

# 光硬化性樹脂を用いる光造形法とその応用

萩原恒夫

液状光硬化性樹脂を用いた3次元光造形法（ステレオリソグラフィ）は、1981年小玉秀男氏（当時名古屋市工業試験所）によって基本コンセプトが提唱され<sup>1,2)</sup>、その後、1984～1985年にかけて、米国のUVP社（のちの3Dシステムズ社）のC. Hull氏および大阪府立総合研究所の丸谷洋二氏（現大阪産業大学教授）により実用化の成果が発表された<sup>3-5)</sup>。1987年には3Dシステムズ社により世界初の実用機SLA-1の製品化が発表され世界的に注目された。翌年、三菱商事により丸谷氏の技術に基づきC-MET社が設立され、SOUP (solid object ultra-violet laser printer) システムが発表された<sup>6)</sup>。最近では、IT技術の台頭と3次元CAD (computer aided design) の普及につれて、自動車産業界、家電産業界などの基幹産業分野を中心に光造形システムが急速に採用されるようになった<sup>7,8)</sup>。

本解説では、光造形の概要を述べるとともに、最近話題になっている実部品への展開、医療分野での用途などについても述べる。

## 1. 光造形の原理

光造形では、図1に示すように、まず、コンピュータ上の3次元CADシステムにより作成したい物品の立体モデルを設計し、この立体モデルデータを立体造形用データフォーマット (STL フォーマット) に変換する。STL フォーマットは3次元自由局面を三角パッチの集合体で近似する方式で、CAD から造形装置にデータを渡す際に広く用いられている。次いで、光造形装置内での配置や積層方

向を決定し、前記物品データを所定の間隔にスライスしてその断面のデータを作る。この断面データに基づいて液状の光硬化性樹脂の表面をレーザー光で走査し、被照射部分の樹脂を硬化させて断面データに対応する樹脂硬化層を形成させる。この工程を繰り返して樹脂硬化層を次々と積層することにより、設計したとおりの3次元立体物の形状モデルを得る<sup>5-7)</sup>。

光造形システムでは、Ar レーザーまたは半導体励起固体レーザーを紫外光発生源に用い、機械シャッター、光変調器 (AOM)、光学レンズを通し、X 方向 Y 方向の2つのスキャナーミラーで照射位置を制御しながら光硬化性樹脂容器中のテーブル上に光照射する。レーザー、AOM、スキャナーミラーはコンピューターでコントロールし、テーブルもそれに伴い制御する。そして、紫外光により光硬化性樹脂薄膜層を断面データに基づいて1層ずつ硬化させる<sup>9,10)</sup>。

## 2. 光造形用樹脂

### 2.1 光造形用樹脂の分類

光造形法のキーポイントはその樹脂の性能にあるといっても過言ではない (<http://www.urban.ne.jp/home/hagi>)。ユーザーは造形により得られる樹脂硬化物を利用するため、その物性や性質が最も重要である。

光造形で用いられる液状光硬化性樹脂は、硬化の反応機構により大別して2つに分類される。1つはラジカル重合反応タイプであり、もう1つはカチオン重合反応タイプである。代表的な光硬化性樹脂として前者はウレタンアクリレート系があり、後者はエポキシ系がある<sup>6,7,10)</sup>。

ウレタンアクリレート系樹脂ではラジカル反応で進行するため、一般的に反応速度は大きいのが重合がランダムになりやすいことより、造形物がそりや精度の点で不利といわ

帝人製機(株)オプトイメージカンパニー (〒105-8628 東京都港区西新橋 3-3-1) (4/1よりシーメット社(株) 〒144-0052 東京都大田区蒲田 5-15-8 蒲田月村ビル)  
E-mail: hagi@mx.ksp.or.jp

