

Title	選択的レーザ溶融法における時空間入熱制御技術の開発
Author(s)	水口, 佑太
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/96059
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏名 (水 口 佑 太)

論文題名 選択的レーザ溶融法における時空間入熱制御技術の開発

論文内容の要旨

近年、製品の3Dデータを基に材料を付加して積み上げることで3D造形を行う付加製造(AM)技術が次世代のものづくりを担う技術として注目を集めている。AM技術の中でも金属の加工手法として最も代表的である選択的レーザ溶融法(SLM)は敷き均した材料粉末にレーザを照射して材料粉末を溶融凝固して一層の造形を行い、このプロセスを繰り返して積層することで3D造形する手法である。しかし、SLMで作製した造形物は、材料組織の異方性や粒径サイズの不均一性、空隙やスパッタの発生など多くの問題が生じ、機械特性の低下や溶接欠陥の発生が避けられない。そこで本論文では、レーザによるこれらの欠陥形成因子を明らかにし、欠陥抑制プロセスを開発して真のレーザ金属積層造形法を開発することを目的とした。特にレーザを金属粉末に照射する際の入熱制御法として、変調パルスを用いた材料組織の粒径の均一化に取り組んだ。さらにレーザのビームプロファイルを整形して照射すると、スパッタが少なく、しかも基板露出層の発生を防ぎ、空隙の少ない造形プロセスとなることを見出したことも特筆すべき点である。

本論文は5章で構成されている。

第1章は、本論文の序論であるレーザ金属積層造形の概要および課題について述べ、本研究の目的と意義を明らかにすると共に、本論文の構成について述べた。

第2章では、変調パルスレーザによる時間的入熱制御について述べた。造形物の金属組織不均一化を、変調パルスレーザを用いた時間入熱制御によって解決を試みた。連続発振(CW)レーザを用いて作製した造形物と変調パルスレーザを用いて作製した造形物の結晶粒サイズを比較し、変調パルスレーザがチタン合金(Ti64)造形物に与える影響を調べた。その結果、変調パルスレーザを用いた造形物においては、基板近傍から造形物表層にかけての結晶粒サイズの変化が少なく、均一性が向上していることを明らかにした。また、X線回折により結晶相を調べ、変調パルスレーザを用いた場合にTi64造形物中に β 相が析出することを明らかにした。

第3章では、レーザのビームプロファイルを整形し空間的入熱制御について述べた。金属粉末にレーザを照射すると溶融池が形成されると同時に、周囲の粉末が溶融池の表面張力や雰囲気ガスのガス流によって引き寄せられて基板が露出した基板露出層(DZ)が形成される。DZは空隙発生因子となるため、これを抑制する手法の開発が望まれていた。そこでビームプロファイルおよび雰囲気圧力を制御した空間入熱制御によって抑制することを試みた。本章では、チタン(Ti)に比べて蒸気圧が高く、DZの形成が顕著である鉄(Fe)を主成分とするステンレス鋼(SUS316L)を用いた。ガウシアン、リング、フラットトップの3種類のビームモードを整形するとともに、雰囲気圧力を $10 \sim 1.0 \times 10^5$ Paの間で変化させた造形においてDZの幅を計測し、均一なエネルギー分布を持つフラットトップモードにおいてDZの形成が最も抑制されること、および雰囲気圧力300 Pa付近においてDZの形成が最も抑制されることを明らかにした。また、単層造形および積層造形を行い、DZの形成が抑制される条件において造形物の表面粗さおよび空隙率が小さくなるという結果より、DZの抑制が高精度かつ緻密な造形につながることを示した。

第4章では、金属の吸収率が高い青色半導体レーザを用いた吸収率制御について述べた。青色波長のレーザは、光吸収率の機構が電子の強制振動とともに、バンド間遷移の吸収機構を有する。そこでこの吸収機構の違いが造形に与える影響を明らかにするために、1ラインのビード造形を行い、 $(\text{レーザ掃引速度}[\text{mm/s}]) \times (\text{ビード断面積}[\text{mm}^2]) / (\text{レーザ出力}[\text{W}])$ で表すビード形成能 $[\text{mm}^3/\text{J}]$ を定義し、造形効率を比較指標とした。青色半導体レーザで造形したサンプルと近赤外線ファイバレーザで造形したサンプルを比較し、掃引速度が100 mm/s以上の速い時には、青色半導体レーザで造形したビードの方が高い造形効率を示すが、掃引速度が100 mm/s以下の低速の時には、ビードの残留熱効果によってレーザ照射部の温度上昇に伴って光吸収率が増加し、波長による造形効率に差がなくなることを明らかにした。この結果より、青色半導体レーザによる高効率な造形には、高速造形時に優位な差が出ることを示した。

第5章は本論文の結言であり、各種入熱制御手法によってSLMが抱える課題を解決可能であることを示した。時間入熱制御、空間入熱制御、吸収率制御の3つの手法を組み合わせることで、よりエネルギー効率が良く、かつ空隙や表面精度が高く、均一な金属組織を有する金属の3D造形物を作製可能なSLMが実現できる可能性を示唆した。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (水 口 佑 太)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	塚本雅裕
	副 査	教授	近藤勝義
	副 査	教授	林高弘
	副 査	准教授	佐藤雄二

