

積層造形砂型に付着する砂の質量に及ぼす造形条件の影響

中野真紘*, 金森陽一*

Effects of Molding Conditions on Mass of Sand Adhering to Sand Molds Made by Additive Manufacturing

Mahiro NAKANO and Yoichi KANAMORI

The effects of molding conditions on the mass of sand adhering to sand molds made by binder jetting additive manufacturing were experimentally investigated. As a result, the mass of sand adhering to sand molds changed depending on the relative humidity in the device, binder content and sand mold shape. On the other hand, it did not change significantly with curing time from the completion of molding to removal of sand molds. Finally, it was clarified that the mass of sand adhering to sand molds with different shapes increased as the surface area of sand molds cavity increased.

Keywords: Binder Jetting, Additive Manufacturing, Sand Mold, Furfuryl Alcohol, Sintered Artificial Sand

1. はじめに

鑄造用砂型におけるバインダジェット式積層造形（以下、積層造形と記す）では、3D-CAD データから直接的に砂型を造形するため、模型を必要とせずに複雑形状の砂型を作製することができる。また、従来の砂型造型と比較して、設計変更が容易であり、模型作製にかかる時間やコストを抑えられる^{1,2)}。この技術は自硬性鑄型のプロセスを活用しており、硬化剤をコーティングした人工砂の敷詰め（リコート）と、設計位置への樹脂であるバインダの塗布を繰り返して積層した後、一定時間において硬化させることで砂型が得られる¹⁻³⁾。図1に造形プロセスの模式図を示す。作製した砂型は、バインダを塗布していない部分の硬化していない砂（以下、未硬化砂と記す）に覆われているが、鑄造時の欠陥発生の原因となる⁴⁾ため、砂型として使用するためには、この未硬化砂を完全に除去する必要がある。未硬化砂には、砂型を

回転・左右揺動などして重力により除去することが可能な砂（以下、簡易除去砂と記す）と、重力による除去が困難な砂型周辺に付着した砂（以下、付着砂と記す）とに分類できる。簡易除去砂および付着砂の模式図を図2に示す。この未硬化砂を除去する工程は、一般的な自硬性鑄型造型には無い工程であるが、未硬化砂の除去に手間と時間を要するため、積層造形における課題の一つとなっている。

これまでに、積層造形により作製した砂型に関

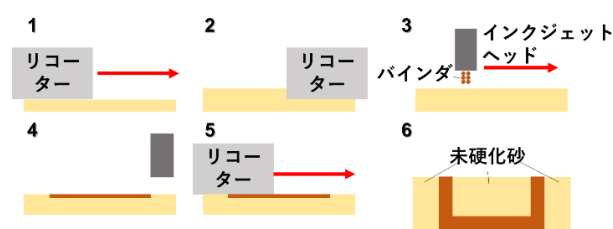


図1 バインダジェット式積層造形の砂型造形プロセス

* 金属研究室

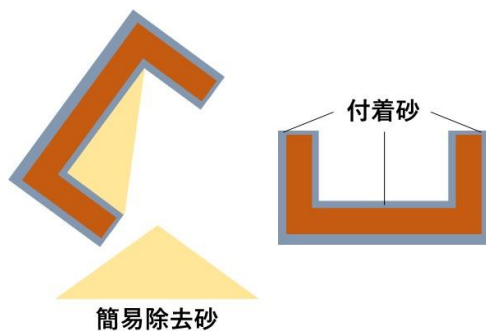


図2 簡易除去砂と付着砂の模式図

して、未硬化砂排出用の穴を設けるなど砂型設計により未硬化砂の除去を容易にする方法について検討されている^{4,5)}。しかし、未硬化砂を簡易除去砂と付着砂とに分類し、それらに着目して評価した報告は見当たらない。

そこで、本研究では、バインダにフラン樹脂を用いた積層造形により作製した砂型について付着砂を定量的に評価するとともに、付着砂の質量に及ぼす造形条件（装置内部の相対湿度、硬化時間、バインダ量および砂型形状）の影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法

2.1 砂型の造形

砂型積層造形装置（SCM-10、シーメット（株）製）により、装置専用の人工砂およびバインダを用いて砂型を作製した。積層ピッチを 0.28 mm、バインダ量については 2.1 ± 0.1 % を基本条件とした。また、バインダは砂の質量に対する添加量である。バインダ量の影響を調査する実験では、基本条件のほか 1.8 ± 0.1 % と 3.0 ± 0.1 % を追加した 3 条件とした。

