

マイクロ金型による微細転写加工技術に関する研究 (第1報)

小松利安¹, 萩原義人¹, 石黒輝雄¹, 宮川和幸¹, 勝又信行¹, 佐野正明¹
山田博之², 西村通喜², 吉田善一³, 寺田信幸³

(¹山梨県工業技術センター, ²富士工業技術センター, ³東洋大学理工学部)

要約 マイクロ関連部品は、材料への直接加工により小ロット製造されていることが多く、この場合、製造コストが高くなるため、今後は微細転写加工のような量産化技術が必要になる。しかし、実用化には、転写加工用マイクロ金型の加工技術や転写加工条件の最適化等、まだ多くの課題が残っている。そこで、本研究では、グラッシーカーボンを用いたマイクロ金型の作製、および金属製薄板を積層させた転写加工実験用マイクロ金型を作製し、樹脂フィルムへの転写加工を行った。その結果、アノード酸化処理によるアルミニウム薄膜をレーザー加工用ハーフトーンマスクとして用いて、複数の20~30 μ mの立体的な微細形状をグラッシーカーボンに加工できた。さらに、薄板積層金型を用いて樹脂フィルムに転写性実験を行い、基本的な加工条件を確認した。

Study on Transcription Molding of Micro-pattern using Microdie (1st Report).

Toshiyasu KOMATSU¹, Yoshihito HAGIHARA¹, Teruo ISHIGURO¹, Wako MIYAGAWA¹, Nobuyuki KATSUMATA¹, Masaaki SANO¹, Hiroyuki YAMADA², Michiyoshi NISHIMURA², Yoshikazu YOSHIDA³ and Nobuyuki TERADA³

(¹Yamanashi Industrial Technology Center, ²Yamanashi Fuji Industrial Technology Center, ³University of Toyo).

Abstract A machining of micro parts is often produced in a small lot performed through directly from the material. Therefore, production cost become higher and it is a reason why mass production technology such as transcription molding is needed. However, there are still many problems to be solved. In this study, transcription molding method using glassy carbon and laminated metal sheet were considered. The tininess shape of three-dimensional solids of 20-30 μ m was processed using an aluminum film by the anode oxidation processing a half tone mask for laser processing. The basic conditions in order to transcript to plastic film using thin laminated metal mold were presented.

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。しかし、多くのマイクロ部品は、各種微細加工機を用いた小ロット加工によって製造されている場合が多く、材料を直接除去加工するため製造コストが高くなってしまふ。このため、今後は微細転写加工のような量産化技術の必要性が高まることが予想される。現在、半導体製造技術を応用したマイクロ金型の作製技術に関する研究、ホットエンボス法および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いる。例えば、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、マイクロ金型の品質(耐久性、離型性等)の向上、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等があり、これらの課題を解決する必要がある。

本研究では、数十 μ mから数百 μ mの微細形状を有するマイクロ流体デバイスや光学フィルタ等のようなマイクロ部品の加工を主な目的とした。マイクロ金型の材料として、耐熱性や耐薬品性に優れているが、一般的に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)を選択した。これまでも、エキシマレーザーによるグラッシーカーボンへの微細加工を試み、基本的な加工条件の検討を行った^{4), 5)}。今後、マイクロ金型にグ

ラッシーカーボンを用いた場合、転写加工時に熱や圧力が加わるため、レーザー加工による変質が存在するとマイクロ金型が破損する可能性がある。そこで本研究では、エキシマレーザー加工面の加工変質層について評価を行った。また、フォトリソグラフィとアノード酸化処理によるアルミニウム薄膜をハーフトーンマスクとしてレーザー加工に用い、立体的な微細形状の形成を行った。さらに、試作したマイクロ金型を用いて樹脂フィルムへの転写加工を試みた。一方、リブや溝などの微細形状と転写加工性との関係について、金属製薄板を積層させることにより、複数の微小リブと微小溝を形成できる転写実験用簡易マイクロ金型を作製し、樹脂フィルムへの転写加工実験を試みたので報告する。

