

# プラスチック射出成形加工における 金型のレーザー洗浄に関する研究 (第2報)

山田 博之・寺澤 章裕・阿部 治・長田 和真

## Study on Laser Cleaning in Injection Molding Die (2nd Report)

Hiroyuki YAMADA, Akihiro TERASAWA, Osamu ABE and Kazuma OSADA

### 要 約

プラスチック射出成形加工では、加工時にガス化した原材料や添加剤が金型に付着・堆積することや、金型表面に微量な残留物(炭化物など)が付着することなどが原因で不良品が発生することがある。本研究では、その対策方法としてレーザー洗浄に着目した。できるだけ安価なレーザー加工装置を利用して、プラスチック射出成形金型に対するレーザー洗浄の照射条件と洗浄効果との関係について検討するとともに、金型への影響を調べた。その結果、熱可塑性エラストマー材を対象とした場合について、シボ面の金型に対するレーザー洗浄の効果を確かめ、さらに、各種レーザー照射条件と、洗浄効果・材料表面ダメージ等との関係について把握できた。アシストガス等を利用する複合的な洗浄方法によって洗浄や金属の酸化に対する効果の向上が図れた。また、斜面へのレーザー洗浄の場合、金属材料の傾斜角度が大きくなると、洗浄効果が低下するため、レーザー強度調節が必要であることを示した。また、レーザー照射によって金属表面が変化しない又は色が変わる程度であれば、硬さや内部の金属組織への影響はほとんどないことがわかった。

### 1. 緒 言

プラスチック射出成形加工では、加工時にガス化した原材料や添加剤が金型に付着・堆積することや、金型表面に微量な残留物(炭化物など)が付着することなどが原因で不良が発生することがある。対策の1つとして金型洗浄が挙げられるが、溶剤で拭き取るなどの接触式洗浄では、金型表面に傷が付くことやシボ状態が変化してしまうこともある。一方、非接触式では、炭酸ガスやドライアイスプラスト吹き付け等があるが汚れが十分に落ちないこともある。

そこで、レーザー洗浄に着目した。レーザー洗浄の特徴は、非接触、環境に優しい、ランニングコストが小さい、部分的・局所的な除去が可能などのメリットがあるが、反面、イニシャルコストが必要、側面や複雑形状への照射が難しいなどのデメリットがある。ゴム成形の金型洗浄などでは実用化されている例も一部あるが、装置が高額

であり中小企業では導入が難しい。また、レーザー洗浄による金型へのダメージを研究している例は非常に少ない。<sup>1),2)</sup>

本研究の目的は、できるだけ安価なレーザー加工装置(ファイバーレーザー連続発振)を利用して、プラスチック射出成形金型に対するレーザー洗浄の照射条件とその効果を検討するとともに、レーザー洗浄による金型材料への影響を調べることである。第1報では鏡面状態の金型に対するレーザー洗浄を検討した結果を報告した<sup>3)</sup>。本報ではシボ面状態の金型に対するレーザー洗浄を検討し、またレーザー洗浄による金型へのダメージの有無を検討したので報告する。

### 2. 実験方法

#### 2-1 ガス化による原材料や添加剤の付着方法

ガス化した原材料や添加剤を付着させる対象の金属材料には、プラスチック射出成形用金型材料として一般的に使用される析出硬化系プリハードン鋼である NAK80(大同特殊鋼(株)製)を用いた。また、樹脂材料には外装部品などに多く使用されるが、外観不良が比較的発生しやすいエラストマー材を対象とし、ウレタン系熱可塑性エラストマー材である大日精化工業(株)製レザミン P-4597を用いた。

