

## 複合セラミックスシェルモールドの形式及びその効果

何 仕栄・吉浦洋之\*

機械電子部・\*大分県産業創造機構

### Formation and Performance of Component Ceramic Shell Molds

Shirong HE, \*Hiroyuki YOSHIURA

Mechanics & Electronics Division

\*Oita Industrial Creation Organization

#### 要旨

RP 装置を用いて作成したプロトタイプをマスターモデルとして精密鋳造法に応用する技術は、既往のロストワックス法に比べ、多くの相違点が存在する。この技術には、マスターモデルのシェル構造設計、脱模型の昇温過程の制御、残留物の除去、樹脂模型の熱膨張による鋳型の破壊防止など取り入れるべき手法が多くあり、技術の成立において必要不可欠な要素になっている。中でも基本的な課題である鋳型の破壊防止対策に関して、これまで針金の巻き締めによる補強鋳型、11層以上の厚手鋳型、1回で成形できる迅速鋳型、金網補強鋳型等が試みられた。しかし、金属補強材自身の膨張による拘束力の低減、鋳型を厚くした場合の作業性等が指摘され、従来どおりの肉厚があり且つ著しい強度効果が期待できる鋳型の開発が要求される。本研究では短繊維による補強型鋳型を提案し、その形式及び効果について実験的に検証した。その結果長さ0.5mm前後のガラス繊維による吹き付け付加法が効果的であることを明らかにした。

#### 1. 緒言

鋳型を補強せずに樹脂模型を用いる場合、鋳型は殆ど破壊する。その破壊過程としては、樹脂の熱膨張かガス圧等の一次的要因により、鋳型コーナ付近に大きい表面力が発生し、この表面力が二次的要因となって鋳型内側コーナ部に大きな特異分布の応力が発生し、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鋳型が一気に破壊する。

一次的要因についてガス圧と熱膨張と2通りの見方があるが、開放状態における鋳型には熱膨張に匹敵するようなガス圧が発生することは考えにくいことから破壊の発生源は主に模型の熱膨張にあるという見方が有力である。

したがって脱模型時の熱膨張による破壊に耐え得る鋳型を得るために、マスターモデルをシェル構造化する他に、セラミックス材の破壊靱性値を高め、コーナ部応力の特異性を低減しなければならない。その手法の1つとして補強繊維のブリッジング効果を検討すべきである。

