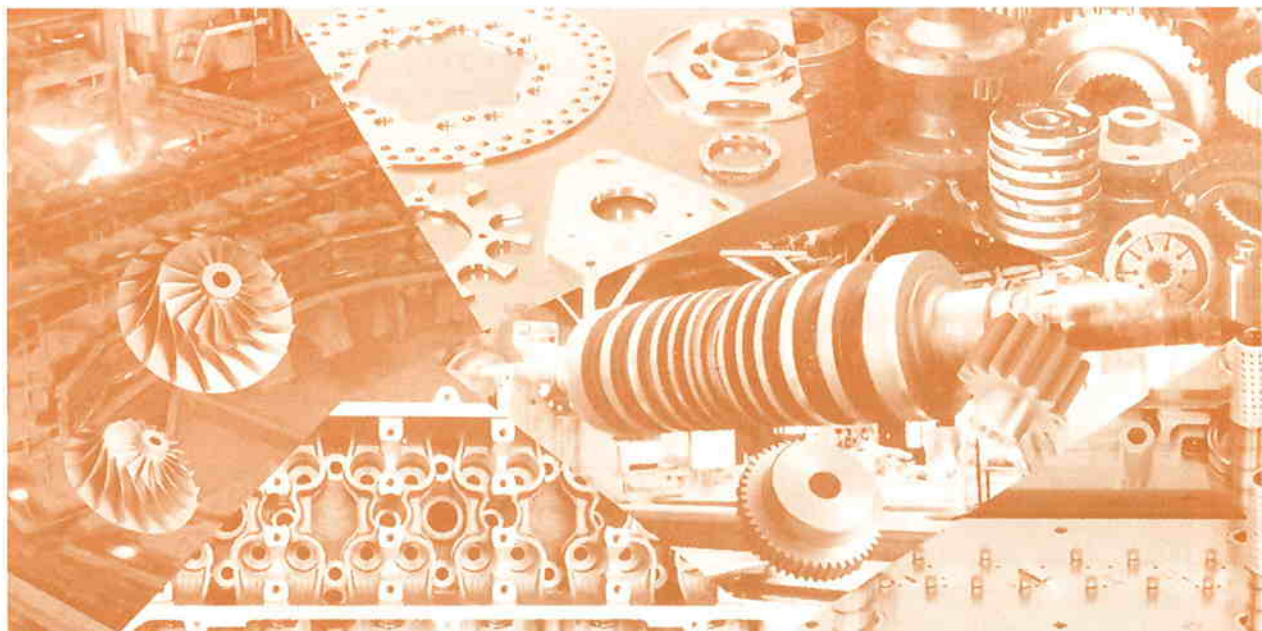


素形材

Vol.48
No.7

- 特集「ラピッドプロトタイピングの最新動向」
- 積層造形技術の動向－粉末積層造形法を中心に－
- 粉末焼結積層造形装置の課題
- 粉末レーザ焼結型RPの最新状況と製品製造への適用について
- 電子ビーム技術を利用した金属積層造形装置
- インクジェット方式による三次元砂型造形技術
- 紙積層立体モデル (LOM) によるラピッドプロダクション
- 2007年の光造形用樹脂



技術TREND

- 発泡樹脂成形機におけるシングル段取金型交換システム
- バリ取り・エッジ仕上げの諸問題と対策

TOPICS

- アンチモニー産業の歴史と生産技術－外貨獲得に貢献した東京の地場産業－

◆◆特集「ラピッドプロトタイピングの最新動向」◆◆

特集「ラピッドプロトタイピングの最新動向」企画趣旨	1
編集委員 安齋正博	
積層造形技術の動向—粉末積層造形法を中心に—	1
東京大学 新野俊樹 (独)理化学研究所 安齋正博	
粉末焼結積層造形装置の課題	6
(株)アスペクト 早野誠治	
粉末レーザ焼結型 RP の最新状況と製品製造への適用について	13
(株)NTTデータエンジニアリングシステムズ 前田寿彦	
電子ビーム技術を利用した金属積層造形装置	18
(株)エイチ・ティー・エル 赤野恒夫 萩原正志	
インクジェット方式による三次元砂型造形技術	21
(株)EX ONE 横山謙次	
紙積層立体モデル(LOM)によるラピッドプロダクション	25
(株)今西製作所 今西寛文	
2007年の光造形用樹脂	29
シーメット(株) 萩原恒夫	

