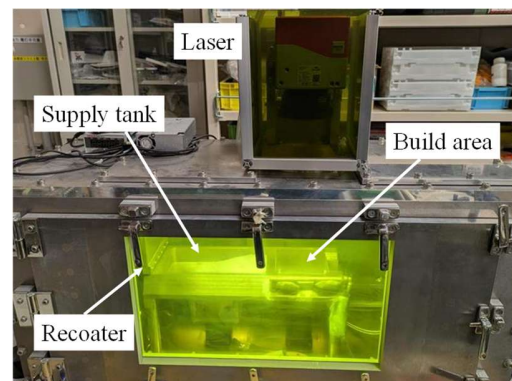


Fig. 1 Photograph of the in-house developed LPBF system used in this study.

2. 実験方法

2.1 粉末調製

母材粉末として AlSi10Mg 粉末（東洋アルミニウム株式会社製 SI10MG40B）を用い，強化相として TiC 粉末（高純度化学研究所製 TH02PB）1 vol% および SiC 粉末（高純度化学研究所製 SH01PB）1 vol% を添加した。粉末混合はターブラ・シェイカー・ミキサーを用いて行い，AlSi10Mg 粉末中に添加粉末が均一に十分に分散するようにした。混合は乾式条件下で一定時間実施し，バインダーや表面改質処理は行っていない。

2.2 ラティス構造体の造形

ラティス構造体は Fig. 1 に示す自作 LPBF 装置を用いて作製した。ラティス構造の形状および寸法は Fig. 2 に示すとおりであり，TiC および SiC の添加，また，造形条件の影響を評価するため，すべての試験片で共通とした。造形条件の詳細は Table 1 に示す。ここで， P はレーザーパワー， v は走査速度， h はハッチ間隔， t は積層厚さを表す。造形条件の違いにより溶融池の溶け込み量が変化し，造形寸法が設計したモデルデータと乖離する傾向が認められた。そのため，本研究では，造形後のラティス構造体の寸法がモデルデータと整合するように，スキャン軌跡に対するオフセット量を条件ごとに調整した。すべての試験片は，寸法補正後のスキャン条件に基づいて作製した。スキャンストラテジーには双方向スキャン方式を採用した。また，積層ごとの熱履歴および造形異方性の低減を目的として，奇数層と偶数層で走査方向を 90° 回転させる層間回転スキャンを行った。すべての試験片は同一のスキャンストラテジーを用いて造形した。

2.3 密度測定

造形したラティス構造体の密度はアルキメデス法により測定した。測定前にラティス構造体表面に付着した未溶融粉末を洗浄により除去したが，造形後処理として一般的なブラスト処理は行わなかった。

2.4 X線 CT による欠陥解析

ラティス構造体内部の欠陥形態を評価するため，X線 CT 装置（東芝 TXScanner 1100）を用いた非破壊解析を行った。測定は加速電圧 160 kV，露光時間 499 ms，感度 0.5 pF の条件で実施した。取得した CT データの空間分解能（ボクセルサイズ）は $10\ \mu\text{m}$ である。取得した CT データは三次元画像解析ソフトウェア VGStudio（Volume Graphics 社）を用いて処理した。CT 画像からラティス構造体の三次元形状を再構築し，その後，材料部と空隙部を分離することで内部欠陥の抽出を行った。

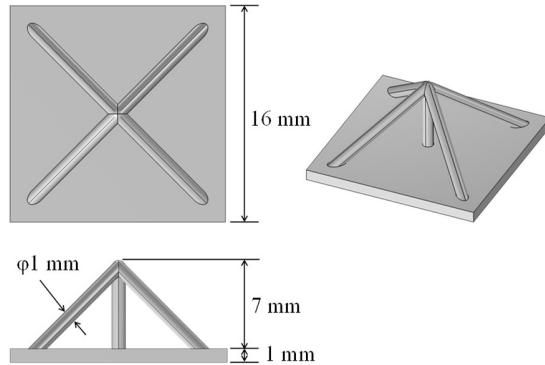


Fig. 2 Front, top, and oblique (isometric) views of the fabricated AlSi10Mg lattice specimen.

ID	P (W)	v (mm/s)	h (mm)	t (mm)
1	240	1080	0.150	0.040
2	160	1080	0.100	0.040
3	80	1080	0.050	0.040

2.5 圧縮試験およびエネルギー吸収評価

ラティス構造体に対して準静的圧縮試験を実施し、力学特性を評価した。圧縮速度は 1 mm/min とした。試験中の荷重-変位曲線を取得し、荷重-変位曲線の積分によりエネルギー吸収量を算出した。すなわち、次式により所定の変位までのエネルギー吸収量 E を求めた。

$$E = \int_0^{\delta_c} F d\delta \quad (3)$$

ここで、 F は荷重、 δ は変位を示す。本指標を用いて、異なる造形条件および TiC、SiC 添加によるラティス構造体のエネルギー吸収量を比較した。

3. 結果と考察

3.1 相対密度と欠陥形態

ラティス構造体の密度測定結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 の横軸はレーザーパワー、縦軸は相対密度である。相対密度は、アルキメデス法により測定した密度を、AlSi10Mg のバルク密度 2.68 g/cm³ を基準値として正規化した。Fig. 3 に示すように、AlSi10Mg 単体材料 (w/o addition) においてレーザーパワーが 160W 以上では相対密度がほぼ一定の 0.96 程度に飽和しており、80W ではわずかに小さく、0.93 程度となった。また、240W において TiC 添加 (with TiC) および SiC 添加 (with SiC) の相対密度は w/o addition の相対密度とほぼ同等であることがわかる。すなわち、これは TiC 添加や SiC 添加が AlSi10Mg の相対密度の向上に寄与していないことを示している。

