

金属積層造形におけるサポートレス造形に向けた検討

村川 収*

Investigation Towards Supportless 3D Printing in Metal Additive Manufacturing Osamu Murakawa

粉末床溶融結合方式の金属積層造形において、水平方向にオーバーハングするように傾斜した角度を有する形状ではサポートと呼ばれる支持部材が必要となるが、造形コストや造形後の後処理工程の増加の要因となる。本研究ではサポートの低減に向けて、造形条件が傾斜した角度の造形に及ぼす影響について、造形材料に SUS316L, マルエージング鋼, AlSi10Mg を用いて検討した。その結果、通常の緻密体が得られる造形条件よりも、低いエネルギー条件を用いることで、サポートレス造形が可能であることを明らかにした。

1. 緒 言

3D プリンターに代表される Additive Manufacturing(付加製造)技術は、除去加工に比べ内部形状の自由度が高く、ラティス構造に代表されるように、従来技術では実現できなかった形状を製造できる利点がある¹⁾。その特徴を活かし、近年は金型への適用事例が増えている。金型成形品の形状に合わせて水管を適切に配置できるため、冷却効率が向上し、サイクルタイムの短縮や成形品の改善が図られている^{2,3)}。

しかし、金属材料を用いた 3D プリンターの一般的な造形手法である Powder Bed Fusion(粉末床溶融結合)は、水平方向にオーバーハングする傾斜形状(以下、傾斜角度: 積層方向を 90° とし、造形プレートと平行な方向を 0° とする)を持つ場合、造形が困難である。そのような形状に対しては、造形モデルを支える支持部材(以下、サポート)を下部に追加する必要がある。しかし、これにより造形コストが増加し、サポート除去などの後処理工程も増える。特に、前述の金型の冷却水管のように、閉じた空間内に配置される構造では、造形後にサポートを除去できないため、サポートが不要となるよう、造形モデルの形状を修正する必要がある。それにより本来意図した機能を発揮できないといった課題がある。このような課題に対応するため、Ti6Al4V を対象に溶融凝固挙動を考慮したサポートレス造形の研究が進められている⁴⁾。

傾斜角度の造形では、図 1 に示すように傾斜底面下部に未溶融の粉末が存在する状態となる。このため、通常の造形条件では、与えるエネルギーが過剰になると、底面部よりも深い未溶融粉末まで巻き込んで溶融し、造形形状の崩れが発生する。従って、サポートなしで傾斜角度を造形する場合、底面部のみを適切に溶融させるため、通常より低いエネルギー条件が適していると考えられる。

そこで本研究では、SUS316L, マルエージング鋼, AlSi10Mg の 3 種類の造形材料を対象に、造形条件が傾斜角度の造形に及ぼす影響について検討した。また、これらの検証で最も小さい傾斜角度の造形が可能であったマルエージング鋼

については、造形物の組織観察による溶融状態の確認と、サポートレス条件と通常の造形条件の組合せによる造形品質の向上の可能性について検証を行った。

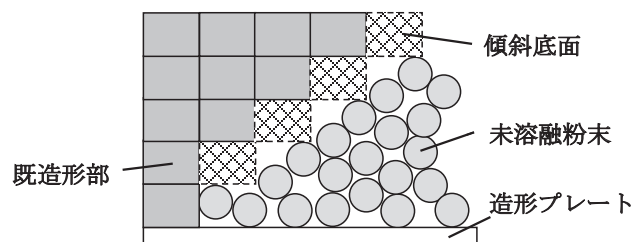


図 1 傾斜底面の造形イメージ

2. 実験方法

2・1 造形物の相対密度の評価

金属造形では、造形条件の適正を判断するにあたり、一般的に、エネルギー密度と、得られた造形物の相対密度の関係により評価される。エネルギー密度は、レーザー出力を走査速度、走査ピッチ、積層厚で除した単位体積あたりの投入エネルギー量を表しており、主要な造形パラメータを含んでいる。相対密度評価用の試験体の造形にあたり、造形パラメータのうち、走査ピッチを 0.105mm、積層厚を 0.03mm で固定とし、レーザー出力を 50~200W、走査速度を 50~6000mm/s の範囲で設定した。試験体の形状は 1 辺約 15mm の立方体とした。造形には金属積層造形機 Concept Laser 社製 M2cusing を用いた。得られた試験体をワイヤー放電加工機により造形プレートから切断し、アルキメデス法により相対密度を測定した。

