

解 説

光造形法による立体モデル・型への応用と最新動向



萩原恒夫*

Current Status and Trend of Stereolithography Resin for 3D Model and Direct Die

Tsuneo Hagiwara*

Current status and trend of stereolithography resin for 3D model and die were reviewed. Durable resins for stereolithography were developed and well accepted. ABS performance resin is being developed. High performance resin will cultivate new markets and new application. The direct injection-molding die by stereolithography has been developed.

Keywords : stereolithography, resin, 3D model, durable-resin, ABS, direct die, master-model, vacuum casting

1. はじめに

光造形法は日本で生まれたハイテク技術である。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社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プング=RP)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。「消費者のニーズに合った品質の良い製品を、安価でしかも短期間に開発して、市場に送り出す」ことが製造業の命題であり、このことに光造形システムをはじめとするRPシステムが大きな役割を果たしている。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。その役割は、大別して、3次元立体モデルの製作と型への展開である。本解説では光造形法による立体モデル(模型)のための光硬化性樹脂と試作型について、その特徴と最近の動向について述べる。

2. 光造形法とは

光造形法については多くの総説^{1~4)}に紹介されている

ので、ここでは簡単に述べると、次のようになる。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。

2.1 光造形物の用途

光造形法で得られる造形物の主な用途は、立体モデルを通じた人と機械との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と、各種シミュレーションに用いることにある。立体モデルの製作により、デザイン評価や形状確認を行い、同じものが10個~20個程度必要な場合は、光造形モデルをマスタとして、シリコンゴム型を作成して、熱硬化型のウレタン樹脂やエポキシ樹脂でレプリカを作成する。また、光造形モデルをマスタモデルとして鋳造品の作成や、メタルエポキシ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たことにより、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・評価に使うことも積極的に行われている。さらに、実部品として

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	形状確認、医療
真空注型マスター	40	15	家電、自動車
機能・機構確認	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

表4 光造形法による直接射出成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
ベース樹脂	UA*	UA	UA	UA	エポキシ	エポキシ	エポキシ
粘度(mPa)	49,000	35,000	25,000	49,000	3,000	4,800	4,800
比重	1.8	1.7	1.7	2.1	1.55	1.59	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(MPa)	13,850	15,680	16,700	24,600	7,800	9,210	9,200
曲強度(MPa)	97	118	145	170	153	127	120
曲弾性率(MPa)	14,300	15,680	16,900	26,600	10,420	8,920	8,500
熱変形温度(°C)	120	250	250	>300	120	120~250	120~250
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

表5 光造形法を利用する型材の比較

	型材	成形樹脂	成形個数	利点	欠点
真空注型型	シリコンゴム	熱硬化性ウレタン樹脂、熱硬化性エポキシ樹脂	20	<ul style="list-style-type: none"> 簡便 短工期 廉価 	<ul style="list-style-type: none"> 相当材 (ABS, PPなどは無理) 成形数
金属樹脂型	アルミエポキシ	汎用樹脂 PP, ABS, PC など	1,000	<ul style="list-style-type: none"> 少量生産 	<ul style="list-style-type: none"> 精度
ダイレクト型	ファイラ強化光硬化性樹脂	汎用樹脂 PP, ABS, PC など	50~200	<ul style="list-style-type: none"> 短工期 精度 	<ul style="list-style-type: none"> ショット数 形状に制約 成形速度遅い

いる。1995年4月にはフィラ強化光造形用樹脂(TSR-752)で作成した型が、ABS等の汎用プラスチックを100~200個程度射出成形できることを湘南デザイン(株)とともに、初めて示した。このことは、光造形装置がいわゆるRTの装置として利用できることを初めて証明したものである。以降、TSR-753、754と発展している。フィラ強化樹脂TSR-754はHDTが250°C以上を有し、比較的粘度で沈降性が改善されて使いやすいものとなった。TSR-754を型材として用いることによってフィラ入り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形が可能となった。光造形樹脂に十分な物性を付与して、光造形法により型を製作することは日本特許(特許第26629034号、特許第3267888号)として登録された。

