

砂型三次元積層造型技術の評価

近藤義大*, 服部 俊*, 中村創一**

Evaluation of Three-Dimensional Molding Technology

Yoshihiro KONDO, Suguru HATTORI and Soichi NAKAMURA

Key words: Additive Manufacturing, Mold Sand, Casting Plan, X-ray CT, Three-Dimensional Technology

1. はじめに

近年、鋳鉄鑄物業界では、木型や金型を必要としない鑄型の造型方法が着目されている¹⁾。この背景には、試作時の方案変更が容易になるだけでなく、鑄型形状の自由度が増すなどの利点がある。たとえば、従来の木型を用いる造型の場合には必要であった抜け勾配が不要となり、主型と中子を一体として造型することも可能である。

そこで本研究では、木型、金型レス造型方法の一種である、砂型積層造型技術に注目した。これは、鑄物砂にバインダーを吐出し硬化させるインクジェット方式と、鑄物砂を焼結させるレーザー方式とに分類される三次元技術である²⁾。本研究では、フラン自硬性鑄型のインクジェット方式積層造型技術に着目し、従来手法では造型不可能であった下型・中子一体鑄型（以下、中子一体型と呼ぶ）および上型・下型・中子一体鑄型（以下、上下一体型と呼ぶ）を積層造型した。

本報告では、砂型積層造型技術の評価を目的に、造型した鑄型の外観評価やX線CTによる内部評価、鑄造した鑄物について外観評価を実施したので、結果を報告する。

2. インクジェット方式による砂型積層造型機による鑄型の造型方法

本研究では、ExOne社のインクジェット方式砂型積層造型機S-Max（以下、積層造型機とする）

* 金属研究室

** ものづくり研究課

を用いて、フラン自硬性鑄型を造型した。

インクジェット方式の砂型積層造型のメカニズムはつぎのとおりである。

まず、粒径0.14mm（カタログ値）程度に調整された積層造型機専用の天然砂（以下、積層造型砂とする）に、有機スルホン酸系の硬化触媒を添加、攪拌したものを造型面に一層分敷き詰める。この層厚は0.28mm（同）程度である。

つぎに、鑄型部分のみ、フラン樹脂を約4mass%吐出し、縮合反応により砂を硬化させる。この繰り返しにより、砂を積層し、鑄型を造型する。

ただし、この段階では、図1a)に示すように、鑄型以外の部分に未硬化砂が残る。そのため、図1b)のとおり、未硬化砂をエアブロー等で除去して、鑄型が完成する。

従来の木型や金型を用いる手法では、中空部分をもつ鑄物製品を鑄造する場合、上型、下型および中子をそれぞれ別に造型する必要があった。砂型積層造型技術では、直接鑄型を造型することが可能となるため、主型と中子を一体とした中子一体型や、上型と下型と中子のすべてを一体とした上下一体型の造型も可能である。

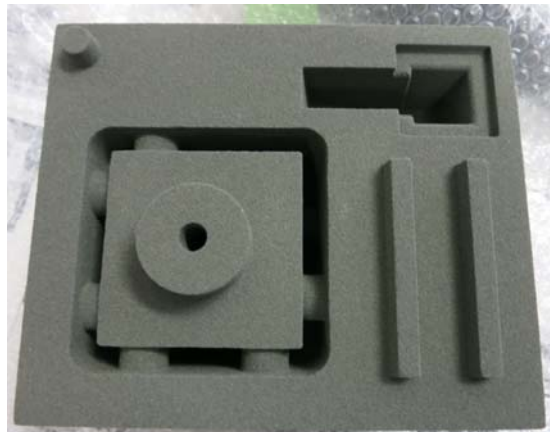
3. 実験方法

砂型積層造型技術において、積層造型砂、造型された鑄型および鑄造した鑄物の評価を目的に実験を行った。

3.1節では、積層造型砂の形状を測定した。3.2



a) 砂除去前の積層造型鑄型



b) 砂除去後の積層造型鑄型

図1 未硬化砂の除去

節では、鑄型の強度および寸法精度を測定した。3.3節では、2章で述べた利点に注目し、従来技術では造型不可能だった中子レス、見切り面レス鑄型を造型し、鑄造実験を行った。

