

## 積層造形により作製した砂型の特性

金森陽一\*, 樋尾勝也\*

### Characteristics of Three-dimensional Printed Sand Molds

Yoichi KANAMORI and Katsuya HIO

The characteristics of three-dimensional printed sand molds were measured. The dimensional errors (length, to 200 mm) of three-dimensional printed sand molds varied -0.25 to +0.4 mm. The dimensional errors (height, to 50 mm) of three-dimensional printed sand molds varied -0.1 to +0.7 mm. The permeability of three-dimensional printed sand molds was approximately 80. The compressive strengths of three-dimensional printed sand molds ranged from 340 to 650 N/cm<sup>2</sup>.

Key words: Three-dimensional Printing, Sand Mold, Additive Manufacturing, Dimensional Error, Permeability, Strength

#### 1. はじめに

AM (Additive Manufacturing) 技術は、3次元 CAD データを用いて、樹脂、金属などを積層して造形する技術である。この技術は、3次元 CAD データから直接造形を行うことから設計変更が容易であること、また装置を無人で稼働させることができることなどから、鋳造プロセスへの適用が期待されている。鋳造プロセスへの適用としては、先行している鋳造用模型への適用<sup>1-3)</sup>に加え、鋳型への適用<sup>4-6)</sup>が検討されてきている。

鋳型への適用の1つである砂型への適用は、鋳造用模型が不要になるだけでなく、設計の自由度が高く、工数の削減などメリットが多くあることから<sup>4,6)</sup>、試作品や交換部品などの小ロット生産への適用が積極的に進められている。しかし、積層造形により作製された砂型は薄く敷き詰めた砂を積層して造形されているため、強度、通気度などの砂型特性が従来の砂型と異なることが予想される。積層造形により作製した砂型を広く普及させるためには、砂型の特性を把握し、積層造形に合った砂型を設計・製造することが重要である。

\* 金属研究室

そこで、本研究では、種々の条件で積層造形試験片(砂型)を作製し、寸法精度、通気度、強度、表面安定度、熱間ひずみなどを測定し、積層造形で作製した砂型の特性を調べた。また、積層造形により作製した砂型を用いて鋳物を溶製し、表面粗さ(平面、段差)についても確認したので、それらの結果について報告する。

#### 2. 実験方法

##### 2. 1 砂の粒度分布測定

砂の粒度分布測定については、鋳物砂の粒度試験方法<sup>7)</sup>により行った。

##### 2. 2 作製した試験片(砂型)の形状と作製

図1に作製した試験片(砂型)形状を示す。作製した試験片(砂型)は、(1)長さ試験片 X×20×10 mm X: 20, 50, 100, 200 mm の4種類、(2)高さ試験片 20×20×Z mm Z: 5, 10, 20, 50 mm の4種類、(3)通気度、圧縮、表面安定度試験片 φ50×50 mm の1種類、(4)曲げ強さ、熱間ひずみ試験片 200×20×20 mm の1種類の合計10種類である。

