

樹脂模型を用いたセラミックス鋳型への検討 (第3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 3)

- 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

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、迅速鋳型成型法と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針金補強鋳型成型法を考案したが、いずれの手法も生産性、コストの両面から工業化に向けては一層の改善を要するものであった。そこで、今年度はこの手法の改善策を検討し、低負荷型のセラミックス鋳型成型技術の開発に取り組んだ。セラミックス鋳型成型の低負荷化に於いては、如何に鋳型を補強し、セラミックス層を薄手化するかがポイントとなるため、各種補強材を用いた鋳型成型実験を行い、補強材と補強法の最適化を行った。その結果、鋳型そのものの強度を上げ、樹脂の膨張により発生した初期亀裂の進展を抑えるためには、適正なメッシュの金網が作業性、均一性の面からも極めて有効な手法である事を見出した。この金網補強鋳型成型法により、従来の厚手強化型の鋳型成型法と比較し、ロストワックス法と同等のコーティングで鋳型の破壊を防止できるようになり、樹脂模型を適用する場合のコスト、工期の削減につなげる事ができた。

1. はじめに

我が国の鋳造業界では、近年低コスト・短納期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、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できる光造形システムを用いた新たな精密鋳造技術の導入は、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し、将来への生き残り策の一つになり得るものと確信する。

平成10年度の研究では、昨年度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. 迅速鋳型成型法の改善検討

迅速鋳型成型法としては昨年度に各種方案を検討・実験した結果、サンド材+泥漿セラミックス充填型成型法で技術確立の目処を得ている。

迅速鋳型成型法は鋳型としては十分な強度があり、

樹脂燃焼後の鋳肌品質の確保からも実用化レベルではあるが、

- ①多量の造形材料(セラミックス)を使用する、
- ②乾燥に長時間を要す

の問題があり、この解決方法として以下の3方案を検討し改善実験を行った。

2.1 改善方案の考え方

迅速鋳型成型法の各問題点に対する改善策としてTable 1の方法を考案し、鋳型製作実験を実施した。

2.2 鋳型成型実験結果と考察

実験結果をFig. 1, 2, 3に示す。方案2 (Fig. 2は内部の空洞部確認のため切断した状態)は内部での微小クラックの発生は見られるが、鋳型本体の割れはなくはほぼ健全な鋳型が得られた。一方、方案1, 3は乾燥時間短縮のメリットはあるものの、泥漿セラミックスのスポンジやマットへの十分な浸透が難しいため、鋳型の強度も低くなり、迅速鋳型成型方案としては不相当である。

この結果から、模型形状に沿ってガラス繊維マットで囲む迅速鋳型成型方案は、造形セラミックスの使用量も少なく鋳型焼成時の強度も充分であり、迅速鋳型成型法

の改善策としては効果的と考える。今回は簡易な手法による実験であったが、マット被覆方法や型枠の形状、大きさ等は引き続き検討していく。この迅速鑄型成形法は木枠等に樹脂模型をセットし、造形材（泥漿セラミックスとサンド材の混合材）を充填する極めてシンプルな方法ではあるが、

- ①改善策にても依然として乾燥時間が長い、
- ②大きな比重差により樹脂模型の固定が難しい（浮力により上昇する）、
- ③スラリーが分離し、鑄型の均一性が確保出来ない、の問題が残っており、今後より高精度な鑄型を効率的に造形していく上では、これらの問題の解決も必要である。

Table 1 迅速鑄型成形法改善案

改善方法	具体的案	狙い
方案1	周囲をスポンジで被覆	スポンジに泥漿セラミックスを十分に浸み込ませる。但しスポンジを燃焼消失後無数の空隙ができるので強度面の確認も必要。
方案2	強化繊維で被覆補強	セラミックス層をガラス繊維強化マットで被覆しそれに泥漿セラミックスを浸み込ませる、セラミックス強化タイプ。
方案3	周囲を石膏で枠固め	セラミックス層をガラス繊維強化マットで被覆し、周囲を石膏で覆い更にその外を石膏で固め水分を吸収し、乾燥を早める。

(注) マット：チョップストランドマット#450（日本板ガラス製）



Fig.1 方案1 Fig.2 方案2 Fig.3 方案3

3. セラミックス鑄型造形法の改善検討

3.1 セラミックス鑄型造形法

光造形システムにより作成した樹脂模型を用いるセラミックス鑄型造形法を以下に示す。

3.1.1 コーティング方法

スラリー及びスタッコ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、スタッコ材、乾燥の3つの組み合わせからなり、Table 2 にコーティング方法の詳細を示す。鑄肌を良くするために第1層はスラリーのみとする。またセラミックスの強度を上げるために、十分な乾燥温度と時間（25℃×3hr）を設定し、

