



N. Seto

## 「ホットワイヤ方式によるワイヤ 3D 造形の 高効率化」～開発の概要とその後～

瀬渡 直樹\*

### 1. 研究の目的と背景

近年、金属材料の 3D プリントが実用化されてきており、金属粉末等を供給しながらレーザや電子ビームを照射しながら造形する加工が行なわれている<sup>1-3)</sup>。一方、ワイヤのような固体供給型の造形は、造形材料の供給密度を向上できるため、体積の大きな造形でも高速にできることが期待できる<sup>4)</sup>。しかし、ワイヤ溶融のためのエネルギーは熱源から与えるしかないため、高速な造形のためには強力なレーザ等が不可欠である。残念ながら、強力な大出力レーザ発振器は非常に高価であり、レーザの出力だけに頼る高速化/高効率化は実用的とは言えない。

そこで本研究では、ワイヤと基板の間に電流を流して加熱するホットワイヤと呼ばれる溶接で用いられる手法<sup>5-6)</sup>でワイヤを加熱してワイヤ 3D 造形の高速度/高効率化を試みた。

本研究では、レーザを熱源としたホットワイヤ方式のワイヤ造形機を試作した。目標は、すでに市販されている電子ビーム型ワイヤ造形機の造形能力<sup>7)</sup>に匹敵する造形速度として 7 kg/hour 以上とした。また、高温材料のインコネル合金での造形も行い、直線や四角、丸のような単純形状の造形で造形能力や精度の評価も行った。

なお、本報ではその後の技術開発として、開発したホットワイヤ方式のワイヤ造形機の応用研究として、異材溶接への応用トライアルについても簡単に報告する。

### 2. 実験方法

#### 2・1 実験装置の概要

本研究で用いた実験装置の構成を図 1 に示す。レーザの照射部にワイヤが供給できるようにワイヤ供給口を保持できる造形用ノズルを新作り、それを通じてワイヤ供給機からワイヤが供給される。そして、ホットワイヤ電源およびワイヤ供給機は市販のものを調達し、図 1 のように接続して試験片とワイヤの間に電流を流した。

なお、3D 造形するために試験片が固定されているテーブルが 3 次元に移動する必要があるため、図 1 に示すように試験片下のテーブルを XYZ テーブルとし、このテーブルとレーザ発振器、ホットワイヤ電源を制御して加工する制御コンピュータを通じて実験を行った。

本研究で用いた高出力レーザは連続発振で 4kW の YAG

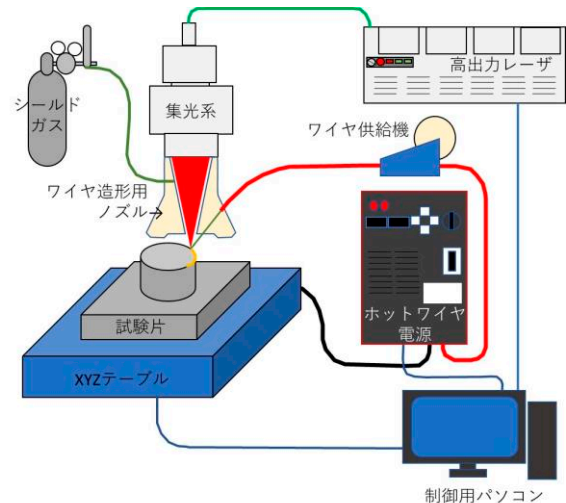


図 1 ホットワイヤ式ワイヤ造形機のレイアウト

レーザで、焦点での集光径は 0.6mm である。また、ホットワイヤ電源およびワイヤ供給機は市販のもので、最大電流が 135A の交流電源である。供給するワイヤについては、材質がステンレス鋼とインコネル 718 であり、ワイヤの直径は 1.2mm のワイヤを供給して積層加工した。

加工実験の一方、加工点の挙動の観察においては、加工点の照明に可視光レーザを用いて、その波長が通過するバンドパスフィルタを付けたカメラで観察した。また、ホットワイヤのワイヤ温度の測定はサーモグラフィを用いてワイヤの温度変化を観察した。

### 3. 研究成果／実験成果

#### 3・1 ホットワイヤのワイヤ温度調査

積層加工では、前の積層の上に次の積層を重ねるため、前の層が安定に加工できることが重要である。すなわち、第 1 層目の積層を安定に行うことが最も重要である。そこで、ホットワイヤ時の温度分布、ホットワイヤ加工時のワイヤや熔融池の挙動など、第 1 層目におけるホットワイヤの効果を研究した。

