

砂型積層造形を中子へ適用する際の造形条件の検討

伊藤恭祐*, 金森陽一*, 中野真紘*

Study of Molding Conditions for Application to Casting Core of Three-dimensional Printed Sand Molds

Kyosuke ITO, Yoichi KANAMORI and Mahiro NAKANO

Sand molds, which were assumed to be casting cores, were made using three-dimensional printed sand molding under various molding conditions. The relationships of strengths and thermal strains against bulk densities and binder amounts were experimentally obtained, and the conditions of making casting core were investigated. As a result, it was found that the binder amount was optimal at 2.6 %, and that a coating treatment was effective in particular for the sand molds with a large bulk density.

Keywords: Three-dimensional Printing, Sand Mold, Casting Core, Binder Jetting, Modeling Conditions

1. はじめに

砂型積層造形（砂型の設計→砂型の造形→鋳造（砂型への鋳込み））は、既存技術（砂型の設計→模型の製作→砂型の造形→鋳造）に比べ、短期間での試作、設計変更への柔軟な対応、分割面が不要、抜け勾配が不要などの優れた特徴を有する技術である¹⁾。当所では、積層造形砂型の特性について強度²⁾、表面粗さと積層段差³⁾を報告した。また、富田らが積層造形砂型における造形方向と強度の関係⁴⁾、伊藤らが積層造形砂型における熱間強度⁵⁾について報告しているが、密度、バインダー量と強度の関係、特に熱間ひずみとの関係に関する研究については、ほとんど見受けられない。

中子はシェル中子が一般的に知られているが、シェルモールド法は量産に適しているものの、金型で作製することから試作するには適していない。そのため、中子の試作にはフランなどの有機自硬性鋳型が用いられている。

鋳物形状が複雑化するにともない中空部分の狭小化が避けられず、中子を薄肉にすることが求め

られている。しかしながら、中子を薄肉とすることにより中子の強度不足による中子の折損が発生する⁶⁾。中子の強度を向上させるには添加剤を増加せざるを得ないが、その場合ガス欠陥が生じる。つまりは、中子割れを防ぐためには添加剤を増す必要があるが、その一方でガス欠陥を防ぐために添加剤を減らす必要がある⁷⁾。

そこで本研究では、砂型積層造形が薄肉複雑形状の中子を造形できることに着目し、中子を想定した砂型を作製した。そして、作製した積層造形砂型の密度、バインダー量に対する強度及び熱間ひずみの関係を調査し、中子割れやガス欠陥を防ぐことのできる中子造形条件を検討したので報告する。

2. 実験方法

2.1 砂型の作製

実験に使用した砂型として、中子を想定し、棒状の砂型試験片 22.5×22.5×200 mm 作製した。図 1 に示すように砂型試験片は長辺を造形方向と平行に配置し、1回の造型で左、中、右の各領域で7本、計 21 本作製した。次に造形条件を表 1 に示す。使

* 金属研究室

用する砂は専用の人工砂 CCS, バインダーは専用のフランで, バインダー量については, 設定値として, 標準バインダー量の 2.1 %に加え 1.8 %, 2.6 %, 3.1 %とした. なお, 砂型試験片から 20 g の砂を採取し, 800 °C, 3 時間の強熱減量を測定し, 実バインダー量を求めた. バインダー量のばらつきは±0.1 % (上・下限) である. また, 砂を引くりコーターの速度を 50 mm/s と 100 mm/s の 2 通りに設定し, 1.38-1.53 g/cm³ の範囲のかさ密度の試験片を造形した. ここで, 両速度, いずれもばらつきが大きかったため, 速度との対応は考慮せず, 単に, かさ密度との対応で曲げ強さおよび熱間ひずみを検討した. なお, 造形には当所所有のインクジェット方式の砂型積層造形装置 (SCM-10 シーメット (株)) を用いた.

