

鋳造分野におけるデジタルものづくり（第3報）

久富茂樹*、水谷予志生**、藤井勝敏*

Digital manufacturing in the casting field (III)

KUDOMI Shigeki*, MIZUTANI Yoshiki** and FUJII Katsutoshi*

鋳造の効率化、高品質化を目的として、「鋳造分野におけるデジタルものづくり研究会」を設立し、砂型 3D プリンタや木型代替の樹脂模型といった新技術に取り組んでいる。砂型 3D プリンタを使用した砂型造形、注湯試験では、水平に近い角度の斜面だけでなく、垂直に近い角度の斜面の場合にも積層による筋状の積層痕が確認された。また、実際の鋳造の結果と、シミュレーションによる引け巣解析結果を比較すると、全体の傾向としては一致していたが、実験と解析で差が生じる部分もあった。樹脂 3D プリンタで造形した樹脂模型は、自動砂型造形機での試験でも良好な結果であり、小ロットであれば実用に耐え得るものであった。また、樹脂模型の表面平滑化方法の検討を行い、各方法の特徴に関する知見を得た。

1. はじめに

鋳造分野において、デジタル技術を導入し、鋳造の効率化、高品質化を目的として、「鋳造分野におけるデジタルものづくり研究会」（以降、“本研究会”と記す）を設立し、(1) 砂型 3D プリンタの利活用、(2) 樹脂 3D プリンタの利活用、(3) CAE の利活用などの新技術に取り組んでいる。

砂型 3D プリンタは、木型を使用する必要がなく、ダイレクトに砂型を作製できるため、鋳造の試作期間短縮、設計自由度の向上が期待されている¹⁾。従来型の鋳造工程では、近年木型を作製する企業の減少、職人の高齢化が進んでおり、木型代替として、樹脂 3D プリンタで作製した樹脂模型が活用され始めている²⁾。また、鋳造シミュレーションやトポロジー最適化といった CAE の活用も進んできている³⁾。鋳造シミュレーションは、鋳造欠陥の危険性などを知ることができ、試作回数の低減に有効である。また、トポロジー最適化は、必要強度を保ちつつ軽量化を図る製品設計に有効である。

これまでに、砂型 3D プリンタでは、造形データの配置方向によって積層痕の現れ方や幾何公差が異なること、造形物の取り出しや砂の除去を考慮した製品設計が必要であることがわかった。また、樹脂 3D プリンタで造形した鋳造用模型の評価を実施し、使用する 3D プリンタの造形方式、造形条件によって寸法精度や積層時に生じる積層痕の状態が異なるという知見を得た⁴⁾。

本年度は、砂型 3D プリンタを使用した砂型造形、注湯試験と、樹脂 3D プリンタで造形した樹脂模型の自動砂型造形機への適用、樹脂模型の表面平滑化方法について検討したので報告する。

2. 砂型 3D プリンタを使用した鋳造試験

2. 1 造形形状

砂型 3D プリンタも他の 3D プリンタと同様に、高さ方向に積層して造形するため、積層ごとに断面データを作成する。そのため、高さ方向には連続的ではなく、離散的な形状形成となり、造形した砂型には筋状の積層痕が生じる。この積層痕の影響を評価するため、図 1 に示すように、製品部分は角度の異なる傾斜面を組み合わせ

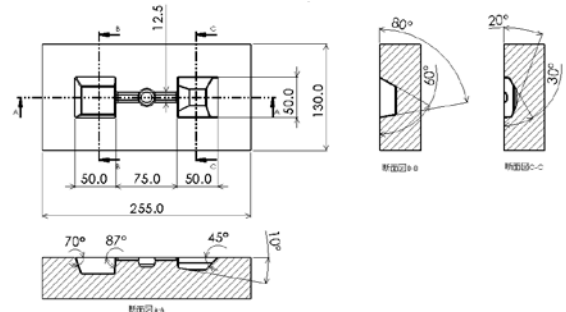
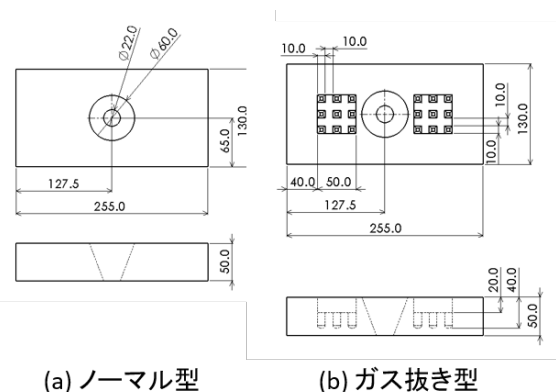


