

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2報)

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

Study on Fabrication Technology for Microdies and Transcription Molding of Micro-pattern and Application (2nd Report)

Hiroyuki YAMADA, Toshiyasu KOMATSU, Nobuyuki KATSUMATA, Masafumi ISHIDA, Wako MIYAGAWA, Kazuhiro KIJIMA, Takashi IWAMA 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り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等の各種要素技術について検討を行った。はじめに、金属製転写型の作製を目的として、切削加工および放電加工による金属材料へのマイクロ加工技術を検討した。その結果、幅 $100\mu\text{m}$ 、高さ $100\mu\text{m}$ の微小リブが加工でき、マイクロ金型作製技術への適用可能性を把握した。また、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ー加工技術を検討した。その結果、レーザーによるグラッシーカーボンへの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。さらに、微小部分の表面処理技術として、磁性砥粒を2軸揺動させた磁気援用研磨加工を検討した。その結果、1軸揺動に比べて表面粗さがより一層向上することを確認できた。

1. 緒 言

近年、マイクロテクノロジーは様々な分野への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り試作・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り、今後は微細転写加工による量産化技術の必要性が高くなると考えられる。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されており、代表的な課題として以下に示す項目を解決する必要性が考えられる。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)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。第1報⁴⁾では、耐熱性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)にレーザー加工を適用し、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。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、洗浄能力の向上を確認した。

本報では、第1報に引き続きグラッシーカーボンへのレーザー加工について、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、金属製転写型の作製を目的として、切削加工および放電加工による金属材料へのマイクロ加工技術を検討した。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。第1報で金属製の型に対する磁気援用研磨加工について報告したが、本報では磁性砥粒を2軸揺動させた場合の磁気援用研磨加工について検討を行ったので報告する。

2. 金属材料へのマイクロ加工

2-1 実験方法

金属製転写型の作製を目的として、金属材料へのマイ

*1 東洋大学理工学部生体医工学科

クロ加工技術を検討した。本報では、切削加工および放電加工による金属へのマイクロ加工・高精度加工を試みた。切削加工では金型鋼として使用されているNAK55を型材料に用い、放電加工ではガラスと熱膨張係数が近く難削材であるKovarを型材料に用いた。切削加工実験ではマシニングセンタ（三井精機工業(株)製、VU50A）を使用し、放電加工実験では微細放電加工機（三菱電機(株)製、EDSCAN8E）を使用した。マイクロ流体デバイスなどで利用される微細溝を有した部品を転写加工によって作製することを目標とし、型形状として断面が100×100μmの微小リブの加工を試みた。加工条件を表1および表2に示す。

表1 微小リブの切削加工条件

加工装置		マシニングセンタ 三井精機工業(株)製、VU50A
荒加工	工 具	超鋼 TSコート (ミスミ製：TSC-HP-MS) スクエアエンドミルφ6mm
	切削速度	約60m/min
	送り速度	1000mm/min
仕上げ加工	工 具	超鋼FXコーティング (OSG製：FX-MG-EMS) スクエアエンドミルφ3mm
	切削速度	約50m/min
	送り速度	125mm/min
	切り込み	0.1mm

表2 微小リブの放電加工条件

加工装置		微細放電加工機 三菱電機(株)製、EDSCAN8E
放電条件	設定電圧	80V
	静電容量	0pF
加工条件	電 極	銅パイプ (φ2.0mm)
	Z送り量	0.2mm
	加工速度	任意 (最適送り)
	加工時間	約113時間
	電極消耗量	0.1121mm

また、切削加工において発生するバリが転写加工時に影響を及ぼすことが予想される。そこで本研究では、核（コア径：0.2～0.5mm）となる弾性体の表面に研磨微粉を付着させた表面積層型の弾性研磨材を用いて加工物表面を乾式の擦過現象によって研磨加工することができるブラスト加工機を用いて、バリの除去を検討した。実験では鏡面ブラスト加工機（東洋研磨材工業(株)製、SMAP-II）を用いた。ブラスト加工条件を表3に示す。

