

## Powder Bed Fusion 法による金属粉末造形時のスパッタ挙動

金沢大学 ○江頭 郷太, 金沢大学 ◎古本 達明, 橋本 洋平, 小谷野 智広, 細川 晃

## 要旨

粉末床溶融結合法において、レーザ照射時にスパッタの飛散が確認されている。スパッタが造形物表面に付着することにより、造形面精度の低下や、スキージングブレードと接触し装置が停止するなどの問題が発生する。本研究では、各照射条件とプレート温度でのスパッタ挙動の観察を目的に、高速度カメラを用いて金属粉末の溶融状態を撮影した。エネルギー密度が飛散方向と飛散数、プレート温度が飛散数に影響を及ぼすことが分かった。

## 1. 緒論

3次元CADで作成したデータから立体形状を製作する積層造形法が開発された。当初は試作品の製作程度であったが、使用可能な材料の拡大や技術の向上により、金型製作や医療部品など適用範囲を広げている。積層造形法の中で、薄く堆積させた金属粉末床にレーザを照射し、溶融・固化させ層を造形する金属粉末床溶融結合法に注目した。レーザ照射での造形時、粉末の溶融・固化の間に、スパッタと呼ばれる飛散物が発生する。スパッタが造形物表面に付着することにより、造形面精度の低下や、スキージングブレードと接触することによる装置の停止などの問題が生じる。本研究では高速度カメラを用いたレーザ照射中のスパッタの可視化により、スパッタの生成メカニズムの解明を試みた。また、レーザ走査速度、ベースプレート温度などの造形条件がスパッタの生成に及ぼす影響を調査した。

## 2. 実験方法

本研究で用いた実験装置を図1に、実験条件を表1に示す。装置はレーザ発振装置、高速度カメラ、粉末造形装置で構成される。波長1070 nmの連続Yb:ファイバレーザ(IPG フォトニクス社製: YLP-300-AC-Y11)を焦点距離150 mmの集光レンズを用いて粉末床表面に焦点を合わせた。レーザを垂直方向から30°の角度で照射したため、粉末床表面のビーム径は50×58 μmの楕円形であった。レーザを粉末床表面上で走査するとき、高速度カメラ(株)ナックイメージテクノロジー製: MEMRECAM Q1v)を照射部直上に設置し、粉末上のレーザ照射領域を記録速度5,000 fpsで撮影した。レーザと高速度カメラの位置は固定し、精密ステージ(日本トムソン(株)製: CYLH220H-3030A/ Y0035)を用いて装置を一定方向に動かして1ライン造形を行った。金属粉末は平均粒径25 μmのマルエ

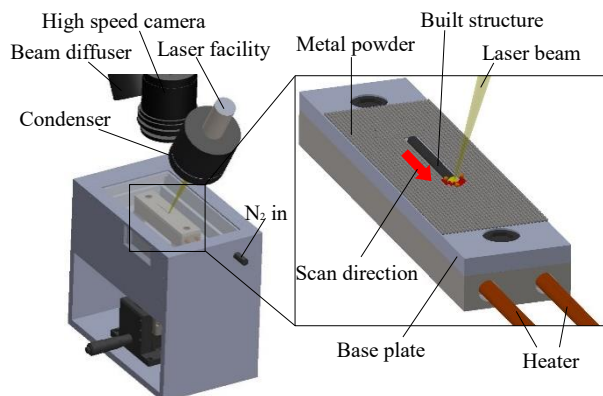


Fig.1 Schematic of experimental setup

ージング鋼を、ベースプレートは炭素鋼(S50C)を使用した。プレートにヒータを挿入し、プレート加熱の有無がスパッタの生成に及ぼす影響を調査した。造形中の金属粉末の酸化防止のため、装置内は窒素を充填させた。ベースプレートは平均粒径300 μmのWA砥粒でサンドブラストして溶融粉末の濡れ性を改善した。ベースプレート表面に金属粉末を堆積させ、スキージングブレードを用いて平坦化することで、粉末床の厚さは実験を通して50 μmで一定とした。

