

金型加工技術・微細転写加工技術とその応用に関する研究(第1報)

山田 博之・小松 利安・岩間 貴司・勝又 信行・宮川 和幸・萩原 茂・木島 一広・吉田 善一*1

Study on Fabrication Technology for Microdies and Transcription Molding of Micro-pattern, and Application (1st Report)

Hiroyuki YAMADA, Toshiyasu KOMATSU, Takashi IWAMA, Nobuyuki KATSUMATA
Wako MIYAGAWA, Shigeru HAGIHARA, Kazuhiro KIJIMA and Yoshikazu YOSHIDA*1

要 約

マイクロ関連部品は、要求される加工精度が高いため、材料への直接加工によって小ロット製造されている場合が多いが、製造コストが高くなるため、微細転写加工による量産化技術が注目されている。しかし、実用化にはまだ多くの課題が残っている。そこで、本研究では転写型のマイクロ加工技術や微細研磨加工技術、型の洗浄方法等の各種要素技術について検討を行った。

本年度は、転写型への適用を目的として耐熱性や耐薬品性に優れたグラッシーカーボンへのエキシマレーザ加工技術を検討した。その結果、エキシマレーザによる微細加工の可能性を確認でき、基本的な加工条件を把握した。また、微小部分の表面処理技術として、混合磁性体を用いた磁気援用研磨加工を検討した。その結果、微細バリの除去および表面粗さの向上が確認できた。さらに、金型の微小部分における洗浄方法として、マイクロバブルを利用した手法を検討した。その結果、マイクロバブルによる水質変化が確認でき、一定の洗浄能力向上がみられた。

1. 緒 言

近年、マイクロテクノロジーは様々な分野に応用が期待されている。多くのマイクロ部品は、要求される加工サイズや加工精度が高いため、各種微細加工機を用いて小ロット加工によって試作・製造が行われている場合が多い。しかし、材料への直接加工では製造コストが高くなってしまったため、今後は転写加工による量産化技術が必要になると考えられる。現在、半導体製造技術を応用したマイクロ金型作製技術に関する研究、ホットエンボス法やインプリント法などの転写加工技術に関する研究が盛んに行われている^{1)~3)}。しかし、実用化にはまだ多くの課題が残っており、代表的な課題として以下に示す項目を解決する必要があると考えられる。①転写加工用マイクロ金型の作製に適した加工技術と材料の選定、②マイクロ金型の品質（耐久性、離型性など）の向上、③材料に応じた転写加工条件の最適化とタクトタイムの向上、④実用化に向けて研究開発段階である微細転写加工技術の確立、⑤マイクロテクノロジーの各種応用分野における量産化技術の適用などがある。

本研究では、数十 μm から数百 μm のマイクロ形状を有する部品の加工を主なターゲットとし、マイクロ金型を作製するための各種マイクロ加工技術や研磨加工技術

の検討と、微細転写加工技術の検討を目的とした。同時に、量産化技術を適用した応用分野を検討し、応用例を提案することを目的とした。

本報では、耐熱性などに優れているが切削などの機械加工が難しいグラッシーカーボン（ガラス状炭素材料）にレーザ加工を用いることにより、加工形状や寸法精度からマイクロ金型への適用可能性を検討した。また、各種加工時に発生する微小なバリの除去や、離型性を向上させるために微小部分の表面処理技術が必要になるため、はじめに金属製の型に対する研磨加工技術を検討した。さらに、金型の微小部分における汚れを除去することが難しいため、マイクロバブルに注目し、マイクロバブルを利用した洗浄方法についても検討した。これらの検討結果について報告する。

2. マイクロ加工技術の検討

2-1 実験方法

転写型材料として耐熱性や耐薬品性に優れたグラッシーカーボンに注目した。グラッシーカーボンには、東海カーボン（株）製 GC-20SS を用い、表面を研磨加工によって鏡面に仕上げた材料をレーザ加工実験に用いた。レーザには、アブレーション加工が可能でマイクロ加工に適した紫外レーザとして、エキシマレーザに注目した。

