

金属粉末積層造形による内水冷式金型の製作

戸羽 篤也, 中村 勝男, 平野 繁樹, 稲野 浩行

The Manufacturing of Metal-Mold with Inner Water Cooled System by SLS

Atsuya TOBA, Katsuo NAKAMURA, Shigeki HIRANO, Hiroyuki INANO

抄 録

金属粉末積層造形法は、通常の機械加工が難しい複雑な内部構造を持つ金属製品などを製作することができる。その応用事例として、内部に冷却用の三次元冷却管を配置した機能性の高い金型の設計・製作を目標に、内部配管を造形するための最適な造形条件や熱伝導率等の熱特性を把握した。また、内部に三次元水冷管を配置した試験用金型を製作し、精密鋳造用ロストワックス模型材による成形試験を行い、内水冷式金型を使用することによる成形品品質および生産性の改善効果を確認した。

キーワード：金属粉末積層造形，三次元プリント，内水冷式金型

Abstract

The Selective Laser Sintering (SLS) process using metallic powder is able to manufacture the Metal-Mold which have a complicated internal structure that is difficult processing by the usual mechanical method. As the application example, for the purpose of a design and manufacture of the Metal-Mold which has the three-dimensional internal channel, we have obtained the optimal modeling conditions for fabricating internal channel, and we also found thermal characteristics as thermal conductivity of the Metal-Mold. Moreover, we manufactured a Metal-Mold which has the three-dimensional inner water cooled channel, and we examined the improvement effect on the quality and productivity of castings by using the mold and the wax material that used to models of the precision casting process.

KEY-WORDS : Selective Laser Sintering Method (SLS), 3D-Printing, Inner-Cooling Metal Mold

1. はじめに

金属粉末積層造形法は、近年、新たな製造プロセスとして注目される三次元プリント技法のひとつで、三次元形状データをもとに、金属粉末を用いて金属製品を迅速に製作する技法である。金属粉末積層造形法を利用すると、従来の機械加工では製作が困難であったり、加工できても日数や製作コストがかかるような複雑形状の金属製品を、比較的容易に製作することができる¹⁾。

本研究は、金属粉末積層造形法の特徴を活かして製作する金属製品として、内部に三次元の冷却水配管をもつ金型製作に着目し、その具体的な製作技法と金型設計に必要な諸物性値を得るための試験を行った。また、内部水冷管を三次元配

置した試験用金型を製作し、これを用いて精密鋳造用ワックス模型用のワックス材料を用いた成形試験により、金型の温度制御による成形品の品質および生産性に及ぼす影響に関する知見を得たので報告する。

2. 研究の目的

金属粉末積層造形法は、材料に金属の微粉末材料を用い、製作しようとする立体のスライスデータ（立体を水平面で切断した時の断面形状データ群）をもとに、レーザー光などの高密度エネルギー熱線を照射して各層の断面形状部分を溶融接合し、これを積層して金属の立体物を得る技法である。

この技法によれば、外形だけでなく内部構造も三次元立体

事業名：経常研究

課題名：金属粉末成形による凝固制御可能な金型製作技術の開発（平成24～26年度）

として造形可能である。機械加工は、もっぱら外形切削によって製品形状を製作するので、内部構造をもつ製品の加工には適さない。内部に複雑な構造を製作する金属加工法として「鋳造法」が知られている。鋳造法では中子と呼ばれる耐火性成形物を利用して製品の内部構造を製作することができる。中子は鋳造時に溶湯の浮力を受けるため、これに耐える熱間強度と肉厚が要求される。従って、鋳造法で細い冷却管を製品内部に配置するような製品では、管の径や配置に制限がある。

これに対して、金属粉末積層造形法は、熱線照射の有無によって断面形状を造形し、これを連続的に積層するので、中子のような特別な部材を利用せずに寸法精度よく内部構造を製作することができる。また、造形後に未溶融の金属粉末を排出できるという条件を満足させれば、内部構造の寸法や形状の制限に関する許容範囲はかなり広いものとなる。

金属粉末積層造形法のこのような優位性を活かした金属製品の例として、図1に示すような、内部に三次元配管を設けた金型が挙げられる。一般に、射出成型や金属製品のダイカストに用いられる金型は、予熱温度の調整や、射出成型後の冷却のため、金型系構造内に水冷管を設ける。多くの場合、金型冷却管は、機械加工によってベースプレート（金型基盤）に特殊なドリルで長直穴をあけて、後でこれらを連結したり、溝穴を掘った複数の部材を組み合わせたたりして内部配管を形成する。

これに対して、金属粉末積層造形法で造型する内部冷却管は、金型表面の形状に沿って自由に三次元配管が可能となるので、ある範囲においてムラのない冷却条件を設定したり、必要に応じて熱の移動量を変化させたりするような金型設計が可能となる。しかし、金属粉末積層造形装置のメーカーらは、使用する材料の機械的性質や熱特性といった金型設計に必要な諸物性値を明らかにしていないため、ユーザーがこれらを計測し、得られた数値によって設計を行わなければならない。また、金属粉末積層造形法の特質から、製品内部構造の部位や姿勢によって製造条件が変化し、品質に差が生じる可能性がある。

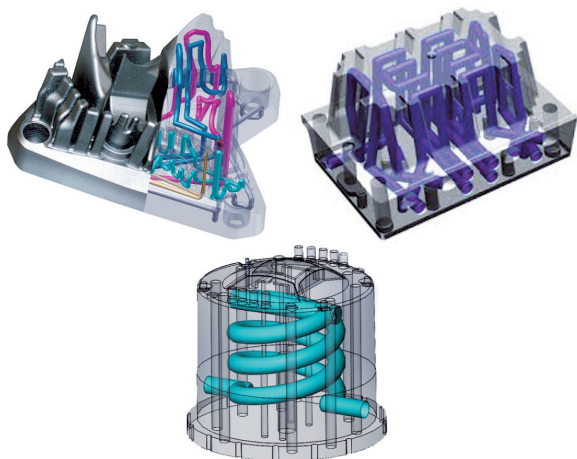


図1 内部に3次元配管した金型の事例
出典；RENISHAWホームページから

そこで、本研究では鉄系金属粉末材料を用いた積層造形装置による三次元水冷管を配置した金型を製作するための設計指標を得るため、製作物の機械的性質および熱伝導率等の熱的特性の把握、内部構造を製作する際のレーザー照射条件と造形品質の関係を調べることを目的に計測試験を行った。また、内部に配置した三次元冷却管を利用して金型温度を制御した場合に、成形品の品質や生産性にどの程度の効果が得られるかを把握するため、試験用金型を製作して精密鋳造用ワックス模型を成形し、成形時の温度変化計測や成形品の外観観察を行った。