まずは、ワイヤに電流を流し、加工点であるワイヤと試験片の接点の温度をサーモグラフィで測定した。図 2 にその一例を示すが、ワイヤが試験片と接する点で 900～1200℃を達成した。また、昇温速度はワイヤに流す電流で異なることが確認された。電流が 30A では昇温速度は

\*産業技術総合研究所 製造技術研究部門  
積層加工システム研究グループ 主任研究員

142℃/秒だったが、120A では760℃/秒だった。そのため、積層加工する条件に合わせてワイヤの電流を調整することで、加工点の温度を調整できる可能性が確認された。

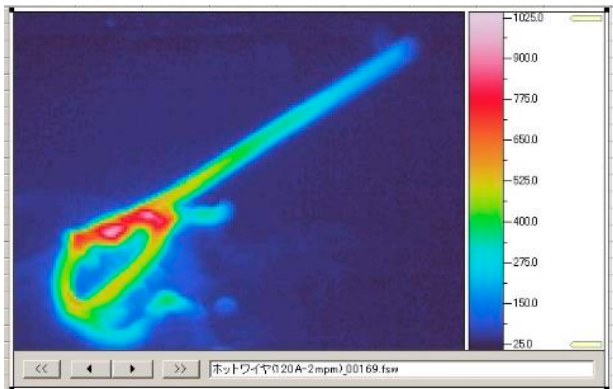


図2 ホットワイヤの温度測定結果の一例

### 3・2 ホットワイヤのワイヤ供給限界調査

ワイヤ造形では、レーザが照射される加工点に供給するワイヤを溶融しながら造形をしていくので、ワイヤが過剰に供給されると、ワイヤの溶融が追いつかなくなり、積層ビードにワイヤが溶着して加工不能になる。そこで、ワイヤが試験片に溶着する時のワイヤ供給速度を限界の供給速度として、ホットワイヤによる加工限界の拡大を調べた。

レーザ出力 2kW で固定して、ワイヤ電流 0A と 60A, 120A の時の第1層目積層を比較した結果を図3に示す。通常のワイヤ供給になる0Aでは、送り速度が3m/minでワイヤの溶着が確認されたが、ホットワイヤで供給されている電流120Aでは、7m/minで供給してもまだ溶着が確認されなかった。この結果より、ホットワイヤによってワイヤの供給速度は2倍以上に向上できることが確認された。この結果より、ホットワイヤにすることで、通常のワイヤ供給に比べて2倍以上の造形速度が期待できる。



	電流 (A)	ワイヤ送り速度 (m/min)						備考
		2	3	4	5	6	7	
	0	○	×					
	60	○	○	△				4m/minで不安定になったので中断
	120	○	○	○	○	○	○	

図3 ホットワイヤによるワイヤ供給速度限界の変化

### 3・3 ホットワイヤの加工点での挙動調査

また、ホットワイヤで積層中の挙動の特徴を調べるために、加工点を高速度カメラで直接観察した。

ワイヤに電流を流さない時の挙動を観察した例を図4<sup>8)</sup>に示す。この時の特徴は、ワイヤが加工点までワイヤのまま供給され、レーザの照射でワイヤが溶融して溶融池に流れ込む状態が安定して継続することで造形されることであった。

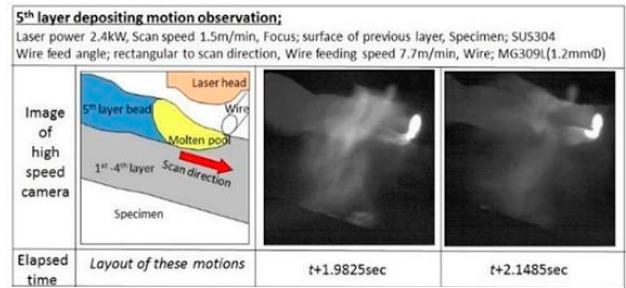


図4 ワイヤ供給型造形中の溶融池近傍の挙動

一方、ホットワイヤで加工中の挙動を観察した結果を図5に示す。この観察はワイヤ電流が120Aの時を観察したものであるが、電流を流さない時と同様にレーザが照射されている所へワイヤが途切れることなく供給され、レーザの照射によってワイヤが溶融して積層されていく挙動が安定的に継続する様子が観察された。なお、電流を流したことでワイヤが赤熱していたため、図5よりも図6ではワイヤを視認しやすい。