本装置の造形エリアは 800 mm×400 mm×400

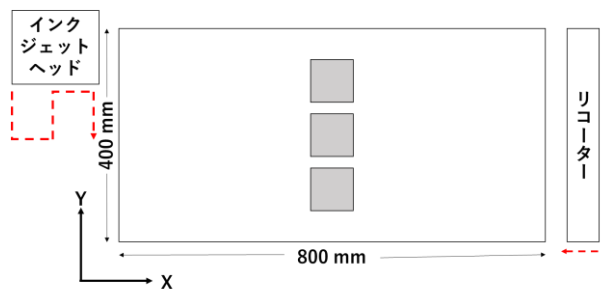
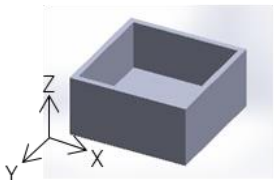
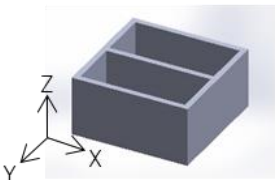
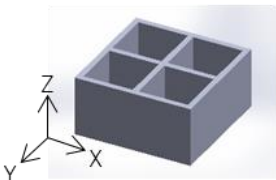
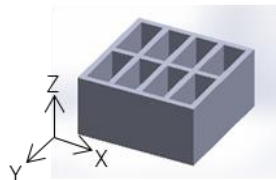


図3 造形配置

mm (X×Y×Z) である。造形配置を図3に、作製した砂型の外観を表1に示す。本装置で作製した砂型のかさ密度は、造形位置に依存することが確認されている。すなわち、X方向の左から右に向かってかさ密度が大きくなる傾向を示す。これは、リコーターにより砂がX方向の左から右にリコートされるためである。一方、Y方向のかさ密度の差は小さいことが確認されている。そこで、X座標を固定し、Y方向に同一の砂型を3点配置して砂型を作製した（標本サイズ、つまりn数は3となる。）。砂型aは、100 mm×100 mm×50 mmの直方体に90 mm×90 mm×40 mmの空洞部を設けた柵状の形状とした。また、空洞部におけるX-Y方向2辺とZ方向1辺との角度は90°とした。砂型形状による付着砂の質量の変化を調査する実験では、砂型aの空洞部の表面積を変化させた砂型bおよびc、dを作製した。砂型b、cおよびdは、砂型aの空洞部に厚さ5 mmの内壁の数を増やすことで表面積を大きくしている。なお、砂型b、cおよびdの空洞部におけるX-Y方向2辺とZ方向1辺との角度は90°である。

装置動作中から砂型取り出しまでの間は、空調等により、装置内部を温度 20-25 °C、相対湿度 40 %RH 以下の環境下に制御した。

表1 作製した砂型の外観

			
砂型a	砂型b	砂型c	砂型d

2.2 付着砂の定量

砂型外周部の付着砂について、装置から砂型を取り出す際に手で触れるため、評価の対象とすることができない。そこで、本研究では、砂型空洞部の付着砂を評価対象とし、砂型外周部の付着砂は評価対象外とした。付着砂の定量方法を以下に述べる。2.1 節で作製した砂型を装置から取り出し、評価対象外となる外周部の付着砂をブラシで除去した。その後、砂型を回転させて左右・上下に動かし、空洞部に存在する簡易除去砂を除去した。その後、砂型空洞部に残存する付着砂をブラシで除去し、その質量を測定した。3 つの砂型の付着砂の質量の平均値を用いて、付着砂の質量に及ぼす造形条件の影響を調査した。なお、付着砂の質量については、その質量を空洞部の表面積で除した単位面積あたりの質量で評価した。

2.3 砂型のバインダ量の測定

鋳物砂の強熱減量試験方法⁶⁾を参考に、1.5、2.0、2.5%のバインダを添加した砂の強熱減量から、バインダ量と強熱減量との検量線を作成した。作成した検量線を用いて、各造形条件で作製した砂型のバインダ量を求めた。

3. 結果および考察

3.1 装置内部の相対湿度の影響

図4に砂型造形終了後から砂型取り出しまでの硬化時間（以下、硬化時間と記す）を24時間とした際の、砂型取り出し時の装置内部の相対湿度と単位面積あたりの付着砂の質量との関係を示す。ここで、硬化時間の0時間は造形が終了した時間である。図4中のRは相関係数であり、得られた相関係数の相関係数0に対する差に関する検定(t検定)の結果、有意確率0.05において有意と認められた。図4より、装置内部の相対湿度が増加するに伴い、単位面積あたりの付着砂の質量が減少した。

バインダは、電子データにより設計された位置へ吐出され、この吐出面積はバインダ量によって変化しない。設計面積境界に吐出されたバインダは、毛管現象により設計寸法の外側へ拡散する⁷⁾。これは、バインダがにじんでいると考えられる。図5にバインダの吐出面積とにじみについての模式図を示す。付着砂は、このにじんだバインダと未硬化砂とが結合することにより形成されると考

