

熱溶解積層造形法によるダイレクト・プロダクション・システムの開発 —積層形状の高精度化—

中山 信一・橋田 鉄雄・古屋 重彦・古川 進*1

A Direct production System by Adding of Fused Materials

—Smoothing Surfaces of Products—

Shin-ichi NAKAYAMA, Tetsuo KITTA, Shigehiko HURUYA and Susumu HURUKAWA*

要 約

熱溶解積層造形法によるダイレクトプロダクションシステムにおいて、積層造形における最大の課題は積層間に生じる段差の除去である。そこで、まず熔融素材の吐出量、ノズルの移動速度及び積層間隔の制御方法を確立し、極力積層段差が生じないように微細かつ平滑で、しかも高精度な表面形状を確保するための研究を行った。

積層表面の平滑化の方法として、レーザ光を用いた積層段差の凹凸部を除去するための技術を確立するとともに、レーザの熱による除去、あるいは、瞬時に溶解し再凝固時の表面張力で滑らかな表面を得る方法について検討した。また、これらの技術を応用し、統括制御するCAMプログラムの検討を行っている。

1. 緒 言

市販されているラピッドプロトタイプングシステムには、使用材料として樹脂、ワックスおよび紙を使用したものが多い。しかし、最近はモデル形状を確認するだけでなく、金属やセラミックスなど現在使われている製品と同様の材質のモデル、または最終製品を直接製作する装置がアメリカ、ドイツ及び日本を中心に研究が進められ、一部で装置が販売されている。

最終製品としての金属やセラミックス製品をラピッドプロトタイプングで作製するには、光造形法などで作ったモデルを用いたインベストメントキャスト等による間接造形方法及び、金属またはセラミックスでできた最終製品を直接成型する方法とがある。

ここでの直接造形法は、基本的に既にワックスなどで実用化した技術を金属に応用するものである。しかし、ワックスと金属では粘性や加熱温度等が違うため、吐出機構を改良する必要がある。そこで、新たに空気圧とギヤポンプ方式を併用した吐出機構を設計開発して採用した。

本研究は、このギヤポンプに吐出材料として投入する各種素材とそれを積層固化した素材を、YAGレーザを用いて平滑化するための、適正加工条件を求めることを目的としている。

2. 実験装置および実験方法

図1は、実験に用いた二分岐ファイバー付きYAGレーザ加工装置で、その仕様は次のとおりである。



図1 二分岐YAGレーザ加工装置

2-1 二分岐ファイバー付きYAGレーザ加工装置の構成

導入したCWQsw YAGレーザの構成は、次のとおりである。モデルLDP-20MQ (マーキング・切断用) LEE LASER製

- ・ 2分岐ファイバ光学系
- ・ 可変式ビームエキスパンダ2~8倍
- ・ HeNeレーザ
- ・ ビームスプリッタ
- ・ シャッタ (2個)
- ・ ファイバ入射ユニット (2個)

*1 山梨大学工学部機械システム工学科

- ・ G型ファイバコア径 0.6mm×3m (2本)
- ・ 出射レンズユニット (焦点距離 60mm) 2個
- ・ ベースプレート及び安全カバー (一式)