本研究では、樹脂材料を熔融させた時に発生するガス

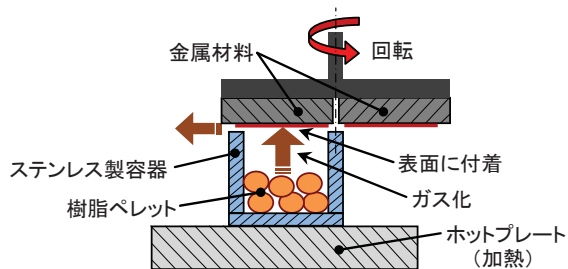


図1 洗浄実験用サンプルを作製する実験機器の概略図

成分や微量な樹脂を金属板表面に付着させた実験用サンプルを作製して、レーザ洗浄の検討を行った。図 1 に実験用サンプルを作製する実験機器の概略図を示す。ステンレス製容器内で熱可塑性エラストマー材のペレットを、ホットプレートを用いて加熱し、ガス等を発生させた。熱伝導や放熱を考慮してホットプレート上面の温度は約 250℃とした。容器の上方に、NAK80 の金属板を配置した。金属板の形状は 40mm×40mm×10mm で、均一に付着するように 4 枚を並べて配置し、約 60rpm で回転させた。金属板には、表面を研磨加工によって鏡面状態としたサンプル、およびエッチング処理によるシボ加工（シボ面：日本エッチング N-TONE7 半艶相当）を施したサンプルを用いた。

## 2-2 シボ面に対するレーザ洗浄の実験方法

本技術の実用化や広く利用されることを考慮して、本研究ではできるだけ安価なレーザ加工装置を用いてレーザ洗浄を実現すること、および、ファイバでの伝送等によって実使用における取り扱いを容易にすることなどを目的として、レーザには、波長 1070nm で連続発振 (cw) の Yb:ファイバーレーザを用いた。レーザ照射装置には、ガルバノミラーなどによってレーザスキャン照射が容易かつ高速であるレーザマーカを用いた。本実験で使用したレーザマーカの仕様を表 1 に示す。

表 1 レーザ照射装置の仕様

装置名	パナソニックデバイス SUNX(株)製 FAYbレーザマーカ LP-S500W
レーザ	Yb：ファイバレーザ (CW発振)
波長	$\lambda=1070\text{nm}$
出力	42W (±5%) CW発振
スキャン方式	ガルバノスキャン方式
ワーク間距離	中心位置 (合焦) : 193mm 設定範囲 : 173~213mm

表 2 ライン洗浄におけるレーザ照射条件

レーザ強度	8, 16, 24, 32, 39 W
スキャンスピード	250, 500, 1000, 2000, 3000 mm/s
スキャンピッチ	0.25, 0.125, 0.0625, 0.03125, 0.0152, 0.009, 0.006 mm
ワーク間距離	193mm (合焦位置)

表 3 面洗浄におけるレーザ照射条件

レーザ強度	8 W
スキャンスピード	250 mm/s
スキャンピッチ	13 $\mu\text{m}$
ワーク間距離	193mm (合焦位置)
照射面の外形寸法	2mm×2mm

レーザ洗浄実験における各種レーザ照射条件を表 2 および表 3 に示す。レーザ強度は、レーザパワーメータ (オフィール社製 Nova II) を用いて測定した。

はじめに、各種レーザ照射条件と洗浄効果との関係を調べた。金属板表面がレーザ合焦位置となるように設置し、スキャン長さ 1mm で、表 2 に示すスキャンピッチで縞状にレーザを照射した。その照射条件に加えて、レーザ強度およびスキャンスピードの各条件を表 2 に示すように変化させてレーザを照射した。

次に、これらの検討結果をもとに、重ねスキャンによるレーザ照射を行うことによって面洗浄を試みた。面洗浄のレーザ照射条件を表 3 に示す。

## 2-3 洗浄効果の評価方法

洗浄効果の評価方法として、実体顕微鏡 (オリンパス (株)製 SZX16) による観察、および走査型電子顕微鏡 ((株)日立ハイテクノロジーズ製 SU3500) の反射電子による表面状態の観察をそれぞれ行った。さらに、エネルギー分散型 X 線解析装置 ((株)堀場製作所製 EMAX Evolution X-Max20) によって表面の炭素と酸素を分析して、有機物などの残留の有無や金属の酸化状態などを調べることによって洗浄効果の評価した (以下「EDX 分析」と表記する)。

## 2-4 斜面に対するレーザ洗浄の実験方法

金型キャビティ部における曲面形状や側壁形状部分へのレーザ洗浄を検討するため、図 2 に示すように金属材料の傾斜角度を変化させて、すなわち金型表面に対するレーザ入射角度を変化させて、レーザ洗浄効果への影響を調べた。表 4 に示すレーザ照射条件と金属材料の傾斜角度で、レーザを照射した。また、金属材料には、表面状態が鏡面とシボ面のサンプルを用いた。

