

## マルエージング鋼による水冷管を内蔵した金属 3 D 造形金型の製作

戸羽 篤也, 鈴木 逸人, 平野 繁樹, 長船 康裕\*, 葛西 勝明\*\*, 葛西 健央\*\*

### Production of 3D-Printing Metallic Mold that has Inner Water-Cooling Channels by Maraging Steel.

Atsuya TOBA, Hayato SUZUKI, Shigeki HIRANO, Yasuhiro OSAFUNE\*,  
Katsuaki KASAI\*\*, Takeo KASAI\*\*

#### 抄 録

金属粉末積層造形法による実用可能な金型製作に関する知見を得るため、マルエージング鋼粉末を使用して内部に三次元水冷管を配置したプラスチック射出成形用金型を製作した。造形後の時効硬化処理に関しては、事前の溶体化処理を必要とせず、500℃以下×3時間以上でHRC50程度の表面硬さが得られた。また、熱処理時の熱影響による変形も少ないことがわかった。製作した金型で冷却水温度と成形後保持時間を変えた樹脂成形試験を行い、脱型後に生じる収縮変形量を調べた。その結果、材料によって収縮量を小さくする最適な冷却条件があり、PA材やPBT材に対しては冷却水温度を30℃としたときに脱型後の変形が最も小さくなった。また、金型内水冷管による強制冷却で成形後保持時間を短くできることを確かめた。

キーワード：金属 3 D 造形, マルエージング鋼, 内水冷式金型、樹脂射出成形

#### Abstract

In order to get knowledge about the production of practically useable Metallic-Mold by metal 3D-Printing method, we manufactured a Metallic-Mold for the plastic injection molding that located inner three-dimensional water-cooling channel by using maraging steel powder. About the aging heat-treatment after molding, we found the prior solution treatment is not needed, and surface hardness of HRC50 degree was provided in 500 degree Celsius or less and 3 hours or more time. And, it was found that there was little deformation caused by heat influence at the heat-treatment. We performed an examination of resin molding using the metallic-mold by changing retention time after molding and coolant temperature. And we measured a size of shrink deformation after demolding. As a result, we found that there is the most suitable cooling condition to lower quantity of shrinkage for a material, and deformation after demolding it became smallest when we set up coolant temperature with 30 degrees Celsius for PA and PBT. In addition, we checked it was able to get short retention time after molding by forcibly cooling with the inner-cooling Metallic-Mold.

KEY-WORDS : Metal 3D-Printing, Maraging Steel. Inner Cooling Metallic-Mold, Resin Molding

---

\* 室蘭工業大学, \*\* 株式会社サカイ技研

\* Muroran Institute of Technology, \*\* Sakai-Giken Co., LTD.

事業名：重点研究

課題名：金属 3 D 造形による実用金型製造のための加工・熱処理プロセス技術の開発（平成28～30年度）

## 1. はじめに

積層造形法は、三次元形状モデル情報から多層に分割した水平断面を積み重ねて実立体を製作する加工法である<sup>1)</sup>。造形する材料に金属粉末を用いる金属粉末積層造形法（以下「金属3D造形」という）は、粉末を水平に敷き詰め、その表面にレーザー光などの熱線を照射して金属粉末を熔融し、直下の既造形材と溶接して積み上げていく技法である。この方法によれば、通常の機械加工で製作し難い複雑な形状や、内部構造を比較的容易に製作できるほか、機械的性質、熱特性、電気特性など、金属特有の機能を有する三次元立体物を得ることができる<sup>2,3)</sup>。これらの特質を有効に活用する事例として、内部に三次元の水冷管を配置した金型が挙げられ、樹脂成形用金型への応用例が散見される<sup>3~6)</sup>。しかし、その詳細な加工プロセスや強制水冷による効果等について評価をした報告は少ない。

一般に、金型には、多数回の成形に耐えるだけの耐久性が求められる。これを満足させるには、金型表面の硬さを十分に硬くする必要がある。近年、金属3D造形による金型製作に適合した粉末材料として、マルエージング鋼<sup>7,8)</sup>が入手可能となり、金属3D造形の主要材料として使われている。

当場では、平成22年に金属粉末積層造形装置を導入し、いくつかの金属粉末による造形試験に関する基礎データの積み重ねを進めており、平成27年からマルエージング鋼粉末も取り扱っている。金属3D造形においては、その製作時のレーザー照射条件が造形物の金属組織や物性に大きく影響するため、金属3D造形に供する金属粉末ごとに、その造形に適した条件を把握する必要があり<sup>9,10)</sup>、当場ではこれまでの試験でマルエージング鋼の最適な造形条件を把握した<sup>11)</sup>。

