

光造形用樹脂の最近の進歩と開発動向*

萩原恒夫 **

Current Status and Trends of Stereolithography Resins / Tsuneo HAGIWARA

Key words: stereolithography, resin, 3D model, epoxy, durable resin, ABS, PC

1. はじめに

光造形法は20数年ほど前(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により実用化された。以後、光造形法に端を発した各種3次元積層造形法(ラピッドプロトタイピング=RP)が開発され、今日、開発コスト削減、開発工期低減に大きく寄与し、製品開発に不可欠な手段となっている。現在、光造形法は、当初の目的であった形状確認モデルの製作にとどまらず、光造形用の光硬化性樹脂材料(以後光造形用樹脂)の開発により、モデル自身に機能を付与せしめ、広範な用途に展開されている。ユーザは最終的には出来上がった造形物の性能に付加価値を見いだすものであり、その材料の性能がそのシステムの性能を大きく支配している。その意味で、材料の開発が重要となる。本解説では光造形用樹脂の最近の進歩と開発動向について述べる。

2. 光造形法とは

光造形法の仕組みについては多くの総説^{1,2)}に紹介されているので、詳しくはそちらを参照して欲しい。ここでは簡単に述べると、図1のように、まず、3次元CAD上で入力された3次元ソリッドデータをSTLフォーマットに変換した後、積層厚みにスライスして断面データを作成し、このデータに基づきに液状の光硬化性樹脂に紫外線レーザー光を照射して選択的に硬化させ、一層ずつ積層することにより所望形状の3次元立体モデル(造形物)を得るものである。

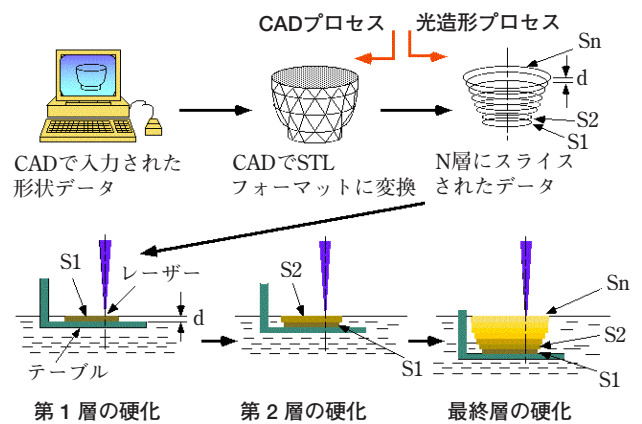


図1 光造形の原理図

2.1 光造形装置市場での推移

光造形装置の市場での推移について考察したのが図2である。1990年導入開始より約10年間の長い第一世代は、装置の開発や材料の開発に注力が払われた時期である。光造形装置のUV光源はHe-CdレーザからArレーザと替わり、さらに半導体励起の固体レーザへと進化していった。材料も、アクリレート系材料からエポキシ系材料へと展開され、壊れやすいものから、韌性をもった実用的なものへと開発が進められてきた。装置として成熟してきており、そのコストや品質が問われる第二世代に突入している。現在は第二世代であり、安心して使用できる安定な装置となり、実用導入が進んでいる。この期間は短く、1~2年後

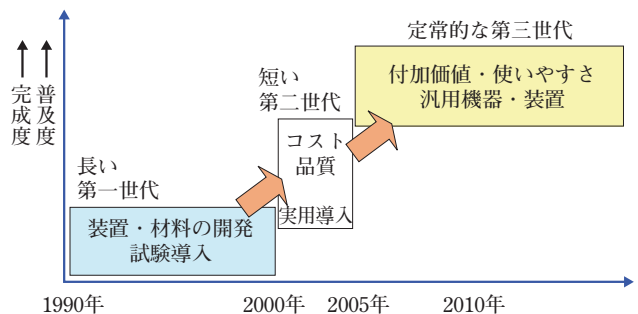


図2 光造形装置の市場での推移



* 原稿受付 平成 15 年 12 月 4 日
 ** シーメット(株) (横浜市港北区新横浜 2-5-5)
 萩原恒夫
 1974年群馬大学大学院工学研究科修士終了。同年4月帝人(株)入社。帝人東京研究センターにて、感光性樹脂、導電性高分子の研究に従事。導電性高分子の研究により1988年筑波大学より理学博士。1994年より帝人製機(株)オプティメージ事業部にて光造形樹脂の開発に従事。樹脂開発部長を経て、2000年同オプティメージカンパニー社長。2001年4月よりシーメット(株)常務取締役。