2. グラッシーカーボン製マイクロ金型の作製

2-1 実験方法

型材料である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用いてレーザー加工実験を行った。使用した加工用レーザーは、一般的にマイクロ加工に適しているエキシマレーザーを用いた。ビームは光学系にアパーチャマスクを挿入して整形し、縮小光学系レンズで集光した。マイクロ金型には転写加工時に熱や圧力が加わるため、グラッシーカーボンにレーザー加工を行った加工表面について加工変質層の有無を

確認した。表1に示すレーザー加工条件で、グラッシーカーボンに穴をあけ、穴底面をラマン分光分析 (RENISHAW (株)製: inVia Microscope), X線回折分析 ((株)リガク製: Ultima IV), 押し込み硬さ試験 (Agilent Technologies (株)製: Nano Indenter G200) により分析・評価を行った。押し込み硬さの測定ではISO-14577規格に準拠し、最大荷重50mNで測定を行った。

次に、立体的な微細形状の作製を目的として、フォト

表1 グラッシーカーボンへの穴加工条件

エキシマレーザー加工機	Exitech社製: PS2000
波長	248 nm
繰り返し周波数	50 Hz
フルエンス	1, 2, 3, 4, 5, 6 J/cm ²
照射パルス数	10, 20, 50, 100, 500 pulses

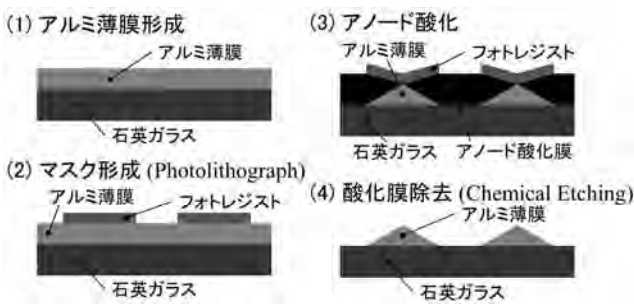


図1 アルミ薄膜形成プロセス

表2 ハーフトーンマスクによるレーザー加工条件

基板	光学石英ガラス
マスク材質	アルミ薄膜
マスク形状	四角錐 (幅:200 μm, 高:約12nm)
縮小光学系倍率	×10 (縮小倍率: 1/10)
フルエンス	5.0 J/cm ²
照射パルス数	10, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 300, 400, 500 pulses

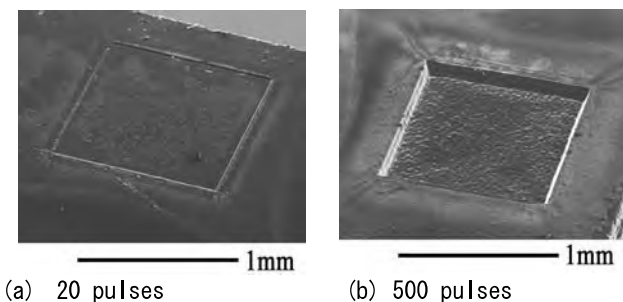


図2 レーザによるグラッシーカーボンへの穴加工

リソグラフィとアノード酸化処理によるアルミニウム薄膜^{6),7)}をレーザー加工用ハーフトーンマスクに応用することを試みた。フォトリソグラフィとアノード酸化, 化学エッチングを組み合わせたアルミ薄膜形成プロセスを図1に示す。四角形一辺約200 μm, 高さ約12 nmの四角錐に近い形状のアルミニウム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ーの強度変化を利用して, グラッシーカーボンに立体的な微細形状を加工した。表2にレーザー加工条件を示す。

2-2 結果

図2は, エキシマレーザーでグラッシーカーボンに1mm×1mmの穴を加工したサンプルの電子顕微鏡観察写真であり, 図2(a)はレーザー照射回数が20pulsesの場合, 図2(b)