表3 ブラスト加工条件

加工装置	鏡面ブラスト加工機 東洋研磨材工業(株)製、SMAP-II
砥 粒	仕上げ加工メディア SP-F100D (#10000ダイヤモンド砥粒)
インバータ周波数	40, 50Hz
加工送り	手動
加工時間	10sec

2-2 結果

金型鋼として使用されているNAK55材料に、切削加工により100×100μmの微小リブを加工した。表1に示す条件で切削加工した微小リブの電子顕微鏡観察写真を図1に示す。目標とする加工形状が得られたが、リブの上面に微細なバリが発生することが分かった。また、加工面の表面粗さは0.147μmRaである。微細転写加工用マイクロ金型としてバリの除去や表面粗さの改善が必要であるため、それらに関する検討結果を後述する。

次に、ガラスと熱膨張係数が近いKovarに、放電加工により100×100μmの微小リブを加工した。表2に示す条件で放電加工した微小リブの電子顕微鏡観察写真を図2に示す。加工面の表面粗さは0.142μmRaであり、切削加工と同程度の加工面粗さが得られた。ただし、リブの根元部分が僅かにR形状になっており、これは放電集中による電極磨耗の影響であると推測される。

次に、切削加工において発生するバリの除去について検討を行った。鏡面ブラスト加工機を用いて鏡面加工を行う場合は、荒加工・中仕上げ加工・仕上げ加工など加工面の状態に応じた研磨材を段階的に使用する。しかし、本

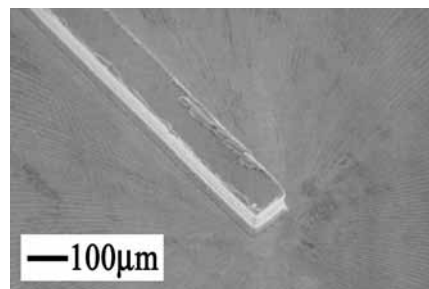


図1 NAK55への微小リブの切削加工例

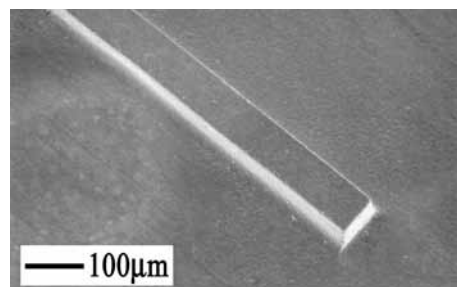
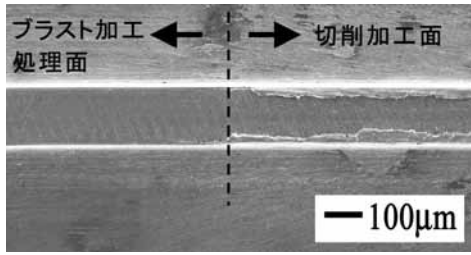
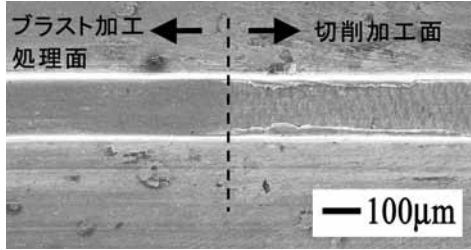


