

3 D積層造形法で製作したマルエージング鋼材の金属組織

戸羽 篤也, 鈴木 逸人, 平野 繁樹, 長船 康裕*, 葛西 勝明**, 葛西 健央**

Micro Structures of Maraging-Steel by Selective Laser Melting.

Atsuya TOBA, Hayato SUZUKI, Shigeki HIRANO, Yasuhiro OSAFUNE*,
Katsuaki KASAI**, Takeo KASAI**

抄 録

金属粉末積層造形法は、内部に三次元冷却管を配置した金型など、複雑な内部構造を持つ金属製品を製作することができる優位性の高い加工法である。マルエージング鋼は、実用製品の製作に応用できる素材であり、金属粉末積層造形の主要な材料となりつつある。しかし、この材料による積層造形の製作条件に関する報告が少なく、この技法を用いる場合の最適な製作条件を知るためには、レーザー照射パラメータと造形物の品質との関係性を明らかにする必要がある。

本報は、マルエージング鋼を用いた金属粉末積層造形法に関して、レーザー照射条件を変化させて製作した試験片の断面組織の観察により、造形物の内部空隙と材料の溶融形態に及ぼすレーザー照射パラメータの影響を調べた結果を示す。

キーワード：金属粉末積層造形，マルエージング鋼，レーザー照射条件

Abstract

The Selective Laser Melting (SLM) is an additive manufacturing technique that makes metal products with complicated internal structures, such as a Metal-Mold with the three-dimensional cooling channel. Maraging steel is a material that is able to produce practical products, and is becoming the major material of SLM. However, there are few reports of the manufacture conditions for this material. It is necessary to clarify relationship of laser irradiation parameters and the quality of samples in order to know the optimal manufacturing conditions in the case of using this method.

In this report, we present the effect of laser conditions on porosity and melting area shape in the maraging steel sample made by SLM.

KEY-WORDS : Selective Laser Melting Method (SLM), Maraging Steel. Laser irradiation conditions

1. はじめに

金属粉末積層造形法（以下「金属3D造形」という）は、近年、新たな製造プロセスとして注目される三次元プリント技法¹⁾のひとつである。造形に用いる素材が金属であるため、機械的性質、熱特性、電気特性など、金属特有の機能を有する3D立体物が得られることから、特殊な形状や機能を要求される輸送機械、航空宇宙産業、医療分野で今後の利用展開が期待されている^{2,3)}。

金属3D造形の実用適用事例としては、現在のところ内部に水冷管を3D配置したプラスチック射出成型用高機能金型への応用例が散見される³⁻⁶⁾。当初、金属3D造形で製作する金型には短い製作期間で試作用の使用に耐えるものが求められていたが、直近では数千ショットから1万ショット以上の使用に耐える量産用金型へと、その要求水準が向上している。金属3D造形金型の量産要求に応えるためには、金型表面の硬さと耐久性を併せ持つ強靱な素材が求められる。

マルエージング鋼^{7,8)}は、Ni, Co, Mo等の高価な合金成分

* 室蘭工業大学, ** 株式会社サカイ技研

* Muroran Institute of Technology, ** Sakai-Giken Co., LTD.

事業名：重点研究

課題名：金属3D造形による実用金型製造のための加工・熱処理プロセス技術の開発

を多量に含むため素材価格が高いが、強度や靱性のほか、可鍛性、熱ひずみ、耐低温脆性など、優れた特性を持つため、航空・宇宙分野の構造材として使用されている。このようなマルエージング鋼の特性は、金型素材としても有効である。マルエージング鋼は、時効処理と呼ばれる熱処理によりロックウェル硬さでHRC50以上の表面硬さが得られ、量産に耐える金型を3D積層造形技法でも製作可能となるので、近年、金属3D造形用の粉末素材として多く使用されるようになり、今後もその利用の進展が見込まれる。金属3D造形においては、その製作時のレーザー照射条件が造形物の金属組織や物性に大きく影響する^{9,10)}。しかし、マルエージング鋼粉末の金属3D造形への利用はまだ日が浅く、その造形条件等に関する系統立てた試験データの報告は少ない。また、民間企業が有する知見は企業のノウハウであり、公に開示されないのが現状である。

本報は、マルエージング鋼粉末による3D造形技法の普及を加速させる観点から、その製造条件と造形物の品質との関係を調べ、レーザー照射条件の違いによる造形物内部の空隙との関係について知見を得たので報告する。

2. 実験方法

試料は、図1に示す金属粉末光造形複合加工装置（株松浦機械製作所製/LUMEX Avance-25¹¹⁾を用い、図2に示す125×125×t20mmの炭素鋼基板（以下「ベースプレート」という）の上に10×10×t3mmの試験片を7段×7列に配置し、それぞれレーザー照射条件を変えて製作した。なお、実際の試験片は、後で試験片をベースプレートから切り離すため、高さ2mmのサポートを設け、さらに製作上の都合により、それぞれ向きを左に30°傾けて造形した。

試験片を製作する際のレーザー照射条件を表1に示す。金属3D造形装置では、図3の模式図に示すように、造形物製作時のレーザー照射条件として、レーザー出力 P 、レーザー集光径 D 、レーザー走査速度 v 、レーザー走査間隔 e 、一層当たりの積層厚さ d の各パラメータを設定する。このうち、製作効率の観点から、本実験においては、全てレーザー出力 $P=160$ W、造形積層厚さを $d=0.05$ mmとして試験片を製作した。

