

熱可塑性樹脂砥石の研磨性能に関する研究

著者	川崎 柊耶, 丹 勇人, 津田 雄一郎, 鹿野 祐樹, 奈良 健太, 松浦 寛, 遠藤 春男, 斎藤 修
雑誌名	東北学院大学工学部研究報告
巻	55
号	1
ページ	47-51
発行年	2021-02
URL	http://id.nii.ac.jp/1204/00024695/

研究論文

熱可塑性樹脂砥石の研磨性能に関する研究

Study on the Polishing Performance of a Thermoplastic Resin Grinding Wheel

川崎 柊耶*	丹 勇人*	津田 雄一郎**	鹿野 祐樹***
Shuya KAWASAKI	Hayato TAN	Yuichiro TSUDA	Yuki KANO
奈良 健太***	松浦 寛*	遠藤 春男*	斎藤 修*
Kenta NARA	Hiroshi MATSUURA	Haruo ENDO	Osamu SAITO

Abstract: The end-face of optical fibers for optical communication is precisely polished. We have developed a grinding technology that allows for a mirrored surface to be obtained using a thermoplastic resin bonded to a diamond wheel without a polishing process. To demonstrate the superiority of the developed grinding wheel, the grinding characteristics were compared with those of a conventional thermosetting resin wheel. As a result, a surface roughness of 4.4 nm-Ra was obtained by grinding alone for 5 min at a with the concentration of 50 and a grain size of #12000.

Keywords: Thermoplastic resin, Optical fiber, Diamond abrasive

1 緒言

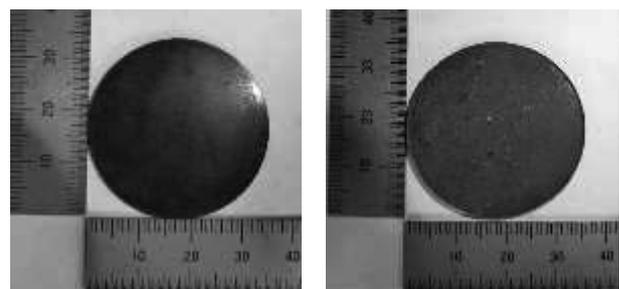
近年、5G 導入に伴い、高速光通信による大容量通信に適した光ファイバの需要が拡大している。これらに使用される光通信用コネクタは、光ファイバ間の接続に重要な部品である。接続時の損失を抑えるために端面を光学鏡面(表面粗さが 10~1 nm オーダ)に仕上げなければならない。[1]

一般に、光産業分野で用いられる光ファイバ(石英ガラス、フッ化ガラス、プラスチック)の加工は、砥粒を段階的に細かくしながら、最終的に研磨で仕上げている。そこで我々は、固定砥粒による研削加工だけで研磨加工と同等の表面性状を得ることを最終目標にしている。[2-8]

本研究では我々が開発したボンド剤に熱可塑性樹脂を用いた砥石を用いて、光ファイバ端面の加工を行った。今回、砥粒の粒度、及び集中度の最適条件を求めた。さらに熱可塑性樹脂砥石の優位性を示すために、従来から用いられている熱硬化性樹脂砥石との研磨性能をそれぞれ比較した結果、実用的な加工精度が得られたので報告する。

2 熱可塑性樹脂砥石

我々は、研削だけで研磨と同等の表面粗さを得る砥石の開発を行っており、本研究では、ボンド剤として熱可塑性樹脂のポリフェニレンサルファイド(PPS: Poly Phenylene Sulfide):ポリプラスチックス株式会社製を用いた。提案する熱可塑性樹脂砥石(以後、PPS 砥石と呼ぶ。)と研削性能を比較するため、従来から熱硬化性樹脂砥石(以後、PF 砥石と呼ぶ。)に使われているフェノール樹脂(PF: Phenol Formaldehyde)で砥石を作製した。成型直後の PPS 砥石と PF 砥石を図 1(a), (b)に示す。PPS は融点 280 °Cで連続使用温度が 200 °C, ガラス転移温度 90 °Cであることから加工時の熱に対



