

プラスチック射出成形加工における 金型のレーザ洗浄に関する研究（第1報）

山田 博之・寺澤 章裕・阿部 治・高尾 清利

Study on Laser Cleaning in Injection Molding Die (1st Report)

Hiroyuki YAMADA, Akihiro TERASAWA, Osamu ABE and Kiyotoshi TAKAO

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洗浄に着目した。できるだけ安価なレーザ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、金型表面への影響を調べた。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、鏡面金型に対するレーザ洗浄の効果を確認できた。さらに、各種レーザ照射条件と、洗浄効果・デブリ・材料表面ダメージ等との関係について把握できた。また、アシストガス等を利用する複合的な洗浄方法によって洗浄効果の向上が図れた。

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、ドライアイスブラストや炭酸ガス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、レーザ洗浄に着目した。レーザ洗浄の特徴は、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^{1,2)}。

本研究の目的は、できるだけ安価なレーザ加工装置(ファイバーレーザ連続発振)を利用して、プラスチック射出成形金型に対するレーザ洗浄の照射条件とその効果を検討するとともに、レーザ洗浄による金型表面への影響を調べることである。本報では鏡面状態の金型に対するレーザ洗浄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

ガス成分や微量な樹脂を付着させる金属材料には、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、樹脂材料を溶融させた時に発生するガス成分や微量な樹脂を金属板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。アルミニウム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で加熱して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の設定温度は約 250℃とした。容器の上方に、NAK80の金属板を配置し、均一に付着するように約 60rpm で回転させた。金属板の形状は 40mm×40mm×10mm で、研磨加工によって鏡面状態とした。

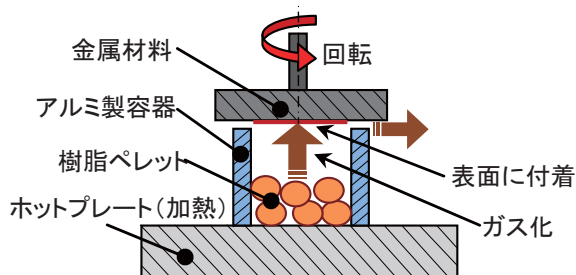


図1 実験用サンプルを作製する実験機器の概略図

2-2 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。

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。

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 ($\pm 5\%$) 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, 0.063, 0.031, 0.015, 0.009, 0.006 mm
ワーク間距離	193mm (合焦位置) 169mm (デフォーカス-24mm) 217mm (デフォーカス+24mm)

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 μm
ワーク間距離	193mm (合焦)
照射面の外形寸法	2mm×2mm

次に、金属板表面とレーザ焦点位置との関係に対する洗浄効果の違いを調べた。金属板表面が合焦位置となるように設置した場合 (ジャストフォーカス) と、金属板表面が合焦位置よりもレーザ光源側に 24mm 近い位置となるように設置した場合 (デフォーカス-24mm) と、金属板表面が合焦位置よりも 24mm 遠方である位置となるように設置した場合 (デフォーカス+24mm) について検討した。

次に、上記検討結果をもとに、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) による表面状態の観察、および走査型電子顕微鏡 ((株) 日立製作所製 SEM S-2380N) 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 Energy) によって表面の炭素を分析して、有機物などの残留の有無を調べることによって洗浄効果を評価できるかを検討した。また、レーザ未照射部分と面洗浄部分の表面粗さをそれぞれ測定し比較評価を行った。(株) ミツトヨ製の表面形状・粗さ測定器 CS-H5000CNC を使用した。

3. 結果および考察

3-1 各種レーザ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 (鏡面) 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を照射し、各種レーザ照射条件と洗浄効果との関係を調べた。

レーザ強度とスキャンピッチを変化させてレーザ洗浄実験を行い、実体顕微鏡で表面状態を観察した結果の例を図 2 に示す。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洗浄実験を行い、実体顕微鏡で表面状態を観察した結果の例を図 3 に示す。レーザ強度が减小する、またはスキャンスピードが増加すると、デブリの発生が多くなり、さらに条件を変化させると洗浄効果が得られなくなった。除去洗浄できるエネルギーに達しないためであると推測される。反面、レーザ強度が増加する、またはスキャンスピードが减小すると、洗浄効果は大きくなるが、材料表面にダメージが発生した。

ここで、走査型電子顕微鏡で表面状態を観察した結果の例と、エネルギー分散型 X 線解析 (以下「EDX 分析」と表記する) での炭素マッピングの結果の例を図 4 に示す。炭素マッピングの結果から洗浄効果の有無を確認できると考えられる。また、スキャンピッチが狭く重ねスキャンになることによって発生したと考えられる材料ダメージも確