このように、ホットワイヤ時の溶融池の挙動は、ワイヤに電流を流さない場合の挙動と同じであり、安定した挙動が続いていることが確認された。

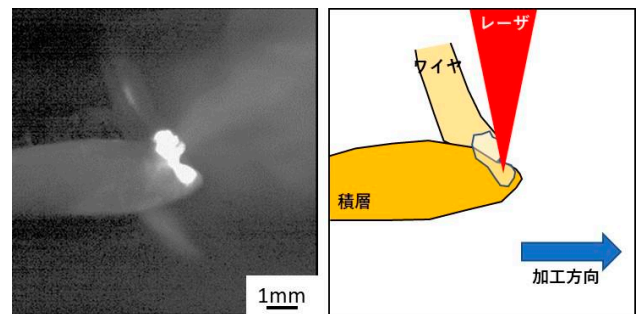


図5 ホットワイヤで供給中の加工点での挙動と模式図

### 3・4 ホットワイヤによる大体積積層の試行

以上の結果より、ホットワイヤ式のワイヤ造形は次のような特徴があることが確認された。

- 加工点のワイヤ温度を1000℃近くに上げられる
- 供給できるワイヤ速度が2倍以上にできる
- ワイヤの溶融～積層の挙動は安定しており、電流を流さない場合と同様。

これらの結果から、ホットワイヤにすることで得られる効果は、純粋にワイヤの温度を上げ、レーザがワイヤを溶融するために与えるエネルギーの量を抑制していると考えられる。

そこで、本節では、ホットワイヤ状態でワイヤの供給速度を大きくして、造形速度の限界を調査した。

高速大体積積層を行うためにレーザの出力を3kWに上げ、ホットワイヤの電流が120Aでワイヤの供給速度も14m/minまで上昇させて第1層目の積層を試みた結果を図6に示す。ビードに太い細いはあるものの、6mm幅、5mm高、74mm長の1層目を約3秒で作成でき、この造形部分



の重さは 6.801g であった。造形部の重さと造形時間から単位時間当たりの造形速度を計算すると、8161.2g/h (8.1612kg/h) であることが確認された。この値は提案時の目標としていた 7kg/h を十分超える速度であり、高速大体積積層ができる可能性を示した。



図 6 高速大体積積層検討の第 1 層ビード外観

### 3・5 ホットワイヤ式の造形テスト

ホットワイヤ方式による高速大体積積層の可能性を確認できたので、ここではホットワイヤ式の造形機を試作し、基本的な形状の造形も可能かを調査した。

図 7 に造形実験のために試作したレーザと加工ロボットの写真を示す。レーザ加工機の集光ヘッドを産業用ロボットに保持させ、加工ヘッドを 3 次元的に取り回すことで加工する。なお、加工ヘッド先端部には、ワイヤ供給機から積層用ワイヤが供給されるノズルがついており、ホットワイヤ電源から電気を供給することでホットワイヤ状態を再現できる機構になっている。



図 7 造形実験用ホットワイヤ装置の駆動部と発振器

造形テストは円筒の造形を試みた。円筒形状を選んだ理由は、円筒には XYZ どの方向の運動も満遍なく含まれているため、試作した加工機に加工方向依存性等があった場合には、その方向の加工だけ劣悪になるという形で明確に確認できるからである。積層条件を調整し、加工条件をレーザ出力 2kW、スキャン速度 1.5m/min、ワイヤ電流 30A、ワイヤ送り速度 4m/min で直径 50mm の円筒を造形した際の挙動を直接カメラでとらえた写真を図 8 に示す。

写真の通り溶融金属の飛沫が時折飛び出すものの、ワイヤは加熱された状態で安定的に加工点に供給され、そこでレーザによって溶融/積層が進んでいることが確認された。

図 8 の造形実験の結果、得られた造形の外観を図 9 に示す。造形物の形状は図の通りきちんと円筒形になっており、積層加工が終始安定に進んでいたことがわかる。また、特

定の方向だけ加工の品質が落ちる加工方向依存性もなく、良好な結果であった。なお、積層に要した時間は約 10 分であった。この結果より、積層条件を適切に調整することで、ホットワイヤ式のワイヤ積層を安定に続けることが可能であることが確認された。

