

# 鑄造分野におけるデジタルものづくり

久富茂樹\*、藤井勝敏\*、水谷予志生\*\*

## Digital manufacturing in the casting field

KUDOMI Shigeki\*, FUJII Katsutoshi\* and MIZUTANI Yoshiki\*\*

近年、製造業において、3DプリンタやCAEなどのデジタル技術を活用したものづくりに対する関心が高まりつつある。本研究では、これらの技術を鑄造分野のものづくりに適用して、鑄物製品の多品種小ロット生産への対応、製品の品質向上を図る。本年度は、砂型3Dプリンタの造形物評価と、鑄造用模型への適用を目的とした樹脂3Dプリンタの造形物評価を実施した。砂型3Dプリンタでは、造形時の積層方向によって造形物の形状が異なることがわかった。また、樹脂3Dプリンタでは、使用する装置、造形方式、造形条件によって、寸法精度や積層時に生じる段差が異なることがわかった。

### 1. はじめに

鑄造は、溶解した金属を鑄型に流し込み、冷却して凝固させる金属加工技術である。複雑な形状の製品を製造することができ、中子（なかご）を組み合わせて中空形状の製品も製造することができる。その反面、切削加工などの加工法より寸法精度が悪く、品質の安定度が低いため、不良率が高いという課題がある<sup>1)</sup>。また、鑄造工程は、技術・技能の一般化、標準化が難しく、暗黙知に依存するところが多分にあると言われている。一方、2014年以降3Dプリンタが一般にも注目を集め、使用する材料も樹脂や石膏、金属など多様な材料に対応したものが製品化されている。鑄造の砂型製作用の砂型3DプリンタもTRAFAM（技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構）による産学官連携で開発されている<sup>2)</sup>。また、実際の型製作前に鑄造欠陥を予測し、最適な鑄造方案を構築するために、CAEを活用した取り組みもなされている<sup>3)</sup>。

このような背景から、当センターでは、鑄造分野におけるデジタル技術に関わる情報共有や交流の場として、「鑄造分野におけるデジタルものづくり研究会」を設立し、現在10機関が参画している。本研究では、(1)砂型3Dプリンタの利活用、(2)樹脂3Dプリンタの利活用、(3)鑄造シミュレーションの利活用などの技術開発を実施するとともに、技術講演会、機器講習会を開催し、鑄造分野における多品種小ロット生産への対応、製品品質の向上を図る。本年度は、砂型3Dプリンタの造形物評価と、鑄造用模型に適用するための樹脂3Dプリンタの造形物評価を実施したので報告する。

### 2. 砂型3Dプリンタの造形物評価

砂型3Dプリンタは、結合剤を吐出して、鑄物砂を硬

化させるか、もしくは樹脂がコーティングされた鑄物砂にレーザを照射して熱溶着させることによって、1層分の形状を製作し、層を重ねることで三次元形状を製作していく装置である。砂型を直接製作するため、従来工法では不可欠であった鑄造用模型が不要で、試作や小ロットの製品へ迅速に対応できる。また、従来工法では砂型から鑄造用模型を取り外すため、鑄造用模型に抜け勾配を考慮する必要があるが、砂型3Dプリンタでは抜け勾配を考慮する必要がなく、形状によっては主型・中子を一括して造形することも可能で、設計の自由度が大きくなるなどの利点が期待されている。

#### 2. 1 形状評価用試料の造形

今回は三重県工業研究所金属研究室にある砂型3Dプリンタを使用して造形物を製作し、形状評価を実施した。使用した装置の仕様を表1に示す。造形方式は結合剤噴射方式で、平均粒径が約0.12mmの専用の人工砂にフラン系結合剤を選択的に吐出して造形する。形状評価用試料として、直径50mm、高さ50mmの円筒状の試料を、円筒の軸が造形エリアのX軸、Y軸、Z軸に平行になるように造形方向を変えて、各造形方向で18個ずつ造形した。

