

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 3 日現在

機関番号	13904
研究種目	挑戦的萌芽研究
研究期間	2011～2012
課題番号	23656103
研究課題名（和文）	マイクロニードルアレイ工具を用いた高品位・高能率マイクロ穴加工技術の開発
研究課題名（英文）	Development of High-Quality and High-Throughput Micro-Hole Processing Using Hollow Microneedle Array
研究代表者	
	柴田 隆行(SHIBATA TAKAYUKI)
	豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授
	研究者番号：10235575

研究成果の概要（和文）：中空構造を有するマイクロニードルアレイ工具を用いた熱インプリント応用技術によって、様々な樹脂フィルムに最小寸法 10 $\mu$ m 程度の高品位・高精度なスルーホール（貫通穴）を極めて高能率に加工する新規なマイクロ穴加工技術の開発を行った。本提案技術によって、円形断面に限らず、任意の幾何学形状をもった貫通穴（三角形、四角形、星型など）の形成も可能となった。

研究成果の概要（英文）：A novel thermal imprinting technique has been developed to enable the high-throughput fabrication of through holes with a minimum feature of a few tens of micrometers in a wide variety of polymers with high quality and precision by using an array of out-of-plane, hollow microneedles as an imprint tool. This technique can also be applicable to the formation of through holes with almost any non-circular cross-sections (triangle, square, star-shaped holes, etc.) as well as circular ones.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：ナノ・マイクロ加工，マイクロ穴加工，熱インプリント，マイクロニードルアレイ，MEMS

## 1. 研究開始当初の背景

今日、製造業のグローバル化によって、従来型の「ものづくり」から新たな価値を創成する「ことづくり」への転換が求められている。すなわち、作り手の立場から製品の「機能的価値」（技術スペックや高度な機能など）を追求し、高品位・低コストの製品をいかに製造するのかといったプロセス・イノベーション（How to make）から、消費者の立場に立って「意味的価値」（人々や社会の潜在ニーズなど）を提供するプロダクト・イノベーション（What to make）への変革が求められており、持続的発展可能な日本の産業構造

を再建する上で重要な課題となっている。しかし、新たな製品を開発するためには、誰にも真似のできない『コア技術＝強み』をもつことが前提条件となる。したがって、我が国の経済社会の基盤である先端技術産業を将来的にも国際競争力のあるものとするためには、日本が得意とする“ものづくり技術”（製造技術や生産技術）をさらに進化・発展させることも極めて重要な課題である。

## 2. 研究の目的

本研究は、申請者の独自技術によって作製した中空構造を有するマイクロニードルア

レイ工具を用いた熱インプリント応用技術によって、様々な樹脂フィルムに最小寸法  $10\mu\text{m}$  程度の高品位・高精度なスルーホール（貫通穴）を極めて高効率に形成できる新規なマイクロ穴加工技術の開発を目的として実施した。

### 3. 研究の方法

本研究では、①微小荷重変動測定機能付き穴加工装置の開発、②樹脂フィルムへの最小直径  $10\mu\text{m}$  程度の貫通穴加工の実現、③穴加工時の振動援用効果の検証、④異形断面（三角形、四角形、星型など）を有する貫通穴加工の実証、⑤金属製マイクロニードルアレイ工具の作製プロセスの確立を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) マイクロ穴加工装置の開発

穴加工実験の再現性の向上ならびに加工条件の最適化を図るために、微小荷重変動測定機能付き穴加工装置を試作した（図1および図2）。本加工装置は、ステッピングモータ（最小送り速度  $8\mu\text{m/s}$ ）によって工具送りを制御でき、ロードセル（分解能  $0.01\text{N}$ ）によって加工過程の微小な荷重変化のインプロセス計測が可能となっている。また、工具側に piezo 素子（振幅  $2.2\mu\text{m}/100\text{V}$ ）を取り付け、ファンクションジェネレータの入力信号を piezo ドライバで増幅して piezo 素子を駆動させることで、穴加工時に振動を付加することも可能となっている。

