

指向性エネルギー堆積法で作製したSUS316Lステンレス鋼の機械的特性 ーデジタル画像相関法を用いたSUS316L積層造形体の変形挙動の解析ー

山田 泰希*¹ 内野 正和*¹ 安部 年史*¹

Mechanical Properties of SUS316L Fabricated by Directed Energy Deposition -Digital Image Correlation Analysis of Deformation Behavior in Laser Additively Manufactured 316L- Taiki Yamada, Masakazu Uchino and Toshifumi Abe

指向性エネルギー堆積法 (DED) は、金型の補修のような肉盛造形や異種材料の接合などの用途が期待されており、その接合界面における強度に関心が集まっているが、関連する研究の多くはひずみゲージを用いた局所的なひずみの計測である。本研究では、DEDで作製されたステンレス鋼SUS316Lについて、デジタル画像相関法 (DIC) を用いて、引張破壊過程における変形状態を可視化し、一般的な溶製材との引張特性の違いを明らかにした。

1 はじめに

切削加工、塑性加工等に次ぐ第3の加工法とされる三次元積層造形 (Additive Manufacturing : AM) 技術は、従来のモノづくりでは困難な三次元形状を造形できることから新しい製造プロセスの確立や大幅な生産性向上をもたらす技術として注目を集めており、近年では金属材料に適用可能なプリンティング方式が実用化されはじめている¹⁾。金属AM技術の1方式である指向性エネルギー堆積 (Directed Energy Deposition : DED) 方式は、ベースプレート上の三次元造形に加えて既存部品に付加造形できることから、金型や航空機タービンブレードの補修、耐熱性や耐摩耗性などの機能性付与を目的とするコーティング、異種金属の接合など、より実用的な用途への適用が広がっている。

一方で、金属AM技術に共通する課題として、造形物の金属組織や造形物中に発生する内部欠陥等 (図1) に起因する機械的性質の低下が挙げられる。特にDEDにおいては、レーザー出力や送り速度といった造形条件によって決定される入熱エネルギーや、母材と造形金属の組み合わせによって接合状態が大きく左右される可能性がある。そこで、接合界面の強度に関心が集まっているが、関連する研究の多くがひずみゲージ等を用いた局所的なひずみの計測であり、三次元的な異方性や接合界面を含む積層造形材のひずみ分布を計測した報告は少ない。

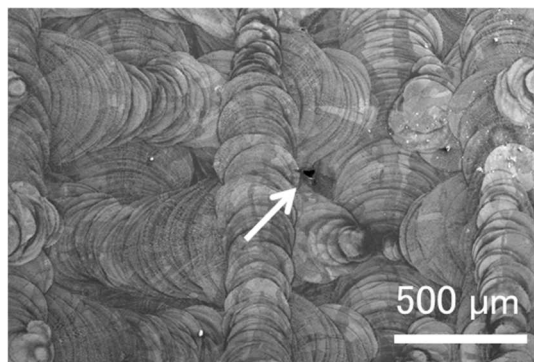


図1 造形物断面のSEM像²⁾

本研究では、DEDで作製したステンレス鋼SUS316Lについて、デジタル画像相関法 ((Digital Image Correlation : DIC) により、引張破壊過程における変形状態を可視化し、一般的な溶製材との引張特性の違いを明らかにすることでDEDの実用性を確認した。

2 研究、実験方法

2-1 引張試験片の作成方法

実験に用いた装置は、半導体レーザー (最大出力200 W、中心波長 915 nm) を搭載した (株) ニコン製の lasermeister 100Aである。材料粉末には、ステンレス合金SUS316Lのガスアトマイズ球状粉末 (山陽特殊製鋼 (株)) を用いた。SUS316Lはオーステナイト系ステンレスの代表的な鋼種であり、耐食性、加工性、溶接性に優れ、機械部品や医療機器など幅広い分野で使用されている金属である。なお、金属粉末の平均粒径 (D_{50}) は 75 μmである。

*1 機械電子研究所

DEDの原理を図2に示す。DEDは、レーザ光の照射によって母材上に形成した溶融池(メルトプール)に金属粉末を供給し、溶融・凝固を繰り返しながら三次元形状を造形する方式である。造形条件(レーザ出力、走査速度、積層ピッチ)は、高い相対密度が得られる条件を検討して、表1に示す値とした。