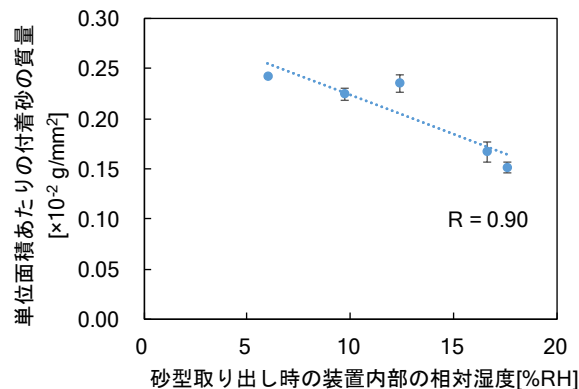


図4 砂型取り出し時の装置内部の相対湿度と単位面積あたりの付着砂の質量との関係
エラーバーは標準誤差を示す (n=3)

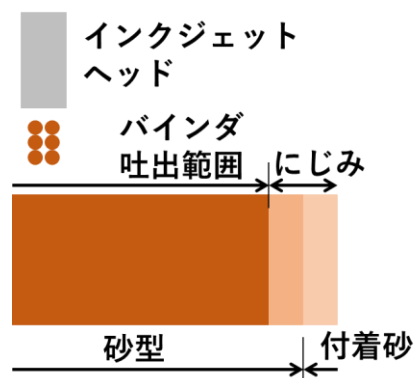


図5 バインダの吐出範囲と付着砂との関係

えられる。フラン樹脂による硬化反応は脱水縮合反応であり、これらは水分が蒸発しやすい高温・低湿度環境で促進される^{3,8)}。そのため、装置内部の相対湿度が低いことで硬化反応が促進され、付着砂の質量が増加したと考えられる。

装置内部の相対湿度は、変動しやすい室内の温湿度の影響を受けるため、装置内部の相対湿度を一定にして造形を行うことは困難であるが、次のようにしてできる限り安定させるように努めた。すなわち、砂型造形中から砂型を取り出すまでの装置内部の相対湿度は、時間が経過するとともに低下する傾向にあり、ある一定の範囲内に収束する。そこで、各条件で付着砂の質量を測定する際は、砂型取り出し時の装置内部の相対湿度が一定の範囲内に入る条件で実施することとした。装置内部の相対湿度による付着砂の質量の影響を正確に捉えるためには、温湿度を一定の条件に制御で

きる環境で、砂型を作製して評価する必要がある。

3.2 硬化時間の影響

図 6 に、硬化時間と単位面積あたりの付着砂の質量との関係を示す。硬化時間を変化させても単位面積あたりの付着砂の質量はほぼ一定であった。各硬化時間における単位面積あたりの付着砂の質量について、Tukey の多重比較検定⁹⁾ (両側)の結果、p 値はすべて 0.05 以上であり、有意差は認められなかった。なお、p 値が 0.05 未満であれば、統計的に有意差ありと判断される。

以上により、次節以降の各条件における付着砂の質量の測定は、砂型を完全に硬化させるため、硬化時間を 24 時間とした。

3.3 バインダ量の影響

図 7 に異なるバインダ量で作製した各砂型における単位面積あたりの付着砂の質量を示す。図 7 中の R は相関係数であり、t 検定の結果、有意確率 0.05 において得られた相関係数は、有意と認められた。バインダ量が増加するに伴い、付着砂の質量も増加した。バインダ量が増加することで、にじみ量が増加し、単位面積あたりの付着砂の質量が増加したと考えられる。この結果から、バインダ量が付着砂の質量に影響を及ぼすことが示唆された。

3.4 砂型形状の影響

図 8 に異なる形状で作製した各砂型における単位面積あたりの付着砂の質量を示す。図 8 中の R は相関係数であり、t 検定の結果、得られた相関係数は有意確率 0.05 において有意と認められた。空洞部の表面積が増加するに伴い、単位面積あたりの付着砂の質量も増加した。単位面積あたりの付着砂の質量で評価しているため、付着砂が様に生成していれば表面積が変化しても一定になると予想された。しかし、実際には、表面積の増加とともに単位面積あたりの付着砂の質量も増加した。付着砂除去の際、空洞部における X-Y 方向 2 辺と Z 方向 1 辺の計 3 辺の交点 (以下、接点と記す) に付着砂が集中する様子が見受けられた。そのため、表 1 に示すように、内壁の増加とともに辺の長さおよび接点数が増加したことにより、付着砂の質量が増加したと考えられる。このことから、本研究で用いた異なる形状で作製した砂型における付着砂の質量は、表面積のみの影響ではなく、辺の長さおよび接点数が複合的に作用して増

