

## 樹脂模型を用いたセラミックス鋳型への検討 (第2報)

— 光造形システムによる複雑形状部品の一品生産に関する研究 —

森 智明・吉浦洋之・\*高橋芳朗  
機械電子部・\*材料開発部Fabrication of Ceramic Molds Using Stereolithography Resin Model (Part 2)  
— Application of Laser Stereolithography System  
to Mono Production of Complex-shape Part —Chiaki MORI, Hiroyuki YOSHIURA, \*Yoshiro TAKAHASHI  
Mechanics & Electronics Division, \*Material Development Division

## 要旨

光造形システムにて作成した樹脂模型を用いてセラミックスシェルモールド法に適用する場合にも、ロストワックス法における脱ろう方法と同様に、この樹脂模型の消失方法が最も重要な課題となってくる。特に光硬化性樹脂の場合は、重合度が高く化学的に融解処理等による流出ができず、且つ加熱による熔融流出も期待できない事から、燃焼での消失法が唯一の方法であり、発火までの膨張を伴う加熱法とならざるを得ない。従ってこの樹脂の膨張と燃焼時に発生する多量のガスによるセラミックス層への圧力負荷を軽減する事が必要になってくる。

昨年度までに、セラミックス層に割れを生じない樹脂模型の消失方法として、セラミックスコーティング層を厚くし、且つ針金で補強する事で、焼成時の樹脂燃焼での割れが生じにくい知見が得られた。そこで、今年度はこの手法を更に発展させ、工業化の面から生産性を視点に一層迅速な鋳型製造法として、樹脂燃焼過程に於いても割れを生じない最適セラミックス鋳型成形法の検討を実施した。

## 1. はじめに

我が国の鋳造業界では、近年生き残りを懸けて低コスト・高生産性等益々多様化してくるユーザーニーズへの対応や、多品種少量生産を余儀なくされており、コスト削減・開発期間の短縮化は常に重要課題となっている。

この厳しい状況下において、従来の切削加工によらず複雑な3次元形状モデルを短時間に造形出来る光造形システムを用いた新たな精密鋳造技術は、従来のロストワックス法と比較して、一層の製品の高付加価値化と短納期化を実現するものと確信する。

本年度は、前報までの成果を基に、光造形システム適用による複雑形状鋳物の新たな精密鋳造技術の確立に向けて一層の検討を行った。

## 2. 迅速鋳型成形法の検討

セラミックスコーティング法では樹脂模型燃焼時の膨張による割れ対策として、11層以上のコーティングと加えて針金での補強が必要であり、生産性、作業性の面で課題が多い。そこで、この製造工程改善のために、迅速に鋳型を成形する方法として、多量の鋳型材に樹脂模型を直接浸漬し焼成する迅速鋳型成形法を検討した。

## 2.1 実験方法

## 2.1.1 型枠の作成

ベニア板を用いて型枠を作成した。樹脂模型（階段部分：50×100×30mm）と木枠面との距離を約20mm程度確保するために、大きさは145×140×115mmとした。

## 2.1.2 充填材

型枠充填材としては、Table 1に示す様に水ガラス系、発砲スチロール系、サンド系の3種類を用いて鋳型成形を行った。

Table 1 充填材一覧

種類	内容
水ガラス系	水ガラス系の砂を充填し、突き固め後CO <sub>2</sub> 硬化
発砲スチロール系	泥漿セラミックスと発砲スチロール（加熱過程で消失し熱伝導性を向上させ、乾燥時間を短縮）の混練
サンド系	泥漿セラミックスとアルミナサント <sup>®</sup> (0.7~1.2mm)、ムライトサント <sup>®</sup> (1.0~1.5mm)を混練

(注) 泥漿セラミックス (コイタ<sup>®</sup>シリカ+ジルコニア、  
粘性：サーンナップ #4 で90秒)