脂開発部長を経て、2000年同オプティメージカンパニー社長。2001年4月よりシーメット(株)常務取締役。

には装置に付加価値や使いやすさが求められ、かつ汎用的な装置に求められるものが備わった定常的な第三世代に移行するものと推定している。逆に、2004年はこの光造形装置をはじめとするRP装置にとって、一つの正念場の時期でもある。この時期に使いやすさや、装置の安定性が備わらなければ、この装置が汎用的な装置に移行するのが難しいともいえる。この装置が汎用的なものに移行するためには、材料が鍵を握っていると考えている。というのは、装置の顧客はあくまでも出来上がった造形物の性能にその意義を見いだすからである。どんなにすばらしい装置であろうと、使いやすい装置であろうと、できてくる造形物が低レベルでは顧客の要求を満たすことはできない。あくまでも、顧客は最終造形物を利用するのである。

2.2 光造形物の用途

光造形法で得られる造形物の基本的な用途は、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り、各種シミュレーションに使うことにある。さらに、光造形モデルをマスターとして、シリコンゴム真空注型を経由するレプリカの作成、鋳造品の作成や、メタルエポキシ型の作成、直接射出成形用の試作型の作成に利用され、試作品や少量生産品を得る方法に使われている。

最近では光造形樹脂の性能が向上し、機構部品や機能部品を製作してデザイン検証のみならず機能試験・評価に使われるようになってきた。そして、実部品としての未来が開かれてきた。

今日の光造形物の用途を、米国と比較すると表1のようになる。米国に比較して日本では真空注型のマスターモデルに利用することが多い。これに対して、米国ではデザインサイドと開発サイド、あるいは開発サイドと生産サイドの意思疎通を図るためのコミュニケーションツールとしての形状確認用途が最も多い。これは製品開発の様式の違いによるものといわれている。デザイナーとエンジニア、製造現場とがそれぞれ独立に機能しているために、これら部門間の意思疎通(コミュニケーション)のためのツールとして光造形モデルが形状確認に広く利用されている。これに対して、日本ではこれら各部門が同居して設計から開発までが行われることが多いために、意思の疎通に利用するよりは、開発や製造に近いところで利用される場合が多い。このことが、造形モデルの精度と材料性能を優先させている。その結果、ハイエンドの光造形装置が他のRPシステムに比べて広く普及していることにも繋がっている³⁻⁴⁾。

表1 光造形物の用途割合

用途	日本 (%)	米国 (%)	ポイント
形状確認	30	45	コミュニケーションツール, 医療
真空注型マスター	40	15	家電, 自動車
機構・機能確認	20	20	新規高性能樹脂
型応用など	10	20	ダイレクト型, 金属樹脂型, 木型

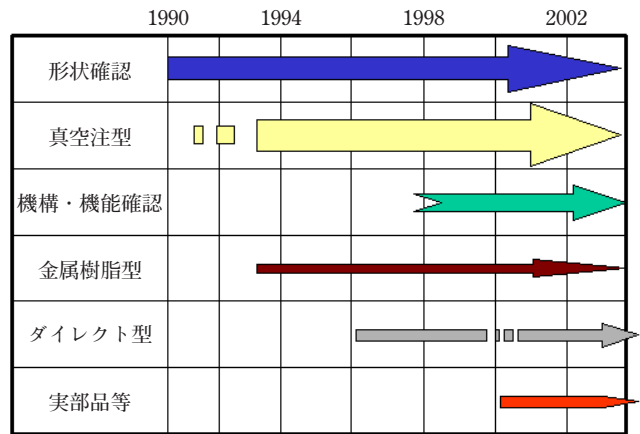


図3 光造形物の用途の歴史(帝人製機/シーメット社の例)

図3にシーメット社のユーザ先での光造形物の用途について簡単に推移を示す。当初、光造形物の用途は形状確認で出発したが、その後真空注型マスターモデル、金属樹脂型応用、ダイレクト型、機構・機能確認へと展開していった。最近では実部品等の直接製造(ラピッドマニファクチャリング=RM)への息吹も強く感じられる。帝人製機の開発したイミド系樹脂は、造形物が直接実部品として日立製作所の水質試験器の重要部分であるマニホールドに採用されている⁵⁾。このようにものづくりの方法が大きく変化していることがよく分かる。さらに材料の開発・改善が進むことにより光造形の応用が拡大していくものと考えている⁶⁻¹¹⁾。

