

粉末焼結積層造形装置の課題

(株)アспект 早野誠治

本文では、粉末焼結積層造形装置の開発を行うに当たり、材料の多様化、高精度化、高速化、歪み防止等において注力した重要な課題を解説する。

1. はじめに

まず、積層造形技術の将来を考えてみたい。

図1に示すように、立体プリンターの市場は2003年以降に普及期に入ったと言っても過言ではないだろう。将来更に立体プリンター市場が、拡大するのは間違いない。

一方、直接製品を造形するラピッド・マニファクチャリングの分野に関しては、補聴器や歯列矯正等の用途で使用されるようになったが、まだまだ市場は小さい。ラピッド・マニファクチャリングを目指した高級機の市場は横這い・低迷を示しているのが図2から見て取れる。しかし、装置や材料の技術開発が進むにつれてラピッド・マニファクチャリング市場も顕在化が始まると考えている。

積層造形技術の世界的スポークス・マンとして名高いTerry Wohlers氏も図3に示すような市場の方向性を指摘している。図3の中で試作金型や量産金型を積層造形法で造形する時代が来るのかは、議論の余地のあるところであろう。ダイカスト金型やゴム型等の比較的精度を要求しない金型では、金属粉末焼結積層造形装置による金型が少しずつ利用され始めていることから、ケース・バイ・ケースで普及するのではないかと言うことだが、基礎研究を積み重ねた将来に、高速で高精度な部品や金型が造形できる時代が来ることを期待したい。

さて、ラピッド・マニファクチャリングを目指した技術開発が特に活性化し始め

たのは、ここ4～5年程度であろうか。立体プリンター市場が顕在化し、積層造形技術の次なる市場としての注目を集めている所は、一品生産・小ロット生産の分野であると誰もが考えている。しかし、特許問題もありエンジニアリング・プラスチックを材料とする積層造形装置の分野は、3D Systems社とEOS社の2社に独占されていると言っても過言ではなかった。このような状況から、積層造形装置の新規参入組は、未開拓の分野である金属積層造形技術（金属堆積積層造形法・金属シート積層造形法・金属粉末焼結造形法）の開発に乗り出す事例が多い。

