

低エネルギーアーク放電による 高能率・低ダメージなコアリング研削用 超薄型ダイヤモンド電鍍砥石修正法の開発

古木辰也

Development of an ultra-thin diamond electro-molded wheel truing method for highly efficient and low-damage coring grinding by low-energy arc discharge

Tatsuya Furuki

With the growing expectations for automated driving and advanced driver assistance technology, a large number of sensors are required, and mass production of high-precision lenses is desired. Glass lenses are expected to be used as such high value-added lenses. Traditionally, glass lenses have been manufactured using tungsten carbide molds, but there are limits to the precision and life of these molds, and recently it has become desirable to use CVD-SiC as the mold material. However, because of the high hardness of CVD-SiC, a large amount of processing time is required to extract a large amount of mold material from a CVD-SiC wafer. In this study, we aim to use an ultra-thin diamond electroformed grinding wheel to extract mold materials from wafers with high yield and high efficiency. On the other hand, it is difficult to modify the diamond electroformed grinding wheel using conventional truing and dressing methods. Therefore, this study reports an attempt of discharge truing, in which the working surface of the grinding wheel is corrected by arc discharge.

Keywords : *Discharge truing, electro-molded wheel, CVD-SiC*

1. はじめに

自動運転や高度運転支援技術の期待の高まりにともなって、多数のセンサが必要となったことで、高精度なレンズの大量生産が望まれている¹⁾。これまでレンズ材料には軽量かつ製作が容易なプラスチックが用いられてきたが、低屈折率や経年劣化などの課題がある。そこで、このような高付加価値レンズとしてガラスレンズが期待されている。従来、ガラスレンズは超硬合金製金型で製造されてきたが、結晶粒界段差の影響により成形品の表面品位は限界に至っている。一方で近年、微粒子かつ高密度で SiC を焼結 SiC 上に蒸着する CVD 法が開発された²⁾。当該手法で創成された CVD-SiC は、超硬合金と比べ、高い剛性、高温下での形状安定性を有しており、CVD-SiC を金型材料に使用することで上記課題の解決が期待され

る．通常，ガラスレンズ成形型の形状は円柱状である．しかし，CVD-SiC は高硬度なため，CVD-SiC 基材から円柱状素材を取り出すことが，従来法では低効率であった．図 1(a)に既存の CVD-SiC 製成形型の製造方法を示す．CVD-SiC 基材からダイヤモンドブレードによるダイシングで角柱状素材を取り出す．次に円筒研削により円柱形状としていた．この方法では，加工工数が多いこと，歩留まりが悪いといった課題がある．そこで本研究では，図 1(b)に示す円筒状くり抜き工具により CVD-SiC 基材から円柱状素材を直接取り出す手法を提案している．本研究では，図 2 に示す超薄型ダイヤモンド電鍍砥石により高い歩留まりかつ高能率に円柱状金型素材をウェハから取り出すことを考えた．