3. 金属粉末積層造形の概要

3.1 AM技法について

三次元積層造形技法における製造プロセスの概念について整理しておく。目的の形状を得る従来の加工法には、母材から不要部分を取り除く「切削加工」、材料そのものに永久的な変形を与える「塑性加工」、材料に流動性を与えて型に注入後に固化させる「成形加工」などがある。

近年、新たな製作プロセスとして注目される「三次元積層造形法」は、これらの加工法とは概念を異にするもので、切削加工が母材から製品形状を得るのに不要な部位を取り除いて目的の形状を得る「除去加工」であるのに対して、何もなところから材料を積み上げたり、付け加えたりして目的の製品を得ることから、「付加工（Additive Manufacturing/以下「AM」という）」と呼ばれている。「AM」の呼称は、米国試験材料協会（ASTM）が各種三次元積層造形法を体系化し、規格化を進める中で定められたものである。同協会は、AM技法に関する国際規格を検討する中で表1に示す7つの分類を設けている。

液槽光重合法は、三次元積層造形の中でも歴史が古く、紫外線を照射すると硬化する性質を有する液状の樹脂を材料に用い、積層面ごとに紫外線を照射して断面形状を固化させ、これを積層して樹脂製立体を得る。造形に光線を用いることから「光造形法」とも呼ばれる。

材料押出法は、熱可塑性樹脂を造形材料に用いて、加熱して流動性を持たせた材料をノズルから押し出して既成層と接着させ、これを積層して立体を得る技法である。材料を加熱溶融させて堆積させることから「熱溶融堆積法（FDM）」とも呼ばれる。市販されている安価な三次元プリンターは、この技法を採用しているものが多い。

粉末床溶融結合法は、使用する材料の形態が粉末であり、これを水平に敷き詰めた面に熱線を照射して溶融し、既成層と接合する。材料には、金属あるいは樹脂の粉末を用い、これに熱線を照射して粉末材料自体を溶融して接合する。熱線にはレーザー光を用いるものが一般的であるが、電子線を用いる特殊な装置も実用化されている。

表1 ASTMが定めたAM技法の分類

造形方式	造形材料	特徴
液槽光重合 Vat photo polymerization	光硬化性樹脂	光硬化性の樹脂に光線を照射して選択的に硬化させる
材料押出 Material Extrusion	熱可塑性樹脂	加熱した流動性のある材料をノズルから押し出して堆積させる
粉末床熔融結合 Powder Bed Fusion	金属粉末 樹脂粉末	粉末を敷いた面に熱線を照射して選択的に熔融結合させる
結合剤噴射 Binder Jetting	石膏, 砂 プラスチック	液状粘結材を粉末に噴射して選択的に固化させる
シート積層 Sheet Lamination	紙, 樹脂フィルム, 金属箔	断面形状を切り抜いたシート状の材料を重ねて接着する
材料噴射 Material Jetting	光硬化性樹脂 ワックス	液状にした材料の液滴を選択的に噴射し, 堆積して固化させる
指向性エネルギー堆積 Directed Energy Deposition	金属 (線材・粉末)	材料を供給しながら加熱領域を制御して選択的に熔融結合する

結合剤噴射法は、造形材料に粉末を用いるが、粉末自体を熔融する粉末床熔融結合法とは異なり、粘結材を吹き付けて粉末相互の固化および既成層との接合を行う。粘結材を吹き付ける機構には、書面印刷用のインクジェットプリンターと同じ原理を利用する。吹き付ける粘結材は、糊の水溶液や化学反応で硬化する樹脂を用いるものなどがある。造形材に砂を用いると耐熱性の高い造形物を製作することができ、この技法を応用して鋳造用鋳型を造型して鋳物を得る手法に関する研究も進められている^{2~4)}。

シート積層法は、紙や薄いプラスチックフィルムを断面形状に切り出し、特殊な糊で貼りあわせて立体を造形する技法である。プラスチックフィルムを用いた技法では、光造形法に劣らない品質の造形品を得ることができる。紙積層法で製作した造形物は、密度の高い木製品と同等の品質を実現できるので、鋳造用の木型製作に応用された例もある。この技法では、断面形状を切り抜いたあとのシート材料の再利用が難しく、ほとんどが廃棄されるため、コストや資源問題の観点から、産業用途としてはあまり採用されていない。一方、A4サイズの上質紙にカラー印刷した紙を切り抜いて積層造形する装置は、実物に近い色彩を持たせた造形物が得られることからサンプルモデルの製作用途で使用されている。

材料噴射法は、インクジェットノズルを用いた造形機構を採用する点で結合剤噴射法と共通するが、この技法でノズルから噴出させるのは造形材料そのものである。造形材料には化学反応で硬化する樹脂のほか、ワックスなども用いられる。材料噴出ノズルの配置や構成により、三次元プリント造形法で必須とされるサポートを用いずに立体成型できるため、造形品形状の自由度は高く、複数の素材の噴出量を制御して造形することで材質を傾斜させた造形物を得ることもできる。

指向性エネルギー堆積法は、熱エネルギーを利用して材料を熔融しながら積み上げていく技法で、材料には金属の線材や粉末が用いられる。

3.2 金属光造形複合加工装置

本研究で使用した積層造形機は、金属光造形複合加工装置 LUMEX Avance-25 (松浦機械製作所⁵⁾製、以下「金属粉末造形装置」という)で、その外観を図2に示す。同装置の造形技法は、AM技法の7分類の“粉末床熔融結合法”に該当する。この装置で使用する造形材料は、鉄、ニッケル、銅を主な成分とする金属粉末材である。同装置が「複合加工装置」と称するのは、この装置の造形品製造プロセスの特徴に由来する。すなわち、同装置は金属粉末を水平に敷いた面に



図2 金属粉末積層造形装置の外観
(松浦機械製作所⁵⁾製 LUMEX Avance-25)

