アルミニウムの延性異方性を生み出す不均一変形のその場観察と定量解析

名古屋大学　大学院　工学研究科
教授　高田　尚記
（2022 年度 一般研究開発助成 AF-2022020-B3）

キーワード：レーザ粉末床溶融結合法，引張試験，走査電子顕微鏡，デジタル画像相関法

１．研究の目的と背景

レーザと金属粉末を用いたレーザ粉末床溶融結合(Laser Powder Bed Fusion: L-PBF)法は最も汎用的な金属積層造形プロセスのひとつである．原料の金属粉末を 1 層ずつ積層し，造形部にレーザ照射し溶融・凝固を繰り返しながら三次元構造体を造形する加工法である[1,2]．この L-PBF プロセスは，構造最適化を援用して設計される複雑形状部材の造形を可能とするため，輸送機器部材の軽量化や高熱伝導性部材などの造形が容易である．アルミニウム合金粉末を用いた L-PBF プロセス適用の報告例は近年著しく増加し[3-12]，従来の鋳造合金に分類される AlSi10Mg 等の Al-Si 系合金[5-9]や高強度展伸材に分類される Al-Cu 系合金や Al-Zn-Mg 合金に留まらず，新たな合金系[10-12]へ適用されている．

L-PBF 法をアルミニウム合金に適用して得られる積層造形体は，機械的特性の異方性を示す．0.2%耐力，引張強度や破断伸び等の引張特性は，造形時の粉末積層方向(Building direction: BD)と荷重方向の関係によって変化する[6,7]．特に造形方向と荷重方向が平行な場合，造形体の延性は大きく低下することが知られている[6,7]．引張延性の異方性の一因として，溶融池境界に沿った優先破断が挙げられる．レーザ積層造形体はレーザの走査に伴う溶融池が重畳した微視組織を持ち，Al-Si 系合金ではそれらの境界においてα-Al/Si 共晶組織の粗大化が生じる[6-8]．溶融地境界は溶融池内部に比べ低い硬さを示すことが報告されており，引張試験ではその分布に沿った形状の破断面が観察される[6,7]．これらは積層造形体の破壊が溶融地組織に起因した不均一変形を経て進行することを示唆しているが，その詳細は未だ明らかでない．

本研究では積層造形体の溶融池組織と変形挙動の関係を詳細に調査するため，走査型電子顕微鏡(Scanning electron microscope: SEM)に小型引張試験機を格納し，引張変形におけるその場 SEM 観察を実施した。本報では Al-12mass%Si 合金積層造形体を材料として引張試験片を作製し，微視組織を現出させた状態で引張変形させ，その表面をその場 SEM 観察した．ここでは，異なる引張方向による一軸変形に伴うその場 SEM 像をデジタル画像相関法(Digital image correlation: DIC)で解析し、得られたひずみ分布を比較することで異方的引張延性との関係を考察した結果を報告する[13]．

２．実験方法

2・1　L-PBF 造形

本研究では，3D SYSTEM 社から供給されたガスアトマイズ法で作製した Al-12mass%Si（AlSi12）合金粉末を用いた．用いた粉末粒子は球状を呈しており，粒子径分布は約 1～30 μm である．合金粉末と造形体の組成を誘導結合プラズマ発光分光分析及び赤外線吸収法を用いて測定した結果，合金粉末の合金組成は造形体のものとほぼ同じであり，0.15mass%と比較的高濃度の酸素を含む．Al-12%Si 合金の造形には 3D SYSTEM 社製の ProX 200 DMP を用い，ビーム焦点径(spot size)約 100 μm，レーザ走査速度 1.2 m s^{-1}，レーザ出力 191 W，粉末積層厚さ 30 μm，レーザハッチ距離(hatch distance)100 μm を造形条件とした．なお，大きさ 40 mm の六角形単位のレーザ走査パターンを採用し，毎層 90°づつ回転させ，レーザ積層造形を行った．造形体の形状はおよそ 50×15×60 mm^3 の直方体である．得られた造形体の相対密度は，99%以上であった．

