

金属光造形複合加工法による成形金型の革新

Innovation of Mold with Hybrid Process of Metal Powder Bed Fusion and Milling

阿部 諭 上本 誠 一
Satoshi Abe Seiichi Uemoto

要 旨

金属粉末の3Dプリンティングプロセスと切削プロセスを組み合わせた金属光造形複合加工システムを開発した。従来の3Dプリンティングプロセスと比較して飛躍的に加工精度・表面粗さを向上させるだけでなく、従来の切削加工では加工不可能な深リブを含む形状でもワンプロセスで加工することができ、超短納期で金型製作が可能となる。また、射出成形金型に適用すると、従来の除去加工法では不可能であった自由な温度調節回路の形成が可能であるため、成形サイクル向上、成形精度向上などを達成する高機能な金型を実現できる。

Abstract

We have developed a hybrid system that uses metal powder bed fusion and milling. With this system, it is possible to dramatically improve machining accuracy and surface roughness compared to a conventional 3D printing system. And the mold production period can be reduced significantly. Applying this system to the mold manufacturing process, it is possible to manufacture molds with deep ribs that cannot be manufactured by a conventional milling process in one go.

Furthermore, it is possible to freely form three-dimensional cooling channels that cannot be processed with the conventional removal processing method. Applying this system to an injection mold having three-dimensional cooling channels, a high-performance mold can be produced with high-cycle and very accurate operations.

1. はじめに

2012年に発売されたクリス アンダーソン氏のベストセラー「MAKERS」[1]をきっかけに、3Dプリンティングブームが巻き起こった。対象となったのは、コンシューマ向けの安価な樹脂造形装置（FDM：Fused Deposition Modeling）であるが、金属粉末材料を積層造形するプロセス（MPBF：Metal Powder Bed Fusion）にも注目が集まっており、MPBF装置の市場は拡大を続け、2020年にはワールドワイドで560億円と予測されている[2]。

エコソリューションズ社では既に、射出成形金型の製造プロセスを革新する目的で2000年からMPBFに着目し、MPBFプロセスと切削プロセスを組み合わせた、独自のユニークなシステムを開発した[3]。これを「金属光造形複合加工システム」と呼び、これを活用して当社を中心にパナソニックグループの500面以上の金型に適用して実績を上げている。

金属光造形複合加工法の特長を以下に挙げる。

- (1) 複数のコマに分割していた複雑な形状の金型部品を一体で作製することができ、型製作期間を大幅に短縮できる。
- (2) 切削加工や放電加工では形成できない複雑な3次元温度調節回路を内部に形成できるため、金型の温度調節能力が高く、成形サイクルの短縮や高精度な成形が可能。

特に、3次元温度調節回路によるハイサイクル成形の効果が大きく、成形生産性を20%~30%も向上させた例も

あり、その実績を積み重ねている。

本稿では、金属光造形複合加工法の特徴と、これを適用した高機能射出成形金型について紹介する。

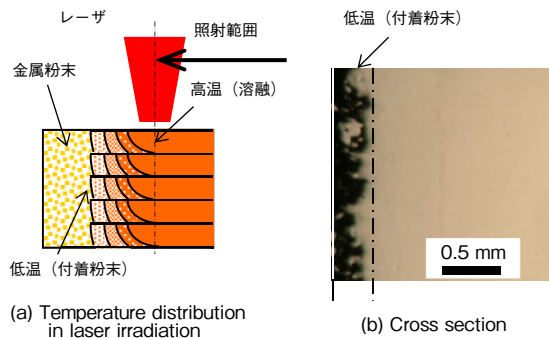
2. 金属光造形複合加工法

2.1 MPBF：Metal Powder Bed Fusionの課題

MPBFは、金属の粉末材料を赤外線レーザーなどで1層ずつ焼結または溶融させて積み上げ、立体形状を形成する方法である。この方法は、3次元CADで設計された金型形状をそのまま形成できる特長を有し、複雑な形状の加工が可能である。しかし寸法精度は数100 μm が限度であり、金型に必要な精度とはほど遠いものであった。加工精度はレーザーの照射精度でほぼ決定される。積層造形法では、ガルバノメータミラーで高速にレーザーを走査する方法が一般的であるが、ガルバノメータミラーは湿度や温度の影響を受けやすく、特に赤外線レーザーを用いるMPBFでは、ミラーはエネルギーを吸収して発熱し、熱変形や角度センサへの影響が精度悪化の要因となる。