本報は、金属粉末造形法を金型製作に応用するための具体的な加工プロセスに関する知見を得るため、造形後の時効熱処理に関わる試験と、具体的に内部に三次元水冷管を配置した樹脂射出成形用金型を製作し、金型として要求される機能面から種々の評価を行ったので、その結果を報告する。

## 2. 試験方法

### 2.1 時効硬化に関わる熱処理条件の影響

試験片および試験金型の製作は、(株)松浦機械製作所製金属粉末積層造形装置 (LUMEX Avance-25, 図1) を使用した。

通常、時効硬化処理を行うに当たり、材料内の化学組成の均質化を図るための溶体化処理を施した後、所定温度の炉内に所定の時間保持して空冷する。これらの処理を想定し、造形材料の溶体化と時効硬化の熱処理条件の影響を調べた。

溶体化処理条件の影響について、試験片をマルエージング鋼粉末で20×12mmの矩形を厚さ4.5mmで造形した後、上



図1 金属粉末積層造形装置の外観  
(株)松浦機械製作所製 LUMEX Avance-25

面と底面を平面研削加工した。溶体化処理は、830~860℃のAr雰囲気中の電気炉内に1時間保持後、炉外で空冷した。その後、試験片を室温に冷却してから表面硬さ計測を行い、同試験片を再度500℃のArガス雰囲気中で3時間の時効硬化処理を行って、表面硬さの変化を計測した(図2)。

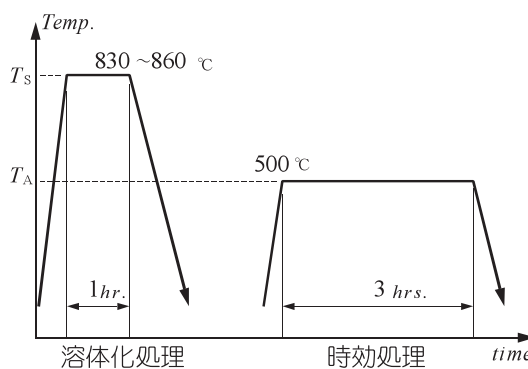


図2 熱処理パターン模式図

時効硬化処理条件の影響については、試験片を12×9mmの矩形を厚さ4.5mmで造形した後、上面と底面を平面研削加工した試験片を用いて、温度を460~520℃の4水準、炉内保持時間を1時間、2時間、3時間、5時間、10時間保持後、炉外空冷した後の試験片表面硬さを計測した。

熱処理に伴う熱影響による変形の度合いを確認するため、時効硬化処理前後の各部位の寸法の変化を計測した。試験片は、80mm×80mm×厚さ20mmの炭素鋼 (S50C) 製ベースプレートの上に、一辺が30mmの立方体の各頂点に直径φ15mmの球を配置した形の試験片を造形した(図3)。試験片の寸法は、マイクロメータを用い、上下に配置したそれぞれ4つの球に対して、図3に示す座標方向についてX方向、Y方向および対角の45°方向、135°方向の6方向(図中①~⑥)ずつ計12カ所と、立方体の対向面について水平X方向、Y方向の距離(図中⑦、⑧)を上、下部で計4カ所計測した。併せて、ベースプレートの寸法についても、ノギスを使用してX方向とY方向の対辺距離を計測した。