(a) PPS 砥石 (b) PF 砥石

図 1 成型直後の砥石

* 東北学院大学大学院

** 東北学院大学大学院(現: スズキ株式会社)

*** 東北学院大学大学院(現: 太平洋セメント株式会社)

表 1 作製した砥石の諸元および成型条件

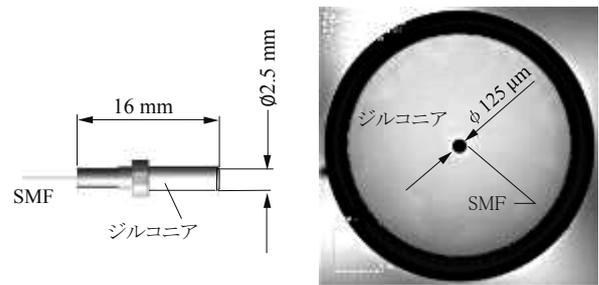
ボンド剤	PPS 樹脂	フェノール樹脂
比重	1.32	1.3
熱的性質	融点 約 240°C	荷重たわみ温度 75°C
吸水率 23°C/24 hrs	0.08%	0.2%
ガラス転移点	88°C	-
砥粒	ダイヤモンド (MBM シリーズ)	
砥石寸法	外径 35 mm, 厚さ 1 mm	
粒度	#3000, #6000, #12000	
砥粒集中度	50,100,150	
成形押付け力	約 6000 N	
成形最高温度	280°C	120°C
成形保持時間	18 min	11 min

して耐久性があり、ある一定の温度で軟質化する性質があるため、研削熱による砥石表面の軟化を図り、この樹脂を選択した。

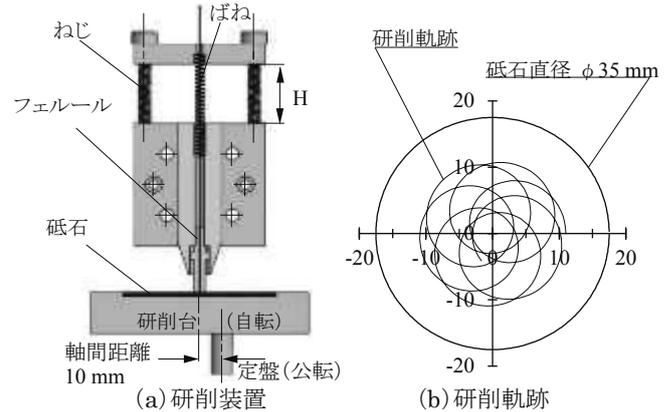
次に、砥石諸元と成型条件を表 1 に示す。成形機はロボシリンダー RCP2 (IAI 製)、カートリッジヒータ 08101020 (坂口電熱製) 6 本、K 熱電対、温度制御器 E5C (オムロン製) で構成されている。また、最大温度 450°C、最大押付け力 6000 N である。

先行研究では、砥石の粒度、及び集中度に関しての研削実験は行っておらず、砥石の成型条件の確立、及び研削速度(自転速度、公転速度)の最適条件に関して進めていた。さらに、砥石の研削性能を向上させるために研削前に砥石に GC 砥粒 (Green Carborundum) を用いて遊離砥粒ドレッシングすることで目立てを行い、砥石表面には砥粒数が多いほど良好な結果が得られると考えていた。しかし、廃液処理が必要であり研削毎の結果のばらつきが大きく、光ファイバ端面に複数のスクラッチやクラックが確認された。

これはワークとなる光ファイバの材料が石英ガラスであることから、砥石表面上で砥粒とワークが滑っていることから、十分に研削されていないことが原因であると考えている。そのため、砥石の集中度を低くすることで、砥粒 1 つあたりの荷重を大きくする。それにより切込み深さが確保でき、砥石の切れ味が向上する。さらに砥石表面の気孔数を増やすことができることから、切り屑の排出や自生作用が起きやすくなり、安定した研削加工が期待できる。このことから集中度が低い砥石による研削では脆性材料に対する研削能力が優れていると仮定して、集中度別での比較ができるように集中度を大きく変化した砥石で研削を行った。砥石は樹脂別、粒度別、集中度別の計 18 種類である。



