

レーザーを用いた金属モデルの3次元造形

阿部 史枝・小坂田宏造

ラピッドプロトタイプング (rapid prototyping: RP) は、設計した3次元CAD (computer-aided design) データから3次元モデルを迅速に得るために、10年ほど前に開発された技術である^{1,2)}。RPは積層造形法 (layered manufacturing) とよばれ、CADデータから得られた2次元スライスデータから薄い層を作製し、薄層を順次積層する付加加工により3次元モデルを作製する (図1)。また切削などの除去加工では作製することのできない複雑な形状も自由に造形することができるため、自由形状造形法 (solid freeform fabrication) とよばれる場合もある。

現在までに開発されているRP技術は大別すると次の4種類にわけられる。①紫外線レーザーを紫外線硬化樹脂上に照射することでモデルを造形する光造形法。②材料に粉末を使用し、レーザービームを照射することで局部的に焼結・溶着固化させモデルを造形する。または、粉末に接着剤を塗布することでモデルを造形する粉末溶(固)着法 (selective laser sintering: SLS など)。③ひも状やプレート状の熱硬化性樹脂を細いノズルから溶融させながら出し、モデルを造形する溶融紡糸堆積法 (fused deposition modeling: FDM)。④紙や樹脂薄板をレーザーやカッターを用いて断面形状に切断し、順次積層することでモデルを造形する薄板堆積法 (laminated object manufacturing: LOM)。これらの手法は、設計における形状確認のためのモデルを高速で作製したり、ロストワックス用のマスターモデルを作製したりすることができるため、製品開発期間やコストを小さくすることに貢献している。

しかし特に日本の産業界では、試作モデルではなく、少量部品や少量生産用金型を直接迅速に造形したいという要

望が強い。上述の手法では、金属部品や金型を直接造形することは困難である。そこで近年、SLS法を用いた造形機で射出成形用金型や金属モデルを直接造形することができる装置が市販され、注目を集めている。また新しい手法についての研究開発も行われている。以下では、金属の3次元モデル造形技術について述べる。

1. 金属の3次元造形への取り組み

樹脂を材料とした光造形やFDMなどはほぼ技術的に確立され、現在のところRP造形機の販売台数のほとんどを占めている。しかし市場の要望は単なるモデリングからラピッドツーリングとよばれる金属部品や少量生産用金型の直接造形に移行しつつある。その流れを受けて、これまで直接金属モデルを造形できる造形機はDTM社 (アメリカ)³⁾とEOS社 (ドイツ)⁴⁾の装置だけであったが、新たに金属モデル造形を目標とした装置が売り出された (ProMetal社、Optomec社)⁵⁾。

DTMおよびEOSの市販機はともにSLS法を利用している。違いは材料にあり、DTMは炭素鋼粉やステンレス粉に樹脂バインダーをコーティングしてあり、レーザーの熱により樹脂バインダーを溶融固化させることで仮焼結モデル (グリーン体) を得る。EOSはブロンズ・ニッケル混合粉末を用い、融点の低い金属材料を溶融させ液相焼結の原理で金属モデルを作製する。DTM装置の利点としては、造形時の熱収縮等による変形が小さいため金属部品の直接造形が期待できるが、造形後の脱脂・本焼結・溶浸に時間と技術的ノウハウを必要とする。EOS装置の利点としては、材料に金属材料のみを使用しているため造形後の強度が高いので取り扱いやすく、造形後の樹脂含浸も容易である。しかし金属材料を溶融するための熱による変形のため、造形できる形状が限られ金属部品の直接造形は難し