表2 LUMEX Avance-25のレーザー照射条件

設定項目	設定範囲
レーザー出力 ^{※1)}	0 ~ 200 ^{※2)} [W]
集光スポット径	0.08 ~ 0.6 [mm]
レーザー走査速度	50 ~ 2500 [mm/s]
レーザー走査間隔	0.1 ~ 0.9 [mm]
レーザー走査方式	全面一括/帯状分割
レーザー走査方向	単一方向/交互方向
層間関係	同方向/XY交互

※1 通常は 160W で固定。

※2 工業試験場に導入した装置の設定範囲。

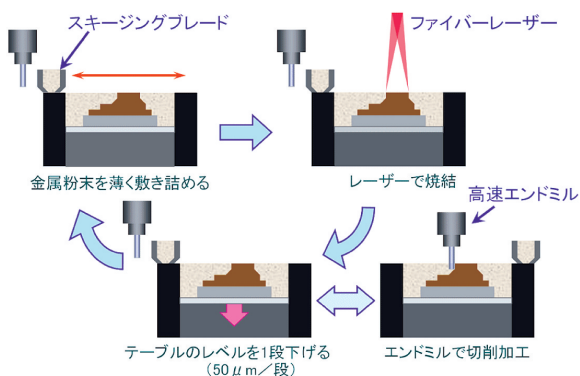


図3 金属粉末積層造形法の加工プロセス（模式図）

レーザー光を照射して材料を熔融接合して立体を造形する「三次元積層造形」の機能に加えて、造形室内に三次元切削加工機能を併せ持ち、積層造形により製作した立体形状の外表面を、機械加工で精度よく上げることができる。

また、この装置では、金属粉末を熔融接合する際に使用するレーザー光の照射条件を項目ごとに表2に示す範囲で選択することができる。これらの設定項目の設定値は、専用のCAMソフトで三次元データからレーザー光の走査パスを生成する際にパスの属性データとして記録される。

同装置の製作工程を図3の模式図に沿って概説する。造型物は、「ベースプレート」と称する鋼製板の上に造形される。金属粉末材料を「リコーター」と呼ばれる機構で水平に敷き、この表面にスライスデータをもとに作成したパスに従ってレーザー光を走査させ、所定の断面形状を熔融接合する。その後、ベースプレートを搭載したテーブルを1層分の積層厚さに相当する分だけ下げる。通常の積層厚さは50μmに設定する。これを10回程度繰り返したところで、三次元切削機構により造形層の輪郭をボールエンドミル等で切削加工する。加工が終わったら、再びリコーターを用いて金属粉末を既成層の上に敷き、レーザー光で所定の部位を熔融接合する。この工程を、造型物の高さに達するまで繰り返して造形物を得る。

4. 実験方法

4.1 内部構造の最適な製作加工条件

金属粉末積層造形では、レーザー光の照射条件により造形物の品質に変化が生じる。特に、内部構造を製作する際、レーザー集光径や走査速度の違いにより形状の再現性や表面状態などに影響を及ぼすことが予測される。

そこで、造形時のレーザー照射条件が造形物の品質へ与える影響を調べるため、レーザー集光径とレーザー走査速度を変化させて内部に水平円管を有する試料を積層造形し、造形物の金属組織観察と内部構造のマクロ観察を行った。

試験片試料は、一辺10mmの立方体とし中央部に直径φ3.2mm、φ4.0mm、φ4.8mmの円形の穴を水平に配置した形

状とした。造形は、レーザー出力を160Wとし、レーザー光集光径をφ0.1mm、φ0.3mm、φ0.4mm、φ0.5mmの4水準、走査速度を80mm/s、100mm/s、120mm/sの3水準で行い、造形試料を鉛直方向に切断した面の金属組織を観察し、レーザー光照射による熔融領域の深さと幅を計測した。また、諸条件で製作した内部円管の外観を観察し、造形時のレーザー照射条件と造形品質との相関関係を分析した。

4.2 造形物の熱伝導率

内水冷管を利用して金型温度を調節して成形材料からの熱移動を制御するには、冷却媒体の選択、流入温度や流量の条件設定のほか、金型表面からの冷却管の深さや配置上の位置関係など、金型の設計が重要になる。成形物から冷媒への熱の流れは、成形物と金型表面、金型内部における金型表面から水冷管までの間の伝熱、水管表面から冷却水への熱伝達による熱移動を見積もる必要がある。その中で、金型表面から水冷管までの間の熱移動量を見積もるためには、造形物の熱伝導率を知る必要がある。

金型表面から水冷管までの間の熱移動量（熱流束） q は以下の式で計算される。

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} [W/m^2] \quad (1)$$

ここで、 λ は金型材料の熱伝導率、 dT/dx は金型表面から水冷管表面に至る部位の温度勾配である。負の符号は、一般に正の向きの温度勾配に対して熱の移動は逆向きとなることを示している。この式で、金型表面から水冷管までの距離と、金型表面温度、冷媒温度が決まれば温度勾配が定まるので、材料の熱伝導率を知ればこの間の熱移動量を見積もることができる。

金属粉末積層造形法で製作する造形物の熱伝導率は、材料の成分・化学組成や造形時の熱線照射条件によって変化するため、成形物ごとに実測して得る必要がある。そこで、金属粉末造形装置で製作する造形物の熱伝導率を得るための試験を行った。

試験片は、金属粉末造形装置により鉄系粉末材料を用いて、直径φ6mm、長さ100mmの丸棒状の造形物を製作し、その後、機械加工で図4に示すように直径φ5mmに仕上げ、その両端にM5×0.8のねじ加工と、基準端面から20mm、30mm、40mm、50mmの位置に直径φ1mm深さ2.5mmの小径穴をあけた。この基準端面側のねじには電熱線ヒーターを取り付け、他方の端面側ねじには銅製の丸棒を取り付けて氷水の入った容器内に浸漬させた。また、4つの小径穴には素

