

# 繊維強化セラミックスシェル鑄型に関する研究

—光造型システムによる複雑形状部品の一品生産に関する研究—

何 仕栄・森 智明・吉浦洋之  
機械電子部

## Study on Fiber Reinforced Ceramics Shell Mold

—Application of Stereo Lithography System to Mono Production of Complex-Shape Part —

Shirong HE, Tiaki MORI, Hiroyuki YOSHIURA  
Mechanics & Electronics Division

### 要旨

ロストワックス法に準じて、光硬化樹脂マスターモデルを高温燃焼による脱模型を行う時、樹脂の熱膨張により鑄型の破壊が多発する。本論文では、まず光硬化樹脂を用いたセラミックスモールド法の手順及び特徴について説明し、その中から問題点を抽出して、耐熱短繊維を鑄型の成型に用いることによって、セラミックス鑄型の破壊問題を解決する方法を提案した。繊維強化セラミックスシェル鑄型は、従来のシェル鑄型では問題となる鑄型材の固有破壊靱性が低いという弱点を改善し、マトリックス材に混入した繊維のブリッジング効果により、亀裂の発生および進展を阻止することができることを明らかにした。未強化の鑄型と同様の条件で脱模型実験を実施した結果、未強化のセラミックス鑄型は実験後数個の断片に分割したのに対して、強化セラミックスシェル鑄型は実験前と同じ状態であることを確認した。

### 1. はじめに

ラピッドプロトタイプング技術は、3Dプリンターとして、形状確認用のデザインモデルや性能確認用のワーキングモデルといったコンセプトモデルの製作に用いられるほか、ダイレクト型やマスターモデルとしての利用も盛んに検討されている。しかし、RT (Rapid Tooling) の分野では速さ、コストの面では優位にある CNC と競争する局面にあり、機械加工では難しいとされるシャープなコーナーや薄い壁、中空構造等複雑形状部品の作製に用いられる。光硬化樹脂モデルを用いたセラミックスモールド法は、複雑形状部品の製造するために、光硬化樹脂模型をマスターモデルとして、従来のロストワックス法と同様のプロセスを確立し、金型製造の工程を省略することによって迅速に少量の部品を生産することを目的とする。

### 2. プロセスの特徴

#### 2.1 プロセスの構成

光硬化樹脂モデルを用いたセラミックスモールド法は、光造形技術と精密鑄造法を結びつけた手法であり、CADによる設計、RPシステムによる造形およびモールド製造で構成される。しかし、CAD設計、光造型システム及び精密鑄造などの技術は互いに連携することにより新しい特徴が付けられる。

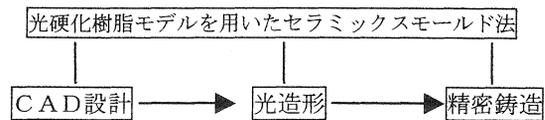


Fig.1 プロセスの構成

#### 2.2 CADによる設計

3次元CADによる設計は精密鑄造のマスターモデルを設計する意味で単純な部品設計ではなく、モールドのためのマスターモデル設計であるため、通常中空構造が必要である。中空構造の長所は造形時に高価な光硬化樹脂の使用量を減らすのでコストダウンに寄与できることと、樹脂モデル肉厚の減少により脱模型時の膨張が緩和されることが上げられる。短所は新規生成の内表面によりモデル全体の面の数が増え、データ量が大きくなり処理時間が長くなること、薄肉のため模型の剛性が低下し、寸法精度が確保しにくいことなどがあげられる。また、中空構造の設計は単純な部品設計より構造上複雑になり、設計にかかるノウハウと時間を多く必要とする。Fig.2は設計の1例を示す。外観の輪郭はソリッドに見えるが、内部は互いに貫通する中空状態になっている。