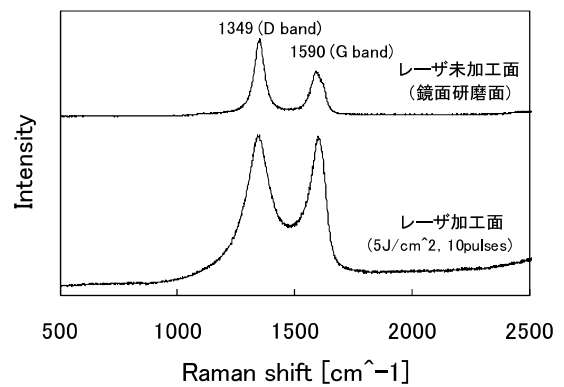


図3 ラマン分光法によるレーザー加工面の測定結果

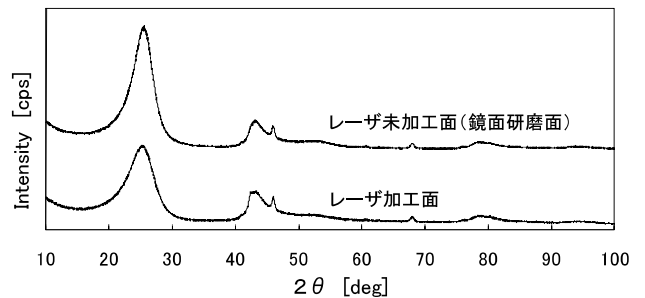


図4 X線回折法によるレーザー加工面の測定結果

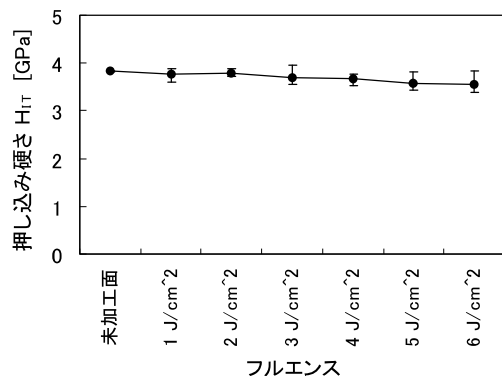


図5 押し込み硬さ試験によるレーザー加工面の測定結果

は500pulsesの場合であり、フルエンスは5.0 J/cm²である。次に、穴底面であるレーザ加工面について、ラマン分光法、X線回折法によって加工表面を測定した結果を図3、図4にそれぞれ示す。未加工面である鏡面研磨面と比較した結果、加工による構造の乱れが多少起こるが、グラッシーカーボン本来の特性を示しており、加工によって大きく変質することはないと考えられる。また、押込硬さ試験により加工表面を測定した結果を図5に示す。最大荷重を50mNとした場合、表面からの押込深さは1 μm前後であった。未加工面およびレーザ加工面ともに押込硬さはHIT 3.5~4 GPaであり、測定のばらつきを考慮すると、加工により変質し、表面付近の硬さが大きく変化することはないと考えられる。これらの結果から、エキシマレーザで加工したグラッシーカーボンは、微細転写加工用のマイクロ金型として適用可能と判断した。

次に、図1に示すプロセスで成膜したアルミニウム薄膜をエキシマレーザ加工用のハーフトーンマスクとし、立体微細形状のレーザ加工を試みた。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加工部高さとの関係を図6に示す。照射パルス数と加工部高さとの関係は400pulsesまでは比例関係となるため、高さ制御が可能であると考えられる。しかし、400pulses以上では加工底面が形成されなくなり加工除去量が低下し、立体形状の先端部が加工されるため、微細形状の高さが最大値50 μmになったと推測される。レーザ照射パルス数が30、100 pulsesの場合の加工部を電子顕微鏡で観察した結果を図7 (a)、(b)に示す。幅20~30 μm、高さ50 μm以下の複数の立体微細形状をグラッシーカーボンに加工することが

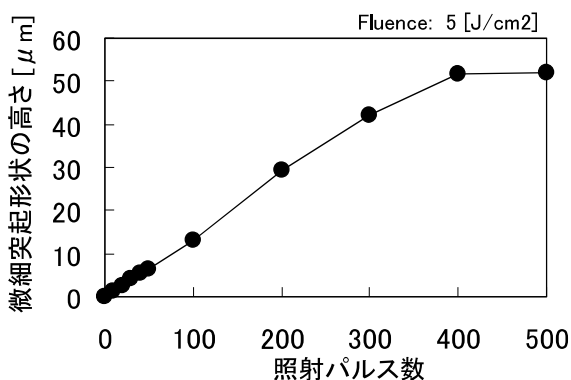
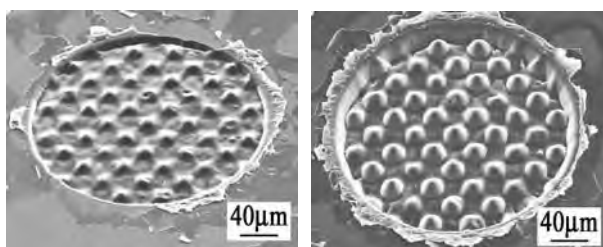