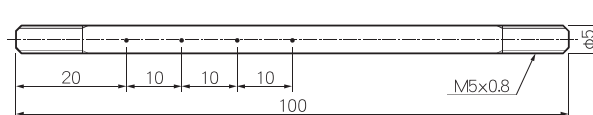


図4 熱伝導率計測用試験片の形状と寸法

線径φ0.2mmのK型熱電対を設置して温度計測を行った。

熱伝導率の測定は、電熱ヒーターに通電した後、熱電対で計測した試験片各部位の温度が定常状態になった時の温度から試料中の温度勾配を求め、電熱ヒーターの消費電力から試料内を流れる熱流束を見積もって、(1)式を変形した次式により熱伝導率を算出した。

$$\lambda = -q \frac{\Delta x}{\Delta T} [\text{W/mK}] \quad (2)$$

電熱ヒーターの発熱量は、ヒーター線に流れる電流と両極間電圧とを計測し、その積で計算される“消費電力”から見積もった。実験条件の設定において、電熱ヒーター加熱後の定常状態で加熱側の温度が100℃を超えない範囲に設定し、発熱量が0.3W, 0.4W, 0.5W, 0.6Wの4水準で試験を行った。熱伝導率は、各実験条件において電熱ヒーターの発熱量を試料断面積で割った値を熱流束値とし、定常状態になった時点の各測温点温度から温度勾配の平均値を求め、(2)式により算出した。

4.3 内水冷式金型の試作と造形試験

金型内部に設けた三次元水冷管による金型温度制御の効果を検証するため、具体的に内水冷管を配置した試験用金型を製作し、成形試験を行った。試験用金型は2分割式とし、図5に示す形状の成形品を得るためのキャビティと、その上部注入口付近と底部に三次元配管を設けた。試験には、成形材料として精密鑄造用ロストワックス模型に用いられるワックス材を選定した。

成形工程は、成形材を約60℃まで加熱して溶融し、35℃に予熱した金型に注入した後、成形材が固化してから成形物を

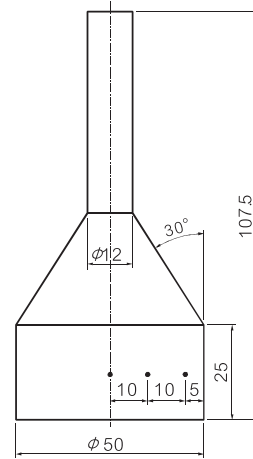


図5 成形試験に用いた成形試料の形状と寸法

取り出してその外観を観察した。また、金型キャビティ内に底面から10mmの高さに、表層から5mm, 15mm, 25mm(中心)の3点(図5に示す位置)にT型熱電対を設置し、成形材を注入後の冷却過程の温度変化を計測した。

