

# マイクロナノモールディングの現状とこれからへの期待

黒瀬 隆\* 伊藤 浩志\*\*

## はじめに

プラスチック材料のマイクロモールディングの研究は、1996年の論文発表から20年以上の時を経た。これまで、微細構造を成形品表面に賦形する転写成形のほか、マイクロスケールの微小構造体や機械部品の精密射出成形などの研究開発が行われてきた。また、プラスチック表面にナノスケールの微細構造の形成が可能となる転写成形が注目され、その一つとして1995年頃はナノインプリントが注目を集め、多くの研究が取り組まれた。このインプリント技術は印刷技術から派生したもので、マイクロもしくはナノスケールの構造を有する金型（モールド）を利用して、金型のレプリカを作製する技術である。基本的にはモールドを利用するため、一つのモールディングとして定義される。

現在もナノ・マイクロスケールの転写成形は幅広い分野で盛んに研究されている。微細構造を応用した超撥水や高摩擦表面を有する機能性フィルム、医療分野におけるマイクロ流路チップやマイクロニードル、光学分野におけるレンズ、光導波路デバイス、エレクトロニクス分野におけるフォトリソグラフィ用レジスト、プリント配線板への応用を目的とした研究などである。研究内容も新しいモールド・被転写素材に関するものから、転写プロセス、転写後の凹凸形状を応用したデバイス作製に関する研究まで多岐にわたる。

2018年1月号では、主にプラスチック成形加工による「マイクロ・ナノインプリント成形技術」「ロール・ツー・ロール転写成形技術」に関する研究の概要と今後の展開について述べた。今回は、「射出成形を用いたマイクロ・ナノモールディング」と、低コスト・低環境負荷・生産性の観点で盛んに研究が行われている「熱可塑性樹脂の熱インプリント技術」、バイオ・エレクトロニクス・オプティクス・生体模倣分野などへの応用展開が著しい「UV硬化樹脂のUVナノインプリント技術」について2018年に報告された研究を中心に紹介する。

## 1. 射出成形を用いたマイクロ・ナノモールディング

これまで熱可塑性プラスチックを用いたマイクロ・インジェクションモールディング ( $\mu$ IM) が数多く行われているが<sup>1)~8)</sup>、熱可塑性エラストマーを用いた検討はあまり行われていない。F. Baruffiら<sup>9)</sup>は、熱可塑性エラストマーであるSEBS (スチレン-エチレン-ブチレン-スチレン共重合体) を用いた $\mu$ IMの研究を報告している。

図1に検討に用いた成形品形状を示す。成形品は中空構造であり、センサ部品用のサスペンションリングを想定したものである。金型寸法は材料の熱収縮を予め考慮し、外径1.55mm、内径0.48mmとなっている。ゲート位置は成形品の図1に示す位置にある。中空構造を形成させるため、部品中心部にピンをインサートし成形を行っている。このピンは、SEBSが大きな破断伸度を有するために、成形後に取り外

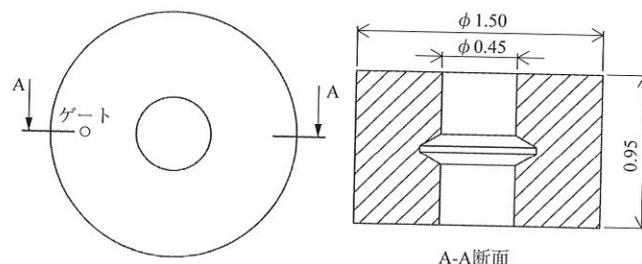


図1 マイクロ・サスペンションリング部品形状 (寸法: mm)

\* Takashi Kurose  
山形大学大学院 有機材料システム研究科 准教授  
Tel./Fax. 0238-26-3081  
\*\* Hiroshi Ito  
同 教授

することが可能である。金型には、キャビティ、ランナ、ゲートがそれぞれ4つずつ設けられ、一度の射出成形で4つの成形品が得られる。射出成形は、樹脂温度 (210, 225 (°C)), 金型温度 (30, 40 (°C)), 射出速度 (50, 70, 90 (mm/s)), 保持圧力 (300, 500, 700 (bar)) を変えて行い、これらの成形条件の因子が、成形品の外径と内径に与える影響について、実験計画法を用いて解析を行っている。

図2に、各成形条件と成形品の外径・内径の関係を示す。図中の点線は全体の平均値を示す。まず、4つのキャビティにおいて結果に大きな違いは見られず、精密な金型加工及び成形加工が行われたことが確認できる。金型温度を30°Cから40°Cに上昇させた場合、内径は減少するが、外径は増大するという結果が得られている。保持圧力を上昇させた場合も、内径は減少するが、

外径は増大する。樹脂温度、射出速度においても、成形条件が内径と外径へ及ぼす影響が相反する結果となる。この理由として、外径側で成形収縮が抑制される時には、内側のピンで拘束される内径側の樹脂には大きな圧縮応力が発生することが考えられる。このように、成形品の剛性が小さくなりがちな熱可塑性エラストマー部品の $\mu$ IMの難しさが理解できる。