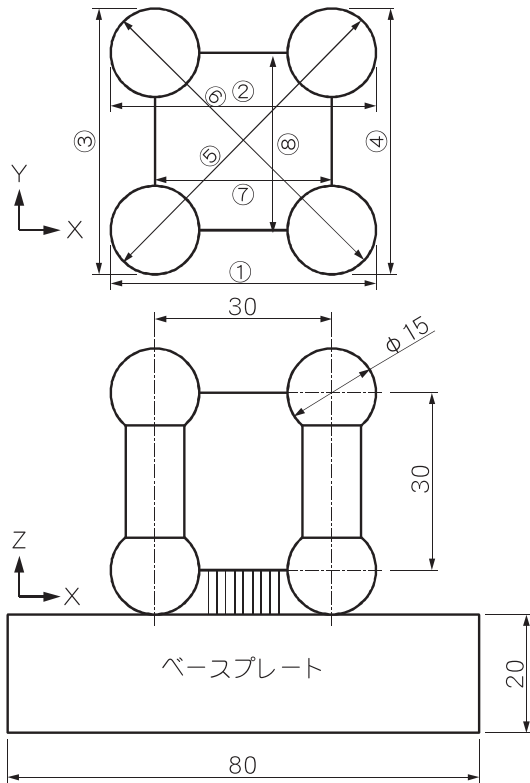


図3 熱変形量試験片

## 2.2 水冷管を内蔵した金型の製作

金属3D造形法の大きな特徴である“内部構造を有する金属製品”への応用例として、冷却用水冷管を内部に三次元配置した金型を想定し、樹脂射出成形試験用金型を製作してその機能性を評価した。

金型で成形する製品は、今後応用展開の参考を得るため、板厚やその拘束状態、肉厚の変化など、種々の評価要素を含んだ形状を考案し、図4に示す形状の製品を設計した。成形時にこれを効果的に冷却するための水冷管を三次元的に配置

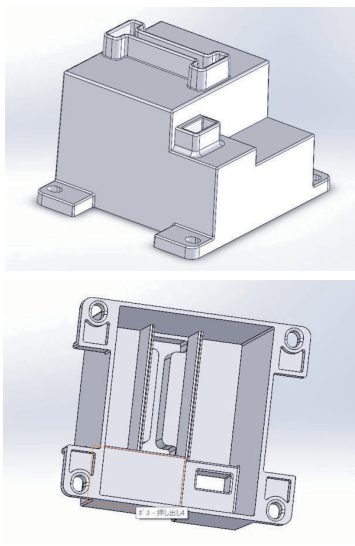


図4 成形試験用に用意した樹脂成形品の形状

することとし、図5に示すような冷却管配置を設計した。

水冷管の内径は、製品形状や部位ごとの制約を受けるので一様ではないが、基本内径をφ7mmとし、金型設計上の制約条件に応じて、φ4mm～φ8.5mmの内径を選択した。

具体的な金型を製作するに当たり、樹脂材料の射出位置、脱型方法等を勘案して、金型の可動型と固定型の分割を検討した結果、樹脂材料の射出口を備えた製品外側の成形に用いる固定型は図6-a)と図6-b)で示す2つの金型で構成し、一方の製品内側の成形に用いる可動型は図6-c)に示す金型で構成することにした。

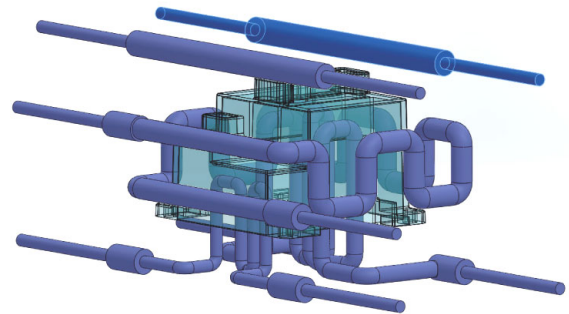
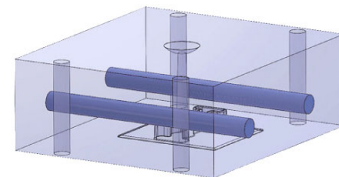
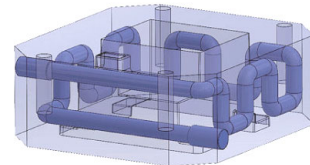


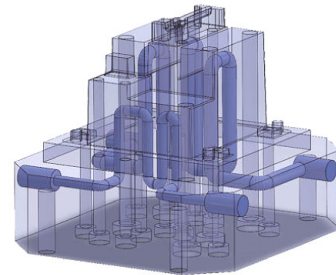
図5 金型内冷却システムの設計



a) 射出口を備えた固定型 I



b) 製品外観形状を成形する固定型 II



c) 製品内側を成形する可動型

図6 樹脂成形金型の構成

これら3つの金型は、マルエージング鋼粉末を用いた金属3D造形で製作し、これらが入れ子として収まるように、モールドベースを設計した。

水冷管内蔵金型の熱履歴とその熱応力に対する耐久性を確認するため、簡易的水冷管内蔵金型を製作し、加熱・冷却を繰り返し、その金型表面の状態、亀裂の有無などを観察した。