金型の冷却条件は、内水冷管に5℃および24℃の冷媒を約27ml/sの流量で流して金型を冷却する条件と、冷媒を流さないで自然に冷却する条件を設定した。

5. 実験結果と考察

5.1 内部構造の最適な試作加工条件

レーザー照射条件のうち、レーザー集光径とレーザー走査速度を変えて試料を造形し、その鉛直断面の金属組織観察写真を図6に示す。鏡面研磨後のナイタールエッチングにより

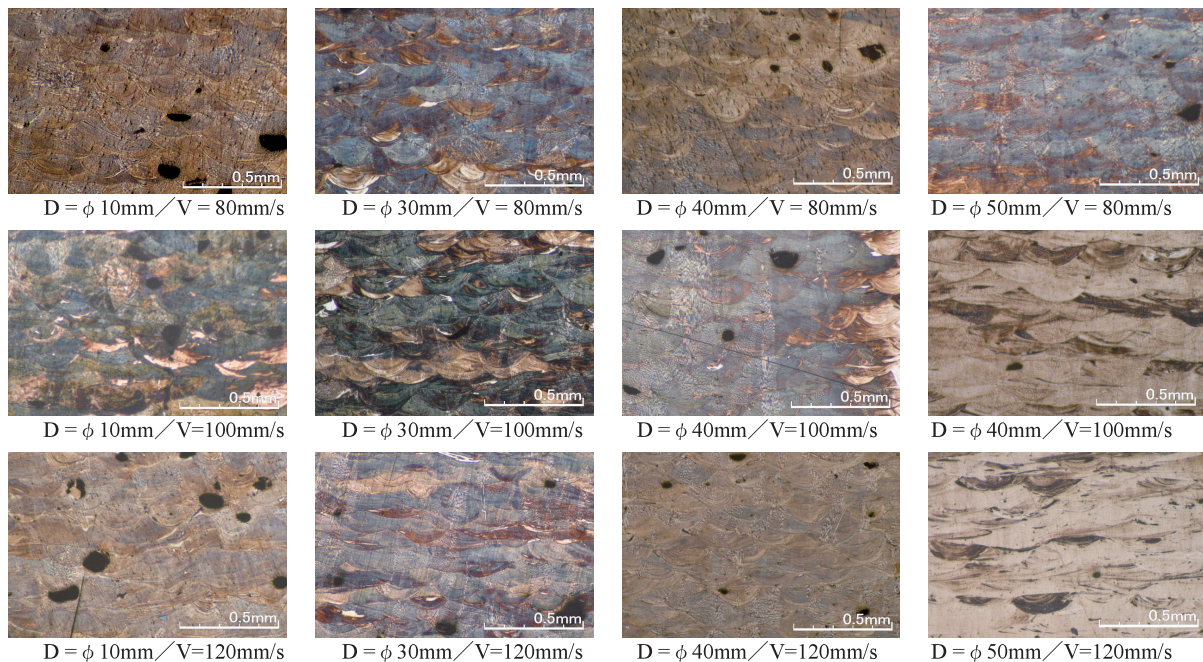


図6 異なるレーザー照射条件による造形物の鉛直断面金属組織

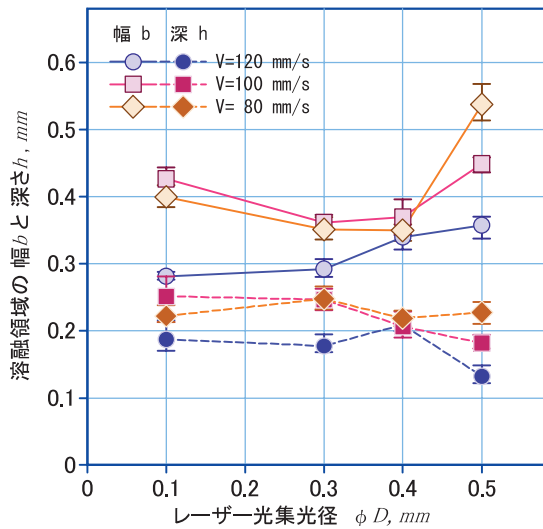


図7 レーザー光単パス照射条件と溶融領域の関係

レーザー光の単パスで形成される溶融域が鱗片状に確認される。これら溶融域形状の深さと幅に着目すると、レーザー集光径の大きさにつれて溶融域の幅が狭く、また集光径および走査速度が大きくなるにつれて、溶融領域深さが浅くなる傾向が認められる。これら金属組織写真を画像処理により計測した結果を図7に示す。走査速度が80mm/sと100mm/sの試験について、集光径を $\phi 0.3\text{mm}$ ～ $\phi 0.5\text{mm}$ として製作した試料の溶融域幅は概ね集光径と一致しているが、集光径を $\phi 0.1\text{mm}$ で製作した試料の溶融域幅は集光径よりかなり大きく計測された。これは、集光径が $\phi 0.3\text{mm}$ 以上では、レーザー光が照らされた範囲で母材表面が昇温し、内部方向に向かって熱が伝わる伝熱形態となるのに対して、集光径を $\phi 0.3\text{mm}$ 以下に絞ると、材料の伝熱特性により微小表面に与えられた熱量が内部方向だけでなく表面方向にも広がるような伝熱形態になったと考えられる。走査速度を120mm/sとして製作した試料では、レーザー集光径が大きくなるにつれて溶融域幅が増大する傾向が見られた。走査速度が大きな条件では単パスのレーザー照射により十分な予熱量が得られないため、溶融域が表層近傍のみとなり、集光径に応じた溶融幅が計測されたと考える。

一方、溶融深さについては、概して集光径が大きくなるにつれて浅くなる傾向が認められるが、顕著な差異は認められなかった。深さ方向への溶融域の広がり、表層に照射されたレーザー光の熱量が内部方向に熱伝導により伝熱されることで生じるが、照射時間は極めて短く、設定した走査速度や集光径の範囲では、熱が伝わるのに十分な時間が得られず大きな差異がなかったものとする。

これらの結果を踏まえ、レーザー光の集光径を $\phi 0.1\text{mm}$ ～ $\phi 0.5\text{mm}$ 、走査速度を80mm/s～120mm/sに変化させて内径約 $\phi 5\text{mm}$ の水平円管を製作し、その断面観察を行った。図8にその断面写真を示す。いずれも円管底部（下側）の表

面粗さに比べて円管頂部（上側）の表面粗さが粗い。水平円管頂部の拡大写真を製作条件ごとに同図右側に示した。集光径を $\phi 0.1\text{mm}$ および $\phi 0.3\text{mm}$ で製作した円管頂部に0.5mm程度の表面粗さが見られるのに対して、集光径を $\phi 0.5\text{mm}$ で製作した円管頂部の表面粗さは若干滑らかになっている。

円管頂部の粗さが粗くなる原因は、金属粉末積層造形特有の造形条件によるものである。金属粉末積層造形における水平円管の造形は、図9の模式図に示すような工程を経る。すなわち、底部は既成層の上に新たな層が積み重ねられるが、円管の中心となる高さを超えると、円管頂部に向かって既成層から積層粉末上に少しずつ張り出しながら造形が進む。このとき、既成層の上に積み上げられた金属粉末の厚さは最大1層分の積層厚さとなるが、下に既造形材がない領域では積層粉末の上にレーザー光が照射されることになる。

既造形部上では、レーザー光照射によって金属粉末と既造形材表面の一部が溶融し、その熱量は既造形材を通じて放出されるため、レーザー光照射面の表面近傍で一様な溶融層が形成される。これに対して、積層粉末材は熱伝導率の小さな

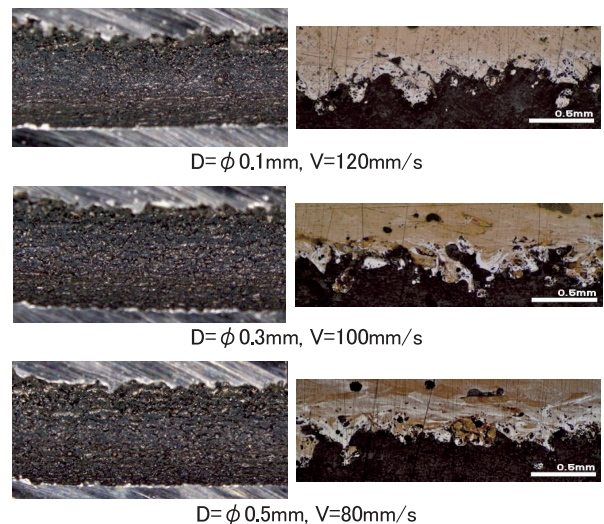


図8 製作した水平円管の断面写真

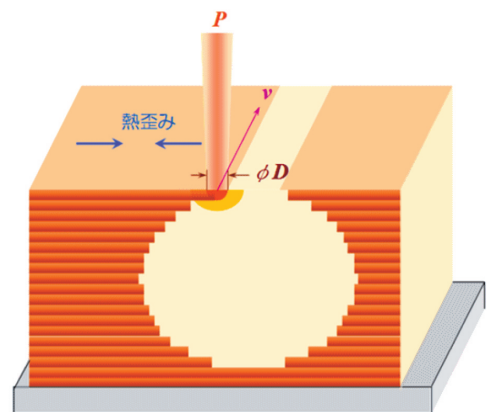


図9 金属粉末積層造形における水平円管の製作プロセス

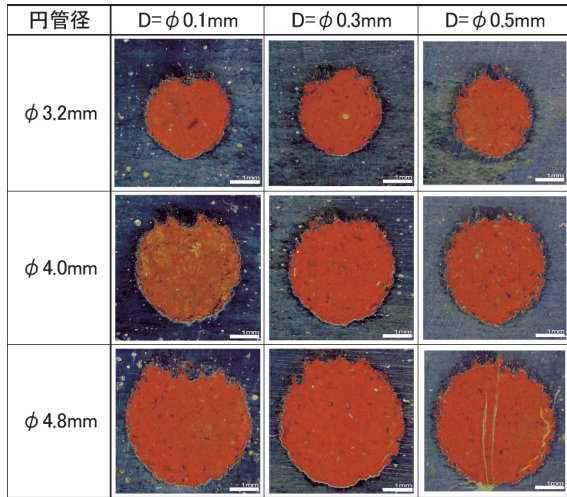


図10 製作した水平円管の断面写真

雰囲気中にあるので、この表面上にレーザー光が照射されると、熱流束が拡散せず、熔融域は深い部位にまで到達し、不安定な熔融層が形成されると考えられる。したがって、積層粉末上に熔融層を形成する場合は、レーザー光の集光径を大きくするほど様な熱量照射面積が広がるとともに熱量の到達深さも浅くなるため、管頂部の造形にはより適した条件に近づく。

