

論文

粉末焼結型 AM 技術における 3D データ補正による寸法精度向上

小林 隆一*¹⁾ 小金井 誠司*¹⁾ 山内 友貴*¹⁾

Accuracy improvement by correcting 3D data in laser sintering AM technologies

Ryuichi Kobayashi*¹⁾, Seiji Koganei*¹⁾, Yuki Yamauchi*¹⁾

Plastic parts built by Additive Manufacturing (AM) technologies contribute to an acceleration of the product development process. This is because AM allows 3D objects to be obtained from 3D CAD data directly and quickly compared to traditional methods. However, parts built by AM face problems such as accuracy etc. In this study, we focused on a method of feeding back the first prototype information to the next prototype so as to improve its accuracy. A box shape with an opening was first built using laser sintering and then shape data of the box was obtained using a 3D digitizer. The shape data was compared to the CAD data and the deformation causes were estimated based on the comparison results. These are then expressed as boundary conditions in a simulation using the finite element method. Moreover, a corrected shape was generated by inverting the boundary conditions. Using this method, we managed to suppress deformation by modeling the corrected shape.

キーワード: 3D プリンター, 付加製造, 粉末焼結, データ補正, フィードバック, 有限要素法

Keywords: 3D printer, Additive manufacturing, Laser sintering, Data correction, Feedback, Finite element method

1. はじめに

Additive Manufacturing (以下, AM), または 3D プリンティングと呼ばれる造形技術, 特に樹脂を用いた造形の普及が進み, より迅速に試作品を作製することが可能になってきた。従来の試作作製は切削や部材の貼り合わせなどが用いられていたが, 形状自由度の高い AM を用いることで 3D データと同等の形状を迅速に得られるようになった。

樹脂を用いた AM は, 材料押出法, インクジェット法, 光造形法, 粉末焼結法など複数の方式があり, 用いられる材料も多岐にわたる。その中で, ナイロン 12 を用いた粉末焼結型 AM による造形は, 形状自由度が高く, 高じん性を有するといった特長から, 外観だけでなく機能を確認するための試作や, 金型を作製する前の射出成形品の試作に用いられる。一方で, そりやゆがみなどによって寸法精度の確保が難しい, 表面に積層段差が残るなどの課題がある。特に寸法精度は製品の検証を行う上で重要な因子であり, 造形品の寸法精度の向上が望まれている。寸法精度の向上によって, より精度の高い検証だけでなく, 実製品への適用なども期待できる。

寸法精度向上のために, 造形に使用する 3D データに補正する手法がある。これは, 造形時に意図しない変形が生じるならば, 造形するデータに補正を施すことで変形を抑制し, 所望の形状を得るといった考え方である。粉末焼結型 AM においては, 山内ら⁽¹⁾ がそりの逆変形補正, Eschey ら

⁽²⁾ が FFD を用いた造形領域全体の収縮量補正について報告している。また, 筆者らも枠のゆがみについて報告している⁽³⁾。しかし, いずれの報告もそりやゆがみなどの単一の現象に着目しているが, 各現象が同時に発生する場合については考慮されていない。

そこで本研究では, ナイロン 12 を用いた粉末焼結型 AM において, そりとゆがみが同時に発生する形状についてデータ補正による造形品の精度向上に取り組んだ。データの補正にはそりやゆがみの状態を把握することが必要だが, 本研究では補正前のデータで造形を行い, 3D デジタイザで測定することで形状データを取得した。また, データ補正についてはシミュレーション技術を活用し, 計算によって補正形状の生成を行った。

2. 粉末焼結型 AM

粉末焼結型 AM は図 1 の a から d に示すように, 樹脂粉末を敷き, レーザで描画することで局所的に熔融させ, これを繰り返し積層することで立体形状を作製する。粉末焼結型 AM では結晶性の樹脂を用いることが一般的である。積層プロセス中は積層した粉末を融点より低く, かつ再結晶温度よりも高い温度に保温することで積層中に発生する変形を抑制する。積層が終了した後は熔融した樹脂をガラス転移点以下まで冷却し, 粉の中から造形品を取り出すことで完成する。また, 冷却によって樹脂が収縮するため, あらかじめ収縮を考慮して数%拡大したデータで造形される。

