

研究論文

革新的金型製造技術の開発とその産業応用

加藤正樹*1、梅田隼史*2、福田嘉和*3、池口達治*4、加藤淳二*1

Development of Innovative Mold Manufacturing Technology and the Industrial Application

Masaki KATO*1, Junji UMEDA*2, Yoshikazu Fukuta*3, Tatsuharu Ikeguchi*4 and Junji KATO*1

Research Support Department*1*3*4, Industrial Research Center*2

高い形状自由度を実現可能なプロセスである積層造形技術は、「製品の生みの親」である金型の製作において、内部冷却構造の付与等による高品位化に直結する技術として非常に注目されている。本研究開発では、積層造形による最適冷却構造の開発、カーボンコーティングによる金型の表面処理技術の開発及び積層造形に適した新規粉末材料の開発について、地域産学行政連携による集中的な研究開発を行った結果、高効率かつ均一な冷却や複合材料による造形が可能となった。

1. はじめに

材料の塑性や流動性を利用した成形加工法は、さまざまな製品の製造工程で広く用いられている。被加工材の種類に応じて、ダイカスト成形をはじめ多くの方法が実用化されているが、いずれも金型から形状を転写して製品を得る点では共通している。

従って、金型は製造業の根幹を支える重要な生産財である。金型は、高度な加工技術を駆使して製造され、その品質が製品の良否に直接影響するため、「製品の生みの親」とも称されている。愛知県を含む東海地域は、我が国のものづくりの中心であり、金型産業においても、国内最大の集積地である。¹⁾

金型による成形加工では、1個の型で大量の成形が可能であり、金型は一点あるいは少数しか製作されない。一方、寸法精度、強度への要求は厳しいため、高硬度かつ脆性を示す難加工材（特殊鋼）が多用される。

成形性や金型寿命の点からは、金型の成形面の冷却が有効であるが、鋼材を切削加工して作製する金型の内部に複雑な冷却水管等の構造を付与することは、非常に困難である。また、表面の加熱・冷却を反復する環境で使用されるため、金型表面にヒートチェック（熱疲労亀裂）が生ずる場合があり、その補修にも多くの時間と費用を要している。

近年、自動車の電動化や国際的な価格競争の激化等、経済・社会的環境の大きな変化に伴い、成形体も複雑かつ多様化が進むとともに、迅速な製品化が強く求められる。そのため、「製品の生みの親」である金型にお

いても、高品位化（高生産性、高精度、高耐久性、短納期等）が非常に重要となっている。金属粉末を用いた積層造形技術は、金型製作においても内部冷却構造や複雑形状の造形が可能になる等、高い形状自由度を実現可能なプロセスとして大きな注目を集めているが、機械的特性や材料の自由度等における技術的課題も少なくない。本研究開発は、「知の拠点あいち」重点研究プロジェクト（Ⅱ）「革新的金型製造技術の開発とその産業応用」として、地域産学行政の連携による集中的な研究開発を実施したものである。全体の概要を図1に示す。積層造形による最適冷却構造の開発、カーボンコーティングによる金型の表面処理技術の開発及び積層造形に適した新規粉末材料の開発により、製品の品質向上や価格競争力に直結する、革新的かつ高品位な金型の開発とその産業応用を推進した。

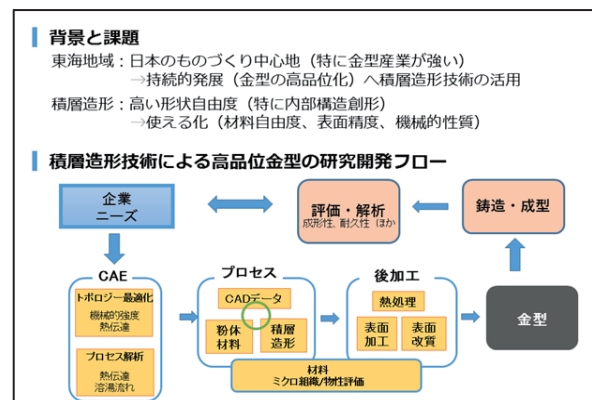


図1 研究の概要

*1 共同研究支援部 試作評価室 *2 産業技術センター 化学材料室(現企画連携部 企画室) *3 共同研究支援部 試作評価室(現産業技術センター) *4 共同研究支援部 試作評価室(現企画連携部)