認できることがわかった。レーザー照射条件が強い場合には、金属板表面が溶融再凝固して鏡面状態から変化してしまうことや、溶融時に付着物が混合することなどによって、材料ダメージが上記方法で確認できたと推測される。

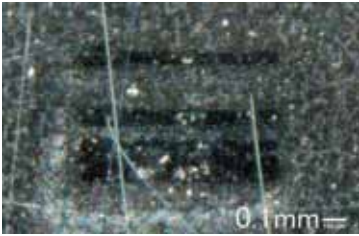

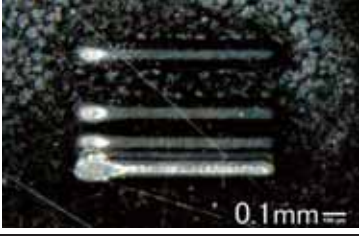
照射条件	実体顕微鏡による観察結果	
レーザー強度 8 W (1000mm/s)		広 ↑↓ 狭 ピッチ
レーザー強度 24 W (1000mm/s)		広 ↑↓ 狭 ピッチ
レーザー強度 39 W (1000mm/s)		広 ↑↓ 狭 ピッチ

図2 レーザー強度とピッチを変化させ場合の洗浄結果の例


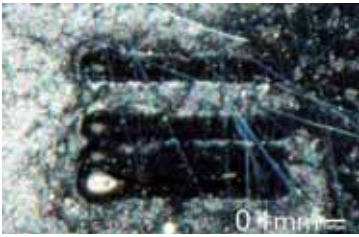
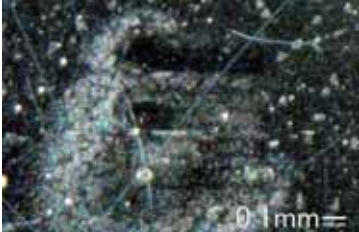
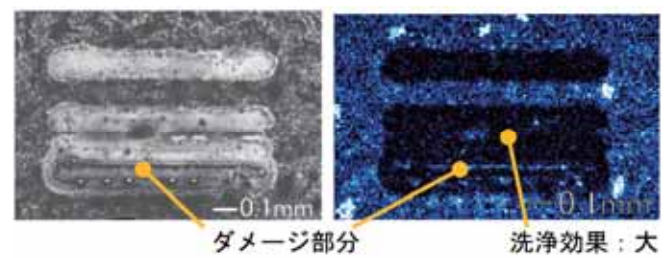
照射条件	実体顕微鏡による観察結果	
スピード 500mm/s (24 W)		広 ↑↓ 狭 ピッチ
スピード 1000mm/s (24 W)		広 ↑↓ 狭 ピッチ
スピード 3000mm/s (24 W)		広 ↑↓ 狭 ピッチ

図3 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の例

一方、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、洗浄効果は異なることがわかった。洗浄効果が良好な照射条件に比べて「レーザー強度：小、スキャンスピード：遅」条件では洗浄効果が小さくなり、一方、洗浄効果が良好な照射条件に比べて「レーザー強度：大、スキャンスピード：速」条件では洗浄効果が小さくなることに加え、デブリの発生が多く、狭スキャンピッチでは材料ダメージが発生しやすい傾向があった。熱の影響が大きいと推測される。したがって、レーザー照射エネルギーが同一でも、洗浄に対して適切な条件でレーザー照射することに注意が必要であると考えられる。



(a) SEM 観察結果 (b) EDX 分析結果 (炭素)

図4 SEM 観察例と EDX 分析結果の炭素マッピング例



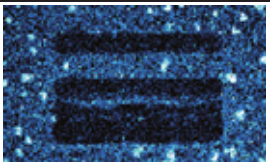
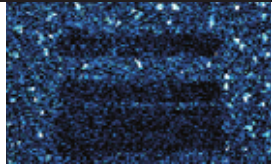
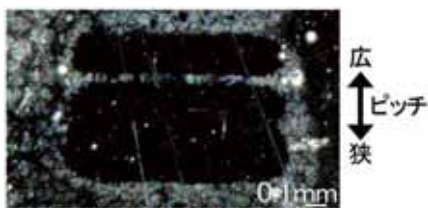
条件	レーザー強度：16W スキャンスピード：500mm/s	レーザー強度：32W スキャンスピード：1000mm/s
実体顕微鏡		
EDX分析		