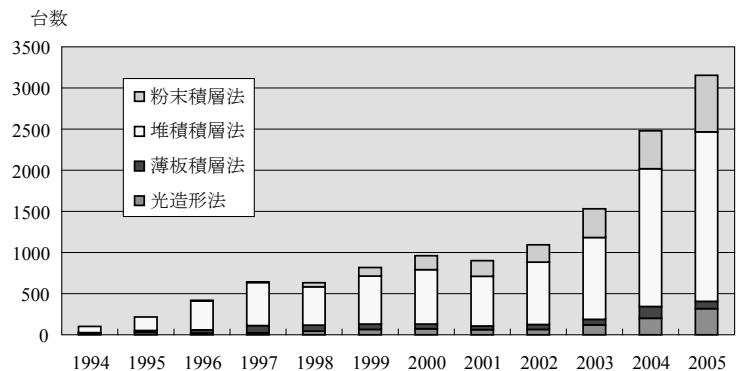


図1 世界の立体プリンター市場

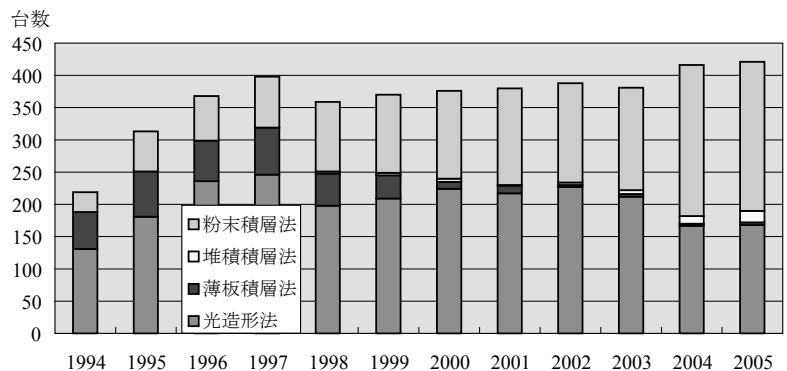


図2 世界の積層造形装置の高級機市場

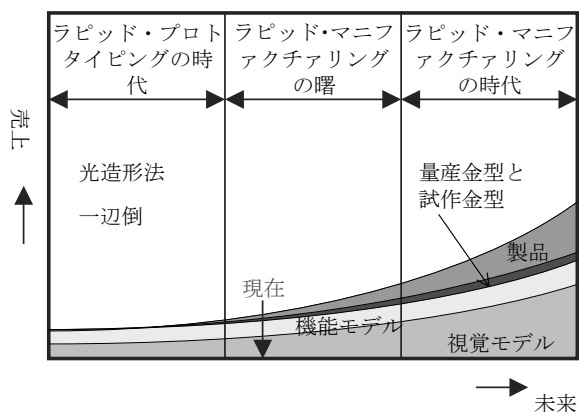


図3 積層造形法の市場

金属堆積積層造形法は、溶射技術の微細加工技術に類似しており、金型や金属部品の修理に適した技術とも考えることができる。従って、金属積層造形技術と言っても、現時点では金型や金属部品の直接造形する技術であるとは思えない。一方、金属シート積層造形法はアルミシートを積層し、アルミ金型を造形できる技術であるが、アルミ金型を積層して造形するよりも直接機械加工で切削の方が速く、実用的ではないと判断される。このように考えてくると、金属積層造形技術として将来ものになりそうな技術は、金属粉末焼結積層造形法のみと言っても過言ではないだろう。しかし、主流となっている金属粉末焼結造形技術の場合でも、熔融後の再凝固の際に発生する応力による歪みと、造形後の部品は100%密度にはならないと言う深刻な問題を抱えている。従って、サンプルとして紹介されるものは殆どがZ軸方向に長い部品や小さな部品であり、ショットピーニング処理等の表面処理を施されたものに限定されているのが現状である。しかも、金属積層造形技術はまだ未知数であり、高速ミリング技術と比較すると信頼性や精度で劣ることは言うまでもない。

従って、エンジニアリング・プラスチックを材料とする積層造形装置である樹脂粉末焼結積層造形装置が、ラピッド・マニファクチャリング分野を開拓することになるだろう。

日本国内には粉末焼結積層造形技術を研究しようと、大学や研究所の研究者からなる小規模ではあるが研究会が持たれている。しかし、粉末焼結積層造形装置を商業化しようという動きは無い。これは、光造形法にのめり込み視野が狭くなった悪癖であろう。このため、当社が粉末焼結積層造形装置を開発し、商業化を図ったものである。なお、本開発では東京大学生産

技術研究所の新野研究室や東京都の御支援を戴いた。

2. 粉末焼結積層造形装置 SEMplice

当社が開発している装置の名称はSEMpliceであり、Sintering Equipment for 3D Modelingの省略形である。

当社では1997年12月から2002年まで3D Systems社(旧DTM社)の装置を代理店として販売し、教育や保守を提供してきた。また、1998年からは粉末焼結積層造形装置 Sinterstation シリーズサービス・ビューローとして活動してきた。現在8台の装置を保有しているが、ワークサイズが光造形装置に比べ格段に小さいことや、温度センサーの不具合が原因で発生した熱暴走により粉末材料が全て固化してしまう等のトラブルを初めとする造形上の問題を経験している。SEMpliceでは、従来製品の問題点を改善するべく、以下に挙げる種々の点で改善を施している。



図4 SEMpliceの概観

2.1 温度計測

図5に示される造形を行うパートベッド部と材料供給のフィードベッド部の温度を計測するセンサーとして、IRセンサーが採用されている。従来の装置では造形が進むにつれて、IRセンサーの表面には積層時に舞い上がった粉末や蒸気化した樹脂材料が付着し、徐々に温度を低く計測するようになり、造形温度を数度上昇させてしまう現象が発生する。このため、当社では高温環境対応のIRセンサーを採用しただけでなく、IRセンサーの表面に気化した材料が付着しないように、窒素ガスで保護する対策を施している。

