

### 3 積層造形をした砂型中子を用いた重力鑄造技術の調査

長岡孝, 森下勇樹, 大石郁, 府山伸行, 岩元裕一\*, 香川栄次\*\*, 市岡雅義\*\*

Study of gravity casting technology using sand mold processed by additive manufacturing technology

NAGAOKA Takashi, MORISHITA Yuki, OHISHI Kaoru, FUYAMA Nobuyuki, IWAMOTO Yuichi,  
KAGAWA Eiji and ICHIOKA Masayoshi

Recently, sand mold processed by additive manufacturing has attracted attention. In order to handle this technology, it is necessary to comprehend the characteristics of sand mold and castings. In this report, sand mold had prototyped with additive manufacturing apparatus. And characteristics evaluation of sand mold, surface roughness, and metallographic structure of cast iron by prototype sand molds were observed. It was found that the cast iron prototyped using sand molds processed by additive manufacturing had the same metallographic structure as the casting sand molds which molded with phenolic resin.

キーワード：砂型積層造形, 重力鑄造

#### 1 緒 言

近年, 砂型重力鑄造に用いる砂型を三次元積層造形技術により作製する手法が注目されている<sup>1)</sup>。従来手法では鑄物形状に調整された木型に砂を押し込め, その後木型から砂型を抜き出す作業が必要である。一方, 積層造形技術では鑄型の三次元データがあれば砂型の造形が可能である。その結果, 抜き勾配が不要となり, 鑄物の形状最適化が可能であるといった利点がある。また, 一層ずつの積層造形であるため, 従来手法では不可能であった複雑形状や鑄型の中空化も検討できる。積層造形技術は, 木型を用いて試作する砂型と比較して製品形状や鑄造法を迅速に修正でき, 新製品の試作検討をする際のツールとしても期待されている。

当技術を適切に取り扱うためには, 砂型の強度や注湯時の熱膨張量, 通気度やガス発生量を把握し, また鑄物の鑄肌や組織への影響を調査することが必要である。これらについては, 金森らがインクジェット式の積層造形装置を用いて砂型を試作し, 諸特性の評価を行っている<sup>2)</sup>。また, 服部らは主型と中子の一体鑄型と, 内部の砂抜き手法について調査している<sup>3)</sup>。しかし, 積層造形技術を用いた鑄鉄への適用性についてはこれまでほとんど報告されていない。

そこで本研究では, 砂型積層造形装置を用いて砂型評価用ブロック及び砂型中子を試作し, 砂型の特性評価と, 試作中子を用いて鑄造した鑄鉄の面粗度や金属組織を調査した。

#### 2 実験方法

本研究では, 積層造形装置として技術研究組合次

世代 3D 積層造形技術総合開発機構 (TRAFAM) で開発されたシリカ ( $\text{SiO}_2$ ) とアルミナ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) を主成分とする人工砂とバインダ樹脂にフラン樹脂を用いる砂型積層造形装置 SCM-800 (シーメット株式会社製) を使用し, 造形は同社に委託した。また比較用に,  $\text{SiO}_2$  を主成分とする天然砂を使用して一般的なアルカリフェノールプロセスにより木型を用いて試作鑄型と砂型中子を作製した。以下, 積層造形装置を用いて作製した中子を積層造形鑄型又は積層造形中子, 比較として作製した鑄型をフェノール鑄型又はフェノール中子と呼ぶ。

作製した試作鑄型に対して, ロータップ式ふるい振とう機を用いて JACT 試験法 S-1 に準拠した粒度分布評価, JACT 試験法 GM-4 に準拠した曲げ強さ評価, JACT 試験法 GM-5 に準拠した圧縮強さ評価, JACT 試験法 M-1 に準拠した通気度評価, JACT 試験法 M-2 に準拠した熱膨張量評価, JACT 試験法 M-5 に準拠したガス発生量評価を行った。また, 崩壊性評価は, 試験片をアルミ箔に包み 700℃ で 10 分焼成し冷却後, ロータップ式ふるい振とう機を用いて 8 mesh の篩網上で振とうさせて崩壊割合を測定した。灼熱減量は 1000℃ の電気炉で焼成した際の減量割合とした。