2. 実験方法

2.1 積層造形金型の評価

2.1.1 金型の設計及び試作

アルミダイカスト成形、アルミ重力鋳造成形、ゴム成形、プラスチック射出成形及び深絞りプレス成形の各成形法について、参画機関において金型を 3D-CAD (Dassault Systèmes 社 SOLIDWORKS 等) により設計した後、編集ソフトウェア (Materialize 社 Magics RP) 積層造形用のデータとして変換した。

例えば、アルミダイカスト成形用金型の場合、金型は構造的に固定型と可動型に大別され、固定型には溶湯を注入する鋳込口、可動型にはキャビティ (溶湯が充填・固化される空間) を構成するための入れ子等が設けられる。入れ子の表面冷却効果に対する内部冷却の効果を検討するため、まずモデルとする成形体の形状に合わせた入れ子の形状を作成した後、その内部に異なる 3 種類の冷却構造 (U 字型水管、一様なインフィル構造、最適化計算によるインフィル構造) を組み入れた。外形寸法には、機械加工に必要な加工代を加えた。

金型の全体図を図 2 に示す。また、金型の内部冷却構造の例として、一様なラティス構造による冷却構造を内蔵した入れ子の断面図を図 3 に示す。

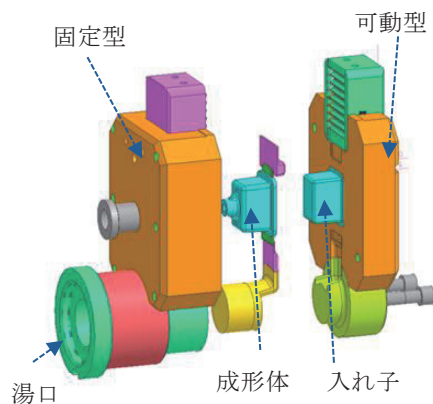


図 2 アルミダイカスト試験金型の全体図

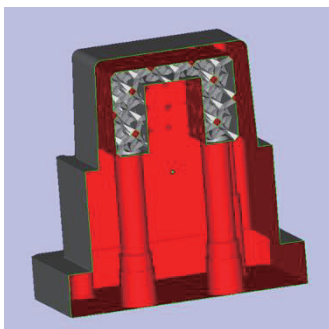


図 3 一様なインフィル構造による冷却構造を内蔵したアルミダイカスト成形用入れ子

同様に、アルミ重力鋳造成形、プラスチック射出成形及び深絞りプレス成形においても、金型の成形面を冷却するための内部構造を設計した。ゴム成形金型では、アンダーカット形状を有する成形品の金型を設計した。

それぞれの設計データに基づき、粉末床溶融結合型の金属積層造形装置 (3D Systems 社 ProX DMP 200) を用いて、金型を作製した。

本装置は、金属製ベースプレートの上に、粉末床と呼ばれる原料粉末の薄層を形成した後、対応する断面図をレーザーで描画して溶融・緻密化させ、これを上下方向に繰り返すことにより、造形物を得るものである。

原料は、造形装置のメーカーから購入したマルエージング鋼粉末 (LaserForm Maraging Steel) を用いた。造形時の一層当たりの厚さは 30 μ m とした。レーザー照射条件は、出力: 255W、走査速度: 2,500mm/s、ビーム間距離: 50 μ m とした。ベースプレートは、造形装置のメーカーから購入した SUS430 板 (140 \times 140 \times 15mm) を用いた。