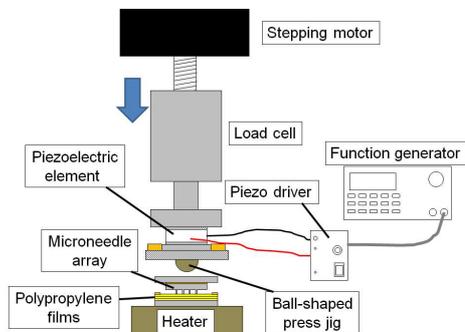


図1 微小荷重変動測定機能付き穴加工装置の概略図

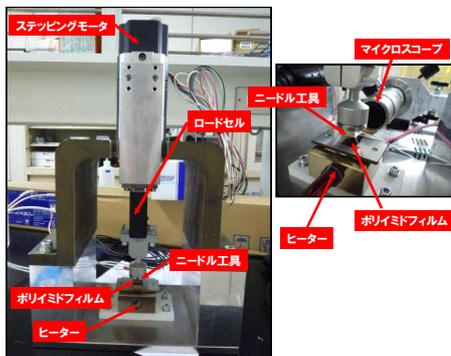


図2 微小荷重変動測定機能付き穴加工装置の外観写真

#### (2) 樹脂フィルムへのマイクロ穴加工

MEMS 技術によって作製した極微小な中空構造を有する酸化シリコン ( $\text{SiO}_2$ ) 製マイクロニードルアレイ工具を用いて、ポリイミド（カプトン 150EN-A、厚さ  $37.5\mu\text{m}$ ）フィルムへの穴加工を行った。図3に使用したマイクロニードルアレイ工具の一例を示す。外径  $35.5\mu\text{m}$ 、内径  $32.2\mu\text{m}$ 、長さ  $97\mu\text{m}$  のマイクロニードルがピッチ  $80\mu\text{m}$  で規則正しく配列されている。

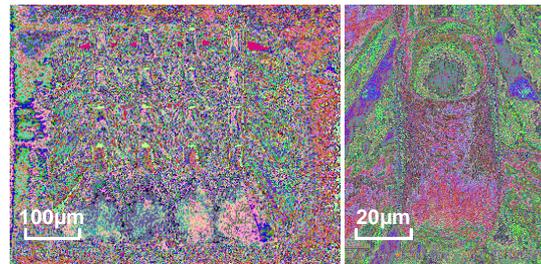


図3  $\text{SiO}_2$  製マイクロニードルアレイ工具（直径  $35\mu\text{m}$ ）

図4にポリイミド（PI）フィルムへの穴加工（加工条件：加熱温度  $350^\circ\text{C}$ 、荷重  $6\text{N}$ ）を行った結果の一例を示す（工具は図3のもの使用）。図のように、加工穴の入口側と出口側のいずれにも加工欠陥（バリなど）が認められない高品位な穴加工が実現できていることがわかる。また、加工穴内壁の表面性状も極めて平滑となっている。

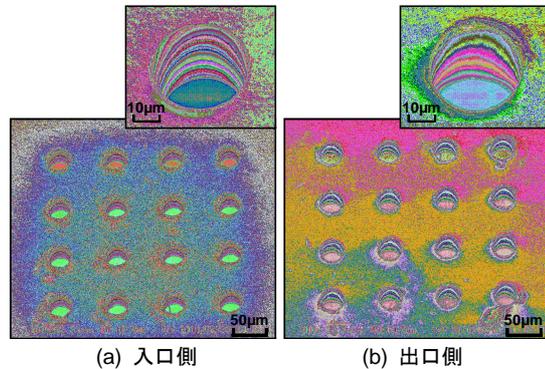
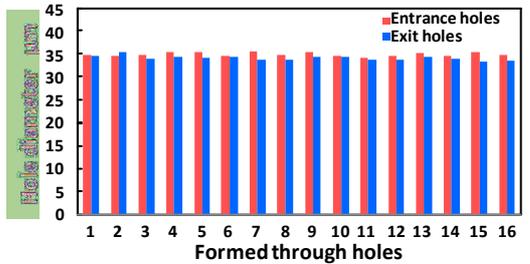