#### 2.3 RPシステムによる造形

RP技術は光造形法 (Stereo Lithography)、紙積層法

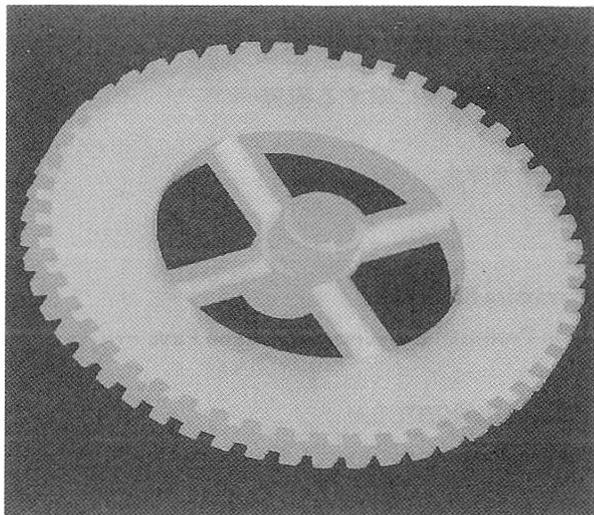


Fig.2 中空状態のCADモデル

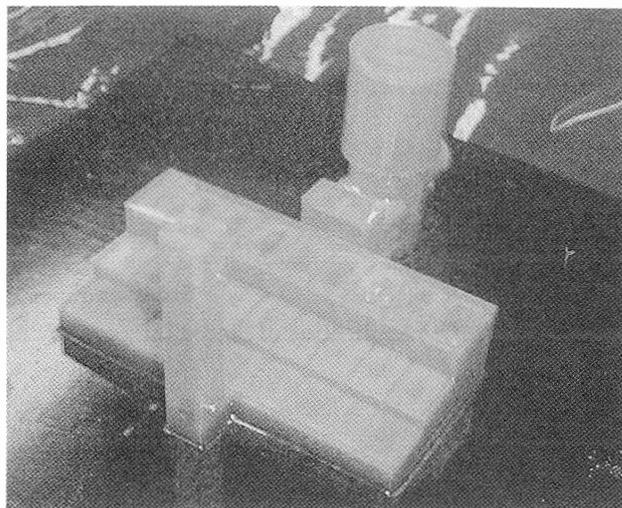


Fig.5 階段型光硬化樹脂モデル

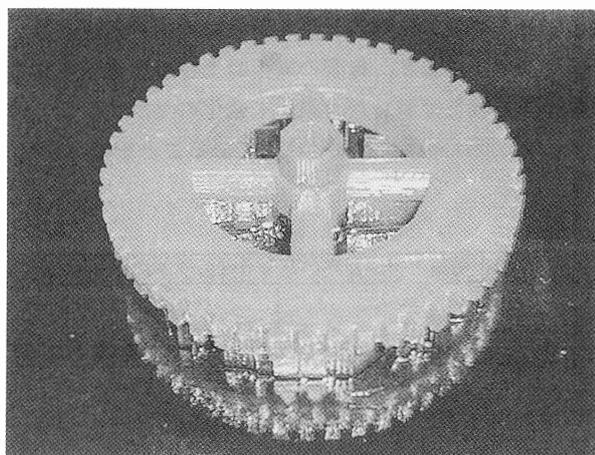
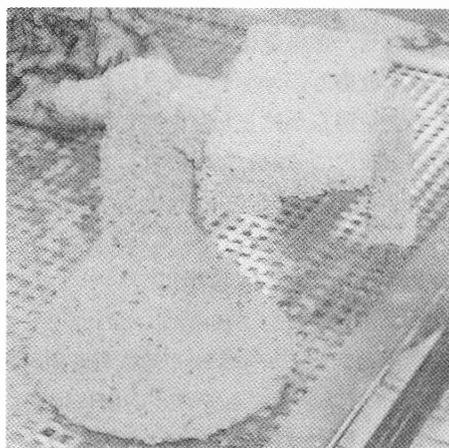