2・2 各種造形条件を用いた傾斜角度の造形

前項の結果により得られた造形条件を用いて、図 2 に示すように 10~30° の傾斜角度を設けた試験体を造形した。側面には傾斜角度を示す凹形状をモデル化し、造形の可否は側面の凹形状の崩壊の有無で判断した。造形途中で明らかに造形不可であることが確認された試験体は、その時点で造形を終了とした。また、造形プレート下部に設置された造形機付属のヒーターを用いて、200℃に予熱した条件も合わせて比較した。造形中の粉末床中央(1点)の温度変化

* 技術支援部製品技術グループ



図2 傾斜角度を設けた試験体

を見るため、放射温度計 CALEX 社製 PM-HA-201-CT-CRT を造形機に据え付け測定した。

2・3 組織観察による溶融池の寸法評価

2・1 で作製したマルエージング鋼製の立方体試験体を、図3に示すように積層方向に沿って切断し、研磨およびエッチングを施し、内部断面の組織を観察した。エッチングには3%ナイトール溶液を用いて約60秒間エッチングを行った。組織が明確に観察できない場合は、再度エッチングを行った^{5,6)}。組織観察にはレーザー顕微鏡(株)エビデント製 OLS5100-EAT を用いた。

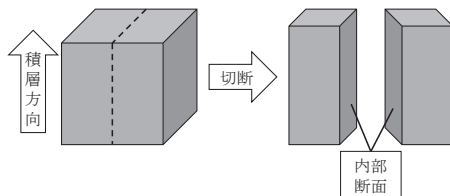


図3 立方体試験体の切断方法

2・4 異なる造形条件を組合せた造形方法の検討

試験体の傾斜底面を選定したサポートレス条件で造形し、上部を通常の造形条件で造形した。図4に示すように傾斜角度を10°とし、底面部の高さを30~70層の範囲で変えて造形した。造形材料はマルエージング鋼を用いた。

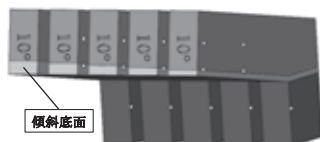


図4 傾斜底面の造形評価用の試験体

3. 実験結果

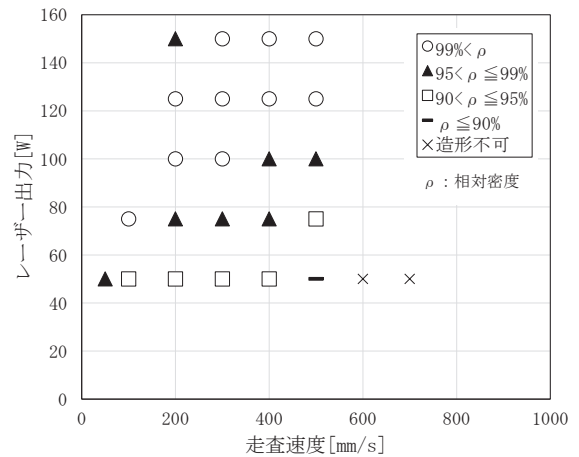
3・1 造形条件と相対密度の関係

本項では傾斜角度の造形にあたり、SUS316L、マルエージング鋼、AlSi10Mgの各種造形材料について、200W以下のレーザー出力による造形の限界を確認することを目的としている。

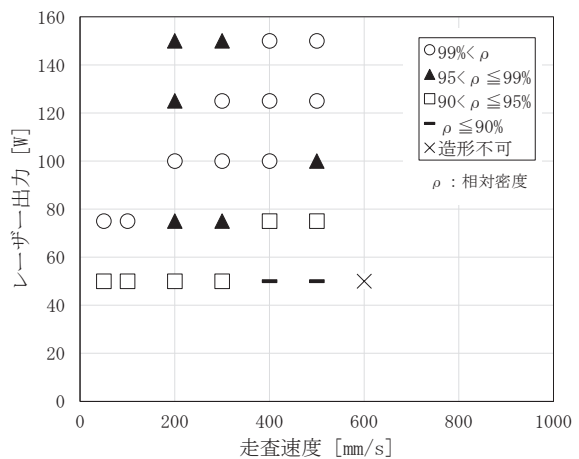
図5に各造形材料について、走査速度とレーザー出力および相対密度の関係を示す。いずれの造形材料もエネルギー密度の低い領域では造形ができていない。特にAlSi10Mgはレーザー出力150W以下の条件では、高い相対密度は得られなかった。また、図6に示すように投入エネルギー量の不足により、積層間のクラックや造形プレートからの剥離が確認された。これは、AlSi10MgはSUS316Lやマルエージング鋼に比べて、造形に使用しているレーザーの波長(約1070nm)に対する吸収率が低く、熱伝導率も高いことから、低エネルギー条件では十分な溶融ができなかったためと考

