

# マイクロ・ナノモルディング技術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ルディングの研究は、1996年の論文発表から約20年を経た。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、ナノインプリントが1995年から注目され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、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が行われている。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が盛んである。

一昨年は、プラスチック成形加工によるナノ・マイクロ転写成形の課題、歴史、研究動向と今後の展開について述べた。本年は、近年発表された研究成果や動向について、特に注目が集まっている「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」に関する研究内容を中心に紹介したい。

### 1. マイクロ・ナノインプリント成形技術における微細構造形成

転写される微細表面構造の力学特性及び電気特性改善を目指してプラスチック複合材料を用いた研究が行われている。スペインのJamie J.Hernandez, Isabel Rodriguezらは<sup>1)</sup>、PSに0.35wt%

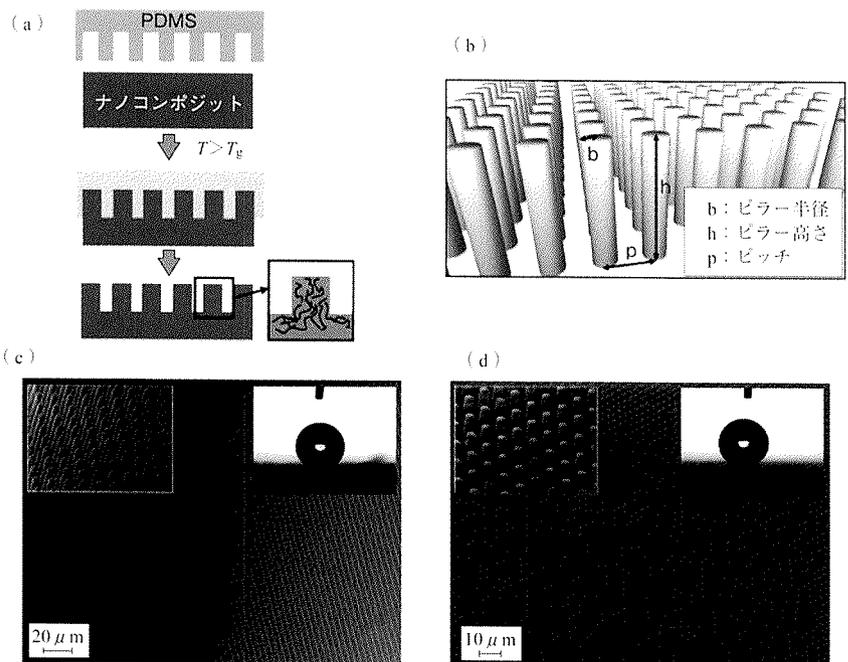


図1 (a) ナノコンポジットフィルムの表面構造のための熱インプリント成形工程、(b) ピラー形状、(c) 直径 $2\mu\text{m}$ のPSピラーアレイのSEM写真と $4\mu\text{l}$ の水滴の様子、(d) 直径 $2\mu\text{m}$ のPS/CNTピラーアレイのSEM写真と $4\mu\text{l}$ の水滴の様子

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

表1 PS, PS-CNT, PVDF, PVDF-RGOの濡れ性  
(WCA:水滴との接触角)

基 材	水滴接触角 (°)	転落角 (°)	ヒステリシス (°)
PS	172 ± 2	6 ± 1	5 ± 2
PS-CNT	173 ± 1	3 ± 2	6 ± 2
PVDF	155 ± 2	18 ± 2	19 ± 6
PVDF-RGO	157 ± 1	12 ± 3	11 ± 4

の単層CNT(カーボンナノチューブ)及びPVDFに1wt%のRGO(還元型酸化グラフェン)を添加したナノコンポジット材料を作製した。シリコンウェハー上に溶媒キャストによりコンポジット材料を成膜した後、PDMS(ポリジメチルシロキサン)テンプレートを用いて、材料の $T_g$ (ガラス転移温度)以上で熱インプリントし、マイクロスケールのピラー構造を成形させた(図1)。転写されたピラー形状の特性は、直径 $2\mu\text{m}$ 、高さ $12\mu\text{m}$ 、構造ピッチ $4\mu\text{m}$ である。形成されたマイクロピラー構造は、水に対する接触角が大きく超撥水特性を示した(表1, 図1(c)(d))。ナノインデーターを用いたピラー構造の弾性率及び最低座屈荷重測定の結果、図2のようにナノファイラーを添加した試料では、マイクロピラー部分の弾性率及び最低座屈荷重が向上した。彼らはマイクロピラー構造体中にナノファイラーが均質に分散していることを、共焦点ラマン分光法及びSEM観察により明らかにしている。CNTとRGOナノファイラーを複合した材料は、CNTとRGO由来のラマンシフトが、ピラー中及び基材中の両方に確認される。また、破断したPS/CNTマイクロピラーの根本に、CNTがピラーと基材とを繋いでいる様子がSEMにより観察されている。これらよりマイクロピラー構造体中にナノファイラーが均質に分散したことで、マイクロピラーの力学特性が向上したと結論付けている。このPS/CNT材料の導電率を複素誘電率測定から算出している。 $10^{-1}\sim 10^6\text{Hz}$ の周波数範囲において導電率は

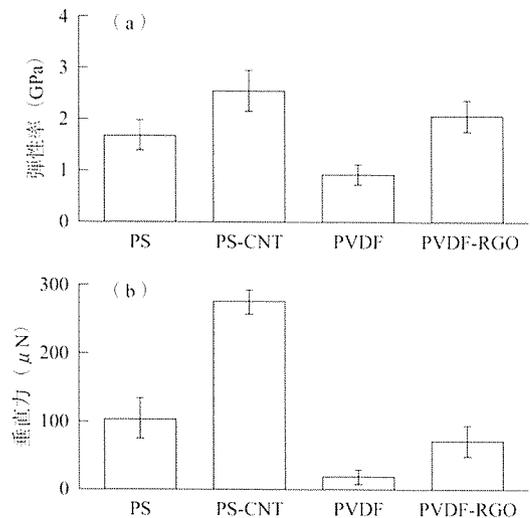
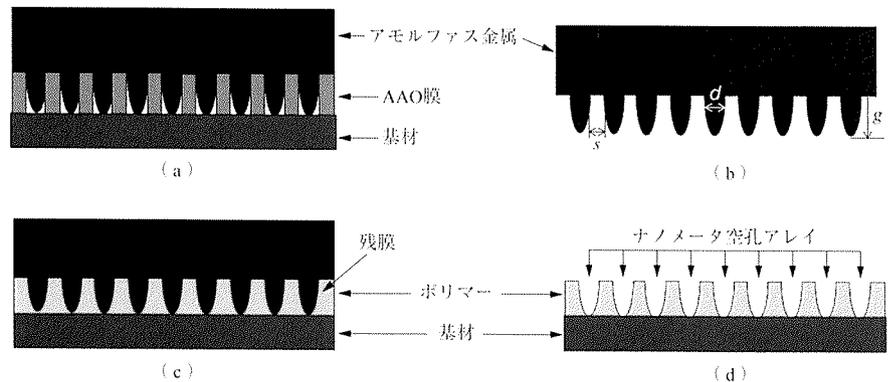


