

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05165

研究課題名（和文）金属積層造形物に内在する微小空孔の多軸応力圧着条件

研究課題名（英文）Condition of internal void closure with multi-axial stress induce in additive manufactured metallic body

研究代表者

吉田 佳典 (Yoshida, Yoshinori)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：60303674

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：粉末床選択的レーザー溶融法によって積層したマルエージング鋼造形物の内部に残存する未溶融欠陥である微小空洞および造形物の機械的特性を、エネルギー密度一定条件のもとで4種類のレーザー走査速度およびハッチングスペースの組み合わせで勝負ロックを造形した。造形物から小型引張試験片を切り出して、引張試験に供することによって評価した。また、内部欠陥を圧着消失させるべく、代表者が開発したウェッジ鍛造によって低荷重に大ひずみを導入することによって圧着する手法を実験および数値シミュレーションによって検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金属積層造形を用いて金型を製造する際、どうしても内部に微小空洞が残存し、これが製品の機械的特性を低下させる要因となりうる。現状では、熱間等方圧加圧法（HIP）処理などの後続加工によってこれらを減少させているが、必ずしも0とはならない。一方、塑性加工には鍛造という技術があり、内部中心近辺の欠陥を圧着する。しかしながら内部欠陥の理論的消失条件は必ずしも明らかにはなっていない。本研究では、積層造形における内部欠陥予測の基礎知見を得ること、同時に垂直方向偏差応力を効率よく増大させることで、低荷重で大ひずみを付与することが可能とするウェッジ鍛造法の機構を解明する。

研究成果の概要（英文）：Powder bed fusion (PBF) and selective laser melting (SLM) method was used for maraging steel block manufacturing. Internal void volume fraction and mechanical properties of the products were investigated under the experimental condition of constant energy density with 4 combinations of laser scanning rate and hatching space distance. Micro tensile test specimens were cut out from the build blocks and tensile test was performed. In addition, the wedge forging process was proposed for the purpose of internal defect closure, and its experiment and finite element analyses were performed. As the result, the forging process realizes employment of large strain in low compression load.

研究分野：塑性加工学

キーワード：積層造形 ウェッジ鍛造 内部欠陥 未溶融欠陥 高強度

1. 研究開始当初の背景

積層造形を用いて金型を製造する際、素材に接する成形部には積層造形技術によって複雑形状の肉盛り加工を行い、摩耗・凝着および割れなどの表面欠陥が生じた段階で、再度の積層造形肉盛りメンテナンスによる対応も有効である。一方、塑性加工には鍛造という技術があり、その中でもコギングなどの鍛造は寸法・長尺の素材を逐次圧縮することによって内部中心近辺の欠陥(凝固引け)を圧着する。しかしながら内部欠陥の理論的消失条件は必ずしも明らかにはなっていないために、成否は操業者の経験に依るところが大きい。また積層造形においては材料内部に直径が数 μm 以下の微小な空孔が材料中心から表面まで広く分布し、金型接触面直下のデッドメタル近辺ではひずみが小さいため、コギングの知見をそのまま適用することは難しい。申請者はこれまでに鍛造工程の最適化および有限要素法を用いた数値シミュレーション技術開発に従事してきたことも踏まえ、積層造形プリフォームを側方から圧縮する際に、同時にその垂直方向の材料流動を促すことによって偏差応力を効率よく増大させることで、低荷重で大ひずみを付与することが可能であると着想するに至った。

2. 研究の目的

内部空孔の圧着には大ひずみの導入が必要であるが、研究対象である高強度材においては荷重が高くなるため装置(金型)の損傷が懸念され、現実的な対策には必ずしもならない。一方、積層造形と逐次鍛造という異なる技術の融合で、新たな価値が創造されるものと考えられる。またこれを克服するべく、難加工材である高強度マルエージング鋼を対象に、マイクロ組織制御による機械的特性の向上を実現する低荷重加工法の開発を目的とする。すなわち、力学的に無負荷な熔融凝固過程である金属積層造形法で予備成形品(プリフォーム)を造形し、その後これに低荷重な逐次塑性加工を施すことで組織制御(内部空孔圧着)実現のための条件を明確にする。具体的には、積層造形において種々の空孔体積率を有するプリフォームを造形し、これらに対して申請者が提案するウェッジ逐次鍛造を種々の条件で施すことによって内部空孔圧着条件を学術的に追求する。

