

鑄造品への光造形の応用

Application of Laser Stereolithography to Castings.

今 村 正 人*・孟

陽*・中 川 威 雄**

Masato IMAMURA, Yang MENG and Takeo NAKAGAWA

デジタルデータを利用した 3 次元 CAD によるもの作りに、Rapid Prototyping の大部分を占める光造型（液体樹脂を使用した紫外線レーザ硬化 3 次元樹脂モデル作成法）による 3 次元樹脂モデルを作成する。これをベースとして鑄造へ利用することで、金属製品あるいはこれの反転形状である金型が迅速に作成できることを実験的に示すとともに、今後の応用についてまとめた。

1. は じ め に

鑄造は複雑形状のマスタを砂型に転写し、これに溶融金属を流し込んで金属製品に置換する方法である。常温では固体である金属も融点以上に加熱することで、粘度は水以下となり、形状を自由に作り出す事が出来る。しかも、砂型は鑄造後に容易に除去可能であり、複雑な形状の金属製品を作り出すことができる。つまり、除去加工で切屑を産み出す機械加工とは異なり、材料の無駄のない変形加工であるため、マスタモデルさえあれば、いくらでも複製することが可能である（表 1¹⁾参照）。

現在のような大量生産システムを支えてきた裏には、簡単な図面から複雑な立体モデルを推定し、作り上げてきた、優秀な模型製作技術者の存在に裏打ちされたものであった。しかしながら、こうした人々の定年退職の時期を迎えて、こうした技術の伝承が問題となっている。

表 1 加工法の比較（早野らの表¹⁾に加筆）

項目	機械加工	光造形	鑄造（鍛造）
加工法	除去加工	付加・積層加工	変形（揺・延）加工
加工対象	固体（金属・木等）	液体（光硬化性樹脂） 粉末（樹脂・金属・セ	液体（融体）
工具	有限個体	紫外線（レーザ・フラ）	溶解炉＋鋳型
最少加工単位	点（・）	有限要素（▼）	点（構成粒子径）
形の定義	形 = Σ （・）	形 = Σ （▼）	形 = Σ （・）

早野、島山：第 1 回光造形システムシンポジウム

*東京大学生産技術研究所 第 2 部

**東京大学生産技術研究所 付属先端素材開発研究センター

その一方で、現在では宇宙・航空機などの先端的立体成形物の設計への 3 次元 CAD の使用は必須のものとなりつつある。すべての曲面を数値化する必要はあるものの、誰もが利用出来る普遍的なものとなりつつある。このデータを利用して CAD・CAM・CAE への転換が進み、実際の物作りの前に、形状確認や機能確認、応力解析も可能となり、究極的にはコンピュータの中で物作りが行われるという状況にきている。視覚世界である建築や感覚世界であるエンターテイメントの中では VR（バーチャル・リアリティ）が可能であるが、より具体的な工業分野では現実の立体成形物として具体的な形を与える 3 次元プリンタとしての Rapid Prototyping の使用は不可欠となる。特に、実用という点では金属製品での利用が熱望される。

その意味でこれに一番近いものとして、写真 1²⁾に示すような溶接のビードを利用した 3 次元 WELDING があり、基本的な条件は確立しているものの、若干の問題をのこしている。現状では汎用性に富むことから、世界的に主流となっている樹脂成形品を創製する、光造形（紫外線硬化液体樹脂モデル）の利用を考えるのが妥当となる。無から形状を創成する付加加工である、光造形ではデータさえあれば 1 日程度でモデルの作成が可能で

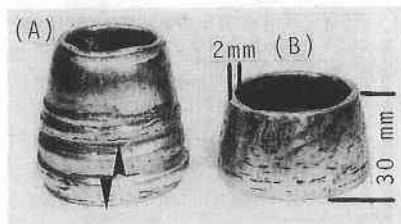


写真 1 プラズマバウダメルティングによる 3 次元形状の創成²⁾

あり、精度がよくなって来ているので有効性は高いものと考えられる。

2. 光造型システム^{3)~5)}

Rapid Prototyping は無から物を作り出す加工方式で、従来の加工方式とはまったく異なる付加加工システムであり、さまざまな方式があるが、ここでは主として用いられている光造型、なかでも自由液面方式で、平面上での位置精度が常に保証できる XY プロッタ方式 (シーメット製 SOUP530RH) を用いた例 (図 1³⁾ 参照) について述べる。XY プロッタの特徴によりモデルを表面形状のみの中空構造のサーフェスモデルで作製することも、あるいは中実構造のソリッドモデルで作製することも可能で、加工精度は作製するモデルの大きさに依存しないことも大きな特徴となっている。使用した紫外線硬化樹脂は初期反応率の高いと言われているエポキシ系である。