超耐熱性のTSR-1971は、造形物の熱変形温度が300°C以上を示し、曲げ弾性率が20GPaを超え鋼のそれに匹敵している。また、熱線膨張係数が小さいために、型材と

しても有用な材料と考えている。TSR-754との比較では、たとえばPBT樹脂の成形の場合、安定的に成形物が2倍以上の数得られた。また型の抜き勾配を金属型に近い1°程度にすることも出来たことより、広範な熱可塑性樹脂で成形が可能と考えている。

2001年にこの技術は帝人製機から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に発展した。このものは、通常刃物での切削が可能で、適度な耐熱性(120°C)と切削加工性を示し、汎用樹脂の成形に威力を発揮している。

図2及び表4に示すように帝人製機に引き続きJSR社もこの材料分野に参入している。JSR社の三井等は、この直接型の利点を紹介している。CADデータから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を詳細に報告している¹⁴⁾。海外ではDSM-SOMOS社によりOptoFormシステム用樹脂などの開発が行われている。

れていると聞いている。

光造形物の中実部分をハニカム状にして造形を行うことにより、マスタモデルの焼失を容易にするとともに、熱によるモデルの膨張を抑え、型割れが防止できる。ハニカム状モデルをセラミックスで何層にもコーティングし、炉の中でこのモデルを焼失させ、同時にセラミックスを焼き固めて型を作成する。この方法で得た鋳造物は、試作品に用いると共に、少量生産品としている例も少なくない。特に欧米では盛んに用いられている。鋳造物としてはインタークマニホールドなどの自動車部品が代表例として報告されている。

3.3 木型代替としてのマスタモデル

鋳造のためのマスタモデルや砂型用のマスタモデルなど、木型の代替として光造形モデルが使われる例もある。光造形モデルは砂型製造のマスタとして用いられる場合は十分な精度と耐久性が確保されている。しかし、木型が本来果たしてきた大きなモデルに関しては、光造形法は造形時間などからコスト高となりそれほど有利ではない。張り合わせや切削では果たせない高精度が要求される場所のみで利用価値が高い。

3.4 金属エポキシ樹脂型のマスタモデル

光造形モデルをマスタとし、アルミ粉末を多量(75 mass%程度)に含むエポキシ樹脂(メタルレジン)で簡易型を作成し、この型で射出成形を行う方法がある。この方法では、型の耐熱性(荷重たわみ温度=HDT 250℃以上)と強度(曲げ強度 98 MPa)がある程度保証されており、安心して200~5,000ショットの成形が可能である。しかし、光造形モデルをマスタにしてこの型を作成しているところはかなり少なくなっている。その理由は転写の操作が行われるので精度が若干劣る傾向があるためと推定され

る。この方法は、簡便で確実であるため、比較的大型の成型物の作成では現在でも積極的に利用して、試作品を得ているサービスビューロもある。

4. 光造形法による直接射出成形型(ダイレクト型)への展開

製品開発ではできるだけ早い段階で最終製品と同じ材料で、強度や耐久性、感触などを確かめることが重要である。そのため試作金型を製作して、評価用成形物を得て開発にフィードバックしている。試作金型の作成や手直しには時間がかかるため、この期間が短いことは開発にとって大きなメリットとなる。

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。これらのためのRP法としては、光造形法、SLS(Selective Laser Sintering)法(EOSのEOSINT Mや3D SystemsのVanguard)、SLM(Selective Laser Melting)法、LENS(Laser Energy Net Shaping)法などが挙げられ、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。これに対して、光造形法による直接型の作成では、フィラ強化した光硬化性樹脂が用いられている。この光造形法による直接射出成形型(ダイレクト型)の作成について以下に特徴を述べる。

4.1 ダイレクト型とその歴史

光造形物が十分な強度と耐熱性を有すれば試作用金型として利用できるものと考え、筆者らは1994年に初めて射出成形型に応用した^{12,13)}(図2参照)。当初のフィラ強化樹脂は120℃程度の耐熱性しか有していなかったが、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