図2 PSとPVDF及びそれぞれの複合材料の  
(a)弾性率, (b)最小変形荷重

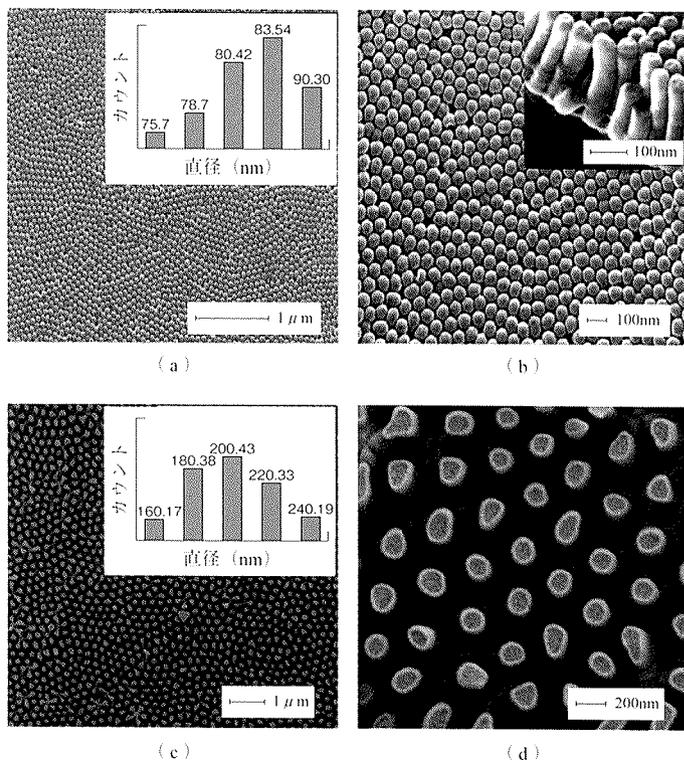


(a) AAO膜へのホットプレスにより形成されるアモルファス合金ナノロッドアレイの形成  
(b) 化学エッチングによるAAO膜の除去  
(c) アモルファス合金ナノロッドアレイを用いたポリマーフィルムへのナノ空孔の形成  
(d) 酸素プラズマによる残膜の除去

図3 テンプレートを用いたナノ構造転写の概念図

周波数に依存性せず $10^{-4}\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ となり、転写表面に帯電防止機能を有する電気特性が付与されたことを示した。耐久性に優れるテンプレート作製を目的とした、アモルファス合金製の微細転写テンプレート作製に関する研究が報告されている。Jianjun Li, Yujun Songらは<sup>2)</sup>、Pt系貴金属アモルファス合金製のテンプレート作製方法を提案している(図3)。厚さ1mmのアモルファス合金を空孔サイズ35, 90, 200nmの陽極酸化多孔質アルミナ(AAO)膜に圧力80~130MPaで押し当てる

ことで、表面にナノロッドアレイが転写されたアモルファス合金製テンプレートを作製した。この転写はアモルファス合金の $T_g$ 以上で行われる。ロッド方向に対し斜め方向から観察したSEM画像より、アスペクト比が5~6のナノロッドアレイが形成されていることが分かった。彼らは、アモルファス合金のほか、ネガティブ型のフォトレジスト材料やPMMAを用いて同様のナノロッドアレイ表面が形成可能なことを示している(図4)。これらのナノロッドアレイをテンプレ



(a) (b) UV硬化樹脂, AAO膜テンプレートの空孔サイズ  $82.4 \pm 3.4$  nm  
 (c) (d) PMMA, AAO膜テンプレートの空孔サイズ  $198.7 \pm 31.5$  nm

図4 AAO膜をテンプレートして作製されたナノロッドフィルムのSEM写真とナノロッドの直径のヒストグラム

表2 転写されたPSフィルム表面特性

型コード	120°C <sup>x</sup>			140°C		
	r <sup>a)</sup>	d <sup>b)</sup> (μm)	z <sup>c)</sup>	r	d (μm)	z (μm)
M <sub>1</sub>	36 μm	67	28 μm	—	—	—
M <sub>2</sub>	34 μm	34	18 μm	—	—	—
M <sub>3</sub>	31 μm	10	18 μm	—	—	—
N <sub>1</sub>	37 nm	—	500 nm	37 nm	—	1.2
M <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	38 μm	66	26 μm	38 μm	66	26
	35 nm	—	500 nm	37 nm	—	1.1
M <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	35 μm	32	18 μm	35 μm	31	19
	38 nm	—	450 nm	35 nm	—	1.1
M <sub>3</sub> N <sub>1</sub>	31 μm	10	18 μm	32 μm	10	19
	35 nm	—	520 nm	38 nm	—	1.0

a) マイクロ構造又はナノ繊維の直径  
 b) マイクロ構造間隔  
 c) マイクロ構造又はナノ繊維の高さ  
 x) 金型温度

ニウムの陽極酸化により作製される多数のナノスケールの空孔を有するAAO膜 (Anodized aluminum oxide, 孔径50, 100nm, 深さ120 μm程度) をテンプレートしたPPとPSの熱インプリント成形を行ってきた<sup>3)</sup>. そこでPSやPPフィルム表面のナノ繊維形成に及ぼすプレス温度, 時間, 圧力の影響を明らかにしてきた. PSにおいては直径50nm, 長さ50 μm (アスペクト比1,000) の繊維が, PPにおいては, 長さ130 μm (アスペクト比2,600) となるナノ繊維が形成されることを明らかにした.