1 軸駆動装置 超音波モータMODEL USR-60 (株)新生工業
 駆動電源 MODEL PS-131 (株)新生工業

2-2 レーザ制御と接合条件

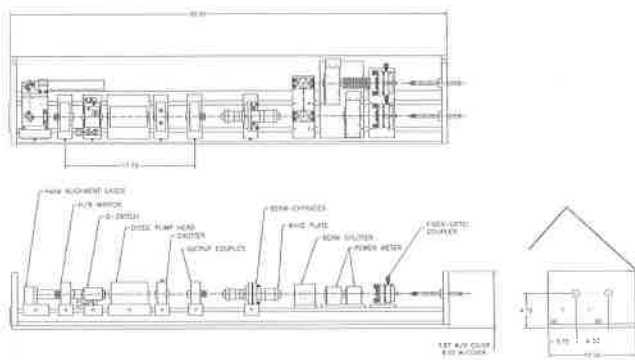


図2 二分岐ファイバ付きYAGレーザ加工装置の光学系

2-2-1 CWQsw周波数とレーザ出力

まず、導入したLD励起YAGレーザ装置のCWQsw周波数における出力を把握するため次の予備実験を行った。

ここでは、CWQswの発振周波数と出力の関係を明らかにした。

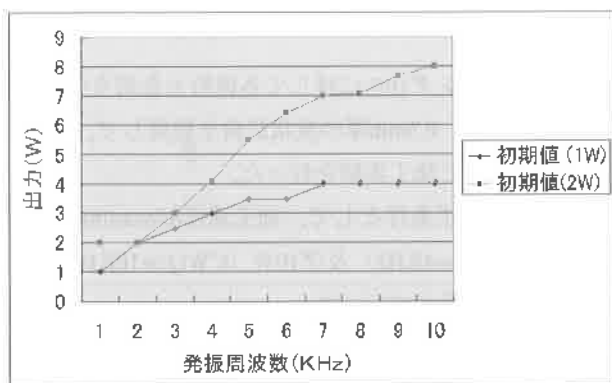


図3 CWQswの発振周波数と出力 (低周波)

この結果、図3のようにCWQswの発振周波数が、1から10kHzと比較的低い周波数においては、周波数の上昇に伴い、出力も上昇傾向にある。特にCWQswの発振周波数が1kHzで初期設定出力を2Wと設定した条件では、その傾向が顕著に現れている。

一方、図4に示すようにCWQswの発振周波数が、1から50kHzと比較的高い周波数において、初期設定が1Wでは10kHzまでは出力が急激に上昇するが、それ以上高い

周波数では約4.4Wと横這いである。また、初期設定が2Wにおいては、15kHzまでは出力が急激に上昇するが、それ以上高い周波数では約10Wで横這いとなる。

このことから、CWQswの発振周波数による適正加工条件の把握において、1から15kHzまでは出力の上昇が大きいため、加工状況においても同様の変化が現れることが想定できる。

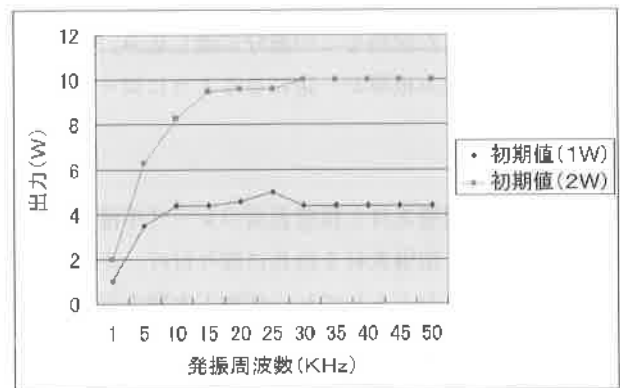


図4 CWQswの発振周波数と出力 (高周波)

2-2-2 粉末金属の種類

実験に使用した粉末金属の種類は、表1のとおりである。なお、粉末金属の平均粒径は全て20μmのものを使用した。

表1 使用した粉末金属の種類と成分

記号	素材名	含有成分
304L	SUS 304L	Cr-18, Ni-8, Mn-0.09, Si-1.0, C-0.03, Fe-Bal
410C	SUS 410C	Cr-11.5, Mn-1.0, Si-1.0, C-0.17, S-0.03, Fe-Bal
430C	SUS 430C	Cr-16, Mn-1.0, Si-1.0, C-0.07, S-0.03, Fe-Bal
S.INV	Fe-31Ni-5Co	Ni-31, Co-5, Mn-0.5, Si-0.2, Fe-Bal
F17Si	Fe17Si	Si-17, Al-0.5, Mn-0.5, C-0.03, S-0.03, Fe-Bal