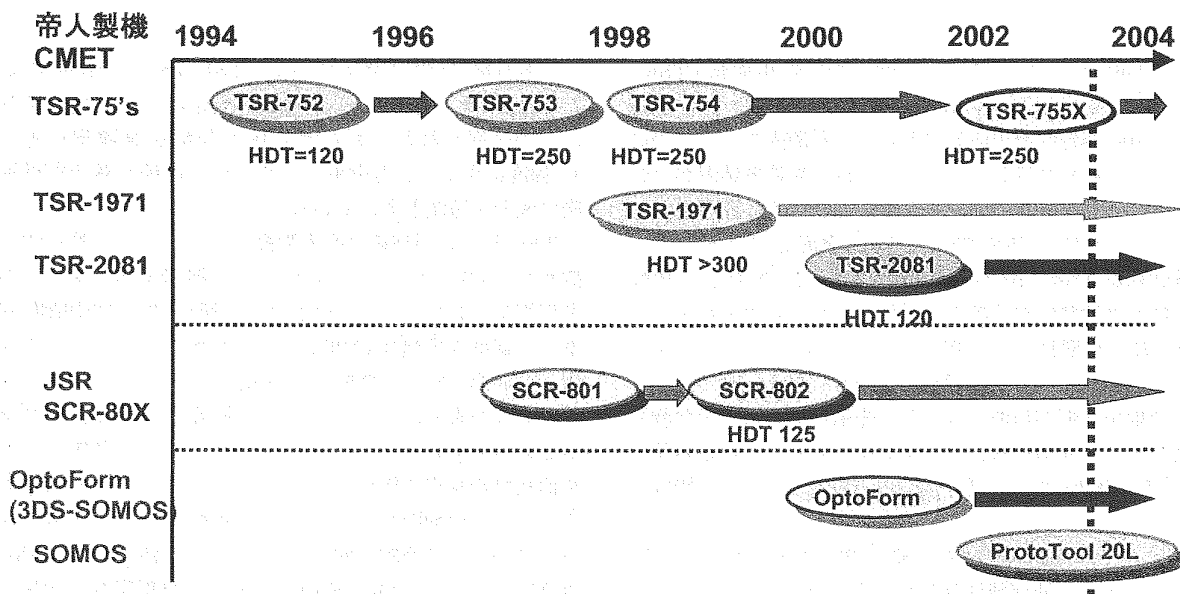


図2 ダイレクト型用樹脂の歴史

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 ($>60^{\circ}\text{C}$)	PP~ABS (60°C)	ABS ($>80^{\circ}\text{C}$)	耐水性 ($>60^{\circ}\text{C}$)	PP (60°C)	PP~ABS ($>60^{\circ}\text{C}$)
将来ニーズ (耐熱指標)	PC ($>120^{\circ}\text{C}$)	PC ($>120^{\circ}\text{C}$)	POM~PC ($80\sim 120^{\circ}\text{C}$)	人体適合 性、イミド ($150\sim 180^{\circ}\text{C}$)	POM~PC ($80\sim 120^{\circ}\text{C}$)	ABS (80°C)

て各社努力したおかげでもなく湿度は問題にならなくなった。これを第二世代と呼ぶことにする。旭電化のHS-680や帝人製機のTSR-820、JSRのSCR-701などがこの点で大きな成功を収めた。その結果、精度・経時変化とも満足するレベルに達したが、光造形品は壊れやすい、扱うときは注意が必要という状況は依然として続いた。そのため壊れないこと(靱性)が顧客から求められたわけである。その後は、樹脂が靱性を獲得した世代であり、これを筆者は第三世代と呼んでいる。まず、帝人製機はウレタンアクリレート系靱性樹脂TSR-1938Nを三菱レイヨンと共同で開発して上市した。次いでvantico社(現在はHuntsman社Advanced Materials部門)がエポキシ系のSL-7540を靱性樹脂として発表した。このSL-7540樹脂はかなり評判となった。帝人製機(帝人製機の光造形ビジネスがシーメット社と統合したため、その後はシーメット社)は、エポキシ系の靱性樹脂TSR-821樹脂を2001年にリリースした。このTSR-821樹脂は、耐熱性を除き機械物性はABSのそれに匹敵するものである。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るそれに対して、TSR-821は曲げ弾性率として2.2GPaを有し、ABSのそれと同等である。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。

