

1. はじめに

光造形法は、20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社により実用化された。今日、すべての製造業にとって、「品質の良い製品を、顧客のニーズに応じて、市場に迅速かつ安価で送り出すことが命題であり、このために光造形システムを中心としたRPシステムが大きな役割を果たしている。

光造形法とは、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次元立体造形物を得るものである。今日、光造形法は、形状確認モデルの製作にとどまらず、光硬化性樹脂材料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きた。この用途展開として光造形法による直接射出成型の製作が挙げられる。

プロトタイプング(試作)からマニファクチャリング(生産)へはどうしても型の作成を避けては通れない。製品開発からみると強度や耐久性、感触などを検討する上で、できるだけ早い段階で製品と同じ材料で確かめることが重要である。そのために試作金型を製作し、評価用成型品をその数に応じていかに効率よく得るかがポイントとなる。その評価結果を最終製品の金型製作のために活かし、開発期間短縮を図ることが効果的である。このツールとして3次元積層造形法(RP法)による試作型の製作に発展していった。

今日、RP法を用いて成形用の型を簡易に製作する技術はラピッドツーリング(RT)とも呼ばれて、一つのジャンルを形成するに至っている。これらには、光造形法、SLS(Selective Laser Sintering, EOSのEOSINTや3DSYSTEMSのVanguardなど)法、SLM(Selective Laser Melting)法、LENS(Laser Energy Net Shaping)法などが挙げられる。光造形法を除く3者はいずれも、金属粉末をレーザーで固着、溶融、融解しながら積層し、直接型を作る方法である。SLSやSLMなどの金属粉末を用いる型の作成は、この特集の別の著者により詳細に報告されているのでそちらを参照されたい。光造形法による型の作成には、(1)製品成形物と同じモデルを作成し、これをマスターとしてアルミエポキシを用いた樹脂型を作成する方法と、(2)フィラー強化した光硬化性樹脂で直接に型を作成する方法がある。前者は、貼り合わせでモデルを作成していた頃からの技術で有り、マスターモデルが光造形モデルに替わっただけである。ここでは、材料開発により極めて簡便に光造形より直接に射出成型型が作成できる後者について取り上げた。

フィラー強化した光造形樹脂を硬化させて得られる直接射出成型型(以下ダイレクト型)は精度の点では十分なレベルに達しているが、金属型が本来持っている性質である、

- ・機械的強度 500MPa以上
- ・寸法精度 0.01mm以上
- ・表面粗さ 1 μ m未満

を同時に満たすことは今後の材料開発を待たしてもほとんど不可能と思われる。光造形で得たダイレクト型は特に機械的強度、表面粗さなどが不十分であり、これらの条件を満たすことはできないものと考えている。しかし、ダイレクト型の有利な点を活かして活用していくことが工期短縮、コスト削減に繋がるものと信じている。以下、光造形法による試作型の製作について述べる。

2. 光造形による射出成型型(ダイレクト型)の開発

2.1 開発の経緯

光造形物が十分な強度と耐熱性を有すれば金型として利用可能と考え、筆者らにより初めて射出成型型(ダイレクト型)製作に応用された。田村と萩原は1993年頃から、「試作品の最終評価は実際製品で使う樹脂でなければならない」と考え、光造形法の用途開発の一環としてフィラー強化型材の開発研究を行ってきた。その結果、帝人製機のフィラー強化樹脂TSR-750シリーズとして結実した。当初のフィラー強化樹脂は120程度の耐熱性を有していたが、改良を重ねて今日では300を超える材料の開発にも成功している。これらフィラー強化した光造形型は日本特許(特許3267888)として登録されている。

1995年4月にフィラー強化光造形用樹脂(TSR-752)で作成した型が、ABS等の汎用プラスチックを100~200個程度射出成型できることを湘南デザイン(株)と共に初めて示した。このことは、光造形装置がいわゆるRTの装置として直接利用できることを初めて証明したものである。TSR-750シリーズは、TSR-753、754と発展していった。フィラー強化樹脂TSR-754はHDTが250以上を有し、比較的的低粘度で沈降性が改善されて使いやすくなった。TSR-754を型材として用いることによってフィラー入りPBT、SPS、ナイロン46等のエンジニアリングプラスチックの射出成型が可能となった。

