

分割切削法によるマイクロレンズアレイ金型の超精密加工

慶應義塾大学理工学部機械工学科 ○向田 央 ㊟ 閻 紀旺

要旨

スロートールサーボを用いたマイクロレンズアレイ金型の旋削加工では、レンズエッジ部において Z 軸加速度が大きくなることから加工機の運動誤差が誘発され、高精度な加工が困難とされていた。そこで、本研究ではマイクロレンズを一定の間隔をもってグループ分けし、1 グループずつ切削を行う分割切削法を提案した。加工実験を行ったところ、Z 軸加速度を低減させることにより、通常連続切削法と比較して形状誤差を 1/4 に低減した。

1. 結論

近年、マイクロレンズアレイは光学機器の高集積化、高機能化の観点から注目を集めている。マイクロレンズアレイの大量生産には、射出成形法やプレス成形法に用いるための高精度な金型が必要とされる。光学素子の金型の高精度な加工方法として、超精密切削が有効である¹⁾。マイクロレンズアレイ金型の場合、ミリング加工を用いるのが一般的であるが、問題点として加工時間が非常に長いことや、高い形状精度を得るのが困難であることが挙げられる²⁾。

本研究では、マイクロレンズアレイ金型の加工方法として、スロートールサーボ (Slow Tool Servo: STS) を用いた旋削加工を採用する。STS 旋削は自由曲面形状を短時間で高精度に加工できる方法であるが、エッジのある形状に対しては加工機の Z 軸加速度が過大になるため加工が困難となっていた。そこで本研究では、マイクロレンズアレイ金型の STS 旋削における新たな加工方式として、分割切削法を提案し、エッジのある形状の加工精度向上を試みる。

2. 加工原理

2.1 STS 旋削による自由曲面への微細形状加工

STS 旋削には図 1 のような多軸加工機が用いられる。図 2 のように C 軸回転に合わせて Z 軸が前後に駆動することにより、自由曲面への微細形状の加工が可能となっている。

2.2 分割切削法

通常の STS 旋削では図 3(a) のように 1 サイクルで全てのレンズを加工する。これを連続切削法と呼ぶこととする。連続切削法では、エッジにおいて Z 軸加速度が大きくなり、加工機の運動誤差が誘発され、高精度な加工が困難となる。そこで、本研究では図 3(b) のように切削するレンズをそれぞれが隣り合わないよう数グループに分割し、1 グループごとに切削する方法を提案する。こ