Fig.3 造形直後の光硬化樹脂モデル



(a) 作成中のセラミックスシェル鑄型

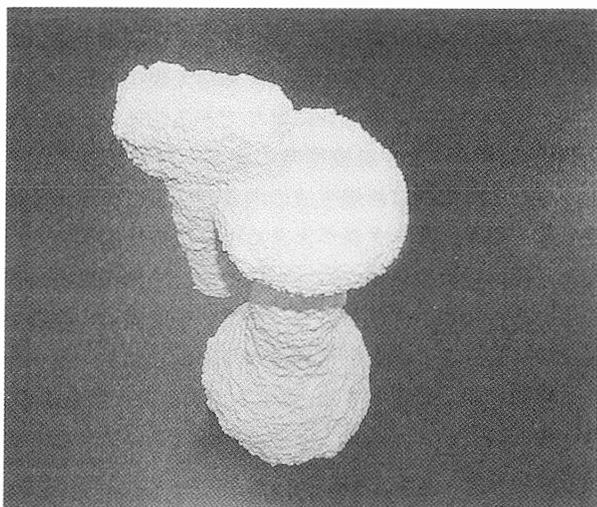
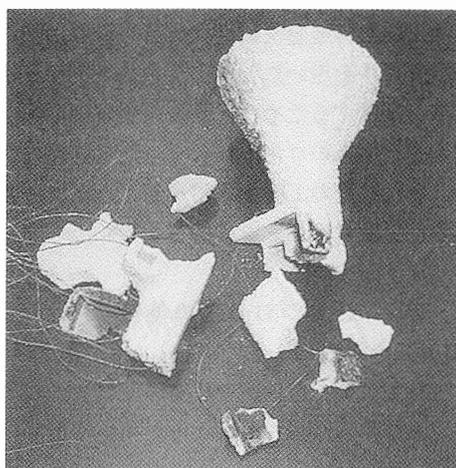


Fig.4 セラミックスモールド



(b) 脱模型実験後のセラミックスシェル鑄型

Fig.6 作製中と脱模型後の鑄型

(Laminate Object Manufacturing), 溶融物積層法(Fused Deposition Modeling), 粉末焼結法(Selective Laser Sintering)等がある。これらの技術は原理的にはほとんど同様であるが, 造型手法の拡張により, 積層に使用できる素材が増えるにつれてセラミックスモールド法に利用可能な材料の種類も多くなっている。従って, 模型の材質はコスト, 時間, 精度等の条件により選択する必要がある。上記造型手法では光造形システムは技術的に成熟であり, モデル製作のコストが低い機種が見られる。Fig.3に示すのはCAD設計によるデータに基づいて光造形システムより作製した樹脂モデルである。

## 2.4 モールドの製造

RPによるモデルは砂型鋳造, 真空注型, 精密鋳造等のマスターモデルに用いられる。精密鋳造のマスターモデルに用いる場合は脱模型の特徴から消失模型法とロストワックス法と共通点がある。模型を燃焼させて脱模型を行う点では消失模型法と同様であるが, 金属の流し込みが模型の消失の後から行う点ではロストワックスの特徴を持つ。ただし, 樹脂モデルを用いる場合, 脱模型後の残留物を除去する作業が必要なので, 脱模型と鋳造を一回で済ませることが困難なため消失模型法の方へアプローチすることが難しい。従って本モールド製造法の開発はロストワックス法に準ずるプロセスを確立することを目標とする。Fig.4に示すのは上記モデルより作製したセラミックス転写モールドである。メインモデルのほかに湯口や排気口も取り付けられている。

## 2.5 主な問題点

以上に説明したように本研究ではロストワックス法のワックスモデルの代替物として, 特定の光硬化樹脂モデル(樹脂は波長473nmの可視光で硬化する)をマスターモデルに用い, ロストワックス法同等のプロセスを確立することを目的とする。そのため, 最終製品に不良な影響を与えないすべての条件を備えさせなければならない。すなわち製品製造を可能にするセラミックス鋳型を安定的に得ること, および高品質な製品を作るための高精度なマスターモデルを作成することである。Table 1に示すように光硬化樹脂の熱膨張率が大きく, 脱模型中マスターモデルの膨張による鋳型の破壊が深刻であり, ここではセラミックス鋳型を安定的に得るための手法について検討する。