更にマイクロ・ナノスケールの表面階層構造を有する成形体を作製する目的で, 以下のプロセスを提案した. 半径35 μm程度のマイクロスケールの凹凸をあらかじめ有するアルミニウムを陽極酸化処理し, マイクロスケールとナノスケール (空孔直径: 25nm) の凹凸を同時に有するAAO膜を作製し, そのAAO膜をテンプレートしたPSの熱インプリント成形を行った<sup>4)</sup>. 比較としてマイクロスケールのみ, ナノスケールのみを有するインプリント成形も行い, そのフィルム表面の濡れ性の評価を行った. 表2に各種AAO膜を用いて形成された転写フィルム表面の形状特性と成形温度を示した. 図5 (a) ~ (h) にマイクロ及びナノスケールの凹凸を同時に有するAAO膜を用いたPS転写フィルム表面のSEM写真を示した. 図5 (a) ~ (d) は成形温度120°C, 図5 (e) ~ (h) は140°Cで転写されたものである. 半径約35 μmのマイクロスケールの凹凸表面上に, 更に直径30nm, 長さ500 ~ 1,000nm程度のナノ繊維が形成されていることが分かる. 図6に作製されたPSフィルム表面と水滴との接触角を示す. マイクロスケールの凹凸ピッチが狭いほど, 成形温度が高いほどにPS表面と水滴との接触角は高くなり, 接触角は最大で150.6°を示した. 平らなPS表面と水滴との接触角89.7°に対

レートとした, ナノスケールの空孔を有するフィルム作製を下記のように行っている. まず, シリコンウェハー上にポジティブ型のフォトリソ材料 (ILR-1050) をスピコートにより厚さ300 ~ 400nmで成膜・養生する. その後, ナノロッド表面を有するテンプレートをフォトリソ材料に押し込

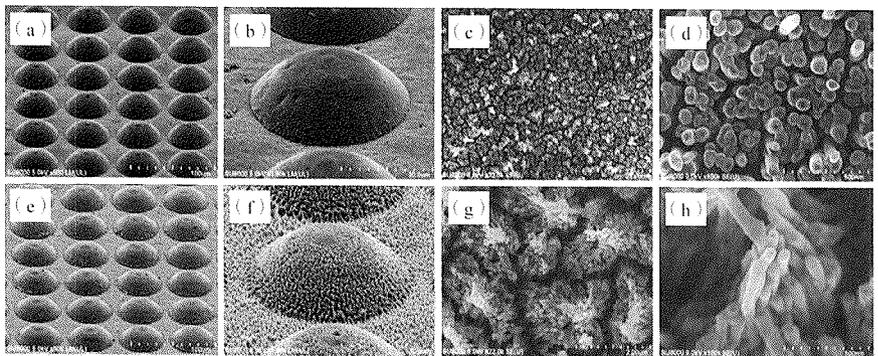
む. フォトリソ材料のT<sub>g</sub>以上の温度と圧力を加えながら硬化反応させた後, 室温まで冷却しテンプレートを引き離す. アモルファス合金テンプレートで作製された転写表面のSEM写真から, 100nm程度の空孔が明瞭に確認された.

我々の研究室では, これまでアルミ

し、特に化学的 surface 処理なしに、物理的な表面形状のみで超撥水特性が付与されることを示した。

## 2. マイクロ・ナノインプリント成形技術の半導体プロセスへの応用

テンプレートをを用い大面積を転写成形する際の大きな課題の一つとなる“空気の巻き込み”を回避する手法として、J.W.Kimらは<sup>51</sup>、SCIL (Substrate Conformal Imprint Lithography) という転写手法を提案している (図7)。彼らは光集積回路 (PI: Photonic Integrated Circuit) デバイス向けの構造と材料構成で検討を行っている。図7 (a) のように、形状を転写するテンプレート側は、ガラス基材、PDMSクッション層 (ヤング率: 2MPa)、PDMSスタンプ層 (ヤング率: 80MPa) で構成されている。被転写側は、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  (厚み100nm) と酸化シリコン (厚み6 $\mu\text{m}$ ) が被覆されたシリコンウェハ上に、厚み200nmのフォトリソ材料をスピコートにより成膜したものをを用いている。転写はウェハ側より行われ、テンプレート側から局所的に圧力を加えながら徐々にウェハ側との接触面積を増加させていく (図7 (b) (c))。テンプレート側が完全にウェハ



(a)~(d) 120°C成形品、(e)~(h) 140°C成形品。(a) (b) (e) (f) マイクロスケール構造、(c) (d) (g) (h) ナノスケール構造

図5 ミクロ及びナノスケール構造を有するPS表面のSEM写真 ( $\text{M}_3\text{N}_1$ )

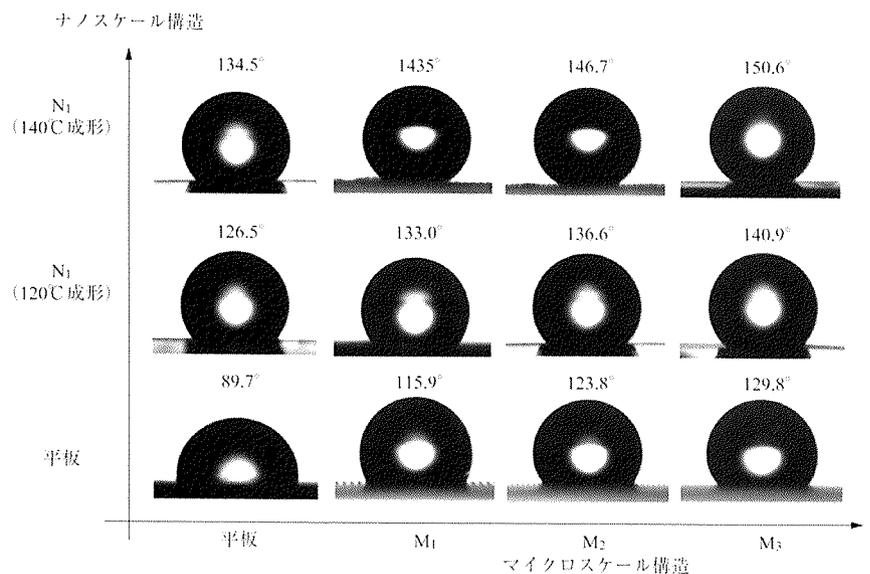


図6 転写後PSフィルムと水滴との接触角 (横軸: テンプレートのマイクロ構造のサイズ, 縦軸: 成形温度: 高温ほどナノストラクチャー構造が発達)