一方、IRセンサーによる計測にも問題は残る。パートベッド温度を特定部位だけで計測し、それをパートベッド温度だと判断するには問題があるのである。従って、SEMpliceではPt測温体をパートベッドの周

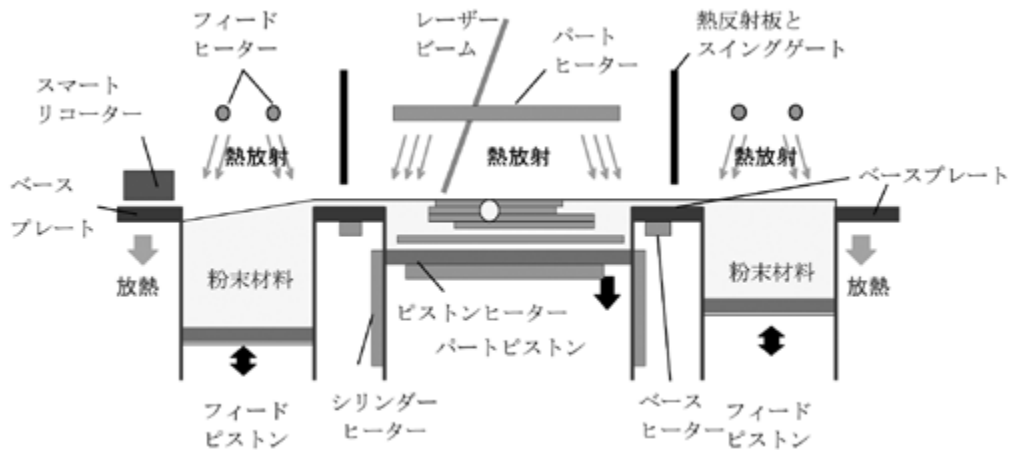


図6 SEMpliceのヒーターの配置

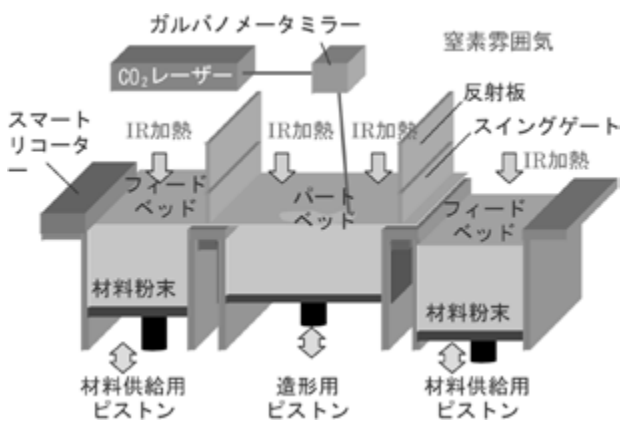


図5 SEMpliceの概要図

囲に配置し、他の部位の温度を計測することで過熱温度制御を行っている(図6)。

2.2 加熱と熱伝導による冷却

さて、粉末焼結積層造形装置で造形を行う場合に重要な環境条件は、温度管理だけではなく、過熱を管理しなければならないということが挙げられる。パートベッドをヒーターで過熱しても、パートベッドに蓄えられた熱が伝導や対流により急激に冷却されると言った場合は、造形物にカール現象が発生してしまう。これを管理することが重要な課題である。実際、大気の大気対流現象にさらされているベースプレートからは多くの熱が奪われ、カール現象を引き起こす原因となっている。チャンバーの上部は、基本的に二重構造になっていること、また熱源の近傍であること、パートベッドからは対流現象でしか熱は伝わらない。従って、ベースプレート等から予想以上に熱が逃げたり、逆に逃げなかったりする現象が、季節の変わり目に発生し、装置の安定運用の障害となっている。SEMpliceでは、直接大気に触れる部分を断熱材で覆い、且つ熱源を