## 3. 脱模型実験

### 3.1 マスターモデルおよび鋳型の作成

脱模型実験にはFig.5に示すような階段型モデルを用いた。マスターモデルの作製は, まずCAD上で階段型のソリッドモデルを作成し, 樹脂の膨張及び使用量を考慮して内部を中空状態にし, 薄肉モデルの剛性低下によるモデル

の変形を防止するためにモデル内部で長手方向に沿って10mm間隔でリブを設置するように設計した。次にソリッドモデルのCADデータをSTLデータに変換して保存するが, 光造形システムではこのデータの修正が難しいためこの段階で造形の精度, 速度を考慮してパラメーターを適当に設定する。

樹脂モデルの作成は, まず専用編集ソフトでSTLデータを編集する。その主な内容はサポーターの設置とスライスデータの作成がある。サポーターの形状寸法はモデルの後処理に影響を与え, またスライスパラメーターの設定は造形効果に関係するので, 造型機の特徴を十分理解した上で適切に選択する必要がある。

セラミックス鋳型の作製は, 上記成型した樹脂モデルにスラリーによりスタック材をコーティングし乾燥して, コーティングと乾燥の手順を繰り返す方法によった。使用材料およびコーティング方法はTable 2とTable 3に示す

Table 1 樹脂とセラミックスの性質

	ヤング係数	膨張率 $10^{-6}$
樹脂	27kgf/mm <sup>2</sup>	130/°C
セラミックス	22000kgf/mm <sup>2</sup>	9/°C

Table 2 スラリーの調合と性質

スノーデックス	界面活性剤	ジルコンフラワー	粘度 サンカップ#5
100	0.01	350	50秒

Table 3 コーティング方法

層数	1	2	3	4	5	6	7	8
材料	A	A +	A +	A +	A +	A +	A +	A

A: スラリー

B: ジルコンサンド

C: ハイアルミサンド

D: ムライト

### 3.2 脱模型実験の結果

脱模型はあらかじめセラミックス鋳型を電気炉に挿入し, 樹脂の発火点である530°Cまで室温から徐々に加熱する方法を用いた。この過程では樹脂はワックスのように高温で溶解する性質を持たないため, オートクレーブ法における高温高压の代わりに, 高温送気で助燃を施した。燃焼は樹脂の発火点付近で起き, およそ15分継続した。燃焼の様子は電気炉の覗き口から観察された。Fig.6に示すのは脱模型前後の鋳型の状態である。脱模型終了後, セラミックス鋳型は数個の断片に分割して完全に破壊した。