大阪大学基礎工学研究科機械科学分野 (〒560-8531 豊中市待兼山町 1-3)
E-mail: fumi@me.es.osaka-u.ac.jp

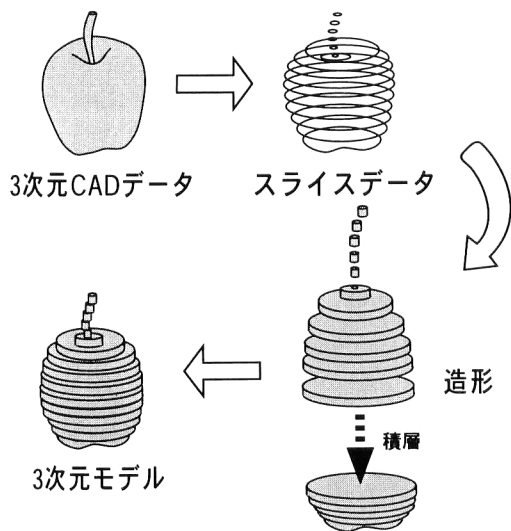


図1 3次元造形の原理。

い。これらの装置で造形される金属モデルは、主に射出成形用試作金型としての利用を目的としており、さらに強度・密度の高いモデルを造形するため新材料の開発等が進められている。ProMetalはインクジェットプリンターと似た手法で、金属粉末上にバインダーを噴射し固めることでグリーン体を作り、脱バインダー・含浸することで金属モデルを得る（この手法を3D-Printingとよんでいる）。これらの手法で造形されたモデルはいずれも密度・強度が著しく低く、そのままでは使用することが難しい。そのため密度・強度を上げるための樹脂や銅の含浸、溶浸を必要とするという共通点をもっている。

Optomec社（LENS technology）は、図2に示すような原理でレーザービームの中に材料粉末を噴射・供給し、溶融堆積させることでモデルを造形する（directed material deposition systems）。この手法では密度・強度の高い金属モデルを直接造形することができるため造形後の焼

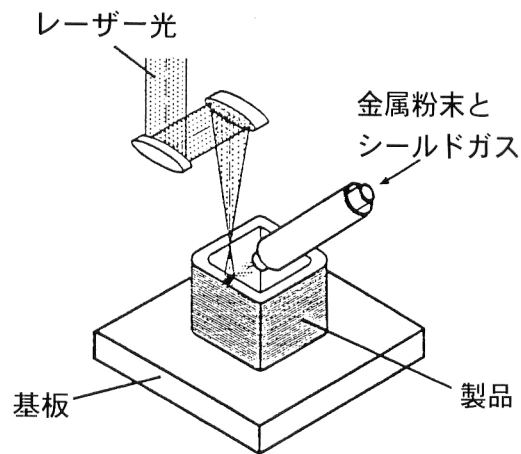


図2 レーザークラッディング（レーザージェネレーティング）の概略図。

結・含浸等の必要がない。しかしオーバーハング形状を造形できないなど、造形形状に制限を受ける。

上述の市販装置のほかに、新しい造形法の研究・開発も活発に行われている。（株）レーザックスのY.カチューリア⁶⁾は、CO₂レーザーと肉盛り用材料粉末を用いたレーザークラッディングおよびYAGレーザーと融点の異なる2種類の金属の混合粉を用いたレーザー焼結技術の研究を行っている。

早稲田大学の中沢ら⁷⁾は、スライスデータをもとにレーザーなどでパルプシートを切り抜き積層し、シートの切り抜かれた空間に粉末材料を充てんして焼結後、炭化したパルプシートを取り除く方法を提案している。

職業能力開発総合大学の徳永ら⁸⁾は、材料に純鉄粉末を用い低出力のレーザーを照射し仮固化させた後で、再度出力を高めたレーザーを照射することで固化させる方法でモデルを造形している。

