

# 金属粉末積層造形法におけるマルエージング鋼造形物の寸法精度向上

鈴木 逸人, 戸羽 篤也

## Accuracy Improvement of Maraging Steel Parts in Powder Bed Fusion Additive Manufacturing

Hayato SUZUKI, Atsuya TOBA

### 抄 録

材料を積層することでものづくりを行う方法は、国際規格ではアディティブマニュファクチャリング (Additive manufacturing; AM), 国内では3Dプリントとよばれ、近年、装置や材料などの技術開発が加速し、市場規模が急激に成長している。活用される産業が拡大するなか、AM造形物に求められる精度要求が高くなっている。高精度なAM造形物を得るためには、造形物を測定し得られた造形誤差をCADデータにフィードバックさせ、製作を繰り返すことで造形誤差を収束させるクローズドループエンジニアリングが有効であるが、実証報告が少ない。本研究では、クローズドループエンジニアリングを用いて造形物の精度がどの程度向上するのかを検証することを目的とし、切削機構を有する粉末床溶融結合方式の金属AM装置でマルエージング鋼による造形を行った場合について検討した。研究の結果、切削機構を有する金属AM装置で発生する主な造形誤差要因は、造形物の熱膨張・収縮であることがわかった。また、測定した造形誤差量に基づきCADデータを修正することで最大0.2mm程度であった造形誤差を0.05mm以内に低減させることができることを実証した。

**キーワード:** アディティブマニュファクチャリング, 粉末床溶融結合方式, マルエージング鋼, クローズドループエンジニアリング, 精度向上

### Abstract

Additive manufacturing (AM) is a process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies. In recent years, AM market expand rapidly with the development of equipment and materials. One of the methods for producing a high-precision object is closed loop engineering that improves the accuracy of the object by repeatedly feeding back the error to CAD data. However, there have been few reports of studies that applied the method to accuracy improvement of metal AM products. The purpose of this study was to examine how the precision of the product with maraging steel in powder bed fusion AM device with a cutting machine was improved by using the closed loop engineering. As a result of this study, it was found that the main error factor generated in the AM device was thermal expansion and contraction of the product. In addition, it was demonstrated that the error of about 0.2 mm reduced within 0.05 mm by modifying the CAD data based on the measured error.

**KEY-WORDS :** Additive manufacturing, Powder bed fusion, Maraging steel, Closed loop engineering, Accuracy improvement

## 1. はじめに

アディティブマニュファクチャリング (Additive manu-

facturing; AM) は、国内では3Dプリントとよばれ、3Dモデルデータから材料を積層することで物体を造形する手法である。国際規格では、7種類の方式に分類され<sup>1)</sup>、この

事業名: 委員委嘱

課題名: 産総研戦略予算プロジェクト 3D計測エボリューション(3D3プロジェクト)

うち主に、6種類の方式の装置が産業分野で活用されている(図1)。近年、日本を含む世界各国で装置開発が進み、また使用可能な材料の増加などの技術的な発展が著しく、市場規模が急激に成長している<sup>2)</sup>。特に、金属を用いたAM法(金属AM法)は、樹脂AM法と異なり、実際に最終製品として使用可能な造形物を製作することができる。さらに、複雑形状や軽量化構造を製作可能で設計自由度が高いといった利点があり、金型分野、航空宇宙分野、医療分野で活用が期待されている<sup>3-5)</sup>。金型分野では、従来の機械加工では実現することができなかつた成形面に沿うような立体的で複雑な配管構造が造形可能である。例えば、プラスチック射出成形においてこのような配管構造を有した金型を用いた高機能冷却を行うことで、サイクルタイム短縮による生産性向上や抜型後の二次収縮防止による成形品質の向上が期待できる<sup>6)</sup>。