図2 Kovarへの微小リブの微細放電加工例



(a) インバータ周波数40Hzの場合



(b) インバータ周波数50Hzの場合

図3 切削加工面へのブラスト加工結果

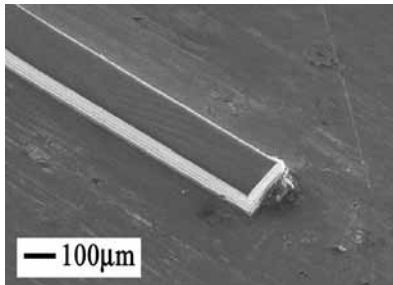


図4 ブラスト加工処理後の微小リブ

研究ではバリの除去を目的とし、かつ微小リブの形状に対する影響が少ないように、仕上用メディアのみを用いて切削加工部分にブラスト加工を行った。加工実験では、微小リブの半分にマスキングしてブラスト加工を行うことにより、切削加工面とブラスト加工処理面との比較を行った。砥粒噴射装置のインバータ周波数を40Hzと50Hzに設定した条件でブラスト加工を行ったサンプルの電子顕微鏡観察写真を図3 (a), (b) にそれぞれ示す。40Hzと50Hzの両条件ともに切削加工時に発生したバリを除去でき、表面粗さについても多少改善された。ただし、インバータ周波数50Hzの条件のように砥粒噴射が強い場合には、微小リブのエッジ部にダレが発生することが確認された。また、ブラスト加工後のサンプルを電子顕微鏡で観察した鳥瞰写真を図4に示す。リブ寸法に対して砥粒径が大きいいため、リブ側面などに対してはブラスト加工の効果が小さいことが分かった。今後は、表面粗さの改善について切削加工条件の最適化とともに他の処理方法も検討する。

3. グラッシーカーボンへのマイクロ加工

3-1 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。一般的にグラッシーカーボンは切削などの機械加工が難しいため、レーザによるマイクロ加工を検討した。グラッシーカーボンには、東海カーボン(株)製GC-20SSを用い、表面を鏡面研磨加工し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。本実験ではエキシマレーザ加工機 (Exitech社製, 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。

第1報では、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、 $20 \times 20 \mu\text{m}$ の微小穴の加工条件について検討した。本報では、穴寸法の影響を調べるために $100 \times 100 \mu\text{m}$ の微小穴の加工条件について検討した。加工条件を表4に示す。ビーム形状は焦点位置で約 $100 \times 100 \mu\text{m}$ とした。レーザのフルエンスを $2.0\text{J}/\text{cm}^2$ から $7.0\text{J}/\text{cm}^2$ 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10pulsesから100pulses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。さらに、加工ステージを移動させることによって、幅 $100 \mu\text{m}$ の微小リブの加工を試みた。ビーム形状は焦点位置で約 $1 \times 1 \text{mm}$ とした。

また、微細立体形状の作製を目的として、アノード酸化処理によるアルミ薄膜をハーフトーンマスクに應用して、グラッシーカーボンへの微細構造のレーザ加工も試みた。

表4 微小穴のレーザ加工条件

加工装置	エキシマレーザ加工機 Exitech社製, PS2000 (発振器 LAMBDA PHYSIK社製, LPX200i)
レーザ波長	248nm
縮小光学系倍率	10倍レンズ系 (1/10縮小)
ビーム形状	$100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$
発振周波数	50Hz
フルエンス	2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, $7.0\text{J}/\text{cm}^2$
照射パルス数	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100

3-2 結果

エキシマレーザによってグラッシーカーボンへ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。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5に示す。

第1報で報告した $20 \times 20 \mu\text{m}$ の微小穴を加工する場合と比較した。加工深さとフルエンスとはほぼ比例関係であるが、 $100 \times 100 \mu\text{m}$ の微小穴を加工した方が、加工深さは小さくなるのが分かった。穴寸法が大きくなると除去体積も大きくなり、加工時に発生する飛散物が穴外部へ排出されにくくなるのが影響していると推測される。また、レーザフルエンスを 5 J/cm^2 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6に示す。図7 (a), (b) は $20 \times 20 \mu\text{m}$ の微小穴を加工した場合、図7 (c), (d) は $100 \times 100 \mu\text{m}$ の微小穴を加工した場合の加工穴の電子顕微鏡観察写真である。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 $100 \mu\text{m}$ 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。ただし、アスペクト比が増加するほど、または、穴寸法が増加するほど、穴側面がテーパ形状になり易く、穴周辺におけるデブリの堆積も多くなるのが分かった。これらも、加工時に発生する飛散物が穴外部へ排出されにくいことが影響していると推測される。