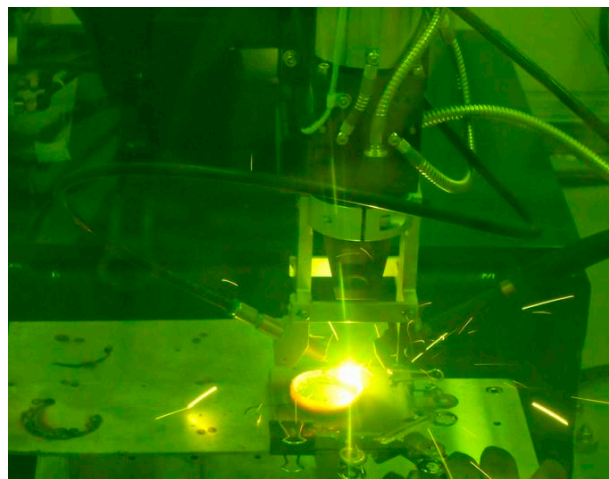


図 8 円筒積層実験中の様子



図 9 円筒積層実験結果の一例と積層中の様子

なお、造形物表面の凹凸はパウダーベッド式 3D 造形や粉末噴射型の DED に比べると粗いため、造形のまま使うことができる例は限られると考えられる。また、造形物の周囲には複数のスパッタが確認されている。これらは造形中に溶けたワイヤや溶融池の一部が液滴としてはじき出された結果であり、ワイヤの脱線を含めて、これらの現象は造形に寄与しない材料の無駄である。これらを抑制できる加工の改良はこれからの課題である。また、レーザを集光させ、更に細いワイヤを使う等で、もっと細幅で精密な造形も期待できるが、それも今後の課題である。

## 4. その後の展開報告

### 4・1 ワイヤ供給型造形の応用先検討

近年は SDGs の流れで「部品を補修して使う」というリペア技術が注目されている<sup>9)</sup>。補修溶接などでは、補修溶

接後に機械加工して仕上げることも多い<sup>10)</sup>。機械加工も併用する場合には、造形物表面の粗さは大きな問題ではなくなるので、ギアの迅速なリペア等にもホットワイヤ式の造形技術が利用できると考えられる。したがって、リペアへの応用が可能か実験しながら検討を進めたいと考えている。

#### 4・2 ワイヤ供給による溶融池成分調整の試行

ワイヤ供給型の造形では、加工点まで材料を固体ワイヤで供給できるために、様々な材料を溶融池に制御しながら大量供給できる。そのため溶融池内の金属成分を自在に制御できる可能性がある。

3D 造形の世界でも、多色積層や傾斜材料のような材料成分が変わる積層<sup>11,12)</sup>が求められているが、すべての材料が全率固溶で安定な合金や化合物になるわけではなく、多くの場合は特定の成分で金属間化合物のような脆い組織を生成して重大な問題を引き起こす<sup>13)</sup>。そこで、ワイヤ供給システムを応用して溶融池内の金属成分調整の可能性を調査した<sup>14)</sup>。

図 10 に Ti と Cr の平衡状態図を示す。図から明らかなように、Cr が 6 割くらいの成分では  $TiCr_2$  という脆い金属間化合物を生成する性質がある。

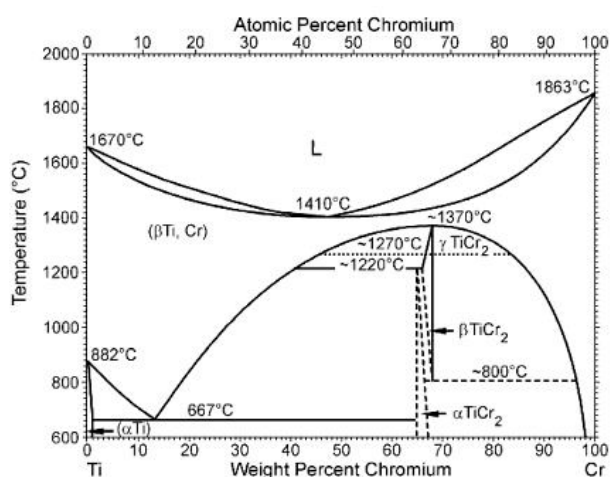


図 10 Ti と Cr の平衡状態図

そこで、図 11 に示すような形で Ti と Cr の溶接部に Ti ワイヤを供給し、溶接金属部の Cr の存在率(希釈率)を調整できるかを検証した。ワイヤ供給速度を変化させて溶接を行い、それぞれの溶接金属部の Cr の希釈率をプロットしたものを図 12 に示す。ワイヤの供給が増えるほどに Cr の希釈率は低下し、溶接金属部内の Cr の存在率は低下する方向に制御できていることが確認された。その結果、C, A, B のプロットになったビードは溶接後に大きな衝撃を与えてもビードが破断することは無く、ワイヤ供給による溶融池の成分調整によって脆い金属間化合物は生成を抑制されたと考えられる。