AM法の造形物における寸法精度は、造形方式により異なる。最も安価に入手可能な材料押出方式(Material extrusion)の場合、多種材料を使用できる一方、材料フィラメントが太く、積層厚さが厚いため寸法精度が悪くなる傾向がある。結合剤噴射方式(Binder jetting)の場合、数百 $\mu\text{m}$ の粉末に結合剤を噴射するため、結合剤の浸透などにより余剰硬化が発生することがあり、粉末粒径程度の誤差があり得る。材料噴射方式(Material jetting)や液層光重合方式(Vat photopolymerization)の場合、使用する材料が液体であることから、材料噴射方式であればプリントヘッド駆動系の平行度や直角度に起因する誤差、液層光重合方式であれば硬化に使用するレーザー等の集光精度や走査経路に起因する余剰硬化による誤差が考えられる。金属AM法で最も用いられる指向性エネルギー堆積方式(Direct energy deposition)と粉末床溶融結合方式(Powder bed fusion)では、溶融池が凝固する際に周辺の未溶融粉末が表面に付着することで材料粉末粒径程度の誤差が発生する可能性がある。金属AM装置では、造形のみ装置と造形と切削を行うことができる装置がある。切削機構を有する装置であれば、切削面では未溶融粉末の付着による造形誤差は排除することができる。しかし、熱収縮による誤差が考えられる。特に、粉末床溶融方式では、造形物の周辺が未溶融の金属粉末で覆われ、冷却等を行うことができないことから、製作中に造形物の温度が上昇していると予想される<sup>7)</sup>。以上のように、AM法は、方式により誤差の原因、程度が異なるものの、高い寸法精度が要求される場合、完成形の3D CADデータをそのまま使用することが困難である。

高精度なAM造形物を製作する方法にクローズドループエンジニアリングと呼ばれる手法がある(図2)。製品の設計、製造、検査などの一連の工程においてデジタルデータを用いて効率化するデジタルエンジニアリングの一手法であり、デジタルデータを活用してものづくり工程のPDCA(Plan:計画, Do:実行, Check:評価, Action:改善)サイクル

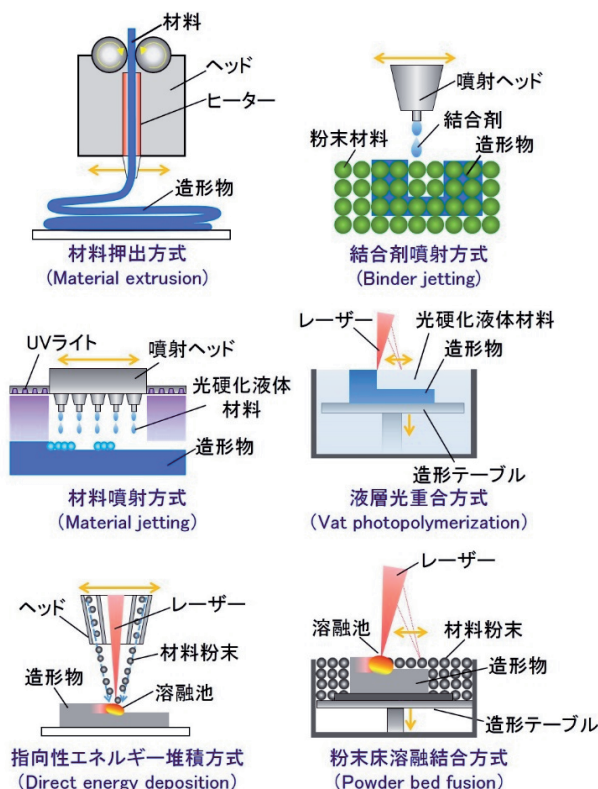


図1 AM法で実用的に用いられている6方式

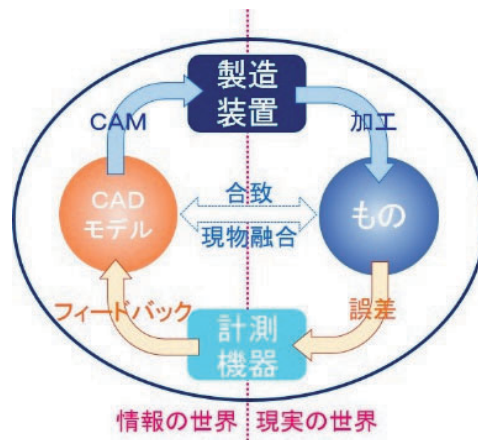


図2 クローズドループエンジニアリングの概要

を有機的に回すことにより生産性を向上させる方法である<sup>8)</sup>。AM法におけるクローズドループエンジニアリングの具体的な方法は、AM法で製作した造形物を測定し、測定データと造形に用いた3Dデータとを照合することで幾何誤差を定量化した後、3Dデータにフィードバックさせ修正し、再造形のループを繰り返すことで造形物の形状誤差を収束低減させる。測定には、ノギス等の汎用機器を用いる他、複雑な3D造形物に対応するため、接触式および非接触式3次元測定機を用いる。理論上このループを数回繰り返すことで、造形誤差を排除することが可能だが、現実的にどの程度まで造形誤差が収束するのかは実証が必要である。