X 線 CT 測定による欠陥解析の結果、添加の有無に関係なく 240W では内部欠陥はほぼ見当たらず、80W では内部欠陥が多く観察された。これは密度測定の結果と矛盾しない。すなわち、240W では添加なしでも十分に密になっており、添加によって造形性を悪化させるわけでもないことを示している。

3.2 ラティス構造体の圧縮挙動

ラティス構造体の代表的な荷重-変位曲線を Fig. 4 に示す。すべての試験片において、圧縮初期に荷重が増加し、変位約 0.5 mm 付近で極大値を示した。その後、ストラットの座屈や局所破壊に起因する荷重低下を示し、変位約 1.6 mm 付近からストラット同士の接触に起因した荷重の再増加が観察された。160 W 以上の条件において、添加の有無にかかわらず、変位が約 1.6 mm までは荷重-変位曲線はほぼ同じであり、この変位までのエネルギー吸収量は平均 0.48 J となった。この類似性は相対密度の結果と一致している。すなわち、160W 以上では密度が飽和し、それに対応して力学挙動も飽和していると考えられる。

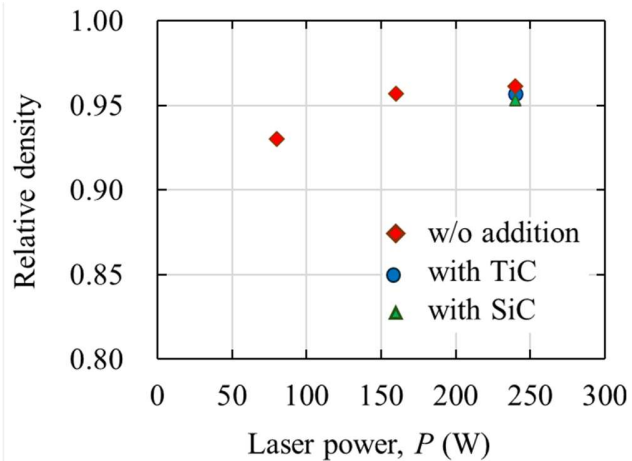


Fig. 3 Variation of relative density of the lattice structures as a function of laser power.

以上より，ラティス構造体の荷重-変位曲線の挙動は相対密度に強く依存し，レーザーパワーが 160W 以上の造形条件では相対密度が十分に高くなるため，TiC や SiC の添加によるエネルギー吸収の向上はほぼ見られないことが明らかとなった。

4. 結 言

本研究では金属 AM で一般的な材料である AlSi10Mg に TiC および SiC を添加してラティス構造体を作製した。その結果，レーザーパワー 240W の造形条件では AlSi10Mg は十分に密になっており，TiC や SiC の添加による造形性の向上はあまり見られず，圧縮挙動も同等の性能を示した。すなわち，AlSi10Mg において，SiC や TiC などのヘテロ凝固核粒子添加によるラティス構造のエネルギー吸収性能の向上はあまり見込めないことが明らかになった。

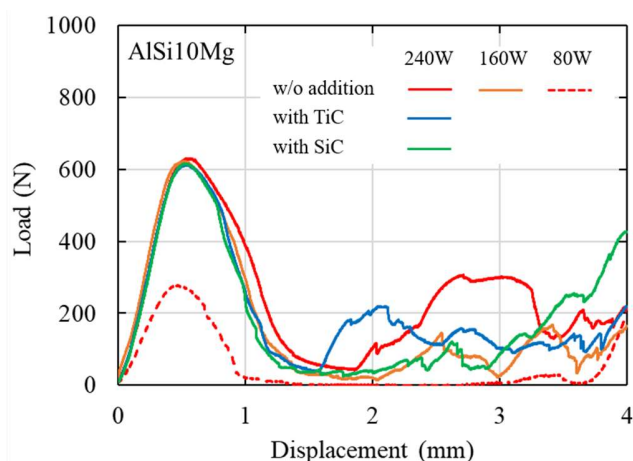


Fig. 4 Representative load-displacement curves obtained from compression tests of the lattice structures.

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ました。多大なるご支援に心より感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] 高田 尚記, 小平 寛久, 関沢 圭人, 鈴木 飛鳥, 小橋 眞: 軽金属, **67** (2017), 582-588.
<https://doi.org/10.2464/jilm.67.582>
- [2] L.L. Sun, N. Milenkovski, K. Awasthi, X.B. Nghiem, N. Mongelli, E. Kirchner and C. Mittelstedt: *Materials*, **18** (2025), 4934. <https://doi.org/10.3390/ma18214934>
- [3] 渡辺 義見, 菅野 浩行, 知場 三周, 佐藤 尚, 佐藤 直子, 中野 禅: 軽金属, **72** (2022), 198-205.
<https://doi.org/10.2464/jilm.72.198>
- [4] 柳瀬 裕太, 宮内 創, 松本 洋明, 横田 耕三: 日本金属学会誌, **88** (2024), 153-162.
<https://doi.org/10.2320/jinstmet.JA202403>

A6061 アルミニウム合金ラティス構造体の圧縮特性に及ぼす TiC ヘテロ凝固核粒子添加の影響

大久保 智¹⁾, 渡辺 義見²⁾

1) 東京都立産業技術研究センター

2) 名古屋工業大学 大学院工学研究科 工学専攻材料機能分野

1. 緒 言

A6061 アルミニウム合金は、良好な比強度、耐食性および加工性を有する Mg-Si 系アルミニウム合金として、構造材料として広く利用されている。近年、付加製造 (Additive Manufacturing, AM)、特にレーザー粉末床溶融結合法 (Laser Powder Bed Fusion, LPBF) を用いることで、従来工法では製造困難であったラティス構造を A6061 アルミニウム合金に適用する試みが進められている。ラティス構造は、軽量化とエネルギー吸収性を両立できる点で有望である一方、細径ストラットに起因する成形欠陥の発生や相対密度のばらつきが、力学特性の再現性を損なう要因となる。