鑄造試験での鑄物形状は, 表層及び内部の組織への影響を調査するため肉厚約 10mm の箱型とした。傾斜による影響を調べるため, 1.5° と 2.5° の勾配を砂型中子に設定した。比較のため, フェノール中子も同様の抜き勾配となる木型を用いて造形を行った。アルカリフェノール樹脂をバインダとする主型に対し, 積層造形中子, あるいはフェノール中子をそれぞれ組み合わせて鑄型とし, FC 材を注湯して鑄造を行った。注湯した鑄型は徐冷した後に型バラシを行った。試作した鑄物に対して, 3D スキャナー (キーエンス製 VR-3000) で中子と接して

\*株式会社ミットヨ

\*\*株式会社ツチヨシ産業

いた鋳肌の抜き勾配を設定した面と設定していない面について 35mm 角の視野範囲で面粗度評価を行った。また、砂型中子の冷却性能の違いによる影響やガス欠陥の有無を確認するため、光学顕微鏡を用いて任意の断面の金属組織観察を行った。さらに、鋳物の断面にて鋳物厚さを考慮してφ 5 mm のタンダステンカーバイドボールにより 750kgf の荷重でブリネル硬さ評価を行った。

### 3 実験結果及び考察

#### 3.1 試作鋳型の特性評価

図 1 に試作鋳型の粒度分布評価結果を示す。積層造形鋳型の各粒度は 140mesh が 76.3%、200mesh が 19.4%とであり、AFS F.N は 108.3 であった。フェノール鋳型の各粒度は 50、70、100mesh でそれぞれ 27.1%、31.3%、27.1% であり、AFS F.N は 55.4 であった。この結果から、フェノール鋳型の砂は、50～100mesh の範囲で構成されており、粒径の異なる砂により構成されているが、積層造形鋳型は、フェノール鋳型と比較して均一で細かい粒により構成されており、積層造形鋳型とフェノール鋳型は異なる粒径により構成されていることが分かる。

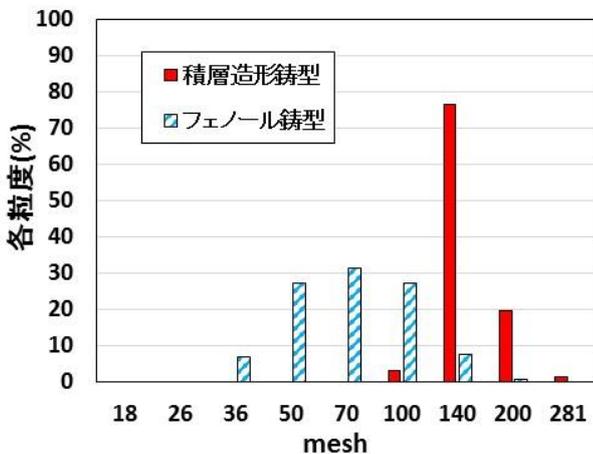


図 1 試作鋳型の粒度分布評価結果

表 1 に試作した鋳型の曲げ強さ及び圧縮強さ、通気度評価結果を示す。積層造形鋳型の曲げ強さは 36.2kg/cm<sup>2</sup>であったのに対して、フェノール鋳型は 12.2kg/cm<sup>2</sup>であったことから、積層造形鋳型はフェノール鋳型の約 3 倍の曲げ強さを有することが分かった。また、積層造形鋳型とフェノール鋳型の圧縮強さはそれぞれ、52.0kg/cm<sup>2</sup>以上と 17.1kg/cm<sup>2</sup>であり、積層造形鋳型はフェノール鋳型と比較して高い強度を有することが分かった。これは、造形方法が積層造形鋳型はフランププロセス、フェノール鋳型

はアルカリフェノールプロセスによりそれぞれ異なるためであると考えられる。積層造形鋳型とフェノール鋳型の通気度はそれぞれ 138 と 199 であった。積層造形鋳型は砂の粒径がフェノール鋳型と比較して小さく、かつ単一ピークであったことから、通気度がフェノール鋳型よりも小さい値となったと考えられる。

表 1 試作鋳型の曲げ強さ及び圧縮強さ、通気度評価結果

サンプル	曲げ強さ, kg/cm <sup>2</sup>	圧縮強さ, kg/cm <sup>2</sup>	通気度
積層造形鋳型	36.2	52.0 以上	138
フェノール鋳型	12.2	17.1	199