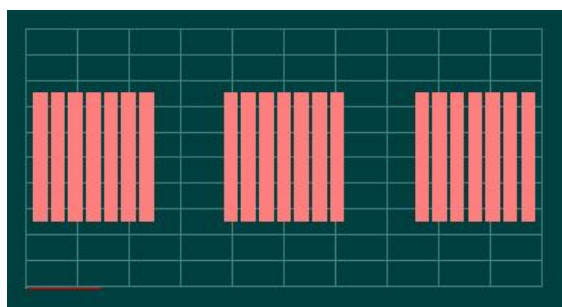


図 1 砂型試験片造形配置図

表 1 造形条件

砂	専用人工砂 CCS
バインダー	専用バインダー フラン 2.1 % (±0.1), 1.8 % (±0.1), 2.6 % (±0.1), 3.1 % (±0.1)
積層ピッチ	0.28 mm
かさ密度	1.38~1.53 g/cm ³

2.2 強度試験

作製した砂型試験片の強度を把握するため, 曲げ強さ測定を実施した. 測定機は卓上型精密万能試験機を用い, クロスヘッド速度 300 mm/s, 支点間距離 150 mm の条件で 3 点曲げ試験を行った.

2.3 ガス量試験

作製した砂型試験片から発生するガス量の測定を実施した. ガス量測定は, 砂型から試料を 10 g サンプルングし, 石英管に入れた. 次に 1000 °C に加熱した炉に試料の入った石英管を投入し, 試料

から発生したガス量を流動パラフィン入りシリンダで読み取った. ガス発生量測定のタイミングは 180 秒まで 15 秒毎, それ以後は 30 秒毎とした. これを 2 回実施し, 平均値を求めた. なお, 積層造形砂型と比較するため, 鑄造工場から入手した一般的なフラン鑄型も同様にガス量を測定した.

2.4 熱間ひずみ試験

作製した砂型試験片の熱による影響を把握するため, 熱間ひずみ試験を実施した. 熱間ひずみ試験とは金属でいえば熱に対する強度を調べるクリープ試験に相当するものである. 試験の状況を図 2 に示す. 熱間ひずみ試験は, 試験片の片側を固定し, 固定側の端から 80 mm の位置の下部をバーナーで加熱した. 変位を測定する機器はデジタルゲージを用い, 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 の上面とし, 変位測定位置には 100 g の荷重をかけた. 30 秒ごとにデジタルゲージに表示される変位を読み取って記録し, 試験片が破断するまで測定を行った.



図 2 熱間ひずみ試験状況

2.5 塗型の効果

作製した砂型試験片に塗型をし, 塗型の効果を調査した. 塗型剤には鑄鉄用白色系アルコール性塗型剤で, 成分は固定炭素 11.9 %, 揮発分 2.7 %, その他 (SiO₂, MgO, Fe₂O₃ ほか) 85.4 % のものを使用した. 使用した塗型剤はエタノールで 35 ボーメに調整し, 砂型試験片の表面に刷毛を用いて塗型剤を塗布し, 自然乾燥した後に, 先に述べた熱間ひずみ試験を実施した.

3. 実験結果と考察

3.1 強度試験

かさ密度と曲げ強さの関係を図 3 に示す. 作製

した砂型試験片は曲げ強さ 1.5-6.0 N/mm² の範囲であることが分かった。積層造形により得られた砂型は同じかさ密度でバインダー量が増えれば、曲げ強さは大きかった。また、かさ密度と曲げ強さにも小さいながらも相関があり、かさ密度が大きくなるにつれて曲げ強さも大きくなった。その比例係数はバインダー量が 1.8%から 3.1%に増えるほど、直線の傾き、すなわちかさ密度の変化量に対する曲げ強さの増加量の比率は大きいものとなった。なお、一般的なフラン鑄型ではバインダー添加量は約 1.0%で圧縮強さは 4.0 N/mm² 程度⁸⁾とされており、本研究のバインダー添加量はそれに比べてかなり大きな値となっている。ここで、圧縮強さ 4.0 N/mm²を求めるとすれば、曲げ強さは 2.5 N/mm²程度²⁾ 必要になると考えられる。したがって、今回造形した砂型のかさ密度の範囲内でそれと同等の曲げ強さを得るには、バインダー量 2.1%以上添加する必要があることが分かった。すなわち、積層造形砂型では、砂を積層しながらバインダーを塗布して造形していくため、強度を出すには一般的なフラン鑄型のバインダー量の 2.1 倍程度添加しなければならないことが明らかとなった。なお、今回の実験では、試験片の長辺を造形方向と平行に配置した。そのため、強度に関しては、今後、造形方向に垂直な方向についても調査する必要がある。

