

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：82108

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15317

研究課題名（和文）超音波温度モニタリングに基づくレーザ積層造形材の組織形成の解明と制御

研究課題名（英文）Elucidation and control of microstructure formation of laser powder bed fusion based on ultrasonic temperature monitoring

研究代表者

草野 正大（KUSANO, Masahiro）

国立研究開発法人物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・研究員

研究者番号：60822583

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：選択的レーザー溶融プロセスにおける超音波温度モニタリング手法を、逆問題を解くことで確立した。選択的レーザー溶融プロセス中の超音波伝播挙動を実際の測定で観察し、さらに熱解析-超音波伝播解析の連成によって再現した。超音波波形中のボトムエコーの伝播時間は、材料中の温度の増減に伴って周期的に増加・減少し、積層プロセスの進行に伴って増加した。計測された伝播挙動からプロセス中の温度分布を逆解析によって計測することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金属積層造形プロセスの温度モニタリングは、これまで高速度カメラや赤外線カメラを用いた方法で実施されてきたが、計測は材料の表面に限定されていた。一方、本研究による超音波を用いた方法では、材料内部を伝播した弾性波を計測するため、部材内の温度分布を計測することが可能である。実際、金属積層造形プロセス中の材料温度によって、部材の変形や内部欠陥の形成が起こったり、微細組織に影響を及ぼしたりする。そのため、このような材料内の温度を制御することで、より優れた金属積層造形部材を製造を実現できる。

研究成果の概要（英文）：An ultrasonic temperature monitoring method for selective laser melting process was established by solving an inverse problem. The ultrasonic propagation behavior during the selective laser melting process was observed by actual measurements and was further reproduced by coupled thermal and ultrasonic propagation analysis. The propagation time of the bottom echo in the ultrasonic waveform increased and decreased periodically with increasing and decreasing temperature in the material and increased as the selective laser melting process progressed. From the measured propagation behavior, the temperature distribution in the process was successfully measured by inverse analysis.

研究分野：金属積層造形

キーワード：金属積層造形

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

選択的レーザー溶融法 ( Selective Laser Melting、 SLM ) は、金属積層造形法のひとつであり、高出力レーザーによって金属粉末層を選択的に溶融・凝固させ、積層を繰り返すことで任意形状の三次元部材を造形する。鍛造材などを切削加工や溶接接合によって複雑形状部材を製造する従来のプロセスに比べ、金属積層造形は原材料の歩留まりや少量多品種の生産効率性に優れており、また、複数部品の一体成形により製造工程の削減や製品の信頼性向上も期待できる。これらの長所を活かして、航空宇宙分野では、エンジン部品などの複雑形状部材を製造するプロセスとして、SLM の応用が期待されている。

SLM の実用化への課題は、プロセス中に部材に生じ得る割れや変形などの欠陥を如何に抑制するか、また、力学特性や耐食性に優れた材料をこのプロセスでどのように創るか、である。プロセス中のレーザー照射による入熱は数百～数千層にも渡って繰り返されるため、造形部材は複雑な熱履歴を経る。このような熱履歴が原因で残留応力によって造形部材が変形したり、プロセス条件によっては割れや空隙などの内部欠陥なども生じる。また、SLM の熱履歴は、凝固プロセスで形成される微細組織の形状や結晶方位、析出相にも影響を及ぼす。そのため、積層造形材の特性は、プロセス条件に大きく左右される。したがって、SLM プロセスと微細組織や欠陥、材料特性との相関関係の理解が必要不可欠である。

一方、金属積層造形プロセス中の材料温度を計測した事例は多数報告されている。主な手法は、CCD カメラ ( 高速度カメラ ) の画像解析法もしくはサーモグラフィを用いた方法であり、熱源による溶融金属やその周囲の温度計測に成功している。しかし、これらの光学的な手法による計測範囲は材料表面に限定されており、材料内部の温度を計測できない。それに対して、金属材料内を伝搬する超音波 ( 弾性波 ) を用いた温度計測法は、材料内部の情報を得ることができる。超音波を用いた温度計測は二十年以上前から研究されており、近年では計測精度の向上や波形解析アルゴリズムの改良、レーザー超音波法による非接触計測により実用に適う技術となってきた。積層造形法への応用はまだないが、大口径銃内やボイラ炉内の計測例が報告されている。