事業名 平成 26 年度 基盤研究

*¹⁾3D ものづくりセクター

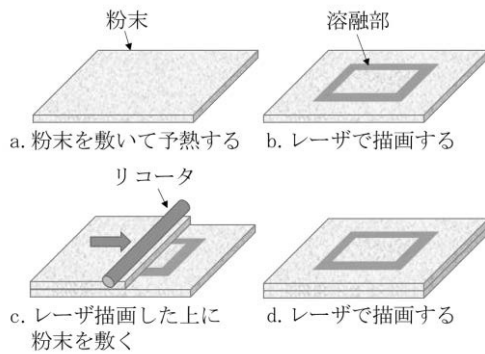


図1. 粉末焼結型 AM の積層プロセス

3. 実験方法

本研究では以下の方法で実験を行った。

- ① 設計データの作成
- ② 設計データでの造形
- ③ 3D デジタイザを用いて造形品の形状を測定
- ④ 測定データと設計データを比較
- ⑤ シミュレーションによるデータ補正
- ⑥ 補正データでの造形

とした。⑥終了後に、補正データでの造形品に対して再度③、④を実施し、補正前のデータでの造形品の測定結果と、補正を行った造形品の測定結果を比較することでデータ補正による寸法精度向上の効果を確認した。

3.1 設計データの作成 図2に本研究で設計データとして用いた箱形状を示す。箱形状はケースなどの試作でよく作製される形状である。一方で、造形時にはそりやゆがみが生じる形状である。形状データの作成には SolidWorks を用いた。また、図2に示す座標系の位置を原点とする。

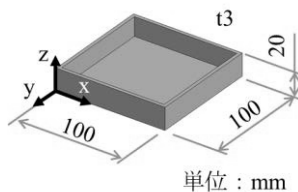


図2. 設計データ

3.2 造形 粉末焼結型 AM 装置である RaFaEl550C (アスペクト製) を用いて、図2に示した設計データでの造形を行った。表1に主要な造形条件を示す。

表1. 造形条件

材料	ASPEX-PA(ナイロン 12)
積層ピッチ	0.10 mm
積層時の粉面(中心)温度	173°C
造形開始高さ	40 mm
収縮を考慮したデータの拡大率	x = 1.024
	y = 1.027
	z = 1.031

3.3 形状測定 作製した造形品の形状測定はパターン投影式 3D デジタイザ COMET5 (Steinbichler 製) を用いた。

測定により点群データを取得し、さらに STL データに変換することで形状測定データを取得した。表2に主要な測定条件を示す。また、測定時にはハレーション防止スプレーを使用した。

表2. 測定条件

測定領域	155×105×70 mm
点群間隔	0.038 mm(高解像度)

3.4 設計データと測定データの比較 設計データと測定データの比較を spGauge (Armonicos 製) を用いて行った。まず、設計データを基準とし、最小二乗法を用いて誤差が最も小さくなる位置へ測定データを配置した。配置後に設計データと測定データの距離を調べることで設計データからの変位を数値化した。

3.5 シミュレーションによるデータ補正 データの補正には SolidWorks simulation を使用し、有限要素法を用いて行った。まず、設計データをメッシュデータに変換し、そりやゆがみを境界条件で表現する。補正形状の生成は境界条件を反転させてシミュレーションを実施することで計算によって取得した。本研究ではそりを温度勾配、ゆがみを荷重によって表現し、条件を反転することで補正形状を生成した。

4. 結果と考察

4.1 造形結果 図3に補正前の設計データで造形した結果の写真を示す。



図3. 造形品の外観

4.2 設計データと測定データの比較結果 設計データと、補正前の造形品の測定データを比較した結果を図4に示す。図4aにおいて A1 は設計データと一致していることがわかった。一方、A1 から A2 に近づくにつれて、設計データに対して y+方向の変位が大きくなることがわかった。さらに A1 から A3 に近づくにつれて、設計データに対して y+方向の変位が大きくなることがわかった。また、他の側面においても変形の傾向は同様であった。図4bにおいて底面は中心部から B1 にかけて設計データと一致していることがわかった。一方、B2 近傍では、設計データに対して z+方向の変位が大きいことがわかった。底面四隅の他の部分においても変位の傾向は同様であった。