超耐熱性の TSR-1971 は、HDT が 300 以上を示し、曲げ弾性率が鋼のそれに匹敵し、また、熱線膨張係数がきわめて小さいために、型材としても極めて有用な材料と考えている。TSR-754 との比較では、たとえば PBT 樹脂の場合、TSR-1971 で作成した型を利用すると 2 倍以上の数の射出成形物が安定に得られた、また型の抜き勾配を本型に近い 1° 程度にすることが出来たことより、広範な熱可塑性樹脂で成形が可能と考えている。

2001 年にはこの技術は帝人製機オプティメージカンパニーと NTT-Data シーメットとの事業統合により、新生“シーメット社”に引き継がれ、TSR-2081 としてエポキシ樹脂をベースとする型用樹脂が上市された。このものは、通常刃物での切削が可能で、適度な熱変形温度(120)と切削加工性を有し、汎用樹脂の成形を可能としている。帝人製機グループに引き続き JSR 社もこの材料分野に参入している。

2.2 樹脂とその物性

ダイレクト型用樹脂について整理したのが表-1 である。TSR-750 シリーズはウレタンアクリレートをベースポリマーとし、TSR-2081 と JSR 社の SCR800 樹脂は、エポキシをベースポリマーとしている。最近では耐熱性の観点よりもむしろ使いやすさへと材料開発の方向が移っている。TSR 樹脂は、無機フィラーに加えウイスキー状フィラーを補強材として含有していることが特長であり、型材として必要な機械的物性と耐熱性を併せ持つように設計されている。ウイスキー状フィラーを含有させることにより、特に射出成形時の精度の点で重要となる曲げ弾性率を大幅に向上させることに成功している。

表 - 1 光造形法による直接射出成形型用樹脂とその物性

製造会社	帝人製機 / CMET					JSR	
銘柄	TSR-752	TSR-753	TSR-754	TSR-1971	TSR-2081	SCR-801	SCR-802
ベース樹脂	UA*	UA	UA	UA	エポキシ	エポキシ	エポキシ
粘度(mPa·s/25) 比重	49,000 1.8	35,000 1.7	25,000 1.7	49,000 2.1	3,000 1.55	4,800 1.59	4,800 1.59
引張強度(MPa)	75	83	89	101	88	84	85
破断伸度(%)	1	2	1.4	1.4	2.1	2	2
引張弾性率(GPa)	13.9	15.7	16.7	24.6	7.8	9.2	9.2
曲強度(MPa)	97	118	145	170	153	127	120
曲弾性率(GPa)	14.3	15.7	16.9	26.6	10.4	8.9	8.5
熱変形温度()	120	250	250	>300	120	125 ~ 250	125 ~ 250
特徴・用途	型	耐熱モデル、型	耐熱モデル、型	高耐熱モデル、型	型	型	型
上市時期	1995 年	1997 年	1998 年	1999 年	2001 年	1997 年	1999 年

* UA: ウレタンアクリレート

2.3 光造形によるダイレクト型の作成フロー

光造形によるダイレクト型の作成は図 - 1 の様になる。

- 製品(成形品)の3次元CADデータを作成する。
- 次いで、3次元CADデータをもとにパーティング面を作成し、
- キャピティ・コアを作成する。
- STLデータを出力して、
- f) 光造形装置で造形し射出成形型を得る。