3. 鋳造への応用^{3)~5)}

樹脂模型をそのまま樹脂型とすることは勿論可能である。しかし、金属型への対応展開が可能であればその利用効果はさらに大きくなる。樹脂モデルの金属への置換え方法としては鋳造が一般的である。ここでは樹脂モデルと同一形状品、レプリカを主体としたが、図 2⁶⁾ に示すように、勿論反転形状なども容易に製造出来る。

通常の一般機械部品では付加価値はあまり高くないが、複雑形状の意匠を凝らした一品ものなどにはアナログデータの特徴を生かしたマスキング方式⁷⁾ によって作られた模型の利用もなされており、こうしたニーズは高い。ましてや型となれば高価であり、経済性も十分成り立つと思われる。加えて、試作や少量多種生産、自由曲面を有する大中型の鋳物、に対して非常に効果が大きい。しかも、鋳型という媒介を利用することで、より効率的な形状創成が可能となる。たとえばタービンブレードや水車のように連続・繰り換しの形状の場合には、全体を一

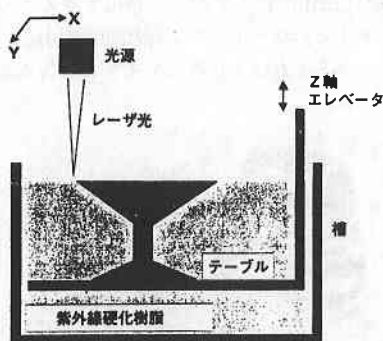


図1 液面規制式光造型システム (SOUP)¹⁾

体で作る必要はない。つまり、その基本部分の模型を1つ製作し、これから砂型を多数個作って組合せて一つの鋳型を作ればよいことになる。これも鋳型を使った転写加工である鋳造の特徴である。以下に製品製造過程での利用および製品量産用の型への応用例を示す。

4. ロストワックス精密鋳造への応用⁸⁾

ロストワックス精密鋳造では、一般の方法では作成出来ない、複雑形状を金属に転写できる数少ない方法のうちの一つである。

ロストワックス用の Rapid Prototyping としては、最近、図 3⁹⁾ のようにワックスや樹脂を押し出して積層する方法も上市されているが、ここではロストワックス法のろう型の代用品として、光造形システムで作製した樹脂モデルを用いた精密鋳造実験について述べる。

精密鋳造用の鋳型は次のように製作される。つまり、

現物、製品見本、木型などの原型

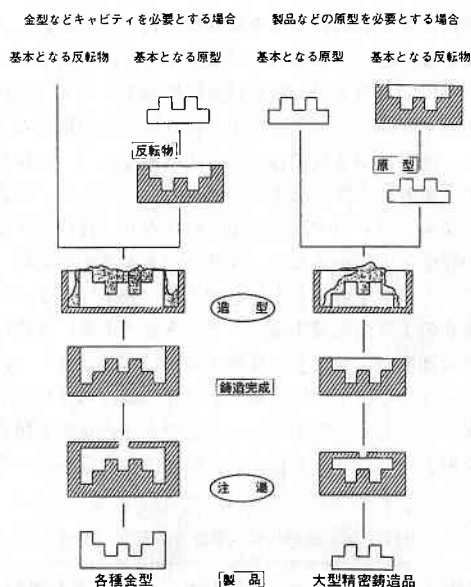


図2 鋳造における原型、金型、製品の関係⁶⁾ (一部加筆・訂正)