## 2.1.3 模型の事前処理

樹脂模型消失後の鋳肌品質の点から、先ず樹脂模表面

に泥漿セラミックスを2回コーティングし、これを乾燥させた。更に Fig.1 に示す様に、樹脂模型には送風口と燃焼時の排煙及び排滓口を作成し型枠内に設置した。

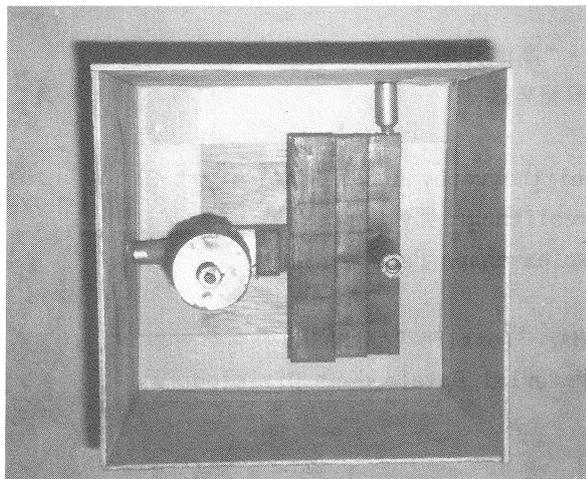


Fig.1 枠内に設置した模型及びその方案

#### 2.1.4 焼成温度パターン

約 150℃/hr で 600℃まで加熱し、樹脂の燃焼と鋳型の一次焼成を行った。また樹脂の燃焼促進のために鋳型内に空気を送風しながら加熱した。(Fig.2)

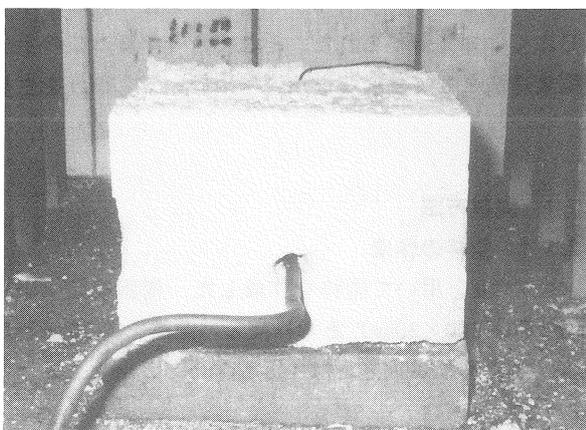


Fig.2 鋳型焼成状況 (銅パイプ：送風用、細線：熱伝対)

#### 2.1.5 鋳型の評価

金属を鋳型に注入し、鋳物製品を得る場合には、樹脂燃焼後の空洞の品質が最も重要となる。そこで、ファイバースコープを用いて空洞内の肌の状態や樹脂燃焼後の残滓の状況等を観察し鋳型としての評価を行った。

#### 2.2 実験結果

水ガラス系と発砲スチロール系は内部の模型表面にコーティングしたセラミックス層が割れ、且つ型枠自体も強度不足であった。次にサンド材と泥漿セラミックスを混練したサンド系は、型枠が適度な強度を保持した事で、その結果クラック等の発生もなく、また樹脂消失後の空洞内には残滓もない鋳型が得られた。更にこの鋳型を用いてアルミの鋳込みも実施したが、鋳型は損傷もなく十分な強度である事も確認できた。

迅速鋳型成形法として各種方案を検討・実験した結果、サンド材+泥漿セラミックス充填型成形法で第一段階での目処を得る事ができた。今後乾燥時間の短縮や排滓方案等、更なる迅速化と最適化を継続検討する。

### 3. セラミックス鋳型の検討

#### 3.1 セラミックス鋳型の製作(その1)

迅速鋳型成形法での送風、排煙口の設置が割れ抑制に効果的である事から、排出口を備える形状に樹脂模型を変更し、ロストワックス法に準じたセラミックスコーティング法での鋳型割れを回避する実験を実施した。