ベースプレート部等の適切な部位に配置し、カール現象を引き起こす熱流を最小限化している。

SEMpliceを開発する際に、IRヒーターからの熱放射による加熱に関して、コンピュータ・シミュレーションによる解析を行った。この解析に基づきヒーターの前後への配置や熱反射板の左右への配置が決定された。当然のことながら、配置決定後の温度解析では比較的良好な結果を得た。

一方、パートベッドに対する不用意な冷却もカールや歪みを生じさせる原因となる。従って、雰囲気として使用される窒素温度も管理するだけでなく、供給される粉末の温度も管理している。しかも、粉末毎に適切な造形温度と供給される粉末温度が存在しているため、SEMpliceでは反射板やスウィング・ゲートにより供給される材料をパートベッドから独立させた温度管理を行っている。

2.3 レーザー走査露光

SEMpliceでは、XY軸を交互にラスタ走査する機能が標準の走査パターンである。しかも、最初から多種の走査パターンを提供し、オペレーターに対し走査パターンの自由度を与えることとした。これにより、オペレーターが粉末焼結積層造形技術や装置の習熟度が増すにつれ、独自に走査パターンを設定できるようにするものである。

さて、従来機のレーザー走査に関する問題点が、End Of Vector (EOV) と呼ばれる始終点の問題である。

始終点は必然的に過照射になってしまうことから、レーザーの電源を制御することで過照射を回避する。この制御方法は、始点でのレーザー照射を遅延させることで、終点の過照射と相殺する方法である。元からこの方法で露光量の制御を行うには限界があり、均一

な露光よりも高速造形に主眼を置いた結果として選択された方式である。この走査露光を図7に示す。従来機のレーザー走査をマイラー用紙に焼き付けたものを図8に示す。

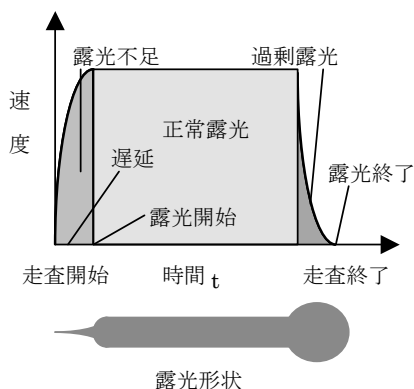


図7 従来のレーザー走査と露光形状

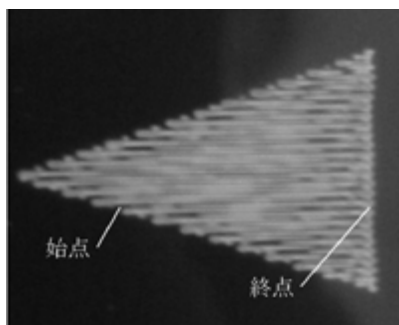


図8 EOVによる始終点の映像

見る限りギザギザした感じであり、このレーザー走査で造形すると、造形品の面粗度がいかにも悪く見える。しかし、実際はレーザーのビームの直径が450 μ mであり、レーザー走査間隔が100~150 μ mであることから、図8に示されるほどは面粗度が悪いと言うことはない。しかし、1mm程度の厚みを持つ垂直な壁を造形しようとする、レーザー走査は加速した後最高速度に到達する前に減速することとなり、他

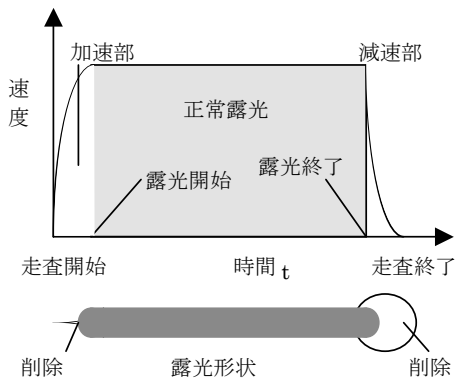


図9 SEMplíceのレーザー走査と露光形状

の部位に比較して過剰に露光してしまい、寸法値よりも厚く造形してしまうという問題が発生する。逆に、小さな穴形状も過剰露光によりつぶれてしまうという問題も発生する。このために、微細形状を造形するのが困難となってしまっている。

