

三次元積層造形技術を利用した鑄造用一体鑄型の作製技術の開発

服部 俊*, 近藤義大**

Development of Technology of Uniform Sand Molds for Casting by Using Additive Manufacturing Technology

Suguru HATTORI and Yoshihiro KONDO

Uniform sand molds made with additive manufacturing (AM) technology can enhance the flexibility of casting design. To make an AM mold, all unsolidified sand inside the mold must be removed. In this paper, we tried to produce uniform sand molds and evaluate them by X-ray CT. As a result, casting products without surface defects were obtained.

Key words: Ink Jetting, Sand Mold, Casting, Additive Manufacturing, X-ray and CT Inspection

1. はじめに

近年、鑄型（鑄造用の砂型）を三次元積層造形（以下、積層造形と呼ぶ）技術により作製する手法が注目されている。積層造形は材料を付加させて造形物を立体化する方法が一般的であり、付加造形（Additive Manufacturing: AM）とも呼ばれる。鑄型の積層造形は、従来の木型や金型などを用いない手法であることから、型の維持管理や造型スキルが不要、製品形状の自由度（抜け勾配の無い設計、高精度、複雑形状など）が増す、製品や鑄造法案の設計変更が容易であるなど、鑄造品の製造工程を高速化する様々な利点がある。そのため、装置や鑄型原料の開発が進んでいる¹⁾。

樹脂、金属粉末、鑄型などの積層造形は、委託造形サービスも充実してきており²⁾、装置を保有せずとも用途に合せた造形物を少量から入手することができる。そのため、鑄造に関わる多くの企業にとって利用しやすい技術であるとともに、量産鑄造だけでなく、機械設備の補修部品や意匠性の高い個人向け工芸品といった超小ロット品の鑄造にも適用可能である。

* プロジェクト研究課

** 金属研究室

積層造形鑄型の作製工程において、完成前に鑄型内部の砂を除去する工程がある。製品の鑄造不良を出さないためには、この工程で砂を完全に除去することが必須である。

積層造形の適用に関しては、鑄造した金属の材質（機械的性質や金属組織など）への影響³⁾などが先行して調査されている。また、著者らのこれまでの研究⁴⁾では、砂の結合剤（バインダ）にフラン樹脂を用いる積層造形鑄型について、その強度や寸法精度などの特性を評価した。同時に、鑄型の非破壊検査と試作鑄造も試みたが、鑄造品表面の欠けやバリの発生が積層造形特有の課題として明らかになった。

本研究では、積層造形技術ならではの設計である「一体鑄型」に着目し、表面の欠けやバリを抑制し、鑄放しでの外観の良い鑄造品を得ることを目的に、積層造形鑄型の作製技術の一つとして砂除去の手法を構築した。具体的には、一体鑄型に特有な砂抜き穴の設計手法および鑄型の X 線 CT による非破壊検査技術に取り組んだ。また、新たにフェノール樹脂をバインダとする鑄型も作成し、フラン樹脂の鑄型と比較した。これらに対し、試作した鑄型および鑄造品に対する評価を実施したので報告する。

表 1 積層造形鑄型および装置の仕様

	フラン鑄型	フェノール鑄型
砂	専用の天然砂	専用の人工砂
樹脂	フラン樹脂	フェノール樹脂
硬化剤（硬化触媒）	有機酸系硬化剤	有機エステル系硬化剤
鑄型の特徴	安価，造形後に焼成せず	高価，造形後に焼成する
使用装置	ExOne 社 S-Max	ExOne 社 S-Print
造形ボックスサイズ（W×L×H）	1800×1000×700 mm	800×500×400 mm
積層ピッチ	0.28 mm	0.28 mm