また、従来のMPBFでは表面粗さがRz数100 μm しか得られなかった。これは、レーザーエネルギーが熱に変換されて粉末がいったん溶融し、次に冷却過程で粉末同士が融着するメカニズムであり、レーザービーム中心の温度が高く、その周辺の温度も上昇するため、第1図に示すようにレーザー照射域の端部において、周辺にある不要な金属粉末が表面に付着する「粉末付着層」が形成されてしまうためである。このような精度と表面粗さでは金型と

してそのまま使用できないため、切削加工や放電加工などの多大な後加工時間が必要となり、金型製作期間を短縮することはできなかった。

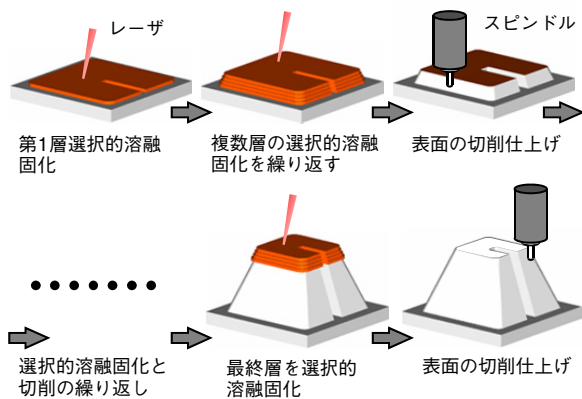


第1図 MPBFのメカニズム
Fig. 1 Mechanism of metal powder bed fusion

2.2 金属光造形複合加工法の概念と工程

金属光造形複合加工法は、金属粉末のレーザーによる選択的溶融固化積層とエンドミルによる切削仕上げを同一装置内で交互に行う複合加工法である。上述した粉末付着層を切削加工で除去することにより表面粗さの課題を解決するとともに、レーザー照射精度に起因する寸法精度の課題も同時に解決することができる。加工プロセスを以下に示す(第2図)。

- (1) 粉末材料を造形プレート上に所定の厚さに供給し、レーザーで選択的に溶融させてプレートに接合する。
- (2) 粉末材料の供給とレーザー照射による選択的溶融固化を繰り返し、積層する。
- (3) 切削工具の首下長さ以下の厚さまで積層した時点(積層ブロック高さ)で、周囲の粉末付着部をエンドミルで切削仕上げする。
- (4) (2)と(3)を繰り返す。



第2図 金属光造形複合加工プロセス
Fig. 2 Process of hybrid system of metal powder bed fusion and milling

すべての層の選択的溶融固化が完了した後に切削を行うのではなく、選択的溶融固化と切削仕上げを交互に繰り返しながら、立体を積み上げることが特徴である。複数層積層し、その積層ブロック高さが切削工具の首下長さに達する直前に切削工程を挿入する。この方法であれば、従来の切削加工では不可能であった深い溝の内面も、一定の積層ごとに切削するため、刃長の短い小径工具で加工することができる。このため、放電加工を必要としていた金型もワンプロセスで作製でき、しかもマシニングセンタによる加工と同等レベルの寸法精度と表面粗さが確保できる。

開発した金属光造形複合加工システムで加工したサンプルを第3図(a)に、MPBFのみで加工したサンプルを第3図(b)に示す。積層ピッチは50 μmとし、切削プロセスは10層ごとに挿入した。MPBFのみのサンプルの寸法精度は±0.10 mm、側面鉛直方向の表面粗さはRz 150 μmであった。金属光造形複合加工法の場合、寸法精度は±0.02 mm、表面粗さはRz 10 μmであった。寸法精度、表面粗さともに1桁向上していることがわかる。



