

## 積層造形砂型の熱間特性に及ぼす塗型の影響

森 康暢\*, 金森陽一\*, 中野真紘\*

### The Influence of Mold Coating on Thermal Properties of 3D-printed Sand Molds Evaluated by Thermal Deformation Tests

Yasunobu MORI, Yoichi KANAMORI and Mahiro NAKANO

To improve hot strength of 3D-printed sand molds, the influence of foundry coating on thermal properties of the sand molds was investigated. The results of thermal distortion tests revealed that the type of coating influences on behavior up to the point of thermal destruction. All types of coating namely magnesia, aluminum silicate, graphite, graphite-magnesia and zircon prolonged the time to complete destruction, while having no influence on final strain amount. Temperature measurements carried out in thermal distortion tests demonstrated decreases in the rate of temperature rise for some types of coatings, suggesting that the insulation effect of the coatings is one of the factors contributing to the time prolongation.

Keywords: Three-dimensional Printing, Sand Mold, Casting Core, Coating, Thermal Distortion Test

#### 1. はじめに

砂型積層造形は、模型や金型を用いる従来の砂型造形法とは異なり、CAD データから直接砂型を造形する技術である。従来の加工プロセスの制約にとらわれず、複雑な3次元形状を一体で製作できる特徴があり、鋳造分野において迅速試作や少量生産のツールとして活用されている<sup>1)</sup>。砂型積層造形は、特に複雑形状の砂型造形に利点があり<sup>2)</sup>、複雑形状の砂型や中子の造形に適用するための研究が行われている<sup>3,4)</sup>。複雑形状の中子造形では、薄肉部の強度不足により折損欠陥が発生する<sup>5)</sup>ため、常温及び熱間で高強度な砂型が望まれる。伊藤らは、フランバインダを用いるインクジェット方式の砂型積層造形を中子へ適用する際の造形条件として、バインダ量と強度及びガス発生量の関係を報告している<sup>4)</sup>。これによると、バインダ量の増加によって常温及び熱間における強度が向上する。しかしながら、ガス発生量が増えてしまうことから、バインダ量を増加させずに、砂型を

高強度化する手法が望まれている。

塗型は、一般的に、溶湯と鋳型との間に物理的・化学的に安定な障壁を設け、焼付きを防止することで鋳肌を平滑にする目的で用いられている<sup>6)</sup>。塗型は砂型強度の向上を図る目的でも利用されており、酒井らは、アルミニウム鋳物用塗型剤として、アルミン酸ソーダ水溶液からなる強化液を開発している<sup>5)</sup>。また、J. Jakubski らは、一般的なフラン鋳型に塗型剤を施すことで、耐熱性が向上することを示している<sup>7)</sup>。一方で、塗型を積層造形砂型の熱間強度向上に適用を検討した例はほとんどない。また、塗型が砂型の熱間強度に及ぼす影響について、熱間圧縮試験等で直接的に測定することは容易ではない。そこで、本研究では高温に曝されたときに生ずるひずみ量を分析する熱間ひずみ試験<sup>8)</sup>に、熱電対による温度測定を組み合わせることで、砂型の熱間特性に及ぼす影響の検討を試みた。ひずみ量と時間の関係のみならず、温度との関係を調べることで、塗型が砂型の熱間特性に及ぼす影響のメカニズムを検討した。マグ

\* 金属研究室

ネシア, アルミナシリケート, 黒鉛, 黒鉛-マグネシア他, ジルコンを基材とするアルコール性塗型剤を用いて, 塗型剤を施した積層造形砂型の熱間特性に及ぼす影響の大きさを統計的に評価した.

## 2. 実験方法

### 2.1 砂型試験片の作製

砂型試験片の作製には, インクジェット式の砂型積層造形装置 (SCM-10, Cmet 社製) を用いた. 砂型試験の形状は, 通気度試験片  $\phi 50 \times 50$  mm, 曲げ試験片  $10 \times 20 \times 60$  mm 及び, 熱間ひずみ試験片  $22.5 \times 22.5 \times 200$  mm に  $\phi 3$  深さ 80 mm の穴が開いた試験片とした. 積層造形装置専用の砂 (GCCS) 及びバインダを用いて, 積層ピッチ 0.28 mm, かさ密度  $1.45 \sim 1.48$  g/cm<sup>3</sup>, バインダ量  $2.1 \pm 0.1$  % の条件で試験片を作製した. なお, バインダ量は JIS Z 2601:1993 に準ずる手順で強熱減量を測定して求めた.

