

# 加工物側面粗さを抑えた高精度金属光造形複合加工

## High-Precision Milling-Combined Laser Metal Sintering with Finer Side Surfaces

阿部 諭\* · 東 喜万\* · 不破 勲\*  
Satoshi Abe · Yoshikazu Higashi · Isao Fuwa

金属光造形複合加工法における加工物側面の粗さを改善するため、焼結・積層による側面の変形を考慮した仕上代を荒仕上げ工程で残し、仕上げ工程は焼結による収縮応力の影響が小さくなる領域（焼結面から見て深い位置）に対して施す「仕上げシフト切削加工プロセス」を開発することにより、加工物側面粗さ Rz を従来の 1/4 の約 5 μm に抑制している。

その結果、側面に発生する段差はほぼ解消され、離型不良が発生しない高精度で高品質な射出成形金型の作製が可能となる。

In order to improve the side surface roughness of a formed object in the milling-combined laser metal sintering process, the development of the "finish-shifted milling process" suppresses the side surface roughness Rz within approx 5 μm which is 1/4 of the roughness normally obtained by the conventional process. In this process, a finish milling layer comparable to the thickness of side deformation by sintering deposit remains after rough milling, and the finish milling is applied with lesser effects including shrinking stress due to sintering (deeper position viewed from the sintering surface).

As a result, the steps generated on the side are almost eliminated and the manufactured high-precision high-quality injection mold does not cause product separation defects.

### 1. ま え が き

日本の製造業は中国など海外との労働コストの違いから、空洞化の危機にさらされている。製造メーカの多くは東アジアや東南アジアの安価な労働力による製造コストダウンを目的に、製造拠点を海外へ移転し続けており、日本の経済競争力を支えてきた金型を中心とする基盤技術の海外流出とともに、国内製造機能の衰退が懸念されている<sup>1)</sup>。

また、ユーザのニーズは多様化を極め、製品のライフサイクルが短縮しており、とくに家電業界では5年前と比較して約60%になっている<sup>1)</sup>。そのため、メーカは新製品を次々に市場に投入する必要がある、製品開発の期間短縮とコスト低減が必須となっている。そこで、製品開発部門においては、3次元CAD (Computer Aided Design), CAM (Computer Aided Manufacturing), CAE (Computer Aided Engineering), 積層造形法などのデジタルエンジニアリングへの取組みを行っている。しかし、金型は従来どおりの加工方法を踏襲しているため、製作に1ヶ月から3ヶ月程度要しており、金型製造プロセスの革新が望まれ

ている。

このような背景から、高精度かつ短納期な量産金型づくりを目的に、金属光造形複合加工法は開発された<sup>2), 3)</sup>。図1にその加工プロセスを示す。金属粉末にレーザを照射する焼結・積層と、所定の積層ごとに切削による表面仕上とを繰り返して立体形状を作製する方法である。これにより、従来はエンドミルの長さに制約があるために放電加工をしたり、エンドミル加工が可能な高さのブロック部品に分割して加工したりしていた複雑な金型でも、刃長の短いエンドミルを使用してワンプロセスで製作が可能となり、金型の製作期間を大幅に短縮することができる<sup>4)</sup>。

従来の金属光造形複合加工法の問題は、加工物の側面が粗いことである。図2に金属光造形複合加工法で作製した金型と、その側面の状態を示す。側面が粗い加工物を射出成形金型として使用すると、その粗さが成形品を離型するときの抵抗となり、成形品が変形するなどの不良を引き起こす。そのため、手作業による磨き仕上げを行う必要があり金型製作時間が長くなっていた。また、金属光造形複合加工法は金型を一体で作製するため、狭く深いリブの側面