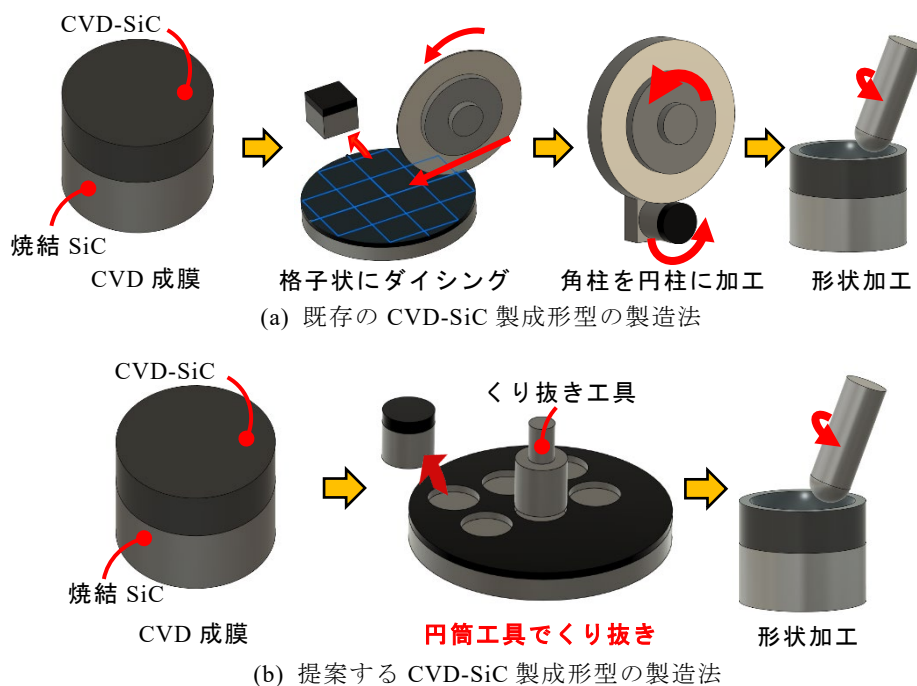


図 1 CVD-SiC 成形型の製造方法の比較

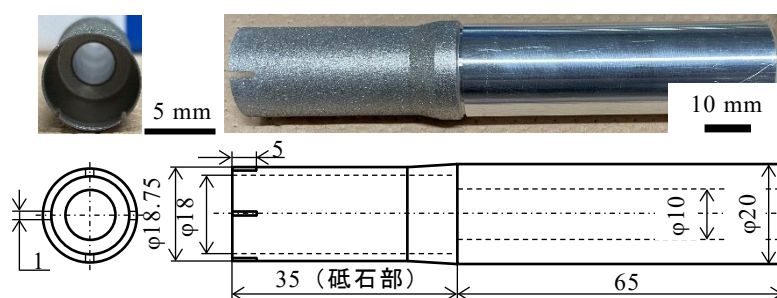
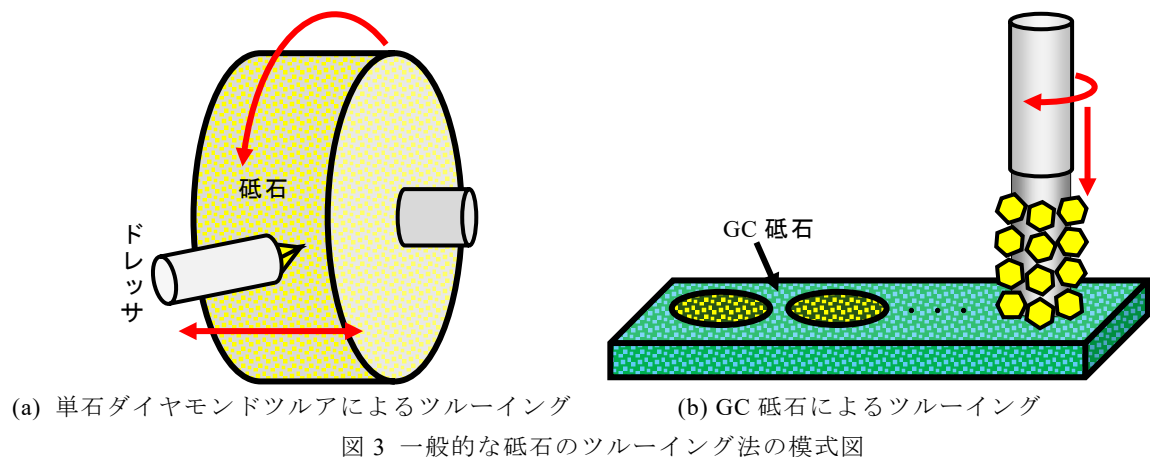