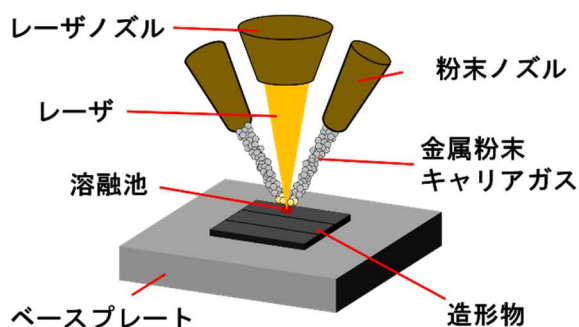


図2 DEDの原理²⁾

表1 造形条件

レーザ出力	W	150
送り速度	mm/s	3
積層ピッチ	mm	0.1
粉体供給量	g/min	2
金属粉末		SUS316L
金属粉末の平均粒径	μm	75

2-2 造形物の引張特性評価

造形物の機械的性質を確認するために、計5種類の引張試験片を作製した。図3に示す通り、長手方向が積層方向と水平(Z)および垂直(Y)となる直方体(8 mm×8 mm×80 mm)を造形し、平行部長さ 20 mm、平行部幅 8×2 mmのダンベル状に機械加工して試験片とした。試験片(d)、(e)については、SUS316L溶製材またはSUS304溶製材の上にSUS316Lを造形した後、平行部の中央が接合部となるように加工を行っている。

図4に、今回実施した引張試験の全体図を示す。DICは、試料表面に塗布した白黒のランダムな斑点模様を基に、デジタル画像を利用して表面の変位分布を取得する手法である³⁾。具体的には、初期画像内に基準となるサブセット(数10画素角程度)を決め、引張などの変形を与えた後の比較画像内においてこのサブセットに近い輝度値分布を探索し、輝度値分布の中心位置とサブセット中心位置から移動量(変位)を求める。サブセットは任意に画像中から選択でき、非接触で広範囲

のひずみ分布を測定できることに加え、ガスタービンやジェットエンジンなどひずみゲージでの測定困難な高温環境下においても、ひずみの計測が可能であることから、航空宇宙や自動車を始めとする様々な産業用途における活用が進んでいる⁴⁾。引張試験機には島津製作所製のAG-300kNV、DICの計測にはGOM社製のARAMISを使用した。

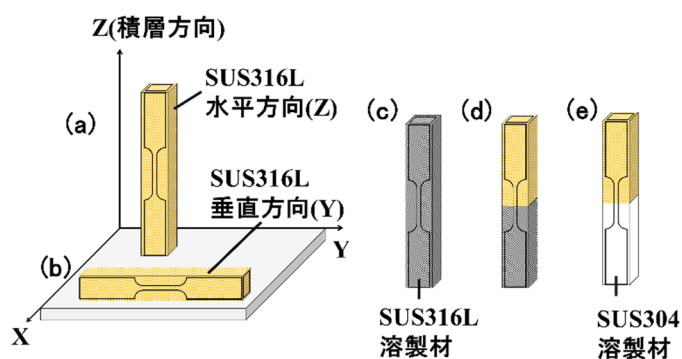


図3 引張試験片の作製²⁾

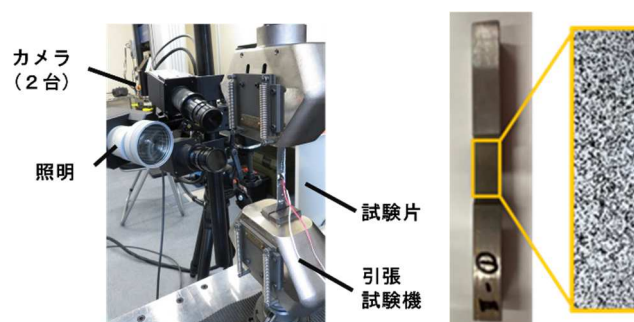


図4 DICによる撮影風景と試験片表面の模様²⁾

3 結果と考察

引張試験の結果を表2に示す。造形物の引張強度は水平方向(Z)626 MPa、水平方向(Y)632 MPaとなり、溶製材が示した604 MPaを上回る結果となった。これらの強度は、JIS G 4303に規定されているSUS316Lの引張強度480 MPa以上を満たしている。

図5は、試験片(a)～(c)における応力-ひずみ線図であり、ひずみは評価エリアの平均値を採用した。水平方向(Z)に比べ、垂直方向(Y)の引張強度は僅かに大きく、破断伸びが小さくなる異方性が存在することが分かる。また、溶製材と比較すると、破断伸びは水平方向(Z)で5%程度小さく、垂直方向(Y)では半分以下となった。そのため、DEDを実製品に適用する上では、想定される負荷方向を考慮した上で、積層方向を決定することが重要である。