##### 3.1.1 階段型模型の形状変更

迅速鋳型成形法での結果を踏まえて、前報までの湯口からの送風に替え、湯道部に直接送風口を設け、併せて内部の空気の流れと排煙、排滓のために排出口を設けた。

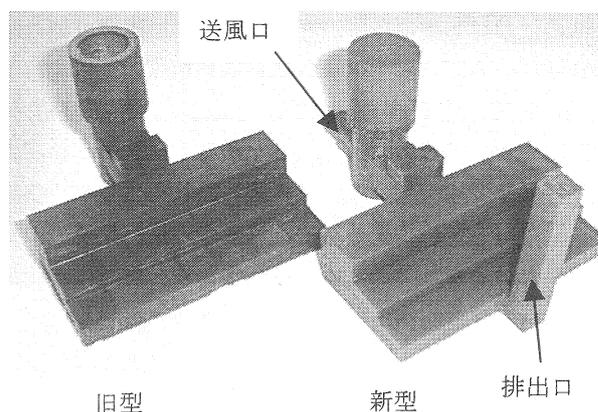


Fig.3 階段型樹脂模型の新旧形状比較

##### 3.1.2 コーティング方法

スラリー及びスタック材を樹脂模型にコーティングする方法は、樹脂模型のスラリーへの浸漬、スタック材、乾燥の3つの組み合わせからなり、Table 2 にそのコーティング方法の詳細を示す。鋳肌を良くするために第1層はスラリーのみとしている。またセラミックスの強度を上げるために、ここでは充分な乾燥温度と時間(25℃×3hr)を設定した。更に鋳型の補強として中間層に於いて針金(0.5mmφ)を締結した。

Table 2 セラミックスコーティング方法と試験水準

第1層	スラリーのみ	(備考) ・試験水準…8層 10層, 13層 ・針金(0.5mmφ) の締結…8層→5層後, 10層→5層後, 13層→8層後
第2~3層	スラリー+ジルコナイト (0.2~0.8mm)	
第4~5層	スラリー+ジルコナイト (0.7~1.2mm)	
第6~最終層	スラリー+ジルコナイト (1.0~1.5mm)	
最終層	スラリーのみ	

##### 3.1.3 焼成パターン

鋳型の焼成パターンを Fig.4 に示す。加熱による樹

脂の急激な膨張を防ぎ、更に樹脂の燃焼を確実にを行うために、600℃までは約150℃/hr程度で徐々に加熱した。また加熱時は併せて送風口より銅パイプにて約10l/minで送風し、急激な樹脂の膨張を抑制し、更に着火後は約30l/minで燃焼アップと残滓の排出を図った。その後樹脂燃焼後は一気に1000℃までに加熱し約1時間保持し焼成した。

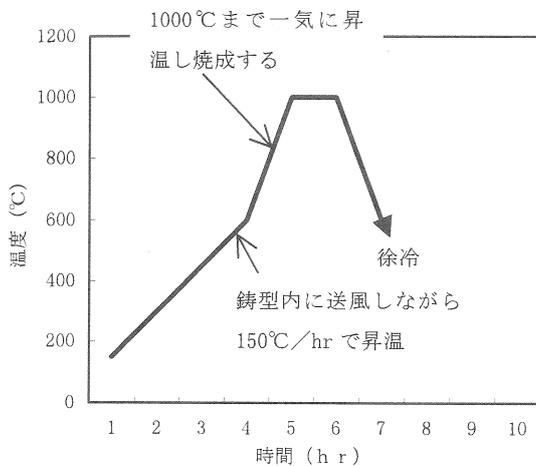


Fig. 4 焼成昇温パターン

### 3.1.4 評価方法

焼型の評価としては、

- ・ 炉内観察により割れ発生の確認
- ・ 焼成後アルミの実鋳込みにより焼肌等の確認

により焼型への適用可否等総合的に実施した。

### 3.1.5 実験結果

実験結果を Table 3 に示す。焼型の焼成に於いては、13 層コーティング焼型のみが割れの現象は見られず、健全なセラミックス焼型として得られた。一方8層、10層の焼型に関しては、加熱の早い段階（約250℃）で階段型の端面より初期亀裂が発生し、徐々に拡大し完全な割れに至った。この実験結果から、送風、排煙口を設け樹脂燃焼時のガス圧低下を行っても、セラミックス層の割れ回避には、針金補強に加え樹脂膨張による応力増に抗するセラミックスの厚みも必要であることを確認した。

