

粉末床溶融結合法で得られた造形物の変形メカニズムに関する研究

金沢大学 ○ 坪内 光太郎, ◎古本 達明, 橋本 洋平, 小谷野 智広, 細川 晃

粉末床溶融結合法は、薄く堆積した金属粉末に対して選択的にレーザを照射し、層状に溶融・凝固を繰り返して3次元形状を得る手法である。本研究では、造形中に生じる造形プレート内部の温度やプレート裏面のひずみを詳細に検討し、造形後の変形を抑制する手法を検討した。その結果、各層の粉末が焼結される際のベースプレートの変形挙動とレーザ照射時にベースプレート内部に構成される応力場が明らかとなった。

1. 緒言

近年、顧客ニーズの多様化により多品種少量生産が増えている。そのため、3次元CADデータをもとに製品を生産可能なAdditive Manufacturing (AM)が注目されている。特に、金属材料を用いたAMは、使用可能な材料の多さや複雑形状加工への適性から、金型製作、航空機部品、医療用部品への利用が期待されている。本研究では、金属AMの中でも、金属粉末の層にレーザを照射することで粉末を溶融・固化していく Powder Bed Fusion (PBF)法に着目した。これは、薄く堆積した金属粉末を選択的に溶融・固化して造形物を得る方法である。金属AM装置の開発は進んでいるが、同手法で得られた造形物の寸法精度は切削加工に及ばず、各種実用部品へ適用するためには解決すべき課題が残っている。精度低下の大きな要因として、レーザなどの熱源に起因して生じた膨張・収縮による造形物の変形がある¹⁾。そこで本研究では、PBF法による造形中に生じるベースプレート内部の温度とひずみを実験的に評価し、レーザ照射に起因して生じる変形挙動を詳細に検討したので、以下に報告する。

2. 実験方法

実験装置の概略図を図1に、実験条件を表1に示す。実験に用いた粉末は、ガスアトマイズ法によって製作され、平均粒径が $33.3\ \mu\text{m}$ であるマルエージング鋼である。ベースプレートに対して粉末を自重のみで堆積させたため、堆積粉末のかさ密度は $4260\ \text{kg}/\text{m}^3$ であった。ベースプレートは、厚さが $10\ \text{mm}$ である熱間工具鋼 (JIS: SKD61)を用い、造形部の幅が $7\ \text{mm}$ となるようにダンベル形状に加工した。そして、プレート上に $5 \times 45 \times 5\ \text{mm}$ の直方体を造形した。また、ベースプレートの上面から $2\ \text{mm}$ の位置に直径が $1.6\ \text{mm}$ の穴を明け、同径のK熱電対((株)ミスミグループ本社製: MSND1.6-50)を挿入してプレート内部の温度を測定した。さらに、熱電対の真下に位置するベースプレート底面にひずみゲージ((株)共和電業: KFG-2-120-C1-11L1M2R))を貼付し、造形時に生じる内部応力の変化を測定した。温度とひずみの測定箇所は、図に示すように(1)造形物の中心位置、(2)造形物の中心と端の間、(3)造形物の端の3カ所とした。測定時間は、造形開始から造形終了後に設ける10分間の冷却期間をはさみ、プレートを取り付けたボルトによる拘束を解除するまでとした。

造形時のレーザ走査方法を図2に示す。図に示すように、带状走査と呼ばれる手法を採用し、照射面を $5 \times 5\ \text{mm}$ のブロックに分割した後、各ブロックを造形物の端から順に造形した。次層の造形では、レーザ光の照射方向を 90° 変え、層内のブロック作成位置をX, Y方向ともに $1/4\ (1.25\ \text{mm})$ ずつ移動させた。これらの带状走査を繰り返しながら造形を行うため、ブロックの位置およびレーザの走査方向が同一になるのは8層ごととなる。実験では、带状走査時にプレートで生じる温度とひずみの変化をオシロスコープ(横河電機(株)製: スコープローダDL850E)で測定し、それらの時間履歴から各層でのプレート変形挙動を詳細に検討した。

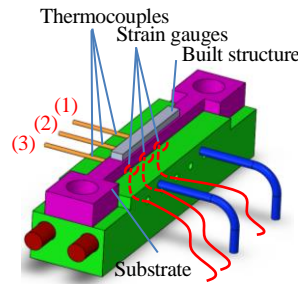


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

Table 1 Building condition

Table 1 Building condition	
Laser irradiation	
Laser type	Yb:Fiber
Wavelength [nm]	1070
Laser power[W]	320
Spot size [mm]	0.2
Scan speed [mm/s]	500
Hatching space [mm]	0.15
Built structure size [mm]	$5 \times 45 \times 5$
Layer thickness [μm]	50
Layer number	100
Atmosphere gas	N_2
Substrate material	SKD61
Metal material	maraging