3. 研究の方法

(1) 金属三次元積層における造形条件とプリフォーム内空孔体積率の関係調査

造形には選択的レーザー溶融法(SLM)による金属積層造形機 LUMEX Avance-25 を使用した。対象材はマルエージング鋼 Matsuura Maraging II (SANDVIK) とした。造形条件を **Table 1** に示す。ここで、単位体積当たりに投入されるエネルギー量を表すエネルギー密度 E は次式で表される。

$$E = \frac{P}{vht}$$

ここで、 P [W] はレーザーの出力、 v [mm/s] は走査速度、 h [mm] はハッチングピッチ、 t [mm] は1層の積層厚さを示す。エネルギー密度を大きくするにはレーザーパワーを上げる以外にも、走査速度を遅くする、ハッチングピッチを小さくする、積層厚さを小さくするといった方法がある。

Table 1 Processing condition of additive manufacturing

Condition	1	2	3	4
Power of laser P [W]	320			
Layer thickness t [mm]	0.05			
Spot diameter s [mm]	0.2			
Hatch spacing h [mm]	0.05	0.1	0.15	0.2
Scan speed v [mm/s]	1680	840	560	420

造形物内部の引張強さや破断相当ひずみなどの機械的特性の分布を調査するために、造形ブロックからワイヤーカット放電加工機を用いて **Fig. 1 (right)** に示す小型試験片を切り出して引張試験に供した。平板部分のみ 600 番のエメリー紙で研磨を行い、放電加工による試験片表面の加工層を除去した。引張試験片は全長 15.4 mm、その平行部は幅 1.0 mm、厚さは 1.0 mm とした。試験片長手方向(引張方向)がレーザー走査方向に平行(LD)に、またこれに垂直な方向(TD)および積層面に高さ方向(ND)となるように切り出した。TD方向の試験片は2種類あり、造形したブロックの端面に近い試験片を **Left_TD**、ブロック中央に位置する試験片を **Middle_TD** とする。試験片切り出し位置を **Fig. 1 (left)** に、両開き式小型引張試験機を **Fig. 1 (right)** に示す。本試験機は試験片を固定した治具が左右に両開きすることで、常に試験片平行部中央を高速度カメラで定点観測しながら試験可能である。

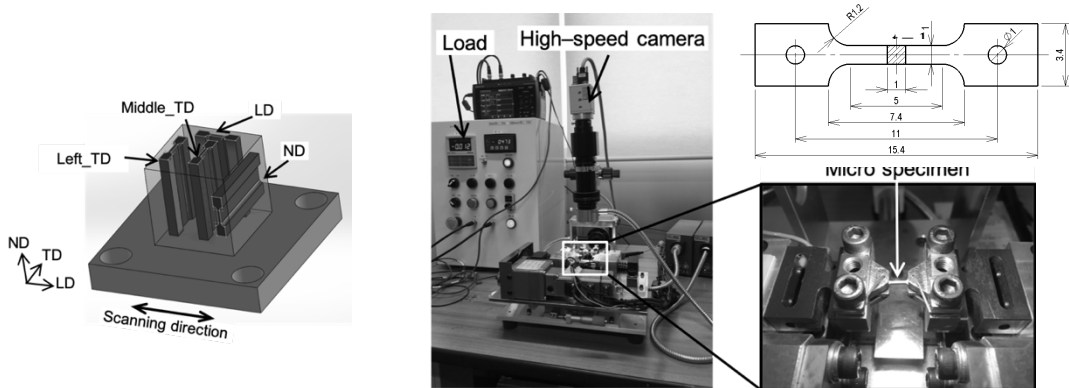


Fig. 1 Micro tensile testing method; (left) location and direction of micro specimen for tensile test, (right) micro tensile test machine and specimen geometry

(2) ウェッジ鍛造を用いた圧縮実験および有限要素解析

積層造形プリフォーム内に大ひずみおよび圧縮応力を導入することによって空孔圧着を狙うべく、効率的な圧縮応力導入のために、ウェッジ圧縮 (Fig. 2) を応用する。ここで、試験片の内部ひずみに与える加工条件の影響を調査するため、有限要素解析を実施した。数値シミュレーションには汎用塑性加工コード DEFORM-3D™ を用いた。解析条件を Table 2 に示す。ウェッジ金型の形状を Fig. 3 に示す。Fig. 3 に示すウェッジの底角を α とし、 $\alpha = 0^\circ, 3^\circ, 6^\circ, 9^\circ$ の 4 種類のウェッジ金型を使用した。また、ウェッジ形状金型は奥行方向に対して同形状とし、上型および下型の形状は同一とした。ウェッジ金型の設置条件について Fig. 4 に示す。下型の稜線を基準に上型のウェッジの棟が圧縮軸まわりに回転した角度を上下型の交差角度 β とした。 $\beta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の 3 種類の設置条件を設定した。