レーザー走査速度 v は、以下の式(1)で定義するレーザー光の単位面積当たりの照射エネルギー（以下「レーザー光熱密度」という）が $1.0\sim 10.0$ J/mm²の範囲になるように設定した。

$$q = \frac{P}{ev} \text{ [J/mm}^2\text{]} \quad (1)$$

ただし、 P ：レーザー出力 [W]、

e ：レーザー光走査間隔 [mm]、

v ：レーザー光走査速度 [mm/s]



図1 金属粉末積層造形装置の外観
(株松浦機械製作所製 LUMEX Avance-25)

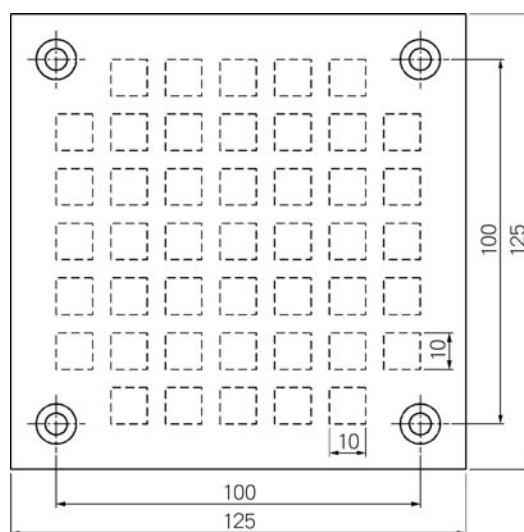


図2 造形試料（試験片）の形状・寸法

表1 試験片の製作条件

設定項目	設定範囲	
レーザー出力： P	160	[W]
レーザー集光径： D	0.1 ~ 0.5	[mm]
レーザー走査速度： v^{*1}	46 ~ 1.280	[mm/s]
レーザー走査間隔： e	0.1 ~ 0.4	[mm]
積層厚さ： d	0.05	[mm]
レーザー走査方式	5mm幅帯状	
レーザー走査方向	XY方向交互照射	
層間関係	XY交互	

※1 レーザ光熱密度の設定値によって固定。

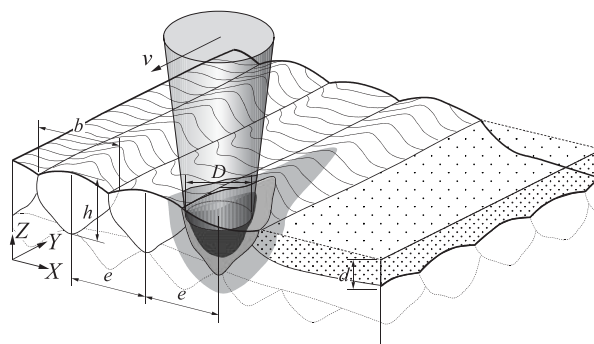


図3 金属3D造形のレーザー照射条件模式図

金属 3D 造形による金型製作では、空隙の少ない緻密組織の造形と、多孔質組織の双方を効果的に組み合わせる。すなわち、強度や硬さが要求される部位には緻密組織が求められるが、そうでない部位は多少の空隙があっても与熱量を抑えて迅速に造形した方が経済的であるという考え方によるものである。また、多孔質に造形された部位は、その空隙率の程度により、ガスや液体を透過させることができるため、成形時の金型内キャビティの加減圧や、成形後のエアージェクト（空圧で成形品を金型から抜型する技法）、離型剤の供給などに応用できる¹²⁾。

そこで、本研究では試験片の製作に際して、レーザー光熱密度を、内部空隙の少ない緻密組織に対しては 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 10.0 J/mm² の 7 水準、空隙の多い多孔質材に対しては、1.00~2.50 J/mm² の範囲で 0.25 J/mm² 間隔で 7 水準に設定し、式(1)からこれらの条件に適合するようにレーザー走査速度 v を 46 ~ 1,280 mm/s の範囲で変化させた。

レーザー集光径 D は 0.1~0.5 mm の範囲で 0.1 mm ごとに 5 水準、レーザー走査間隔 e は 0.1~0.4 mm の範囲で 0.05 mm ごとに 7 水準に変化させた。

試験片製作後、試験片をベースプレートから切り離し、最上面のレーザー走査方向に垂直となる鉛直面で切断して、その断面組織を観察した。組織観察は、まず鏡面研磨した断面の写真を 10 枚撮影し、その中から 5 枚を抽出して、画像処理によって材料と空隙の間に閾値を設け、視野面積に対する空隙の面積の比率を計測し、これを 3 つの組み合わせで計測してその平均を開口率 ϵ とした。画像処理で計測する視野数が十分に多いとき、開口率は材料内の空隙率と同値に近づくので、ここで計測した開口率は、材料の空隙率と同等と考えてよい。