図10は、レーザー集光径を変えて製作した水平円管の断面の写真である。円管の径は、φ 3.2mm、φ 4.0mm、φ 4.8mmの3水準で造形した。レーザー集光径をφ 0.1mmに絞って造形した場合、いずれの内径においても水平円管の管頂部は不安定な形状を呈した。レーザー集光径をφ 0.3mm、φ 0.5mmと大きくするにつれて、管頂部の形状は安定した状態となっていく傾向が認められた。

金属粉末積層造形法の特質として、造形物はレーザー光照射による急激な加熱と冷却が繰り返され、大きな温度変化に伴う熱膨張・収縮で熱歪が蓄積される。特に、内部水平円管頂部を造形する部位では、図9で示したように、張り出し部は熱応力によって開口部がめくれ上がるような変形を生じる。次第に張り出し造形が進んで開口部が接続すると、その後の造形が安定するまで接続部付近にレーザー光の熱量が放出されにくくなり、周囲より厚めに積層される。これにより円管頂部は下側に沈み込むような形態で造型される。この下側への沈み込み量が円管径に対して大きい場合、円管内に残った未熔融粉末を拘束して、造形後これを排出するのが困難となる。また、金属粉末積層造形法で製作する内水冷式金型の内部円管の管頂部は、金型表面の成形物に接する面に近い側となるため、安定的に形状を造形できることが望ましい。

管頂部の形状は円形に限らず、矩形断面の水冷管を形成する方が有利な場合もある。いずれの場合も管頂部の成形にはレーザー集光径を広くする製作条件を設定するのが適当であるとの知見が得られた⁵⁾。

5.2 造形物の熱伝導率計測

金属粉末積層造形法で製作した材料の熱伝導率を計測するに当たり、試験方法の妥当性を検証するため、入手できる熱伝導率が既知の金属材料として、Al-Si合金、銅合金（黄銅）、軟鋼（SS400）、炭素鋼（S45C）、ステンレス鋼（SUS304）、純チタンの6種類を選び、図4で示した試験片形状に加工して熱伝導率を計測した。

計測試験の様子を図11に示す。試験片上部には電熱線ヒーターを巻きつけた加熱ブロックを取り付け、下部には純銅棒を取り付けて、その銅棒は攪拌機の上においたビーカー内の氷水に浸漬してある。また、試験片にあけた4つの小孔には熱電対（K型）を埋め込んで温度を計測する。温度計測試験の際は、試験片とヒーターブロックを断熱材で覆い、外への熱の流出を抑えている。

計測試験で得られた各金属材料の熱伝導率の計測結果を図12に示す。図の横軸は、伝熱ヒーターの消費電力を試料断面積で除した値を“見掛けの熱流束値”として整理した。いずれも熱流束値が大きくなるにつれて熱伝導率の計測値が増大する傾向を示すが、これは、実験方法の中でヒーターブロックおよび試験片の断熱方法において完全な断熱状態とはなっていないためと考えられる。すなわち、電熱ヒーターへの通電量を増やして試験片内を流れる熱流束値を上昇させるにつ

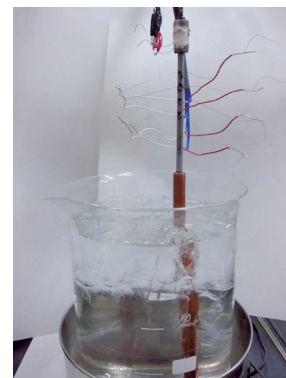


図11 熱伝導率計測試験の様子

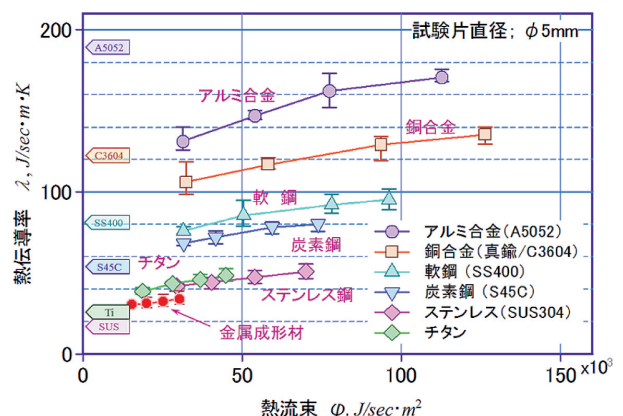


図12 各金属材料の熱伝導率計測試験の結果

れて、ヒーター側の温度が高くなる。断熱材は有限の熱伝導率を有するので、ヒーター側の温度が高いほど断熱材を介して外に放出される熱量は大きくなる。すると電熱ヒーターの消費電力の一部は試験片内部を通らずに外部への損失が増えることになるので、試験片に生じる温度勾配はその分だけ小さくなり、見掛け上の熱伝導率は大きく計測される。

図12の左側に付記した記号は、文献等に記載される各金属材料の熱伝導率の値を示している。アルミ合金、銅合金のように熱伝導率の高い材料は、文献値よりも幾分低く計測され、逆にステンレス鋼、チタンのように熱伝導率の低い材料は、文献値よりも幾分高い値が計測されている。前者については原因を特定できないが、後者については上記と同様の理由で見掛け上の熱伝導率が大きめに計測されたものとする。

材料ごとの熱伝導率の比較目的や、熱損失等の誤差を念頭に入れた設計を心掛けるなどすれば、実運用上の不都合が軽微であることを考慮し、本計測方法で計測した熱伝導率の値を用いることでも有効と判断した。

金属粉末積層造形法で製作した試料を用いて熱伝導率を定常熱流束法で計測したところ、図12のプロットで示すように、30W/mK程度の熱伝導率を得た。金属材料としては熱伝導率が小さく、ステンレス鋼やチタンと同等である。この原因としては、造型材料の金属粉末の組成にNiが20wt%を超える割合で含まれており、これにより造形された材料の金属組織に熱伝導率の低い組織（残留オステナイトなど）が多く含まれるからではないかと考えられる。