えられる⁷⁾。

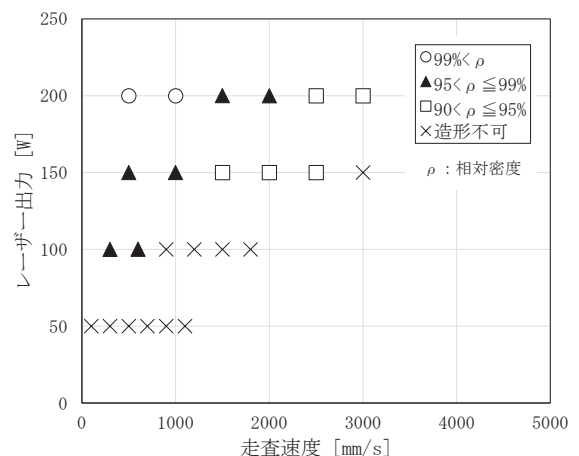
SUS316L、マルエージング鋼では低出力・低走査速度(75W, 100mm/s, 238J/mm³)から、高出力・高走査速度(150W, 500mm/s, 95J/mm³)にかけて、99%以上の高い相対密度が得られる適正な造形領域が存在していることがわかる。



(i) SUS316L



(ii) マルエージング鋼



(iii) AlSi10Mg

図5 造形条件と相対密度の関係

図7にSUS316Lを用いて造形した立方体試験体を示す。この図では、試験体を格子配置し、縦軸はレーザー出力、横軸は走査速度に該当する。最下段の試料群は50Wのレーザー出力で、上段に行くごとに25Wずつ増加している。ま

た、各レーザー出力に対して、右に行くほど走査速度が速くなっている。従って、左上の試験体が最もエネルギー密度が高く、右下に行くほどエネルギー密度が低くなる。

一部の例外を除き、エネルギー密度が低くなると未熔融部が増加する傾向が見られる。また、図中の枠線で囲まれた試験体の造形条件を表1に示す。レーザー出力が高くなると、より低いエネルギー密度で造形できることがわかった。これらの結果から、レーザー出力と走査速度は、試験体の形成にそれぞれ異なる影響を与えていると考えられる。

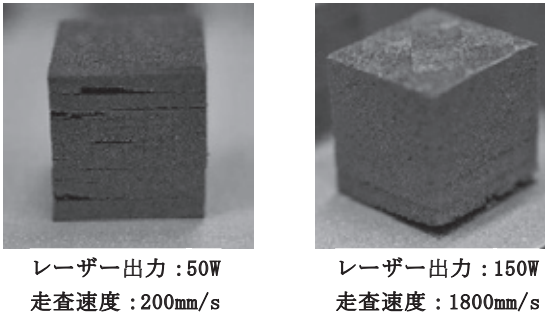


図6 AlSi10Mg 立方体試験体の欠陥部

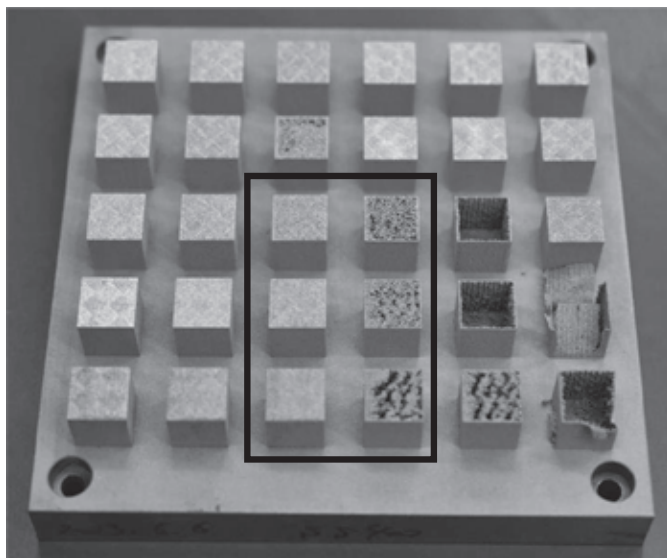


図7 造形した相対密度評価用試験体(SUS316L)

