

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01353

研究課題名（和文）光学材料の超精密研削におけるクラック抑制サーボ制御手法の開発

研究課題名（英文）Development of crack suppression control technique in ultra-precision grinding of optical materials

研究代表者

柿沼 康弘（Kakinuma, Yasuhiro）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：70407146

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、光学レンズの超精密研削加工におけるクラック抑制サーボ制御手法の開発に取り組んだ。始めに各駆動軸のサーボ情報とAEセンサを併用し、加工状態を3つに分類する加工状態監視手法を開発した。次に、加工状態監視による判別結果に基づき並進軸ならびにワーク軸のオーバライドを自動調整するシステムを構築し、クラック抑制制御を試みた。クラックが発生しない延性モード研削におけるサーボ電流の挙動を指令値として、その電流値に追従するようにオーバライドを変更することで、マイクロクラックが一切発生せずにガラスの超精密研削が可能であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超精密加工のようにセンシティブなプロセスでは、理論と実加工現象には乖離がある。それを補うために加工学と制御工学を融合した加工制御法を展開している点に本研究の学術的意義がある。また、サーボ情報を巧みに利用したプロセス監視技術はあらゆる加工機で利用でき、付加的なセンサも必要ないため導入も容易である。さらに、このプロセス監視技術を応用したクラック抑制技術により超精密加工による高機能光学部品の安定生産が可能になる点で社会的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to develop a crack suppression control technology in ultra-precision grinding of optical lenses. Firstly, a grinding condition monitoring method that classifies the grinding status into three by using the servo information of each axis and the AE sensor. Then, a system is constructed, which automatically adjusts the override of the translational axis and the work spindle based on the classified result. From the result of the crack suppression control test, it is clear that micro cracks are perfectly suppressed in ultra-precision grinding of optical materials by changing the override according to the classified grinding status.

研究分野：生産工学

キーワード：プロセス監視 プロセス制御 超精密加工 研削 クラック抑制

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

4K・8K 対応機器の市場は、今後も一層拡大することが見込まれている。その中でも業務用カメラや車載用カメラなどの撮像機器に対しては、日本が技術面で優位性を保ちながら 8K 技術の開発を進め、放送分野や産業分野に広く普及させていくことが望まれている。撮像機器のキー要素として、大口径非球面レンズがあり、4K・8K に対応するためにはより高い表面品位や形状精度が求められる。これを歩留まりよく高効率かつ安定して生産する製造技術が確立すれば、日本の優位性は格段に高まることになる。

大口径非球面レンズは、従来、複数の精密研削工程により形状を整えた後、研削工程で生じた表面のクラックを研磨工程で十分に除去することで製造される。この製造工程を 4K・8K 対応の光学レンズにそのまま適用した場合、研磨工程における除去量が多くなるため、要求される形状精度の達成は難しい。そこで申請者は、研磨工程での除去量を最大限抑えるため、クラックが生じない延性モードのクロス研削加工に関する研究に取り組み、その高能率化を追求してきた。クロス研削とは、砥石周速ベクトルと被削材周速ベクトルを直交させ研削する手法である。ガラスの延性モード研削における未解決の問題として、砥石表面や研削液の状態といった不確定要素により、延性モード条件であるにも関わらずレンズ表面にクラックが生じる場合がある。特に外周部で頻繁に発生する。そのため、試行錯誤を重ねて最外周部でもクラックが生じない十分に遅い送り速度を設定する必要があった。延性モード研削の信頼性を高め、高能率化を図るためには、加工学と制御工学を駆使して、大口径レンズの加工に耐えうるプロセス制御手法を開発する必要がある。

