

# 熱溶解積層法の寸法精度および幾何学的精度

## Dimensional Accuracy and Geometrical Precision of Fused Deposition Modeling

山下 正英<sup>1)</sup>, 鈴木 智大<sup>2)</sup>, 宮下 実怜<sup>2)</sup>

Masahide Yamashita<sup>1)</sup>, Tomohiro Suzuki<sup>2)</sup>, Mirei Miyashita<sup>2)</sup>

**Abstract** : When processing mechanical parts, it doesn't become same as the size indicated by a drawing. When designing a product, it's necessary to decide dimensional tolerance as well as the size. Fused deposition modeling has been developed recently, but the modeling precision of the fused deposition modeling isn't clear. The purpose of this study is to make the modeling precision of the fused deposition modeling clear. An experimental result showed that the feed speed of the nozzle, preheating in a modeling stage and cooling to a modeling thing influence the modeling precision of the fused deposition modeling.

**Keywords** : Fused deposition modeling, 3D printer, Dimension accuracy, Geometric accuracy

### 1. 緒言

機械部品を加工した際に、図面に指示された寸法通りにならず、わずかな誤差が必ず生じる。機能上差支えない最大許容寸法と最小許容寸法の差を寸法公差という[1]。近年の工業製品は高品質が求められており、高精度のものが多く、この場合には寸法公差だけでなく、形状、姿勢、位置および振れが問題となる。これらを幾何学的に正しい形状や位置などから狂ってもよい領域を数値で表したものが幾何公差である[1]。製品の設計において、寸法精度および幾何学的精度は加工方法とともに指示する必要がある。しかし、各加工方法の精度を知り得なければ、これら精度を適切に指示することは困難である。寸法公差および幾何学的精度の一例である真円度の指示例を、図1に示す。

加工法を大きく分類すると、変形加工、除去加工、付加工に分けられる[2]。代表的な変形加工法として、鋳造やプレス加工が挙げられるが、これらの加工法は大よその形状を一度に成形することが可能である。しかし、成形には金型を必要とするため、変形加工は少量生産に向かず大量生産に特化した加工法である。近年、金型を必要としない変形加工法として積層造形法、いわゆる3Dプリンタが注目されている。積層造形法は樹脂が主たる材料であることから迅速な試作(RP: Rapid Prototyping)と呼ばれていた。しかしながら、国際標準では Additive Manufacturing と定義され、金属材料の積層造形法の技術開発が進み、実際に機器等に組み込んで使用される実用部品の製作が可能となってきた[3]。したがって、本加工法においてもその精度を知り得ることは重要であるが、造形方向毎の寸法誤差等の基礎的なデータが報告されている[4][5]ものの、本手法の精

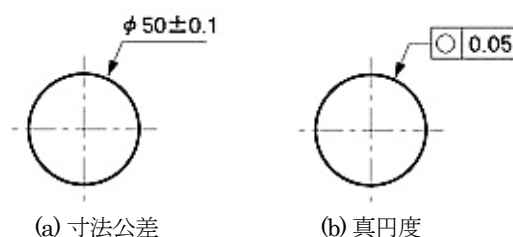


図1 設計図面における精度の指示例

度はまだ明確になっていないのが現状である。

本研究では、積層造形法の寸法精度および幾何学的精度について知見を得ることを目的として、樹脂材料を用いた熱溶解積層法により円柱形状を造形し、三次元測定機を用いて直径および真円度を調べた。特に、ノズル送り速度や造形サイズ、さらに造形ステージへの予熱や造形物に対する冷却に注目して、それらと造形精度との関係について得られた知見について述べることにする。

### 2. ノズル送り速度およびサイズが造形精度におよぼす影響

熱溶解積層法は、熱可塑性樹脂に熱を加えガラス遷移温度以上まで昇温した状態でノズルから必要量の樹脂を押し出し、一層毎に造形して積層することで三次元形状を成形する方法である。造形時のノズル送り速度は速いほど造形にかかる時間を短縮できるが、速すぎると材料の押し出しに不具合が生じてかすれを生じることや、樹脂の冷却が不十分であると造形物の造形精度に悪影響をおよぼすことが想定できる。また、造形サイズが大きいほど、一層の造形