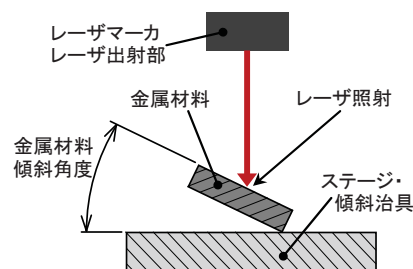


図 2 斜面に対するレーザ洗浄実験の概略図

表 4 斜面へのレーザ照射条件

レーザ強度	16 W
スキャンスピード	500 mm/s
スキャンピッチ	0.25, 0.125, 0.0625, 0.03125, 0.0152, 0.009, 0.006 mm
金属材料の傾斜角度	0, 15, 30, 45, 60, 75°

表5 金型への影響を調べる実験におけるレーザー照射条件

	No.1	No.2	No.3
レーザー強度	8 W	16 W	32 W
スキャンスピード	250 mm/s	500 mm/s	1000 mm/s
スキャンピッチ	13 μm		
ワーク間距離	193mm (合焦)		
照射面の外形寸法	2mm×2mm		

### 2-5 金型材料への影響を調べる評価方法

レーザー洗浄によって金型材料の硬さの変化や金属組織の変化などの金型への影響の有無について検討した。表面状態が鏡面の金型材料を用いて、表5に示す3種類の条件でレーザーを照射した。レーザー未照射サンプルおよびレーザー照射サンプルを切断し、切断面を鏡面になるように研磨加工し、さらに液エッチングによって金属組織を現出させた。各断面に対して、マイクロビッカース硬さ試験機（アカシ(株)製 MVK-H300A3）を用いてビッカース硬さを測定し、また走査型電子顕微鏡を用いて金属組織を観察し、それぞれ比較評価を行った。

## 3. 結果および考察

### 3-1 シボ面状態の金型材料に対する

#### 各種レーザー照射条件と洗浄効果との関係

図1に示す実験機器を用いてガス化した原材料や添加剤を金属板表面（シボ面）に付着させた。大きなムラ等が発生することなく付着させることができた。この金属板表面に、表2に示すように照射条件を変化させてレーザーを照射し、各種レーザー照射条件と洗浄効果との関係を調べた。

レーザー強度とスキャンピッチ（レーザー走査線の間隔）を変化させてレーザー洗浄実験を行い、洗浄部分の表面状態を走査型電子顕微鏡の反射電子で観察した結果とEDX分析を行った結果（炭素マッピング）の例を図3に示す。また、スキャンスピードとスキャンピッチを変化させてレーザー洗浄実験を行い、同様な評価を行った結果の例を図4に示す。ここで、図中における上端のスキャンピッチ（レーザー走査線の間隔）が0.25mmで、下端のスキャンピッチが0.006mmであり、下端側は重ねスキャンになっている。ここで、EDX分析結果の炭素マッピング、すなわち有機物の付着と考えられる炭素の検出結果の分布から洗浄効果の有無が確認できると考えられる。レーザー強度が減少する、またはスキャンスピードが増加すると、洗浄効果が低下した。除去洗浄できるエネルギーや温度に達しないためであると推測される。反面、レーザー強度が増加する、またはスキャンスピードが減少すると、洗浄

効果は大きくなるが、材料表面の変色や溶融によるシボ面状態の変化が発生した。

	電子顕微鏡観察結果 (反射電子像)	EDX 分析結果 (炭素マッピング)
レーザー強度 8 W  (250mm/s)		
レーザー強度 16 W  (250mm/s)		
レーザー強度 24 W  (250mm/s)		

図3 レーザー強度とピッチを変化させた場合の洗浄結果例

	電子顕微鏡観察結果 (反射電子像)	EDX 分析結果 (炭素マッピング)
スキャン速度 250mm/s  (16 W)		
スキャン速度 500mm/s  (16 W)		
スキャン速度 1000mm/s  (16 W)		