積層造形した金型は、ベースプレートから切断分離した後、内部の空隙に充填された粉末を除去した。除去後の状態は、工業用内視鏡 (株) SPI エンジニアリング HNL-1.8CAM120) を用いて確認した。

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 (HRC45 程度) を行うとともに、外周全面に機械加工を行った。アルミダイカスト金型については、機械加工後、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を行った。

2.1.2 製造工程での成形試験による実証

作製した各種の金型を、参画機関の製造プロセス装置に装着して成形工程における実証試験を行い、冷却性能や成形性等に及ぼす効果について検討した。

アルミダイカスト成形の場合、従来法のドリル加工穴冷却による入れ子を比較対象として、U 字冷却管またはインフィル構造を内蔵した入れ子について、それぞれダイカスト成形試験を実施し、金型表面での冷却効果を評価した。同様に、アルミ重力鋳造成形、深絞りプレス成形においても、金型の成形面を冷却するための内部構造を設計した。プラスチック射出成形においては、冷却が成形体の寸法に与える影響について検討した。

ゴム成形では、アンダーカット形状を有する金型の成形性と金型製作コストへの影響について検討した。

2.3 新規積層造形材料の造形

積層造形が可能かつ金型及び周辺部材に利用可能な新材料として、WC/Co 系複合粉末、多元系金属ガラス

粉末及びチタン酸アルミニウム粉末を選択し、金属積層造形装置を用いて造形パラメータの検討を行った。

それぞれレーザ出力、走査速度、ビーム間距離、層厚さの異なるブロック（20mm×20mm×5mm）を造形し、それらの外観及び微視組織や硬さを評価した。

3. 実験結果及び考察

3.1.1 金型の設計及び試作

アルミダイカスト成形用の入れ子について積層造形後の状態を図4(a)、機械加工後にカーボンコーティング処理を行ったものの外観を図4(b)に示す。造形ままの状態における大きな変形は認められず、外周の機械加工を行うことにより金型として利用可能なことが確認された。

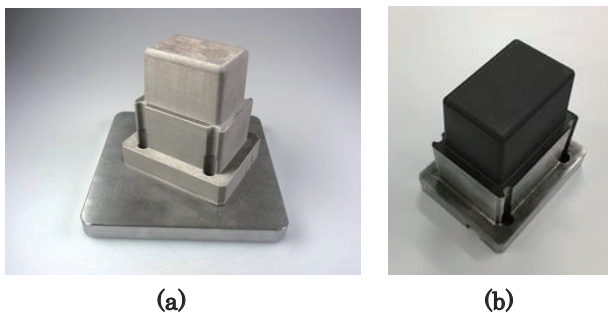


図4 アルミダイカスト成形用入れ子の外観
(a) 層造形後の状態
(b) カーボンコーティング処理後

造形体を工業用内視鏡で観察した結果、金型の内部には設計通りのラティス構造が形成されるとともに、空隙部分の原料粉末もほぼ完全に除去されており、冷却構造として利用可能であることが確認された。

外周の機械加工後に行ったカーボンコーティング処理についても、マルエージング鋼で積層造形した金型表面においても、緻密かつ十分な密着強度を有するカーボン皮膜が形成されたことが確認された。

カーボンコーティング処理は、参画機関が特許を保有する金属表面処理技術で、鉄を主成分とする金属材の表層に、気相反応により窒化層を介してナノカーボン類を含む炭素膜を形成する処理である。アルミ合金溶湯と炭素膜は非濡れ性が高い。そのため、従来は、アルミ溶湯の保温性、湯流れ性、金型の耐溶損性の向上を目的としてアルミダイカスト金型の表面に適用されてきた。積層造形で作製した金型の表面に適用することで、冷却により低温化した金型表面での溶湯の湯流れ性を向上させ、成形品の高精度・高品質化、金型の長寿命化に寄与することが分かった。アルミダイカスト成形金型に対するカーボンコーティング処理の概要及び効果を図5に示す。

