

平成23年 3月31日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2009～2010  
 課題番号：21760093  
 研究課題名 (和文) 砥粒分布および研削条件の精密制御による高脆性材料の超精密鏡面研削  
 研究課題名 (英文) Control of grinding conditions  
 and precision grinding of brittle materials.  
 研究代表者  
 吉原 信人 (YOSHIHARA NOBUHITO)  
 岩手大学・工学部・准教授  
 研究者番号：80374958

## 研究成果の概要 (和文)：

本研究の目的は、高脆性材料である石英ガラスの超精密鏡面研削を実現することである。超精密鏡面研削を実現するためには延性モード研削を行う必要があるため、石英ガラスの臨界切り込み深さを明らかにした。また連続砥粒切れ刃間隔を一定にするために、砥粒が均一に分散した砥石を開発した。また砥粒切り込み深さを臨界切り込み深さ以下にするために、最適な研削条件の選定を行った。これらの結果から、石英ガラスの鏡面研削に成功した。

## 研究成果の概要 (英文)：

Purpose of this study is to achieve the ultra precision grinding of brittle material such as fused silica. In this study, new grinding wheel, in which the abrasive grains are distributed uniformly, is developed, and guidance of grinding condition selection is indicated. As a result, fused silica is ground to mirror surface.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：切削・研削加工

## 1. 研究開始当初の背景

石英ガラスは良好な光の透過特性、耐熱性、耐食性を有するため、光学材料として注目されている。しかし石英ガラスは高脆性材料であり容易に脆性破壊が生じるため、研削により鏡面に仕上げるのが困難である。そのため現在、梨地面状態で後の研磨工程に供給されている。その結果、研磨工程の長時間化、形状精度の劣化などの問題が生じている。そ

こで本研究では、石英ガラスの鏡面研削を実現し、高能率で超精密の石英ガラス製非球面レンズを加工する。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、高脆性材料である石英ガラスの超精密鏡面研削を実現することである。

### 3. 研究の方法

高脆性材料である石英ガラスは、研削により鏡面を得ることは困難である。これは研削を行う際に最大砥粒切込み深さが石英ガラスの臨界切込み深さを容易に超えてしまうためであると考えられる。したがって、まず臨界切込み深さの値を知る必要がある。そしてその値を超えない研削条件を明らかにしなくてはならない。しかし実際の研削条件は、砥石表面の状態によって大きく変化する。そのため均一に砥粒が分散した砥石を開発する必要となる。また一般に用いられる研削条件と最大砥粒切込み深さの関係はプランジ研削にのみ適用されるものであり、本研究で対象とする超精密の成形研削に適用することはできない。したがって超精密成形研削時の砥粒切込み深さを明らかにする必要がある。

#### 3. 1 砥粒の分級分散 (均一分散砥石の開発)

連続砥粒切れ刃間隔のばらつきを小さくするためには、砥粒が均一に分散した砥石が必要となる。応募者らは超安定超精密研削用の砥石として、精密分級・均一分散砥石の開発を行ってきた。その技術を応用し、硬脆材料の鏡面研削に適した砥石を成形する。

#### 3. 2 研削条件の選定

##### 3. 2. 1 最大砥粒切込み深さの影響

延性モードから脆性モードへの遷移には最大砥粒切込み深さ  $g_m$  が影響していると考えられる。最大砥粒切込み深さ  $g_m$  は次式で表される。

$$g_m = 2a \frac{v}{V} \sqrt{\frac{\Delta}{D}} \quad (1)$$

ここで  $a$  は連続砥粒切れ刃間隔、 $v$  は工作物送り速度、 $V$  は砥石周速度、 $\Delta$  は砥石半径切込み深さ、 $D$  は砥石直径である。今回は砥石半径切込み深さ  $\Delta$  のみを変化させることにより、最大砥粒切込み深さ  $g_m$  を変化させる。実験方法を図1に示す。工作物を傾斜させて設置することにより、砥石半径切込み量を0から  $10\mu\text{m}$  まで増加させる。図2に実際に使用した実験装置を示す。カップツルアにより砥石のツルーイング・ドレッシングした後、傾斜させて設置した石英ガラスをダウンカットで研削する。そして未加工面を含む断面プロファイルを測定し、脆性破壊が発生する砥石半径切込み量を測定する。

##### 3. 2. 2 砥石周速度の影響

スクラッチ試験から得られる延性モードから脆性モードに遷移する切込み深さ  $d_c$  は次式で表される。

$$d_c \propto \left( \frac{E}{H} \right) \left( \frac{K_c}{H} \right)^2 \quad (2)$$