表 2 に試作鋳型の熱膨張量及びガス発生量評価結果を示す。積層造形鋳型の熱膨張量は 180秒で 0.00%、300秒で 0.01% となった。一方フェノール鋳型は 180秒で 0.87%、300秒で 0.90% となり、積層造形鋳型の方がフェノール鋳型と比較して熱膨張量が小さかった。これは、フェノール鋳型は SiO<sub>2</sub> を主成分とする天然砂を使用しており、積層造形鋳型は Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と SiO<sub>2</sub> を主成分とする人工砂を使用しているためであると考えられる。ガス発生量については、積層造形鋳型が 90秒で 11.2ml/g、180秒で 12.1ml/g、フェノール鋳型は 90秒で 10.9ml/g、180秒で 12.0ml/g であり同程度であった。

表 2 試作鋳型の熱膨張量及びガス発生量評価結果

サンプル	熱膨張量, %			ガス発生量, ml/g		
	180秒	300秒	MAX	90秒	180秒	MAX
積層造形鋳型	0.00	0.01	0.09	11.2	12.1	13.8
フェノール鋳型	0.87	0.90	0.94	10.9	12.0	14.6

表 3 に試作鋳型の崩壊性及び灼熱減量評価結果を示す。崩壊性については、積層造形鋳型は 30秒で 9.4%、120秒で 23.9% となった。一方、フェノール鋳型は 30秒で既に 99.4% であった。この結果から、積層造形鋳型は 700℃ での崩壊性がフェノール鋳型と比較して低く、アルミニウム合金を鋳造する際の温度域 (600～700℃) では崩壊性が悪い可能性があることが分かった。灼熱減量については、積層造形鋳型が 2.39%、フェノール鋳型が 2.47% と、同程度の結果となった。

表 3 試作鋳型の崩壊性及び灼熱減量評価結果

サンプル	崩壊性, %				灼熱減量, %
	30秒	60秒	90秒	120秒	
積層造形鋳型	9.4	15.2	20.2	23.9	2.39
フェノール鋳型	99.4	100.0	100.0	100.0	2.47

### 3.2 試作した鑄物の評価

図2に積層造形中子又はフェノール中子を用いて試作した鑄物の鑄肌写真を示す。積層造形中子を使用した鑄肌は、抜き勾配の有無に関わらず砂の焼き付き等の表面欠陥は確認されなかった。一方、フェノール中子を使用した鑄物の鑄肌は、砂の焼き付き又は差し込みと見られる凹凸が確認された。積層造形中子は140meshでピークを有する砂を用いており、フェノール中子に使用した一般的な砂と比較して粒径が小さいため、鑄物の鑄肌がより平坦になったのではないかと考えられる。

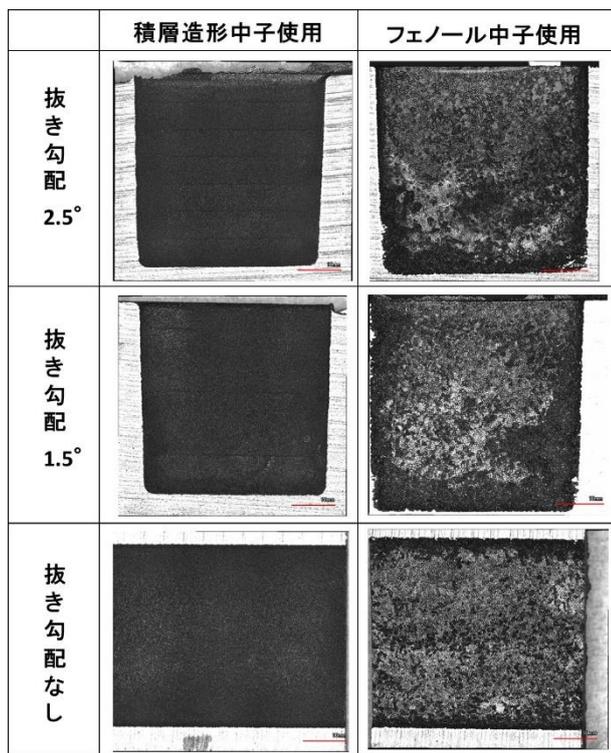


図2 試作鑄物の鑄肌写真

図3に3Dスキャナーにて取得した試作鑄物の表面プロフィールを示す。積層造形中子を使用した鑄物で、抜き勾配2.5°に設定した面では約6mm間隔で200μm程度の段差が、抜き勾配1.5°に設定した面では約15mm間隔で200μm程度の段差が存在することを確認した。これらの段差模様は、中子造形の際の積層による段差模様が転写されたものと考えられる。