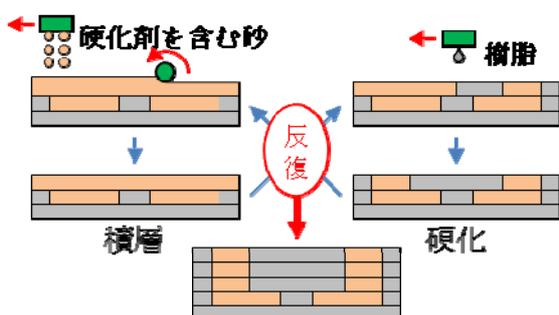


図 1 インクジェット方式の積層造形工程

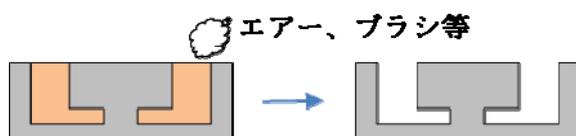


図 2 未硬化砂の除去による鑄型の完成

2. 鑄型の積層造形工程

2.1 積層造形装置による鑄型の出力

本研究では，鑄型の積層造形の方式としてインクジェット方式⁹⁾を採用する．まず，あらかじめ硬化剤（硬化触媒）がコーティングされた砂をローラーで供給し，積層ピッチ厚の薄い層状に敷き詰める．つぎに，プリンタヘッドから鑄型部分にのみバインダの樹脂を噴射し，反応させ硬化する．この 2 つの工程を反復し，砂を高さ方向に積層する．その概要を図 1 に示す．

2.2 未硬化部分の砂の除去工程

前節で得られた鑄型は，未硬化部分に砂（以下，未硬化砂と呼ぶ）が残存している．そこで，鑄型を装置から取り出し，ブラシやエアブローで未硬化砂を除去して完成となる．その概要を図 2 に示す．

未硬化砂が残っていると，鑄造時に溶湯の流れを障害し，製品欠陥の原因となる．しかし，

- ・砂の除去口が限られるため，鑄型の形状が複雑になると，内部にエアブローの届きにくい部分が存在する
- ・砂が硬化剤を含むことや吸湿によりべたつく
- ・強力な除去方法は，鑄型を損耗するおそれがある

などの理由で，砂の完全な除去は容易でない．

3. 実験方法

3.1 実験に供する鑄型および積層造形装置の選定

本研究では，鑄型のバインダ樹脂として，フラン樹脂およびフェノール樹脂の 2 つを選定した．以下，それぞれの樹脂を使った鑄型をフラン鑄型，フェノール鑄型と呼ぶ．また，積層造形装置として，フラン鑄型の造形には ExOne 社製の S-Max，フェノール鑄型の造形には同社製 S-Print を選定し，実際の造形は同社生産サービスセンター（日本）に委託した．

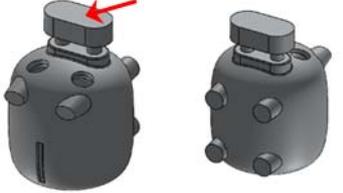
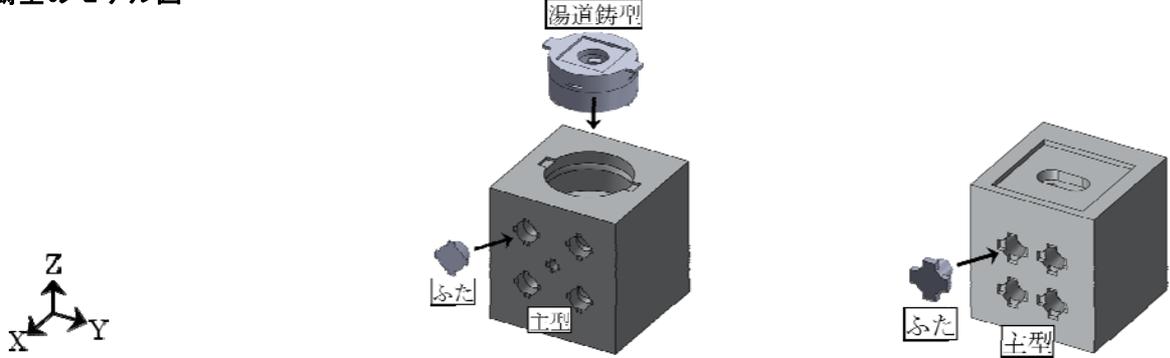
それぞれの鑄型と装置の詳細を表 1 に示す．