次に、これらの加工条件をもとに、幅 $100 \mu\text{m}$ の微小リブのレーザ加工を試みた。焦点位置でのビーム形状を

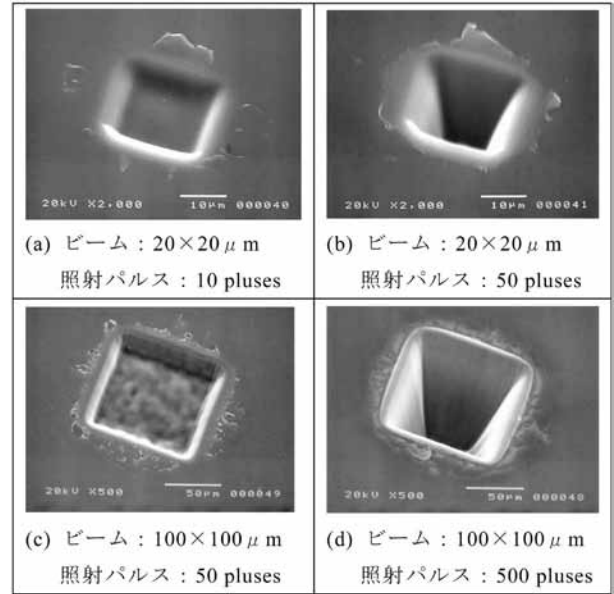


図5 微小穴の加工深さとレーザフルエンスとの関係

$1 \times 1 \text{ mm}$ としてスキャン加工を行い、微小リブ部分を残す除去加工を行った。表5に示す条件でグラッシーカーボンに加工した微小リブの電子顕微鏡観察写真を図8に示す。深さ約 $100 \mu\text{m}$ のリブが加工できたが、側面はテーパ形状である。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、リブ上面にデブリの堆積が観察されるため、今後はデブリの対策についても検討する必要がある。

次に、微細立体形状を作製するため、アノード酸化処理によるアルミ薄膜^{5), 6)}をレーザ加工用ハーフトーンマスクに応用する実験を試みた。膜厚を変化させたアルミ薄膜を光学石英ガラス板上に成膜したマスクを作製し、そのマスクを用いてエキシマレーザの強度分布を変化させることにより、グラッシーカーボンに微細立体形状を加工することを検討した。表6に示す条件でレーザ加工を行った。図9の電子顕微鏡観察写真に示すような幅 $20 \mu\text{m}$ 、高さ $10 \mu\text{m}$ の複数の突起形状をグラッシーカーボンに加工することができた。今後は、加工条件をさらに検討するとともに、転写加工の検討を行う。

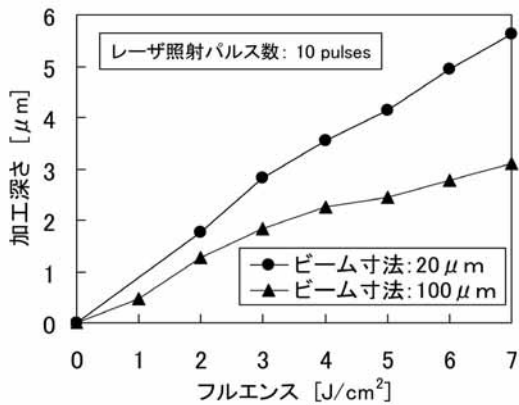


図5 微小穴の加工深さとレーザフルエンスとの関係

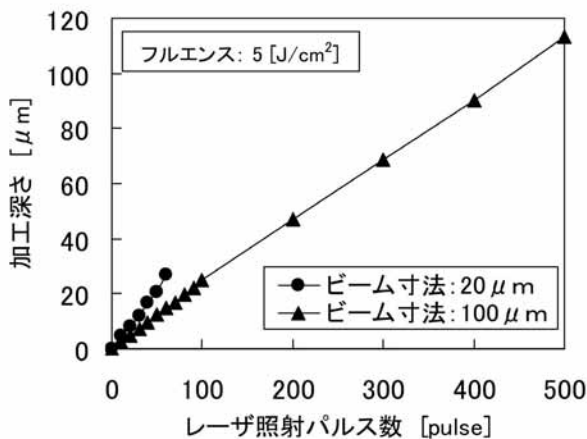


図6 微小穴の加工深さとレーザ照射パルス数との関係

表5 微小リブのレーザ加工条件

レーザ波長	248nm
縮小光学系倍率	10倍レンズ系 (1/10縮小)
ビーム形状	1 mm \times 1 mm
発振周波数	50Hz
フルエンス	5.0 J/cm^2
ステージ移動速度	17.82mm/min
パス数	6