A6061 アルミニウム合金は LPBF プロセスにおいて、溶融・凝固挙動に起因する欠陥が生じやすい材料として知られており、造形条件、特にレーザーパワーの影響を強く受ける[1]。そのため、AM で作製された A6061 アルミニウム合金ラティス構造体の力学特性は、材料固有の性質のみならず、造形密度や内部欠陥量と強く相関すると考えられる。

このような観点から、A6061 アルミニウム合金の AM 適性を向上させる手法として、セラミックス粒子の添加が注目されている。その中でもチタン炭化物 (TiC) は、高融点かつアルミニウム中で安定に存在する粒子であり、溶融池内での凝固挙動に影響を及ぼし得る材料として報告されている[2]。先行研究では、TiC がアルミニウム合金中で凝固過程に関与し、結果として欠陥低減や造形安定性の改善につながる可能性が示唆されている[3]。

一方で、AM により作製されたラティス構造体の圧縮特性は、材料組織そのものよりも、相対密度や空隙率といった幾何学的・構造的因子に支配されることが知られている[4]。特に、バルク材料とは異なり、ラティス構造ではストラット内部および接合部近傍の欠陥分布が、初期弾性域から塑性変形挙動、さらにはエネルギー吸収特性にまで影響を及ぼす。

以上を踏まえると、A6061 アルミニウム合金および TiC 添加 A6061 アルミニウム合金を用いて AM により作製したラティス構造体については、造形条件が密度および欠陥状態に与える影響を定量的に評価し、それが圧縮特性とどのように対応するかを整理することが、材料設計および構造設計の両面から重要である。

本研究では、A6061 アルミニウム合金および TiC を添加した A6061 アルミニウム合金を用いてラティス構造体を作製し、その圧縮応答と相対密度および欠陥量との相関について検討することを目的とする。

2. 実験方法

2.1 粉末調製

母材粉末として A6061 アルミニウム合金粉末（東洋アルミニウム株式会社製 A6061-40B）を用いた。これに対し、強化相として TiC 粉末（高純度化学研究所製 TH02PB）を 1 vol% 添加した。粉末混合はターブラ・シェイカー・ミキサーを用いて行い、A6061 粉末中に TiC 粒子が均一に十分に分散するようにした。混合は乾式条件下で一定時間実施し、バインダーや表面改質処理は行っていない。

2.2 ラティス構造体の造形

ラティス構造体は前章と同じ自作 LPBF 装置を用いて作製した。ラティス構造の形状および寸法も前章と同じである。造形条件の詳細を Table 1 に示す。ここで、 P はレーザーパワー、 v は走査速度、 h はハッチ間隔、 t は積層厚さを表す。造形条件の違いにより熔融池の溶け込み量が変化し、造形寸法が設計したモデルデータと乖離する傾向が認められた。そのため、本研究では、造形後のラティス構造体の寸法がモデルデータと整合するように、スキャン軌跡に対するオフセット量を条件ごとに調整した。すべての試験片は、寸法補正後のスキャン条件に基づいて作製した。スキャンストラテジーには双方向スキャン方式を採用した。また、積層ごとの熱履歴および造形異方性の低減を目的として、奇数層と偶数層で走査方向を 90° 回転させる層間回転スキャンを行った。すべての試験片は同一のスキャンストラテジーを用いて造形した。

2.3 密度測定

造形したラティス構造体の密度をアルキメデス法により測定した。測定前にラティス構造体表面に付着した未熔融粉末を洗浄により除去したが、造形後処理として一般的なブラスト処理は行わなかった。

Table 1 Process parameters of LPBF specimens

ID	P (W)	v (mm/s)	h (mm)	t (mm)
1	240	1080	0.150	0.040
2	200	1080	0.125	0.040
3	160	1080	0.100	0.040
4	120	1080	0.075	0.040
5	80	1080	0.050	0.040

2.4 X線 CT による欠陥解析

ラティス構造体内部の欠陥分布を評価するため、X線 CT 装置（東芝 TXScanner 1100）を用いた非破壊解析を行った。測定は加速電圧 160 kV、露光時間 499 ms、感度 0.5 pF の条件で実施した。取得した CT データの空間分解能（ボクセルサイズ）は $10\ \mu\text{m}$ である。取得した CT データは三次元画像解析ソフトウェア VGStudio（Volume Graphics 社）を用いて処理した。CT 画像からラティス構造体の三次元形状を再構築し、その後、材料部と空隙部を分離することで内部欠陥の抽出を行った。

2.5 圧縮試験およびエネルギー吸収評価

作製したラティス構造体に対して準静的圧縮試験を実施し、力学特性を評価した。圧縮方向は造形方向と一致させ、圧縮速度は $1\ \text{mm/min}$ とした。試験中の荷重-変位曲線を取得し、前章と同様に荷重-変位曲線の積分によりエネルギー吸収量を算出した。

3. 結果と考察

3.1 相対密度と欠陥特性

造形したラティス構造体の密度測定結果を Fig. 1 に示す。Fig. 1 の横軸はレーザーパワー、縦軸は相対密度である。相対密度 ρ_{Arc} は、アルキメデス法により測定した密度を、A6061 のバルク密度 2.71 g/cm^3 を基準値として正規化した。Fig. 1 に示すように、レーザーパワーの増加に伴い、ラティス構造体の相対密度は増加する傾向を示した。この傾向は、A6061 単体材料 (w/o TiC) および TiC を添加した材料 (with TiC) のいずれにおいても共通して見られた。

また、同一レーザーパワー条件においては、TiC を添加したラティス構造体の相対密度は、A6061 単体の場合と比較して高い値を示した。この結果は、TiC 添加がラティス構造体の相対密度すなわち内部欠陥量に影響を及ぼすことを示している。

