

氏名	いわつか けんいち 岩塚 健一
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博知第10号
学位授与日	平成27年3月21日
論文題目	マイクロ流体チップ金型の微細溝加工に関する研究
論文審査委員	(主査) 富山県立大学 教授 前田 幸男 教授 野村 俊 教授 中村 清実 准教授 神谷 和秀 新潟大学 名誉教授 榎田 正美

## 内容の要旨

近年、製薬、化学分析、化粧品の製造に応用可能なマイクロ流体チップが注目されている。マイクロ流体チップは、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いて製造した幅 100 $\mu$ m 程度の流路内で化学反応を起し、それらの化学操作、分析、測定を行う装置であり、幅数 10mm のプラスチックまたはガラス基板上に化学実験装置を集積化したシステムである。一般に、この成形には半導体製造工程で用いられるフォトリソグラフィ方式で製造された Si 製金型が採用されている。しかし、高価な設備と多くの製造工程を必要とするこの方式は、製造コストの削減と、リードタイムの短縮が実用化に向けた開発課題となっている。

そこで本研究では、幅数 10~数 100 $\mu$ m の微細溝をマイクロ機械加工で形成するメカニカル・リソグラフィ方式を提案し、ステンレス鋼、超硬合金製の金型の表面に高精度な凹凸微細溝をマイクロ工具により直接加工できる技術を開発した。その主な研究開発項目は、① マイクロエンドミルの切削特性に基づく加工条件選定指針の作成、② マイクロエンドミルによるステンレス鋼製金型を製造する上で問題となる流路断面積変化の低減技術の開発、③ プラスチック製マイクロ流体チップを想定した Y 字流路モデル金型の試作による開発技術の有効性の実証、④ ガラス製マイクロ流体チップ成形用金型の製造に適した超硬合金の微細溝加工技術の開発である。

第1章では、現状のマイクロ流体チップを成形するための金型加工に必要な要素技術と、研究の目的と方針を明確にしている。また、従来の微細溝加工に関する研究成果、さらに本研究の技術課題やその概要を述べている。

第2章では、メカニカル・リソグラフィ方式による金型加工の開発課題である、マイクロエンドミルの加工条件の選定指針に関して検討を行った。切削速度、1刃当り送り量、軸方向切込み量の加工条件が基本的切削特性に及ぼす影響に関して、工具径  $\phi$ 0.5mm のマイクロエンドミルを用い

て、実験的に検討した。その結果、マイクロエンドミルによる加工において、1 刃当り送り量が工具の切れ刃エッジRよりも小さい条件では、実効すくい角が負角となるため、バリ発生量が大きく、切削力、表面粗さの増加割合も変化するというマイクロエンドミル特有の現象を明らかにした。また、今まで研究報告がされていない微細溝側面の表面粗さに関して、その観察と測定方法を考案し、加工条件が溝側面の表面粗さに及ぼす影響に関して実験的に検討した。その結果、微細溝側面の表面粗さは、加工条件に係わらず約  $0.5\mu\text{mRz}$  であることを明らかにした。これまで未検討であった切れ刃エッジRの溝肩部バリ発生、工具摩耗への影響を考慮したマイクロエンドミルの加工条件の選定指針を作成し、工具径  $\phi 0.1\text{mm}$  以下のエンドミルにも適用可能であることを実証した。

第3章では、マイクロエンドミルにより金型製造する上で問題となる流路断面積変化の低減方法に関して検討を行った。2個の被削材(幅  $2\text{mm} \times 2$ )をテーパクランプ治具で固定し、加工後に突合せ部分の溝断面形状を測定する方法を用い、加工条件が微細溝形状に及ぼす影響を実験的に検討した。その結果、切削力の増加に伴い、溝傾斜角度と溝底部コーナRが悪化することを明らかにした。さらに、加工機全体を含む工具剛性と SUS316 材の比切削抵抗を実験的に求め、加工条件から近似的に工具変形を予測する方法を考案し、その予測方法によりマイクロエンドミルの工具変形を 20%以下の誤差で予測可能であることを示した。次に、工具振れ回りが微細溝幅、工具寿命に及ぼす影響を実験的に検討した。その結果、2 枚刃エンドミルの振れ回りの軌跡に対して、2 枚の切れ刃を接線方向に角度調整することで、工具振れ回りの加工精度への影響を大幅に低減できることを明らかにし、工具振れ回りが約  $10\mu\text{m}$  発生していても、その影響による溝幅変化を  $1\mu\text{m}$  以下と  $1/10$  に低減するとともに、工具摩耗も低減できることを実証した。

