



N. Sato

## 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

佐藤 直子\*

### 1. 研究の目的と背景

3次元金属積層造形(以下, AM: Additive Manufacturing)は, 材料を積み上げて三次元構造を造形する加工技術である。そのため AM は, 工具を使って加工する切削や, 型を使って加工する塑性加工, 鋳造などの既存の加工技術よりも複雑形状や中空形状の加工が得意とされる。そのため, 形状設計による軽量化や高機能化が期待されている。

金属の粉末床溶融結合型(以下 PBF: Powder Bed Fusion)の AM は, 原料粉末を薄く敷き(リコーティング), 必要箇所だけに熱源を照射することで金属粉末を溶融凝固させ, それを繰り返して積層するプロセスである。熱源にレーザーを用いる手法は, PBF-LB/M (Laser-based Powder Bed Fusion of Metal) と呼ばれる<sup>1)</sup>。

PBF-LB/M のプロセスでは, 反りによるエラーを抑制するため, 土台(ベースプレート)と造形物を繋ぐようにサポート材を造形する(図 1a, b)<sup>2)</sup>。サポート材は, 応力除去の熱処理を施した後に取り除かれる。しかし, サポート材の造形は, 流路などの内部構造を造形する場合にとくに必要な場合が多いものの, 内部は刃物が入らず除去することが難しいため, 実質的に造形できる形状を制限しているといえる。したがって, AM の複雑形状を造形できる特徴を生かすためには, サポートレス造形技術の開発が必要である。著者らが開発したサポートレス造形は, 真空雰囲気において<sup>3)</sup>, 造形物の下部から仮焼結状態の予熱部(図 1c 予熱1)を造形し, さらに弱いレーザー照射条件で予熱を施し(図 1c 予熱2), 造形物周辺の粉末温度を均一に高めることにより実現した<sup>4)</sup>。図 1d は, サポートレスプロセスにより造形したタービンの模型である。しかし, このプロセスは, まだ再現性が低く, その理由は, プロセスの制御が不十分なためである。たとえば, 粉面の温度が低い場合は, 層が反ったり, スパッタ等により突起状に凝固したりして, それがりコータとぶつかり, 造形不良となるが, 造形時の粉面の温度が高く均一であれば, 造形不良は生じにくい。これらは経験的にはわかっているが, 造形条件に反映できていない。

PBF は, 造形条件の最適化の指標として単位体積当たりの投入エネルギーLED が用いられている(式1)。

$$LED = \frac{P}{v \sigma d} \quad (1)$$

ここで, P はレーザー出力, v はレーザー走査速度,  $\sigma$  はレーザー直径, d は粉末層の厚さである<sup>5)</sup>。LED が一定であれば, 熱源から同じ量のエネルギーが供給されるため, 同等の品質の部品が製造されることが期待される。しかし, LED はプロセス設計するには不十分であることが指摘されている<sup>6-8)</sup>。LED が一定の場合でも, 走査速度とレーザー出力によって物性は変化する。同様の現象は, 残留応力<sup>9)</sup>や表面粗さ<sup>9)</sup>などの他の特性についても観察されている。LED と部品の最終的な品質の関係を解明するためには, 粉末の溶融凝固挙動を把握する必要がある。

そこで, 本研究では, サポートレス造形プロセスにおける温度制御を目指して, 粉末床の溶融挙動観察装置を試作し, 評価を試みた。本稿では, その成果を最近の成果も交えて紹介する。



図 1 (a)サポートあり造形プロセス, (b)サポートあり造形プロセスによる造形物<sup>2)</sup>, (c)サポートレス造形プロセス, (d)サポートレス造形プロセスによるタービンブレード。

### 2. PBF の溶融挙動のその場観察装置の開発

#### 2.1 実験装置の概要

開発した PBF-LB/M の溶融挙動観察装置の模式図を図 2 に示す。本装置は, X 線透視法による溶接のその場観察を参考に<sup>10)</sup>, 島津製作所社製の X 線透視装置の X 線管(MTT255: Shimadzu Corp.)とイメージインテンシファイヤの間に, 開発した金属粉末溶融装置を配置したものである。X 線透視装置は, X 線管の管電圧と管電流を設定し,

