ホットワイヤ方式によるワイヤ 3D 造形の高効率化

産業技術総合研究所 製造技術研究部門 主任研究員 瀬渡 直樹 (平成 29 年度 重点研究開発助成 AF-2017203)

キーワード: ワイヤ供給型造形, ホットワイヤ, レーザ造形

1. 研究の目的と背景

近年,金属でも 3D プリンタ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広がってきている¹⁻³⁾.特に金属ワ イヤのような固体供給型の造形は,造形材料の供給密度 を高くできるので,体積の大きな造形でも高速にできる ことが期待できる⁴⁾が,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ので,高速な造形のためには 強力なレーザ等が不可欠である.しかしながら,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/高効率化は実用的ではない.

一方,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いう方法でワイヤを溶接前に加熱して供給する技術は溶接で時々見かけられる手法⁵⁻⁶⁾である.もし,ワイヤ供給型の造形においても,この方法でワイヤを供給することができれば,加工点にワイヤを高温な状態で供給できるので,レーザ等の熱源からワイヤ溶融のために供給すべきエネルギーを抑制でき,固体供給型造形の高速化/高効率化や,小さい出力のレーザでも固体供給型の造形を可能にできる,などの可能性が広がる.

そこで、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、ワイヤ供給型 3D プリンタ の造形性能の向上を図る.目標としては、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⁷⁾に匹敵す る造形速度は7 kg/hour 以上 を目標に開発する.

また,高温材料で直接造形の要望の高いインコネル合金 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う.

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し,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 造形するためには,試験片上をワイヤ供給機 能の付いた集光系が3次元に移動するか,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.本研究 では,試験片の側をXYZ方向に動かせるようにXYZテーブ



図1 ホットワイヤ式ワイヤ造形機のレイアウト

ルを設置し、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 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

ワイヤ供給型の積層加工は,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特に重要で ある.そのため,第1層目の積層を安定に行うことが最も 重要であるといえる.それはホットワイヤでも例外ではな いので,ホットワイヤにすることによる効果や,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溶融池 の挙動など,ホットワイヤの効果を第1層目の積層で研究 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、試験片と接する点で900~1200℃を達成した. なお、図中でワイヤが6の字のようになっているのは、通電中はワイヤが一定速度で供給されるため、それらが試験片と接する点の辺りでとぐろを巻いたからである.



図2 ホットワイヤの温度測定結果の一例

また、ホットワイヤ時の温度変化を調べたところ、図3 のような温度と時間の関係が確認され、このようなグラフ から読み取れる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 142℃/秒だ ったが、120A では 760℃/秒だった.したがって、積層に 合わせて電流の調整が必要であると考えられる.



3・2 ホットワイヤのワイヤ供給限界調査

ワイヤ造形の場合,加工点でレーザが照射されてワイヤ を溶融しながら造形をしていくので,ワイヤの供給が過剰 になると,レーザによるワイヤの溶融が追い付かなくなり, 積層ビードにワイヤが溶着する.そのため,加工中にワイ ヤが試験片に溶着する速度を限界の供給速度とみなし,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 120A の時の第1層目積 層を比較した結果を図4に示す.ワイヤが室温で加工点ま で供給される(ホットワイヤではない)電流 0A では,送り 速度が 3m/min で限界(ワイヤ溶着)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.これは、ホットワイヤでない場合

		ワイヤ送り速度			(m/min)			備考
		2	3	4	5	6	7	
電 流 (A)	0	0	×					Zew. 30 glan
	60	0	0	\bigtriangleup				4m/minで不安定になったので中断
	120	0	0	0	0	0	°~	2K DOA TONA

図4 ホットワイヤによるワイヤ供給速度

に比べて 2 倍以上のワイヤを供給できることと同じなの で,造形効率の大幅な向上が期待できる結果である.

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について,ワイヤに 電流を流さない場合と差異がないかを調べるため,ホット ワイヤで加工中の加工点を高速度カメラで直接観察を行 った.

ワイヤに電流を流さない時の挙動を観察した例を図 5 に示す.このデータは本研究を始める前に確認した⁸⁰もの であるが,特徴としては,ワイヤが加工点までワイヤのま まで供給され,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 がワイヤに電流を流さない時の挙動の特徴である.



図5 ワイヤ供給型造形中の溶融池近傍の挙動

ー方,ホットワイヤで加工中の挙動を観察した結果を図 6 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



図6 ホットワイヤで供給中の加工点での挙動と模式図

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.

3・4 ホットワイヤによる大体積積層の試行

3.1~3.3節の結果より、ホットワイヤ式のワイヤ造形 は、加工点のワイヤ温度を 1000℃近くに上げることがで きること、ワイヤに電流を流さない場合に比べて供給でき るワイヤ速度が2倍以上に上げることが可能なこと、ワイ ヤの溶融~積層の挙動はワイヤに電流を流さない場合と 同様であることが明らかになった.これらの結果から、ホ ットワイヤにする効果は、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 抑制する方向にのみ働いていることが確認された.