*1 東洋大学 工学部 機械工学科

表 1 微小穴のレーザ加工条件

加工装置	Exitech 社製エキシマレーザ加工機 PS2000 (LAMBDA PHYSIK 社製発振器 LPX200i)
レーザ波長	248 nm
縮小光学系倍率	10 倍レンズ系 (1/10 縮小)
ビーム形状	20 μm ×20 μm
発振周波数	50 Hz
フルエンス	2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0 J/cm ²
照射パルス数	10, 20, 30, 40, 50, 60

本実験では Exitech 社製のエキシマレーザ加工機 PS2000 (発振器：LAMBDA PHYSIK 社製 LPX200i) を用いた。波長は 248nm, パルス幅は 20nsec, 発振器の 1 パルスあたりのレーザパワーは 150~280mJ とし, さらに減衰器によってレーザパワーを調節した。また, ビームは光学系にアパーチャを挿入して成形し, 縮小光学系レンズによって集光した。加工面の評価は, レーザ顕微鏡 (レーザーテック (株) 製 1LM15W) による形状・寸法測定と, 走査電子顕微鏡 (日本電子 (株) 製 JSM-5310LV) による表面観察によって評価した。

はじめに, エキシマレーザによるグラッシーカーボンへの加工状態の向上と基本的なマイクロ加工条件を把握することを目的として, 20 μm ×20 μm の微小穴の加工条件について検討を行い, この加工条件を表 1 に示す。ビーム形状は焦点位置で約 20 μm ×20 μm とした。レーザのフルエンスを 2.0 J/cm² から 7.0 J/cm² まで変化させた場合の加工状態への影響について検討した。また, レーザの照射パルス数を 10 pulses から 60 pulses まで変化させた場合の加工状態への影響について検討した。次に, 加工ステージを移動させることによって, 幅 20 μm の微細溝の加工を試みた。

2-2 結果

エキシマレーザによってグラッシーカーボンへ 20 μm ×20 μm の微小穴を加工する場合の加工条件と加工状態との関係について検討した。はじめに, レーザ照射パルス数を 10pulses とした場合のレーザフルエンスと穴加工深さとの関係を図 1 に示す。加工深さとフルエンスとはほぼ比例関係であることが確認できた。また, レーザフルエンスを 5 J/cm² とした場合のレーザ照射パルス数と穴加工深さとの関係を図 2 に示す。加工深さとレーザ照射パルス数とはほぼ比例関係であることが確認できた。これらの結果から, 開口寸法が数十 μm でアスペクト比 (穴の開口寸法と深さ寸法の比) が 1 前後までの穴形状で

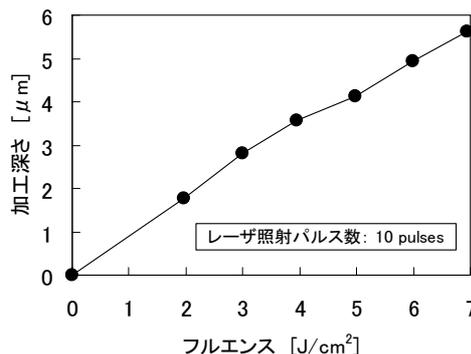


図 1 微小穴の加工深さとレーザフルエンスとの関係

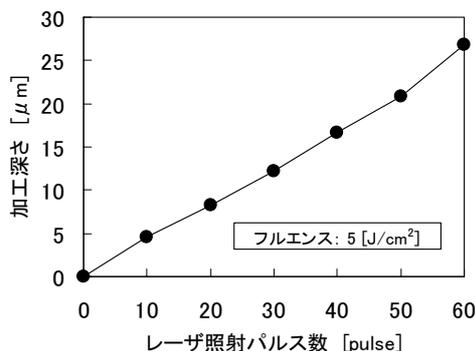
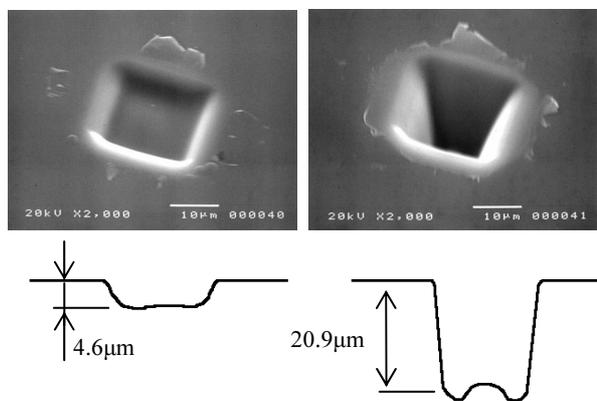