図 1 下型形状



(a) ノーマル型

(b) ガス抜き型

図 2 上型形状

* 情報技術部

** 金属部

た形状の型を試験することにした。

また、今回使用したバインダジェット式の砂型 3D プリンタでは、専用のコーテッドサンドと専用バインダのフランを使用しており、ガスの発生が多くなることが懸念される。砂型 3D プリンタでは、砂型外形も比較的自由に設計できるため、図 2(a)に示すノーマル型と、図 2(b)に示すように、ガス欠陥対策として、製品上部にあたる上型の一部を薄くし、ガス抜けが良くなるような形状のガス抜き型の 2 種類を作製した。

2. 2 砂型造形と注湯試験

三重県工業研究所金属研究室の砂型 3D プリンタ（シーメット製、SCM-10）を使用して砂型を造形した。造形方式はバインダジェット式、積層ピッチは 0.28mm、XY 解像度は 0.15mm で、造形材料の砂は、平均粒径が約 120 μ m の専用コーテッドサンドである。造形した砂型を図 3 に示す。

これらの砂型を使用して、注湯試験を実施した。使用した材料は青銅系銅合金（CAC406）、注湯温度は 1,180℃、注湯時間は約 3 秒で注湯を実施した。注湯時、ガス抜き型では、肉抜きをして薄くなった上型の部分から白い煙が発生する様子が確認でき、ノーマル型に比べて、ガス抜き効果が高いようであった。冷却後、鑄造品を取り出し、1mm の鉄球を使用して 5 分間ショットブラスト処理を行った。図 4 に鑄造品の外観を示す。

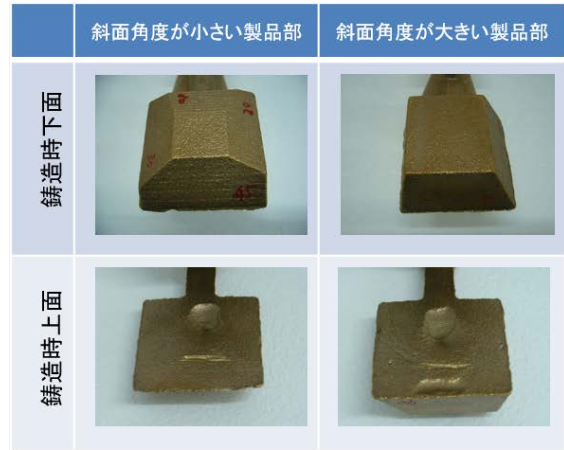
2. 3 積層痕評価

造形した砂型を非接触三次元形状測定機（GOM 製、ATOS Compact Scan）で測定した後、形状評価ソフトウェア（GOM 製、ATOS Professional）を使用して、測定データと設計データをベストフィットにて位置合わせを行い、偏差をグラデーションマップ表示する形状偏差評価を行った。図 5 にノーマル型の製品斜面部の評価結果を示す。斜面部を平面に展開して表示した。図中の角度は斜面部の水平面からの角度を示す。また、昨年度実施した樹脂 3D プリンタで造形した樹脂模型を使用した砂型の評価結果を図 6 に示す。樹脂模型を使用した砂型では、水平面に対する角度が小さい場合に、筋状の積層痕が明瞭になり、垂直に近い角度では積層痕が目立たなくなる結果となったが、砂型 3D プリンタで造形した砂型では、垂直近くになった場合も積層痕が明瞭に確認できる結果となった。この結果は、3D プリンタの XY 解像度の差から生じたのではないかと推測する。使用した樹脂 3D プリンタの XY 解像度としてのデータは公開され



