粉末焼結積層造形法による金型製作技術

早野 誠治*

1. はじめに

当社は、1998年1月からサービスビューロー事業（以後SB事業と呼称する）を立ち上げたが、積層造形装置の機種選定には半年間を掛けて調査検討した。最初に検討したのは光造形装置であったが、光造形装置の用途が真空注型のマスターモデルに限定されつつある時代であり、市場規模があまりにも小さすぎた。さらに、光造形装置を導入する工業用模型試作業者の増加に伴い、競争が激化しており、サービスビューロー単価が軒並み下落する中で、当社が簡単に新規参入できる余地はなかった。このため、将来性の最も高い装置を導入し、市場へアピールする方法以外の道を選ぶしかなかった。

溶融物堆積造形装置は、ABSが使える等良い点はあるが遅い。粉末焼結積層造形装置の鋳型専用機も検討したが、思ったよりもひずみが大きくかつ歩留まりが悪い。両者ともSB事業向きとはいえなかった。また、粉末固着積層造形装置は意匠検討用として価格面・速度とも適しているが、精度面や材料強度から考えるとSB事業向きではない。ましてや、当時は日本国内では販売されていなかった。悶々として時が過ぎたが、1997年5月の積層造形シンポジウムで、粉末焼結積層造形法（Selective Laser Sintering：以後SLS法と呼称する）で成形されたナイロン系の成形品と出会う。その成形品の精度の改善ぶりにただ驚き、「これだ、将来はこれが来る。」と思った。

このため、メーカーである米国DTM社と直接交渉を開始すると、当社が環太平洋地域での最初のSBとなることから、同社として全面支援すると申し出があり、SB事業がようやく進み始めた。その後の交渉でSLS装置の販売代理店にもなる。翌年1998年からサービスビューロー業務を開始したが、図1に示す様に順調に売上を伸ばしている。

さて、DTM社はすでに存在せず、現在は3D Systems社のDTM部門である。3D Systems社とDTM社合併は、2001年4月3日に発表された。同年8月に米国司法省の承認を得て、正式に3D Systems社がDTM社を吸収合併した。この結果、光造形法・溶融物堆積法・SLS法に跨る名実共に世界最大のラピッドプロトタイピング

（以後RPと呼称する）メーカー3D Systems社が誕生した。

本合併の狙いは、両者の保有する特許の共有化・販売・営業・製造ラインの共有化と合理化・アプリケーションの拡大である。合併に因りRP業界における特許に関する巨人とRPデパートがスタートしたと言えよう。

2. SLS法

テキサス大学Beamanらを中心とした研究チームによ

図1 SB事業の売上

図2 SLS装置の概略図

* Hayano, Seiji
 (株)アспект
 東京都稲城市東長沼 3104-1-101 (〒206-0802)
 2001.11.5 受理

り 1986 年に開発された技術が SLS 技術¹⁾である。積層造形法の他の方法に遅れることなく、同じ頃に開発されたということは実に興味深い。図 2 に SLS 装置の概略図を示す。

SLS 法とは一層毎にレーザーを走査することで焼結し、粉末素材を付着する。焼結後、エレベーターが一層分下降し、ローラーが次の層の材料を供給する。これを繰り返すことで積層し、三次元立体物を成形する方法である。

光造形法と比較すると、材料の違うことを除いて原理やプロセスは光造形法と全く類似する技法であり、光造形法でも利用されている STL データに基づき加工している。なお、MIT の Sachs²⁾が開発した粉末にバインダーを塗布して固着させる積層造形法(粉末固着積層造形法)は、Soligen 社や Z 社、Electrotudehone 社によって製品化されている。SLS 法と粉末固着積層造形法とは粉末を素材としているが、二者は全く異なる技術であることから区別し、本報では、名称も異なるものを使用することとする。

テキサス大学で開発された SLS 技術は、1987 年にテキサス大学内のベンチャー育成プログラムによって設立された DTM 社が、SLS 装置の開発と製品化を担うことになる。1992 年 12 月に発表された市販機は、成形精度が $\pm 0.5 \sim 1 \text{ mm}$ と悪く、評判は良くはなかった。1997 年になって、成形時の環境温度を融点近くまで上昇させることで引き裂り現象によるひずみ発生を押さえ、成形精度が向上した。さらに、高精度用素材ナイロン系複合材が登場した。この素材は熱伝導率を比較的低く押さえる等の改良が施され、SLS 法でも $\pm 0.1 \text{ mm}$ の成形精度を実現できるようになった。さらに、SLS 装置の生産性は光造形装置の約 3 倍で、ランニングコストも安価であることから、2001 年には販売累積台数 400 台を達成し、新機種(Vanguard Normal/HS)を発表した。