Fig. 2 Wedge forging die

Table 2 FEA conditions of wedge forging

Mode		Deformation
Step increment control		0.1 s/step
Specimen	Object type	Elasto-Plastic
	Temperature	300 °C
	Material	7000 series Al alloy
	Number of elements	100000
Top die	Object type	Rigid
Bottom die	Object type	Rigid
Inter-Object	Top die-Work piece	Shear friction 0.7
	Bottom die-Work piece	Shear friction 0.7

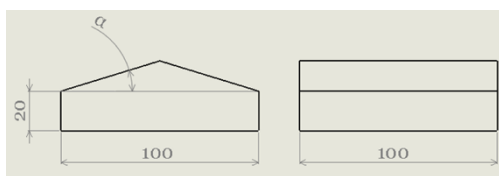


Fig. 3 Shape and dimensions of wedge die

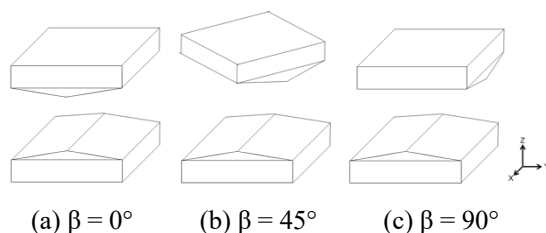


Fig. 4 Intersect angle β of top and bottom dies

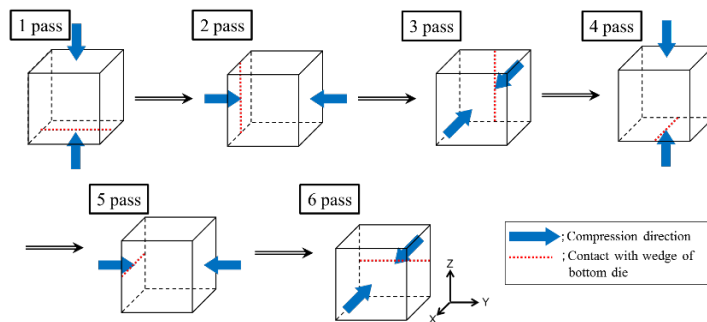


Fig. 5 Schematic illustration of wedge multi-stage forging process

ウェッジ鍛造工程の概略図を Fig. 5 に示す. 試験片と下型のウェッジの棟が X 軸および Y 軸に平行に接触するようにウェッジ金型を設置し, 圧縮した. 1 回の鍛造工程を 1 pass と称し, 合計 6 pass の多段鍛造シミュレーションを実施した. 各 pass における圧縮率は圧縮軸における試験片長さの 50% とした. 上下型の工具動作は 1 mm/sec に設定した.

4. 研究成果

(1) 積層条件が造形物の内部欠陥および機械的特性に及ぼす影響

組織観察用試験片の研磨面の観察から求めた空孔率 f を Fig. 6 に, また各条件のレーザ走査方向に垂直な断面写真を Fig. 7 に示す. Fig. 6 においては, 空孔率は条件 2 が最小で, 条件 4 が最大となっている. これは後述する破断相当ひずみと相関があり, 初期空孔率が少ないほど破断相当ひずみが大きく (条件 2), 初期空孔率が多いほど破断相当ひずみが小さい (条件 4). 条件 1 と 3 は空孔率の分布に違いがあるものの観察領域全体の空孔率は同程度だった. マルエージング鋼の積層材の延性には初期の空孔率が大きく影響を与えることがわかる.

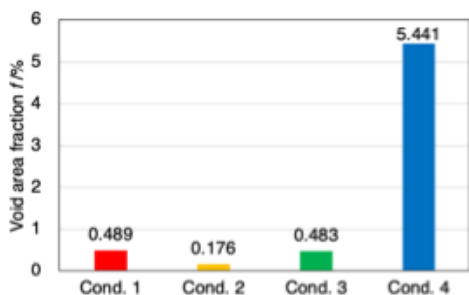


Fig. 6 Void area fraction on cross-sectional surface of fabricated block

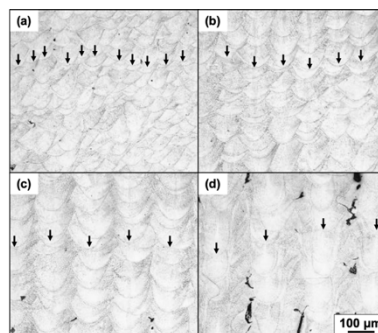


Fig. 7 Microstructure on the cross-sectional surface of fabricated block ((a) Cond. 1 ($h = 50 \mu\text{m}$), (b) Cond. 2 ($h = 100 \mu\text{m}$), (c) Cond. 3 ($h = 150 \mu\text{m}$), and (d) Cond. 4 ($h = 200 \mu\text{m}$))