### 2. 研究の目的

本研究では、超音波を用いた金属積層造形材の内部温度計測法を確立する。一般に、材料を伝搬する弾性波の速度は温度に依存するため、超音波の音速計測によって材料温度が得られる。この原理を応用して、複数の探触子を用いて得た超音波波形を逆解析することで、SLM プロセス中の造形材内部の温度分布を計測する。

### 3. 研究の方法

SLM 装置を用いて SUS304 基材上面への高出力レーザーの高速走査をおこない、同時に図 1 (a) のように基材下部に設置した探触子にて超音波伝播挙動を観察した。パルスレーザからのパルス電圧によって、図 1 (b) の点線で示した探触子 A から超音波振動を送信し、A～C の 3 つの探触子で振動を受信した。オシロスコープでは、探触子からの受信信号とパルスレーザからのトリガ信号を受取り、それに応じて探触子からの受信波形を計測した。また、同じ SLM 装置を用いて、SUS304 基材上にニッケル基合金粉末を原料として円柱サンプルの積層造形をおこない、上記と同様に基材下の探触子にて SLM プロセス中の超音波波形を計測した。

さらに、有限要素解析ソフトウェアを用いた熱解析と超音波伝播解析の連成により、SLM プロセス中の高温材料における超音波伝播挙動を再現した。まず、図 2 (a) のように、熱解析では、レーザー照射による入熱を表面熱流束として与え、3 次元の温度場を計算した。物性には、SUS304 の密度、熱伝導率、熱容量を用いた。次に、熱解析で得られた温度場と温度依存の弾性率と剛性率から、縦波と横波のそれぞれの音速分布をそれぞれ求めた ( 図 2 (b) )。この音速分布を条件として与え、温度場が与えられた場合における超音波伝播挙動を解析した ( 図 2 (c) )。

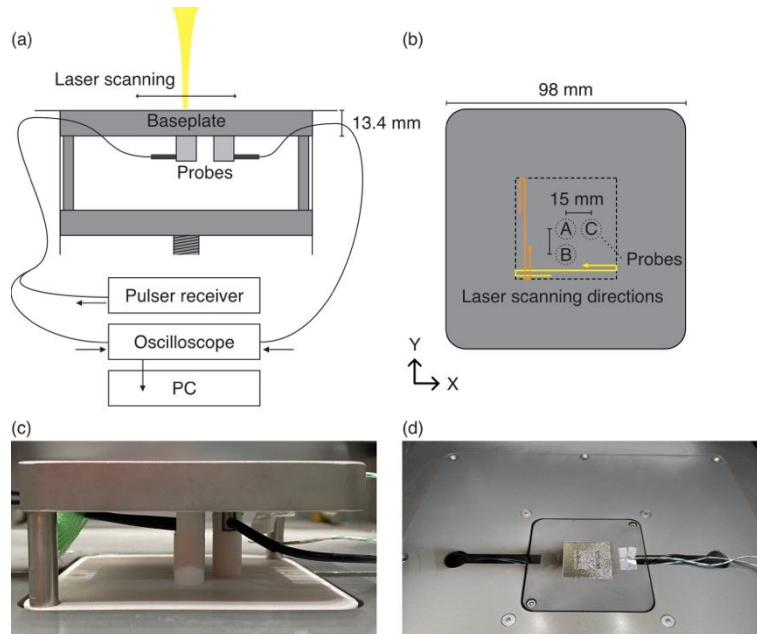


図 1 (a)(b) SLM 装置への超音波探触子設置の概略図、および(c)(d) 実際に探触子を設置した様子。(a)(c) 側面からの図、(b)(d) 上面からの図。