\* 生産技術研究所 Production Technologies Research Laboratory

の磨き仕上げは困難である。そのため、いかに仕上加工面の粗さを抑制するかが本加工法のポイントである。

本稿では、加工物側面の粗さの原因である段差発生要因を明確にするとともに、これを低減する切削加工プロセスを提案し、加工物側面の粗さを改善したので報告する。

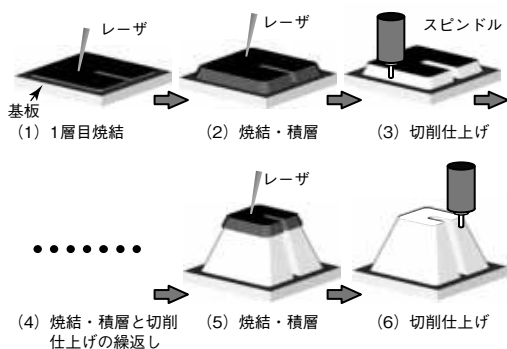


図1 金属光造形複合加工プロセス

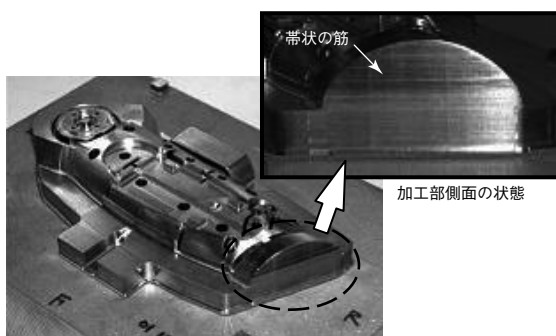


図2 金属光造形複合加工法で作製した金型

## 2. 加工物側面の段差

### 2.1 発生する現象

図3に金属光造形複合加工法における、従来の切削仕上げプロセスを示す。複数回の焼結・積層工程で形成された高さ範囲（以下、切削ブロックと記す）の余剰焼結部を、荒仕上げ工程と仕上げ工程の2段階で切削仕上げ加工する。この加工を2段階に分けているのは、直径1 mm以下のエンドミルの場合はその径に対して余剰焼結部の幅が大きく、エンドミルへの負荷が大きいため良好な切削仕上げ面が得られないからである。

切削荒仕上げ工程では、所望形状から仕上代 $\delta_c$ を残して切削し、切削仕上げ工程でこの部分を切削する。切削範囲は、両工程ともに同じであり、下方に垂れ下がった余剰焼結部もすべて含まれる。加工したワーク側面のSEM写真を図4に示す。このワークのサイズは10 × 10 × 10 mmであり、積層厚み0.05 mmの焼結工程を10回繰り返すごとに切削仕上げを施している。つまり、0.5 mmの高さを焼結すごとに切削している。

この仕上面にはほぼ等間隔にラインが見られ、その間隔は約0.5 mmである。これは、このサンプルで適用した切

削ブロック高さ（積層厚み0.05 mm × 10層）とほぼ一致していることから、切削仕上げ工程ごとに段差が生じていることがわかる。工具顕微鏡により測定した段差量は15 ~ 20  $\mu\text{m}$ である。

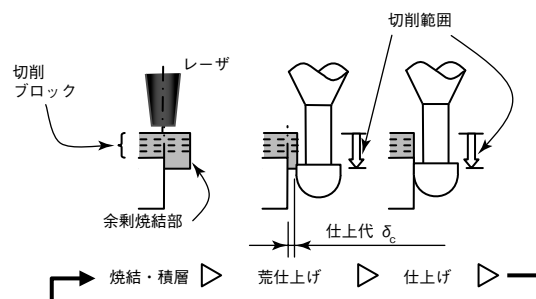


図3 従来の切削仕上げプロセス

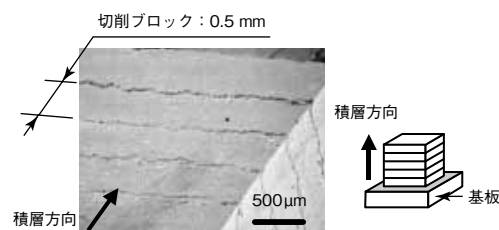


図4 ワーク仕上面のSEM写真

### 2.2 側面段差発生要因

このような段差が発生する要因を以下に列挙する。

- (1) 切削抵抗や造形物の表面硬化などによるエンドミルや主軸のたわみ
- (2) エンドミルの位置決め繰返精度
- (3) 取付精度に起因するエンドミル先端の振れのばらつき
- (4) 余剰焼結量のばらつきに起因する切削抵抗の変化によるエンドミルや主軸のたわみ
- (5) 焼結・積層工程で発生する収縮応力に起因する造形物の変形