◆技術TREND

発泡樹脂成形機におけるシングル段取金型交換システム	35
DAISEN(株) 津田彰彦	
バリ取り・エッジ仕上げの諸問題と対策	40
(独)理化学研究所 安齋正博	

◆ TOPICS

アンチモノー産業の歴史と生産技術—外貨獲得に貢献した東京の地場産業—	46
日本工業大学 松野建一 丹治 明	

◆素形材学校 素形材の表面改質(15)

表面処理—ハードコーティング(その2)	
—TDプロセス—	52
DOWAサーモテック(株) 井辺光広	

◆随想

中国の若者“向前进”から“向钱进”	57
(株)アイ・ディー・オー・デジタル出版 井戸 潔	

文献速報	58	素形材工業生産実績	67
SOKEIZAI Center News	59	編集後記	72
平成18年度事業報告書・収支決算書概要	60		

2007年の光造形用樹脂

シーメット(株) 萩原恒夫

光造形システム用の光硬化性樹脂は、その進歩により形状確認モデルにとどまらず、機能や機構検討モデルとして広く利用されるに至った。本解説では2007年6月時点での光造形用樹脂の現状とその開発動向について述べる。

1. はじめに

光造形システムの原理は、3次元CAD上で入力されたソリッドデータを三角パッチで簡略化されたSTLフォーマットに変換した後、所望積層厚みにスライスして断面データを作成し、この断面データに基づき液状の光硬化性樹脂に紫外線レーザー光を選択的に照射して硬化させ、一層ずつ積層することにより三次元立体モデル（造形物）を得るものである。この技術は1980年に当時名古屋市工試の小玉氏により発明され、その後、米国の3Dシステムズ社や日本のシーメット社により実用化された。光造形法に端を発した各種3次元積層造形システム（ラピッドプロトタイピング=RPシステム）が開発され、今日では製品開発に不可欠な手段となっている。

光造形システムの特徴は、速度と精度が他のRPシステムに比較して最も優れていることであり、過去、現在とも最も重要なRPシステムと認識されている。また、光硬化性樹脂（以下樹脂）の進歩により、当初の目的であった形状確認モデルの他、機能や機構確認モデルとして広く利用されている。本解説では2007年6月時点での光造形用樹脂とその開発動向について述べる。

2. 光造形システムとその樹脂

図1に光造形システム市場の推移を示す。1990年からの約10年間の第一世代は、開発や試験導入の世代であり、光造形装置のUV光源はHe-CdレーザーからArレーザーと替わり、さらに半導体励起の固体レーザーへと進化した。その後装置として成熟が進み、そのコストや品質が問われる第二世代を経て、現在は、必要不可欠なツールとして広く利用されており、第三世代

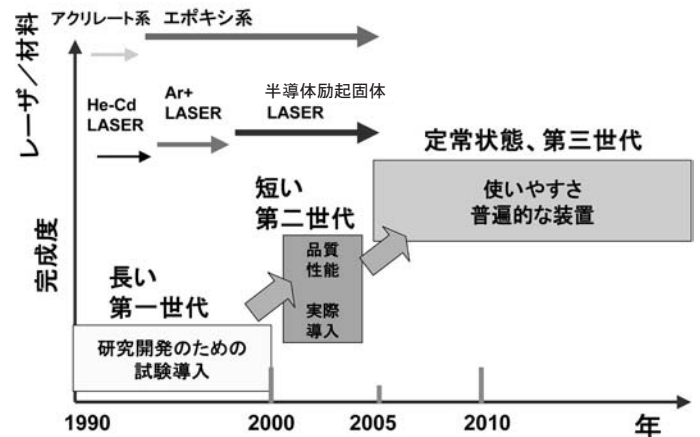


図1 光造形システム市場の推移

へと推移している。

光造形システムは、今日、誰でも簡単に安心して使用できる装置となり、製品開発の担い手として重要な役割を果たしている。光造形システムは今日、その性能が樹脂の性能に大きく依存してきている。

