519 切削加工によるガラスのマイクロファブリケーション

Micro Fabrication on Glasses in The Cutting Process

正 松村 隆(東電大), ○二宮誉史(東電大)

Takashi MATSUMURA, Tokyo Denki University. 2-2 Kanda Nishiki-cho, Tokyo;
Yoshifumi NINOMIYA, Tokyo Denki University

Cutting processes are discussed to fabricate micro patterns on glasses in this paper. The principle of glass milling is shown to machine the crack-free surface. The cutting tests with ball end mills are performed to verify that the milling mechanism is effective to machine the glass without brittle fracture. Based on the results, a machine tool is developed to fabricate micro-scale patterns. The machine tool has seven axes to machine materials with the tilted ball end mill. It is shown that the developed machine tool works well in some machining examples.

Key words: Milling, Ball End Mill, Micro Machining, Glass

1. まえがき

微量量のサンプルに対して生化学試験を行うためのマイクロ TAS(Total Analysis System)やマイクロアレイは、バイオメディカル分野におけるたんぱく質や DNA 解析の重要な検査基板であり、今後ますます高機能、多機能化が進むと言われている。このような基板は、ガラス等の表面に $0.1\mu\text{m}$ ~ $100\mu\text{m}$ 程度の溝や凹凸を有するものであり、従来はフッ酸によるエッチングで製造されていた。しかしフォトリソグラフィによるマスクの製造は多くの工程が必要であり、またフッ酸の取り扱いや廃液処理などの二次的な作業やコストが必要とされているため、多くの問題を抱えているのが現状である。このような背景を踏まえ、本研究ではボールエンドミルによるガラスの微細加工を試みた。本報では、まずエンドミルによるガラスの加工メカニズムについて議論する。次に開発した微細切削加工機とその加工事例を示す。

2. ガラスのエンドミル加工

図 1 はエンドミルによる溝加工において、工具軸方向から切れ刃の軌跡を示したものである。このようなエンドミルの切削過程では、切れ刃は材料に対して食いつきと離脱を繰り返す。そのため切れ刃一回転中の切削厚さは、点 A から点 B まで 0 から最大切削厚さまで増加し、その後は減少し点 C で 0 となる。同図(b)は現在着目している切れ刃と後続切れ刃の軌跡の干渉曲線を模式的に示したものである。ここでエンドミル切れ刃が仕上げ面を創成している過程は、A—A' と C—C' のみであり、それ以外は工具の送りにより後の切削で除去される。一方ガラスは $1\mu\text{m}$ 以下の切削厚さになると金属と同様の切りくずが生成され、脆性き裂が発生せずに加工できる⁽¹⁾。そこで A—A' と C—C' における切削厚さを $1\mu\text{m}$ 以下にすることで、脆性損傷のない加工面が得られる。なお実際には主軸の振れや工具のたわみなどがあり、切れ刃は同図のような理想的な軌跡を描くことはないが、切れ刃の食いつき部と離脱部近傍で仕上げ面を創成するメカニズムは同様であるため、回転数と送り速度を適切に設定すればガラスを延性的に加工できる。ボールエンドミルの加工では、図 1 の切れ刃軌跡における回転半径が切れ刃高さとともに大きくなる。したがって溝底部から溝上面まで上述のメ

(a) Undeformed chip thickness (b) Machined surface made by a rotating cutter

Fig. 2 Cutting operation with a tilted ball end mill

(a) Tilt angle 90° (b) Tilt angle, 45°
Fig. 3 Machined surface

カニズムにより仕上げ面が創成されるため、軸方向切込みが大きくても脆性損傷のない良好な加工面が得られる。ただし切れ刃底部は切れ刃の回転による切削速度が 0 であり、工具送りのみで切削が行われるため切削速度が低くなる。そこで図 2 のようにエンドミルを送り方向に傾け一定の切削速度を維持しながら切削を行う。図 3 はガラスの溝加工においてボールエンドミルを傾けずに切削した場合と送り方向に 45° 傾けて切削した場合の仕上げ面を比較したものであり、工具を傾斜させて切削をすることにより、良好な加工面が得