また、M. Calaonら<sup>10)</sup>は、マイクロ流体デバイス向けのサブミクロンスケールの微細構造を有する金型を用いて、環状ポリオレフィンを射出成形及び射出プレス成形し、成形条件と微細構造転写性の関係について研究を行っている。

金型の微細構造は、電子線リソグラフィ技術を用い、Ni表面に深さ110nm、幅300nm、ピッチ間隔1,000nm、長さ450 $\mu$ mのライン&ス

ペース (L&S) 構造を形成させたものである。このNi表面を有する金属板 (30mm $\times$ 80mm) を金型の一部にセットして成形を行っている。射出成形では、「金型温度」「保持圧力」「射出速度」「樹脂温度」「L&S溝方向」を因子とし、射出圧縮成形では、「圧縮開始前のキャビティの厚さ」「圧縮開始時のキャビティ内の樹脂充てん量」「L&S溝方向」を因子として、実験計画法を用いて、成形条件と転写性の関係について解析を行っている。

図3に金型形状及び各因子と構造転写性の関係を示した。転写性の値は、金型の最大深さまでの不足した深さを示しており、完全に樹脂が充てんされる時に「0」となる。図3 (a) の金属板は、成形時には図3 (b) の位置に設置・固定されている。結果から、金型温度が転写性に与える影響は大きく、金型温度が低い程に転写性が低下する。これは金型温度の低下に伴って樹脂の粘度が上昇し、微細構造に流入しづらくなるためである。しかし、ゲートに近い場所では金型温度が低い場合でも高い転写性を示す。微細構造へ樹脂が充てんされるのは、キャビティが樹脂で満たされた直後と考えられるので、ゲート近くではキャビティに流入した後の熱い樹脂が転写されるためだと考えられる。また、ゲート近くは高温の樹脂がより通過する量が多いため金型表面温度が上昇した可能性も考えられる。一方、保持圧力が高い方が、転写性が低くなる結果が得られている。その理由として、金型の変形を挙げており、成形品にバリが発生しない領域においても、そのような現象が生じることを説明している<sup>11)</sup>。また、射出速度が速い程、転写性が向上する報告もあるが<sup>12)</sup>、今回は、射出速度が速い時に転写性が低下する結果が得られている。この理由として、金型内に存在する空気の影響が不十分であることを挙げている。