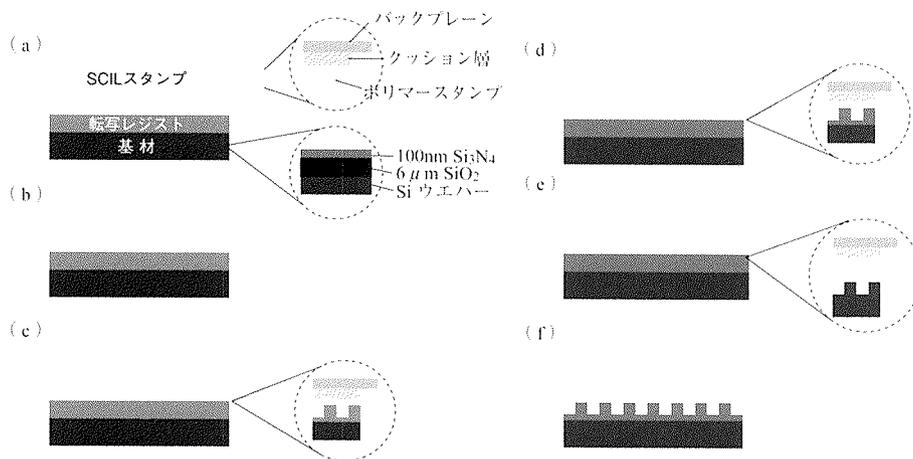


図7 SCILのプロセスフロー

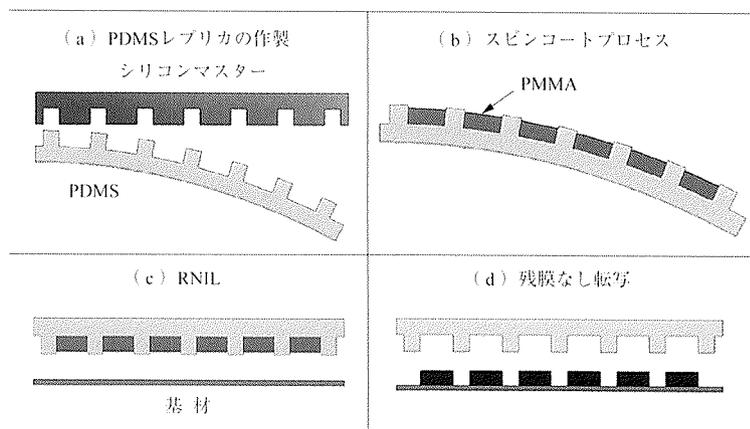


図8 残膜が残らないリバース式ナノインプリントリソグラフィー (RNIL) の工程概念図

一側と接触した後、UV照射によりフォトレジスト材料を硬化させテンプレートを取り除く。次に反応性イオンエッチング (RIE) により、フォトレジスト材料及び  $\text{Si}_3\text{N}_4$  をエッチングしていく。転写後のフォトレジスト層の厚みの差を利用し、フォトレジスト層の薄い凹部直下の  $\text{Si}_3\text{N}_4$  層のみがエッチングされた微細パターンを得ることが可能となる。RIE プロセス後にフォトレジスト材料を化学的に除去した表面構造の観察から、得たい形状がしっかりと転写されていることが分かる。エッチングにより作製した微細パターンに1,600nmの低温酸化層を被覆した後、導波管伝送損失の評価を行っている。伝送損失を計測した結果、SCILで作製したPICの光学品質は、通常のフォトリソグラフィーで作製したPICの品質と比較できるレベルにあることが示されている。

通常、半導体製造において、基板への微細な形状パターンニングのために、製造設備が高価なフォトリソグラフィープロセスが必要となる。また、樹脂レジスト材料が狙い通りに除去できずパターン精度が低下してしまうリスクがある。そこでプラスチックの微細転写技術を用いたフォトリソグラフィ代替プロセスや、残膜がない樹脂レジストのパターンニング技術の研究開発が進められている。

A.Fernandez, Nikolaos Kehagiasらは<sup>6)</sup>、リバース・インプリント技術により、シリコンウェハーなどの基板に、フォトリソグラフィープロセスを使用せず、更に残膜なしにレジスト樹脂の微細パターンを形成する方法を報告している。図8にリバース・インプリント法の工程概念図を示す。まず、シリコン製のマスターモールドを用いフレキシブルなPDMSテンプレートを作製する (図8 (a))。次に、PMMAが50wt%溶解したアニソール溶液をPDMS上にスピコートする (図8 (b))。この際、テンプレート垂直方法に60Hzの振動を加え、PDMSハンカム構造体中への溶液の充てんを促す。PMMA溶液中のアニソール溶媒を加熱除去した後、シリコンなどの基板へPMMA配列構造体を振動を加えながら転写する (図8 (c) (d))。PDMSハンカム構造テンプレートのSEM写真 (壁高さ: 800nm, 壁幅: 500nm) を観察した結果、シリコンウェハー上にPMMAがリバース・インプリントにより綺麗に配列され、転写の際に加えた振動でPMMAが変形した様子が見られないことを確認している。

VijayRamya Kolliらは<sup>7)</sup>、基板上に紫外線硬化レジスト材料をナノ・マイクロスケールで残膜なしにパターンニングする方法を提案している。図9 (a) (b) のように基板上に塗布された紫外

線硬化レジスト材料をテンプレートにより転写成形する場合、テンプレートの空洞の大きさにより毛管力が異なるため、基板上に形成される残膜の厚みが不均一となる課題が生じる。幅の広い空洞には多くのレジスト材料が充てんされ、その空洞近くの残膜厚みは薄くなる。一方、幅の狭い空洞に充てんされるレジスト材料の量は少なく、その空洞近くの残膜は厚くなるためである。このような厚み不均一な残膜をレジストとしてエッチングした場合、基板のオーバーエッチングや凹部のレジスト材料の残膜により不完全なエッチングとなる (図9 (c))。

彼らが提案する方法は、PDMSテンプレートの凸部がUVを遮蔽するため金属層で覆われており、凸部以外はUVの透過が可能である (図9 (d))。従って、このハイブリッドPDMSテンプレートで、UV硬化性レジスト材料に形状転写しながらUV照射すると、UVは金属層で遮蔽され、それ以外の部分では、UVはテンプレートを透過しレジスト材料が硬化する (図9 (e))。UVが遮蔽された金属層直下のレジスト材料は未架橋であるため、溶媒等で容易に除去が可能であり、残膜のないレジスト材料のパターンニングが可能となる (図9 (f))。