### 2.2 塗型剤の塗布

本研究では基材の異なる 5 種類のアルコール性塗型剤を検討した. 表 1 に検討した塗型剤を示す. 各塗型剤は, メーカー指定の塗布濃度となるよう, 重ボーム計で測定しながらエタノールを適量添加した. 砂型への塗布方法はハケ塗りとし, 各砂型試験片の全面に塗型剤を施した. 塗布後 1 日自然乾燥させた後,  $105^\circ\text{C}$  で 3 時間乾燥させた. 塗型の膜厚については, マイクロメーターにより塗型前後の砂型寸法を測定し, その差より求めた. 実験は 3 回行い, 測定データはチューキーの多重比較検定<sup>8)</sup> (両側) により比較した. 検定の結果, p 値が 0.05 未満を統計的に有意差ありとした. 以下の 2.3 節および 2.4 節も同様である.

### 2.3 常温特性の評価

通気度測定は, 通気度試験片を用いて, JIS Z 2601:1993 のオリフィス法により行った. 強度試験には, 曲げ試験片を用い, 卓上型精密万能試験機 (AGS-10kNG, 島津製作所社製) により, クロスヘッド速度 5 mm/s, 支点間距離 50 mm の条件で 3 点曲げ強度を測定した.

### 2.4 改良した熱間ひずみ試験

熱間ひずみ試験では, 加熱時の変位量 (熱間ひずみ曲線) を調べる試験である. 各種塗型剤を施した試験片について測定することで, 熱影響時の砂型特性に塗型が及ぼす影響を評価できる<sup>9)</sup>. 本

実験では, 一般的な熱間ひずみ試験に, 熱電対による温度測定を組み合わせる測定を行った (これを改良した熱間ひずみ試験とする). これにより, ひずみ量と時間の関係のみならず, 温度との関係の評価を可能とした. 改良した熱間ひずみ試験は, 熱間ひずみ試験片を図 1 に示す実験装置に固定して行った. 室温からガスバーナーで砂型下部を加熱した際の変位量を, ひずみ計 (ID-S1012X, ミットヨ) で 5 秒毎に測定した. 同時に, 砂型試験片に熱電対を挿入し, 加熱部直上の砂型内部の温度を 1 秒毎に測定した. 試験片が破断に至るまで測定を継続した.

表 1 本研究で検討した塗型剤の基材と塗布濃度

基材	塗布濃度
マグネシア	55~65 Be
アルミナシリケート	35 Be
黒鉛	15~25 Be
黒鉛-マグネシア他	30~40 Be
ジルコン	65~70 Be

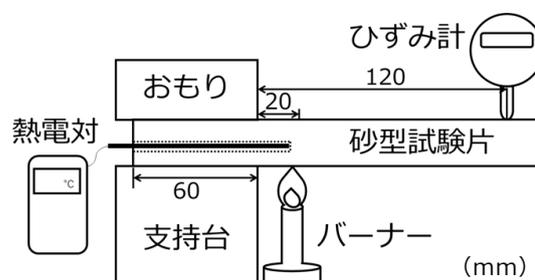


図 1 熱間ひずみ試験装置

## 3. 結果と考察

### 3.1 塗型の膜厚及び塗型による砂型特性への影響

図 2 に, 本研究の塗布条件で施された塗型の膜厚を示す. 図中の a, b 等の記号は, 多重比較検定の結果を示し, 同じ記号は有意差がないことを示す. 「ab」の様な複数の記号が付いている場合は, a と b の間の大きさであり, いずれに対しても有意差がないことを意味する.