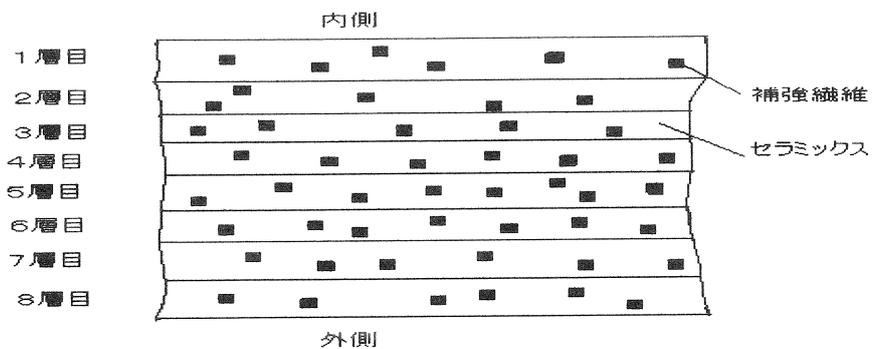


Fig. 7 強化セラミックスシェル鑄型の概念図

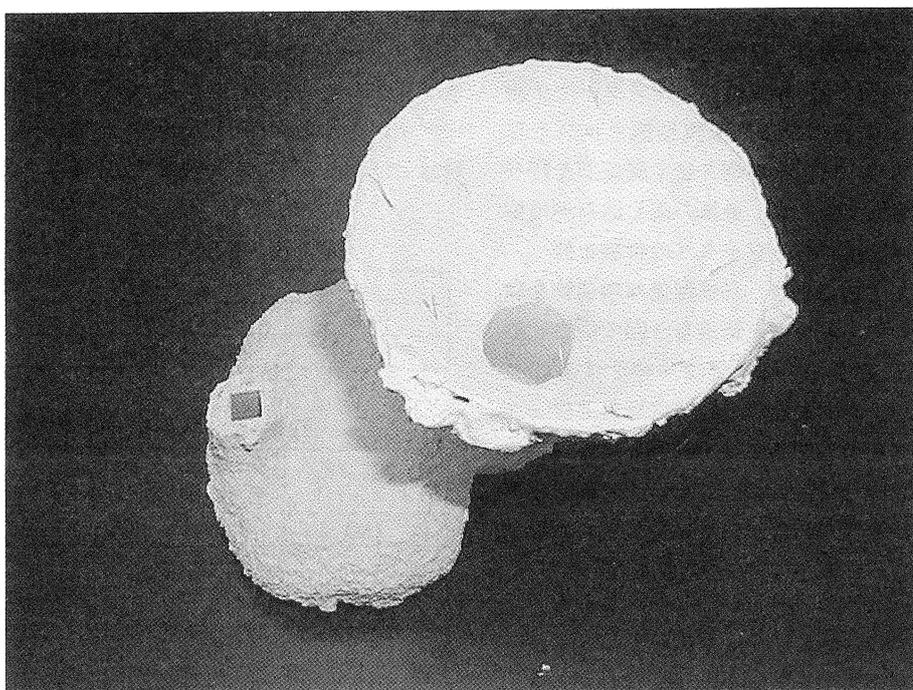
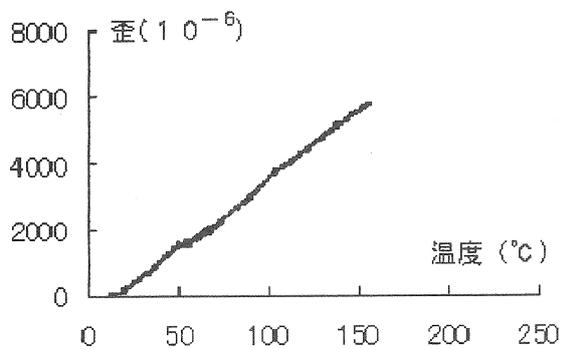
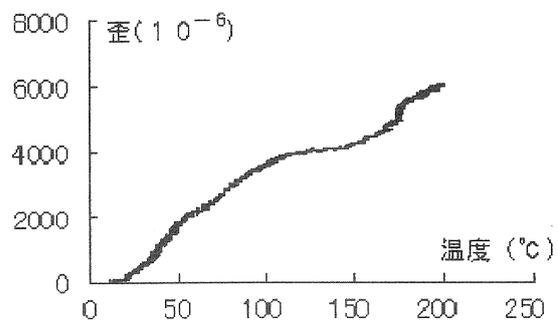


Fig. 8 脱模型後の強化セラミックスシェル鑄型



(a) 強化セラミックスシェル鑄型



(b) 未強化セラミックスシェル鑄型

Fig. 9 鑄型内部歪の変化

## 4. 繊維強化セラミックスシェル鑄型

### 4.1 鑄型破壊の原因

鑄型の破壊について、まず光硬化樹脂の熱膨張が原始的な原因となり、部品形状によりコーナー付近に大きい表面力が発生する。次にこの表面力が2次的要因となって鑄型内側コーナー部に応力拡大係数の大きい特異分布の応力が発生する。最後に、昇温につれて応力拡大係数がセラミックスの固有破壊靱性値に達し亀裂が生じて鑄型が一気に破壊すると考えられる。したがって、脱模型時の熱膨張による破壊に耐え得る鑄型を得るためにセラミックス材の破壊靱性値を高め、またはコーナー部応力の特異性を低減しなければならない。

### 4.2 これまでの解決手段

従来の技術ではモールド破壊の防止対策としては中空形状や自己破壊模型の適用、鑄型に適する材質の模型材料の選択、セラミックスシェル鑄型の肉厚の増大等の手法が施されている。これらの手法は一定の効果はあるが、鑄型自体の強度を変えることができない。