### 2. 研究の目的

(1)本研究の目的の一つは、延性モード条件にも関わらずクラックが生じる原因を明らかにすることである。研削中のサーボ情報を解析していたところ、クラックの発生は工具主軸のサーボ特性に大きく依存する可能性が示唆された。つまり、従来、プロセスの最適化と言えば、加工条件のみに焦点が当てられてきたが、光学材料の超精密研削のように非常にセンシティブなプロセスでは、サーボ制御も含めたプロセスの最適化が必要になる。サーボ特性がクラック発生に与える影響を明らかにするためには、実加工時のサーボ状態量計測と同期して、研削負荷計測とクラック発生検知を行う必要がある。しかしながら、工具も工作物も回転する超精密研削の場合、機械加工においてデファクトスタンダードとして使用されている圧電式力/トルクセンサを設置することは非常に難しい。そこで、研究代表者らが開発してきたセンサレス加工力推定技術と外付け可能なセンサ情報を併用したプロセス監視手法を提案する。具体的にはサーボ情報と AE 信号を用いた加工状態推定に取り組んだ[1]。

(2)もう一つの研究目的は、4K・8K に対応した大口径レンズを安定して研削できるクラック抑制サーボ制御手法の開発である。サーボ情報により推定した研削負荷に応じて、オーバーライドを変更して、クラックの発生を抑制することを試みた。

### 3. 研究の方法

#### (1) 加工状態監視システムとクラック検知方法

本研究で構築した加工状態監視のシステム構成を図 1 に示す。加工機の回転軸・並進軸サーボ情報や工具回転情報に加え、ワーク主軸に設置した AE センサから加工中の AE 信号を取得することが可能である。

本加工機の並進軸およびワーク回転軸には比例器と積分器を用いた位置制御が採用されており、高いロバスト性を有する。並進軸 (X, Y, Z 軸) およびワーク回転軸 (C 軸) の位置決め精度はそれぞれ 1 nm, 0.0001 deg である。ここで、超精密研削における各軸動作の加減速は十分に小さいため、駆動における慣性力は無視することができる。また、摺動摩擦も一般的な工作機械と比較して十分に小さい。そのため、外乱推定理論を考えれば、各並進軸の負荷変動はサーボ電流の変化に相当するとみなせる。そこで、被削材垂直方向加工負荷  $F_z$  は Z 軸の電流指令  $I_z^{cmd}$  に比例するモデルとした (式 1)。

また、取得サーボ情報から延性モード研削や脆性モード研削といった加工状態の判別を行う必要がある。そこで、比研削エネルギー (Specific grinding energy 以後,SGE) を応用し、新たな指

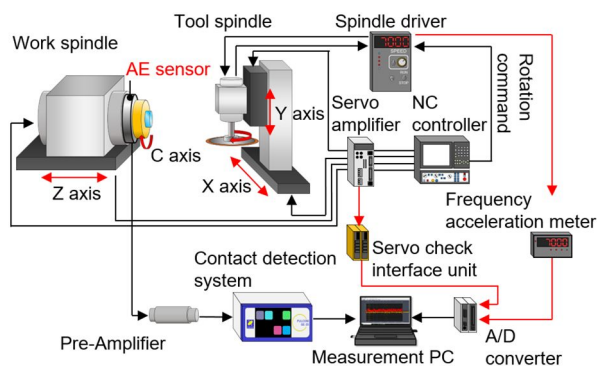


図 1 加工状態監視システム

標として、被削材垂直方向比研削エネルギー $SGE_z$ を定義した[2]。被削材垂直方向比研削エネルギー $SGE_z$ は式2のように表される。 $v_s$ は工具回転速度、 $f$ は工具送り速度、 $r$ は被削材中心からの距離、 $d$ は切り込み深さを指す。

$$F_z = K_{tz} I_z^{cmd} \quad (1)$$

$$SGE_z = \frac{F_z \cdot v_s}{f \cdot 2\pi r \cdot d} \quad (2)$$

## (2) サーボ情報に基づくクラック抑制方法

上記で提案した加工状態監視手法を用いた、マイクロクラック抑制システムを提案した。まず、加工状態監視に基づくリアルタイムでの加工制御のために、制御対象とするパラメータを決める。加工制御を行う上で、所望の加工形状を得るために被削材に対する工具軌跡を維持する必要がある。また工具側の主軸制御は加工機から独立して制御されている。これらの理由から、並進3軸とワーク主軸に関係するオーバーライドを変更することで、工具軌跡を維持したまま、砥石1回転あたりの切り取り厚さを変更することで、マイクロクラックを抑制する方法とした。本システムにおいて、加工機の外部に上位コントローラを実装した。この上位コントローラでサーボ情報を取得し、加工状態の判別を行うとともに、判別した加工状態に応じて加工機のオーバーライド指令を与える仕組みとした。この仕組みにより、予め設定したNCコードを変更することなく、加工状態監視に基づく実時間でのクラック抑制が可能となる。