#### 2. 2 造形物の形状評価

造形した試料を非接触三次元形状測定機（gom製、ATOS Compact Scan）で測定した。形状評価ソフトウェア（gom製、ATOS Professional）を使用して、測定デー

表1 砂型3Dプリンタの仕様

型番	SCM-10（シーメット社製）
最大造形サイズ	800(X) x 400(Y) x 400(Z) mm
積層ピッチ	0.28mm
XY解像度	0.15mm
高さ(Z)方向の造形速度	約17mm / 時間

\* 情報技術部

\*\* 金属部

タと設計データをベストフィットにて位置合わせを行い、偏差のグラデーションマップ評価と円筒度評価を行った。

図1に偏差のグラデーションマップ評価の一例を示す。各図の左上の座標軸は、造形エリアの座標を示しており、(a)は円筒軸が造形エリアのX軸に平行になるように造形した場合で、(b)はY軸に平行、(c)はZ軸に平行になるように造形した場合の結果である。測定データが設計データより大きいほど白色に近く、測定データが設計データより小さいほど黒色に近い。図2に示すように、インクジェットヘッドはY軸方向に結合剤を噴射しながら移動するため、Y軸と平行に濃淡の筋が観察できる。また、積層方向(Z軸方向)には積層時にできる段差による筋が観察される。

図3に造形方向ごとの円筒度の平均を示す。円筒度は、「円筒形体の幾何学的に正しい円筒からの狂いの大きさ」と定義されており<sup>4)</sup>、数値が小さいほど円筒曲面が正しく形成されていることを示す。造形方向をZ軸に平行になるように造形した試料の円筒度が小さくなっており、より正確に円筒が形成されている。装置のZ方向の分解能である積層ピッチ(0.28mm)よりXYの分解能(0.15mm)が高いことが起因していると推察される。

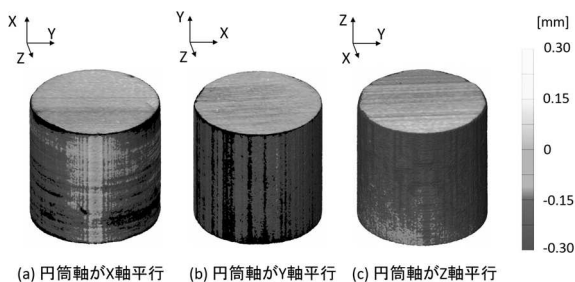


図1 偏差のグラデーションマップ評価

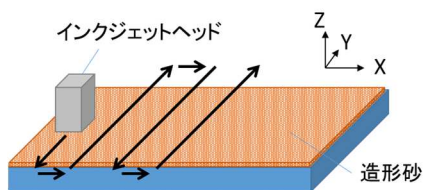


図2 インクジェットヘッドの動き

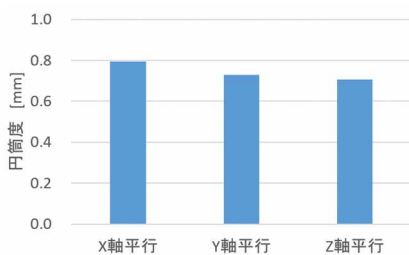


図3 造形物の円筒度

### 3. 樹脂3Dプリンタの造形物評価

砂型3Dプリンタを使用しない従来の鑄造工程では、製品形状をした鑄造用模型を使用して砂型(鑄型)を製作する。鑄造用模型はマスター型とも呼ばれ、木型で製作されることが多いが、木型職人の数が減少してきており、また、職人の高齢化も進んでいる。そこで、木型代替技術として、樹脂3Dプリンタを利用した鑄造用模型製作について検討することにした。樹脂3Dプリンタは、三次元データを準備すれば、容易に三次元形状の造形が可能であり、鑄造用模型製作に関しても有望な技術の一つである。しかしながら、樹脂3Dプリンタで鑄造用模型を製作した場合、積層時に生じる段差が砂型に転写されるため、意匠的な面での課題や、砂型から鑄造用模型を抜き取る際に、段差によって砂がこぼれ落ちる課題がある。樹脂3Dプリンタ造形物の鑄造用模型への適用については既に報告があるが<sup>5)</sup>、本研究においても、造形物の形状や段差の状態を把握するための評価を実施した。