図4 ポリイミドフィルムに形成した貫通穴（直径  $35\mu\text{m}$ ）

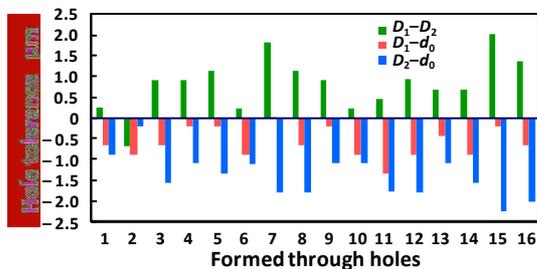
図5(a)に16個の加工穴の直径の測定結果を示す。加工穴径の平均値は、入口側  $34.9\mu\text{m}$ （標準偏差  $\text{SD}=0.4\mu\text{m}$ ）、出口側  $34.1\mu\text{m}$ （ $\text{SD}=0.5\mu\text{m}$ ）であり、加工穴径のバラツキが小さく、高精度なスルーホールの形成が実現されていることがわかる。さらに、(b)に示すように、入口側 ( $D_1$ ) と出口側 ( $D_2$ ) の直径差は最大でも  $2\mu\text{m}$  程度（平均  $0.8\mu\text{m}$ ）であり、加工穴の断面形状はほぼ垂直となっている。また、ニードル外径 ( $d_0$ ) に対して加工穴径はわずかに小さくなる傾向となったが、これは、加工後の PI フィルムの熱収縮によるものと思われる。しかし、ニードル外径に対す

る穴径差(平均値)は、入口側で $-0.6\mu\text{m}$  ( $=D_1-d_0$ )、出口側で $-1.4\mu\text{m}$  ( $=D_2-d_0$ )と小さく、ニードル外径とほぼ同程度の加工穴が形成されている。

以上のように、通常の樹脂材料に比べて極めて高強度・耐熱性を有する PI フィルムの穴加工が実現できたことは、本提案技術が様々な樹脂フィルム材料の微細穴加工に適用できることを示す結果である。



(a) 加工穴直径



(b) 穴加工精度

図5 形成した貫通穴の精度評価(穴直径 35 $\mu\text{m}$ )

次に、直径 10 $\mu\text{m}$  程度の貫通穴加工を試みた。図 6 に使用した SiO<sub>2</sub> 製マイクロニードルアレイ工具 (4 $\times$ 4 アレイ、ピッチ 80 $\mu\text{m}$ ) を示す。ニードル外径 10.9 $\mu\text{m}$ 、内径 8.9 $\mu\text{m}$ 、厚さ 1.0 $\mu\text{m}$ 、長さ 104 $\mu\text{m}$  である。

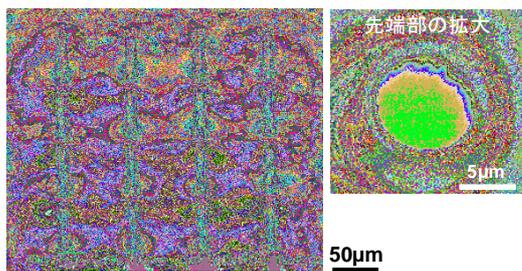


図6 SiO<sub>2</sub> 製マイクロニードルアレイ工具(直径 10 $\mu\text{m}$ )

図 7 に PI フィルムへの貫通穴加工結果を示す(加熱温度 350 $^{\circ}\text{C}$ 、荷重 6N)。図のように直径 10 $\mu\text{m}$  程度の貫通穴が形成されており、加工穴周辺部にはバリが認められない高品位な穴加工が実現されている。