(a) コネクタ寸法および外観 (b) コネクタ端面拡大写真
図 2 ジルコニアフェルール端面と形状



(a) 研削装置 (b) 研削軌跡
図 3 実験装置概要

3 実験系および評価方法

ワークに用いる光通信用コネクタ(以後、コネクタ)はコリメータ用のフラット研磨(傾斜 8°で平面研磨)されているものではなく、光コネクタ用の PC (Physical Contact) 研磨(コア同士を物理的に接触させるため曲率 R=20 mm で球面研磨)されているものを対象にしている。コネクタの外観を図 2(a)に、端面拡大写真を図 2(b)に示す。外周の黒い部分は面取り部の影である。コネクタの材質はジルコニアで、中心の穴径 126 μm に直径 125 μm の光ファイバ(石英ガラス)が接着剤で固定されている。

研削装置の構造を図 3(a)に示す。光コネクタはねじ送り機構を利用してばねを縮ませて砥石に押し当て、フックの法則により長さ(H)を変化させることで荷重を調整できる構造にしている。はじめに研削荷重別(1 N, 2 N, 3 N)で実験を行っている。装置は自転運動と公転運動を組み合わせた複合円軌跡機構のロータリー型である。砥石を取り付ける研削台は自転し、研削台を乗せる定盤は公転する。自転速度を 200 rpm, 公転速度を 30 rpm としている。自転軸と公転軸の軸間距離は 10 mm である。

砥石上のフェールの軌道は式(1),(2)より求め、軌跡を図 3(b)に示す。α は自転公転の速度比、

表 2 研削実験条件

加工方式	乾式
ワーク	シングルモード光ファイバ (SMF)
自転の回転数	200 rpm
公転の回転数	30 rpm
研削時間	1 min 毎, 最長 5 min
ばねによる研削荷重	1 N, (2 N, 3 N)
SMF 実験開始前表面粗さ	100 nmRa ~ 120 nmRa
ドレッシング	無し

β は公転の半径, γ は駆動軸の半径である. 本研究では $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 7 \text{ mm}$, $\gamma = 3 \text{ mm}$ とした.

$$x = \beta \cos\theta + \gamma \sin(\alpha \cdot \theta) \quad (1)$$

$$y = \beta \sin\theta + \gamma \sin(\alpha \cdot \theta) \quad (2)$$

次に, 実験条件を表 2 に示す. 実験工程のフローチャートを図 4 に示す. 先行研究の結果から, PPS 砥石の湿式研削では光ファイバ端面の表面粗さが 20 nmRa 以下にならなかった (Ra: 算術平均表面粗さ). これは冷却水の効果により PPS の軟化温度に到達していないと考えた. また, PF 砥石は湿式と乾式による表面粗さの違いはなかった. また, 乾式研削の場合, 水や研削液を必要としないことから作業工程を大きく省略できる. よって, 本実験は乾式研削と研削荷重で熱可塑性樹脂砥石を軟化させることにした.

表面粗さの変化を観察するため, 光ファイバ端面の表面粗さ 1 nmRa の製品を粒度 #1000 のサンドペーパーで前処理 (表面粗さ $100 \sim 120 \text{ nmRa}$) した実験サンプルを用意した. 次に, 実験装置のばねの変位を調整して, フェルルールに研削荷重をかけた. 研削加工のインターバル時間は 1 回当たり 1 min とし, 毎回観察を行っている. また, 生産性を考慮して, 研削時間は最長 5 min までとした. 研削加工後にレーザー顕微鏡 (オリンパス製, LEXT OLS4000), および SEM (日立ハイテクノロジーズ製, TM3000) で表面粗さ, および表面の状態を観察した. 設定した研削荷重で, 粒度ごとの表面粗さの時間変化を測定した結果を図 5 に示す. 砥石のボンド剤の種類にかかわらず研削荷重を大きくすると表面粗さが悪くなっていった. この結果から今後の実験では, 研削荷重は 1 N のみで行った. 研削性能は, 光ファイバ端面の表面粗さで評価することにした. 光接続部品の一般仕様の接続損失 0.3 dB 以下を満たすために光ファイバ端面の到達算術平均粗さは 10 nmRa 以下を目標値とした.