以上の実験より、ワイヤ供給によって溶融池成分(希釈率)の調整ができ、金属間化合物が抑制できる可能性が確

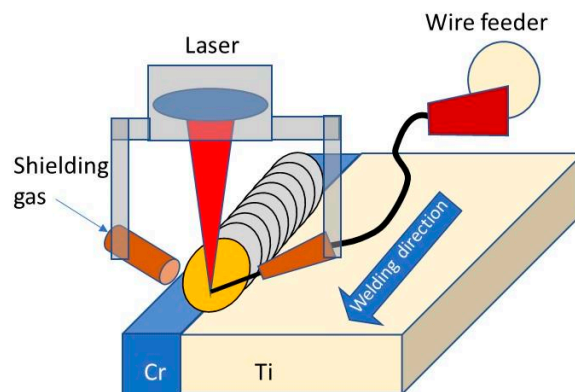


図 11 溶融池成分の調整試行実験のレイアウト図

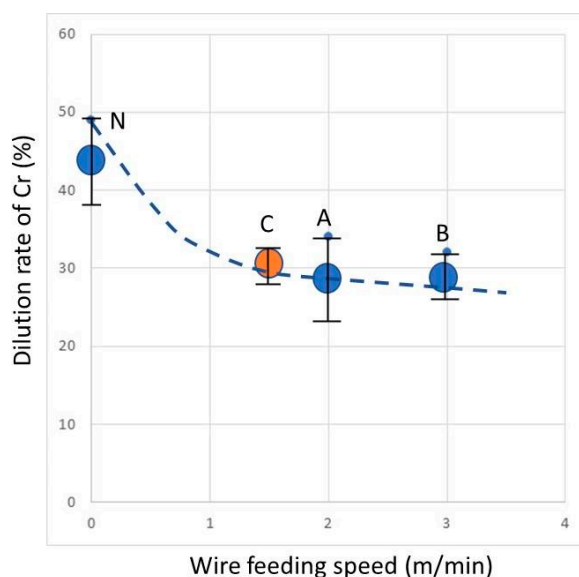


図 12 ワイヤ供給速度と溶接金属部の Cr 希釈率の関係

認された。この結果はワイヤ供給型積層装置で異材溶接ができる可能性を有すると言える。また、この結果は、金属間化合物を生成しやすい材料の組合せによる多色刷りや傾斜材料積層の基礎になる知見でもありと考えられる。

## 5. 結び

本研究では、ステンレス鋼とインコネルにおけるレーザを熱源としたワイヤ供給型金属積層をホットワイヤ化することによるワイヤ 3D 造形の高効率化を研究した。得られた主な成果を以下に示す。

- 本実験装置におけるホットワイヤの先端の温度は 1200°C 付近まで上がることが確認された。なお、昇温速度は、ワイヤに流す電流によって変わることも確認された。
- ホットワイヤとコールドワイヤを比較したところ、ホットワイヤの場合は、コールドワイヤの 2 倍以上の送り速度で送っても加工ができることが確認された。

- 安定に加工できているホットワイヤ時の溶融池の挙動は、ワイヤが溶融池に静かに供給され、そこでレーザーによって溶融して積層になっていくことが確認された。
- 高速に大容量を積層できるかを調べたところ、本装置では積層速度は8.16kg/hを出せることが確認された。この値は目標の7kg/hを十分超えている。
- 造形実験の結果、きちんと円筒形状ができており、積層条件を適切に調整することで、ホットワイヤ式のワイヤ積層を安定に続けることが可能であることが確認された。
- 積層物の外観向上や加工の改善などは今後の課題である。