Fig. 7 においてはレーザのスポット中心と思われるメルトプールの最下部に矢印を付した. 矢印の間隔は各条件のハッチングピッチにほぼ等しく, 条件 1, 2 および 3 はメルトプールの輪郭が明瞭で, 比較的小さな欠陥が見られた. 条件 4 では隣接するメルトプールの中に不明瞭な組織が発達しており, 積層方向に連なった空孔も見られた. これはスポット径とハッチングピッチの長さが等しいために, 隣り合うメルトプールとの間隔で溶融不良が起きていたためである.

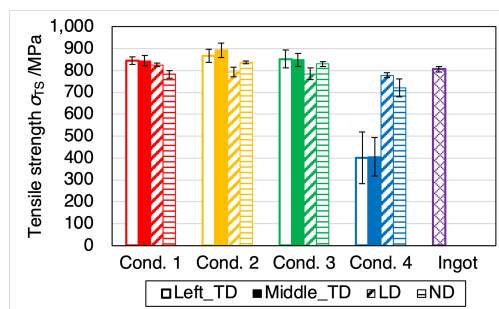


Fig. 8 Relationship between process conditions and tensile strength

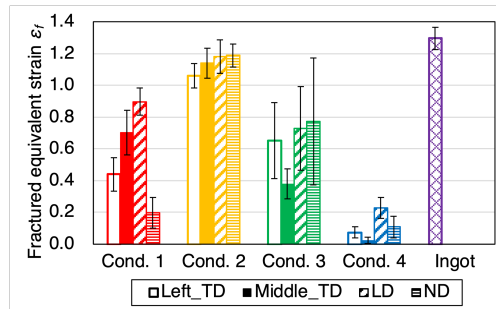


Fig. 9 Relationship between process conditions and fractured equivalent strain

小型引張試験によって得られた引張強さ σ_{TS} の平均値を Fig. 8 に示す. Left_TD および Middle_TD の試験片の場合, 条件 4 の引張強さはその他の条件の約半分となった. LD および ND 方向の試験片の場合, 引張強さに大きな違いはなく, 造形条件が引張強さに及ぼす影響は小さいことがわかった. また, 溶製材と比較しても同等で, 積層造形材の方がわずかに大きいものもある.

破断相当ひずみ ϵ_f の平均値を Fig. 9 に示す. 引張方向に関わらず条件 2 で破断相当ひずみが最大となり, 条件 4 で最小となった. これより, 造形条件が破断相当ひずみに及ぼす影響は大きいことがわかった.

(2) ウェッジ鍛造の変形様式

有限要素解析で得られたウェッジ多段鍛造中における +X 平面上の相当ひずみおよびせん断ひずみ γ_{yz} の分布図から, 中心部の相当ひずみはウェッジ多段鍛造の進行につれて増加していた. 3 pass までは与えられた相当ひずみ量に大きな差は見られなかったが, 4 pass~6 pass では,

ウェッジの底角 α が大きいほど、相当ひずみ量が少なかった。また、以下の知見を得た。

- ・ ウェッジ多段鍛造後の試験片中心部に付与された相当ひずみはウェッジの底角 α が大きいほど、減少した。
- ・ ウェッジ多段鍛造後の試験片中心部に発生されたせん断ひずみ γ_{xy} はウェッジの底角 α によらず同程度発生した。
- ・ ウェッジ多段鍛造後の試験片中心部に付与されたせん断ひずみ γ_{yz} はウェッジの底角 $\alpha=6^\circ$ の時に最も高い値が発生した。
- ・ ウェッジ多段鍛造後の試験片中心部に付与されたせん断ひずみ γ_{zx} はウェッジの底角 $\alpha=6^\circ$ の時に最も低い値が発生した。

Fig. 10 に Case 4 ($\alpha=3^\circ$, $\beta=90^\circ$) のウェッジ多段鍛造における試験片中心の引張強さ、全伸び、を示す。2 pass における試験片中心の引張強さおよび全伸びは 1 pass と比べ、それぞれ 20% 増加し、84% 減少した。3 pass の試験片中心の引張強さは 2 pass と比べ、大きな差が見られなかった。3 pass に比べ、6 pass 後の試験片中心の引張強さは大きな差が見られなかったが、全伸びは 64% 増加した。

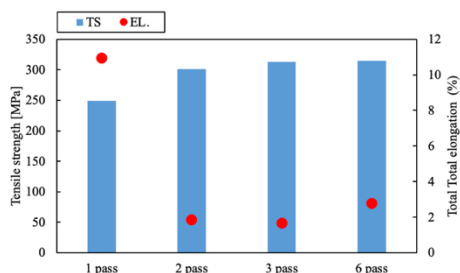


Fig. 10 Tensile strength and total elongation of specimen during wedge multi-stage forging.