加工精度 : ±0.02 mm
表面粗さ : Rz 10 μm

(a) By Hybrid system of metal powder bed fusion and milling



加工精度 : ±0.10 mm
表面粗さ : Rz 150 μm

(b) By conventional MPBF (without Milling)

第3図 寸法精度と表面粗さの比較

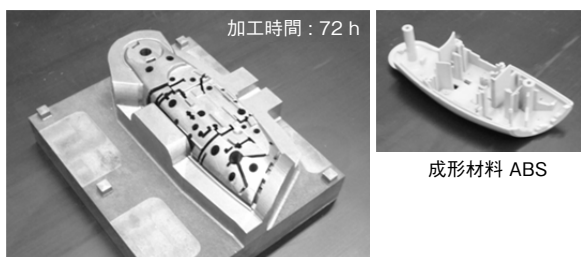
Fig. 3 Comparison of dimensional accuracy and surface roughness

3. 金属光造形複合加工法による型製作期間短縮

従来の切削加工では、複雑な形状を有する金型は、分割したブロックを加工して組み立て、放電加工を施すことを前提とした金型設計を行ってきた。金属光造形複合加工法は金型を分割することなくその形状を一体で作製

することができ、放電加工も大幅に削減できるため、設計を含む金型製作期間の大幅な短縮が期待できる。以下に当社で金属光造形複合加工法を適用した事例を述べる。

射出成形金型への適用事例を第4図に示す。また、本金型の型部製作期間を従来加工法と比較した結果を第5図に示す。多数の深いリブを有するこの金型では、型部を一体化し、設計時間が約67%、加工パス生成処理時間は90%、加工時間は47%削減できた。その結果、型部の製作期間を従来工法より62%短縮した。

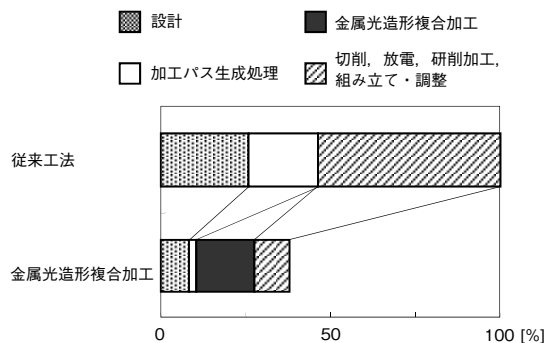


(a) Mold part manufactured by the developed process (b) Molded part

ABS: アクリロニトリル, ブタジエン, スチレンの共重合合成樹脂

第4図 金型と成形品の例

Fig. 4 Example of mold and molded part



第5図 金型製作期間の削減

Fig. 5 Ratio of reduction of mold manufacturing period

4. 3次元温度調節回路による高精度・ハイサイクル成形

従来の金型加工では、ドリル加工などによる直線的な温度調節回路しか形成することができない。したがって、成形品形状や金型構造によっては、温度調節したい部分に温度調節回路を通すことができず、成形品の変形が発生し、変形を抑えるために冷却時間を長くし、その結果成形サイクルが長くなるなどの課題が多かった。

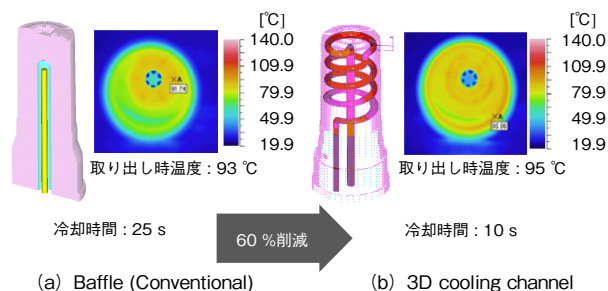
一方、金属光造形複合加工法では、内部構造を自由に作製することができるため、複雑な3次元温度調節回路を形成することができる。成形により蓄熱する部分に重点

的に冷却を施し、ロックアウトピンやガイドピンなどの構造物を回避して温度調節回路を形成することができる。また、断面形状も円に限らずさまざまに変えることが可能である。