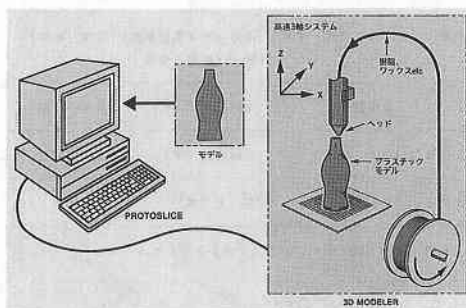


図3 溶融樹脂積層システム (3D モデラ)⁹⁾

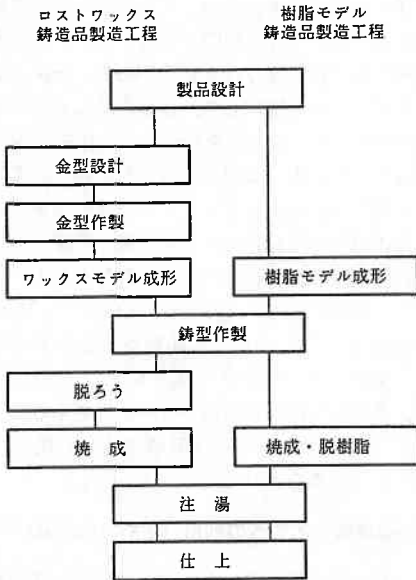


図4 精密鋳造工程の比較

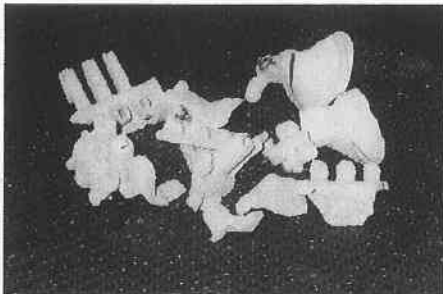


写真2 焼成・脱ろう（樹脂）過程での鋳型の割れ

まずモデルをセラミックスラリー中に浸漬し、セラミックパウダーをスタッコして、1層コーティングする。さらに、セラミックスラリー中に再度浸漬し、セラミック粒をスタッコした後セラミックスラリーを浸漬する。これを6回程度、繰返したあとで乾燥する。これを焼成・脱ろう処理した。

この場合、図4に示すように、鋳型焼成と同時にモデルが消失するため脱ろう工程が省略でき、ワックス型作製のジグソーパズルのように3次元的に複雑な金型の設計・製造が必要なく、直接、容易にマスタモデルを成形でき、試作でのトライアルを大幅に短縮でき、製造期間短縮とコストダウンが可能となる。さらに、この焼成鋳型にはほとんどすべての金属を鋳造可能であるため、鋳型ができれば製品は製造可能と考えることもできる。

中実のソリッドモデルを使用した場合、セラミックシェル（熱膨張係数： $0.5 \sim 8.0 \times 10^{-6}$ ）と樹脂モデル（ $64 \sim 130 \sim 250 \times 10^{-6}$ ）との熱膨張差がワックス（ $48 \sim 90 \times 10^{-6}$ ）に比較して非常に大きいので、写真2に

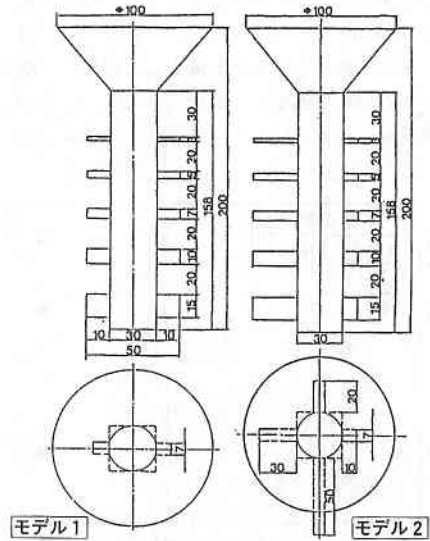


図5 実験に使用したモデル

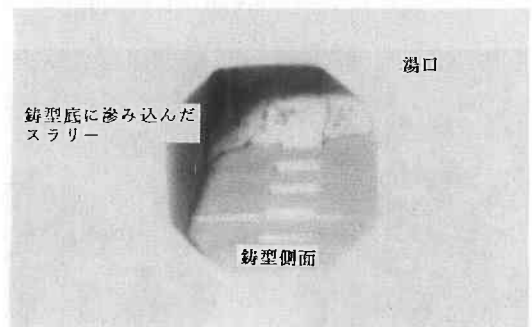


写真3 薄肉モデルによる鋳型材の侵入例

示すように脱ろう（樹脂）時にシェルが破断する。通常のロストワックス鋳造では高圧のオートクレーブを用いて脱ろうするが、エポキシ樹脂の場合、熱硬化性であるため軟化しないため、高温でガスに分解して除去する必要がある、これを促進するため、サーフェスモデル樹脂の肉厚の薄肉化と分解して発生したガスの除去を促進する必要がある。そのため、図5に示すようなモデルを用い、種々に肉厚を変化させたモデルを使用した。この際、ハンドリング強度を大きくするために造形品内に薄いサポートを設定した試料についても検討した。肉厚0.1mmと極端に薄肉化し、内部サポートのないものは、鋳型製作時に写真3に示すように樹脂モデルの破損が起これ、モデル内部へのスラリーの漬込みがあり、作成に失敗した。また厚肉の部品では前述のように鋳型の破断が生じるために、図6に示すようなある範囲での薄肉モデルを使用することで鋳型作成が可能となる。

こうして作成した鋳型に、Al合金（AC4H）、炭素鋼（S50C）、ステンレス鋼（SCS13）を鋳造した。その一

例を写真4に示す。この結果をもとに、写真5に示す人体模型を鋳造した。これらのモデルは薄い一枚のサーフェスモデルであるので、発生した樹脂の分解ガスをモデルの内側から逃がすことができる。ところが、一般の機械部品の例では同じサーフェスモデルでも、全体