表1 図7中の枠線で囲まれた試験体の造形条件

造形位置	レーザー出力 [W]	走査速度 [mm/s]	エネルギー密度 [J/mm ³]
左上	100	2500	13
右上	100	3000	11
左中	75	1300	18
右中	75	1700	14
左下	50	500	32
右下	50	600	26

3・2 傾斜角度の造形に及ぼす造形条件の影響

3・2・1 予熱による影響

前項の検討結果を基に、比較のために高いレーザー出力や走査速度の条件も含め、傾斜角度を持つ試験体の造形を行った。表2に造形条件と造形可能な最小傾斜角度を示し、図8から図10に造形した傾斜角度試験体を示す。

表2 傾斜角度の造形条件

(i) SUS316L

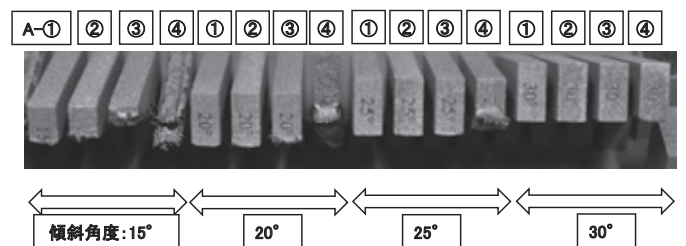
条件番号	レーザー出力 [W]	走査速度 [mm/s]	エネルギー密度 [J/mm ³]	予熱	造形可能な最小傾斜角度 [°]
A-①	75	1300	18	無	20
				有	20
A-②	150	4000	12	無	20
				有	20
A-③	75	900	26	無	20
				有	25
A-④	75	300	79	無	30
				有	25

(ii) マルエージング鋼

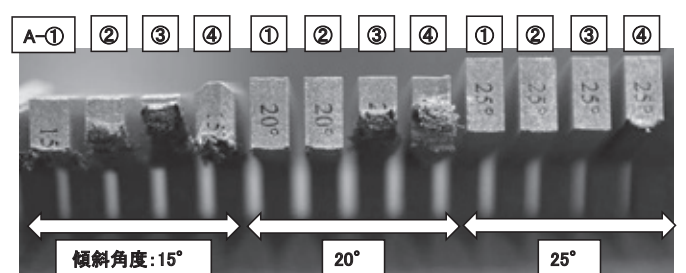
条件番号	レーザー出力 [W]	走査速度 [mm/s]	エネルギー密度 [J/mm ³]	予熱	造形可能な最小傾斜角度 [°]
B-①	200	2000	32	無	10
				有	30
B-②	100	1000	32	無	10
				有	25
B-③	50	500	32	無	15
				有	20
B-④	50	250	63	無	10
				有	25

(iii) AlSi10Mg

条件番号	レーザー出力 [W]	走査速度 [mm/s]	エネルギー密度 [J/mm ³]	予熱	造形可能な最小傾斜角度 [°]
C-①	300	1800	53	無	20
				有	20
C-②	200	1200	53	無	20
				有	15
C-③	100	600	53	無	25
				有	20
C-④	100	300	106	無	25
				有	20



(i) 予熱なし



(ii) 予熱あり

図8 造形条件と傾斜角度の関係(SUS316L)