#### 2. 脱模型実験

##### 2.1 試験体の作成及び使用材料

脱模型実験には階段型の光硬化樹脂模型を用いた。セラミックス鋳型の作製は、樹脂模型にスラリーによりスタッコ材をコーティングし乾燥して、コーティングと乾燥の

Table1 スラリーの調合と性質

スノーテックス	界面活性剤	ジルコニウムフラワー	粘度サンカップ #5
100	0.01	350	50秒

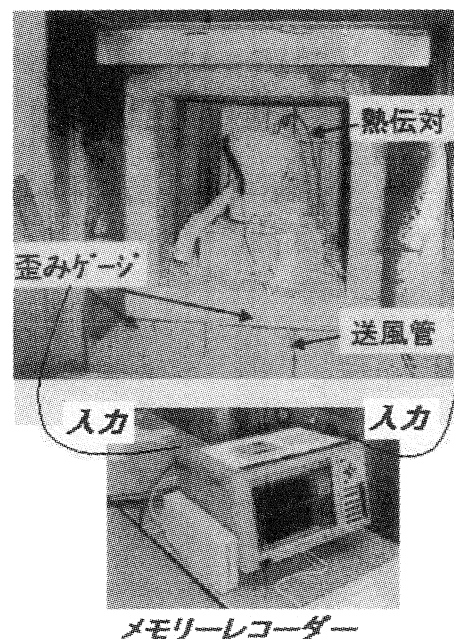


Fig.1 脱模型実験の状況

Table2 鋳型制作方法

番号 層数	N001 炭素繊維 C 拘束	N002 補強なし	N003 炭素繊維 D 層間吹付 (3-7 層)	N004 ガラス繊維 A 層間吹付 (3-7 層)	N005 ガラス繊維 B 層間吹付 (3-7 層)	N006 炭素繊維 D とスタッコ 材混合	N007 炭素繊維 D とスラリー 混合	N008 担層繊維 D とスラリー とスタッコ 材
1 層目	スラリー	スラリー	スラリー	スラリー	スラリー	スラリー	スラリー	スラリー
2 層目	スラリー ジルコンサ ンド	スラリー ジルコンサ ンド	スラリー ジルコンサ ンド	スラリー ジルコンサ ンド	スラリー ジルコンサ ンド	スラリー ジルコンサ ンド	スラリー ジルコンサ ンド	スラリー ジルコンサ ンド
3 層目	スラリー ハイアルミ サンド (yo-3)	スラリー ハイアルミ サンド (yo-3)	スラリー 炭素繊維 D ハイアルミ サンド	スラリー ガラス繊維 A ハイアルミ サンド	スラリー ガラス繊維 B ハイアルミ サンド	スラリー (炭素繊維 D+ハイアル ミサンド)	(スラリー+ 炭素繊維 D) ハイアルミ サンド	スラリー+ ジルコンサ ンド+ハイ アルミサン ド+炭素繊 維 D+ムライ トサンド 混合
4 層目	スラリー ムライトサ ンド	スラリー ムライトサ ンド	スラリー 炭素繊維 D ムライトサ ンド	スラリー ガラス繊維 A ムライトサ ンド	スラリー ガラス繊維 B ムライトサ ンド	スラリー (炭素繊維 D+ムライト サンド)	(スラリー+ 炭素繊維 D) ムライトサ ンド	
5 層目	スラリー ムライトサ ンド	スラリー ムライトサ ンド	スラリー 炭素繊維 D ムライトサ ンド	スラリー ガラス繊維 A ムライトサ ンド	スラリー ガラス繊維 B ムライトサ ンド	スラリー (炭素繊維 D+ムライト サンド)	(スラリー+ 炭素繊維 D) ムライトサ ンド	スラリーに よる表面処 理
6 層目	スラリー ムライトサ ンド	スラリー ムライトサ ンド	スラリー 炭素繊維 D ムライトサ ンド	スラリー ガラス繊維 A ムライトサ ンド	スラリー ガラス繊維 B ムライトサ ンド	スラリー (炭素繊維 D+ムライト サンド)	(スラリー+ 炭素繊維 D) ムライトサ ンド	
7 層目	スラリー ムライトサ ンド 後繊維で拘 束	スラリー ムライトサ ンド	スラリー 炭素繊維 D ムライトサ ンド	スラリー ガラス繊維 A ムライトサ ンド	スラリー ガラス繊維 B ムライトサ ンド	スラリー (炭素繊維 D+ムライト サンド)	(スラリー+ 炭素繊維 D) ムライトサ ンド	
8 層目	スラリーに よる表面処 理	スラリーに よる表面処 理	スラリーに よる表面処 理	スラリーに よる表面処 理	スラリーに よる表面処 理	スラリーに よる表面処 理	スラリーに よる表面処 理	
備考	1.スラリー：スノーテックス+ジルコンフラワー 2.ガラス繊維 A：CS13PE549(13mm, 日東紡) 3.ガラス繊維 B：CS2PE905(2mm, 日東紡) 4.炭素繊維 C：HTA-12K(ロング, 東邦レーヨン) 5.炭素繊維 D：HTA-C13-0W(13.2mm, 東邦レーヨン)							

Table3 強化繊維の性質

指標	CS13PE54 9 (A)	CS2PE905 (B)	HTA-12K (C)	HTA-C13-0 W (D)
種類	ガラス 繊維	ガラス 繊維	炭素繊維	炭素繊維
長さ(mm)	13	2	ロング	13.2
単繊維直 径 ( $\mu\text{m}$ )	13	13	7	7
含水量 (%)	>0.1	>0.1	22.1	22.1
引張強さ (GPa)	35	35	42	42
膨張係数 (10 <sup>-6</sup> /°C)	5.6	5.6	-0.1	-0.1

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 Table1 と Table2 に示す。強化繊維を用いた場合は上記方法に準じてセラミックス鋳型を作製した。強化繊維の性質を Table3 に示す。