2-2-3 積層素材の作成

積層造形した粉末金属を焼結するためには、脱脂工程が必要となる。通常の加熱脱脂工程では、肉厚が10mm以上のものは脱脂が困難なことから、本システムでは基本的に超臨界流体を用いた脱脂工程を経た後、焼成して製品を得ることとした。この方法は、脱脂工程での制約が非常に少なく、実用上有望な技術である。今後のレーザ加工実験においても超臨界脱脂工程を踏まえて進めた。

2-2-4 バインダの組成

レーザ加工用の試料は、合成高分子ワックス (ST100) バインダ10wt%に対して各種粉末金属90wt%を容器に入れ、マントルヒータで約100℃に加熱溶解し、均一になるまで混練した。

次に、溶解した試料をポリ袋に入れ、オートクレーブで90℃に保温し電動ローラを通して0.3, 0.4, 0.5mmの均一な厚さにした。さらに、広い面積が必要な試料は、予め厚さ0.5mmのシリコンゴム板に一辺50mmの矩形を切り抜いておき、溶解した試料をこの部分に流し込み、それを上板と下板で挟み込み板厚が一定になるようにローラ仕上げした。

2-2-5 積層素材と積層表面のレーザ平滑化実験

板状に成形した積層素材を治具に取り付け、それを一軸駆動テーブル上にセットしてレーザ加工実験を行った。レーザ加工実験の因子は、レーザ熱エネルギー、CW Q_{sw} 周波数、加工速度、試料の種類、試料の厚さである。

2-2-6 レーザの加工速度による切断状況

S304Lと合成高分子ワックス (ST100) 10wt%とを混合した試料において、0.3, 0.4, 0.5mm厚の試料を用いて、加工速度 (1.8, 3.6, 6.0, 30, 60, 600mm/min) における加工状況を観察した。使用したYAGレーザ出力は、CW 5Wで行った。

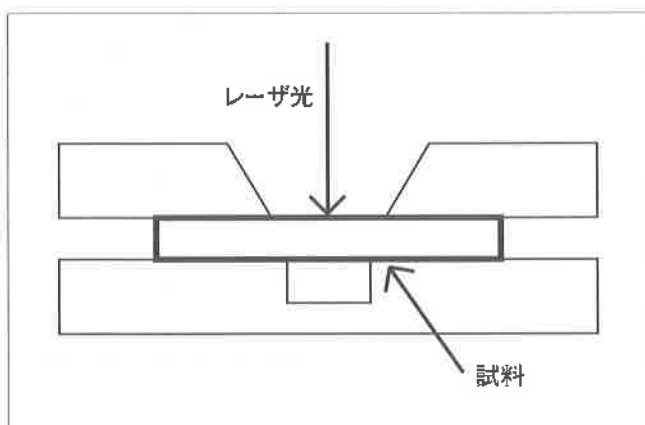


図5 レーザ接合用取付け治具

表2 使用したバインダの種類

記号	組成	
バインダA	パラフィン (80wt%)	ステアリン酸 (20wt%)
バインダC	パラフィン (90wt%)	ステアリン酸 (10wt%)
バインダE	パラフィン (65wt%)	EVA (35wt%)

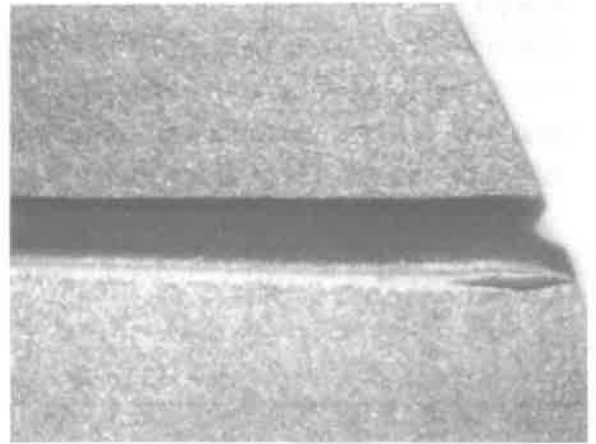


図6 レーザ加工 (SUS304L, 600mm/min, t=0.5mm)