表2 引張試験の結果

No	試験片	引張強度 MPa
(a)	SUS316L 造形 水平方向(Z)	626
(b)	SUS316L 造形 垂直方向(Y)	632
(c)	SUS316L 溶製材	604
(d)	SUS316L 溶製材 + SUS316L 造形	603
(e)	SUS304 溶製材 + SUS316L 造形	632

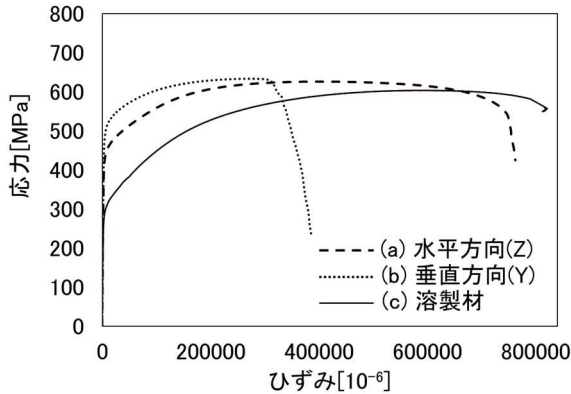


図5 試験片(a)～(c)の応力-ひずみ線図

図6に、試験片(d), (e)における引張試験後の写真を示す。試験片(d)において SUS316L溶製材側で破断が起きたことから、造形物の引張強度が溶製材より大きいことを確認できる。

図7は、試験片(e)の応力-ひずみ線図であり、ひずみはSUS304とSUS316Lを含む評価エリア全体の平均値である。図8は、図7中①～④における試験片表面のひずみ分布を示したものであり、コンターの濃淡は濃くなるほどひずみが大きいことを示している。図8より、引張破壊過程の初期において、①SUS304溶製材の中央付近に応力が集中し、その後、②均一に伸びが進展していることが確認できる。その後、③SUS316L造形物の中央付近に応力の集中が見られ、伸びが進展した後、最終的に、④SUS316L造形物側で破断が確認された。

DICで測定された試験片(e)における破壊メカニズムは、SUS304が有する顕著な加工硬化特性に起因するものと考えられる。オーステナイト系ステンレス鋼は、ひずみの付与によって加工誘起マルテンサイト変態を生じ、マルテンサイト(α)相はオーステナイト(γ)相に比べ著しく硬いことから、引張破壊過程における引張強度が向上することが知られている。杉本らは、引張加工