Table 3 焼成実験結果一覧

コーティング層数	焼成結果	評価
8	約250℃で微小クラック発生、その後昇温に従い割れ拡大。特に堰近傍の割れ大。	×
10	約250℃で微小クラック発生、その後昇温に従い割れ拡大するも程度中。	△
13	焼型の割れの現象発生なし。	○

次にアルミニウムの実鋳込み試験では、割れの発生した焼型もジルコンフローとコロイダルシリカで補修

し使用した。铸造上の課題は焼肌と寸法、形状の転写性であるが、3つの焼型ともに焼肌面では粗さが見られ、微小クラックの痕跡も観察された。また形状的には、コーナー部での転写性が悪いが、これは溶湯の押し力によるものと考えられる。铸造方案に関しても、焼型成形法と併せて今後継続して検討をしていく。

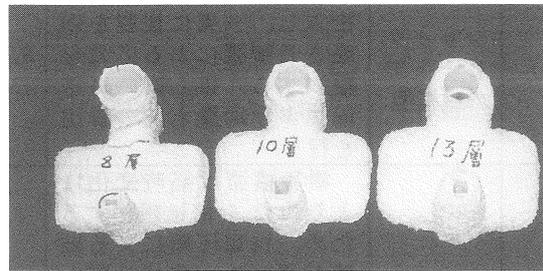


Fig. 5 焼成後のセラミックス焼型 (各層別比較)

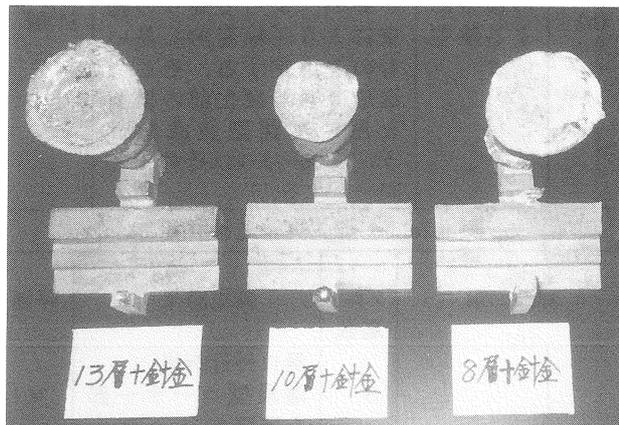


Fig. 6 アルミ(AC4C)铸造後の階段型試験片

## 3.2 セラミックス焼型の製作 (その2)

セラミックス焼型の製作 (その1) の結果から昇温過程での焼型の割れは、樹脂燃焼時のガス圧よりむしろ樹脂模型の膨張によるセラミックス層への応力集中と推定される。そこで、この樹脂膨張時の応力緩和手段としての模型消失方法を策定し焼型の成型法を検討した。

### 3.2.1 応力緩和対策

Table 4 に示す応力緩和対策案を設定し、焼型焼成実験を実施した。

### 3.2.2 コーティング方法

コーティング方法はその1と比較し、10層焼型のコーティング数を補強針金の完全被覆のために11層に変更し、更に針金締結補強は8層後（その1では5層後）とした。その他泥漿セラミックス組成、サンド材、乾燥条件は全てその1と同一条件とした。

### 3.2.3 実験結果

実験結果を総括して Table 5 に示す。ショックヒート法では8層焼型は破壊が大きかったが、11層、13層焼型は湯口、湯道に割れは発生するもこれまでの様な本体（階段部）の割れは見られなかった。また造形直後の模