2.1 光造形物の用途

光造形法で得られる造形物の用途は、三次元立体モデルを通じたマン・マシンインターフェースであり、製品開発を効率的に行うためのツールである。CADデータや図面の確認（形状確認）、各種シミュレーション、光造形モデルをマスターとするシリコンゴム真空注型型を経由するレプリカの作成、鋳造のためのマスターモデル、メタルエポキシ型のマスターモデルなど、「ものづくり」の基本的な手段として利用されてきた。最近では、樹脂性能が向上したことにより、光造形法にて直接、機構部品や機能部品を製作して機能試験やその評価に使われるようになってきた。今後は、製品開発のツールから、更に実部品への応用が期待されている。

光造形機の導入先からその利用を推定してみるこ

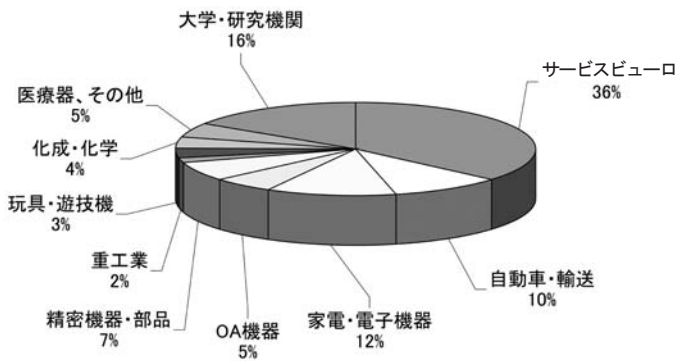


図2 シーメットの光造形機の顧客

にする。図2にシーメット社の光造形機の既存顧客を分類する。図から分かるようにサービスビューロが最も多く30%を超えている。この割合は今後更に増加すると推定している。このサービスビューロは光造形モデルを受注して自動車や家電などの大企業の「ものづくり」を支えており、サービスビューロの力はそのまま大企業の開発力に直結しており重要な位置を占めている。対応力強化のためにサービスビューロは競って新しいシステムを導入し、高性能な新しい材料を使いこなしている。というのは製品開発ステージでの分業が一層進むと共に、サービスビューロはその生き残りのために、新規開発樹脂に最も敏感であり、いち早く対応していくためである。この点からサービスビューロの光造形樹脂へのニーズが代表的なものとなる。

2.2 樹脂開発の経緯

開発の経緯を樹脂の面から見ると、レジスト材料に

端を発するアクリレート系樹脂から、シーメットがいち早く採用したエポキシ系樹脂へと展開されていった。表1に最近の光造形樹脂の分類とそのメーカ、品番について示す。各種用途に適応するために、高精度モデル用(真空注型用も兼ねる)、靱性(PPあるいはPEライク)、ABSライク、透明、耐熱、フィラー強化、ゴムライクなどに大別できる。この表を見て分かるように用途別に一通りの品揃えはできたものと考えられる。これら樹脂について、以下にその動向を述べる。

2.2.1 高精度モデル用樹脂

高精度モデル用樹脂は広く形状確認用途、真空注型マスターモデル、精密鑄造用消失模型などに使われている。このうち、真空注型マスターモデルは日本で特に広く用いられている用途であり、簡単に言うと光造形樹脂の性能が低いため、熱硬化性のウレタン樹脂やエポキシ樹脂に置き換えて(レプリカを作成し)機能試験などを可能とするためである。シリコンゴムで型を取れば20個程度の高品質・高性能なレプリカが容易に作成でき、ほとんどの用途に利用できる。光造形樹脂の性能が向上すれば自ずと真空注型用途は減少してくると思われるが、現状では有効な手段である。

2.2.2 靱性樹脂

勘合などに耐えられる靱性樹脂が上市され、光造形法の応用範囲を劇的に拡大した。1998年に筆者らは、高靱性を発揮しやすいウレタンアクリレート系樹脂により、ポリプロピレン(PP)に近い性能を有し、スナップフィット性能をもつTSR-1938を発表した。