3. 1 積層造型砂の評価

3. 1. 1 積層造型砂の観察

積層造型砂は導電性がないため、金 (Au) 蒸着で導電処理後、走査型電子顕微鏡で観察した。比較のため、市販の輸入高純度けい砂でも同様の試料を作製し、観察した。

3. 1. 2 積層造型砂の粒度分布の測定

試験方法は JIS Z 2601 に準拠した。積層造型砂を 50 g 採取し、ロータップ型ふるい機を用いて 15 分間ふるい分けを行い粒度分布を調べた。比較のため、高純度けい砂 50 g に対しても同様に分布を調べた。

3. 2 積層造型鑄型の評価

3. 2. 1 鑄型強度の測定

試験方法は JIS Z 2601 に準拠した。積層造型機を用いて $\phi 50 \times 50$ mm の円筒状の試料を作製し、軸方向に対し圧縮力を負荷することで、鑄型の圧縮強さを測定した。測定は 2 回実施した。

3. 2. 2 鑄型の寸法精度の評価

積層造型は、鑄型を z 方向に積層するため、鑄型表面で xy 平面に対して傾斜になる部分や曲面などは、積層段差が発生する。このような段差は、必然的に設計データと寸法差が発生する。このことを評価するため、図 2a) に示す鑄型の三次元設計データをもとに、傾斜部分のある鑄型を積層造型機で造型し評価に供した。

非接触三次元測定機で測定して得られた傾斜試料の形状測定データを図 2b) に示す。これと元の三次元設計データを、比較用の検査ソフト (GOM Inspect Ver.7.5) の機能を用いて重ねあわせ、積層段差および設計データとの寸法差を測定した。測定箇所は、傾斜角の異なる傾斜部分 2 か所とした。

3. 3 積層造型鑄型の試作評価および鑄造実験

試作評価にはサイコロ形状のモデルを用い、中子バリレス鑄物をターゲットとした中子一体型を 2 種類、見切り面レス鑄物として上下一体型を 1 種類、計 3 種の鑄型を造型し、鑄造実験を行った。

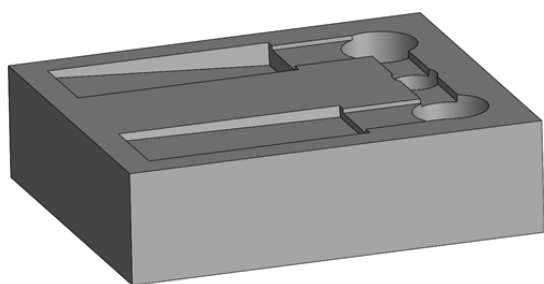
3. 3. 1 鑄型の試作と評価

本項では、評価する 3 種の鑄型の詳細について述べる。

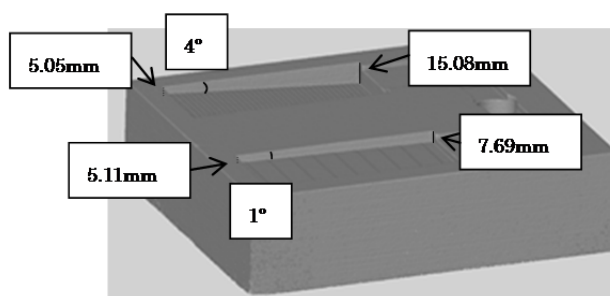
図 3a) に、中子一体型の設計案を示す。なお、造型した鑄型の写真は図 1a), 図 1b) に示したものである。これは、積層造型技術により可能となった主型と中子が一体の鑄型であり、必然的に鑄物の中子バリが発生しない工法である。

積層造型鑄型では、2章で述べたように、未硬化砂を除去する必要があるが、図 3a) の中子一体型では、奥まった部分の未硬化砂の除去が物理的に困難であるうえ、目視できないという課題が明らかになった。そこで、砂除去具合を非破壊で確認するため、X 線 CT (島津製作所 SMX-225CT) で鑄型内部の観察を行った。

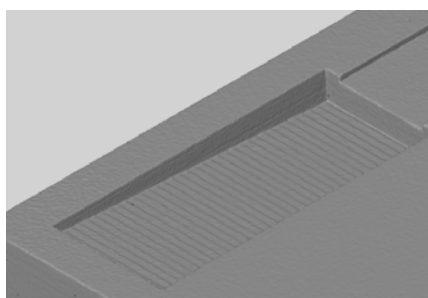
観察結果は、4.3.1 項で後述するが、この中子一体型では未硬化砂の除去効率に問題が残った。そ



