

# 工具主軸と並進軸のサーボ情報を応用した 光学ガラスレンズの超精密研削加工面の評価

慶応義塾大学理工学部 ○栗山 充, ◎柿沼 康弘

## 要旨

4K・8K技術の開発が進められる中、撮像機器のキー要素である大口径ガラスレンズをより高精度に製造することが求められている。そのため、クラックの発生しない延性モード研削加工技術の開発が必要とされている。そこで本研究では、加工時のクラック発生が工具主軸のサーボ特性に依存することから、光学ガラスレンズの超精密研削加工において、工具主軸と並進軸のサーボ情報が加工面品位に与える影響について実験的に評価した。

## 1. 緒論

2018年12月1日から4K・8K衛星放送が開始された。4K・8K技術では、従来の映像に比べ、より高精細化された映像が撮影されている。このような映像の高画質化に伴い、撮像機器のキー要素である大口径ガラスレンズには、高い表面品位や形状精度が求められている<sup>[1]</sup>。

一般に、光学ガラスレンズの製造工程は、レンズ形状を生成する研削加工工程と、研削加工工程で発生したクラックを除去する研磨加工工程で分けられる。研削加工工程では高能率化のためにクラック発生が許容されているが、研磨量の増加を招き、加工精度が低下してしまう。そのため、研削加工工程においてクラック発生を最小限に抑える必要がある。しかし、被削材の材料特性や加工法によりクラックの発生条件が異なるため、適切な加工条件の選定には多量の実験が必要となり時間とコストがかかってしまう。以上より、加工条件によらないクラックの発生検知・抑制技術が強く必要とされている。

そこで本研究では、光学ガラスレンズの超精密研削加工を行い、加工機モニタリングシステムから得られたサーボ情報を用いて、加工面品位の解析を行った。

## 2. サーボ情報に基づく加工負荷推定手法の確立

モニタリングシステムを用いて取得したサーボ情報から、加工時に発生する加工負荷の推定を行うための基礎特性解析を行った。その際、加工機のX, Y, Z軸方向に沿ってそれぞれの力を砥石接線方向加工負荷  $F_x$ 、被削材周速方向加工負荷  $F_y$ 、被削材垂直方向加工負荷  $F_z$  と定義した。

$F_x$  は砥石外周の接線方向に作用する接線研削抵抗であり、工具軸スピンドルの回転速度に影響する<sup>[2]</sup>。また、本加工機の工具軸スピンドルには、回転ムラを低減するためにP制御が採用されている。すなわち、接線方向加工負荷  $F_x$  から工具軸回転速度偏差  $V_{dev}$  への伝達関数は(1)式のように表される。ここで、工具軸の慣性モーメント  $J$ 、工具半径  $R$ 、コントローラゲイン  $K_p$  およびトルク定数  $K_t$  は定数であることから、 $V_{dev}$  と  $F_x$  は比例関係にあることがわかる。

$$\frac{V_{dev}}{F_x} = \frac{R}{Js + K_p \cdot K_t} \quad (1)$$

3方向の加工負荷と取得可能なサーボ情報の関係から、 $F_x$  は工具軸の回転速度偏差を用いて、 $F_y$  はワーク軸のトルク指令値を用いて、 $F_z$  はZ軸の推力指令値を用いてそれぞれ負荷推定を行った。なお、 $F_y$  は加工試験において  $F_x$ 、 $F_z$  に比べ極めて小さな値となったため、考慮しないものとする。

### ● 砥石接線方向加工負荷 $F_x$ の負荷推定試験

被削材を動力計に固定しワーク軸に設置した。その後、砥石を7000  $\text{min}^{-1}$  で回転させながらクロス研削における被削材周速方向であるY軸方向に工具を送り、溝加工を行った。サーボ情報から得た工具送り速度を Fig. 1(a)に、動力計により得られた砥石接線方向の研削抵抗を Fig. 1(b)に示す。工具送り速度を変化させ3度加工を行い、工具回転速度偏差と砥石接線方向の研削抵抗の関係を線形近似することにより校正直線を算出した。

### ● 被削材垂直方向加工負荷 $F_z$ の負荷推定試験

治具にワックスで固定した被削材をワークスピンドルに真空チャックで固定し、Fig. 2(a)に示すように断続的に負荷を加えた。サーボ情報モニタリングシステムを用いて、測定したZ軸推力指令値を Fig. 2(b)に示す。入力した負荷と出力されたZ軸推力指令値との関係から、 $F_z$  の校正直線を算出した。