図 8 に形成した 16 個の貫通穴直径の精度を示す。加工穴径(平均値)は、入口側  $D_1=12.9\mu\text{m}$  (SD=0.1 $\mu\text{m}$ )、出口側  $D_2=12.3\mu\text{m}$

(SD=0.1 $\mu\text{m}$ ) であり、両者の直径がほぼ等しく、加工穴の断面形状はほぼ垂直であった。また、加工穴径のバラツキ(標準偏差)も極めて小さい。さらに、ニードル工具の外径に対する穴径差(平均値)は、入口側で 2.0 $\mu\text{m}$  ( $=D_1-d_0$ )、出口側で 1.4 $\mu\text{m}$  ( $=D_2-d_0$ ) となっていた。このように、直径 10 $\mu\text{m}$  程度のマイクロ穴加工においても工具外径とほぼ同程度の高精度な貫通穴加工が実現できることが実証された。

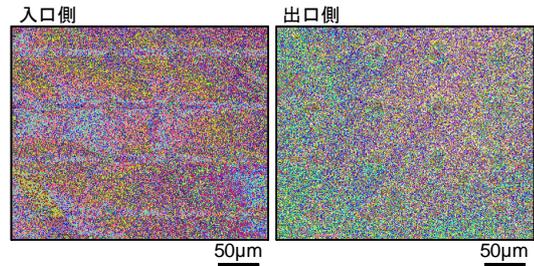


図7 ポリイミドフィルムに形成した貫通穴(直径 10 $\mu\text{m}$ )

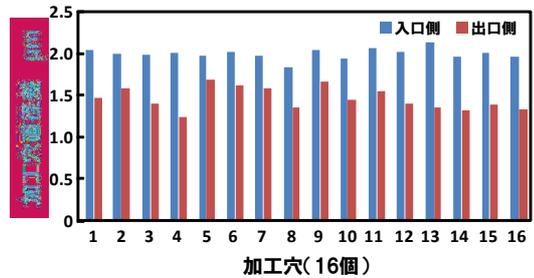
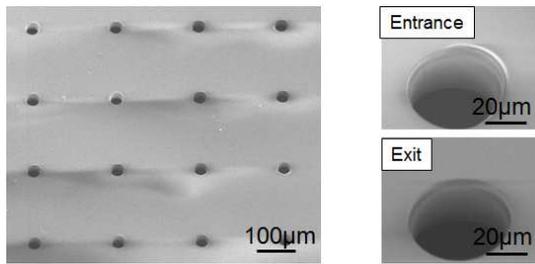


図8 形成した貫通穴の精度評価(穴直径 10 $\mu\text{m}$ )

