

マイクロ流体チップ製造のための極低温マイクロマシニング法の開発

Development of Cryogenic Micromachining Method for Manufacturing Microfluidic Chips

80817387 三島耕治 (Koji Mishima) Supervisor : 柿沼康弘 (Yasuhiro Kakinuma)

1. 結論

マイクロ流体工学やバイオメディカル分野において、マイクロ流体チップ上で生化学分析を行うマイクロ TAS (Total Analysis System) が注目されている。このシステムの実現により分析時間の短縮、試料・廃液の削減が可能となる。特に PDMS はマイクロ流体チップの主流な材料である。チップの製造法は、フォトリソグラフィにより作製した型を用いるマイクロモルディングプロセスが利用されている。この手法は大量生産に向いているが、流路のパターンに限られる。一方、最近では三次元複雑流路を持った高付加価値のある多種多様なマイクロ流体チップを少量生産することが望まれている。通常、PDMS のような粘弾性高分子材料は低弾性かつ高粘着性を示し、切削時に弾性変形やむしれが生じるため高精度な切削加工は困難であった。切削加工を適用するには切削速度を高め、負のすくい角を用い、加工部の剛性を局所的に高めながら切削する必要がある^[1]。しかし良好な加工面性状が必要な場合や、切削速度の低い小径エンドミルを使用する場合は不適である。そこで本研究では温度による材料特性の変化に着目し、PDMS に対してガラス転移点以下まで冷却することで、切削により加工品位の高い微細流路を形成する極低温マイクロマシニング法を提案した。PDMS に対して押し込み試験、摩擦試験を行い、環境温度と切削性について評価することで、本手法の加工メカニズムを解明した。最後に予変形極低温マイクロマシニング(PDCM)法を提案し、従来の加工技術では作製困難である特殊形状流路パターンの作製を試み、その有効性について検証した。

2. 極低温マイクロマシニング法の提案

高分子材料にはガラス転移点が存在し、それ以下の温度において低弾性であるゴム状態から剛性の高いガラス状態へ遷移する特性がある。ガラス転移点が -123°C である PDMS は常温ではゴム状態として存在するため、高精度な切削加工が困難となる。そこで PDMS をガラス転移点以下にすることで剛性が高まり、PDMS 特有の高粘着性は消失すると仮説をたてた。さらに切込み量をナノスケールにした延性モード切削を適用することで、高精度な切削加工が実現すると考えた。その概念図を Fig.1 に示す。本研究では PDMS をガラス転移点以下まで冷却し、ガラス状態を維持したまま 3 次元微細流路を直接加工する極低温マイクロマシニング法 (Fig.2)を提案した。また冷却剤には液体窒素を用いた。

3. 極低温マイクロマシニング法の加工メカニズム

常温・ガラス転移点以下における PDMS の縦弾性率・動摩擦係数の変化について検証するため、押し込み試験・摩擦試験を行った。押し込み試験の結果から、ガラス転移点以下にすることで PDMS の縦弾性率が著しく増加することが確認できた。摩擦試験の様子を Fig.3 に示す。X 方向に加わる力、Z 方向に加わる力それぞれを測定することで、PDMS の動摩