3.2 積層造形鑄型の試作

三次元 CAD を用いて，大小 2 種類の鑄造試作品とその鑄造法案を設計し，鑄型の設計データを作成した．それぞれの鑄型のモデル図などを表 2 に示す．いずれも胴体が円環上の断面をもつシェル形状である．

ここで，本研究では，従来手法にない積層造形ならではの鑄型として，図 3 に示すような，湯口などを除いた鑄造品の本体形状を象る全ての鑄型を一体化して造形する鑄型（以下，一体鑄型と呼ぶ）に着目し，そのように設計した．

表2 実験に供する試作品および鑄型のモデル図

	試作品 (大)			試作品 (小)	
モデル図					
モデルサイズ (W×L×H)	200×208×201 mm			85×115×88 mm	
胴体部外径	最大直径 200 mm			最大直径 85 mm	
胴体部肉厚	10 mm			8 mm	
モデル重量 (ねずみ鑄鉄の場合)	約 9.7 kg			約 1.4 kg	
鑄造方案のモデル図 (矢印が湯口)					
鑄造重量 (ねずみ鑄鉄の場合)	約 10.6 kg			約 1.6 kg	
鑄型のモデル図					
鑄型のサイズ (X×Y×Z)	241×240×250 mm			127.5×125×135 mm	
砂抜き穴のフタの個数	耳 2	足 4	臍 1	耳 2	足 4
					
フタ先端の形状 および先端の径	楕円 長径 25 mm	円 直径 33 mm	円 直径 10 mm	楕円 長径 15 mm	円 直径 15 mm

型間の間隙が無いことから、得られる鑄造品は溶湯が差し込み発生するバリが少なく、バリ除去などの後加工のコスト低減が期待できる。

その反面、分割の鑄型に比べ、一体鑄型は内部に奥まった空洞が多くなるため、未硬化砂の除去は難化する。

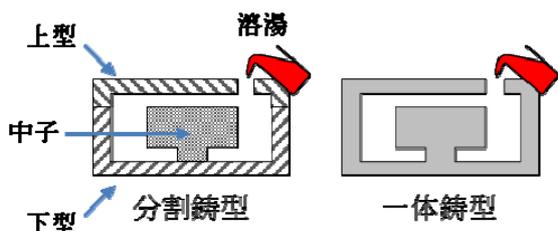


図3 一体鋳型の概要図

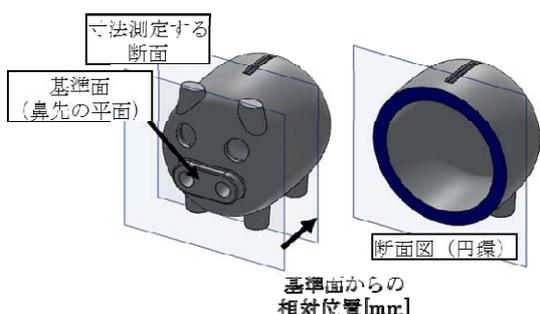


図4 試作品(小)における胴体断面の測定

表3 実験に供する鋳型の組合せと個数

	フラン鋳型	フェノール鋳型
試作品(大)	1個	1個
試作品(小)	- (実施せず)	1個

そこで、鋳型には未硬化砂の除去のための穴を追加で設計し、そこから砂を除去した後、別に造形するフタで埋めるという手法を採用する。これは、これまでの研究⁴⁾でも採用した手法であるが、穴の周囲には鋳造品のバリが発生しうる。これを低減するため、本研究では製品の外観上バリの発生影響の少ない箇所を選定し、鋳造品の突起部分(試作品における耳、足の部分などで、具体的には表2に示した位置と個数)において、突起先端と同じ大きさのフタを設計する方策をとる。これを、表3に示す組合せにて、試作品(大)2個および(小)1個の計3個を造形し、エアブローにより内部の砂を除去し、フラン鋳型とフェノール鋳型を得た。