更に鑄型の補強用として中間層（8層）に於いて針金（0.5mmφ）を締結する。

Table 2 セラミックスコーティング方法

第1層	スラリーのみ
第2～3層	スラリー+ジェルコンクリート（0.2～0.8mm）
第4～5層	スラリー+アルミナサント（0.7～1.2mm）
第6～11層	スラリー+ムライトサント（1.0～1.5mm）
第13層	スラリーのみ

・8層後に針金（0.5mmφ）の締結

3.1.2 焼成パターン

鑄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行うために、600℃までは150℃/hr程度で徐々に加熱する。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、セラミックス層と樹脂間に温度勾配を設け、両者の熱膨張率の大きな差（セラミックス： 9.0×10^{-6} 、樹脂： 130×10^{-6} ）による影響を小さくする。更に着火後は、30L/minで燃焼アップと残滓の排出を図る。その後樹脂燃焼後は一気に1000℃までに加熱し約1時間保持し焼成する。

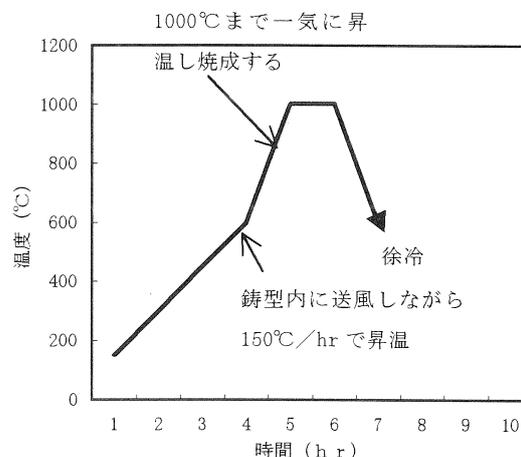


Fig.4 鑄型焼成昇温パターン

3.2 セラミックス鑄型造形法の改善策の検討

セラミックス鑄型を造形する場合は、脱模型時の樹脂燃焼に於ける樹脂の膨張によるセラミックス層の割れ対策として、針金による強固な補強の他に十分な厚みの層が必要である。Fig.6に示す二次元FEMの解析結果からも、セラミックス層の樹脂との境界面、特に応力集中するコーナー部に発生する最大応力は、当然樹脂層の厚みが増すに従い減少し、セラミックス層の厚みが10mmを超えると急激に低下する事が分かる。実際のコーティング厚みは、Fig.5にも示す様にコーティング数により増加するため、10mm超の厚みを得るには8層以上のコーティング数が必要となる。またセラミックス厚みは、鑄型焼成後の熔融金属を注入する場合の強度の面

からも十分な厚みが必要であり、ロストワックス铸造では補強なしで7~8層が標準となっている。以上の解析結果やロストワックス法を前提とすると、条件的にワックスより厳しい樹脂模型を適用する場合は、8層超の相当な厚みが必要となり、昨年度の研究結果においては、針金補強を施工しても樹脂の膨張による応力での割れを回避するには、13層のコーティングが必要であった。

セラミックス層の多層化は、材料費、生産効率の面から工業化にとっては極めて不利である。つまり、如何に効果的な鑄型補強を行い、少ないコーティング層数で樹脂膨張による過大応力と金属溶湯に耐え得る鑄型を造形するかが工業化に向けた重要な課題となる。そこで、今年度は、現行のロストワックス法に準じ、工業的に成立し得る低負荷型鑄型補強方案の最適条件を見いだすためにセラミックス鑄型の一層の改善策を検討した。