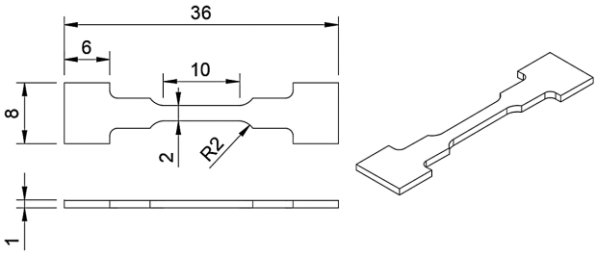


図 1　本研究で用いた試験片形状

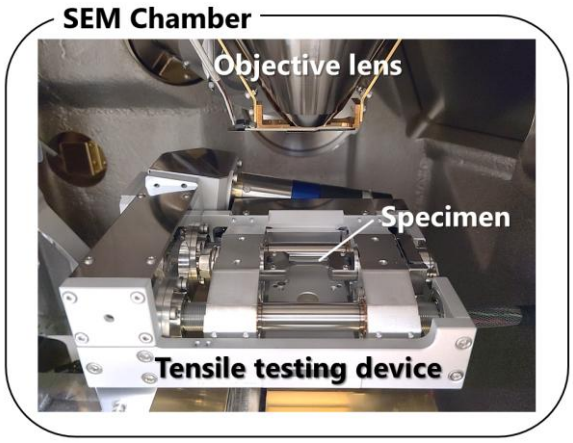


図 2　SEM チャンバーに格納した試験機の外観

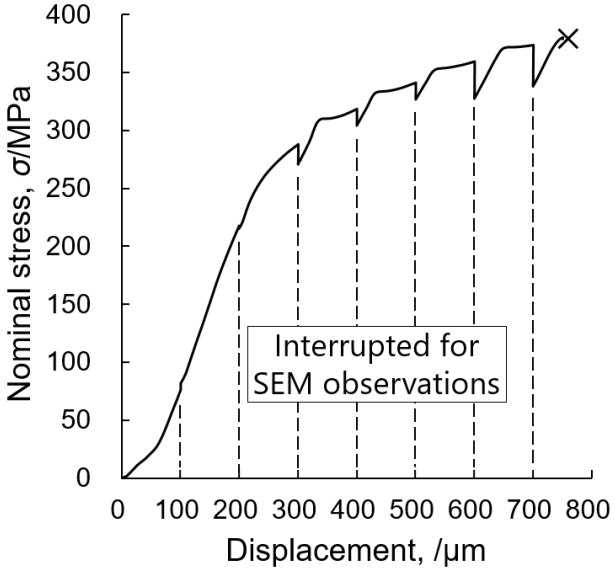


図 3　積層方向(Building direction: BD)が荷重方向と平行となる試験片を用いて得られた公称応力-変位曲線

2・2　引張試験とその場 SEM 観察

図 1 に示す形状の引張試験片をワイヤ放電加工により切り出し，表面を精研磨した後，10%過塩素酸エタノールを用いた電解エッチングにより組織を現出した．図 2 に SEM 試料室内に設置された引張試験機の外観を示す。SEM 観察は日本電子社製 SEM JSM-IT500 により行い，引張試験機には TSL ソリューションズ社製 SEM 観察用試料引張試験機 TS-1500-IIIを用いた．ひずみ速度を 1.6×10^{-4} /s にて引張試験を実施し, 所定の変位ごとにクロスヘッドを停止させ, 試験片表面の SEM 像を取得した. 得られた SEM 像を Correlated Solutions 社製ソフトウェア Vic-2D を用いて DIC 解析し、相当ひずみの分布図を得た．DIC 解析におけるサブセットサイズは 61×61 pixel、ステップサイズは 5 とした.

3．実験結果および考察

図 3 に，L-PBF 法にて造形した Al-12Si 合金試料の積層方向(Building direction: BD)が荷重方向と平行となる試験片を用いて得られた公称応力－変位線図を示す. 破断時の変位は 750 μm，破断応力は 380 MPa であった．図中の破線は SEM 観察を実施するためにクロスヘッドを停止させた変位を示し, 塑性変形領域では応力緩和が生じることがわかる.

図 4 に，その場観察により得られた試験片表面の SEM 像を示す. 図 4(a)および(b)はそれぞれ変形前および破断直前の試験片全体像，(c)は破断部近傍における観察結果である．図 4(a)で見られる欠陥は積層造形に起因して生じた造形欠陥であり，これを基準として変形後の SEM 像を比較することで, 引張変形に起因する変化を考察する．その結果，変位の増加に対応し，造形欠陥を起点として生じた亀裂が進展する様子や, 溶融池境界において亀裂が開口する様子が観察された．図 4(d)および(e)に造形欠陥から発生・伝播したき裂の一例を示す．き裂は溶融地境界を経路として進展する傾向を示しており，これは図 4(c)に見られる破断面の形状と対応すると考えられる。これらの結果は, 積層造形体の破壊が造形欠陥を起点として発生し, 溶融地境界を伝播することを示唆する.