撮影画像は図2の模式図で示すようになり、粉末が溶融・固化した造形物幅と、粉末が溶融池に向かって凝集した粉末凝集幅を定義した。図2に示すように溶融池先端を原点として座標軸を定義し、0.5 ms毎の撮影画像からスパッタ発生数とスパッタ飛散方向を調査した。スパッタの発生数は造形条件によりレーザ走査距離が異なるため、走査距離と粉末凝集幅の積で示す粉末凝集領域に対する発生数を測定した。また、0.1 ms毎の撮影画像での溶融粉末の変位から速度を求め、速度グラフの傾きから各条件での加速度を算出した。その後、画像から溶融粉末の直径を概算し、質量と加速度の積から、溶融粉末にかかる凝集力を算出した。

Table 1 Experimental conditions

Laser source	
Laser type	Yb-fiber laser (CW)
Wavelength	1070 [nm]
Power	300 [W]
Beam diameter at focal spot	50 [μm]
Scan speed	50, 75, 100, 200 [mm/s]
Atmosphere of the chamber	Inert gas (N <sub>2</sub> )
Base plate	
Material	Carbon steel
Thickness	5 [mm]
Surface roughness R <sub>a</sub>	3.5 [μm]
Temperature	25, 200 [°C]
Metal powder	
Material	Maraging
Particle mean diameter	25 [μm]
Layer thickness	0.05 [mm]

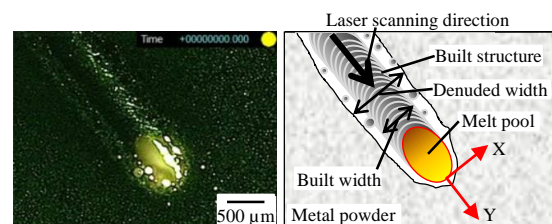


Fig.2 Captured image around the laser irradiated area

### 3. 結果と考察

#### 3.1 レーザ照射部の観察

図3にエネルギー密度が $2400 \text{ J/mm}^3$ の条件でライン造形を行ったときの溶融池周辺について、 $0.8 \text{ ms}$  間隔で撮影した画像を示す。図3(a)に示すように、金属粉末にレーザ照射したとき、レーザ照射部の粉末だけでなく、照射部周囲の粉末が凝集し、溶融池を形成した。同時に、レーザの熱影響を受けて溶融した溶融粉末が溶融池周辺に複数発生した。その後、上昇気流と表面張力の影響で溶融粉末は溶融池に向かって凝集した。そして、図3(b)のように、発生した溶融粉末の多くは溶融池に吸収された。その後、図3(c)のように、吸収された溶融粉末の一部が溶融池からはじき出されて、凝集方向と反対方向にスパッタが発生した。ここで、エネルギー密度とプレート温度による粉末凝集幅の変化を図4に示す。エネルギー密度の増加に伴って粉末凝集幅は広がった。また、プレート加熱により、各エネルギー密度による粉末凝集幅は広がった。エネルギー密度やプレート温度の上昇に伴って、より遠くから溶融粉末が凝集したためと考えられる。

#### 3.2 スパッタ発生数

エネルギー密度とプレート温度によるスパッタ発生数の変化を図5に示す。エネルギー密度が小さいとき、スパッタの発生数は少なく、エネルギー密度が大きくなるほどスパッタの発生数が増加した。また、各エネルギー密度においてプレート温度を上昇させると、スパッタの発生数は増加した。エネルギー密度やプレート温度の上昇に伴って、粉末凝集幅が広がり、溶融池に凝集する溶融粉末量が増加したことで、スパッタ発生数が増加したと考えられる。

#### 3.3 スパッタの飛散方向

図6にエネルギー密度とプレート温度によるスパッタの飛散方向の変化を示す。図6(a)(c)より、エネルギー密度 $600 \text{ J/mm}^3$ で造形したとき、スパッタはY成分が負の領域に多く見られ、すなわち溶融池の進行方向後方に飛散した。図6(b)(d)より、エネルギー密度 $2400 \text{ J/mm}^3$ で造形したとき、進行方向前方に多く飛散した。エネルギー密度によるスパッタの飛散方向の違いは、溶融池周辺で発生する溶融粉末の発生位置に依存すると考えられる。撮影動画より、エネルギー密度 $600 \text{ J/mm}^3$ のとき、溶融粉末は溶融池の側面・後方に多く発生し、溶融池に向かって凝集した。エネルギー密度 $2400 \text{ J/mm}^3$

のとき、溶融粉末は溶融池の前方に多く発生し、溶融池に向かって凝集した。溶融粉末が溶融池に吸収されるとき、凝集方向と反対方向に跳ね返されるようにスパッタが飛散したため、エネルギー密度によって飛散方向に違いが生じた。