以上の結果を基に、変形の模式図を図5に示す。図5aに示すように各側面の中央よりも四隅が箱の中心に向かって変形した。また、図5bに示すように、開口部である上面よりも底面の収縮が大きくなった。また、図5cに示すように底面は、z+方向にそりが発生した。以上から、側面のゆがみと、底面のそりが同時に生じていることがわかった。

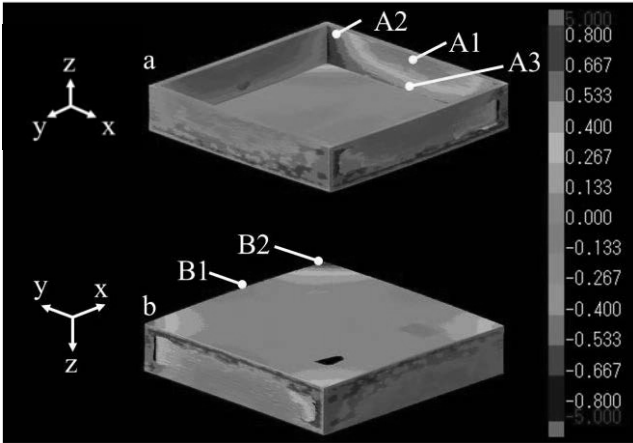


図 4. 設計データと測定データの比較結果 (全体)
a は Z+方向から, b は Z-方向から見た図

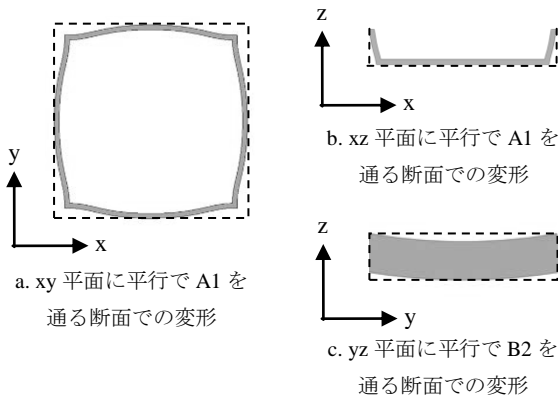


図 5. 変形の模式図

点線は設計データを示している

4.3 補正データの生成 測定データの解析結果を基に, 設計データに対する変形を反転させた形状補正を行えば, 設計データに近い形状を得ることができる。図 6a では各側面の中央よりも四隅が外側に変形させる補正を示している。図 6b では開口部である上面よりも底面の収縮を小さくする補正を示している。図 6c では底面において z-方向のそりを生じさせる補正について示している。

次に, この形状をシミュレーションによって生成する方法を説明する。図 5 で示した変形はいずれも何らかの原因で収縮が不均一であるために生じるといえる。したがって, シミュレーション上で収縮を表現する必要があるが, 本研究では造形品に温度変化を生じさせることで表現し, 造形時と同様に初期状態を高温, 最終状態を低温とすることで収縮を表現した。ただし, 単純な温度変化のみでは図 6 の形状は生成されず, 条件を加えていくことで図 6 の a から c の形状を同時に表現する。まず, 図 6a, 図 6b の形状を表現するために, 荷重条件を追加した。図 6a, 図 6b の形状は箱の各側面の内側に, 中心方向に荷重をかけて引っ張ることで表現した。次に図 6c の形状を表現するために温度勾配を追加した。そりは先行研究によって温度が要因であると報告がある⁽⁴⁾。そりを表現するには温度勾配のほかに曲げモー