(a) 下型 (b) ノーマル型 (c) ガス抜き型

図 3 造形した砂型



(a) ノーマル型



(b) ガス抜き型

図 4 鑄造品

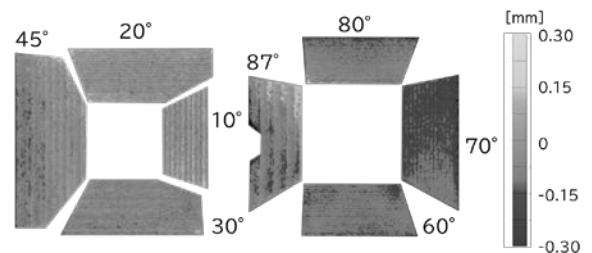


図 5 砂型 3D プリンタで造形した砂型の形状偏差

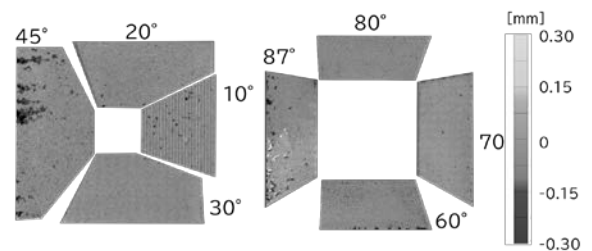


図 6 樹脂 3D プリンタで造形した樹脂模型で作製した砂型の形状偏差

ていないが、これまでの造形品を見る限り、XY 方向には滑らかな表面形成がなされている。一方、砂型 3D プリンタは、XY 解像度が 0.15mm と比較的粗くなるため、XY 方向の位置決めが離散的になり、垂直に近い斜面でも筋状の積層痕が明瞭になったと考えられる。鋳造品についても同様の形状評価をした結果、これらの積層痕は、鋳造品にも転写されていた。また、ガス抜き型の鋳造でも同様の結果となった。

2. 4 ガス抜き型の鋳造結果

鋳造品の外観を観察した限りでは、ノーマル型を用いた場合もガス抜き型を用いた場合もガス欠陥は見当たらなかった。しかしながら、鋳造時の上面部になる、製品部斜面の反対側平面部に引け巣欠陥が発生していることが確認できた。この引け巣の大きさを次の方法で求めた。まず、非接触三次元測定機で製品部の形状を測定し、検査ソフトウェアで体積 (A) を求めた。次に、測定データ上で、引け巣欠陥が発生している領域を削除し、欠陥が発生していない周囲の面に合わせて穴埋めを行った。引け巣欠陥のない状態の測定データを仮想的に作成することができ、この体積 (B) をソフトウェアで求めた。体積 (B) - 体積 (A) を計算することで、引け巣の量として算出した。

図 7 に製品部の形状測定結果と算出した引け巣量を示す。引け巣は、斜面角度の小さい製品部、斜面角度の大きい製品部ともに発生していたが、斜面角度の大きい製品部の方が引け巣量は大きかった。今回の実験では、斜面角度の小さい製品部では、ガス抜き型の方が、引け巣

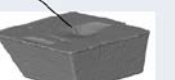
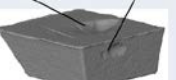
	ノーマル型	ガス抜き型
斜面角度が小さい製品部	450mm ³ 	110mm ³ 
斜面角度が大きい製品部	600mm ³ 	520mm ³ 30mm ³ 