SEMplíceでは、EOV制御による過剰露光問題を回避するために、図9に示すレーザー走査速度が最高速度に到達してからレーザー露光を開始し、レーザー露光を終了してから減速し停止する露光方式を採用した。これにより、造形物の全域に対し均一な露光が可能となる。この結果、加工単位は境界部分と内部で同じとなり、オフセット値を固定でき、過熱による線収縮のみを考慮すれば、高精度な造形が可能となるし、従来機で発生した小さな穴形状も過剰露光によりつぶれてしまうという問題も回避できる。このレーザー走査方式を当社ではConstant Exposure Scanning (CES) 方式と呼ぶ。しかし、CES方式のレーザー走査は、加速部と減速部の分だけレーザー走査距離が若干ではあるが延びることとなる。このために、従来機に比較して、SEMplíceでの造形時間は若干長くなる。

精度と造形速度は反比例するのであり、精度と造形速度のいずれかを選択しなければならないのであれば、当社では精度を選択するべきであると判断したのである。しかし、造形速度は重要な課題である以上10m/secの走査速度を標準仕様としている。

2.4 材料の積層とオーバーフロー

粉末材料を100 μ m以下の厚さで積層する技術は、過去に研究が行なわれたことも無く、難しい技術である。粉末粒子が10 μ mとなると、粘土や液体の性状を持つこととなり、ましてや難しくなる。

一方、必要な箇所に必要な分量の粉末を供給することも、困難なことである。大量の粉末を供給し、余剰の粉末を取り除くことで、初めて適切に供給できるのである。

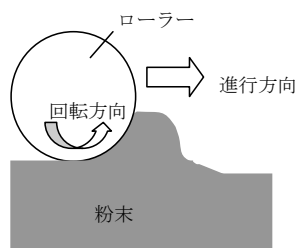


図10 逆回転ローラーシステム

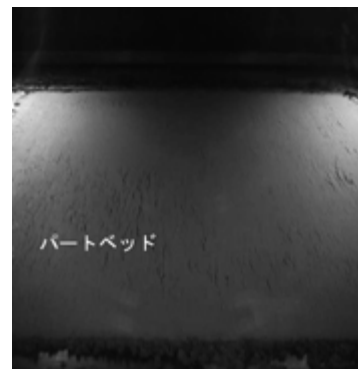


図11 パートベッドの肌荒れ

従来装置の中には、図10に示される逆回転ローラーシステムにより材料を積層するものもある。逆回転ローラーシステムの利点は、少々のカール歪みが発生していても、造形物を引っ掛けることなく簡単に材料を積層できることである。しかし、粉末粒子の粒子径が $20\mu\text{m}$ 以下となるとローラーの逆回転による擦り付けがY軸方向にひび割れを生じさせる。図11に $20\mu\text{m}$ 以下の粒子径の粉末を逆回転ローラーで積層した際に生じたひび割れ現象を示す。このようなひび割れ現象が生じると、正しく粉末を焼結・溶融することができず、造形物の精度・強度そして面粗度に影響がでてしまい使いものにならない。このため、逆回転ローラーシステムによる材料積層は粒子径 $40\sim 60\mu\text{m}$ 程度の粉末材料に限られる。将来、高精度化や微細化を測ろうとすると、より微細な粉末粒子を使用する可能性が高いが、その際には逆回転ローラーシステムは使用できないと言っている。

一方、従来装置では、オーバーフローと呼ばれる部分がある。粉末を積層する場合に、供給不足の箇所が生じないように余剰に粉末を供給しなければならない。そのため、粉末がパートベッドに供給された後、余剰の粉末はオーバーフロー部に落とされることになる。