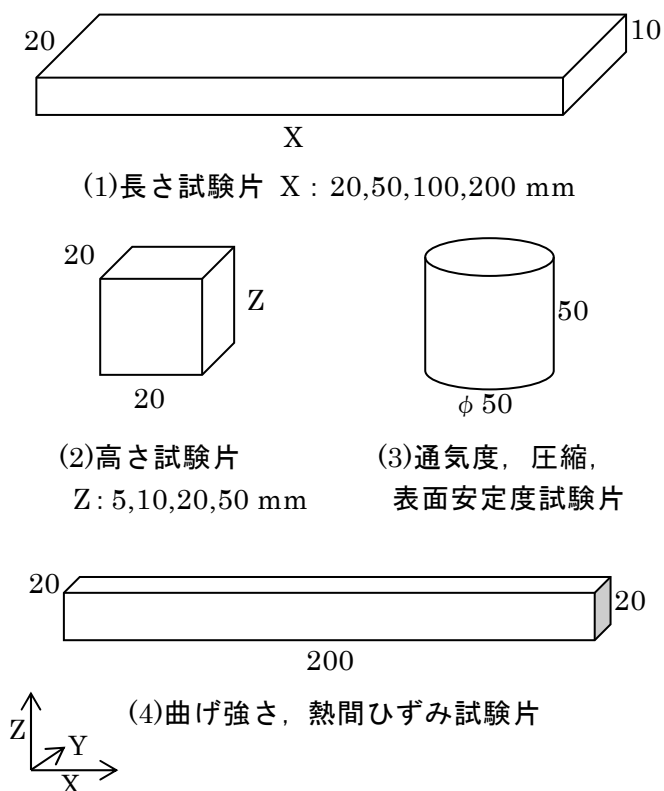


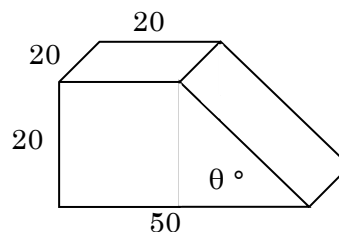
図 1 作製した試験片（砂型）形状

試験片（砂型）作製については、インクジェット式（結合剤噴射）の積層造形装置を用い、表 1 の 3 条件により行った。なお、積層方向については、(1)長さ試験片、(2)高さ試験片及び(4)曲げ強さ、熱間ひずみ試験片は Z 方向とした。また、(3)通気度、圧縮、表面安定度試験片（φ50×50 mm）については、積層方向の影響を調べるため、積層方向に対し、図 1 の縦置き（たて）、図 1 を 90° 回転させた横置き（よこ）の 2 種類の試験片を作製した。

### 2. 3 試験片（砂型）の評価

長さ及び高さ測定については、ノギスにより長さ試験片の X 部及び高さ試験片の Z 部を測定し、3次元 CAD データ（設計値）との差を求めた。通

気度測定については、鋳物砂の通気度試験方法<sup>8)</sup>により行った。圧縮強さ測定については、クロスヘッド速度：1 mm/min で試験を行った。曲げ強さ測定については、クロスヘッド速度：5 mm/min、支点間距離：150 mm の条件で、3 点曲げ試験を行った。表面安定度については、表面安定度試験方法<sup>9)</sup>に基づき、φ50×50 mm 試験片を網目 3,360 μm のふるいの上で 60 秒間振とうさせ、振とう前の試験片重量と振とう後の試験片重量から求めた。熱間ひずみ測定については、試験片の片側を固定し、固定側の端から約 80 mm の位置の下部をバーナーで加熱し、固定していない側の変位を測定した。なお、変位の測定位置は試験片の固定していない側の端から 20 mm の上部とし、変位測定位置には 100 g の荷重をかけた。



θ : 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20, 25, 30°

図 2 溶製した段差試験片の形状

### 2. 4 試験片（鋳鉄）の溶製と評価

溶製した鋳鉄は、図 2 に示す 8 種類の段差試験片 角度 θ : 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20, 25, 30° である。積層造形により作製した砂型に約 1,450 °C の溶湯を注湯し、ねずみ鋳鉄（FC200）を溶製した。図 3 に積層造形により作製した砂型の概略図を示す。溶製した試験片（鋳鉄）の評価については、接触式表面粗さ測定機により、平面及び傾斜部の最大高さ粗さ（以下、「最大高さ粗さ」

表 1 砂型の造形条件

試験片名	積層ピッチ mm	X/Y 解像度 mm	砂	樹脂 %	硬化剤 %
フラン 1	0.28	0.1	人工砂	フラン系 2.0	0.3
フラン 2	0.28	0.07	天然砂	フラン系 2.2	0.2
フェノール	0.24	0.1	人工砂	フェノール系 3.4	0.2

は「Rz」とする.)を測定した.