以下に、このような3次元温度調節回路を有する金属光造形複合金型が射出成形にもたらす効果について述べる。

4.1 樹脂流動・冷却解析ソフトウェアを活用した冷却管設計

第6図に3次元温度調節回路により成形サイクルを短縮した事例を示す。金型表面近傍に温度調節回路を配置することにより、冷却時間を60%短縮することができた。この事例の場合は、金型設計者の経験により温度調節回路を設計しているが、現在ではほぼすべての金型に対し、さらに高い温度調節性能を求め、解析による事前検討を実施している。



第6図 3次元温度調節回路による冷却時間の削減

Fig. 6 Reduction of cooling time with 3D cooling channel

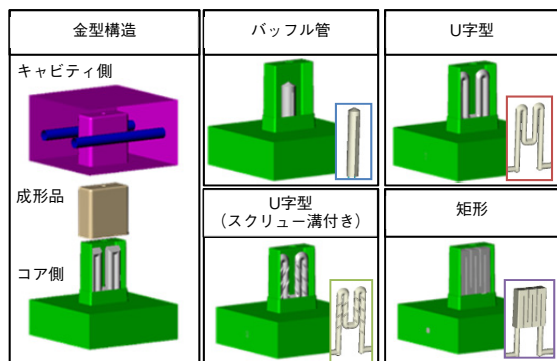
当社では、金属光造形複合加工金型の3D温度調節回路設計に、樹脂流動・冷却解析ソフトウェアを使用し、冷却時間や成形品の変形などをあらかじめ評価し、温度調節回路形状と配置を決定している[4]。第7図に解析事例のモデルを示す。成形品は箱型形状で、キャビティ側には成形品の側面に2本の温度調節回路を配し、コア側の温度調節回路の仕様を変えて冷却性能を比較する。

コア側の温度調節回路は、従来の温度調節回路構造であるバッフル管と、以下の3つの温度調節回路を検討する。

- (1) 金型表面に沿うように配置したU字型温度調節回路
- (2) 内壁にスクリー状の溝を設けたU字型温度調節回路
- (3) 断面を矩(く)形にした温度調節回路(矩形温度調節回路)

解析の条件を第1表に示す。成形材料はPBT(ポリブチレンテレフタレート樹脂)を用いた。

第8図には成形品の表面温度を示す。成形品表面のキャビティ側とコア側の温度は、バッフル管の場合コア側のほうが11℃高くなっているのに対し、U字型温度調節

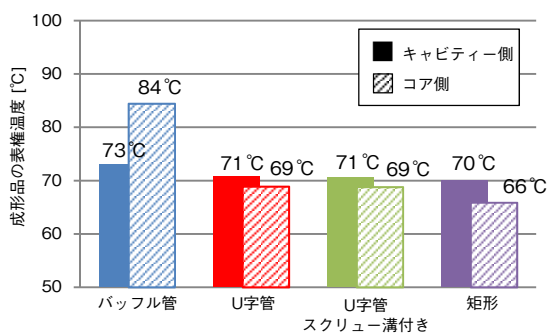


第7図 検討した温度調節回路構造
Fig. 7 Studied cooling channel structure

第1表 解析条件

Table 1 Analysis conditions

| | |
|----------|---------------------------|
| 樹脂材料 | PBT |
| 樹脂温度 | 255 °C |
| 金型温度 | 65 °C |
| 樹脂流量 | 10 000 mm ³ /s |
| 温度調節媒体流量 | 0.17 l/s |
| 保圧 | 35 MPa |
| 保圧時間 | 6 s |
| 冷却時間 | 14 s |

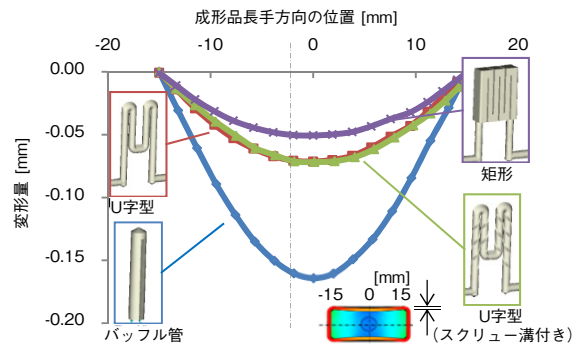


第8図 成形品の表面温度（解析）
Fig. 8 Surface temperature of the molded part (Analysis)