図 2 微小穴の加工深さとレーザ照射パルス数との関係



(a) 10 パルス照射した場合 (b) 50 パルス照射した場合

図 3 微小穴の観察写真と断面形状の概略図

は, 加工条件による加工深さの制御が容易であると予想される。また, フルエンスが 5 J/cm² のレーザを 10 パルスと 50 パルス照射した場合の加工穴の電子顕微鏡観察写真およびレーザ顕微鏡によって測定した断面形状の概略図を図 3 に示す。10 パルス照射した場合のアスペクト比は 0.2 であり, 50 パルス照射した場合のアスペクト比は 1.0 である。アスペクト比が大きくなると加工底面が凸形状になることがわかる。これはアスペクト比が大きくなるとアブレーションによる除去物が, 穴の外部に排出されにくくなるためであると推測される。

表2 微細溝のレーザ加工条件

レーザ波長	248 nm
縮小光学系倍率	10倍レンズ系(1/10縮小)
ビーム形状	20 μ m \times 20 μ m
発振周波数	50 Hz
フルエンス	5.0 J/cm ²
ステージ移動速度	1.2 mm/min
(1パルスあたりの移動距離)	(0.4 μ m)

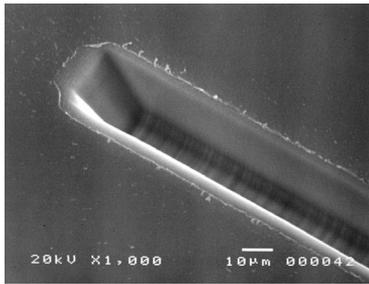


図4 グラッシーカーボンへの微細溝加工例

次に、これらの加工条件をもとに、幅 20 μ m の微細溝の加工を試みた。焦点位置でのビーム形状が約 20 μ m \times 20 μ m であるレーザを使用した。表 2 に示す条件で加工した微細溝の電子顕微鏡観察写真を図 4 に示す。幅と深さの寸法はともに約 20 μ m に加工できたが、側面は 23° のテーパ形状である。ただし、転写加工時には抜け勾配が必要となるため、今後は抜け勾配として必要な角度を検討し、転写加工形状に適したテーパ形状が得られるように加工条件をさらに検討する必要がある。また、溝側面の表面はなめらかであるが、底面には加工痕が観察されるため、今後は加工面の粗さの改善も検討していく。

3. マイクロ金型研磨加工技術の検討

3-1 実験方法

磁気援用研磨加工法は、円筒内面の精密仕上げや、複雑な曲面形状を有する部品の精密仕上げ等に広く応用されている。本研究では、マイクロ金型の微細形状部分における微細バリの除去や加工面あらしの向上を目的に金属材料 (SUS304) への磁気援用研磨加工法の適用を検討した。

図 5 に磁気援用研磨加工法の模式図を示す。加工方法としては、磁石から発生する磁力により磁性砥粒を加工物に一定の力で押しつけ、さらに、磁石を揺動することで磁性砥粒を揺動し、固定された加工物表面を研磨加工する方法を用いた。