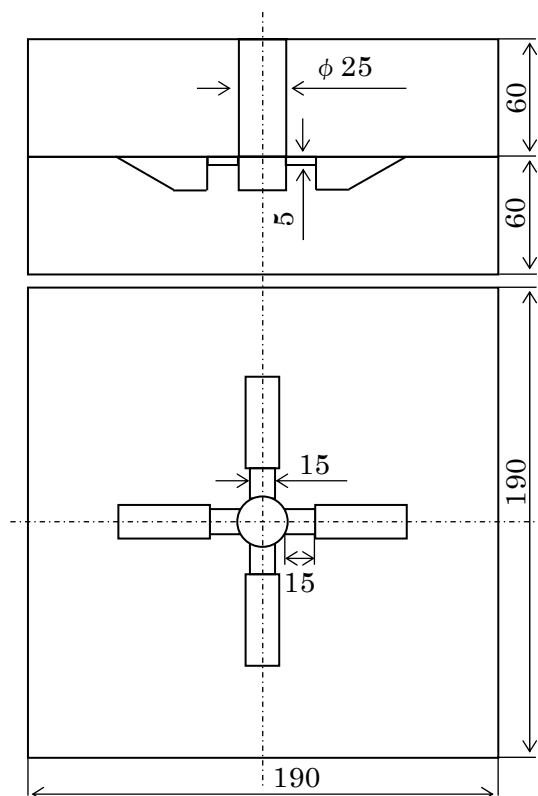


図3 作製した砂型の概略図

### 3. 実験結果と考察

#### 3. 1 砂の粒形と粒度分布

図4に砂の外観写真を示す。人工砂を使用しているフラン1及びフェノールでは、砂の粒形は丸

く、天然砂を使用しているフラン2では、砂の粒形は角形であった。

表2に、粒度分布の測定結果を示す。3種類の砂とも、呼び寸法：106  $\mu\text{m}$ の砂が60%以上を占める非常に細かい砂であった。粒度分布結果から求めたAFS粒度指数は、フラン1：106，フラン2：105，フェノール：113であった。

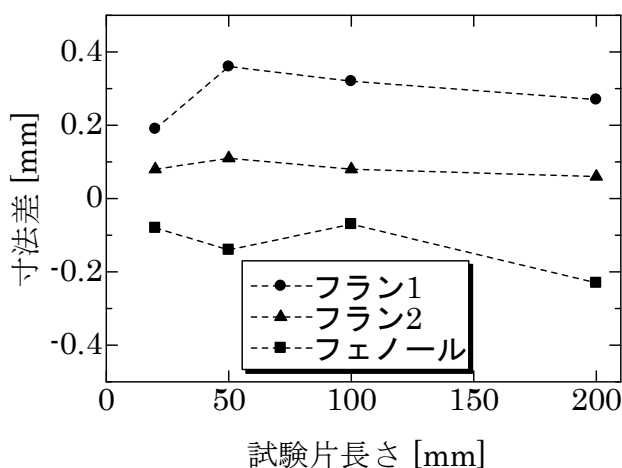


図5 作製した試験片（砂型）の長さとの3次元CADデータ（設計値）との寸法差の関係

#### 3. 2 作製した試験片（砂型）の長さとの高さ

図5に作製した試験片の長さとの3次元CADデータ（設計値）との寸法差の関係を示す。図5から、試験片長さが長くなっても、寸法差はあまり変わらず、試験片長さとの寸法差には関係がないよ