型を用いた場合には割れの発生は全くなく健全な鋳型が得られた。以上の結果から今回設定した応力緩和対策は有る程度効果が見られ、引き続き検討し当システムにて使用する樹脂への対策として方案化していく。

Table 4 鋳型焼成法の対策案

対 策		内容 (考え方)	水準
(a)	ショックヒートでの脱模型	1000℃雰囲気中に鋳型を投入し、一気に樹脂を燃焼させ膨張による応力を緩和する。但し同時に送風により助燃と灰の排出を行う。	8, 11, 13 層
(b)	造形直後の模型による鋳型焼成	樹脂模型は経時変化により約 2.4 倍に硬化するため、拘束圧縮による破壊が遅れる。作成後間もない模型は強度も低く腰が弱い。よって周りの拘束により圧縮変形し易いものと推定する。そこで造形直後の硬化前の模型を用いて鋳型焼成を行う。焼成パターンはその1と同一とする。	11 層

Table 5 焼成実験結果一覧

対 策		コーティング層数	焼成結果	評価
(a)	ショックヒートでの脱模型	8	湯口付近折損。階段型コーナー部も破壊大。	×
		11	湯口、湯道、ガス抜き部の一部割れ発生。但し、階段型部分は健全。	△
		13	湯道部分のみに大きな割れ発生。他部分は健全。	△
(b)	造形直後の模型による鋳型焼成	11	異常なし。	○

#### 4. セラミックス鋳型の歪測定

セラミックス鋳型の焼成では、コーティングしたセラミックシェル（熱膨張係数： $9.0 \times 10^{-6}$ ）と樹脂模型（ $130 \times 10^{-6}$ ）との熱膨張差が非常に大きいために、脱模型時にシェルに割れが発生する。特にセラミックコーティング層は、曲げ強度試験では 1000℃焼成後でも 16Mpa レベルで強度的には弱い。またセラミック層内部の特にコーナー部にはこの熱膨張差により大きな引張応力が発生している（FEM 解析による）。

一方セラミックコーティング層の割れ対策として、これまでコーティング層の厚みを厚くし、且つ中間層で

針金締結による補強が効果的である事を確認している。

そこで今回この割れ発生メカニズムの解明のために歪ゲージを用いて、熱膨張によりどの程度の歪がセラミック層内部に発生するのか測定を行った。この時には、針金締結による補強効果も併せて確認するために、針金締結有無での温度上昇に伴う歪の変化として測定した。

#### 4.1 実験方法

Fig. 7 の要領にて樹脂模型にセラミックスをコーティングし、歪ゲージを貼付した。また針金締結による補強については、8層コーティング終了時に 0.5mmφ の針金を用いた。尚セラミックのコーティング方法については、粘性、スタッコ材の種類等はすべてこれまでの実験と同一条件で実施した。また昇温パターンもこれまでと同様に、約 150℃/hr で実施した。昇温時には、鋳型内に約 10l/min、樹脂着火後には約 30l/min で送風した。