そこで、国立研究開発法人産業技術総合研究所計量標準総合センターがプロジェクトリーダーとなり、国内50カ所以上の公設試験研究機関が参加し、クローズドループエンジニアリングの実証を目指すプロジェクトを実施した。本プロジェクトでは、運営協議会から提示されたガイドラインに基づき、各機関が所有するAM装置で造形した器物を測定し、方式による造形誤差について検証を行った。

本研究では、金属AM法の金型製作で最も用いられるマルエージング鋼造形物に対して、クローズドループエンジニアリングを活用することで造形物の形状誤差がどの程度収束するのかについて明らかにすることを目的として検討を行った。はじめに、造形物を測定し形状誤差を定量化した。次に、3Dデータにフィードバックさせ再造形し、造形精度について検証を行った。

## 2. 造形方法および測定方法

### 2.1 造形物形状

本研究では、3次元造形誤差評価用器物（以下、「3次元器物」とする）と2次元造形誤差評価用器物（以下、「2次元器物」とする）の2種類の評価用器物を造形し、各々の寸法精度を評価した。図3に3Dデータを示す。3次元器物は、一辺30mmの直方体の各頂点と直径15mmの球の中心が一致するように配置されている。器物全体に切削を行うため、積層方向の球間に円柱を配置した。2次元器物は、100×100×5mmの直方体に直径2mmの穴を15mm間隔で25個配置した。粉末床溶融結合方式では、ベースプレート上に造形を行うため、ベースプレートと器物の間に空間があると造形することができない。このため、器物下面にサポートを配置した。サポートは、厚さ0.6mm、ピッチ5mmの格子状とした。

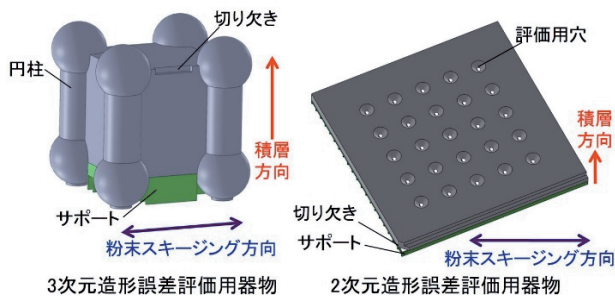


図3 造形誤差評価用器物

### 2.2 造形装置および造形条件

造形には、金属光造形複合加工機（松浦機械製作所社製、Lumex Avance-25）を用いた（図4）。材料は、マルエージング鋼粉末（松浦機械製作所社製、マツウラマルエージングII）を用いた。ベースプレート上面をz方向原点とし、z方向に積層した。ベースプレートは、造形前に平面研削を行っ

た厚さ19.897mmのS50C板材を用いた。積層厚さは、0.05mmとし、10層毎に直径1mmのボールエンドミルで切削加工を行った。3次元器物、2次元器物のレーザー照射条件を表1に示す。ベースプレート予熱温度は50℃とした。造形中、造形室内は窒素雰囲気とした。2次元器物は、造形後にサポート部分をバンドソーでベースプレートから切断し、サポート痕が見えなくなるまで平面研削を行った。

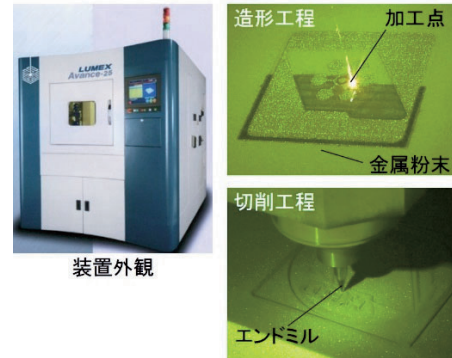


図4 金属光造形複合加工機（粉末床溶融結合方式）

表1 レーザー照射条件

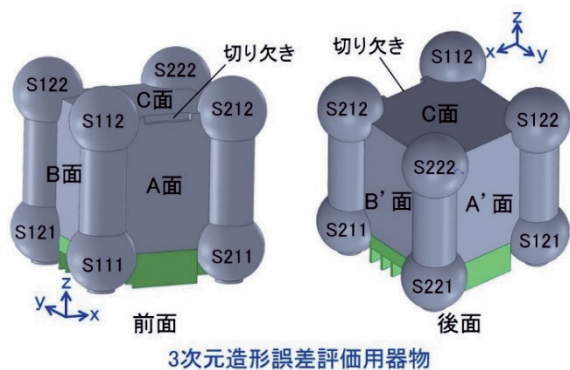
レーザーパラメータ	3次元器物	2次元器物
パワー $P$ [W]	160	160
スポット直径 $D$ [mm]	0.2	0.2
走査速度 $v$ [mm/s]	320	160
走査間隔 $e$ [mm]	0.1	0.2