本実験では, 各塗型剤をメーカー指定の塗布濃度に調整して用いたため, 必然的に塗型の種類に

よる膜厚に差が生まれた。黒鉛を基材とする塗型では、アルミナシリケートや黒鉛-マグネシア他を基材とする塗型の膜厚と比較して、有意差が確認された。その他の種類の塗型間の比較においては、有意差は認められなかったものの、膜厚の薄い塗型(a)と厚い塗型(b)の2段階の水準が認められた。以降で述べる測定結果の塗型間の比較においては、膜厚の違いによる影響を含んでいる可能性がある。

図3に塗型が積層造形砂型の通気度に及ぼす影響を示す。いずれの塗型剤を施した場合においても、塗型前と比較して、通気度は著しく低下した。塗型なしに対して、塗型剤を施したすべての条件で統計的に有意な差が確認された。砂型積層造形に使用される砂 (AFS 粒度指数 106<sup>10)</sup>) と比較して、一般的な塗型剤の基材には 50 μm 以下<sup>11)</sup> のかなり細かな粒子が用いられている。塗型によって、砂型表面の砂粒の空隙が埋められる、もしくは砂型表面に新たな表面が作り出されることにより、通気度が著しく低下したと考えられる。

図4に、塗型が積層造形砂型の常温強度に及ぼす影響を調べた結果を示す。アルコール性塗型剤を施すことで砂型が劣化して常温強度が低下する事例<sup>12)</sup>が報告されている。塗型剤を施した試験片と、施さない試験片で強度を対照して検討したところ、統計的な有意差は確認されなかった。本研究の実験条件であれば、塗型により砂型の常温強度は変化しないと考えられる。

### 3.2 改良した熱間ひずみ試験

図5に、塗型なし及び各種塗型剤を施した砂型について得られた熱間ひずみ曲線及び温度測定の一例を示す。バーナーの加熱により、砂型の温度は徐々に上昇するとともに、砂型下面が熱膨張することで上向き(正)の変位が、その後のさらなる加熱により砂型が軟化して自重による曲げモーメントやひずみ計の測定力(1.5 N)によって垂れ下がることで下向きの変位量(負)が測定された。図6にバーナーによる加熱時の様子及び破断した試験片の写真を示す。熱間ひずみ試験では、加熱によりバインダが燃焼されることで最終的に試験片が破断する<sup>7)</sup>。加熱部直上のみならず、加熱部の周辺のバインダが広く燃焼されることで、破断に至ったことが見受けられた。