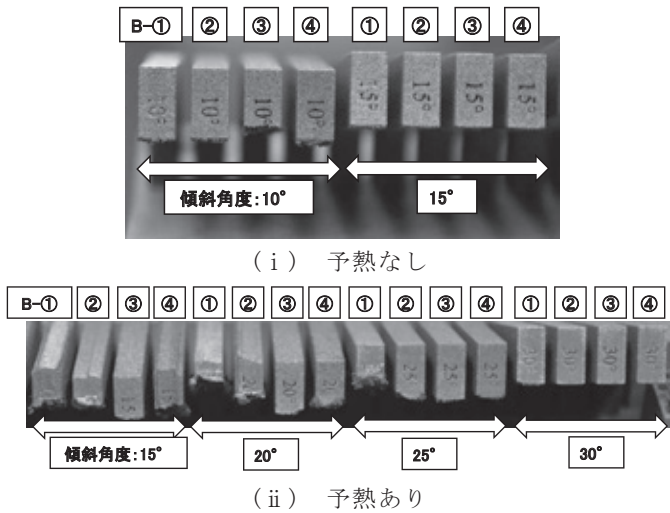


図9 造形条件と傾斜角度の関係(マルエージング鋼)

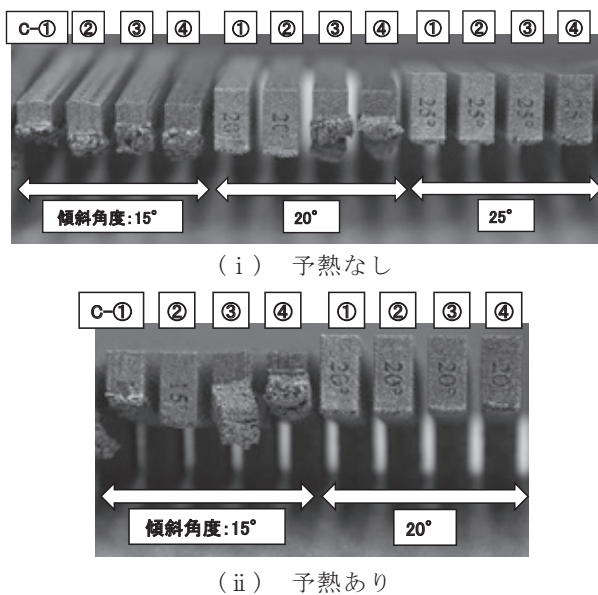


図10 造形条件と傾斜角度の関係(AlSi10Mg)

200℃の予熱の効果について、AlSi10Mg は予熱あり，マルエージング鋼は予熱なしの方が，より小さい傾斜角度の造形が可能であった．SUS316L については，この試験体からは予熱による大きな優位性は確認できなかった．

予熱が傾斜角度の造形に有利に働く効果として，「残留応力の低減」と「必要な投入エネルギー量の低下」の二点が挙げられる．一つ目の残留応力については，通常の造形に比べ予熱をすることで凝固速度が緩やかになり，凝固時に生じる残留応力が低減し，造形不良を抑制できると考えられる．二つ目の投入エネルギー量については，金属粉末が予め高い温度に保持されることによって，融点との温度差が小さくなるため，通常よりも低い投入エネルギー量で造形が可能となる．AlSi10Mg では予熱をしたことにより，これら二点の効果が得られ，小さな傾斜角度の造形が可能になったと推察される．

予熱なしの条件が適当であったマルエージング鋼は，凝固過程で相変態が生じる．マルテンサイト変態終了温度(以下， M_f 点)は 90℃で， M_f 点以上の温度域で造形される場合，軟質なオーステナイト相が存在し，残留応力を緩和すると

されている⁸⁾．図9に示す試験体の造形を行った際の，造形中の粉末床上面の温度を図11に示す．予熱をした際の粉末床上面の温度は，造形開始初期には約 92℃と M_f 点を上回っているが，造形が進むに連れて低下している．これは予熱が造形プレート下部からの加熱によるものであるため，造形が進むと造形プレートとの距離が離れることになり，粉末床上面に熱が伝わらなくなったためである．このことから，予熱の有無に関わらず，造形中はマルテンサイト相が支配的であったと推察される．