### 2.3 測定装置および測定位置

図5に器物の各球および面、穴の名称および座標系を示す。3次元器物では、球にS111からS222まで名称を付け、立方体の面をそれぞれA、B、C面とし、対面をそれぞれA'、B'、C'面とした。また、S111-S211方向をx方向、S111-S121方向をy方向、S111-S112方向をz方向とした。2次元器物では、図に示すように切り欠きを左下で設置したときの左下を1番穴、右下を5番穴、左上を21番穴、右上を25番穴とした。以後、これらの名称を用いて測定位置を示す。

3次元器物の測定には、マイクロメーターを用いた。3次元器物の測定位置は、各球の直径、球間の最大距離、立方体面間距離とした。球直径は、各球のx-y平面に対して測定を行った。z方向における球間の最大距離に関しては、上側の球とベースプレート下面の最大距離を測定し、ベースプレート厚さを引いた値を測定値とした。A、B面内対角の球間最大寸法のみベースプレートとの干渉のためマイクロメーターでは測定できないことからノギスを用いた。器物は測定テーブル上に置き、必要の場合はベースプレートをクランプして測定を行った。

2次元器物の測定には、2次元画像測定機（ミットヨ社製、QI-B3017B）を用いた。照明は、透視照明で行い、他の照明は用いなかった。測定面上における1番穴の中心を原点と



3次元造形誤差評価用器物

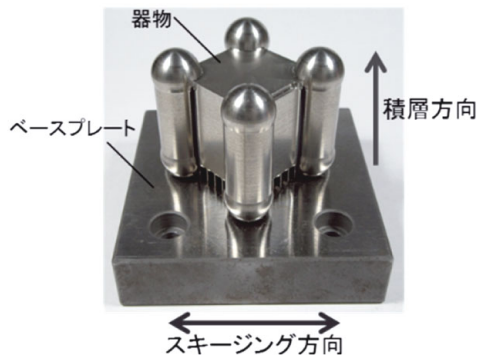
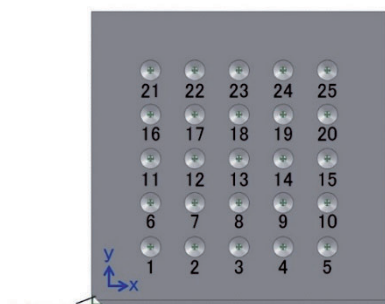


図7 3次元造形誤差評価用器物外観



2次元造形誤差評価用器物

図5 器物各要素の名称



図6 測定装置および器物設置状態

し、1番穴の中心と5番穴の中心を通る直線をx軸、x軸から反時計回りに90度の方向をy軸とする器物座標系を設定して測定を行った。穴に対して円近似を行い、中心座標と円直径を1番穴から25番穴まで順番に3回測定を行った。測定の際には、器物の設置位置の再現性を向上させるため、テーブル上にクランプとブロックを設置し器物を固定した(図6)。

