

金属粉末の直接焼結によるラピッドプロトタイピング

Direct Sintering of Metal Powder by Laser Rapid Prototyping.

木下 俊行* 宮田 良雄* 鬼橋 保祐**
Toshiyuki Kinoshita Yoshio Miyata Yasusuke Onihashi

(2001年7月16日 受理)

キーワード：金属粉末、ラピッドプロトタイピング、レーザ、焼結、金型、試作、三次元CAD

1. はじめに

ラピッドプロトタイピングとは、一般に3次元CADデータを利用して、自動的に3次元の複雑形状を有する製品を短時間で造形する事を言い、光造形法（紫外線硬化樹脂法）、熔融紡糸堆積法、薄板積層法、SL S法など、様々な方法がある¹⁾。いずれも、薄い層状の造形物を積層させることにより、所定の形状のモデルを造形する方法である。光造形法は、液体の光硬化性樹脂を紫外線で順次硬化させる方法であり、ラピッドプロトタイピングシステムとして最も普及が進んでいる²⁾。光造形法による造形品は、プラスチック製品の試作モデルや、金属製品の形状確認用モデルとして利用されている。近年、より強度の高い製品を造形する方法として金属粉末のラピッドプロトタイピングが注目されており、試作品の作製や金型への応用が期待されている。当所では、中小企業事業団の委託事業『平成10年度：物づくり試作開発支援センター整備事業』により、金属粉末ラピッドプロトタイピング装置（独 EOS社製EOSINT-M250）を設置し、造形品の品質向上等の研究を実施している。本稿では、造形方法の概要や装置の特徴、製品の基本的な特性ならびに2～3の造形事例を紹介する。

* 生産技術部 塑性加工グループ

** 生産技術部 客員研究員

2. 造形の原理および装置の特徴

金属粉末ラピッドプロトタイピング装置の造形原理を図1に示す。サポートや造形品のCADデータを積層厚に応じてスライスし、断面形状データに変換する。データの変換作業は、パラメーターを設定するだけでよく、切削加工におけるCAMデータの作成に比べて非常に容易である。図1(a)のように粉末材料の所定の位置にレーザを照射し、部分的に焼結する。1層分のレーザ照射が終わると粉末を供給し（図1(b)）再度レーザを照射する。造形品の最上面まで繰り返し積層していく事によりモデルを造形する。従って、造形終了時には焼結された造形品は金属粉末に埋まった状態になっている。造形品の形状を維持し、寸法精度を安定させるため、造形品はベースプレートと称する基板上に接合して造形される。このため、造形物の最下面は、サポート（図1(a)参照）を介してベース

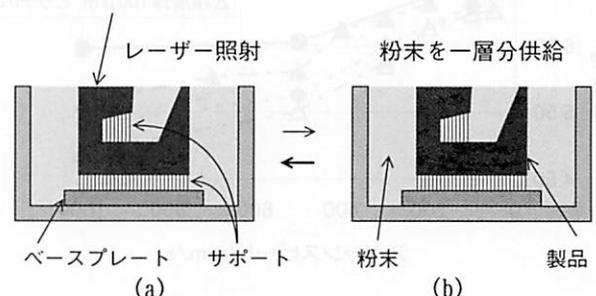


図1 造形法の原理

レートに接合される。オーバーハングを有する形状の造形も可能であるが、造形物の形状精度を維持するためサポートが必要となる場合がある。

EOSINT-M250は、金属粉末用の造形装置であり、粉末材料として専用のブロンズ・Ni系混合粉末または鉄・Ni系の混合粉末を使用する。粉末材料には樹脂バインダーを含まずレーザーで直接焼結するため、脱バインダーや焼結などの後処理が不要である。表1に装置の仕様を示す。レーザービーム直径は、0.4mmであるため、これより細かい製品の造形は不可能である。ブロンズ・Ni系造形品の引張り強度は120MPa、鉄・Ni系造形品の引張り強度は500MPaである。ブロンズ・Ni系造形品は強度や耐熱性が低いことから、主に試作や小ロット生産用の樹脂成形用金型として利用されている。また、鉄・Ni系造形品は、ブロンズ・Ni系造形品より強度が優れることから、ダイキャスト金型等への利用が期待されている。しかし、鉄・Ni系造形品は造形時間が長いことや、造形時の収縮による寸法精度の不良や割れの発生など、解決すべき課題も多い。このため、次章より当所で行った鉄・Ni系造形品に関する各種の実験結果について報告する。