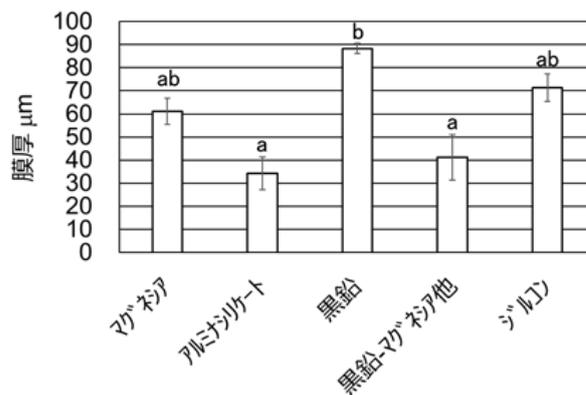


図2 塗型の膜厚

エラーバーは標準誤差を表す。(n=3)  
異なる英文字を付した数値間には 5%水準の有意差があることを示す (Tukey 法)。

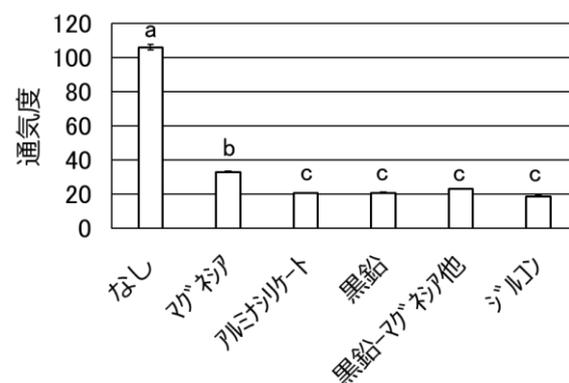


図3 塗型による通気度への影響

エラーバーは標準誤差を表す。(n=3)  
異なる英文字を付した数値間には 5%水準の有意差があることを示す (Tukey 法)。

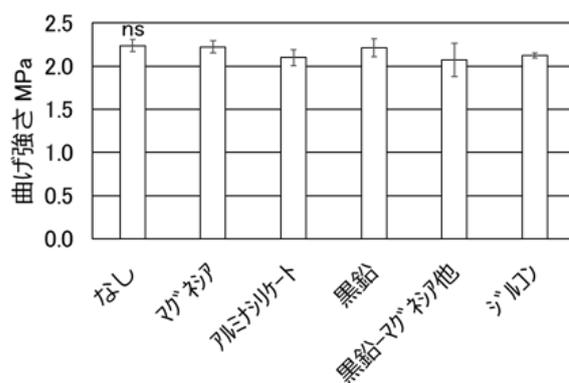


図4 塗型による曲げ強度への影響

エラーバーは標準誤差を表す。(n=3)  
「ns」は数値間に 5%水準の有意差がないことを示す (Tukey 法)。

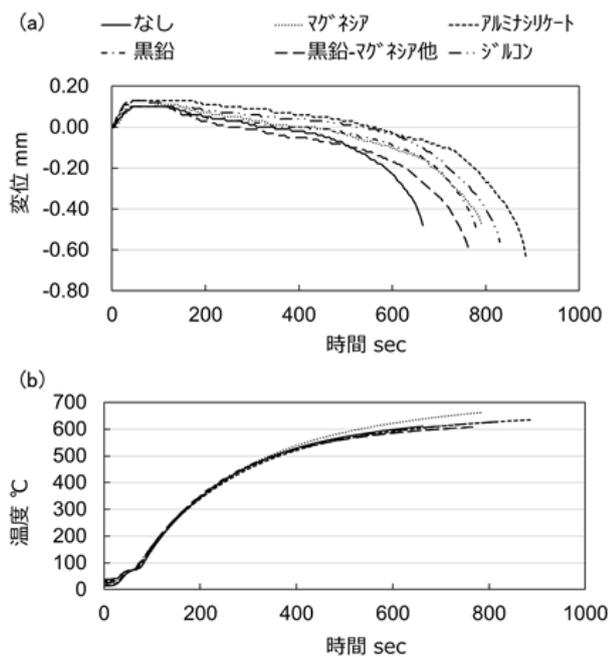


図 5 熱間ひずみ試験. (a)熱間ひずみ曲線及び(b)測定温度

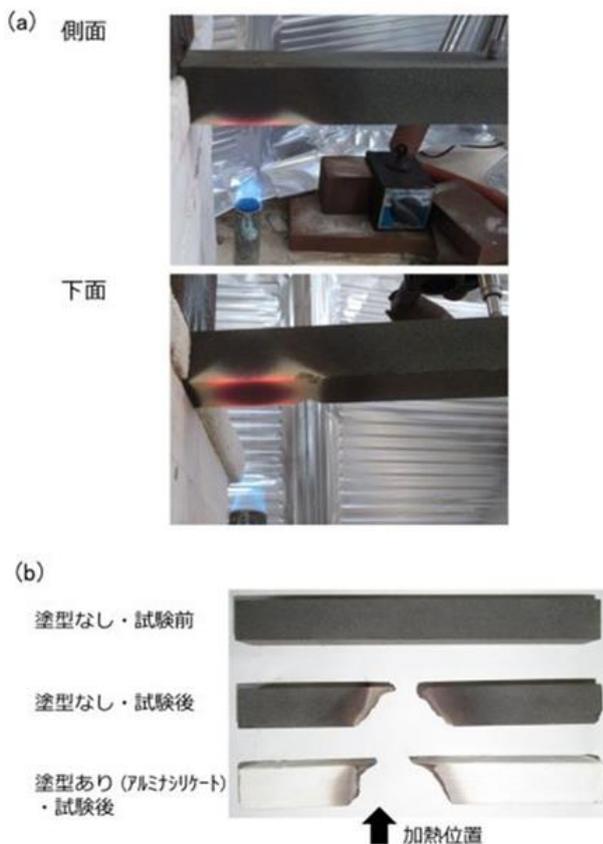


図 6 熱間ひずみ試験. (a)バーナーによる加熱及び (b)破断した試験片の様子

熱間ひずみ試験における変位量は、鋳物製品の形状や寸法精度の指標となる<sup>9)</sup>。加熱初期の段階で、いずれの条件においても熱膨張が確認された。熱膨張の程度は、いずれも 0.1 mm 程度と小さかった。本研究で用いた砂型積層造形専用砂はムライト系の人工砂であり、熱膨張率が小さいことに対応した結果であると考えられるが、砂型表面に塗型剤を施すことによる熱膨張への影響も小さいことが示唆された。また、図 7(a)に破断時の変形量（最終変位）を示す。最終変位において、塗型の種類による統計的な有意差は見られなかった。測定値のばらつきが大きく、標本数  $n=3$  と小さいため、有意差が認められなかった可能性もあるが、塗型が積層造形砂型の熱によるひずみ量に及ぼす影響は小さく、形状や寸法精度への影響はわずかであることが示唆された。