(測定条件)・使用歪ゲージ：共和電業製

型式 SKW-10190

使用温度範囲 ~550℃

・サンプリング：60 s ピッチ

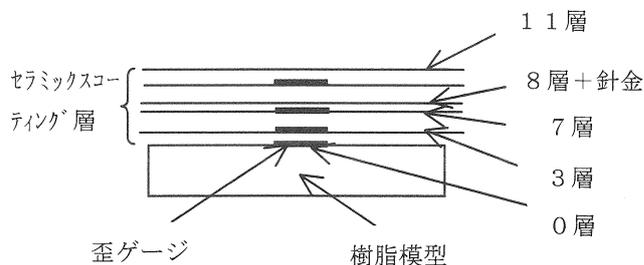


Fig. 7 セラミックスコーティングと歪ゲージの貼付位置

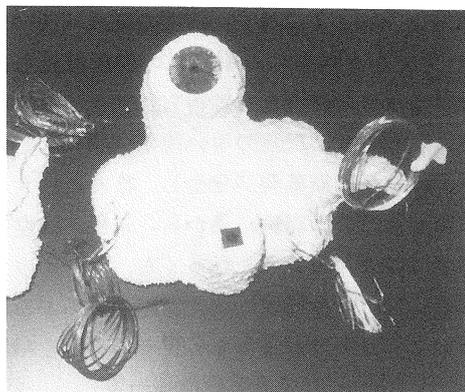


Fig. 8 歪ゲージ貼付後のセラミックス鋳型

#### 4.2 実験結果と考察

今回の鋳型焼成では、これまでの実験結果より、鋳型を針金で補強した場合はセラミック層に割れが生じずに焼成できた事から、針金補強の有無で鋳型内部の歪分布の変化を把握し、割れ発生メカニズム解明の一助とする事を目的とした。Fig. 10 に昇温パターンを示す。約 200, 300, 400℃に変局点があるのは、小型電気炉でのタック切り替えのタイミングである。次に各鋳型の昇温時

の炉内及び鋳型内の温度変化として、針金補強なしの鋳型焼成時のパターンを Fig. 11 に示す。鋳型内には樹脂の急激な膨張の抑制と発火後の助燃効果のために、約 10l/min の送風を行っており、従って炉内とは約 130℃ 程度の差が出ている。更に樹脂の発火点である 400℃ 近傍で鋳型内温度は急激に立ち上がっているが、これは樹脂が燃焼開始したためで、樹脂燃焼時は一層の助燃のために送風量を約 30l/min に増加しており、鋳型内は急激な温度上昇を来している。