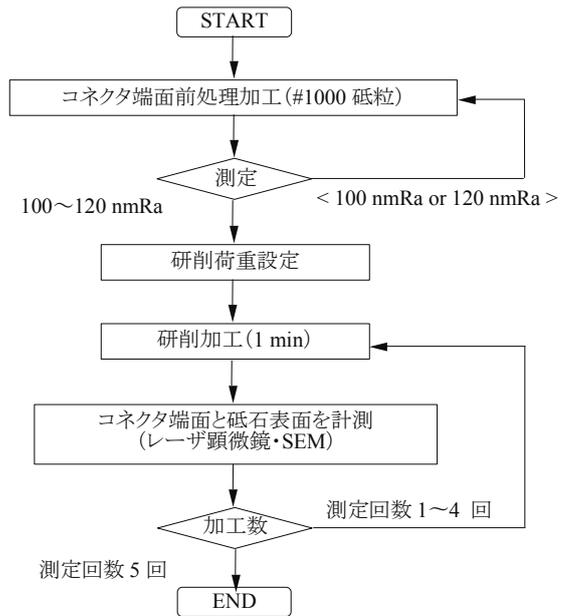


図 4 実験フローチャート

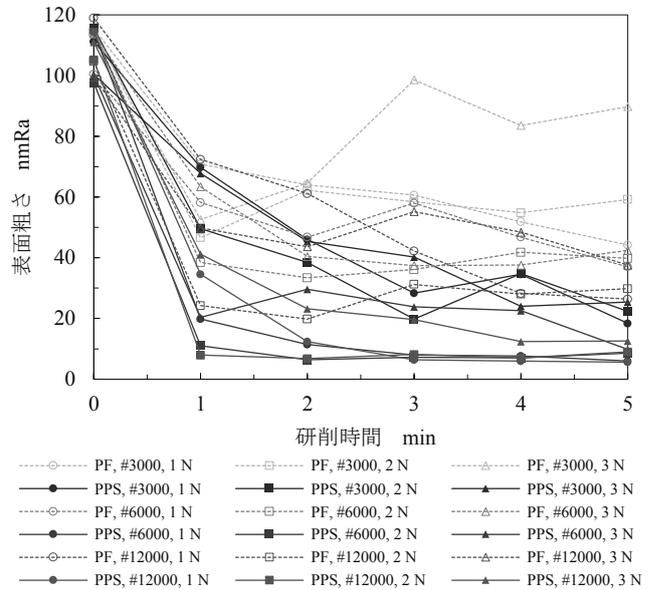


図 5 各研削荷重による表面粗さの変化

4 実験結果

4.1 熱硬化性樹脂砥石 (PF 砥石) による研削

PF 砥石による研削の表面粗さを図 6 に示す. 研削荷重は全て 1 N である. 粒度 #3000 の表面粗さは, 研削開始から 1 min で 70.8 nmRa , 5 min で 44.2 nmRa であった. 粒度 #6000 は 1 min で 58.2 nmRa , 5 min で 37 nmRa , 粒度 #12000 は 72.4 nmRa , 5 min で 26.4 nmRa となった. そこで, 粒度 #3000 で 5 min 研削後の表面粗さ (44.2 nmRa) を基準として, 粒度別に表面粗さを比較すると, 粒度 #6000 は 1.19 倍, 粒度 #12000 は 1.67 倍に向上した. 次に, 最も表面粗さが良かった粒度 #12000 の

PF 砥石による研削前後の光ファイバ端面の状態を 図 7 に示す. 図 7(a) は光ファイバ端面を 100~120 nmRa の粗さに処理した研削前の端面写真である. 5 min 研削後の光ファイバ端面を 図 7(b) に示す. 最大幅 5 μm, 最大深さ 1.05 μm のスクラッチ痕, 直径 2.6 μm~21 μm のクラックが確認できた.