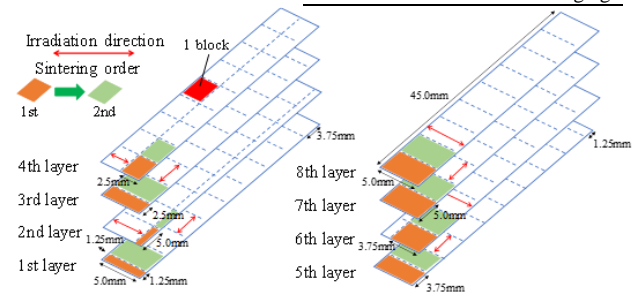


Fig.2 Schematic of laser path

3. 実験結果

3.1 造形全体を通してのひずみと温度変化

図3に、造形時に出力された造形開始から拘束を解除するまでのプレート裏面のひずみとプレート内部の温度の履歴を示す。造形初期とそれ以降でそれぞれの変化傾向が異なっていた。造形開始から9層目までにプレート裏面で生じたひずみは、全ての測定位置で圧縮側にシフトしたのに対し、積層数が増えるにつれて(1)中心と(2)中心と端の間で生じたひずみは引張側にシフトし、(3)造形物の端で生じたひずみは圧縮側にシフトした。このことから、プレート上面に加わる内部応力として、8層目まではベースプレート上部の膨張に起因する圧縮応力が支配的であったが、造形物の高さが大きくなるにつれ、造形物の収縮により引張応力が発生し、ベースプレート上面が造形物に拘束されたと考えられる。一方、プレート内部の温度は層数が増えるにつれて次第に高くなるが、17層目以降の造形では造形物の高さが増すことで、レーザ照射に起因して生じた熱がプレートへ伝導しにくくなり、徐々に低下した。

得られた結果から、造形中にプレートで生じる変形を予測することができると考えられる。ボルトによる拘束を解除する前後で生じる変形を模式的に表した結果を図4に示す。9層目以降のひずみ変化から(1)、(2)では下に凸となる変形、(3)では上に凸となる変形が生じていると考えられる。(3)付近は熱影響が生じる領域の境界であり、(1)、(2)に比べ、(3)は発生する内部応力が小さくなることが予想される。さらに、ボルトによる拘束時

は変形が限定されるため、相対的に (3)では逆向きの変形が生じたと考えられる。造形終了後に拘束を解除すると、いずれの測定位置でもひずみが急激に大きくなって引張側にシフトしたことから、プレート全体で下に凸となる変形をしたこととなる。拘束時もプレート全体に同様の応力が働いており、拘束の解除によって内部応力が解放された結果といえる。ベースプレートが下に凸となる変形は、レーザフォーミングの代表的な変形メカニズムとして知られる TGM (Temperature gradient mechanism)²⁾や、冷却時の造形物やベースプレートの収縮率の差が影響していると考えられる。

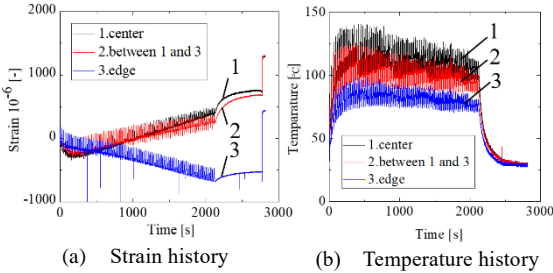


Fig.3 Experimental result of strain and temperature history

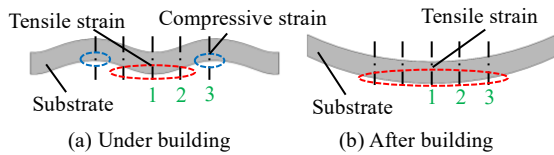


Fig.4 Deformation of substrate

3.2 レーザ照射時に生じる応力分布

図 5 に造形開始 1 層目から 8 層目までの温度とひずみの履歴を示す。いずれも (1)造形物中心の位置で出力された波形である。また、造形開始から 2 層目、3 層目、6 層目を拡大した結果を図 6 に示す。図 5 に示すようにプレート内部の温度は、レーザ照射位置が熱電対の直上に近づくにつれて急激に上昇し、直上を通過した後、極大値をとり、その後急激に減少した。また、造形する層数が増えると、プレート温度が次第に高くなる様子も確認された。これらの結果から、レーザ照射に起因したプレート内部の温度は、その変化率が大きいことがわかる。一方、プレート裏面のひずみは、レーザ照射部が測定位置の直上に近づき通過する過程で引張と圧縮の変化を繰り返しながら圧縮側にシフトした。これらの変化の割合は帯状走査に起因して各層で異なる。