これらの要因が発生する場合に予想される五つの現象を図5に示す。その内容は以下のとおりである。

- (1) エンドミルや主軸のたわみが影響している場合は、各切削ブロックにおいて下側が広がった形状になる。
- (2) エンドミル先端の振れが影響している場合は、加工物の寸法が全体的に小さくなる。
- (3) エンドミル取付精度に起因するエンドミル先端の振れのばらつきが影響している場合は、切削ブロックごとの凹凸となる。
- (4) エンドミルの位置決め繰返精度が影響している場合は、切削ブロックごとに仕上面の位置がずれる。
- (5) 焼結による収縮応力が影響している場合は、最後の切削ブロック以外は各ブロックの上方が凹む。

要因	予測される発生現象
(1) エンドミルや主軸のたわみ	
(2) 回転振れ (静的)	
(3) エンドミル取付精度に起因する回転振れのばらつき	
(4) エンドミル位置決め繰返精度	
(5) 焼結歪	

図5 段差発生要因と発生現象

## 2.3 側面の段差発生メカニズム

### 2.3.1 側面の段差プロファイル評価

加工したワークの側面に発生した段差のプロファイルを図6に示す。なお、基準点は切削加工したワーク天面と最終切削ブロック端面の交点とする。横軸は基準点から深さ方向の距離を、縦軸は各深さでの側面の位置を示している。プラス側は基準点より外側にはみ出た位置、マイナス側は基準点より凹んだ状態を示している。

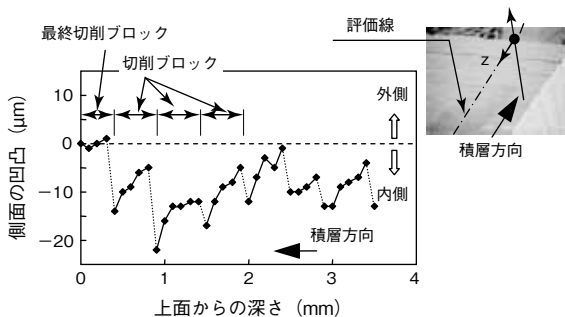


図6 段差プロファイル

最終切削ブロックの側面は数  $\mu\text{m}$  のばらつきがあるのみで、天面に対してほぼ垂直となっている。これはエンドミルや主軸のたわみの影響が小さい条件で切削されていることを示している。また、各切削ブロックの切削面は下方が広がるように傾いているが、その下端においても基準点より外側にはみ出していないことがわかる。つまり、最終切削ブロックは、天面に対してほぼ垂直に加工されているが、その他の切削ブロックは、上方が内側に凹んだ状態である。

図7にはワークを積層方向に、かつ端面に垂直に切断

した段差部の断面写真を示す。下側の切削ブロック上端に、上側の切削ブロック下端が覆いかぶさっている状態であることがわかる。この段差は、切削工程後新たに焼結・積層した際の収縮応力により発生していると考えられる。