金型形状は、図7に示す矩形形状の金型の内部に水冷管を設けた。図中の  $d$  [mm]は、金型表面から水冷管までの距離を示し、 $t$  [mm]は、熱応力を集中させる目的で金型表面に設けた十字形溝の深さ方向先端から水冷管までの距離を示す。製作した試験金型は、 $d$ については3.4mmと4.6mmの2水準、 $t$ については2.3mmと2.8mmの2水準に変化させた。

熱履歴試験は、上記金型試験片から2つを対向させて組み合わせ、内部キャビティ（金型表面側）に電熱ヒータ（100V/500W相当）を挟んだ状態で水冷管に水を流しながら電熱ヒータへの給電と停止を一定サイクルで繰り返し、所定回数の加熱サイクルを終えた後、金型表面の状態を観察した。

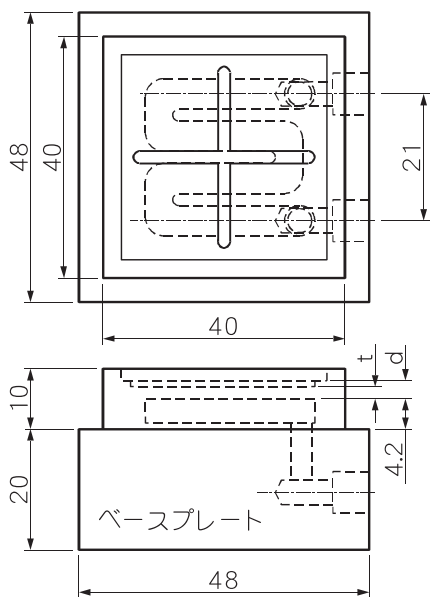


図7 熱履歴耐久性試験金型の形状・寸法

処理後の表面硬さはHRC28付近でほぼ一定となり、溶体化処理温度に関わらず、材料の状態が均質に整えられている状況が推定された。これらの試験片に対して500℃×3時間で時効硬化処理をすると、溶体化処理温度の違いにかかわらずHRC50程度で変化がないことがわかった。

一般に溶体化処理とは、鋳塊として造られた金属材料中の微量元素を均質に飽和させた固溶体にするための熱処理をいうが<sup>12)</sup>、均質な金属粉末をマイクロなサイトでの溶接材の集合と見せる金属3D造形材は、造形した段階で既に合金元素の偏析の少ない均質状態となっているため、一般に行われる溶体化処理で得ようとする効果が造形後に既に得られていると考えることができる。すなわち、金属3D造形で製作した部材は、溶体化処理を省略することができる。

次に、時効硬化に着目して熱処理条件を変えた場合の試料表面硬さの試験結果を図9に示す。熱処理温度を460℃～520℃

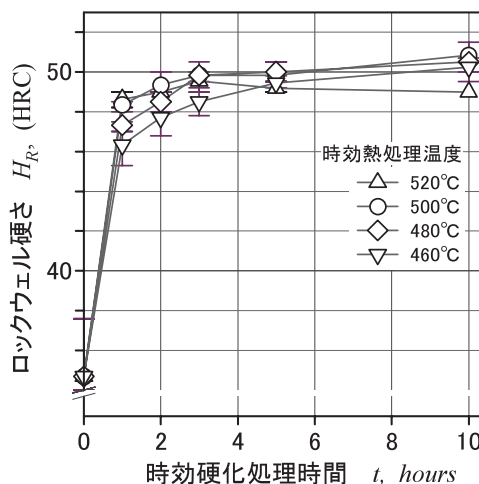


図9 試験片硬さに及ぼす時効硬化処理条件の影響

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 時効硬化処理に関わる熱処理条件の影響

時効硬化処理前に行われる溶体化処理の熱処理条件を変化させた試験で、溶体化処理直後と、引き続き時効硬化処理を行った後の試験片の表面硬さ試験の結果を図8に示す。

溶体化処理温度を830℃～860℃に変化させた場合の溶体化

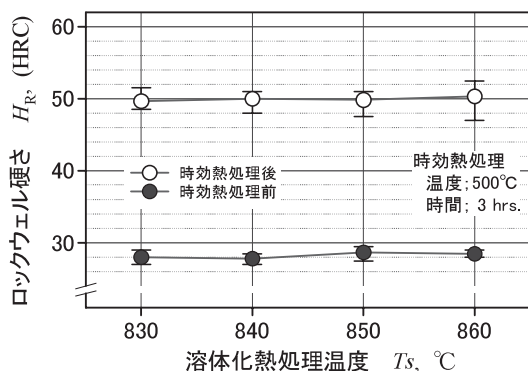


図8 試験片硬さに及ぼす溶体化処理条件の影響

℃と変化させた場合、いずれも熱処理時間の経過に伴って試験片硬さが増大する傾向を示した。また、熱処理温度が高いほど、初期の硬化速度が速くなった。熱処理温度が500℃以下で、処理時間の経過により硬さの増大傾向が認められるが、熱処理温度を520℃とした場合は熱処理時間が3時間経過した時点を経点として、その後の時間経過とともに硬さが減少する過時効が認められた。