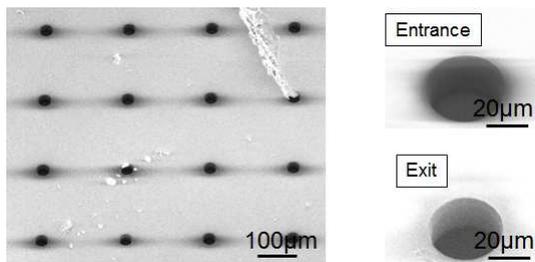
### (3) 振動援用マイクロ穴加工

図 9 にポリプロピレン (PP) フィルムへの穴加工結果を示す。PP フィルムは、市販の粘着テープ (3M 社製 Scotch 透明粘着テープ CC1210-D-J、厚さ 35 $\mu\text{m}$ ) の粘着剤をアセトンで除去したものを使用した。加工条件は、加熱温度 120 $^{\circ}\text{C}$ 、工具送り速度 80 $\mu\text{m}/\text{s}$  (0.1 $\mu\text{m}/\text{step}$ )、押込み量 400 $\mu\text{m}$  とした。(a) は振動援用なしの場合であり、加工穴(入口側)の周辺にわずかにバリが認められる。一方、振動援用(周波数 10kHz、振幅 1 $\mu\text{m}$ )を行った場合(図(b))には、加工穴周辺にバリは認められず、入口側と出口側ともにエッジ品質が向上している。また、加工穴径の平均値(加工穴 16 個)は、振動なしの場合(工具外径 34.7 $\mu\text{m}$ )は、入口側 34.1 $\mu\text{m}$  (SD=0.2 $\mu\text{m}$ )、出口側 33.4 $\mu\text{m}$  (SD=0.2 $\mu\text{m}$ )、振動ありの場合(工具外径 34.9 $\mu\text{m}$ )は、入口側 33.3 $\mu\text{m}$  (SD=0.1 $\mu\text{m}$ )、出口側 33.0 $\mu\text{m}$  (SD=0.1 $\mu\text{m}$ ) であり、振動援用を行った方が加工穴直径のバラツキ(標準偏差)が小さくなった。さらに、入口側 ( $D_1$ ) と出口側 ( $D_2$ ) の直径差は、振動なしの場合の平均値 0.7 $\mu\text{m}$  (SD=0.2 $\mu\text{m}$ ) に対して、振動ありでは

0.3 $\mu\text{m}$  (SD=0.1 $\mu\text{m}$ )と減少しており、振動援用を行うことで加工穴の垂直度も向上した。

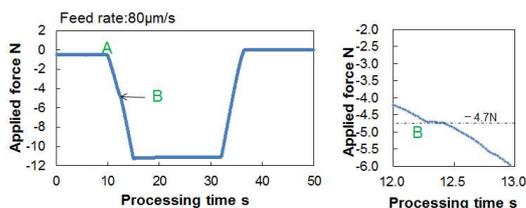


(a) 振動なし

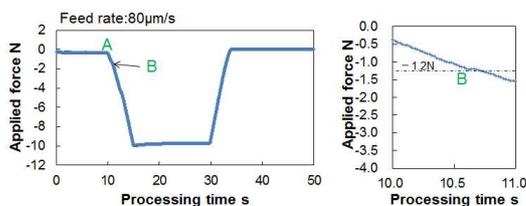


(b) 振動援用(周波数 10kHz, 振幅 1 $\mu\text{m}$ )

図9 ポリプロピレンに形成した貫通穴(直径 35 $\mu\text{m}$ )



(a) 振動なし



(b) 振動援用(周波数 10kHz, 振幅 1 $\mu\text{m}$ )

図10 穴加工時の荷重曲線

図10に穴加工を行ったときの荷重曲線を示す。なお、工具を固定するために予め24 $\mu\text{m}$ 押し込んだ位置から荷重を印加した。図中A点でPPフィルム表面に荷重(圧縮荷重)が印加され始め、図中B点で荷重増加が一瞬緩やかになっている。この時点で工具の先端部分がフィルム表面に挿入(せん断)されたものと考えられる。振動なしでは、荷重4.7N(工具1本当当たりの応力230MPa、押し込み量190 $\mu\text{m}$ )であるのに対し、振動を付加することで荷重が1.2N(60MPa、押し込み量50 $\mu\text{m}$ )と大幅に減少している。これは、振動付加によってPPフィルムの変形抵抗が大きくなり、

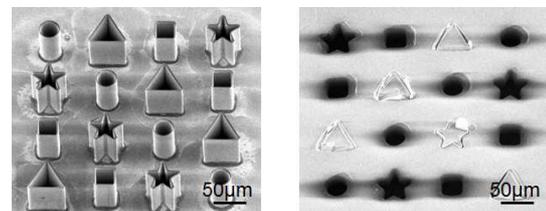
力をより効率よく伝えられるようになったためと思われる。これは、加工が開始される押し込み量(フィルムの変形量に対応)の大幅な減少や、振動なしではPPフィルム1枚に対して、振動ありではPPフィルム2枚に貫通穴が形成されたことから示唆される。