図4 スキャンスピードとピッチを変化させた場合の洗浄結果例

また、図5に示す例のように、単位時間・単位面積あたりのレーザー照射エネルギーが同一な場合でも、レーザー強度とスキャンスピードの組み合わせによって、洗浄効果は異なることがわかった。レーザー強度が大きい場合の方

が、狭スキャンピッチの重ねスキャンでは材料ダメージが発生しやすい傾向があった。ここで、EDX 分析結果の酸素マッピングにおいて、酸素が多く検出された部分は、金属表面が溶融再凝固して金属材料が酸化した部分などであると推測される。

一方、金属板表面がシボ面状態の場合と、第 1 報で報告した鏡面状態の場合とを比較した。図 6 にレーザー強度が 16W でスキャンスピードが 500mm/s の条件で鏡面とシボ面にレーザーを照射した場合の EDX 分析結果の例を示す。同じレーザー照射条件で洗浄した場合、鏡面よりもシボ面の方が、付着物を除去しやすく、金属表面状態へのダメージも受け易いことがわかった。さらに、レーザー強度が大きい照射条件の方がその傾向が顕著であることがわかった。ガス成分や添加剤が付着した面、および未付着

照射条件	レーザー強度：8W スキャン速度：250mm/s	レーザー強度：32W スキャン速度：1000mm/s
電子顕微鏡 観察結果 (反射電子像)		
EDX 分析 結果 (炭素分布)		
EDX 分析 結果 (酸素分布)		

図 5 単位時間・単位面積あたりのエネルギーが同一な場合

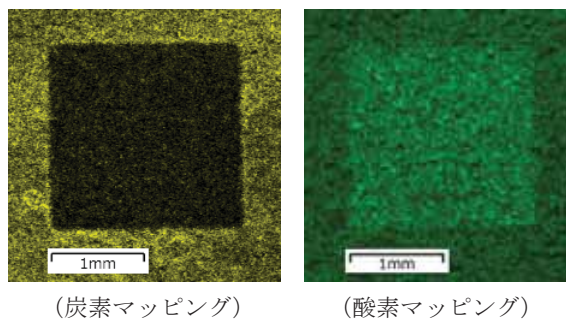
金属表面	鏡面	シボ面
EDX 分析 結果 (炭素分布)		
EDX 分析 結果 (酸素分布)		

図 6 金属表面が鏡面とシボ面におけるレーザー洗浄の比較

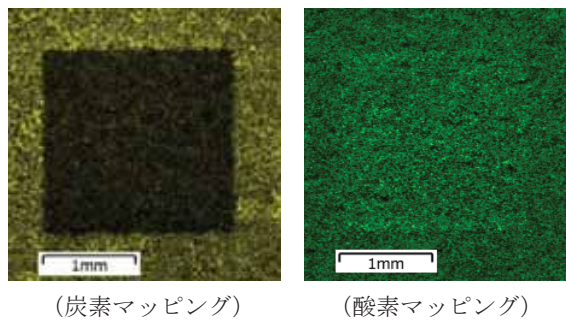
の金属表面の両者ともに、鏡面に比べてシボ面の方がレーザー吸収率が 1.5~2 倍大きいことや、シボ面の場合は微細な凹凸部で熱が溜まり、溶けやすいことなどが原因であると推測される。したがって、鏡面の方が重ねスキャンによるレーザー洗浄の照射条件を選定しやすいと考えられ、反面、シボ面の方が金型のシボ状態に影響を与えずに有機物のみを除去する最適なレーザー照射条件を選定することが難しいと考えられる。

### 3-2 シボ面状態の金型材料に対する面洗浄

重ねスキャンによるレーザー照射を行うことによって面洗浄を試みた。ここでは、前節までに述べた実験結果をもとに、レーザー照射条件を決定した。洗浄残しやムラがない均一な面洗浄ができるようにスキャンピッチは 13µm とし、狭スキャンピッチによる材料ダメージが発生しないようにレーザー強度は弱い方である 8W に設定して、面洗浄を試みた。表 3 に示す条件でレーザー照射を行い、電子顕微鏡で表面状態を観察した結果、および洗浄部分の EDX 分析を行った結果（炭素マッピング、酸素マッピング）を図 7(a)に示す。この結果から、有機物の除去効果はあるが、金属表面が酸化されてしまうと推測される。1本のラインのみでのレーザー照射では金属表面へのダメージはみられなかったが、狭ピッチによるスキャンを重ね続けることによって熱が蓄積され、金属表面へのダメージが発生したと推測される。



