

# インプリント技術を利用した超微細可動構造体の作製

九州大学大学院 工学研究院機械工学部門

准教授 津守 不二夫

(平成 19 年度一般研究開発助成 AF-2007030)

キーワード：インプリント，MEMS，磁性粒子

## 1. 研究の目的と背景

インプリント技術はいわゆるホットエンボス加工を超微細構造加工に適応させたものであり，リソグラフィやエッチングを繰り返す従来の半導体製造技術とは全く違ったアプローチの加工技術である<sup>1)</sup>。非常に簡単なプロセスで光の波長以下の超微細樹脂構造を作製できることもあり，近年注目されている。

また，MMMS (Micro Magnetic Mechanical Systems) と呼ばれる微細駆動システムも提唱されている。これは，静電場や誘電体を利用した従来の微細駆動システムである MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) を磁性材料に対応させたものであり，さまざまな分野での応用が期待されている。

本研究では磁性ナノ粒子粉末を分散した樹脂材料を利用した微細駆動構造の作製を目的としている。この駆動構造としては，既に報告済みであるサイズに依存せずに駆動可能な構造を用いる<sup>2, 3)</sup>。図 1 にアクチュエータの模式図を，図 2 に作製したアクチュエータの例を示す。この駆動構造はアレイ状に配置された柱状構造により構成されている。柱状構造の頂部には磁性材料が配置されており，磁場中でのこの磁性要素の相互作用により構造を駆動することができる。従来の磁気アクチュエータは磁気勾配による引力を利用したものが多く，相互作用を利用した例は特徴的である。この

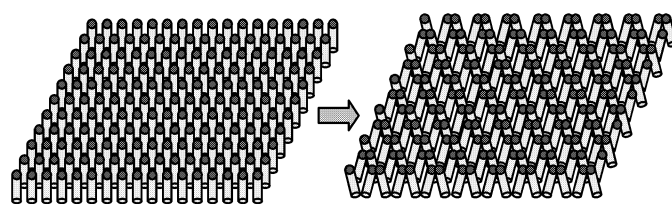


図 1：磁場駆動アクチュエータの模式図。図は最もシンプルな正方格子状のものである。各柱状構造の頂部に磁性粒子を配置してある。水平方向の磁場により，ある磁場強度で一気に「構造転移」が起こる。このような挙動はアクチュエータのサイズを変えても同じ磁場を与えれば再現される。

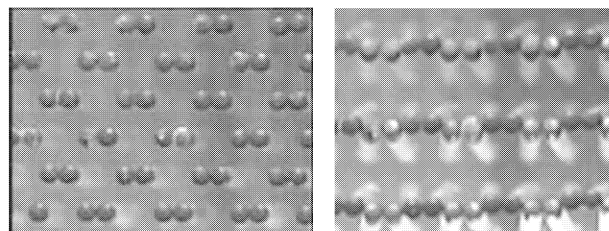


図 2：マイクロ構造の駆動例（上部からの観察写真）。ピラーの直径は  $50 \mu\text{m}$ 。水平方向の磁場を強めていくと，第一段階で左のように 2 個ずつがペアになった構造を，第二段階で直鎖状になった構造を生成する。それぞれの相転移は一気に進行する。

磁気相互作用の大きさを理論的に検証した結果，本アクチュエータは微細化に関わらず駆動することが可能であることが証明されている<sup>3, 4)</sup>。図 2 は実際に作製し駆動した構造例であるが，単純格子状の初期配列であるにも関わらず，水平方向の磁場の増加により特徴的な二段階の変形パターンを示している。一段階目では 2 個ずつのペアが生成し，二段階目ではそれらが直鎖状に連なっていく。

これらのパターンは相転移的に発生し、それぞれ一気に変形が確認される。

図 2 に示したサンプルはシリコーンゴム材料を用い、キャストにより作製したものである。本アクチュエータは微細化により機能が阻害されないことが示されているが、同様の微細構造を作製することは困難である。そこで、本研究ではインプリントプロセスの利用に着目した。駆動構造を作製するためには、ナノ磁性微粒子を含む材料を用いたインプリントプロセスを実現する必要がある。しかし、これらの研究は現在ほとんど行われておらず、そのため、まずは微細型内部への粉末材料の配置に関する基礎的な成形実験を行った。