図 2 超薄型ダイヤモンド電鍍砥石の外観と寸法

表 1 超薄型砥石の仕様

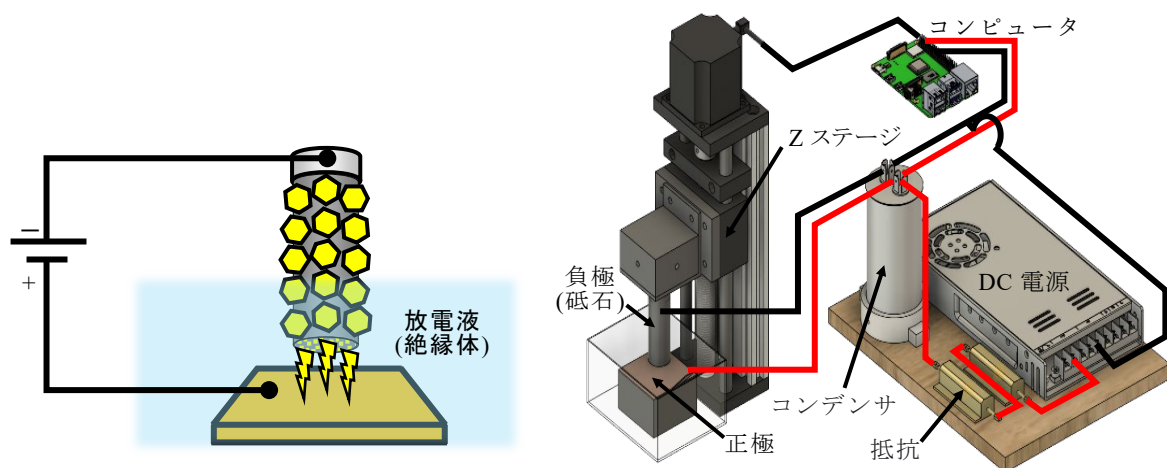
外径	Φ18.75 mm
厚さ	t0.375 mm
砥粒 平均粒径	SD230 Φ70 μm
砥石部長さ	25 mm

一方で，超薄型ダイヤモンド電鍍砥石は通常のツルーイング（摩耗した砥粒を除去し，砥石内部の新たな砥粒を砥石表面に出現させること）法で砥石修正が困難である．例えば，図 3(a)のような単石ダイヤモンドツールによる機械的なツルーイングでは，超薄型砥石が弾性変形し砥石作用面を除去できない．また図 3(b)の GG 砥石を加工することでツルーイングを行う方法では，数百から数千穴の加工を必要とするため膨大な非加工時間とコストを要する．ここで，超薄型ダイヤモンド電鍍砥石では，結合剤としてニッケル等の金属を用いている．すなわち，砥石は導電性を有する．したがって本研究では，アーク放電により非接触で砥石作用面を除去し，修正する放電ツルーイングを試みたので報告する．



2. 放電ツルーイング装置の試作

放電ツルーイングは図 4 左に示すように、負極である砥石と正極である金属電極を放電液中に配置し、両電極間に電圧を印加することで、両電極間の放電液を絶縁破壊させることでアーク放電を発生させ、負極側の砥石底面部（作用面）を除去する方法である。一般的に放電回路には、電源と抵抗、コンデンサから成る RC 放電回路⁴⁾とトランジスタを付加したトランジスタ放電回路⁵⁾がある。前者は電極消耗が早いものの、単位時間あたりに比較的大きな除去量を得られることが特徴である。後者は電極消耗を抑制できるが、単位時間あたりの除去量が相対的に小さくマイクロ加工に向く。本研究では、短時間で超薄型砥石作用面の除去・修正を完了したいため、RC 放電回路を採用した。放電ツルーイング装置に必要な要素としては、電極に電圧を印加する電源部と両電極間の放電ギャップを維持するための制御部である。本研究では、図 4 右に示す放電ツルーイング装置を試作した。電源には 48V の DC 電源を用い、コンデンサには 30 μF の電解コンデンサを用いた。砥石と電極間の放電ギャップの保持のために、電動 1 軸ステージを用い、その制御はシングルボードコンピュータ (RaspberryPi4) で行っている。



3. ダイヤモンド電着砥石を用いた放電ツルーイング装置の放電試験と適正条件の調査

試作した放電ツルーイング装置が正常に砥石の放電ツルーイングが実行可能であることを、ダイヤモンドを金属丸棒にニッケルで電着固定したダイヤモンド電着砥石に対して放電ツルーイング実験することで検証した。