図 7 鋳造品の引け巣量評価

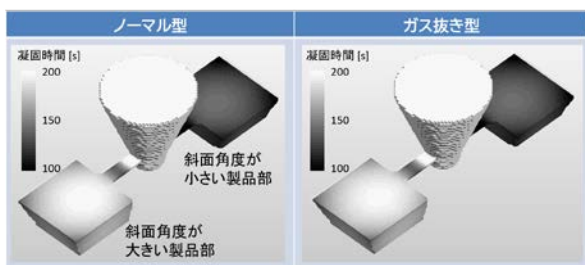


図 8 凝固時間解析結果

量が小さかった。斜面角度の大きい製品部では、引け巣量の総量としてはほとんど差がなかったが、ガス抜き型では、製品の側面部に引け巣が分かれて生じる結果となった。

この結果の考察のため、鋳造シミュレーション (クリオカ製、JSCAST) による凝固解析を行った。図 8 に凝固解析結果を示す。ノーマル型、ガス抜き型ともに、製品中心部の凝固時間が長くなった。湯道の途中の部分で、凝固時間が早い部分があり、製品部の凝固前に溶湯の供給ができなくなっており、引け巣欠陥が生じた実験結果と一致していた。凝固時間は、ノーマル型で 436s、ガス抜き型で 425s であった。温度分布の解析を行い、断面の温度分布を調べると、製品部の上部にあたる上型 (砂型) の温度は、ガス抜き型のほうが低くなっていた。製品部分も若干温度が低くなっており、ガス抜き型では、上型の肉抜きを行っているため、冷却効果が高くなると考えられる。しかしながら、今回の解析では、ガス抜き型の側面に引け巣欠陥が生じる現象の究明には至らなかった。

3. 樹脂 3D プリンタを使用した鋳造用模型

樹脂 3D プリンタで造形した樹脂模型が、実際の生産で使えるだけの強度や耐久性があるかを確認するため、自動砂型造形機に樹脂模型をセットして砂型を造型した。また、樹脂模型を木型代替として使用する場合に、積層による段差が、意匠的な問題や型外しの際の砂こぼれの原因となる懸念がある。昨年度の研究から、型外しの際の砂こぼれの心配は少ないと考えられるが、樹脂模型に形成された積層痕は鋳造品にも転写されるため、意匠面での課題が残った。そこで、樹脂模型の表面処理を行い、積層痕を低減する方法を検討した。

3. 1 樹脂模型を使用した砂型造型

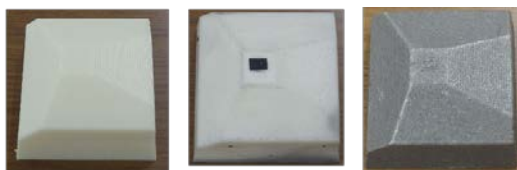
昨年度は、樹脂模型を使用して、有機系炭酸ガス硬化法で手作業によって砂型を作製した。本年度は、樹脂模型が自動砂型造形機での使用に耐え得るか確認する実験を本研究会参加企業で行った。表 1 に造形条件を示す。一例として、No.2 の条件で造形した樹脂模型を図 9(a) に示す。造形した樹脂模型の中央平面部に識別用の番号マーカを貼付し、湯口、湯道などの方案とともに自動砂型造形機 (コーヨー製、SM-60V-S A Type) の型枠に取り付け、砂を充填して、15 枠の砂型を造型した。その後、ねずみ鋳鉄 (FC200) の鋳造ラインで、製作した砂型に注湯を行った。図 9(b) に 15 枠造型後の樹脂模型を、図 9(c) に鋳造品の外観を示す。砂型造型後の樹脂模型の壊れ、摩耗等とはなかった。また、抜型性、鋳肌ともに実用に耐え得るものであった。他の造形条件で作製した樹脂型でも同様の結果となった。小ロットであれば、樹脂 3D プリンタで造形した樹脂模型が、自動砂型造形機での使用に耐え得ることがわかった。引き続き、造型回数を重ねた時の樹脂模型の耐久性について調べたい。

表1 樹脂模型の造形条件

No.	造形方式	3Dプリンタ機種	積層ピッチ	材料
1	材料押出	Fortus360mc-L (Stratasys製)	0.127 mm	ABS
2	材料押出	Fortus360mc-L (Stratasys製)	0.254 mm	ABS
3	材料押出	Mark Two (Markforged製)	0.1 mm	Onyx ^(*)
4	Multi Jet Fusion ^(**)	Jet Fusion 540 (HP製)	0.08 mm	PA12