図6 微細突起形状の高さとレーザ照射パルス数との関係



(a) 30 pulses (b) 100 pulses

図7 ハーフトーンマスクを用いたレーザ加工例

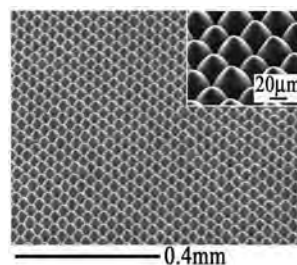
できた。また、ハーフトーンマスクのレーザ照射方向の投影パターンは四角形であるが、パルス数が多い100 pulsesでの加工形状は円錐状になることが分かった。

次に、ビーム形状を1mm×1mm、照射パルス数を300 pulsesとして、より広範囲に複数の立体微細形状を加工した例を図8(a)に示す。立体微細形状の転写性を調べるために、精密ホットプレス装置（新東工業(株)製：CYPT-L）を用いて熱転写加工を試みた。厚さ200 μmのポリスチレンフィルムに、ステージ温度を105℃、圧力を2.5MPaとして転写加工を行った例を図8(b)に示す。型の形状を転写できた部分とそうでない部分があり、圧力等の加工条件が面内で均等ではないことが推測されるため、均一な転写加工が今後の課題である。

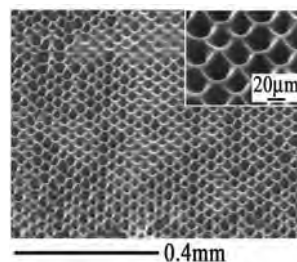
3. 簡易マイクロ金型による転写加工

3-1 実験方法

複雑な微細形状に転写加工実験を行う前に、基礎的な形状を有した金型を準備し、加熱温度を変化させて、樹脂フィルムに対する転写性について検討を行った。転写加工実験には、前述した精密ホットプレス装置を使用した。転写加工条件を表3に示す。樹脂フィルムは、PC（ポリカーボネート）とPA（ポリアセタール）の2種類で、寸法は30mm×15mm×0.3mmとした。図9に示すよう



(a) グラッシーカーボン製マイクロ金型



(b) 樹脂フィルムへの熱転写加工結果

図8 広範囲への立体微細形状の加工例

表3 転写加工条件

加工装置	新東工業(株)製 精密ホットプレス装置 CYPT-L
転写圧力	1st STEP : 0.33 MPa 2nd STEP : 0.44 MPa
保持時間	1st STEP : 240 sec 2nd STEP : 300 sec
冷却時間	300 sec

に、金属ブロックの間に金属製薄板を1枚挟み、高さ100 μm の微小リブを形成させた簡易マイクロ金型を使用した。金属製薄板の厚さは100 μm 、材質はSUS304Hを用いた。転写加工した微小溝は、非接触で表面形状を測定することが可能なコンフォーカル顕微鏡（レーザーテック㈱製：OPTELCIS H1200）を用いて形状測定を行った。微小溝を転写加工した場合、加工条件によって、図11に示すような微小溝の端部にだれが発生する。その角度を測定することにより、転写加工性の評価を行った。

3-2 結果

加熱温度条件を把握するために、PCとPAの熱特性について分析を行った。7mm×7mm×0.3mmの樹脂フィルムを、7mm×7mm×3mmのアルミナブロックで挟み、0.3Nの荷重をかけながら加熱し、熱軟化特性を測定した。使用した分析装置は、熱機械的分析装置（TA instruments製：TMA 2940）である。実験結果は図12に示すとおり、PCの熱軟化点は約200°C、PAは約170°Cであった。

次に、簡易マイクロ金型を用いた、PCおよびPAの微細転写加工実験の結果を 図13に示す。PCの場合は約170°C、PAの場合は約158°Cになると、端部だれ角度は

