レーザー粉末溶融による消失模型作製の一方方法

紙谷 卓之, 山田 修*, 丸谷 洋二

大阪産業大学 工学部情報システム工学科 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内3-1-1)

*大阪産業大学 教養部 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内3-1-1)

A Method of Fabricating Evaporative Models by Selective Laser Melting

Takayuki KAMITANI, Osamu YAMADA*, and Yoji MARUTANI

Department of Information Systems Engineering, Faculty of Engineering

Osaka Sangyo University, 3-1-1 Nakagaito, Daito, Osaka 574-8530

*College of General Education, Osaka Sangyo University, 3-1-1 Nakagaito, Daito, Osaka 574-8530

(Received February 28, 2001)

In this paper, we propose a new method of fabricating evaporative patterns for vacuum molding and precision casting. Powders of exothermic reactive materials and salt are mixed uniformly and thinly spread. An infrared laser beam scans over the layer of these material powders. Chemical reaction occurs in the irradiated area, and the salt powders are melted by chemical reaction heat and laser energy. After the irradiation, the materials solidify and connect to the lower solidified layer. By repeating the powder spreading and the laser scanning, a 3-D model is fabricated. Since the main component of the model is salt, the model is easily removed from the mold by washing with water. In order to prove this theory, simple layered models were made and their shapes were transferred to silicone rubber and plaster. Copies of the master models were made by vacuum molding and plaster molding.

Key Words: Selective laser melting, Rapid prototyping, Vacuum molding, Precision casting, Evaporative pattern

1. はじめに

注型法は、液状の樹脂を型に注入し、加熱、冷却などにより固化させて部品を作製する方法であり、プラスチック部品の低コストな製造法として広く利用されている¹⁾。その中の真空注型法は、真空を利用して型の細部にまで樹脂を均一に充填する成形法である。そこでは型素材としてシリコンゴムが多く用いられており、模型の周囲を液状のシリコンゴムで包み、硬化後メスで分割して中の模型を取り除き、再度組み合わせて型とする²⁾。

精密鑄造法は、模型を元に作製された型に金属を鑄込むことにより、形状を置換して金属部品を製造する方法である³⁾。そこでは原模型(消失模型)の素材としてワックス(ろう)が多く用いられており、模型の周囲を泥状の鑄型材料で包み、材料が固化した後、加熱してワックスを溶かし出すことによって鑄型が作製される。

3次元CADの普及にともなって、これら真空注型や精密鑄造の原模型を設計データから直接に光造形法^{4,5)}によって樹脂で作製する試みがなされるようになった⁶⁾。光造形法とは、液状の光硬化性樹脂の上を紫外線レーザーで走査して薄い硬化層を形成することと、この硬化層を一層の厚

さ分だけ液中に沈めることを繰り返して、積層模型を作製する方法である。真空注型の原模型を光造形法で作製した場合は、複雑な構造であると模型を取り外す際にシリコンゴムが模型に食いついて、ちぎれるという問題があり⁷⁾、脱型にはかなりの熟練が必要である。また、光造形に用いる樹脂は装置メーカーが供給する特殊なものであって、注型用のエポキシ樹脂などに比べるとはるかに高価なものである。したがって、光造形法でプラスチック部品を大量生産することは採算に合わないし、1個の原模型から複数個の製品を作製する注型法の場合であっても、もっと安価な素材を利用できることに越したことはない。精密鑄造の原模型を光造形法で作製した場合には、脱型は燃焼あるいは溶融後に燃焼することによって行われるが、燃焼ガスの発生や模型が熱膨張することにより鑄型が破損したり、鑄型に灰が残留し鑄物に悪影響を及ぼすという問題があり⁷⁻⁹⁾、脱型にはやはり高度な熟練が必要である。また、燃焼ガスの毒性や前述の樹脂価格の問題もある。

無害で安価な物質として水を用いて注型用の原模型(消失模型)を作製するRapid Freeze Prototyping (RFP)と呼ばれる方法が提案されている¹⁰⁾。この方法では、水を低温の雰囲気下で滴下しつつ氷結させ、それを堆積させていくこと