\*産業技術総合研究所 製造技術研究部門  
素形材加工研究グループ 研究員

発生した X 線を試料に照射し、試料を透過した X 線をイメージインテンシファイヤで可視光領域に変換した画像を CCD カメラで取得する。金属粉末溶融装置は、真空チャンバ内に、直線移動する機構を付けた粉末試料トレーを導入し、チャンバ外に固定したレーザヘッドからレーザを粉末床に照射する機構とした。また、試料に X 線を照射し、透過した X 線を CCD カメラでとらえるため、真空チャンバの両側面に X 線吸収率の低い Be 窓を設置した。

真空チャンバには、ターボ分子ポンプおよびアルゴンガス配管を接続することで、低酸素濃度の雰囲気管理を可能とした。これにより、点状あるいは線状にレーザを照射した時の金属粉末の溶融挙動を再現し、粉末床の飛散や掘削、溶融池形状の変化などの動的な挙動を捉えることができる。レーザは、波長が 1070 nm で最大出力が 500 W のファイバーレーザ (ASDIJ256-R07P: Furukawa Electric Co., Ltd.) を用いた。粉末試料トレーは、長さ 130 mm × 深さ 13 mm × 厚さ 5 mm のアルミニウム板の 130 mm × 5 mm の面に溝加工を施し、溝の中に厚さ 3mm の粉末を充填する構造とした。

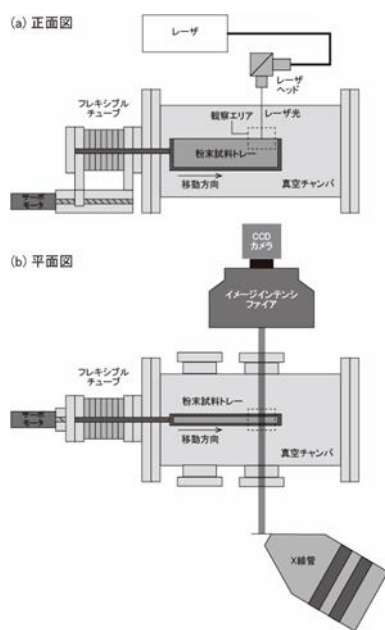


図 2 粉末床の溶融挙動観察装置の模式図。

## 2.2 開発装置で得られる PBF の溶融挙動の X 線透視像

PBF の溶融挙動の X 線透視像を図 3 に示す。ここでは、形状などから判別のしやすいボーリング現象を観察対象とした結果を紹介する。

供試材は、Ti6Al4V 合金のガスアトマイズ粉末で、粒子サイズが 45  $\mu\text{m}$  以下に分級されたものを用いた。粉末は、粉末試料トレーをタップしながら充填した。

X 線透視観察は、レーザ出力  $P = 250 \text{ W}$ 、粉末試料トレーの送り速度  $v = 10 \text{ mm/s}$  の条件について実施した。X 線照射条件は、X 線透視画像において最も色の差異が明瞭になった、管電圧 160 kV、管電流 90 A とした。X 線透視像

は、画像処理ソフトウェア ImageJ を用いて輝度から溶融部、粉末床、雰囲気領域を分離し、溶融部の形状を解析した。

図 3 は、得られた X 線透視画像を 1 ms 間隔で抜き出した画像である。t = 0 ms では、レーザ照射位置付近に 2 つほど小さい溶融凝固部がみられたが、1 ms 後にはボールが一つに合体し、さらに大きな紙面向かって右側の球体に引き寄せられるように合体していることがわかった。このほか、キーホールが生じたり、レーザ照射部に球状の溶融凝固部が引きつけられてボールが成長したりする様子が観察された。

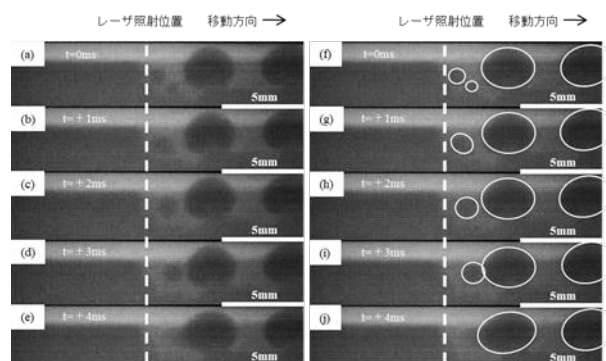


図 3 出力 250 W、移動速度  $10 \text{ mms}^{-1}$  の時の球状の溶融凝固部の合体過程 (a-e) および a-e の溶融凝固部を縁取りした模式図 (f-j)。(a, f) 発生時、(b, g) 発生後+1ms、(c, h) 発生後+2ms、(d, i) 発生後+3ms、(e, j) 発生後+4ms。