また、金属粉末積層造形では、造形時のレーザー照射量を小さくすることにより、多孔質な金属材料を得ることができる。試験片内に空隙を持たせた時の見掛けの熱伝導率を把握するため、造形時のレーザー照射量を変えて試験片を製作し、見掛けの密度と熱伝導率との相関関係を調べた。その結果を図13に示す。レーザー光の照射量は、レーザー光の出力と走査条件により、造形時にレーザー光によって照射される単位面積当たりの熱量（以下「レーザー光熱密度」という）で整理した。レーザー光熱密度が3J/mm²より小さくなると、材料内に空隙が生じ、さらにレーザー光熱密度が小さく

なるにつれて内部空隙率が小さくなる傾向を示す。材料内部の空隙率の増大は、見掛け密度の減少という形でも表現されるが、図13から、材料の見掛け密度と見掛けの熱伝導率の間には強い相関関係が認められた。

空隙率が増大して材料断面の開口率が増えると、相対的に材料の面積が減少するため、熱は見掛けの断面積より小さな面積を流れることになり、実際に材料を流れる熱流束は材料の占める面積割合に応じて変化する。材料の占める面積割合が減少する分だけ実際の熱流束が大きくなるので、その部位には大きな温度勾配が生じる。見掛けの温度勾配が大きくなることは、見掛けの熱伝導率が小さくなることを意味するので、空隙率が増えるにつれて熱伝導率は小さく計測される。材料の見掛け密度と見掛けの熱伝導率の相関関係は、この理由によるものとする⁶⁾。

5.3 内水冷式金型の試作と造形試験

内部に三次元配管を施した試験用金型を製作し、これを用いて成形試験を行った。金型は、図14に示すような構造の金型を2つ組み合わせ、ベースプレートから成形物の注入口部と底部に三次元流路を配管する方式で設計した。金属粉末積層造形法による金型の造形は、図15の写真に示すように、240×125×20mmの炭素鋼製ベースプレートに配管用の穴を機械加工したものを用意し、この上に2つの金型を並べて造形した。金型造形中の様子を図16に、製作した金型の外観を図

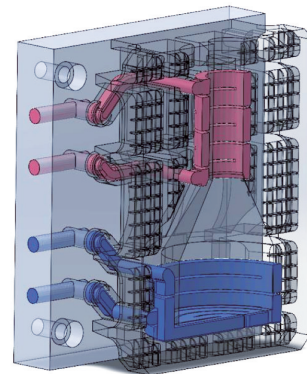


図14 内水冷式試験金型のCAD設計図（半分）

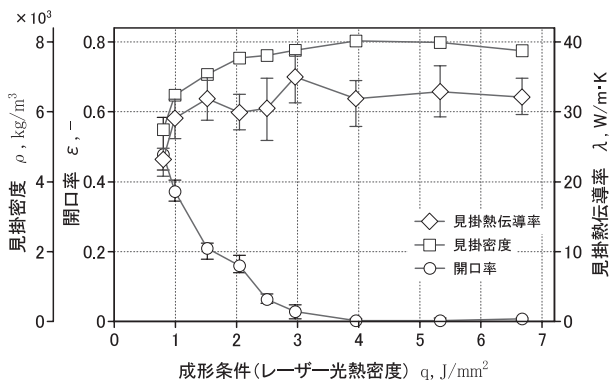


図13 成形条件を変えて製作した試料の熱伝導率計測結果

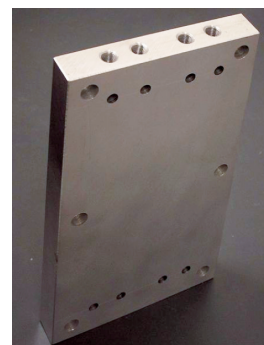


図15 金型製作のため用意したベースプレート

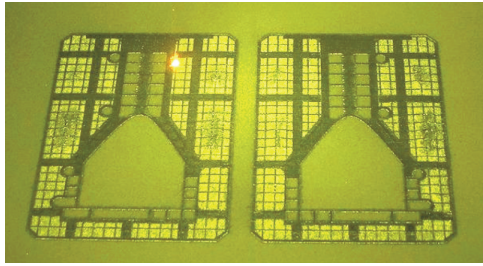


図16 金属粉末積層造形法による金型製作の様子

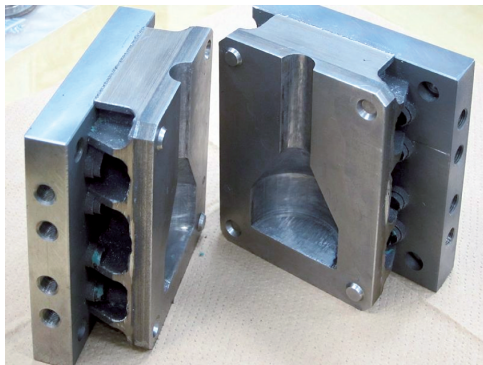
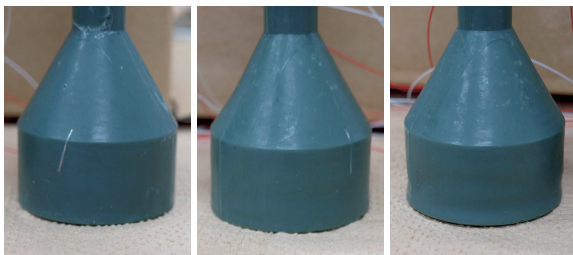


図17 製作した内水冷式試験用金型の外観



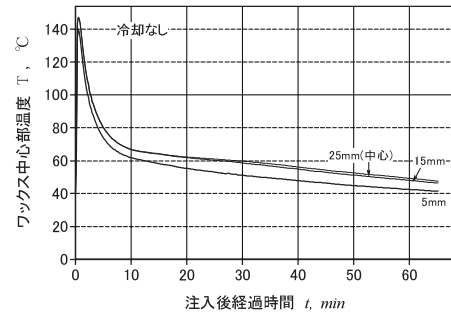
強制冷却なし 水道水(24°C)冷却 冷水(5°C)冷却

図18 成形試験で得たワックス模型の外観

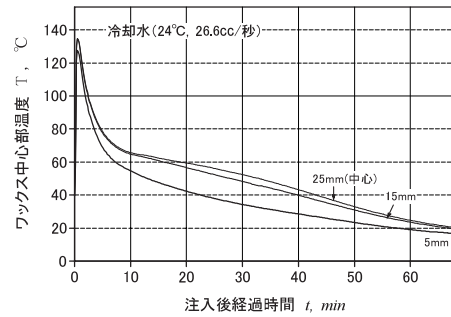
17に示す。造型の高さは約60mmで、加工時間は積層造形と切削加工を合わせて、約180時間を要した。