によって氷の立体模型を作る．しかしながら室温での作業ができない上、水滴が氷結してできる単位氷結体のサイズが不安定なため、上下方向の寸法精度が期待できないという難点がある．

型を使わずに光造形法のようにレーザーを用いてCADデータから金属模型を作製する手法がいくつか検討されている⁶⁾．粉末焼結法¹¹⁾は、バインダでコーティングした金属粉末を薄く敷き詰めることと、その上を赤外線レーザーで走査することとを繰り返して積層する方法である．しかしながら金属粉末がバインダで仮に固定されているだけであるので、模型にするためには融点近くの高温で焼結を行う必要がある．そのため、作製に時間がかかるだけでなく焼成工程に関する高度な熟練を要することが問題となっている．グリーンテープレーザー焼結法¹²⁾は、材料粉末とバインダとで作製したテープを利用し、レーザー焼結とテープの供給を繰り返して積層する方法であるが、模型の強度と密度が問題とされている．Laser generating¹³⁾は、レーザーの照射位置に金属粉末をふりかけて、粉末を加熱、溶融して直接造形していく方法であるが、大出力のレーザーが必要であり、オーバーハング形状を造形できないという問題もある．レーザープロトタイプング¹⁴⁾は、金属粉末の敷き詰めと赤外線レーザーの走査を繰り返して積層する方法で、粉末を溶融にまで至らせて金属模型を直接造形するものである．しかしながら寸法精度の向上、熱による変形や残留応力などが問題点として残されている．

ここでは食塩を主成分とした粉末をレーザー走査し、選択的に溶融・再凝固した層を積み重ねて立体模型を作製する方法を試みた．食塩は水溶性であるので、水洗いにより型を破損することなく模型を除去でき、脱型の工程に高度な熟練も焼成炉などの設備も不要になる．また、水洗いに用いた排水を再処理する必要がなく、素材の価格も安価であるなどの特長がある．以下、模型作製の原理と、粉末の溶融と積層の実験、注型と鋳造の簡単な実証実験を行った結果について述べる．

2. 模型作製の原理

積層造形は、立体模型を作製する手法の一つである．3次元形状を表すデジタルデータをもとに、等間隔に平行な平面で切断して断面形状を求め、薄い固体層を断面形状にしたがって形成し、順次に積層して全体を作製する¹⁵⁾．本研究では固体層を形成する手法として、Fig.1のように粉末状素材を敷き詰めて赤外線レーザー光で選択的に溶融・再凝固させる方法を用いた．食塩(NaCl)の融点は800℃、沸点は1467℃であるから、食塩粉末を融点以上かつ沸点未満の温度になるよう加熱すれば、食塩粉末を溶融させることができる．しかしながら固相の食塩は、局所加熱用レーザーとして代表的なCO₂レーザーの発振波長10.6μmにおける透過率が厚さ10mmの場合で91%と非常に高く¹⁶⁾、レーザー光を照射して食塩を溶融することは容易ではない．そこで反応性の素材を食塩に混合し、素材によるレーザー吸収熱に化学反応熱を付加することによって食塩を溶融することを試みた．収束した赤外線レーザービームに

Fig.1 Selective laser melting.

よって食塩と反応性素材の混合粉末上を走査する．レーザー照射部では、反応性素材が熱エネルギーを吸収して化学反応を起こし、その化学反応熱が素材のレーザー吸収熱に加えられて食塩粒子の表面が溶融する．走査後は冷却され、隣り合う粒子同士が接合して、走査軌跡形状の凝固物が形成される．凝固層の上にさらに混合粉末を薄く敷き詰めてレーザー走査することにより、断面形状を形成させつつ下層との接合を行う．このようにして粉末の敷き詰めとレーザーの走査を繰り返すことにより、食塩を主成分とした立体模型が作製される．粉末を積層してから部分溶融する方法であるので、垂下部を造形する際に下方からのサポートを設ける必要が無い．

3. 模型作製の基礎実験

3.1 実験装置

Fig.2に実験装置を示す．レーザービーム走査装置としてレーザーマーカ(LP-110:サンクス(株))を利用した．このレーザーマーカは、レーザーヘッドとコントローラーで構成され、レーザーヘッドには発振波長10.6μm、最大出力20W、TEM₀₀モードのCO₂レーザーが備えられている．ビーム走査方式は、2軸ガルバノスキャニング方式である．ビーム出射口の下方に、シリンダーを固定し、そのシリンダー内部には上下方向に可動する円形テーブルを配置した．シリンダーヘッドからテーブルを所望の高さだ

Fig.2 Experimental system.