熱間ひずみ曲線から、塗型によって破断に至る時間（破断時間）が増加することが確認された。図 7(b)に塗型なし及び各種塗型剤を施した砂型について得られた破断時間を示す。塗型なしに対して塗型剤を施したすべての条件で破断時間が増加し、その増加量について統計的な有意差が認められた。塗型によって砂型の耐熱性が向上し、熱間強度が向上することが示唆される。一方で、塗型の種類によって破断時間の増加の程度は異なった。特に、アルミナシリケートを基材とする塗型において破断時間の増加が顕著であり、ジルコンを除く他の塗型との比較においても統計的な有意差が確認された。ジルコンでは、他の塗型剤と統計的な有意差こそ認められなかったが、アルミナシリケートとも有意差がなく破断時間の増加量は大きかった。アルミナシリケートやジルコンを基材とする塗型剤は、砂型の耐熱性の向上に効果的であると考えられる。なお、図 2 に示したアルミナシリケートの膜厚は有意差が認められなかったものの、他に比して薄いものであった。それにもかかわらず、破断時間が有意に長かったことは注目すべきである。今後、ジルコンも含め、膜厚を変えるなどデータ数を増やして検証していく必要があると考えられる。

熱間ひずみ試験を用いた先行研究<sup>7)</sup>において、塗型が従来の造形法で作製されたフラン砂型のひずみ量や破断時間に及ぼす影響が評価されており、塗型の種類がそれらに影響することが報告さ

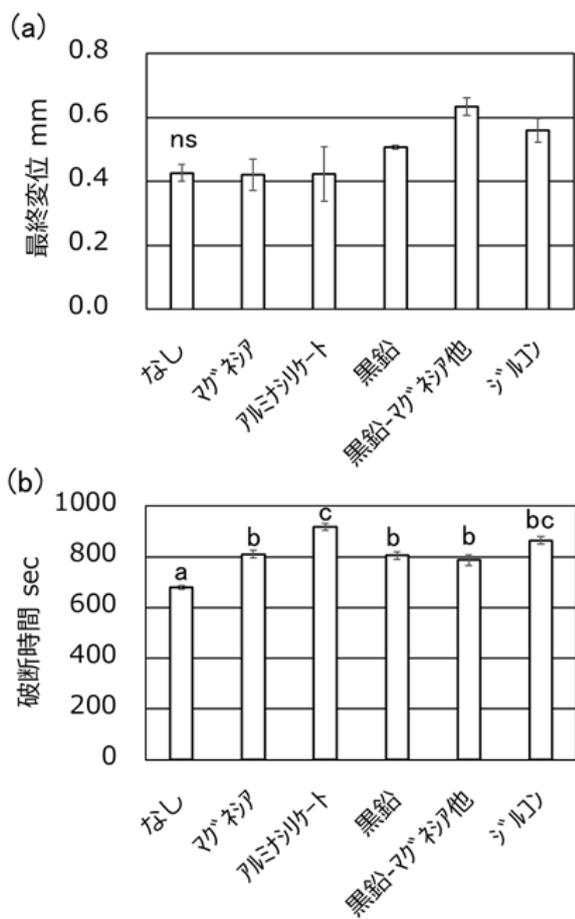


図7 熱間ひずみ試験. (a) 最終変位及び (b) 破断時間

エラーバーは標準誤差を表す. (n=3)  
異なる英文字を付した数値間には 5%水準の有意差があり, 「ns」は有意差がないことを示す (Tukey 法).