(*) ナイロンに短繊維カーボンを混練した材料

(**) 粉末の材料を敷き、エージェントをインクジェットで塗布し、ヒーター照射の熱反応により材料を硬化させる造形方式



(a) 造形前樹脂模型 (b) 造形後樹脂模型 (c) 鋳物

図9 樹脂模型を使用した鋳造

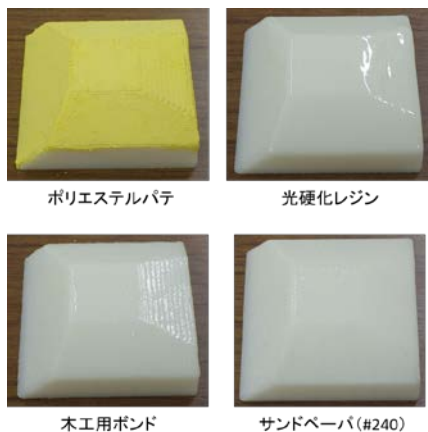


図10 樹脂模型の表面平滑処理

3. 2 樹脂模型の表面平滑化

材料押出方式の3Dプリンタ（Stratasys製、FORTUS 360mc-L）を使用し、ABS材料、積層厚0.254mmで造形した角度の異なる斜面を有する形状を造形した。樹脂模型の表面に形成された積層痕を平滑化するために、次の4つの方法を試した。

- (1) ポリエステルパテ
- (2) 光硬化レジン
- (3) 木工用ボンド
- (4) サンドペーパー (#240)

図10に平滑処理後の外観を示す。使用したポリエステルパテは2液性のもので、5～10分で硬化し始めるため、バリ状になってしまう部分があった。サンドペーパー

(#240)で研磨するとバリ状の部分を取り除くことができ、平滑な面になった。光硬化レジン、紫外線ライトを照射すると数分で概ね硬化する。蛍光灯照明下ではそれほど硬化が進まないため、紫外線ライトを照射するまで扱いやすい粘度を保持しており、作業性は良好であった。塗りムラも比較的少なく、塗布後の形状測定結果でも概ね均一な面が形成されていた。木工用ボンドは徐々に硬化が始まるので、手早く作業する必要があった。また、形状に沿わせて一度に厚く塗布することは困難で、数回に分けて重ね塗りが必要であった。サンドペーパー研磨はエッジに近い部分で研磨量が大きくなってしまいう傾向であった。今回試した方法の中では、光硬化レジンが作業性と形状の正確性の両面で最も扱いやすかった。今後、平滑処理を施した後の樹脂模型の抜型性と耐久性を調べたい。

4. まとめ

砂型3Dプリンタを使用した砂型造形、注湯試験を実施した。今回の実験では、水平に近い角度の斜面だけでなく、垂直に近い角度の斜面の場合にも積層による筋状の積層痕が確認された。また、実際の鋳造の結果と、シミュレーションによる引け巣解析結果を比較すると、全体の傾向としては一致していたが、実験と解析で差が生じる部分もあった。

樹脂3Dプリンタで造形した樹脂模型を用いて、自動砂型成型機で砂型成型、注湯を行った。15枠の成型後の樹脂模型に壊れや摩耗はなく、抜型性、鋳肌ともに実用に耐え得るものであった。また、樹脂模型の表面平滑化方法の検討を行い、各方法の特徴に関する知見を得た。

【謝 辞】

本研究で使用した試料の一部は、公益財団法人JKAの補助事業で導入した三次元造形機（3Dプリンタ）で作製しました。本研究を遂行するにあたり、砂型3Dプリンタの造形指導及びアドバイスをいただいた三重県工業研究所金属研究室の皆様へ深く感謝いたします。砂型成型、鋳造を実施していただき、ご意見をいただいた株式会社KVKの皆様、株式会社マツバラの皆様へ深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 岡根ら、鋳造工学、第90巻、第6号、pp266-273、2018
- 2) 金森ら、三重県工業研究所研究報告、No.40、pp61-66、2016
- 3) 新藤、日本機械学会誌、Vol.123、pp22-26、2020
- 4) 久富ら、岐阜県産業技術総合センター研究報告、No1、pp17-20、2020
- 5) 久富ら、岐阜県産業技術総合センター研究報告、No2、pp27-30、2021