け降下させ、そこに素材である食塩と反応性素材の混合粉末を敷き詰め、その上からレーザービームを照射する。照射位置におけるビームスポット径は理論値で110 μ mである。食塩は市販されているままでは粒径が大きいので、ミルにより粒径100 μ m程度に粉碎し、充分乾燥させたものを用いた。

パソコン上のCADソフト(CANDY6：(株)アスキーサムシンググッド)で作成した形状データをレーザーマーカに転送し、レーザーパワーと走査速度を設定した後に走査を開始させる。これによりレーザービームで粉末上に所望の形状を描くことができる。

3.2 食塩のみによる部分熔融実験

本手法ではレーザーを走査した範囲が熔融・再凝固し、かつ凝固層間が接合する必要がある。そこでまず、反応性素材無しの場合について部分熔融実験を行った。実験装置のテーブル上に食塩粉末を厚さ3mmで敷き詰め、その上を出力20Wのレーザービームで走査した。しかしながら、やはり食塩の赤外線透過率が高いため、走査速度を1mm/secまで遅くしても粉末には何ら影響がなく、部分的な熔融が起こらないことがわかった。

3.3 発熱反応性素材の混合による部分熔融実験

小出力レーザーにより実用に供するレベルの走査速度で食塩を熔融させるためには、熱を充分に吸収するような素材を混合するか、レーザー光の照射によって発熱するような素材を混合する必要があると考えられる。ここではレーザー照射エネルギーの低減をねらって後者を選択し、発火をともなう発熱反応の一つである燃焼合成¹⁷⁾の起こる素材の粉末を混合した。また食塩の沸点を考慮し、燃焼合成の中では生成熱の比較的小さなCuとAl₂O₃の混合体を合成する系を選択した。この燃焼合成の化学反応式は

で表され、標準生成熱は $-\Delta H_f = 38.8\text{kJ/mol}$ である。素材中のCuは、発熱量を制御する目的で非反応物質としてあらかじめ添加した生成物である。平均粒径がそれぞれCuO：1～2 μ m、Cu：15 μ m、Al：27.6 μ mの粉末を、モル比でそれぞれ10%、84%、6%にして混合した。

まず、反応性素材の粉末と食塩粉末を重量比で1：3に混合してテーブル上に厚さ3mmで敷き詰め、その上から16Wのレーザービームを1mm/secの速度で走査した。走査軌跡は2つの楕円を交差させた形状とした。レーザー光が照射されると、照射領域の反応性素材に瞬時に着火し、レーザーによる加熱に化学反応熱が付加されて食塩粉末の表面が熔融する。走査後は自然冷却により即座に凝固し、粉末同士が固着する。Fig.3に走査終了後のシリンダ内の凝固物と周囲の粉末素材の様子を示す。図より交差部分も含めて走査領域全体が固着していることがわかる。このように反応性素材を混合して熱を補えば、小出力のレーザーでも食塩を熔融可能であることがわかった。

本手法は、細いビームを用いた非接触加工であり、切削加工のような力学的加工に比べて原理的に壁が薄く寸法

Fig.3 An solidified object and powders around it. (reactive materials : salt = 1 : 3 in weight ratio, laser power: 16 W, scanning speed: 1mm/sec).

精度の高い模型を作製できる。そこで次に、壁の厚さや寸法精度に直接関係する凝固幅に対して、反応性素材粉末と食塩粉末の混合比やレーザーエネルギーが与える影響を調べた。ここで凝固幅とは、凝固物の上面すなわち深さ0における走査軌跡の接線に垂直な方向の寸法をいう。Fig.4 (a)～(c)にビームスポット径が110 μ mの場合の実験結果を

(a) laser power: 16W

(b) laser power: 8W

(c) laser power: 4W

Fig.4 Relationship among laser power, scanning speed, mixing ratio, and solidified width. (RM = Reactive Materials).