表1 最近の光造形樹脂の分類とそのメーカ

	高精度	靱性	ABS ライク	高透明	透明・耐熱	高耐熱	フィラー入	ゴム
指標		伸度 >10%	HDT >60℃	高透明	透明・耐熱	高HDT	高曲弾性率	Shore A 70 Shore A 50
メーカ								
シーメット	TSR-820	TSR-821 TSR-831	TSR-825 TSR-832	TSR-828 TSR-829	-	TSR-830	TSR-755	TSR-1920 TSR-510
ADEKA	HS-680	-	HS-690 HS-696	-	-	-	-	-
JSR	SCR-701	SCR-710 SCR-711 SCR-720	SCR-735	SCR-776	SCR-771	SCR-740	SCR-802	SCR-330
DSM-SOMOS	SOMOS-7120	SOMOS-9120 SOMOS-9420	SOMOS-14120	SOMOS-11120 SOMOS-18120	-	SOMOS-12120 SOMOS-12920 SOMOS-18420	ProtoTool 20L NanoTool NanoForm 15120	ULM-17220
Huntsman	SL-5510	SL-7545	SL-7580 SL-7800 SL-7810	SL-7570	-	SL-5530HT	-	-
3Dシステムズ		SI-25 SI-26	SI-40, SI-50 SI-55, SI-60	-	-	SI-46	Bluestone	-

この樹脂は靱性に優れ、大きな注目を集めた。その後、TSR-1938 A、三菱レイヨンとの共同開発のTSR-1938 Nへと改良した。また、1998年米国 DuPont 社のSOMOSグループ(現 DSM-SOMOS社)はエポキシ系材料のSOMOS-8100シリーズでポリエチレン (PE) ライクな材料を、その後はこれを発展させて2000年にはポリプロピレン (PP) ライクなSOMOS-9100シリーズとした。2000年になると vantico 社(現 Huntsman Advanced Materials 社)はPPライクな靱性樹脂のSL-7540を発表した。樹脂はそのしなやかさでかなり評判となった。しかし、SL-7540の曲げ弾性率は1.1~1.4GPaであり薄ものでは、形状保持に若干不安があったため、その後SL-7545にレベルアップしていった。シーメット社は、これら先行樹脂の欠点をカバーしたエポキシ系の靱性樹脂TSR-821を2001年に上市した。TSR-821樹脂は、耐熱性を除き、引張り、曲げなどの機械物性はABSのそれに匹敵するものである。特に曲げ弾性率は2.2GPaを有し、ABSと全く同等で、ABSの感触で使えるものとしてその評価は高い。靱性と強度を兼ね備えた樹脂により光造形物の応用範囲はさらに広がった。2006年になると新しい靱性樹脂が次々と発表された。JSRはSCR-711からなる高伸度樹脂を発表した。この樹脂は30cmの高さからパチンコ玉を繰り返し落下させても何ら損傷がないとしている。DSM-SOMOS社は「オキセタンケミストリー」として数多くの靱性樹脂を発表しているが、2007年になるとDMX-SL-100樹脂なる高靱性樹脂を発表した。シーメット社はTSR-821の高性能を保持し、かつ耐湿性を格段に向上させ、吸湿伸びに対する性能が向上した新しい材料を使ったTSR-831を発表した(図3)。この樹脂には新規材料を使っていることから、他社より一歩先を見据えた樹脂として大きな評価が期待でき

る。

2. 2. 3 ABSライク

靱性樹脂の出現以後、顧客の要望は、成形材料として広く利用されているエンジニアリング樹脂と同等の物性を有する材料である。その代表的性能はABS性能である。

シーメット社は2003年夏にはTSR-821を発展させたTSR-825を発表し、耐熱性・靱性を向上させてABS物性により近づけた。この樹脂は無色透明の液体状態から光硬化により白色を呈し外観もABSに近いものとなっている。JSR社はエポキシベースにエラストマー微粒子を含有させた乳白色のSCR-730樹脂を上市し、その後、これを改良してSCR-735とした。これらSCR-730、735とも、乳白色の液状から淡黄色の硬化物に変化する。これら樹脂は硬いエポキシ樹脂マトリックスにエラストマー粒子を分散させてABS類似の構造を狙ったものと推定される。また、バンテニコ社(後にハンツマン社)は2002年秋に乳白色でABSライクな外観を持つSL-7560樹脂をリリースし、その後、改良してSL-7580とした。2004年になるとDSM-SOMOS社は白色の靱性樹脂SOMOS-14120を、3Dシステムズ社は白色と灰色の2タイプを有するSI-50をリリースしたが、このSI-50は不評で2007年にはSI-55に改良した。これらの性能はABSには及ばないものの外観はABSに近いモデルが得られる。ハンツマン、SOMOS、3Dシステムズ社などの白いABSライクな樹脂は形状確認が重要な米国では人気が高いようである。