(a)レーザー照射のみの場合



(b) レーザ照射にアシストガスを付加した場合

図 7 面洗浄部分の EDX 分析結果

そこで、アシストガス（ガス噴射を利用する複合的な洗浄方法）による対策を試みた。アシストガスには、主成分がジメチルエーテルであるスプレーを使用した。表 3 に示す条件で同様にレーザー照射を行い、同時に洗浄部分へガスをノズルを用いて側方から噴射した。電子顕微鏡で表面状態を観察した結果、および洗浄部分の EDX 分析の結果（炭素マッピング、酸素マッピング）を図 7(b) に示す。洗浄や金属の酸化に対してアシストガスによる対策の効果があることがわかった。

### 3-3 斜面に対するレーザー洗浄

金型キャビティ部における曲面形状や側壁形状部分へのレーザー洗浄を検討するため、図 2 に示すような金属材料の傾斜角度とレーザー洗浄効果との関係を調べた。表 4 に示す条件で金属材料の傾斜角度を変化させてレーザー洗浄実験を行い、EDX 分析を行った結果（炭素マッピング）の例を図 8 に示す。表面状態が鏡面およびシボ面の両者ともに、傾斜角度が大きくなると、レーザー洗浄効果が低下し、有機物の除去幅も変化した。傾斜角度 75° 以

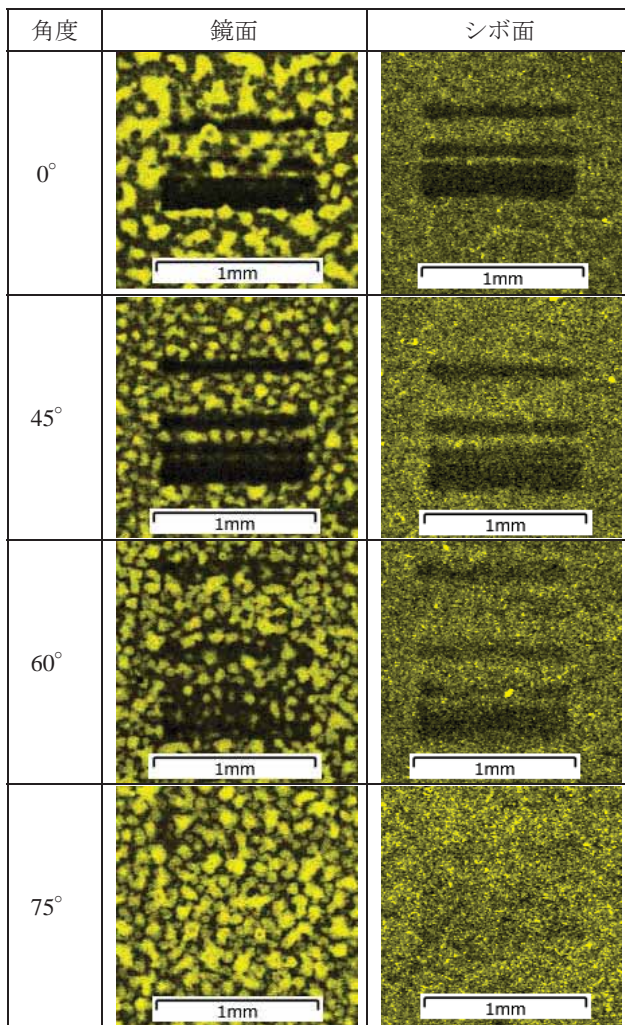
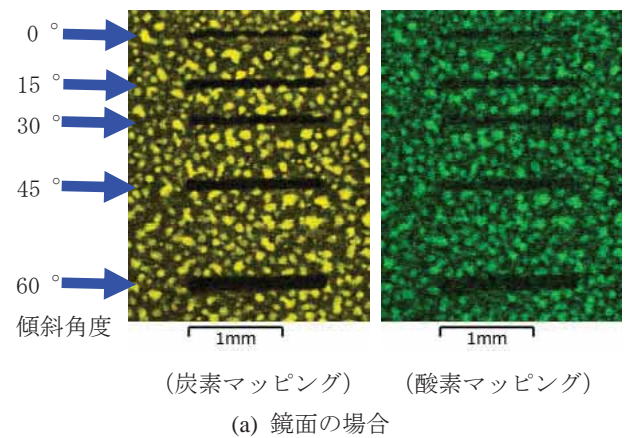