抜き勾配2.5°と1.5°の段差の間隔から積層による段差は傾斜角度が造形テーブルと垂直になるにつれて間隔が大きくなるものと推測される。このことから、積層造形鑄型を用いた鑄物を鑄肌のまま使用するには、注意が必要である。フェノール中子を使用した鑄物の鑄肌は、抜き勾配の有無に関わらずすべての表面プロフィールであり、砂の焼き付き又は差し

込みと考えられる凹凸を確認した。

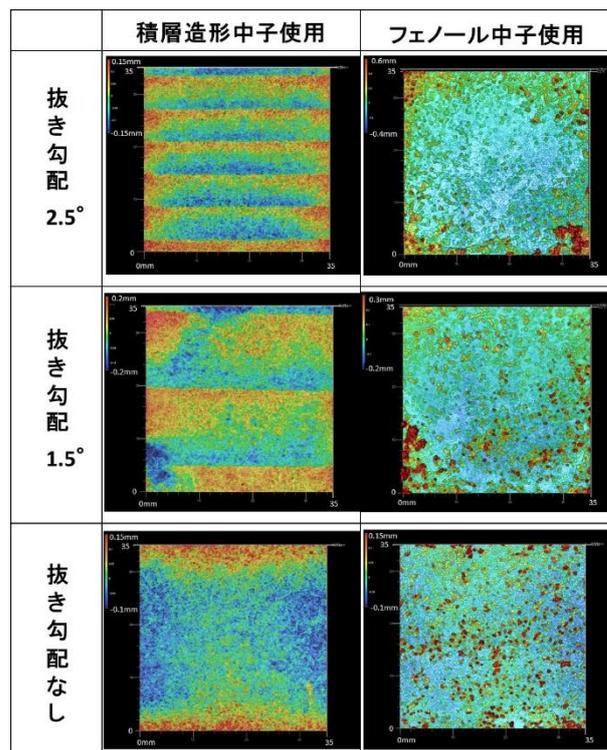


図3 試作鑄物の表面プロフィール

図4に試作鑄物表面の面粗さを示す。積層造形中子を使用した鑄物の表面粗さは、抜き勾配の有無に関わらず45~50μm程度であった。一方、フェノール中子を使用した鑄物の表面粗さは、抜き勾配が2.5°で120μm、1.5°で49μm、抜き勾配無しが43μmであった。このことから、積層造形中子を使用した鑄物の表面粗さは、フェノール中子を使用したものと比較して均一であることが分かった。粒度分布評価結果と図2の写真から積層造形中子を使用した鑄物の方が鑄肌の表面粗さは小さくなると予想されたが、両者を使用

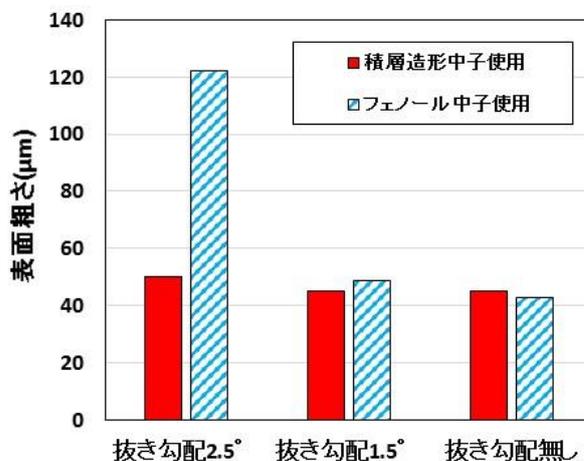


図4 試作鑄物表面の面粗さ

して試作した鋳物の抜き勾配 $1.5^\circ$ と抜き勾配無し  
の面の表面粗さにあまり差は見られなかった。これは図  
3の表面プロファイルの結果から、積層造形中子を使用  
した鋳物では、抜き勾配有りの面は段差模様も含ま  
れた表面粗さであり、抜き勾配無し  
の面では35mm角の視野内で高低差が存在したため  
であると考えられる。