3.3 鋳型の非破壊検査

島津製作所製 X線 CT 装置 SMX-225CT を用い、前節のすべての鋳型に対し非破壊検査を实

施し、鋳型の三次元スキャンデータを得た。同時に、得られた CT 画像により、鋳型内部に砂が残存していないかを確認した。装置の出力は、それぞれの鋳型にあわせて最適な画像を得られるよう調整した。

3.4 鋳造実験

非破壊検査を終えた鋳型に対し、別に造形した湯口およびフタを挿入し組付けた後、周囲を珪砂で埋め固定し、表3で示した計3個の供試鋳型を完成した。溶解は50kg高周波誘導炉を用い、鋳型1個に対し、FC200相当のねずみ鋳鉄30kgを溶製し鋳造した。すなわち計3チャージを溶製した。ここで、原料には銑鉄や鋼板などを用い、置注ぎ法により接種処理した。

鋳造から約1時間後に型ばらし、およびショットブラスト処理し、鋳造品を得た。これに対し、外観を目視にて評価した。

3.5 形状測定による精比較

試作品(小)に対し、CADの設計データ、前節の鋳型の三次元測定データ、および鋳造品をX線CTにより撮影して得た三次元外形データの3点をソフトウェア(ATOS社製 GOM Inspect V7.5)にて位置合せ(形状フィッティング)機能により重ね合せ、断面が円環状となっている胴体部において、図4に示すとおり、モデル先端の鼻先を基準面(0mm)とする20~80mmの位置の複数断面にて、断面円環の寸法(円環の外径および外径)を比較し精度を検証した。

4. 実験結果と考察

4.1 鋳型の非破壊検査の結果

試作品(大)については、X線CT装置の出力を管電圧200kV、管電流100μAとすることで、一例として、フラン鋳型に対して図5およびフェノール鋳型に対して図6に示す画像をそれぞれ得た。また、試作品(小)については、管電圧200kV、管電流80μAと調整し、一例として、図7に示す画像を得た。

X線CTは測定物中の密度差を反映したものであり、図5~図7中の黒い部分は密度の低い空洞部分、白い部分は密度の高い鋳型もしくは砂を示す。この陰影と設計した鋳型のモデル図と見比べたところ、主要な箇所では砂の鋳型内の残存は認められなかった。