3. 実験結果及び考察

この結果、試料を直接平板に載せた状態でレーザ加工を行ったところ (図6), 全ての条件において瞬間的に切断されるが、切断後溶けたサンプルが平板上に残り、切断部を再度融着する現象が起こった。このため、サンプルと平板とにスペーサを用い隙間をあけた状態で加工を行ったが、殆どのサンプルにおいて再融着現象が現れた。

3-1 バインダの種類による切断状況

次に、上記実験でレーザ切断後融着現象が発生することから、バインダの種類を替え、バインダ10wt%に対し粉末金属90wt%の割合で混合した試料を作成し、レーザ加工実験を行った。使用したバインダの種類は表2のとおりである。

なお、各バインダ10%に対して各種粉末金属を90%の割合で混練した後、0.5mm厚の板状試料を作成して、図5の治具にセットして加工実験を行った。

この場合の加工条件として、加工速度85mm/min、レーザ出力 3W (Q_{sw} 4KHz) 及び10W (CWQ_{sw} 10KHz) の条件において、合焦点で行った。

実験結果から、レーザ出力 3W (CWQ_{sw} 4 KHz) の条件においては、合成高分子ワックス (ST100) と同様に、図6のように全ての試料においてU字状に凹み、裏側は逆に凸形状に加工されている。一方、10W (CWQ_{sw} 10KHz) の加工条件においては、加工した試料の全てが切断出来た。しかし、レーザ光のビーム径が細いにも関わらず、切断幅は1~4mmと非常に広く、バインダの種類によって切断幅が異なっていた。

この原因としては、次のように考えられる。3W程度の低い出力では瞬間的には切断されるが、溶解した材料が直ちに切断部を覆ってしまう。そのためバインダの熱伝導度や比熱の違いはあまり影響してこない。それに対し、10W

まで出力を高めると、熱影響部が広い範囲まで及び、切断幅が広がる。また、バインダの種類により、切断幅が異なるのは、各バインダの熱伝導度や比熱が異なるため、切断部周囲への熱の伝わり方が異なり、溶解の度合いが変わってくるためと考えられる。

3-2 切断性能の良いバインダ

これまでの実験から、切断性能の良いバインダを開発する目的で、パラフィン、EVA及びポリエチレンを主成分としたバインダを使用し、粉末粒径 $20\mu\text{m}$ のSUS304と混練した試料を作成し、加工実験を行った。

なお、この時の試料の大きさは0.3, 0.5, 0.8, 1.0mmを用い、レーザの加工速度は、300, 600, 1200mm/minと比較高速で行った。YAGレーザ出力は、CWにおいては7W, CWQswでは10W (10KHz) の条件で切断を行った。

図7は、レーザ出力がCW発振の場合の加工速度と板厚が加工幅に及ぼす影響を表したものである。

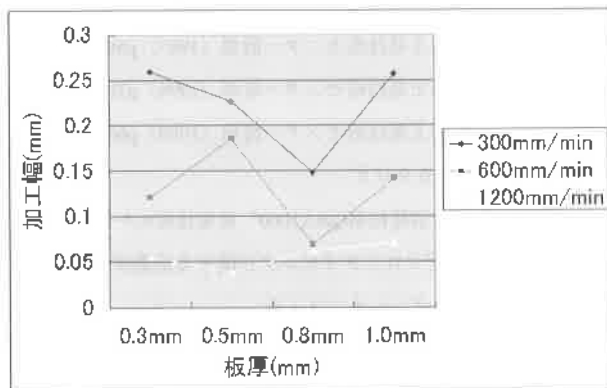


図7 加工速度と板厚が加工幅に及ぼす影響 (CW)