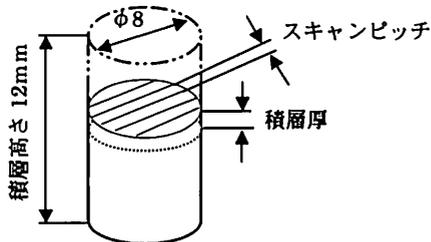


図2 試料形状および造形パラメーター

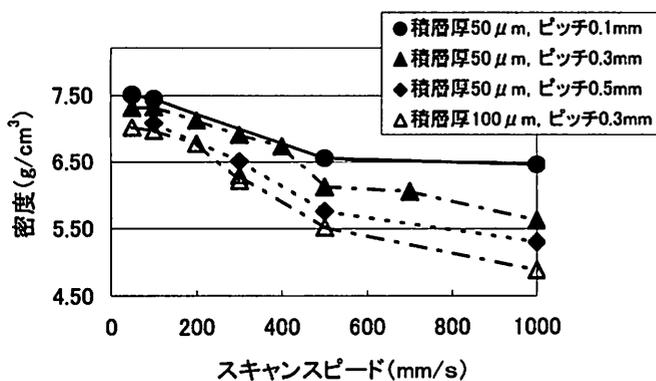


図3 (a) レーザ照射条件と造形品の密度

表1 金属粉末ラピッドプロトタイプング装置の仕様

| 装置名称 | EOS社製 EOSINT-M250 | |
|----------|---------------------------|--------|
| 使用レーザー | CO ₂ レーザー 200W | |
| レーザービーム径 | 400 μm以下 | |
| スキャンスピード | 最大3m/s | |
| 位置決め誤差 | ±50 μm | |
| 積層厚 | 標準0.05mm | |
| 造形サイズ | 250×250×150mm | |
| 装置寸法 | 1950×1030×1720mm | |
| 装置重量 | 約800Kg | |
| 所要電力 | AC400V, 3相5芯, 32A | |
| 標準使用材料 | ブロンズ・Ni | 鉄・Ni |
| 比重 | 6.5 | 7.8 |
| 相対密度 | 70~75% | 最大95% |
| 引っ張り強さ | 120MPa | 500MPa |
| 寸法精度 | ±0.07%+0.05mm | |
| 造形データ | STL, CL1 | |
| 造形環境 | 22±5℃, 20~80%RH | |

3. 鉄・Ni系造形品の機械的性質

造形パラメーターを変えて、図2に示すφ8mm×高さ12mmの円柱形試料を造形した。図3(a)に示すように、積層厚さやスキャンピッチ、スキャンスピードを増加させると、エネルギー密度（単位体積あたりに照射されるエネルギー）が減少するため、造形品の密度は低くなる。図3(b)は、造形品の密度とエネルギー密度の関係を示したものである。密度が6.5を超えるるとエネルギー密度の増加量に対する密度の増加量は急激に低下する。