1) 東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科, 生産システム工学コース, 助教

2) 東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科, 生産システム工学コース, 在学

に時間を要するため、造形物の精度に影響をおよぼすことが想定できる。そこで、熱溶解積層法の造形精度の基礎的データとして、ノズル送り速度およびサイズが造形精度におよぼす影響について、実験により調べた。

## 2.1 実験方法

本実験で造形するモデルは、図2に示す単純な円柱形状とする。円柱形状を採用した理由は、寸法精度および幾何学的精度を調べるための三次元モデルとして最も単純な形状であるためである。本研究においては、元の三次元モデルの直径 $\Phi_1$ と熱溶解積層法による造形物の直径 $\Phi_2$ との差( $\Phi_1 - \Phi_2$ )である寸法誤差を寸法精度の評価値とした。また、円柱の真円度を幾何学的精度の評価値とする。測定にはZEISS社製の三次元測定機であるDuraMaxを用いた。各造形物を3回測定し、その平均値と誤差を調べた。円柱のサイズは、高さを20mm一定として、直径を6mm, 9mm, 12mm, 18mm, 24mmと変化させた。直径を変化させて造形することで、造形サイズの影響について調べた。図3に各直径の造形物の例を示す。

本実験に用いる実験装置として、スマイルリンク社製の3DプリンタであるDS1000を用いた。本装置は、造形物を密着させる造形ステージの予熱機能が無く、造形中の造形物に対する冷却機能も無い単純な構造の3Dプリンタである。熱溶解積層法による造形条件を表1に示す。材料には、熱溶解積層法での造形に一般的に用いられているPLA(線径 $\Phi 1.75\text{mm}$ )を用いた。ノズル径は造形しやすい $0.4\text{mm}$ を選択して、ノズル送り速度は $5 \sim 45\text{mm/s}$ まで $5\text{mm/s}$ の間隔で変化させた。図4に造形物の構造と各部の名称を示す。積層ピッチ(一層毎の厚さ)は $0.25\text{mm}$ とした。壁面幅(ノズルから押し出される材料の幅)は $0.6\text{mm}$ で壁面枚数を3枚としたため壁面厚さは $1.8\text{mm}$ である。表1の条件は造形物全てで共通に用いており、内部の充填パターンや壁面厚さの影響による差異がないように考慮した。

## 2.2 実験結果および考察

図5に各造形物の寸法誤差を示し、図6に各造形物の真円度の測定結果を示す。本実験では5種類のサイズで測定を行ったが、プロットが多く見難くなるため、造形サイズの比較的小さなものと大きなものを分けて示している。また、同様な理由でグラフには平均値のみを示し誤差を示していない。寸法誤差については誤差が全て $\pm 1\%$ 未満であったが、造形物の真円度については誤差が $\pm 10\%$ 程度であった。さらに、 $\Phi 6\text{mm}$ および $\Phi 9\text{mm}$ の造形物は、ノズル送り速度が $15\text{mm/s}$ 以上および $30\text{mm/s}$ 以上で、図7に示すように造形が著しく悪くなり三次元測定機による測定が不可能になったため、測定結果をグラフ上にプロットしていない。この原因については、造形サイズが小さい場合において、造形が速いと造形物全体が高温となり、ガラス遷移温度以上そのまま造形されるため大きな歪みが発生すると考えた。なお、以降の実験においても、グラフの示し方

表1 造形条件

材料(線径)	PLA(1.75mm)
ノズル径	0.4mm
ノズル送り速度	5~45mm/s
ノズルヒーター温度	195°C
積層ピッチ	0.25mm
壁面幅	0.6mm
壁面枚数	3枚
壁面パターン	斜線
充填密度	10%
充填パターン	ハニカム

