

粉末床溶融結合法による金属多孔質体の造形と プロセスインフォマティクスのための 中間特徴量抽出

西来路 正彦* 長 藤 圭 介**

1. はじめに

レーザを用いる粉末積層造形のうち、粉末材料を積層・レーザ照射・凝固を繰り返す粉末床溶融結合法 (PBF; Powder Bed Fusion) は、精密な構造を造形できる方法として期待されている。その標準的な製造プロセスを図 1 に示す。3D データを専用ソフトにて積層毎のスキャンの軌跡データに変換し (a)、装置のプロセスチャンバー内で粉引き機構で材料をビルドプレート上に供給し (b)、製品の断面形状に対応した部分にレーザビームが照射されて材料が溶融凝固し製品の断

面形状が作られ (c)、ビルドプレートが 1 層分下がり (d)、その上に再度材料が供給される (e)。 (c) から (e) が繰り返されることで、PBF 部品が完成する。

PBF は、異なる形状の部品を同時に複数製作することができ、かつ、断面を積み上げていくため複雑な形状を作ることができる。また、レーザスキャンされていない部分の粉末材料は再度使用可能であるため、材料ロスが少ないというメリットがある⁽¹⁾。その反面、現状の技術レベルでは工法としてのスループットが従来工法より低いいため形状が単純な場合は PBF の方がコストが高く、形状が複雑になるにつれて従来工法のコストは増加するが PBF のコストは増加しないため、ある点を境にコストが逆転して PBF を使うメリットが飛躍的に大きくなることが報告されている⁽²⁾。このような理由から、トポロジー最適化、ラティス構造、多孔質体のような精密で複雑な形状は、PBF の活用が進んでいる。PBF では、レーザ吸収→粒子表面加熱→粒子内熱伝導→粒子間熱伝達→粒子溶融→溶融池形成→蒸発→反跳圧でメルトプールに凹部発生 (入熱量によってキーホール形成)→ブルーム発生→溶融池冷却・凝固→ビード形成 (図 2) という複雑現象が起きており、そのメカニズムをすべてモデリングできている例がない。そのため、高速度カメラ表面観察、X 線 CT 測定、赤外線温度分布観察など多方面からの観察のアプローチと粉体力学シミュレーションの研究が多くなされている⁽³⁾⁽⁴⁾。一方で、機械特性等の最終評価値を得るための出力や走査速度といったプロセスパラメータの組み合わせは膨大で、その最適化にかかる時間の短縮が急務である。

本稿では、PBF で製作された精密構造に及ぼすプロセス

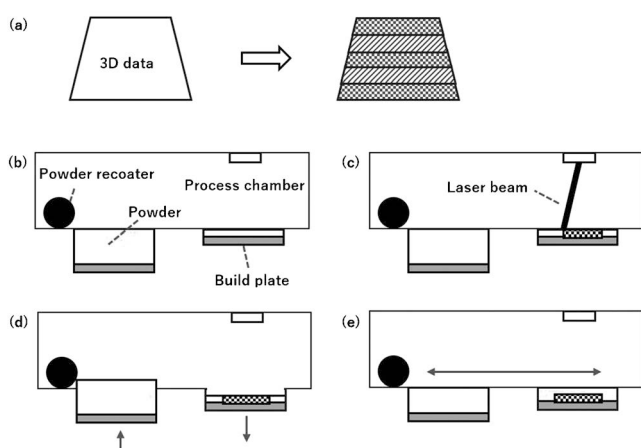


図 1 PBF の造形プロセス (a) 3D データ変換, (b) 開始前, (c) レーザ照射, (d) 粉末供給準備, (e) 粉末供給。

* SOLIZE 株式会社 SOLIZE 開発統括部技術開発部; 部長(〒242-0007 大和市中央林間 7-10-1)

** 東京大学大学院工学系研究科; 准教授

Fabrication of Metallic Porous Structures by Powder Bed Fusion and Intermediate Feature Extraction for Process Informatics; Masahiko Sairaiji* and Keisuke Nagato** (*Technology Development Department, SOLIZE R&D Unit, SOLIZE Corporation, Tokyo. **Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo.)