## 4. 研究成果

### (1) サーボ情報とAEセンサを用いた加工状態監視システムの検討

#### サーボ情報を用いた加工面品位の解析

本研究で対象とするガラスの平面研削を行う場合、加工中の切り込み深さを変更することはできない。また、研削砥石は通常、一定回転で制御される。そのため、式2で示す被削材垂直方向比研削エネルギー $SGE_z$ の加工パラメータのうち、加工中に変更可能なパラメータは工具送り速度 $f$ のみとなる。そのため、工具送り速度 $f$ を変更して加工試験を行い、各加工状態における $F_z/f$ の比較を行った。図2に示すように、加工機にレジンボンド砥石工具および被削材として直径30mm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向かって送ることで、クロス研削加工を行った。工具送り速度は0.5 mm/minと1.0 mm/minに設定した。加工条件を表1に示す。

本研究では、延性モード加工と脆性モード加工に加え、延性面とマイクロクラックが混在する半脆性モード加工を含めた3つの加工モードを考え、加工状態の分類を行った。各加工状態の表面観察結果を図3に示す。

加工試験を行い、工具送り速度0.5 mm/minでは、加工位置に応じて延性モード、半脆性モード、脆性モードの3つの加工状態が得られ、1.0 mm/minでは半脆性モード、脆性モードの2つの加工状態が得られた。加工時における取得サーボ情報から算出した $F_z/f$ を図4に示す。延性モード、半脆性モード、脆性モードの順に $F_z/f$ の値は小さくなり、被削材外周部における各加工モードの差は顕著であった。そのため、 $F_z/f$ を指標とすることで、上記の加工状態を判別できることがわかった。

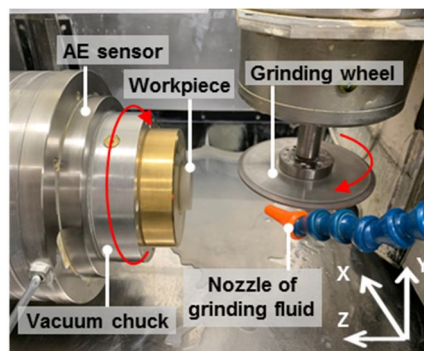
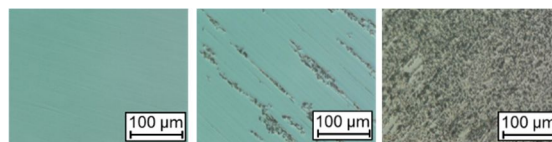


図2 ガラス材のクロス研削の様子

表1 BK7ガラスの研削条件

Depth of cut [ $\mu\text{m}$ ]	0.5
Wheel feed rate [mm/min]	0.5, 1.0
Workpiece rotational speed [ $\text{min}^{-1}$ ]	10
Wheel rotational speed [ $\text{min}^{-1}$ ]	7000
Sampling time of data logger [ms]	1