この実験結果から、処理温度を480～500℃で3時間以上の条件で時効硬化処理を行うのが適正と判断した。

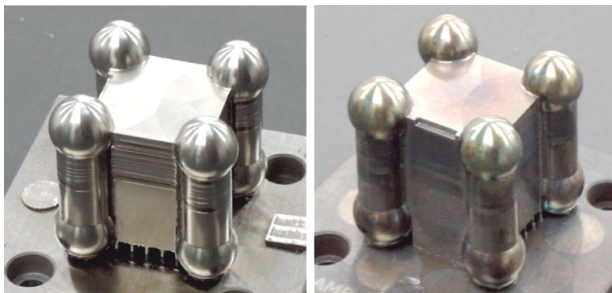
時効硬化処理時の熱影響による造形物の変形に関して、図3で示した試験片の各部位の寸法を、時効硬化処理の前後で計測した結果を表1に示す。表中の①～⑧の数字は図3で示した計測方向を示す。また、表中の「上部」、「下部」の表現は、それぞれ造形物の天井付近とベースプレート直上付近での計測結果である。

熱処理前後の寸法変化は、いずれも20μm以下であり、基準寸法に対する変化率は-0.02%～+0.03%の範囲であった。

表1 熱処理前後の試験片寸法変化

計測部位		計測時期		差分	
位置	方向	熱処理前	熱処理後	[mm]	[%]
上部	①	45.005	45.010	+0.005	+0.011
	②	45.007	45.003	-0.003	-0.007
	③	45.005	45.008	+0.003	+0.007
	④	45.005	45.008	+0.003	+0.007
	⑤	57.373	57.390	+0.017	+0.029
	⑥	57.370	57.363	-0.007	-0.012
	⑦	30.025	30.025	+0.000	+0.000
	⑧	30.000	30.002	+0.002	+0.006
下部	①	45.005	45.012	+0.007	+0.015
	②	45.002	45.012	+0.010	+0.022
	③	45.002	45.008	+0.007	+0.015
	④	45.012	45.012	+0.000	+0.000
	⑤	59.370	57.387	+0.017	+0.029
	⑥	59.383	57.390	-0.003	-0.006
	⑦	30.017	30.020	+0.003	+0.011
	⑧	30.012	30.013	+0.001	+0.006
ベースプレート	X方向	79.996	79.990	-0.006	-0.008
	Y方向	79.990	79.984	-0.006	-0.008

20μm程度の寸法差は、ほぼ機械加工の精度範囲内であり、よほどの厳しい寸法精度が要求される場合を除いて、許容誤差の範囲内と考えられる。当初危惧された、造形時の残留応力の解放などによる大きな熱変形は生じておらず、金型製作において時効熱処理による変形は軽微なものと考えてよいことがわかった。図10に熱処理前後の試験片外観を示す。熱影響による若干の表面の変色は認められるが、酸化被膜などの付着は見られなかった。



a) 熱処理前 b) 熱処理後  
図10 寸法計測に供した試験減の外観

### 3.2 金型による樹脂射出成形試験

内部に三次元水冷管を配置した樹脂射出成形用の試験金型を製作した。全体構造は、図11に示すモールドベースの固定部と可動部に金属3D造形で製作した3個の入れ子を配置し、冷却水の接続管および継ぎ手と、成形後の脱型用押し出しピンなどを設けた。製作したモールドベース外観を図12-a)、固定側（樹脂射出口側）の入れ子金型の外観を図12-b)、可動側の入れ子外観を図12-c)に示す。

この金型を用いて、樹脂射出成形試験を行った。成形試験は、東芝機械(株)製プラスチック射出成形機 (EC100SX-3A)