図 6 (a)と(b)に示すように、奇数層と偶数層ではひずみが引張と圧縮に変化する回数が異なっていた。引張応力が発生したのは、レーザ照射位置がひずみ測定位置の直上へ到達する前後であった。一方、圧縮応力が加わるのは、レーザ照射位置がひずみ測定位置の直上へ到達したときであり、帯状走査に起因して圧縮応力が加わる回数は奇数層で 1 回、偶数層で 2 回となっていた。また、偶数層では温度の上昇も 2 段階に分かれていた。

さらに(a)と(c)から、同じく偶数層であっても、2 回加わる圧縮応力のうち、ひずみの減少量が大きい位置が各層で異なっていた。温度の上昇も同様であった。これは、各層のブロック作成位置によると考えられ、一度のレーザ照射で流入する熱量が大きいほど発生する圧縮応力は大きくなったと考えられる。

応力の発生は、レーザ照射に起因した加熱・冷却の過程でプレートが膨張・収縮したためであり、急激な温度変化によるレーザ照射部の温度場と、それにもなる熱応力場が形成されたと考えられる。レーザ照射によって、レーザ照射部は急激に加熱されて膨張しようとするが、周囲は加熱されないために拘束される。その結果、レーザ照射部近傍では圧縮応力が生じ、その周辺には引張応力場が形成された。硬脆材料をレーザ切断す

るときに熱源付近は圧縮応力、熱源周辺には引張応力発生することがわかっている³⁾。これらの結果は、その熱応力場と似ており、金属材料表面へレーザ照射したときも同様な熱応力が生じることが明らかとなった。

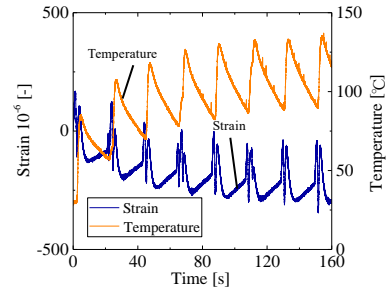
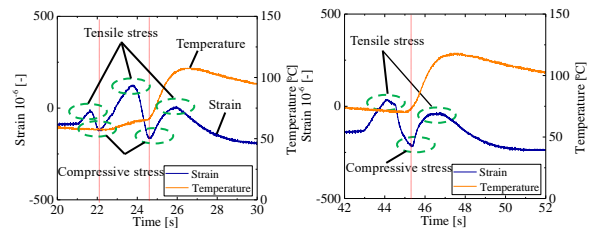
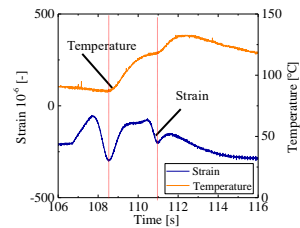


Fig.5 Strain and temperature history from 1 - 8 layers



(a) 2nd layer (b) 3rd layer



(c) 6th layer

Fig.6 Strain and temperature history of one layer

4. 結言

本研究では、ひずみゲージと熱電対を用いて造形中のベースプレートの温度とひずみを測定した。以下に得られた結果を示す。

- (1) 造形中の造形物の高さが大きくなるにつれ、(1), (2)の位置でのひずみは造形物の収縮により、引張側にシフトする。また、温度は熱伝導しにくくなることで徐々に低下していく。
- (2) 拘束中と拘束解除後で変形が異なり、拘束中(1), (2)の位置では下に凸、(3)の位置では上に凸となる変形が生じ、拘束解除後に全体的に下の凸の変形となった。
- (3) レーザ照射部が通過する過程でのひずみと温度の変化の割合は各層で帯状走査に起因する。また、ひずみから引張と圧縮応力が繰り返し加わることがわかる。
- (4) 造形中、レーザ照射によって、レーザ照射部は急激に加熱され膨張しようとするが、周囲は加熱されないために拘束される。結果として、レーザ照射部近傍では圧縮応力が生じ、その周辺には引張応力場が形成される。

参考文献

- 1) T. Furumoto, et al.: Study on Deformation Restraining of Metal Powder Fabricated by Selective Laser Melting, Materials Processing Technology, 245, pp. 207-214 (2017)
- 2) 上田隆司ら：レーザフォーミング加工に関する基礎的研究, 精密工学会誌, 67, 2, pp.300 - 304(2001)
- 3) 沖山俊介：レーザ切断, 精密工学会誌, 60, 2, pp.196 -197(1994)