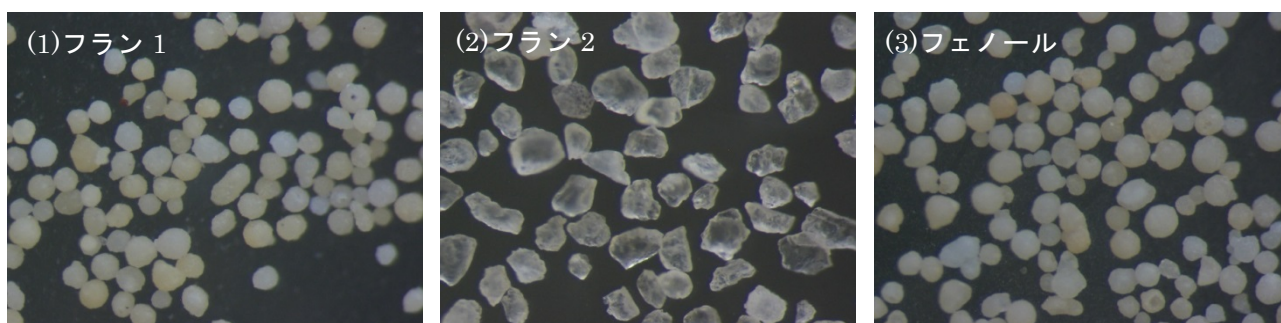


図4 砂の外観写真

表2 粒度分布の測定結果

呼び寸法 $\mu\text{m}$	600	425	300	212	150	106	75	53	PAN	mass%
フラン1	0.0	0.0	0.0	0.1	9.8	68.6	20.5	1.0	0.0	
フラン2	0.0	0.0	0.1	0.8	12.4	64.8	20.9	1.1	0.1	
フェノール	0.0	0.0	0.0	0.2	5.3	64.3	26.4	3.7	0.2	

うに見受けられる。各条件の寸法差はおおよそ、フラン 1 : +0.2~+0.4 mm, フラン 2 : +0.1 mm, フェノール : -0.25~-0.1 mm の範囲であった。各条件の X/Y 解像度は、フラン 1, フェノール : 0.1 mm, フラン 2 : 0.07 mm である。寸法差 (長さ) は、X/Y 解像度が高いフラン 2 で小さく、フラン 1, フェノールで大きくなったことから、寸法差 (長さ) は X/Y 解像度に関係していると推察される。

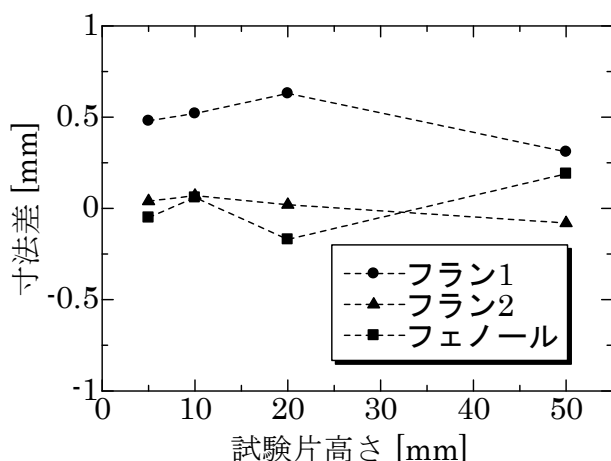


図 6 作製した試験片 (砂型) の高さ と 3 次元 CAD データ (設計値) との寸法差の関係

図 6 に作製した試験片の高さと 3 次元 CAD データ (設計値) との寸法差の関係を示す。図 6 から、試験片高さが高くなっても、寸法差はあまり変わらず、試験片高さと寸法差には関係がないように見受けられる。各条件の寸法差はおおよそ、フラン 1 : +0.25~+0.7 mm, フラン 2 : ±0.1 mm, フェノール : -0.1~+0.2 mm であった。各条件の積層ピッチは、フラン 1 と 2 : 0.28 mm, フェノール : 0.24 mm である。フラン 1 では、高さ方向の寸法差は積層ピッチの 1~3 倍程度あり、高さ方向の寸法差は大きかった。これに対し、フラン

表 3 通気度の測定結果

		通気度
フラン 1	たて	79
	よこ	77
フラン 2	たて	75
	よこ	88
フェノール	たて	76
	よこ	77

2 及びフェノールでは、高さ方向の寸法差は積層ピッチより小さく、高さ方向の寸法差は小さかった。

### 3. 3 作製した試験片 (砂型) の通気度

表 3 に通気度の測定結果を示す。作製した試験片 (砂型) の通気度は 75~88 の範囲で、積層造形により作製した砂型の通気度は 80 程度であった。この通気度は、例えば一般的な有機自硬性鋳型の通気度が 400 程度<sup>10)</sup>であるのに対し、非常に小さい値である。この結果は、積層造形により作製した砂型を使用する場合、砂型のガス抜き対策が重要になることを示唆している。