## 2. 実験材料および実験方法

型内部での材料流動等の基礎的な知見を得るための成形実験を行った。具体的には 2 層の薄膜状樹脂材料にインプリント加工を施し、その断面プロフィールを観察する。2 層の内、上層部には磁性粒子を分散する。

樹脂材料には PMMA (Poly (Methyl Methacrylate)) を用いた。これはナノインプリント研究に一般に広く用いられている樹脂材料である。物性値を変化させるために、分子量が 15k, 120k, 350k の 3 種類の材料 (Sigma Aldrich 試薬) を用意した。磁性粒子は  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ナノ粒子

(Sigma Aldrich 試薬, 平均粒径 50 nm アンダー) を用いる。被加工材である薄膜は PMMA をトルエンで溶解し、ガラス基板上にスピコートすることによって得た。図 3 に被加工材断面の SEM 写真を示す。このようにして用意された積層材料に、ライン&スペース (L&S) 状のパターンを持つシリコンモールドを用いてインプリント加工を施す。パターンとして幅  $10\mu\text{m}$ 、ピッチ  $20\mu\text{m}$  および、幅  $50\mu\text{m}$ 、ピッチ  $100\mu\text{m}$  の 2 種類のモールドを

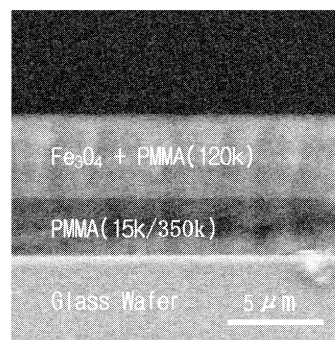


図 3: ガラス基板上の積層薄膜被加工材。上層部にマグネタイトナノ粒子が良好に分散していることが確認される。

準備した。

## 3. 実験結果

図 4 にインプリント加工実験結果を示す。加工されたサンプルは切断後、その断面を SEM により観察している。マグネタイト粒子が分散されている上層部が白く観察される。上 8 枚は幅  $10\mu\text{m}$  のライン&スペースパターン、下 6 枚は  $50\mu\text{m}$  のモールドを用いたものである。左から右にかけて、加工前の上層部厚さを変化させている。具体的な初期厚さはそれぞれの写真内に示されているが、 $1\mu\text{m}$  未満から  $5\mu\text{m}$  程度まで変化させている。

まず、上部 8 枚の写真であるが、上層部の厚さと下層部の分子量の違いにより、結果的な材料配置が大きく異なっていることが見て取れる。例えば、下層が柔らかい (分子量が小さい) 場合、上層部が全表面を覆うように配置されている。それ以外の場合には上層下層界面はなだらかな山状となる。

幅  $50\mu\text{m}$  の L&S 構造の場合にはもっと大きな変形パターンが観察される。特に上層厚さ  $2\mu\text{m}$  以上で下層部の分子量が小さいものの変形結果が興味深い。構造凸部の左右に両側からの流れ込み状態が観察される。また、幅が狭い場合と異なり、盛り上がり部の中央箇所へへこみが存在している。