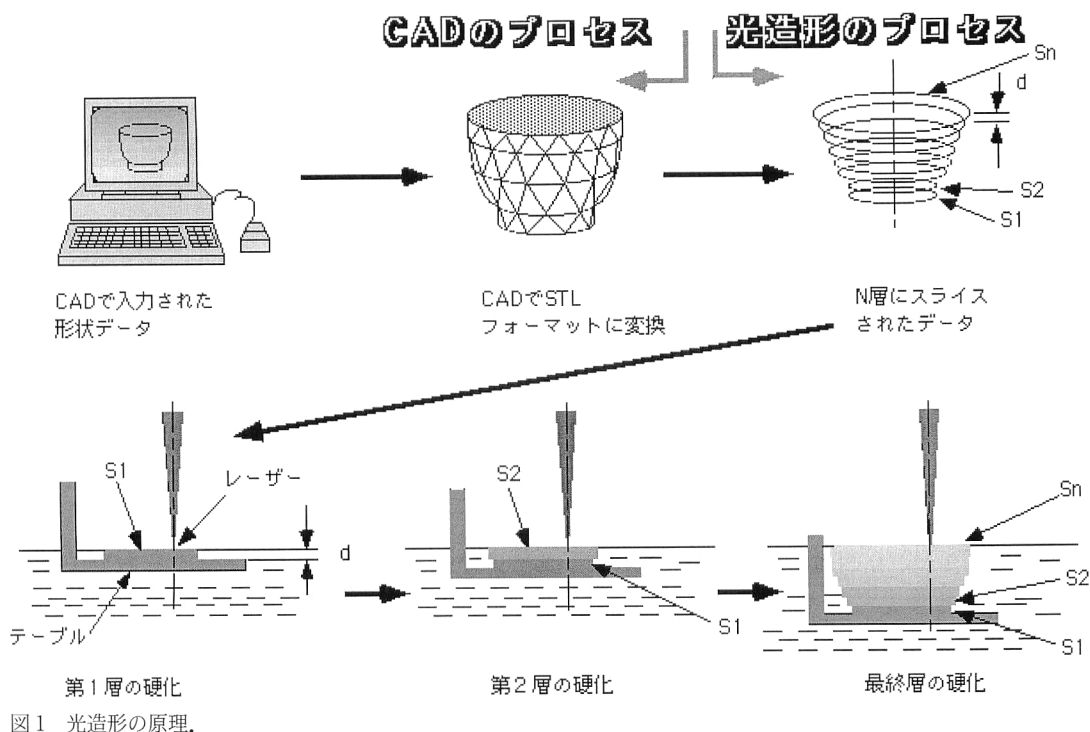


図1 光造形の原理.

れている。しかし、ウレタン骨格はイソシアネート成分とアルコール成分とから容易に新しいものが合成可能であり、硬化後は高分子主鎖中のウレタン基により分子間凝集力の大きいものが得られやすいことから、高分子主鎖中にポリエーテル基を有するエポキシ系樹脂に比べ機械特性、および熱的特性は有利と考えられる。

エポキシ化合物の重合反応はスルホニウム塩等の光分解から誘導されるカチオン（プロトン）により開始される。このカチオン重合反応は、重合速度は劣るが、逐次重合性の要素をもっており、得られる重合硬化物の収縮歪みが小さな傾向がみられる。そのため、造形物の寸法精度が有利であると信じられ、最近特に広く用いられるようになった。しかし、エポキシ系樹脂の場合には選択できるエポキシ化合物の数が極端に制限されるとともに、人体への安全性や重合速度の点から使用できる主剤は特定の脂環族エポキシ化合物にほとんど限定されている。

光造形用樹脂はエポキシ系が主流になりつつあるのが現状であるが、ウレタンアクリレート系の樹脂は、先に述べたように主剤の選択範囲がエポキシ系樹脂に比較して圧倒的に大きく、機能性を要求されることがますます強くなることから、今後の開発次第では立場が逆転することもあり得る。

## 2.2 光造形用樹脂の動向

3次元光造形システムの展開が急速に拡大するにつれて、新規樹脂開発の重要性が再認識され、各社での開発も

活発になってきた。モデル用樹脂として、汎用プラスチックであるABS（アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン）樹脂をひとつの目標として開発が進められている。このABS樹脂は物性のバランスがとれていて、かつ成形性もよく安価なため、広く利用されている。樹脂の重要性が認識され開発者がかなりの精力を注入しているにもかかわらず、市場にある光硬化性樹脂の硬化物の性能はいまだ目標のABS樹脂には到達していないのが現状である。

また、最近では、モデル用樹脂がエポキシ系樹脂が中心であることより概して脆いため、「光造形物は壊れやすい」という通説ができてしまっている。これをうち破るために韌性にすぐれたものを積極的に提供しようとする動きが各社から出てきた。この韌性はポリプロピレン（PP）をひとつの手本としている。旭電化工業からはHS-681 (<http://www.adk.co.jp>), DSM-SOMOS社 (<http://www.dsmsomos.com>) からはSOMOS 8100 (JSR社からも同じものがSCR-8100シリーズ), ごく最近, Vantico (旧チバ・スペシャルティール・ケミカルズ) からSOMOS 8100シリーズと外観が非常によく似たSL-7540が出た (<http://www.3dsystems.com>)。これらはすべてエポキシ系であり、韌性の観点からみるとまだPPの特性には至っていない。これらに対して筆者らはウレタンアクリレート系のTSR-1938 Mを最近市場に投入した<sup>8)</sup>。これはエポキシ系では達成し難い、強度と伸度とを兼ね備えたものであり、PPの物性をほぼ満足しており、今後の発展が期待さ