メントを付加する方法も考えられるが, 本研究では温度勾配のみで表現した。図 6c で示す z-方向のそりを表現するには底面と開口部上面の間に温度勾配がある状態を初期状態とし, この状態から低温の状態まで変化させた。これにより底面と開口部上面の収縮量の差を生じさせ, z-方向のそりを発生させた。以上の条件を図 7 に示す。F は荷重を示しており, 各面において等分布荷重とした。Ta と Tb はそれぞれ開口部上面と底面の初期温度を示しており, Ta < Tb の関係にある。また冷却によって到達する温度を T とする。

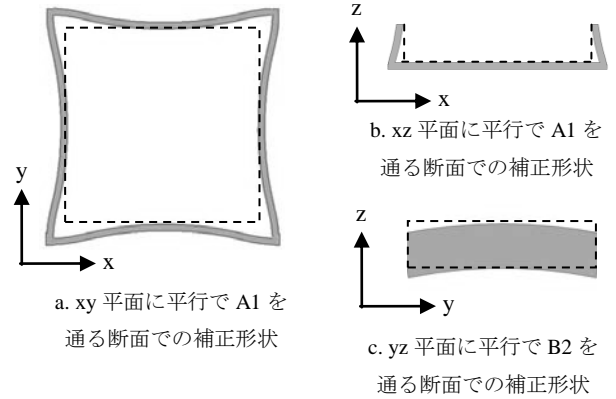


図 6. 補正形状の模式図

点線は設計データを示している

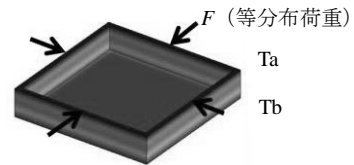


図 7. 補正形状を生成する境界条件

図 4 の変位では, 各側面の変形, 底面の四隅のそりの傾向は同じであるが, 各側面や底面における最大変形量は 0.4 ~ 0.8 mm であり同じではない。シミュレーションでは中間の 0.6 mm を補正量の目標値に設定した。この補正を実施した際の境界条件の値および物性値を表 3, 表 4 に示す。

表 3. 境界条件

F	20,000 N/m ²
Ta	145°C
Tb	175°C
T	23°C

表 4. 物性値

線膨張係数	2.0 × 10 ⁻⁴ /K
ヤング率	8300 MPa
ポアソン比	0.28

4.4 補正データでの造形品の評価結果と考察

シミュレーションによって生成した補正データを用いて, 3.2 から 3.4 に示す実験を再度行った。補正データによる造形品を測定したデータと設計データを比較した結果を図 8 に示す。設計値からの変位が大きかった図 4 の A2, A3 と, 対応する A5, A6 を比較すると A5, A6 の方が設計データからの変位が少ないことがわかった。同様に図 4 の B2 と B4 を比較すると, B4 の方が設計データからの変位が少ないことがわかった。

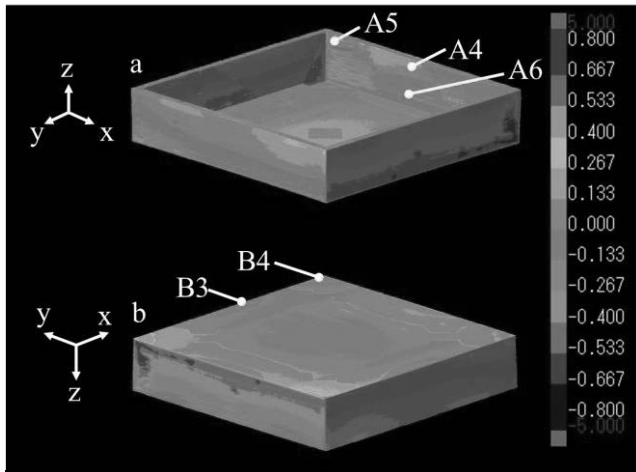


図 8. 設計データと補正データにて造形した測定データの比較結果

①は Z+方向から, ②は Z-方向から見た図

また, 定量的に捉えるために, 図 4 の A1 と変位の大きかった A2 を結ぶ直線上について, 補正がなかった場合と補正があった場合の設計データとの差分を図 9a にグラフで示す。同様に B1 と B2 についても図 9b にグラフで示す。