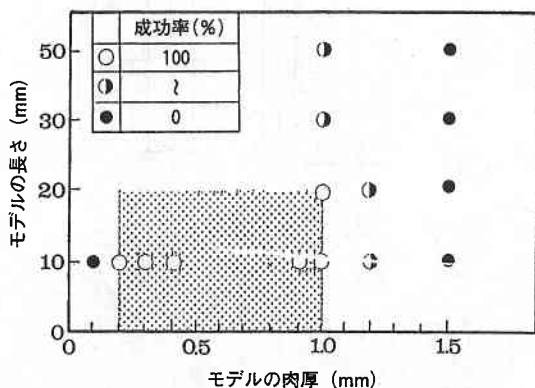


図6 サーフェスモデルを用いた鋳型の成形性

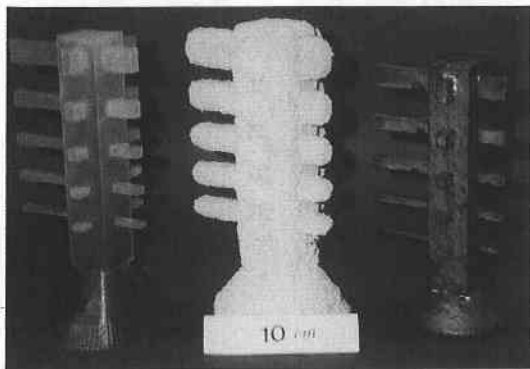


写真4 精密鋳造のテストサンプル
(左から、樹脂モデル、鋳型、鋳造品)

として閉じた形状であるため、成形時に内部に空気が閉じ込められ、脱ロウ時に膨張して鋳型を破損する恐れがあるため、ガス抜きを付ける必要がある。今回の鋳造では製品モデルのみを製作して、後から湯口系を取付けたが、CAD データに湯口系を登録し、一体モデルとして方案を含めて作る際には問題にはならない。こうして作成した自動車用ナックルジョイントの鋳造品を写真6に示す。この他の応用分野としては医療分野特に、外科的要素の高い歯科補綴を含めた形成分野等もある。

エポキシ樹脂に比較してウレタンやフェノール樹脂は分解温度が高い¹⁰⁾ ためにシェル鋳型が破断する可能性が高く、変性した樹脂を使う試みも報告¹¹⁾ されている。この他、薄肉化と同様に樹脂の分解を促進する方法として、写真7に示すように3次元織物状¹²⁾ に樹脂モデルを作成する試みもなされている。

5. 樹脂模型の木型への利用 (木型の代用品)^{13)~15)}

ここでは主に木型の代用としての使用の可能性を確認するために、マスタモデルとして自動車内装用フロア

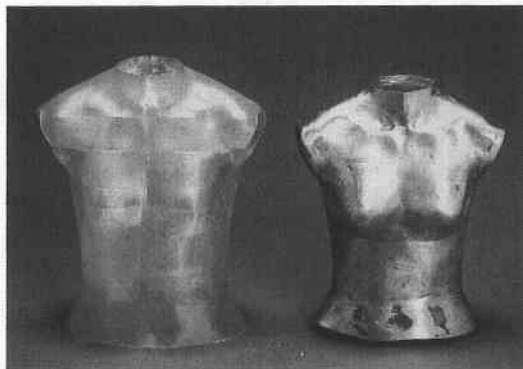


写真5 人体模型と鋳造品 (ブロンズ)