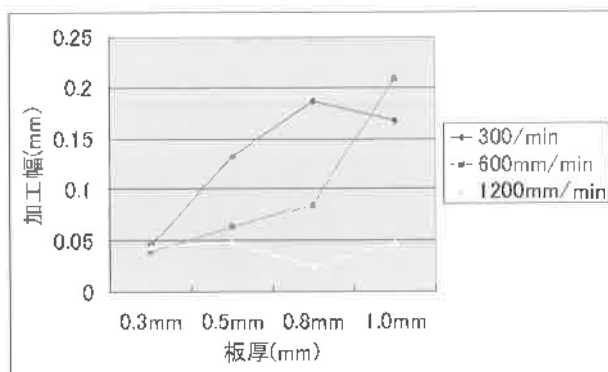


図8 加工速度と板厚が加工幅に及ぼす影響 (CWQsw)

図から、加工速度が300及び600mm/minでは、板厚が0.8mmのとき加工幅が最小となる。加工速度が1200mm/minの場合は、板厚に関わらず0.05mmとほぼ一定の加工幅である。しかし、切断面は良い結果が現れていない。

図8は、レーザ出力がCWQswの場合の加工速度と板厚が加工幅に及ぼす影響を表したものである。

この条件においても、加工速度が1200mm/minの場合は、試料の板厚に関わらず0.04mmとほぼ一定である。加工速度が600mm/minの条件においては、試料の板厚が増すに従い、加工幅が増加傾向にある。加工速度が300mm/minの条件では、試料の板厚が0.8mmにおいて加工幅が0.187mmと最も広く、板厚が1mmでは0.168mmと減少傾向を示す。

以上の結果からレーザ出力がCWとCWQswとを比較した場合、一般的にCWQsw出力の方が加工幅は狭くできる。しかし、図9のCWと図10の加工切断面を比較した場合、CW発振方式のほうがはるかに滑らかな加工面に仕上げることができる。

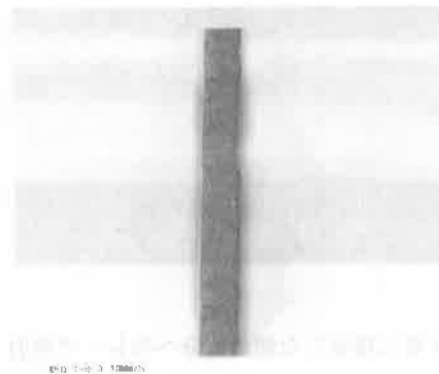


図9 CW発振による加工切断面
板厚0.3mm, 加工速度600mm/min, SUS304L

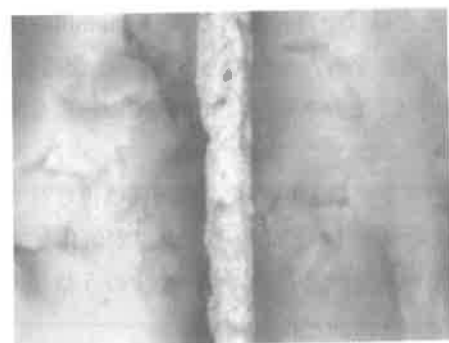


図10 CWQsw発振による加工切断面
板厚0.3mm, 加工速度600mm/min, SUS304L

3-3 溶融法による積層面の平滑化

積層装置により粉末金属を数層積み重ねた場合、上記のとおり積層物を切断して平滑面を得る場合と、レーザ光から発する熱を利用して部分的に瞬時に再溶融と凝固を行い、熱研磨のメカニズムで滑らかな面を得る方法がある。