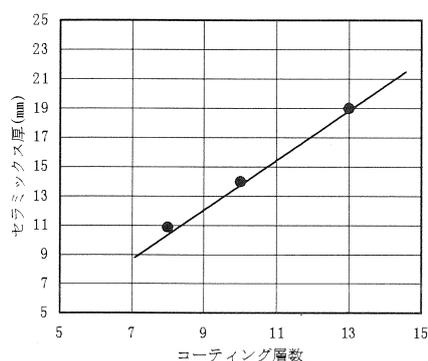


Fig. 5 セラミックスコーティング層数と厚みの関係

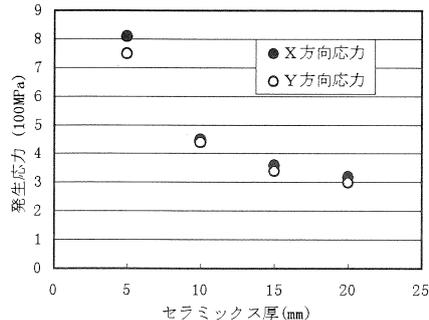


Fig. 6 セラミックス厚みと発生応力の関係

3.3 ガラス繊維強化マットによる補強

セラミックス鑄型の補強用として、針金の代わりにマット（ガラス繊維織り込み）とセラミックブランケットを使用し、セラミックスコーティング回数の削減を目標に鑄型成形実験を行った。補強材の強度面や補強の均一性等の補強性能を考慮し、コーティング回数は6~7回程度とした。コーティング条件はTable 3に示す。

鑄型焼成結果としては、Fig. 7~10に示す様にいずれの水準の鑄型も割れが発生した。これはコーティング層が少なかった事も一因ではあるが、セラミックブランケットやマット材への泥漿セラミックスの浸透が悪く強

度的に低かった事と、被覆する際に模型の段差部で空隙が生じ、泥漿の入り込みも悪い事 (Fig. 11) が主要因として考えられる。

しかし、水準4の鑄型では、補強用マットの被覆を二重にすれば割れの程度も軽くなり、前述のコーティング時のマットへの泥漿セラミックスの充填方法等を工夫すれば割れの回避も可能と思われる。またマットによる被覆は鑄型本体を均一に補強する事になり、この均一性が一層補強効果を上げる事を示唆している。

Table 3 セラミックスコーティング鑄型成型条件と焼成結果

水準	1~3層	4層	5層	6層	7層	割れ程度
No 1	○	マット○	○	○	—	×
No 2	○	マット○	マット○	○	—	×~ △
No 3	○	セラミックブランケット○	○	○	—	×
No 4	○	マット○	マット○	○	○	△

(注1) ○:コーティング (スラリー+スタッコ材)

(注2) スタッコ材: 2,3層=ジ・コンサント, 4,5層=ア・ルサント, 6層~=ムライトサント

(注3) マット: チョップ・ストラント・マット #450 (日本板ガラス製)

(注4) セラミックブランケット: ジュラフ・ランケット #130

(東京モノファックス製)

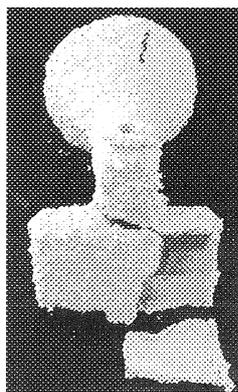


Fig. 7 水準1

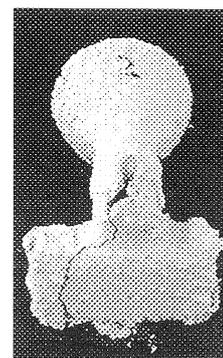


Fig. 8 水準2

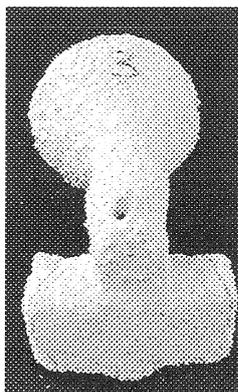


Fig. 9 水準3

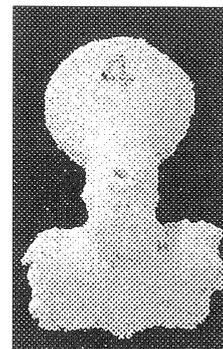


Fig. 10 水準4

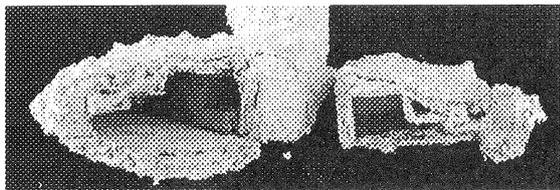


Fig. 11 水準2の割れ断面（マットへの泥漿ミックスの浸透が少なく、空隙がある）

3.4 金網による鑄型補強

セラミックス鑄型を補強する場合、これまでの針金による補強では、複雑な模型形状に追従した結束が難しい事と、平面方向で均一なメッシュ分布が得られない等の欠点があり、結果として必要以上のセラミックス層の厚み（13層）となった。しかし、ガラス繊維強化マット被覆での補強の実験を行い、方向性をなくし形状に沿った均一な補強を行えば、セラミックス厚も低減可能である事が判明した。