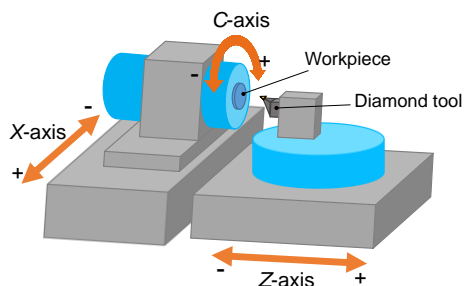


図 1 自由曲面加工機の概要

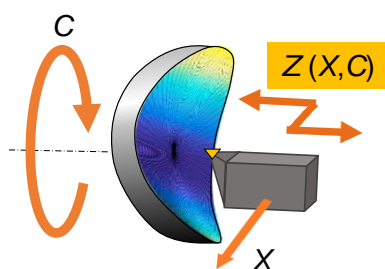


図 2 STS 旋削原理

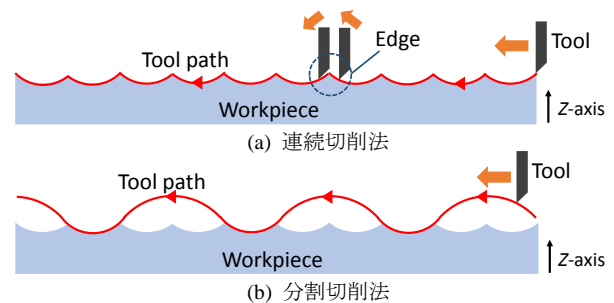


図 3 STS 旋削におけるマイクロレンズアレイ金型加工の工具軌跡

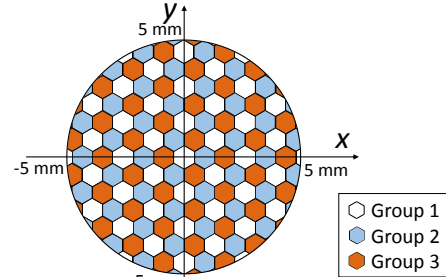


図 4 六角形マイクロレンズアレイ金型の分割模式図

の方法を分割切削法と呼ぶ。分割切削法によって Z 軸加速度を最小限に低減することで、加工機の運動精度向上が期待できると考えられる。

3. 実験装置および方法

連続切削法と分割切削法によって六角形マイクロレンズアレイ金型の STS 旋削を行い、加工精度を比較した。自由曲面加工機 Nanoform X (アメテック(株)製)を用いて加工を行った。工具にはノーズ半径 0.1 mm、すくい角 0°の単結晶ダイヤモンド R バイトを、被削材にはアルミニウムを用いた。加工形状を図 4 に示す。直径 10 mm の平面上に 1 辺 500 μm 、深さ 5 μm の正六角形凹球面レンズアレイを作成した。分割切削法では、図 4 に示す 3 グループに分割した。これは、六角形の場合 3 グループに分割することで隣り合わないよう分割できるためである。スピンドル回転数 N は、連続切削法では $N=45 \text{ rpm}$ 、 $N=15 \text{ rpm}$ 、分割切削法では $N=45 \text{ rpm}$ とした。分割切削法では 3 サイクルで加工を行うことから、連続切削法で $N=15 \text{ rpm}$ の場合と同じ加工時間となる。1 回転あたりの送り量は 1 μm 、切込み量は仕上げ加工で 2 μm とした。

4. 結果および考察

4.1 加工面観察およびレンズ曲面形状測定

図 4 においてレンズ中心が y 軸上の $y=1.5 \text{ mm}$ に位置するレンズを微分干渉顕微鏡により観察した結果を図 5 に示す。分割切削法では、連続切削法と比較してエッジが鋭く形成されたことが確認できた。また、非接触 3 次元測定装置 NH-3SP (三鷹光器(株)製)により同じ部分のレンズ曲面形状を測定した。得られた 3 次元測定結果から、レンズ中心を通る x 軸に平行な断面を抽出した。これらの結果を図 6 に示す。抽出した断面は図 6 の 3 次元測定結果

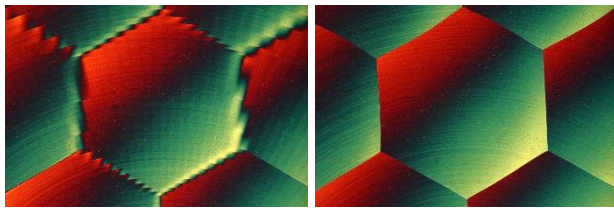
(a) 連続切削法 $N=15$ rpm (b) 分割切削法 $N=45$ rpm

図5 レンズの微分干渉顕微鏡画像

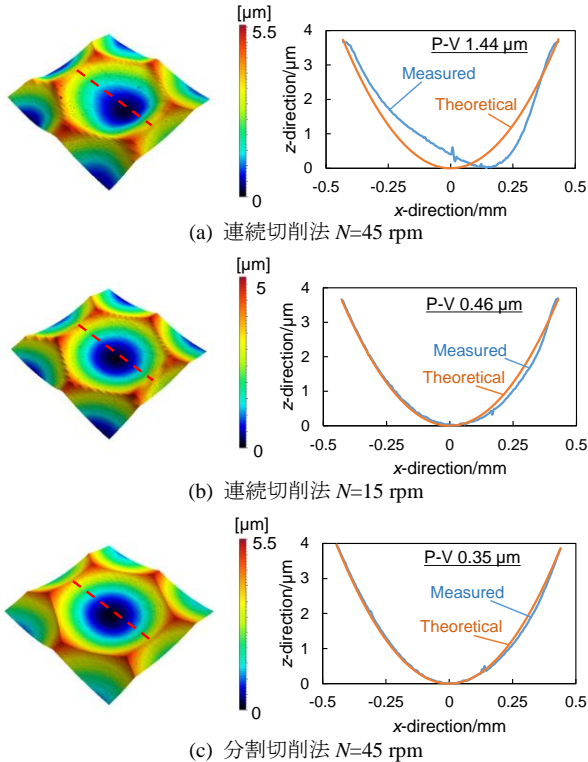


図6 レンズの3次元形状および断面形状

中の赤破線の部分である。断面の理想形状との誤差を、誤差の最大値と最小値の差を表す P-V (Peak to Valley) 値で評価したところ、分割切削法は同回転数での連続切削法と比較して 24% まで誤差を低減した。また、同じ加工時間となる回転数での連続切削法と比較しても誤差が 76% となっており、分割切削法の優位性が示された。

4.2 加工機の Z 軸加速度と運動誤差

Z 軸駆動におけるプログラム指令座標との位置誤差、および指令上の加速度を図 7 に示す。X=1.5 mm 通過後から 0.75 秒間、空運転において測定を行った。指令座標と実座標の誤差を P-V 値を用いて評価したところ、レンズの形状誤差と同様の値となったことから、レンズの形状誤差が加工機の運動誤差に大きく起因していることがわかった。連続切削法では、レンズエッジにおいて加速度の絶対値が非常に大きくなり、加工機の運動が追いつかず、位置誤差を生むことが確認できる。一方、分割切削法では Z 軸駆動の加速度を低減することで、位置誤差が小さくなる。連続切削法においても回転数を小さくすることによって加速度を低減することができるが、分割切削法を用いた方が、加速度がより低減されたため、加工精度も分割切削法が上回ったと考えられる。