#### 3.1 評価用試料の造形

図4に造形した評価用試料の形状を示す。傾斜角度が、10°、20°、30°、45°の斜面と半径が10mmの半球形状を同時に評価できる形状とした。また、表2に造形条件を示す。材料吐出堆積方式(以下、FDM方式とする)の2機種と材料噴射堆積方式(以下、インクジェット方式とする)の1機種の装置を使用して造形を行った。FDMの1機種については、積層ピッチが0.254mmの試料と0.127mmの試料の2種類を造形した。図5に造形物の外観を示す。1試料を造形するために要した時間は、FDM0254, FDM0127, FDM0125のそれぞれで、24分、1時間31分、2時間17分であった。INK0016については8時間13分であった。使用した装置は、造形エリア内に、最大高さが変わらずに配置できれば、数量が増えても造形時間はほぼ変わらない。

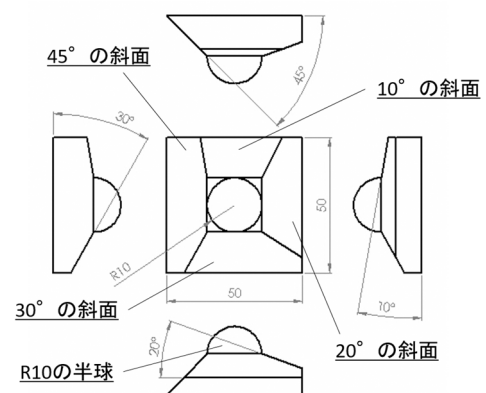


図4 評価用試料の形状

### 3. 2 造形物の形状評価

造形物を前述の非接触三次元形状測定機で測定した。造形物の表面が光を反射する性状であったため、白色塗料を塗布して測定を実施した。測定データと設計データをベストフィットにて位置合わせを行い、偏差のグラデーションマップ評価を行った。評価結果を図6に示す。FDM方式の造形物は、積層ピッチが0.254mmの場合には30°以下、積層ピッチが0.127mmと0.125mmの場合には20°以下の斜面において、設計データとの偏差による濃淡が筋状になって現れた。半球部分の形状についても、積層面との角度が小さくなる天頂付近に同心円状に濃淡差が現れており、積層時の段差が顕著になっている。積層ピッチが0.254mmの場合には、半球部分の偏差が大きいところで約0.1mmとなっており、設計データに対して小さく造形される結果となった。FDM方式の別機種で造形したFDM0125は、斜面の端部分で偏差が大きくなっている部分があり、半球部分についても、偏差がマイナス方向に大きくなっている部分とプラス方向に大きくなっている部分が混在して、形状が崩れている部分が確認された。インクジェット方式のINK0016では、傾

斜角度が10°の場合においても濃淡の筋は確認されないことから、積層時に生じる段差は小さかった。しかしながら、全体的に偏差が大きくなっている部分が多く見られ、特に斜面の角の部分で大きく歪んでいることを確認できる。今回使用したインクジェット方式の3Dプリンタでは、モデル材の周囲がサポート材（ワックス）で固められた状態で造形され、造形後に約60°Cの油でサポート材を除去する作業が必要なため、熱による変形が生じたのではないかと推察される。

次に、触針式表面粗さ計を使用して、測定長さを10mm、測定速度を0.5mm/secとした条件で斜面の部分測定した。測定結果から求めた算術平均粗さRaを図7に示す。FDM方式の造形物は、斜面の傾斜角が20~30°のときにRaが最も大きくなった。積層ピッチが粗いFDM0254のRaが大きく、積層ピッチが同程度のFDM0127とFDM0125は同程度のRaとなった。斜面の傾斜角度が小さい部分では、段差の平面部分の間隔が広がるため、算術的に平均粗さを求めると数値が小さくなったと推察される。インクジェット方式のINK0016は、FDM方式の造形物に比べてRaが小さくなってお