そこで、中間層での補強後もセラミックスの充填性が良くセラミックスが積層し易い補強材として、鉄線平織の金網の適用を検討した。

3.4.1 金網補強方法

金網は、亜鉛めっき鉄線製平織金網（JIS G3555）を使用した。補強は模型形状に合わせて一重の金網で模型本体を包み込み、その後針金で巻き締めた。Table 4 にセラミックスコーティング条件と、Fig. 12 に金網による補強外観を示す。

3.4.2 実験方法

金網にて補強する場合は、

- ・補強作業の容易性、
- ・加工性（加工し易く、形状に沿った補強ができる）、
- ・セラミックスの充填性（空隙を作らずにスラリー及びスタック材をコーティング）、
- ・8層でのコーティング数

が評価のポイントとなる。

そこで、以上の評価のために使用する金網の線径とメッシュを規格内で変更し補強効果の確認を行った。

3.4.3 実験結果

以上の実験計画に基づき金網補強によるセラミックス鑄型焼成実験を実施した。

Table 6 に各種金網での補強水準と鑄型焼成結果を示す。3.4.2 でも述べた様にここでは、評価のポイントが焼成結果として現れた。つまり、メッシュが小さい金網は、線径も細いため柔らかく加工し易いが、反面目詰まりを起こし金網とその下層との間に空隙が出来てしまう。その結果ガラス繊維強化マットによる補強の場合と同様な状況となり、従って補強効果が十分に現れなかった。更に加工性を確保する線径の金網でもメッシュが大きい

Table 4 金網補強コーティング条件

項目	金網補強8層コーティング	
スラリー粘性 (ザンカップ 4号)	1~2層	45秒
	3層以降	20秒
乾燥温度	1~2層	23℃
	3層以降	25℃
乾燥時間	3時間（各層毎）	
スタック材	1層	スラリーのみ (ジルコニア+コイタリカ)
	2層	ジルコニアサンド (0.2~0.8mm)
	3層	ジルコニアサンド (0.2~0.8mm)
	4層	アルミナサンド (0.7~1.2mm)
	5層	アルミナサンド (0.7~1.2mm)
		金網補強
	6層	ムライトサンド (1.0~1.5mm)
	7層	ムライトサンド (1.0~1.5mm)
8層	スラリーのみ	

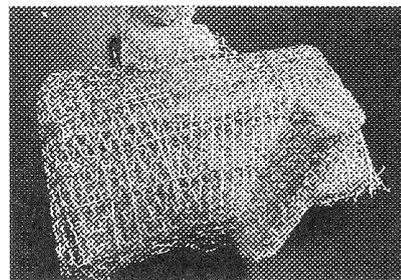


Fig. 12 金網による補強外観

場合には必ずしも所定の強度が出ていない。更に針金の線径を上げると、強度は増すが加工上模型形状に沿った適切な加工が難しく、そのため補強用の網と型との間隔が大きくなる部分が多くなる。これを金網も含め完全にセラミックスで被覆するには、逆に9層以上のコーティング層が必要であり、初期のコーティング数が得られない結果となった。

金網による補強法は、Fig. 13 に示す様に補強効果を十分に得るためにはメッシュに適切な範囲が存在するが、樹脂模型の形状に合わせて金網を選択し適用する事で、針金補強とは違い、簡易に且つ適切な補強ができる技術である。加えてコーティング数も8層とこれまでのロストワックス法と同等の回数となり、光硬化性樹脂模型を用いたセラミックス鑄型も十分に工業的な面での適用の可能性があると評価できる。

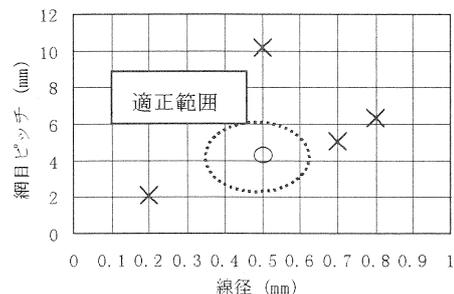


Fig. 13 金網メッシュによる補強効果

Table 6 鋳型補強水準と焼成実験結果

水準	メッシュ (線径×網目ピッチ)	結果	内 容
1	0.2mm×2.0mm	×	ピッチが小さいためコーティング材の充填が困難. セラミックス鋳型の強度が確保出来ない.
2	0.5 ×4.0	○	割れ発生なく鋳型作成が可能
3	0.5 ×10.0	×	ピッチ大のため補強強度が低い
4	0.7 ×5.08	×	針金の強度が高く, 模型形状に適切な補強が困難. また8層では完全なコーティングが出来ない.
5	0.8 ×6.35	×	同上