第4章では、高精度な微細溝をマイクロエンドミルの加工で実現するために重要な課題となる、溝肩部バリの発生の低減、被削材表面からの溝深さ精度の向上について検討した。初めに、バリ低減を目的に、切削液の潤滑、切屑の排出効果の向上が期待される超音波キャビテーション援用加工をマイクロエンドミル加工に適用し、その加工特性に関して実験的に検討した。その結果、MQL (Minimum Quantity Lubricant) 加工ではバリ発生が大きい条件である ( $1$  刃当り送り量  $S_z \leq$  (切れ刃エッジR)においても、超音波キャビテーション援用加工を用いることで、バリ面積比を目標の 5%以下に低減でき、さらに切削初期における工具刃先欠損を MQL 加工と比べ、半減できることを明らかにした。次に、本研究で開発した工具振れ回りの低減技術を用いて、マシニングセンタ等に広く普及している 2 面拘束ホルダ(スプリングコレット方式)に把持した工具の振れ回りを測定・修正する装置を試作した。その試作装置を用いて、2 枚刃エンドミルの角度修正することで、工具振れ回りが発生しても、その加工精度への影響を  $1/10$  に低減できることを実証した。また、被削材表面からの溝深さ精度の向上に関し、被削材表面を原点としてマイクロエンドミルの切込み方向の刃先位置の検出方法を考案し、マイクロ流体チップ金型を製造する上で必要な  $\pm 0.5\mu\text{m}$  の高精度位置決めを達成できることを実証した。以上の本研究で開発したメカニカル・リソグラフィ方式を、プラスチック製マイクロ流体チップを想定した Y 字型流体チップ金型 (SUS316 材、凹凸形状金型、溝幅・深さ  $100\mu\text{m}$ ) の試作に適用し、バリ発生の抑制、表面粗さ  $0.2\mu\text{mRz}$  以下、溝深さ精度  $0.6\mu\text{m}$  と高精度な微細溝を得られることを明らかにした。

第5章では、ダイヤモンド電着砥石を用いたガラス製マイクロ流体チップ成形用金型(微粒子超硬合金)の製造を行う上で問題となる、砥石先端部の周速度ゼロ付近での加工を回避するため、加

工機の主軸を工具送り方向に傾けて加工を行うチルト研削特性について検討した。初めに、主軸の傾斜角であるチルト角が研削特性に及ぼす影響を実験と解析から検討し、チルト角  $45^\circ$  で良好な加工を行えることを明らかにした。また、工具剛性を向上させたダイヤモンド電着砥石(砥石径  $\phi 0.5\text{mm}$ )を試作し、市販工具との研削特性を比較した。その結果、試作した高剛性タイプ、平均砥粒径  $25\mu\text{m}$  のダイヤモンド電着砥石を用いることで表面粗さ  $0.2\mu\text{mRz}$ 、溝形状、溝深さ変化量  $0.3\mu\text{m}$  以下と良好になることを明らかにした。さらに、チルト研削において、砥石周速度、送り速度、切込み量が研削特性に及ぼす影響を実験的に検討し、砥石回転数  $90,000\text{min}^{-1}$ 、工具送り速度  $7.5\text{mm/min}$ 、切込み量  $10\mu\text{m}$  の加工条件を選定した。この条件下で、マイクロ流体チップ金型に必要なとされる研削長  $200\text{mm}$  まで、表面粗さ  $0.5\mu\text{mRz}$  以下の高精度な微細溝加工ができることを明らかにした。