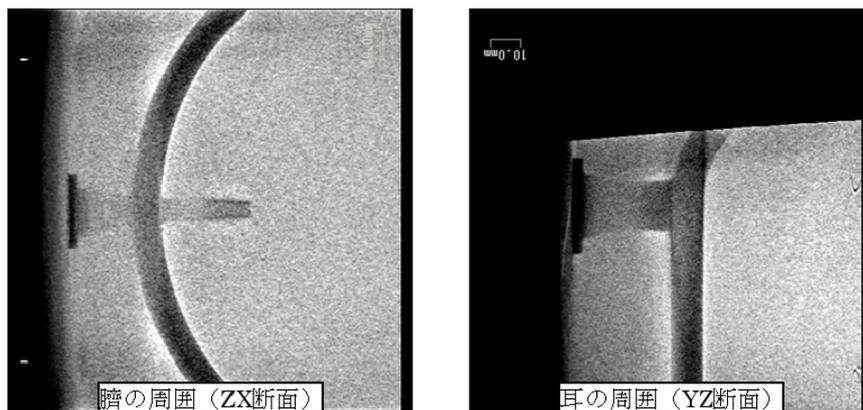


図 5 試作品（大），フラン鑄型の非破壊検査

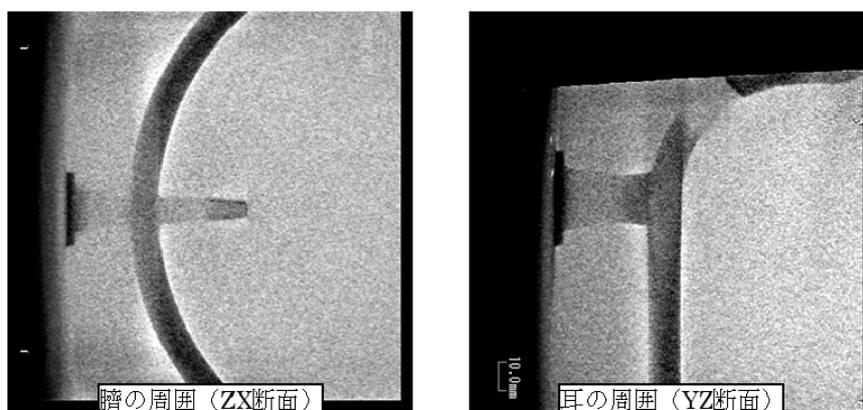


図 6 試作品（大），フェノール鑄型の非破壊検査

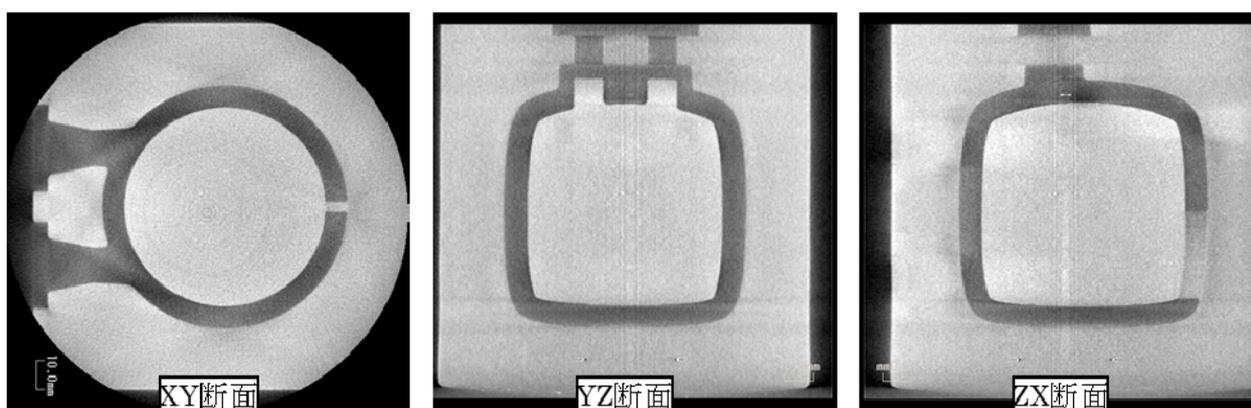


図 7 試作品（小），フェノール鑄型の非破壊検査

4. 2 鑄造実験の結果

試作品（大）について，得られた鑄造品を図 8 および図 9 にそれぞれ示す．一般的なフラン鑄造品に対し発生しやすいとされるベニング欠陥^④は確認されなかったが，図 8 のフラン鑄造

品には，右目から口にかけて，表面にくぼみが確認された．この発生位置は，鑄造姿勢における-Z 側（下側）であり，かつエアブローの届きにくい目の鑄型部分の周囲である．くぼみの形状は滑らかであった．