テンプレート凸部の金属層は電子ビーム物理蒸着法を用いて形成させている。また、PDMSと金属の密着性が悪い場合、PDMSのメチル基 ( $\text{Si-CH}_3$ ) を酸素プラズマ処理によりシラノール ( $\text{Si-OH}$ ) へと変性させている。蒸着に用いる金属はクロム、金、チタン、それらの組合せを検討し、5nmのチタン層に80nmの金を形成させた層がPDMSとの密着性、金属膜の形状安定性の点で優れることを見出している。金属層の定着は、ポジティブ型のフォトレジストを用い、ケミカルエッチングにより不要な金属層の除去を行っている。作製したハイブリッドPDMSテンプレート (凸幅100  $\mu\text{m}$ , 凹幅145

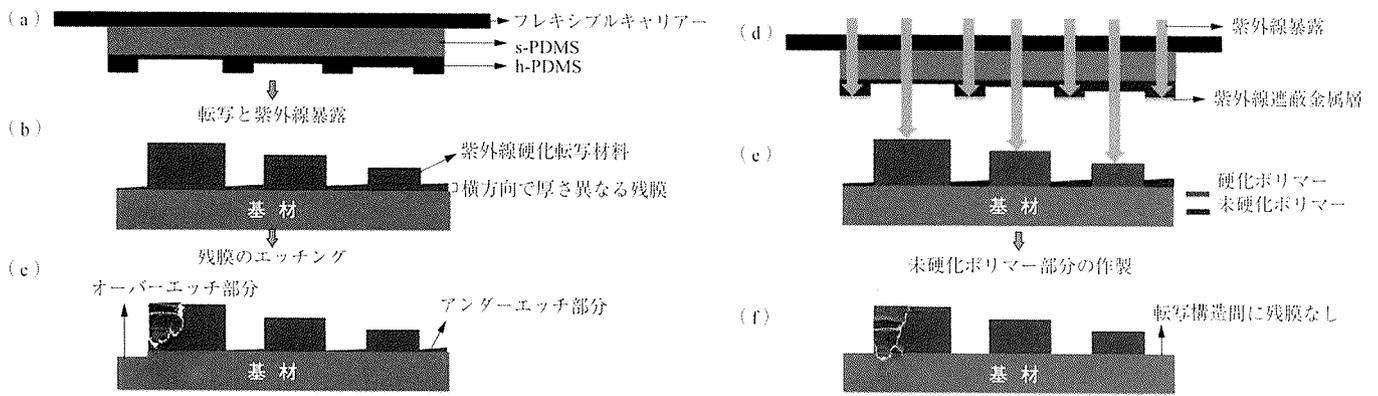


図9 (a) 通常のSCILプロセスで使用されるテンプレート, (b) UV硬化で転写形成された不均一な残膜, (c) 凹部における過剰なエッチングと残膜, (d) UV遮蔽金属層付きハイブリッドソフトテンプレート, (e) 硬化部と未硬化部を有する転写構造, (f) 残膜がない転写構造

$\mu\text{m}$ , 深さ220nm)を用い, ネガティブ型のフォトレジスト材料への転写成形を行っている. UV照射後の転写形状は, 形状凹部に10~80nmの残膜が生じているが, 残膜除去処理(アセトンへ20s浸漬)により完全に残膜が除去されていることが確認できている.

### 3. マイクロ・ナノインプリント成形技術の電気配線への応用

プラスチックの転写成形技術を応用して, 高解像度の導電性パターンを形成させる研究が進められている. Changkyu Lee, Je Hoon Ohらは<sup>8)</sup>, 転写成形による凹凸パターンを利用して親水・疎水パターンを形成させ, そこから最終的に導電性パターンを付与する方法を提案している. 彼らの方法は, まず微細凹凸形状を有するPDMSテンプレートを用いて, ガラス基板上的のエポキシ系UV硬化樹脂(SU-8)に凹凸パターン形状を転写する(図10(a)(b)). 形状転写されたUV硬化樹脂へ継続してUV照射することで樹脂表面を親水化させる(図10(c)). 次に, “平らなPDMSテンプレート”にフッ素カーボン溶液をスピコートした後, UV硬化樹脂と接着させ, UV硬化樹

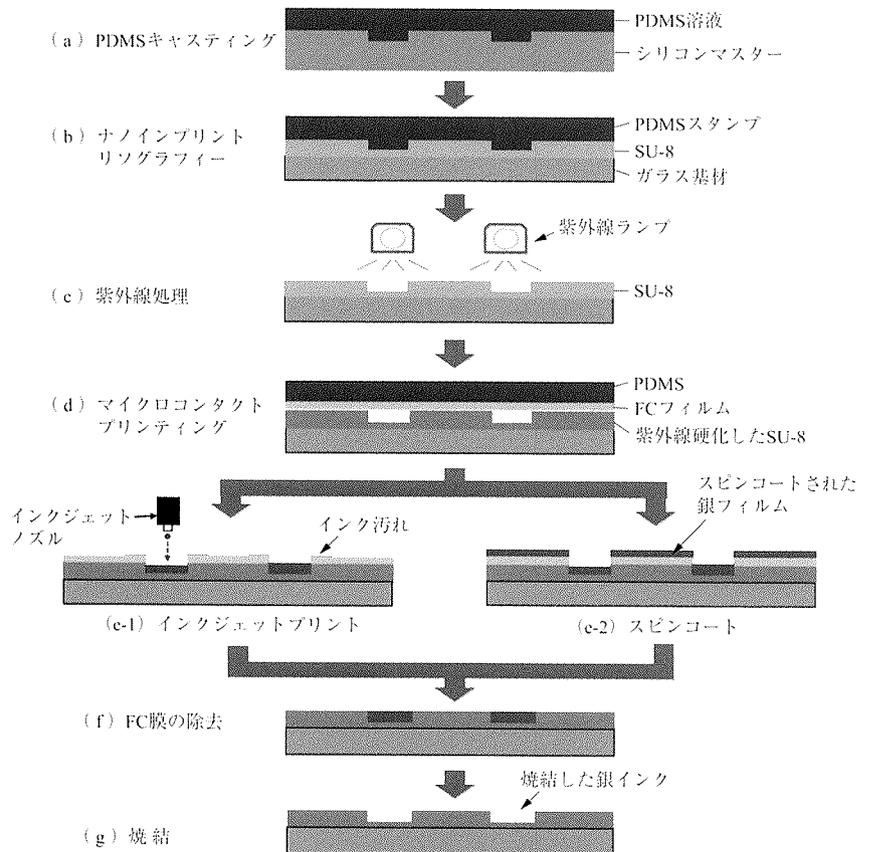


図10 転写成形後にプリンティング又はスピコートにより作製される高解像度導電性パターン形成プロセス

脂の凸部のみに疎水性フッ素カーボン膜を形成させている(図10(d)). これにより凸部上面は疎水性, 凹部が親水性を示すUV硬化樹脂膜が形成される. その後, 導電性パターン形成方法