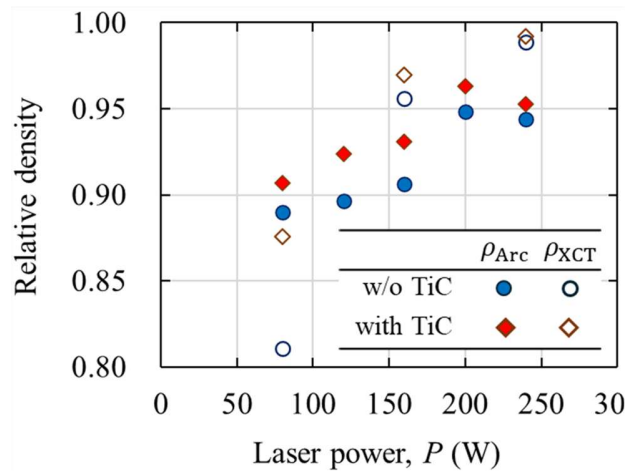


Fig. 1 Variation of relative density of the lattice structures as a function of laser power.

X 線 CT 像の代表例を Fig. 2 に示す。図中の白線は、VGStudio によりグレースケールの閾値を用いて再構築した際の材料部と空隙部の境界を示している。Fig. 2 中の赤矢印で示す部分は、目視では欠陥のように確認できるものの、グレースケールに基づく閾値処理では境界として認識されなかった位置である。これは X 線 CT 像にリングアーティファクトが存在するためであり、欠陥領域をより広く抽出する目的で閾値を変更した場合、リングアーティファクト由来の領域が誤って欠陥として認識されることが確認された。そのため、本研究ではリングアーティファクトの影響を回避するため、欠陥抽出の閾値は保守的に設定した。この結果、X 線 CT 像の欠陥は実際の欠陥量に対して過小評価されている可能性がある。すなわち、相対密度は過大に評価される。一方、Fig. 2 中の黄色矢印で示す領域には、表面に開口した亀裂状の欠陥が観察された。このような欠陥形態においては、アルキメデス法による密度測定時に欠陥内部の空気が外部へ排出され、欠陥として認識されない可能性がある。その結果、アルキメデス法から算出した密度は実際の欠陥状態を反映できず、相対密度が高く評価されている可能性がある。当然ながら、外部へ排出できずに内部に残存する空気も存在し、欠陥として認識される場合もあると考えられる。したがって、検出できる欠陥と、検出できない欠陥が混在している状態であると考えられる。

上記のように、X 線 CT 像では表面の開口欠陥が確認された。そこで、データ処理により表面欠陥を検出することとした。X 線 CT により測定した境界を基に STL データを出力し、Magics (Materialise 社) のラッピング機能を使用して欠陥の穴埋めを行った。ここで隙間サイズを 0.1 mm 、解像度を $20 \mu\text{m}$ とした。ラッピング処理では隙間サイズや解像度を大きくすることで開口欠陥を完全に埋めることもできるが、過度な改変であると考えて上記のパラメータを使用した。オリジナル領域の体積をラッピング領域の体積で除した相対密度 ρ_{XCT} を算出した。

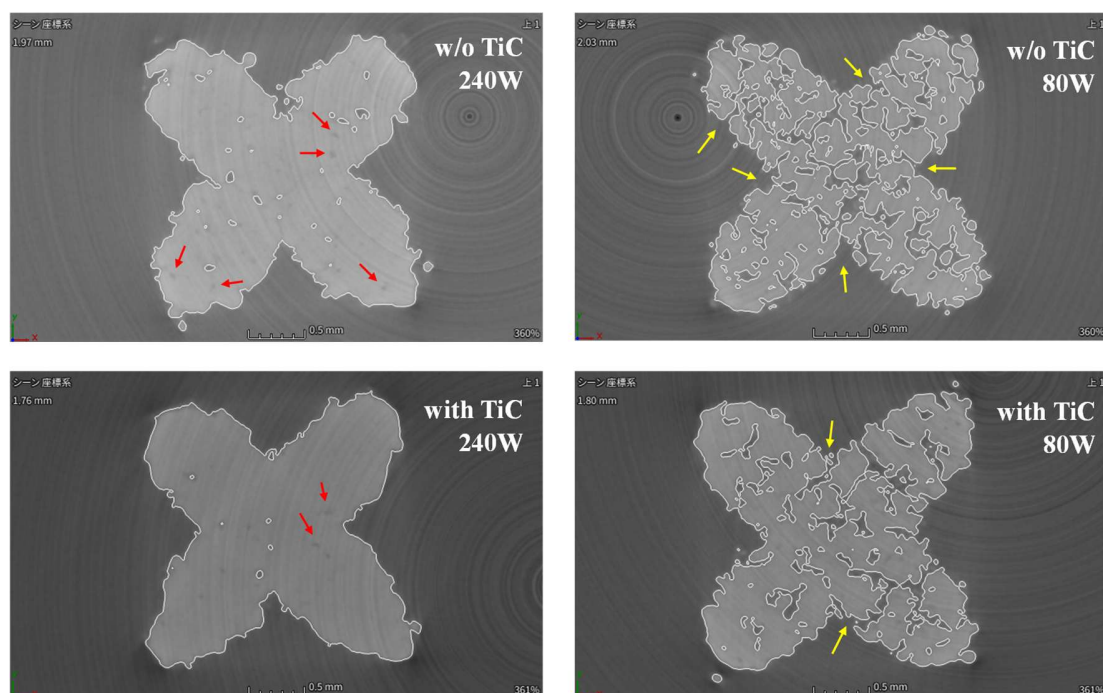


Fig. 2 Representative X-ray CT images of the lattice structures.