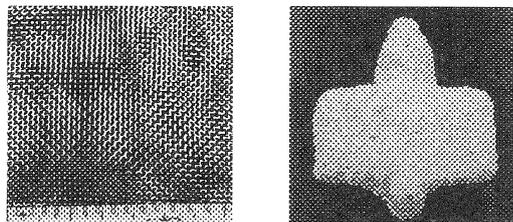


Fig. 14 水準1の金網と鋳型焼成結果 (裏面横方向に割れ発生)

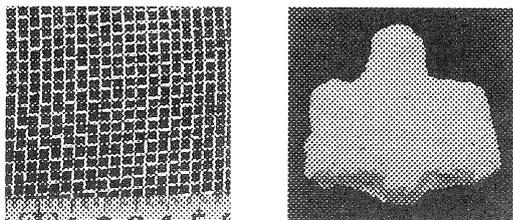


Fig. 15 水準2の金網と鋳型焼成結果 (割れ発生なし)

4. セラミックス鋳型の歪み測定

前回セラミックコーティング法による鋳型作成に於いて, 針金締結での補強効果の定量化を目的に, 歪ゲージを用いてセラミック層内部に発生する歪みを測定した. 今回も金網補強の効果定量化のために歪み測定を実施した. 以下にその結果について示す.

4.1 実験方法

今回の歪み測定実験に於いては, 前回の測定値と比較するために, 補強なしの鋳型は13層とし, 一方金網補強鋳型は前述のセラミックス鋳型補強方案で技術的に目処を得た, 5層後に金網補強したトータル8層の鋳型とした. Fig. 16 に歪みゲージの貼付要領を示す. また金

網による補強については, 0.5mm×5.0mm メッシュ材を用いた. 尚, セラミックスのコーティング方法については, 粘性, スタック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°C/hr で実施した. 昇温時には, 鋳型内に約 10L/min で送風した.

(測定条件)・測定器: 株式会社電業製 デジタルメモリーレコーダー EDX-1500A

・使用歪みゲージ: 株式会社電業製
型式 SKW-10190
使用温度範囲 ~550°C

・サンプリング: 1s ピッチ

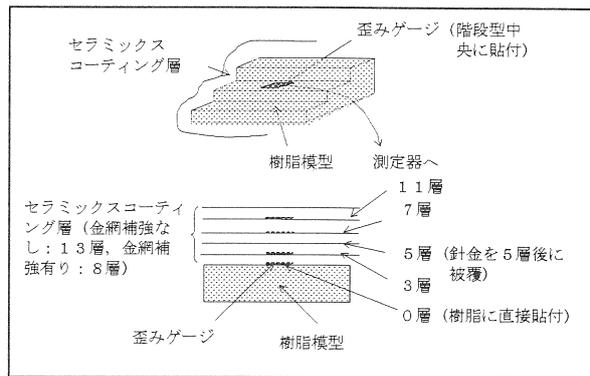


Fig. 16 セラミックコーティングと歪みゲージの貼付位置

4.2 実験結果と考察

今回の歪み測定結果を Fig. 17, 18, 19 に示す.

鋳型内部の歪みの温度による変化は補強有無で殆ど差は見られなかった. これは前回と同様の結果であるが, 前回は針金補強の有無での効果確認のため両者共に13層のコーティングを行った鋳型であり, 針金の補強はむしろ内部亀裂の伝達を抑制に効果があり, 内部歪みの増加はセラミックス層の厚みに律速するために歪み量として同一レベルとなったものと考えられる. 更に Fig. 20 の13層コーティングの針金補強鋳型と今回の8層金網補強鋳型での3層部分での歪み量の比較では, 樹脂燃焼に至る約 400°C近傍までは殆ど差がない事が分かる. つまり今回の測定結果から, 金網補強鋳型は8層のセラミックス厚みしかないが13層針金補強鋳型と同じレベル内部歪みの発生量である事を踏まえると, 金網補強は樹脂模型による鋳型補強法として, 強度面とセラミックスコーティング層の薄物化を実現するのに十分な効果がある事を示している.

5. まとめ

昨年度までに得られた樹脂模型を用いたセラミックス鋳型への適用技術を, 工業的な面から低負荷型の鋳型補強方法として検討を行い, 以下の成果が得られた.