として, インクジェットプリント法及びスピコート法を用いている. インクジェットプリント法では, テトラデカン溶媒中に粒径12nm以下の銀ナノの粒子が分散したインク(粒子濃度65

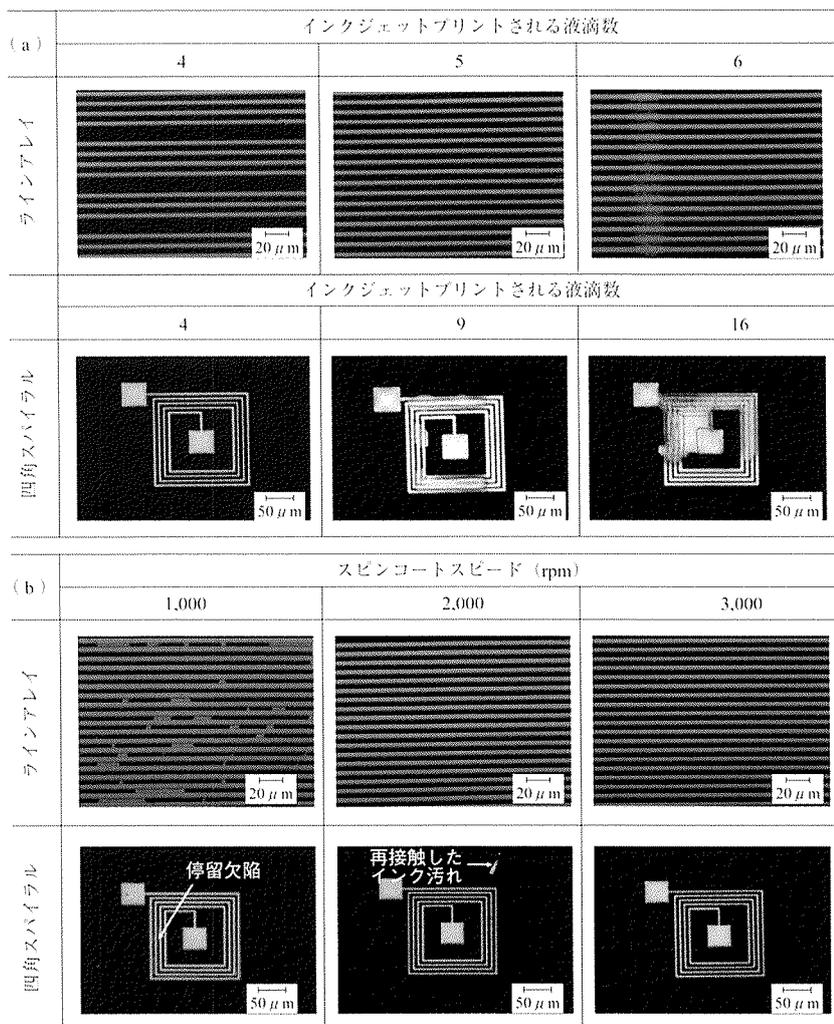


図11 光学顕微鏡観察像。(a) インクジェットプリントプロセス、(b) スピncコートプロセス

フッ素カーボン膜を溶解させるため、フッ素系溶媒中へガラス基板ごと浸漬、超音波を照射し、疎水性フッ素カーボン膜とその膜状に付着した銀粒子を取り除く(図10(f))。最後に220°Cの熱を加えて導電体である銀粒子を定着させる。転写形状は、インクジェットプリント法及びスピncコート法のいずれにおいても、ライン&スペース(ライン幅:7 μm, ギャップ:4.8 μm, 深さ:1.1 μm)及びスパイラル(ライン幅:7 μm, ギャップ:3 μm, 深さ:1.1 μm)の形状を用いている。図11に導電性パターン形成後の結果を示す。インクジェット法の場合、ライン&スペースではインクを5滴滴下した場合に、スパイラル形状の場合には4滴滴下した場合に綺麗なパターンが得られた。スピncコートの場合、2,000回転以上で高精度のパターンが得られており、インクの滴下量やスピncコートの回転数の制御が、高精度の導電性パターンの形成に重要なことが示された。焼成後も導電性配線パターンに大きな変化がないことが示されている。また、焼成後の配線の導電性は、インクジェット法、スピncコート法でそれぞれ4.81、5.95 μΩ・cmと銀のバルクの電気抵抗率(1.59 μΩ・cm)の3倍程度であり、十分な導電性を示すことが示された。

#### 4. ロール・ツー・ロール(RtR)成形技術

J.Zhang, M.Sahliらは<sup>9)</sup>、ラボスケールのRtR装置を用い、熱可塑性樹脂製のマイクロ流路デバイス作製における押出温度、転写圧力、ロール速度、樹脂粘度などの影響について報告している。図12にRtR装置の概観を示す。幅20mm、厚さ1mmのダイからコンベヤ上に押出された樹脂フィルムは、コンベヤにて搬送されて2つのロール間を通る。下側のコンベヤを駆動するローラーは、ゴムで被覆された駆動ロー

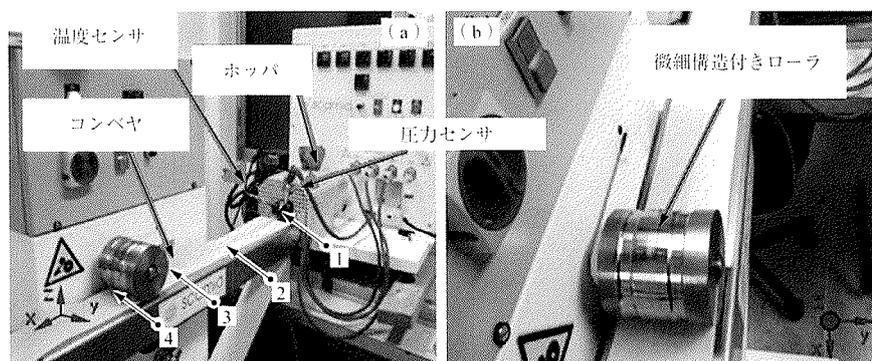
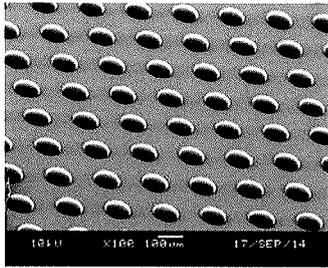