2.2 光造形用樹脂の今後の動向

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ではなくなった。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をリリースして好評を得ている。また、vantico社は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(現在は第四世代と呼ぶ)。

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の要求はPP樹脂性能からABS性能に移行しつつあり、将来は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。そのためのABS性能樹脂、さらにはPC性能樹脂を強く求めている。これらニーズに合わせて樹脂開発が活発に行われている。

3. 光造形物のマスタモデルとしての利用

3.1 シリコン注型のマスタモデル

表1で示したように、日本では光造形物が形状確認だけに用いられことは少なく、真空注型のマスタとして広く利用されている。3次元CADでデザイン・設計したモデルの複製を、できるだけ早急に十数個程度入手したいときなどには、シリコンゴム型による真空注型法が極めて簡便で有効である。旧来の削り出しでマスタモデルを作成するのと比較して、光造形法ではマスタが精度よく短時間で得られることより、注型品も高精度で短時間で得られる。この真空注型には熱硬化タイプのウレタン樹脂やエポキシ樹脂が用いられている。注型材料を着色したり、注型品に塗装を施すことも可能であり、仕上げ後は最終製品と全く区別がつかなくなる。一つのシリコンゴム母型から10~20個作成できるので、母型を10個程度用意すれば100~200個のレプリカの作成が理論上可能となる。真空注型法の欠点としては、レプリカをとるのに1~2時間程度時間がかかるため、100~200個も作成する場合にはかなり手間がかかる。また、得られるレプリカはABS樹脂などの熱可塑性樹脂を用いる製品(商品)とは異なる材料のため最終的な機能試験などには直接利用出来ないことが挙げられる¹⁴⁾。

3.2 鑄造のマスタモデル

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に、大幅な工数の削減が可能となる。しかし、光造形モデルでは光開始触媒の「残さ」などが焼失(消失)の際に少量残ってしまうため、鑄造物の表面などが荒れたりして品質の低下を招くことがある。山梨の名工社では宝飾用に特化したシステムを開発するとともに、焼失法を工夫することにより光造形モデルを鑄造に広く利用されている。特に中東やヨーロッパなどに多数のシステムが出荷さ

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	造形性	精度	耐湿度	韌性	ABS 性能
製造会社					
CIBA vantico	XB-5081-1	SL-5180	SL-5510	SL-7540, 7545	SL-7560, 7565
DSM- SOMOS	SOMOS-3100		SOMOS-7100	SOMOS-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-681	HS-690
帝人製機/ シーメット		TSR-800	TSR-820	TSR-1938N TSR-821	(TSR-821)

UA: ウレタンアクリレート系樹脂
EP: エポキシ系樹脂

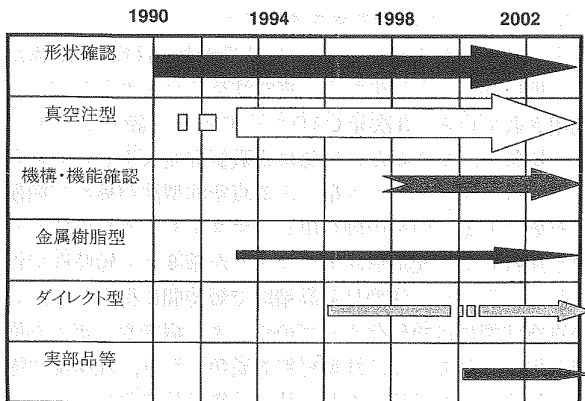


図 1 光造形物の用途の歴史 (帝人製機/シーメット社の例)