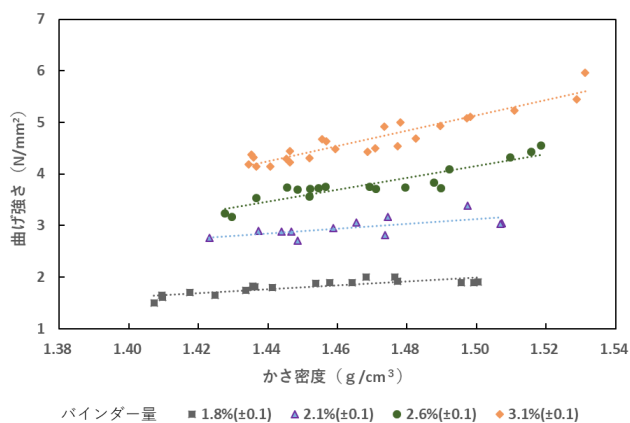


図3 異なる条件で作製した砂型試験片のかさ密度と曲げ強さの関係

3.2 ガス量試験

かさ密度とガス量の関係を図4に示す。バインダー量 2.1%でかさ密度の違う3個の試料と比較すると、3個ともガス量は 8.7 mL/g 程度であり、

かさ密度を変えても砂型から発生するガス量は変わらないことが分かった。ただし、かさ密度の増加に従い直線的に通気度が低下する⁹⁾ため、砂型から発生するガス量は同じでも、通気度が低いと鑄造品にガス欠陥が生じる恐れは残っている。

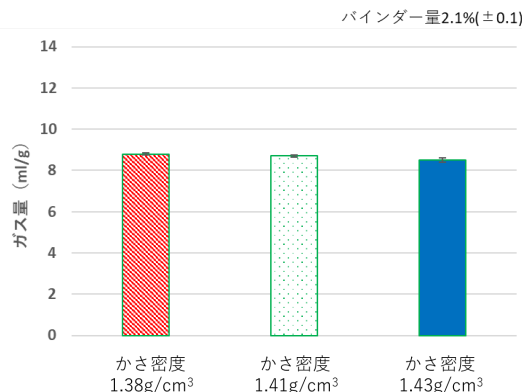


図4 かさ密度とガス量（エラーバーは標準偏差）の関係

次にバインダー量とガス量の関係を図5に示す。1.8, 2.1, 2.6, 3.1%の各バインダー量の積層造形砂型から発生するガス量はそれぞれ 7.3±0.1, 8.7±0.05, 10.4±0.1, 11.7±0.1 mL/g (sample mean±sample standard deviation)であることが分かった。このように、バインダー量とガス量には強い比例関係があり、積層造形により得られた砂型はバインダー量が増えれば比例的にガス量が増加する。砂型から発生するガス量については鑄造する際、製品の欠陥の原因になるため、発生量を抑えたいが、バインダー量を少なくすると先ほど述べたように砂型の強度が低下する。