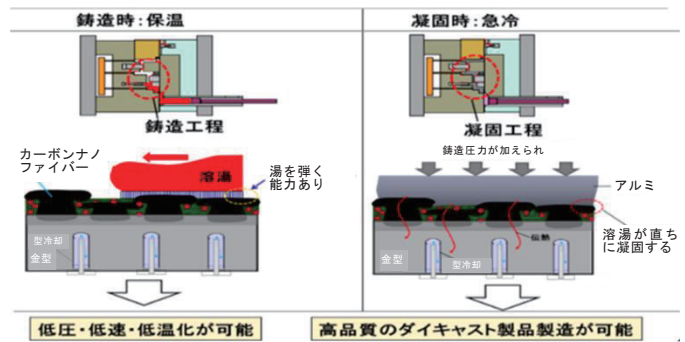


図5 アルミダイカスト成形金型に対するカーボンコーティング処理の概要及び効果

ゴム成形では、マルエージング鋼により成形試験用の評価型を作製し、成形試験を実施した。アンダーカット形状を有する金型を、割り型とすることなく一体として作製可能なことを確認した。作製したゴム成形金型の外観を図6に示す。成形面の加工が不要な製品も多く、切削加工の場合に必要な複雑な型設計と多くの工数が省略できるため、金型作製の費用低減と期間短縮が可能なが分かった。

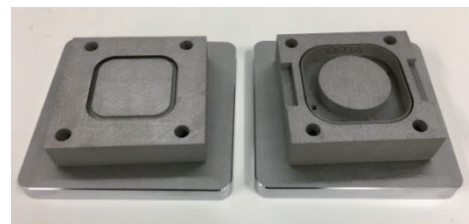


図6 ゴム成形金型の外観

3.1.2 製造工程での成形試験による実証

アルミダイカスト成形試験における金型表面の冷却効果について、ダイカスト成形後、金型を開いて成形体を取り出した直後の表面温度の分布を図7に示す。

従来の金型では、金型表面の温度は約300℃であったのに対して、U字型水管による冷却を行った入れ子では、200℃まで低下した。更に、一様なインフィル構造による冷却構造を内蔵した金型の場合には、表面温度は140℃まで低下し、大きな冷却効果が得られることが分かった。これは、従来の金型は、ドリルで穿孔した直径数mm程度の直管にさや管を挿入して水冷するため、ごく局所的にしか冷却効果が得られないのに対し、U字型水管による冷却では、より多くの排熱が可能になるためと推定された。一様なインフィル構造による冷却では、金型内部の冷却水量の増大に加え、格子表面からの熱伝達による排熱が寄与し、表面温度が大きく低下したと推定された。

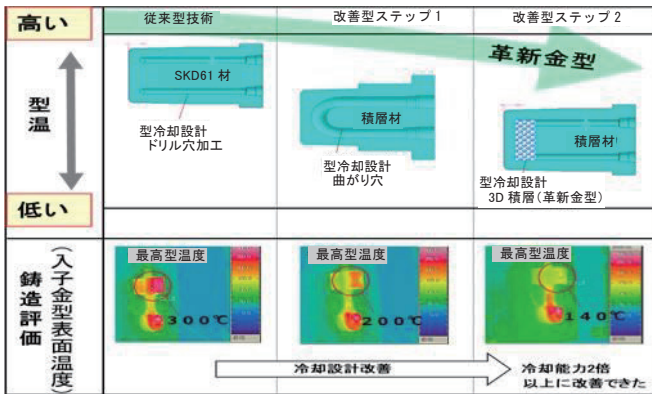


図7 アルミダイカスト成形金型 成形直後の金型表面の温度分布

最適化計算で得られたインフィル構造による冷却構造を有する金型については、冷却効果は見られたものの、表面温度が200℃を超えている部分があり、温度分布もやや不均一で、期待した結果が得られなかった。この構造は、流路が極めて狭小な部分があるため、そうした部分に冷却水が十分に流れ込んでいない、あるいは冷却水量の不足による内部での沸騰等が原因として推定された。