#### (4) 異形断面をもつ貫通穴加工

本提案プロセスでは、フォトマスクのデザインを変更することで、種々の断面形状をもつマイクロ工具の作製が可能である。その一例を図11(a)に示す。この異形ニードル工具(SiO<sub>2</sub>厚さ2.3 $\mu\text{m}$ 、長さ76 $\mu\text{m}$ )を使用してPPフィルムへの穴加工を行った結果を(b)に示す。一部貫通穴が形成されていない箇所もあるが、円形だけでなく正方形や星形のような異形断面をもつ貫通穴(外形寸法50 $\mu\text{m}$ 程度)を高精度に加工できることが実証された。

図12に星形の貫通穴の拡大写真を示す。穴の入口側と出口側ともにエッジ品質に優れた複雑形状の貫通穴が形成できていることがわかる。これは、従来技術とは異なる本提案技術の大きな特徴の一つである。

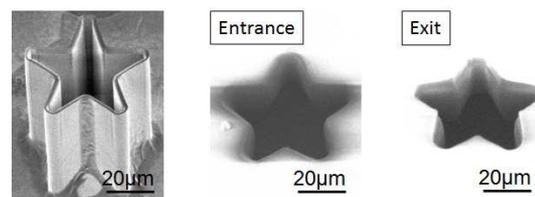
以上の結果は、本提案の加工技術が円形断面以外の複雑形状をもつ微細穴の高品位・高精度・高効率加工を可能とする独創的な機能性樹脂フィルム創成技術となり得ることを示す結果である。



(a) 異形断面工具

(b) PPに形成した貫通穴

図11 異形断面を有するマイクロ穴加工



(a) 異形断面工具

(b) PPに形成した貫通穴

図12 星型断面を有する貫通穴

#### (5) 金属製マイクロニードルアレイ工具の作製プロセスの確立

本提案技術は、原理上、加工時間は加工穴数に依存せず、極めて量産性の高い加工法と言える。しかしながら、製造技術としての実用化を図る上では、脆性材料であるSiO<sub>2</sub>製マイクロニードルアレイの利用は、工具としての耐久性(折損)に問題があると考えられる。そこで、高硬度・高靱性に優れたNi製

のマイクロニードルアレイの作製プロセスを検討した。

図 13 に提案する作製プロセスの概要を示す。Si (厚さ 300 $\mu\text{m}$ ) の深堀エッチング (DRIE) によって微小孔を形成し、その表面に熱酸化によって SiO<sub>2</sub> 膜を形成する (図 (b))。次に、この微小孔をモールドとし、無電解 Ni めっきを行うためのパラジウム (Pd) 触媒核を Si 基板表面に付与する。この際、基板上面にも Pd 触媒核が一様に付与されるため、反応性イオンエッチング (RIE) によって、Si 基板上面の SiO<sub>2</sub> 表面層を除去することで、Pd 触媒核を取り除く (図 (d))。次に、Si 基板表面に無電解 Ni めっきを行うことで、微小孔内壁と Si 基板下面に位置選択的な Ni 膜の析出を行う (図 (e))。Si 表面の SiO<sub>2</sub> 膜を完全に除去した後、水酸化テトラメチルアンモニウム (TMAH) 水溶液を用いて、Si のみを選択的に除去することで、Ni/SiO<sub>2</sub> ニードル構造を形成する (図 (f))。最後に、Ni 膜上の SiO<sub>2</sub> 膜を除去することで Ni 製マイクロニードルアレイを作製する (図中には記載していない)。