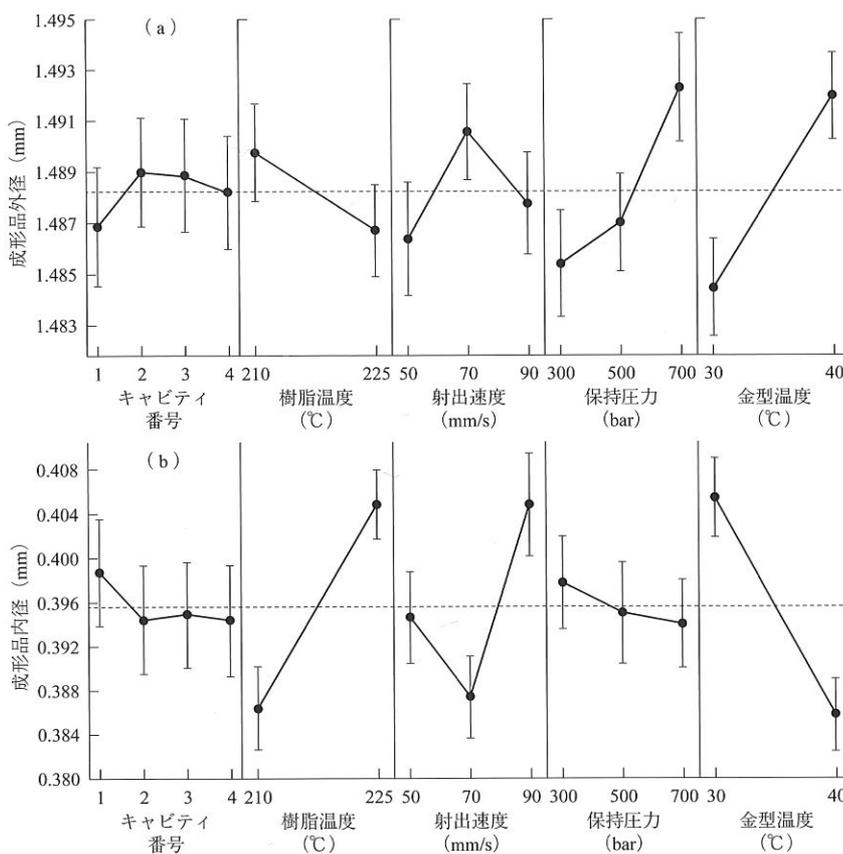


図2 各因子ごとの成形品 (a) 外径と (b) 内径の平均値。破線は全体の平均値

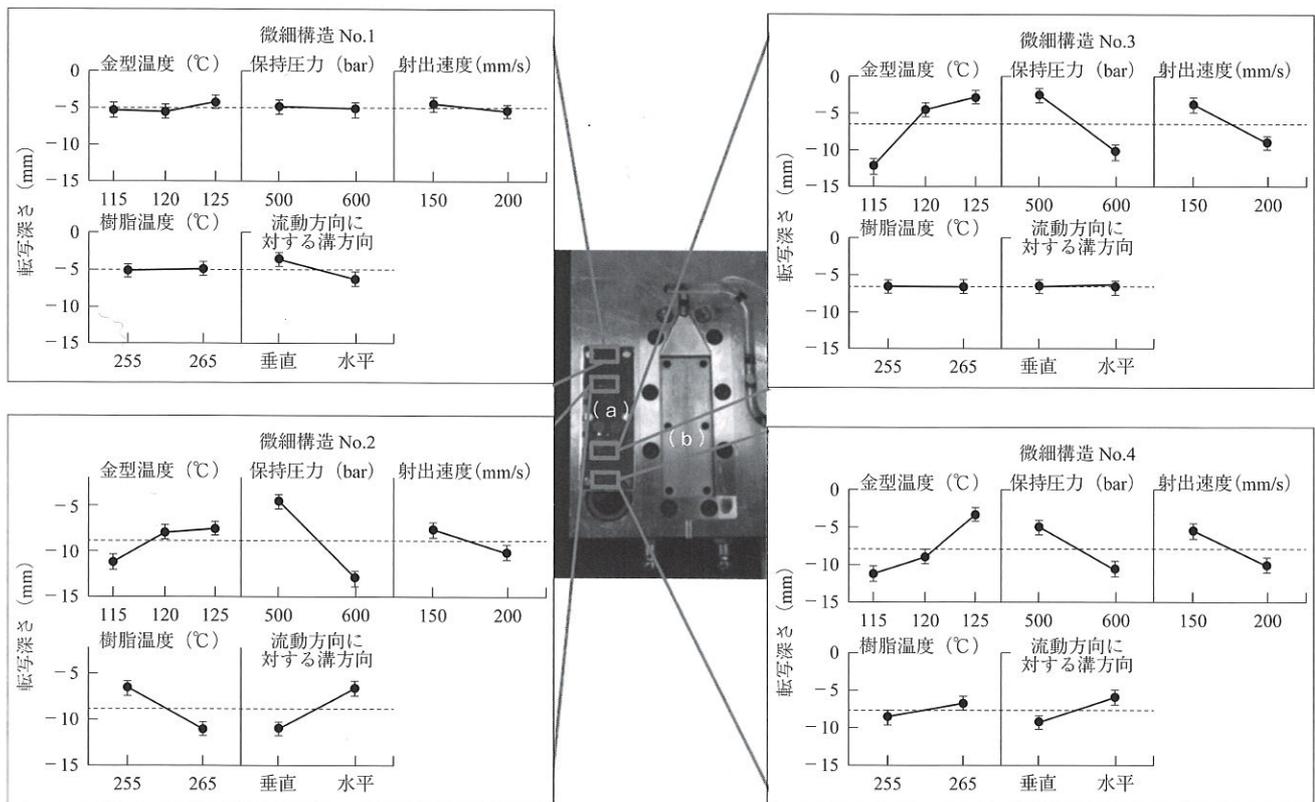


図3 金型外観及び各因子ごとの転写深さの平均値。(a) 微細構造を持つ入子。(b) 入子の設置位置

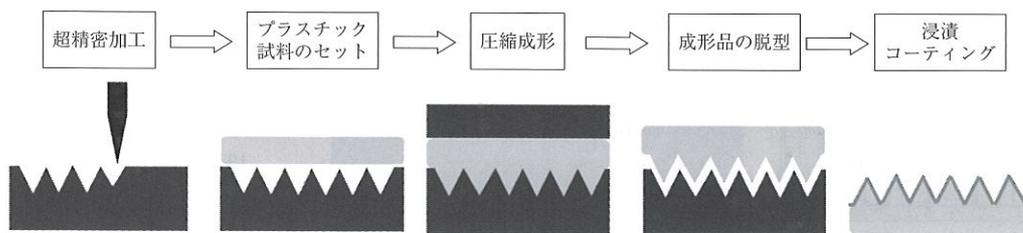


図4 微細構造の転写方法

## 2. 熱可塑性プラスチックの熱インプリント技術

K-M. Leeら<sup>13)</sup>は、面内方向に濡れ性の異方性を示すプラスチックシートを作製する研究を報告している。

熱可塑性プラスチックであるポリプロピレン (PP) シートに、マイクロスケールで断面が三角形の溝構造を表面に有する金型を押し当て、PPフィルムに金型の微細構造を転写している。図4にPPシート作製工程を示す。金型の溝構造は、電解めっき銅の平滑な金型表面を、単結晶ダイヤモンドで

切削加工することで形成させている。構造の深さは10, 20, 30  $\mu\text{m}$ 、ピッチ間隔20, 40, 60  $\mu\text{m}$ である。構造の転写は、厚み5mmのPPシートに、温度180°Cの金型を圧力1MPaで5分間押し当てる圧縮成形により行っている。また、構造が形成されたPPの撥水性を向上させるために、PPシートをシラン化合物 (1H, 1H, 2H, 2H-perfluorodecyltrichlorosilane) と平均粒径15nmのアナターゼ型TiO<sub>2</sub>が分散したエタノール溶液へ浸漬させ、PPの表面コートを行っている。