使用することも可能となってきた。

今日の光造形物の用途を、米国と比較して示したのが表 1 である。米国に比較して日本では真空注型のマスタモデルに利用することが多いのが特徴である。米国ではコミュニケーションツールとしての形状確認用が最も多い。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。米国では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、これら部門間の意志疎通(コミュニケーション)のためのツールとして形状確認モデルが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、意志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ている。このことが、精度と性能を優先させ、ハイエンドの光造形装置が他の RP システムに比較して広く普及していることにもつながっている^{5,6)}。

図 1 にシーメット社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、造形品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⁷⁾。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^{8,9)}。

2.1 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¹⁰⁾。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精度が高いと評判になっていた。この理由は、用いるエポキシ樹脂であると認識された。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、造形ひずみが発生しにくい。そのために高精度で反りの少ない造形物が得やすい。エポキシ系樹脂が造形精度に重要であることが理解され、各社はエポキシ系樹脂の開発に注力した。その結果、チバの 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樹脂が上市されたため、光造形品は顧客の満足行く精度レベルに向上した。これを第一世代と呼ぶことにする。

その後は、精度が向上したことにより大気中の水分(湿度)による寸法変化が目立ってきた。耐水・耐湿性に対し

光造形で得られるダイレクト型の精度は金属金型のレベルにまで達しており、レーザビームを絞り込むことにより刃物が入りにくいような小さな成形型の製作が容易であるため、切削による金属金型の作成が困難なものに適用可能である。逆に、大きな型や深いものは切削の方が向いている場合もある。光造形で得たダイレクト型は熱伝導率が金属より悪いので、射出成形サイクルが長くなるため、試作金型向きといえる。ダイレクト型の適応は利点をうまく利用することで効果を発揮するものと考えている。

4.2 光造形法を利用した型材の比較

表5に光造形法を利用した真空注造型、金属樹脂型、及びダイレクト型の型材の比較をまとめて示す。それぞれ利点と欠点を有しているが、使い方を適宜選択することによりその利用価値を発揮できる。筆者は光造形法による型の製作は製品開発のためのRTの中核として位置づけており、そのための材料を積極的に開発してきた。今後は、材料の開発と改良が行われるとともに、使いこなすためのエンジニアリングも進むものと思われる。

5. 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。一方、光造形法で作成するダイレクト型はコストの低減や開発期間の短縮に大きな役割を果たすものと思われる。

文 献

- 1) Y. Marutani: OPTRONICS (2000) 11, 186, (2001) 1, 276
- 2) 中川威雄, 丸谷洋二編, 積層造形システム-3次元コピー技術の新展開(工業調査会, 1996)
- 3) P.F.Jacobs: "Rapid Prototyping & Manufacturing, Fundamental of Stereolithography", (SME, 1992)
- 4) T. Hagiwara: URL, <http://www.urban.ne.jp/home/hagi>
- 5) T. Wohlers: "Wohlers Report 2001, 2002", (Wohlers Associates, Fort Collins, Colorado, USA (2001, 2002).
- 6) T. Hagiwara: Kikai to Kougu, vol. supp. (2001) 4, 78.
- 7) R. Miyake, H. Enoki, S. Mori and T. Ishihara: Chemical Sensor Meeting (IEEJ) Tokyo, April 28, 2000) CHS-00-7.
- 8) T. Hagiwara: Die and Mold Tech. 16 (2001), 10, 246.
- 9) T. Hagiwara: Kougaku 30 (2001) 4, 248.
- 10) T. Hagiwara, T. Ito and K. Furuta, AITC2002 Meeting, Hong Kong (2002) 12.
- 11) T. Hagiwara: Seikei Kakou (2001) 13, 767.
- 12) T. Hagiwara: JETI 48 (2000) 11, 70, 48 (2000) 12, 90.
- 13) T. Hagiwara: Die and Mold Tech. 18 (2003), 9, 65.
- 14) M. Mitsui et. Al: Die and Mold Tech. 15 (2000) 8, 54.