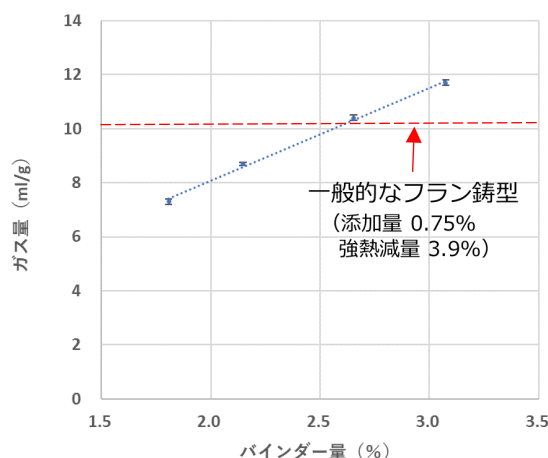


図5 バインダー量とガス量（エラーバーは標準偏差）の関係

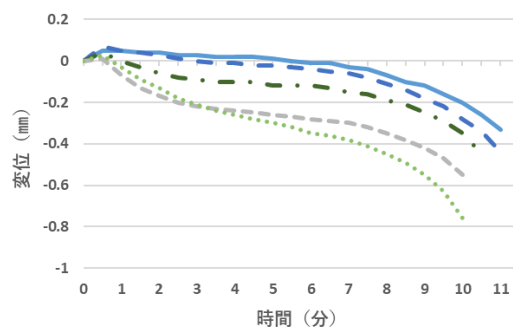
実際、鑄造工場で使用しているフラン鑄型のガス量を調べたところ、 10.2 ± 0.25 mL/g (sample mean \pm sample standard deviation) であった。なお、鑄造工場での聴き取りによりフランの添加量は 0.75 % であったが、強熱減量を測定するとイグロスの影響があり 3.9 % であった。そのため、得られたグラフから積層造形砂型のガス量を一般的なフラン鑄型のガス量と同等程度に抑えるためには、バインダー量を 2.6 % 以下にする必要があると考えられる。

3.3 熱間ひずみ試験

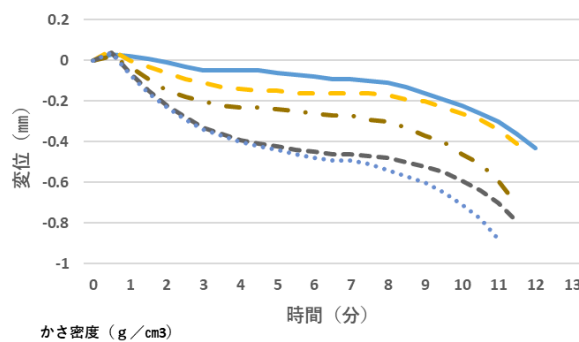
それぞれのバインダー量での熱間ひずみ曲線を図 6 に示す。砂型試験片を加熱すると、当初、下面の熱膨張が上面より大きいため上向き（正）に変位する。その後、加熱による全体の軟化が生じ下向き（負）に大きく変位する。さらに加熱すると、ほぼ一定の速さでの負の変位が続き（以下、この区間を「停滞時間」とよぶ）、最終的には急速な負の変位を経て破断する。全てのバインダー量に共通して言えるのは、熱間ひずみ曲線はかさ密度が小さいものほど負の変位が大きくなることである。特に、経過時間 3 分まで異なったかさ密度間での変位の開きが生じている。つまりは、かさ密度の小さいものほど変位が大きく、加熱初期の軟化が大きいと言える。これらの特性は全てのバインダー量の間で共通していた。

バインダー量の違いで熱間ひずみ曲線を比較してみると、バインダー量が多くなるにつれて、変位は全体的に小さくなるとともに、各バインダー量におけるかさ密度の異なる曲線は互いに近づいているように見える。すなわち、バインダー量が多くなるにつれて、かさ密度の大きいものは軟化し難かったものがいくらか軟化するようになり、かさ密度の小さいものは大きく軟化していたものが難化の程度がいくらか軽くなったためと考えられる。この結果から、バインダー量 2.6 % 以上であれば、当初の熱膨張、それに続く停滞時間における適度な軟化、そして最後の破断に至る理想的な熱間ひずみ曲線¹⁰⁾を示す傾向があると言える。なお、経過時間約 3 分から変位の停滞が発生し、特にバインダー量 2.6 % から顕著になっていくように見受けられる。その停滞時間における変位速度は同じかさ密度の条件で比較すると、バインダー量の多いものほど小さく、停滞時間そのものはバ

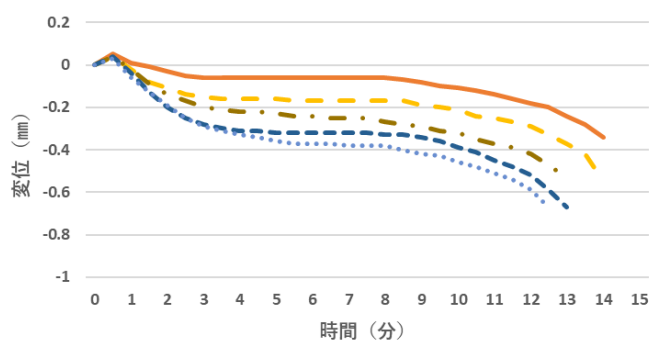
インダー量が多いものほど長くなっていく。例えば、バインダー量 2.6 % はかさ密度 1.45 g/cm³ で 4 分から 9 分まで約 5 分間停滞している。これに対して、バインダー量 3.1 % は同程度のかさ密度と比較すると 4 分から 11 分まで約 7 分間停滞しており、バインダー量 2.6 % に比べ、2 分間停滞時間が延びている。このことが、最終的な破断時間の長時間化につながっている。