## 2.2 実験方法

脱樹脂実験ではあらかじめ鋳型を電気炉に挿入し、室温から樹脂の発火点 530°C まで徐々に昇温を行った。実験中鋳型内部の歪変化を捉えるために高温歪ゲージを鋳型の底部に貼り付け、また鋳型内外の温度を測定するために熱電対を 2 個それぞれ鋳型の内部と外部に取り付けた。実験の状況は Fig.1 に示す。

## 3. 補強の形式及び脱模型中の挙動

### 3.1 補強鋳型の形式

Table2 に示す方法で作製された各種繊維補強鋳型はそれぞれ次のような特徴がある。

N001 は炭素ロング繊維で補強を施した鋳型である。繊維による拘束はセラミックスコーティング後に行われた。Table3 に示すように炭素繊維の線膨張係数はマイナスであるため、鋳型膨張時、金属材の場合は針金が膨張して拘束力が緩むのに対して、炭素繊維の場合は熱収縮によって拘束力が更に増える。ただし十分な拘束力を得るために拘束の手順を的確にコントロールすることが重要である。

N002 は補強材を使わず、比較するための通常の鋳型である。コーティング層数は 7 層であり、8 層目はスラリによる仕上げである。

N003 は長さ 13.2mm の炭素繊維を各コーティング層に吹き付けで付加する手法による鋳型である。炭素繊維はセラミックス泥漿との親和性は良くないため付着した繊維の量は少ない。

N004 は長さ 13mm のガラス繊維を各コーティング層に吹き付けで付加する手法による鋳型である。ガラス繊維はセラミックス泥漿との親和性が良く、鋳型に付着した繊維

の量が多い。ただし繊維の長さが長いと外側の層になるほど表面に垂直する繊維の量が増え、繊維の配向は 3 次元ランダム状態である。

N005 は N004 と同様にガラス繊維を各コーティング層に吹き付けで付加する手法による鋳型である。ただし長さは 2mm の短い繊維を使用する。そのため繊維は満遍なく鋳型の各層面に付着し、均一な 2 次元分布になっている。

N006 はあらかじめ長さ 13.2mm の炭素繊維をスタッコ材と混入し、その混合物を通常のスタッコ材として使う手法による鋳型である。炭素繊維はスタッコ材と混合しにくく、また両者の比重がかなり異なるため、コーティングする際炭素繊維とスタッコ材が分離し、結局完成品の鋳型には少量の炭素繊維しか含まれない。

N007 はあらかじめ長さ 13.2mm の炭素繊維をスラリと混入し、その混合物を通常のスラリとして使う手法による鋳型である。この場合繊維の量が増えるとスラリの流動性が悪くなり、通常の作業法では作業が困難になるため、手作業で塗りつけなければならない。

N008 は炭素繊維、スラリ及びスタッコ材を混練し、その混合物を 1 回でマスターモデルの表面を覆う手法による鋳型である。この方法は混合する各成分の量を事前に調整でき、鋳型の乾燥にかかる時間が短い。

### 3.2 脱模型中の鋳型の挙動

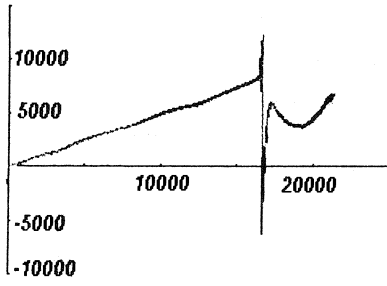
Fig.2 は脱模型中鋳型内部の歪の変化を示す。横軸は秒で表す時間であり、縦軸は歪である。2 本のカーブはそれぞれ鋳型底部における横及び縦方向の歪である。望ましいデータは得られなかった例もあったが、原因はカーボン繊維によるゲージ端子の短絡と考えられる。

実験で観察された歪はいずれも一定の温度で急に上がりその後下がる挙動を示したが、変化の履歴は各鋳型では異なる。歪が急上昇する現象は、鋳型内温度が樹脂の発火点以上になった時、樹脂の急激な熱膨張により鋳型内部の応力場が厳しくなったことが原因であると考えられる。