次に、鏡面研磨した試験片試料の断面を、塩酸 3 : 硝酸 1 の容積比による混酸 (= 王水) でエッチング処理し、その金属ミクロ組織を観察した。特に、造形最上面には最終のレーザー照射によって溶融した金属材料の溶融域断面形状が観察されるので、この組織写真から画像計測法によって単一のレーザー光照射で溶融したと推定される領域の幅と深さを計測した。

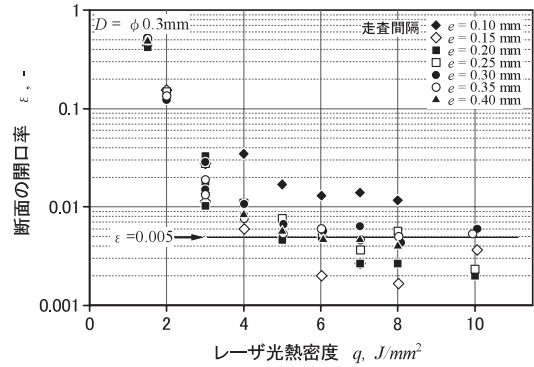
なお、組織写真の撮影には、金属顕微鏡 GX41 (OLYMPUS 製) を用い、100 倍に拡大した画像写真をデジタルカメラによりピクセル数 2144 × 1424 の解像度で撮影した。組織写真からの画像計測には、デジタル画像計測ソフト Quick Grain Pro Ver.4 (株 Inotech 製) を使用した。

3. 実験結果と考察

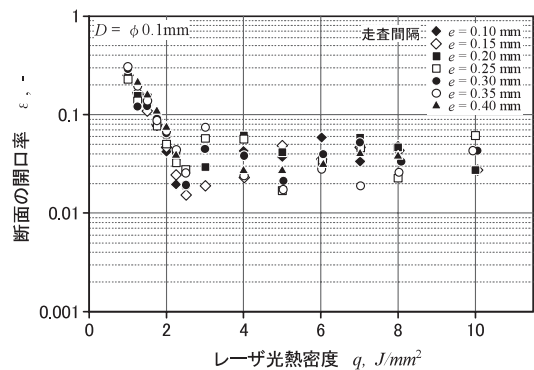
3.1 内部空隙率に及ぼす造形条件の影響

造形条件を変化させて製作した試験片の断面観察によって計測したレーザー光熱密度と開口率の関係を図 4 に示す。

レーザー集光径 $D = 0.3 \text{ mm}$ で製作した試験片では、図 4-a) に示すように、レーザー光熱密度が増大するにつれて開口率が



a) 造形条件 $D=0.3 \text{ mm}$ 時の走査間隔ごとの開口率



b) 造形条件 $D=0.1 \text{ mm}$ 時の走査間隔ごとの開口率

図 4 光熱密度と空隙率(開口率)の関係

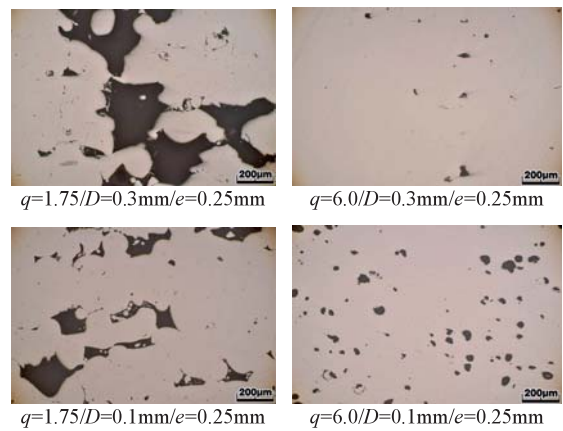


図 5 試験片断面の開口率観察写真 (写真の下の数字は造形条件を示す)

減少する傾向が認められる。金属 3D 造形による緻密材の空隙率は、実用上、0.005 以下が目安とされる。実験結果から、開口率が 0.005 以下となる造形材は、レーザー光熱密度が 4 J/mm² を超える条件で得られることがわかる。ただし、レーザー走査間隔の違いによりばらつきが大きく、レーザー集光径 $D = 0.3 \text{ mm}$ の条件において開口率が 0.005 以下の造形材を安定して得るには、レーザー走査間隔 $e = 0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ でレーザー光熱密度 q が 6 J/mm² 以上の条件設定が必要である。

一方、レーザー集光径 $D = 0.1 \text{ mm}$ で製作した試験片は、図 4-b) に示すように、レーザー光熱密度を 3 J/mm² 以上に大きくしても、断面の開口率は 0.01 以下とならないことが判った。

レーザー集光径 $D=0.3\text{mm}$ と $D=0.1\text{mm}$ で製作した試験片について、レーザー光熱密度 $q=1.75\text{J/mm}^2$ と $q=6.0\text{J/mm}^2$ の条件で製作した試験片断面の写真を図5に示す。レーザー光熱密度が小さい条件では、いずれの集光径の場合も、金属粉末の未熔融で粉末間空隙を残したまま溶着した組織が認められる。一方、レーザー光熱密度が大きい条件では、未熔融による粉末間空隙が少なくなり、断面組織に観られる空隙の大きさがかなり小さくなっている。空隙の開口径はいずれも概ね $50\mu\text{m}$ 以下となっているが、形状に着目すると、 $D=0.3\text{mm}$ では開口形状がやや尖鋭なのに対して、 $D=0.1\text{mm}$ の開口形状は丸みを帯びているものが多く観られる。