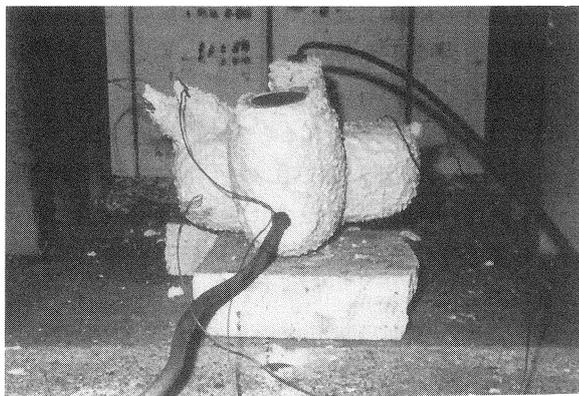


Fig. 9 歪測定用鋳型焼成状況

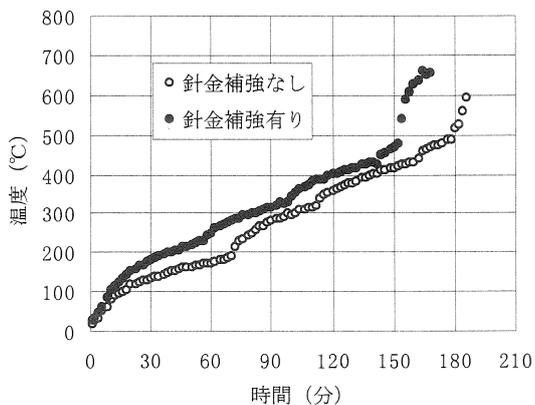


Fig. 10 昇温パターン

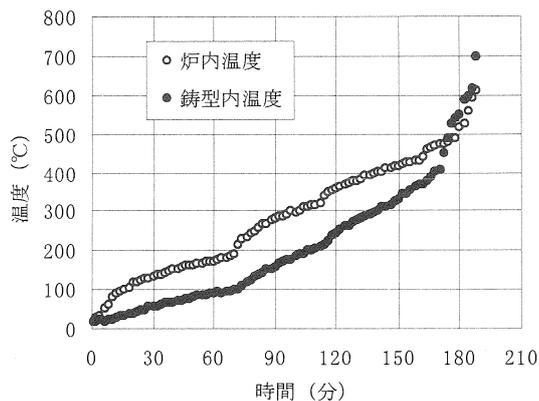


Fig. 11 炉内及び鋳型内温度変化

今回の実験により得られた歪測定値を Fig. 12 に示す。但し歪 3 (7 層) は針金補強有り鋳型で断線したためここでは省略した。測定結果より針金補強有無での鋳型内での歪の温度による変化は、約 400℃ 付近までは殆ど差はない。しかし 400℃ 以降の樹脂発火後では、針金補強なしの鋳型が温度上昇に伴い歪も増加するのに対して、補強有りの鋳型では歪の大きな増加は見られない。特に歪 4 (11 層) は外層に近い事もあり、炉内温度の影響を受けやすく、約 400℃ 前で急激に上昇し両者に大きな差が発生している。しかしこの現象は、400℃ 以降の炉内温度上昇が補強有りの鋳型の方が急激であったために、

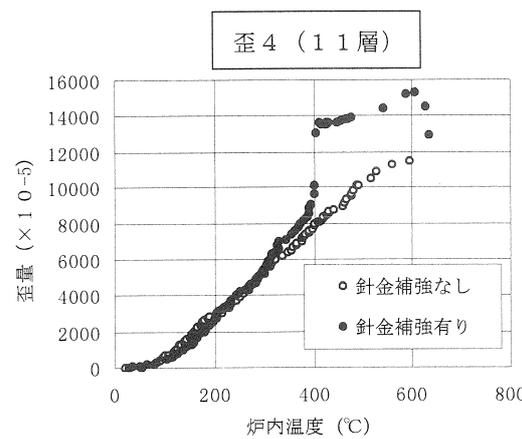
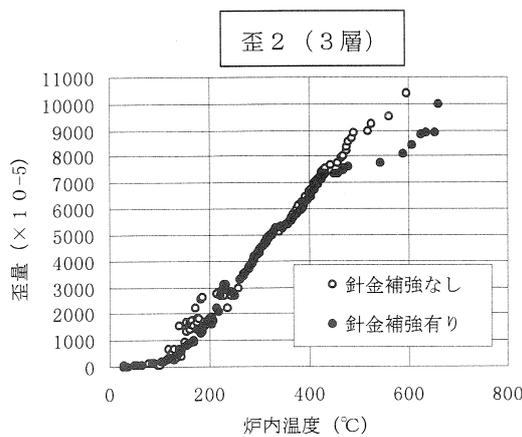
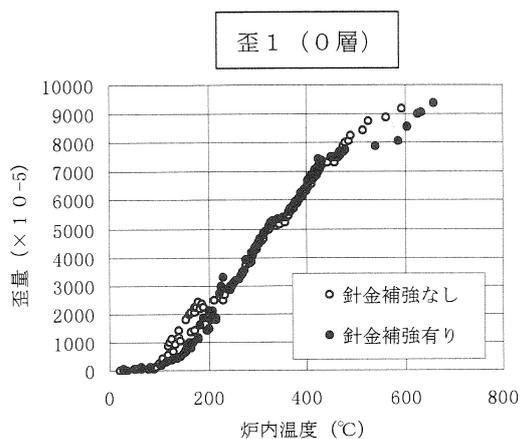


Fig. 12 針金補強有無での各位置の歪量変化

歪量の増加が温度上昇に追従しなかったためと考えられる。つまり、歪量の変化を温度との関係でなく時間依存性として時間軸の補正を行うと、Fig. 13 に示す様に両者殆ど一致する事が分かり、この現象はここでは無視してよい。

一方約 350℃近傍までの歪の挙動として、針金補強の有る鑄型は安定して温度上昇に伴い歪も増加しているが、針金補強のない鑄型は大きく変動し、不安定な伸縮を繰り返している。この現象は初期段階でセラミックス層に引張応力が繰り返し負荷されている事を示し、初期クラック発生の要因にもなり得るものと考えられる。従ってこの繰り返し応力の抑制が針金による補強の効果と考えられる。