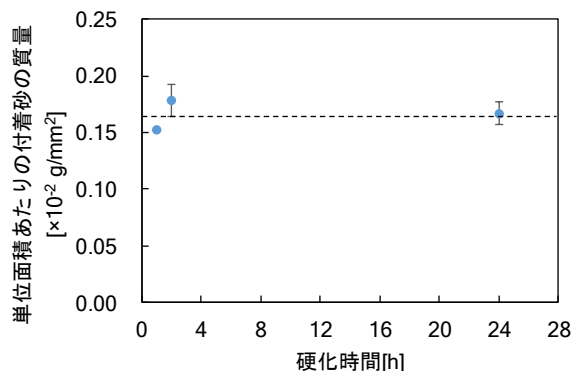


図 6 硬化時間と単位面積あたりの付着砂の質量との関係
エラーバーは標準誤差を示す (n=3)

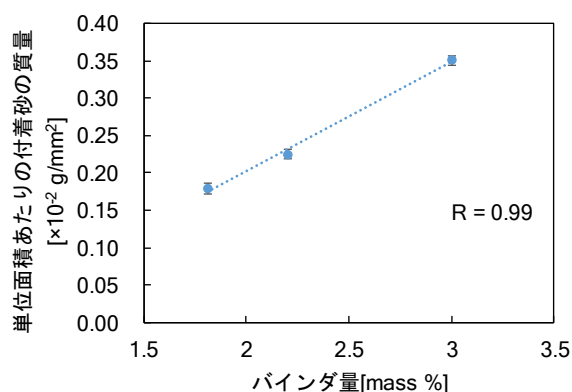


図 7 バインダ量と単位面積あたりの付着砂の質量との関係
エラーバーは標準誤差を示す (n=3)

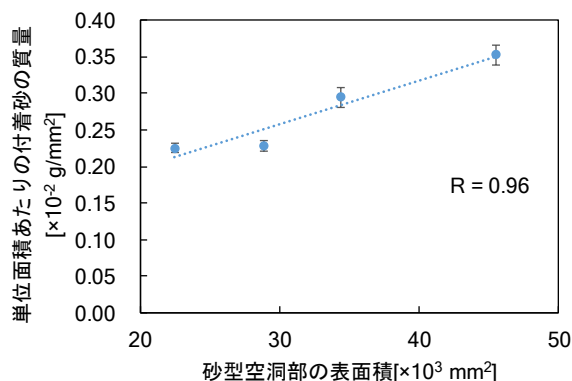


図 8 砂型空洞部の表面積と単位面積あたりの付着砂の質量との関係
エラーバーは標準誤差を示す (n=3)

加していると考えられる。今後、それらの関係については詳細な検討が必要である。

4. 結論

積層造形により作製した砂型における付着砂の質量に及ぼす造形条件について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- ・単位面積あたりの付着砂の質量は、砂型取り出し時の装置内部の相対湿度によって変化する。本研究で実施した相対湿度の範囲では、相対湿度が高いほど単位面積あたりの付着砂の質量が少なくなる。

- ・単位面積あたりの付着砂の質量は、造形終了後から砂型取り出しまでの 24 時間において、硬化時間の影響を受けない。

- ・単位面積あたりの付着砂の質量は、バインダ量が小さいほど少なくなる。

- ・単位面積あたりの付着砂の質量は、砂型空洞部の表面積が増加するに伴い大きくなるが、表面積だけではなく、辺の長さおよび接点数が複合的に作用し、付着砂の質量の増加に影響を及ぼすと考えられる。

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 casting 品と casting 技術の高度化”。
鑄造工学, 90(6), p266-273 (2018)

- 2) 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)
- 3) 永井康弘：“人工砂を用いたフラン自硬性鑄型とその特性”。鑄造工学, 94(12), p728-732 (2022)
- 4) 近藤義大ほか：“砂型三次元積層造形技術の評価”。三重県工業研究所研究報告, 39, p57-64 (2015)
- 5) 服部 俊ほか：“三次元積層造形技術を利用した鑄造用一体鑄型の作製技術の開発”。三重県工業研究所研究報告, 41, p1-7 (2017)
- 6) 日本産業規格 JIS Z 2601：“鑄物砂の強熱減量試験方法”。日本産業標準調査会(1993)
- 7) Saptarshee Mitra et al.:" The effect of ageing process on three-point bending strength and permeability of 3D printed sand molds", Int. J. Adv. Manuf. Technol. , 97, p1241-1251 (2018)
- 8) 日本鑄造工学会：“鑄造工学便覧”。丸善株式会社. p84 (2002)
- 9) J.W. Tukey: “Comparing individual means in the analysis of variance”. Biometrics, 5(2), p99-114 (1949)