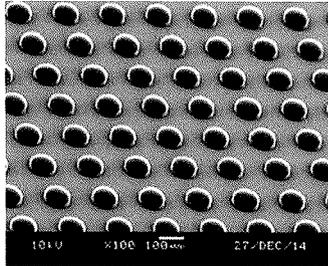
図12 (a) ホットローラ転写装置(1: 押出ダイ出口, 2: 中間位置, 3: 転写前位置, 4: 転写後位置), (b) 転写ローラ詳細

wt%, 粘度9mPa.s, 表面張力26.5mN/m)を直径30 μmの圧電プリントヘッドでプリントしている(図10(e-1))。またスピncコート法では同様の銀ナノ

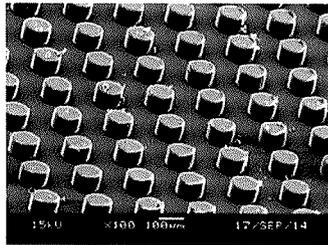
粒子インクを回転速度500 ~ 3,000rpmで成膜する検討を行っている(図10(e-2))。インクジェットプリント及びスピncコート後、PDMS凸部の疎水性



(a) 半球状マイクロレンズアレイのSEM写真 (温度: 275°C)



(b) 円柱-半球状マイクロレンズアレイのSEM写真 (温度: 285°C)



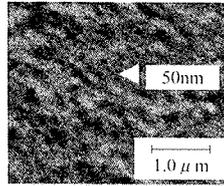
(c) 円柱アレイのSEM写真 (温度 = 295°C)

図13 種々温度で転写したフィルム表面のSEM写真 (荷重: 20kgf, ロール速度: 1.0m/min)

ラーであり、上側のローラーが形状を転写するローラーで受動的な回転をする。転写するマイクロ流路デバイスの形状は、流路幅約  $100 \mu\text{m}$ 、高さ  $110 \mu\text{m}$  であり、PDMS性のテンプレートが複数、上側のローラーに装着されている。ゴムと紙のコンベヤベルトの素材を用い比較した結果、ゴムベルトを用いた場合、転写形状のひずみが大きく転写性があまり良くなかったため、紙ベルトを選定している。結論として、温度と圧力の均一性が転写成形には最も重要なパラメーターであり、転写速度、樹脂の可塑状態も重要だと述べている。

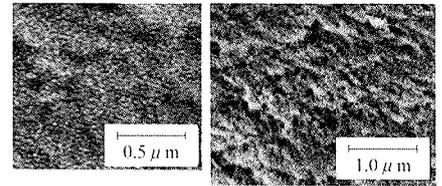
Chih-Yuanらは<sup>10)</sup>、ロールへの微細構造加工における生産効率向上のため

(a) 繊維径  $10 \mu\text{m}$ 、減圧速度  $3\text{MPa}/\text{min}$



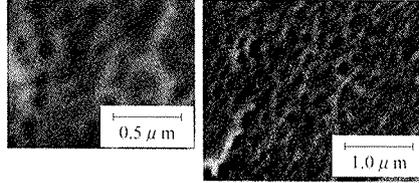
PS繊維  $10 \mu\text{m}$

(b) 繊維径  $20 \mu\text{m}$ 、減圧速度  $3\text{MPa}/\text{min}$



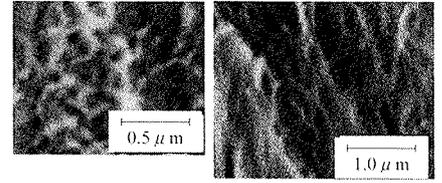
PS繊維  $20 \mu\text{m}$

(c) 繊維径  $20 \mu\text{m}$ 、減圧速度  $2\text{MPa}/\text{min}$



PS繊維  $20 \mu\text{m}$

(d) 繊維径  $20 \mu\text{m}$ 、減圧速度  $1\text{MPa}/\text{min}$



PS繊維  $20 \mu\text{m}$

図14 発泡後のマイクロ繊維の断面SEM写真

に、あらかじめ微細構造を加工した薄いステンレスシートを、後から金属ロールに巻き付けるハイブリッド押出ロール転写プロセスを提案している。厚さ  $80 \mu\text{m}$  のステンレスシートの  $10 \times 20\text{cm}$  のエリアは、フォトリソグラフィで形成された直径  $100 \mu\text{m}$  又は  $200 \mu\text{m}$  の円状の穴を有している。樹脂材料は光学レンズ用のポリカーボネートを用い成形条件 (温度、転写荷重、ロール速度) が転写構造に及ぼす影響を明らかにしている。転写された形状の高さは、熔融温度、転写荷重の上昇に伴い高くなり、ロール速度が速くなるほど低くなる。図13に転写荷重、ロール速度を一定として、熔融温度を変化させた際に形成される表面構造のSEM写真を示す。温度  $275^\circ\text{C}$  の場合、転写形状は半球状となるが、温度が高くなるに従い円柱状へと変化している。

## 5. その他のマイクロ・ナノ成形技術

我々はPSマイクロスケールファイバーの  $\text{CO}_2$  物理発泡による多孔質体作製の研究を行っている<sup>11)</sup>。熔融紡糸により作製した直径  $10, 15, 20 \mu\text{m}$  のPS繊維を、圧力容器中で  $6.3 \sim 6.5\text{MPa}$  に  $\text{CO}_2$  で加圧し、PSのガラス転移温度

近傍 ( $\text{CO}_2$  含浸時の  $T_g = 25^\circ\text{C}$ ) において、一気に減圧しPSを微細発泡させた。減圧速度が速いほど、またPS繊維径が細いほど、微細な発泡セルが形成される傾向があることが分かった。繊維径  $10 \mu\text{m}$ 、減圧速度  $3\text{MPa}/\text{min}$  の条件で、セル直径  $50\text{nm}$  の微細発泡セルの作製に成功している (図14)。