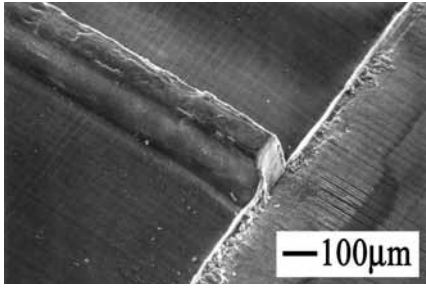


図8 グラッシーカーボンへの微小リブ加工例

表6 微細立体形状のレーザ加工条件

レーザ波長	248nm
縮小光学系倍率	10倍レンズ系 (1/10縮小)
マスク基板	光学石英ガラス
マスク材質	アルミ薄膜
発振周波数	50Hz
フルエンス	5.0J/cm ²
照射パルス数	100pluses

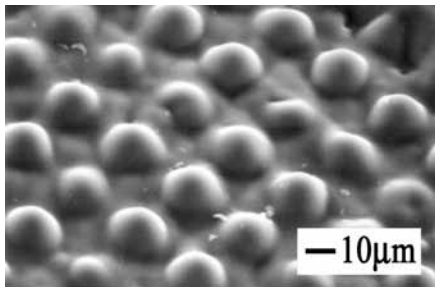


図9 グラッシーカーボンへの微細立体形状加工例

4. マイクロ金型研磨加工技術

4-1 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⁷⁾。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か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10に磁気援用研磨加工法の模式図を示す。磁石から発生する磁力により磁性粒体を被加工物に押しつけ、磁性粒体を揺動させて加工物表面を研磨加工する方法である。第1報では被加工物を固定して磁石のみを揺動させていたが、本報では加工面品質の更なる向上を目指して、被加工物と磁石をそれぞれ直角方向に揺動させて、研磨加工する方法を検討した。

表7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、且つ磁石と磁性粒体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。安定した揺動運動を行うため電磁式振動試験機 (エミックス株式会社, VC-10DMAX (32) P1R) を使用した。

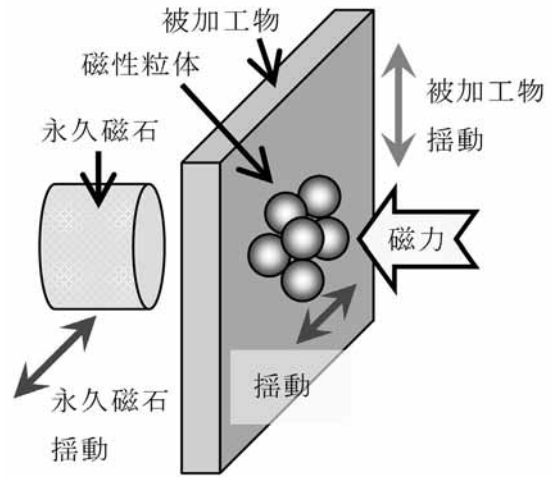
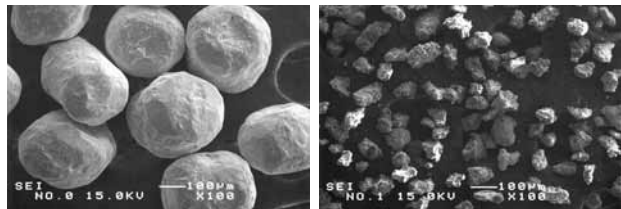