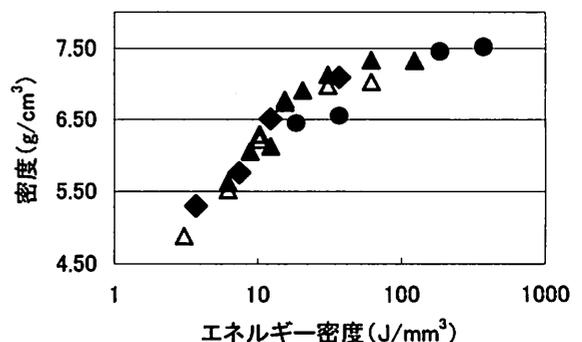


図3 (b) エネルギー密度と造形品の密度

| | | | | |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 記号 | (a) スキン | (b) | (c) | (d) コア |
| 積層厚 | 50 μm | | | 100 μm |
| スキャンスピード | 100 mm/s | 300 mm/s | 100 mm/s | 300 mm/s |
| スキャンピッチ | 0.3 mm | 0.3 mm | 0.5 mm | 0.3 mm |
| エネルギー密度 | 62 J/mm ³ | 37 J/mm ³ | 21 J/mm ³ | 10 J/mm ³ |
| 密度 | 7.3 g/cm ³ | 7.1 g/cm ³ | 6.9 g/cm ³ | 6.3 g/cm ³ |
| 組織 | | | | |

図4 レーザ照射条件と造形品の組織 ←→ 1mm

図4は、レーザを照射する平面に平行な断面組織である。通常、造形品は、割れの発生や寸法精度の低下を防ぐ目的で、スキン(図4(a))と呼ばれる厚さ3mm程度の表層部分とコア(図4(d))と呼ばれる内部に分けて造形される。コアの照射条件は、スキンに比べて積層厚およびスキャンピッチが大きく、大きな空孔が見られる。図4(b)および図4(c)は、スキンの照射条件に対してそれぞれスキャンスピードおよびスキャンピッチを増加させた場合であり、いずれも空孔が増加している。図4(c)では、空孔が格子模様となっているが、これはスキャンピッチがレーザビーム径(0.4mm)より大きいためである。また、図5は、密度と圧縮降伏応力の関係である。レーザ照射条件にかかわらず、密度と圧縮降伏力は、ほぼ比例関係にある。

スキンとコアの機械的特性を表2に示す。z方向は、積層方向(垂直方向)、xおよびy方向は積層方向に直交する方向(水平方向)である。コア部はスキン部よりポーラスになっており、ヤング率はスキンの約1/2、引張り強度は約1/4である。スキンについては、200℃、400℃、600℃および800℃の各温度で圧縮試験を行い、高温強度の測定を行った。表3に示す通り、600℃までの温度範囲では、降伏強度の低下は緩やかであった。

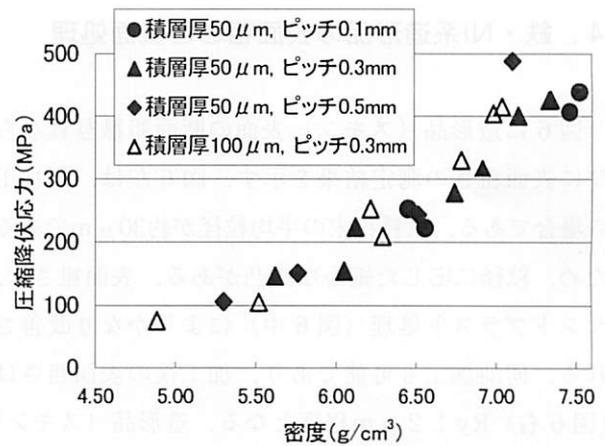


図5 密度と圧縮降伏応力の関係

表2 引張り試験結果 試験速度: 2mm/min

| | スキン | | | コア |
|-----------|------|-----|-----|------|
| | x方向 | y方向 | z方向 | x方向 |
| ヤング率(Gpa) | 130 | | | 60 |
| ポアソン比 | 0.29 | | | 0.22 |
| 降伏応力(MPa) | 454 | 424 | 390 | |
| 引張強度(MPa) | 595 | 576 | 410 | 118 |

表3 高温圧縮試験結果 試験速度: 2mm/min

| 試験温度 | スキン(z方向) | | | |
|-----------|----------|------|------|------|
| | 200℃ | 400℃ | 600℃ | 800℃ |
| 降伏応力(MPa) | 360 | 350 | 230 | 81 |