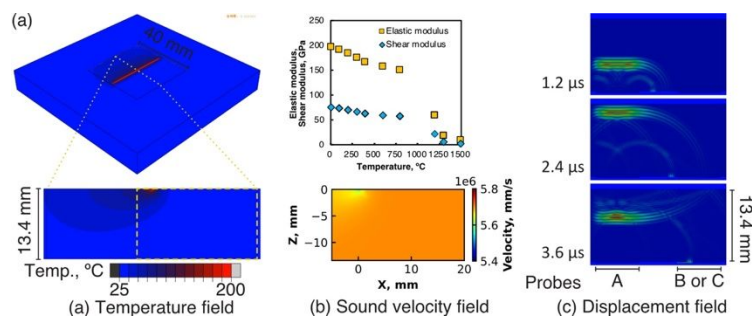


図 2 熱解析-超音波伝播解析の弱連成プロセス。(a) 熱解析による温度場分布、(b) 弾性率と剛性率の温度依存性から得られた縦波の音速場、(c) 音速場を条件として与えた超音波伝播解析（変位場）。

#### 4. 研究成果

熱解析で計算された温度場を図 3 (a)に示す。パート上面にレーザ照射を模した入熱条件が与えられ、その熱源が移動した場合の時間  $t=4.0, 8.0, 12.0$  s における温度場である。熱流束による入熱部が最も高温であり、その位置が時間経過とともに Y 方向へ移動し、熱が周囲へと拡散した。図 3 (b)は、材料中心部分(図 3 (a) 破線部)における表面からの深さごとの熱履歴である。熱流束が破線部を通過する 8.0 s において、表面近傍の温度が急激に上昇し、その後ゆるやかに下降した。また、表面からの距離が離れるほど、温度変化は緩慢となった。この熱解析は、時間的・空間的にマクロなスケールを対象としており、レーザ照射による高速走査による局所的・瞬間的な現象を平均的に扱った結果であると解釈すべきである。

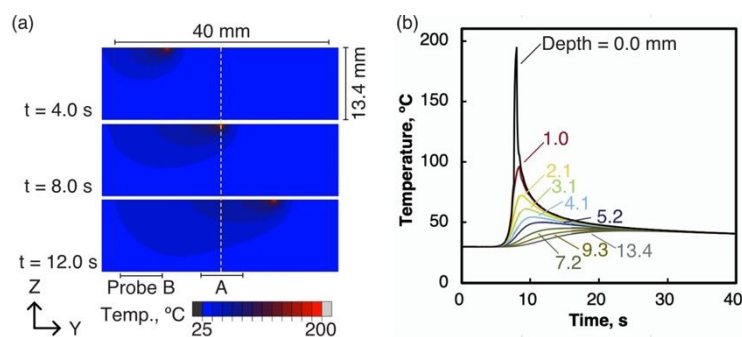


図 3 熱解析による(a) 温度場および(b) 材料中心部の熱履歴。

図 4 (a)は、 $t = 12.0$  s における温度場との弱連成解析で得られた、超音波伝播挙動であ

る。探触子 A から送信された超音波振動は、反対面で反射し、探触子 A と B へと伝搬する。この解析による受信波形と実際の計測波形を図 4 (b)に示す。解析結果から探触子 A では  $5 \mu\text{s}$  近傍のパルス波が縦波の第 1 底面エコーであり、計測波形においても同様にパルス波が観察された。探触子 B についても、解析と計測でほぼ同じ時間の  $5.5 \mu\text{s}$  近傍に第 1 底面エコーが認められた (図 4(c))。図 4(d)(e)は、レーザ照射前 ( $t = 0.0 \text{ s}$ ) とレーザ照射中 ( $t = 12.0 \text{ s}$ ) の第 1 底面エコーの比較である。解析と計測共に、レーザ照射前に対して照射中はパルス波が遅れることが確認された。これは、レーザ照射による昇温で材料の音速が低下したためである。