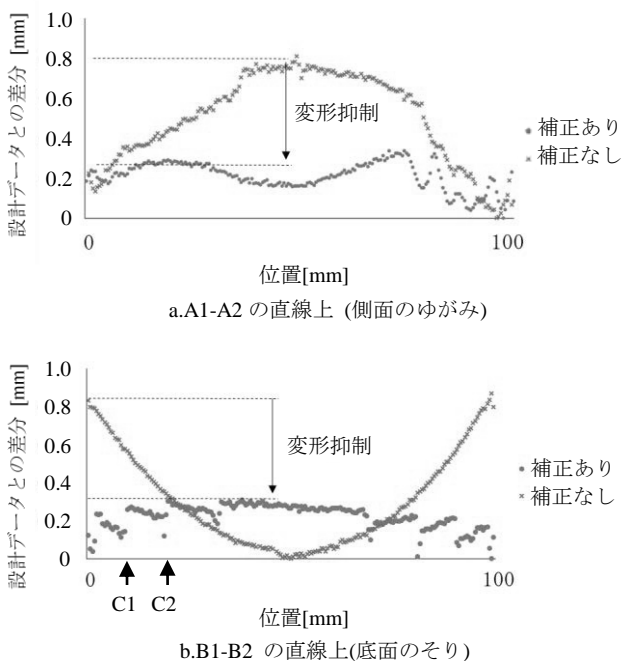


図 9. 補正ありと補正なしの測定データ比較データ比較

各グラフの最大変位量でみると, 図 9a では 0.81 mm が 0.34 mm まで低下していることがわかった。図 9b では 0.87 mm が 0.31 mm まで低下していることがわかった。以上の結果から, 箱形状において発生した側面のゆがみと底面のそりを同時に抑制させることができたことを確認した。ここで図 9b の C1, C2 のプロットに注目すると, プロットが断続的に途切れていることがわかる。これは, 補正データは緩やかな曲面だが, 造形時には積層段差によって離散的に表現されたことが原因だと考えられる。

5. まとめ

ナイロン 12 を用いた粉末焼結型 AM の造形において, データ補正を用いた精度向上について実験を行った。本研究の結果を以下にまとめる。

- ・箱形状の造形品を 3D デジタイザで測定し設計データと測定したデータを比較し, 解析を行うことで, 箱形状には側面のゆがみと底面のそりが同時に生じていることがわかった。
- ・有限要素法を用いて設計データに温度条件と荷重条件を与えることで計算によって補正データを生成した。
- ・生成した補正データを用いて造形した結果, そりとゆがみを同時に抑制することができた。

AM におけるデータ補正技術と AM を活用した製品開発プロセスを組み合わせればより良い試作が可能になる。さらに, 今後期待されている AM の実製品適用において試作と実製品が直結するようなケースではデータ補正技術はより効果的である。今後は実製品に近い形状での検証を行い, 実用性を向上させていきたい。

(平成 28 年 7 月 4 日受付, 平成 28 年 7 月 21 日再受付)

文 献

- (1) 山内友貴, 小金井誠司, 横山幸雄, 安田健: 「粉末焼結型 AM 技術におけるそりの測定と補正」, 精密機械工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.539-540 (2015)
- (2) C. Eschey, S. Feldmann, M. F. Zaeh: “RULE-BASED FREE-FORM DEFORMATION FOR ADDITIVE LAYER MANUFACTURING”, Solid Freeform Fabrication Symposium 2011, <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/2011TOC>, 2016.6.14 閲覧
- (3) 小林隆一, 山内友貴, 小金井誠司: 「粉末床溶融結合における溶融部と未溶融部の収縮差による変形と造形データの補正に関する研究」, 精密機械工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.545-546 (2016)
- (4) 佐藤和樹, 新野俊樹: 「粉末焼結積層造形における供給粉末の圧粉の効果に関する研究 — ポリアミド樹脂を利用した際のそり低減の効果の評価 —」, 精密機械工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.763-764 (2008)