## 3. 点照射における溶融挙動の解析<sup>11)</sup>

### 3.1 背景と目的

ここでは、レーザを 1 点照射した時の粉末床の溶融過程を解析した成果を紹介する。

PBF-LB/M は、LED だけでは造形物の品質を制御することが難しく、これは特定のエネルギーに到達するまでの時間を考慮する必要があるためと考える。たとえば低走査速度、低レーザ出力の条件下では、特定のエネルギーを供給するのに長い時間を必要とする。その結果、溶融が遅れたり、熱拡散時間が長くなったりするなど、時間と共に溶融挙動が変化することになる。このように、様々な造形条件に対する溶融挙動の時間変化を捉え理解することで、最適なプロセス設計の実現につながる。

レーザ照射時間は、PBF プロセスでは、走査速度によって変化させるが、レーザを走査すると、レーザ入射角、熱伝導の方向等も変化する。そのため、それらの影響を排除できる 1 点照射の溶融挙動を解析対象とした。また、溶融挙動を解析するためには、X 線透視で観察されるレーザ照射点の温度情報が必要である。

そこで本研究では、X 線透視法と二色温度計の同時測定によるレーザ点照射時における溶融過程の解明を目的とした。均質に敷設した Ti6Al4V 粉末に対し、レーザ点照

射を実施し溶融・凝固させ、その過程を X 線透過と二色温度計で同時測定した。得られた画像から粉末床と溶融池の形状を測定することで、溶融過程を評価し、溶融池の生成・拡大過程のメカニズムについて検討した。

### 3.2 実験方法

#### 3.2.1 評価装置の改造

溶融挙動可視化装置は、X 線透視による溶融池形状と溶融池近傍の温度の同時計測をするため図 4 のように改良した。初号機 (図 2) からの主な変更点は、レーザヘッドを粉末床の垂直方向から  $15^\circ$  傾けて配置したこと、粉末床の直上に二色温度計を配置したことである。二色温度計は、粉末床の直上に配置することにより、形状のゆがみなく温度分布を観察できるようにした。また、レーザ照射、二色温度計の計測、X 線透視の撮影の開始と終了の時間は同期制御した。

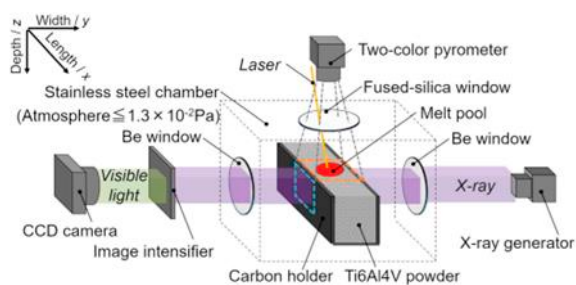


図 4 改良した溶融挙動可視化装置の模式図<sup>11)</sup>。

#### 3.2.2 溶融挙動の画像処理と定量評価

画像処理ソフト (Fiji)<sup>12)</sup>を用いて、解析用の生 X 線透視画像から 2 値化画像と重ね合わせ画像を作成した。この後、左右のくぼみ長さ  $L_l$  と  $L_r$ 、およびくぼみ深さ  $D$  を測定した。図 5 にこれらの数値の定義を示す。左右のくぼみ長は、それぞれくぼみの左右の輪郭とレーザ照射点との水平距離と定義した。くぼみ長  $L$  は、 $L_l$  と  $L_r$  の和とした。 $t=0.001$  秒におけるくぼみ長さの中心点をレーザ照射点、くぼみ深さ方向に伸びる線とくぼみの輪郭の交点を底点と定義した。また、レーザ照射点からくぼみ部の底面までの距離をくぼみ深さとした。