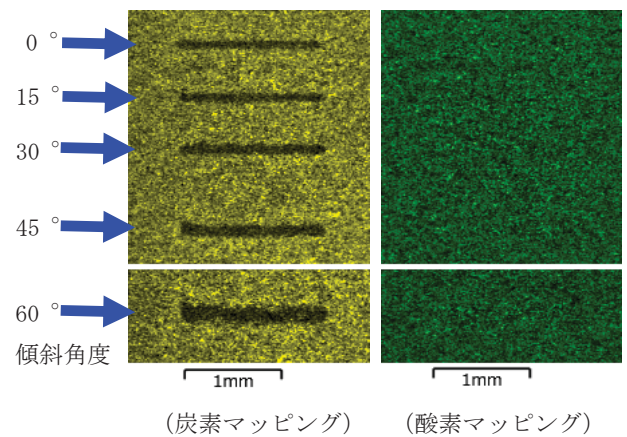
図 8 金属材料を傾斜させた場合のレーザー洗浄実験の結果

上ではほとんど洗浄効果が確認できなかった。金属表面に対するレーザーの入射角度が減少することによって、レーザー照射面積は増加するが、単位面積当たりのレーザー照射エネルギー量すなわちエネルギー密度が減少することが原因であると考えられる。

そこで、ファイバーレーザーの強度分布がガウス分布であると仮定し、金属材料の傾斜角度を変化させても照射面の中心部におけるエネルギー密度が同程度になるように、傾斜角度に対応してレーザー強度を調節し、レーザー洗浄実験を行った。図 9 に EDX 分析を行った結果（炭素マッピング、酸素マッピング）を示す。金属材料の傾斜角度が変化しても、有機物の除去効果はほとんど変化せず、金属の酸化もみられなかった。ただし、傾斜角度の増加に伴うレーザー照射面積の増加によって、有機物の除去幅すなわちレーザー洗浄の幅も増加した。これらの結果から、金型キャビティ部の斜面の角度に対応したレーザー強度調節ができれば、曲面形状や側壁形状部分へのレーザー洗浄も可能であると考えられる。ただし、斜面の傾斜角度が非常に大きい場合すなわちレーザー入射角度が非常に浅い場合は、全反射などの影響によって洗浄効果が得られないことが予想されるため、レーザー光源の位置を調節するなどの対策も必要であることに注意したい。



(a) 鏡面の場合



(b) シボ面の場合

図 9 レーザー強度調節を行った斜面レーザー洗浄実験の結果

### 3-4 レーザ洗浄による金型材料への影響

上述したような電子顕微鏡による表面観察や EDX 分析による元素分析の結果から判断される金属表面における溶解や酸化などの影響以外に、レーザー洗浄によって金型材料へどのような影響があるかを調べた。

表面が鏡面状態の金型材料に、表 5 に示す 3 種類の条件でレーザーを照射し、硬さや金属組織の変化を調べることによって金型への影響の有無について検討した。はじめに、実体顕微鏡を用いて表面状態を観察した結果を図 10 に示す。照射条件 No.1 では表面状態は変化せず、照射条件 No.2 では表面の色が少し変化し、照射条件 No.3 では表面が荒れて鏡面状態ではなくなり、観察結果で照明光が散乱していることがわかる。また、レーザー照射面のビッカース硬さを測定した結果、未照射面や照射条件 No.1, No.2 のレーザー照射面では 400HV(0.05kgf)前後であったが、表面が荒れた照射条件 No.3 では約 360HV(0.05 kgf)に硬さが低下していた。次に、未照射サンプルおよびレーザー照射サンプルについて、断面の金属組織を電子顕微鏡を用いて観察した結果を図 11 に示す。表面状態が変化しない照射条件 No.1 の場合または表面の色が少し変化する照射条件 No.2 の場合は、レーザー未照射の場合と比較することによって、内部の金属組織への影響がないことがわかる。一方、表面が荒れた照射条件 No.3 では、表