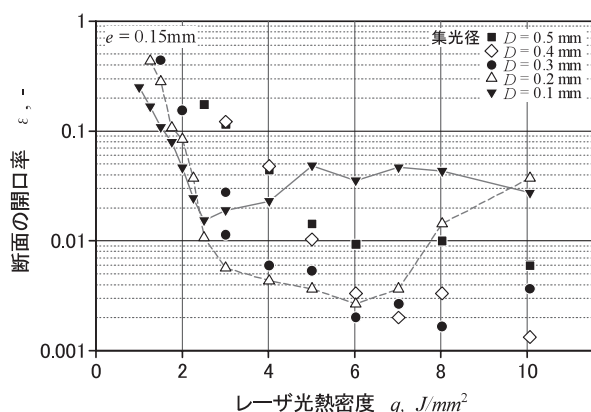
金属3D造形による金型で緻密材が要求される部位には、大きな圧力が加わったり、温度の昇降が頻繁に繰り返されたりすることが予想される。これら圧力や熱歪みによる繰り返し変動荷重を受ける部位では、亀裂の発生やその進展に関して、内部空隙の大きさや形状の影響が想定される。このような条件下では、空隙の数だけでなく、応力の集中に関わる大きさ・形状の空隙が存在することは望ましくなく、これらを低減する造形条件の選定が重要である。

造形時のレーザー光熱密度と試験片断面の開口率の関係をレーザー走査間隔ごとに整理して図6に示す。レーザー走査間隔

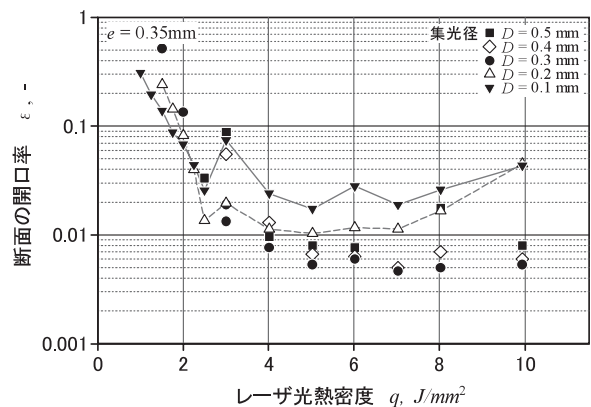
$e=0.15\text{mm}$ の条件で製作した試験片では、図6-a)に示すように、レーザー集光径 D が 0.3mm 以上についてレーザー光熱密度 q の増加に伴って開口率の減少傾向が認められ、特に、 $D=0.3\sim 0.4\text{mm}$ で q が 6J/mm^2 以上の条件で概ね開口率が 0.005 以下の試験片が得られている。 $D=0.5\text{mm}$ の条件では、 $D=0.3\sim 0.4\text{mm}$ の条件に比較して開口率が大きい傾向を示しているが、これは同じレーザー出力で集光径が大きくなると、深さ方向への与熱量が減少するため、積層厚さに対して金属粉末の未熔融部を多く生じさせる条件になったことがその原因の一つと考えられる。これに対して、 $D=0.1\sim 0.2\text{mm}$ の場合は、レーザー光熱密度 q の増加に対して一様の減少傾向とならず、 $D=0.1\text{mm}$ では $q=2.5\text{J/mm}^2$ 、 $D=0.2\text{mm}$ では $q=6.0\text{J/mm}^2$ の条件を境に、 q が増加しても開口率が減少しない挙動が認められた。

一方、レーザー走査間隔 $e=0.35\text{mm}$ の条件で製作した試験片では、図6-b)に示すように、レーザー集光径が $D=0.3\text{mm}$ 以上について、 $e=0.15\text{mm}$ の実験結果と同様に、レーザー光熱密度 q の増加に伴って開口率が減少するのに対して、 $D=0.1\sim 0.2\text{mm}$ では、 q が増加しても $q=5\text{J/mm}^2$ 付近を境に開口率が減少しない。さらに、 $e=0.15\text{mm}$ の実験結果と比較すると、 q の増加に対する開口率の変化は、 $D=0.1\text{mm}$ と $D=0.2\text{mm}$ とでは似た挙動を示しているが、この挙動にはレーザー走査間隔とレーザー集光径との比率が影響している可能性が考えられる。すなわち、レーザー走査間隔 $e=0.15\text{mm}$ のとき、集光径がこれより小さい $D=0.1\text{mm}$ の条件では理論的に隣接のレーザー走査パス間でレーザー照射光が重ならないが、 $D=0.2\text{mm}$ の条件では、隣接のレーザー走査パス間でレーザー照射光が集光径の4分の1程度重なることになる。これに対して、レーザー走査間隔 $e=0.35\text{mm}$ のとき、集光径 $D=0.1\sim 0.2\text{mm}$ は、レーザー走査間隔に対して十分に小さいので、いずれも理論的に隣接するレーザー走査パス間でレーザー照射光が重ならない。図5-a)と図5-b)の結果で示した集光径 $D=0.1\text{mm}$ と $D=0.2\text{mm}$ のレーザー光熱密度に対する挙動の差異は、レーザー集光径とレーザー走査間隔の比率が影響しているものとする。ただし、理論的に隣接するレーザー走査パス間でレーザー照射光が重ならない $e=0.35\text{mm}$ 、 $D=0.3\text{mm}$ の条件で開口率が 0.005 になる試料が得られているので、必ずしもレーザー集光径をレーザー走査間隔より大きくしなければ緻密な造形材が得られないということではない。