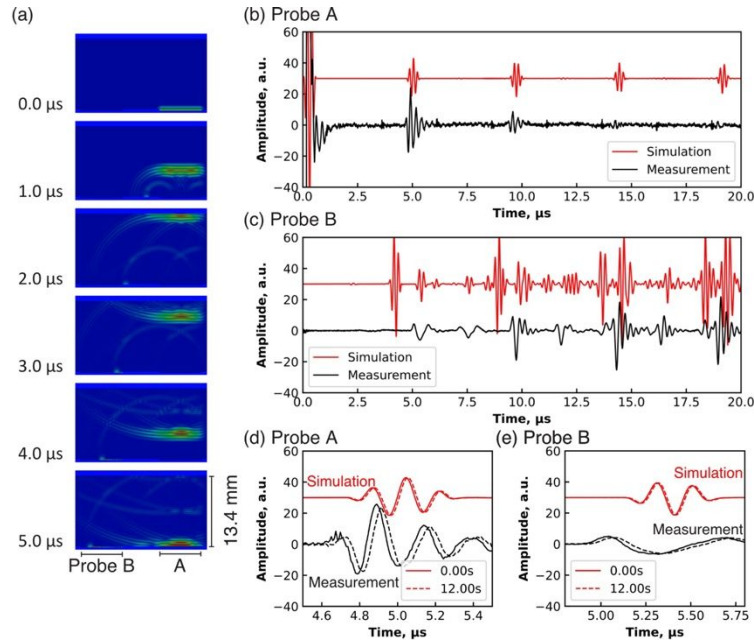


図 4 (a) 超音波伝播解析による変位場。(b) (c) 探触子 A と B それぞれにおける解析と計測による受信波形。(d) (e)レーザ照射前 ( $t = 0.0 \text{ s}$ ) と照射中 ( $t = 12.0 \text{ s}$ ) の第 1 底面エコーの比較。

図 5 (a)(b)は、第 1 底面エコーが最大となる時間を超音波伝播時間 (Time of Flight、ToF) とし、照射前 ( $t = 0.0 \text{ s}$ ) との時間差  $\Delta\text{ToF}$  を  $t$  に対してプロットしたグラフである。計測による  $\Delta\text{ToF}$  は、探触子 A ではレーザ照射後約  $10 \sim 12 \text{ s}$  にかけて、探触子 B では約  $8 \sim 10 \text{ s}$  にかけて増加し、その後、ゆるやかに低下した。探触子 B の方が早く増加し始めるのは、レーザ照射が図 3(a)のように Y 方向に移動するためである。また、解析による  $\Delta\text{ToF}$  は、計測の  $1/3$  程度の値であった。これは、弱連成で用いた熱解析の温度場が、実際の温度よりも低かったことが一因と推測される。熱解析で境界条件として与えた熱流束による入熱量は、レーザ光の吸収率  $A$  で決まり、これは材料の種類や表面の状態に依存するパラメータである。今回の熱解析では  $A=0.3$  と仮定したが、 $\Delta\text{ToF}$  の比較から  $A$  はより大きな値であり、材料温度はより高温であると示唆される。図 5 (c)は、レーザの出力を変えた場合の  $\Delta\text{ToF}$  の時間変化である。3 条件すべてで  $10 \sim 12 \text{ s}$  の  $\Delta\text{ToF}$  の増加が認められたが、レーザ出力が大きいほどその変化量が大きかった。これは、レーザ出力が大きいほど材料がより加熱され、音速がより低下し、パルス波がより遅れるためである。

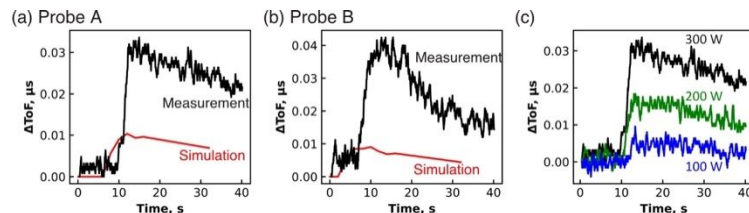


図 5 (a)(b) 探触子 A、B それぞれにおける計測および解析による  $\Delta\text{ToF}$  の時間変化。(c) レーザ出力を 100、200、300 W とした場合の探触子 A で計測された  $\Delta\text{ToF}$  の時間変化。