さて、SLS 装置は欧米州市場の積層造形装置の高級機市場で約 25%~30% 程度のシェアを保持しており、日本市場の 5% 程度とは大きく異なっている。日本市場で SLS 装置があまり普及していない要因は、輸入のために製品価格が高いことであろう。しかし、SLS 法は樹脂から金属までの幅広い素材を採用できるという特徴を持っていることから、日本でも徐々に好評を得るようになった。

3. SLS 法の素材と応用

SLS 装置の特徴は、成形時にサポートを必要としないこと、光造形法や紙積層・溶融堆積法等の技術に比べ生産性が高いことなどが挙げられる。しかし、最大の特徴は多種多様な成形材料を選択できることにある。

SLS 装置が初めて開発された 1991 年当時は、ワックス粉末しか成形できなかったが、1993 年以降になってポリカーボネートやナイロン 11 等の樹脂粉末が発表された。しかし、成形精度は $\pm 0.5 \text{ mm}$ と劣悪であり、ナイロン 11 の複合材の発表までは光造形装置に比べ成形精度は劣る装置というイメージしかなかった。現在では、ゴム質の粉末材料や砂、バインダーを混入したステンレス粉末までも成形できるようになっている。現在、SLS 装置用として市販されている材料を表 1 に示す。

ここで、SLS 装置の当社 SB 事業部でどのような材料が使用されているかを以下の図 3 に示す。85% 程度がナイロ

ンやゴム系のものであり、機能評価を目的とした試作が圧倒的に多いことがわかる。注目すべき点は、ガラスビーズ混入ナイロン複合材が増加傾向である点であり、また表では読み取れないが合成ゴムも増加傾向にあることである。一方、最近では本報のテーマである射出成形金型やダイキャスト金型等への応用も始まり、ステンレスが徐々に比率を上げている。さて、従来材料開発は制限されていたが、3D Systems 社と合しかした現在は、ユーザーや第三者による材料開発に柔軟な対応を示している。

表 1 粉末材料

用途	商品名	材質
消失模型	CastForm PS	アクリル酸スチレン
機能モデル	DuraForm	Nylon 11 の複合材
	DuraForm GF	Grass Beads 混入の DuraForm
	SOMOS 201	合成ゴム
鋳型	SandForm Zr II	ジルコン砂
	SandForm Si	シリカ砂
金型	LaserForm ST-100	ステンレス 420

図 3 材料別売上

図 4 新装置

4. 装置の進展

2001年8月に発表された新装置 (Vanguard) (図4) と従来機との大きな違いは、レーザーの走査方法にある。光造形法ではすでに行なわれていることであるが、焼結するエリアの内側はレーザービーム焦点をぼかして高速で塗りつぶし、アウトライン (コンター) 部分はレーザービームの焦点を絞り走査している。この走査方式に対応するために、Galvanometer Mirror に Z 軸焦点の調整機構を追加し、またソフトウェアを改良し高精度高速走査に対応させ、さらに 100 W レーザー (標準) を採用している。

その結果、従来の4倍の出力でビーム走査が可能であり、レーザービーム照射時間を比較するとほぼ従来の1/4の時間ですむようになる。

さらに、新装置ではローラーによる高速積層機構にも改善が施され、従来よりも高速化している。表2に従来機との仕様比較を示す。

レーザービーム焦点を絞ったアウトライン (コンター) 走査により、新装置では成形精度が20%向上し、また面粗度の向上も実現された。このようなレーザービーム走査方法は、光造形法では以前から行なわれてきたことであるが、SLS法も樹脂系の素材であれば以下に示す Jacobs²⁾ の方程式に準拠しているためである。

$$C_d = D_p \ln \{E_{\max}/E_c\}$$

この方程式は、以下のことを示している。

- (1) 硬化深度 C_d は、露光量 $\ln(E_{\max})$ に線形である。
- (2) 硬化深度 C_d と $\ln(E_{\max})$ をグラフにした硬化深度曲線の傾きは透過深度 D_p となる。
- (3) 硬化深度曲線の x 軸との交点での露光量は、臨界露光量 E_c である。

図5に面粗度向上の比較例を示す。より細かい粉末を利用すれば、さらに面粗度が向上することが期待できるだろう。

さらに、微細形状も 0.8 mm の薄壁が限界であったが、新装置では 0.5 mm 厚みの薄壁を成形できるようになっている (図6)。当然、エッジの切れも向上した。