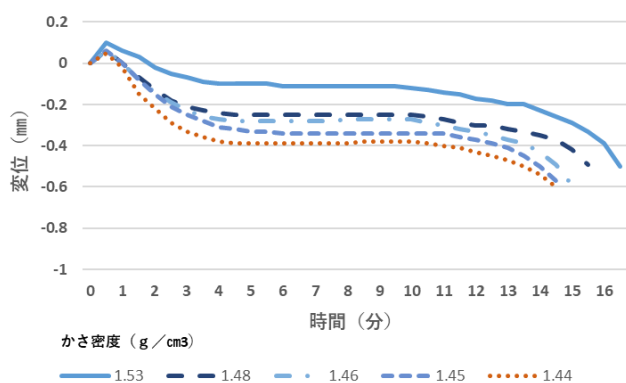
a) バインダー量 1.8 %



b) バインダー量 2.1 %



c) バインダー量 2.6 %



d) バインダー量 3.1 %

図 6 熱間ひずみ曲線

かさ密度と破断時間の関係を図 7 に示す。バインダー量が多くなれば、破断時間も延びる。これは、先ほど述べたように、バインダーが多いと加熱の途中で変位速度の低い停滞時間が長くなるため、結果的に破断時間が長くなったと考えられる。破断時間は、例えばかさ密度が同程度という条件下で、バインダー量 3.1% は 1.8% に比べて、4 分 30 秒程度も長くなった。なお、その一方で、同じバインダー量であれば、かさ密度が大きくなると、僅かではあるが、破断時間が長くなった。

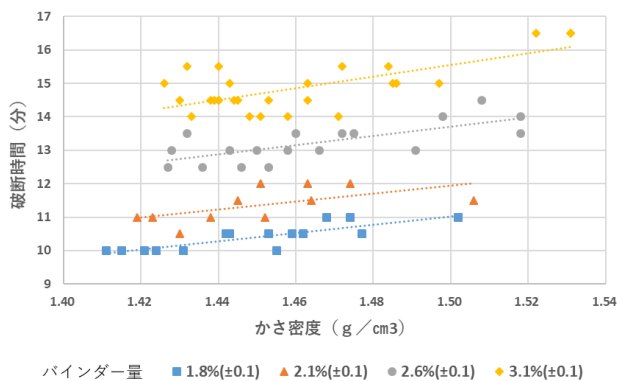


図 7 異なる条件で作製した砂型試験片のかさ密度と破断時間の関係

かさ密度と最終変位の関係を図 8 に示す。この関係はばらつきが多いため、直線近似が困難であるので、集団として比較する。なお、変位は負値であるため、以下の記述における「最終変位」はその絶対値を表すものとする。バインダー量が多くなれば、最終変位は大きくなる傾向にあるように思われる。一方、バインダー量が同じ場合には