(3) まとめ

粉末床選択的レーザ溶融法を用いたマルエージング鋼の造形において、エネルギー密度を一定として走査速度およびハッチングピッチの組み合わせを変更して造形した場合の造形物の内部欠陥および機械特性に及ぼす造形条件の影響について調査するべく、4つの造形条件で小型ブロックを造形し、微小引張試験片を切り出して機械的特性を評価し、未溶融欠陥生成予測モデルと比較した。また、ウェッジ多段鍛造におけるウェッジ金型の形状および設置方法が内部ひずみに与える影響を数値シミュレーションから調査した。その結果、溶融部オーバーラップ高さは空孔率と相関があり、レーザパワーおよびエネルギー密度を一定とした場合、溶融部オーバーラップ高さが大きい条件において空孔率が低く、機械的特性が良好であることが示された。また、ウェッジの底角 $\alpha=6^\circ$ 、上下型のウェッジの交差角度 $\beta=90^\circ$ の条件で鍛造された試験片は、他のウェッジ角度 ($\alpha=0^\circ, 3^\circ, 9^\circ$) の条件と比べて試験片内部に高い負の最大せん断ひずみ γ_{zx} が存在すること、ウェッジ多段鍛造においては通常の平行圧盤による鍛造と比べると試験片中心部の引張強さには差が見られなかったが、ウェッジ鍛造では全伸びが 115% 増加することが示された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 沓掛あすか, **吉田佳典**, 児嶋彬, 岡島琢磨: 粉末床選択的レーザ溶融法を用いたマルエージング鋼の積層造形における造形条件が未溶融欠陥生成に及ぼす影響, 塑性と加工, **61-717** (2020), 211-216. (査読あり)

[学会発表] (計 5 件)

- ① **吉田佳典**: マルエージング鋼の SLM 造形における未溶融欠陥予測モデルと造形条件の最適化, 日本塑性加工学会プロセッシング計算力学分科会 第 68 回セミナー 金属 3D プリンティングとそのプロセスシミュレーション (2021 年 4 月 9 日, オンライン)
- ② 沓掛あすか, **吉田佳典**, 児嶋彬, 岡島琢磨: 粉末床選択的レーザ溶融法を用いたマルエージング鋼の積層造形における造形条件が未溶融欠陥生成に及ぼす影響, 日本塑性加工学会 第 71 回塑性加工連合講演会 (2020 年 11 月 15 日, オンライン)
- ③ 沓掛あすか, **吉田佳典**, 児嶋彬, 岡島琢磨: SLM 積層造形における造形条件がマルエージング鋼造形物の機械的特性 および内部欠陥に及ぼす影響, 日本金属学会 2020 年春期(第 166 回)講演大会 (2020 年 3 月 17 日, 中止・講演成立)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 KUTSUKAKE Asuka, YOSHIDA Yoshinori, KOJIMA Akira, OKAJIMA Takuma	4. 巻 61
2. 論文標題 Influence of Processing Conditions on Unmelted Defect Generation in Maraging Steel Made with Selective Laser Melting	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity	6. 最初と最後の頁 211 ~ 216
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9773/sosei.61.211	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 吉田佳典
2. 発表標題 マルエージング鋼のSLM造形における未溶融欠陥予測モデルと造形条件の最適化
3. 学会等名 日本塑性加工学会プロセッシング計算力学分科会 第68回セミナー 金属3Dプリンティングとそのプロセスシミュレーション（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 沓掛あすか, 吉田佳典, 児嶋彬, 岡島琢磨
2. 発表標題 粉末床選択的レーザー溶融法を用いたマルエージング鋼の積層造形における造形条件が未溶融欠陥生成に及ぼす影響
3. 学会等名 日本塑性加工学会 第71回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 沓掛あすか, 吉田佳典, 児嶋彬, 岡島琢磨
2. 発表標題 SLM積層造形における造形条件がマルエージング鋼造形物の機械的特性 および内部欠陥に及ぼす影響
3. 学会等名 日本金属学会2020年春期講演大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------