図10 磁気援用研磨加工法の模式図

表7 磁気援用研磨加工条件

被加工物	SUS304 (20×30×0.5mm)
揺動条件	被加工物: 周波数 5 Hz 20mmP-P 永久磁石: 周波数33Hz 4 mmP-P
磁極	ネオジウム永久磁石: 10×5×40mm
磁性粒体	ステンレスボール: 平均粒径0.3mm WA混合磁性砥粒: 平均粒径0.08mm
研磨方式	乾式
間隙	約 4 mm (磁石と磁性砥粒間)

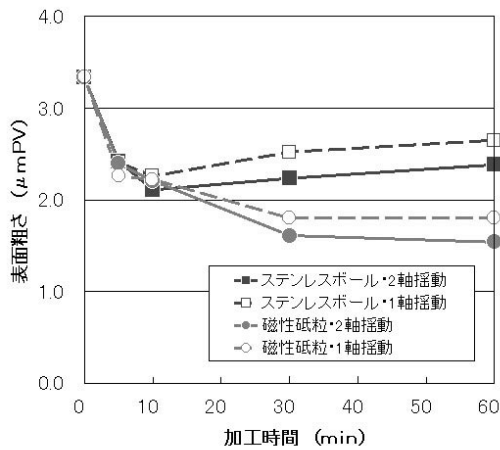


(a) ステンレスボール (b) WA混合磁性砥粒
図11 磁気援用研磨加工に用いた磁性粒体

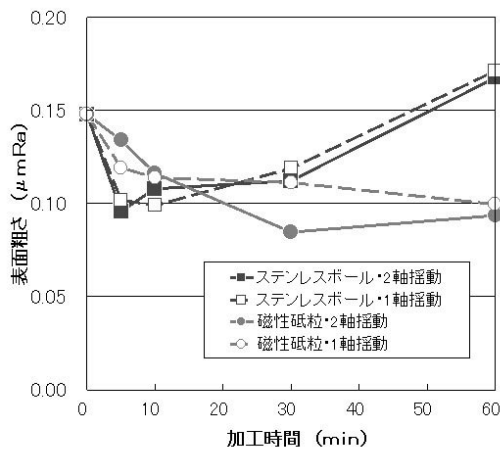
使用した磁性粒体は、図11 (a) に示す直径約0.3mmのステンレスボールと、図11 (b) に示すWA混合磁性砥粒を使用した。各磁性粒体を約0.1g使用して、乾式で研磨加工を行った。

4-2 結果

加工時間による表面粗さの変化について、実験結果を図12に示す。(a)に記載されている表面粗さPVは、最大粗さに相当する値である。全体的に、磁性粒体はステンレスボールより磁性砥粒を使用した方が、加工面品質が向上することが分かった。特に、ステンレスボールを用いた場合、表面粗さPVの数値は低下するが、表面粗さRaで評価すると、加工時間の増加により表面品質が悪化する現象が見られた。この原因は、ステンレスボールが被加工物の表面を転がり、極表面部の微細な凹凸を



(a) 研磨加工時間による表面粗さの向上 (PV)

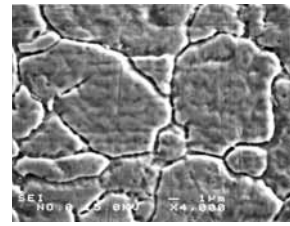


(b) 研磨加工時間による表面粗さの向上 (Ra)

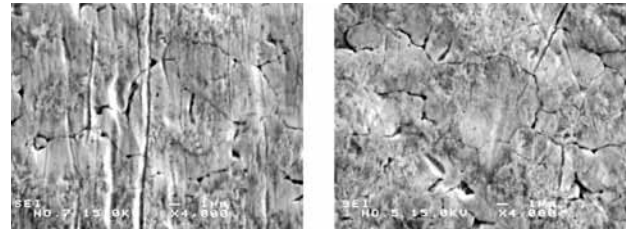
図12 磁気援用研磨加工による表面粗さの向上

押し潰すだけで、被加工物自体を除去加工していないためと考えられる。また、すべての加工条件において、加工時間が30分以上経過すると、表面粗さの値はほぼ一定になることも分かった。さらに、1軸揺動の場合より2軸揺動の方が、表面粗さの値が低くなり、加工面品質を向上させることも分かった。