ここで  $H$  は硬脆材料のビッカース硬度、 $E$  はヤング率、 $K_c$  は破壊靱性値である。また材料

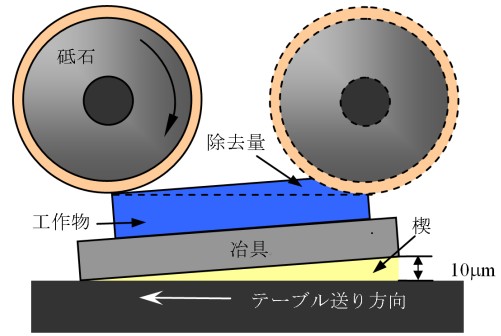


図1 研削実験概略

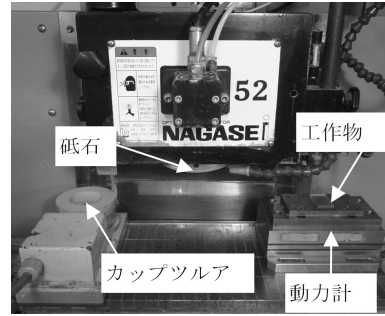


図2 実験装置

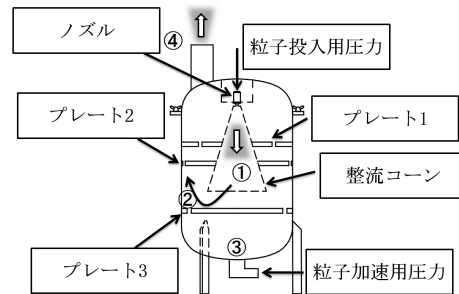


図3 分級装置概略

の温度が上昇するとビッカース硬度  $H$  が下がり、ヤング率  $E$  が上昇する。したがって発生する熱を大きくすることにより、切込み深さを大きくすることができると考えられる。そこで砥石周速度が延性モードから脆性モードに変化する砥石半径切込み深さ(以下、臨界切込み深さと記す)に与える影響を調べる。このとき最大砥粒切込み深さ  $g_m$  の影響を排除するために  $v/V$  を一定にする。

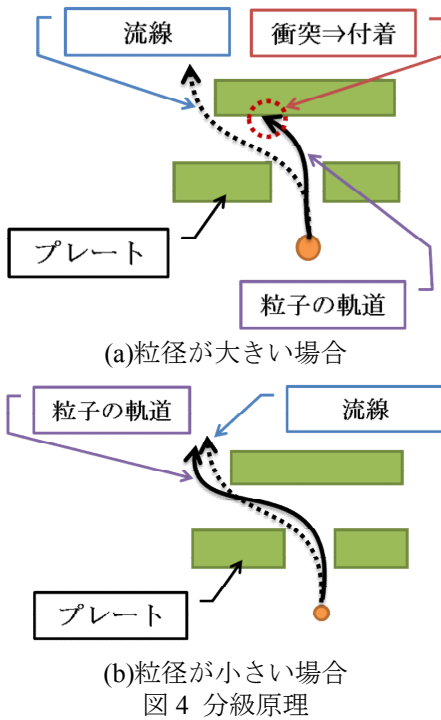
#### 3. 3 サブサーフェスダメージの評価

研磨工程への負荷を大きくする要因として、加工面の粗さのみではなくサブサーフェスダメージ(以下、SSDと略記する)の深さも挙げられる。そこでSSDの深さを測定する。

### 4. 研究成果

#### 4. 1 砥粒の分級分散 (均一砥粒砥石の開発)

本研究で用いる分級器の概略を図3に示す。分級器の上部に噴射ノズルが設置されている。また内部には三角錐形状の整流コーンが設置されており、整流コーンの外側には穴の



あいたプレートが設置されている。同装置による分級の仕組みは以下の通りである。

- (1) 噴射ノズルから粒子が投入される。
- (2) 整流コーンから出た粒子が気流に乗って舞い上がる。
- (3) 径の大きな粒子は慣性力によりプレートに衝突する。また径の小さな粒子は気流に乗って、プレートに設けられた穴を通り排出される。(図4参照)

#### 4. 1. 1 構造の最適化

同装置の構造を最適化する。まず流体解析ソフト(FLUENT)を用いて流線をシミュレートし、最適なプレート間距離を検討した。シミュレーションの条件を表1に示す。またシミュレーション結果の一例を図5に示す。同図中の流線がプレート1に接する部分のプレート2穴からの距離を衝突開始距離とする。このプレート間距離と衝突開始距離の関係を図6に示す。プレート間距離を大きくするほど衝突開始距離も大きくなることわかる。衝突開始距離が大きくなると慣性力による分級の効果が小さくなると考えられる。一方、衝突開始距離が小さい場合、粒子の大半が捕集されるため回収効率が低くなると考えられる。そこで最適なプレート間距離を5mmとした。