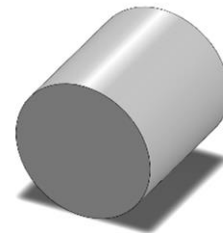


図2 造形する円柱の三次元モデル

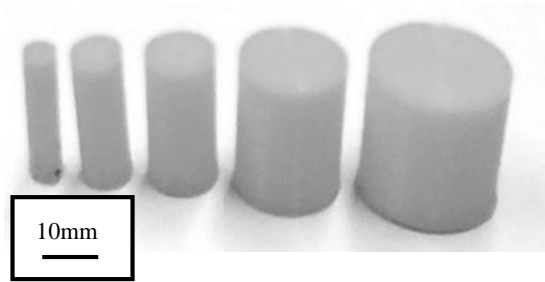


図3 各直径の造形物(左から $\Phi 6\text{mm}$ ,  $\Phi 9\text{mm}$ ,  $\Phi 12\text{mm}$ ,  $\Phi 18\text{mm}$ ,  $\Phi 24\text{mm}$ )

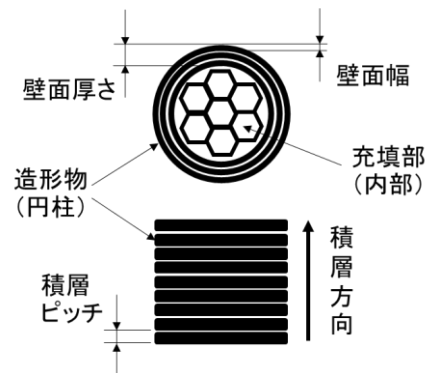
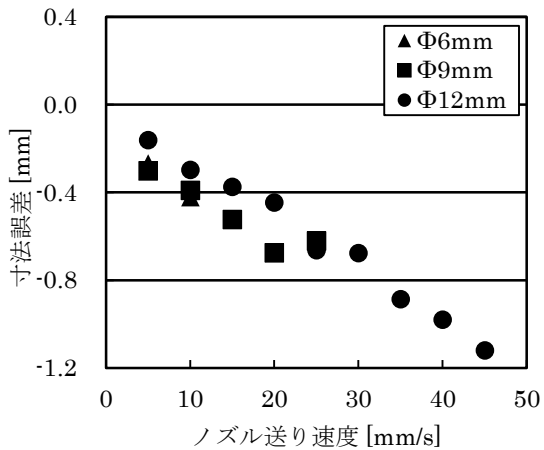


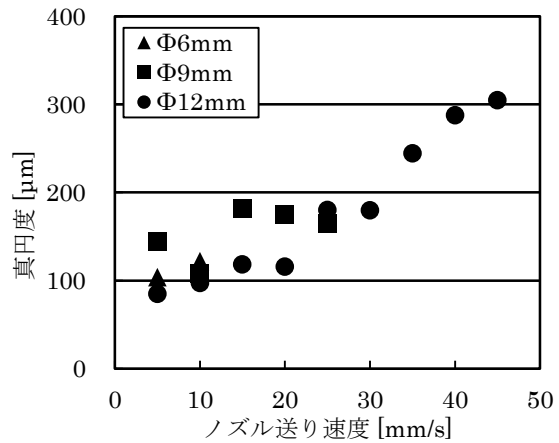
図4 造形物の構造と各部の名称

は平均値のみを示し、造形が著しく悪くなり三次元測定機による測定が不可能になったものはグラフ上にプロットしていない。また、誤差の範囲についても同様な結果であった。

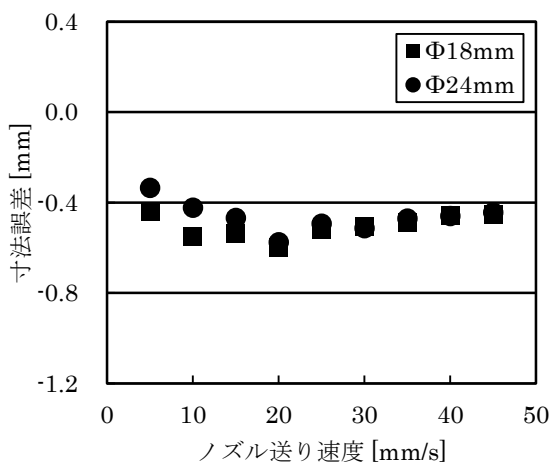
造形物の寸法誤差について、 $\Phi 6\text{mm}$ から $\Phi 12\text{mm}$ までの造形物はノズル送り速度が速くなるに従って大きくなることが認められる。造形物の直径は冷却時の収縮作用が影響すると考えた。造形が速いと造形物全体の温度が高まるこ