3.1. 放電液がアーク放電に与える影響の調査

放電加工では放電液として一般的に水もしくは油を用いる。水を用いた場合、除去速度や放電ギャップが増大するというメリットがあり、油を用いた場合では、放電加工された表面の粗さが良好となる。本研究では砥石作用面に高い表面粗さを得ることが目的ではないため、放電液には水を用いた。通常、水は絶縁体であるが水道水には塩化物やミネラル物質が含まれており、加工液内にこれらが多く含まれている場合、加工液の電気伝導率が増大する。放電加工では、絶縁体である加工液が大電流により絶縁破壊することでアーク柱が形成される。ここで、水道水と脱イオン水の電気伝導率には、2000 倍程度の違いがあることが知られている³⁾。したがって、本研究では、水道水と脱イオン水生成器で得た純水を放電液として放電確認試験を行った。その他の条件は以下のとおりである。ダイヤモンド電着砥石の粒度は本研究で取り扱った電着砥石においてもっとも砥粒径の小さい SD325（平均粒径： $\phi 49\text{ }\mu\text{m}$ ）、正極電極は真鍮板である。放電発生の有無は目視で行った。実験時の様子を図 5 に示す。放電液に水道水を用いた場合、放電ギャップによらず放電しなかった。一方で、純水を用いた場合には放電を確認できた。以上より、脱イオン水を用いたことで、ダイヤモンド電着砥石と電極間にアーク放電が形成されたことを確認できたため、以降の実験は放電液に脱イオン水を使用することとした。

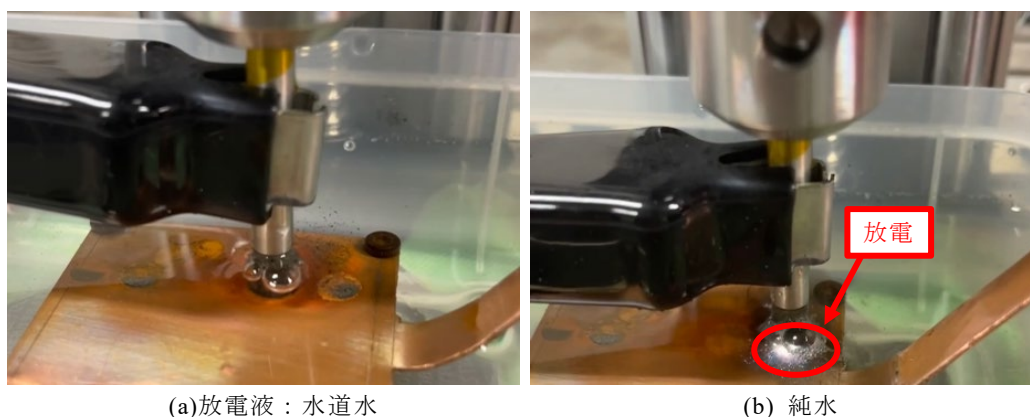


図 5 粒度が異なるダイヤモンド電着砥石を用いた放電ギャップの確認

3.2. 最大放電ギャップの確認試験

砥石と電極間においてアーク放電が生じなくなる放電ギャップが超薄型ダイヤモンド電鍍砥石に用いている砥粒の半径よりも小さい場合、超薄型砥石の放電ツルーイングは不可能である。そこで、粒度が異なるダイヤモンド電着砥石を用いて、最大放電ギャップを確認した。ダイヤモンド電着砥石の粒度は SD100（平均粒径： $\phi 160\text{ }\mu\text{m}$ ）、SD200（平均粒径： $\phi 80\text{ }\mu\text{m}$ ）、SD325（平均粒径： $\phi 49\text{ }\mu\text{m}$ ）の 3 種類である。ダイヤモンドは絶縁体であるので、放電は砥石の結合剤と電極間で発生する。電着砥石において、結合剤から砥粒が突き出している高さは、およそ砥粒径の 50% である。すなわち、放電の有無と砥粒半径からおよそその最大放電ギャップを確認した。確認方法は前節と同じく目視にて放電の有無を確認した。砥石以外の放電条件は以下のとおりである。放電液は脱イオン水、正極電極は真鍮である。図 6 に SD100 電着砥石と SD200 電着砥石で放電試験を行った際の様子を示す。SD100 砥石を用いて放電試験を行ったところ、砥石と電極が接触する間隙においても放電が発生しなかった。一方で、SD200 砥石を用いた際には放電を確認できた。またもっとも細粒である SD325 砥石を用いた場合でも放電を確認した。したがって、本研究で試作した放電ツルーイング装置の最大放電ギャップは $80\text{ }\mu\text{m}$ 程度を有していることがわかった。超薄型ダイヤモンド電鍍砥石の粒度は SD230 であり、平均粒径は $70\text{ }\mu\text{m}$ であるため、超薄型砥石に対して放電ツルーイングを行う能力を十分に有していることがわかった。