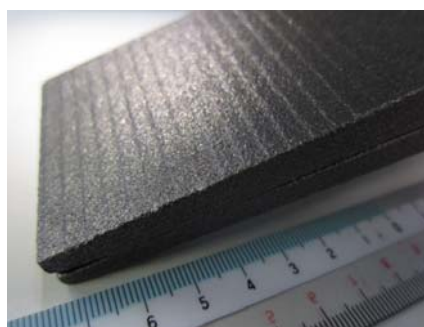
a) 鋳型 (三次元設計データ)



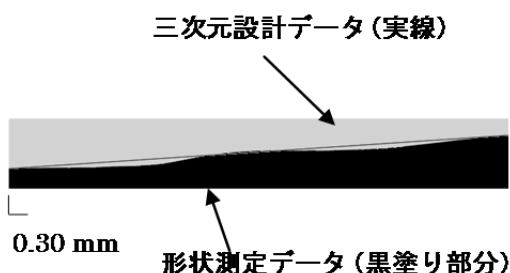
b) 鋳型 (形状測定データ)



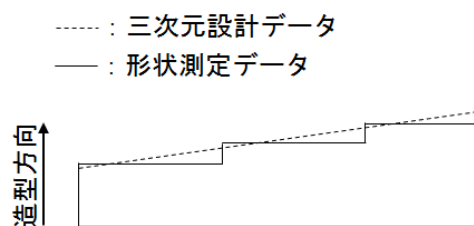
c) 鋳型の表面の拡大



d) 鋳肌に転写された積層段差



e) 図 2a)と図 2b)の重ね合わせ断面拡大図



f) 図 2e)の模式図

図 2 積層造型鋳型傾斜部寸法精度の評価

ここで、未硬化砂の除去効率の改善を目的に、新たに対策型中子一体型を造型した。これは、図 3b)のように、砂除去の困難な箇所、具体的には下型の下面 (6 の面) および側面 (4 の面および 5 の面) にエアブローによる砂抜き用の穴を新たに追加・設計し、ここからも砂を除去したのち、別に穴の形に積層造型しておいた蓋を詰める、という鋳型方案である。

これらの中子一体型とは別のアイデアとして、図 4a), 図 4b)に示す上下一体型も造型した。これも積層造型技術により可能となった鋳型であり、上型、下型および中子を一体としたことによ

り見切り面が不要であり、バリの発生を防ぐことができる。未硬化砂の除去のため、サイコロ各面の目の一部を砂抜き用の穴としておき、そこから砂を除去したのち、あらかじめ穴の形状に積層造型しておいたサイコロの目に相当する蓋を挿入し、鋳型が完成する。

