

氏名（本籍）	沓掛あすか（愛知県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第618号
学位授与日付	令和4年3月25日
専攻	工学専攻
学位論文題目	粉末床選択的レーザ溶融法における造形条件が内部未溶融欠および表面特性に及ぼす影響 (Influence of process conditions on unmelted defect and surface property in powder bed fusion and selective laser melting)
学位論文審査委員	(主査) 教授 王 志剛 (副査) 教授 植松 美彦 准教授 吉田 佳典

論文内容の要旨

金属積層造形技術は複雑な立体形状を3D CADデータから製造することが可能であり、カスタムメイドインプラントなどの一点ものの医療機器を作製する手法として今後の活用が期待されている。人工股関節等の骨内で使用されるインプラントにおいては、表面の生体親和性に加えて部材強度と延性が求められる。骨内の生体親和性についてはインプラントの表面凹凸が生体活性に影響を及ぼすことが明らかになっており、金属積層造形で造形したインプラントモデルの表面凹凸が生体内に受け入れられる必要がある。また、造形条件の組み合わせが適切でないと造形物に初期欠陥が内包され、機械的特性において特に延性を低下させる。さらに、金属積層造形を普及させるには造形時間の短縮が求められ、本研究では造形条件の最適化が求められている。

これら課題を受けて、当該論文では、安全なインプラント造形を最終目的として、金属積層造形技術の一種である粉末床選択的レーザ溶融法（Selective laser melting, SLM）を用いて作製したインプラントモデルの表面性状と生体活性の関係を調査するとともに、初期空孔が生じないインプラントを短い時間で造形する条件を求める手法を提案し、シングルトラック実験に基づいた未溶融欠陥生成予測モデルの構築に取り組んでいる。

未溶融欠陥生成予測モデルの構築については、まずはマルエージング鋼を対象としたSLMにおいて、エネルギー密度を一定として走査速度およびハッチングピッチの組み合わせを変更して造形した場合の未溶融欠陥生成予測モデルの構築が行われている。レーザパワーを一定とし、走査速度とハッチングピッチの積である塗りつぶし速度が一定となる4条件でシングルトラック実験を行い、レーザ走査方向に垂直な断面の組織観察からビード上面およびメルトプール境界形状をそれぞれ楕円弧で幾何学的にモデル化し、未溶融欠陥生成予測モデルを構築した。また、同様の条件で実際にブロックを造形し、微小引張試験によって機械的特性を評価するとともに、断面組織観察から空孔率を調査し、空孔率が大きい場合、機械的特性が低下することを確かめている。隣り合うトラックの溶融部断面形状がオーバーラップしている高さが積層厚さを超えていることが未溶融欠陥の生成しない必要条件であり、エネルギー密度一定の条件において溶融部オーバーラップ高さが最大となる走査速度とハッチングピッチの組み合わせに最適値があることが示されている。

次に、当該モデルをTi-6Al-4Vを対象としたSLMに適用し、走査速度だけでなくレーザパワーも考慮した未溶融欠陥生成予測モデルを構築し、シングルトラック実験から溶融部オーバーラップ高さを計算することで初期空孔および造形時間の最小化を検討した。レーザパワーおよび走査速度を変更したシングルトラック実験を行い、SLMの初期欠陥の要因であるボーリング現象およびキーホールポアが発生しない条件を求めるとともに、得られた溶融部断面形状から未溶融欠陥生成を回避するハッチングピッチの組み合わせを求めることで初期空孔を最小化する条件が予測可能である。また、走査速度とハッチングピッチの積で求められる一層の塗りつぶし速度から造形時間の最小化も同時に検討でき、初期空孔を最小化しながら造形速度を最大化するレーザパワー、走査速度およびハッチングピッチの組み合わせを求めた。また、本条件でブロックを造形することで造形条件が空孔率ならびにブロック上面の凹凸に及ぼす影響を観察している。

表面凹凸と生体安全性および生体活性、SLMを用いて作製したインプラント表面の生体活性を調査し、造形ままの凹凸面および研磨面における新生骨の形成を、ラット大腿骨を用いた動物実験により調査した。インプラントモデル埋植後2週間の短期では研磨面の生体活性が良好であったが、埋植後8週間の長期においては造形ままの凹凸面で生体活性が高く、SLMの造形肌と研磨面を組み合わせたインプラントを作製することで短期にも長期にも骨固定性が良好なインプラントを作製できることが示唆された。

論文審査結果の要旨

本論文は選択的レーザ溶融法（SLM）を用いた医療用カスタムメイドインプラント造形を目的とし、使用中の破損原因となる SLM 特有の内部欠陥発生条件に及ぼす積層造形条件の影響ならびに積層造形表面の生体活性について検討している。

内部欠陥予測に対して、未溶融欠陥生成予測モデルおよび当該モデルにおける材料特性パラメータを簡易なシングルトラック実験によって決定する手法を提案し、これを用いることで未溶融欠陥を生ずることなく、なおかつ最短造形時間を算出することに成功している。これは汎用性が高く、医療用インプラントにとどまることなく、種々の粉末床積層造形技術に応用できるため工業的価値が高い。さらに、モデル構築においては、SLM の初期欠陥の要因となるボーリング現象および内部空孔欠陥（キーホールポア）が発生しない条件をも考慮しており、実用的なモデルとなっている。また、走査速度とハッチングピッチの積で求められる一層の塗りつぶし速度から造形時間の最小化も同時に考慮し、初期空孔を最小化しながら造形速度を最大化しうるレーザパワー、走査速度およびハッチングピッチの組み合わせを最適化した。また表面生体活性特性に対しては、積層造形表面凹凸ならびに研磨面を有するインプラントモデルを動物実験（ラット大腿骨埋植実験）によって埋植後の短期および長期の骨伝導能および安全性を妥当に検討しており、信頼性の高い知見を得ている。

最終試験結果の要旨

学位審査委員会は、提出された論文の主要部分が、下記に示す既発表の 2 編の査読付き論文から構成されていることを確認するとともに、令和 4 年 1 月 19 日に開催された学位論文公聴会における質疑応答と口頭試問などに基づいて審査を行い、最終試験に合格と判定した。

発表論文（論文名、著者、掲載誌名、巻号、ページ）

1. Influence of Surface Asperity Made by Selective Laser Melting Additive Manufacturing on Bioactivity in Rat Femur, Kutsukake, A., Yoshida, Y., Procedia Manufacturing, Vol.47, pp. 1101-1105, 2020.
2. 粉末床選択的レーザ溶融法を用いたマルエージング鋼の積層造形における造形条件が未溶融欠陥生成に及ぼす影響, 沓掛あすか, 吉田佳典, 児嶋彬, 岡島琢磨塑性と加工, Vol.61, No.717, pp.211-216, 2020.