いずれの測定も20℃恒温測定室内で行った。器物は、造形後にエアブローと吸引により金属粉末を十分に除去し、20℃恒温室に24時間以上保管した後に測定を行った。

### 3. 造形誤差の定量化

#### 3.1 3次元器物の測定結果

図7に造形した器物を示す。外観検査では測定の誤差要因

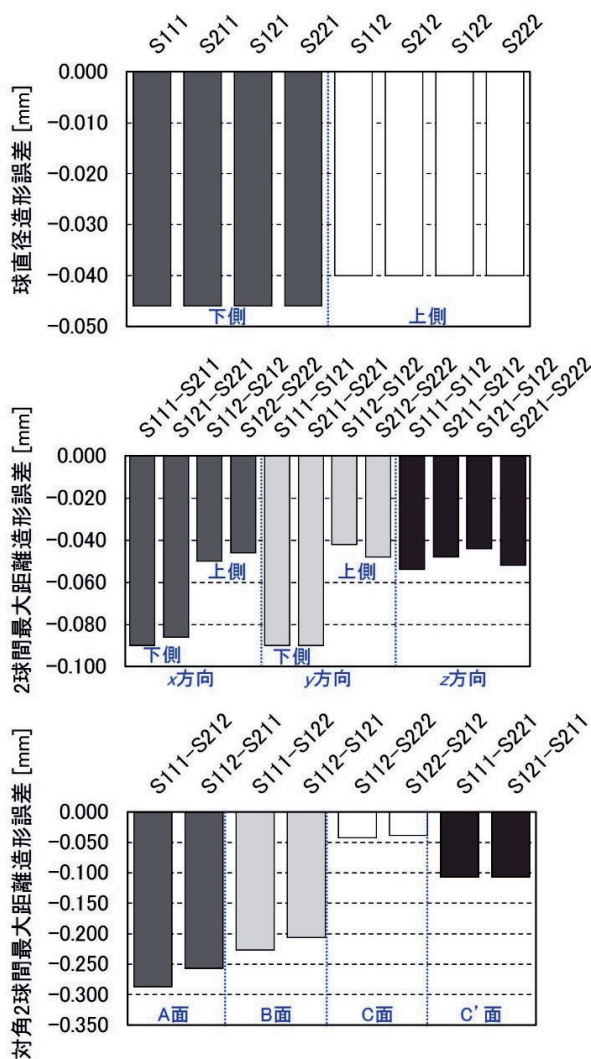


図8 3次元器物の造形誤差

となり得る目立つ傷や空孔などは認められなかった。図8に造形誤差(測定値から設計値を引いた差)の測定結果を示す。正の値は設計値に対して膨張、負の値は収縮を表す。上側球(S112, S212, S122, S222)の直径は、すべて14.960mmとなり、設計値に対して0.040mm小さくなった。また、下側球(S111, S211, S121, S221)の直径は、すべて14.954mm

となり、設計値に対して0.046mm小さくなった。上側球と下側球の値を比較すると上側球の方が若干大きくなった。

2球間の最大距離においてx軸方向とy軸方向で差は見られなかった。上側球と下側球の2球間最大距離の平均と標準偏差は、それぞれ $44.954 \pm 0.003\text{mm}$ と $44.911 \pm 0.002\text{mm}$ となり、上側球間の方が若干大きくなった。また、z軸方向の2球間最大距離は、平均と標準偏差が $44.951 \pm 0.004\text{mm}$ となり、全体的に設計値よりも小さくなった。

A, B面内の対角2球間最大距離は、0.2mm以上設計値より小さくなっているが、ノギスで測定したため他の測定箇所よりも測定誤差が大きくなったためと考えられる。C面内での対角2球間最大距離の平均と標準偏差は、 $57.386 \pm 0.003\text{mm}$ となり設計値よりも0.040mm小さくなった。この設計値との差は、上側球の直径の設計値との差とほぼ同じ値であることから、C面間の球間が収縮したわけではなく、球自体の収縮による差であると考えられる。C面の対面内での対角2球間最大距離はどちらも、57.320mmとなり設計値よりも0.106mm小さくなった。この設計値との差は、下側球の直径収縮量以上に小さい結果となった。

C面付近での直方体のA-A'面間, B-B'面間距離は、どちらも29.986mmとなり、設計値よりも0.014mm小さくなった。また、C'面付近では、どちらも29.960mmとなり、設計値よりも0.040mm小さくなった。これまでの傾向と同様に下側の方が大きく収縮した。上述のC面の対面内での対角2球間最大距離が下側球の直径収縮量以上に小さくなった理由は、球の収縮と直方体のx-y平面内の収縮の複合要因によると考えられる。

### 3.2 2次元器物の測定結果

図9に造形した器物を示す。図10に円の中心座標の測定結果を示す。図中では、誤差の傾向をわかりやすく表示するため円中心座標の設計値からの差 [μm]を100倍拡大させ表示した。円中心の座標の設計値からの差は、すべて負の値となった。円中心座標の設計値からの差の平均と標準偏差は、x座標とy座標でそれぞれ $-0.03 \pm 0.02\text{mm}$ と $-0.04 \pm 0.03\text{mm}$ であった。円直径の平均と標準偏差は、 $1.98 \pm 0.01\text{mm}$ となった。全体として、穴位置、穴直径ともに設計値に対して収縮する方向に造形誤差が見られた。これは、3次元器物と同様に熱収縮による造形誤差だと推察される。

## 4. 3Dデータ修正および再造形器物による評価

### 4.1 3Dデータ修正方法および器物の再造形方法

測定結果より、どちらの器物も収縮する方向で造形誤差が発生することがわかった。従って、設計値へ造形物の寸法を近付けるには、3Dデータの寸法をあらかじめ拡大しておく必要がある。そこで、測定した造形誤差に基づき3次元器物