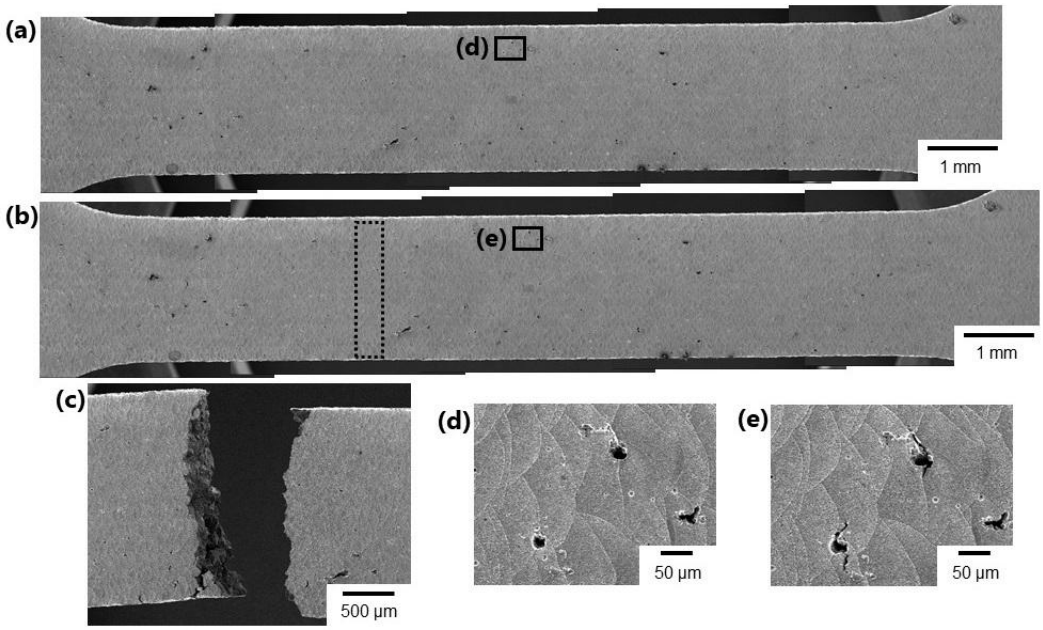


図 4　SEM チャンバー内で引張試験した試験片表面の SEM 像：(a) 試験前と(b) 破断直前（変位 700 mm）の試験片ゲージ部の低倍率像，(c) 破断後の低倍率像，(d) 試験前と(e) 破断直前（変位 700 mm）の造形欠陥周りの高倍率像.