これについても、砂除去具合を X 線 CT で観察した。

3. 3. 2 鋳造実験

前項で述べた 2 種類の中子一体型および 1 種類の上下一体型を用い、鋳造性を比較評価するため実験を行った。

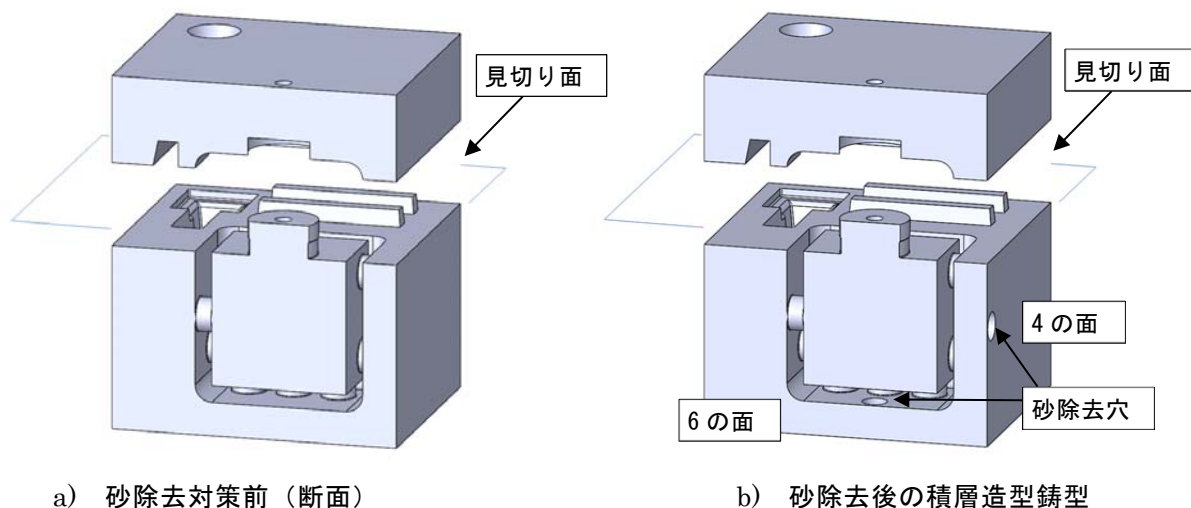


図3 中子一体型

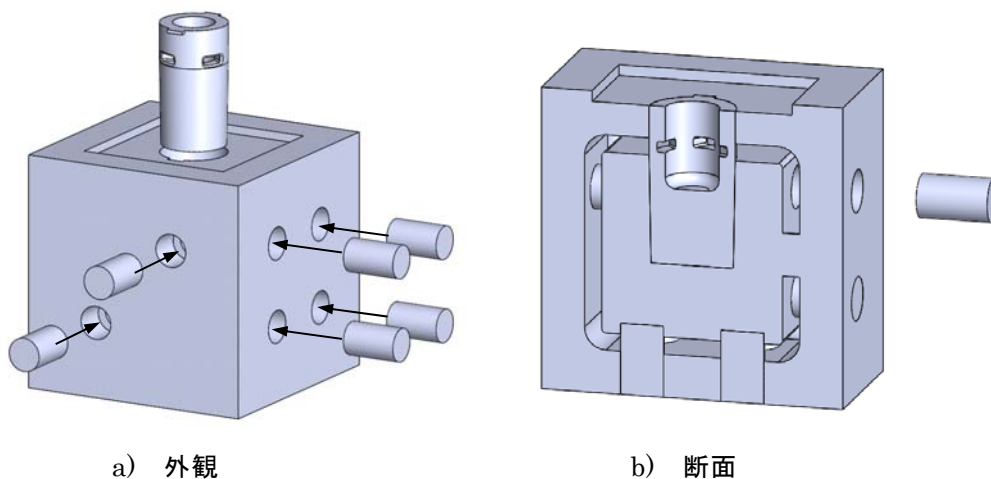


図4 上下一体型

溶湯は、銑鉄、鋼板を原料に用いて、20 kg 高周波誘導炉にてFC200相当の溶湯成分で約 20 kg 溶製した。溶湯は約 1500 °C まで昇温した後、Ca・Ba 系接種剤を溶湯重量比 0.5 %用い、置き注ぎ法にて接種処理した。

この溶湯を、A と B の 2 チャージ用意した。各々の化学成分を表 1 に示す。溶湯 A は処理後ただち

に中子一体型（砂除去対策前）と JIS Z 2241 8C 号引張試験片用丸棒鋳型（シェルモールド鋳型）に鋳込み、溶湯 B も処理後ただちに対策型中子一体型、上下一体型および丸棒鋳型に鋳込んだ。それぞれ約 60 分後に型ばらしを行った。

溶湯 A および B の引張試験および硬さ試験結果も表 1 にあわせて示す。

表 1 鋳造実験試料の化学成分および引張試験片の機械的性質

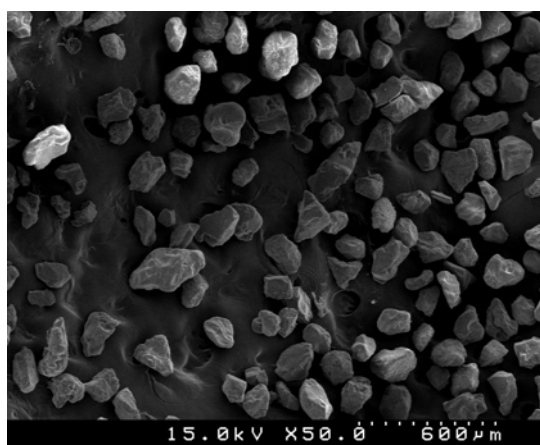
溶湯	化学成分 [mass%]					引張強さ [MPa]	硬さ [HBW]
	C	Si	Mn	P	S		
A	3.47	1.93	0.79	0.11	0.10	265	192
B	3.49	1.88	0.72	0.10	0.11	223	194