4.3 レンズエッジ形成における直線補間の影響

図 8 にエッジにおける連続切削法と分割切削法の工具軌跡を示す。自由曲面加工では、加工面上の有限個の点の座標が算出され、点と点の間は直線で補間するように加工機が運動する。しかし、算出される座標点の間隔は加工機のプログラム処理速度によって限界がある。そのため、連続切削法ではエッジを表現するのに十分な座標点を取れない場合、エッジにおいて直線補間の影響を受け、エッジが鋭く形成されない(図 8-a)。一方、分割切削法ではエッジにおいても直線補間の影響を受けにくい工具軌跡となつた

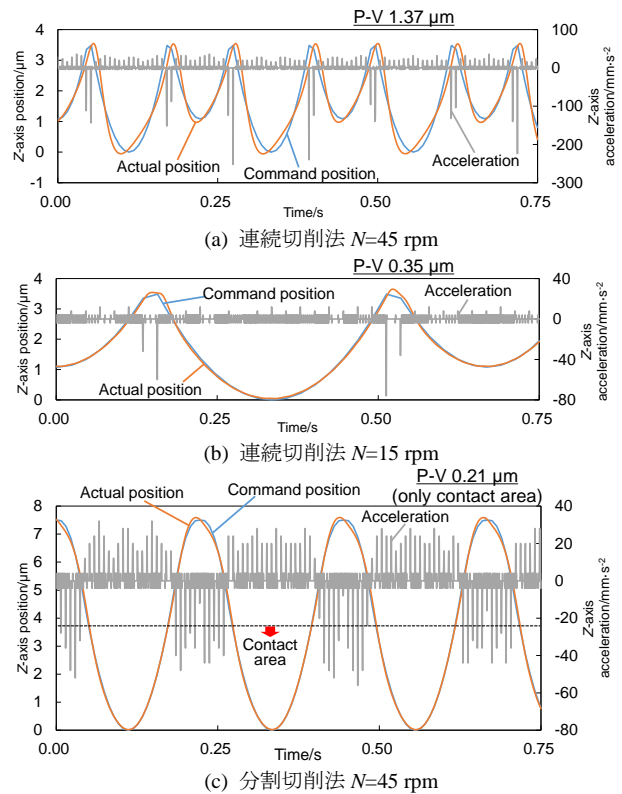
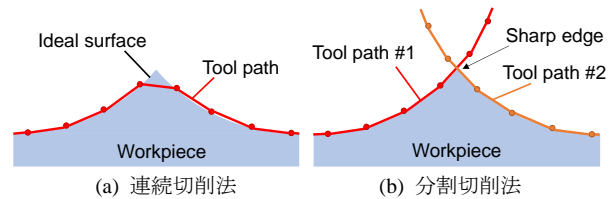


図7 Z軸指令加速度と加工機の運動誤差



(a) 連続切削法 (b) 分割切削法

図8 エッジにおける工具軌跡

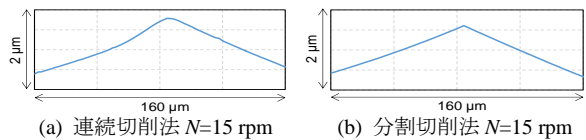
(a) 連続切削法 $N=15$ rpm (b) 分割切削法 $N=15$ rpm

図9 エッジ断面形状

め(図 8-b)、エッジ形成において有効であると考えられる。

図 4 において y 軸上の $y=0.75$ mm のエッジ断面形状を走査型白色干渉計 Talysurf CCI1000 (アメテック(株)製)を用いて測定したところ、図 9 に示す断面形状となった。図 9(a)では、エッジの曲率半径が 0.24 mm となったのに対し、図 9(b)では、使用した測定装置の分解能ではエッジ曲率半径が算出不可能なほど鋭利なエッジが形成された。このことから、分割切削法によりエッジ形成を改善したことが実証された。

5. 結論

マイクロレンズアレイ金型の STS 旋削において、分割切削法を提案した。本方法により、加工機の Z 軸駆動の指令加速度緩和による運動誤差低減と、レンズエッジ形成において直線補間による工具軌跡の改善が可能である。その結果、マイクロレンズアレイ金型の加工精度を大幅に向上させることに成功した。

参考文献

- 1) M. Weck, J. Hennig, R. Hilbing, Precision Cutting Processes for Manufacturing of Optical Components, Proc. SPIE 4440 (2001) 145-151.
- 2) S. Scheiding, A.Y. Yi, A. Gebhardt, R. Loose, L. Li, S. Risse, R. Eberhardt, A. Tünnermann, Diamond milling or turning for the fabrication of micro lens arrays: comparing different diamond machining technologies, Proc. SPIE 7927 (2011) 79270N.1-79270N.11.