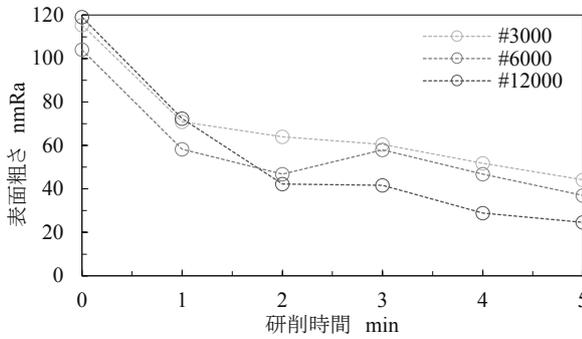
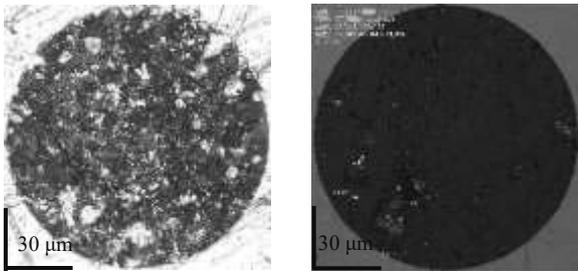


図 6 PF 砥石研削による表面粗さ(研削荷重 1 N)



(a) 研削加工前 (b) 5 分研削後 (#12000)

図 7 PF 砥石研削による光ファイバ端面

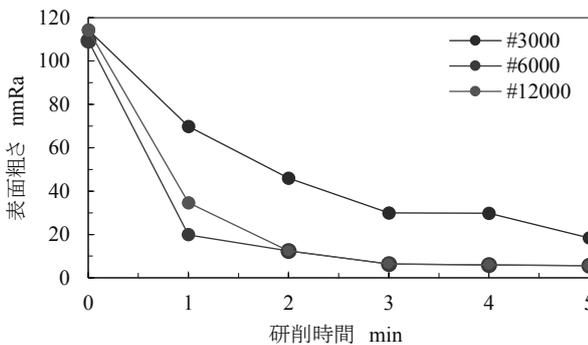
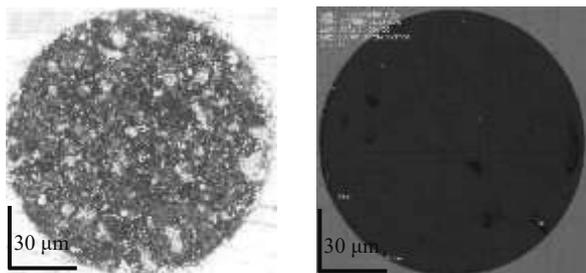


図 8 PPS 砥石研削による表面粗さ



(a) 研削加工前 (b) 5 min 研削後 (#12000)

図 9 PPS 砥石研削による光ファイバ端面

4. 2 熱可塑性樹脂砥石 (PPS 砥石) による研削

PPS 砥石による研削後の表面粗さを 図 8 に示す. 研削荷重は PF 砥石と同様に 1 N のみである. 粒度 #3000 の表面粗さは, 加工開始から 1 min で 69.8 nmRa, 5 min で 18.4 nmRa であった. 粒度 #6000 は 1 min で 19.8 nmRa, 5 min で 6 nmRa, 粒度 #12000 は 1 min で 34.6 nmRa, 5 min で最小値 5.6 nmRa となった. 同様に, 粒度 #3000 で 5 min 研削後の表面粗さ (18.4 nmRa) を基準として, 粒度別に表面粗さを比較すると, 粒度 #6000 は 3.06 倍, 粒度 #12000 は 3.29 倍に向上した.