また、「たて」、「よこ」の通気度を比較すると、フラン 1 とフェノールはそれぞれ 79 と 77、76 と 77 で、「たて」と「よこ」の通気度はほぼ同じであったのに対し、フラン 2 では、「たて」が 75、「よこ」が 88 でわずかな差が生じた。積層造形では、砂を薄く敷き詰めて、砂型を造形するため、砂の敷き詰め方向 (積層方向に対し垂直方向) に砂が揃いやすくなると考えられる。通気度測定では、φ50×50 mm 試験片の長手方向 (よこ) の空気の流れを測定しているため、よこ方向に砂が揃う「よこ」の通気度が高くなることが予想される。本実験においては、角形の砂を使用しているフラン 2 では、「たて」より「よこ」の通気度が大きくなったのに対し、丸形の砂を使用しているフラン 1 とフェノールでは、砂が敷き詰め方向に揃ってもその影響は小さく、「たて」と「よこ」の通気度はほぼ同じになったと考えられる。

表 4 圧縮強さの測定結果

		圧縮強さ N/cm <sup>2</sup>	
		1 週間後	1 か月後
フラン 1	たて	462	424
	よこ	340	433
	平均	401	429
フラン 2	たて	650	611
	よこ	521	605
	平均	586	608
フェノール	たて	573	467
	よこ	509	420
	平均	541	444

### 3. 4 作製した試験片（砂型）の強度特性

表 4 に圧縮強さの測定結果を示す。作製した試験片の 1 週間後の圧縮強さ（平均）は、フラン 1：約 400 N/cm<sup>2</sup>，フラン 2：約 590 N/cm<sup>2</sup>，フェノール：約 540 N/cm<sup>2</sup>であった。一般的なフラン鑄型の樹脂添加量は 0.7~0.9 %<sup>11)</sup>で、この添加量で得られる圧縮強度は 400 N/cm<sup>2</sup> 程度<sup>11)</sup>とされている。本実験で作製した砂型では、3 条件ともに圧縮強さは 400 N/cm<sup>2</sup> 以上であり、十分実用できる圧縮強度が得られたと考えられる。

積層造形の樹脂添加量（フラン 1：2.0%，フラン 2：2.2%）は、一般的なフラン鑄型の樹脂添加量：0.7~0.9 %<sup>11)</sup>の 2 倍以上である。積層造形では、砂の突き固めができないため、樹脂添加量を多くすることで圧縮強度を確保していると考えられる。

1 週間後と 1 カ月後の圧縮強度（平均）を比較すると、フラン 1 と 2 では 1 か月後の圧縮強度はわずかに増加したが、フェノールでは 1 か月後の圧縮強度はわずかに低下した。この圧縮強度の低下はわずかであるものの、砂型の吸湿性に起因する可能性があるため、今後の課題として、圧縮強度低下の原因調査と砂型の管理方法の検討が必要である。

また、「たて」、「よこ」の圧縮強さを比較すると、全 6 条件のうち、フラン 1 の 1 か月後の圧縮強さを除く、5 条件で「たて」の圧縮強さの方が高かった。積層方向により圧縮強度に差が生じた理由についても、詳細な検討が必要である。

表 5 曲げ強さの測定結果

	曲げ強さ N/cm <sup>2</sup>
フラン 1	240
フラン 2	240
フェノール	420

表 5 に曲げ強さの測定結果を示す。作製した試験片の曲げ強さは、フラン 1 と 2 が 240 N/cm<sup>2</sup>，フェノールが 420 N/cm<sup>2</sup>であった。この結果から、フェノールの曲げ強さは、フラン 1, 2 の曲げ強さの約 1.8 倍で、非常に大きいことがわかる。

### 3. 5 作製した試験片（砂型）の表面安定度

表 6 表面安定度の測定結果

		表面安定度 %
フラン 1	たて	96.8
	よこ	96.3
フラン 2	たて	96.9
	よこ	97.5
フェノール	たて	97.6
	よこ	97.5

表 6 に表面安定度の測定結果を示す。表 6 から、本実験で作製した砂型では、3 条件の「たて」、「よこ」ともに、表面安定度は 97 %程度であり、十分実用できる表面安定度が得られたと考えられる。