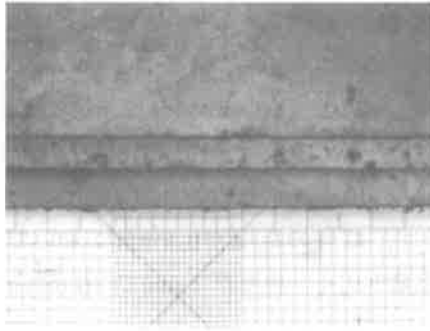


図11 3層に積層したレーザー照射前の試料 (SUS430C)
板厚@0.5mm, バインダA, 最小目盛り0.05mm

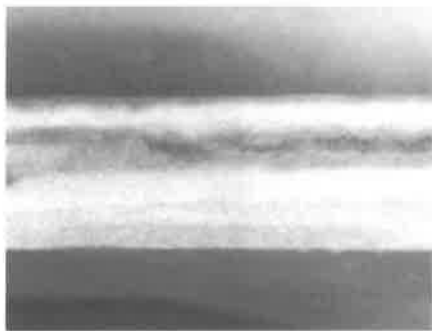


図12 3層に積層した傾斜部分へのレーザー照射
CW 3 W,加工速度85mm/min

図11は、板厚0.5mmの積層素材を3層に積層したものである。図12は、この傾斜部分にデフォーカス10mm上方よりレーザー光をほぼ垂直に照射し、85mm/minの加工速度で加工して平滑面を得たものである。なお、使用した試料は、バインダA, C, Eの3種類にSUS430Cの粉末金属を混入して用いた。

何れのバインダにおいても、平滑面は得られているがバインダEはレーザー熱のによりバインダが気化して肌荒れ現象が現れている。バインダAは、多少のうねりは認められるもののほぼ平滑面が得られた。

CWQswに比べCW発振の方がより平滑面が得られるとともに、この場合の出力は10W以下で十分であることが分かった。

4. 結 言

以上の実験より得られた結果は次のとおりである。

- 1) 粉末金属と合成高分子ポリマの試料における切断実験では、試料の熱伝導度の影響とレーザービーム径が細いため、切断後融合してしまうことが多い。この場合、

アシストガスを使用すると切断可能であるが、切断幅が極端に広がる。

- 2) 粉末金属とバインダを混入することで、融合を防ぎ、レーザーによる切断が可能になるが、切断精度は劣る。
- 3) パラフィン、EVAそれにポリエチレンのバインダに粉末金属を混入した試料は、レーザーによる精密切断及び積層面の平滑化を可能とした。この場合のレーザー出力は10W以下で十分であり、CWQsw比べCW発振の方が良好な切断面が得られる。なお、レーザー光の出射角度の制御法については継続して検討を行っている。

本研究では、金属粉末を混入した熱溶解素材を原料とする熱溶解積層造形装置も試作し、幾つかの小型部品の造形を試みている。さらに、その装置にレーザー発振装置の組み込みも検討しており、今後実験を進める計画である。

参考文献

- 1) 平野英樹：“最新レーザー加工技術総覧”テック出版(1994)
- 2) 中山ほか：山梨県工業技術センター研報(1995) p22
- 3) 中山ほか：山梨県工業技術センター研報(1997) p59
- 4) 中山ほか：山梨県工業技術センター研報(1998) p78
- 5) 中山ほか：山梨県工業技術センター研報(1999) p66
- 6) PSL取扱説明書、カタログ
- 7) 松田福久：“接合溶接技術Q&A1000”産業技術センター(1999)
- 8) 阿部：金属のレーザープロトタイプングに関する基礎研究,1997.8
- 9) LEONIX95 カタログ；レオニクス(株)
- 10) 東芝レーザー加工システムカタログ；東芝精機(株)
- 11) 金属加工用YAGレーザー装置カタログ；NEC(株)
- 12) YAGレーザー；住友重機械(株)
- 13) CW励起Nd：YAGレーザーカタログ；(株)日本レーザー
- 14) レーザ応用技術ハンドブック；朝倉書店