れている. 塗型剤の種類によって破断時間が増加すること, また, 破断時間を増加させる塗型剤としてジルコンが良好であるとの結果については, 本研究と一致する結果あった. 一方で, 熱によるひずみ量への影響の有無については本研究の結果と異なった. 熱間ひずみ試験に用いる砂型試験片のサイズなど実験条件が異なり, 単純に比較することはできないため, 観察された結果の差異が, 積層造形のフラン砂型に特有のものであるかについてはさらなる検討が必要である.

塗型によって砂型の耐熱性が向上した原因について, 加熱部直上の砂型内部温度の測定結果を用いて考察する. まず, 400~500 °C 間の温度上昇速度を代表値として, 塗型が砂型の温度上昇に及ぼ

す影響を整理した. 各種塗型剤を施した砂型において測定された温度上昇速度の塗型なしに対する比を図8に示す. この値は, 塗型による砂型内部への熱伝導の特性や, 塗型自身の比熱など, 様々な情報が合算された特徴量であると考えられる. 破断時間が顕著に増加したアルミナシリケートの場合では温度上昇速度が塗型なし比で約 10%低下していた. アルミナシリケートを基材とする塗型剤の低い熱伝導性 (高い断熱性) により, 砂型内部の温度上昇を抑制し, もってバインダの燃焼を抑制することで破断時間が増加したことが示唆される. また, 標準誤差が大きいものの, 黒鉛や黒鉛-マグネシア他を基材とする塗型剤においても温度上昇速度が低下する傾向がみられた. 一方, ジルコンでは温度上昇速度は塗型なしと同程度であった. また, マグネシアでは温度上昇速度が塗型なし比で約 10%増加した. マグネシアを基材とする塗型剤は高い熱伝導率 (低い断熱性) を示すことが示唆される. 温度上昇速度の低下が見られなかったジルコンやマグネシアにおいても破断時間の増加がみられたことから, 断熱性以外にも耐熱性を向上させる要因があることが示唆される.

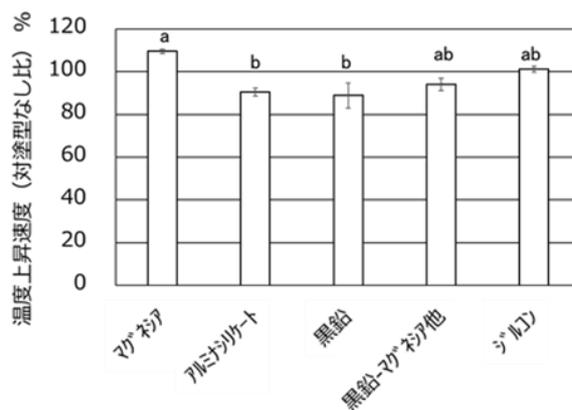


図8 熱間ひずみ試験. 温度上昇速度(対塗型なし比)

エラーバーは標準誤差を表す. (n=3)  
異なる英文字を付した数値間には 5%水準の有意差があることを示す (Tukey 法).

次に, 塗型が破断時の温度 (破断温度) に及ぼす影響を整理した. 塗型なし及び各種塗型剤を施した砂型について測定された破断温度を図9に示す. マグネシアを基材とする塗型剤を施した場合

に、塗型なしと比較して破断温度が高くなり、統計的な有意差が確認された。その他の塗型剤における破断温度は、塗型なしとの比較において統計的な有意差は見られなかったが、破断時間の顕著な増加が見られたアルミナシリケートやジルコンにおける破断温度については、マグネシアに次いで破断温度が高くなっていた。破断温度が上昇した理由には、塗型自体の高温強度等が考えられるが、原因は明らかでない。塗型が砂型の熱間強度に及ぼす影響の理解には、さらなる研究を要する。今回得られた結果をもとに鑄造試験等により塗型が熱間強度に及ぼす影響を評価し、検証していく必要がある。