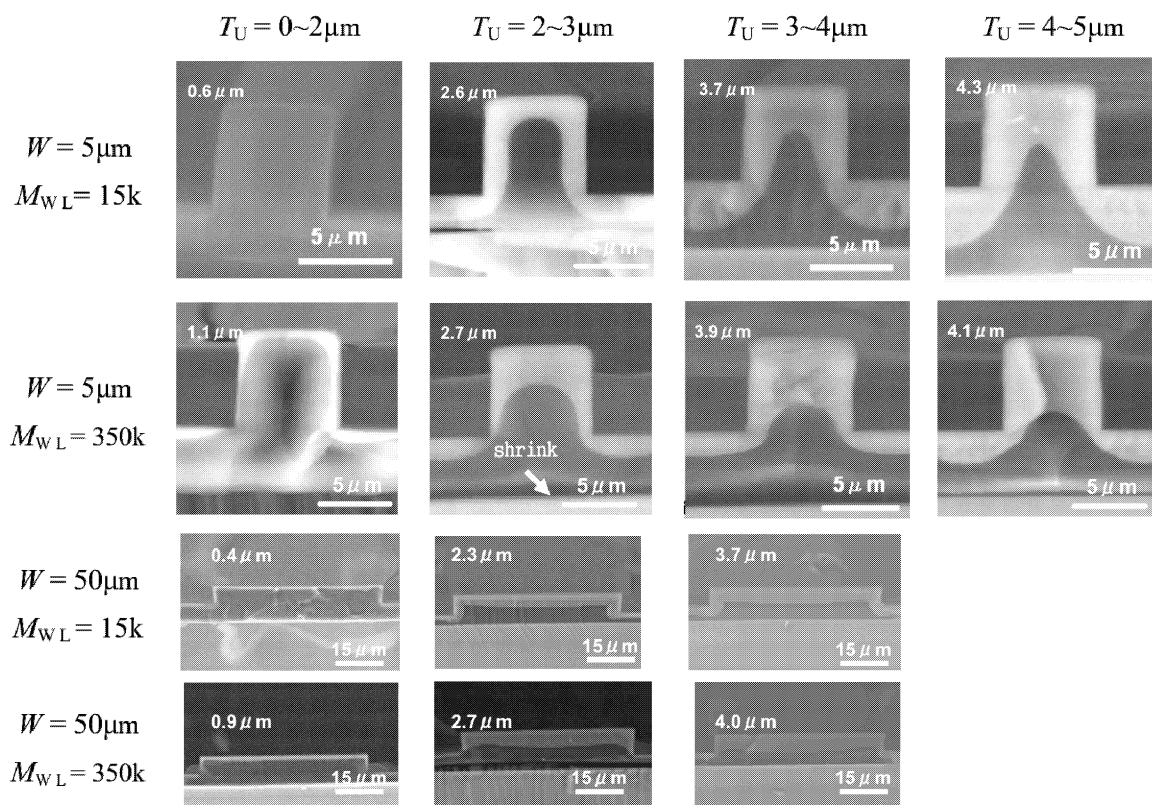


図4：インプリント実験サンプル SEM 写真。上8枚は幅  $10\mu\text{m}$  のライン&スペースパターン，下6枚は  $50\mu\text{m}$  のモールドを用いたものである。左から右にかけて，加工前の上層部厚さを変化させている。具体的な初期厚さはそれぞれの写真内に示されている。それぞれの形状について下層樹脂の分子量を変化させ，その物性を制御している。

このような材料の流れはインプリントプロセスシミュレーションで既に報告されているものであるが，構造が実際に試料内に存在することが可視化できたことは，今回の実験の副次的な成果と言える。

これらの結果より初期厚さおよび利用する材料分子量，モールド形状により材料内部配置が大きく異なることが観察された。以降，さらに定量的な材料変形挙動評価を試みる。変形後の材料配置として図5に示すようないくつかのパラメータを考えた。下層材料が流れた距離の基準として  $h_L$  を，流れた量を基準として  $S_L$  を利用する。それぞれの値はピッチ幅  $W_L$  と凸部断面積  $S_V$  で除算することにより正規化し，それぞれ  $D_L$ ， $F_L$  とした。図6

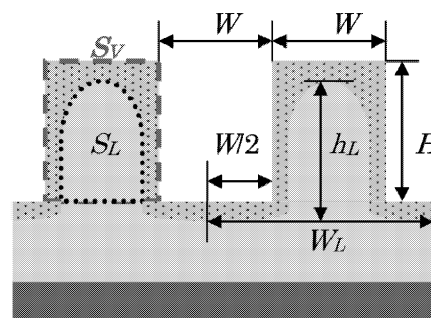


図5：変形後試料内部材料配置の評価パラメータ。変形度として下層部の盛り上がり量を  $h_L$  および  $S_L$  を正規化して用いる。

に  $D_L$  を，図7に  $F_L$  をプロットしたものをそれぞれ示す。図6を見ると，幅の狭いパターンで分子量  $350\text{k}$  のもののみ上層部の厚さの減少に伴い，大きく  $D_L$  が減少していることがわかる。幅広構造の