Keywords: L-PBF (Laser Powder Bed Fusion), porous, surface roughness, porosity, pore size

2024年12月24日受理[doi:10.2320/materia.64.377]

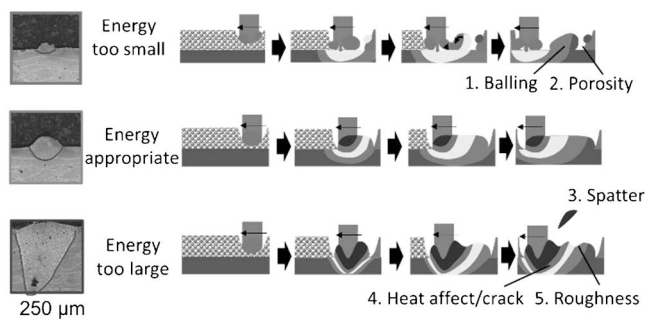


図2 PBFの入力エネルギーと現象の概要.

パラメータの影響とPBFとプロセスインフォマティクスの組み合わせの研究および多孔質体の製作においてプロセスインフォマティクスを適用してプロセスパラメータ探索を効率化するための中間特徴量抽出に関する研究を紹介する.

2. PBFによる精密構造とプロセスパラメータの影響

PBFで製作される精密な構造の例として, ラティス構造, アスペクト比の高い構造, マイクロチャンネル構造, 多孔質体構造などがある. PBFにより造形された部品の例を図3に示す. 図3(a)は直径800 μm のストラットからなるラティス構造, (b)は密集した直径300 μm のピン形状を有する部品, (c)は壁厚200 μm のマイクロチャンネルを多数有する熱交換器の一部, (d)は構造体の一部が多孔質体となっている部品である. いずれも1 mm以下の形状が多数存在しており, 従来工法で製作する場合は複雑なプロセスを必要とするか, そもそも製作自体が困難な形状であり, PBFにおいても製作難易度が高い形状である. また, その機械特性や表面性状はプロセスパラメータによって大きく変化する. たとえば, 図3(a)のようなラティス構造に関しては, プロセスパラメータのうちレーザーのスキャンパターンが変化する

と, 品質に影響があることが明らかになっており, 西来路らは3種類のレーザーのスキャンパターンを用いてラティス構造を製作し, その影響を報告している⁽⁵⁾.

ラティス構造を製作するのに使用したレーザーのスキャンパターンを図4に, そのパターンで製作されたラティス構造のストラット断面の観察方向, 光学顕微鏡画像と粒界マップを図5に示す.

レーザーのスキャンパターンの違いによって, 断面形状と結晶組織が異なっていることがわかる. 断面形状は図5(b)に見られるように, 同心円状のスキャンパターンでは歪な楕円形状をしているがストライプ状のスキャンパターンでは輪郭の凹凸が大きいの. このことはレーザースキャンの開始と終わりでのビード形成が不安定であることから, 平行ハッチよりも

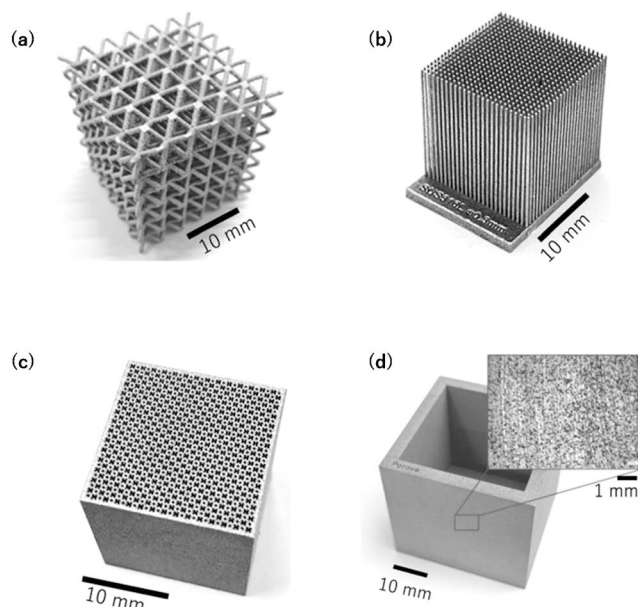


図3 PBF製作物 (a) ラティス構造, (b) 高アスペクト比ピン形状, (c) 微細流路構造, (d) 多孔質体.