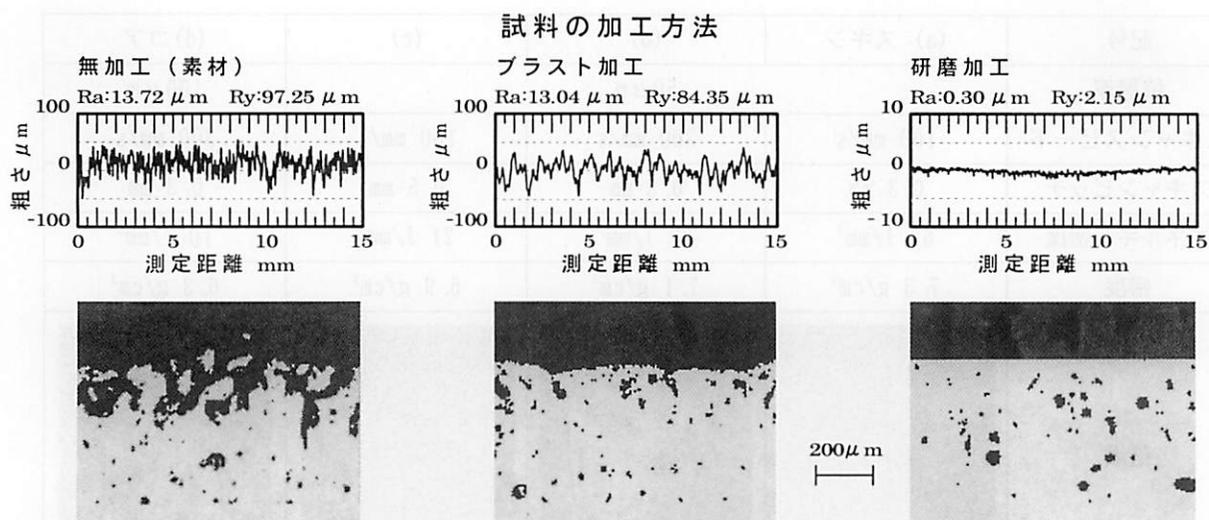


図6 造形品表面の断面組織と表面粗さの測定結果

4. 鉄・Ni系造形品の表面粗さと表面処理

図6に造形品（スキン）表面の断面組織写真ならびに表面粗さの測定結果を示す。図6左は、無加工の場合である。原料粉末の平均粒径が約 $30\mu\text{m}$ であるため、粒径に応じた細かな凹凸がある。表面粗さは、サンドブラスト処理（図6中）によりかなり改善される。研削加工も可能であり、加工後の表面粗さは（図6右） $Ry: 2\mu\text{m}$ 程度となる。造形品（スキン）の硬さは、約 $Hv250$ （ $HRC22$ 程度）であるため、金型として使用するためには、表面の硬化処理が必要であると思われる。このためメッキおよびホウ化処理を施し、処理後の硬さを測定した。造形したままでは、表面粗さが大きくメッキが困難であるため、研磨加工後に表面処理を行った。図7に、表面処理部断面の組織写真を示す。図の左側は、表面処理直後の組織である。また、高温での使用における材質の劣化を測定するため、焼鈍（ 700°C 、 1h ）を施した。図7の右側は、焼鈍後の組織である。無処理の組織は、焼鈍により厚い酸化層が生成しているが、メッキおよびホウ化処理した試料には厚い酸化層は見られない。また、硬質Crメッキのメッキ層には亀裂が生じている。焼鈍前の硬さは、硬質クロムメッキ層が約 $Hv1000$ 、ニッケルリンメッキ層が $Hv550$ 、ホウ化処理層は、 $Hv1100\sim1400$ であった。

| | 表面処理のみ | 焼鈍（ 700°C 、 1h ） |
|------------|--------|---|
| 無処理 | | |
| 硬質Crメッキ | | |
| 無電解Ni-Pメッキ | | |
| ホウ化 | | |