図5に試作鋳物の表面付近の断面組織を、図6に  
試作鋳物の肉厚中心部の断面組織を示す。ノンエッチ  
ング写真では、黒色部が片状黒鉛、白色部が基地組織  
である。またエッチング写真では、黒色部は片状黒鉛  
、灰色部がパーライトである。断面組織観察の結果から  
、積層造形中子とフェノール中子をそれぞれ使用した  
鋳物の断面組織は同様の金属組織を有することが分か  
った。積層造形中子とフェノール中子はそれぞれ人工砂  
と天然砂を用いており冷却能が異なるため、表層  
における組織の違いが見られることが予想されたが  
、両者に差異は見られなかった。また、積層造形鋳型は  
フェノール鋳型よりも通気度が低かったため、ガス欠  
陥の発生が懸念されたが、任意の断面を調査した結果  
、内部の鋳造欠陥は確認されなかった。

ブリネル硬さ評価を行った結果、積層造形中子を使用  
した鋳物は184 HBW 5/750、フェノール中子を使用  
したものは185 HBW 5/750であり、同様の硬さであ  
った。以上の試作鋳物の評価から、肉厚10mmの鋳物  
に対しては、積層造形中子の適用が可能であることが  
分かった。

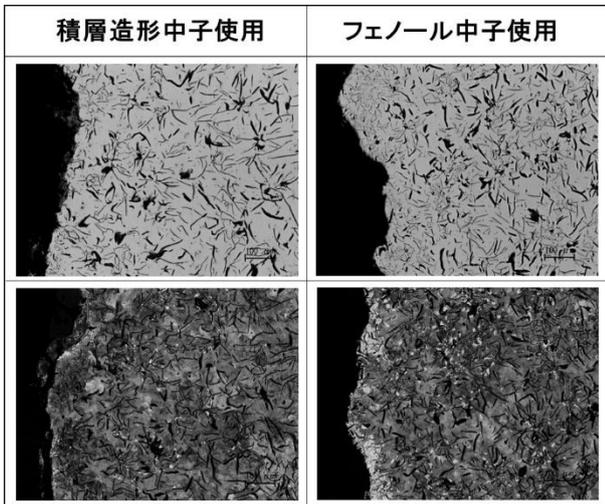


図5 試作鋳物の表面付近の断面組織  
上段ノンエッチング  
下段エッチング

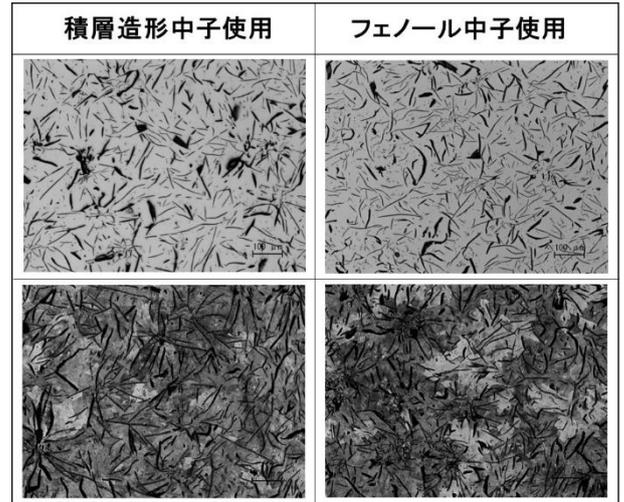


図6 試作鋳物の肉厚中心部の断面組織  
上段ノンエッチング  
下段エッチング

## 4 結 言

砂型積層造形装置を用いて試作鋳型及び砂型中子  
を試作し、砂型中子の特性評価と試作中子を用いて鋳  
造した鋳鉄の面粗度や金属組織を調査した結果、以下  
の知見を得た。

- (1) 積層造形鋳型は、フェノール鋳型と比較して高  
い曲げ強度と圧縮強度を有し、熱膨張率が非常  
に小さい。
- (2) 積層造形中子を用いた鋳物の鋳肌は、一般的  
なフェノール中子を用いた鋳物の鋳肌と比較し  
て、面粗度は均一となる。しかし、中子造形  
の際に形成された段差模様が転写されるため、  
鋳肌のまま使用する際には考慮する必要がある。
- (3) 積層造形中子を用いて鋳造した鋳鉄は、フェ  
ノール中子を用いて鋳込んだものと同等の金属  
組織を有する。
- (4) 積層造形中子を用いて肉厚10mmの鋳鉄を  
鋳造した場合、ガス欠陥等の内部欠陥は確認  
されなかった。

## 文 献

- 1) 岡根：精密工学会誌，82 (2016)，629
- 2) 金森他：三重県工業研究所 研究報告，41 (2017)，  
95
- 3) 服部他：三重県工業研究所 研究報告，41 (2017)，  
1