さて、SEMPliceでは将来の光造形装置並みの微細化を睨み、 $20\mu\text{m}$ 以下の粒子径の粉末を使用できる装

置とするために積層機構には、ローラーではなくブレード形状のRecoaterを選択した。また、材料使用に関しては出来るだけ合理的且つ経済的に使用できる方式を採用し、ランニングコストの軽減を目指した。また、粉末焼結積層造形装置である以上、1台の装置で多様な目的に対して多様な材料が使用できることが魅力である以上、材料交換の簡便性も追及しなければならない。

これらの条件を満たす機構として、当社ではSmart Recoatingシステムを開発した。3D Systems社やEOS社の製品にあるオーバーフロー部を削除し、材料全てを有効に使用できる方式である。

この方式は、図12に示すように左のフィードピストンが上昇し材料を供給すると、右のフィードピストンが下降しオーバーフローした材料全てを右のフィード・カートリッジに落とす。逆に、右のフィードピストンが上昇し材料を供給する場合は、左のフィードピストンが下降する。つまり、左右のフィードピストンがギックンボタンをすることで、オーバーフロー材料を吸収する。Smart Recoatingシステムの技術的な課題は、Smart Recoaterがある一定以上の材料を保持し続けなければならないこと、材料がSmart Recoaterで均一に保持されるように、少ない箇所に材料が流れ込んでくれることであったが、研究開発に

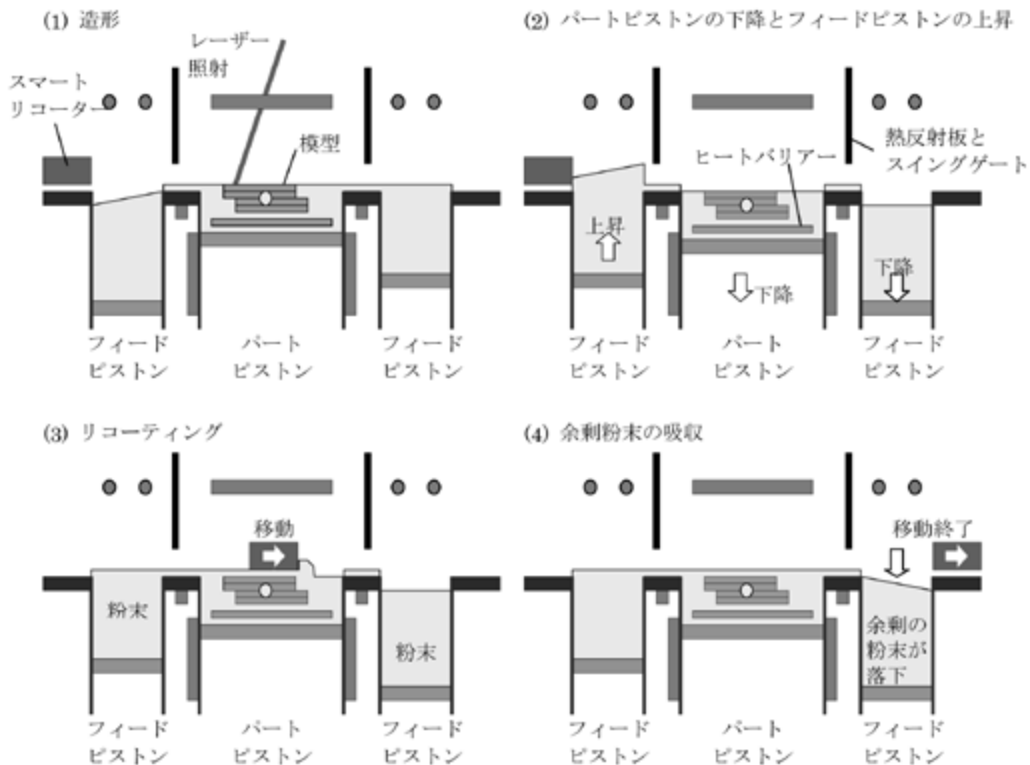


図12 Smart Recoating システム

より克服した。

Smart Recoating システムでは、オーバーフローを発生させないことにより材料の有効利用を実現し、ランニングコストを格段と低減したことである。また、材料供給方法としてカートリッジ方式を採用したことにより、材料交換も簡単であり、使用しない場合はカートリッジのまま保管もできる。