この型をモールドベースに組み込み完成する。この射出成形型を用いて成形を行う。a~f は通常 2~3 日程度で実施される。

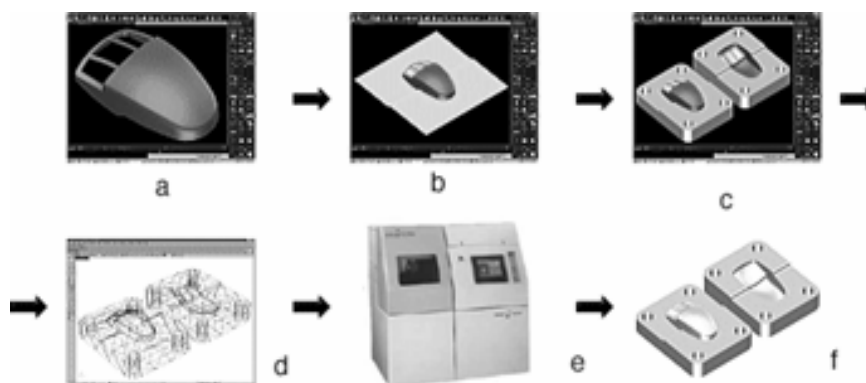


図 - 1 光造形で型を作成するフロー [(株)モルテックホームページより]

2.4. 光造形法によるダイレクト型の特長

ダイレクト型の利点などを整理すると以下ようになる。

- 1) 試作型の製作期間が短い(CAD データから数日間で成形物が手に入る)。
- 2) 複雑な形状製品でも 3 次元データをほぼ忠実に短期間で再現可能。
- 3) 従来法では手間がかかる複雑なものほど有利である。ダイレクト型では差がない。
- 4) 汎用 ABS 樹脂などで通常 100 ショットは確実に得られる。

以上のように、数多くの特長を有している。使う側は金属と比較して性能で見劣りする機械的強度、表面粗さなどを意識しつつ、有利な点を利用するかことで適応範囲は大きくなるものと考えている。

3. 光造形法によるダイレクト型利用上の留意点

光造形型(ダイレクト型)を用いる際の留意点を筆者の経験から以下に述べる。基本的には、通常金型と同様に考えて型設計を進めればよい。しかし、ダイレクト型固有の留意点はきちんと理解しながら利用することがポイントである。表-2 にダイレクト型データ作成上のポイントを示す。

表-2. ダイレクト型データ作成の留意点

項目	留意点
パーティング面(PL 面)の取り方	<ul style="list-style-type: none"> ・ PL 面の取り方は基本的には通常の金属型と同様に考えてよい。 ・ できるだけ肉厚の端面を横切るラインで構成される面を PL 面とする方が都合がよい。これは、造形時にできる積層段差を取り除くための磨きを容易にする。
抜き勾配	<ul style="list-style-type: none"> ・ 抜き勾配が必要である。成形品の数量を増やしたい場合は、抜き勾配を大きめに取る必要がある。 ・ 例えば、図面指示が $0.5 \sim 1.5^\circ$ となっている時は最大の 1.5° を選択する。 ・ 成形物の深さ、リブ形状などを考慮し、必要に応じて $3 \sim 5^\circ$ の大きめの抜き勾配角をとる。
成型品と型サイズ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 型サイズは成形品のサイズをもとに決定する。例えば、XY 平面は、通常成形品の最外殻サイズに各々 20mm 程度を加えたの切りの良い数字とする。高さ方向はプラス 15mm 程度に設定する。
イジェクターピン	<ul style="list-style-type: none"> ・ 成形品が突き出し時に変形したり白化したりしないように、バランスよく配置することが必要である。 ・ 突き出し抵抗が高くなるので、金属型より多めに(1.5 倍程度が目安)イジェクターピンを配置する。 ・ 突き出し抵抗の高い形状がある部位にはイジェクターピンを多めに配置するのが好ましい。 ・ リブの頭はできる限り突き出すようにする。 ・ イジェクターピンに隣接する壁と間の厚みはできるだけ大きく取る必要がある(あまり薄いと型の破損につながる)。目安として、5mm 程度は厚みが取れるような位置に配置にする。
ゲート位置と形状	<ul style="list-style-type: none"> ・ できるだけ樹脂流動の良好なゲート = 流動抵抗が低いゲートを選択する。 ・ ゲートの末端を成形品に直結させる