回路とスクリューを設けたU字型温度調節回路の場合は、キャビティ側とコア側の温度はほぼ同じ、矩形温度調節回路はコア側のほうがキャビティ側より4 °C低い結果となった。3次元温度調節回路を設けることにより、金型のコア側が十分に冷却され、キャビティ側とコア側の温度の均衡がとれていることを示している。

第9図には成形品開口部長辺の変形量を示す。横軸に成形品長辺の位置、縦軸に変形量を示す。バッフル管の場合の変形量が0.16 mmに対し、U字型温度調節回路と内壁にスクリュー状の溝を設けたU字型温度調節回路での変形量が0.07 mm、断面を矩形にした温度調節回路での

変形量が0.05 mmであった。この結果より、金型のコア側が十分に冷却され、キャビティ側とコア側の温度差を小さくすることにより、成形品長辺の変形量を抑制できると考えられる。

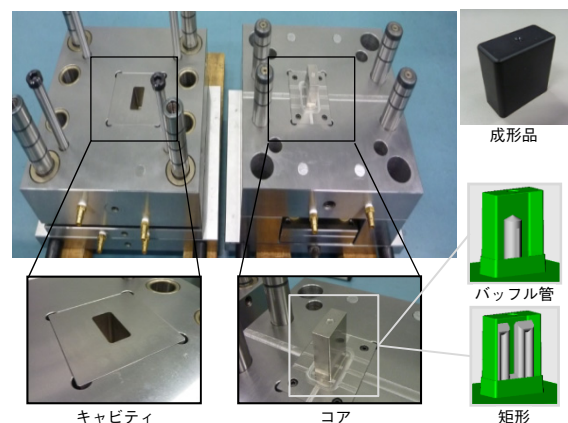


第9図 成形品の変位量（解析結果）
Fig. 9 Amount of displacement of the molded part (Analysis)

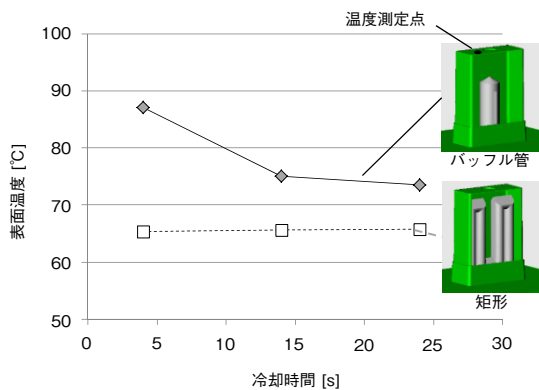
4.2 成形品と解析の比較

4.1節の解析結果から、最も効果が大きい矩形温度調節回路を内蔵した造形金型を作製し、冷却効果を確認した。比較のため、バッフル管を用いた金型も作製した。第10図に作製した金型を示す。第11図に実際に成形した際の金型表面温度を示す。金型温度は65 °Cと設定した。冷却時間を5秒から24秒まで変化させ、成形品取り出し後の可動側表面温度を接触温度計で測定した。

バッフル管金型は冷却時間を短くすると、金型温度が上昇しているのに対し、矩形温度調節回路金型の場合は、冷却時間5秒まで短くしても、金型温度はほぼ設定温度の65 °Cを保っている。矩形温度調節回路金型は、熱がこもりやすいコア側も十分に温度調節されており、バッフル管と比較すると約20秒の成形サイクル短縮が見込める。