2.3 光造形用樹脂の歴史

表2に光造形樹脂の簡単な歴史を示す⁸⁾。黎明期では、3次元CADデータから立体モデルができるだけで人々は驚嘆したが、精度は十分とはいえないものであった。このころアクリレート系樹脂でシステム実用化の先鞭を切った3Dシステムズ社は精度向上のために「反り」と日夜格闘していたものと推定される。一方、シーメット社の造形物は光造

表2 光造形用樹脂の進歩

年	1993	1994	1998	2001	2002
世代	黎明期	第一世代	第二世代	第三世代	第四世代
ベース樹脂	UA/EP	EP	EP	EP	EP
ポイント製造会社	造形性	精度	耐湿度	靱性	ABS狙い
CIBA vantico	XB-5081-1	SL-5180	SL-5510	SL-7540, 7545	SL-7560
DSM-SOMOS	SOMOS-3100		SOMOS-7100	SOMOS-8120, 9120	SOMOS-11120
3DS(RPC)				AccuDur100	
JSR	SCR-310		SCR-701	SCR-710 SCR-735	(SCR-735)
旭電化	HS-661 (EP)	HS-673S	HS-680		HS-690
帝人製機/シーメット		TSR-800	TSR-820	TSR-1938N TSR-821	TSR-825

UA: ウレタンアクリレート系樹脂

EP: エポキシ系樹脂

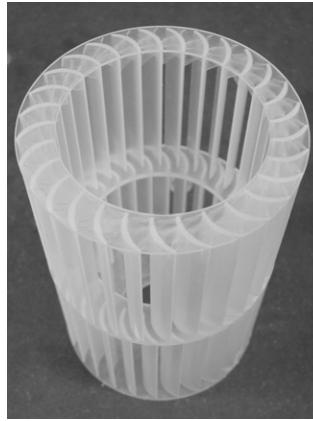


写真1 TSR-821の造形物

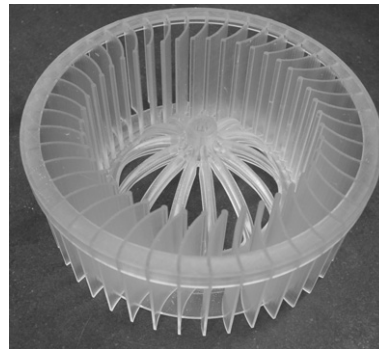


写真2 HS-690の造形物

形樹脂にエポキシ系材料を使っているために、硬化収縮による「反り」が小さいため精度に優れていた。光カチオン重合を利用するエポキシ樹脂は、光ラジカル重合を利用するアクリレート系樹脂に比較して反応が緩やかで、開環重合で反応が進行するため体積収縮率が比較的小さくなり、造形歪みが発生しにくい。そのために、高精度で反りの少ない造形物が容易に得られる。1993～1994年頃を境にして各社はエポキシ系光造形樹脂の開発に注力した。その結果、CIBAのSL-5180や旭電化のHS-673S、帝人製機のTSR-800樹脂などに代表されるエポキシ系樹脂で相次いで上市され、光造形品は顧客の満足いく精度レベルに向上した。筆者はこの頃を光造形樹脂の「第一世代」と呼んでいる。

この頃から光造形で精度が十分確保できるようになった。しかし、材料がエポキシを主体としているため、水分での経時変化、特に「寸法変化」に改善が求められた。旭電化のHS-680や帝人製機のTSR-820、JSRのSCR-701、vantico社のSL-5510に代表されるエポキシ系材料は、耐水性の高い原料を用いることや反応性を工夫することにより、この湿度・水分による経時変化を克服した。この中、旭電化製HS-680樹脂は特に耐水性に優れ、寸法変化がない樹脂として大きな評価を得た。一方、帝人製機のTSR-820は初めてエポキシと同じカチオン重合性系材料であるオキセタン化合物を用い、この材料の高反応性を利用して、耐水性と共に物性を向上させている。これらの樹脂の世代を「第二世代」と呼ぶことにする。これでやっと光造形システムが安心して使える装置へと成長してきた。

精度・経時変化とも満足するレベルに達したが、エポキシ系材料主体であるため、光造形品は壊れやすい、そのために扱いは極めて慎重に行わなければならなかった。壊れやすいため、組み付け後ははずすことができず、2セットを必要とするような場合もあった。また、後加工でタッピングすると壊れてしまうなどの不都合がユーザを悩ませていた。壊れないこと(靱性)、タッピング性(ねじ加工性)などが顧客から強く求められていたわけである。このことがまた、システムの普及に足かせとなっていた。