図5 レーザー照射エネルギーが同一な場合の洗浄結果比較例

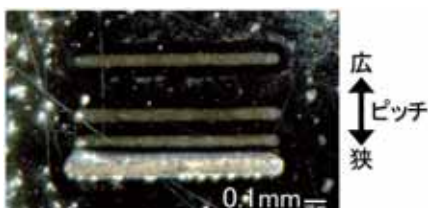
3-2 焦点位置と洗浄効果との関係

レーザーの焦点位置と金属板表面との位置関係に対する洗浄効果の違いを調べた。特に、前節の結果から、スキャンピッチが狭い重ねスキャンになると材料にダメージが発生しやすい傾向があるが、均一な面洗浄を行うためには狭スキャンピッチが重要になると予想される。そこで、本研究ではレーザーの合焦位置から離れたデフォーカス位置における洗浄効果について検討を行った。表2に示す条件でレーザー照射を行い、実体顕微鏡で表面状態を観察した結果の例を図6に示す。デフォーカス位置で材料表面にレーザーを照

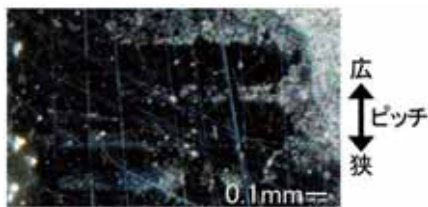
射することによって、狭スキャンピッチでの材料ダメージは軽減されることがわかった。ただし、洗浄効果は少し低下した。図 6 および EDX 分析結果から、金属板表面が合焦位置よりもレーザー光源側に 24mm 近い位置となるように設置した場合には洗浄範囲がぼやけてグラデーションのようになる傾向があった。また金属板表面が合焦位置よりも 24mm 遠方である位置となるように設置した場合には、レーザー照射影響部が広範囲（二重）になり、レーザー照射スポット中心に近い方が洗浄効果が大きくなる傾向があった。金属表面におけるレーザー強度分布が影響していると考えられる。



(a) デフォーカス位置：レーザー光源側へ 24mm



(b) 合焦位置



(c) デフォーカス位置：合焦位置より遠方側へ 24mm

図 6 焦点位置による洗浄効果や金型ダメージの違い

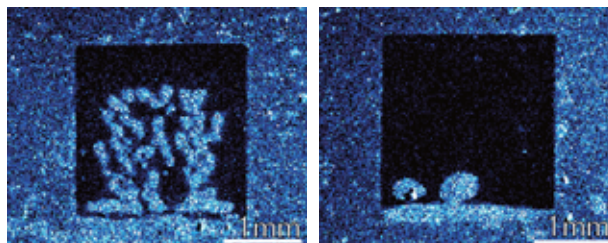
3-3 鏡面状態の金型材料に対する面洗浄

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 13 μ m 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を弱い方である 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、洗浄部分の EDX 分析を行った結果（炭素マッピング）を図 7(a)に示す。洗浄残しやムラが発生することがわかった。ラインのみでのレーザー照射では十分な洗浄効果があったが、図 7(a)に示すように照射面の中央側やスキャンを重ね

ていった照射後半で洗浄残しやムラが発生した。ライン洗浄とは異なり、洗浄面積すなわち除去面積が大きくなると、デブリや汚れの再堆積あるいは再凝固が増加したことが原因の 1 つではないかと推測される。

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、成分が炭酸ガス+DME 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。洗浄部分の EDX 分析（炭素マッピング）の結果を図 7(b)に示す。アシストガスによる対策の効果が大きいことがわかった。

一方、レーザー照射部と未照射部の表面粗さを測定した。その結果、レーザー照射部では 0.01 μ mRa, 0.09 μ mRz であり、未照射部では 0.01 μ mRa, 0.11 μ mRz であった。表面粗さに大きな違いはなく、レーザー洗浄による金属板の鏡面状態への影響はわずかであると考えられる。



(a) レーザー照射のみ

(b) アシストガス付加

図 7 面洗浄部分の EDX 分析結果（炭素マッピング）

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。その結果、熱可塑性エラストマーを対象とした場合について、鏡面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・デブリ・材料表面ダメージ等との関係について把握できた。また、アシストガス等を利用する複合的な洗浄方法によって洗浄効果の向上が図れた。

今後は、硬さや金属組織が変化してしまうような金型ダメージの有無を調べ、また、金型のシボ状態などへの影響や、曲面形状等へのレーザー洗浄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)