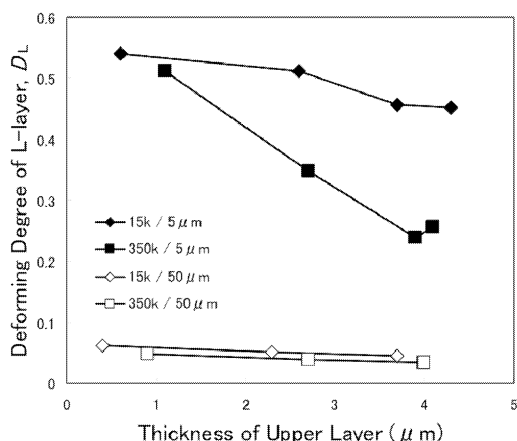


図 6: 変形度 (界面の上昇距離) と上層部厚さとの関係.

場合は先に述べたように流入部中央箇所に凹みが生成され二つの凸構造が生成する. そのため図 6 に関しては常に中央部の距離を評価している訳ではないことに注意したい. 中央部で考慮した場合には単純に上層厚さの増加に伴い下層構造の移動量が減少するが, 下層分子量が小さい場合には大きな影響がないことが興味深い. 図 7 においては, 上記のように変形パターンが異なっているものの, 流入割合自体は各条件とも変化せず, 上層厚さのみに応じて変化していることが示されている. これらの基礎データをもとに, できるだけ粒子を凸構造上部に配置する手法を確立していきたい.

#### 4. 結言

新たに提唱した超微細駆動構造を作製するためにインプリントプロセスを用い, 磁性粉末材料を分散させた積層樹脂材料の加工実験を行った. その結果, 凹凸構造のアスペクト比, 積層樹脂材料の上層部下層部の分子量, それぞれの積層厚さ, が被加工材内部の材料分布に影響することを定量的に評価した.

本実験は, 異なる材料を積層することで加工された材料内部の加工時の流動について観察結果を得ることができた. これは従来のインプリント研

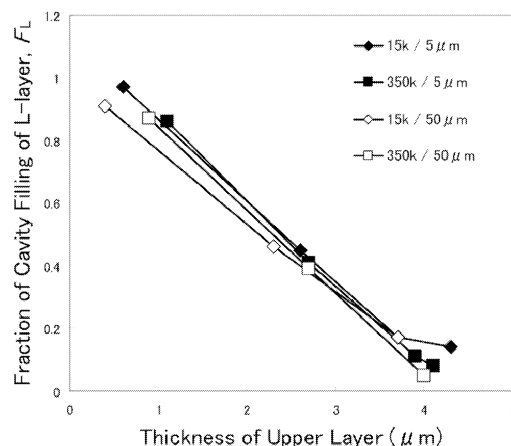


図 7: 変形度 (凸部構造内部への流入量) と上層部厚さとの関係.

究においてはシミュレーションのみによって確認されてきたことであり, 直接観察結果の提示は意義深いものである.

今後, この手法により駆動構造を完成させるため, さらに高いアスペクト比の構造を用いた実験を行う必要がある. また, さらなる微細化に伴い, 粒子分散樹脂材料の微細構造内での物性について新たに評価することを検討していかなければならない.

#### 参考文献

- 1) S.Y.Chou, P.R.Krauss, P.J.Renstrom, Appl. Phys. Lett. 67 (1995) 3114.
- 2) F. Tsumori, N. Miyano, H. Kotera, J. Jpn. Powder Powder Met., 56-3 (2009) pp. 127-132.
- 3) F. Tsmori, N. Miyano, H. Kotera, J. Jpn. Powder Powder Met., 56-3 (2009) pp. 133-136.
- 4) F. Tsumori, et al., Proc. Int. Conf. Computational Plasticity, (2007) CD-ROM.