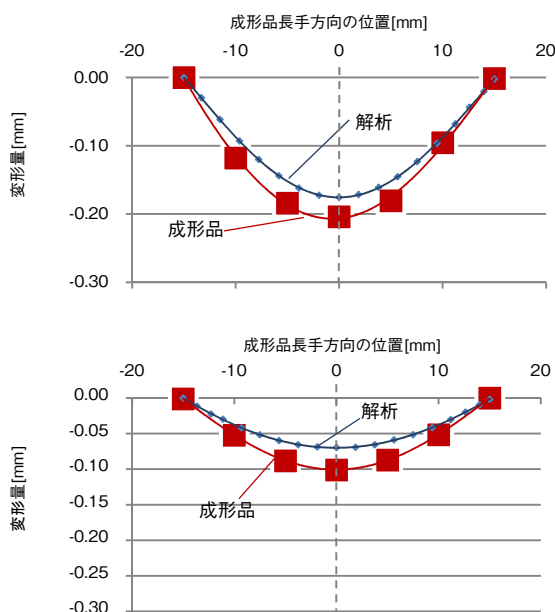


第10図 ハイサイクル成形検証金型
Fig. 10 Verification mold for high-cycle molding



第11図 金型表面温度
Fig. 11 Surface temperature of the mold

第12図に成形品変形量を示す。バツフル管での変形量が0.2 mmであるのに対して、矩形温度調節回路での変形量は0.1 mmであった。実際の成形でも矩形温度調節回路の冷却効果が高く、コア側とキャビティ側の温度均衡を得ることによって成形品の変形を抑制できることがわかった。



第12図 成形品の変形量
Fig. 12 Amount of displacement of the molded part

一方、解析では、バツフル管での変形量が0.17 mmに対して、矩形温度調節回路での変形量は0.07 mmとなり、成形品の変形量とほぼ一致した。

この結果から、金属光造形複合加工法で適用される3次元温度調節回路設計において解析が有効であり、成形サイクル短縮や成形品反りが高精度で予測可能であることを示した。

5. まとめ

レーザによる金属粉末の選択的熔融固化プロセスと精密高速切削プロセスを組み合わせた、金属光造形複合加工システムを開発した。本システムの特長は、レーザによる金属粉末の選択的熔融固化と切削仕上げを繰り返すことである。複数層をレーザで固化させ、その積層高さが切削工具の有効刃長に達する直前に切削工程を挿入するため、従来の切削加工では加工不可能であった深いリブも小径エンドミルで加工することができる。ワンプロセスで金型を作製することが可能であるため、金型製作期間を62%短縮することができた。また、マシニングセンタと同等レベルの表面仕上げ加工を施すことから、加工精度は従来のMPBFと比較して飛躍的に向上し、量産金型として適用可能な寸法精度 ± 0.02 mm、表面粗さRz 10 μ mを達成した。

さらに、内部構造を自由に形成することができる金属光造形複合加工法の特長を生かした3次元温度調節回路を適用し、成形精度の向上、ハイサイクル成形が実現可能であることを示した。また、金属光造形複合加工法を適用した金型づくりにおいて、3次元温度調節回路の効果を最大限に引き出すために設計段階で解析を活用し、成形サイクル短縮や成形品の変形を高精度で予測可能であることを示した。今後も金属光造形複合加工金型において、解析を活用したハイサイクル成形と高精度成形を展開していく。

参考文献

- [1] クリス アンダーソン, "MAKERS—21世紀の産業革命が始まる," (株) NHK出版, 東京, 2012.
- [2] (株) アクトプローブ, 進化する金属3Dプリンター市場の近未来展望 2015年版, さいたま市, 2015, pp.79 - 88.
- [3] 阿部論 他, "金属光造形複合加工法の開発—金属光造形法と切削仕上げのオンマシン複合化—," 精密工学会誌, vol.73, no.8, pp.912 - 916, 2007.
- [4] 上本誠一 他, "パナソニックにおける金属光造形複合加工による金型づくり," 型技術, vol.31, no.2, 2016.

執筆者紹介



阿部 諭 Satoshi Abe
エコソリューションズ社 ものづくり革新本部
Manufacturing Innovation Div.,
Eco Solutions Company
博士（工学）



上本 誠一 Seiichi Uemoto
エコソリューションズ社 ものづくり革新本部
Manufacturing Innovation Div.,
Eco Solutions Company