かさ密度が大きくなるにつれて最終変位が小さくなるのは、熱間ひずみ曲線がかさ密度が大きいもののほど変位が小さい曲線を描くことに対応している。

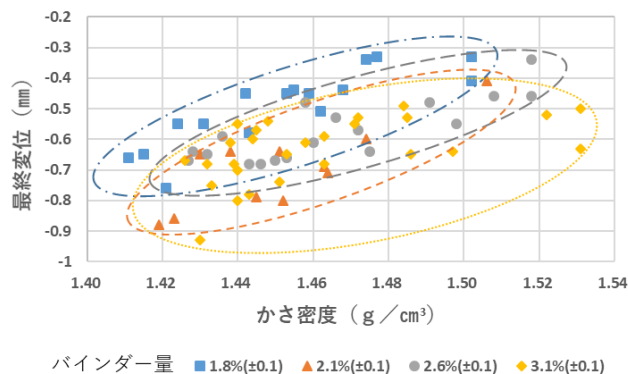


図 8 異なる条件で作製した砂型試験片のかさ密度と最終変位の関係

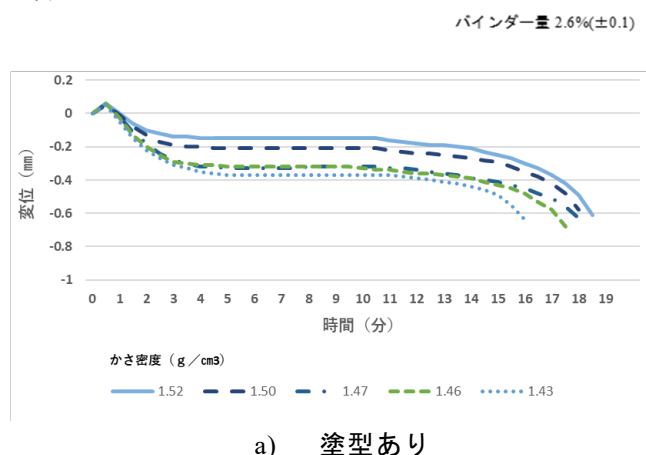
以上のことを踏まえて、熱による砂型の耐久性について考える。用途にもよるが、破断時間を延ばすことにつながる停滞時間を長くするためには 2.6% 以上のバインダー量が必要であることが示された。なお、かさ密度についても大きくなれば、破断時間は延びる傾向にあることが示された。

3.4 塗型の効果

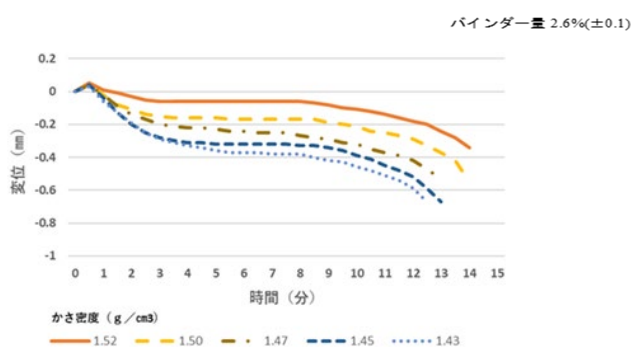
強度試験，ガス量試験，熱間ひずみ試験の結果を踏まえ、本実験の方法では、バインダー量として 2.6% が適していることが導かれた。そこで、バインダー量 2.6% の砂型試験片に塗型をし、熱間ひずみ試験で得られた曲線を図 9 に示す。塗型ありの熱間ひずみ曲線 (図 9(a)) に示すように、塗型なしの熱間ひずみ曲線 (図 9(b), 図 6(c)再掲) のように、最初、上向き (正) に変位し、すぐさま軟化により下向き (負) に変位する。その後、長い停滞時間を経て破断する。この停滞時間は、例えばかさ密度 1.46 g/cm³ で 8 分間であり、塗型なしの砂型試験片で同程度のかさ密度の試験片において得られた停滞時間 5 分間と比べると、同じバインダー量 2.6% であるにもかかわらず、3 分間長くなった。この停滞時間はバインダー量 3.1% で塗型なしのものに比べても 1 分間長くなった。この停滞時間の差は、破断時間の差につながっている。

塗型によるかさ密度と破断時間の関係を図 10 に示す。各バインダー量において、塗型ありは、

塗型なしと比べると、4分から5分程度破断時間が長くなっている。さらに、「塗型ありバインダー量 2.6%」は「塗型なしバインダー量 3.1%」よりも2分から3分程度長くなっている。つまり、バインダー量を増加しなくても、塗型をすることで砂型の熱への耐久性を上げることができることが分かった。



a) 塗型あり



b) 塗型なし (図 6(c)再掲)