Fig. 1にはアルキメデス法から算出した相対密度 ρ_{Arc} に加えて、X線 CT 像から解析して求めた相対密度 ρ_{XCT} も合わせて示している。相対密度 ρ_{XCT} もアルキメデス法で測定した結果と同様に TiC を添加することで内部欠陥が減少することを示した。一方、相対密度 ρ_{Arc} と相対密度 ρ_{XCT} を比較した結果、両者の間にはレーザーパワー条件によって異なる傾向が認められた。具体的には、レーザーパワーが 160 W および 240 W の条件では、 ρ_{Arc} が ρ_{XCT} よりも小さくなる傾向を示した。一方で、80 W 条件では、 ρ_{XCT} が ρ_{Arc} よりも小さくなる傾向が確認された。この差異は欠陥量だけでなく、欠陥形態、特に表面亀裂状欠陥の量および分布状態が強く関係している可能性がある。X 線 CT 像観察の結果、160 W および 240 W の条件では、表面に開口した亀裂状欠陥は比較的少ない一方で、80 W の条件では、これらの欠陥が急激に増加していることが確認された。前述のとおり、アルキメデス法による密度測定では、欠陥が外部と連通している場合、欠陥内部の空気が排出されることで欠陥体積として保持されにくくなり、相対密度が高く評価される可能性がある。一方、CT 解析では、表面亀裂状欠陥が増加した場合でも、表面ラッピングおよび閾値設定の影響により、欠陥体積が必ずしも完全には反映されない。これらの結果は、CT 解析およびアルキメデス法が、それぞれ異なる欠陥形態に対して異なる感度を有していることを示しており、両手法から得られる相対密度の差異は、欠陥量の大小のみならず、欠陥の形態や連通性を反映したものであると考えられる。

3.2 圧縮挙動と欠陥の関係

造形したラティス構造体の代表的な荷重-変位曲線を Fig. 3 に示す。すべての試験片において、圧縮初期に荷重が増加し、変位約 0.5 mm 付近で極大値を示した。その後、荷重は

一旦低下し、変位約 1.6 mm 付近から再び増加する挙動が観察された。初期の荷重増加および極大値は、ラティス構造を構成するストラットの弾性変形および局所的な塑性変形の進行に対応するものと考えられる。極大値以降の荷重低下は、ストラットの座屈や局所破壊に起因する流動応力の低下を反映している。一方、変位がさらに増加すると、荷重は再び増加に転じた。この挙動は、圧縮の進行に伴って隣接するストラット同士が接触し、構造全体としての変形抵抗が増大したことに起因すると考えられる。すなわち、この後半領域における荷重増加は、ラティス構造の構造的な緻密化挙動に対応するものである。

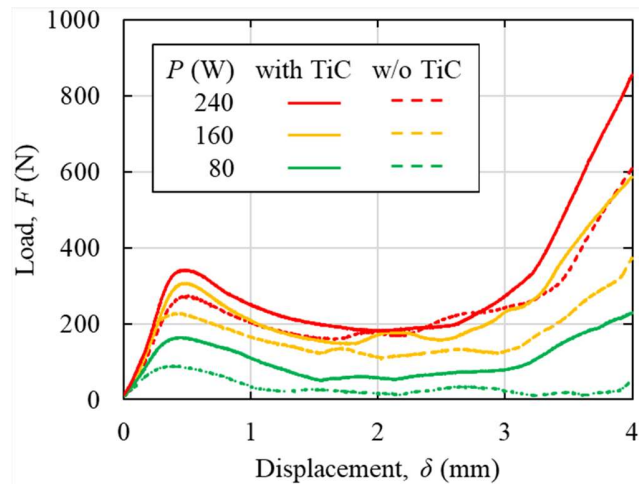


Fig. 3 Representative load–displacement curves obtained from compression tests of the lattice structures.

変位 1.6 mm までのエネルギー吸収量と相対密度との関係を Fig. 4 に示す。ここで用いた相対密度は、アルキメデス法および X 線 CT 解析の双方から算出された相対密度のうち、より小さい値を採用している。Fig. 4 の横軸は相対密度、縦軸はエネルギー吸収量である。Fig. 4 に示すように、エネルギー吸収量は相対密度の増加に伴って増加する傾向を示した。本研究で対象とした相対密度範囲においては、これらの関係は概ね線形的な相関として表現できる。TiC を添加した試験片では、エネルギー吸収量が A6061 単体の場合と比較して高い値を示したが、Fig. 4 に示す相対密度との関係から判断すると、これらの増加は TiC 添加による材料固有特性の直接的な向上というよりも、造形性の向上に伴う相対密度の増加を介した効果として理解するのが妥当である。すなわち、TiC 添加はレーザー溶融・凝固挙動に影響を与えることで欠陥量を低減し、相対密度を高め、その結果として、エネルギー吸収量が増加したものと解釈できる。

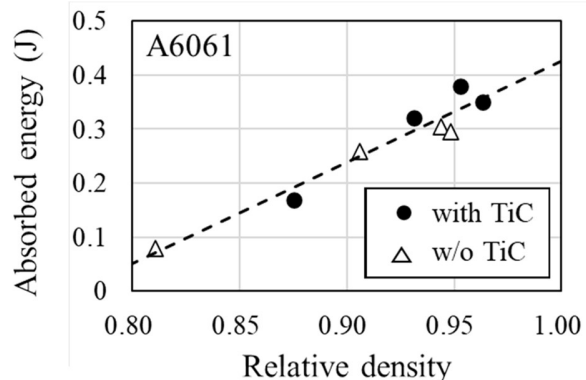


Fig. 4 Relationship between relative density and energy absorption of the lattice structures. The relative density represents the material density after fabrication and was defined as the lower value obtained from either the Archimedes method or X-ray CT analysis.