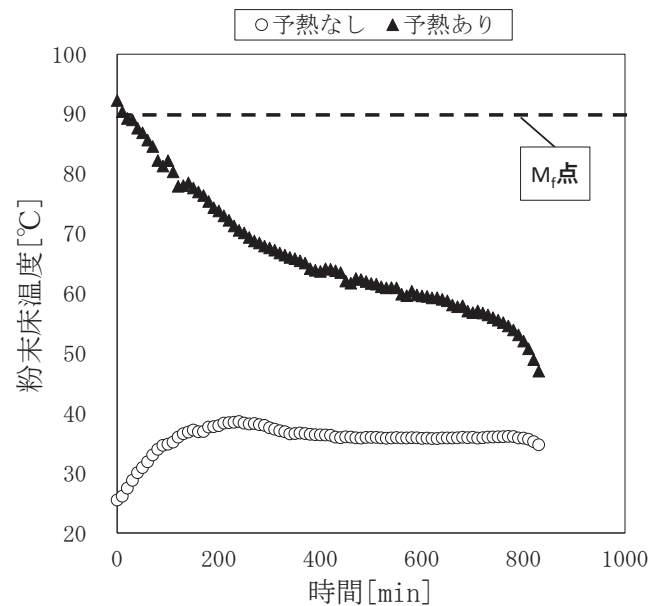


図11 造形中の粉末床上面の温度(マルエージング鋼)

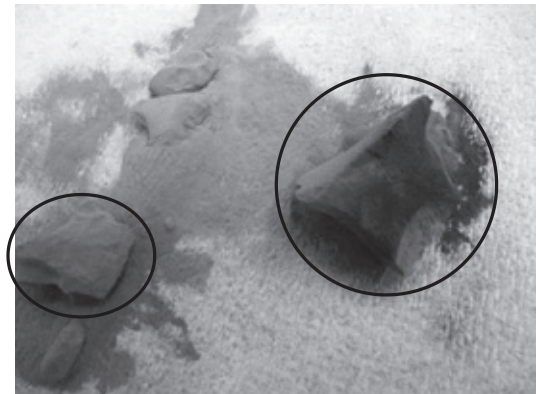


図12 造形後の粉末の凝集体(マルエージング鋼)

また，マルエージング鋼で予熱をした場合，造形後に未溶融の粉末を回収すると，図12に示すような粉末の凝集体が生じる．これらは傾斜角度の下部に多く存在していることから，熱の蓄積によって生じたものと考えられる．傾斜角度の造形では図1に示したように傾斜底面下部には未溶融の粉末があるため，底面部のみを溶融させる浅い溶融池が適している．底面下部が粉末の状態と比べて，予熱により図12のような凝集体が形成される状態では，より深い層まで巻き込む溶融池となり，傾斜角度の造形性が悪化したものと推察される．

図8から図10に示した造形結果から，適切な造形条件

を選定することで、SUS316L は 20° ，マルエージング鋼は 10° ，AlSi10Mg は 15° の傾斜角度の造形が可能となった．また傾斜角度の造形には，溶融に必要な最低限のレーザー出力を有し，エネルギーが過多とならない条件が適当であることがわかった．

3・2・2 サポートレス条件と高相対密度条件の比較

前項の結果から最も小さな傾斜角度の造形が可能であったマルエージング鋼を用いて，傾斜角度 10° の試験体の造形について検討した．図 13 に造形の可否の結果を示す．300W の高出力，または低出力・高走査速度 (100W, 2000mm/s, 16J/mm^3) 条件では造形ができておらず，傾斜角度にも適した造形領域があることが見てとれる．この傾斜角度の造形に適した造形領域は，図 5 で示した試験体の造形で高い相対密度 ($99\% < \rho$) が得られた条件に比べ，低エネルギー側へシフトした．

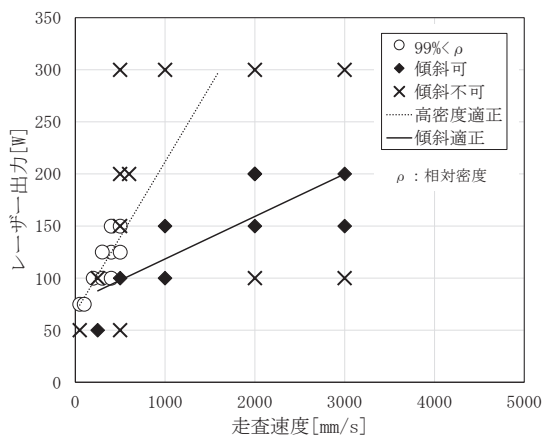


図 13 傾斜角度 10° の造形の可否 (マルエージング鋼)