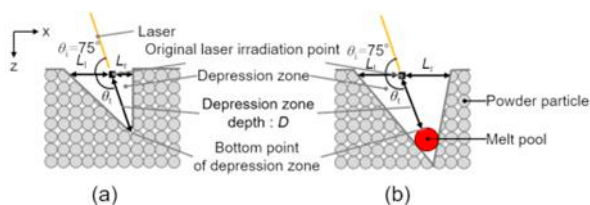


図 5 左右のくぼみ部分の長さ  $L_l$ ,  $L_r$ 、傾斜角  $\theta_i$ 、レーザ入射角  $\theta_i$ 、くぼみ部分の深さ  $D$  の定義。(a)溶液プール生成前、(b)溶液プール生成後<sup>11)</sup>。

### 3.3 点照射時の金属粉末の溶融挙動

#### 3.3.1 X 線透視像から判別される領域

図 6 は、コントラストが明瞭な X 線透視像の 3 例である。画像の左下と右下の黒い部分は、真空チャンバーの枠を表しており、これは X 線が真チャンバによって完全に減衰していることを示す。

X 線透視像は、その明るさにより、4 つの領域が目視で識別でき、(i)大気、(ii)くぼみ領域、(iii)粉末層、(iv)溶融池の順に輝度が減少する<sup>13)</sup>。すなわち、X 線透視像の上側の白い領域は大気(i)、下側の黒い領域が粉末層(iii)、中央の粉末層に比べてやや暗い領域が溶融池(iv)、中央上部の大気に比べてやや暗い領域がくぼみ領域で(ii)、大気と粉末が存在していることが分かる。また、図 6b に示すように、2 つの大きなスパッタが観察された。これらのスパッタをスパッタ A、スパッタ B とした。

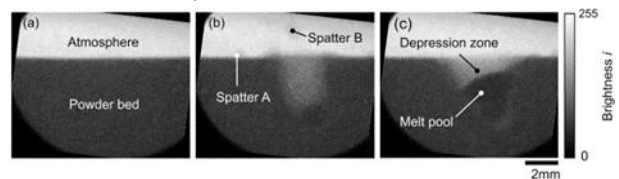


図 6 X 線透視画像:(a)レーザ照射前、(b)レーザ照射中 (例として  $t=0.18$  s)、(c)レーザ照射後<sup>11)</sup>。

#### 3.3.2 溶融挙動の分類

図 7 は、レーザを照射した粉末床の特徴的な溶融挙動を示した。溶融挙動は、X 線透視像から以下 4 つに分類される；キーホール、溶融池の浮き上がり、スパッタ、ボール化。まず、くぼみの深さが大きいキーホールが観察された。くぼみ深さの傾斜角は約  $120^\circ$  であった。次に、溶融池の浮き上がりと気孔の形成が観察された。図 7 に示すように、 $t=0.211$  秒の赤枠で示した領域では、溶融池の上部の明るさが 0.02 秒前の X 線透視像より暗くなっている。これは、くぼみの周辺にあった物体が内部に移動していることを示している。浮遊していた溶融池は、これらの物体と合体して大きくなった。溶融池の断面形状は、円形から縦に細長い楕円形に変化した。第三に、2 つのスパッタ A、B が観測された。図 8 にこれらの軌跡を示す。スパッタ A は溶融池から負の x 方向に飛散している。0.1 秒間同じ場所に留まった後、スパッタ A は吸い込まれるように溶融池に戻った。スパッタ B は溶融池から正の z 方向に飛散し、観測領域の外側に移動した。その後、スパッタ B は観測領域内の溶融池へ落下した。第四に、球状の溶融池が観察された (ボール化)。 $t = 0.133$  秒の時点では、X 線透視像と熱画像の両方で溶融池の形状が円形であることが確認された。溶融池は、浮き上がった後も球状であった (図 7,  $t = 0.211$  s) ため、溶融池と粉末床の間に中空構造が形成されていたことが推測される。その後、 $t = 1.001$  s における溶融池の曲率半径は  $t = 0.755$  s よりも大きくなり、溶融池の表面はより平坦になった。