茨城大学の前川ら⁹⁾は、グリーンテープレーザー焼結法

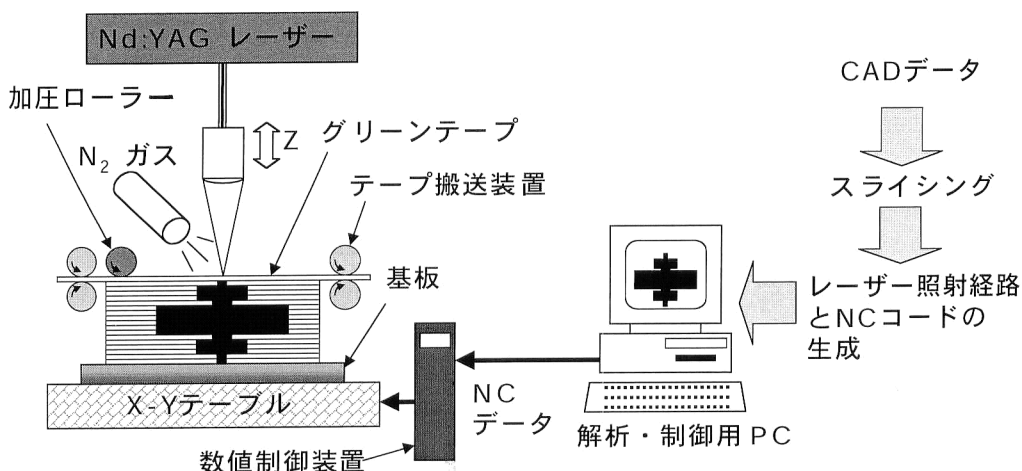


図3 グリーンテープレーザー焼結システム。

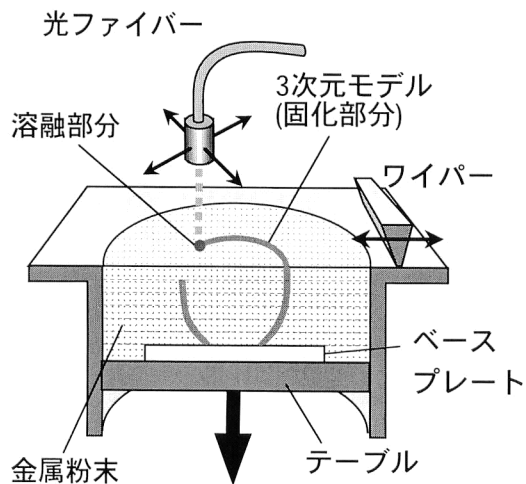


図4 レーザープロトタイプ造形システム。

(図3)を提案している。この方法は、材料粉末と有機バインダーを混ぜたスラリーからテープ状の薄いシート（グリーンテープ）を成形し、このグリーンテープを自動供給しレーザー焼結と積層を交互に繰り返して3次元造形を行う。材料がテープ状であるため粉末にくらべ取り扱いが容易である等の利点があるが、さらにモデルの強度・密度を高める等の問題も残っている。

名古屋大学の山口ら¹⁰⁾は、溶融金属のドットをコンピューター制御でスキャンして2次元画像を描き、これを積層して3次元構造体を製作する方法を提案している。メタルジェットの材料としては低熔点合金やはんだ等を使用している。

筆者らは、金型および金属部品の直接造形を最終目標として、平成6年度から密度・強度が高い金属モデルをCADデータから直接造形するレーザープロトタイプ造形の研究開発を行っている。以下では、これまでの研究成果と金属のラピッドプロトタイプ造形の今後の可能性などについて述べる。

2. 金属粉末を用いたレーザープロトタイプ造形

2.1 目的

近年、市場のニーズが大量生産からより個性を重視した多品種少量生産へ変化し、携帯電話などの情報端末や家電製品などについては新製品開発時間が著しく短くなってきている。コスト競争の点からも製品開発時間の短縮は強く望まれている。そこでCADデータから直接、性能試験に使用できる強度が高いモデルや少ロット生産を行うことができる金型を作る技術の開発を目的として、レーザーを熱源とし材料である金属粉末を局部的に溶融させながらモデルを造形する金属モデル成形法について研究を行って