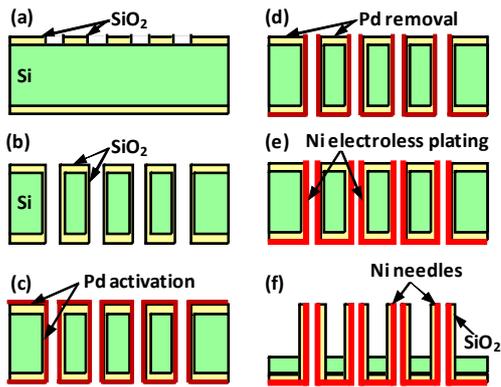


図 13 Ni 製マイクロニードルアレイ工具の作製プロセス

提案したプロセスによって作製した Ni 製マイクロニードルアレイ工具の一例を図 14 に示す。無電解 Ni めっきは、温度 75 $\pm$ 2 $^{\circ}\text{C}$  (pH4.32) の条件で 30min 行った。図のように、中空構造を有する Ni 製マイクロニードルアレイ工具 (外径 47 $\mu\text{m}$ , 内径 42 $\mu\text{m}$ , 長さ 105 $\mu\text{m}$ , 4 $\times$ 4 アレイ, ピッチ 80 $\mu\text{m}$ ) の作製が可能となった。なお、皮膜の内部応力を低減し、めっき膜の厚付けを実現するために開発された無電解 Ni めっき液 (提供元: メルテックス) を用いることで、厚さ 2.7 $\mu\text{m}$  の Ni 膜を剥離やき裂を生じることなく形成することができるようになった。このように、RIE によって Pd 触媒核を除去することで、位置選択的な無電解 Ni めっきが可能となった。

また、SiO<sub>2</sub> 製マイクロニードルアレイ工具と同様に、フォトマスクのデザインを変更することで、種々の断面形状をもつ工具の作製

が可能である。図 15 に作製例を示す。図のように正方形断面や星型形状をもつ Ni 製マイクロニードルアレイ工具 (長さ 78 $\mu\text{m}$ , Ni 厚さ 5 $\mu\text{m}$ ) の作製も可能である。

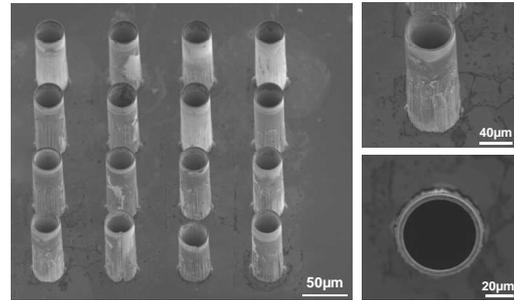


図 14 Ni 製マイクロニードルアレイ工具 (直径 50 $\mu\text{m}$ )

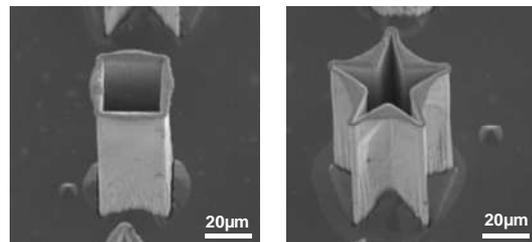


図 15 異形断面を有する Ni 製マイクロニードルアレイ工具

#### (6) まとめ

樹脂フィルムに微細な貫通穴を形成する従来技術としては、プレス加工、切削加工、レーザ加工などがある。プレス加工は 1 回の工程で多数の貫通穴を同時に形成できる生産性に優れた工法である。しかし、パンチとダイの高精度な位置合わせが必要 (1/100mm 程度の精度) であり、かつ両者の間隙 (クリアランス) を数  $\mu\text{m}$  程度に管理する必要があるため微細な穴加工への適用は困難である。現状では、直径 100 $\mu\text{m}$  以下の穴加工には、生産性の観点から、レーザ加工が採用されている。しかし、実用レベルでは貫通穴の直径は 30 $\mu\text{m}$  程度であり、さらに、レーザ加工後の穴周辺にはスミア (樹脂の残渣) が発生し、化学薬品を用いた溶解除去工程が別途必要となる。