以上より、本研究で観察された力学特性の向上は、材料強化効果そのものというよりも、造形結果として得られた相対密度の違いに起因する構造的効果が支配的であると考えられる。

4. 結 言

本研究では、A6061 および TiC を添加した A6061 を用いて付加製造により作製したラティス構造体について、密度特性、欠陥特性および圧縮特性を評価した。密度測定の結果、レーザーパワーの増加に伴い相対密度は増加し、同一造形条件では TiC 添加材の相対密度が A6061 単体より高くなる傾向が確認された。X 線 CT 解析およびアルキメデス法による評価から、欠陥形態や表面亀裂の有無により相対密度評価が影響を受けることが明らかとなった。圧縮試験の結果、ラティス構造体は初期の極大応力、続く荷重低下、変位約 1.6 mm 以降の構造的緻密化に起因する荷重再増加という典型的な応答を示した。変位 0–1.6 mm で算出したエネルギー吸収量および極大応力はいずれも相対密度と良好な相関を示し、本研究の範囲では概ね線形的に整理された。得られた結果から、TiC 添加による力学特性の向上は、材料そのものの直接的な強化効果というよりも、造形性の向上を介した相対密度の増加に起因する効果であると解釈される。

以上より、TiC 添加は A6061 ラティス構造体の造形品質を改善し、その結果として圧縮特性およびエネルギー吸収特性の向上に寄与することが示された。

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ました。多大なるご支援に心より感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] M. Rosito, M. Vanzetti, F. Bondioli, E. Padovano, F. Gili, R. Sampieri and C.F. Badini: *Metals*, **13** (2023), 1128. <https://doi.org/10.3390/met13061128>
- [2] W. Zhuang, J. Li, Q. Cao, L. Qin, J. Jia and J. Liu: *Heliyon*, **10** (2024), e37122. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37122>
- [3] M. Qu, D. Yu, L. Chen, K. An and Y. Chen: *Metals*, **14** (2024), 1064. <https://doi.org/10.3390/met14091064>
- [4] J. Sun, H. Gu, J. Zhang, G. Dai, B. Li, Z. Sun and Z. Liang: *Materials*, **18** (2025), 3898. <https://doi.org/10.3390/ma18163898>

A6061 アルミニウム合金ラティス構造体の圧縮特性に及ぼす アウトラインスキャンの影響

大久保 智¹⁾, 渡辺 義見²⁾

1) 東京都立産業技術研究センター

2) 名古屋工業大学 大学院工学研究科 工学専攻材料機能分野

1. 緒 言

アルミニウム合金 A6061 は、Mg-Si 系析出硬化型合金として優れた比強度および加工性を有する材料であるが、レーザー粉末床溶融結合 (Laser Powder Bed Fusion, LPBF) による付加製造 (Additive Manufacturing, AM) においては、凝固割れ感受性や造形安定性の観点から、Al-Si 系合金と比較して造形が難しい材料として知られている[1]。このため、A6061 を用いた AM 構造体の特性は、造形条件や内部欠陥の影響を強く受ける傾向がある。一方、ラティス構造体においては、圧縮特性およびエネルギー吸収特性が材料固有の特性のみならず、造形後に得られる相対密度や欠陥状態に強く依存することが報告されている[2]。そのため、力学特性の向上には材料設計だけでなく、造形過程における欠陥形成の制御が重要な要因となる。前報では、Al-10Si-0.4Mg を対象として SiC および TiC を添加し、ヘテロ凝固核粒子としての影響を評価した。その結果、粒子添加による顕著な特性向上は確認されず、材料系によっては粒子添加の効果が限定的であることが示唆された。このことから、AM における特性改善には、材料設計に加えて、造形プロセス条件そのものに着目する必要があると考えられる。

このような観点から、LPBF におけるスキャン戦略の一つであるアウトラインスキャン (contour scanning) は、造形物の表面品質や幾何精度に影響を及ぼす要因として知られている[3]。特にラティス構造のような細径ストラットでは、外周部の溶融挙動がストラット径や表面状態に影響し、その結果として構造体の実効的な相対密度や力学特性に関与する可能性がある。しかしながら、A6061 を対象としたラティス構造体において、アウトラインスキャンの有無が造形結果および力学特性に及ぼす影響については、十分に整理されていない。

以上の背景から、本研究では、A6061 を用いたラティス構造体を対象とし、アウトラインスキャンの有無および条件が相対密度、欠陥特性および圧縮特性に及ぼす影響を評価することを目的とした。

2. 実験方法

2.1 ラティス構造体の造形

ラティス構造体は前報同じ材料粉末および自作 LPBF 装置を用いて作製した。ラティス構造の形状および寸法も前報と同じである。造形条件の詳細を Table 1 に示す。フィル部分とアウトラインの条件は同一である。なお、スキャナソフトウェアの機能制限でアウトラインパスはオフセットできていない。そのため、フィル部分のオフセットも行わなかった。フィル部分のスキャンストラテジーには双方向スキャン方式を採用した。また、積層ごとの熱履歴および造形異方性の低減を目的として、奇数層と偶数層で走査方向を 90° 回転させる層間回転スキャンを行った。すべての試験片は同一のスキャンストラテジーを用いて造形した。

Table 1 Process parameters of LPBF specimens

ID	P (W)	v (mm/s)	h (mm)	t (mm)
1	240	1080	0.150	0.040
2	160	1080	0.100	0.040
3	80	1080	0.050	0.040

2.3 密度測定

造形したラティス構造体の密度はアルキメデス法により測定した。測定前にラティス構造体表面に付着した未熔融粉末を洗浄により除去したが、造形後処理として一般的なブラスト処理は行わなかった。アルキメデス法により測定した密度を A6061 のバルク密度 2.71 g/cm³ を基準値として正規化した相対密度を算出した。