4. 実験結果と考察

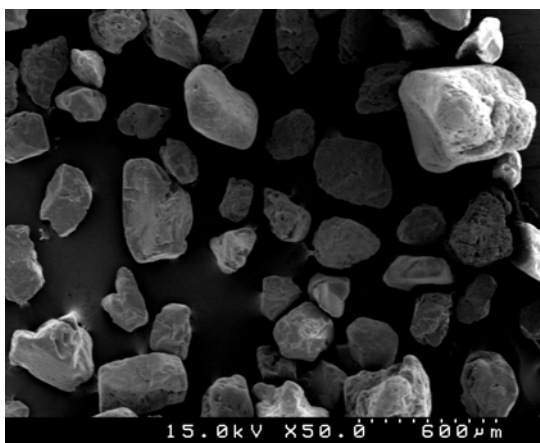
4. 1 積層造型砂の評価

4. 1. 1 積層造型砂の観察

図 5a), 図 5b)に積層造型砂と高純度けい砂の電子顕微鏡写真を示す。観察の結果、通常の高純度けい砂は 400 μm を超える比較的大きな粒も確認されるなど、粒度のばらつきが見られた。一方、積層造型砂では、100~200 μm の大きさの砂粒が大半であった。



a) 積層造型砂



b) 高純度けい砂

図 5 走査型電子顕微鏡による砂の観察
(観察倍率 50 倍)

4. 1. 2 積層造型砂の粒度分布の測定

両者の粒度分布を調べた結果を図 6 に示す。高純度けい砂はふるいの呼び寸法 106~425 μm に粒度のばらつきがあったのに対して、積層造型砂はメイン・ピークである呼び寸法 106 μm に全体の約 62 mass%の砂が集中していることがわかつ

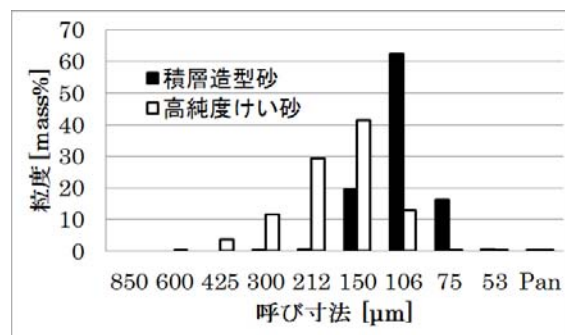


図 6 粒度分布

た。積層造型砂の粒径のばらつきは、高純度けい砂に比べ少ないことがわかった。

4. 2 積層造型鑄型の評価

4. 2. 1 鑄型強度の測定

積層造型機で作製した円筒状試料の圧縮強さを表 2 に示す。実験の結果、圧縮強さは約 820 N/cm^2 を示し、一般的なフラン自硬性鑄型³⁾が約 500 N/cm^2 であることから、これに比べ高いことがわかった。

表 2 圧縮強さ試験

試験回数	圧縮強さ [N/cm^2]
1	860
2	820

一般的に、単一粒径にふるい分けした新砂の場合、粒径が小さく比表面積が大きいほど鑄型の圧縮強さは低下することが知られている⁴⁾。前節で確認したように積層造型砂のほうが粒径は小さいにも関わらず、高い鑄型強度を示した。その要因として、積層造型砂はバインダー添加量が多いことが考えられる。一般的に、フラン樹脂を用いた有機自硬性鑄型は、バインダー添加量が多いほど、高い圧縮強さを示すことが知られている⁵⁾。2章で述べたように、積層造型鑄型はインクジェット方式で約 4 mass%と、通常のフラン鑄型⁶⁾の 2 倍以上のバインダーを添加しており、そのため粒径が小さいにもかかわらず高い圧縮強さを示したものと考えられる。

4. 2. 2 鑄型の寸法精度の評価

鑄型の寸法測定の結果を図 2b)に付記した。この結果をもとに鑄型表面についての積層段差について評価した。傾斜角の小さい造型箇所(約 1°)は、実測値約 7.69 - 5.11 = 2.58 mm に対して 9 個の

段差が確認された。また、傾斜角の大きい造型箇所（約 4° ）は同約 $15.08 - 5.05 = 10.03 \text{ mm}$ に対して 35 個の段差が確認された。これらから、傾斜角によらず段の高さが一層あたり約 0.29 mm となると見積もられる。最終的に、この鋳型に鋳造し、できた鋳物の外観を観察したところ、図 2d) のように、この段差が鋳肌に転写されていることを視認した。