(a) 延性モード (b) 半脆性モード (c) 脆性モード

図3 加工状態の違い

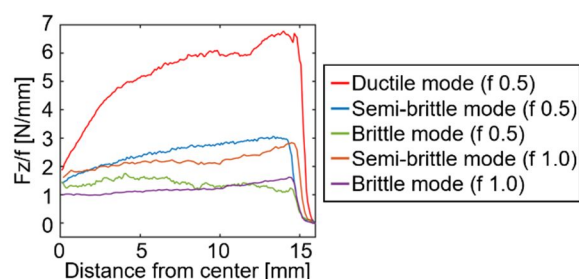


図4 各加工状態と $F_z/f$ の比較



### AE センサを用いた加工面品位の解析:

上述した3つの加工状態における AE 信号の波形の違いを解析した。加工条件は表2の通りで、工具送り速度は 0.5 mm/min とした。延性モード加工時と半脆性モード加工時の AE 信号波形の比較を行った。一例として、半脆性モード加工時の AE 信号のパワースペクトルを図5に示す。両加工モードの AE 信号波形を比較すると、183 kHz の帯域(帯域 A)のパワースペクトル値に対する、191~207 kHz の帯域(帯域 B)のパワースペクトル値に差が見られた。そのため、帯域 B のパワースペクトル値の総和(PSB)を帯域 A のパワースペクトル値(PSA)で除した指標を用いて評価した。延性モード加工時と半脆性モード加工時の PSB/PSA を図6に示す。延性モード加工時に比べ、半脆性モード加工時において PSB/PSA が高くなる傾向が確認された。

### (2) マイクロクラック抑制制御の有効性検討

サーボ情報により3つの加工モードを判別できたことから、本研究ではサーボ情報に基づく加工状態監視を応用して、マイクロクラックを抑制する制御技術の研究開発を進めた。上位コントローラでサーボ情報を取得し、演算により加工状態を判別した後、その結果に基づき加工機並進軸とワーク主軸のオーバーライドを調整してマイクロクラックの抑制を試みた。直径 30 mm のレンズ材を用いて、提案した制御手法の有効性を検討した。加工条件は工具送り速度を除き表2と同様であり、レンズの最外周部となる被削材中心からの距離が 15 mm の位置から、クラック抑制制御を開始した。予め取得した延性モード加工時の  $F_z/f$  の近似曲線を参照データと、今現在のサーボ情報から得られる  $F_z$  の推定値から、工具送り速度に対するオーバーライドを逐次算出して指令値とした。参照データと加工試験結果の  $F_z/f$  の比較と、オーバーライド指令により変化させた送り速度  $f$  を図7に示す。オーバーライドを調整しながら、 $F_z/f$  が参照データに追従していることがわかる。その結果、被削材全面においてマイクロクラックは一切発生せず、安定して延性モード加工が可能であることを確認した。また、被削材中心に向かうにつれて送り速度が高まり、送り速度一定の従来研削と比較して、加工時間を短縮することにも成功した。以上より、提案したマイクロクラック抑制制御手法の有効性が示された。