次に, 粒度 #12000 の PPS 砥石による研削前後の光ファイバ端面を 図 9 に示す. 研削前と後の状態をそれぞれ 図 9(a), および 図 9(b) に示す. 光ファイバ表面上に最大幅 1 μm, 最大深さ 0.5 μm のスクラッチが複数確認できた.

4. 3 砥粒集中度別による研削

最も良好な研削結果が得られた集中度 50, 粒度 #12000 の PPS 砥石による研削前後の光ファイバ端面を 図 10 に示す. 集中度 50, 粒度 #3000 の表面粗さは, 加工開始から 1 min で 65.6 nmRa, 5 min で 33.6 nmRa, 集中度 50, 粒度 #6000 は 1 min

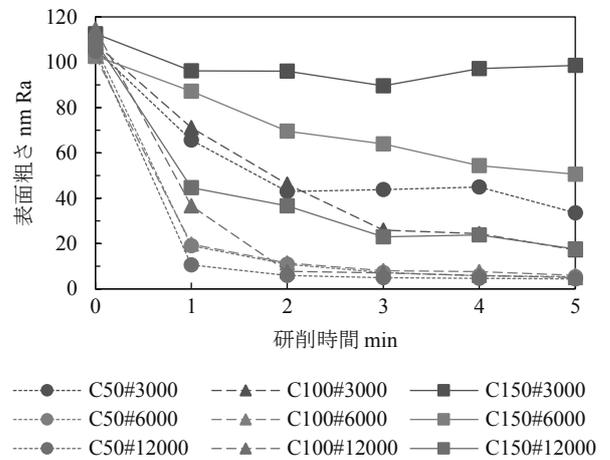
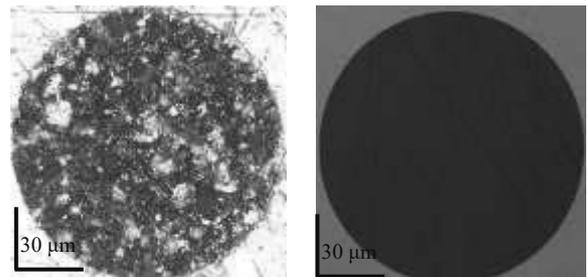


図 10 PPS 砥石研削による表面粗さ



(a) 研削加工前 (b) 5 min 研削後 (#12000)

図 11 PPS 砥石研削による光ファイバ端面

で 19.0 nmRa, 5 min で 5.4 nmRa であった. 集中度 50, 粒度#12000 は 1 min で 10.6 nmRa, 5 min で最小値 4.4 nmRa となった. 続いて, 集中度 150, 粒度#3000 の表面粗さは, 加工開始から 1 min で 96.2 nmRa, 5 min で 98.6 nmRa で, 集中度 150, 粒度#6000 は 1 min で 87.2 nmRa, 5 min で 50.6 nmRa, 集中度 150, 粒度#12000 は 1 min で 44.6 nmRa, 5 min で 17.6 nmRa となった. 研削前後の状態をそれぞれ図 11(a), および図 11(b)に示す. 光ファイバ表面上にはスクラッチやクラックが確認されず, 良好な研削結果が得られた.