2.5 SEMPliceの樹脂粉末材料

1992年から販売開始された粉末焼結積層造形装置は、当初ワックス粉末やPC（ポリカーボネート）粉末を材料として使用していた。1990年代の半ばから実用化された材料は、11ナイロンや12ナイロンであり、またPS（ポリスチレン）が挙げられる。

ABS樹脂に代表される非結晶性樹脂は、粉末焼結積層造形装置で利用するべく材料開発が行われたが、その物性のためポーラスな焼結体しかできなかった。逆に、ポーラスとなることを利用して、PSが精密鑄造用の消失パターンとして用いられている。結晶性樹脂としては、融点が180～190℃付近のナイロンだけが製品化されている。これは、装置側の制約により、これら材料に限定せざるを得なかったものと言えるだろう。実際、粉末焼結積層造形法は、焼結しようとする材料の融点近傍まで粉末材料を加熱し、レーザーで焼結する。従って、6ナイロンや66ナイロンの場合では、粉末を少なくとも200℃を越えた温度に加熱しなければならず、装置に多大な付加を掛けることとなる。このような高温の環境温度で正常に作動するベアリングなどの部品は、非常に高価であり且つ長期間機能し続ける保証がない。このような理由から、融点が200℃を下回る材料が選択されることとなった。11ナイロンや12ナイロンは、融点が200℃を下回ること、親水性が低いことから経時的な変化が少なく粉末焼結積層造形に適していることから採用されたと言っても過言ではない。

実際、11ナイロンや12ナイロンを粉末焼結積層造形で使用してみると、樹脂の機械物性や耐熱性、さ

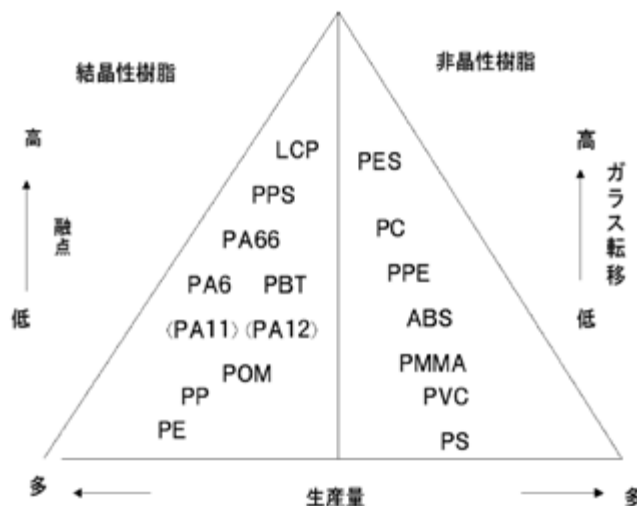


図13 熱可塑性樹脂

らに装置的な観点からもバランスのとれた使い勝手のよい樹脂であり、Rapid Prototyping 用材料として重宝されることとなった。さらに、これらの樹脂にガラスビーズや炭素繊維等を加えることによりその機械物性や耐熱性が向上することもある。かなりの使用範囲をカバーできたのである。しかしながら、射出成形や押出成形をはじめとする量産製造において用いられている樹脂は、図13に示すように極めて多様に富んでいる。Rapid Prototypingとしてこれらの量産樹脂との対応をとりたいという要望や今後のRapid Manufacturingを考慮した場合、さまざまな樹脂のバリエーションがあるべきだとの考えから、結晶性樹脂で最も広く用いられている樹脂のひとつであるPPに着目して開発を開始した。PPはナイロンと異なり、非極性材料であるため静電気を帯びやすい、まして微粉末では特に帯電しやすいためその対策が必要になる。帯電したPP粉末を用いて造形すると、温度が上がるにつれてスクレーパーでの微粉末の舞い上げや、それにより粉面が凹凸になるなどの粉面の荒れが発生する。これらに対する対策として、静電気が発生しないように帯電防止剤を添加することになるが、それを添加したことによる粉面のひび割れやひきずりなどの