図6-a)と図6-b)の実験結果を比較すると、 $D=0.3\text{mm}$ 以上の条件においてレーザー走査間隔の小さい方が概して開口率が小さくなる傾向が認められることから、造形試料断面の開口率は、レーザー光熱密度に加えてレーザー集光径に対するレーザー集光径の比率の影響を受け、緻密な材料を得るためには、レーザー光熱密度を 6J/mm^2 以上に設定するとともに、レーザー集光径を $D=0.3\text{mm}$ 程度とし、レーザー走査間隔をこれ以下にする条件を選定すべきである。



a) 造形条件 $e=0.15\text{mm}$ の集光径ごとの開口率



b) 造形条件 $e=0.35\text{mm}$ の集光径ごとの開口率

図6 光熱密度と空隙率(開口率)の関係

3.2 レーザ照射溶融域に及ぼす造形条件の影響

一般に、積層造形法における造形速度は、単位時間当たりの造形容積で評価され、造形効率を示す指標の一つとなる。金属粉末積層造形における造形速度 V_B を次式で定義する。

$$V_B = evd \text{ [mm}^3\text{/s]} \quad (2)$$

ただし、 e : レーザ光走査間隔 [mm],
 v : レーザ光走査速度 [mm/s],
 d : 1層当たりの積層厚さ [mm],

この式で、レーザ走査間隔とレーザ走査速度は、造形速度を決定する重要なパラメータである。造形効率を維持したうえで内部空隙の少ない緻密な組織を得るためのレーザ走査速度およびレーザ走査間隔を決定するには、図3で示した模式図において、隣接するレーザパス間で溶融部が十分に重なっていることと最上面の粉末と既成層との良好な溶融状態を得るための必要かつ十分な溶融深さを得なければならない。したがって、造形効率の良い造形条件を知るためには、レーザ照射条件の変化に伴う材料の溶融状態の差異を把握しておく必要がある。

レーザ集光径 $D=0.2\text{mm}$ と $D=0.4\text{mm}$ の条件で製作した試験片の断面計測により、レーザ照射による材料の溶融領域の水平方向の幅（以下「溶融幅」という）と鉛直方向の距離（以下「溶融深さ」という）を、レーザ走査速度で整理して図7に示す。いずれもレーザ走査速度が増大するにつれて溶融幅、溶融深さともに小さくなる傾向が確認されるが、レーザ走査速度が大きいということは、材料にレーザ光が照射される時間が短くなることと同義であり、レーザ照射によって与える熱量が小さければ材料の溶融量が小さくなるのは自明である。

集光径 $D=0.2\text{mm}$ と $D=0.4\text{mm}$ の溶融域の計測結果を比較すると、集光径が大きい条件では、溶融幅が広がり溶融深さが浅くなる傾向が認められる。これは、レーザ出力が同じとき、材料に照射されるレーザ光の面積が広がれば、深さ方向の与熱密度が減り、溶融深さが浅くなると理解できる。図8は、レーザ走査間隔 $e=0.25\text{mm}$ 、レーザ走査速度 $v=$ mm/s でレーザ集光径を変えて造形した試験片の断面マイクロ組織の写真である。最上面の溶融領域の輪郭を強調して書き加えた部位について、隣接する溶融領域の重なりを考慮した形状と比較すると、レーザ集光径が大きくなるにつれて溶融幅が拡大し、溶融深さが浅くなる様子が確認できる。集光径 $D=0.1\text{mm}$ の溶融領域形状は他に比べて特徴的な形状をしているが、これは、図9の模式図で示すように、上部溶融池形成メカニズムの違いが影響していると考えられる。すなわち、レーザ集光径が比較的大きい場合は、図9-a)の模式図に示すように、材料表面にレーザエネルギーが照射されて上面から鉛直方向に進展して溶融池が形成される。一方、レーザ集光径が極端に小さい場合は、図9-b)のように小さな領域に高い与熱密度でエネルギーが照射され、鉛直方向に深く