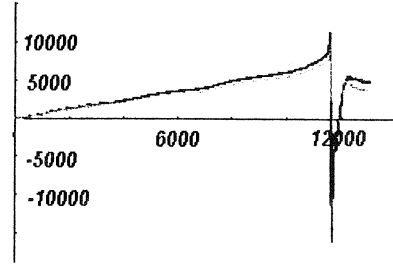
歪の急降下には 2 つの状況があると考えられる。1 つは温度が低いときに歪が急に下がる場合であり、歪の急降下は、鋳型の損傷または破壊によるものと考えられる。メカニズムとして樹脂模型の熱膨張により鋳型内部に微小な亀裂が発生し、歪エネルギーが解放され歪が減少する。

もう 1 つは鋳型内の温度が樹脂の発火点温度になった後一度急上昇した歪は再び急に下がり始める。この降下部分は上記低温における歪降下と同様に鋳型内部の損傷という条件で起きる場合と、高温による歪ゲージの失効による場合があり、2 つの要因が絡んでいるため脱模型後鋳型の状態から調べる必要がある。

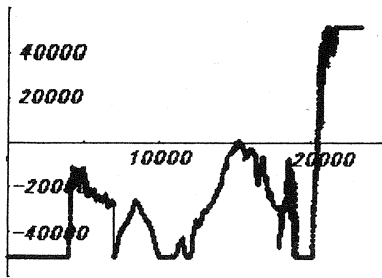
Fig.3 に示すのは昇温曲線の例である。このケースでは温度の変化には五つの上昇パルスが観察された。その原因



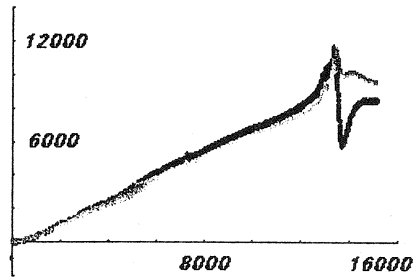
N001



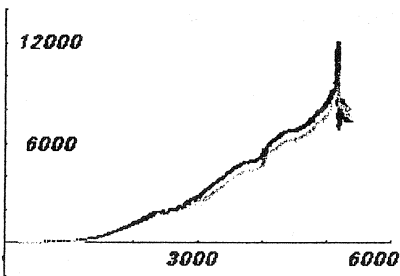
N002



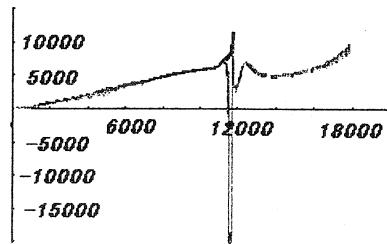
N003



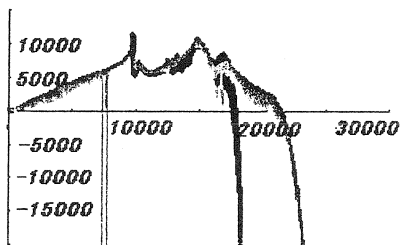
N004



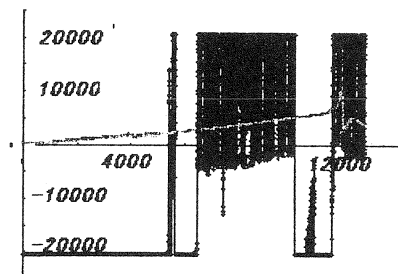
N005



N006



N007



N008

Fig.2 脱模型中鋳型の時間—歪関係

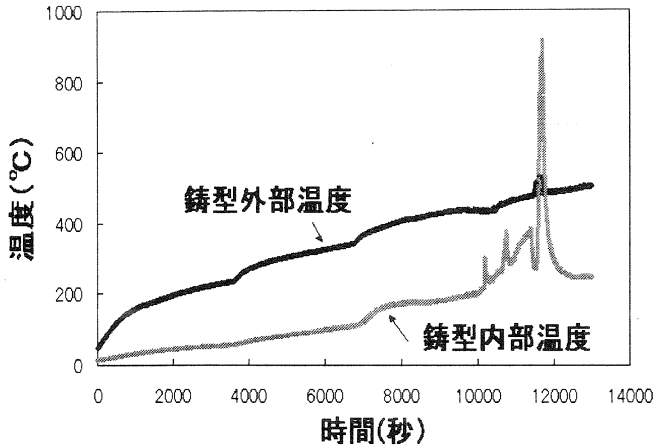


Fig.3 鋳型内外の昇温曲線

は亀裂が発生した後ポンプ送気に伴う内部静圧減少により外部の高温空気が吸い込まれ局所的な燃焼が起きたと考えられる。この燃焼は温度が高い場所にだけ生じ、広がると周辺の温度が発火点以下に下がるため、再び消えてしまう。この局部燃焼現象は数回も繰り返し、全体が発火点以上になったとき大規模な燃焼が発生する。ただし、歪は局所的な温度変化に追従する挙動を示さない。