られることがわかる。

3. マイクロスケール加工機

ボールエンドミルによる溝加工において良好な加工面を得るためには、工具を送り方向に対して傾斜させる必要がある。そこで工具を傾けて任意の微細パターンを加工するために、図4の門型の7軸制御マイクロ・ナノスケール加工機を製作した。同機は図5(a)に示すテーブル側の駆動系として、分解能100nmのリニアモータによるX、Y方向の並進運動制御軸と、分解能0.0005°のサーボモータによるC軸まわりの回転制御軸を持っている。また同図(b)の工具側の駆動および姿勢制御系は、ステッピングモータによる分解能10nmのZ軸、分解能1μmのX'軸、分解能2μmのY'軸、分解能0.0012°のB軸を持っている。また本機はC軸の回転テーブル上にX軸、Y軸のテーブルを取り付けているが、これは所定の半径の円弧を任意の位置に加工するためである。一般にエンドミルの回転軸がZ軸に対して傾斜していなければ、X軸とY軸の同時制御により任意の微細溝が加工できる。例えば円弧の溝を所定の場所で配列する場合は、円弧中心の位置決めとX、Y同時制御による円弧切削で加工できる。一方本研究で対象とする加工様式のようにエンドミルを傾斜させる場合は、均一な加工面を得ることと工具の折損を防止するために、その送り可能な方向が図2の矢印で示した一方向に限定される。そのためX、Y同時制御による円弧切削ができない。そこでC軸の回転駆動により円弧を加工する。ここでX、Y軸のテーブル上にC軸の回転テーブルを取り付けると、X、Y軸の移動では円弧の半径が変わるのみであり、同心円の円弧しか加工できない。これに対してC軸の回転テーブル上にX軸、Y軸のテーブルを取り付けると、X、Y軸が移動しても、工具とC軸の回転中心との距離は変わらないため、同じ半径を有する円弧を所定の位置に配列できる。なお本機で同心円の円弧溝を加工する場合は、工具側のX'軸の半径設定制御とテーブル側のC軸駆動とによって加工する。

4. マイクロ切削加工事例

製作した加工機により、図6(a)に示す幅152μm、深さ15μmの円弧の溝を加工し、中心間距離500μm、直径270μmの円形アスペリティのマイクロアレイを加工した。この加工では直径0.4mmのボールエンドミルを45°傾け、回転数20000rpm、送り0.48mm/minの加工条件で、以下のシーケンスにより加工した。

- (1) 工具側のB軸制御により工具を45°傾斜させる。
- (2) 工具側のZ軸制御により、材料表面に対して工具の接触点を設定する。
- (3) 工具側のX'軸、Y'軸制御により、切れ刃と材料が接触する点をテーブル側の回転中心に合わせる。
- (4) テーブルの回転中心に対して、工具側のX'軸を135μm移動させる。
- (5) 工具側のZ軸制御により、切込みを与える。
- (6) テーブル側のC軸制御で被削材を360°回転させながら切削し、加工後に工具側のZ軸を上げる。
- (7) テーブル側のX軸を500μm移動させる。
- (8) (5)に戻る。

図6(b)はレーザー顕微鏡による加工面のプロファイルであり、脆性損傷のない良好な加工面が得られていることがわかる。本機によるその他の加工事例として、図7(a)にビットマップデータによる加工を、同図(b)に直線補間と曲線補間を組合せ

Fig. 4 Micro/nano scale machine tool

(a) Table drive system

(b) Control of cutter attitude

Fig. 5 Control axes on machine tool

(a) Micro array

(b) Profile

Fig. 6 Micro array of circular asperities

(a) Micro characters

(b) Micro channel

Fig. 7 Machining examples

た加工を示す。

5. 結論

ボールエンドミルのメカニズムにより、ガラスに対して脆性損傷のない切削加工ができる。これに基づいて試作した加工機では、数値制御により微細パターンが加工できる。

引用文献

- 1) Matsumura, T., Hiramatsu, T., Shirakashi, T. and Muramatsu, T., (2004), "A Study on Cutting Force in The Milling Process of Glass," Transactions of NAMRI/SME, Vol. 32, pp.463-470.