以上より求められた  $F_x$ 、 $F_z$  の負荷推定式を(2)-(3)式に示す。

$$F_x = -0.018 \times V_{dev} \quad (2)$$

$$F_z = 105 \times \text{Force command} \quad (3)$$

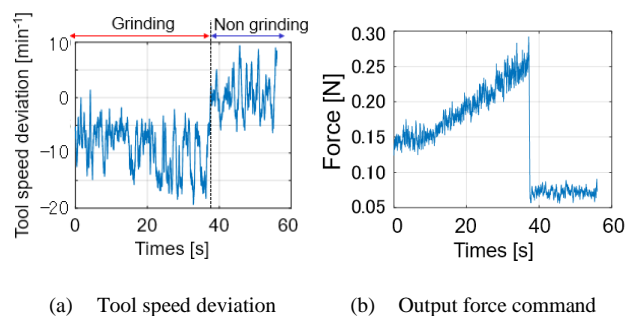


Fig. 1 Estimation of wheel tangential axis grinding load  $F_x$

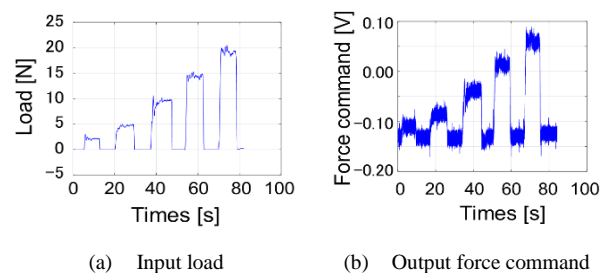


Fig. 2 Estimation of workpiece vertical axis grinding load  $F_z$

## 工具主軸と並進軸サーボ情報を併用した加工面品位の解析

Fig. 3(a)に示すように、直径 100 mm レジンボンド砥石の工具および被削材の直径 30 mm の光学ガラス BK7 を取り付け、工具を被削材の外周部から中心に送ることで、加工を行った。被削材周速度の影響をなくすため、工具送り速度を徐々に高くすることで、材料除去量が一定となるように設定した。工具送り速度  $F$  の加工条件を Fig. 3(b)に示す。その他の条件は Table. 1 に示した条件で研削を行い、加工中に工具回転速度および Z 軸推力指令値を測定した。取得したサーボ情報から推定した  $F_x$  と  $F_z$  を Fig. 4 に示す。また、各条件における加工面観察結果から二値化を用いて算出したクラック率を Fig. 5 に示す。この際、クラック率が 1% を超えた加工面において、脆性モード加工と判定する。

$F_x$  の各条件における平均値および加工モードを Table. 2 に示す。工具送り速度  $F$  1.0-2.0 の加工条件において、被削材中心から 7.5 mm の箇所材料除去量を変化させたため、被削材内側と外側で分けて算出した。Table. 2 より、 $F_x$  は延性モード加工に比べ、脆性モード加工で大きな値となることが分かった。しかし、Fig. 4(a)に示すように、推定された  $F_x$  は分散が大きい。そのため、クラックを検知するためには平均値を算出する必要があり、閾値選定が困難である。

一方、Fig. 4(b)に示すように、 $F_z$  は  $F_x$  に比べ分散が小さいことから閾値選定に用いるのは容易だが、推定される  $F_z$  の大小から加工モードを判定することはできない。そこで、クラック発生を判定する指標として比研削抵抗(SGL)を導入する。SGL は研削抵抗を平均研削断面積で除した値であり、脆性モード加工時に低下することが知られている<sup>[1]</sup>。本研究において、平均研削断面積は被削材周速度( $r \times \omega$ )と工具送り速度( $F$ )の積によって求まることから、被削材垂直方向の比研削抵抗  $SGL_z$  は(3)式のように表される。

$$SGL_z = \frac{F_z}{r \times \omega \times F} \quad (3)$$

加工機サーボ情報を用いて算出した  $SGL_z$  を Fig. 6 に示す。脆性モード加工と判定した領域で比研削抵抗が低下していることが分かる。この結果から Fig. 6 の点線に示すように、比研削抵抗 3.50 N/mm<sup>2</sup> 以下となった際、脆性モード加工となりクラックが発生していると判断された。