表1 添加剤とPPの機械物性

添加剤	引張強さ ISO 527	引張破壊ひずみ %	引張弾性率 ISO 527	曲げ弾性率 MPa	アイゾット衝撃 ISO 180 (ノッチなし)
	MPa		MPa		KJ/m ²
A	23.0	10.8	734	825	19.8
B	20.0	7.5	796	803	13.9
C	21.8	55.6	623	864	23.0
D	22.4	92.4	603	809	24.1

表2 SEMpliceの仕様

システムの仕様	最大有効造形エリア	X : 550 × Y : 550 × Z : 500 (mm)	
	レーザー	55W CO ₂	
	ビーム走査	ガルバノミラー方式 最高標準スキャン速度 = 10,000 mm/sec	
	コンピュータシステム	Pentium4 3GHz以上	
	ソフトウェア	Windows [®] XP Professional & SEMware	
設備条件	CADインターフェース	STLフォーマット (ビットマップデータも計画中)	
	電源	3相 AC 200V ± 10% 75A (50/60Hz) AVR不要	
装置寸法	空調	20℃ ~ 28℃ (造形中は ± 2℃ 以内) 湿度 70% 以下	
	構成	寸法	重量
	本体	2,100 × 1,450 × 2,350 (mm)	2,000 kg
	コンピュータキャビネット	800 × 800 × 1,500 (mm)	120 kg
材料	機能モデル用材料	ASPEX PA	ナイロン 12
		ASPEX GB	ナイロン 12 + ガラスビーズ
		Asphia PP	ポリプロピレン
		ASPEX TPE	Thermal Plastic Elastomer
	消失模型	ASPEX IC	ポリスチレン (PS)

2 次的な問題も発生することになる。弊社では鋭意検討した結果、特定の添加剤の組み合わせによりこれらの問題を解決した。上記の造形性の改善にとともに、PP材料の機械物性のなかでも最も特徴となる引張り破壊ひずみ(伸び)や衝撃試験値の向上をはかることができた。表1にその測定値を示すが、添加剤により韌性が大幅に向上していることがわかる。

ちなみに韌性を改善する方法として、いったん造形した造形品を熱処理後、急冷することにより結晶構造を制御することでも韌性の向上が達成できるが、問題点として急冷時の造形品の変形は避けることができない。

3. 結言

粉末焼結積層造形装置による機能評価モデルは、自動車業界を中心に広がりつつある。当社としては、本市場に対して最適な装置や材料を提供して行くこととなる。また、需要に応じカスタマイズ対応も行う予定である。最後にSEMpliceの仕様(表2)と特徴を以下に取りまとめる。

- 有効造形サイズの大型化
(X 550 mm × Y 550 mm × Z 500 mm)
 - レーザーのチラーを本体内に内蔵
 - 無駄なスペースを省き、すっきりとした装置
- 安定した造形温度環境と均一な温度分布

- 多点の測温体とIRセンサ併用による絶対温度での温度制御
 - ヒータ安全回路(CT内蔵により断線、短絡検知) + 独立制御系過熱保護
 - AVR不要 - ヒータ電源電圧変動補正機能(IRヒータ部)
 - 優れた造形精度と高速造形
 - 広いワークサイズでもビーム焦点を最小化し、かつCES方式を採用
 - ・コンパクトなRF電源内蔵レーザー(55W)を搭載
 - ・標準最高スキャン速度は10m/sec
 - ・安全装置: 設定値以上の過出力検知機構
 - 容易な材料準備および交換操作
 - オリジナルのソフトウェアの開発
 - SEMwareの日本語メニューによる操作
 - 入力データはSTLデータとビットマップデータ(予定)
 - 自由度の高いレーザー走査パターン
- また、本装置は顧客のカスタマイズの要望に対応する。

株式会社アスペクト

http://www.aspect-rp.co.jp/
 〒206-0802 東京都稲城市東長沼3104-1-101
 TEL 042-370-7900 FAX 042-370-7901