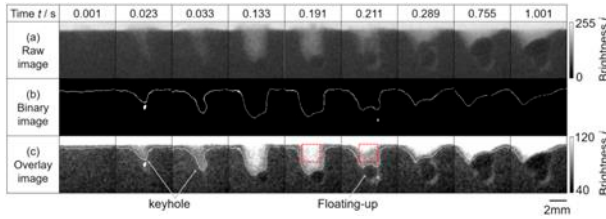


図7 溶融挙動評価；X線透視画像を溶融池とへこんだ領域に着目して  $145 \times 145$  pixel に切り取った。(a) Raw 画像, (b) 二値化画像（白線は輝度値 230-240 に対応）, (c) 二値化画像を重ねた補正画像（輝度値 40-120）。観察時間  $t = 0.191$  s と  $t = 0.211$  s の四角で囲った枠内はそれぞれ輝度値が異なるが、輝度値が低いほど粉末粒子が多くあることを示す<sup>11)</sup>。

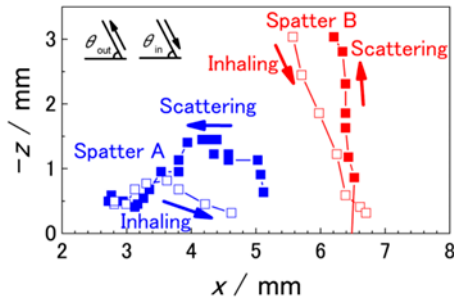


図8 スパッタ A, B の軌跡。青色点はスパッタ A, 赤色点はスパッタ B を表す。塗りつぶされた点は散乱, 白抜きの点は吸収を表す。スパッタ B は  $t = 0.061-0.175$  s に観察視野外にいたためグラフが途切れている。 $\theta_{out}$  : 散乱角,  $\theta_{in}$  : 落下角<sup>11)</sup>。

### 3.3.3 くぼみ形状の時間変化

くぼみ形状の時間変化を図9に示す。赤色の点は、くぼみ深さ  $D$  を示している。レーザー照射開始直後、 $D$  は  $3.2$  mm に達するまで急増し、 $t = 0.16 \sim 0.2$  s は定常値を維持した。その後  $t = 0.2 \sim 0.28$  s では溶融池の浮上、および物体の溶融池への吸入により急減した。さらにその後、 $D$  は徐々に減少したが、 $t = 0.901$  秒になると  $45 \mu\text{m}$  ほど増加した（図9右下の黒矢印）。青色の点は、くぼみ領域の長さ  $L$  を示す。 $t = 0 \sim$  約  $0.16$  s の間に急減し、その後、徐々に落ち込み幅が大きくなる傾向が見られた。溶融池が浮上した後、くぼみの左側にあった物体が溶融池に吸い込まれたため、くぼみの長さは再び急増した。また  $L_l$  は徐々に長くなり、 $L_r$  は溶融池が浮上した後、定常状態になった。

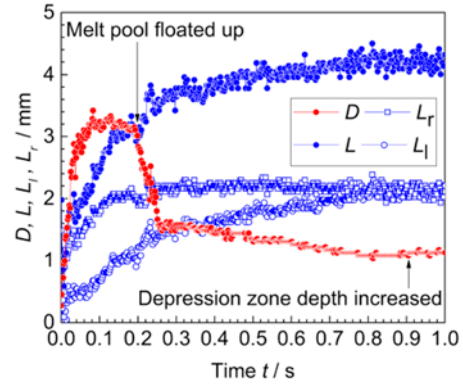


図9 デプレッションゾーンの時間変化。左右の凹部長 ( $L_r$ ,  $L_l$ ) は、それぞれ凹部の左右の輪郭とレーザー照射点との水平距離として定義した。凹部長  $L$  は、 $L_r$  と  $L_l$  の和である。また、レーザー照射点から窪地の底までの距離を窪地深さ  $D$  とした<sup>11)</sup>。

### 3.3.4 熱拡散

図10は、 $t = 0.14 \sim 0.98$  s までの温度分布の時間変化を、対応する側面からの X 線透視像とともに示したものである。どの熱画像でも、溶融池の端から中心に向かって温度が上昇していることが分かる。図10cの  $t = 0.14$  s に見られるように、溶融池の中心部には暗い部分があり、この部分は温度測定範囲 ( $1300-2400^\circ\text{C}$ ) から外れていた。したがって、最高温度は  $2400^\circ\text{C}$  以上であったと推測される。温度分布の形状は、レーザー照射が終了するまで、円形（図10c;  $t = 0.001, 0.191, 0.289$  s）と不定形（図10c;  $t = 0.023, 0.033, 0.133, 0.211$  s）を形成する工程が繰り返された。