### 3.3 複合補強鋳型の性能

脱模型実験では徐々に加熱する方法を取ったため鋳型の装入から樹脂が消失するまでおよそ6時間がかかった。実験後各鋳型の状態は次のとおりである。

鋳型の外観に関して、N004, N005, N007, N008の鋳型は亀裂がなく、完璧な表面状態である。これは補強繊維とマトリックス相との混合が十分であり、脱模型中強化繊維による補強効果が十分に現れたからである。

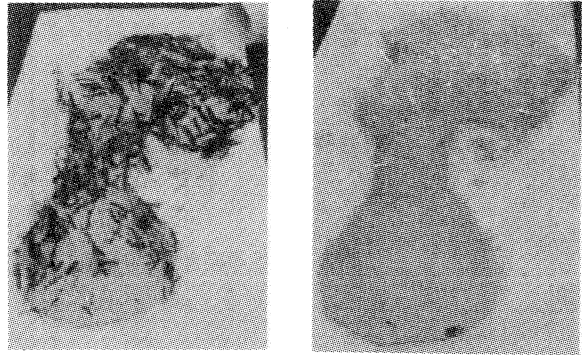
N001の鋳型は本体部分の表面にかすかな微小亀裂しか発見されなかったが、湯口部分の破損が観察された。これは、鋳型本体はロング炭素繊維により拘束されているが湯口部分は補強されなかったためである。

N003及びN006の鋳型は破壊が生じなかったが表面に微小亀裂が観察された。微小亀裂の発生原因は繊維の混入量及び配向が不十分なためと考えられる。

Table4 鋳型性能の評価結果

番号	混入状態	重さ	寸法	破壊状況
N001	○	◎	◎	△
N002	×	◎	◎	×
N003	△	○	○	○
N004	◎	×	×	◎
N005	◎	◎	◎	◎
N006	×	△	○	○
N007	◎	○	△	◎
N008	◎	◎	○	◎

◎：最も優れる ○：良い △：尚可 ×：良くない



A.炭素繊維使用

B.ガラス繊維使用

Fig.4 作製中の強化鋳型

また、N002の鋳型は補強されない通常の鋳型であるため、実験終了後数個の破片となって完全に破壊した。

鋳型の形態については繊維の混入量、配向、親和性、鋳型の重さなどで評価された。Table4は評価の結果を示す。ガラス短繊維による強化効果が最も優れている。

## 4. まとめ

通常の鋳型と同様な寸法及び重量を持ち且つ顕著な熱膨張耐力がある鋳型を得るために、種類、特徴の異なる強化繊維を用い、補強パターンの異なるセラミックスシェル鋳型について脱模型実験を実施し、性能評価を行った。

補強型の鋳型は繊維の混入方法や作製の手順により補強効果が異なる。炭素繊維はセラミックス材との親和性が良くないため、十分に混入できず期待するような補強効果が得られない場合がある。これに対してガラス繊維のようなセラミックスと近い性質の補強材はマトリックス材との親和性が良く、望ましい混入量及び繊維配向を得ることができる。

補強繊維の長さは長いほど繊維のブリッジング効果が大きい。鋳型作製において繊維の2次元配向が難しく、出来上がった鋳型の寸法が大きく重量が重い。脱模型後優れた強度特性を持ち且つ通常の鋳型と同様の外観状態を獲得するのに長さ0.5mm前後のガラス繊維の使用が効果的である。補強短繊維を用いることにより、樹脂模型の熱膨張に耐える鋳型を得ることが可能である。

## 文献

何 仕栄, 吉浦洋之:「RPモデルによる転写モールド法の条件に関する考査」(招待講演), 第17回ラピッドプロトタイプングシンポジウム, 1999年11月, PP76-82