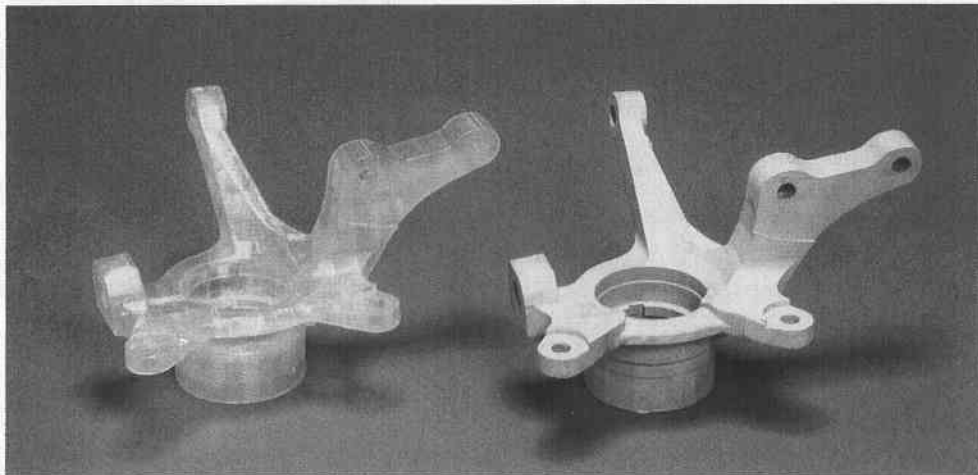


写真6 ナックルジョイントモデルと鋳造品

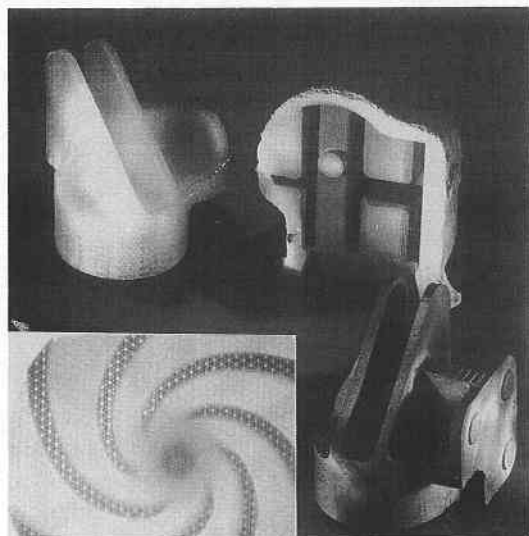
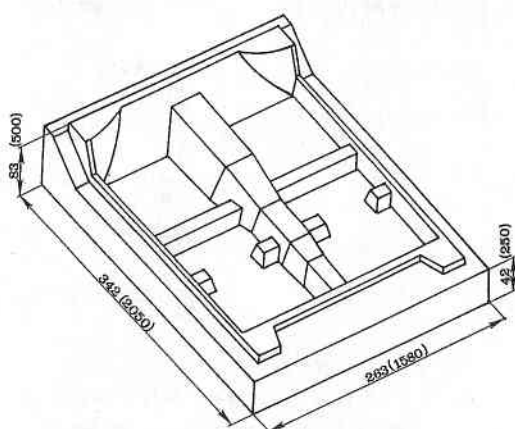
写真7 特殊モデルと鋳造品 (Quick Cast)¹²⁾

図7 フロアカーペット金型用モデルマスタ

カーペットの成形型をモデル化した形状を用いた例を図7に示す。ここでは各種砂型造形方式とそれによる鋳造成形状況および鋳物表面の観察を主体とした。これは、現在のシステムが液状の紫外線硬化樹脂をレーザー光をXY方向に走査させながら局部的に硬化させ、これをZ方向に積み重ねるという2.5次元のデジタル加工機であるため、成形品の表面性状は量子化誤差を生じるためである。光造形での積層ピッチは0.2~0.1mmが一般的であり、精密鋳造の表面層製造に用いるような非常に細かいセラミック粉末の場合には模型のZ軸の積層段差を精密に転写する。しかしながら、大型の鋳物製造に用いられるような0.06~0.1mmへと使用するセラミック粒径を変化させることでその積層模様も見にくくなると考えたからである。

ここで用いた造形方式は生型、フラン自硬性鋳型（5および7号相当けい砂）を主体とし、FC200およびAC4Cを鋳造した。写真8に使用した模型とおのの鋳造品を示す。これらモデルおよび鋳造品の斜面部分の拡大写真、表面形状そして表面あらさを写真9、図8に示す。モデル形状(1)を基準として、細粒けい砂を用いたフラン自硬性型に鋳造したアルミ鋳物(2)では比較的段差が転写される。比較的形状転写のでにくい鋳鉄鋳物では、細粒けい砂を用いたフラン自硬性型に鋳造したもの(6)でも形状は転写されにくくなる。さらに、粗粒けい砂を用いたフラン自硬性型(4)、これに塗型した鋳型(5)、生型(3)の場合にはモデルの段差は認められにくくなる。また比較的良好に形状を転写するVプロセス鋳型(7)でもショットプラスト処理することで鋳物の段差は小さくなる。したがって、図9に示すように、けい砂粒度が大きい（細かい砂の）場合にはZ軸方向の積層段差が部分的に転写されるが、粗い砂の使用、塗型、ショットプラスト処理等によりほとんど観察されない程度の仕上げ面となる事がわかった。これより光造型樹脂モデルを用い