図 6 (a)は、円柱サンプルの積層造形プロセス開始からの時間ごとの超音波の計測波形である。

$t = 0.0$  の  $7.5 \mu\text{s}$  近傍のパルス波が第 1 底面エコーであり、造形時間の経過に伴って右側にシフトした。これは、積層造形プロセスによって基材上の円柱サンプルが高くなり、超音波伝播距離が延びるためである。図 6 (b)のように、横軸に計測波形の超音波伝播時間、縦軸に積層造形プロセスの経過時間とし、振幅をカラースケールとしてマッピングすると、この傾向は明らかである。また、図 6(c)からも、第 1 底面エコーの  $ToF$  は、造形時間に対してプロットするとほぼ線形に増加したことが確認された。積層造形プロセスの前後で  $ToF$  は約  $1.8 \mu\text{s}$  増加し、ニッケル基合金の音速を  $5500 \text{ m/s}$  と仮定すると、厚さの増加量は約  $4.45 \text{ mm}$  と見積もることができ、実際のサンプル高さに近い値が得られた。さらに、図 6 (c)の時間スケールを拡大すると、図 6 (d)(e)のように、 $ToF$  は 1 層の造形時間と同じ約 12 秒の周期で上昇と下降を繰り返した。この周期的な  $ToF$  の変化は、基材上面へのレーザー照射で観察されたものと同じように、レーザー照射による材料温度の上昇と下降による音速変化に依るものと考えられる。そのため、 $ToF$  の周期的な変化は造形プロセスが終了した  $2020 \text{ s}$  まで観察され、それ以降では材料温度が下がるため  $ToF$  も次第に低下した。

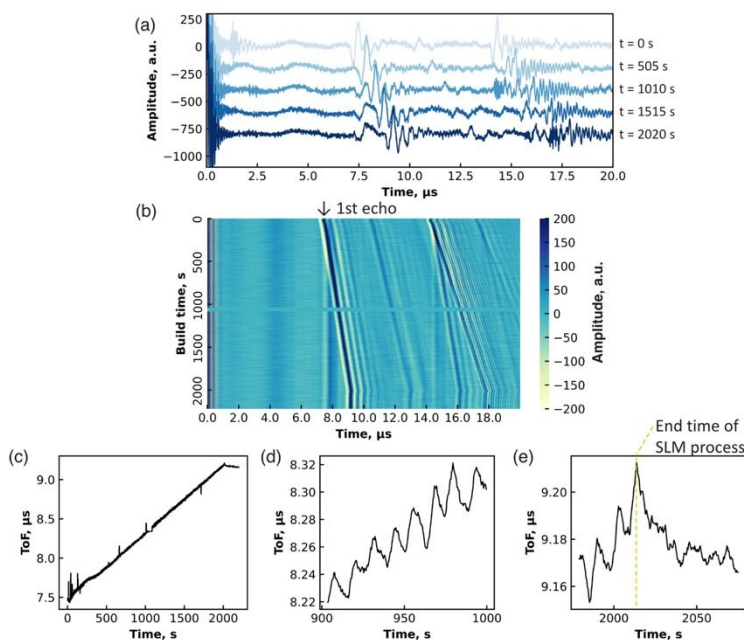


図 6 積層造形プロセス中の(a) 超音波計測波形、(b) 振幅マップ、(c)  $ToF$  の時間変化。(d)(e) プロセス中盤および終盤の  $ToF$  の時間変化。

上記の計測された  $ToF$  から材料内部の温度を求めるのは、いわゆる逆問題である。そこでガウス分布で表される近似温度分布とベイズ最適化とを組み合わせることで、この問題を解くことに成功した。図 7 は、熱解析による温度場(左)と超音波モニタリングによる温度場(右)であり、両者がよく一致していることが明らかである。レーザー照射部の金属溶融が生じる部分では  $50$  以上の差が生じたが、その周囲は  $\pm 10$  以内の誤差で温度を求めることが可能であった。

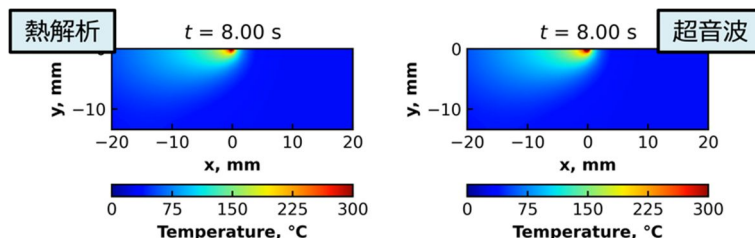


図 7 熱解析による温度分布(左)および超音波モニタリング結果に基づく温度分布(右)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 草野正大, 渡邊誠
2. 発表標題 選択的レーザー溶融プロセスにおける材料温度の超音波モニタリング
3. 学会等名 第 29 回 超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------