表2 造形条件

試料名	造形方式	積層ピッチ mm	モデル材
FDM0254	材料吐出堆積 (FDM)	0.254	ABS
FDM0127	材料吐出堆積 (FDM)	0.127	ABS
FDM0125	材料吐出堆積 (FDM)	0.125	Onyx (*)
INK0016	材料噴射堆積(インクジェット)	0.016	ABS ライク (アクリル系)

(\*)ナイロンに短繊維カーボンを混練した材料

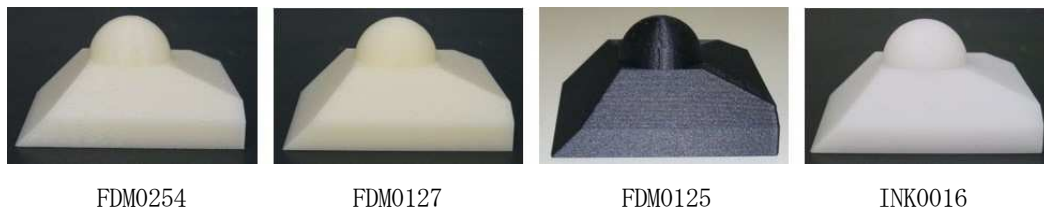


図5 造形物の外観

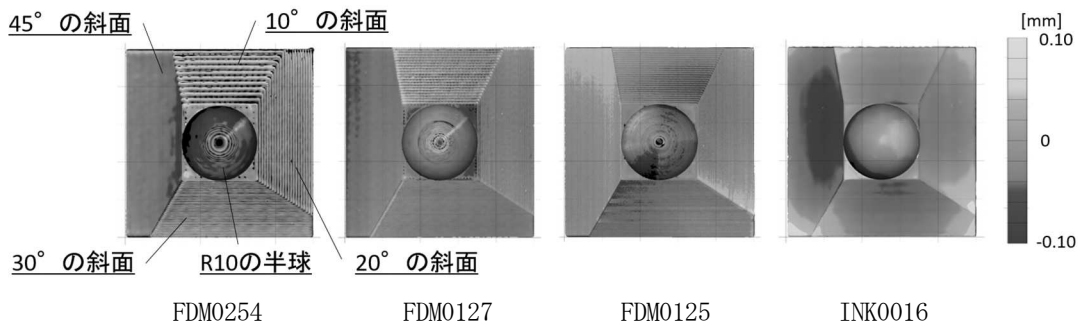


図6 偏差のグラデーションマップ評価

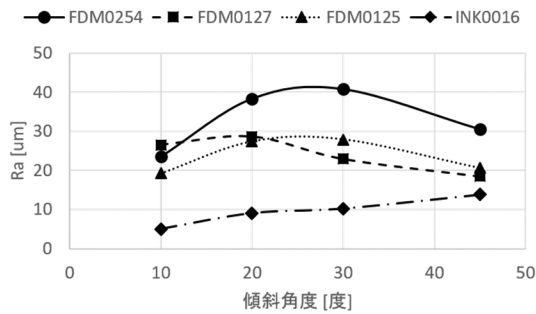


図7 算術平均粗さ

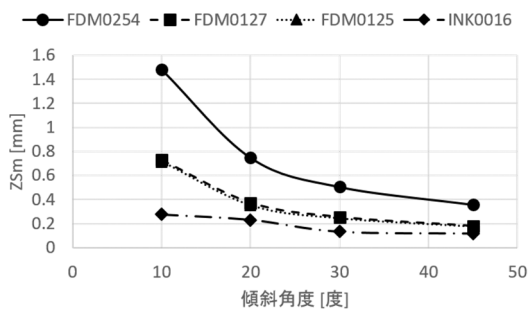


図8 輪郭曲線要素の平均長さ

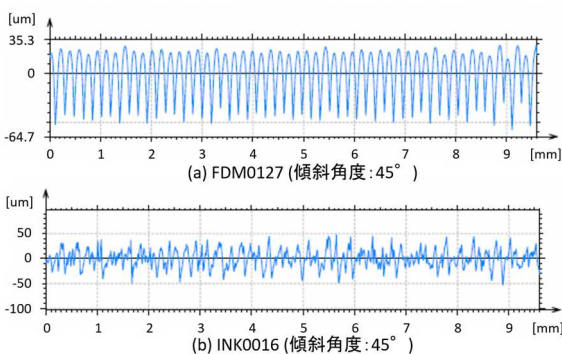


図9 粗さ曲線

り、滑らかな面が形成されていることがわかる。また、斜面の傾斜角度が大きくなるにつれてRaが大きくなっており、FDM方式の造形物の場合と傾向が異なっている。今回使用したインクジェット方式の3Dプリンタの場合、X,Y方向の解像度はともに600dpi、積層ピッチである0.016mmは約1600dpiに相当する。従って、造形面内(XY方向)の分解能より高さ方向(Z方向)の分解能の方が高いため、このような結果になったものと考えられる。

段差の状態を定量的に評価するために、輪郭曲線要素の平均長さZSm(Zは算出に使用する曲線によってR,W,Pの記号が入る)を求めた<sup>6)</sup>。積層時の段差が大きいFDM0254の10°と20°の斜面およびFDM0127とFDM0125の10°の斜面では、うねり曲線要素の平均長

さWSmを、その他の場合は、粗さ曲線要素の平均長さRSmを採用して求めた。図8に求めた輪郭曲線要素の平均長さを示す。すべての試料において、傾斜角度が大きくなるにつれZSmは小さくなった。積層ピッチがほぼ等しいFDM0127とFDM0125を比較すると、造形に使用した装置は異なるが、ZSmはほぼ等しくなった。