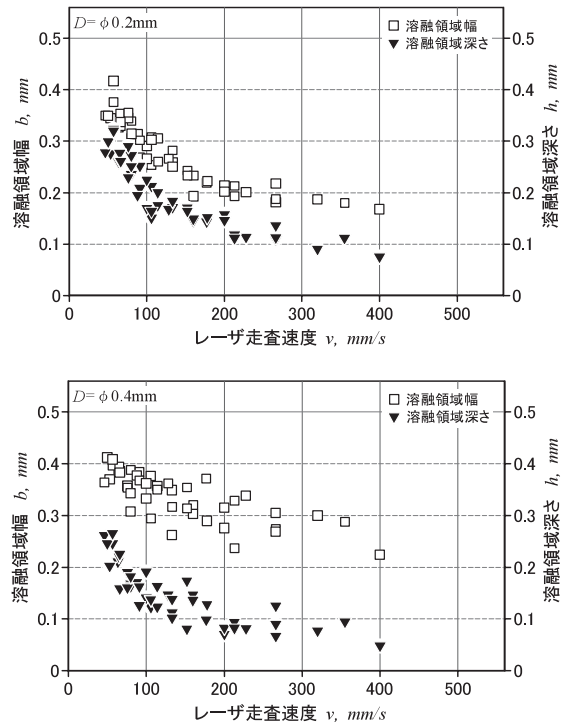


図7 レーザ走査速度と溶融域形状（幅・深さ）の関係

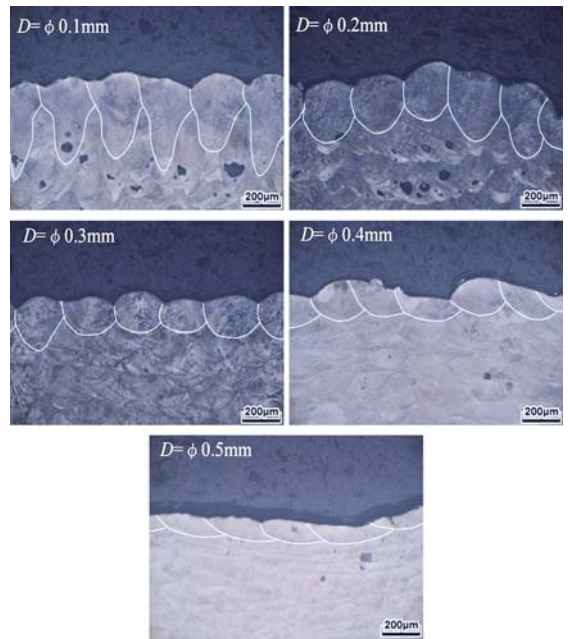


図8 集光径ごとの最上部溶融領域形状の比

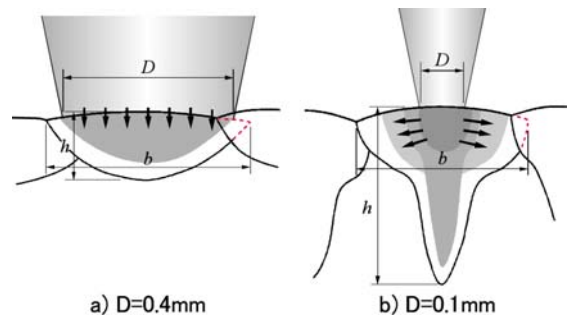


図9 レーザ集光径による溶融形態の違い（模式図）

溶融が進む一方で溶融池上部の溶融金属の昇温が大きくなり、水平方向へ伝熱による溶融が進展して図9-b)のような形状の溶融領域になると推測する。

また、集光径の小さな $D=0.1\sim 0.2\text{mm}$ の組織には、丸い形のブローホール欠陥が散見される。これは、小さく集光された高密度のレーザー照射で急激に昇温した溶融池内に周囲の雰囲気ガスの巻き込みや、金属の蒸発ガスが凝固時に取り残されたものと考えられる。前項で、集光径の小さな造形条件でレーザー光熱密度を高くしても内部空隙率が小さくならなかったという実験結果を示したが、これは、このメカニズムにより材料内にとどまったガスが内部に空隙として残留したためと考えることができる。

図8で示した造形試料断面のマイクロ組織最上部（最後に溶融造形された部位）に観察される溶融領域の形状について、その面積はレーザー光単位照射長さ当たりの溶融容積とほぼ同値であり、単一のレーザー照射で溶融する量に関する指標となる（以下「溶融領域面積」という）。レーザー走査速度と試料断面観察によって計測した溶融領域面積との関係を、レーザー集光径 $D=0.3\text{mm}$ の条件について図10に示す。

レーザー走査速度が増大するにつれて溶融面積が縮小するほか、両者には反比例の関係が認められる。また、レーザー走査間隔が異なっても、概ね同じ線上にプロットされることから、

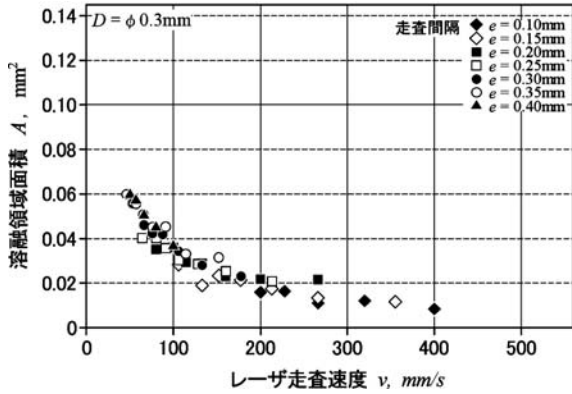


図10 レーザ走査速度と溶融領域断面積の関係

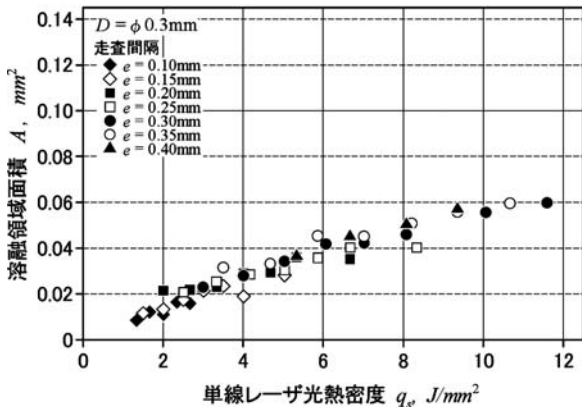


図11 単線レーザー光熱密度と溶融領域面積の関係

レーザー照射による金属材料の溶融状態へのレーザー走査間隔の影響は小さく、溶融量は一本のレーザーパスの照射条件、すなわちレーザー集光径とレーザー走査速度の2つの因子により支配されているようである。