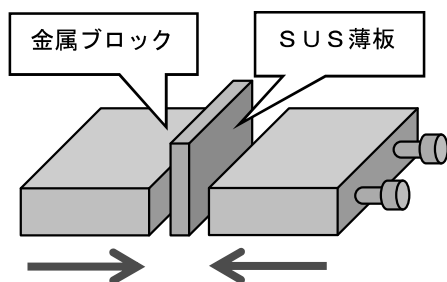


図9 簡易マイクロ金型の概念図



図10 コンフォーカル顕微鏡

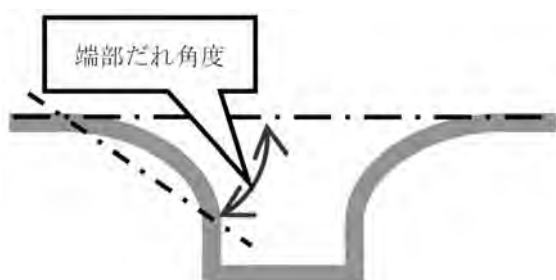


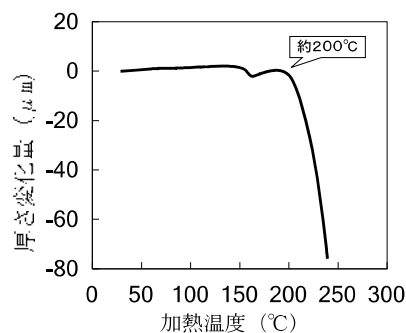
図11 微小溝形状の概念図

大幅に減少し、転写性は著しく向上することが分かった。PCおよびPAともに、この温度より低い場合は、端部だれ角度はほとんど変化せず、逆に高い場合は、樹脂フィルムが軟化しすぎて微小溝が形成されず、前述した樹脂フィルムの熱軟化点近傍では、加熱しすぎであることが分かった。なお、PAの場合、加熱温度140°C以下では材料が硬く、微小リブ形状そのものが転写されなかった。

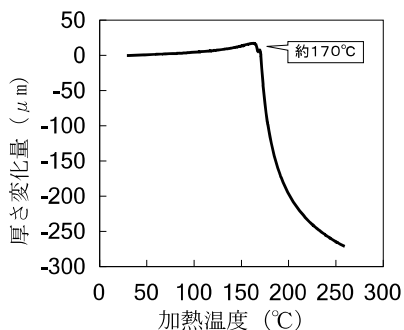
4. 金属製薄板積層金型による微細転写加工

4-1 実験方法

本節では、リブや溝などの微細形状と転写加工性との関係を求めることを目的として、転写加工実験用マイク



(a) PC (ポリカーボネート) の場合



(b) PA (ポリエステル) の場合

図12 樹脂フィルムの熱特性

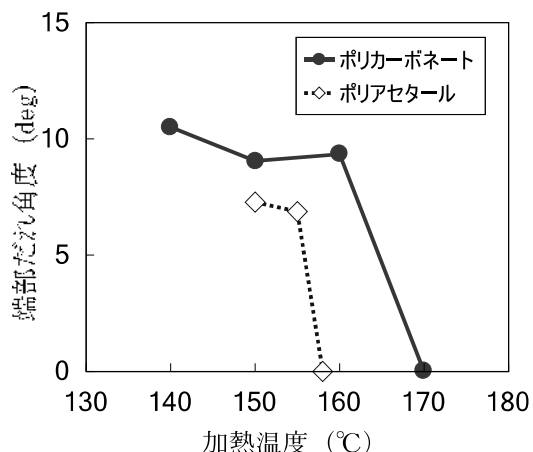


図13 端部だれ角度に対する加熱温度の影響

ロ金型を試作した。図14に示すように、金属製薄板を積層させることにより、複数の微小リブと微小溝を形成する方法とした。薄板の材質はSUS304Hで、厚さは20, 50, 100 μm の3種類を用いた。薄板はワイヤー放電加工機で切断し、その加工条件を表4に示す。また、放電加工面の表面粗さが転写加工に影響することを想定して、薄板の切断面を研磨加工した。本研究では、核(コア径: 0.2~0.5mm)となる弾性体表面に、研磨微粉を付着させた研磨材を吹き付け、擦過現象により研磨加工するブラスト加工機を用いた。その時のブラスト加工条件を表5に示す。また、微細転写加工についても、表6に示す加工条件で実験を行い、電子顕微鏡とコンフォーカル顕微鏡を用いて形状測定を行った。