表 3 に加工条件を示す。磁石は簡易的な機構とするため永久磁石とし、且つ磁石と磁性砥粒の間に十分な磁気吸引力を発生させるためにネオジウム磁石を使用した。

また、安定した揺動運動を行うため電磁式振動試験機 (エミック (株) 社製 VC-10DMAX (32) PIR) を使用した。

さらに、砥粒の混合割合は図 6 (a) に示す鉄粉と図 6 (b) に示す WA 混合砥粒を 0.3g : 0.1g の割合で混合した⁴⁾。

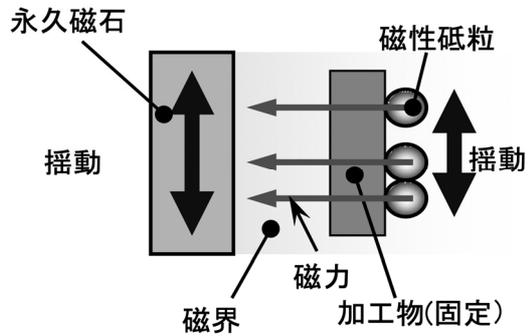
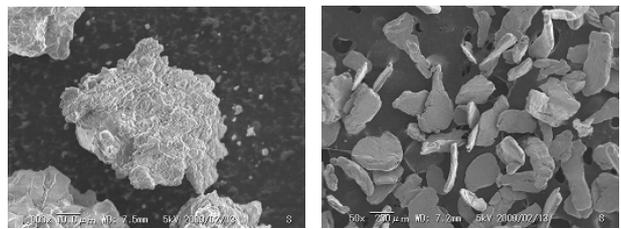


図5 磁気援用研磨加工法の模式図



(a) 鉄粉 (b) WA 混合砥粒

図6 磁気援用研磨加工に用いた砥粒

表3 磁気援用研磨加工条件

被加工物	SUS304 (20 \times 30 \times 0.5mm)
揺動条件	周波数 : 5Hz 20mmP-P
磁 極	ネオジウム永久磁石 10 \times 5 \times 40mm
磁性砥粒	鉄粉 : 平均粒径 0.3 μ m 0.3g WA 混合磁性砥粒 0.08 μ m 0.1g
混合方式	水性研磨液を用いた湿式
間 隙	約 4mm (磁石と磁性砥粒間)

3-2 結果

微細なバリ高さの減少を目的に磁気援用研磨加工を検討した。高さ 5~10 μ m 程度の微細バリを発生できるように、市販のガラス切り (ガラスカッター) を用いて SUS304 表面に溝加工を施し、エッジ部に発生した微細バリを加工実験に使用した。初期のバリ高さは 5 μ m である。バリの高さおよび表面粗さは表面粗さ計 (小坂研究所製 : SE3F) で測定した。磁気援用研磨加工を行った結果を図 7 に示す。1 時間の加工によってバリ高さは 2 μ m に減少した。さらに 1 時間加工を行ったがバリ高さ

は殆ど変化が無かった。

次に、表面粗さの向上を目的に磁気援用研磨加工を検討した。研磨紙により表面を一定の粗さに加工した3種類の加工物に対して磁気援用研磨加工を実施した。結果を図8に示す。1 μmRz 以上の粗さに対しては、1時間の研磨加工により0.4 μmRz 程度の向上が図られたが、初期粗さが1 μm 未満の粗さに対してはわずかな向上が図られた。表面粗さRaに関しては、加工時間とともに粗さの向上が図られた。

以上の結果から、本研究の磁気研磨加工方法は、高さ5 μm 程度の微細なバリの減少や、1 μmRz 以上の表面粗さの向上に有効であることが確認できた。

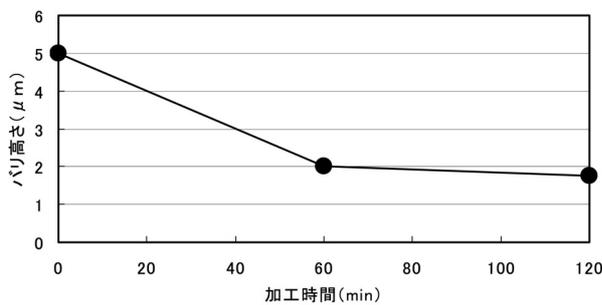
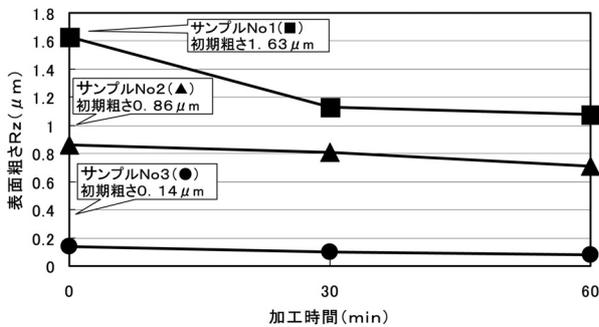
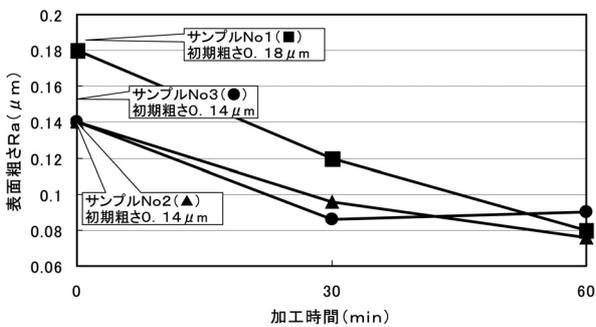