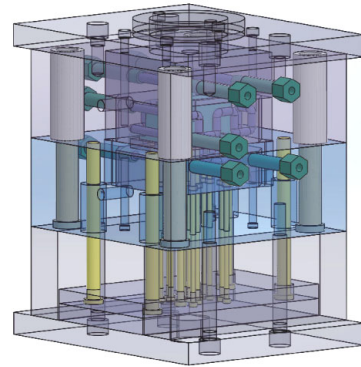
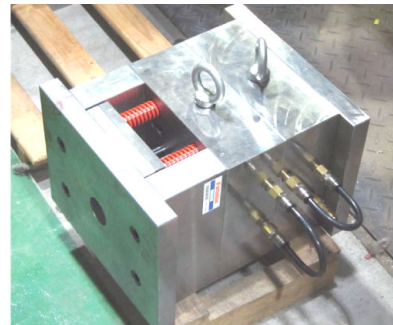
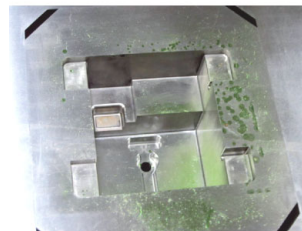


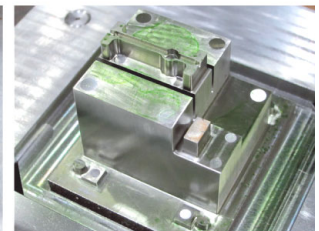
図11 射出成形試験用金型の設計概念図



a) モールドベース



b) 固定側

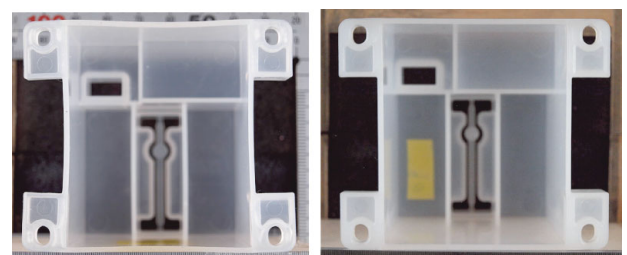


c) 可動側

図12 製作した試験金型の外観

を使用し、型締力480kN、射出圧力50MPa、射出材料温度250℃の条件とし、射出後の型締保持時間を5~60秒、金型へ供給する冷却水温度を15℃、30℃、60℃に変化させて行った。成形材料には、比較的熱収縮量の大きいとされるナイロン系の材料 (PA) と、自動車部品など寸法精度が要求される精密部品に使用されるポリブチレンテレフタレート樹脂 (PBT) を使用した。

図13に試験成形品の外観写真を示す。成形後の製品を観察



a) 冷却水機能不使用 b) 冷却水 30°C20 秒保持

図13 試験成形品の外観

すると、成形条件によって図14に示すような箱形試験片の開口部で成形後収縮による内側への二次変形が認められた。そこで、製品品質をこの収縮量の大きさに評価した。



図 14 成形品に生じた収縮変形の例

PBT材成形品の射出成形後型締め保持時間  $t$  [秒] と脱型後の収縮変形量  $\delta$  [mm] との関係を図15に示す。金型の冷却条件として、冷却水の温度を15℃、30℃、60℃の試験結果を併記している。変形量は、開口片中央付近の最も収縮が大きくなる部位の変形量を、画像計測法で計測した数値である。

いずれの冷却水温度に対しても、射出成形後の保持時間が長くなるにつれて変形量が小さくなる傾向を示した。これは、金型で成形物が冷却される時間が長いほど、脱型時の成形品温度が下がり、脱型後の温度変化が少なくなるためと考える。冷却条件の変形量への影響については、冷却水温度の上昇

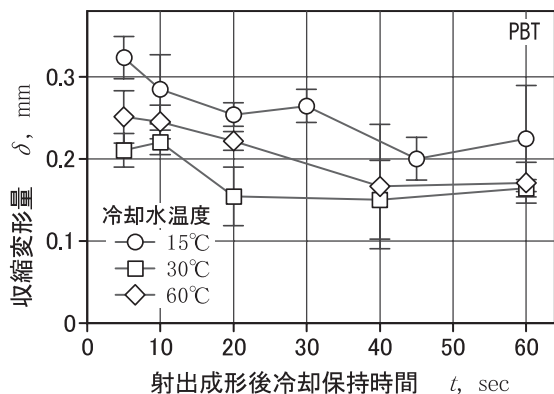


図 15 射出成形後の保持時間と収縮変形量 (PBT)

