

研究論文

積層造形技術の深化による モノづくり分野での価値創造とイノベーション創出

梅田隼史^{*1}、加藤裕和^{*2}、加藤正樹^{*3}

Creating Value and Innovation in the Manufacturing Industry through Advanced Additive Manufacturing Technology

Junji UMEDA^{*1}, Hirokazu KATO^{*2} and Masaki KATO^{*3}

Technical Support Department^{*1*2*3}

金属積層造形技術であるレーザー粉末床溶融結合法を用いて高周波焼入れ用誘導加熱コイル、プラスチック射出成形金型、アルミダイカスト金型を作製し、それぞれ連続焼入れ試験、成形試験、鋳造試験を行った。銅合金粉末から造形した高周波焼入れ用誘導加熱コイルは、100万回以上の耐久性実証に成功した。プラスチック射出成形金型は、銅合金製及び鉄鋼製の両金型について、成形試験等により比較した。アルミダイカスト金型は、水管内面をめっき処理することで鋳造時の性能低下を抑制できる可能性を示した。

1. はじめに

愛知県は「製造品出荷額等」で全国1位を誇り、その中で50%以上を輸送用機械器具製造業が占める日本を代表する自動車産業集積地である¹⁾。そのため、高品質な自動車部品を低成本で大量生産する技術は、愛知県の産業の根幹となっている。

近年、注目を集めている金属積層造形は、複雑な形状の部品製造が可能な高い自由度を示す一方、現状ではコストや生産管理の点で自動車部品のような大量生産に適しているとは言えない。しかし、金属積層造形技術を、大量生産部品を生み出す「親」となる金型や高周波焼入れコイルのようなツールに適用することで、自動車産業に大きなインパクトを与えることが期待できる。

金属の鋳造やダイカスト、プレス加工、プラスチックの射出成形等の成形加工で用いられる金型は、その作製に金属積層造形を活用することで、従来の切削加工では困難であった複雑な冷却水管や構造を内部に配置することが可能になる。これにより、成形時の冷却効率向上、成形品質向上、内部へのセンサー配置による成形時センシング等が実現でき、高機能化を図ることが可能となる。

金型と同様に、金属部品の熱処理に用いる高周波誘導加熱コイルについても、積層造形で製造することに利点が多くある。従来のコイルは、職人の手作業により個別のパーツをロウ付けで接合して作製していたため、品質や寿命にばらつきが大きく、工期が長くなっていた。しかし、積層造形によることで、コイルを一体で作製する

ことが可能となり、工期短縮、長寿命化や寿命の安定化が期待できる。さらに、従来の手作業による作製よりも設計の自由度が格段に向上し、複雑形状も作製可能なため、コイルの高付加価値化が期待できる。積層造形はデジタル親和性が高いため、シミュレーションや計算科学による設計手法を組み込みやすいこともメリットである。

本研究は企業8社、大学と当センターを含む計11機関の参画で実施した、産学行政連携プロジェクトである。本テーマでは金属積層造形を基盤技術として、「高周波焼入れ用誘導加熱コイル」、「樹脂焼付用誘導加熱コイル」、「プラスチック射出成形金型」、「アルミダイカスト金型」、「深絞りプレス金型」、「磁気応用製品」、「高強度軽量部材」を開発ターゲットとして研究開発を行った。本稿ではこれらのうち、高周波焼入れ用誘導加熱コイル、プラスチック射出成形金型、アルミダイカスト金型の開発結果について記す。

2. 実験方法

2.1 各開発ターゲットの積層造形による作製と試験方法

2.1.1 高周波焼入れ用誘導加熱コイル

高周波焼入れは、コイルに高周波電流を流すことで発生する磁場を利用して金属の表面を加熱し、さらに急冷することで硬化させる熱処理技術である。そのコイルは、被加熱物の形状や焼入れ範囲、必要硬化層の深さに応じた形状や寸法に設計・作製される。