(a) SD100 電着砥石による放電実験の様子

(b) SD200 電着砥石による放電実験の様子

図 6 粒度が異なるダイヤモンド電着砥石を用いた放電ギャップの確認

3.3. 正極電極材料の影響

ここまでの確認試験において、正極である電極板には真鍮を用いてきた。真鍮板を用いた場合でも放電されることは確認したが、連続的な放電を維持しにくいという課題があった。その要因は真鍮の電気伝導率にあると考えた。そこで、真鍮と比べて電気伝導率が高い銅を電極として用いて追試験を行った。真鍮の電気伝導率は $14.3 \sim 25.0 \times 10^6 \text{ S/m}$ であるのに対して、銅は $43.5 \sim 62.5 \times 10^6 \text{ S/m}$ と大きい。実際に銅を電極として放電試験した結果、真鍮と比べて連続的な放電を安定して得られたため、これ以降の実験では電極板材料には銅を採用した。

4. 放電ギャップの制御

砥石と電極間でアーク放電が生じると砥石の結合剤が除去されて放電ギャップが大きくなり、放電が得られなくなる。したがって、常に放電を得られる放電ギャップを維持しなければならない。そこで、正極側の電圧 (48V) を分圧 (5V) し監視することで、放電の有無を判断し、1 軸ステージを制御することで放電ギャップを維持した。放電が行われていないとき、正極側には 5V (分圧後) が印加されている状態にある。しかし、放電が生じるとその電圧が低下し、放電が停止するとコンデンサは蓄電され電圧が 5V まで復帰する。この電圧低下を読み取り、1 軸ステージを下降させることで放電ギャップを維持した。実際に放電前後の正極側電圧を測定した結果を図 7 に示す。コンデンサは放電後、急速に蓄電が完了するが、この速度に対してステージの応答性が低いことから、ローパスフィルタ処理した電圧によりステージを制御している。この制御により放電ツルーイングの自動化が可能となった。

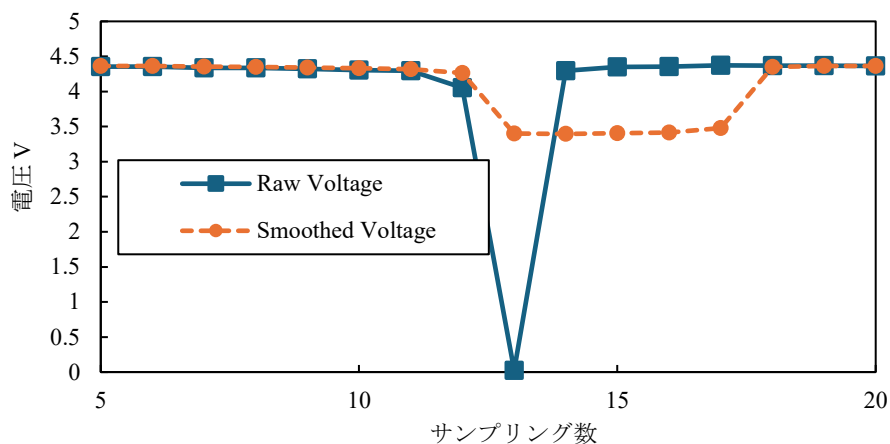


図 7 放電前後の正極側電圧の変化

5. ダイヤモンド電着砥石を用いた放電ツルーイング性能の調査

ダイヤモンド電着砥石を放電ツルーイングすることで試作装置のツルーイング性能を評価した。超薄型ダイヤモンド電鍍砥石の粒径に近い SD200 ダイヤモンド電着砥石を用いて、砥石底面の砥粒数と放電時間の関係を調査することで、性能評価した。図 8(a)に放電前の電着砥石底面画像を示す。このような画像を砥石底面の複数箇所にて撮影した後、各画像中に存在する砥粒数をカウントし、放電時間の増加に伴って砥粒数がどのように変化するか調べた。図 8(b)に放電を 40 秒間行った後の砥石底面画像を示す。ほぼすべての砥粒が脱落し、結合剤も除去され台金金属が露出していることがわかる。図 9 に放電時間と砥粒数の関係を示す。20 秒程度の放電で 80%以上の砥粒が除去されていることがわかった。この結果より、試作した放電ツルーイング装置は極めて高いツルーイング能率を得られることが確認できた。