製作した試験用金型を使用して、精密铸造用ワックス模型用ワックス材料を用いて成形試験を行った。このワックス材の軟化温度は35~40°Cで、液化(熔融)温度は概ね60°Cである。実際の精密铸造用模型の製作では、80°C程度で熔融したワックス材を金型内に圧入して冷却・固化して成形する。本成形試験においては圧入をせず、約140°C程度まで十分に加熱熔融したワックス材を金型内に鑄造し、いくつかの冷却条件で成形することとした。

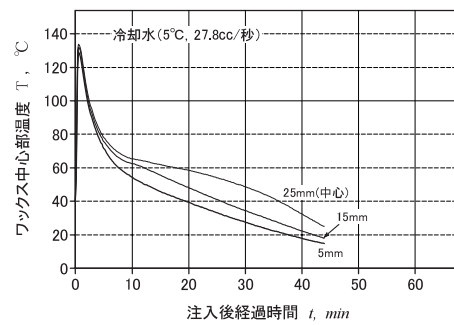
予備実験により、20°C以下の金型にワックス材を注入すると、急冷されて滑らかな表面が得られないものがあったので、成形試験では金型内配管に温水を通して約35°Cに予熱し、その後、配管内の温水を抜いてからワックス材を金型内に注入した。冷却条件は、金型内配管に水を通さないで自然冷却したもの、水道水(約24°C)を通して強制冷却したもの、冷水器を用いて製作した冷水(約5°C)を通して強制冷却したものの3つの条件で行った。また、強制冷却については底部の



a) 強制冷却なし



b) 水道水(24°C)冷却



c) 冷水(5°C)冷却

図19 試験施工による速音性能試験の様子

配管のみを使用して冷却水を流した。

成形試験で得たワックス模型の外観を図18に示す。強制冷却をしない条件と、水道水で強制冷却した条件では、外観上に外引け等の欠陥が見られず、良好な模型を得ることができた。これらに対して冷水で強制冷却したものは外引けによる欠陥を生じた。

欠陥の有無に至る原因を調べるため、図5で示した金型内キャビティの所定の位置に熱電対を設置して、冷却過程における各部位の温度変化を計測した。結果を図19に示す。冷却水の温度が低くなるにつれて材料の冷却速度が増し、短い時間で成形が完了することを示しているが、このこと自体はワックス模型の成形時間の短縮に寄与するので、強制冷却による生産性の向上に効果があることが確認された。

外表面の外引けの有無に関して考察する。外引けの生じなかった、強制冷却なしと水道水冷却の条件では、表層から5mmと15mmの深さにおける温度の変化に大きな差が認められないのに対して、冷水で強制冷却した試料では、冷却の早い段階で表層からの深さ5mmと15mmの部位で温度差が生

じている。これらは、前2者が冷却の過程でワックス模型の表層から深い部位までほぼ同じ温度を保ちながら冷却が進んでいるのに対して、後者は、一定の温度勾配を維持しながら冷却が進んでいることを示している。

ワックス模型内の熱の伝わり方に関して、ワックス材の熱伝導率は約 0.25W/mK ⁷⁾とかなり小さいにも関わらず、強制冷却をしない条件や、冷却水温度が高い条件では成形体内部の温度勾配が小さいことから、表層から順次ゆっくりと凝固が進んだと推定される。これに対して、低温の冷却水で強制冷却した場合は、一定の温度勾配が確認され、冷却過程の早い段階から表層から深い部分まで冷却が進展し、内部でも凝固収縮が生じたことから完全に凝固していない表層の材料を内部に引き寄せる力が働いて外引けが生じたのではないかと推測する。

この結果から、熱伝導率の小さなワックス模型材を冷却水で強制冷却して成形する場合には、内部に大きな温度勾配を生じさせるような過度な強制冷却をすると成形品の品質に不具合が生じる可能性が高いことがわかった。

凝固収縮による引け巣（内引け、外引けを含む）を防ぐには、熔融材料を表層から順次凝固させる「指向性凝固」と呼ばれる凝固形態をとることが必要であり、材料の特性（特に熱伝導率）に応じて冷却速度を制御しなければならないことがわかった。これにより、成形品の形状に合わせて、冷却水管の深さや配置、水管に流す冷媒の温度などを適切に設計することで、成形品の形状や品質を改善するとともに、成形時間の短縮による生産性の向上が期待できる。

6. まとめ

金属粉末積層造形法を利用して内部に冷却水管を自由に配置した内水冷式金型の製作技法の確立と、内水冷管を利用した金型温度制御による成形品の品質や生産性の向上に関する効果の検証を目的として試験を行った。

金属粉末積層造形による内部構造の造形技法について、積層造形の特質を考慮し、特に内部構造頂部を品質よく造形するためのレーザー照射条件に関する知見を得た。

すなわち、内部構造の天頂部を造塊する際は、レーザー集光径を大きくし、積層粉末上になるべく広い範囲に一樣なエネルギーを照射する条件をとるのが有効である。

また、金型設計に必要な物性値に関して、定常熱流束法による計測により、造形材の熱伝導率が 30W/mK 程度であり、造形条件によって見掛けの熱伝導率が変化する。

さらに、具体的に試験用の内水冷式金型を製作し、精密製造用模型に用いられるワックス材による成形試験を行い、内水冷管を利用した金型温度制御により成形品の品質および生産性に向上効果を及ぼすことを確認した。

引用文献

- 1) 山口修一ほか：「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) 日本鑄造工学会：「3次元造形技術の進展」, 第165回全国講演大会・技術講習会テキスト (2014. 10)
- 3) 戸羽篤也・稲野浩行・平野繁樹：「粉末積層成形による鉄鉄鑄物の迅速鑄造プロセス」, 北海道立総合研究機構工業試験場報告No.309 (2010. 8)
- 4) 戸羽篤也・稲野浩行・平野繁樹・桃野 正・八幡一宏・小川貴行・名雪欣也：「粉末RP鑄型による迅速鑄造プロセスの実用性向上」, 北海道立総合研究機構工業試験場報告No.311 (2012. 8)
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) 熱物性ハンドブック：(株)養賢堂；(2000. 4)