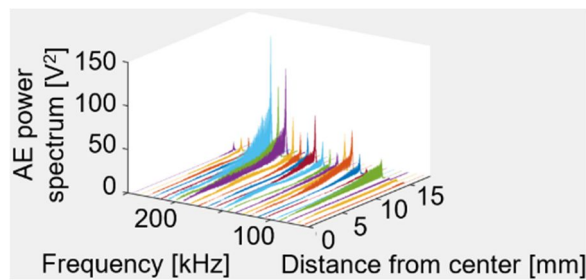


図5 半脆性条件における AE パワースペクトラム

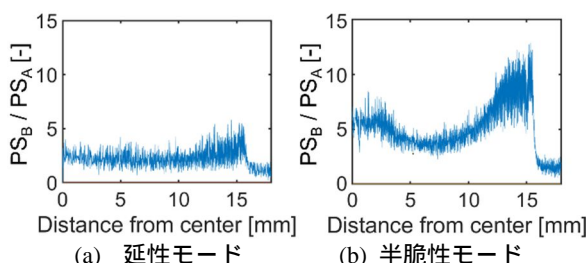


図6 AE 信号の指標に基づく比較

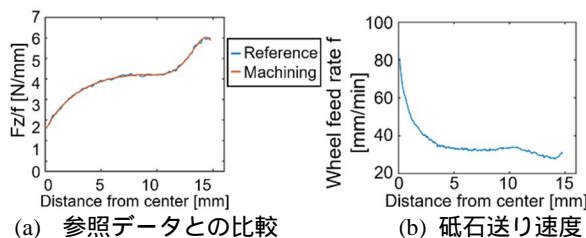


図7 加工時の挙動

### < 引用文献 >

- T.Suetomi, Y.Kakinuma, M.Fukuta, K.Tanaka, "Influence of servo characteristics on crack generation in ultra-precision grinding of optical glass lenses", *Procedia CIRP*, Vol.77, 2018, pp130-133
- 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.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Yamato Shuntaro, Ito Takamichi, Matsuzaki Hirohiko, Fujita Jun, Kakinuma Yasuhiro	4. 巻 159
2. 論文標題 Self-acting optimal design of spindle speed variation for regenerative chatter suppression based on novel analysis of internal process energy behavior	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Machine Tools and Manufacture	6. 最初と最後の頁 103639 ~ 103639
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmachtools.2020.103639	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamato Shuntaro, Nakanishi Kenichi, Suzuki Norikazu, Kakinuma Yasuhiro	4. 巻 110
2. 論文標題 Experimental verification of design methodology for chatter suppression in tool swing?assisted parallel turning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 1759 ~ 1771
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00170-020-05951-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamato Shuntaro, Kakinuma Yasuhiro	4. 巻 69
2. 論文標題 Precompensation of machine dynamics for cutting force estimation based on disturbance observer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 CIRP Annals	6. 最初と最後の頁 333 ~ 336
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cirp.2020.04.068	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 S.Yamato, A. Sugiyama, N. Suzuki, N. Irino, Y. Imabeppu, Y. Kakinuma,	4. 巻 104
2. 論文標題 Enhancement of cutting force observer by identification of position and force-amplitude dependent model parameters	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 3589-3605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00170-019-04080-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 S. Yamato, Y. Imabeppu, N. Irino, N. Suzuki, Y. Kakinuma	4. 巻 41
2. 論文標題 Enhancement of sensor-less cutting force estimation by tuning of observer parameters from cutting test	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Procedia Manufacturing	6. 最初と最後の頁 272-279
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.promfg.2019.07.056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Suetomi, Y. Kakinuma, M. Fukuta, K. Tanaka	4. 巻 77
2. 論文標題 Influence of servo characteristics on crack generation in ultra-precision grinding of optical glass lenses	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Procedia CIRP	6. 最初と最後の頁 130-133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 S. Yamato, T. Ito, H. Matsuzaki, Y. Kakinuma	4. 巻 18
2. 論文標題 Programmable optimal design of sinusoidal spindle speed variation for regenerative chatter suppression	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Procedia Manufacturing	6. 最初と最後の頁 152-160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 S. Yamato, Y. Kakinuma
2. 発表標題 Novel modelling, interpretation and design of spindle speed variation machining for regenerative chatter suppression
3. 学会等名 2nd International Symposium on Applied Abstraction and Integrated Design (AAID2020 (国際学会))
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Sato, S. Yamato, Y. Imabeppu, N. Irino, Y. Kakinuma
2. 発表標題 Precise cutting force estimation by hybrid estimation of DC/AC components
3. 学会等名 International Symposium on Flexible Automation, (ISFA2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Yamato, T. Ito, H. Matsuzaki, Y. Kakinuma
2. 発表標題 Investigation of correlation between process energy balance and phase shift variation of chatter vibration in spindle speed variation
3. 学会等名 JSME 2020 Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials and Processing (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 栗山充, 左高 志織, 柿沼康弘
2. 発表標題 サーボ情報と AE信号を用いた 光学ガラスの超精密研削における加工状態監視
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大和駿太郎, 伊東隆充, 松崎敬彦, 柿沼康弘
2. 発表標題 主軸速度変動によるびびり振動抑制の自動最適化設計ー変調指数に基づくびびり振動エネルギー最小化によるパラメータ選択ー
3. 学会等名 日本機械学会第13回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 栗山 充, 福田将彦, 田中克敏, 柿沼康弘
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Suetomi, Y. Kakinuma, M. Fukuta, K. Tanaka
2. 発表標題 Influence of servo characteristics on crack generation in ultra-precision grinding of optical glass lenses
3. 学会等名 8th CIRP Conference on High Performance Cutting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Yamato, T. Ito, H. Matsuzaki, Y. Kakinuma
2. 発表標題 Programmable optimal design of sinusoidal spindle speed variation for regenerative chatter suppression
3. 学会等名 18th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件



8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------