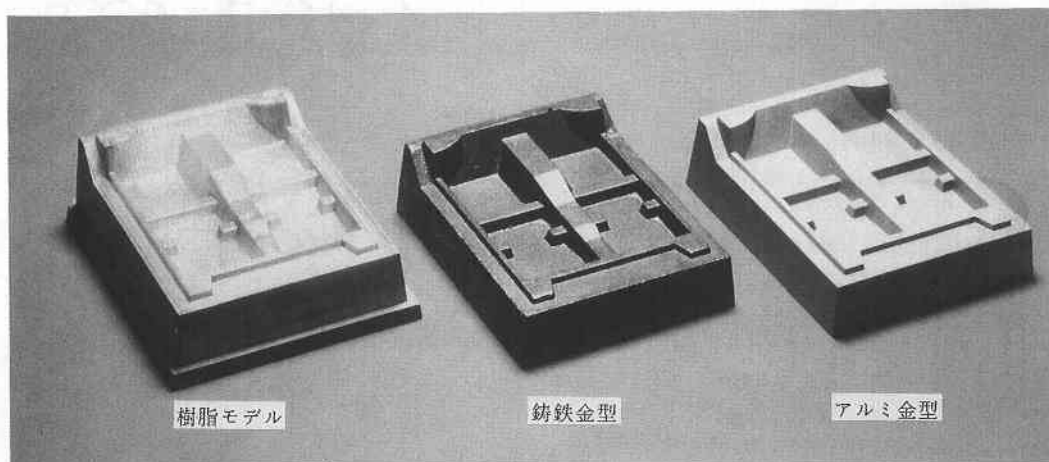


写真8 紫外線硬化樹脂モデルと鋳造金型、アルミ金型

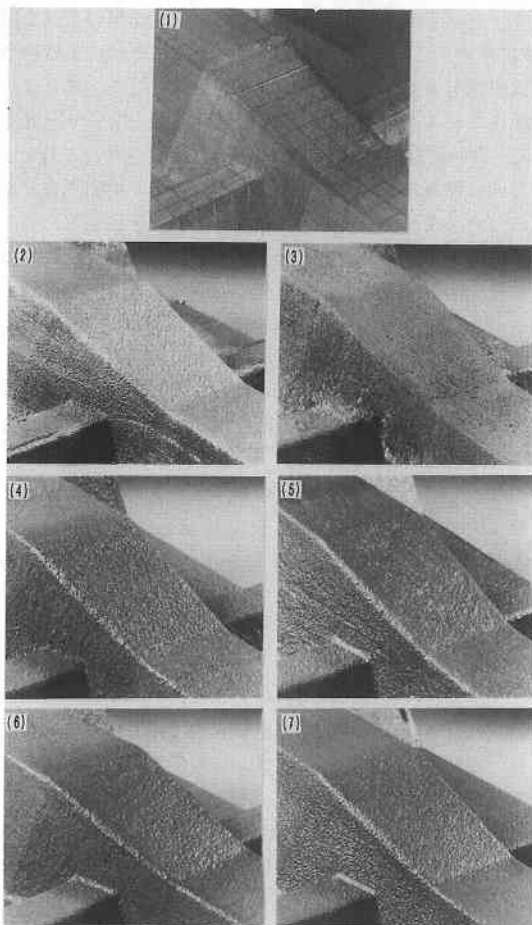


写真 9 樹脂モデルと各種鋳造品の斜面部の段差模様
モデル(1), アルミ: フラン細粒鋳型(2), 鋳鉄: 生型(3),
フラン粗粒鋳型(4), フラン粗粒塗型鋳型(5), フラン細
粒鋳型(6), V プロセス鋳型でブラスト処理(7)

て通常の造型プロセスで金型を製作出来ることを確認した。

さらに作成した模型の3次元形状測定（造型半年後）により、模型の反りも約0.4mmとまったくレーザビームの制御を正確には行っていない初期製作モデルにもかかわらず、高さZ方向の積層ピッチの0.2mmの2倍以内にあることも図10のように確認した。

光造形用の樹脂モデルそのものの耐久性のデータはないが、実施に造型を行った技術者の感覚としては従来の樹脂型と同等という報告をもたらしている。木型の代用として従来よりNC加工機用模型材として使用されている合成木材、模型用充填物含有複合樹脂についての参考データ¹⁶⁾を図11に示す。耐摩耗性としては現在研究であるが、木材と金型の間値となり、耐久性は表2に示されるようにほぼ数千回程度であろうと推定される。

