放射光ドライエッチングによる テフロンのマイクロ加工*

加藤 隆 典**

Teflon Micromachining by SR Dry Etching*

by KATOH Takanori**

キーワード 放射 (SR) 光, テフロンPTFE, マイクロマシン, ドライエッチング, 高アスペクト比

1. はじめに

シンクロトロン放射光 (以後, 放射光) を用いた高アスペクト比 (構造体の高さの表面最小加工幅に対する比が10以上) マイクロ加工 (微細加工) 技術は, 21世紀のマイクロマシン実用化に向けて, 機械分野だけでなく, 物理学, 化学, 医学等多くの分野で活発な研究が行われている, キーテクノロジーの一つである。

本稿では, 新たに開発した放射光ドライエッチングを利用する高アスペクト比マイクロ加工技術について, 特にテフロン PTFE (polytetrafluoroethylene) を中心に述べる。

2. 高アスペクト比マイクロ加工

これまでに, 高さ数百 mm で表面最小加工幅数 mm の微細構造を持つマイクロパーツは, LIGA (Lithographie, Galvanoformung, Abformung) プロセスによって作製可能となってきた^{1,2)}。我々も既に, 工業用小型放射光源 AURORA-2S (図1) を用いた LIGA プロセス技術を開発し³⁾, パーツ試作・製作 (量産対応) を始めている。LIGAでは, 放射光を用いた深いX線リソグラフィーと電鍍金型を用いた成形加工によってマイクロパーツを作製する。しかしながら, 電子, 医療分野において有望な材料であるフッ素系高分子や光通信, マイクロレーザー等で必要な材料である光学結晶に対しては, このプロセスが適用できない。

特にフッ素系高分子の一つであるテフロン PTFE は, 電氣的, 熱的, 化学的特性に優れており, 様々な分野でのマイクロパーツ作製にとって有望な材料の一つである。

が, 従来, 数百 μm の高さで数十 μm の幅を持った構造体を作製する技術はなかった。例えば, レーザアブレーション加工を用いたとしても, PTFE は赤外 (IR) から紫外 (UV) 領域でほとんど吸収がないため, 高アスペクト比のマイクロパーツ作製は困難であると考えられている^{4,5)}。

我々は, 放射光の PTFE への直接照射によって反応性ガス無しで極めて効率よく分解 (ドライエッチング) できることを見出した。放射光による PTFE の分解は, レーザの場合の様にモノマーが生成される熱的な反応ではなく, 飽和したフロロカーボンが生成される非熱的な光化学反応に基づいていることも既に明らかにした^{6,8)}。そして, この放射光ドライエッチングを高アスペクト比マイクロ加工へ適用してきた。表1に種々の材料に対してのエッチング結果をまとめて示す。加工時には, 分解速度 (エッチング速度) を向上させるために適当な温度に加工対象物を加熱している。これまでに, 10 μm 以下の表面最小加工部が得られ, 高速度 (100 $\mu\text{m}/\text{min}$ 程度), 高アスペクト比 (50程度) でかつ深い (1000 μm 程度) マイクロ加工が可能となってきた。

図1 田無製造所に設置の小型放射光源 AURORA-2S (E= 700 MeV, $\lambda_c=1.4$ nm)

*原稿受付 平成14年2月1日

**住友重機械工業 (株) Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

た。

3. 放射光ドライエッチングの応用 —TIEGA—

ここでは、表1中で、特に加工速度の早い PTFE を材料にし、放射光ドライエッチングと電鍍技術を組み合わせで開発したマイクロパーツ作製が可能で高アスペクト比マイクロ加工プロセスである TIEGA (Teflon included etching galvanicforming) について述べる。

TIEGA プロセスについて基本的な工程を図2に示した。第1段階では、放射光によりマスクの吸収体パターンを導電性基板上的 PTFE (厚さ数百～数千 μm) に照射する。照射部のみ選択的にエッチングされ、マスク吸収体パターンと同一形状の PTFE 微細構造体が形成される(図3, 4)。材料としての特徴を生かして、この段階でマイクロマシン製品とする場合もある。マイクロマシンへの応用のために必要な金属製微細構造体を作製するため、PTFE 微細構造体を型に導電性基板を電極として電鍍 (Ni, Cu 等) を行い、電鍍部以外の PTFE を除去する (放

射光ドライエッチングあるいは直接剥離)。作製された金属微細構造体を鋳型として用いプラスチック微細構造体を成形することで、プラスチック製マイクロパーツの大量生産が可能となる。

図5に、TIEGA を用いた金属微細構造体作製例を示す。直径または一辺 80 μm の円形または四角の形状を有したメタルマスクを用いて Cu 基板上の厚み 500 μm の PTFE に放射光エッチングを行い、加工部を型に基板を電極として電鍍を行った後、PTFE 部を再び放射光を用いて除去することで Ni 製微細構造体を得られる。また、PTFE 微細構造体から電鍍部を直接剥離することでも Ni 製微細構造体を得られる。これまでに、TIEGA プロセスによってアスペクト比25程度の Ni 製高アスペクト比金属微細構造体を得られている。