コイルの造形は、銅合金(Cu-Cr-Zr)粉末を原料とし、

*1 技術支援部 試作評価室 *2 技術支援部 計測分析室 *3 技術支援部 濱戸窯業試験場（現三河繊維技術センター）

レーザー粉末床溶融結合法(L-PBF: Laser Powder Bed Fusion)方式の積層造形法により行った。L-PBF 法は、レーザーを熱源に用い、金属粉末を溶融・凝固させて積み重ねていく金属積層造形方式の一種である(図 1)。積層造形装置はティーケーエンジニアリング(株)所有の SLM280PS (Nikon SLM Solutions)を用い、既報²⁾に準じた方法で造形し、必要に応じて熱処理を実施した。なお、コイルの形状設計には熱処理シミュレーションを活用し、被加熱物の形状や焼入れ範囲、必要硬化層の仕様を満たすコイル形状を設計した。作製したコイルにより、連続焼入れ試験を実施した。

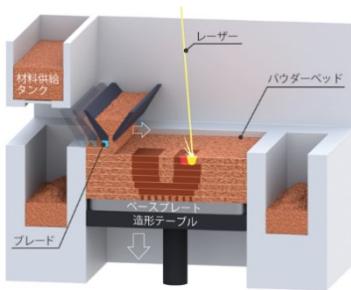


図 1 L-PBF 法による金属積層造形の模式図

2.1.2 プラスチック射出成形金型

プラスチック射出成形は型閉、樹脂充填、保圧、冷却、型開、取出のサイクルで行われ、生産性向上のためにはハイサイクル化が重要である。この中で冷却工程は金型の冷却性能に左右され、冷却性能の高い金型を実現できれば射出成形全体のハイサイクル化が達成できる。

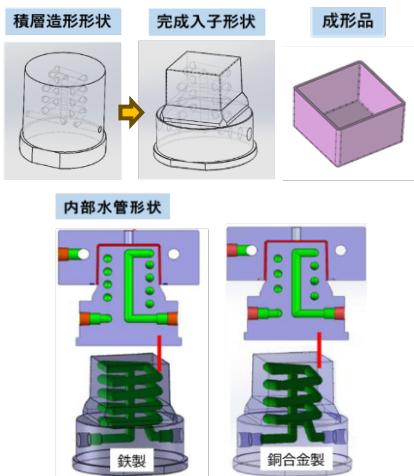


図 2 積層造形による箱形成形用金型の作製

本研究では、材質の異なる積層造形金型として、鉄鋼製及び銅合金製をそれぞれ作製し、その冷却性能及び成形品の寸法精度について検証した。金型(入子)は、図 2 に示すように箱形成形用とし、内部には、らせん形状の水管を配置した。鉄鋼製金型は、マルエージング鋼を材料粉末に用いて ProX DMP 200 (3D Systems)により造形し、銅合金製金型は 2.1.1 と同様の方法で造形した。

両者とも、造形後に機械加工により仕上げを行った。なお、鉄鋼製金型は、銅合金製よりも水管表面積を大きく設計した(図 2)。作製した 2 種の金型を用い、図 6 の構成で金型に 90°C の温水を流したときの金型温度の時間変化を計測し、材質による熱交換性を検証した。また、ポリアセタールの射出成形により箱形成形体を成形し、設計寸法との差異を調査した。

2.1.3 アルミダイカスト金型

アルミニウム合金のダイカスト成形では、金型温度が高くなる部分における成形時の焼付発生等が問題となっており、効率的な冷却が望まれている。しかし、従来の機械加工では、その冷却用水管の配置には制限があった。そこで自由な水管配置が可能な積層造形によりアルミダイカスト金型を作製することで、既報のとおり冷却効果が高く高品質な成形体が得られることがわかっている³⁾。本研究では、そこで判明した新たな課題である、水管内面の防錆および平滑化に取り組んだ。