図 9 塗型による熱間ひずみ曲線の比較

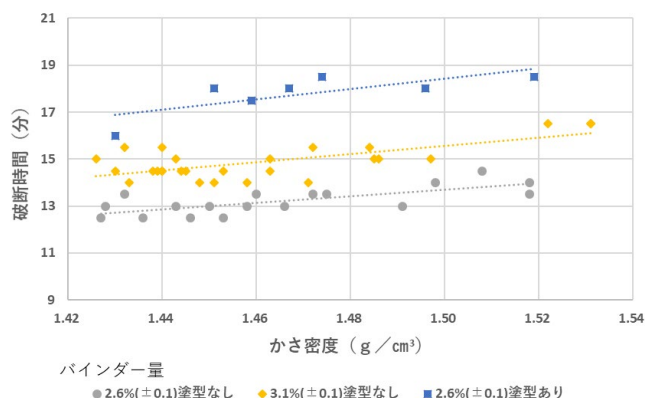


図 10 塗型によるかさ密度と破断時間の関係

また、塗型は最終変位にも影響を与えており、図 11 に塗型によるかさ密度と最終変位の関係を示す。塗型なしの場合にはかさ密度が大きくなる

と(絶対値としての)最終変位が小さくなるというように、最終変位はかさ密度に対して負の相関を示していた。これに対して、塗型をすることでかさ密度が大きくなっても最終変位の変化量が小さかった。これは、かさ密度が大きくなっても、塗型をすることで変位の変化量が小さく安定した砂型が得られることを意味する。以上のことから、かさ密度の大きい砂型に塗型をするのが、熱に対する耐久性を上げるには適していると言える。

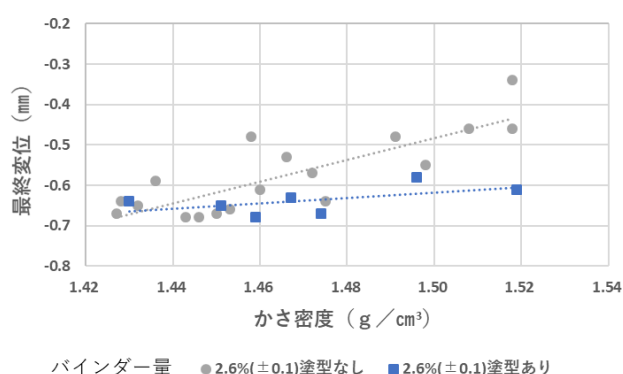


図 11 塗型によるかさ密度と最終変位の関係

4. 結論

本研究では砂型積層造形装置を用いて造形条件を変えて中子を想定した砂型を作製し、密度、バインダー量と強度及び熱間ひずみとの関係を調査し、中子の造形条件を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 今回造形した砂型のかさ密度の範囲内で一般的なフラン鑄型と同等の曲げ強さを得るには、バインダー量 2.1%以上の添加が必要である。
- 2) 砂型のかさ密度を変えても砂型から発生するガス量は変わらない。
- 3) 積層造形砂型のガス量を一般的なフラン鑄型のガス量と同等程度に抑えるためには、バインダー量を 2.6%以下にする必要がある。
- 4) 熱による砂型の耐久性の観点から考えると、2.6%以上のバインダー量が必要である。
- 5) かさ密度の大きい砂型に塗型をするのが、熱の耐久性を上げるには最適である。

以上を踏まえると、薄肉複雑形状品である中子の条件としては、本実験によりバインダー量を 2.6%とし、かさ密度の大きい砂型に塗型をすることが導かれた。

謝辞

塗型剤を提供していただいた株式会社トウチュウ名古屋営業所様, ガス量測定にご協力いただいた群栄化学工業株式会社様, 付記して謝意を表します.

参考文献

- 1) 岡根利光ほか：“3D プリンターへの適用による鑄造品と鑄造技術の高度化”. 鑄造工学, 91(6), p266-273 (2018)
- 2) 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)
- 3) 金森陽一ほか：“積層造形砂型の表面粗さと積層段差”. 三重県工業研究所研究報告, 44, p36-39 (2020)
- 4) 富田祐輔ほか：“積層造形砂型における造形方向と強度の関係”. 公益社団法人日本鑄造工学会全国講演大会概要集, 172, p61 (2018)
- 5) 伊藤厚司ほか：“積層造形砂型における熱間強度向上技術の開発”. 公益社団法人日本鑄造工学会全国講演大会概要集, 169, p119 (2017)
- 6) 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)
- 7) 鈴木伸二：“中子造型技術と砂”. 素形材技術セミナー, p27-34 (2018)
- 8) 横井満男：“第2版 鑄型の生産技術”. 一般財団法人素形材センター, p286-294 (2002)
- 9) 柏井茂雄ほか：“積層造形鑄型の特性に及ぼす装置要因の調査”. 公益社団法人日本鑄造工学会全国講演大会概要集, 176, p151-152 (2020)
- 10) 関根新一：“第2版 鑄型の生産技術”. 一般財団法人素形材センター, p562-564 (2002)

(本研究は, 法人県民税の超過課税を財源としています.)