れる。

### 3. 光造形法の役割

この光造形法の果たす役割は、a. デザイン評価（形状確認）や機能評価、b. 真空注型や鋳造用のマスターモデル、c. 実部品製造の試み、d. 医療分野、e. その他などが挙げられる。以下、これら用途について述べる。

#### 3.1 デザイン評価（形状確認）および機能評価

光造形システムはもともと3次元CADのプリンターの発想から生まれた。そのために、形状確認用のモデルを得ることを主な目的として出発した。製造担当者にとって自分の作る製品あるいは部品のイメージを正確に把握することは非常に重要なことである。特に形状が複雑になればなるほど、理解に時間がかかり製作ミスの可能性も多くなる。

3次元立体モデルを造形することによって、設計した製品のデザインが期待したものであるかどうか実際に手にとって検討可能であり、他者の評価を受けることも可能である。そして、検討結果を設計にフィードバックすることもできる。従来の貼り合わせや、機械加工と異なり3次元CADと直接結びついているため、複雑な形状でも簡単に造形でき、正確に形状を確認することが可能である。また、立体モデルをCADデータまたは図面とともに渡すことにより、金型の製作ミスを防止してロスの低減と最適設計によるコスト削減が可能である。さらに、最終製品製造担当者の理解を助け製造工程でのミスを防ぐことができ、製品化までの時間の低減とロスの低減が可能である。

光造形モデルは、部品の組み付けや嵌合のチェックに利用したり、機構やシミュレーション実験などの機能的な検討が可能となる。機能評価を行うことにより、設計ミスを防ぎ、より適切な設計が可能となる。検討結果は製造設計に容易にフィードバック可能である。

また、デザイン分野では造形モデルがデザイナーの感性を確認して新しい創造へ発展するものと思われる。山梨のメイコー社 (<http://www.meico-inc.co.jp>) を中心に宝飾関係でのデザイン検証用途も盛んである。

#### 3.2 真空注型や鋳造用のマスターモデル

3次元CADでデザイン・設計したモデルを10数個ただちに入手したいときなどには、ウレタン樹脂やエポキシ樹脂などの熱硬化性樹脂を用いたレプリカの作成が行われている。このときのマスターモデルとして光造形で作成したモデルが有効に利用できる。光造形で得たモデルを用い、シリコーン樹脂で母型を作り、この母型に前記熱硬化性樹脂を流し込みレプリカを作成するのである。この場合、

1つの母型から10～20個作成できるので、母型を10個用意すれば100～200個のレプリカの作成が理論上可能となる (<http://www.kk-mitsuboshi.co.jp/hikari>, <http://www2.marinet.or.jp/shimfram>)<sup>7)</sup>。しかし、レプリカをとるのに1～2時間程度時間がかかるため、たくさんとることはかなり手間がかかる。また、できるレプリカは商品とは異なるため、最終的な機能試験などはできないことになる。

他方、光造形モデルをロストワックス法のワックスの代替モデルとして使用することによりワックス作成用の金型が不要となるため、大幅な工数の削減が可能となる。しかし、光造形モデルでは消失の際に残渣が少量残ってしまうため、品質の低下を招くことがある。そのため、本格的な実用化には従来のワックスと同様に完璧に消失する特性をもつ樹脂の出現が囑望されている。その他、鋳造のためのマスターモデルや砂型用のマスターモデルなど木型の代替としても実用化されている。

#### 3.3 実部品製造の試み

最近、光造形システム用の樹脂が、目的をもって開発されるようになってきた。そのひとつは、筆者らが提案した射出成形用の樹脂 TSR-750 シリーズであり、耐熱モデル用の樹脂 TSR-900 シリーズである<sup>9)</sup>。

この、目的志向をさらに押し進め、光造形システムでなければできないような複雑なモデルを造形し、実用的な部品に用いようとする試みが始まった。これは、光造形によりCADデータから直接得られるモデルを実際の製品にしようとするものである。すなわち、光造形システムを製造機に位置づけようとするものである。