図11aは、溶融池の平均温度の時間変化を示す。 $t = 0, 0.02, 0.04, 0.08$  s では、測定領域内に溶融池が発生しなかったため、図11aにはプロットが表示されていない。平均温度は、 $t = 0.2$  s で最も低くなり、 $T_{ave} = 1612^\circ\text{C}$  となり、低粘度の固液共存温度となった。その後、平均温度  $T_{ave}$  はレーザー照射終了まで安定し、 $1800^\circ\text{C}$  に回復した。図11bは、溶融池の温度ヒストグラムである。 $t = 0.12$  秒の溶融池サイズは  $t = 0.3$  s より小さく、 $t = 0.12$  s の高温領域 ( $2400^\circ\text{C}$  以上) の割合は  $t = 0.3$  s よりも広がっていることがわかる。

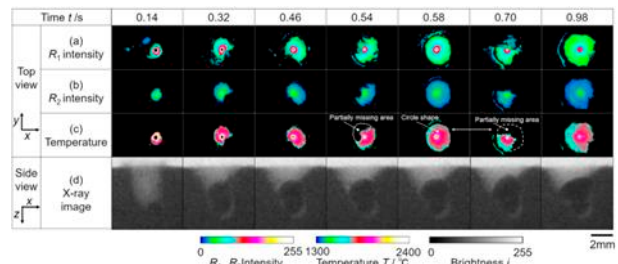


図10 上から見た温度分布の時間変化とそれに対応する横からの X 線透視像。 $t = 0.70$  s では、 $t = 0.58$  s の温度分布の輪郭が点線で描かれている<sup>11)</sup>。

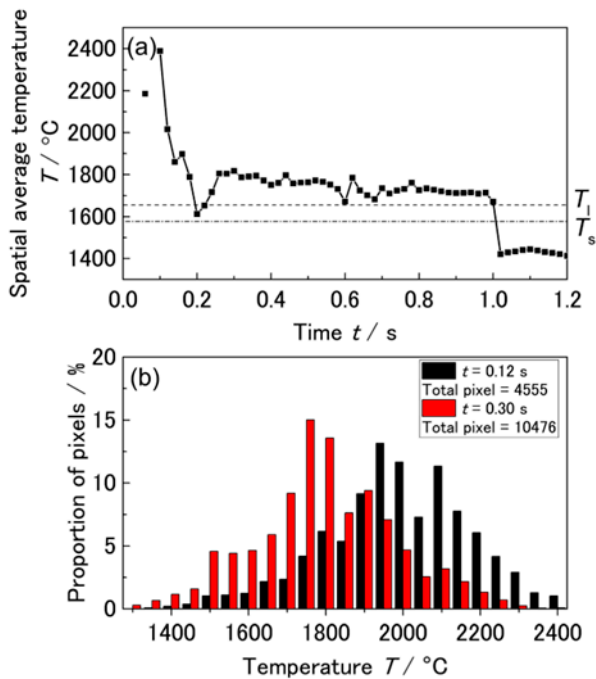


図 11 測温結果. (a) 空間平均温度の変化. Ti-6Al-4V の液相線温度  $T_l$  は  $1655^\circ\text{C}$ , 固相線温度  $T_s$  は  $1577^\circ\text{C}$  である. (b)  $t=0.12$  s と  $t=0.30$  s で得られた温度ヒストグラム<sup>11)</sup>.