2. 2. 4 透明樹脂

一方、日本では機能性が重視されることにより、ABSライクな白い外観よりもむしろ透明性や靱性、耐湿性などが重視されている。中でも基幹産業である自動車や家電では、透明・靱性樹脂に興味が集まっている。車のデザインにおいてヘッドランプやリヤランプなどのデザインは非常に重要であり、特に、光源のLED化でホットな開発対象となっている。

また、エンジン部品や家電製品などで正確で効率的な開発のために内部の可視化は有効であり、透明性に優れた樹脂の開発が進んだ。2003年から2004年にかけてDSM-SOMOS社からSOMOS-11120樹脂(日本ではD-MEC社よりSCR-11120)が上市された。その後JSR社はSCR-11120の未硬化状態での吸水性を改善したSCR-771を2006年に発表した。シーメット社からは2004年にTSR-828樹脂が、ハンツマン社から



図3 耐湿・靱性樹脂TSR-831の例

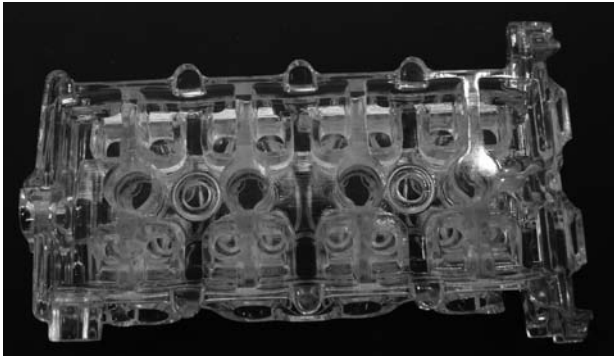


図4 透明・耐湿樹脂TSR-829の例

はSL-7570樹脂が上市された。SOMOS-11120樹脂、SCR-771、SL-7570樹脂はともに硬化モデルが薄い緑色を呈しているのに対してTSR-828樹脂はナチュラルな透明性で顧客の要望を的確に捉えている。2005年になるとシーメット社はTSR-828樹脂の透明性と耐湿性を大幅に改善したTSR-829樹脂を上市した。この樹脂は積層端面の表面性を意識した最初の樹脂であり、造形時に端面に潤い成分が析出して積層端面の透明性を保持しており、エンジブロックなどの可視化に好適である(図4)。

2. 2. 5 耐熱樹脂

先にも述べたが、光造形樹脂の造形物の物性はかなり進歩した2007年時点でもABS性能には及ばない。しかし、機能性の高いモデルを得るためにはポリオキシメチレン(POM)やポリカーボネート(PC)などのエンジニアリングプラスチックと同等の物性を有する材料の開発がポイントとなる。これらエンジニアリングプラスチック性能の樹脂の開発はまだかなり時間がかかると思われる。そこで、得られる造形物の物性が全ての項目に亘って満足しなくても、目的とする機能試験に使用可能な物性を有すれば利用価値は大きいと考えられる。このような観点から、筆者らは、透明でかつ耐熱性の優れた光造形用樹脂TSR-910を1996年に開発し、一部ユーザーによる評価を受けた。1998年に改良しTSR-920として上市した。このTSR-920は高い耐熱性で、潜在顧客を「アツ」と言わせた。ウレタンアクリレート系の樹脂のため、反りという点では若干不利ではあったが一つの大きな指針となった。

チバ社(後にバンティコ社)は2000年頃、3Dシステムズの光造形装置向けにSL-5530HTからなるエポキシ系耐熱樹脂を上市した。その後DSM-SOMOS社は赤色透明のSOMOS-12120なるエポキシ樹脂を2003

年に、JSR社は2004年に淡黄色のSCR-740樹脂を発表した。これらはいずれも熱処理により高い耐熱性を有しているが、モデルの利用時に必要とされるセルフタッピング性は備えていない。そのため極めて限られたところでしか利用されていない。

かかる状況からシーメット社は2006年にエポキシ系のTSR-830という、耐熱性とセルフタッピング性を兼ね備えたものを発表した。このものは、特に熱処理を施さなくても利用環境下で耐熱性が向上する。また、60℃程度の緩やかな熱処理でほぼABS樹脂の耐熱性を示すことにより、ABS樹脂用途に今後広く利用されていくものと推定している。また、JSR社は2006年にSCR-771の耐熱性を向上させたSCR-776を発表し、2007年に上市した。2007年初には3Dシステムズ社も高耐熱樹脂SI-46をラインナップしたと聞いている。このように、このジャンルの樹脂がにわかには活発になってきて、このようにさらに高い性能、耐熱性と靱性を兼ね備えた物性、ひいてはPC性能に近づこうと開発を活発化させている。