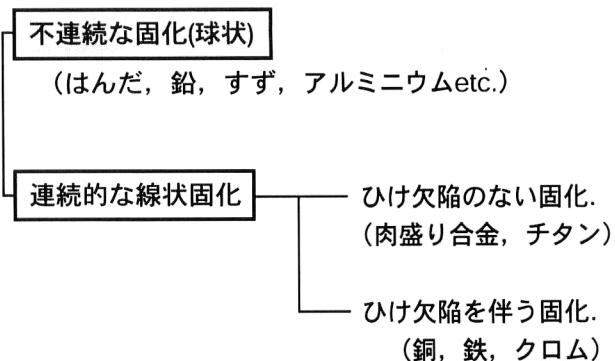


図5 レーザープロトタイプ造形における金属粉末の溶融固化状態の分類。

いる。

2.2 造形システム

本研究で用いている造形システムを図4に示す。熱源として平均出力50Wのパルス発振Nd:YAGレーザー(LUXSTAR 波長 $1.06\mu\text{m}$)を用いる。レーザービームは光ファイバーを通りスポット径約0.8mmで粉末表面上に照射・スキャンされる。酸化を防ぐためレーザー照射は窒素もしくはアルゴンガス雰囲気中で行われる。装置の基本構造はSLS法とほぼ同じであるが、材料に樹脂やワックスなどのバインダーを使用しない点、レーザーの熱により金属材料を局部的に完全に溶融固化させている点が焼結法とは異なる。この手法で作製したモデルは、密度・高度が高いため造形後の焼結や含浸・溶浸を必要としない。

2.3 材料選定

造形に適した材料を選定するため、さまざまな金属粉末について10mm厚の粉末層にレーザービームを直線的に照射して溶融固化状態を観察する基礎試験を行った。その結果、溶融固化した部分が線状につながらず球が並んだようになる粉末と、線状につながる粉末にわかれた。さらに線状に溶融固化するものは、固化体中にひけ巣のような空洞の生じたもの（ひけ欠陥）と生じなかったものとわかれた。まとめた結果を図5に示す^{11,12)}。溶融固化状態の違いは単純に表面張力の大小だけではなく、熱伝導率、溶融量、ぬれ性、酸化被膜などの影響が複雑に絡み生じていると考えられる¹³⁻¹⁷⁾。

この基礎試験から、ひけ欠陥のない固化の得られるニッケル基合金粉末とチタン粉末が材料粉末として適していると考えられた。これらの粉末を用いた簡単な成形試験を行った結果、3次元モデルを造形することが可能であること、酸化防止が重要であること、流動性の点から粉末の粒形状は球状がよいこと等を明らかにした。

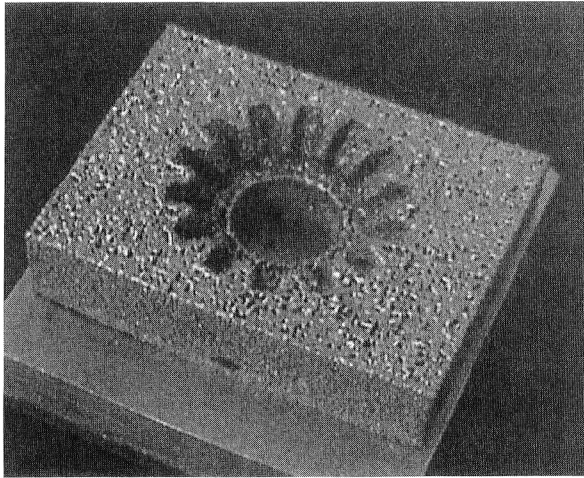


図6 傘歯車鍛造金型の試作モデル（ニッケル合金）。（サイズ45×35×10.6 mm，ピーク出力1 kW，パルス幅1 ms，繰り返し数50 Hz，積層厚さ0.1 mm，ビームスキャン速度4 mm・s⁻¹）。

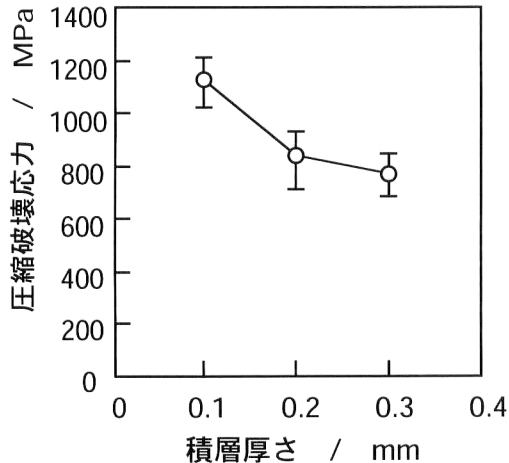


図7 ニッケル合金モデルの圧縮破壊応力と積層厚さの関係（積層面と垂直に圧縮）。（ピーク出力1 kW，パルス幅1 ms，繰り返し数50 Hz，ビームスキャン速度4 mm・s⁻¹）。