#### 4. 1. 2 分級実験

開発した分級器を用いて分級実験を行った。実験条件を表2に示す。分級前後の粒度分布を図7、図8に示す。同図より、径の大きな粒子が除去されていることが確認できる。また樹脂の粒径も小さくなっており、砥粒と結合剤の混合が容易となり、均一に砥粒が分散した砥石の実現が期待される。

表1 シミュレーション条件

プレート間距離	mm	5, 10, 15
穴間距離	mm	15
プレート1穴径	mm	2
プレート2穴径	mm	5
粒子投入圧力	MPa	0.2
粒子加速圧力	MPa	0.1

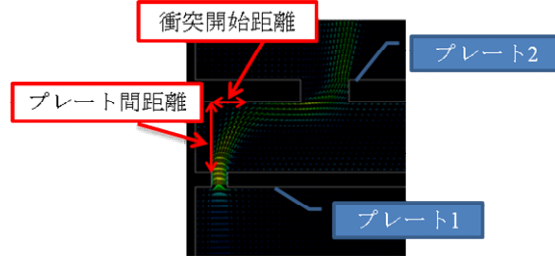


図5 シミュレーション結果例

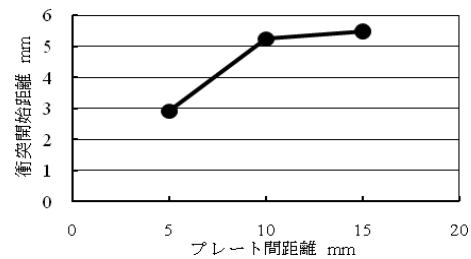


図6 衝突開始距離とプレート間距離

表2 分級実験条件

プレート間距離	mm	5
穴間距離	mm	15
プレート1穴径	mm	2
プレート2穴径	mm	5
粒子投入圧力	MPa	0.2
粒子加速圧力	MPa	0.1
捕集材		シリコゴム
投入粒子		ダイヤモンド砥粒 フェノール樹脂

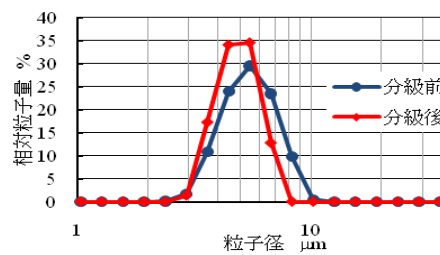


図7 ダイヤモンド砥粒(#3000)の粒度分布

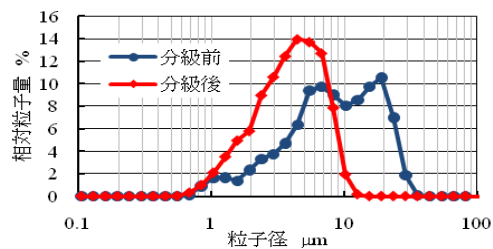


図8 フェノール樹脂の粒度分布

#### 4. 2 研削条件の選定

##### 4. 2. 1 最大砥粒切り込み深さの影響

表 3 に示す条件で研削実験を行った。砥石半径切込量と加工面性状の関係を図 9 に示す。同図より砥石半径切込深さが小さいときは延性モードで研削がなされており、大きくなると脆性モードに遷移することがわかる。

##### 4. 2. 2 砥石周速度の影響

実験結果を図 10 に示す。同図より砥石周速が高くなるほど、臨界切込深さが大きくなっていることがわかる。したがって高温になるほど臨界切込深さが大きくなり、高能率な加工が可能となると考えられる。

##### 4. 3. 3 サブサーフェスダメージの評価

実際に SSD の深さを測定し、砥石半径切込深さととの関係を調べた結果を図 11 に示す。延性モードで研削されている場合、SSD の深さはほぼゼロである。そして延性モードから脆性モードに変化した直後に SSD の深さが大きくなる。砥石半径切込深さが十分に大きくなると、SSD の深さは減少し安定することがわかる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