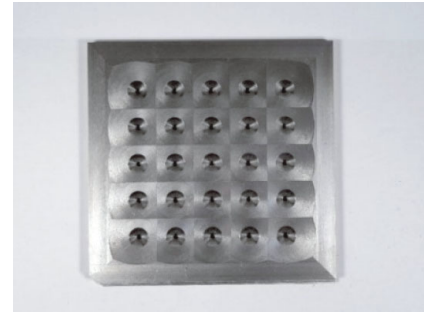


図9 2次元造形誤差評価用器物外観

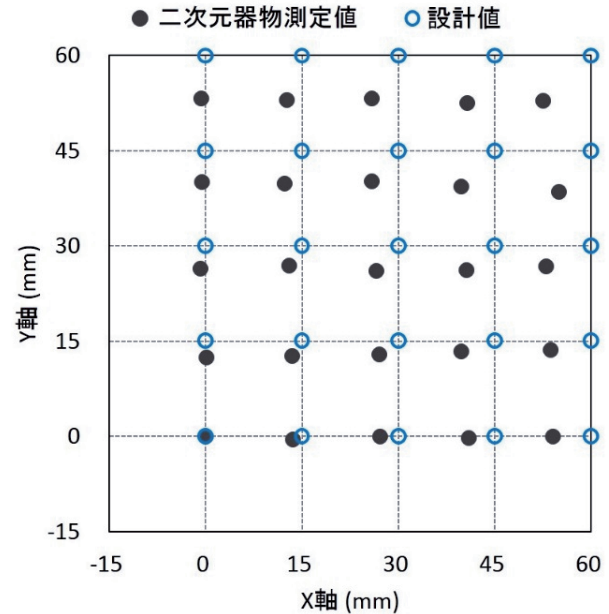


図10 2次元造形誤差評価用器物の造形誤差

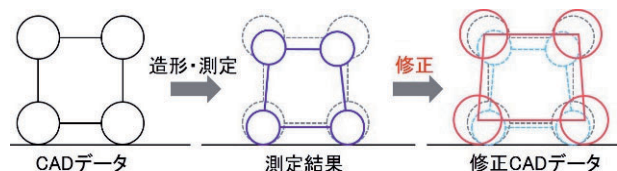


図11 3次元造形誤差評価用器物の3Dデータ修正方法

の3DCADデータを以下の様に修正した(図11)。

- \* 球に対して直径を0.040mm (0.125%) 拡大
- \* 立方体上面の各辺を0.015mm (0.05%) 拡大
- \* 立方体底面の各辺を0.039mm (0.13%) 拡大
- \* 立方体高さ方向は修正なし

また、2次元器物の造形誤差について、器物の中心である13番穴を基準として図11と同様に表示すると図12のようになる。器物中心に向かって中心からの距離にはほぼ比例して収縮していたことがわかった。この収縮量を修正するため、2次元器物の3Dデータを以下の様に修正した。

- \* 器物中心(13番穴)から穴間の直線距離および器物全体を0.099%拡大

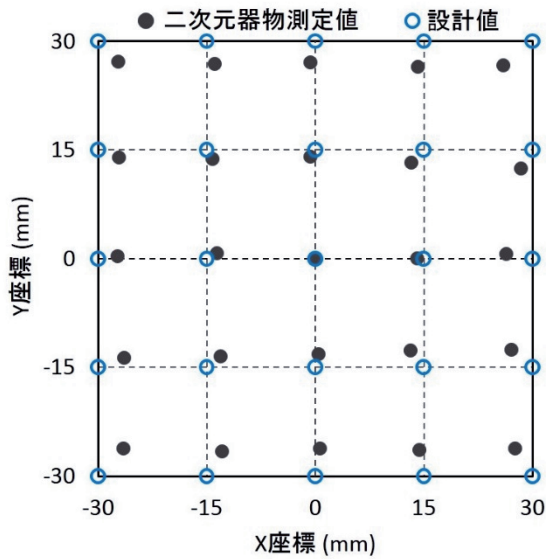


図12 2次元造形誤差評価用器物の造形誤差 (13番穴を中心として再表示)

造形装置，造形条件，測定方法は，変更することなく，すべて修正なし器物と同じ方法で行った。

#### 4.2 修正3次元器物の測定結果

図13に造形誤差（測定値から設計値を引いた差）の測定結果を示す。

球直径は，最大で0.004mmの造形誤差となり，3Dデータを修正した効果が非常に良く現われた。同様に，C面およびC'面の対角2球間の最大距離に対する造形誤差は，0.014mm以内となり，平面に対する寸法修正が非常に有効である結果となった。

2球間の最大距離においてx軸方向とy軸方向の最大造形誤差は，0.010mmとなった。修正なし3Dデータでの器物では上側球と下側球の2球間最大距離の差に若干の差が見られたが，寸法補正の効果により上下間の差は見られなくなった。z軸方向は，平均0.026mm設計値よりも長くなった。z軸方向は寸法補正で0.040mm高くしているのに対して，測定値が0.026mm大きくなったので，今回の器物のz軸方向は，約0.014mm収縮する結果となった。