2.4 ニッケル合金モデル

自溶性ニッケル合金粉末（Niを主成分にフラックス成分のBやSiを数%含有）は耐摩耗性，耐食性を目的とした肉盛り用合金粉末である。フラックス成分を含有しているため，雰囲気の影響を受けにくく，ぬれ性もすぐれているうえ，硬さが約HRC 40あり金型材料として適していると考えられる。そこで，傘歯車鍛造用金型のモデルの作製を試みた。図6に傘歯車金型モデルの写真を示す¹⁸⁾。装置面で，積層方向の精度を高め，造形制御ソフトを改良することで傘歯車の3次元CADデータからモデルを造形することはできたが，寸法精度等をさらに向上させる必要がある。

金型モデルの強度測定を行った結果を図7に示す。最大

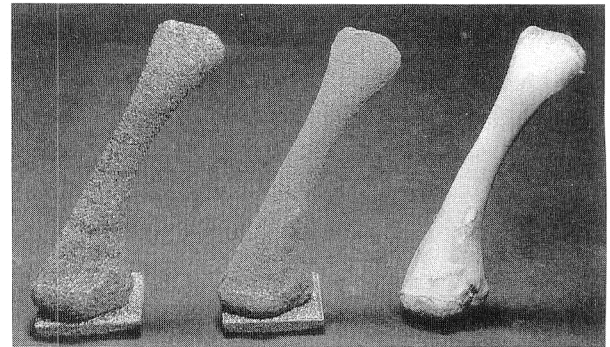


図8 チタン製人工骨作製例。（ピーク出力1 kW，パルス幅1 ms，繰り返し数50 Hz，ビームスキャン速度4 mm・s⁻¹）。左：平均粉末粒径200 μm，中央：平均粉末粒径25 μm，右：実物。

の圧縮破壊応力は約1200 MPaと金型としての使用が期待できるが，引張破断応力について調べると約45 MPaと非常に小さかった。これは造形時に内部に生じたクラック等が原因であると考えられる。

また3次元モデル造形中にモデルが変形したり（そり），割れが生じたりする場合があります，この現象を改善するためにモデル造形後の炉中での熱処理や新しい造形法の開発，材料の延性を高める試み等を行い効果をあげている¹⁹⁾。

2.5 チタンモデル

チタンは比強度が大きく，すぐれた耐食性をもつことから生体組織適合性をもつとして，生体内インプラント材として用いられる。しかし生体部品は個人および部位により形状・大きさが異なるうえに，チタンは難加工材であるため，現在の造形方法では最適な部品作りをすることは不可能である。そこで単品生産を得意とする本造形方法を用いて，純チタン粉末をアルゴンガス雰囲気中で造形して歯や骨などの医療用生体部品を造形することを提案し，歯冠と人工骨を試作した。図8に造形した純チタン人工骨と実際の骨（右）の写真を併せて示す²⁰⁾。本手法ではモデル内部が低密度で表面粗さの大きな部品を作ることも可能であるため，骨細胞との融合が重要である人工骨の造形に適していると期待できる。

現在研究されている金属の3次元モデルを造形するRP技術の中でもレーザーを用いて金属粉末から直接3次元モデルを造形する手法は，造形後のモデルの密度・強度が高いため有望であると考えられる。しかし，精度の向上，熱による変形や残留応力など解決しなくてはならない問題も少なくない。これまでは，単一の造形機や造形法でモデル

を作製する方法がほとんどであったが、それぞれの利点を生かすため複数の造形法や切削等も取り入れ、高速で精度の高いモデルを造形できるような柔軟なシステムを考えることで、さらに RP の可能性が広がると考えられる。また、医療分野のように単品生産の多い分野に RP が普及して、手術中に患者にあったインプラント材を造形し挿入できるようになれば、手術の回数を減らすことができ患者の負担を軽減できるであろう。さらに今後、航空・宇宙なども含め、広い分野への応用が期待できる。

資料提供および助言くださいました新東工業(株)今村正人氏、茨城大学前川克廣教授、日立造船情報システム(株)古川治男氏に謝意を表します。また阿部史枝は日本学術振興会特別研究員であることを付記する。