さて、高速化についてであるが粉末材料毎に成形条件が異なるため、すべての材料で一様に高速化する訳ではない。材料毎では次の様な高速化が期待できる。

●ナイロン系素材

- ・高細精度モード 1.6~1.9 倍
- ・標準モード 2.25~2.75 倍

●ステンレス系素材

2 倍

●ステンレス

1.25 倍

ここで、高細精度モードは 0.1 mm 積層であり、標準モードとは 0.15 mm 積層を意味する。

さて、ここで高速化の具体的な事例として穴掘り機のハウジング (Augur Housing) の成形事例を紹介する。大きさは、縦 267 mm、横 323 mm、高 144 mm である (図7)。

これをナイロン系粉末材料で成形した場合の成形時間を従来機と新装置で比較した。結果を図8に示す。

ここで Vd とは従来機とほぼ同じ装置であり、意匠とソフトウェアでの改善が行なわれたものである。

当社では 0.1 mm 積層しか行なっておらず、必然的に高細精度モードを選択することになる。ざっくりばらんとすると、新装置は従来機と比較して2倍は確実に速い。なお、標準モードと高細精度モードは成形途中でも切り替え可能である。

図5 面粗度の向上

図6 薄壁成形 (厚み 0.58 mm)

図7 Augur Housing

表2 従来機と新装置の仕様比較

項 目	従来機 (Sinterstation 2500 Plus)	新装置 (Vanguard HS)
レ ー ザ ー	25 W CO ₂	100 W CO ₂
光走査方式	Galvanometer Mirror 焦点調整機能なし	Galvanometer Mirror 焦点調整機能あり
走 査 速 度	最高速度 5 m/秒	最高速度 10 m/秒
走査ピッチ	0.15 mm (標準)	0.3 mm (標準)
S/W	走査最適化ソフト無し	走査最適化ソフト搭載

5. 金型作製事例

SLS 装置を用い、ステンレス粉末から実際に金型を作製した事例を紹介する。2001 年の 6 月に実験として作製した携帯電話の裏側ケースハウジングを実例として紹介する (図 9)。

これ小さく複雑な形状が多く、アンダーカット部も多い。金型設計の結果、金型は 17 部品に分割され、これら 17 部品を同時に SLS 装置で作製した。作製されたグリーンパーツは、脱バインダーと液相焼結・ブロンズ熔浸の工程のため熔浸用ケースに配置された。この後、アルミナ粉末で完全にグリーンパーツを埋没させ炉にセットする。

炉のプロセスは、まず約 500℃ まで升温する間に脱バインダーを行う。次に、約 700℃ 付近から液相焼結が始まり、升温に従い液相焼結が進行する。その後、1070℃ で 3~5 時間保持する。熔浸終了後の金型部品を図 11 に示す。

熔浸に関する留意点は、以下に示すとおりである。

- ① パーツの大きさにあわせて、液相焼結時間を延長する。
- ② パーツの大きさにあわせて、熔浸時間を延長する。
- ③ 200℃ 以下になるまで窒素を流す。

である。したがって、焼結・熔浸炉としては還元炉や真空炉でも使用できる。

このようにしてできた型部品に六面体加工を施し、ミリング・EDM・ドリリング・磨きおよび組付けを行う (図 12)。後加工は岐阜多田精機社で行ったが、その際に指摘

図 10 部品の配置と成形されたグリーンパーツ

図 11 熔浸後の型部品

図 8 成形時間

図 9 携帯電話

図 12 組み付けられた金型

された問題点は次の通りである。

- ①面加工の基準面取りが通常と異なり、戸惑いが生じた。
- ②材料に粘りがあり、切削しにくい。
- ③シャープエッジが出ない。
- ④ ± 0.1 mm 程度の寸法誤差が生じた。

このようにして作製された金型を使用して実際に射出成形を行った。図 13 に成形品の外観を示す。成形の結果は、次の通りであった。

- ①形状が細かく、置き駒の数が多いため、最初のトライではイジェクターピンが折損した。
 - ②10 ショット程度成形を行ったが、インサートの磨耗や欠損などは見つからない。
 - ③置き駒をスライド構造に変えれば、相当量のショット数が期待できる。
 - ④冷却水管を通さなかったが、金型の冷却には問題がない。
- 本金型作製に関して、金型設計を開始してから、成形トライを行うまでに結果的に 3.5 週間を要した。図 14 に工数を取りまとめた。

携帯電話の裏側ケースというテーマは初めてであるため、金型設計に時間を要しかつ部品分割も多数に及んだのは当然であろう。また、初めての素材であることから後工程にも必要以上に時間を要したのも理解できる。

このトライアルから学んだことは以下の通りである。

- ①ステンレス粉末の成形品を初めて後加工したが、最適切削条件や加工手順に関し、従来手法で対応した。新しい手順に慣れれば工数は減らせる。
- ②ドリル・リーマ穴加工などは、造形時に下穴をあけず、全て後加工で行う方が良い。