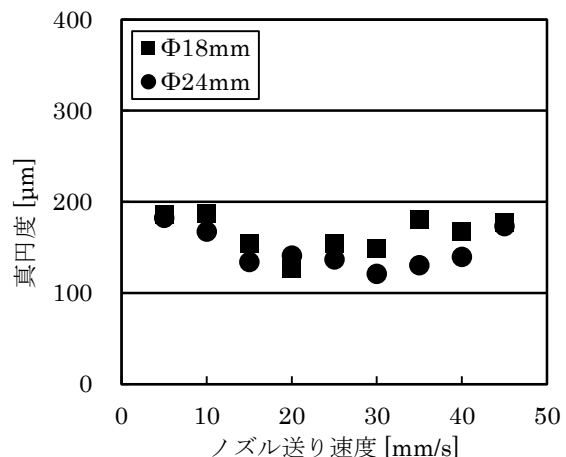
(a) 造形サイズ小



(a) 造形サイズ小



(b) 造形サイズ大



(b) 造形サイズ大

図5 ノズル送り速度と寸法誤差の関係  
(造形ステージの予熱なし, 冷却なし)

図6 ノズル送り速度と真円度の関係  
(造形ステージの予熱なし, 冷却なし)

とが想定される。そのため、冷却時に大きく収縮したと考えた。しかし、 $\Phi 18\text{mm}$ 以上の造形物はノズル送り速度による影響は認められない。直径が大きい場合には一層の造形中に冷却する時間ができるため、速く造形しても造形物全体が高温にならず冷却時の収縮が大きくならないと考えた。

造形物の真円度について、 $\Phi 6\text{mm}$ から $\Phi 12\text{mm}$ までの造形物はノズル送り速度が速くなるに従って悪くなることが認められた。しかし、 $\Phi 18\text{mm}$ 以上の造形物はノズル送り速度による影響は認められない。このことは、造形時の冷却が影響すると考えた。造形物が小さい場合に、冷却が不十分となり冷え固まる前に次の層を造形すると、造形物に歪みが発生すると考えた。しかしながら、直径が大きい場合には造形中に冷却する時間ができるため、速く造形しても歪みが発生しないと考えた。ただし、 $\Phi 9\text{mm}$ 、 $\Phi 18\text{mm}$ 、 $\Phi 24\text{mm}$ の造形物において、ノズル送り速度が $5\text{mm/s}$ もしくは $10\text{mm/s}$ 以下のごく遅い場合において、図8に示すように表面形状が粗くなり真円度が悪いことが認められた。この原因については、材料の押し出し速度がごく遅くなると、ノズル内の圧力上昇が遅くなり、ノズル内面と材

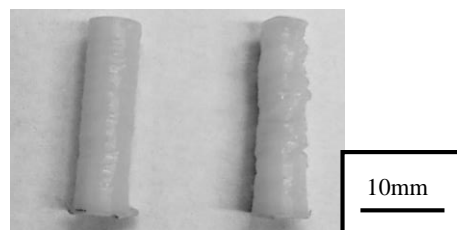


図7  $\Phi 6\text{mm}$ の造形物における大きな歪み  
(左:  $10\text{mm/s}$ , 右:  $15\text{mm/s}$ )

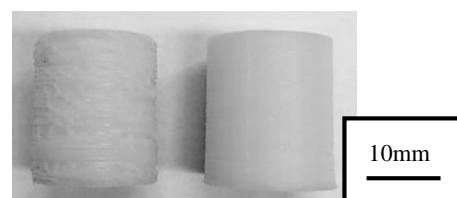


図8  $\Phi 18\text{mm}$ の造形物における粗い表面  
(左:  $5\text{mm/s}$ , 右:  $15\text{mm/s}$ )