TIEGA プロセスの大きな利点は、工業用小型放射光源の利用が適していることである。また、TIEGA プロセスは LIGA プロセスと類似の工程をとるが、原理的に次のような長所を持つ。

—エッチングプロセスであるために、一工程で電鍍型

図2 TIEGA プロセスによる微細構造体製作の基本工程

図3 高アスペクト比 PTFE 微細構造体(高さ 500 μm , 幅 20 μm)

図4 PTFE 製 X 線集光レンズ⁹⁾

図5 高さ500 μm , 直径あるいは一辺 80 μm の Ni 製微細構造体

図6 架橋テフロン製マイクロギヤ

表1 種々の材料に対する放射光エッチング結果

加工材料	PTFE	PFA	FEP	NaCl	KBr	LiF
加工時の材料温度 (°C)	100-200	150	100	400-500	500	500
放射光の光子エネルギー (keV)	0.4-5.5	0.4-5.5	0.4-5.5	white*	white	white
平均露光電流値 (mA)	250	290	275	247	176	280
エッチング速度 (μm/min)	60	36	17	17	33	11
最大加工深さ (μm)	1500	250	250	1000	500	640
最大アスペクト比	75	12	12	50	6	6

* white light without filters

用の微細構造体を作製することができる (LIGA プロセスでは露光, 現像の二工程必要)。

- エッチングはドライプロセスであるために, ウエットプロセス特有の問題点である溶液の張力に起因する高アスペクト比パターンの倒壊等が回避できる。
- エッチング速度が速いために, 放射光利用コストを削減できる。
- 加工速度が速い (X線照射時間が短い) ために, LIGA プロセスで用いるような高コントラストの高額なX線マスクが必要でない。

また, 最近のトピックスとして, テフロン PTFE の架橋体¹⁰⁾へのマイクロ加工にも TIEGA が利用できる点を特記しておく (図6)¹¹⁾。架橋テフロンは, テフロン PTFE を融点近傍で電子線照射により架橋させた材料であり, テフロン PTFE の化学的・物理的特性はそのまま, 耐放射線特性および機械特性 (耐摩耗性等) が大幅に改善し, 光学的にも透明 (IR から UV 領域) である。従って, 原子力施設や宇宙環境等または, 摺動部でのマイクロマシン応用あるいは光学マイクロ部品としての応用展開も考えられる。

4. おわりに

本稿では, 放射光ドライエッチングを用いた高アスペクト比マイクロ加工に関して, テフロン PTFE の加工及び電鍍との組み合わせによる TIEGA プロセスについて説明した。特に, テフロンのマイクロ加工については, その材料としての優れた特性から多分野での応用が開けるものと思われる。我々は, 例えば, 光源点から 3.5 m の地点で, 横幅 100 mm 以上の放射光を利用するなど

AURORA-2S を有効利用することで, すでに放射光によるマイクロ加工技術である LIGA/TIEGA による低コスト部品供給サービスを展開し始めている。今後, さらにこれから加工技術が広く普及しマイクロパーツ作製のための一般工業技術になることを期待している。

参考文献

1) E. W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner, D. Münchmeyer: Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofarming, and plastic moulding (LIGA Process), Microelectronic Engineering, 4 (1986), 35-56.

2) H. Guckel: Deep X-ray lithography for micromechanics and precision engineering, Rev. Sci. Instrum., 67 (1996), 1-5.

3) T. Hori and Y. Zhang: A compact warm ring for industrial applications, Synchrotron Radiation News, 13 (2000), 32-33.

4) 矢部 明, 新納弘之: 高分子材料とエキシマレーザ, 9 (1989), 5-15.

5) S. Küper, M. Stuke: Ablation of UV-transparent materials with femtosecond UV excimer laser pulses, Microelectronic Engineering, 9 (1989), 475-480.

6) 加藤隆典, 張 延平: シンクロトロン放射光誘起反応を用いたテフロンの微細加工及び薄膜形成, 電学論 C, 116 (1997), 1341-1347.

7) 加藤隆典: SR 反応加工, 精密工学会誌, 64 (1998), 1008-1011.

8) T. Katoh and Y. Zhang: Synchrotron radiation direct photo-etching of polymers and crystals for micromachining, J. Synchrotron Rad., 5 (1998), 1153-1156.

9) Y. Zhang, T. Katoh, Y. Kagoshima, J. Matsui and Y. Tsusaka: Focusing hard X-ray with a single lens, Jpn. J. Appl. Phys. 40 (2000), L75-77.

10) A. Oshima, Y. Tabata, H. Kudoh and T. Seguchi: Radiation induced crosslinking of polytetrafluoroethylene, Radiat. Phys. Chem. 45 (1995), 269-273.

11) T. Katoh, D. Yamaguchi, Y. Satoh, S. Ikeda, Y. Aoki, M. Washio and Y. Tabata: Microfabrication of crosslinked polytetrafluoroethylene using synchrotron radiation direct photo-etching, Appl. Surf. Sci., 186 (2002), 24-28.