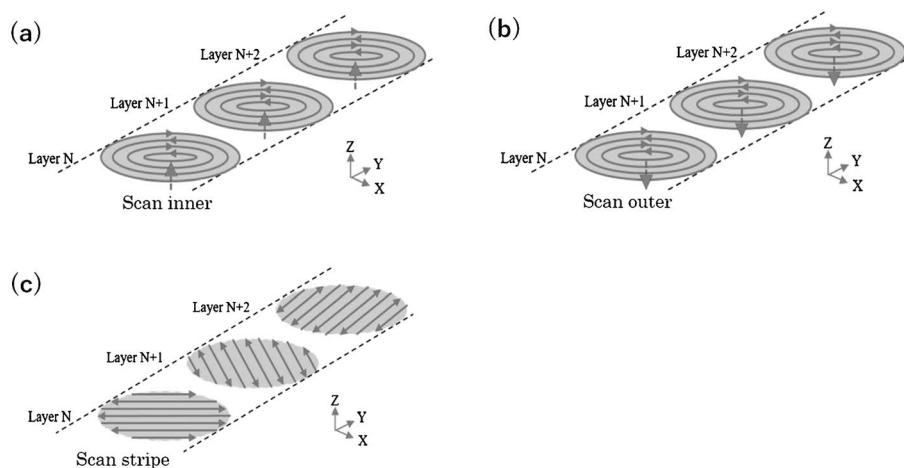


図4 スキャンパターン (a) 同心円状に外側から中心に向かうパターン, (b) 同心円状に中心から外側に向かうパターン, (c) 各層で回転するストライプ状のパターン.

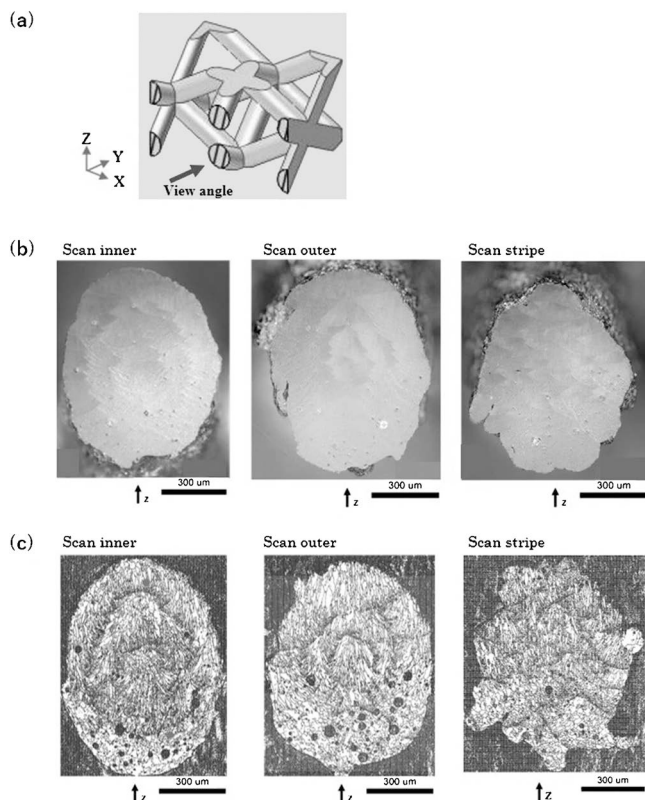


図5 ラティス構造のストラット鉛直断面の観察 (a) 観察方向, (b) 光学顕微鏡画像, (c) EBSD 粒界マップ。

同心円ハッチの方が輪郭がきれいに仕上がることを示している。

結晶組織は図5(c)に見られるように、同じ同心円状でも外側から中心に向かうスキャンパターンの方が中心から外側に向かうスキャンパターンより結晶組織が小さい領域が多い。これは、外側の輪郭が先の方が広い範囲にビードが形成されることで冷却が早く、外側の輪郭が後の方が内側のスキャンでの予熱で結晶が粗大化したと考察できる。このようにプロセスパラメータの違いによって、形状や結晶組織の違いが生まれ、機械的特性が影響を受ける。ラティス構造の決まった寸法に対するプロセスパラメータでも多くの組み合わせ候補がある中で、未開拓の精密な構造を造形していくにあたっては、PBF 装置メーカーから提示される標準的なプロセスパラメータでは造形ができない場合があり、適切なプロセスパラメータの探索が必要となる。