また、今回得られた主な結果から予想できるレーザーを熱源としたワイヤ供給型 DED の展望としては次のようなものがあると考えている。

- ◇ ホットワイヤにすることで8.16kg/hを達成できているので、レーザー熱源でも電子ビーム熱源のワイヤ DED 装置に匹敵する高速大容積積層加工を実現できる可能性がある。
- ◇ ホットワイヤにすることでワイヤの供給速度の上限が上がるので、ホットワイヤは個体供給型積層加工の高速化には最適な方法の一つと考えられる。
- ◇ また、ホットワイヤでは加工点にワイヤを高温度状態で供給できるので、レーザーの出力が小さい発振器でもワイヤを溶融/積層できる可能性がある。

さらに、その後の検討として、次のような試行を行っている所である。

- ワイヤ供給型造形をギアのリペア等に生かせないか検討中である。
- ワイヤ供給しながら異材溶接することで、溶融池内の成分を調整しながら溶接できる可能性が確認された。
- 溶融池の成分調整は異材溶接以外にも傾斜材料積層や多色積層にも有効な知見と考えられる。

## 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の重点研究開発助成Bにより遂行された。ここに記して関係各位に厚く御礼申し上げます。

また、本研究の推進にあたって、数多くの議論や助言、装置開発時のご協力を賜りました産業技術総合研究所の廣瀬伸吾博士および小木曾久人博士に、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

さらに、平常から本研究に理解を示し、多方面でご協力いただきました積層加工システム研究グループの各位、ならびに製造技術研究部門の各位に心より御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 藤巻 晋平, 和田 一輝, 塩見 康友, 大野 博司, 岡田 直忠, “LMD 方式による高速金属 3D プリントを開発”, レーザ加工学会誌, 24 (1), p.53-55, (2017)
- 2) <https://www.nttd-es.co.jp/eos3d/>
- 3) 佐藤 泰貴, 大槻 真嗣, 馬場 満久, 戸部 裕史, 石村 康生, 北菌 幸一, 竹澤 晃弘, “金属 3D プリントにより造形した月惑星探査機用着陸衝撃吸収材の力学特性”, 日本航空宇宙学会論文集, 第 67 巻 6 号, p. 218-224, (2019)
- 4) 小泉 雄一郎, 千葉 晶彦, 野村 直之, 中野 貴由, “金属系材料の 3 次元積層造形技術の基礎”, まてりあ, 第 56 巻 12 号, (2017)
- 5) 堀 勝義, 渡辺 浩, 明賀 俊治, 草野 和喜, “ワイヤ加熱にパルス電流を用いたホットワイヤ TIG 溶接法の開発 —パルス通電加熱ホットワイヤ TIG 溶接法の研究(第 1 報)—”, 溶接学会論文集, 第 21 巻 3 号, (2003)
- 6) 猪瀬幸太郎, 杉野友洋, 松本直幸, 大脇桂, 大畑和夫, “レーザーホットワイヤすみ肉溶接の開発と都市高速橋梁への適用”, IHI 技報, Vol.52 No.1, p.59-63, (2012)
- 7) [https://www.aichi-sangyo.co.jp/inquiry/news/news\\_160301\\_sciaky.html](https://www.aichi-sangyo.co.jp/inquiry/news/news_160301_sciaky.html)
- 8) Naoki Seto and Hiroshi Sato, “Deposition Conditions for Laser Formation Processes with Filler Wire”, International Journal of Automation Technology (IJAT), Vol.10 No.6 pp.899-908, (2016)
- 9) 平尾雅彦, “持続可能な消費に向けてのアプローチ”, 日本 LCA 学会誌, Vol.18 No.2, p.70-76, (2022)
- 10) 佐々木 英人, 菊池 政男, 古屋 毅文, “アルミニウム合金ダイカスト金型のメンテナンス”, 鑄造工学, Vol.88 No.6, p.358-363, (2016)
- 11) 京極 秀樹, “金属粉末レーザー積層造形技術の進展”, 溶接学会誌, Vol.83 No.4, p.250-253, (2014)
- 12) 小泉 雄一郎, 千葉 晶彦, 野村 直之, 中野 貴由, “金属系材料の 3 次元積層造形技術の基礎”, まてりあ, Vol.56 No.12, p.686-690, (2017)
- 13) 小原嗣朗, “金属材料概論”, 朝倉書店, p.33, (1991)
- 14) 瀬渡 直樹, 立花 晃一, 長谷 泰治, 上瀧 洋明, “レーザーによるチタンと鉄の異材接合に関する研究(第 5 報) —Ti ワイヤ送給による金属間化合物抑制効果の検討—”, 溶接学会全国大会講演概要, p.42-43, (2021 秋季)