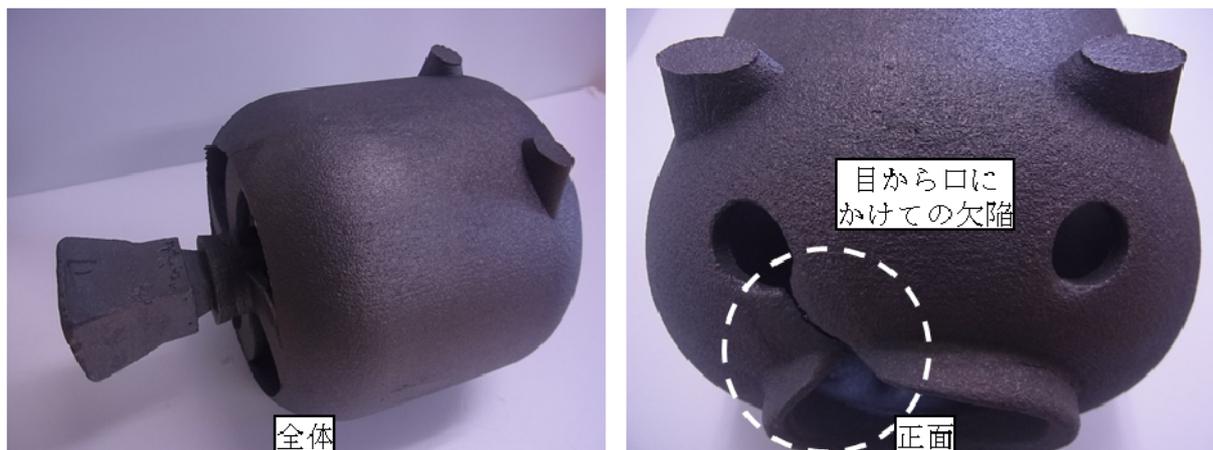


図8 試作品（大）フラン Casting



図9 試作品（大）フェノール Casting

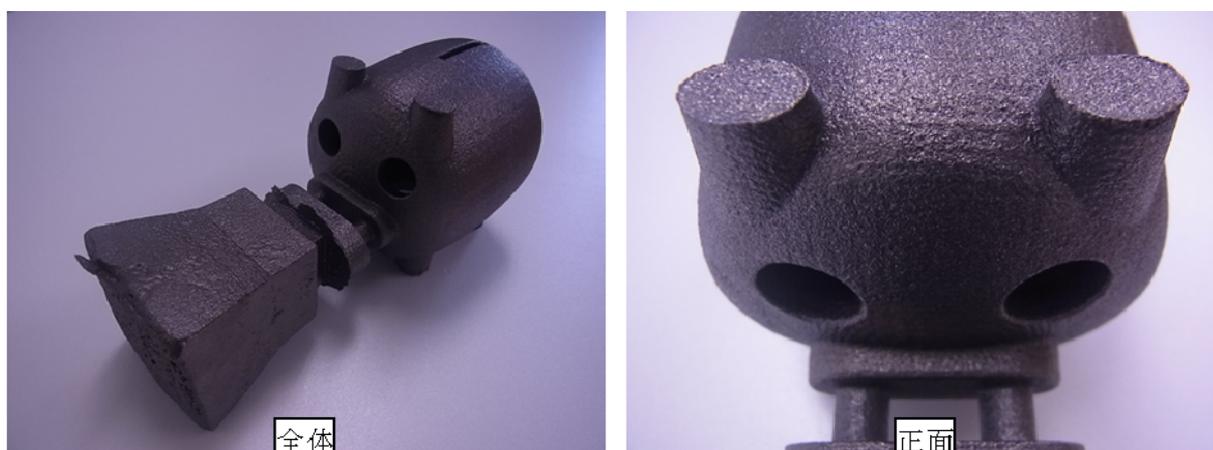


図10 試作品（小）フェノール Casting

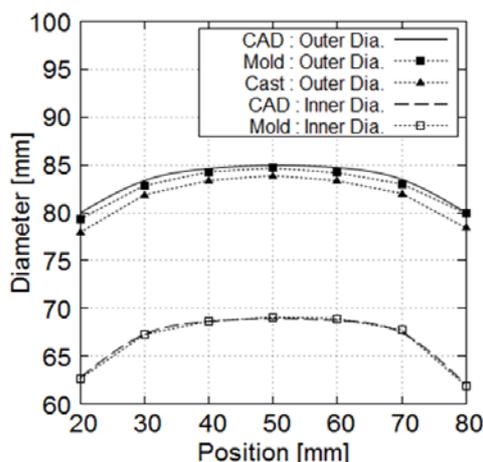


図 11 CAD, 鋳型, 鋳造品の胴体外径および CAD, 鋳型の胴体内径の比較

以上から、前節での観察にかかわらず、実際には鋳型の内部に砂が残っており、溶湯に流され目の周囲に堆積したものと考えられる。

一方、図 9 のフェノール鋳造品にはそのような欠陥は認められず、X線 CT による観察のとおり内部の砂が完全に除去できていたと判断される。いずれの鋳造品についても、突起部分（鋳型の砂抜き穴の位置）において、目立つバリは認められなかった。

つぎに、試作品（小）について、得られた鋳造品を図 10 に示す。表 1 のとおり鋳造品の胴体部肉厚は試作品（大）に比べ小さいが、未硬化砂の残存に起因する表面の欠陥は確認されず、外観上問題ない鋳造品が得られた。

4. 3 形状測定による精度比較の結果

図 11 に CAD データ、鋳型の三次元測定データ、鋳造品の三次元測定データから得た胴体部分断面の外径および内径の値を示す。ここで、X線 CT による鋳造品の撮影出力は 220 kV, 100 μ A と調整した。三次元測定データからは、断面形状からフィッティング機能により円環の形状を抽出し、その外径と内径の値を用いた。

今回の設計においては、CAD に比べて鋳型は外径が小さく、一方で内径はわずかに大きくなり、鋳型の主型部分と中子部分が CAD に比べて多少大きく造形される結果となった。

また、鋳物外径は溶湯の凝固収縮により鋳型外径よりも小さくなった。外径は対 CAD 比で約 97.9%，対鋳型比で約 98.4%であった。

5. 結論