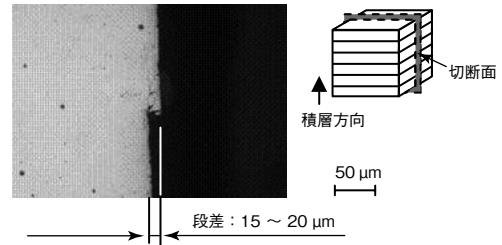


図7 段差部の断面写真

### 2.3.2 段差発生メカニズム

推定した段差発生メカニズムを図8に示す。

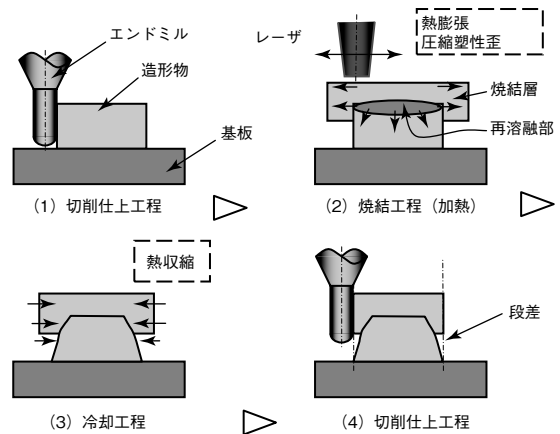


図8 段差発生メカニズム

内容は以下のとおりである。

- (1) 最初のブロックを焼結・積層し、切削仕上げをした時点では、切削面は垂直である。
- (2) 最初のブロックの仕上げ工程が完了した後の焼結・積層工程では、粉末層がレーザー照射により加熱・溶融され、さらに造形物の一部も再溶融する。焼結層と再溶融部は急激な温度上昇により熱膨張するのに対し、造形物内部は低温のままなので膨張を妨げる拘束となり、再溶融部に圧縮熱応力が発生する。金属材料は高温になると降伏応力が低下するため、再溶融部には圧縮塑性歪が発生する。
- (3) 次にレーザー照射後の冷却過程では、焼結層と再溶融部の温度は急激に下がる。熱膨張していた焼結層と再溶融部は収縮するが、再溶融部は(2)の過程で圧縮塑性歪が生じているので元の形状より小さくなる。金属光造形複合加工法では、加工物は剛性の高い基板上に作製されるので加工物全体の変形は抑制されるが、冷却過程で発生する収縮により造形物側面には凹みが生じる。

(4) このような状態で切削仕上げを行うため、凹んだ部分はそのまま残り、段差として側面に現れる。

### 3. ワーク形状・焼結条件と段差量

#### 3.1 ワーク幅寸法と段差量

段差発生要因が焼結時の収縮応力であれば、ワーク幅寸法により収縮量が異なるため、段差量にも差異が生じるはずである。そこで、ワーク幅寸法と段差量の関係を確認する。幅を 0.5 mm から 32.0 mm まで変化させたモデルに対し、積層厚み 0.05 mm で 10 層焼結することに切削仕上げ工程を挿入して側面のみ切削仕上げ加工する。段差量はワーク幅を積層方向に、かつ端面に垂直に切断し、工具顕微鏡により測定する。

測定結果を図 9 に示す。側面の段差量はワーク幅寸法の対数にほぼ比例する関係にあり、この寸法が小さければ段差量が小さく、大きければ段差量が大きくなっている。この結果から、少なくとも焼結時に発生する収縮応力が側面の段差の要因であることが確認できる。本加工システムのテーブルサイズは 250 mm 角であるが、250 mm 角の金型を加工しても段差量は 30  $\mu\text{m}$  以下と推定される。

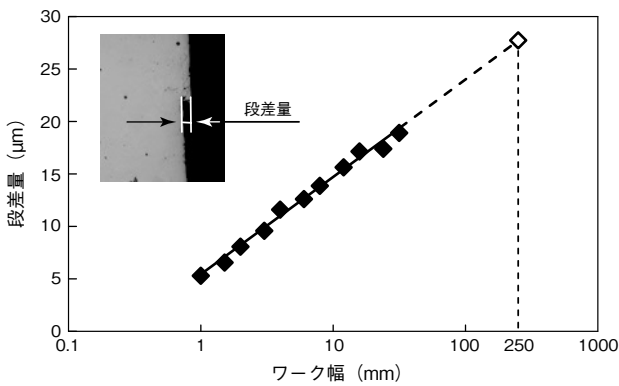


図9 ワーク幅と段差量の関係

#### 3.2 追加積層数と段差量

積層を重ねることによって収縮応力がどの程度蓄積し、側面の段差量に影響を与えるかを評価するため、追加積層数と段差量の関係を確認する。サイズ 10 × 10 × 5 mm のワークに積層厚み 0.05 mm で焼結・積層して側面の切削仕上げを施した後、追加焼結・積層して側面の切削仕上げを行う。追加積層は 1 層 (0.05 mm) から 50 層 (2.5 mm) までとする。段差量はワークを積層方向に、かつ端面に垂直に切断し、工具顕微鏡により測定する。測定結果を図 10 に示す。焼結・積層を重ねるごとに段差が大きくなっており、層を重ねることによって焼結による収縮応力が蓄積されると考えられる。この結果をもとに金型の部位に応じて切削ブロック高さを変更することにより、その部位に必要な面粗度を得ることができる。