TiO<sub>2</sub>粒子分散エタノール溶液への

浸漬処理後と未処理のPP表面のSEM観察を行っている。PPシートに構造が転写されていること、浸漬コートをを行うことでPP表面にTiO<sub>2</sub>ナノ粒子がコーティングされることが確認されている。平均粒径15nmのアナターゼ型TiO<sub>2</sub>は数百nmの凝集体を形成している。また、脱イオン水を用いた接触角測定結果から、TiO<sub>2</sub>粒子による表面撥水処理を行うことにより、溝構造の大きさ、溝の方向に関わらず接触角の増大が確認され、接触角は何れも158°以上を示す。表面未処理で構造深さ30  $\mu\text{m}$ のPPシートでは、接触角は溝

の平行方向 (101°) と垂直方向 (135°) とで34°も異なる撥水性の異方性が確認されている。これらの技術は水滴形状の制御や水滴輸送技術へ応用できる可能性があるとして述べている。

また、C. M. Hanら<sup>14)</sup>は、微細構造を有するポリジメチルシロキサン (PDMS) スタンプの表面特性が、熱可塑性ポリウレタン (TPU) への微細構造転写に及ぼす影響について研究を行っている。

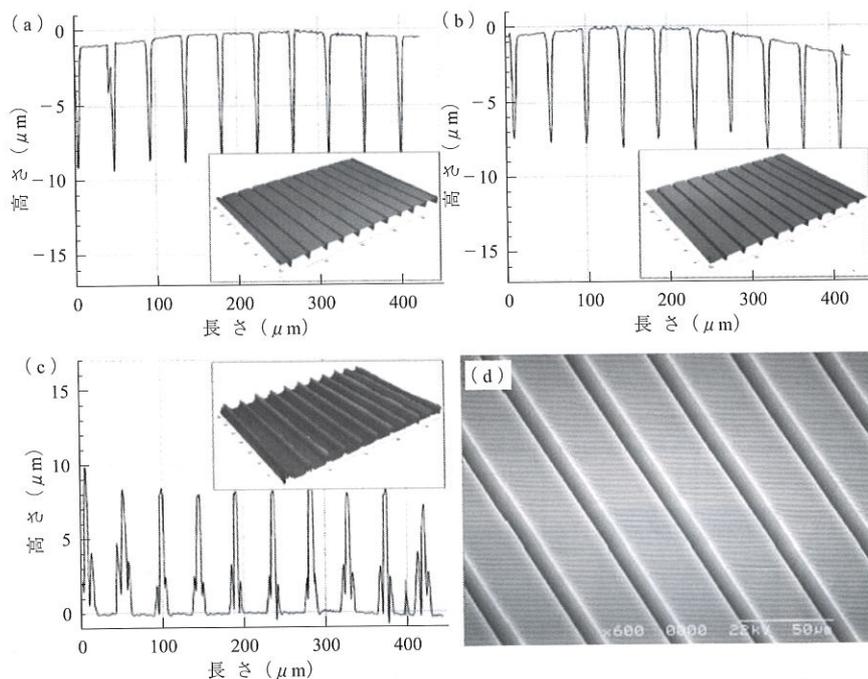
通常PDMSは疎水性を示すが (水と

の接触角: 105°), 硬化前のPDMS原料に界面活性成分を添加することで、親水性を示すPDMSスタンプ (水との接触角: 45°) を作製している。彼らは、UV硬化型エポキシ樹脂SU-8を用いたUVリソグラフィーにより、シリコンウェハ上に幅5 μm、ピッチ間隔45 μmのSU-8のライン&スペース微細構造を形成させ、硬化前の液状PDMSをそのSU-8微細構造上に塗布し、熱硬化させることで微細構造が転写され

た親水性と疎水性のPDMSスタンプをそれぞれ作製している。TPUへの微細構造の転写は、予め作製した厚み86 μmのTPUフィルム上にPDMSスタンプを載せ、温度 (160, 165, 170 (°C)), 時間 (30, 60, 90 (分)), 荷重 (0, 5, 10 (gf)) を変化させて行った。

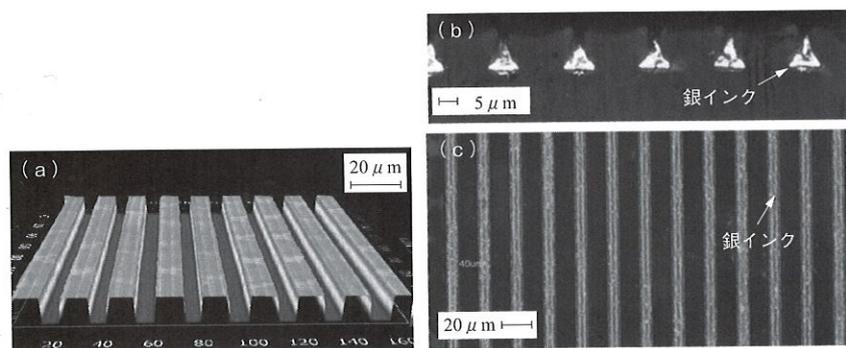
図5 (a), (b) に、作製されたPDMSスタンプの3D計測画像と断面プロファイルを示す。PDMSスタンプのライン&スペースの凹凸深さは約8 μmあり、アスペクト比1を超える構造である。また、図5 (c) にPDMSスタンプによるTPU微細構造転写後の3D計測画像と断面プロファイルを示す。TPUの微細構造転写性に及ぼす、PDMSスタンプの表面特性 (親水性と疎水性)、温度、時間、荷重の影響についてまとめられている。結果より、成形温度が転写性に及ぼす影響が最も大きい。これは、高温になる程TPUの粘度が低下するために転写性が向上すると考察している。また、親水性と疎水性PDMSスタンプの比較においては、何れの成形条件においても親水性スタンプの方が、高い転写性を示す。また、疎水性PDMSスタンプを用いた場合、圧力の影響は多少確認されるが、親水性PDMSを用いた場合には圧力の影響がほとんど見られない。これらの結果より、スタンプ材料と被転写材料の親和性が高い場合には、圧力流れよりも毛細管現象が微細転写には重要と考察しており、微細転写には、スタンプ材料と被転写材料の親和性も重要な因子となることが分る。