A面およびB面の対角2球間の最大距離は，-0.026mmから0.034mmと大きくばらついた。この測定値のばらつきは，ノギスで測定したため，測定誤差が大きくなったと考えられる。

#### 4.3 修正2次元器物の測定結果

図14に修正2次元器物と2次元器物の円中心座標の測定結果を示す。図中では，円中心座標の設計値からの差[μm]を100倍拡大させ表示している。円中心座標の設計値からの差の平均と標準偏差は，x座標とy座標ともに $-0.01 \pm 0.01$

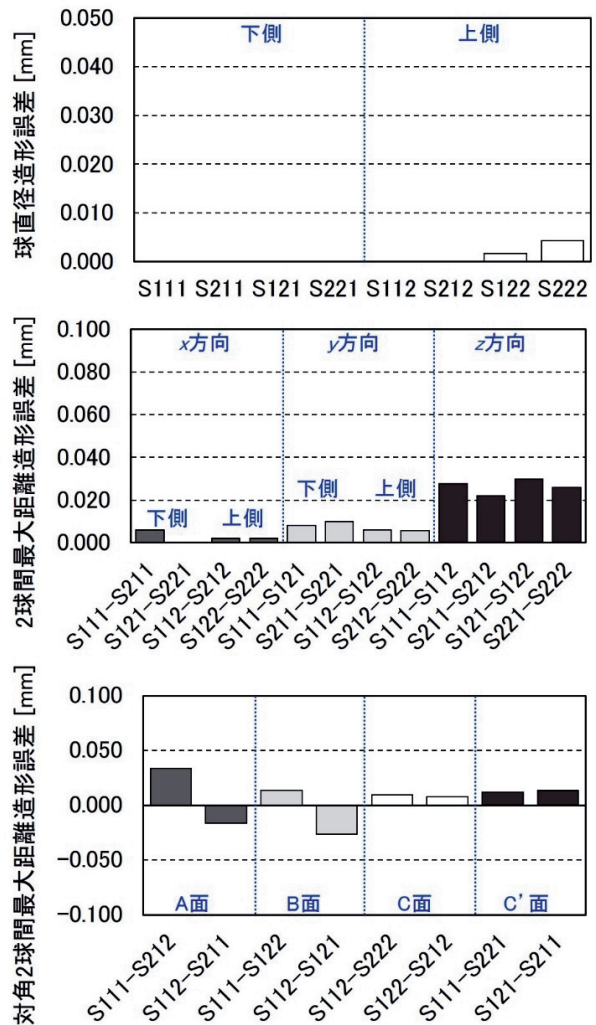


図13 修正3次元造形誤差評価用器物の造形誤差

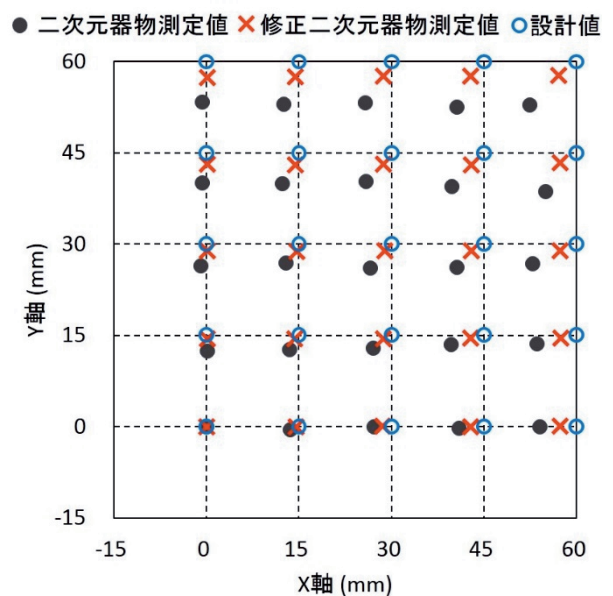


図14 修正2次元造形誤差評価用器物の造形誤差

mmであった。また、円中心座標の設計値からの差は、基準位置から離れるほど収縮量が大きくなり、25番穴で  $x, y$  座標それぞれで  $-0.03\text{mm}$ ,  $-0.02\text{mm}$  であった。円直径の平均と標準偏差は、 $1.96 \pm 0.00\text{mm}$  となった。円直径に関しては修正を行っていないため修正の有無にかかわらず同程度の値となった。