アルミ重力鑄造成形、深絞りプレス成形においても、内部冷却構造を付与することにより、成形時の金型表面温度を大きく低下させるとともに、微視組織や形状安定性の制御が可能であることを確認した。プラスチック射出成形の場合には、内部冷却構造の設計が成形体の寸法安定性に大きく影響し、過剰な冷却は寸法精度に悪影響を及ぼすことが分かった。樹脂は熱膨張係数が大きく、温度差に起因する歪みが生じやすいためと推定された。

ゴム成形では、アンダーカット形状の製品でも、金型からの成形品の取り出し及び仕上げ（バリ除去）が容易に可能であることが確認された。ゴム製品の場合、弾性が大きく金型からの成形体の引き抜きが容易なため、金型の一体成形に起因する支障が生じることはなかった。

今後は、実用化に向け、繰り返し安定性や信頼性評価に関する取組を進める必要がある。

3.3 新規積層造形材料の造形

WC/Co系複合粉末、多元系金属ガラス粉末及びチタン酸アルミニウム粉末のいずれも、造形を可能とするパラメータを見いだすことができた。

WC/Co系では、造形時のレーザ照射条件の調整に加え、ベースプレートに処理を施すことにより、造形の安定性を大幅に向上させ、大型・複雑形状の造形が可能となることを見いだした。これは、造形初期における熔融固化反応の安定性が増すためと考えられた。これにより、WC/Co30%及び12%粉末を用いて、複雑形状の造形品

の試作が可能となった。WC/Co30%複合粉末を用いた造形体を図8に示す。

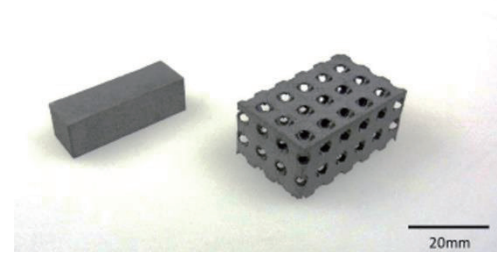


図8 WC/Co30%複合粉を用いた造形体

高硬度（ $Hv \geq 1000$ ）の造形物を得ることができ、深絞りプレス金型（パンチ型）の試作を行った。しかし、造形体の内部にはクラックや微少な空隙が残っており、微視組織も不均一であった。試験片に熱処理を加えることにより改善可能であることが分かったが、金型材料として実用化するためには、微視組織の均質化のための取組をさらに進める必要がある。

多元系金属ガラス粉末及びチタン酸アルミニウム粉末についても、造形可能なレーザ照射条件を見いだすことができた。しかし、クラックが多く入っている等、微視組織の改善に向けた取組が今後の課題である。

4. 結び

本研究の結果は、以下のとおりである。

- (1) 内部に冷却構造を有する金型（入れ子）を開発するとともに、その表面にカーボン皮膜を形成する処理技術を確認した。参画企業での成形試験により、成形時の表面温度が大幅に低下することを確認した。
- (2) 複雑形状の金型を一体で作製可能なことを確認した。参画企業での成形試験の結果、特にゴム成形で有用なことが分かった。
- (3) 積層造形が可能かつ金型材料として利用可能な新材料として、WC/Co系複合材、多元系金属ガラス、チタン酸アルミニウムの造形を検討し、それぞれ造形可能なパラメータを見いだした。今後、微視組織の均質化に向けた取組を進める必要がある。

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（Ⅱ）「革新的金型製造技術の開発とその産業応用」として実施した。

文献

- 1) 愛知県県民文化部統計課：平成29年工業統計調査