なお、筆者らは、熱可塑性ポリエーテルイミド (PEI) フィルムに熱インプリント技術によりライン&スペース (L&S) 構造を形成させ、そのL&S構造の凹部分に銀インクを毛細管現象により充てんする微細配線化技術を報告している。熱インプリントに用いたモールドは、アルミ合金表面をダイヤモンド工具により切削加工した凸幅8 μm、凹幅12 μmのL&S構造である。L&S



(a) 疎水性PDMSスタンプ, (b) 親水性PDMSスタンプ, (c) TPUフィルム (温度170°C, 時間30分, 荷重5gf), (d) 親水性PDMSスタンプのSEM画像。

図5 3D及び断面プロファイル



(a) 熱インプリント後のPEIフィルムの3Dプロファイル, (b) 銀インク充てんサンプルの断面観察像, (c) フィルム上面からの観察像。

図6 熱インプリントしたPEIフィルムの3D計測画像

構造が形成されたPEIフィルムに、テトラデカン溶媒中に平均粒子径7nmの銀ナノ粒子が分散する銀ナノインクを滴下させて、毛細管流動によるL&S構造の凹への選択的な銀ナノインクの充てんに成功している<sup>15)</sup>。

図6 (a) に金型温度285℃、1MPaで熱インプリントしたPEIフィルムの3D計測画像を示す。金型構造がPEIにはほぼ完全に転写されている。図6 (b), (c) には、銀ナノインク充てん後に焼結処理を行ったPEIフィルムの断面及び表面のSEM観察結果を示した。断面観察像より、L&S構造の凹のみに選択的に銀が充てんされている。表面SEM像からも、溝方向に一樣に銀が充てんされることが確認できる。これら50本の配線をまとめて四端子法により電気抵抗を測定した。算出した体積固有抵抗率は $4.2 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ と良好な抵効率を示し、本手法のフレキシブルプリント配線板 (FPC)、プリントド・エレクトロニクス回路へ適用可能性が確認できた。

### 3. UV硬化樹脂のUVナノインプリント技術

S. Jangら<sup>16)</sup> は、ナノインプリント技術を用いて、酸化チタン (TiO<sub>2</sub>) を

表面に有するモスアイ構造のPDMSパッドの作製を行った。このパッドは、表面の酸化チタンの働きによりUVを遮断するが、可視光透過性は高いために透明な素材となる。また、サブミクロンオーダーのモスアイ構造を有するために、超撥水性を示し自己洗浄機能を発現する。

作製工程としては、まず、300nmの周期構造を持つモスアイ構造を表面に有するマスターモールドを以下のように作製している。洗浄されたシリコンウェハ上に厚さ1μmのフォトリソストをスピンコートにより形成させる。次に、直径170nmのピラーアレイをKrFレーザーにより形成させた後、シリコンウェハを誘導結合プラズマ (ICP) により深さ180nmエッチングする。フォトリソストを洗浄・除去した後、シリコンウェハ全体をエッチングする。その後、大気圧下で水素と酸素ガスを導入し、30nmのSiO<sub>2</sub>層、最後に窒化物を、10nm堆積させる。

TiO<sub>2</sub>コートされたモスアイPDMSパッドの作製工程を図7 (a) ~ (d) に示す。上述のモスアイ構造を有するシリコン製マスターモールド表面に、C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>ガス存在下におけるICPによりC<sub>4</sub>F<sub>8</sub>層を形成させる。次に、粒径20nmのTiO<sub>2</sub>が分散したエタノール分

散液をマスターモールドにスピンコートして乾燥させた後、500℃で1時間のアニール処理を行う。その後、トルエンに希釈された硬質PDMSをドクターブレードによりシリコンウェハ上に塗布し、80℃で20分間硬化させる。その後、通常のPDMSを塗布し、70℃で1時間熱硬化させTiO<sub>2</sub>コートされたモスアイPDMSパッドを作製した。図7 (e) にパッド表面及び断面から観察したSEM像を示す。直径約300nmの形状がパッド表面に形成されていることが確認できる。