今回実測した歪データからは、針金補強による効果について歪量では顕著な差は認められなかった。しかし Fig. 14 に示す様に歪の個々の挙動では、針金締結部より内側の層で、補強していない鑄型は歪振幅が見られ、繰り返し応力が発生している事が推定された。この繰り返し

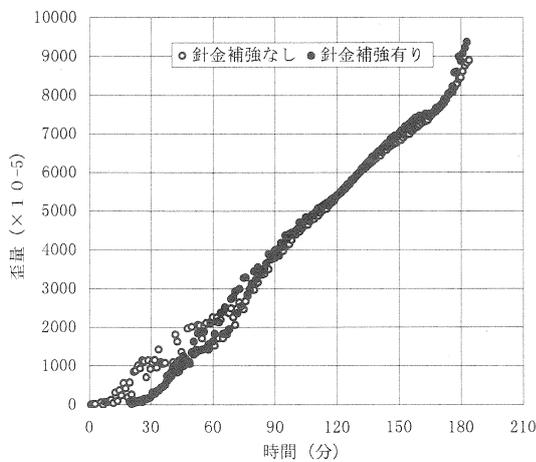


Fig. 13 歪量の時間変化

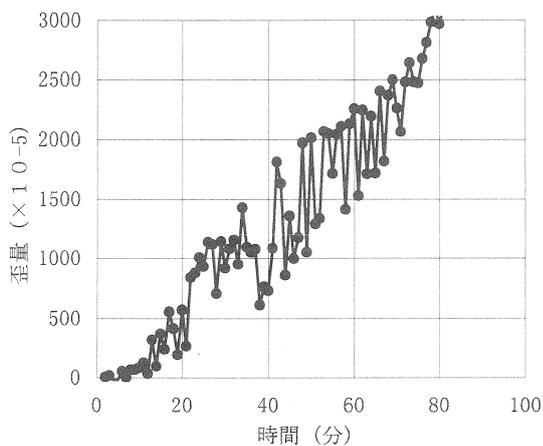


Fig. 14 針金補強なし鑄型の初期歪変化

返し応力により初期クラックが発生し、温度上昇で引張応力が増加するに従い拡大しているものと考えられる。更に外層近傍での歪の変化に於いても差が認められており引き続き歪測定にて評価し、鑄型割れ発生メカニズムを解明し鑄型形状や焼成条件等の最適化を検討していく。

## 5. まとめ

樹脂模型を用いたセラミックス鑄型への適用検討を行い、今回以下の成果が得られた。

①迅速鑄型成型法として、サンド材+泥漿セラミックス充填成型法で強度も充分で品質的にも問題のない鑄型を製造する事ができた。但し送風、排煙、排滓がポイントである。

②セラミックスコーティング法に於いては、コーティング層を 11 層以上で且つ鑄型補強として針金を締結すれば、割れも発生せずに鑄型が製造可能である。この場合も①と同様に送風、排煙等を確実にやる必要がある。

③また樹脂模型は経時硬化するので、成型直後の軟質状態でセラミックスコーティングを行い焼成、消失させる方が、自己崩壊性の点から割れに対しては有効である。

④また割れ発生メカニズム解明の手段として実際の焼成過程に於いて実測した歪からは、針金で補強した場合としない鑄型では歪量には大きな差は認められなかった。しかし針金補強しない鑄型では初期段階に歪振幅が見られ初期クラック発生要因と推定され、メカニズム解明につながるものと考えられる。

引き続き今回得られた成果をベースにセラミックス鑄型成型法の最適条件を探索し、更に複雑模型への適用を行い、光造形システムを用いた新たな精密鑄造技術の確立を図っていく。

## 参考文献

- 1) 吉浦洋之：昭和 62 年度大分県工業試験場研究報告「ロストワックス法による精密鑄造品の精度に関する研究」
- 2) 吉浦洋之、高橋芳郎：平成 8 年度大分県産業科学技術センター研究報告「樹脂模型を用いたセラミックス鑄型への検討 (第 1 報)」
- 3) 社団法人日本鑄造技術協会 編：第 4 版鑄型造形法