4-2 結果

高さを一定の100 μm とし、幅100 μm , 50 μm , 20 μm の微小リブを加工し、9枚の薄板をリブ間隔100 μm , 50 μm , 20 μm となるように積層して、転写加工実験用マイクロ金型を作製した。その電子顕微鏡写真を図15に示す。リブ端部において、放電加工ワイヤ径に起因するR50 μm の形状ができるが、角RやスミRは小さく、また表面粗

表4 ワイヤ放電加工条件

加工装置	(株) 牧野フライス製作所製 ワイヤー放電加工機 UPH-1
ワイヤー材質	高張力ピアノ線 (表面処理: 黄銅メッキ)
ワイヤー径	0.1 mm
工程数 (電気条件数)	4 工程 (荒) 1st→2nd→3rd→4th (仕上)

表5 ブラスト加工条件

加工装置	東洋研磨材工業(株)製 鏡面ブラスト加工機SMAP-II
砥粒	仕上加工メディア SP-F100D (#10000ダイヤモンド砥粒)
インバータ周波数	50 Hz
加工送り	手動
加工時間	4 min

表6 微細転写加工条件

加工装置	新東工業(株)製 精密ホットプレス CYPT-L
ステージ温度	185°C (離型時温度100°C)
転写圧力	1st STEP : 0.30 MPa 2nd STEP : 0.44 MPa
保持時間	1st STEP : 240 sec 2nd STEP : 300 sec
冷却時間	300 sec
サンプル材質	ポリカーボネート
サンプル厚さ	300 μm

さもリブの寸法に対して微細なので、転写性を検討する転写加工実験用マイクロ金型として利用可能と考えた。

この作製した金型を用いて、樹脂フィルムへの熱転写加工を試みた。厚さ300 μm のPCに、加熱温度185°Cで、転写加工を行った結果を図16に示す。図15(a)に示す金型形状を転写した結果が図16(a)であり、図15(b)に示す金型形状を転写した結果が図16(b)である。また、コンフォーカル顕微鏡で断面形状を測定した結果を図17に示す。測定データに多少ノイズが生じているが、厚さ300 μm のフィルムに、リブ高さ100 μm の金型形状が転写でき、金型の表面状態も転写できることが確認できた。また、幅100 μm , 深さ100 μm の溝と、幅20 μm , 深さ100 μm , ピッチ20 μm の複数溝が同時に転写できている。しかし、薄板積層の隙間に生じたバリが転写加工サンプルに発生している。これらの原因として、加工温度や圧力が高いことなどが推測されるが、温度や圧力が低くなると型形状が正確に転写されないことも考えられ、今後は材質、形状、寸法に対する最適加工条件を検討することが必要である。

5. 結 言

グラッシーカーボンを用いたマイクロ金型、および金属製薄板を積層させた転写加工実験用マイクロ金型を作製し、樹脂フィルムへの転写加工を試みた。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) エキシマレーザでグラッシーカーボンを加工しても、加工変質層は確認できなかった。また、レーザ加工用ハーフトーンマスクとして、アノード酸化処理によるアルミニウム薄膜を用いて、複数の立体的な微細形状をグラッシーカーボンに加工した。その結果、最大50 μm までの高さが制御可能であった。
- (2) 薄板積層金型を作製し、熱転写加工実験を行った結果、幅100 μm , 深さ100 μm の溝と、幅20 μm , 深さ100 μm , ピッチ20 μm の複数溝が同時に転写可能であった。