図8 (a) に、このPDMSパッドの透過率スペクトルを示す。TiO<sub>2</sub>を含むためUVB (280 ~ 315nm)、UVC (100 ~ 280nm) の紫外線がほぼ遮蔽され、UVA (315 ~ 400nm) の透過率も大幅に低下することが分る。モスアイ構造の形成により可視光領域の透過率は向上し、表裏の両面にモスアイ構造が形成されたパッドは、波長550nmの透過率が97.6%と高い値を示す。また、放物面を描くモスアイ構造により、フルネル反射が抑制されて反射率が低下することが確認できる (図8 (b))。作製したモスアイ構造を有するPDMSパッドと脱イオン水の接触角は130°と高い撥水性を示し、自己洗浄機能が発現することも確認される。

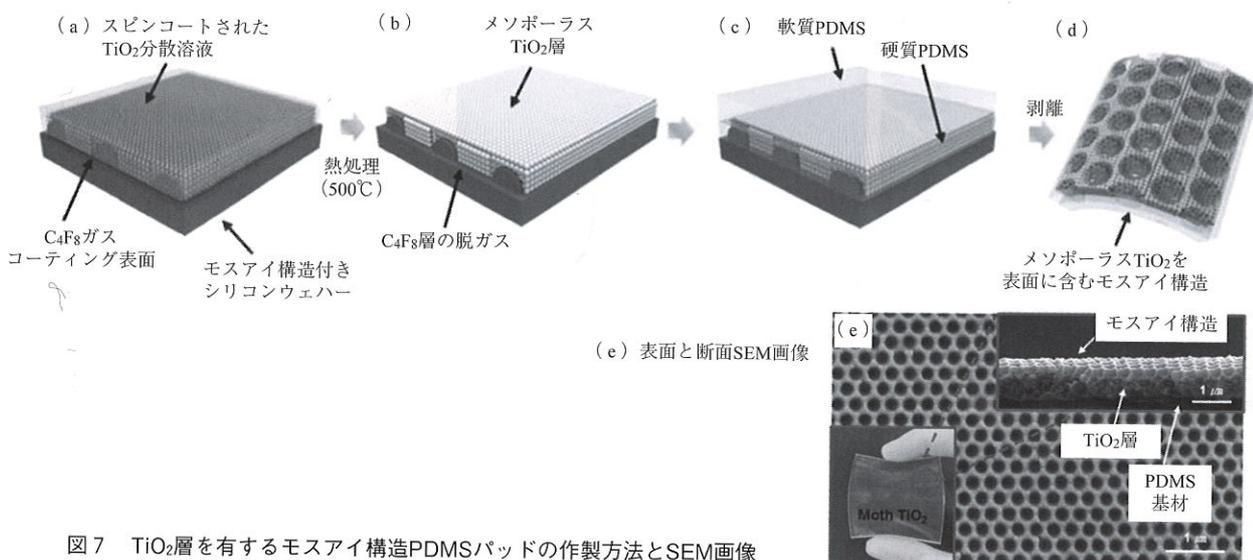


図7 TiO<sub>2</sub>層を有するモスアイ構造PDMSパッドの作製方法とSEM画像

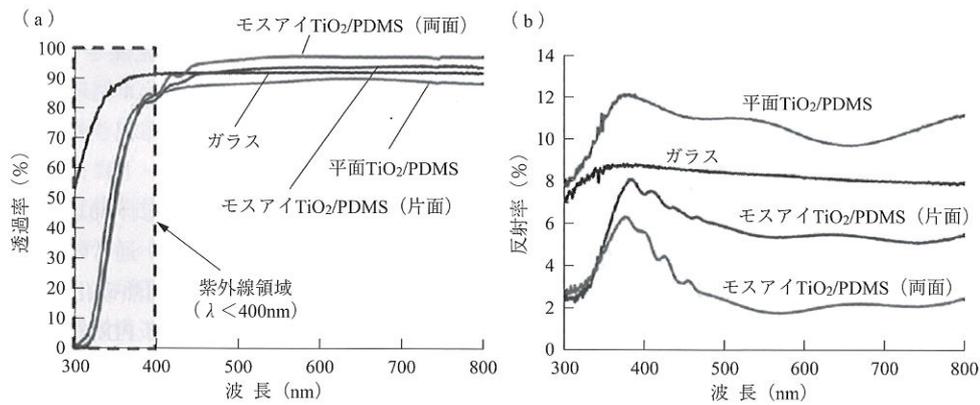


図8 ガラス、モosaic構造と平面構造のTiO<sub>2</sub>/PDMSパッドの  
(a) 透過率と (b) 反射率スペクトル

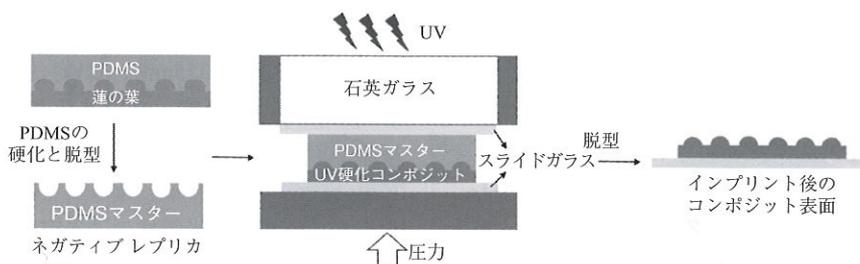
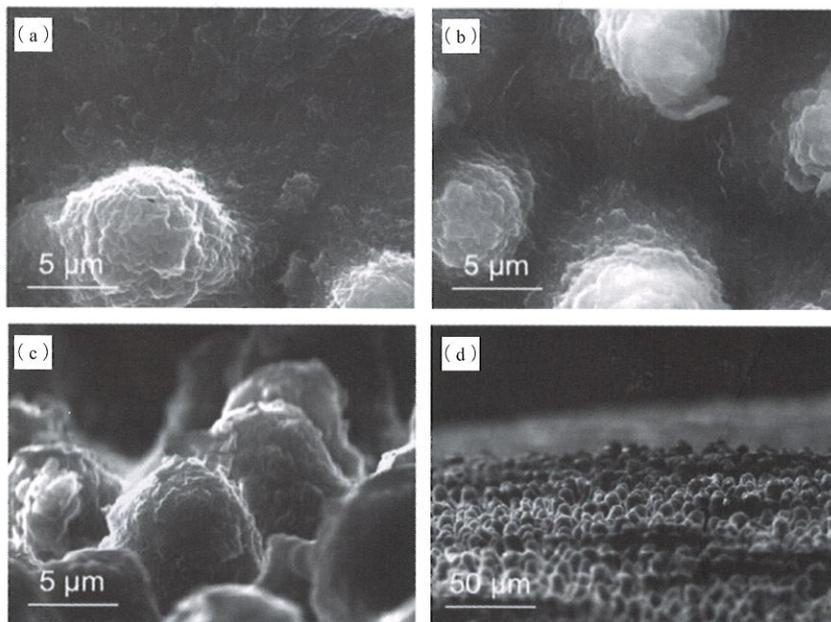


図9 蓮の葉構造を有するナノコンポジット作製方法



(a) アクリル樹脂と (b) シリカ25vol%添加コンポジットのSEM画像 (上面視)  
(c) (d) シリカ25vol%添加コンポジットを88°傾斜させて観察したSEM像

図10 ナノコンポジット (シリカ含有率25vol%) の表面SEM像

また、P. Cullyら<sup>17)</sup>は、蓮の葉を模倣する表面構造を有する超撥水性、自己洗浄性、耐摩耗性に優れたナノコン

ポジットを作製している。ナノコンポジットは一次粒径12nmのシリカ粒子が充てんされるUV硬化型アクリル樹

脂である。アクリル樹脂は分子構造の異なる2種類を用いている。また、界面活性成分としてアクリル基を有するシロキサン化合物を添加している。