料との摩擦力以上に圧力上昇するまでの時間を要することでかすれが発生するためと考えた。

以上のことから、ノズルの送り速度が速いほど造形精度

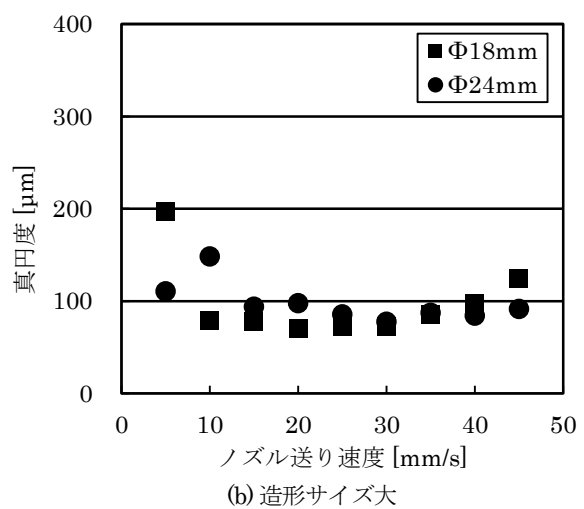
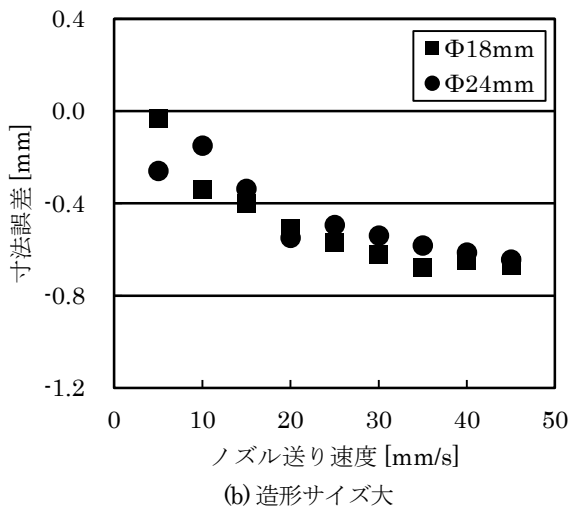
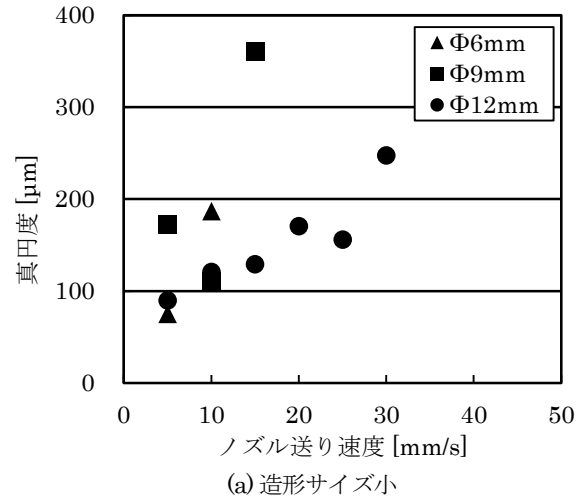
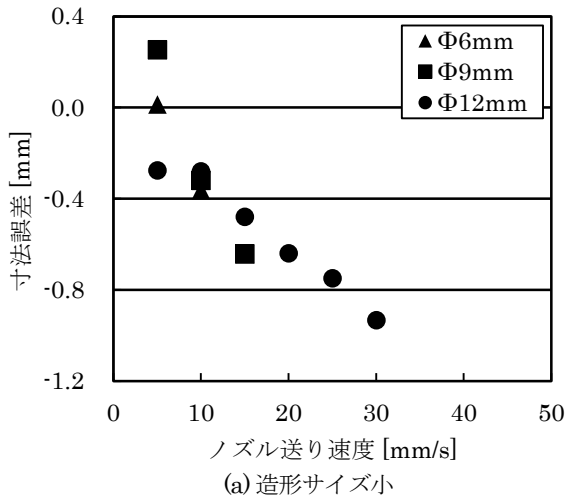