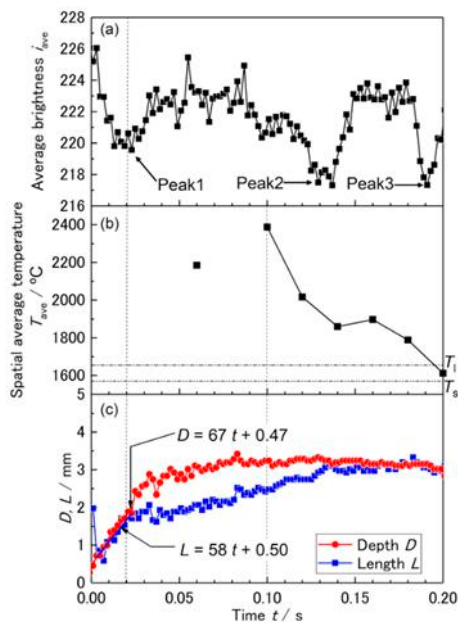


図 12 X 線透視像と二色温度計で得られた溶融挙動の比較. (a) X 線透視像における測定線 ( $x:0-240$  px,  $y:50$ px) 上の平均輝度. 輝度が低いほど, 粉末粒子の数が多いことを示す. (b) 上面から見た溶融池の空間平均温度. 図 9 から  $t=0-0.2$  秒の範囲で抽出したグラフ.  $T_l$  と  $T_s$  はそれぞれ液相線温度と固相線温度. (c) 図 6 から  $t=0-0.2$  秒の範囲で抽出した陥没域の深さ  $D$  と長さ  $L$ <sup>11)</sup>.

### 3.4 考察

溶融挙動には, キーホール, 溶融池の浮き上がり, スパッタリング, ボールの 4 種類があった. ここでは, 2つの解析手法を組み合わせることで, 溶融挙動のプロセスを詳細に明らかにした. 第一の分析手法は, 2色ピロメーターで測定した R1, R2 強度を用いて対象物の相を特定するものである. 第二の分析手法は輝度からスパッタ量を定性的に評価するものである. 本稿では紙面の都合上, キーホールの形成過程の議論を示す. 全種類の溶融挙動は, 参考文献 11) で議論しているのので, 参照されたい.

#### 3.4.1 キーホールの形成過程

キーホールは, 以下の過程で形成した. 図 12c に示すように, くぼみ長さ  $L$  とくぼみ深さ  $D$  は, レーザ照射開始直後にはほぼ同じ速度で急増した. このとき, 同時に多くのスパッタの発生が認められたため, 駆動力はガス圧によるものと思われる. その後,  $L$  の増加傾向は緩やかになったが,  $D$  は増加し続け, その結果, キーホールが形成された. そして,  $t=0.1$  s 付近で  $D$  の拡大が停止した. ここでは, これらの変化の原因について, 熱画像やスパッタ量と比較しながら考察する.

くぼみ長さ  $L$  は, 図 12a, c に示すように, スパッタ発生量が最大値になると徐々に長くなる傾向が見られ, これより, スパッタ発生量とくぼみ領域の広がりに関連があることが示唆された. また, レーザの照射位置は, くぼみの下部に維持されていた. そのため,  $D$  が大きいと  $L$  がレーザ照射の影響から遮断される. その結果として,  $L$  の変化の傾向は徐々に大きくなったと考えられる.

くぼみ深さ  $D$  は,  $t = 0.1$  s で増加しなくなると同時に, 溶融池が形成している. このことから, 溶融池が  $D$  の拡大を防いでいることが示唆された. 下層の透過率は, レーザ照射点にある材料の状態によって変化する. レーザ照射点が粉末床の粉面にある場合, レーザ光は粉末粒子間の隙間を通過して下層に到達する<sup>14)</sup>. 一方, 溶融池では, レーザ光が部分的に反射される.

#### 3.5 粉末床の点照射挙動の小括

本研究では, 粉末床上での金属粉末の溶融形態の変化を調べた. Ti-6Al-4V 粉末を 200W のレーザで 1 点 1 秒間溶融した. レーザ照射中の溶融挙動は, X 線と熱画像を組み合わせたその場同時観察で捉え, その結果, 以下のように分類された (図 13).

- 1) レーザ照射直後は, くぼみ部分の長さ  $L$  とくぼみ部分の深さ  $D$  がほぼ同じ速度で急速に増加する.
- 2) スパッタ発生量が最大値に達した直後から, くぼみ部分の長さが徐々に増加する. その後, くぼみ深さは急激に増加し続ける. その結果, 鍵穴のような形状が発生する.
- 3) 溶融池の生成と散乱を交互に繰り返す. くぼみの深さが伸びなくなると, 溶融池が形成され, 滞留し始める.