図9にナノコンポジットの作製工程を示す。まず洗浄した蓮の葉 (2cm × 2cm) を容器に入れてPDMSを注ぐ。2時間の減圧により気泡を除き、室温で4日間かけてPDMSを硬化させる。液状UV硬化型アクリル混合物をガラススライド上に塗布し、その上に作製したPDMSモールドを速やかに載せ圧力3barsを加えながら30秒間でUV硬化させる。比較として平滑な表面を有するコンポジットの作製も行っている。

作製されたナノコンポジット (シリカ含有率25vol%) の表面SEM像を図10に示す。直径約5 μmのピラーが表面に均一に形成されていることが確認できる。水とナノコンポジットとの接触角は、シリカ粒子未充てんの平滑表面の場合90°程度であり、シリカ粒子を25vol%含むと100°程度となる。微細構造表面を有するナノコンポジットは、シリカ粒子が未充てんの場合でも130°を超える高い接触角を示す。シリカ粒子の添加量が増えるに従い接触角は上昇し、シリカ粒子を25vol%含む試料では150°と高い接触角を示した。また、この微細構造を有するナノコンポジット試料表面に疎水性の胡椒粉体を堆積させて、水を滴下した場合、完

全に胡椒粉体が除去される自己洗浄機能も確認されている。

#### 4. マイクロ・ナノモールディングの動向と将来の展望

マイクロ・ナノモールディング技術は、様々なエレクトロニクスデバイス、バイオデバイス、記録媒体、光学素子やMEMSなどの素子基板作製技術として注目されている。これらに関わる要素技術は非常に広範囲にわたり、転写モールド、樹脂特性、成形機、評価技術、成形技術や離型技術に関する研究が幅広く行われている。近年、マイクロ・ナノモールディング技術に関する研究成果や論文は、中国からの報告が増えているが、韓国や欧州においても研究は盛んに行われている。

熱可塑性プラスチックを用いたマイクロ・ナノモールディングの研究の多くは、プラスチックの高い成形性（形状自由度）、連続成形性を生かし、既存の技術よりいかに、シンプルな工程で、短時間で、環境にやさしいものにしていくかを目的にしているように見受けられ、今後の研究の発展に期待したい。一方で、PDMSやアクリル系などの熱・UV硬化系プラスチックを用いた研究では、低粘度液体という特徴を生かし、ナノスケール構造体やそのための転写モールドとして、精密さを追求する用途に適用されており、バイオ、光学、エレクトロニクスへの応用研究が依然盛んに行われている。