3・3 造形条件と溶融池の寸法の関係

マルエージング鋼製の立方体試験体の断面組織を図 14 に示す．扇状の溶融池が，積層方向に対して重なりあって形成されていることが確認できる．レーザー出力 50W では溶融が不十分のため内部空孔が多く，100W 以上の試験体で見られるような下に凸な溶融池が重なった組織とはなっていない．一方，レーザー出力 150W，走査速度 200mm/s の条件では，溶融池底部付近に円形の空孔が見られ，投入エネルギー量が過剰であることがわかる．

次に，溶融池の寸法測定を行った．図 14 に示すように積層方向を深さ，積層方向に直交する方向を幅と定義した．表 3 にレーザー出力 100W および 150W による立方体試験体の測定結果を示す．まず，深さはレーザー出力 100W ではいずれの走査速度でも $30 \sim 40\ \mu\text{m}$ であるのに対して，150W では走査速度 200mm/s で $90 \sim 100\ \mu\text{m}$ ，400mm/s で $60 \sim 70\ \mu\text{m}$ であった．これより，レーザー出力の増加に伴い，溶融池が深くなり，150W と高出力になると，走査速度が低い方が，より深い溶融池になることがわかった．また，幅は個々の溶融池で寸法にばらつきはあるが，レーザー出力に伴う大きな変化はなく，走査速度の増加に伴って，寸法の減少が見られた．

組織観察の結果から，傾斜角度の造形に有効な底面部の

みを溶融する浅い溶融池の形成には，レーザー出力が低い条件が適当であると考えられる．溶融池の幅に対するレーザー出力の影響が小さいことから，レーザー出力を低下させたとしても，隣接する走査ピッチ間で空孔は生じ難いと推察される．

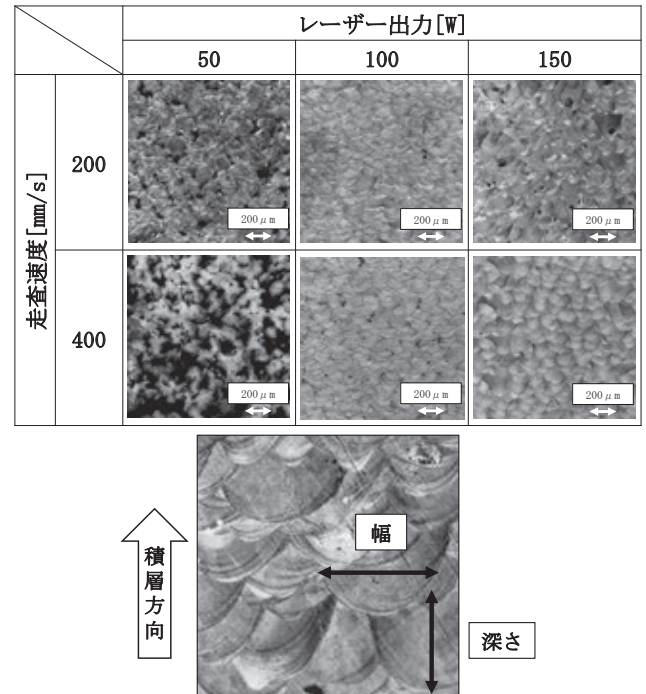


図 14 試験体内部断面の溶融池

表 3 各条件による溶融池の幅と深さ

レーザー出力 [W]	走査速度 [mm/s]	溶融池深さ [μm]	溶融池幅 [μm]
100	200	$30 \sim 40$	$140 \sim 240$
100	400	$30 \sim 40$	$130 \sim 160$
150	200	$90 \sim 100$	$160 \sim 240$
150	400	$60 \sim 70$	$130 \sim 190$

3・4 異なる造形条件を組合せた傾斜底面の造形

これまでの結果から，低エネルギー条件が傾斜角度の造形に適していることがわかった．しかし，図 5 および 13 に示すように低エネルギー条件では，高い相対密度を得ることができないため，強度等の機械的特性の低下が懸念される．そこで，傾斜底面に低エネルギー条件を用い，上層は高相対密度条件で造形する方法について検討した．傾斜底面に表 4 に示す造形条件を用いて，底面の厚みを変えて造形した結果を図 15 に示す．

傾斜底面の造形層が 50 層以下では，いずれの条件でも造形できなかった．これは，高相対密度条件が既造形部も再溶融するような深い溶融池を形成することから，傾斜底面下部の未溶融粉末まで溶け込んだ結果，溶融体積に対する投入エネルギー量が不足したためと推察される．それに対し，60 層以上かつ条件 D-④を用いることで造形が可能となった．条件 D-④は，各条件の中で最も高い相対密度が得られ，内部に空孔も少ないと考えられることから，既造形部で吸収されるエネルギー量が大きく，傾斜底面下部の