自己破壊模型は、複雑な破壊条件を明らかにすることが前提であるため、高度な専門知識が必要であり設計段階の負担が大きい。また、中空形状の模型構造を採用した場合でも依然として樹脂模型の熱膨張による鑄型の破壊が発生し、さらに肉厚が薄すぎるとマスター模型の寸法精度が確保できない等の問題が顕著になる。

従来のようにモールドに適応する特性を持つ模型材料を選定することは、時々経済性や生産性を考慮する必要がある場合があるので、選択できる模型材の範囲が狭い。シェルの肉厚を増やす方法は、モールドを作製するためのコーティング回数が増え、モールドの製造にかかる時間が長いため生産性が低下する一方、過度な肉厚は脱型の困難をもたらし、製品に損傷を与える確率が増えるので品質の保証が難しくなる。

### 4.3 強化セラミックスシェル鑄型の原理

強化セラミックスシェル鑄型は、従来の手法の弱点を克服し、問題となる材料の脆性破壊と強度を改善し、設計、模型作製の負担を低減し、より広範囲の模型材料に適し且つロストワックス法同等の厚みと強度を持つシェル鑄型の製造方法を提供する。セラミックス鑄型の破壊靱性値が低いという課題を解決するため、耐熱短繊維を鑄型の成型に用いる。セラミックス鑄型では一般に圧縮強度は強いが引張り強度は弱い上、不均一であるため微小亀裂が発生しやすく、亀裂が発生した後一気に破壊に至るように脆性的に破壊するのが特徴である。強化繊維の役割は問題となる鑄型材の固有破壊靱性が低いという弱点を改善し、マトリックス材に混入した繊維のブリッジング効果により、亀裂の発生および進展を阻止することにある。Fig.7 に繊維強

化セラミックスシェル鑄型のイメージを示す。

### 4.4 強化セラミックスシェル鑄型の実施効果

強化セラミックスシェル鑄型の作製は、Table 3 に示す3層目から7層目までは、スタッコ材に繊維を混入しその混合物をコーティングする方法によった。脱模型実験は未強化鑄型と同様の条件で行われた。実験終了後、Fig. 8 に示すように鑄型の表面状態は挿入する前と同じく亀裂は観察されなかった。

Fig.9 に示すのは強化された鑄型および強化されなかった鑄型の内部歪—内部温度関係であり、両者とも同じ脱模型条件で記録された。歪ゲージは階段型底部中央で鑄型内部4層目と5層目のコーティング層の間に埋め込んでいる。セラミックス鑄型が強化されなかった場合は強化された場合と比べ、温度に対する歪の変化が不安定であり、これは加熱中光硬化樹脂模型の膨張効果で鑄型内部に応力の増大により損傷が起きたと考えられる。

セラミックスが強化された場合、温度の上昇に対する歪の変化が線形的に上昇するのは、セラミックスマトリックスに強化繊維が散在するため、繊維のブリッジング効果で鑄型内部の損傷が抑制されたと考えられる。

以上の結果により、高温加熱による脱模型時の樹脂マスター模型の膨張に十分な耐力を持つセラミックスシェル鑄型を獲得するのに、耐熱短繊維による強化を施した強化型セラミックスシェル鑄型が有効であることが確認された。

## 5. まとめ

本研究を通して次のような結論が得られた。

- ① ロストワックス法に準ずるセラミックスモールド法を確立するために中空状態のマスターモデルを用い、ロストワックス法の脱蠟に替わって高温送気助燃を施して脱模型することが必要である。
- ② 繊維強化セラミックスシェル鑄型は従来の鑄型では問題となるセラミックス鑄型材の固有破壊靱性が低いという弱点を改善し、マトリックス材に混入した繊維のブリッジング効果により、亀裂の発生および進展を阻止することできる。
- ③ 繊維強化セラミックスシェル鑄型を用い、CADによる設計及びRPシステムによる造形と一体化することにより複雑形状部品を迅速に作製することは可能である。

## 文献

- 1) 何仕栄, 吉浦洋之, 森智明: 強化セラミックスシェル鑄型, 発明協会公開技報, 公技番号 99-2283, 1999年4月