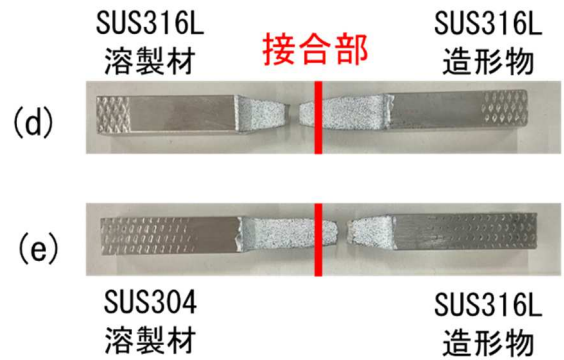


図6 試験片(d), (e)における引張試験後の写真²⁾

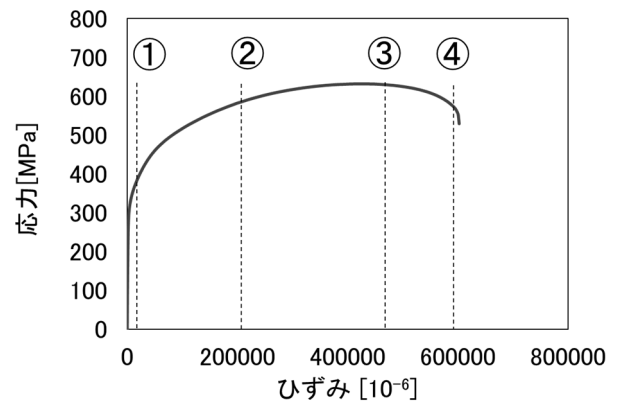


図7 試験片(e)の応力-ひずみ線図²⁾

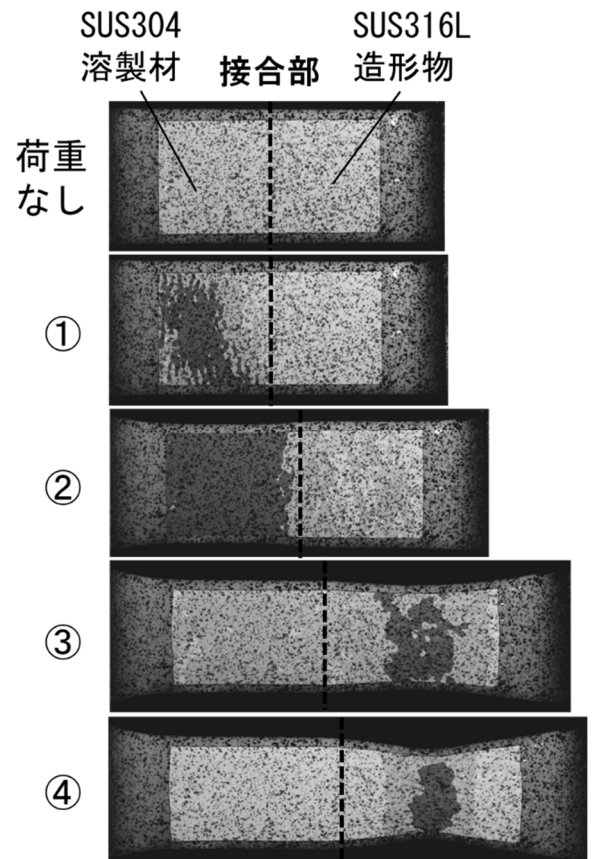


図8 試験片(e)におけるDICの結果²⁾

によってオーステナイト系ステンレス鋼がマルテンサイト相に変態する割合を調べており、伸び40%において、SUS304では30%以上変態するのに対し、SUS316Lではほとんど変化しないことを報告している⁵⁾。図9は、DICによって計算したSUS316LとSUS304それぞれの領域における、引張試験中のひずみ変化を表しており、SUS304とSUS316Lではひずみの増加傾向が大きく異なることを確認できる。

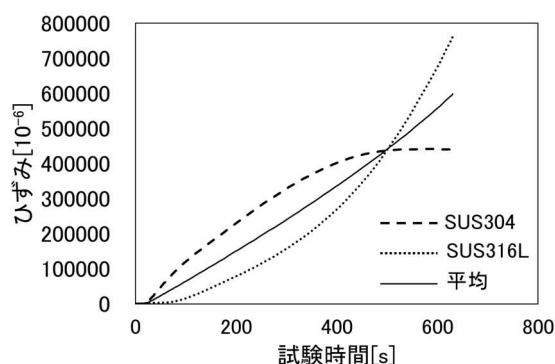


図9 引張試験中の各領域のひずみの変化

つまり、引張破壊過程の初期において、SUS304溶製材側の強度が、伸びの進展に伴う加工誘起マルテンサイト変態によってSUS316L造形物の強度を上回るため、最終的には、引張強度が低くなるSUS316L造形物側が破断するという破壊メカニズムを可視化できていると考えられる。

DEDによってSUS316Lを接合した試験片(d), (e)について、どちらも界面で破断することなく、接合部における応力集中は見られなかった。小池らは、DEDによって接合したニッケル基合金Inconel 625とステンレス鋼SUS316Lの引張試験において、界面で破断することなく十分な接合強度を有していることを報告しており⁶⁾、高い接合強度が得られることから、金型等の補修やコーティング、異種金属接合等に有効な製造プロセスであると考えられる。DEDは、レーザによる短時間の溶融・凝固によって金属組織が緻密化し、硬脆性が高まることが指摘されており、今後補修工程に適用する上で、金属組織を改善する熱処理の影響についても検討する必要がある。

4 まとめ

指向性エネルギー堆積法によってSUS316Lの造形物および溶製材との接合部材を作製し、DICにより、一般

的な溶製材との引張特性の違いを確認した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 指向性エネルギー堆積法を用いて造形したSUS316Lの引張強度はSUS316L溶製材よりも大きく、造形物は十分な強度を有していた。
- (2) 指向性エネルギー堆積法によって造形した溶製材と造形物の接合部材について、引張破壊過程は各材料の内部において進展し、接合界面は十分な強度を有していた。

5 参考文献

- 1) 技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構 (TRAFAM), 設計者・技術者のための金属積層造形技術入門, ウィザップ, (2016)
- 2) 山田泰希: 精密工学会講演論文集2023年度春季大会, p. 625-626 (2023)
- 3) M. A. Sutton, S. R. McNeill, J. D. Helen, and Y. J. Chao: Photomechanics Topic in Applied Physics, Springer-Verlag, vol. 77, pp. 323-372 (2000)
- 4) 内野正和: JETI, 71巻, 4号, pp. 84-87 (2023)
- 5) 杉本貴紀: 金属, 87巻, 5号, pp. 38-42 (2017).
- 6) 小池綾: Int. J. of Automation Technology, 13巻, 3号, pp. 338-343