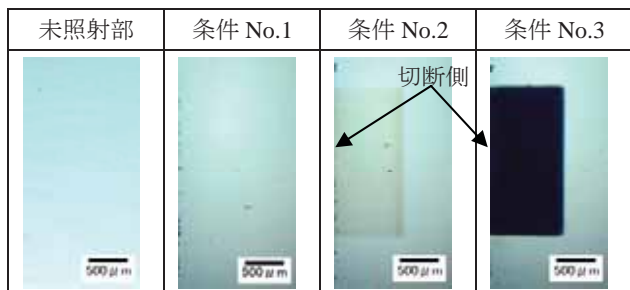


図 10 実体顕微鏡による金属表面状態の観察結果

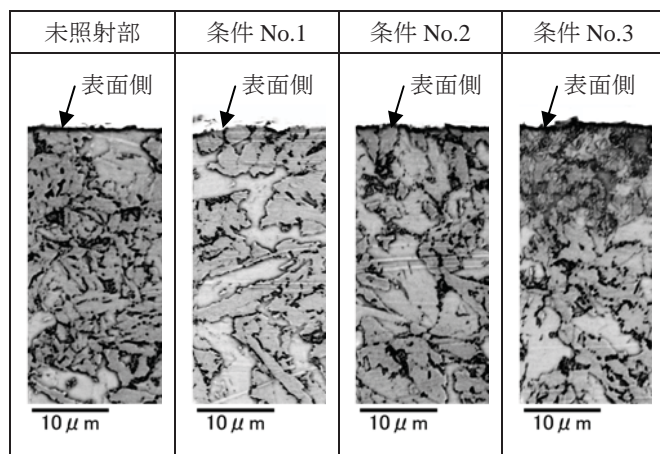


図 11 断面における金属組織の観察結果

面から約 15 $\mu$ m 内部までの領域で金属組織に変化がみられた。レーザー照射による熱影響層であると推測される。また、表面から約 20 $\mu$ m 以上の内部ではビッカース硬さは全てのサンプルで同じであった。

### 4. 結 言

成形加工時にガス化した原材料や添加剤が金型に付着・堆積することや、金型表面に微量な残留物が付着することなどが原因で発生する不良への対策として、レーザーによる金型表面の洗浄を検討した。熱可塑性エラストマーを対象とした場合について検討した結果は以下のとおりである。

- ・シボ面状態の金型への付着に対するレーザー洗浄の効果を確認できた。さらに、各種レーザー照射条件と、洗浄効果・材料表面ダメージ等との関係について把握できた。また、アシストガスを利用する複合的な洗浄方法によって、洗浄や金属の酸化に対する効果の向上が図れた。
- ・金属表面状態が鏡面よりもシボ面の方が、付着物を除去しやすく、金属表面状態へのダメージも受け易いことがわかった。
- ・斜面へのレーザー洗浄の場合、金属材料の傾斜角度が大きくなると、レーザー洗浄効果が低下した。ただし、斜面の角度に対応したレーザー強度調節を行うことによって洗浄が可能であることを示した。
- ・レーザー照射によって、表面が変化しない又は表面の色が少し変化する場合は、硬さや内部の金属組織への影響はほとんどないことがわかった。表面が荒れる場合は、表面で硬さが低下し、内部の金属組織が変化した。

今後は、実際の金型を用いて成形加工時に発生する付着物に対するレーザー洗浄効果、および成形品不良に対する効果を確認することによって、レーザー洗浄の有効性をさらに検討する予定である。

### 参考文献

- 1) 円城寺裕生, 高島康文: レーザ加工学会誌, Vol.17, No.4, P.19-22 (2010)
- 2) 三瓶和久, 社本英泰, 本村孔作: レーザ加工学会誌, Vol.17, No.4, P.8-14 (2010)
- 3) 山田博之, 寺澤章裕, 阿部 治, 高尾清利: 山梨県富士工業技術センター平成 25 年度業務・研究報告, P.63 (2013)