2. 2. 6 フィラー強化樹脂

筆者らはフィラー強化樹脂として1995年にTSR-752を提案し、光造形システムでのダイレクト型作成という新たな境地を切り開いた。その後、TSR-753、754、755と改良を重ねた。

TSR-755は2005年に発表され、高荷重熱変形温度(HDT)が250℃以上を有し、低粘度化と沈降性の改善、及び造形物表面の滑らかさを改善した。この樹脂はウレタンアクリレート系樹脂をベース樹脂にしていることにより、エポキシ系フィラー入り樹脂とは異なり、未硬化状態での長期安定性に全く不安がない。JSR社は1998年頃TSR-75シリーズの後を追って、独自にエポキシ系樹脂をフィラー強化したSCR-801樹脂の提供を開始し、その後はSCR-802と改良した。このものは、シリカフィラー強化したものであるが、フィラー量を抑えているため低粘度であり、沈降が激しく、造形中の攪拌を余儀なくされている。その後、この樹脂は3Dシステムの装置向けにDSM-SOMOS社によりローカライズされProtoTool-20Lとして、そのユーザーを広げた。ProtoTool-20Lは発展しNanoToolに改良された。3Dシステムズ社はBluestoneなる青色不透明のフィラー強化樹脂を発売したがDSM-SOMOS社に特許侵害で訴えられ、係争後和解した。これらフィラー強化樹脂は熱変形温度と共に曲げ弾性率が高く、風洞実験モデルに好適で、F-1などの開発に大きく貢



図5 新規ゴム樹脂TSR-510の例

献しているものと推定される。

2. 2. 7 ゴムライク樹脂

筆者らは常に新しい樹脂材料の開発に積極的に取り組み、1997年にはゴム様モデル樹脂TSR-1920樹脂を開発して、その用途展開を開始した。ゴム様形状確認モデルとして黒色のTSR-1920B、透明タイプのTSR-1920Cを提供している。このものは、それぞれゴム硬度で約70を示し、感触はゴムのそれによく似ているため、デザイナーや開発者の感性を直接表現できる材料として有用とされた。また、医療用のモデルとしても重宝されている。JSR社はゴム硬度A50で高ゴム弾性を示すSCR-330で追従したが、その後市場から姿を消した。2005年になるとDSM-SOMOS社はULM-17220なる黒色ゴムライク樹脂を上市した。マーケットサイズは依然大きくはないと推定されるが広範囲な用途が期待されている。

シーメット社は2006年に図5に示すようなシリコーンゴムを用いた世界最初の光造形樹脂TSR-510を上市した。この樹脂は伸度が100%以上、ゴム硬度50を有し、弾性回復率は100%を有している。このものは、高性能ゴム部品や医療用途を狙って開発したもので、今までのゴムライク樹脂では果たせなかった性質を有していることより今後市場への期待が大きい。

2. 3 鋳造用消失模型用樹脂

欧米では光造形モデルが鋳造用消失模型に広く利用されており、3Dシステムズ社は消失模型製作に対してクイックキャスト法(中空モデルの利用)を次々に改良して、消失性の向上を図っている。現在ではクイックキャスト2.0としてかなりな成功を収めている。特に2006年には3Dシステムズ社の大型のViper Pro機が鋳造用消失模型作成のために多数販売されたといわ

れている。このような事情はこの用途の樹脂開発を加速させている。金属に置き換わったときその表面は消失残渣に左右される。その点を改善するためにDSM-SOMOS社はProto-Cast AFなるエポキシ系樹脂中のアンチモン系開始剤を廃止した樹脂を上市した。同様に、ハンツマン社も2006年夏にSL-7800と7810なるアンチモンの使用量を大幅に減少させたエポキシ系樹脂の発売を開始している。

欧米では鋳造用消失模型用樹脂が一つのジャンルを形成しているが日本では様子が異なっている。光造形が台頭してきた頃には日本でも光造形モデルの用途として鋳造用の消失模型が提案され多くの検討がなされた。しかし、消失残渣による鋳造物の品位の低下、消失時の熱膨張による型割れの問題でその後はわずかなユーザでの実施にとどまっているといわれている。