## 5. 考察

3次元器物の測定結果(図8)で示した様に、粉末床溶融結合方式のAM装置でマルエージング鋼を用いて造形した場合、器物下方ほど平面内の収縮量が大きくなる傾向となった。本研究では、切削機構を有するAM装置で造形を行っており、未溶融粉末が溶融池表面に付着したことによる誤差はない。本研究の器物を造形する際には、切削を行うために器物に対して平面方向 $0.030\text{mm}$ 、 $z$ 方向 $0.400\text{mm}$ の削り代をCAMで設定した。造形物全体に切削を行えていること、また修正器物では造形誤差が明らかに低減したことから、本研究で発生した造形誤差の主要因は、切削精度ではなく、切削工程終了後に器物温度が下がることで生じる熱収縮であると推察できる。さらに、平面内での収縮量が造形物高さで異なったことから、造形物高さ方向に対して内部に温度分布が生じたと考えられる。この温度分布による収縮量の差が造形中に蓄積されることで、 $z$ 軸方向の2球間距離およびA、B面の対角2球間の最大距離といった高さ方向に関わる造形誤差が大きくなったと説明できる。

修正2次元器物の結果(図14)では、造形誤差測定値に基づき修正量を決定したが、2次元器物ほど修正効果が現われておらず、さらにループを行う必要がある結果となった。本研究の修正2次元器物の造形誤差要因として、修正量不足と造形物のそりが考えられる。図15に造形した器物のベースプレート下部の拡大写真を示す。ベースプレート下面にそりが観察された。また、ベースプレートに設置した状態で器物中心付近では圧縮の残留応力が発生していた。ベースプレートから切断した際に、修正量を上回る量で残留応力により器物にそりが発生したため、2次元器物では修正効果が低減したと考えられる。ベースプレートを厚くすることや熱処理によるひずみ緩和を行うことで器物の造形精度はさらに向上すると考えられる。

本研究では、ループを1回行った場合の効果について報告した。さらに数回のループを回すことで、造形誤差はさらに低減すると考えられるが、何回のループでどの程度の造形誤差で収束するかについては今後検討が必要である。

## 6. おわりに

本研究では、粉末床溶融結合方式で切削機構を有するAM



図15 修正2次元器物におけるベースプレートのそり

装置を用いてマルエージング鋼で造形を行った場合の造形精度について検証した。粉末床溶融結合方式の金属AM法では、高さ方向に対して平面内の収縮量が異なることが示唆された。切削機構を有する金属AM装置で発生する主な造形誤差要因は、熱による造形物の膨張・収縮であることがわかった。最大で $0.2\text{mm}$ 程度であった造形誤差を、測定した造形誤差量に基づきCADデータを修正することで $0.05\text{mm}$ 以内の造形誤差に低減させることができることを実証した。

## 謝辞

本研究は、産総研戦略予算プロジェクト 3D計測エボリューション(3D3プロジェクト)(2016-2018)により実施した。本研究で使用した基準器物、測定方法および解析方法は、本プロジェクトで発行したガイドラインに基づき行っており、ガイドラインを作成頂きました運営協議会の皆様に感謝申し上げます。また、本研究で使用した2次元画像測定機は、公益財団法人JKAの機械工業振興補助事業により整備されました。記して感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 榎原弘之：日本におけるAdditive Manufacturingの概要とこれからの課題，計測と制御，Vol.54 No.6，pp.381-385，(2015)
- 2) 経済産業省編：新ものづくり研究会 報告書「3Dプリンタが生み出す付加価値と2つのものづくり」，pp.21-28，(2014)
- 3) C. Gao・C. Wang・H. Jin・Z. Wang et al.：Additive manufacturing technique-designed metallic porous implants for clinical application in orthopedics, RSC Advances, Vol.8 No.44, pp.25210-25227, (2018)
- 4) A. Zadpoor：Frontiers of Additively Manufactured

Metallic Materials, Materials, Vol.11 No.9, 1566,  
(2018)

- 5) 小岩井修二：金属積層造形技術の航空宇宙分野への適用,  
 铸造工学, Vol.90 No.6, (2018)
- 6) 戸羽篤也・中村勝男・平野繁樹他：金属粉末積層造形に  
 による内水冷式金型の製作, 北海道立総合研究機構工業試  
 験場報告, No.314, pp.67-76, (2015)
- 7) P. Hooper : Melt pool temperature and cooling  
 rates in laser powder bed fusion, Additive  
 Manufacturing, Vol.22, pp. 548-559, (2018)
- 8) 高辻利之：ものづくりと計測, 2016年度精密工学会秋季  
 大会学術講演会講演論文集, pp.47-48, (2016)