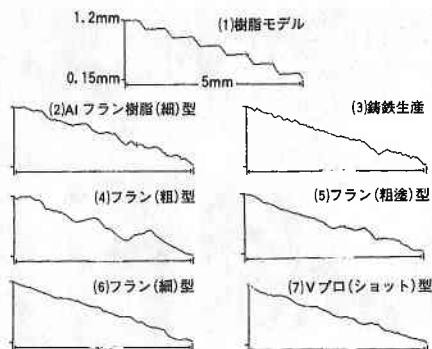


図 8.1 樹脂モデルと鋳造品の表面あらさ

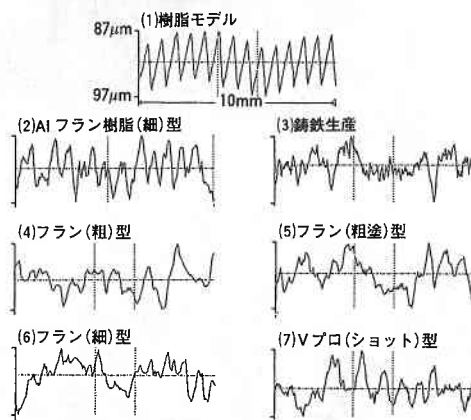


図 8.2 樹脂モデルと鋳造品の表面性状

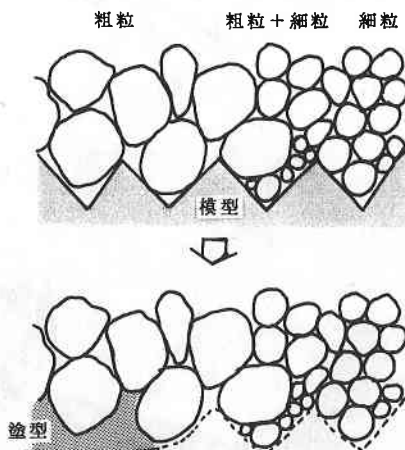


図 9 模型の転写性によぼす鋳型用けい砂粒度と塗型の影響の模式図

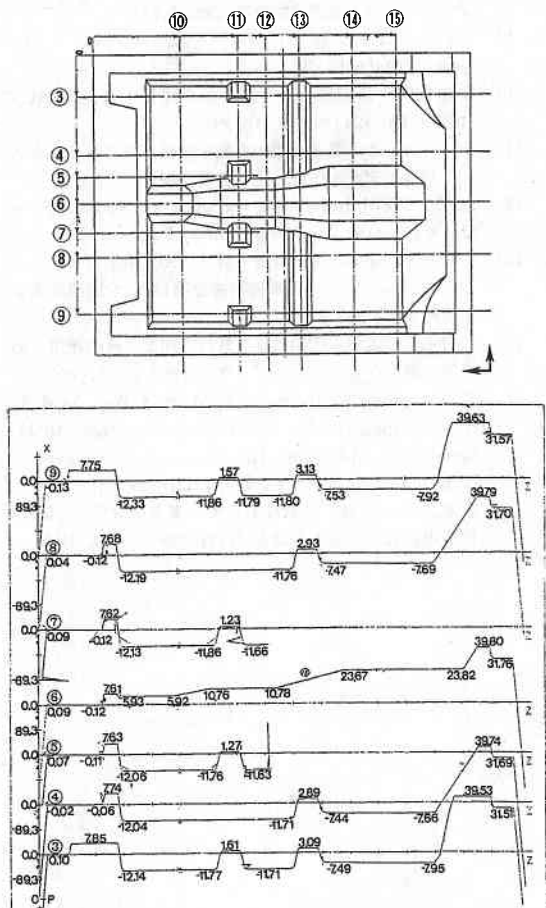
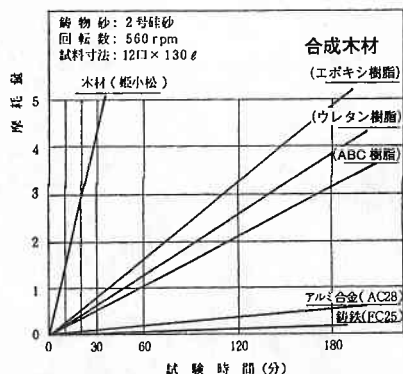


図10 樹脂モデル（カーペット型）の3次元測定データ

図11 各種模型材料の耐摩耗性¹⁶⁾

6. おわりに

もの作りの究極の形は頭の中に描いたものをそのまま具現化することである。今回は形状をあらかじめ想定して3次元CADによる設計データからの樹脂モデルの製作とその金属製品への置き変えに casting を用い、精密 casting

表2 鋳物生産量と使用模型材料の関係¹⁶⁾

鋳物生産量	模型材質
・少量生産 (200以下)	木型
・中量生産 (5000以下)	注型樹脂型 (エポキシ, ウレタン樹脂)
・中量生産 (1万5000以下)	ABS樹脂
・大量生産 (2万以下)	アルミ合金型
・大量生産 (2万以上)	鋳鉄型