図9 ノズル送り速度と寸法誤差の関係  
(造形ステージの予熱あり，冷却なし)

図10 ノズル送り速度と真円度の関係  
(造形ステージの予熱あり，冷却なし)

が悪化するが，造形サイズが大きい場合には悪化しないことがわかった。また，送り速度がごく遅いと真円度が悪くなる場合があることがわかった。

### 3. 造形ステージに対する予熱が造形精度におよぼす影響

熱溶解積層法による造形において，第1層と造形ステージとの密着が不十分であると剥がれて，造形が失敗することがある。このような失敗が起こらないように，第1層目の密着性を向上させるために造形ステージの面粗度を悪くしてアンカー効果を高める方法や，密着性のよくなるものを付着させる等の様々な方法がある。また，造形物は造形できた後にステージから剥がす必要があるため，造形中に密着しており造形後に剥がれ易いことが望まれる。造形ステージへの密着性を変化させる方法として，造形ステージに対して予熱して造形後に自然冷却させる方法がある。先に述べたように，造形物の造形精度は熱による影響を受けると想定した。そこで，造形ステージに対する予熱が造形精度におよぼす影響を調べることにした。

### 3.1 実験方法

本実験で造形するモデルは，先に行った実験と同様に図2に示す単純な円柱形状とする。造形精度の評価，測定機，造形サイズについても同様として，実験条件については表1に示す条件を共通に用いた。ただし，本実験に用いる実験装置には，ムトーエンジニアリング社製の3Dプリンタである3d Magic egg (MF-1150)を用いた。本装置は，造形物を密着させる造形ステージの予熱機能があり，造形中の造形物に対する冷却機能として2方向からのファン冷却を採用している3Dプリンタである。造形ステージの温度は，メーカー推奨の値を採用し，全ての造形において55°C一定とした。

### 3.2 実験結果および考察

図9に各造形物の寸法誤差を示し，図10に各造形物の真円度の測定結果を示す。本実験において，造形物の精度が著しく悪くなる造形条件は造形物の直径およびノズル送り速度がΦ6mmで15mm/s以上，Φ9mmで20mm/s以上，さらにΦ12mmで35mm/s以上であり，先の実験の結果より低速度であることが認められる。この原因につ