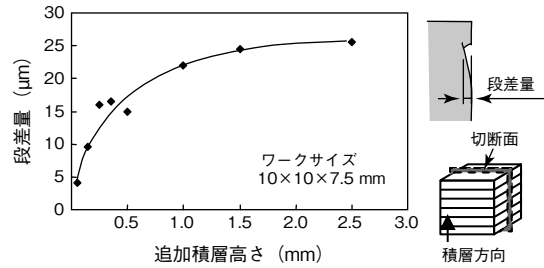


図10 追加高さと段差量の関係

### 4. 「仕上シフト切削加工プロセス」

ここでは、段差を低減するための「仕上シフト切削加工プロセス」を提案する。このプロセスを図 11 に示すとともに以下に説明する。

- (1) 切削仕上げ工程後に、上側の層の焼結・積層を行う。
- (2) 上層の焼結による収縮量を考慮した所定の仕上代を残す切削荒仕上げ工程のみ行う。
- (3) 切削仕上げ工程は行わず、上層の焼結・積層を行う。ここで (2) の工程で残した仕上代以内の切削面の凹みが発生する。その後焼結・積層したブロックの切削荒仕上げ工程のみを行う。
- (4) 焼結面から見て深い位置に対して切削仕上げ工程を施す。
- (5) (1) から (4) を繰り返す。

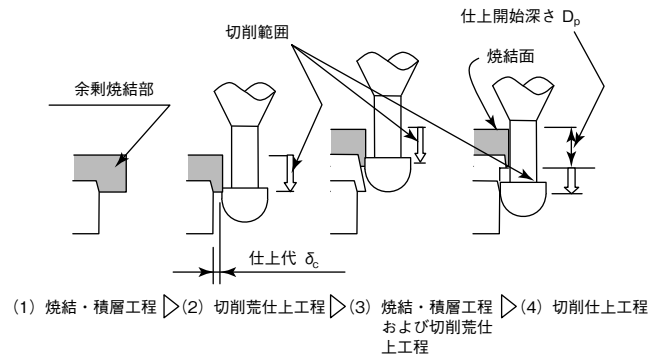


図11 「仕上シフト切削加工プロセス」

2.3.1 項に示した段差プロファイルから、焼結面から下方に離れた位置では焼結による収縮応力が側面の変形に及ぼす影響が小さいことがわかる。焼結・積層による収縮は切削荒仕上げ工程で残した仕上代のなかで発生させ、焼結による収縮応力の影響が小さくなった領域に対し切削仕上げ加工を施している。

仕上代  $\delta_c$  と仕上開始深さ  $D_p$  を変化させて加工を行い、側面の積層方向の面粗さ  $R_z$  との関係の評価して最適な加工条件を求める。結果を図 12 に示す。ワークのサイズは 10 × 10 × 10 mm、積層厚みは 0.05 mm とし、切削工程は 10 層ごとに挿入する。 $R_z$  を触針式形状測定機 Form Talysurf (Tayler Hobson 社製) で測定する。カットオフは 0.8 mm とする。 $\delta_c$  40  $\mu\text{m}$ 、 $D_p$  0.4 mm の場合に最小と

なり、 $R_z$ は $5.4\ \mu\text{m}$ である。図13にワーク側面のSEM写真を示す。図13(a)は図3に示した従来の切削仕上げプロセスで加工したもの、(b)は提案する方法で加工したものである。従来の切削仕上げプロセスでみられた段差は、ほとんど現れておらず、高品質な切削仕上げ面を得ることができる。