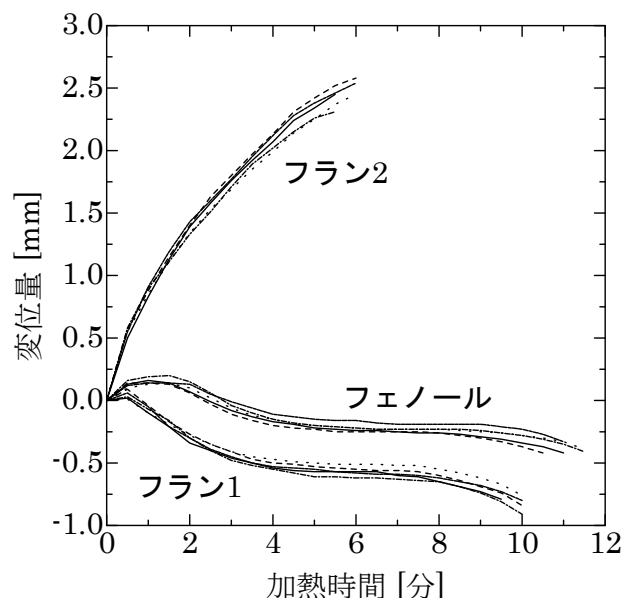


図 7 熱間ひずみの測定結果

### 3. 6 作製した試験片（砂型）の熱間ひずみ

図 7 に熱間ひずみの測定結果を示す。フラン 1 では、加熱を開始すると、砂の熱膨張により変位はわずかに+側になったが、さらに加熱すると、変位は+から-側が変わった。この変位の変化は、加熱による軟化によるものである。さらに加熱すると変位量は-側に徐々に大きくなり、その後変位量の変化が小さくなった。さらに加熱すると、変位は-側に著しく大きくなり、加熱開始から約 10 分で試験片が破断した。フラン 2 では、加熱開始すると、砂の熱膨張により変位は+側となり、

さらに加熱時間の経過とともに、変位は+側に大きくなり、約6分で試験片が破断した。フェノールでは、加熱を開始すると、熱膨張により変位はわずかに+側になったが、さらに加熱すると、熱による軟化により変位は-側になった。この傾向は、フラン1と同じであったが、フェノールの熱膨張による変位の変化はフラン1より大きかった。さらに加熱すると変位量は-側に徐々に大きくなり、その後変位量の変化が小さくなった。さらに加熱すると、変位は-側に著しく大きくなり、加熱開始から約11分で試験片が破断した。この傾向も、フラン1と同じである。以上の結果は、人工砂のフラン1とフェノールでは、砂の熱膨張が小さいため、熱膨張による+の変位は加熱初期しか現れずに軟化による-の変位が発現し、天然砂のフラン2では、砂の熱膨張が非常に大きいため、加熱初期から破断まで熱膨張による+の変位のみが現れたことによると考えられる。また、以上の結果から、フラン1とフェノールはなりより性に優れ、フラン2では、なりより性が悪く、熱膨張により砂型が割れやすいことが予想される。

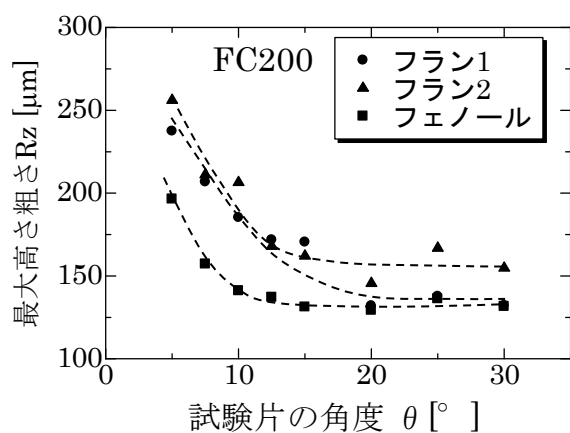


図8 作製した試験片（鑄鉄）の角度と傾斜部の表面粗さの関係

### 3. 7 溶製した試験片（鑄鉄）の表面粗さ

図8に表面粗さの測定結果を示す。傾斜部のRzは、試験片の角度が約15°まで一定で、フラン1：約130 μm、フラン2：約150 μm、フェノール：約130 μmであった。このRzの測定値は、平面のRzの測定値、フラン1：約130 μm、フラン2：約140 μm、フェノール：約130 μmと非常に近い値であった。この結果から、角度：15°程