積層造形装置により一体鋳型を造形し、非破壊検査と 2 つの形状の試作品の鋳造を実施した。その結果、鋳型の主要箇所には砂抜き穴を設ける手法で鋳造品の外観を損なわないことが分かった。また、フェノール鋳型への鋳造で、表面に欠陥のない試作品が得られた。

X線 CT による非破壊検査では、鋳型部分と内部空洞を区別できる出力により内部を透視できた。しかし、結果的にはフラン鋳型で微量の砂が残存しており、より精度良く鋳型を検査する手法を構築する必要がある。

CAD, 積層造形鋳型, 鋳造品の重ね合せ形状比較を実施し、鋳型が CAD よりも大きめに造形されることがわかった。この結果は、今後テストピースなどで詳細に検証する必要がある。

謝辞

本研究は、公益財団法人岡三加藤文化振興財団の助成の下で行われました。ここに記して関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 永井康弘ほか：“有機自硬性バインダ有機自硬性バインダによる三次元積層造形プロセス”。鋳造工学 全国講演大会講演概要集, 166, p15 (2015)
- 2) 蒲生秀典：“デジタルファブリケーションの進展ーファブ拠点の地域展開と国際標準化の動向ー”。科学技術動向, 149, p30-37 (2015)
- 3) D. Snelling et al.: “The effects of 3D printed molds on metal castings”, Proceedings of the Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, 24, p827-845 (2013)
- 4) 近藤義大ほか：“砂型三次元積層造形技術の評価”。三重県工業研究所研究報告, 38, p57-64 (2015)
- 5) 横山兼次：“インクジェット方式による三次元砂型造形技術”。素材材, 48(7), p21-24 (2007)
- 6) 太田英明ほか：“鋳型の生産技術”。(財)素材材センター, p333-354 (2002)