現状では、光造形で得られる硬化物は必ずしも所望の性能を有していない場合が多いが、筆者らが開発したイミド系樹脂は、この目的のための第一歩といえよう。日立製作所の三宅らは水質試験器の心臓部であるマニユールド (図2) に光造形品が使用できることを最近発表した<sup>12)</sup>。光造形品を用いることにより従来法に比較してサイズを約120分の1にした水質試験器を商品化した。この装置は同時に価格も数分の1以下になっている。このように、光造形品を直接部品に用いることにより今まででは考えられなかったような技術革新をもたらす。光造形で代表されるラピッドプロトタイプング (RP) システムは、やがてラピッドプロダクション (RP) システムとして使われることと思っている。筆者らは、さらにイミド本来の性能である耐熱性にもすぐれた材料を提供すべく、新規原料のデザインおよび合成検討を行っている。これらの材料が比較的安価に入手できるようになると、イミド系樹脂は光造形シス

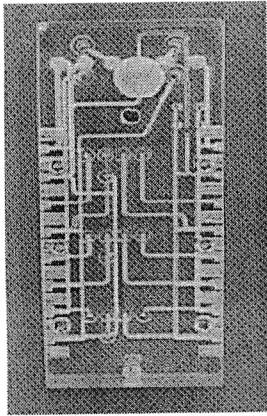


図2 水質試験器のマニユホールド<sup>12)</sup>。

テムを製造機に位置づけるような役割を果たすものと確信している<sup>9)</sup>。

### 3.4 医療分野

製造業以外の分野でも光造形システムの利用が進められつつある。MRI (磁気共鳴映像法) や CT (コンピュータ断層撮影) スキャンで得られた断層データをもとに患部のモデル (図3参照) を作成することにより、医師は患者を実際の診察以上によくみることができ、腫瘍や骨の異常、その他の病気をみつけやすくなる。そして、難しい手術の際の手術方法の検討、削除部分の検討、手術手順のシミュレーションなどに利用することにより高度な医療行為が可能になる。慶応大学医学部形成外科学教室 (<http://www.prs.keio.ac.jp>) の小林正弘専任講師と同大学環境情報学部の千代倉教授のグループの形成外科での光造形の応用研究<sup>13)</sup>、通産省機械技術研究所の谷川らのグループの人の頭のファントムの解析<sup>14)</sup>などが挙げられる。また、歯科医療分野でも光造形などを用いた手術シミュレーション等が活発に検討されてきた<sup>15)</sup>。光造形法を医療検討に用いることが保険で認定されれば、高度な医療行為のためにさらに利用が進むものと考えられる。ベルギーのマテリアライズ社 (<http://www.materialise.be/medical>) はこれらのソフトウェアの開発を積極的に進めている。

セントラル・フロリダ大学の Hosni 教授のグループ (<http://www-mae.engr.ucf.edu/~rplab>) では、MRI や CT スキャンの画像から光造形モデルを利用して人工関節などの研究を進めている。一方、人工骨などのモデルとしてハイドロキシアパタイトを含む光硬化性樹脂の検討が、米国ミシガン大学の Halloran 教授らのグループで進められている<sup>16)</sup>。

さらには、IT 技術と総合的に結びついた遠隔医療支援システムも検討され、今後この分野の発展も見すごせない<sup>13)</sup>。しかし、この領域がさらに発展するためには、X 線

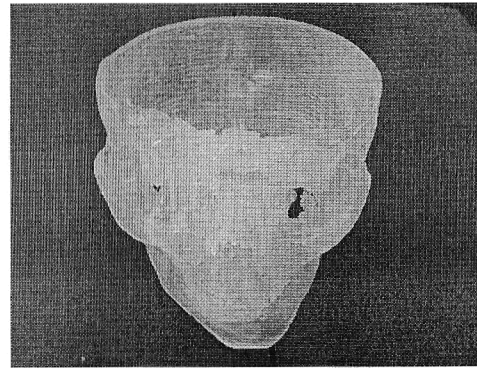


図3 CTより再現した人の頭部分。

技師や医師がオペレーターに頼らず直接操作できるような簡便な造形システムの出現が望まれる。

### 3.5 その他

地形や建物のモデルを作成し、景観の確認、ビル風などのシミュレーションが可能となる。ただ、現状ではどの程度利用されているか不明である。

マイクロマシンなどへの光造形の適応が検討され、大学を中心に研究が進められている。その他、われわれが予期していないような利用方法もかなりあるものと推定され、これらが浮上してくると思わぬ方面に発展していく可能性を秘めており、この技術の応用分野もますます広がっていくものと期待されている。