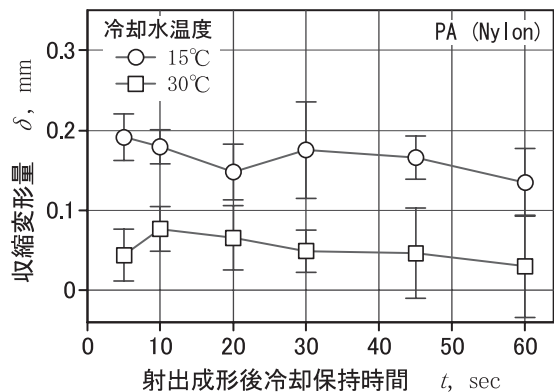


図 16 射出成形後の保持時間と収縮変形量 (PA)

に対して変形量は単純増加とはならず、冷却水を30℃とした場合に最も変形量が小さくなった。同様にPA材を使用した実験で、脱型後の変形を計測した結果を図16に示す。この材料について冷却水60℃で実験を行っていないが、冷却水温度15℃で強く冷却した条件よりも、冷却水温度を30℃として成形した方が、脱型後の変形量を小さく抑えられた。

当初、脱型後の変形は脱型直後の成形品温度の影響が大きいものと推測したが、その後の調査で、高分子材料には結晶性樹脂と非晶性樹脂があり、結晶性樹脂を成形時に急速冷却すると非晶質で成形され、その後結晶化する際に変形を伴うことがわかった<sup>13)</sup>。今回の実験に供したPBT材、PA材ともに結晶性の高分子材料である。今回の実験では、これら特有の再結晶化温度の影響により、射出成形に適正な金型温度条件として冷却水30℃で成形したときに最も変形を抑えられる結果となったと考える。このことは、対象とする樹脂材料ごとに射出成形後の冷却速度に適正値があることを示唆しているが、金型の冷却能は、冷却水温度だけでなく、金型表面から冷却管までの距離、すなわち冷却時の温度勾配の設計によっても制御可能である。その意味から、金属3D造形による金型の設計自由度は、他の金属加工法に比べて優位性が高いものとなる。非晶質の材料（例えばABS材）については実験をしていないので、今後の検証課題とする。

さらに、図15で示したPBT材による成形試験の結果から、冷却水温度が15℃あるいは60℃の試験では、射出成形後の保持時間を長くするほど脱型後の変形が小さくなる傾向が認められるが、これは、良い製品品質を得るために成形後一定以上の型締め保持時間を要することを示している。これに対して、冷却水温度を30℃で行った試験では、型締め保持時間を20秒以上長くしても脱型後の変形量は変わらない。すなわち、この条件では、射出成形後の型締め保持時間を20秒だけ保てば良いことになり、生産性を向上させる効果が期待できる。

一方、金型の耐久性を確認する試験は、図7で示した試験用金型を用いて、図17に示す熱サイクルパターンで行った。加熱温度は、樹脂射出成形を想定し、金型表面でおよそ300℃に設定し、この温度に達したらヒータの電力を遮断して室温付近に下がるまで冷却した。予備試験により、冷却条件と

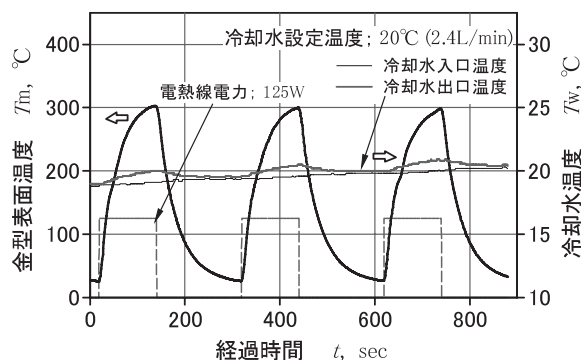


図 17 熱履歴耐久性試験の加熱・冷却パターン

して温調水槽で調整した20℃の水を2.4リットル/分の流量で金型の内部冷却管に常時流す状態で、加熱に120秒、冷却に180秒の1サイクル当たり5分間で、当初500回、さらに追加で500回（合計1,000回）まで熱履歴を与えて、表面の状態を観察した。熱履歴試験の金型の様子を図18に示す。2個の試験金型の間に電熱ヒータを配置し、5分間おきに120秒間125Wの電力を与えて加熱後、電力を遮断して冷却水で冷却した。図19に1,000回の加熱・冷却を繰り返した後の試験金型の表面外観を示す。観察の結果、中央付近に設けた深溝部も含めて、亀裂の発生などの影響は認められず、一定の耐久性を確認した。