示す。図より次のような傾向のあることがわかった。

- (1) 反応性素材の混合比が高いほど、食塩粉末の溶融に必要なレーザーエネルギー[W/mm/sec]が小さく、凝固幅も大きい。
- (2) 反応性素材の混合比が同じ場合、レーザーエネルギー[W/mm/sec]が大きいほど、凝固幅が大きい。

発熱エネルギーは反応性素材の混合比に比例する。よって凝固幅を狭くして精密な模型を作製するのであれば、熱エネルギー、すなわちレーザーエネルギーや反応性素材の混合比を小さくすれば良い。

3.4 積層実験

反応性素材粉末と食塩粉末を重量比で1:3に混合した材料を用いて、次の3つの工程を繰り返し行うことにより積層模型の作製を試みた。

- ① テーブルを1層分の高さだけ降下させる
- ② 粉末を敷き詰める
- ③ ビームを走査する

3.3の結果をもとに実験条件を次のようにした。

レーザーパワー：16W

走査速度：1mm/sec

層厚み：0.5mm

Fig.5に積層数を10として作製した模型の例を示す。図のように上下層間が接合され、安定に造形されていることがわかる。粒径が100 μ m程度の食塩を用いて作製したので、表面に凹凸のある模型となった。もっと細かく食塩を粉碎すれば、空隙を少なくして敷き詰めることができ、また粒径が小さい分だけ模型表面の凹凸も小さくできるので、寸法精度を向上できると考えられる。一層当りの走査時間は約77秒で、手作業で行ったテーブルの降下と粉末の敷き詰めに一層当り約50秒要し、模型全体の作製時間は約22分であった。燃焼合成を起こす素材には様々な物があり、より生成熱の大きな反応性素材を用いれば、走査速度を速めてレーザー熱エネルギーを小さくしても、食塩が溶融する可能性がある。素材選定による走査速度の向上と工程の自動化を行えば、作製時間の短縮が望める。

Fig.5 An example of the layered model.

4. 形状の転写と複製

ここでは、注型や鋳造への応用の可能性を調べるため、シリコンゴムおよび石膏への形状の転写を試みた。

4.1 シリコンゴムへの転写と注型

まず液状のシリコンゴム(シームレスシリコン：国際クラフト(株))で積層模型を覆い、シリコンゴムを真空槽内で充分脱泡した後、恒温槽内で硬化させた。次に模型の外周囲のシリコンゴムをメスで切開し、全体を水に漬けて水洗いした。反応生成物であるCuとAl₂O₃、および未反応の状態に残ったCuO、Cu、Alの粉末は、模型の中に点在していたが、構造材料である食塩が溶け出すことにより、これらも切開部分から細かい粒塊として流れ出た。模型の除去に要した時間は2~3分であったが、温水を用いれば除去時間は短縮できると考えられる。模型除去後、模型の内側部分となるシリコンゴムをメスで切断し、上下2つの型に分割した。これらを再度組み合わせ、内部にエポキシ樹脂(GM-9002：(有)ブレニー技研)を注入し、加熱して樹脂が硬化してから型を外した。Fig.6は、積層数7の模型から作製した注型品である。図に示すように水溶性模型を元にして注型品が作製できることを確認した。

4.2 石膏への転写と鋳造

食塩を主成分とした模型はそのままでは潮解性があるので、まず初めにフッ素系離型材(ダイフリーA741：ダイキン工業(株))で積層模型表面をコーティングした。次に模型の下半分を石膏で覆って固化させ、境界面に当たる石膏面に離型材を塗布して、さらにその上から石膏を流し込んで模型を完全に覆った。石膏が固化した後、溶融金属を流し込む湯口から模型表面のコーティングの一部を破り、全体を水につけて4.1と同様にして内部の模型を洗い出した。境界面で上下2つの型に分割し、イソプロピルアルコールで洗浄して型の内側と境界面の離型材を除去した。これらの型を恒温槽内で乾燥させてから組み合わせ、溶融した鉛を流し込んだ。最後に型を外して中身を取り出した。以上の手順によって、積層数10の水溶性模型からFig.7

Fig.6 An example of the plastic molding.