多孔質体もまた、PBF の適用が検討されている部品の一つである。PBF では、製作時に局所的にプロセスパラメータを変化させることで、同一造形品内に異なる特性を持たせることができ、図3(d)に示すような、壁の一部のみが多孔質体となっている部品も製作することができるため、従来工法で必要とされていた、多孔質部品とバルク部品の接合工程が不要になり、コスト削減とともに接合部の信頼性の向上が可能となる。多孔質に求められる特性は様々であり、例えば医療用インプラントとして使用するための多孔質体は、骨と

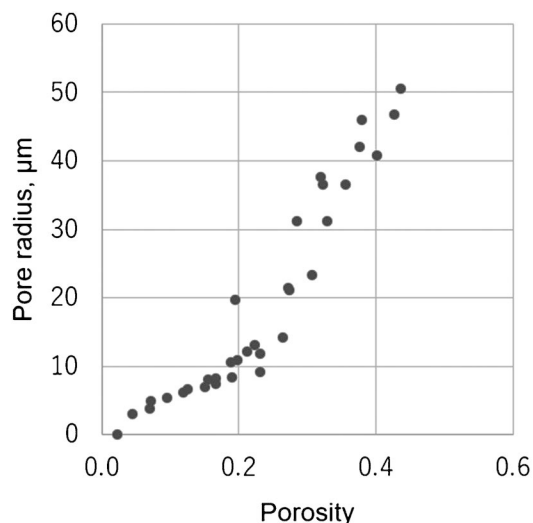


図6 PBF 造形物の空隙率と孔径。

の結合や細胞の付着を促進させるための表面粗さや周囲の骨やインプラント自体の破損を防ぐための骨に近い弾性率や圧縮強度が重要となり、これらの特性がどのようにプロセスパラメータに影響されるかの研究がなされている⁽⁶⁾。また、ループヒートパイプとして使用するための多孔質体であれば、多くの熱量を移動させるために、毛細管力による駆動力を高めながら流体の圧力損失を下げるのが大切になるため、連通孔のサイズと空隙率が重要となる。これらの空隙率や孔径やそれによる透水性もまた、プロセスパラメータによって変化することが報告されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。秋月らは、プロセスパラメータの変化によって、空隙率と細孔径は変化するもののその変化の仕方には相関があり、図6に示すように、空隙率が大きくなると細孔径が大きくなり、ループヒートパイプが求める大きい空隙率と小さい孔径の両立のためには、適切なバランスを持ったプロセスパラメータを選定する必要があることを報告している⁽⁹⁾。

3. プロセスインフォマティクスと中間特徴量の活用

(1) プロセスインフォマティクスとPBF 多孔質体への応用

プロセスインフォマティクスとPBF を組み合わせた研究の数は増えてきており、品質保証や、造形物の機械特性を向上などに活用されている。たとえば、品質保証においては、製造時のモニタリングデータから造形物の内部の欠陥の発生の予測のモデルを構築し、X線CTの測定の結果と比較して、高精度に欠陥を検出する研究が報告されている⁽¹⁰⁾。また、造形物表面のSEM写真から表面の細孔のサイズを検出する機械学習モデルも提案されている⁽⁸⁾。造形物の機械特性の向上においては、造形物の研磨断面の相対密度とプロセスパラメータの組み合わせを機械学習させることで、材料に依存しにくい高密度を実現できる製造プロセスパラメータの予測モデルが提案されている⁽¹¹⁾。また、公開されている多数の先行研究の情報から引張強度やヤング率といった物性をプ