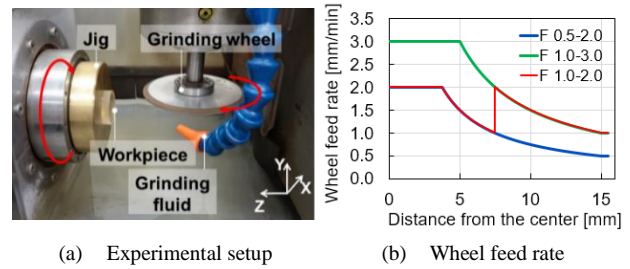
### 3. 結論

本研究を通して以下の結論を得た。

- 砥石接線方向加工負荷  $F_x$ 、被削材周速方向加工負荷  $F_y$ 、被削材垂直方向加工負荷  $F_z$  に対して、サーボ情報に基づく負荷推定式を明らかにした。
- 光学ガラスレンズの研削加工試験を行い、工具主軸と並進軸のサーボ情報を併用した加工面品位の解析を行った。サーボ情報から推定された被削材垂直方向加工負荷に対し、比研削抵抗を用いることで、加工中にクラックの発生を検知できる可能性を示した。

### 参考文献

- 総務省, “4K8K とは 4K8K の魅力”, [http://www.soumu.go.jp/menu\\_seisaku/ictseisaku/housou\\_suishin/4k8k\\_suishin/about.html](http://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/housou_suishin/4k8k_suishin/about.html), 2018/12/5 アクセス
- 奥山繁樹, “若手技術者のための研削工学 (第 5 回) 研削抵抗と其の変化,” 砥粒加工学会誌, vol. 59, no. 6, pp. 355–358, 2015.
- T. G. Bifano and S. C. Fawcett, “Specific grinding energy as an in-process control variable for ductile-regime grinding,” *Precis. Eng.*, vol. 13, no. 4, pp. 256–262, 1991

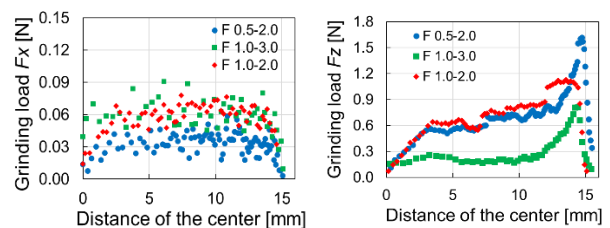


(a) Experimental setup (b) Wheel feed rate

Fig. 3 Experimental setup and wheel feed rate

Table. 1 Process parameter

Depth of cut [ $\mu\text{m}$ ]	0.5
Workpiece rotational speed [ $\text{min}^{-1}$ ]	10
Wheel rotational speed [ $\text{min}^{-1}$ ]	7000
Sampling time of data logger [ms]	1



(a) Grinding load  $F_x$  (b) Grinding load  $F_z$

Fig. 4 Estimated grinding load

Table. 2 Relation between  $F_x$  average and grinding mode

F0.5-2.0	F1.0-2.0 (0 mm~7.5 mm)	F1.0-2.0 (7.5 mm~15 mm)	F1.0-3.0
0.033 N	0.052 N	0.062 N	0.061 N
Ductile	Ductile	Brittle	Brittle

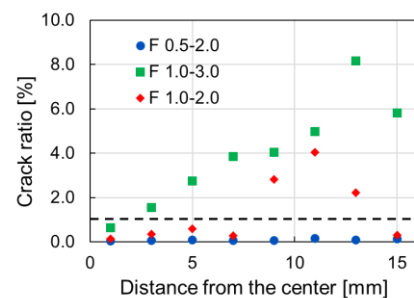


Fig. 5 Relation between distance from the center and crack ratio

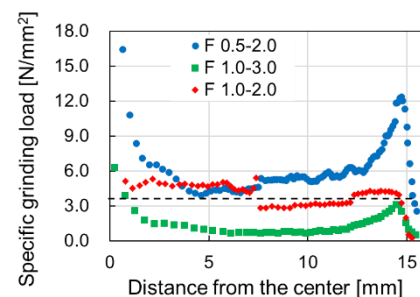


Fig. 6 Relation between distance from the center and specific grinding load