表-3 には、ダイレクト型造形のポイントを示す。基本的にフィラー強化樹脂であるため、未硬化の液状状態での管理が大切である。フィラーの沈降をどのように抑えて、均質な造形物とし、所定の機械的物性を確保するかがポイントとなる。造形中にフィラーが沈降していったら不均質になってしまえば機械的強度が十分に確保できない。そのために樹脂組成物は、造形に対して必要時間内では所定の機械物性が保てるようにフィラーの沈降を考慮して設計されている。

表-3. 造形上の留意点

項目	留意点
前準備	<ul style="list-style-type: none"> ・ フィラー入り樹脂は、フィラーが沈降し不均一になりやすいので、タンク内樹脂を十分に攪拌して、均一にしてから造形を行う。 ・ 一日以上造形をする予定がない場合は、攪拌装置をタンクに設置し、常時攪拌を継続し、フィラーの沈降を押さえる。
照射エネルギー	<ul style="list-style-type: none"> ・ プレートへの接着性を高めるため、最初の数層、最大エネルギーをかけて造形する。その後は、所定の重ね合わせ量で造形する。 ・ 基本的にオーバーハング部がないのでXYの精度を考慮して照射エネルギーを決める。
リコーティング	<ul style="list-style-type: none"> ・ 造形開始直後から高さ 10mm 程度までは、プレートによりナイフの移動速度の影響が抑えられ、比較的容易にリコーティングが行える。 ・ 高さ 10mm を越えると、ナイフの移動速度の影響がリコーティング状態に現れるようになるので、端面での盛り上がりやへこみが起こらないようにナイフの移動速度を決定する。
取り出し	<ul style="list-style-type: none"> ・ 造形物の角にスクレーパ等をあて、プラスチックハンマーで軽く振動を与えると造形物は比較的簡単に取りはずせる。 ・ あまり強い衝撃を与えると、造形物が破損することがある。
洗浄	<ul style="list-style-type: none"> ・ CAD 等で小孔、細い溝の有無を予め確認しておき、溝の中に樹脂が残らないようにする。 ・ キャビ部の隅には樹脂が溜まりやすいので、十分に洗浄、除去する。
後露光	<ul style="list-style-type: none"> ・ 後露光実施中にはオープン内の温度が異常に高くないように注意し、必要に応じて冷却する。
熱処理	<ul style="list-style-type: none"> ・ 熱キュア時の熱負荷により変形を起こす可能性があるため、必要に応じてPL面の精度を保つためにキャビとコアを組み合わせ、万力等で固定して過熱するのがよい。 ・ 急激に温度上昇させると、造形物内に高い熱応力が発生して亀裂発生の原因となるので、造形物は低い温度でオープンに投入し、ステップ昇温させて過熱処理する。 ・ 過剰(長時間)の熱キュアは、造形物の品質低下につながるため避ける。所定の処方にしたがって加熱処理する。

表-4 に、型加工時の留意点を示した。加工時の破損が起こらないように、また、積層造形特有の段差の解消に留意する必要がある。

表-4. 型加工時の留意点

項目	留意点
外形のフライス加工	<ul style="list-style-type: none"> ・ PL 面を基準にキャビ型の底面をフライス加工する。成形時の熱膨張を避けるため、ダイセットのポケット深さより 0 ~ 0.5mm 程度低めにする。 ・ コア型の加工高さもキャビ型加工の時と同様若干低めに設定する。 ・ キャビ型、コア型両方の底面のフライス加工が終わったら、型をバイスに固定したまま四つの側面のフライス加工を行う。側面のサイズはほぼポケットサイズ狙いとする。
イジェクターピン加工	<ul style="list-style-type: none"> ・ 造形時に下穴をあけておくと加工しやすい。 ・ ドリルを通した後、リーマで孔径の精度出しをする。型膨張を考慮して 50 μm 程度大きめに加工する。 ・ クラックを避けるため、加工方向は形状面を上にする。
ゲート加工	<ul style="list-style-type: none"> ・ ゲート孔の加工もイジェクターピン孔の加工と同様に行う。
表面処理 (1) 磨き (2) コーティング	<ul style="list-style-type: none"> ・ わずかな段差でも突き出し抵抗が大きくなり、成形に悪影響を与える。この問題を解消するために、型の縦壁の「磨き」を行うとよい。 ・ 必要に応じて、UV 硬化樹脂でハードコーティングを行う。