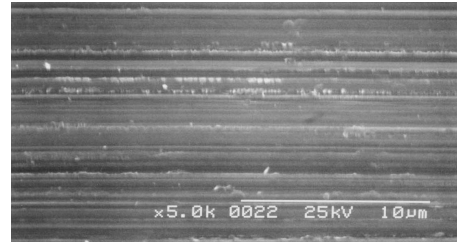
- ① Peng Yao, Nobuhito Yoshihara, Nobuteru Hitomi, Jiwang Yan and Tsunemoto Kuriyagawa, Ductile and Brittle Mode Grinding of Fused Silica, Key Engineering Materials, 査読有, 447-448, p21-25, 2010.
- ② Peng Yao, Takuro Abe, Nobuhito Yoshihara, Tianfeng Zhou, Jiwang Yan, Tsunemoto Kuriyagawa, Repairing Damage on Ground Fused Silica by CO<sub>2</sub> Laser Irradiation, Advanced Materials Research, 査読有, 126-128, p401-406, 2010.
- ③ 吉原信人, 閻紀旺, 厨川常元, 砥粒切削方向が研削面粗さに及ぼす影響について—非軸対称非球面研削に関する研究—, 精密工学会誌, 査読有, 76, 7, p781-785, 2010.

[学会発表] (計 4 件)

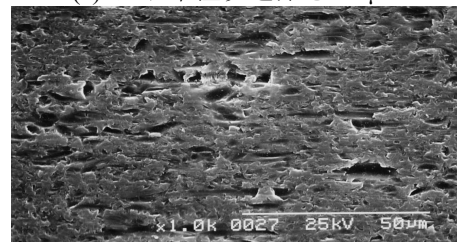
- ① 吉原信人, 袈屋恭平, 西川尚宏, 水野雅裕, 井山俊郎, 高能率研削における研削条件の最適化, 2010 年度精密工学会東北支部学術講演会, 2010 年 11 月 27 日, 岩手県工業技術センター.
- ② Nobuhito Yoshihara, Naohiro Nishikawa, Masahiro Mizuno, Toshirou Iyama, Jiwang Yan and Tsunemoto Kuriyagawa, Optimization of grinding conditions based on grinding theories, International Symposium on Micro/Nano Mechanical Machining and Manufacturing 2010 年 8 月 19 日, 桂林(中国).

表 3 実験条件

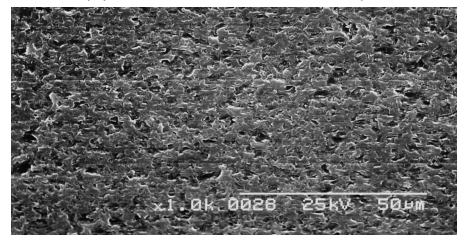
砥石	SD3000K100BPF
工作物	石英ガラス 40mm×25mm×5mm
送り速度 mm/s	0.33, 0.83, 3.3, 8.3
砥石周速度 m/s	10.5, 21, 31.5



(a) 砥石半径切込深さ 0.2μm



(b) 砥石半径切込深さ 1μm



(c) 砥石半径切込深さ 5μm

図 9 砥石半径切込深さと研削面性状の関係

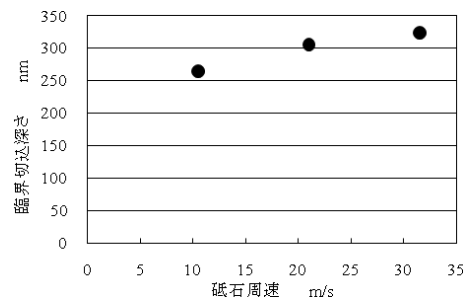


図 10 砥石周速と臨界切込深さの関係

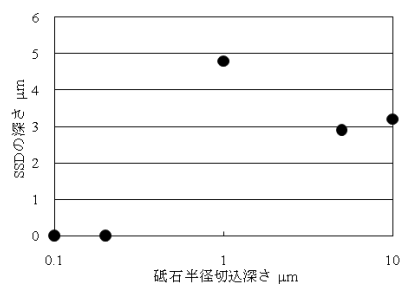


図 11 砥石半径切込深さと SSD の関係

- ③姚 鵬, 吉原信人, 閻 紀旺, 厨川常元, 石英ガラスの高能率超精密研削に関する研究, 2009年度精密工学会東北支部学術講演会, 2009年11月28日, 日本大学工学部.
- ④ Peng Yao, Nobuteru Hitomi, Nobuhito Yoshihara, Jiwang Yan and Tsunemoto Kuriyagawa, High Efficiency Precision Surface Grinding of Fused Silica, the 3rd International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 2009年11月11日, ステーションホテル小倉.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

特になし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉原信人 (YOSHIHARA NOBUHITO)

岩手大学・工学部・准教授

研究者番号: 80374958

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

該当なし