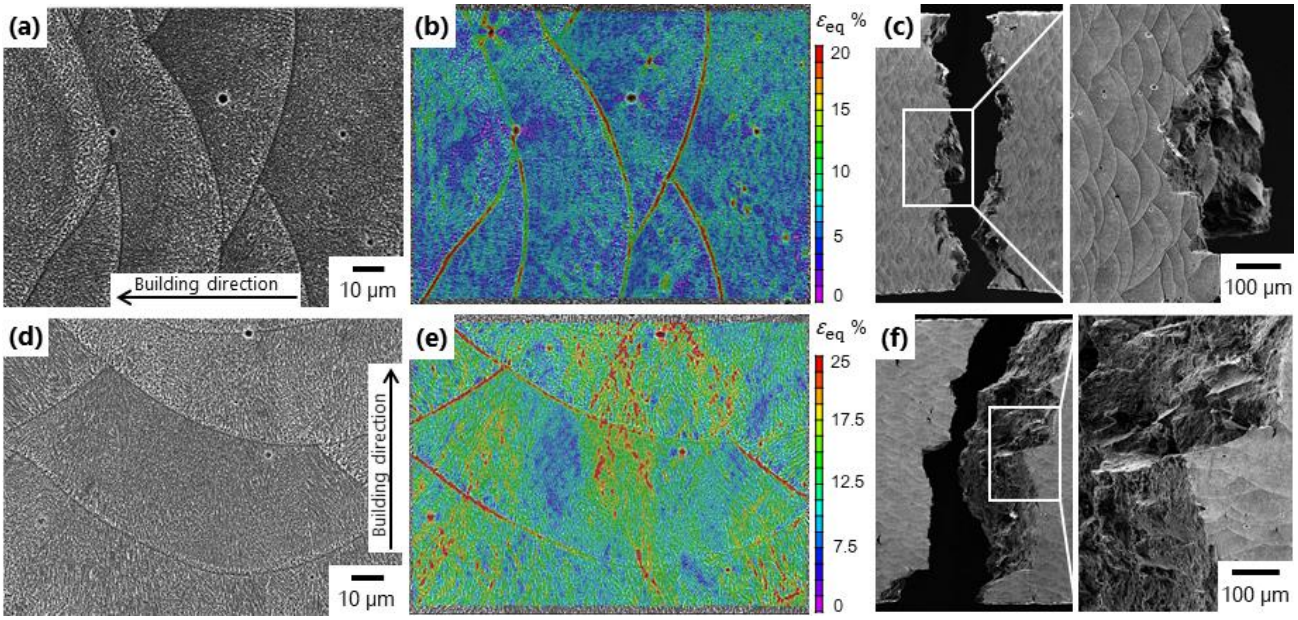


図 5　(a-c) 造形方向(Building direction)に平行な荷重方向と(d-f) 造形方向(Building direction)と垂直な荷重方向で引張試験を行った L-PBF Al-12Si 合金造形体試験片の溶融池構造におけるその場 SEM 観察と DIC 局所ひずみ解析の結果：(a, d) 引張試験前の SEM 像と(b, e) 引張変形後の SEM 像を用いて DIC 解析による相当ひずみ(e_{eq})分布図，(c, f) 破断後の破壊形態を示した低倍率 SEM 像（参考文献 13 を引用改編）.

図 5(a-c)に造形方向(Building direction)と荷重方向（引張方向）が平行となる L-PBF Al-12Si 合金造形体試験片での実験結果を示す．図 5(a)は，引張変形を与える前の溶融池組織を撮影した SEM 像である．紙面上下方向に伸びる線状の領域が溶融池境界である．クロスヘッドを 700 μm 変位させて同領域を撮影し，得られた SEM 像を DIC 解析して求めた相当ひずみ(ε_{eq})の分布を図 5(b)に示す．ひずみは溶融池境界に集中し，溶融池内部のひずみ分布は比較的均一であった．図 5(c)に，試験片破断部の低倍率 SEM 像を示す．破断時の変位は 747 μm であった．破面には溶融池境界に沿って破断が生じたことを示す紙面右側を向いた凸部が見られる．この形態がひずみの集中する領域 （図 5(b)）と一致することから，溶融池境界におけるひずみ集中が破壊形態に影響したことが考えられる．図 5(d-f)は，造形方向(Building direction)と引張方向が垂直となる試験片での実験結果である．破断時の変位量は 1160 μm であり，約 1.6 倍の引張延性を示した．図 5(e)に，1100 μm の変位を与えてその場観察した SEM 像を用いて DIC 解析して得た相当ひずみ(ε_{eq})の分布を示す．溶融池境界に加え，溶融池内を紙面上下方向に貫く領域でのひずみ集中が認められた．図 5(f)に示す破断部では溶融池境界に沿った破断を示す凸部と溶融池内を貫いて破断した領域が混在し，破壊形態とひずみが集中する領域の対応が確認された．したがって，L-PBF Al-12Si 合金造形体試験片が示す破壊形態の異方性は溶融池組織に起因する不均一なひずみ分布に関連することがわかった．

不均一なひずみ分布が延性を変化させるメカニズムを考察するため，溶融池境界におけるひずみ量の抽出を行った。図 6(a, b)に相当ひずみ(ε_{eq})を抽出した溶融池境界近傍の領域を示す．溶融池境界を交差する各線に沿って相当ひずみ(ε_{eq})のラインプロファイルを取得し，その最大値を溶融池境界における局在化したひずみと定義した．なお，用いた相当ひずみ分布図はいずれも 600 μm の変位を受ける試験から解析したものである．図 6(c)に抽出したひずみ量を溶融池境界と引張方向(TD)がなす角（θ）で整理した結果を示す．0°から 45°の角度をなす溶融池境界は，角度の