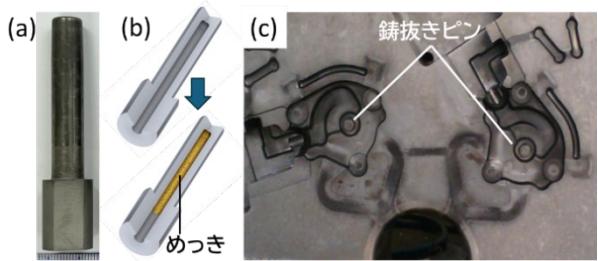


図 3 (a)鋳抜きピン外観、(b)水管内面めっき模式図、(c)型内配置

水管内面の防錆には無電解めっき法を選定し、その検証は、図 3 に示す「鋳抜きピン」形状の金型で実施した。水管は直穴形状であり、本来積層で作製する必要性はない形状であるが、評価の迅速性を重視したことと、過酷な熱衝撃を受ける金型であるため、めっきの耐久性評価に適するという理由で本形状を選定した。積層造形は 2.1.2 の鉄鋼製金型と同様にマルエージング鋼で行い、造形後に所定の機械加工・熱処理を実施した後、その水管内面に無電解めっき法による Ni-P めっきを施した。めっき厚みは 15 μm 狹いとし、比較用にめっきの無い鋳抜きピンも用意した。鋳造試験は型締力 350 トンマシンを用い、1 万ショット以上の鋳造を実施し、水管内面のめっき有無による違いを比較した。鋳抜きピンの伝熱性能は、70°C の温水通水を行い、室温からの鋳抜きピンの温度上昇を赤外温度カメラで計測することで評価した。

水管内面の平滑化は、積層造形後に遊離砥粒研磨装置(小山鋼材(株))により行った。遊離砥粒研磨とは図 4 に示すように試験用金型の水管出入口からアルミナ粒子を懸濁させた水を加圧往復運動させる研磨方法であり、水管内面の研磨が可能である。研磨時間を 10、20、60 分

間と変化させたときの表面粗さを共焦点顕微鏡 DCM8 (Leica Microsystems)により測定した。

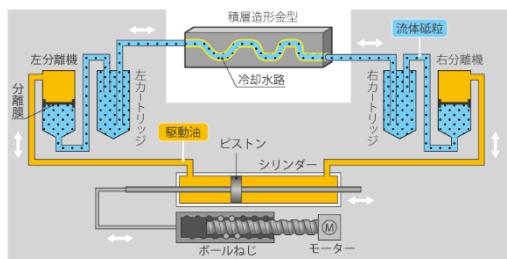


図 4 遊離砥粒研磨法の模式図

3. 実験結果及び考察

3.1 高周波焼入れ用誘導加熱コイル

L-PBF 法により作製した銅合金造形物についての材料的調査の結果は、既報のとおりである²⁾。光学顕微鏡により銅合金造形物の金属組織を観察したところ、L-PBF 法の特徴である局所的なレーザーによる金属溶融・凝固過程を示す構造が明瞭に観察され、空隙等の欠陥はほとんど見られなかった。このことは、銅合金粉末が適切なレーザー条件で溶融・凝固することで緻密体を形成したことを示している。また、常温から高温における機械的強度は、コイルとしての使用に問題がないことを確認した。

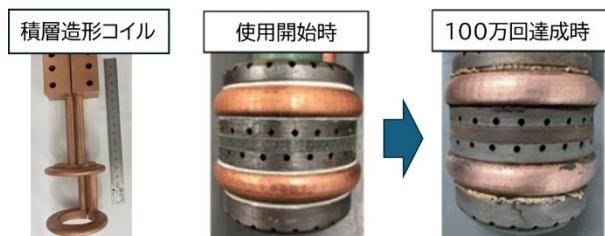


図 5 連続焼入れ試験 100 万回実施前後のコイル変化 (灰色部分はコア)

積層造形したコイルの高周波焼入れプロセスにおける性能や耐久性を実証するため、連続焼入れ試験を実施した。図 5 に積層造形したコイルの外観と、焼入れ前および 100 万回焼入れ後のコイル変化の様子を示す。造形したコイルは焼入れ回数 100 万回という非常に過酷な回数の処理に耐え、コアと呼ばれる別部材の破損は見られたものの、コイル自体に異常はないことがわかった。このことは、3D スキャンによる寸法変化調査、X 線 CT による内部欠陥調査により確認しており、コアの取り換えによる更なる継続使用も可能であった。従来の製造法によるコイルの平均寿命が約 10 万回であることと比較すると、積層造形コイルははるかに高い耐久性を有していることが明らかとなった。

積層造形によるコイル作製は耐久性向上のみならず、製作期間の短縮や、設計自由度向上によりシミュレーション

との適合性が高いことも大きな特長である。既に、これまで誘導加熱による焼入れが不可能であった特殊形状部品にも適用できるようになってきており、今後もその高度化が期待できる。

3.2 プラスチック射出成形金型

2.1.2 で作製した銅合金及び鉄鋼製金型に 90°C の温水を流したときの金型温度の時間変化を図 6 に示す。銅合金製金型は、鉄鋼製のものと比較して、特に通水開始初期の昇温速度が大きい。これは、銅合金の高い熱伝導率によるものであり、熱交換性能に優れることがわかる。実際の射出成形においては、冷却時間の短縮が可能となり、約 40% の成形サイクル時間の短縮となった。

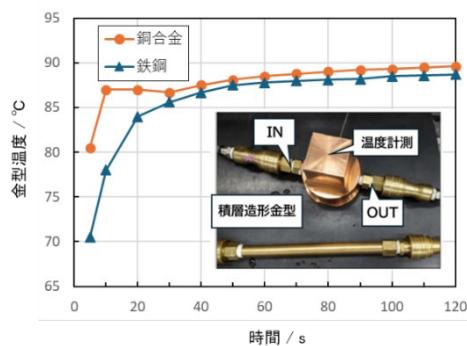


図 6 金型材質の違いによる金型温度の時間変化

次に箱形成品の寸法を計測し、金型材質による違いを検証した。図 7 に冷却時間と成形品の設計寸法からの変形量を示す。変形量は図のように正方形の各辺の中点 a, b, c, d の内側への変位を正とし、その平均値とした。この結果から、銅合金製金型の方が成形品の変形が小さいことがわかる。これは高い金型冷却性能によるものと推測されるが、別の材料での実験等も踏まえた検証が今後の課題である。銅合金の高い熱伝導性と積層造形の設計自由度の両立によるハイサイクル化や高品質成形が期待できる。

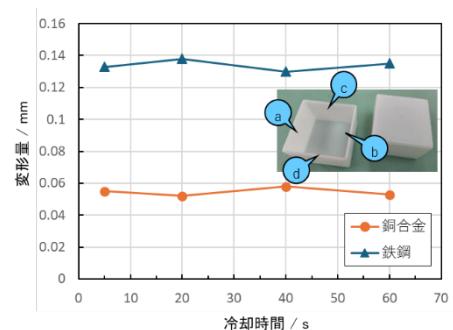


図 7 金型材質の違いによる成形品寸法の変化

3.3 アルミダイカスト金型

鋳造試験の前に、水管めつき処理有り・無しの鋳抜きピンそれぞれの伝熱の様子を、温水通水テストで評価した⁴⁾。その結果、めつき処理の有無による温度上昇の差

はほぼなく、めっき膜による熱伝達の阻害はほとんどないことがわかった。一方、鋳造 10,671 ショット後に同様の温水通水試験をすると、めっき処理無しの鋳抜きピンは、めっき処理有りのものと比較して温度上昇が遅く、伝熱性能が低下していることがわかった。このことは、水管内面へのめっき処理が、鋳造時の金型冷却性能の低下抑制に効果的であることを示唆している。

その理由を調査するため、鋳造後のめっき処理有り・無しの鋳抜きピンを切断し、断面を観察した(図 8)。めっき処理無しの水管内面(図 8(b))には、目視でわかるほど広範囲に鋳およびスケール付着が認められ、電子顕微鏡観察によると $100\mu\text{m}$ を超える厚さでスケールが堆積していた。一方で、めっき処理有りの鋳抜きピンでは鋳やスケール付着量ははるかに少なく、表面にはめっき被膜が残存していた(図 8(a))。このことから、めっき処理は鋳発生抑制、スケール生成抑制の両面からの効果があることが示唆され、課題解決に有望である。ただし、めっき処理の鋳抜きピンにおいても、一部でめっき被膜が存在しない箇所があり、そこでは鋳の発生が認められた。これは、積層造形由来の水管内面の粗さから、均一な全面めっき被膜の形成が難しかったためと考えられる。