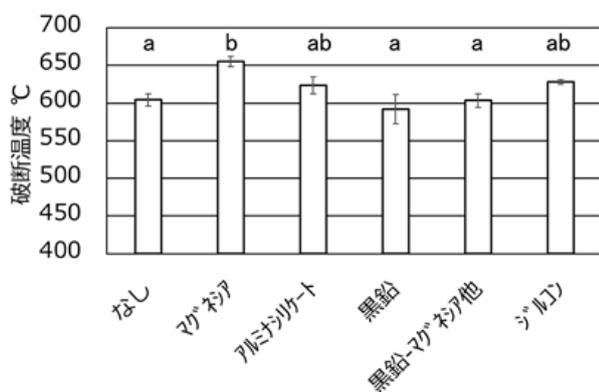


図9 熱間ひずみ試験. 破断温度

エラーバーは標準誤差を表す. (n=3)

異なる英文字を付した数値間には 5%水準の有意差があることを示す (Tukey 法).

#### 4. 結論

本研究において、フランバインダを用いるインクジェット方式の砂型積層造形装置で試験片を造形し、アルコール性塗型が砂型の常温及び熱間特性に及ぼす影響について、改良した熱間ひずみ試験により評価したところ、以下のことが明らかになった。

- 1) 積層造形砂型に塗型剤を施すことで、通気度が著しく低下する。
- 2) 積層造形砂型に塗型剤を施しても、常温強度は低下しない。
- 3) 積層造形砂型に塗型剤を施しても、熱間ひずみ試験における破断時のひずみ量は変化しない。
- 4) 積層造形砂型に塗型剤を施すことで、熱間ひずみ試験における破断時間が増加する。塗型剤の

種類によって増加の程度には違いがあり、特にアルミナシリケートやジルコンを基材とする塗型剤で顕著である。耐熱性が向上し、熱間強度を向上させる可能性が示唆される。

5) 積層造形砂型に塗型剤を施すことで、熱間ひずみ試験における破断時間が増加する要因の1つは、塗型によって断熱性が付与されるためであると考えられる。

#### 謝辞

本研究にあたり塗型剤を提供いただいた株式会社トウチュウ名古屋営業所様に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 岡根利光ほか：“3D プリンターの砂型造形への適用による鑄造品と鑄造技術の高度化”，鑄造工学, 90(6), p266-273 (2018)
- 2) E. S. Almaghariz et al.: “Quantifying the role of part design complexity in using 3D sand printing for molds and cores”. Inter Metalcast., 10, p240–252 (2016)
- 3) 岡根利光：“Additive manufacturing の鑄造技術への応用と砂型用高速積層造形装置の開発”。精密工学会誌, 82(7), p629-633 (2016)
- 4) 伊藤恭祐ほか：“砂型積層造形を中子へ適用する差異の造形条件の検討”。三重県工業研究所研究報告, 45, p24-30 (2021)
- 5) 酒井 徹ほか：“薄肉中子強化用塗型剤の開発”，鑄造工学, 74(11), p731-735 (2002)
- 6) 中山 進ほか：“鑄型の生産技術”。(一財)素材材センター, p267 (1995)
- 7) J. Jakubski et al.: “The influence of the protective coating type on thermal deformation of casting cores”. Archiwum Odlewnictwa, 5(15), p164-169 (2005)
- 8) J.W. Tukey: “Comparing individual means in the analysis of variance”. Biometrics, 5(2), p99-114. (1949)
- 9) W. Emilia et al.: “Impact of penetration depth of protective coating on thermal deformation of masses determined by the hot distortion parameter”. Prace. IOd., 57(1), p51-57 (2017)
- 10) 金森陽一ほか：“積層造形により作製した砂型の特性”。三重県工業研究所研究報告, 41, p95-

101 (2017)

11) J. Campbell: "Complete casting handbook (second edition)". Butterworth-Heinemann, p159 (2015)

12) U. C. Nwaogu et al.: "Foundry coating technology: A review". Materials Sciences and Applications, 2(8), p1143-1160 (2011)