第6章では、上述した微細溝加工技術をマイクロ流体チップ金型製造に適用するための課題と解決策の概要と、本研究の工学的、工業的な意義に関して述べている。

## 審査の結果の要旨

医薬品分野などで用いられるマイクロ流体チップは、幅100 $\mu\text{m}$ 程度の流路内で化学操作、分析、測定を行う装置であり、この流体チップの成形用Si製金型は半導体製造工程で用いられるフォトリソグラフィで製造される。しかし、この金型製造方式は高価な設備と、多くの工程を必要とするため、製造コストの削減と、リードタイムの短縮が開発課題となっている。これに対応するため、本研究では幅数10～数100 $\mu\text{m}$ の微細溝をステンレス鋼、超合金製の金型表面に直接機械加工するメカニカル・リソグラフィ方式を提案し、マイクロ工具により高精度な微細溝を形成する加工技術の開発を行った。

第1章では、マイクロ流体チップ金型製造に必要な要素技術および本研究の目的と方針を明確にしている。また、従来の金型製造技術に関する研究成果、さらに本研究の技術課題やその概要を述べており、博士論文の内容を含む分野に関して十分かつ全般的な知識を有すると認められる。

第2章では、マイクロ流体チップ金型の微細溝加工において、マイクロエンドミルの切れ刃エッジRと溝肩部のバリ発生および工具摩耗などの加工精度への影響を明らかにした。これに基づき、工具径 $\phi$ 100 $\mu\text{m}$ 以下のマイクロエンドミルの加工条件の選定指針を作成し、この選定指針により溝加工した結果、バリ面積比5%以下、溝底面と側面の表面粗さ1 $\mu\text{mRz}$ 以下が達成できる事を実証した。

第3章では、プラスチック製マイクロ流体チップの流路断面の高精度化に対応すべく、成形用金型(SUS316)の比切削抵抗とマイクロエンドミルの工具剛性から工具変形を解析する方法を考案するとともに、工具振れ回りが溝幅精度に及ぼす影響を低減できる切れ刃角度調整方法を開発した。その結果、工具振れ回り量の加工精度への影響を1/10以下に低減できる事を明らかにした。

第4章では、マイクロ流体チップ金型を試作するに際し解決すべき課題である、バリ発生の低減が可能な超音波キャビテーション援用加工法、2面拘束ホルダ(スプリングコレット方式)に把持した工具の振れ回りを低減できる修正装置、被削材表面を原点とする切込み方向の刃先位置検出技術を開発した。これらの開発技術をY字型マイクロ流体チップ金型(SUS316材、凹凸形状金型、溝幅・深さ100 $\mu\text{m}$ )の試作に適用し、微細溝肩部のバリ発生の抑制、表面粗さ0.2 $\mu\text{mRz}$ 以下、溝深さ精度0.6 $\mu\text{m}$ を得られることを明らかにした。

第5章では、ガラス製マイクロ流体チップの成形用金型(微粒子超合金)を対象とした微細溝研削技術の開発を目的に、主軸を工具送り方向に45°傾斜させて加工するチルト研削法を開発した。高剛性ダイヤモンド電着砥石(平均砥粒径25 $\mu\text{m}$ )により超合金をチルト研削した結果、表面粗さ0.2 $\mu\text{mRz}$ 、溝形状と溝深さ変化量0.3 $\mu\text{m}$ 以下と目標値を達成できる事を明らかにした。

第6章では、全体纏めと工学的、工業的な意義について述べており、今後の市場拡大が期待できる医薬品分野へのマイクロ流体チップの適用に貢献できることを示した。

以上の博士論文の研究の方法論・研究手法、得られた結果とその解釈が適切であり、的確な文章表現が与えられている。その研究の手法・結果には独創性が認められ、その成果は機械加工学の諸分野、特に精密微細加工の分野における工学的な価値が認められ、工業の発展に貢献できると評価される。本論文に関連する発表論文は6編であり、そのうち申請者が筆頭の学術論文誌での掲載は2編である。

平成27年1月13日に、博士論文の審査及び最終試験を行った結果、申請者は学術研究にふさわしい討論ができていることから、博士(工学)の学位を受けるに十分な学識と能力を有するものと判定し、学位論文として合格であると認められた。