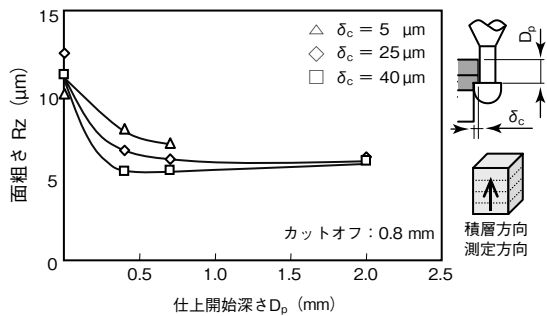


図12 切削加工プロセス条件と側面粗さの関係

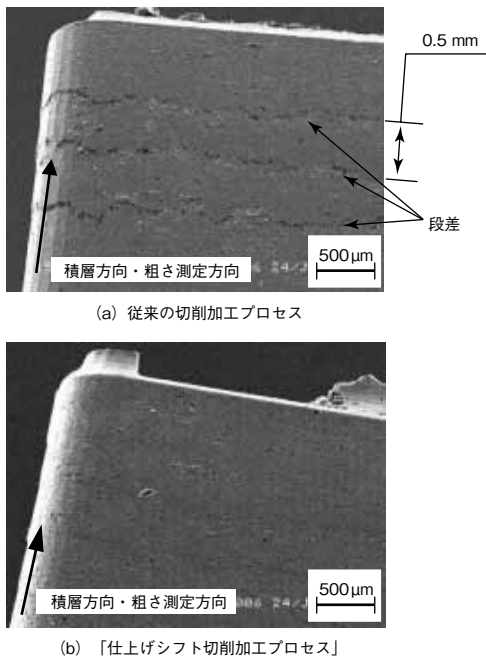


図13 「仕上シフト切削加工プロセス」による段差改善

## 5. 「仕上シフト切削加工プロセス」で加工した金型

提案する「仕上シフト切削加工プロセス」で、金型の型面形状を加工したモデルと加工物の外観写真を図14に示す。大きさは全長 $16\ \text{mm}$ 、幅 $5\ \text{mm}$ 、高さ $4\ \text{mm}$ である。焼結・積層する際の収縮応力による変形量の蓄積を削減するため、従来の条件の約半分となる $0.25\ \text{mm}$ の高さを焼結するごとに切削工程を挿入する。図15に加工面のSEM写真を示す。ボスの側面やリブ内面を見ると、段差のない良好な加工面であることがわかる。

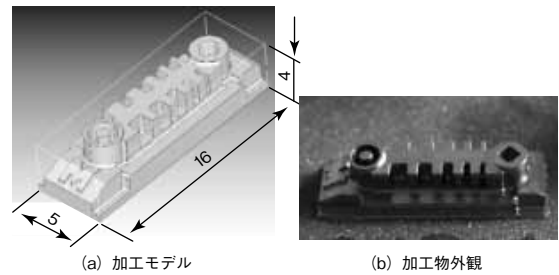


図14 「仕上シフト切削加工プロセス」の加工例

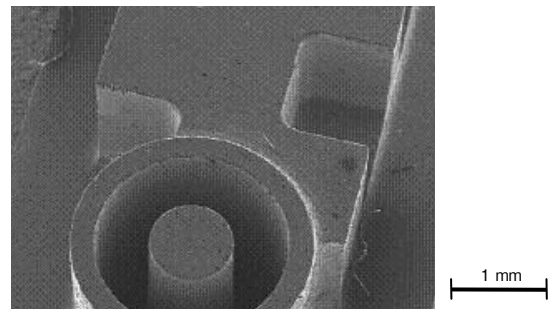


図15 加工面のSEM写真

## 6. あとがき

金属光造形複合加工法における加工物側面の粗さを改善するため、焼結・積層による側面の変形を荒仕上げ工程で残した仕上代のなかで発生させ、仕上げ工程は焼結による収縮応力の影響が小さくなる深い領域に対して施す「仕上シフト切削加工プロセス」を開発することにより、加工物側面粗さ $R_z$ を従来の $1/4$ の約 $5\ \mu\text{m}$ に抑制することができた。

その結果、側面に発生する段差はほぼなくなり、離型不良が発生しない高精度で高品質な射出成形金型の作製が可能になった。

## \*参考文献

- 1) 経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省:2007年版ものづくり白書 (ものづくり基盤技術振興基本法第8条に基づく年次報告)(2007)
- 2) 阿部 諭, 吉田 徳雄, 東 喜万, 峠山 裕彦, 不破 勲, 上永 修士:三次元形状造形物の製造方法及びその装置, 特許 3446733 号 (2003)
- 3) 阿部 諭, 東 喜万, 峠山 裕彦, 不破 勲, 吉田 徳雄: 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, p. 912-916 (2007)
- 4) 阿部 諭, 不破 勲, 東 喜万, 峠山 裕彦, 吉田 徳雄, 太田 卯三: 金属光造形複合加工システムによる高機能射出成形金型製作, 松下電工技報, Vol. 53, No. 2, p. 5-11 (2005)

## ◆執筆者紹介



阿部 諭

生産技術研究所  
博士 (工学)



東 喜万

生産技術研究所



不破 勲

生産技術研究所