表 4 傾斜底面の造形条件

条件 番号	レーザー出力 [W]	走査速度 [mm/s]	エネルギー密度 [J/mm ³]
D-①	200	3000	21
D-②	150	2000	24
D-③	100	1000	32
D-④	100	500	63

単位:層

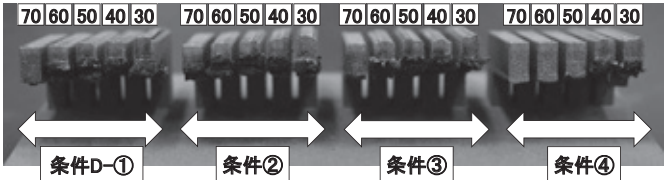


図 15 異なる造形条件による傾斜底面の造形

未熔融粉末までエネルギーが伝達し難い状態にあったためと推察される。

4. 結 言

本研究では、金属造形において、傾斜角度の造形時に必要となるサポートの低減を目的として、SUS316L、マルエージング鋼、AlSi10Mg の 3 種類の造形材料を対象に、造形条件が傾斜角度の造形に及ぼす影響を検討した。その結果得られた知見を、以下に示す。

- (1) 99%以上の相対密度を有する造形物を得るには、造形材料に応じて適した造形領域を選択する必要があることがわかった。特に AlSi10Mg は 200W 以上のレーザー出力が必要であることがわかった。
- (2) サポートレス造形において、造形時の予熱(200℃)は、AlSi10Mg では有用であったが、マルエージング鋼では悪化した。SUS316L では有意差は確認できなかった。
- (3) 傾斜角度の造形に適した造形領域は、高い相対密度が得られる造形領域よりも、低エネルギー側へシフトすることがわかった。
- (4) レーザー出力は、熔融池の深さに対しては影響が大きく、幅への影響は小さかった。浅い熔融池の形成には低いレーザー出力条件が適していることが示唆

された。

- (5) 傾斜角度の造形において、高い相対密度との両立を図るには、低エネルギー条件により 60 層以上の底面層を設ける必要があった。また、底面層の造形には傾斜角度の造形が可能な低エネルギー条件のうち、高い相対密度が得られる条件が適していることがわかった。

参考文献

- 1) 西津卓史, 谷次智弥, 竹澤晃弘, 米倉一男, 渡邊修, 北村充:トポロジー最適化と積層造形を活用したラティス構造の創出手法, 日本機械学会論文集, **83**(855), DOI: 10.1299/transjsme.16-00581 (2017).
- 2) 張昕, 石田浩修, 平田徹, 川崎一真:3次元コンフォーマル冷却金型の製造技術開発,住友重機械技報プラスチック機械特集, **203**, p.17-22(2021).
- 3) 木村有貴, 佐藤良輔, 鈴木将宏, 植田真広, 井川秀昭, 工藤英弘:3Dプリンタを用いた3次元冷却回路による高性能金型開発, 豊田自動織機技報, **70**, p.83-89(2019).
- 4) 佐藤直子:3次元金属積層造形におけるサポートレス造形技術の開発, FORM TECH REVIEW, **31**, p.60-65(2022).
- 5) 高田尚記, 伊藤裕也, 西田亮也, 鈴木飛鳥, 小橋眞, 加藤正樹:レーザ粉末床熔融結合法によるマルエージング鋼積層造形体のオーステナイト逆変態挙動, 鉄と鋼, **109**(3), p.201-214(2023).
- 6) 二宮大紀, 古木辰也, 上坂裕之:金属AM製マルエージング鋼の造形条件が材料特性と研削加工特性に与える影響, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p.357-358(2019).
- 7) 小笹良輔, 石本卓也, 松垣あいら, 中野貴由:Additive Manufacturing の歩みとレーザビーム粉末床熔融結合法の基礎, スマートプロセス学会誌, **10**(4), p.131-136(2021).
- 8) 吉本隆, 紙本朝子:変形低減を志向した金型向け積層造形粉末の開発, 大同特殊鋼技報 電気製鋼, **93**(1), p.21-28(2022).