2.4 X線 CT による欠陥解析

ラティス構造体内部の欠陥分布を評価するため、X線 CT 装置（東芝 TXScanner 1100）を用いた非破壊解析を行った。測定は加速電圧 160 kV、露光時間 499 ms、感度 0.5 pF の条件で実施した。取得した CT データの空間分解能（ボクセルサイズ）は 10 μm である。取得した CT データは三次元画像解析ソフトウェア VGStudio（Volume Graphics 社）を用いて処理した。CT 画像からラティス構造体の三次元形状を再構築し、その後、材料部と空隙部を分離することで内部欠陥の抽出を行った。欠陥領域の抽出に際しては、グレースケール値に基づく閾値を手動で設定し、各試験片に対して同様の手順で解析を行った。抽出した欠陥領域について三次元的な体積評価を行い、欠陥体積率および全体体積から相対密度を算出した。

2.5 圧縮試験およびエネルギー吸収評価

作製したラティス構造体に対して準静的圧縮試験を実施し、力学特性を評価した。圧縮方向は造形方向と一致させ、圧縮速度は 1 mm/min とした。試験中の荷重-変位曲線を取得し、前章と同様に荷重-変位曲線の積分によりエネルギー吸収量を算出した。

3. 結果と考察

3.1 相対密度と欠陥特性

造形したラティス構造体の密度測定結果を Fig. 1 に示す。Fig. 1 の横軸はレーザーパワー，縦軸は相対密度である。比較として前報のアウトラインスキャンを照射しなかったものも合わせて示す。図中の凡例は，アルキメデス法による相対密度 ρ に下付き添え字 Arc，X 線 CT 像の解析によるものに下付き添え字 XCT，アウトラインなしのフィルだけのスキャンのものに上付き添え字 f，アウトラインスキャンありのものに上付き添え字 c を付してある。レーザー出力条件 160W および 240W において，アウトラインスキャンにより相対密度が上がることを確認された。また，アウトラインスキャン無しの条件においてアルキメデス法で測定した相対密度 ρ_{Arc}^f の方が X 線 CT 解析より得た相対密度 ρ_{XCT}^f よりも小さく測定されたのに対し，アウトラインスキャン有りの条件では， ρ_{Arc}^c と ρ_{XCT}^c は同程度という結果になった。一方，レーザーパワー80W の条件では， ρ_{Arc}^c が突出して高くなってしまっているが，その他の条件では，同一の測定方法ではおおむねアウトラインの有無とは関係なく，同程度の相対密度となっている。

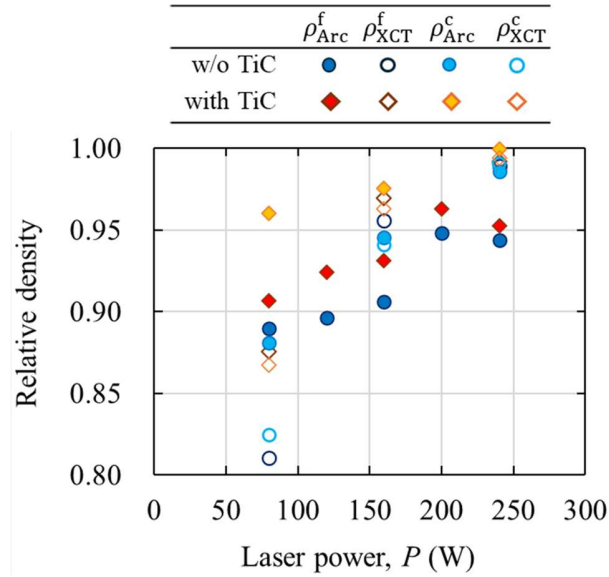


Fig. 1 Variation of relative density of the lattice structures as a function of laser power.

X 線 CT 像の代表例を Fig. 2 に示す。図中の白線は，VGStudio によりグレースケールの閾値を用いて再構築した際の材料部と空隙部の境界を示している。前章のアウトラインスキャン無しの場合の X 線 CT 像と比較して，同レーザーパワーの条件においてアウトラインスキャンによる大きな変化は確認できなかった。すなわち，依然として 160W 以上でも内部欠陥は確認され，80W では表面には亀裂状の開口欠陥が多く確認された。したがって，ストラトの内部欠陥はアウトラインスキャンによる再溶融によっても抑制することは困難であると考えられる。

以上のことから，アウトラインによる再溶融でストラト内部の欠陥は抑制困難であるものの，表面付近の欠陥はある程度抑制できるため相対密度が相対的に増加したのと考えられる。

3.2 圧縮挙動と欠陥の関係

造形したラティス構造体の代表的な荷重-変位曲線を Fig. 2 に示す。X 線 CT 像の結果と同様に，荷重-変位曲線にもアウトラインスキャンの有無による大きな違いは見られなかった。すなわち，変位約 0.5 mm 付近で極大値を示し，その後，荷重が一旦低下，変