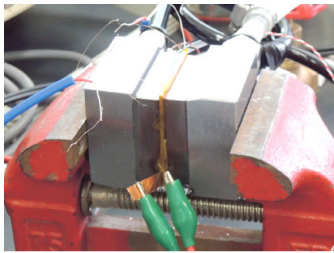


図18 熱履歴耐久試験中の試験金型の様子

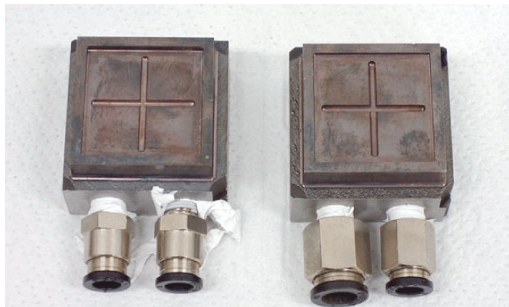


図19 加熱・冷却を繰り返した後の金型外観（1,000回）

#### 4. まとめ

金属粉末積層造形法で金型等の実用金属製品を製作するために多用されるマルエージング鋼粉末を用いた金属3D造形法について、その有効性を調べるため、内部に三次元冷却管を配置した樹脂射出成形用試験金型を製作し、成形試験を行った。実用金型に求められる金型表面硬さの付与について、マルエージング鋼の特徴である時効硬化に関する溶体化処理、時効硬化処理の条件、および熱処理前後の変形について調査を行い、適正な熱処理条件を得るとともに、熱処理に伴う熱影響による変形が少ないことを確認した。

また、金型内部に配置した三次元水冷管による金型冷却の効果を検証するため、射出成形試験用の金型を製作し、樹脂材料を用いて射出成形試験を行った。成形品の脱型後の変形量で品質評価を行い、使用する樹脂に対して射出成形に適正な冷却条件があり、部位による金型温度の精細な制御が有効であることを確認した。また、金型の強制冷却は射出成形後

の脱型までの保持時間を短縮する効果があり、生産性向上にも寄与することを検証した。

#### 参考文献

- 1) 山口修一他：「産業用3Dプリンターの最新技術・材料・応用事例」, シーエムシー出版 (2015.5)
- 2) 京極秀樹：「最近のレーザ積層造形技術の開発状況」, 近畿大学次世代基盤技術研究所報告 Vol.1 (2010)
- 3) 前田寿彦：「レーザ焼結型AM システムのマンユファクチャリングへの活用について」, 素形材 Vol.53 No.2 (2012)
- 4) 米山 猛・香川博之・末廣栄覚他：「金属光造形複合加工金型を用いた射出成形サイクルタイムの短縮」, 成形加工 Vol.19 No.10 (2007)
- 5) 東 喜万・阿部 諭・峠山裕彦他：「金属光造形法の開発と金型への応用」, 松下電工技法 No.78 (2002)
- 6) 阿部 諭・不破 勲・東 喜万他：「金属光造形複合加工システムによる高機能射出成形金型製作」, 松下電工技法 Vol.53 No.2 (2005)
- 7) 木下禾大・徳永洋一・豊島孝行：「マルエージング型ステンレス鋼の組織図と時効硬化」, 日本金属学会誌 Vol.33 (1969)
- 8) 清水謙一・岡本尚機：「18%Niマルエージング鋼におけるNi3Mo析出物の電子顕微鏡による研究」, 日本金属学会誌 Vol.35 (1971)
- 9) 戸羽篤也・平野繁樹：「金属粉末積層造形における製造品質に及ぼす熱線照射条件の影響」, 日本鑄造工学会第165回全国講演大会 (2014.10)
- 10) 戸羽篤也・平野繁樹：「金属粉末積層造形による多孔質金属材料の熱伝導率に及ぼす空隙率の影響」, 日本機械学会2014年度年次大会 (2014.9)
- 11) 戸羽篤也・鈴木逸人・平野繁樹他：「3D積層造形法で製作したマルエージング鋼材の金属組織」, 北海道立総合研究機構工業試験場報告No.316, pp.69~76 (2017.8)
- 12) 野口 徹・中村 孝：機械材料工学, 工学図書, pp.73~74 (2006.3)
- 13) 中條 澄：エンジニアのためのプラスチック教本, 工業調査会, pp.144~154 (1991.12)