図7 磁気援用研磨加工時間によるバリ高さの減少



(a) 研磨加工時間による表面粗さの向上 (Rz)



(b) 研磨加工時間による表面粗さの向上 (Ra)

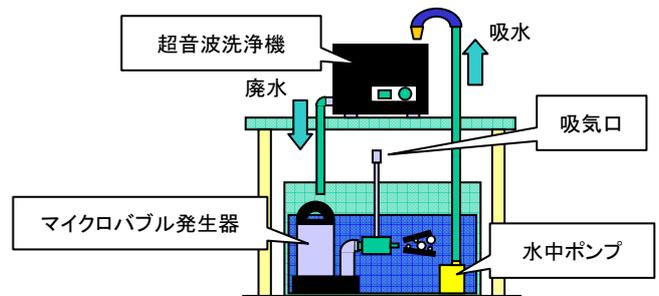
図8 磁気援用研磨加工による表面粗さの向上

4. マイクロ金型洗浄方法の検討

4-1 実験方法

環境問題の観点から、超高压マイクロジェット噴流⁵⁾等、有機溶剤や洗浄液を使用しない洗浄技術の開発が活発に行われている。その中で、マイクロバブルを用いた洗浄方法⁶⁾は、注目を集めている技術の1つである。通常、気泡は直ぐに水面へ上昇して破裂するが、気泡サイズが数十 μm 以下になると、水中での滞在時間が長くなり、水中で収縮・消滅(完全溶解)するようになる。このマイクロバブルによる洗浄メカニズムは、まだ明確に解明されていないが、次のような効果が期待されているため、本研究でもマイクロバブルの利用を検討することにした。

- ① 気泡表面積が大きく、油分等の汚れが付着する。
- ② 気泡の消滅時に衝撃波が発生し、汚れを剥離する。



(a) 装置概略図



(b) マイクロバブル発生器

図9 洗浄実験装置

表4 マイクロバブル発生器の主な仕様

ノズル形式	YJ-9
ノズル径	9 mm
ポンプ出力	0.4 kW
最大ポンプ流量	80 L/min
最大空気供給量	28 L/min
発生気泡径	30~50 μm

図9に本研究で使用した実験装置の概略図と、マイクロバブル発生器を示す。約60Lの水槽中でマイクロバブルを発生させ、洗浄実験槽を兼ねた超音波洗浄機に循環させる構造とした。本研究で使用したマイクロバブル発生器は、専用ノズルに吸水するだけで自然吸気し、マイクロバブルを放出するタイプである。表4に、マイクロバブル発生器の主な仕様について示す。

4-2 結果

まず、マイクロバブルの発生によって、洗浄液がどのような影響を受けるか検証した。具体的には、水道水を実験装置内で循環させた場合と、マイクロバブルを発生させた場合で、水質の変化を電極型pH計(堀場製作所製, twin pH B-212)を用いて測定した。

本研究で使用するマイクロバブル発生器を稼働しても、洗浄水は無色透明であり、目視でマイクロバブルの発生状況は把握できない。しかし、図10に示すように、マイクロバブルを発生し始めると、少しずつ水質がアルカリ性に変わり、約20分後には、pH8.2で安定することが分かった。本研究で使用したpH計は電極型のため、マイクロバブルがマイナスに帯電すると、その溶液はアルカリ性と認識する可能性がある⁶⁾。気泡表面の帯電メカニズムは、まだ明確に解明されていないものの、この測定結果より、目視できないマイクロバブルが、確実に発生していることが確認できた。