今後は、微細金型に忠実に転写できる、最適加工条件の検討が必要である。

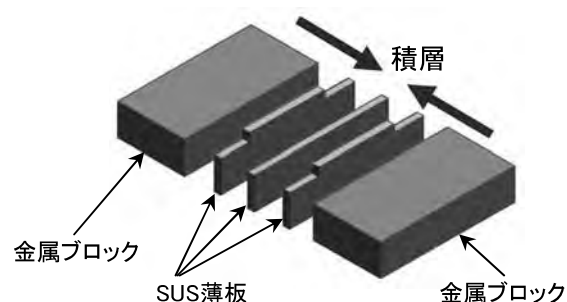
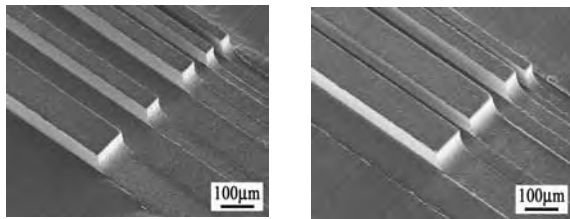


図14 金属製薄板の積層によるマイクロ金型の概念図

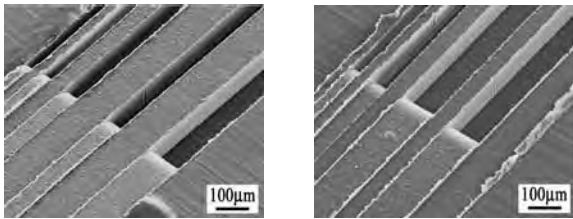
参考文献

- 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) 前田龍太郎ら：ナノインプリントのはなし，日刊工業新聞社，(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(2009)，No.23，P.113 (2009)
- 5) 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2報)，山梨県工業技術センター研究報告(2009)，No.23，P.113 (2009)
- 6) 勝又信行，石田正文，斎藤 修：フォトリソグラフィとアノード酸化を利用したAl薄膜の表面加工，表面技術，Vol.59，No.5，P.333 (2008)
- 7) 勝又信行，石田正文：3次元立体アルミニウムマスクを用いたシリコン基板の反応性イオンエッチング加工，J. Vac. Soc. Jpn.，Vol.52，No.8，P.29 (2009)



(a) 金型作製例1 (b) 金型作製例2

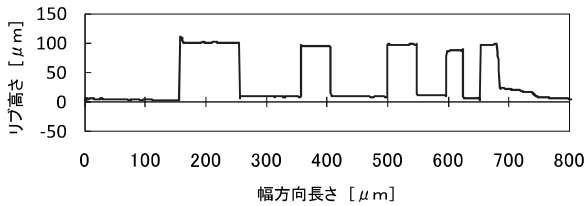
図15 薄板積層による転写加工実験用マイクロ金型



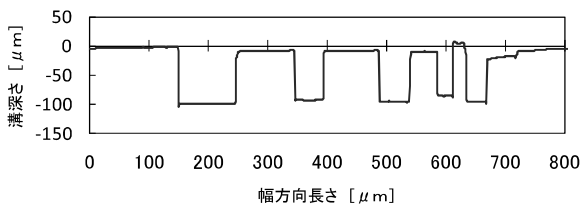
(a) 金型例1の転写結果 (b) 加工例2の転写結果

図16 樹脂フィルムへ熱転写加工を行った結果

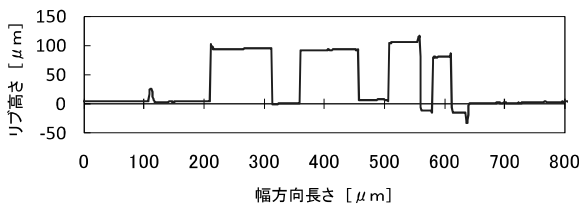
(a) 金型例1とその転写加工サンプル
(α) 金型例1



(β) 転写加工サンプル



(b) 金型例2とその転写加工サンプル
(α) 金型例2



(β) 転写加工サンプル

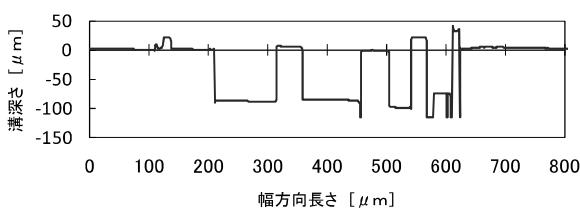


図17 微小リブと微小溝の断面形状

成果発表状況

学会発表

- 1) 山田博之，西村通喜，吉田善一，勝又信行，宮川和幸：エキシマレーザによる高効率・高精度マイクロ金型作製，2011年度精密工学会春季大会学術講演会，東京，2011