Fig.7 An example of the lead casting.

に示す casting 品が作製できた。溶融金属が型の隅々にまで充分に行渡らなかった形跡が見受けられるが、これは溶融金属の温度が低く、その表面張力や粘度が大きかったこと、ならびに湯口が短か過ぎて湯口部分の溶融金属の重力だけでは、型内部の溶融金属に十分な押圧を加えられなかったことなどによると推測される。金属を充分加熱して流動性を高めてから型に流し込むことと、湯口を長くする、あるいは湯口の上に湯溜り（溶融金属の溜り）を設けるなどして型内部に溶融金属を充分に押し込んでやることにより、 casting の精度を向上できると考えられる。

5. あとがき

注型および casting 用の原模型（消失模型）の作製を目的として、赤外線レーザーにより食塩を主成分とする粉末を選択的に溶融・再凝固させて積層模型を作製する方法を提案した。食塩は赤外線透過率が高く単独ではレーザー走査により溶融することが難しいので、燃焼合成と呼ばれる化学反応を起こす素材粉末を混合し、その反応熱を付加す

ることにより溶融させた。この模型は主成分が食塩であるので、模型周囲を型材料で覆った後に水洗いすれば、型から簡単に除去することができる。提案方法の実証を目的として実際に簡単な積層模型を作製し、その形状をシリコンゴムと石膏に転写した。さらに、それらの転写型を利用して注型品、 casting 品を作製した。今後の課題として、積層模型の寸法精度の向上と作製時間の短縮とがあげられる。

参考文献

- 1) (社)高分子学会 編；プラスチック加工技術ハンドブック（日刊工業新聞社, 1995）.
- 2) 中川 威雄：型技術 **12** (1997) 18.
- 3) (社)日本機械学会：機械工学便覧 応用編 B2 加工学・加工機器（丸善, 1984）.
- 4) 中井 孝, 丸谷 洋二：レーザー研究 **16** (1988) 14.
- 5) 丸谷 洋二, 中井 孝：レーザー研究 **17** (1989) 410.
- 6) 丸谷 洋二：レーザー研究 **24** (1996) 467.
- 7) 門 格史, 原 信彦, 吉村 一彦, 中下 和俊：第16回ラピッドプロトタイプリングシンポジウム講演論文集（1999） p.125.
- 8) 村松 磐, 箕輪 幸三, 笹川 俊夫, 増田 伸二, 孟 陽：第16回ラピッドプロトタイプリングシンポジウム講演論文集（1999） p.101.
- 9) 清水 竜朗, 渡辺 徹哉, 後藤 基浩, 小永 幹夫, 鈴木 朝夫：第19回ラピッドプロトタイプリングシンポジウム講演論文集（2000） p.71.
- 10) W. Zhang, M. C. Leu, Z. Ji, and Y. Yan: *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, Austin, 1998 (The University of Texas at Austin, 1998) p.185.
- 11) S. Das, N. Harlan, J. J. Beaman, and D. L. Bourell: *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, Austin, 1996 (The University of Texas at Austin, 1996) p.89.
- 12) 前川 克廣, 小川 慧, 大島 郁也, 横山 雄一：精密工学会誌 **64** (1998) 1340.
- 13) W. König, T. Celiker, and H. J. Herfurth: *Proceedings of the 2nd European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, Nottingham, 1993 (The University of Nottingham, 1993) p.303.
- 14) F. Abe and K. Osakada: *International Journal of the Japan Society for Precision Engineering* **30** (1996) 278.
- 15) 中川 威雄, 丸谷 洋二 編著：積層造形システム（工業調査会, 1996）.
- 16) 福見 俊夫, 安井 至, 植月 正雄 編：光学材料ハンドブック（(株)リアライズ社, 1992）.
- 17) 山田 修：科学と工業 **65** (1991) 460.