つぎに、鋳型の三次元設計データと形状測定データを比較したところ、積層段差がある箇所では、設計図面に対し、最大で 0.27 mm 鋳型が小さく造型されていた。反対に、設計図面に対し鋳型が大きく造型されていた箇所はほとんど見られなかった。今回評価した 2 箇所うちの傾斜角の大きい箇所における結果を図 2c)～図 2f)に示す。

2 章で述べたように、積層造型機の層厚は 0.28 mm であることから、鋳型についての積層段差や、鋳型と設計データの寸法差はこの層厚に相当し、鋳型の寸法精度は層厚程度に収まることを確認した。

積層ピッチ 0.28 mm に対して、前節で確認したように、積層造型砂の粒径はおおよそ $0.10 \sim 0.15 \text{ mm}$ と、積層ピッチの半分程度である。積層造型機は、鋳型を積層造型する際に、通常の鋳型造型法と異なり砂を押し固めることができない。このため、積層ピッチの半分程度の粒径の砂を用いることで砂詰まりを良くし、寸法精度を確保する必要があると考えられる。

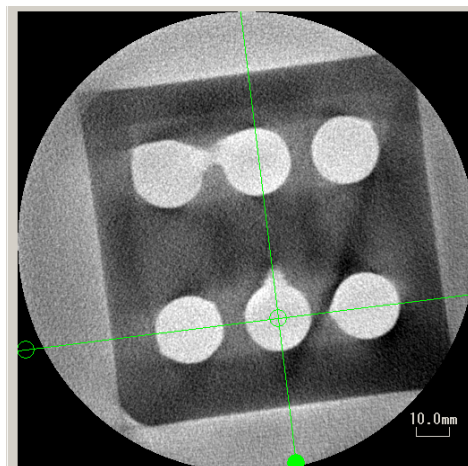
4. 3 積層造型技術を活用した鋳型の試作評価および溶解実験

4. 3. 1 鋳型の試作と評価

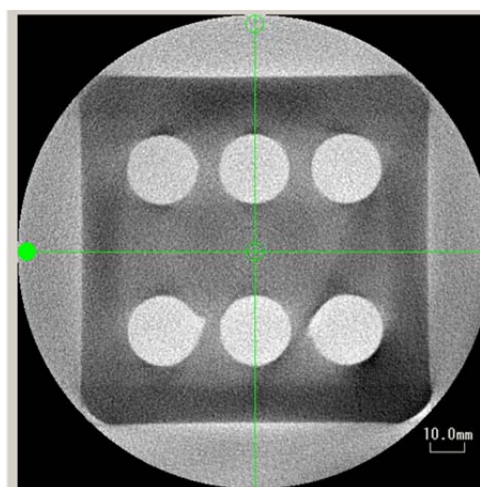
本研究で試作した 3 種類のサイコロ鋳型の X 線 CT による断面画像を図 7a)、図 7b)および図 8 に示す。ここで示すサイコロ 6 の面は中子の下面であり、砂除去が困難だった面である。

図 7a)は最初に造型した中子一体型の CT 画像である。サイコロの目と目の間に白い砂の影が確認され、未硬化砂が固着してしまいうまく除去できていないことが確認できた。未硬化砂の除去には、エアブローなどを当てる必要があるため、このまま鋳型に鋳造すると、製品に身食いが発生すると考えられる。

図 7b)は砂除去穴によりエアブローの改善を試みた中子一体型の CT 画像である。図 7a)と図



a) 砂除去対策前



b) 砂除去対策後

図 7 中子一体型 X 線 CT 画像
(出力 200 kV, 80 μA)

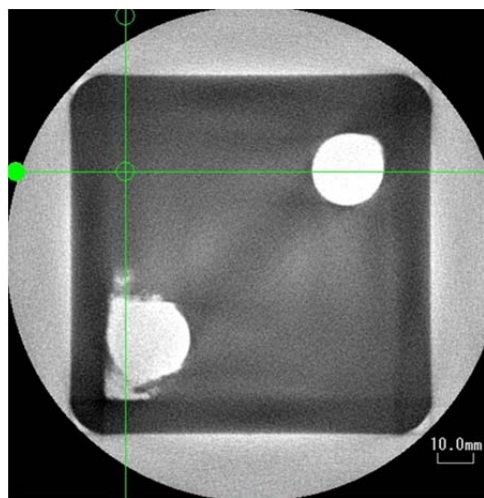


図 8 上下一体型 X 線 CT 画像
(出力 200 kV, 80 μA)