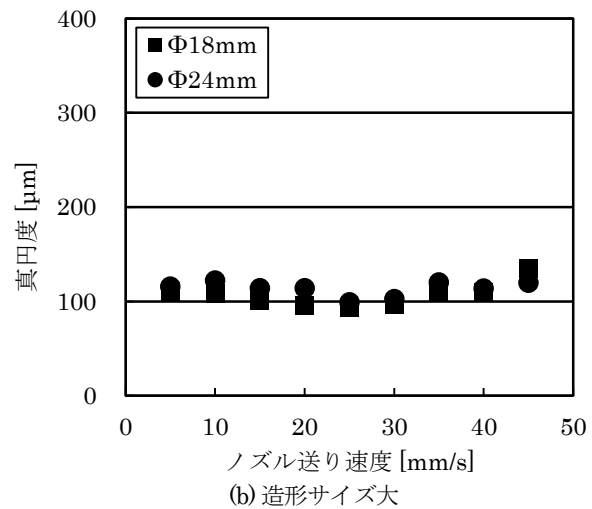
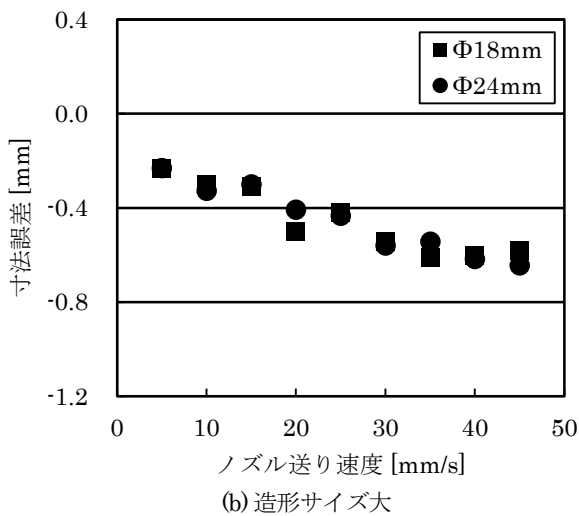
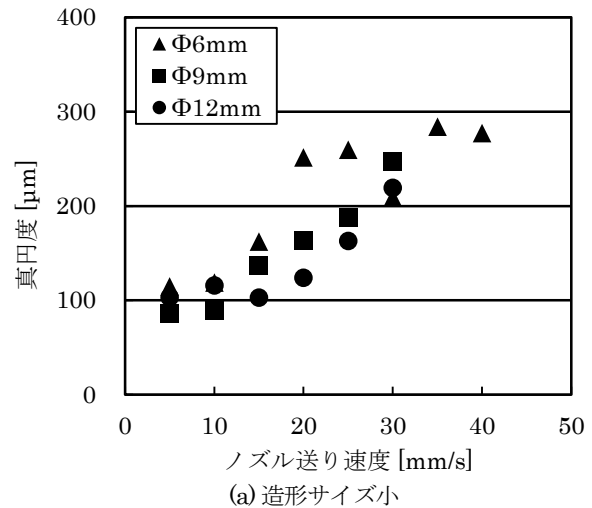
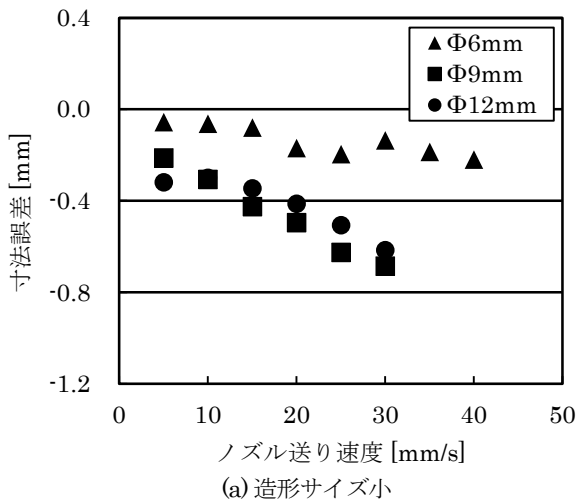


図 1 1 ノズル送り速度と寸法誤差の関係  
(造形ステージの予熱あり，冷却あり)

図 1 2 ノズル送り速度と真円度の関係  
(造形ステージの予熱あり，冷却あり)

いては、造形ステージに対する予熱が造形物全体の温度を上昇させ、ガラス遷移温度以上になり易くなったためであると考えた。また、 $\Phi 12\text{mm}$ 、 $\Phi 18\text{mm}$ 、 $\Phi 24\text{mm}$ の造形物において、ノズル送り速度が  $5\text{mm/s}$  もしくは  $10\text{mm/s}$  以下のごく遅い場合において、図 8 に示すように表面形状が粗くなり真円度が悪いことが認められた。特に、 $\Phi 12\text{mm}$ の造形物においては、寸法誤差がプラス誤差になっていることが認められる。このことから、かすれが生じると、ノズルから押し出される材料の量が不均一になり、場合によってはプラス誤差となる可能性があると考えた。

造形物の寸法誤差および真円度については、先の実験と同様に、ノズル送り速度が速くなるに従って悪化することが認められ、サイズが大きいとその傾向が認められないことがわかる。ただし、寸法誤差において、 $\Phi 18\text{mm}$ および $\Phi 24\text{mm}$ の造形物でノズル送り速度の影響がわずかに認められる。

これらのことから、造形ステージの予熱は造形精度を悪化させることがわかった。また、比較的小さなサイズの造形物においては、ノズル送り速度が速い際の形状の大きな歪みが発生しない範囲が狭いことがわかった。