3.6 射出成形

光造形射出成形型による成形の基本的な注意点は、通常の金属型によるそれとほぼ同様です。但し、金属型に対して機械的性質が劣るため、金属型を使用する場合に比べ型温度管理、射出条件の決定の面において十分注意する必要がある。表-5 に射出成型時の留意点を示す。

表-5. 射出成形時の留意点

項目	留意点
型温度管理	<ul style="list-style-type: none"> ・ 熱伝導率が金属型に比べ悪いことから、予熱時間を十分とる必要がある。 ・ 型温度が 60 以上でなるべく均一になるよう加温することが必要。
射出成型時	<ul style="list-style-type: none"> ・ 離型剤をキャビ、コア双方の型に十分に塗布する。離型剤としてはフッ素系が好ましい ・ ABS 樹脂成形例 射出圧を 300kg/cm²より開始し、最大射出圧の目安を 400kg/cm² ・ PC 樹脂成形例 射出圧を 500kg/cm²より開始し、最大射出圧の目安を 700kg/cm² ・ 成形品が離型時に破損する場合は、突き出しピンの突き出し圧力、速度を下げる。 その結果成形品が型から離型しなくなる場合は、 1)冷却時間を延ばす。 2)型表面にエアブロー等を施し冷やしすぎに注意しながら冷却する。 3) 型開き後、成形品の突き出しを行う前にエアブローを施し、成形品を強制冷却する。 ・ 成形を行う毎(成形品1個毎) 射出前の型が開いている状態で、キャビ、コア双方の型にエアブローを施して十分に冷却する。 30 ショット程度成形後、途中で作業を休止してエアブロー(2 ~ 3分)と放冷(5分)を行い、キャビ、コア双方に蓄積した熱を発散させてやると、型破損軽減に少なからず効果がある。

図-2 に造形中の様子を示す。フィラーにより樹脂は白色粘調液体となっている。硬化すると図-3 のようになる。この型を後加工して射出成形に用いる。

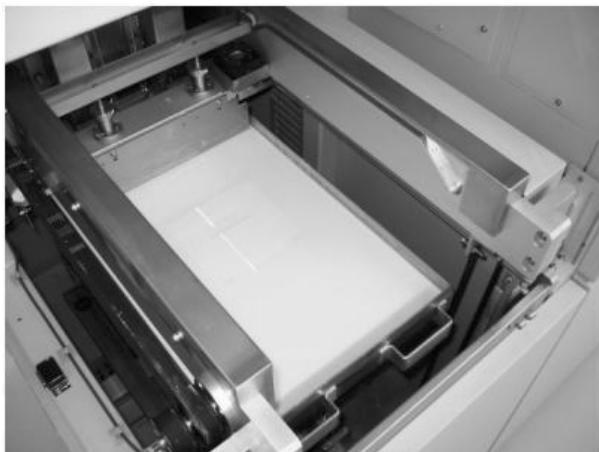


図-2 造形中の様子 (TSR-2081 を用いる SOLIFORM 250B)



図-3 造形して得たダイレクト型(TSR-2081 樹脂、後加工処理前)

図-4a に TSR-1971 樹脂によるダイレクト型と、成型物を示した。これは携帯端末を成形した例であるがこのよう
なものは比較的容易に成形可能である。図-4b にはエポキシ系樹脂をベース樹脂とし、後加工の容易な
TSR-2081 のケースを示す。
光造形によるダイレクト型では型破壊を前提にして、破壊されやすいところは置きゴマの形でいくつか作成して
おき必要に応じて交換しながら必要ショット数確保するとスムーズに作業を進めることができる。