7b)を比較すると、対策後の図 7b)のほうが、砂が比較的良好に除去されており、エアブローの効果があったと考えられる。

図 8 は上下一体型の CT 画像である。本方案では見切り面がないことの反動としてエアブローによる砂除去の効率が悪くなり、目の中子の周りに砂がやや残っており、さらなる砂除去の対策が必要であることがわかった。

4. 3. 2 鑄造実験

3 個のサイコロ鑄物の外観評価を目視で行った。砂除去対策前の中子一体型は、前項での考察、また、図 9 左のように、未硬化砂の固着により、サイコロの目の部分にわずかな身食いが観察された。一方で、対策後の中子一体型は、図 9 右に示すように、身食いは観察されなかった。しかし、砂除去用の穴を詰めた部分にはバリが発生した。



図 9 中子一体型鑄物の身食い
(左が砂除去対策前、右が対策型)

上下一体型は、図 10a)のように、中子下面にあたるサイコロ 6 の面の目の中子周りにわずかな身食いが、6 の面の淵に比較的広い範囲にわたる身食いが観察された。中子周りの身食いは、未硬化砂の固着によるもの、また、淵の身食いは、各面の除去しきれなかった砂が溶湯に流されて下面に集中したことによると思われる。その一方、6 の面以外の各面には身食いは観察されなかった。上下一体型は、図 10b)のように見切り面はないが、中子一体型と同様に砂除去後にサイコロの目の中子を挿入した部分の多くにバリが発生しており、やはり新たなバリ対策が求められる。

5. まとめ

砂型積層造型技術の評価のため、従来工法では造型が不可能であった中子一体型や上下一体型を



a) 6 の面



b) 全景

図 10 上下一体型鑄物

造型し、鑄型や鑄物を評価した。一連の実験をとおして以下の知見を得た。

- ・積層造型砂の大半の粒径は $106 \sim 150 \mu\text{m}$ と一般的な高純度けい砂よりも小さいが、積層造型した試料による鑄型強度は約 820 N/cm^2 と一般的なフラン自硬性鑄型よりも大きいことがわかった。一般的に、フラン鑄型は崩壊性が良いことが知られており、積層造型鑄型においても同等の崩壊性を有するかは、今後定量的に検討する必要がある。

- ・積層造型鑄型の傾斜部分には積層段差が確認された。また、鑄型は設計値より最大で 0.27 mm 程度小さくなるように造型されていた。このため積層造型鑄型を設計する際は、鑄物の縮み代に加え、積層ピッチ分程度鑄型が小さくなる点を考慮すること、造型面に対して傾斜となる部分を減らす向

きに造型することが必要である。

・積層造型技術を活用するためには、製品の身食いを防ぐため、未硬化砂除去の対策を立てる必要がある。本研究では、鋳型に砂除去用の穴を設けたが、穴を詰めた跡にバリが差した。このバリの発生を抑制することは困難であるため、バリを除去する必要がない箇所や、バリの除去が容易な箇所に砂除去用の穴を設計するなどの工夫が必要である。

・上下一体型は見切り面がないため、固着していない砂であっても完全な除去は困難であった。この砂による身食いを防ぐためには、溶湯に流される砂を集めるための溜まりを設計しておき、後加工により溜まりを除去するなど、鋳型設計上の工夫が必要である。

参考文献

- 1) 萩原恒夫: “材料から見た 3D プリンターの現状と将来”. 素形材, 54(9), p37-44 (2013)
- 2) 岡根利光: “鋳造技術における 3D プリンターの活用”. 滋賀県東北部工業技術センター「研究発表会 & 特別講演」別冊配布資料, p1-10 (2014)
- 3) 大橋明ほか: “球状低膨張鋳物砂の開発”. 鋳造工学, 75, p362-367 (2003)
- 4) 山本治ほか: “フラン鋳型の強度に及ぼす砂粒の影響”. 鋳物, 50, p480-484 (1978)
- 5) 山本治ほか: “フラン及びオイル・ウレタン鋳型の常温並びに高温性質”. 鋳物, 50, p14-19 (1978)
- 6) (社)日本鋳造技術協会: “第4版 鋳型造型法”. (社)日本鋳造技術協会, p131 (1996)
- 7) (財)素形材センター: “第2版 鋳型の生産技術”. (財)素形材センター, p286-294 (2002)