論文審査の結果の要旨

本論文は、選択的レーザー溶融法 (Selective Laser Melting: SLM) においてレーザーによる入熱を精密に制御し、結晶粒を均一化可能かつ、従来に比べて高品質高効率な造形を可能とした SLM 技術を開発することを目的とした。近年、製品の 3D データを基に材料を付加して積み上げることで 3D 造形を行う付加製造 (Additive Manufacturing: AM) 技術が次世代のモノづくりを担う技術として注目を集めている。AM 技術の中でも、金属の加工法として最も代表的である SLM は敷き均した粉末にレーザーを照射して溶融凝固することで一層の造形を行い、このプロセスを繰り返して積層することで 3D 造形を行う手法である。しかし、SLM で作製した造形物は、材料組織や粒径サイズの不均一性、スパッタの発生、空隙の形成など多くの問題が生じ、機械特性の低下や溶接欠陥の形成が課題となっている。そこで本研究では、レーザーによるこれらの欠陥形成因子を明らかにし、欠陥抑制プロセスを開発して真にワンプロセスで製品の製造が可能な SLM 技術を開発することを目的としている。特にレーザーを金属粉末に照射する際の入熱制御法として、変調パルスを用いた材料組織の粒径の均一化について述べている。さらにレーザーのビームプロファイルを整形して照射した際のスパッタ発生ならびに造形物内の空隙の割合値について述べている。

第 1 章は本研究の背景および目的であり、SLM の課題を解決するためにレーザーによる精密な入熱制御が必要であることを述べている。

第 2 章では、変調パルスレーザーを用いた時間入熱制御が造形物の金属組織不均一化に与える影響について述べている。連続発振 (CW) レーザを用いて作製した造形物と変調パルスレーザーを用いて作製した造形物の結晶粒サイズを比較し、変調パルスレーザーを用いた造形物においては、基板近傍から造形物表層にかけての結晶粒サイズの変化が少なく、均一性が向上していること、X 線回折により結晶相を調べ、変調パルスレーザーを用いた場合に Ti64 造形物中に β 相が析出することを述べている。

第 3 章では、レーザーのビームプロファイルを整形した空間入熱制御について述べている。金属粉末にレーザーを照射すると溶融池が形成されると同時に、周囲の粉末が溶融池の表面張力や雰囲気ガス流によって引き寄せられて基板が露出した基板露出層 (DZ) が形成され、空隙発生因子となるため、これを抑制することが重要であると述べている。そこでビームプロファイルおよび雰囲気圧力を制御した空間入熱制御によって抑制することを試みている。チタン (Ti) に比べて蒸気圧が高く、DZ の形成が顕著である鉄 (Fe) を主成分とするステンレス鋼 (SUS316L) を使い、ガウシアン、リング、フラットトップの 3 種類のビームモードを整形するとともに、雰囲気圧力を $10 \sim 1.0 \times 10^5$ Pa の間で変化させた造形において DZ の幅を計測し、均一なエネルギー分布を持つフラットトップモードにおいて DZ の形成が最も抑制されること、および雰囲気圧力 300 Pa 付近において DZ の形成が最も抑制されることを示している。また、単層造形および積層造形を行い、DZ の形成が抑制される条件において造形物の表面粗さおよび空隙率が小さくなるという結果より、DZ の抑制が高精度かつ緻密な造形につながることを述べている。

第 4 章では、金属の吸収率が高い青色半導体レーザーを用いた吸収率制御について述べている。青色波長のレーザーは、光吸収において電子の強制振動とバンド間遷移の 2 つの吸収機構を有しており、この吸収機構の違いが造形に与える影響を明らかにするために、1 ラインのビード造形を行い、(レーザー掃引速度 [mm/s]) \times (ビード断面積

$[\text{mm}^2]/(\text{レーザー出力}[\text{W}])$ で表すビード形成能 $[\text{mm}^3/\text{J}]$ を定義し、これを比較指標として青色半導体レーザーと近赤外線ファイバレーザーとの比較が行われている。掃引速度が 100 mm/s 以上の場合では、青色半導体レーザーで造形したビードの方が高い造形効率を示すが、掃引速度が 100 mm/s 以下の低速の場合では、ビードの残留熱効果によってレーザー照射部の温度上昇に伴って光吸収率が増加し、波長による造形効率に差がなくなること示している。この結果より、青色半導体レーザーによる高効率な造形には、高速造形時に優位な差が出ることを述べている。

第5章は本論文の結言であり、各種入熱制御手法によって SLM が抱える課題を解決可能であることを述べている。時間入熱制御、空間入熱制御、吸収率制御の3つの手法を組み合わせることで、よりエネルギー効率が良く、かつ空隙や表面精度が高く、均一な金属組織を有する金属の3D造形物を作製可能な SLM が実現できる可能性を示している。

以上のように、本論文は従来の SLM の課題であった不均一な金属組織に変調パルスレーザーが与える影響、ビームプロファイルが造形物の空隙形成に与える影響、およびレーザーの波長が造形に与える影響をそれぞれ明らかにし、レーザーによる入熱制御の重要性を示したことから、今後の SLM 技術開発に対し大きな貢献が期待される。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。