このような状況下、帝人製機は靱性樹脂をTSR-1938Nを三菱レイヨンと共同開発していち早く上市した。この樹

脂は、ウレタンアクリレート系であり、靱性の観点からエポキシ系樹脂を長い間使ってきた光造形システムユーザからは驚きをもって迎えられた。米国DuPont社のSOMOSグループ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たポリプロピレン(PP)ライクなSOMOS-9100シリーズを上市した。一方、vantico社(現在はHuntsman Advanced Materials社)はPPライクな靱性樹脂のSL-7540を発表した。これらの内、SL-7540樹脂は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であり薄板などでは形状保持に若干不安があった。その後、帝人製機(帝人製機の光造形ビジネスがNTTデータシーメット社と統合したため、その後はシーメット社)は、これら先行の樹脂の欠点をカバーするエポキシ系の靱性樹脂TSR-821(写真1)を2001年に上市した。この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なっている。靱性と強度を兼ね備えたこの樹脂により光造形物の応用範囲はさらに広がってきた。樹脂に靱性やセルフタッピング性が付与されたことにより、今まで使えなかった機能テストや機構テストに充分耐えられるようになり、その用途は飛躍的に拡大している。これら靱性樹脂の出現よりを「第三世代」と呼んでいる。

これら靱性樹脂の出現以後、光造形物は壊れやすいということはなくなった。しかし、顧客の要望は成形材料として広く利用されているABS樹脂と同等の物性であり、さら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の性能を持つものである。シーメット社は2002年秋にABS性能を意識した旭電化製樹脂HS-690(写真2)をリリースして好評を得ている。さらに、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物性により近づけている。また、vantico社も2002年秋には乳白色でABSライクな外観を持つSL-7560樹脂をリリースしており、ABS性能が身近になってきた。このABS物性を意識した樹脂世代を「第四世代」と筆者は呼んでいる。

表3 業界別光造形樹脂要求性能

	自動車	家電	精密機器	医療機器	微細部品	サービスビューロ
現在ニーズ (耐熱指標)	PP ~ ABS (> 60 °C)	PP ~ ABS (> 60 °C)	ABS (> 80 °C)	耐水性 (> 60 °C)	PP (> 60 °C)	PP ~ ABS (> 60 °C)
将来ニーズ (耐熱指標)	PC (> 120 °C)	PC (> 120 °C)	POM ~ PC (80 ~ 120 °C)	人体適合性, イミド (150 ~ 180 °C)	POM ~ PC (80 ~ 120 °C)	ABS ~ PC (80 ~ 120 °C)

3. 光造形樹脂の今後の動向

表3に各業界の光造形樹脂に期待する性能を示す。日本の基幹産業である自動車や家電ではPP樹脂性能からABS性能に光造形物の性能を求めており、将来的にはPCなどの耐熱性のあるエンジニアリングプラスチックの性能を要望している。サービスビューロはこれら基幹産業と深く結びついて活動しているため、最終顧客のニーズがサービスビューロのニーズでもある。そのためにABS性能樹脂を強く求めており、さらにはPC性能樹脂を求めてくものと推定している。樹脂開発者はこのニーズに呼応して樹脂の開発を行っていく必要がある。もしも、開発が需要に対応できないときは、このシステムは生き残れないことになる。その意味でも、樹脂開発者に課せられた責務は重い。

4. ま と め

モデル用の光造形樹脂は顧客のニーズであるABS性能が当面の目標であり、ごく近い将来ABS性能は達成されてスタンダード樹脂になっていくものと考えている。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するRMとなったり、ラピッドツーリング(RT)に積極的に利用されていくものと思われる。

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 2001, 2002", Wohlers Associates, Fort Collins, Colorado, USA(2001-2003).
- 4) 萩原恒夫: 機械と工具, 別冊(2001)4, 78.
- 5) 三宅, 榎木, 森, 石原: ケミカルセンサー研究会(IEEJ), 東京(2000) CHS-00-7.
- 6) 萩原恒夫: 型技術, **16**(2001), 10, 246.
- 7) 萩原恒夫: 光学, **30**(2001)4, 248.
- 8) T. Hagiwara, T. Ito and K. Furuta: AITC2002 Meeting, Hong Kong (2002)12.
- 9) 萩原恒夫: 成形加工, (2001)13, 767.
- 10) 萩原恒夫: JETI, **48**(2000)11, 70, **48**(2000)12, 90.
- 11) 萩原恒夫: 鑄造工学, **75**(2003)12, 816.