図 13 射出成形サンプル

- ③シャープエッジなど、細かい形状は、後加工で出した方が良い。
- ④量産型等の高精度のものは、後加工で寸法を出した方が良い。

SLS 装置による金型作製のメリットは誰でも簡単に金型らしきものが作れることにある。以下にメリットを簡単にまとめた。

- ①RP により最適な粗加工形状が得られる（細部まで、均一取りしる形状）。
- ②NC マクロに金型加工ノウハウを組み込んであるので、NC 加工データ作成が容易にできる。
- ③自動化により、合理化の推進になる。
- ④金型加工の標準化ができる。

SLS 技術は、金型に徐々にではあるが応用範囲を広げつつある。すでに、ゴムやエラストマーの射出成形金型にも応用されている。

ゴムやエラストマー金型の場合、射出後に無理抜きをする場合があり、アンダーカットを有する金型となる。このような金型は、機械加工で成形するよりも SLS 装置であれば簡単に成形できる。ねじれた構造を持つ水管でも 3 次元 CAD 上で設計しておくだけで簡単に作製できる。図 15 に示す写真の事例はエラストマー金型の一部であるが、中子にはねじれ水管が施されている。問題は、ブロンズ熔浸により、型の表面にも銅が現れる点である。この銅にゴムやエラストマーが付着してしまうため、実際に使用する前にはめっきを施した。

さらに、ダイカスト金型に関してもトライを開始した。ダイカスト金型を作製し、760 ショットの成形を行った。

図 15 ねじれた水管を持つエラストマー金型

図 14 金型作製工数

途中で強度の弱いリブが折れたが、ほぼ 300 ショット程度は問題ないことを確認した。ステンレス 420 粉末による型の HRC 硬度は 20 程度と決して硬くない。今後ダイカスト金型として数千ショット成形できるようにするためには、さらに型の硬度を上げる必要がある。焼き入れ処理や表面コーティングによる対処を開始する。

6. まとめ

さて、21 世紀の金型は日本での熟練者の高齢化と減少、同時に 3 次元 CAD の普及に対応したものでなければならないと考えられる。しかも、中国を始めとする東南アジア諸国に劣らない納期と価格で製造できるものでなければならない。もし、将来においても従来と同じ方法で金型を生産する限り、日本のメーカー全てが生産基地を上記諸国に移そうとしている現状から、いずれ設計基地そして金型基地までも優秀なエンジニアがいる上記諸国に移ることになる。

さて、図 16 に示す金型作製のプロセスは、3 次元 CAD で設計した後、STL データに変換し、変換された STL データから型設計を行い SLS 法で金型を作製する方法を示している。10 μ m 台の精度を出すために、SLS 法で作られた型の仕上げ加工を従来の NC 工作機械で行う。0.1 mm 程度の薄皮を一度剥く程度の加工である。この際、仕上げ加工のデータは、やはり STL データから作成した金型データを利用しカッターパスを生成することで、簡単に NC データが作製できる。このプロセスで成形するのであれば、SLS 法の金型作製に 3 日間、仕上げ加工に 1 日、研磨や表面処理に数日で型が完成する。言わば、「一週間金型」である。

当社が実験した金型作製法は、まだ課題が多く残されている。しかし、10 万～100 万個を生産する製品は上記諸国へ生産基地が移ってしまうことを前提にするならば、日本で使う金型は 1 万～5 万ショットを限度として考えてよいのではないだろうか。SLS 法で試作金型として作製されたものは、最終的にパイロット・ロットの 1 万～5 万ショットを成形できる金型に修正できる。納期はもとより、自動化により価格面でもメリットがある上記諸国に対抗できる金型作製法となるであろう。

ここ 10 年間は、大企業の工場の海外への移転に伴い、金型産業は縮小傾向にある。このため、著しく仕事量が減少し、供給側の過当競争が発生した。金型価格はどんどん低下し、倒産や廃業に追い込まれる会社も多い。日本に残る製造業があるとすれば、それは少量多品種の製品であるものと考えられる。このような製造業者に安くかつ短期間で金型を供給することが、日本の金型産業が生き残るための課題と考えられる。少なくとも、従来の金型ではオーバースペックであり、製造原価低減のための打開策が必要であ

図 16 STL を利用した金型作製

る。この課題に対し、SLS 法等の積層造形法や高速切削装置、その他の加工法を駆使し、金型作製の自動化を推し進め、競争力の高い金型を作ることは 1 つの解答となるであろう。

参考文献

- 1) Deckard, C. and Beaman, J. J.: ASME-PED, 33, 191 (1988)
- 2) Jacobs, J. F.: 高速 3 次元成型の基礎, (1993), 日経 BP 出版センター