プロセスパラメータから予測する機械学習モデルも提案されている⁽¹²⁾。これらの研究は、プロセスインフォマティクスの活用によって、PBFが複雑な現象であることに起因した予測の難しさや工法としてのスループットの低さや内部試験のための非破壊検査による高いコストを緩和して、プロセスパラメータ探索の効率化に繋がっていく可能性がある。プロセスパラメータの探索手法として、物理的に意味のある中間特徴量を用いることにより、さらに探索効率を向上させるアプローチも研究されており、PBFへの適用も試みられている。長藤らは、2019年に始まった未来社会創造事業⁽¹³⁾にて、燃料電池触媒層の粉体成膜プロセスのハイスループット化のためにAI・ロボットを活用したプロセスインフォマティクスを提案し⁽¹⁴⁾、1000倍の速度で新しいプロセスを探索した。このときに重要なことは、機械学習を用いた試行回数の削減というだけでなく、「中間特徴量(IFV; Intermediate Feature Value)」の設定によるサイクルタイムの短縮である。マルチフィジックス・マルチスケールの複雑現象であり、メカニズム解明とともに、プロセスパラメータの探索の効率化がますます求められる粉体プロセスとしてはPBFも燃料電池触媒層と同様であるため、中間指標を用いたプロセスインフォマティクスは有力な方法である。長藤らは、PBF造形物のビッカース硬さを予測するために、プロセス中の飛散粒子の情報を中間特徴量として、プロセスインフォマティクスを活用することで、プロセスパラメータの探索効率向上の可能性を示した⁽¹⁵⁾。

多孔質体においても同様に、プロセスインフォマティクスによる高効率な探索の実現に向けて、PBFで造形したステンレス鋼の多孔質体の孔径の予測のために、造形された多孔質体の天面画像から得られる凹部面積比を中間特徴量として評価した事例を紹介する。

中間特徴量は、評価のための時間的・金銭的コストを抑制でき、最終評価値に対して相関性を持っていることが条件となる。中間特徴量の選び方としては、2通りのアプローチが考えられる。1つ目は、大量のデータを入れて機械学習で最終

評価値と相関のある要素を見出し、それを中間特徴量として選ぶデータドリブンのアプローチである。2つ目は、現象のプロセスから想像して最終評価値と相関がありそうな特徴量を設定する仮説ドリブンのアプローチである。前者は、その膨大な初期データを得るところにきわめて大きなリソースを必要としてしまい、本研究の対象とするような、あまりデータが充足していない領域には適していないため、後者のアプローチを採用した。PBFでは、薄く敷かれた金属粉末をレーザーで熔融凝固させる、というプロセスが何度も繰り返されており、ある熔融凝固した層は、次の層のベースとなっている。そのため、層ごとに適用されるプロセスパラメータが同一である場合、造形物の中間に位置する層は、同様の構造を有することが想定される。たとえば、積層回数1,000回で造形された多孔質体の最上層は、積層回数2,000回で造形された多孔質体の積層回数1,000回目の層におけるレーザー照射前の状態と見做すことができる。このことから、多孔質体の最上層の構造を観察することで、多孔質体の内部の構造を推定できる可能性がある。内部構造の詳細な観察にはX線CTによる測定などの手法が必要となるが、最上層のような外部に露出している構造であれば、光学的な手法で簡単に評価することができるため、最上層の高さ方向の情報を有する形状データ、最上層の高さ方向の情報を持たない画像データの2つを中間特徴量の候補とした。図7に多孔質孔径を目的関数としたときのパラメータ探索のための天面画像という中間特徴量の利用例を示す。出力や走査速度といったプロセスパラメータを求めるために、最終評価値としてX線CTによる3次元微細構造の測定があり得るが、バルクのテストピースの作成とX線CTの測定に時間がかかる。一方で中間特徴量として天面画像にて、最終評価値を間接的に予測できれば、サイクルタイムを短縮することにつながり、ハイスループット化が見込めるのである。