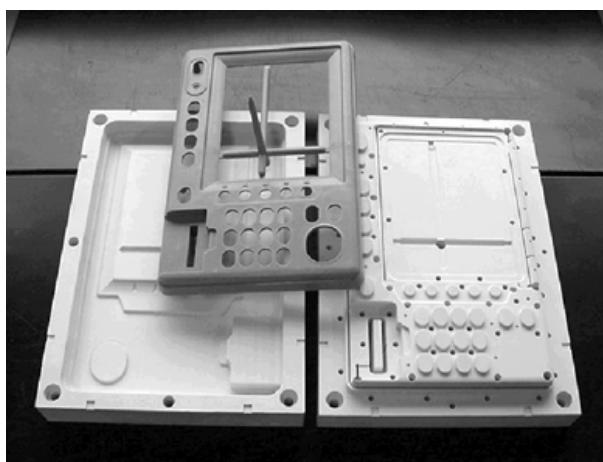


図-4a シーメット社のダイレクト型とその成形物 (TSR-1971 樹脂による型と PP 樹脂成形物)



図-4b エポキシ系樹脂 TSR-2081 による型とその ABS 成型物

現時点での光造形によるダイレクト型の課題は、熱伝導率が金属より大幅に悪いため、型温をコントロールするため射出成形サイクルが長くなったり、材料の機械的物性に改善の余地があったり、他方、積層段差の解消のための表面処理技術の確立などが必要である。このように金属型にはない煩わしい点も含んではいるが、既存の技術と組み合わせ、得意な点を生かし、他の工法とともに使い分けることにより工期短縮、コスト削減が可能となると考えている。JSR 社の三井等は、この直接型の利点を紹介し、成形物を得るまでの期間が 1/4 ~ 1/5 に短縮され、費用対効果も大きいことが詳細に報告している。さらに、課題点が一つでも解決されればより使いやすいものになっていくと考えている。

4. まとめ

我々は、光造形法をラピッドマニュファクチャリング(RM)のツールとして位置づけるために光硬化性樹脂材料の開発を積極的に推し進め、RM のために光造形用樹脂をそれぞれのステージに合った形で配置している。さらに、ダイレクト型を通じて、光造形をラピッドツーリング(RT)の中核として位置づけている。光造形法による RT 技術は、材料に改善の余地を含んでいるが、材料の開発や使いこなすためのエンジニアリングにより、今後さらに広く普及していくものと考えている。既存の技術と新しい技術をうまく組み合わせることにより、コストの低減や開発期間の短縮が可能となると考えている。

参考資料

- 1) 丸谷洋二, オプトロニクス, No.11, pp. 186-192 (2000)
- 2) 丸谷洋二, オプトロニクス, No.1, pp. 276-281 (2001)
- 3) 三井宗洋ほか, 型技術, vol.15, No. 8, pp. 54-55 (2000)
- 4) シーメット(株): “会社案内 / 製品カタログ”, 2001 年, 2002 年, 2003 年
- 5) ディーメック(株), : “会社案内 / 製品カタログ”, 2002 年, 2003 年
- 6) (株)モルテック: “会社案内”, 2000 年, 2001 年, 2002 年
- 7) 千葉慶美, “ラピッド・プロトタイプングを応用した射出成形型の実用例”, 2001 年 5 月
- 8) 萩原恒夫: “光造形システム、現状と今後の展開”, JETI, vol. 48, No.11, pp. 70-74, No.12, 90-95 (2000)
- 9) 萩原恒夫, “ラピッドプロトタイプングの最新動向”, 機械と工具, 別冊, 2001 年 4 月, pp. 78-81 (2001)
- 10) 萩原恒夫, “光造形システム「SOLIFORM」と「SOUP」”, 型技術, vol.16, No.10, pp. 24-28 (2001 年 9 月号)
- 11) 帝人製機(株), “光造形射出成形型による樹脂成形基本マニュアル”, ver. 1.3, (1999 年 5 月 1 日発行)
- 12) 萩原恒夫, “光造形による試作用金型の開発動向”, 成形加工, vol. 13, pp 767-770, (2001 年 12 月号)

著者

萩原恒夫 (HAGIWARA, Tsuneo)
 シーメット株式会社 常務取締役 理学博士
 〒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
 E-mail: hagi@cmet.co.jp