- 4) 溶融池が浮き上がると、溶融池の底と粉末層との間に隙が発生する。同時に、粉末の動きが散乱から吸入に変わる。
- 5) レーザ照射側から粉末を吸入するため、溶融池が成長し続ける。また、くぼみ領域の反対側の拡張は停止する。
- 6) 溶融池の曲率半径が減少する。すなわち、溶融池の表面が平らになる。

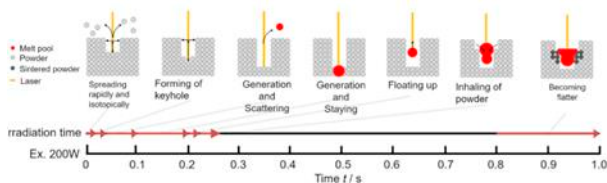


図 13 点照射における溶融挙動の時間変化の模式図<sup>7)</sup>。

#### 4. まとめ

本稿では、サポートレス造形技術を高度化することを目的に取り組んでいる粉末床の溶融挙動評価について、その場観察装置の開発と、それをを用いて実施したレーザの点照射時の粉末床の溶融挙動解析の結果を紹介した。これまで、点から線照射時の溶融挙動解析に展開させており、今後は積層プロセスの溶融挙動の理解と制御につなげていく。

#### 謝 辞

本研究の一部は、公益財団法人天田財団の平成 27 年度重点研究開発助成 B により行われたものであり、ここに記して深く感謝の意を表します。本研究に多大なご協力をいただいた多くの共同研究者の皆様、特に PBF を模した粉末床の溶融挙動観察装置の開発と評価にご協力をいただいた早稲田大学 鈴木進補教授、若井悠貴氏、小倉智哉氏、丸山珠宙氏、PBF プロセスの X 線透視についてご助言とご協力をいただいた産総研 瀬渡直樹主任研究員に、深く謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) ISO/ASTM 52910:2018(E). Additive Manufacturing Design Requirements, Guidelines and Recommendations; International Organization for Standardization ISO: Geneva, Switzerland, 2018.
- 2) <http://www.em-pi-es.com/realizer-slm-50.php> (参照 2015 年 7 月 12 日)

- 3) S. Nakano et al.: Proc. of the 7th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, (2013), 419–422.
- 4) 中野禅, 清水透, 萩原正, 佐々雅祥: 積層造形物, 粉末積層造形装置及び粉末積層造形方法, JP-A-2015-38237, 20150226.
- 5) Ciurana J, Hernandez L, Delgado J (2013) Energy density analysis on single tracks formed by selective laser melting with CoCrMo powder material. Int J Adv Manuf Technol 68:1103–1110.
- 6) Prashanth KG, Scudino S, Maity T, Das J, Eckert J (2017) Is the energy density a reliable parameter for materials synthesis by selective laser melting? Mater Res Lett 5:386–390.
- 7) Chen Z, Wei Z, Wei P, Chen S, Lu B, du J, Li J, Zhang S (2017) Experimental research on selective laser melting AlSi10Mg alloys: process, densification and performance. J Mater Eng Perform 26: 5897–5905.
- 8) Mugwaga L, Dimitrov D, Matope S, Yadroitsev I (2018) Influence of process parameters on residual stress related distortions in selective laser melting. Procedia Manuf 21:92–99.
- 9) Hengfeng G, Gong H, Pal D et al (2013) Influences of energy density on porosity and microstructure of selective laser melted 17-4PH. In: Conf 24th Annu Int Solid Free Fabr Symp, pp 474–489
- 10) 瀬渡直樹, 片山聖二, 松縄朗: “アルミニウム合金レーザ溶接時のポロシティ生成挙動の解明とその抑制法”, 溶接学会論文集, Vol. 18, No. 2, (2000), 243–255.
- 11) Y. Wakai, T. Ogura, S. Nakano, N. Sato, S. Kajino, S. Suzuki, Melting behavior in laser powder bed fusion revealed by in situ X-ray and thermal imaging, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 110 (2020) 1047–1059.
- 12) Schindelin J, Arganda-Carreras I, Frise E (2012) NIH image to ImageJ: 25 years of image analysis. Nat Methods 9:671–675.
- 13) Boyer R, WeBoyer R, Welsch G, Collings EW (eds) (1994) Materials Properties Handbook: Titanium Alloys. ASM International, Materials Park
- 14) Boley CD, Khairallah SA, Rubenchik AM (2015) Calculation of laser absorption by metal powders in additive manufacturing. 54: 2477–2482.