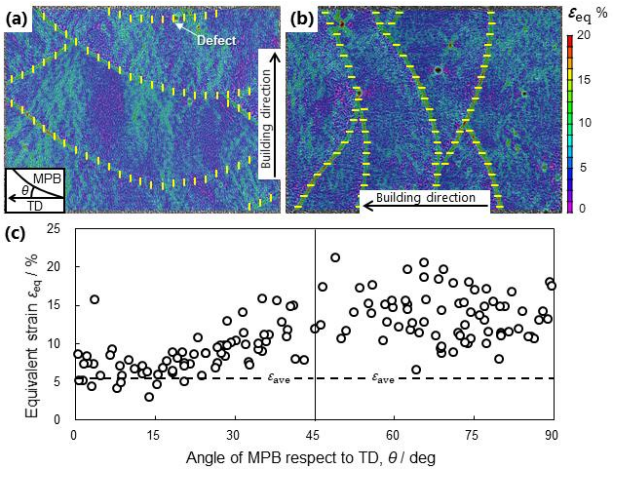


図 6　(a) 造形方向(BD)に平行な引張方向(TD)と(b) 造形方向(BD)と垂直な引張方向(TD)の条件にて 600 μm の変位を付与した L-PBF Al-12Si 合金造形体試験片の溶融池構造におけるその場 SEM 観察と DIC 局所ひずみ解析の結果，(c) DIC 解析から求められる溶融池境界近傍における相当ひずみ(e_{eq})を溶融池境界線と TD の角度(q)の関数で整理した結果（参考文献 13 を引用改編）.

増加に伴い相当ひずみが増加する傾向を示した. 破線で示す視野全体の平均ひずみ量と比較すると，2 倍以上のひずみ量は角度がおよそ 30°以上となる溶融池境界のみで見られる. 一方, なす角(θ)が 45°から 90°となる溶融池境界は，多くのプロットが平均の 2 倍に及ぶひずみ量を示した. この傾向は造形方向と平行に引張を受ける積層造形体において，引張方向との角度が 45°から 90°となる溶融池境界が多く含まれるためと考えられる. その結果，引張変形においてひずみが局在化する溶融池境界に集中しやすい状態となる. 図 5 で確認された破壊形態とひずみが集中する領域の対応から, この溶融池境界におけるひずみ集中の程度局在化が引張方向により変化する現象が，L-PBF Al-Si 合金積層造形体が示す異方的延性の主要因であると考えられる.

謝　辞

本研究は，名古屋大学 大学院生の大谷 祐貴氏（現：兵庫県立大学)，鈴木 飛鳥准教授，小橋 眞教授，あいち産業科学技術総合センターの加藤 正樹氏（現：岐阜大学)，梅田 隼史氏と共同で実施された．また，天田財団 一般研究開発助成の支援を受けた. ここに特記して感謝の意を表す.

参考文献

1) 京極秀樹・池庄司敏孝: 図解　金属 3D 積層造形のきそ, (2017)，日刊工業新聞社.
2) I. Yadroitsev・I Yadroitsava・A. Du Plessis・E. MacDonald：Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals, (2021), Elsevier.
3) E. O. Olakanmi・R. F. Cochrane・K.W. Dalgarno: Prog. Mater. Sci., 106 (2019), 100578.
4) H. R. Kotadia・G. Gibbons・A. Das, P. D. Howes: Addit. Manuf., 46 (2021), 102155.
5) L. Zhao・L. Song・J. G. S. Macias・Y. Zhu・M. Huang・A. Simar・Z. Li: Addit. Manuf., 56 (2022), 102914.
6) N. Takata・H. Kodaira・K. Sekizawa・A. Suzuki・M. Kobashi: Mater. Sci. Eng. A 704 (2017), 218-228.
7) M. Liu・T. Wada・A. Suzuki・N. Takata・M. Kobashi・M. Kato: Crystals, 10 (2020), 1007.
8) 高田尚記・足立大樹・宮嶋陽司 : 軽金属 75 (2025), No. 4, 199-208.
9) Y. Hoshi・D. Kim・N. Takata: Current Opinion in Electrochemistry, 54 (2025), 101773.
10) 高田尚記：まてりあ，63 (2024), 533-539.
11) N. Takata・K. Minamihama・T. Miyawaki・Y. Cheng・Y. Xu・W. Wang・D. Kim・A. Suzuki・M. Kobashi・M. Kato: Nature Communications, 16 (2025) 111105.
12) 高田 尚記：自動車技術，79 (2025), 157-160.
13) Y. Otani・N. Takata・A. Suzuki・M. Kobashi・M. Kato：Scripta Mater., 226 (2023), 115259.