本提案技術は、MEMS 技術によって作製した独自の中空状ニードルからなる工具を使用することで、単純な中空構造 (円柱構造) の工具と比べて、加工点での接触面積が小さくなり、被加工物に効率よくせん断変形を起こさせることができる革新的なマイクロ穴加工技術である。このため、従来技術と大きく異なる特徴は、①様々な樹脂フィルム上に最小寸法が数十  $\mu\text{m}$  程度の微細な貫通穴を極めて高能率 (加工時間は加工穴数に依存しない) に加工でき、②貫通穴の入口側と出口側の加工欠陥 (バリやカケ) の発生がなく、加工穴内壁の表面粗さや熱影響が小さな高品位な貫通穴を加工でき、③樹脂フィルム表面

に対してほぼ垂直な断面形状をもち、かつ寸法・形状精度が極めて高い貫通穴を加工できる。さらに、④貫通穴の断面形状は円形に限らず、任意の幾何学的形状（正方形、三角形などの横断面形状）をもった貫通穴の加工も可能となる。

本提案技術は、特に、可撓性ポリイミドフィルムの両面に銅配線パターンを形成した2層構造のフレキシブル配線板（FPC）の高精細化・高密度化に必要となる極微細なスルーホール形成を可能とするものであり、電子機器（携帯電話、薄型ディスプレイなど）の軽量化・小型化・薄型化のための将来の高密度実装化（HDI）のキーテクノロジーとなり得る。しかも、原理上、加工時間は加工穴数には依存せず、極めて量産性の高い技術である。さらに、穴形状とサイズを人為的に制御した多孔質フィルムの作製や、形成した貫通穴部に他の樹脂材料や金属・セラミックスなどを埋め込んだ新規な機能性樹脂フィルムの創成などへの応用も期待できる。このため、ものづくりにおける我が国の国際的優位性を将来的にも確保し、プロダクト・イノベーション創出を支援する独創的な基盤技術の一つとして高いポテンシャルを秘めている。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計1件）

- (1) T. Shibata, S. Yukizono, T. Kawashima, M. Nagai, T. Kubota, M. Mita, Modified Imprinting Process Using Hollow Microneedle Array for Forming Through Holes in Polymers, Microelectron. Eng., 査読有, 88, 2011, 2121-2125  
DOI : 10.1016/j.mee.2010.12.048

〔学会発表〕（計4件）

- (1) 三苫祐輝, 永井萌土, 川島貴弘, 柴田隆行, 久保田俊夫, 御田 護, 西川忠寛, マイクロニードルアレイを用いた高品位・高能率マイクロ穴加工技術の開発（第4報）－穴加工時の振動援用効果検討－, 2013年度精密工学会春季大会学術講演会, 2013年3月15日, 東京工業大学（東京）
- (2) 柴田隆行（招待講演）, マスクレス微細加工技術と細胞機能解析用 MEMS プラットフォーム, 第31回マイクロファブリケーションシンポジウム（理研シンポジウム）, 2012年11月1日, 理化学研究所（和光市）
- (3) T. Shibata, J. Yoshida, M. Nagai, T. Kawashima, T. Kubota, M. Mita, A Novel

Thermal Imprinting Technique for Forming Through Holes in Polymers by Using Hollow Microneedle Array, The 37th International Conference on Micro and Nano Engineering 2011 (MNE 2011), 2011年9月20日, Berliner Congress Center (Berlin, Germany)

- (4) 吉田隼兵, 永井萌土, 川島貴弘, 柴田隆行, 久保田俊夫, 御田 護, マイクロニードルアレイを用いた高品位・高能率マイクロ穴加工技術の開発（第3報）－樹脂フィルムへの貫通穴加工過程の評価－, 2011年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2011年9月21日, 金沢大学（金沢市）

〔その他〕

ホームページ等

<http://mems.me.tut.ac.jp/>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

柴田 隆行 (SHIBATA TAKAYUKI)  
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：10235575

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし