

研究論文

積層造形技術の高度化と先進デザインの融合による 高機能部材の創製

加藤正樹^{*1}、梅田隼史^{*2}、加藤久也^{*3}

Creation of Highly Functional Materials by Combining Additive Manufacturing Technology and Advanced Design

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

Research Support Department^{*1~3}

金属積層造形技術、カーボン膜被覆技術及び CAE 設計技術等を用いて、3 次元冷却回路を内蔵したマルチエージング鋼製金型及び超合金製金型を試作し、アルミダイカスト成形をはじめとする各種製造プロセスに実装し、成形実証試験を行った。その結果、特にアルミダイカスト成形、深絞りプレス成形において、成形体品質に対する顕著な効果、優位性を確認することができた。また、試作した金型が長期使用にも耐えることを確認することができた。

1. はじめに

成形加工法は、材料の塑性や流動性を利用して、同じ形の製品の大量生産が可能な製造法である。現在、日常で目にする様々な製品が、材料を金型で成形することによって製造されている。材料や成形品の種類により、ダイカスト成形等、多くの加工法が実用化されている。

金型は、高度な加工技術を駆使して製造され、その品質が成形品の良否に大きな影響を与える。「製品の生みの親」とも呼ばれ、モノづくりの根幹を支える極めて重要な生産財である。愛知県を含む東海地域は、我が国のモノづくりの中心であり、金型産業においても国内最大の集積地となっている^{1),2)}。

一方、急速に進化し続ける製造プロセス技術のデジタル化に伴い、3D-CAD(Computer Aided Design)による設計、形状計測技術(3D スキャナ)や 3D プリント等の付加製造技術(Additive Manufacturing、AM)等の活用が、モノづくりの現場で急速に広がっている³⁾。AM 技術、なかでも金属 3D プリントは、近年、飛躍的な進歩を遂げ、国内でも大企業や研究機関等での機器整備が進み、基本的な成形技術が構築されつつある。

金型は、材料への形状付与とともに、材料から熱を除去する役割も担っている。熱管理が不適切な場合、金型の損傷や製品不良が生じるため、金型の成形面への適切な冷却が求められるが、鋼材を切削加工して作製した金型の場合、穿孔による局所的な冷却しか行うことができない。しかし、金属 3D プリントにより金型を製作する

ことで、内部に所望の冷却構造を付与し、効果的な冷却を行うことが可能となる。

「知の拠点あいち」重点研究プロジェクト(Ⅲ期)「積層造形技術の高度化と先進デザインの融合による高機能部材の創製」では、当センターを試作のハブ拠点として地域産学行政が連携し、さまざまな成形法に対する金型冷却構造の最適設計法、高品質な積層造形のための条件探索、形成される微視組織の理解、金型設計に必要な強度評価や熱処理条件等、広範な研究開発を進めた。取組の全体概要を図 1 に示す。本稿では、積層造形による金型の作製及びそれらを用いた成形試験の結果について記す。



図 1 研究開発の全体概要

^{*1} 共同研究支援部 試作評価室(現産業技術センター 瀬戸窯業試験場) ^{*2} 共同研究支援部 試作評価室 ^{*3} 共同研究支援部 試作評価室(現食品工業技術センター)

2. 実験方法

2.1 金型の設計及び試作

アルミダイカスト成形、深絞りプレス成形、エラストマ成形、プラスチック射出成形の各成形法について、まず各参画機関において、内部冷却構造を有する金型(入子)が必要な成形品を、造形装置のサイズも加味した上で選定し、金型を3D-CAD(Dassault Systems 社 SOLIDWORKS 等)により設計した後、これらのデータを編集ソフトウェア(Materialize 社 Magics RP)を用いて積層造形用のデータとして変換した。

それぞれの設計データに基づき、粉末床熔融結合型(Laser Powder Bed Fusion, LPBF)の金属積層造形装置(3D Systems 社 ProX DMP 200)を用いて、金型の元となる造形体を作製した。

原料は、造形装置メーカから購入したマルエージング鋼粉末(LaserForm Maraging Steel)を用いた。深絞りプレス成形用パンチ型については、参画機関が超硬合金(WC/Co)粉末を用いて造形及び機械加工を行った。

マルエージング鋼粉末の造形における、一層当たりの厚さは $30\mu\text{m}$ とした。レーザ照射条件は、出力 255W 、走査速度 $2,500\text{mm/s}$ 、ビーム間距離 $50\mu\text{m}$ とした。ベースプレート($140\times 140\times 15\text{mm}$)は、造形装置メーカから購入した。

造形後、冷却構造を形成する造形体内部の空隙から粉末を除去した。除去の良否は、工業用内視鏡((株)SPI エンジニアリング HNL-1.8CAM120)による観察や空隙容積の測定値と設計値との比較により確認した。

その後、必要に応じて、参画機関において熱処理による硬さの調整及び切削による全面機械加工を行った。アルミダイカスト金型については、さらに参画機関において、成形面に気相反応によるカーボンコーティング処理(CC 処理)を行った。

2.2 試作金型による成形試験及びその評価

それぞれの金型を、参画機関の製造装置に装着して連続成形試験を行い、冷却性能、成形性等に及ぼす効果、製品品質(表面性状、内部組織、成形精度等)を必要に応じて検討した。

例えば、アルミダイカスト成形試験の場合、成形試験中に、金型の表面温度や成形体の表面状態等を観察した。成形体は、寸法、変形の状態に加え、微視組織や内部欠陥の有無等も観察した。

3. 実験結果及び考察

3.1 試作金型の状態

3.1.1 アルミダイカスト成形

アルミダイカスト成形では、成形時の焼付、熱応力に

よる金型損傷等が課題となっている、厚肉・高耐圧製品向けの成形品を対象とした。

アルミダイカスト成形用金型の製作過程及び写真を図2に示す。



図2 アルミダイカスト成形試験用金型

焼付等の生じやすい6カ所の突起部分に、冷却構造を内蔵し、更に金型表面へのCC処理を施した。一般に、マルエージング鋼の積層造形の場合、造形体に溶体化及び時効硬化の2回の熱処理を行うため、造形後にも長時間を要することが多い。しかし、本研究の結果、造形後にCC処理を1回行うのみで、熱処理効果と溶湯の湯流れ性向上等が同時に得られることが明らかになった。

3.1.2 深絞りプレス成形

円筒形の成形品を対象に、内部冷却構造を有するストリップパシブル及び超硬合金製パンチ型を試作した。

通常のストリップパシブルは冷却を行っていないため、成形中の発熱が大きく、熱膨張に伴う成形体の変形が生じやすい課題がある。成形中の冷却により、成形精度の向上が期待される。図3に(a)内部構造を可視化した透明樹脂モデル及び試作した造形体、(b)機械加工後のストリップパシブル及び内部構造図を示す。

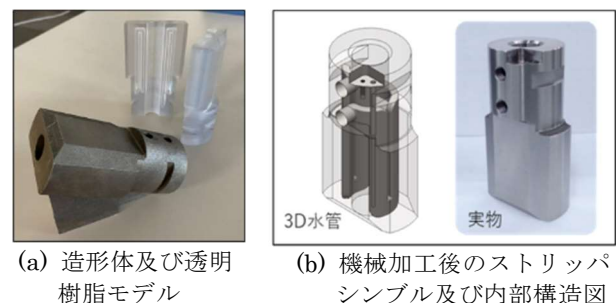


図3 積層造形により試作したストリップパシブル

深絞りプレス成形では、超硬合金製のパンチ型を使用する。一般に、パンチ型は粉末冶金法で作製されるため、冷却やセンサ取り付けのための構造の内蔵は困難であるが、LPBF法で作製すればこれらが可能となる。

WC/17%Co 合金粉末を用いて、適切な条件で造形及び HIP 処理を行った結果、硬度 89HRA・抗折力 2.1GPa を達成し、成形試験に用いるパンチ型の試作に成功した。LPBF 法により実用可能な超硬金型を作製できたことは、世界でも報告例が非常に少ない画期的な成果である。図 4 に(a)試作パンチ型の構造図及び写真、(b)微視組織を示す。微視組織は、従来法による成形体(VM-30)に近い状態であることがわかった。

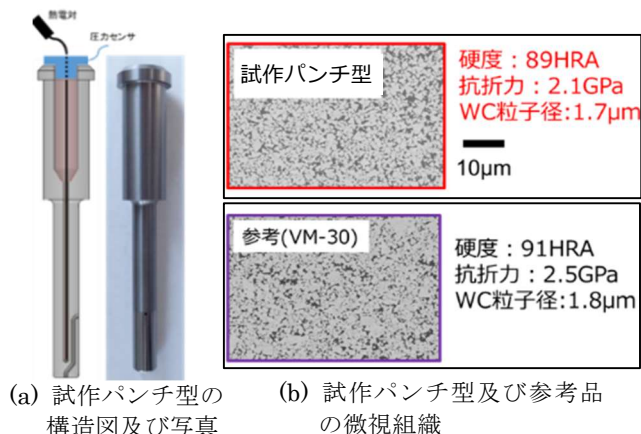


図 4 (a)試作パンチ型の構造図及び写真、(b)微視組織

3.1.3 エラストマ成形

化学発泡法による熱可塑性エラストマ発泡成形体の金型では、成形体形状の外周部分が凝固した後でなければ、金型から成形体を取り出すことができない。成形サイクルの短縮には、金型の冷却が非常に重要である。

金型表面の冷却効果を比較検討するため、コンフォーマル冷却金型及び従来の設計法による金型を試作した。

図 5 に(a)コンフォーマル冷却金型、(b)従来法による金型の内部構造図を示す。

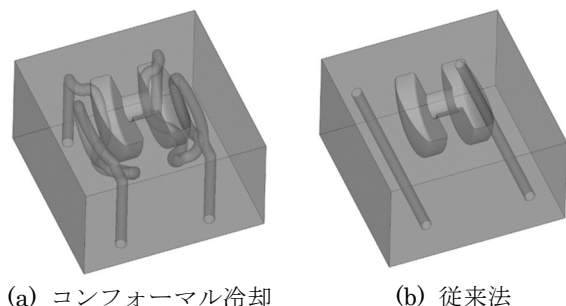


図 5 試作金型の内部構造図

3.1.4 プラスチック射出成形

製品形状に近く高精度な成形を要するシロッコファン部品の射出成形体を対象に、内部冷却金型を試作した。こうした成形体では、僅かな変形が製品の品質を大きく左右する。また、価格低減のため、成形サイクルの短縮が強く求められる。

図 6 にシロッコファン部品の冷却金型の(a)固定側入子、(b)可動側入子の写真を示す。

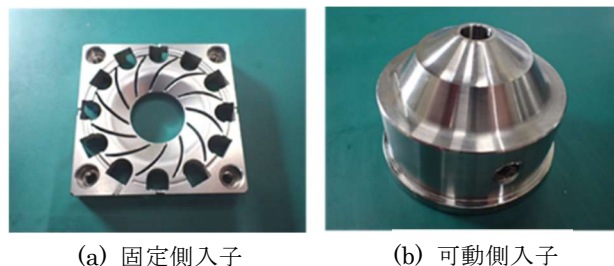


図 6 シロッコファン部品の冷却金型

3.2 試作金型による成形試験及びその評価

3.2.1 アルミダイカスト成形

アルミダイカスト成形試験を実施し、成形プロセス及び成形品の品質等に及ぼす効果を検討した。連続成形では、脱型後の離型剤塗布工程において金型表面温度が不適切な場合、均一な離型剤の塗布が阻害され、焼付等の原因となる。そのため、離型剤塗布直前の金型表面温度を約 130℃に保持することが求められる。金型に間欠的に通水する制御を行うことにより、ほぼ狙い通りの温度制御を達成し、安定した連続成形が可能となった。

試作した成形品は、極めて平滑な表面を有しており、成形品外観が著しく向上した。

成形体内部の鑄巣も、サイズ、数ともに大幅に減少した。図 7 に(a)従来金型、(b)試作金型による、アルミダイカスト成形品の断面写真を示す。

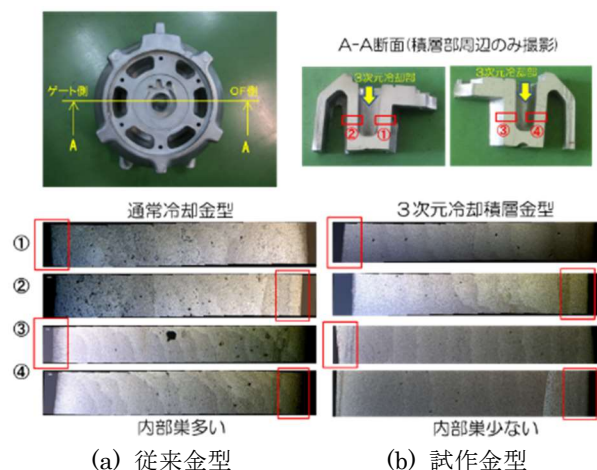


図 7 アルミダイカスト成形品の断面写真

CC 処理により金型内の溶湯流動性が向上し、溶湯に成形圧力が十分に加わるとともに、通水制御により金型温度が適切に保持され、離型剤の水分が十分に蒸発したことにより、溶湯内へのガス混入が減少したためと推定された。

鑄肌表面近傍の断面組織観察の結果、成形品内部の微

視組織も大きく改善されたことがわかった。従来の金型による成形品では柱状デンドライトが観察されたが、試作金型による成形品では等軸デンドライトが観察された。これは、金型表面への CC 処理により成形初期段階における溶湯から金型への熱流が抑制され、かつ成形中の金型のピーク温度の低下により急速な凝固が促進されたため、表面凝固組織が安定化したためと推定された。

3.2.2 深絞りプレス成形

製造設備に試作したストリップシンブルを設置して成形実験を行い、金型温度及び円筒型成形品の口元の楕円量を計測した。

積層造形で試作したストリップシンブルは、成形中の表面温度が大幅に低下していることが確認できた。また、ストリップシンブル部品により間接的にパンチが冷却されたことにより、成形品の楕円量低減やばらつきが抑制されていることが推定された。

WC/Co 超硬材料を用いた積層造形パンチ金型に温度及び圧力センサを組み込み、多工程深絞りプレス成形の中間段階の 1 工程に設置して、連続プレス成形試験を実施した。図 8 に(a)試作パンチ型及び(b)量産設備による成形試験の写真を示す。

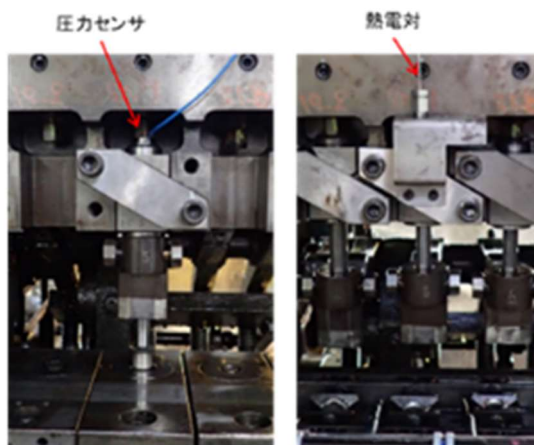


図 8 試作パンチ型及び連続プレス成形試験

長期連続成形試験において、12 万ショットの成形に成功するとともに、in-situ 測定した温度及び圧力を、成形体の形状測定結果と照合することができた^{4),5)}。これにより、積層造形した超硬合金製パンチ型による製品製造や製造工程の IoT 化に道を開くことができた。今後、100 万ショットまで成形実証試験を継続し、成形体品質及びパンチ型の耐摩耗性等の評価を行う予定である。

3.2.3 エラストマ成形

ポリエステル系熱可塑性エラストマに化学発泡剤を 5wt% 添加し、成形試験を行った。良好な成形品を得るための成形所要時間は、従来金型では 160 秒であったのに対し、試作金型では 80 秒で、50% 短縮できた。強い冷却を行ったにもかかわらず、成形体の変形に及ぼす影響は小さいことも明らかになった。

3.2.4 プラスチック射出成形

ポリプロピレン樹脂を用いてシロッコファン部品の成形実験を実施した。その結果、試作金型では材料射出直後から強い冷却効果が現れ、従来と同レベル以上の製品精度を得ながら、成形サイクルを従来比で約 1/5 まで短縮することができた。回転時の偏心の原因となる平面度も非常に良好であった。X 線 CT による評価の結果、内部欠陥も見られなかった。

4. 結び

本研究の結果は、以下のとおりである。

- (1) マルエージング鋼で積層造形した、適切な冷却構造を内蔵した金型を用いて各種成形法での成形実証試験を行った結果、いずれも成形サイクル短縮や成形体の品質に大きな効果を示すことがわかった。
- (2) WC/Co 合金による積層造形金型により、10 万回以上の連続深絞りプレス成形に成功した。今後、特性向上に向けた取組を進める予定である。

付記

本研究は、愛知県及び(公財)科学技術交流財団の「知の拠点あいち」重点研究プロジェクト(Ⅲ期)「積層造形技術の高度化と先進デザインの融合による高機能部材の創製」として実施した。

文献

- 1) 愛知県経済産業局産業部産業政策課：あいちの産業と労働 Q&A2021 8 (2021), 愛知県
- 2) 愛知県県民文化部統計課：平成 29 年工業統計調査 (2017), 愛知県
- 3) 長崎勇太：世界一 3D プリンターが拓く製造業の未来, ジェトロセンサー, (10), 72-73(2017)
- 4) 3D プリンターで高性能金型, 中日新聞, 朝刊, 2022-2-18
- 5) 超硬合金プレス金型作製 リチウム電池部品成形, 日刊工業新聞, 2022-3-2