(1) セラミックスコーティング法に適用する場合には、十分な厚みと補強が必要で、その補強方案として、金網による補強は作業性、均一性、強度の点から極めて有効である。

(2) 金網による補強でセラミックスコーティングは8層化が可能で、コスト、工期面の大幅な削減となる。

(3) 焼成過程での歪み測定結果から金網で補強した8層セラミックス鑄型は針金補強の13層セラミックス鑄型とほぼ同等の強度を持つ事が確認された。

本研究の成果は、セラミックス鑄型造型において、形状面からセラミックスコーティング層に対してコーナー部での応力集中等の厳しい条件となる階段型樹脂模型を用いて得られたものであり、今後の他の複雑形状部品への適用展開の目処を得たことを示すものである。

ところで、光造形システムを用いたセラミックス鑄型造型法は、ロストワックス精密鑄造法と比較して、大幅な製造工期短縮とコストダウンが見込め、更に光造形システムの特徴である機械加工では困難な複雑形状のマスターモデルも作製可能であり、新商品開発での新たな展開が期待できるものである。

そこで、今後の方向として、現状中小の鑄造、金型企業に於ける現実の製造ラインを精査し、その中で生産現場の課題を明確にし、光造形システムと3次元CG、CAD/CAMとの最適連携によるコンクリートな理想的柔軟生産体制をベースに、製造現場に即した形での低コスト化、効率化を実現する新たな生産システムの構築に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 森智明, 吉浦洋之, 高橋芳郎: 平成9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2報)」
- 2) 中小企業創造基盤技術研究事業平成9年度研究報告
- 3) 社団法人日本鑄造技術協会編: 第4版鑄型造形法
- 4) 日本鑄物協会精密鑄造研究部会編: 精密鑄造法

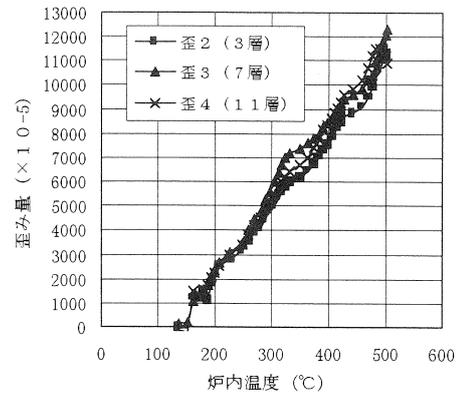


Fig. 17 補強なし鑄型内歪み量変化

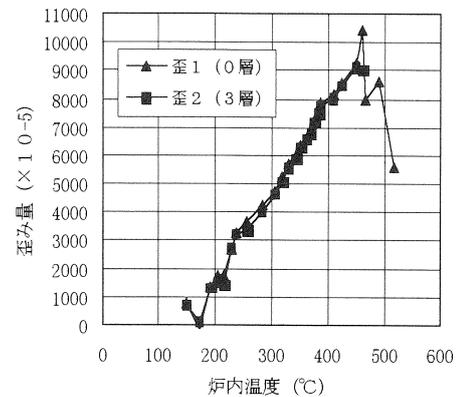


Fig. 18 金網補強鑄型内歪み量変化

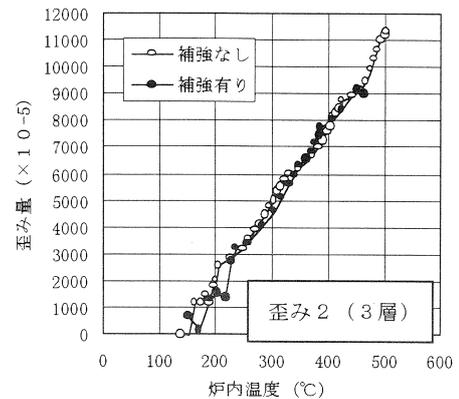


Fig. 19 補強有無での歪み量の比較

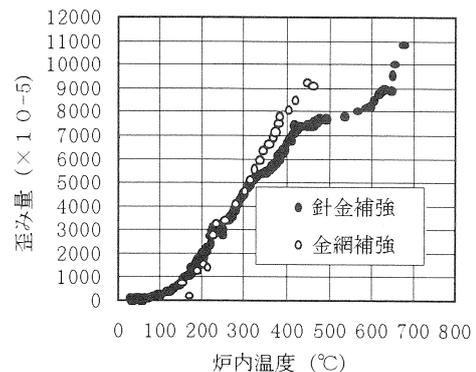


Fig. 20 補強方法と歪み量の関係