電子顕微鏡で各加工条件による表面の状態について観察した結果を図13に示す。被加工物は縦方向に揺動させている。ステンレスボールを用いた場合、初期表面と比較して、表面の微細な凹凸は滑らかになったが、大きな溝はほぼ初期表面の状態と変わらないことが分かった。これは、ステンレスボールは被加工物の表面を転がり、極表面部の微細な凹凸を押し潰すだけで、被加工物自体を除去加工しない、という前述した考察と良く一致した結果である。また、1軸揺動の場合は、揺動方向に加工痕が発生しているが、2軸揺動の場合は、全体的に均一な加工面になっていることが確認できた。



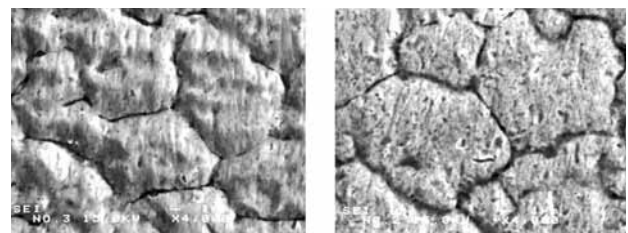
(a) 初期表面



(α) 1軸揺動

(β) 2軸揺動

(b) ステンレスボールを用いた場合



(α) 1軸揺動

(β) 2軸揺動

(c) 磁性砥粒を用いた場合

図13 電子顕微鏡による表面観察

5. 結 言

微細転写加工用型の作製を目的としてマイクロ加工技術や研磨加工技術など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) 金属製マイクロ金型への適用を目的として、切削加工および放電加工によるマイクロ加工を検討した。その結果、幅 $100\mu\text{m}$ 、高さ $100\mu\text{m}$ の微小リブが加工でき、マイクロ金型作製技術への適用可能性を把握した。
- (2) 鏡面ブラスト加工において、仕上用メディアのみを用いて切削加工面にブラスト加工を行うことにより、切削加工時に発生した微細バリを除去できた。
- (3) エキシマレーザにより、耐熱性や耐薬品性に優れたグラッシーカーボンへの加工を検討した。その結果、基本的な加工条件を把握し、幅 $100\mu\text{m}$ 、高さ $100\mu\text{m}$ の微小リブ加工を実現した。
- (4) アノード酸化処理によるアルミ薄膜をエキシマレーザ用マスクに応用して、レーザによって幅 $20\mu\text{m}$ 、高さ $10\mu\text{m}$ の複数の突起形状をグラッシーカーボンに加工することができた。
- (5) 加工面粗さの向上を目的として、SUS304板材を5Hz、永久磁石を33Hzで揺動させた磁気援用研磨加工を行った結果、次のことが分かった。

・ステンレスボールを用いた場合、被加工物の極表

層部の凹凸を除去するだけで、表面粗さが逆に悪くなる場合がある。

- ・30分以上の磁気援用研磨加工では、大幅な表面粗さの向上は認められなかった。
- ・永久磁石の揺動による表面粗さ向上は認められた。

今後は、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て、マイクロ金型の試作を検討するとともに、微細転写加工技術について検討を行う。

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：マイクロ塑性加工ーマイクロ塑性加工技術の現状と展望ー，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) 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：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)，山梨県工業技術センター研究報告，No.23，p.113 (2009)
- 5) 勝又 信行，石田 正文，斎藤 修：薄膜形成法を用いたナノ加工技術の研究 (第2報)，山梨県工業技術センター研究報告，No.21，p.33 (2007)
- 6) 勝又 信行，石田 正文：電解処理法による微細構造体作製技術の開発，山梨県工業技術センター研究報告，No.22，p.44 (2008)
- 7) 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，p.33 (2009)