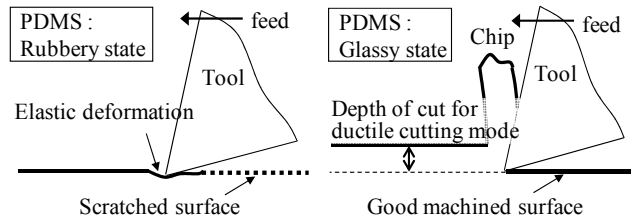


Fig.1 Concept of cryogenic micromachining

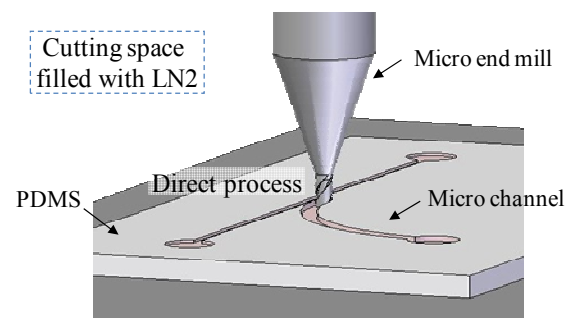


Fig.2 Direct process for fabricating of customized chip

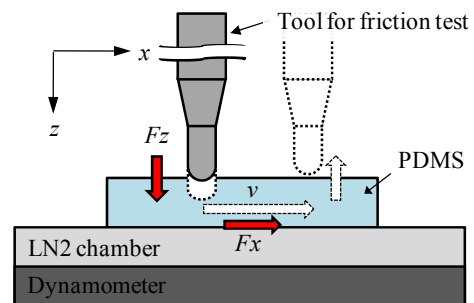


Fig.3 Schematic diagram of friction test

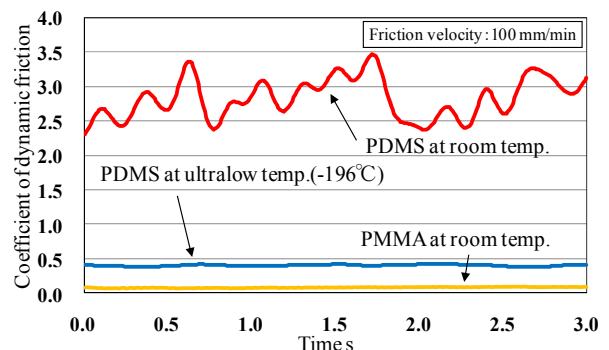


Fig.4 Coefficient of dynamic friction

Table1 Cutting condition

	(A)	(B)
Tool	Micro square end mill $\phi 0.5$ mm	
Rotational speed	15000 min^{-1}	
Feed rate	3.0 mm/min	1.0~4.5 mm/min
Feed per tooth	0.1 $\mu\text{m}/\text{tooth}$	0.025~0.25 $\mu\text{m}/\text{tooth}$
Processing temp.	-160~ -50°C	-196 $^{\circ}\text{C}$
Machine tool	3 axis vertical machining center	

擦係数を求めた。得られた結果を Fig.4 に示す。常温下での動摩擦係数はスティックスリップ現象により値が大きく変動し PDMS の高粘着性が確認できるが、ガラス状態へ遷移させることで値はアクリル樹脂(PMMA)程度まで低下し高粘着性が消失したことが分かる。このようなガラス転移点以下における力学特性の変化の影響により加工時での弾性変形の抑制・切り屑排出性の改善が実現され、切削性が向上すると考えられる。

環境温度と切削性の関係を調べるため、環境温度の測定と切削試験を同時に行った。切削条件を Table1(A)に示す。各温度における微細溝の観察結果を Fig.5 に示す。環境温度が -110°C では溝形成が不完全であることから、形状精度の高い加工溝を得るには常にガラス転移点 -123°C 以下を維持する必要があるとわかる。

4. 極低温マイクロマシニング法の加工特性

PDMS の極低温マイクロマシニングを行ったときの加工特性について評価した。一刃送り量が加工表面へ及ぼす影響を調べるため、Table1(B)の加工条件で切削試験を行い、溝底面表面粗さを測定した。一刃送り量と微細溝の加工表面粗さの関係を Fig.6 に示す。理論上、一刃送りが小さいほど表面粗さは良好になるが、本手法では $0.1\mu\text{m}/\text{tooth}$ 以下になると悪化することが分かる。工具径の異なるエンドミルを用いて同様の切削試験を行ったが、同じ傾向が見られた。本手法においては、一刃送りが小さくなりすぎるとエンドミルの切れ刃が PDMS 表面を上滑りし、摩擦熱が発生する。これにより PDMS の切削点近傍を局部的に軟化させ、切削性の低下を招いたと考えられる。本手法においては、この上滑りが起こらない最小一刃送り量である $0.1\mu\text{m}/\text{tooth}$ 程度に設定することで良好な加工面が得られるとわかった。

5. PDCM 法の提案

PDMS の低弾性を生かし、あらかじめ変形させた状態で極低温マイクロマシニングを行う手法を提案し PDCM (Pre-Deformation-Cryogenic Micromachining) 法と名付けた。予変形方法と加工方法の組み合わせにより、様々な特殊形状が形成可能と考えられる。PDCM 法の代表例である曲がり穴形成プロセスを Fig.7 に示す。曲がり穴を持つマイクロ流体チップの試作を行った。その概観を Fig.8 に示す。本手法を用いることでフォトリソグラフィ技術では困難である特殊形状流路の形成に成功した。また従来の加工法ではチップの製造に数日を要するが、本手法における製造時間は約 90 分となり大幅に時間短縮でき、多品種少量生産に向いていることを確認した。