(2) 天面画像から中間特徴量を抽出するための画像処理

シングルビードで作製される多孔質体の平均孔径を天面画

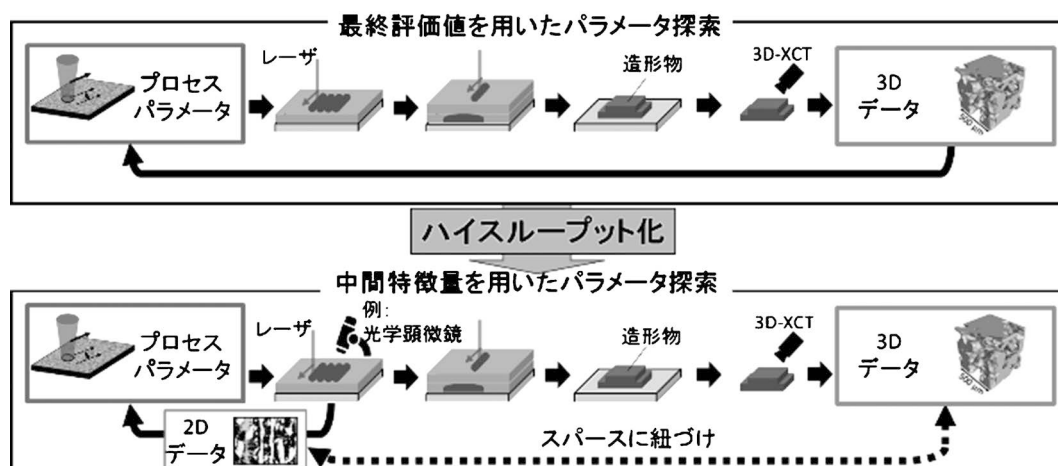


図7 中間特徴量(天面画像)を用いたパラメータ探索の短時間化の概要。

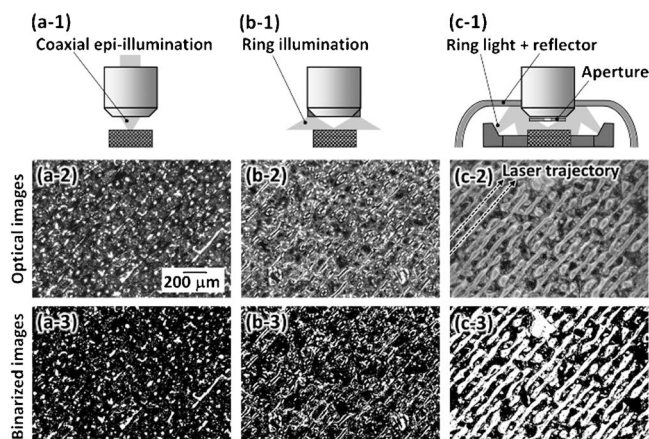


図8 天面画像から二値化により孔径の予測精度を高めるための照明方法 (a) 落射照明, (b) リング照明, (c) リングライト+レフレ板. (-1) 概念図, (-2) 顕微鏡像, (-3) 二値化画像.

像から抽出するためには、最表面の凹凸の凹部分だけを暗く照明を照らす必要がある。図8に3種類の照明を試した例を示す。図8(a)は通常の落射照明でビード内のボーリングしかかっている丘部の頂点が光りすぎることで適さない。次に図8(b)はリングライトを対物レンズの前面に取り付けた例であるが、今度は丘部の周りがリング状に光ってしまいやはり孔径に相当する箇所を暗く照らすには至らない。最後に図8(c)のように、リングライトを対物レンズ対極から照らし、ドーム状のリフレクタとレンズの外周から入る光を遮るアパーチャを取り付けることで、凸部を明るく、凹部を暗く作ることができた。

(3) X線CTの結果と中間特徴量の紐づけ

本セクションでは、2.(2)で示したシングルビードで形成される3次元多孔質体のプロセスパラメータのハイスループット探索のための特徴量抽出に関する研究を紹介する。具体的には、3次元微細構造の情報を、造形中の天面画像から予測する方法である⁽¹⁶⁾。図9(a)に、高精度多孔質体の造形のためのレーザ軌跡を示す。図9(b)には、200 W, 2000 mm/sで造形したバルクのテストピースのX線CT, 共焦点レーザ顕微鏡像(比較のため), 天面光学顕微鏡の例を示す。25個同時に造形した場合の試算した計測時間の高速化度は、共焦点レーザ顕微鏡データ取得はX線CTの5倍の短縮, 光学顕微鏡像取得は18倍の短縮に相当する。