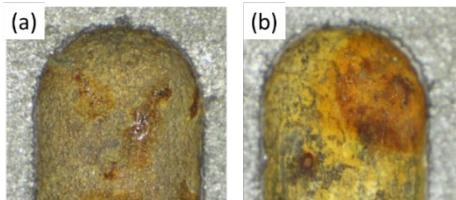


図 8 鋳造 10,671 ショット後の鋳抜きピン断面写真
(a)めっき処理有り、(b)めっき処理無し

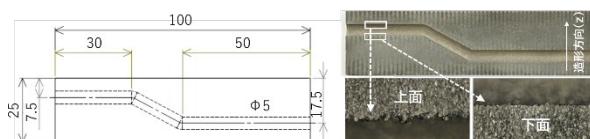


図 9 研磨試験用金型の図面と断面写真

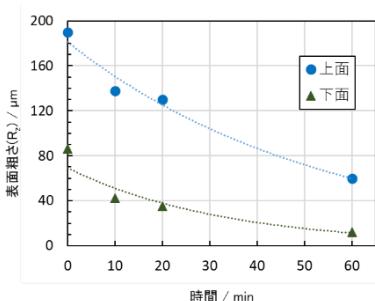


図 10 水管内面の研磨による粗さ変化

めっきによる防鋳処理とは別に、水管内面の研磨による平滑化も実施した。研磨試験用金型の設計図面と断面写真を図 9 に示す。写真からもわかるように、水管内面の上面(天井面)と下面(底面)では粗さが大きく異なる。

この現象は装置によらず、L-PBF 法が抱える課題である。この試験用金型に対して遊離砥粒研磨を実施し、その表面粗さ計測結果を図 10 に示す。研磨時間と共に表面粗さは低減したが、研磨前の粗さによる差はあることがわかる。また、本報では示していないが、水管形状による研磨効果の差があることもわかつており、均一な平滑化には更なる工夫が必要である。

4. 結び

本研究の結果は、以下のとおりである。

- 1 銅合金で積層造形した高周波焼入れ用誘導加熱コイルは、従来品と比較して高い耐久性を有していることがわかった。積層造形技術と計算科学を組合せることで、更なる高機能化も期待できる。
- 2 積層造形した銅合金製金型及び鉄鋼製金型において、プラスチックの射出成形試験を実施した結果、材質によりサイクル性と成形精度が異なることがわかつた。サイクルタイムの短縮と成形精度の向上は、両立できる可能性があることがわかつた。
- 3 ダイカスト金型に積層造形技術を適用する際の課題である水管内面の防鋳処理と平滑化に取り組んだ。1 万ショットの鋳造試験において、水管めっき処理は防鋳効果を示し、金型の冷却性能低下の抑制に有望であることがわかつた。

謝辞

本研究は、知の拠点あいち重点研究プロジェクトIV期(プロジェクト Core Industry)「積層造形技術の深化によるモノづくり分野での価値創造とイノベーション創出」において、旭精機工業(株)、旭ゴム化工(株)、ティーケーエンジニアリング(株)、トヨタ自動車(株)、(株)名古屋多田精機、日比野工業(株)、(株)フジミインコーポレーション、(株)前田技研、名古屋大学、早稲田大学、あいち産業科学技術総合センターにより実施した。プロジェクト関係各位に感謝申し上げます。

文献

- 1 令和 3 年経済センサス・活動調査 産業別集計(製造業)
- 2 D. Kim, N. Takata, J. Umeda, T. Shimizu and M. Kobashi: *Additive Manufacturing Letters*, **11**, 100236(2024)
- 3 小橋眞、梅田隼史、加藤正樹、岩堀弘昭: 鋳造工学, **95**, 665(2023)
- 4 加藤誠、唐木満尋、杉山雅浩、内海清、高橋功、白井守美、梅田隼史、加藤裕和、加樹正樹、岩堀弘昭: ダイカスト会議論文集, JD24-06(2024)