6. 結論

粘弾性高分子材料である PDMS に対して、直接機械加工を行う極低温マイクロマシニング法を提案し、その有効性を検証した。得られた結果を以下に示す。

- (1) PDMS をガラス転移点以下にすることで縦弾性率が著しく増加し、また粘着性が消失することで動摩擦係数が大幅に減少する。
- (2) 形状精度の高い加工形状を得るには常にガラス転移点 -123°C 以下を維持する必要がある。
- (3) 一刃送り量 $0.01\mu\text{m}/\text{tooth}$ 程度で良好な加工面性状が得られる。

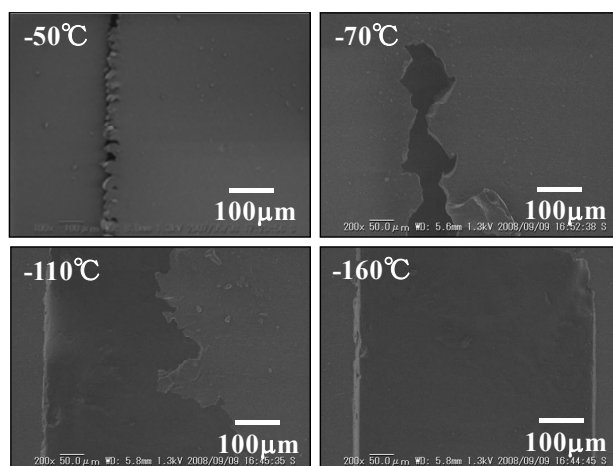


Fig.5 Machined surface at any temperatures

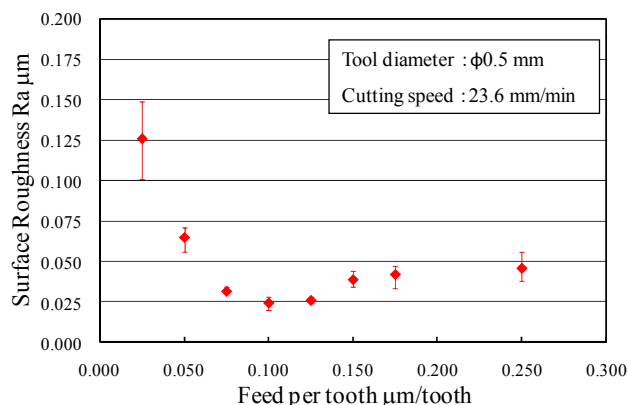


Fig.6 Relation between surface roughness and feed per tooth

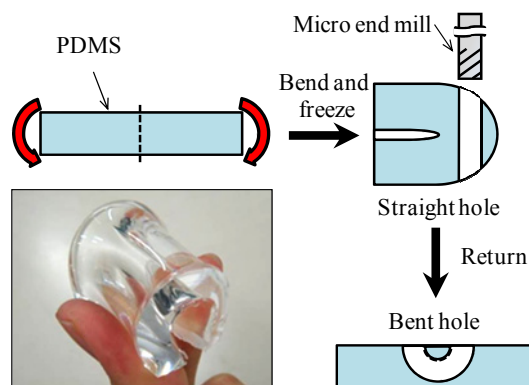


Fig.7 Process of PDCM method for bent hole

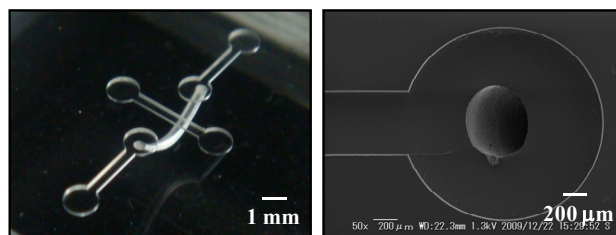


Fig.8 Microfluidic chip with 3D crossed channels

- (4) PDCM 法により従来の加工法では困難な流路形状を形成することができる。

参考文献

[1] Albert J. Shih et al, Trans ASME, Vol.126, No.1, 115-123(2004)