#### 4. 造形物に対する冷却が造形精度におよぼす影響

先の実験において、ノズル送り速度が速いほど造形精度が悪く、さらに造形ステージの予熱が造形精度を悪化させることがわかった。これらのことは、造形時の造形物温度が高温になることで歪みが発生することが原因であると想定した。したがって、造形中に造形物を冷却することで、造形精度が良好になることが考えられる。そこで、造形物に対する冷却が造形精度におよぼす影響について調べた。

##### 4.1 実験方法

造形モデル、実験装置、造形精度の評価、測定機等の実験方法は、全て 3.1 実験方法と同様にした。ただし、ノズル後方に取り付けられた二つの冷却ファンを造形中常に稼働させて、造形中に造形物を冷却した。本装置のファンは、三洋電機社製の San Ace 40 (最大風量  $0.225\text{m}^3/\text{min}$ ) であり、設定上常に 100% の速度で回転させた。

##### 4.2 実験結果および考察

図 1 1 に各造形物の寸法誤差を示し、図 1 2 に各造形物

の真円度の測定結果を示す。図9 (b)および図10 (b)の冷却を行っていない結果と図11 (b)および図12 (b)の冷却を行った結果を比較すると、冷却を行っていない場合においてはノズルが低速度においてかすれが発生したため精度が悪化しているが、それ以外についてはほぼ同様な結果であることが認められる。従って、造形サイズが比較的大きなΦ18mmおよびΦ24mmにおいては、冷却の効果が認められない。

一方、造形サイズが比較的小さい図9 (a)および図10 (a)の冷却を行っていない結果と図11 (a)および図12 (a)の冷却を行った結果について比較すると、冷却を行った場合において寸法誤差が小さく真円度も良好な結果であることが認められる。さらに、造形物の精度が著しく悪くなる造形条件は、造形物の直径およびノズル送り速度がΦ6mmで45mm/s以上、Φ9mmで35mm/s以上、Φ12mmで35mm/s以上である。従って、冷却を行った場合は、Φ6mmおよびΦ9mmにおいて造形物の精度が著しく悪くならない範囲が広がっていることが認められる。特に、Φ9mmよりも比較的小きなΦ6mmの方が、範囲が広がっていることがわかった。

これらのことから、造形中の造形物に対する冷却は、造形精度を向上させることがわかった。特に、比較的小さいサイズの造形物においては効果が大きいことがわかった。

## 5. 結言

本研究では、積層造形法の寸法精度および幾何学的精度について知見を得ることを目的として、樹脂材料を用いた熱溶解積層法により円柱形状を造形し、三次元測定機によりその直径および真円度を測定した。また、測定した直径から寸法誤差を計算して寸法精度を評価し、真円度から幾

何学的精度を評価した。得られた知見を以下に示す。

- (1) ノズル送り速度が速いほど寸法誤差および真円度が悪化する。
- (2) 造形ステージに対する予熱は寸法精度および真円度を悪化させる。
- (3) 造形中の造形物を冷却することで寸法精度および真円度が向上する。
- (4) ノズル送り速度、造形ステージに対する予熱、造形物の冷却が造形精度におよぼす影響は、造形サイズが大きいと認められない。

以上のことから、熱溶解積層法による造形物の造形精度は、造形物の造形中の温度の影響が大きいと想定できる。このことについては、造形物の造形中の温度を測定する等により検証する必要がある。

## 参考文献

- [1] 林洋次ほか：機械製図，実教出版，pp.103-122，2014
- [2] 平井三友，和田任弘，塚本晃久：機械工作法（増補），コロナ社，pp.1-2，2013
- [3] 芦田極：金属三次元積層造形法に対する産総研の取組み，精密工学会第373回講習会テキスト，pp.5-9，2015
- [4] 村上和夫：3Dプリンタによるプロトタイプング，オーム社，pp.58-60，2014
- [5] 小堀義明，長坂保美：積層造形技術の実用化に関する研究（第2報，樹脂型の実用化の検討），日本機械学会関東支部ブロック合同講演会講演論文集，pp.109-110，2001