図7 表面処理部の断面組織

ホウ化処理の場合、 700°C の焼鈍後も硬さの低下は少なく、 $Hv1000\sim1200$ であった。

5. 造形の事例

図8に当所で造形を行った例を示す。このように複雑な形状は、機械加工が困難であるため積層造形のメリットが大きい。割れ等の欠陥無しに造形できたが、寸法精度や薄肉部の強度については未確認である。また、図9には、造形不良の例として屈曲した貫通穴を有する製品の造形例を示す。貫通穴の上面はオーバーハングとなるが、最上面の水平面には余剰の焼結部が付着している。これは、オーバーハングの傾斜角が水平に近くなると、レーザーの照射熱が既に造形された製品部分へ逃げ難くなり、造形面直下の粉末を余分に焼結させてしまうためである。この現象は、レーザー照射速度を増加させる（入熱量を減少させる）ことによってかなり改善することができるが、造形品の形状を変更する（オーバーハング部分には傾斜をとる）ことが望ましい。また、サポート部分には造形品の収縮による亀裂が生じている。この問題は、サポートの強度向上によっても改善することができるが、比較的大きな製品を造形する場合は、製品の四隅にコーナーRを付ける必要がある。

6. まとめ

実際に造形作業を行ってみると、3次元CADデータを作成すれば、原理的にはどのような形状の製品でも自動的に造形できるということは、大きな魅力であると感じられた。また、機械加工と比べ、CADデータから造形データへの変換も容易である。このため、急を要する試作品の作製等に非常に適している。

近年ラピッドプロトタイプリングは、単に試作のみにとどまらず、金型や少量生産品として実用化されつつある。このため、造形品の表面粗さおよび寸法精度の向上が、これまでも増して重要な課題となっている。また、造形できる材料の種類が限定されていることも、金属粉末ラピッドプロトタイプリングの課題であり、高機能材料などの新たな材料開発が期待されている。

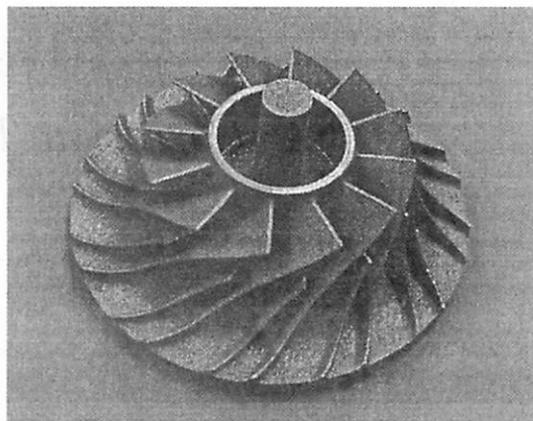
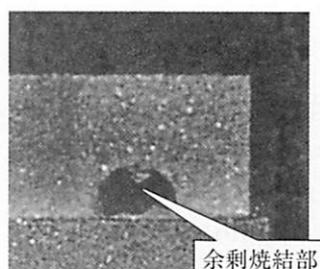


図8 造形品例（直径：107mm 造形時間：22h）



穴部の拡大図

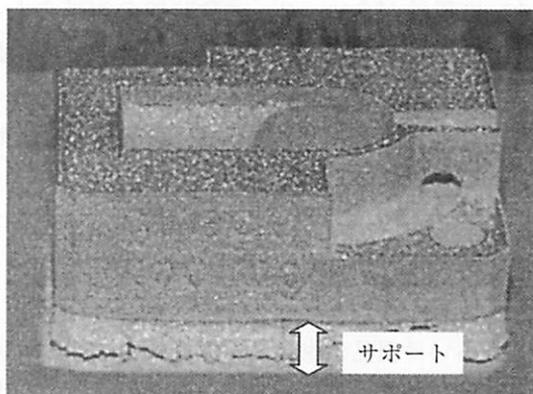


図9 造形不具合の例

参考文献

- 1) 阿部ほか, 塑性と加工 (日本塑性加工学会誌) 37, 430 (1996-11)
- 2) 早野誠治, 第43回レーザー熱加工研究会論文集 (1998.3) p.165