## 4. 今後の展望

光造形法は、装置・樹脂ともに改善の余地を多分に含んでいるが、産業界をはじめ、医療分野などに新たな技術革新をもたらす技術と考えられている。

近い将来では、機能性の追求がターゲットのひとつと考えている。光造形システムが発展するためには、機能性樹脂の性能を向上させ光造形システムを製造機に位置づける材料にすることが重要であると考え、そのためには、ユーザーの要望に応えるための絶え間ない努力が必要であろう。光造形は大きなポテンシャルを秘めており、IT 革命の真の担い手として発展していくと考えている。

この光造形法の本来の意義は必要な形態のモデルや型を、きわめて短時間で手に入れることができるころにある。今後3次元CADがパソコン上でワープロを使うように誰でも当たり前に使えるようになっていき、それぞれの造形方式が改良されていくにつれ、光造形システムもCADのアウトプットとして、ごく当たり前のように使われる時代がまもなく訪れると思われる。

カラーレーザープリンターを共有しているように、グループで1台の造形機である3次元プリンターをネットワー

クで共有する日も近い。CAD の出力として CAD の画面上から「3D print」というボタンを押せば、1 時間ほどすると造形物が 3 次元プリンターの出口からただちに使用できる形で出てくることが想像される。この造形物をエンジニアは、手にとって眺めながら次のデザインを考えるであろうし、外科医師は手術の方法をあれこれ思いめぐらせるものと推定している。

## 文 献

- 1) 小玉秀男：“3次元情報の表示法としての立体形状自動作成法”，電子通信学会論文誌，**J64-C** (1981) 237-241.
- 2) H. Kodama: “Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer,” *Rev. Sci. Instrum.*, **52** (1981) 1770-1773.
- 3) 中井 孝，丸谷洋二：“レーザによる立体形状の創成”，昭和 59 年電気関係学会関西連合大会，G10-20 (神戸，1984).
- 4) C. Hull: “Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography,” U. S. Patent No. 4,575,330 (1986).
- 5) P. F. Jacobs: *Rapid Prototyping & Manufacturing, Fundamental of Stereolithography* (SME, 1992).
- 6) 丸谷洋二，大川和夫，早野誠治，斉藤直一郎，中井 孝：“光造形法—レーザによる 3 次元プロッタ” (日刊工業新聞社，1990).
- 7) 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).
- 8) T. Wohlers: *Wohlers Report 2000* (Wohlers Associates, Fort Collins, Colorado, 2000).
- 9) 萩原恒夫：“光造形システム，現状と今後の展開”，*JETI*, **48** (2000) 70-74.
- 10) 萩原恒夫：“光造形システム，現状と今後の展開”，*JETI*, **48** (2000) 90-96.
- 11) 田村順一，萩原恒夫：“光造形法の樹脂開発からみた今後の展望”，*オプトロニクス*, **16** (1996) 119-125.
- 12) 三宅 亮，榎 英雄，森 貞雄，石原民雄：“マイクロファブリケーション技術を応用した小型水質計”，ケミカルセンサ研究会，CHS-00-7 (電気学会，東京，2000).
- 13) M. Kobayashi, T. Nakajima, T. Kaneko and H. Chiyokura: “Application of stereolithography in the field of plastic surgery,” *8th International Rapid Prototyping Symposium* (Tokyo, 2000) pp. 294-295.
- 14) Y. Tanikawa, D. Imai, K. Tanaka, H. Kawamura and Y. Yamada: “Fabrication of dynamic human head phantom and time-resolved measurement,” *8th International Rapid Prototyping Symposium* (Tokyo, 2000) pp. 296-301.
- 15) Y. Morita, T. Noikura, R. Petzold, M. Blank, W. Kalender, S. Hiura, A. Okubo, K. Sugihara, T. Kamiinaba and Y. Izumi: “Rapid prototyping for dentistry in Japan,” *8th International Rapid Prototyping Symposium* (Tokyo, 2000) pp. 282-287.
- 16) G. A. Brady and J. W. Halloran: “Differential photocalorimetry of photopolymerizable ceramic suspensions,” *J. Mater. Sci.*, **33** (1998) 4551-4560.

(2000 年 11 月 8 日受理)