また、FDM0127と積層ピッチが2倍であるFDM0254を比較すると、すべての傾斜角度においてZSmも約2倍になっており、ZSmは積層ピッチと関連の深いパラメータであると推察される。ただし、インクジェット方式のINK0016では、積層ピッチとZSmの関係が上述のようにはなっていない。FDM0127とINK0016の粗さ曲線を図9に示す。FDM方式のFDM0127の場合は明確な周期性が確認できるのに対し、インクジェット方式のINK0016の場合は、はっきりした周期性が確認できないため、このような結果になったと推察される。

#### 4. まとめ

砂型3Dプリンタで造形した試料の形状評価を実施した。造形時の積層方向によって造形物の形状が異なることがわかった。また、鋳造用模型への適用を目的として、樹脂3Dプリンタの造形物評価を実施した。使用する3Dプリンタの装置、造形方式、造形条件によって、寸法精度や積層時に生じる段差が異なることがわかった。今後、樹脂3Dプリンタで造形した鋳造用模型を使用して砂型を製作したときの寸法精度などについて検討する予定である。

#### 【謝 辞】

本研究で製作した試料の一部は、公益財団法人JKAの補助事業で導入した三次元造形機(3Dプリンタ)で製作しました。

本研究を遂行するにあたり、砂型3Dプリンタの造形指導及びアドバイスをいただきました三重県工業研究所金属研究室の皆様に深く感謝いたします。

#### 【参考文献】

- 1) 木村, 精密工学会誌, Vol.76, No.4, pp373-377, 2010
- 2) 産業構造審議会産業技術環境分科会 研究開発・イノベーション小委員会評価ワーキンググループ, 三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム(次世代型産業用3Dプリンタ等技術開発)技術評価結果報告書(中間評価), 2016
- 3) 井田ら, 鋳造工学, No.92, No.2, pp.95-99, 2020
- 4) JIS B 0621「幾何偏差の定義及び表示」
- 5) 金森ら, 三重県工業研究所研究報告, No.40, pp61-66, 2016
- 6) JIS B 0601「製品の幾何特性仕様(GPS)―表面性状: 輪郭曲線方式―用語、定義及び表面性状パラメータ」