文 献

- 1) P. F. Jacobs: 高速3次元成型の基礎 (日経 BP 出版センター, 1993) pp. 19-21.
- 2) 中川威雄, 丸谷洋二: 積層造形システム — 三次元コピー技術の新展開 — ((株)工業調査会, 1996) pp. 1-18.
- 3) 早野誠治: “Selective laser sintering (粉末固着積層造形システム) sinterstation 2500 plus と新材料”, 第15回ラピッド・プロトタイピングシンポジウム (1998) pp. 12-17.
- 4) 前田寿彦, 古川治男: “金属粉末の直接焼結による金型製作における新技術”, 型技術, **14** (1999) 186-187.
- 5) 今村正人: “ラピッドプロトタイピングからラピッドツーリングへ”, 型技術, **15** (2000) 18-23.
- 6) Y. P. Kathuria: “Microstructuring of metallic powder/hard materials by selective laser sintering process,” *Advanced Technology of Plasticity* (Proc. of the 6th ICTP, 1999) pp. 1011-1016.
- 7) 中沢 弘, 石川光男, 松本祐介: “自由焼結法によるラピッドプロトタイピング (第1報) — 基礎的研究 —”, 精密工学会誌, **64** (1998) 1078-1082.
- 8) 徳永 剛, 吉澤 徹: “2ステップレーザー照射による純鉄粉体材料を用いた3次元造形”, 精密工学会誌, **65** (1999) 1136-1140.
- 9) 前川克廣, 小川 慧, 大島郁也, 横山雄一: “グリーンテープを用いたレーザーマイクロ積層造形法”, 精密工学会誌, **64** (1998) 1340-1344.
- 10) 山口勝美, 夏目康男, 酒井克彦: “メタルジェットによる三次元構造体の造形 (第3法)”, 精密工学会誌, **66** (2000) 1771-1775.
- 11) F. Abe and K. Osakada: “A study of laser prototyping for direct manufacturing of dies from metallic powders,” *Advanced Technology of Plasticity* (Proc. of the 5th ICTP, 1996) pp. 923-926.
- 12) F. Abe and K. Osakada: “Fundamental study of laser rapid prototyping of metallic parts,” *Int. J. Jpn. Soc. Prec. Eng.*, **30** (1996) 278-279.
- 13) 阿部史枝, 吉留彰宏, 小坂田宏造, 塩見誠規: “レーザープロトタイピングにおける金属粉末溶融現象の有限要素解析”, 鑄造工学, **69** (1997) 930-935.
- 14) 阿部史枝, 吉留彰宏, 小坂田宏造, 塩見誠規: “レーザーラッピングにおける溶融現象の有限要素解析”, 鑄造工学, **70** (1998) 40-45.
- 15) F. Abe, A. Yoshidome, K. Osakada and M. Shiomi: “Direct manufacturing of metallic model by laser rapid prototyping,” *Int. J. Jpn. Soc. Prec. Eng.*, **32** (1998) 221-222.
- 16) M. Shiomi, A. Yoshidome, K. Osakada and F. Abe: “Finite element simulation of solidification process of metallic powders in laser rapid prototyping,” *Welding and Advanced Solidification Processes* (Proc. of the 8th Modeling of Casting, 1998) pp. 697-704.
- 17) M. Shiomi, A. Yoshidome, F. Abe and K. Osakada: “Finite element analysis of melting and solidifying processes in laser rapid prototyping of metallic powders,” *Int. J. Mach. Tool. Manuf.*, **39** (1999) 237-252.
- 18) F. Abe, K. Osakada, K. Uematsu and M. Shiomi: “Direct manufacturing of metallic tools by laser rapid prototyping,” *Advanced Technology of Plasticity* (Proc. of the 6th ICTP, 1999) pp. 1005-1010.
- 19) F. Abe, K. Osakada, M. Shiomi, K. Uematsu and M. Matsumoto: “Manufacturing of hard tools from metallic powders by selective laser melting,” *Proc. of AFDM '99* (1999) pp. 721-726.
- 20) F. Abe, K. Osakada, Y. Kitamura, M. Matsumoto and M. Shiomi: “Manufacturing of titanium parts for medical purposes by selective laser melting,” *Proc. of the 8th Int. Conf. on Rapid Prototyping* (2000) pp. 288-293.

(2000年11月22日受理)