また、我々は金属の微細加工技術を応用した金属と樹脂の異種材接合に関する研究も行っている。アルミニウム表面に深さ  $100 \mu\text{m}$ 、溝幅  $30 \mu\text{m}$ 、ピッチ間隔  $200 \mu\text{m}$  のマイクロスケールの格子パターンをレーザーアブレーション技術により形成させ、そのアルミニウム表面と樹脂 (PBT/GF, PS, ABS) との接合強度に関する研究を行った<sup>12)</sup>。アルミニウムと樹脂の接合は、射出成形機の金型にアルミニウムをあらかじめセットし、熔融した樹脂とアルミニウムとを成形接着により行った (アルミニウム/樹脂の接合界面: 幅  $5.5\text{mm}$   $\times$  長さ  $3.0\text{mm}$ )。アルミニウム表面構造へのGF強化PBTの充てん特性に与える射出成形条件 (金型、樹脂温度) の影響について調査を行った。成形接着後に水酸化ナトリウム水溶液によりアルミニウムのみを溶解させ、アルミニウム微細構造への樹脂充てん挙動の確認を行った結果、射出成形における

金型温度が高く、高ノズル温度の条件では、樹脂がアルミ表面の隅々まで充てんし、微細な形状が転写されていることが確認できる。また、ノズル温度が高いほど、樹脂/アルミニウムの接合強度が強くなり、より高い引張り荷重に耐えられることが分かった。

## 6. マイクロ・ナノモルディング技術の技術動向と将来展望

マイクロ・ナノモルディング技術は、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、中国からの報告が多いと感じられる。研究環境の整備や潤沢な研究費により、最先端の研究装置を導入し、研究を行っている。

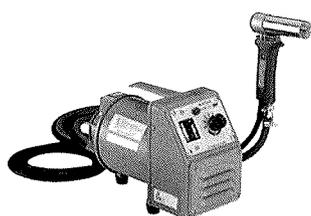
プラスチックを用いたマイクロ・ナノモルディングの研究の多くは、プラスチックの高い成形性（形状自由度）、連続成形性を生かし、既存の技術よりいかに、シンプルな工程で、短時間で、環境にやさしい技術を開発するかを目的にしているように見受けられ、今後の研究の発展に期待したい。

特に、マイクロ・ナノスケールの精密転写成形加工を可能とする材料、新たな金型加工、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、観察技術などの発展、各要素技術での最適化や、その技術の複合化、融合化などの研究の発展に期待したい。

### 参考文献

- 1) J.J.Hernandez, M.A.Monclus, I.Navarro-Baena, F.Vicla, J.M.Molina-Aldareguia, I.Rodriguez, "Multifunctional Nano-engineered Polymer Surfaces with Enhanced Mechanical Resistance and Superhydrophobicity," *Science Report*, 7, 43450 (Mar. 2017).
- 2) J.Li, W.Zhang, Y.Song, W.Yin, T.Zhang, "Template Transfer Nanoimprint for Uniform Nanopores and Nanopoles," *Journal of Nanomaterials*, 9354364 (2016).
- 3) P.Muanchan, S.Suzuki, T.Kyotani, H.Ito, "One-dimensional polymer nanofiber arrays with high aspect ratio obtained by thermal nanoimprint method," *Polymer Engineering and Science*, 57 (2), 214 (2017).
- 4) D.Chu, A.Nemoto, H.Ito, "Biomimetic superhydrophobic polymer surfaces by replication of hierarchical structures fabricated using precision tooling machine and anodized aluminum oxidation," *Microsystem Technologies*, 21, 123 (2015).
- 5) J.W.Kim, B.Chmielak, H.Lereh, U.Plachetka, "Fabrication of photonic integrated circuits in silicon nitride using substrate conformal imprint lithography," *Microelectronic Engineering*, 176, 11 (2017).
- 6) A.Fernandez, J.Media, C.Benkel, M.Guttman, B.Bilenberg, L.H.Thamdrup, T.Nielsen, C.M.S.Torres, N.Kehagias, "Residual layer-free Reverse Nanoimprint Lithography on silicon and metal-coated substrates," *Microelectronic Engineering*, 141, 56 (2015).
- 7) V.Kolli, C.Woidt, H.Hillmer, "Residual-layer-free 3D nanoimprint using hybrid soft templates," *Microelectronic Engineering*, 149, 159 (2016).
- 8) C.Lee, B.J.Kang, J.H.Oh, "High-resolution conductive patterns fabricated by inkjet printing and spin coating on wettability-controlled surfaces," *Thin Solid Films*, 616, 238 (2016).
- 9) J.Zhang, M.Sahli, J.-C.Gelin, T.Barriere, "Roll manufacturing of polymer microfluidic devices using a roll embossing process," *Sensors and Actuators A: Physical*, A230, 156 (2015).
- 10) C.-Y.Chang, M.-H.Tsai, "Development of a continuous roll-to-roll processing system for mass production of plastic optical film," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 25, 125014 (2015).
- 11) P.Muanchan, H.Ito, "Nanocellular foams confined within PS microfibers obtained by CO<sub>2</sub> batch foaming process," *Microsystem Technologies*, published online (April 2017).
- 12) K.Taki, S.Nakamura, T.Takayama, A.Nemoto, H.Ito, "Direct joining of a laser-ablated metal surface and polymers by precise injection molding," *Microsystem Technologies*, 22 (1), 31 (2016).

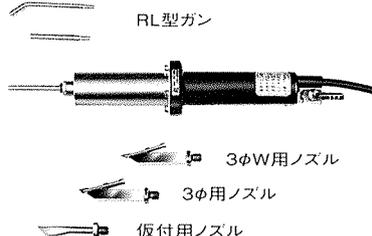
## ニュースーパー300型 ホットジェット



### ロータリーブローア

- 無注油式にて手数が掛りません
- 熱風中に油が混入しません
- 連続長時間使用に耐えます
- 出張作業にも工場使用にも便利です
- 故障がなく長寿命です

## 高速度溶接機



- 溶接のスピードアップが計れます。
- 特にポリオレフィン系の樹脂、半硬質塩化ビニールの溶接にはより一層の効果を発揮します。

製造元

<http://www.fujimpulse.co.jp>  
 **富士インパルス株式会社**

本社 〒561-0834 大阪府豊中市庄内栄町4-23-18 TEL.(06)6335-1663 FAX.(06)6335-1828  
 東日本ショールーム 〒270-0163 千葉県流山市南流山2-27-6 TEL.(04)7157-7511 FAX.(04)7157-7512  
**富士インパルス販売(株)** TEL.(04)7178-6402 FAX.(04)7150-0905