次に、マイクロバブルの洗浄能力について実験を行った。76.0×26.0mmのガラス板上に、模擬汚れとして白色ワセリンを塗布し、超音波洗浄のみの場合と、マイクロバブルを含む洗浄水で超音波洗浄した場合で、洗浄能力がどのように変化するか比較した。白色ワセリンは、ガラス板中央部に約20mm幅で塗布した。超音波洗浄は5分間行い、非接触表面形状測定機(Zygo製, NewView 6300)を用いて白色ワセリンの残留状態を測定・比較した。

図11に実験結果を示す。超音波洗浄のみの場合では、目視でも判別できるほど白色ワセリンが残留した部分があったが、マイクロバブルが付加されると、多量に付着した部分が殆ど存在しない状態となり、一定の洗浄能力向上が確認できた。

5. 結 言

転写型のマイクロ加工技術や微細研磨加工技術、型の洗浄方法等の各種要素技術について検討を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) グラッシーカーボンへのエキシマレーザによる微細加工の可能性を確認でき、基本的な加工条件を把握した。また、幅20 μm 、深さ20 μm 、側面テーパ23°の溝が加工できた。
- 2) 金属材料(SUS304)への磁気援用研磨を試みた結果、混合磁性体を揺動させる加工方法により、表面粗さの向上および微細バリの除去が可能となった。
- 3) マイクロバブルを用いた洗浄方法を検討した結果、マイクロバブルによる水質変化と、一定の洗浄能力向上が確認できた。

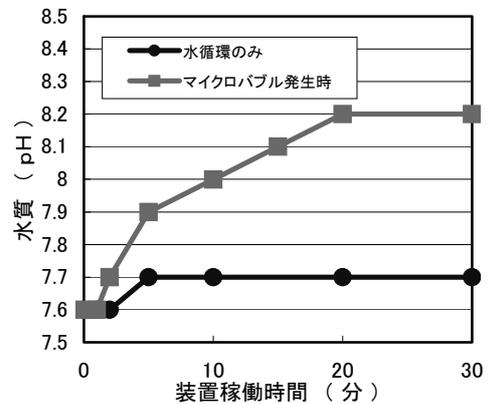
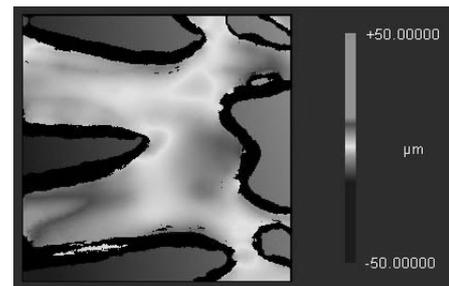
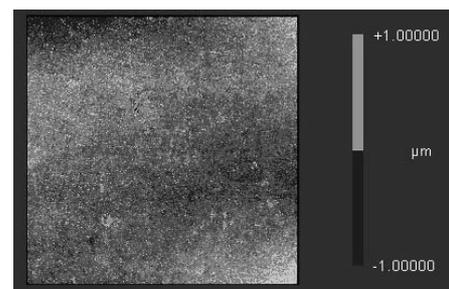


図10 水質の変化



(a) 超音波洗浄のみの場合



(b) マイクロバブル付加の場合

図11 洗浄実験結果

参考文献

- 1) (社) 高分子学会編：微細加工技術 [応用編]，
(株) エヌ・ティー・エス， p.147 (2003)
- 2) 早乙女康典：マイクロ塑性加工-マイクロ塑性加工
技術の現状と展望-，精密工学会誌， Vol.69, No.9,
p.1221 (2003)
- 3) 前田龍太郎，他 5 名：ナノインプリントのはなし，
日刊工業新聞社， p.8 (2005)
- 4) シュウエンカ，進村武男名：定圧磁気ブラシを利用
した新しい平面磁気研磨法に関する研究，砥粒加工
学会誌， Vol.53, No.1, p33 (2009)
- 5) 清家善之，他 3 名：超高压マイクロジェットによる
半導体 CMP パッドの洗浄・コンディショニング技
術，砥粒加工学会誌， Vol.51, No.3, p.3 (2007)
- 6) 高橋正好，他 37 名著：微細気泡の最新技術，
(株) エヌ・ティー・エス， p.207, p.10 (2006)