また、エネルギー密度が同じ条件である図6(a)(c),(b)(d)をそれぞれ比較したとき、プレート温度の上昇に伴って、スパッタの飛散距離が大きくなった。ここで、溶融粉末が溶融池に凝集するとき、溶融池に加速度的に飛び込む現象を確認した。そこで、溶融粉末の質量と加速度の積から溶融粉末にかかる凝集力を測定した。溶融粉末は直径 $17\text{--}22 \mu\text{m}$ の半球とみなし、密度 $7973 \text{ kg/m}^3$ として質量を計算した。図7に、各プレート温度における溶融池からの距離と溶融粉末にかかる凝集力の関係を示す。図7より、凝集力は溶融池から遠い位置にあるほど大きくなった。また、同距離においてプレートを加熱することで凝集力が大きくなる傾向を示した。プレートを加熱したとき、より遠くから溶融粉末が凝集し、溶融粉末にかかる凝集力が大きくなることで、溶融池に飛び込む速度が大きくなり、溶融池から跳ね返されるスパッタの飛散距離が大きくなったと考えられる。

### 4. 結論

本研究では高速度カメラを用いた粉末床溶融結合法でのレーザ照射時のスパッタ挙動を調査した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 溶融池周辺にできた溶融粉末が溶融池に凝集するとき、一部が溶融池からはじき出されることでスパッタが発生する。
- (2) スパッタは、エネルギー密度が高いほど、プレート温度が高いほど多く発生する。
- (3) スパッタの飛散方向はエネルギー密度が小さいとき、溶融池の進行方向後方に飛散し、エネルギー密度が大きいつき、溶融池の進行方向前方に飛散する。
- (4) スパッタの飛散距離は、プレート温度が高いほど大きくなる。

### 5. 参考文献

- 1) Matthews, M.J., et al.: Denudation of metal powder layers in laser powder bed fusion process, *Acta Materialia*, 114, (2016), 33-42

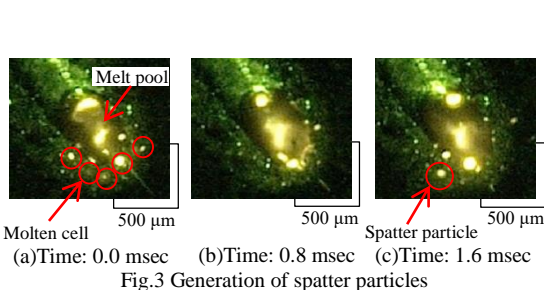


Fig.3 Generation of spatter particles

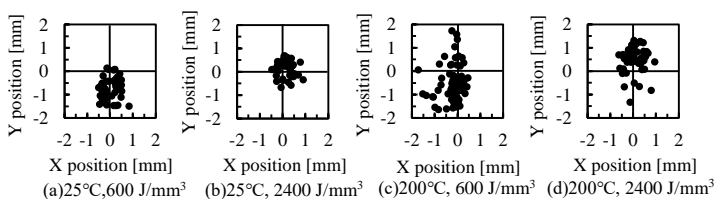


Fig.6 Scattered direction and distance of spatter particle

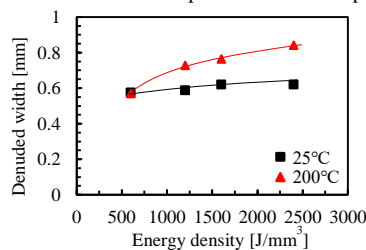


Fig.4 Variation of denuded width with base plate temperature

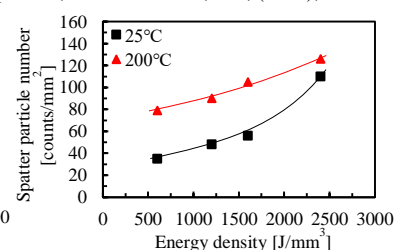


Fig.5 Variation of spatter particles number with base plate temperature

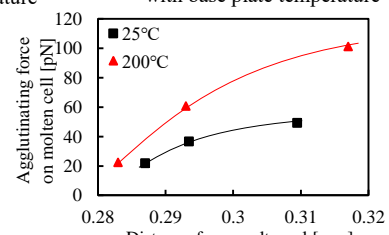


Fig.7 Influence of molten cell position