マイクロ・ナノモールディングの更なる発展に向け、精密転写を可能とする材料、金型加工、成形装置や加工技術、表面処理技術、塗装技術、プロセスモニタリングや数値解析、高次構造や物性の評価技術、観察技術など、各技術の発展、各要素技術の最適化・複合化、近年発展が著しいAI技術、CAE技術、3Dプリントに代表されるアディティブ・マニュファクチャリング技術などと融合させる研究にも期

待したい。

#### 引用文献

- 1) R. Surace, V. Bellantone, G. Trotta, V. Basile, F. Modica, I. Fassi, "Design and fabrication of a polymeric microfilter for medical applications," *J. Micro. Nano-Manuf.*, **4** (1), 011006 (2015). Doi: 10.1115/1.4032035.
- 2) J. M. Stormonth-Darling, R.H. Pedersen, C. How, N. Gadegaard, "Injection Moulding of Ultra High Spect Ratio Nanostructures Using Coated Polymer Tooling," *J. Micromech. Microeng.*, **24** (7), 075019 (2014). Doi: 10.1088/0960-1317/24/7/075019.
- 3) S. Ontiveros, J. A. Yague-Fabra, R. Jimenez, G. Tosello, S. Gasparin, A. Pierobon, *et al.*, "Dimensional Measurement of Micro-Moulded Parts by Computed Tomography," *Meas. Sci. Technol.* **23** (12), 125401 (2012). Doi: 10.1088/0957-0233/23/12/125401.
- 4) H. Y. Lin, C. H. Chang, W. B. Young, "Experimental and Analytical Study on Filling of Nano Structures in Micro Injection Molding," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, **37**, 1477 (2010). Doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.08.017.
- 5) K. F. Zhang, Z. Lu, "Analysis of Morphology and Performance of PP Microstructures Manufactured by Micro Injection Molding," *Microsyst. Technol.* **14**, 209 (2008). Doi: 10.1007/s00542-007-0412-3.
- 6) B. Sha, S. Dimov, C. Griffiths, M. S. Packianather, "Investigation of Micro-Injection moulding Factors Sffecting the Replication Quality," *J. Mater. Process Technol.*, **183**, 284 (2007). Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.10.019.
- 7) D. Masato, M. Sorgato, G. Lucchetta, "Analysis of the Influence of Part Thickness on the Replication of Micro-Structured Surfaces by Injection Molding," *Mater. Des.*, **95**, 219 (2016). Doi: 10.1016/j.matdes.2016.01.115.
- 8) H.-L. Lin, C.-S. Chen, R.-T. Lee, S.-C. Chen, R.-D. Chien, M.-C. Jeng, *et al.* "Effects of Process Parameters on Replication Accuracy of Microinjection Molded Cyclic Olefins Copolymers Parts," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **52**, 44001 (2013).
- 9) F. Baruffi, M. Calaon, G. Tosello, "Effects of Micro-Injection Moulding Process Parameters on Accuracy and Precision of Thermoplastic Elastomer Micro Rings," *Precision Engineering*, **51**, 353 (2018).
- 10) M. Calaon, G. Tosello, J. Garnaes, H. N. Hansen, "Injection and Injection-Compression Moulding Replication Capability for the Production of Polymer Lab-On-a-Chip with Nano Structures," *J. Micromech. Microeng.*, **27** 105001 (2017).
- 11) V. Leo, C. Cuvellez, "The Effect of the Packing Parameters, Gate Geometry, and Mold Elasticity on the Final Dimensions of a Molded Part," *Polymer Engineering and Science*, **36** (15), 1961 (1996).
- 12) C. A. Griffiths, S. S. Dimov, S. Scholz, G. Tosello, "Cavity Air Flow Behavior during Filling in Microinjection Molding," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **133**, 10 (2011).
- 13) K.-M. Lee, C.-V. Ngo, J.-Y. Jeong, E.-c. Jeon, T.-J. Je, D.-M. Chun, "Fabrication of an Anisotropic Superhydrophobic Polymer Surface Using Compression Molding and Dip Coating," *Coatings*, **7**, 194 (2017). Doi:10.3390/coatings 7110194.
- 14) C. M. Han, B.-K. Lee, "Effect of Hydrophilicity of Polydimethylsiloxane Stamp in Capillary Force Lithography Process of Thermoplastic Polyurethane," *Microelectronic Engineering*, **190**, 38 (2018). Doi.org/10.1016/j.mee.2018.01.001.
- 15) 黒瀬隆, 宍戸啓太, 根本昭彦, 伊藤浩志, "ポリエーテルイミドフィルムの熱インプリントによる微細配線構造の形成" 平成30年度繊維学会年次大会予稿集, 1E04, 2018 (6月, 東京).
- 16) S. Jang, S. M. Kang, M. Choi, "Multifunctional Moth-Eye TiO<sub>2</sub>/PDMS Pads with High Transmittance and UV Filtering," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 44038 (2017). Doi: 10.1021/acsami.7b15502.
- 17) P. Cully, F. Karasu, L. Muller, T. Jauzein, Y. Leterrier, "Self-cleaning and Wear-Resistant Polymer Nanocomposite Surfaces," *Surface & Coatings Technology*, **348**, 111 (2018). Doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.05.040.