そこで、図3で示した模式図より、単一のレーザー光照射による与熱量 q_s を以下のように定義する。

$$q_s = \frac{P}{Dv} \text{ [J/mm}^2\text{]} \quad (3)$$

ただし、 P ：レーザー出力 [W]，

D ：レーザー光集光径 [mm]，

v ：レーザー光走査速度 [mm/s]

式(3)の単位は、式(1)のレーザー光熱密度と同じ [J/mm²] であるが、式(1)は複数のレーザー照射パスによって広い面積を造形する際の与熱量密度であるのに対して、式(3)は、1本の線状パスのレーザー照射でレーザー集光径とレーザー走査速度の積で定義する面積に対する与熱量密度を表している。ここではこの与熱量 q_s を「単線レーザー光熱密度」と呼ぶことにする。

式から、単線レーザー光熱密度は、レーザー走査速度に反比例し、レーザー走査間隔の影響を受けない。図10で示したレーザー照射による溶融量（溶融領域の断面積）の関係を単線レーザー光熱密度で整理し直して図11に示す。予測どおり、溶融領域の断面積は、単線レーザー光熱密度にほぼ比例していることが確かめられた。今回の試験条件の範囲では、溶融領域の断面積はレーザー走査間隔の影響をほとんど受けていない。実際には、集光径とレーザー走査間隔が異なれば、レーザー照射パスごとに溶融する金属粉末の量や、集光径とレーザー走査間隔の比率の関係で、隣接造形域や下層の材料の再溶融量に違いが生じるので、造形時の溶融条件が異なったり、造形品質に影響することも考えられるが、今後の検討課題としたい。

単線レーザー光熱密度に対するレーザー集光径ごとの溶融幅の変化を図12に示す。式(3)により、単線レーザー光熱密度はレーザー集光径の大きさで変化するので、試験片製作時の単線レーザー光熱密度の範囲は、レーザー集光径ごとに異なる。また、図

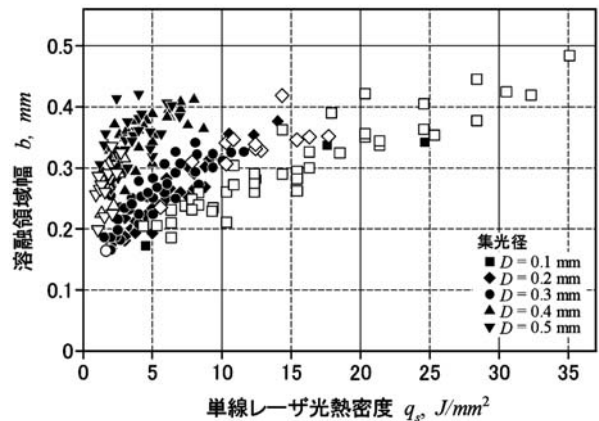


図12 集光径ごとの q_s に対する溶融幅 b の変化
(図中の白抜きプロットは $\epsilon > 0.02$ の試料を示す)

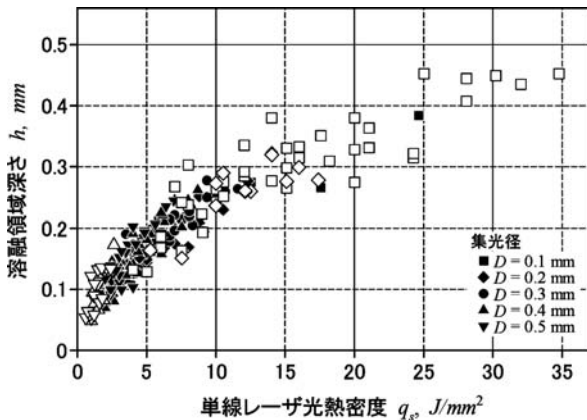


図13 集光径ごとの q_s に対する溶融幅 h の変化
(図中の白抜きプロットは $\epsilon > 0.02$ の試料を示す)

中の白抜きのプロットは、造形物内部の空隙率が0.02以上であることを示す。

いずれの集光径でも、単線レーザー光熱密度が大きくなるほど溶融幅が大きくなる傾向が認められる。また、同じ単線レーザー光熱密度で比較すると、レーザー集光径が大きいほど溶融幅が大きい。ただし、集光径が大きいかつレーザー光熱密度の小さい条件や、レーザー集光径が小さい条件では緻密材が得られず、緻密な造形組織を得ようとする場合は、レーザー集光径 $D=0.2\sim 0.3\text{ mm}$ 、かつ単線レーザー光熱密度 $q_s=3\sim 5\text{ J/mm}^2$ の条件となるようにレーザー走査速度とレーザー走査間隔を選定する必要があることが判った。