天面画像から3次元多孔質の情報を予測した。図9(c)は、光学顕微鏡像の二値化画像から、レーザ軌跡とレーザ軌跡の間、すなわち孔の幅に相当する値を抽出し、そこから予測された平均孔径とX線CTから得られた実際の平均孔径を比べた結果である。決定係数は0.881と高い結果であり、テストピースをPBF装置から取り出し、X線CTで計測することなく天面画像から、孔径をある程度予測することができることを示している。本事例は、テストピースを取り出して光学顕微鏡測定をしているが、仮に装置内に写真撮影する

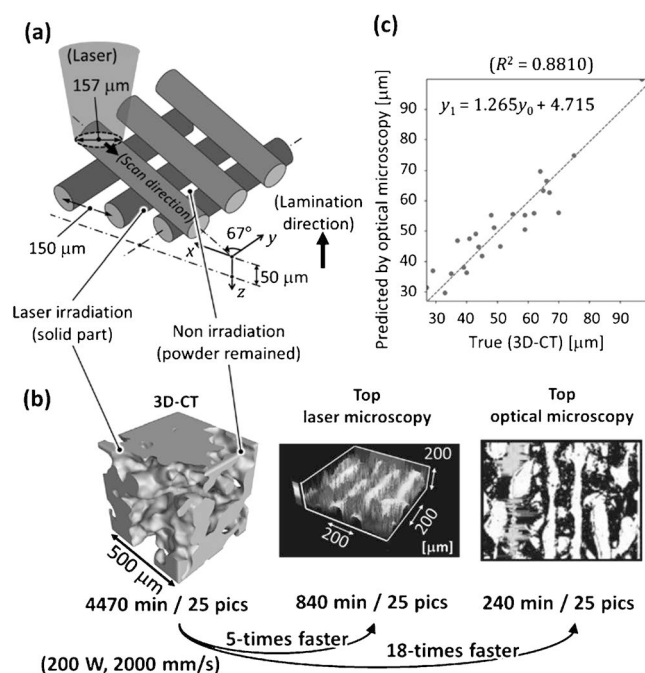


図9 シングルビードで造形する多孔質体の (a) レーザ軌跡, (b) X線CT, 共焦点レーザ顕微鏡, 光学顕微鏡像, (c) 予測された平均孔径.

設備を設けることができれば、18倍を超えるサイクルタイム短縮の可能性を示している。

図10(a)に典型的な3種類のテストピースのX線CTの結果と、出力と走査速度をパラメータとしたときの平均孔径のコンター図を図10(b)に示す。左上、すなわちエネルギーが小さい領域から、右下、すなわちエネルギーが大きい領域にかけて、大きな傾斜が見られる。このことはビードとビードの接触面積が小さい方から大きい方へ遷移する理屈と合っている。一方図10(d)に示した二値化画像を5×5のコンター図に示したものが図10(c)である。絶対値が違うものの、傾斜全体の傾向は似ていて、中間特徴量として活用できる可能性が高い。このコンター図の右下に2か所局所的に大きいエリアが見られるが、最上面のビードとビードが重なりあうところが偶発的にキャプチャされたからだからであると考えられる。このエラーを解決する方法として観察範囲を広げることが考えられる。この方法と同様に、空隙率、孔の分布なども天面画像から抽出された中間特徴量を用いることで、様々な微細構造の目的構造に対するプロセスパラメータ探索のハイスループット化が見込める。

4. 結 論

本稿では、PBFを用いた精密で複雑なラティス構造におけるプロセスパラメータの影響、PBFにより製作された多孔質体がプロセスパラメータの影響を受けることやPBFとプロセスインフォマティクスを組み合わせた事例を紹介した。また、シングルビードで造形する多孔質体のプロセスパ