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、高い造形速度を達成できるかを研究した.

提案時の目標として、「造形速度は7kg/hour 以上を目指 す」と定めていたので、この目標値を超えるような高速大 体積積層ができるかを実験した.

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 でワイヤの供給測速度も 14m/minまで上昇させて第1層目の積層を試みた結果を図 7 に示す.太い細いはあるものの,6mm 幅,5mm 高,74mm 長の1層目を約3秒で作成できた.このビードを含む試験 片の全体の重さを測定し,試験片の長さ×幅×厚さ×密度 で算出した基板の重さを引き算することで求めた造形部 分の重さは6.801g であった.したがって,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 は当初目標にしていた7kg/hを十分超える速度であり,目 標を達成したと言える.



図7 高速大体積積層検討の第1層ビード外観

なお、ワイヤ造形用ノズルと試験片の隙間は当初は5mm を確保していたが、図7のような大体積積層の実験では条 件によってはノズル底面が積層の頂上と干渉し、積層を押 しつぶす場合もあった.図8にその一例を示すが、大体積 造形にも対応させるためにノズルを改造し、試験片の隙間 を10mmに拡大した.



図8 高速大体積積層時のノズル接触ビード外観例

3・5 造形テスト前の重大なアクシデント

大体積積層実験では,積層量が当初の想定より大きすぎ てノズルのギャップを見直したが,これを修正したノズル を設計し,2層目以降を積層する造形テストを開始した時 に重大なアクシデントが発生した.

積層実験中にレーザが発振しなくなるトラブルが起き たため、加工ができなくなった.そのため、本研究を推進 するために故障の原因を直ちに調査し、修理して復旧でき るようであれば、復旧を試みた.その結果、YAG レーザを 励起するための LD が複数,経年劣化によって損傷し、そ のため発振器内の YAG ロッドを焼損したための停止であ ることが判明した.このように発振器の心臓部に重大な故 障があり、修理が事実上不能であったため、レーザの復旧 を断念した.

そこで、本研究で未だ実施できていない造形実験を行い、 研究を継続するために、故障したレーザの代替となるレー ザを研究所内で探索した.その結果、別件で導入中のレー ザ加工機(最大出力が連続波で2kWのディスクレーザの集 光系を産業用ロボットがハンドルするもの)があったので、 関係者に相談して、これをホットワイヤ造形ができるよう に改造して実験を継続することにした.

このレーザ加工機の制御は,産業用ロボットのプログラ ムでレーザの 0N/0FF やガスの制御なども行うタイプだっ たので,ホットワイヤの供給/停止もこのシステム通じて 行う形へ改造した.加工ノズルについても,ここまでのノ ウハウを反映したノズルをレーザ加工機の集光系に合わ せたものに再設計して装着した.

このようなレーザ加工機の改装と並行して,ロボットの ティーチングや制御のためにロボットの操作習熟につい ても造形実験に先行して実施した.

図 9 に造形実験のために改装したレーザと加工ロボットの写真を示す.本機の主要部分は工業製品ベースであるため,形状をなぞる精度や各種機器の 0N/0FF の制御性能は,基礎実験をしていた自作ベースの機械よりも大幅に向上している.したがって,本機では,形状を伴う造形を中心に実験することにした.



図9 造形実験用ホットワイヤ装置の駆動部と発振器

3・6 ホットワイヤ式の造形テスト

造形実験では、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 10 に示す.



図10 円筒積層実験中の様子

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. また,図10の赤熱している軌跡からも明らかなように, レーザでなぞっている部分はきちんと円形の閉曲線であ り,適正な軌跡で積層していることが確認できる.

図 10 の造形実験の結果,得られた造形の外観を図 11 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



図11 円筒積層実験結果の一例と積層中の様子

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.

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.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℃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、 ワイヤ先端の温度が低いコールドワイヤでは、ワ イヤの送り速度を上げるとすぐに溶着して加工不 能になったが、ワイヤ先端が高温なホットワイヤ 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 でレーザによって溶融して積層になっていくこと が確認された.また、ワイヤが通電によって赤熱 していること以外はコールドワイヤの場合の挙動 とよく似ていることも確認された.
- 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
- なお、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状態で供給できるので、レーザ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.

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曽久人博士に,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

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 プリンタを

開発",レーザ加工学会誌,24 (1), p.53-55, (2017)

- 2) <u>https://www.nttd-es.co.jp/eos3d/</u>
- 佐藤 泰貴,大槻 真嗣,馬場 満久,戸部 裕史,石 村 康生,北薗 幸一,竹澤 晃弘,"金属 3D プリン タ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)
- 猪瀬幸太郎, 杉野友洋, 松本直幸, 大脇桂, 大畑和夫, "レーザ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) <u>https://www.aichi-sangyo.co.jp/inquiry/news/n</u> <u>ews_160301_sciaky.html</u>
- 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)