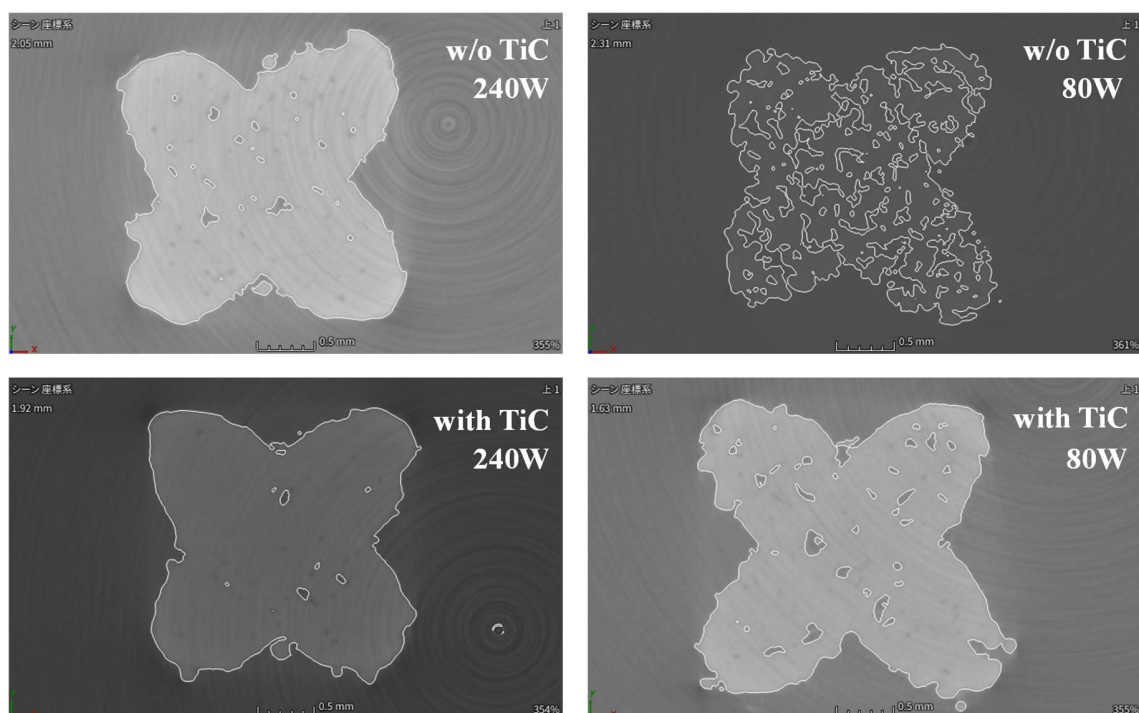


Fig. 2 Representative X-ray CT images of the lattice structures.

位約 1.6 mm 付近から再び増加する挙動が観察された。そこで、変位 1.6 mm までのエネルギー吸収量を算出した。

Fig. 4 にエネルギー吸収量と相対密度の関係を示す。アウトラインスキャンが無しの条件では相対密度とエネルギー吸収量には線形関係が見られたのに対して、アウトラインスキャン有りの条件では、この線形関係よりもエネルギー吸収量が高くなる傾向を示した。この傾向はアウトラインスキャンによるストラト径の増加に起因すると考えられる。

4. 結 言

本研究では、A6061 および TiC を添加した A6061 のラティス構造においてアウトラインスキャンが密度、欠陥特性および圧縮特性に及ぼす影響について調査した。その結果、アウトラインスキャンによるストラト内部の欠陥抑制は困難であったが、表面形状の改善

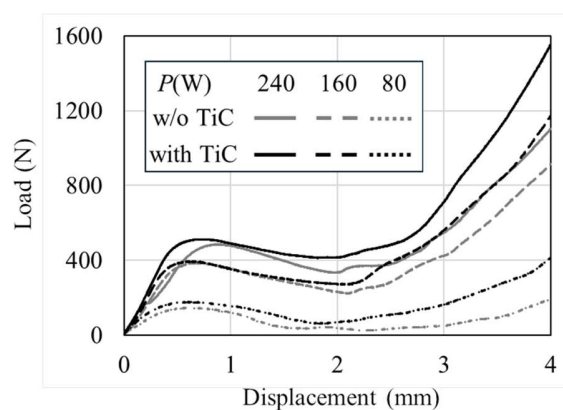


Fig. 3 Representative load-displacement curves obtained from compression tests of the lattice structures.

による相対密度の向上が見られた。この相対密度の向上によるエネルギー吸収量の向上が見込まれた。

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ました。多大なるご支援に心より感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] M. Rosito, M. Vanzetti, F. Bondioli, E. Padovano, F. Gili, R. Sampieri and C.F. Badini: *Metals*, **13** (2023), 1128.
<https://doi.org/10.3390/met13061128>
- [2] J. Sun, H. Gu, J. Zhang, G. Dai, B. Li, Z. Sun and Z. Liang: *Materials*, **18** (2025), 3898. <https://doi.org/10.3390/ma18163898>
- [3] T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee, J.W. Elmer, J.O. Milewski, A.M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De and W. Zhang: *Progress in Materials Science*, **92** (2018), 112–224.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>

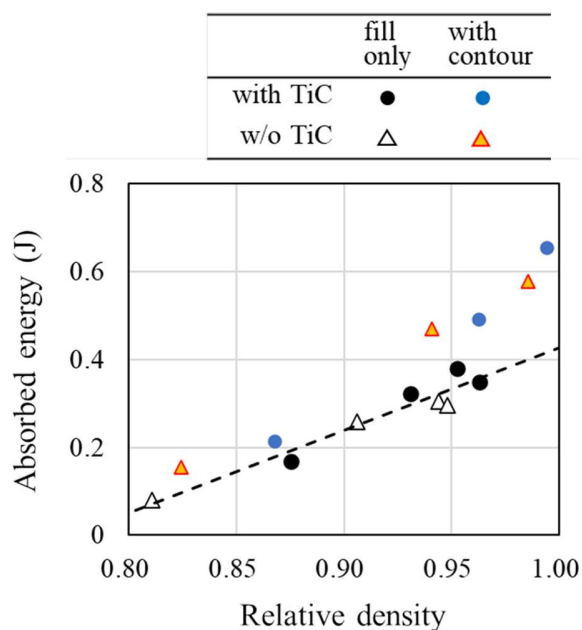


Fig. 4 Relationship between relative density and energy absorption of the lattice structures. The relative density represents the material density after fabrication and was defined as the lower value obtained from either the Archimedes method or X-ray CT analysis.