度以上の傾斜部では、積層による段差が生じない（確認されない）と考えられる。

試験片の角度が15°以下になると、3条件とも、Rzは著しく大きくなり、試験片の角度が5°では、フラン1と2：約250 μm、フェノール約200 μmであった。角度：15°以下では、傾斜部のRzが平面のRzより著しく大きくなったことから、角度：15°以下の傾斜部のRzは積層による段差（凹凸）の影響を受けたと考えられる。以上の結果から、積層造形により作製した砂型を用いて溶製した鑄鉄では、積層段差は角度：15°程度以下で生じ（確認され）、角度が小さくなるほど、段差が大きくなることわかる。

### 4. 結論

種々の条件で積層造形試験片（砂型）を作製し、寸法精度、通気度、強度、表面安定度、熱間ひずみなどを測定し、積層造形で作製した砂型の特性を調べた。また、積層造形により作製した砂型を用いて鑄物を溶製し、表面粗さ（平面、段差）についても確認し、以下のことが明らかとなった。

- 1) 積層造形で使用されている砂は、AFSの粒度指数100以上の非常に細かい砂であった。
- 2) 積層造形により作製した試験片（砂型）の寸法差は、長さ：-0.25～+0.4 mm、高さ：-0.1～+0.7 mmであった。
- 3) 積層造形により作製した試験片（砂型）の通気度は80程度であった。
- 4) 積層造形により作製した試験片（砂型）の圧縮強さは、340～650 N/cm<sup>2</sup>で、曲げ強さはフラン：240 N/cm<sup>2</sup>、フェノール：420 N/cm<sup>2</sup>であった。
- 5) 積層造形により作製した試験片（砂型）の表面安定度は97%程度であった。
- 6) 積層造形により作製した試験片（砂型）は、フラン1とフェノールはなりより性に優れ、フラン2では、なりより性が悪く、熱膨張により砂型が割れやすいことが予想される。
- 7) 積層造形により作製した砂型を用いて溶製した鑄鉄（平面）の表面粗さはRz：130～140 μmであった。また、積層段差は角度：15°程度以下で生じ（確認され）、角度が小さくなるほど、段差が大きくなった。

## 参考文献

- 1) 素形材センター：“平成7年度型技術に関する動向調査報告書（鋳造用模型製造におけるRP技術と今後の方向）”. 素形材センター研究調査報告書, 498, (1996)
- 2) 素形材センター：“平成11年度RP最新技術動向と現状技術レベル調査研究報告書”. 素形材センター研究調査報告書, 550, (2000)
- 3) 金森陽一ほか：“AM技術の鋳造用模型への適用”. 三重県工業研究所研究報告, 40, p61-66 (2016)
- 4) K. Woods et al.: “Design considerations for three dimensional printed cores and molds”. AFS Transactions, 123, p169-182 (2015)
- 5) J.T. Svidro et al.: “Heat absorption capacity and binder degradation characteristics of 3D printed cores investigated by inverse fourier thermal analysis”. AFS Transactions, 123, p135-143 (2015)
- 6) 安達充ほか：“積層工法を用いた新しいモノづくりとその可能性”. 塑性と加工, 56,p118-123(2015)
- 7) 日本工業規格 JIS Z 2601：“鋳物砂の試験方法 附属書2 鋳物砂の粒度試験方法”. (一財)日本規格協会 (1993)
- 8) 日本工業規格 JIS Z 2601：“鋳物砂の試験方法 附属書3 鋳物砂の通気度試験方法”. (一財)日本規格協会 (1993)
- 9) 多品種少量生産型高能率鋳造技術連絡会議評価法ワーキンググループ：“有機鋳型の試験方法 有機鋳型の表面安定度試験方法”. 連絡会議報告書I, p7-8 (1986)
- 10) 奥山賢一郎：“有機自硬性鋳型に適した砂特性”. 公益財団法人日本鋳造工学会関東支部ホームページ, <http://www.j-imonos.com/column/daredemo/46.html>
- 11) 横井満男：“第2版 鋳型の生産技術”. 一般財団法人素形材センター, p283-325(2002)