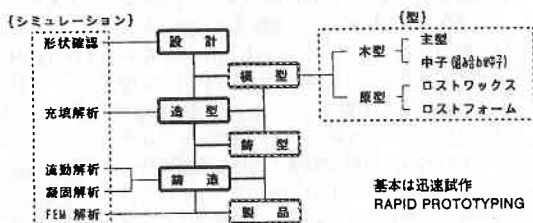


図12 鋳造技術への光造型の利用

用ロストワックスモデルおよび砂型鋳造用マスタモデルとしての適用例を示した。

この他、金属製品の置き換えとしては、電鋳あるいはCVD, PVDなどの原子レベルでの付着・積層加工などが考えられる。さらには低融点金属の鋳造用の金型として、このまま利用することも考えられる。今後は図12に示すように、もの作りのアイデアを具現化するために、3次元CADによる設計から応力解析、使用状況のシミュレーション等にとどまらず、鋳型の方案設計、湯流れおよび凝固シミュレーション、鋳造した鋳物の3次元測定によるデータの取りこみによる伸び尺用補正係数の算定などトータルシステムとしての適用が進み Rverse Engineering を形作るものと思われる。こうしたデータによってすべてのもの作りを行うことは、鋳造の管理システムを大きく変える可能性を含んでいる。たとえば、鋳物製作に使った木型は鋳造メーカが保存するのが通例であったが、現代では土地の高騰に見られるように、従来のような木型倉庫を持つ余裕がないため、重電部品、船用部品、原子力部品の重要な保安部品の製作維持のために数十年に及んで木型を保管する事が出来なくなる現状である。そのため図面から再度木型を作るといった事は難しくなり、データで保存するようになる。必要に応じて、光造形で樹脂モデルを作れば良い事になり、効率のよい生産が行えるようになり、今後もこうした利用方法は進んでいくものと思われる。

終わりに当たって、研究に協力頂いた、日本プレシジョン、林テレンプの皆様に深く感謝の意を生じます。

(1993年3月12日受理)

参 考 文 献

- 1) 早野誠治, 鳥山泰輔: 光造形システム「SOUP」の紹介, 第1回光造形システムシンポジウム, (1991.11.21)P6
- 2) 安斎正博, 中川威雄: プラズマ溶融法により作製した炭化物コバルト系合金複合材料の特性とそれによる立体物の創製, 鉄と鋼, Vol. 76 (1990) No. 3, P93
- 3) 魏杰, 早野誠治, 斎藤直一郎, 中川威雄: 光造形法及び精密鑄造への応用, JACT NEWS, No. 415 (1991-7-20), P32
- 4) 魏杰: システム制御情報学会インテリジェント FA 研究部会第88回研究例会講演論文集 (1991)
- 5) 中川威雄: 光造形システム, 日本機械学会講習会教材 (No. 910-72) 金型製作における最近の技術とシステム化 (1991.11.7)P39
- 6) 日本プレジジョンキャスティング, カタログ
- 7) 大谷利勝, 星野和義他: 光造形技術の鑄造用模型への適用, 素形材, Vol. 31 (1990) No. 12, P7
- 8) 孟陽, 今村正人, 魏杰, 中川威雄: I233次元光造形モデルのロストワックス精密鑄造への適用, 1992年度精密工学会春期講演大会講演概要集 (1992.3.25)
- 9) 丸紅ハイテックコーポレーション, カタログ, Stratasys: 3D MODELER
- 10) 後藤哲郎: 易崩壊性シェル鑄型の現状と課題, JACT NEWS, No. 424 (1992-4-20), P19
- 11) ディーメック: 光造形用の樹脂を開発, ロストワックス法, ロウモデルの代用, 化学工業日報 (1993.1.20)
- 12) 3D SYSTEM: Introducing the advanced Technology of Quick Cast, the Edge (winter 1992), P4
- 13) 今村正人, 孟陽, 中川威雄, 魏杰: 96光造形システムとその鑄造への応用, 日本鑄物協会第120回全国講演大会講演概要集 (1992.5.29), P96
- 14) 今村正人, 孟陽, 中川威雄: 鑄造用模型とその適用, 第2回光造形システムシンポジウム (1992.5.15), P37
- 15) T. Nakagawa, M. Imamura, Y. Meng, J. Wei, A. Maki-nouchi: Application of Laser Stereolithography to FE Simulation and Casting, Third International Conference on Rapid Prototyping (Dayton, 1992. 6. 9), P313
- 16) 日本木型工業会: 素形材センター調査研究報告 No376 模型用新素材に関する調査報告書 (1990.2)P49, P81