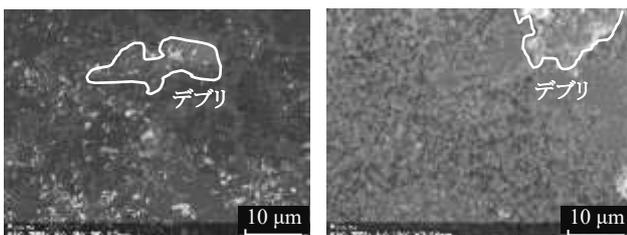
4. 4 研削前後における砥粒密度の比較

SEM の EDX 画像 (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) から砥粒数を抽出して, 研削前と 5 min 研削後の砥石表面に分布する砥粒密度を調べた結果を表 3 に示す. 粒度#3000 の PF 砥石の砥粒密度は研削前が 32.75 %, 研削後が 27.11 % で, 研削前と比較して 17 %ほど砥粒が減少していた. 同様に, 研削前に比較して研削後は, 粒度#6000 が 21 %, 粒度#12000 が 25 %ほど砥粒密度が減少した. 粒度#3000 の PPS 砥石は研削前が 20.15 %, 研削後は 24.82 %で, 研削前に比べ 23 %ほど砥粒が増加した. 同様に, 粒度#6000 が 4 %, 粒度#12000 が 8 %ほど砥粒が増加した.

次に, SEM で集中度 100, 粒度#3000 の PF 砥石と PPS 砥石の表面を観察した写真を図 12 に示す. 実線部で囲まれている部分がデブリである. 研削前は砥粒のみであったが, PF 砥石, PPS 砥石共に研削後はデブリが砥粒を覆っていた. 全体として表面にある砥粒数が増えていた.

表 3 PF 砥石, PPS 砥石表面の砥粒密度変化

砥石	粒度	研削前 %	研削後 %
PF	#3000	32.75	27.11
	#6000	49.38	38.56
	#12000	76.25	57.41
PPS	#3000	20.15	24.82
	#6000	46.92	48.70
	#12000	61.54	66.60



(a) PF 砥石

(b) PPS 砥石

図 12 研削後の砥石表面状態

5 結言

固定砥粒加工のみで光ファイバの最終仕上げを目標として PPS 砥石と PF 砥石による乾式研削加工での比較を行い以下のことが分かった.

- (1) 熱可塑性樹脂をボンド剤に用いることで熱硬化性樹脂よりも加工性能に優れている.
- (2) 集中度 100 以下の砥石の方が, 研削性能が優れている傾向がみられる.
- (3) 砥粒は#6000 以上の砥石を用いてナノオーダー (10 nmRa 以下) の表面性状が得られる.
- (4) PPS 砥石で集中度 50, 粒度#12000 で 5 min 研削して, 最良値の表面粗さ 4.4 nmRa が得られ, 短い研削時間で目標値を達成することができた.

従来の熱硬化性樹脂砥石による精密研削にはドレッシングが必要であるが, 我々が開発した熱可塑性樹脂砥石はドレッシングを施さず, 乾式研削のみで光ファイバの端面を市販の研磨製品と同等の鏡面にすることができる. これにより廃液処理を必要としない砥石を提案することができた.

参考文献

- [1] 小林昭: 超精密生産技術大系, 第 1 巻基本技術, 株式会社フジテクノシステム, (1995) 848, 849, 851.
- [2] 松浦寛ほか: 熱可塑性レジンボンド砥石の研削性能, 砥粒加工学会誌 53, 12 (2009) 756.
- [3] 佐賀渉ほか: 光ファイバの光学研磨のための熱可塑性樹脂パッドの研究, 2017 年度砥粒加工学会学術講演会論文集.
- [4] 奈良健太ほか: 光ファイバ端面の鏡面加工における再生熱可塑性樹脂砥石の加工特性, 砥粒加工学会誌 63, 9 (2019) 478.
- [5] 鹿野祐樹ほか: 熱可塑性樹脂砥石を用いた脆性材料の研削性能に関する研究, 砥粒加工学会誌 64, 7 (2020) 373.
- [6] 鹿野祐樹ほか: 熱可塑性樹脂パッドによる光ファイバ端面の鏡面加工方法の研究, 2018 年度砥粒加工学会学術講演会論文集.
- [7] 奈良健太ほか: 再生熱可塑性樹脂パッドによる光ファイバ端面の鏡面加工方法の研究, 2018 年度砥粒加工学会学術講演会論文集.
- [8] 津田雄一郎ほか: 鏡面研削のための熱可塑性樹脂用ドレッシングの開発, 2019 年度砥粒加工学会学術講演会論文集.