単線レーザー光熱密度の違いに対するレーザー集光径ごとの溶融深さ変化を図13に示す。図中の白抜きのプロットは、造形物内部の空隙率が0.02以上であることを示す。いずれの集光径でも、単線レーザー光熱密度が大きくなるほど溶融深さが大きくなる傾向が認められる。また、溶融幅とは異なり、レーザー集光径によるばらつきが少ないことから、溶融深さは単線レーザー光熱密度に強く支配されることが分かった。

造形物の金属組織観察から、金属3D造形における溶融深さは、一層当たりの積層厚さに対して2～3倍の距離が必要になると考えられる。すなわち、一層当たりの積層厚さが0.05mmのとき、溶融深さは0.10～0.15mmの溶融深さとなる条件を選定する。図13からこの条件となる単線レーザー光熱密度を $q_s=4\text{ J/mm}^2$ と読み取り、造形条件としてレーザー出力 $P=160\text{ W}$ 、レーザー集光径 $D=0.3\text{ mm}$ を選定すると、式(3)からレーザー走査速度は、 $v=133\text{ mm/s}$ と算出される。これに、レーザー走査間隔 $e=0.2\text{ mm}$ を選択すると、式(1)からレーザー光熱密度は、 $q=6.0\text{ J/mm}^2$ と計算され、図6-a)で示した緻密材の造形条件に概ね適合する。また、この条件における造形速度は、式(2)から $V_B=1.33\text{ mm}^3/\text{s}$ ($\approx 4.9\text{ cc/h}$)と算出され、実験装置で緻密材を製作するとき、造形所要時間を見積もる際の参考値となる。

4. まとめ

金属粉末積層造形法で金型等の実用金属製品を製作するために多用されるマルエージング鋼粉末を用いた金属3D造形について、その適切な製作条件を得るべく、レーザー集光径、レーザー走査速度、レーザー走査間隔の因子を変化させて試験片を造形し、造形物の内部空隙と金属組織に及ぼすこれらパラメータの影響を調べた。

造形試験の結果、造形物内部の空隙については造形時の単位面積当たりの与熱量の影響を受け、この余熱量が大きいほど内部空隙率が減少する傾向を確認した。ただし、レーザー集光径を小さく絞ると、特殊な溶融メカニズムにより、与熱量を大きくしても内部空隙率が減少しないことが判った。

また、レーザー照射条件の違いによる金属粉末および既溶材の溶融形態を造形物断面のマイクロ組織観察で評価し、単一のレーザー照射による溶融領域の幅、深さ、面積、形状に及ぼすレーザー集光径、レーザー走査速度の影響についてこれらの関係性を調べることにより、マルエージング鋼による金属3D造形における最適条件の設定値と造形速度に関する知見を得た。

引用文献

- 1) 山口修一ほか：「産業用3Dプリンターの最新技術・材料・応用事例」, シーエムシー出版 (2015.5)
- 2) 京極秀樹：「最近のレーザー積層造形技術の開発状況」, 近畿大学次世代基盤技術研究所報告 Vol.1 (2010)
- 3) 前田寿彦：「レーザー焼結型AMシステムのマニファクチャリングへの活用について」, 素形材 Vol.53 No.2 (2012)
- 4) 米山 猛, 香川博之, 末廣栄覚, 阿部 諭, 宮丸 充：「金属光造形複合加工金型を用いた射出成形サイクルタイムの短縮」, 成形加工 Vol.19 No.10 (2007)
- 5) 東 喜万, 阿部 諭, 峠山裕彦, 吉田徳雄, 不破 勲：「金属光造形法の開発と金型への応用」, 松下電工技法 No.78 (2002)
- 6) 阿部 諭, 不破 勲, 東 喜万, 峠山裕彦, 吉田徳雄, 太田卯三：「金属光造形複合加工システムによる高機能射出成形金型製作」, 松下電工技法 Vol.53 No.2 (2005)
- 7) 木下禾大, 徳永洋一, 豊島孝行：「マルエージング型ステンレス鋼の組織図と時効硬化」, 日本金属学会誌 Vol.33 (1969)
- 8) 清水謙一, 岡本尚機：「18%Niマルエージング鋼におけるNi3Mo析出物の電子顕微鏡による研究」, 日本金属学会誌 Vol.35 (1971)
- 9) 戸羽篤也・平野繁樹：「金属粉末積層造形における製造品

質に及ぼす熱線照射条件の影響」, 日本铸造工学会第165回全国講演大会 (2014.10)

- 10) 戸羽篤也・平野繁樹:「金属粉末積層造形による多孔質金属材料の熱伝導率に及ぼす空隙率の影響」, 日本機械学会2014年度年次大会 (2014.9)
- 11) 山岡恒治:「金属光造形複合加工装置『LUMEX Avance-25』」, 精密工学会誌 Vol.74 No.4 (2008)
- 12) 不破 勲, 東 喜万, 阿部 諭, 武南正孝:「低密度層からなるガスベントを有する金属光造形金型」, 松下電工技法 Vol.53 No.2 (2007)