日本では顧客の最終鋳造品に対する要求が厳しく、このクイックキャスト法も普及していない。近年、千葉・渡邊両氏により光造形モデルを直接消失させるQ-TAC法が開発され注目を集めている。この方法は消失温度の制御と消失時に用いる砂の制御により十分な精度での鋳造が可能となっている。最近では自動車のシリンダブロックサイズのものも鋳造可能になっていると聞いている。このQ-TAC法ではシーメット社のTSR-820シリーズのエポキシ樹脂がよい結果を与えている。他メーカーのエポキシ系樹脂では消失残渣の点で好結果が得られていないと伝えられている。

鋳造の世界でも熟練技能士の減少や、開発期間の短縮化の強い要請で再度光造形法による消失模型製作が叫ばれようになってきた。今後は、この方面の樹脂開発も先に挙げたエンジニアリング・プラスチック性能のモデル用樹脂の開発とともに活発化してくるものと思われる。このことはとりもなおさず、中国大陸へシフトした鋳造法が国内に戻ってくる足懸かりとなるものと推定している。

3. 光造形用樹脂の今後の動向

日本の基幹産業である自動車や家電では光造形物の性能を、まずはABS性能に求めており、更には耐熱性と靱性を兼ね備えたPCなどのエンジニアリングプラスチックの性能を要望している。先に述べたように、シーメット社は2006年ABS樹脂を強く意識したTSR-830を上市した。このものは、60℃程度の雰囲気下でセルフタッピング性を保持したまま耐熱性が向上し、ABS樹脂に迫る性能に向上する。JSR社は靱性と

透明性に併せて耐熱性を向上させたSCR-776を2007年夏に発表した。これらは、耐熱性と共に靱性を向上させ、ABS性能に迫ろうとしている。今後、この方向の開発はより活発に進むと推定される。

また、昨今、自動車業界や家電業界はグリーン購買を社是に掲げ、その活動を活発化させている。「環境に優しい」材料を求めており、光造形用樹脂原料の環境対応も進められるものと考えている。シーメット社は2007年夏に非アンチモン系の靱性樹脂TSR-880を発表した。今後、TSR-800シリーズのいずれでも非アンチモン化を図るものとしている。2009年には各社の樹脂もおそらく全て一気に非アンチモン化がなされていくものと推定している。

これらの樹脂開発を今後10～15年のスパンで見ると、ラピッドマニファクチャリングを意識した高性能なエンジニアリング樹脂性能へのシフトと同時に、環境対応が突き進むものと思われる。

4. まとめ

光造形樹脂はここ数年大きな発展を遂げ、顧客のニーズに応じた樹脂をラインナップすることができるまでになった。しかし、ABS性能への到達にはもう少し時間がかかるものと思われる。そう遠くない将来ABS性能は達成されて標準的な樹脂材料になるものと考えている。その後はさらに高性能なエンジニアリング樹脂性能に進化していくものと推定している。これら、光造形法で作成する造形物はやがてそのまま利

用できるほどに進化して「ものづくり」を大きく変貌させていくものと思われる。また、環境対応も見逃さない。アンチモンフリーの材料やその他環境に配慮した材料が主流となる日も遠くない。

参考文献

- 1) 中川威雄, 丸谷洋二編, 積層造形システム－三次元コピー技術の新展開 (工業調査会, 1996)
- 2) P. F. Jacobs: “Rapid Prototyping & Manufacturing, Fundamental of Stereolithography”, (SME, 1992)
- 3) T. Wohlers: “Wohlers Report 2006, 及び2007”, (Wohlers Associates, Fort Collins, Colorado, USA (2006, 及び2007).
- 4) 萩原恒夫ホームページ: <http://www.urban.ne.jp/home/hagi>
- 5) 萩原恒夫: 精密工学, 70 (2004) No. 2, 171.
- 6) 萩原恒夫: 素形材, 46 (2005) No. 6, 19.
- 7) 萩原恒夫: 画像工学, 45 (2006) No. 3, 162.
- 8) 伊藤 隆, 萩原恒夫: 高分子論文集, 印刷中.
- 9) Q-TAC について: <http://www.jmc-rp.co.jp/qtac/index.html>

シーメット株式会社

<http://www.cmet.co.jp>

〒222-0033 横浜市港北区新横浜 2-5-5

住友不動産新横浜ビル

TEL 045-478-5561 FAX 045-478-5569