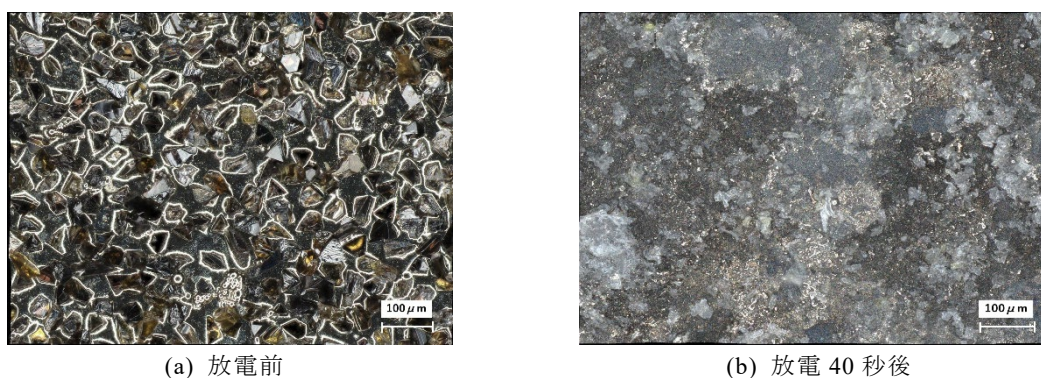


図 8 放電ツルーイング前後の電着砥石底面のマイクロスコブ画像

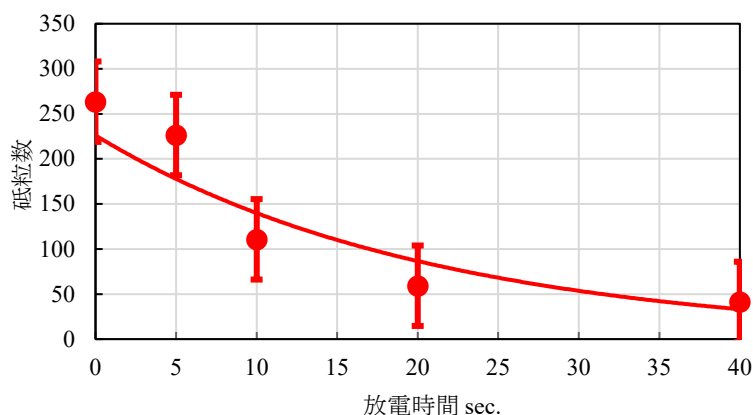


図 9 電着砥石底面の砥粒数と放電時間の関係

6. 超薄型ダイヤモンド電鍍砥石の放電ツルーイング実験

前章において試作した放電ツルーイング装置は高いツルーイング性能を有することがわかったため、超薄型ダイヤモンド電鍍砥石に対して放電ツルーイングを行った。放電条件は以下のとおりである。超薄型ダイヤモンド電鍍砥石の粒度は SD230、放電液は脱イオン水、正極の電極材料は銅である。評価方法は前章と同じく、放電前後の砥石底面砥粒数をカウントした。ただし、電着砥石は砥粒層が単層であったのに対して、電鍍砥石は多層であるので、単純な減少数のカウントはできない（初層が除去されると新層面があらわれる）。そこで砥石底面の同位置を撮影し、画像を前後比較し、①放電前に存在した砥粒の減少量、②砥石底面の全砥粒数を評価した。図 10 に各放電時間における砥石底面のマイクロスコブ画像の一例を示す。本図において、黒丸は放電前から存在する砥粒、赤丸は放電前に存在した砥粒が脱落した場所、青丸は新たな砥粒が出現した場所を示している。放電時間の増加に伴って、新たな砥粒の出現頻

度が多くなっていることがわかる．これら画像における砥粒数の減少・増大をカウントした．図 11 に放電前に存在した超薄型ダイヤモンド電鍍砥石底面の砥粒数の推移を示す．前章のダイヤモンド電着砥石の放電ツルージング実験と同じく，放電時間が 20 秒で約 7 割の砥粒を除去しており，40 秒後にはほぼすべての砥粒が除去されている．したがって，ダイヤモンド電鍍砥石においても，放電ツルージング装置の高い結合剤除去能力を発揮できることがわかった．

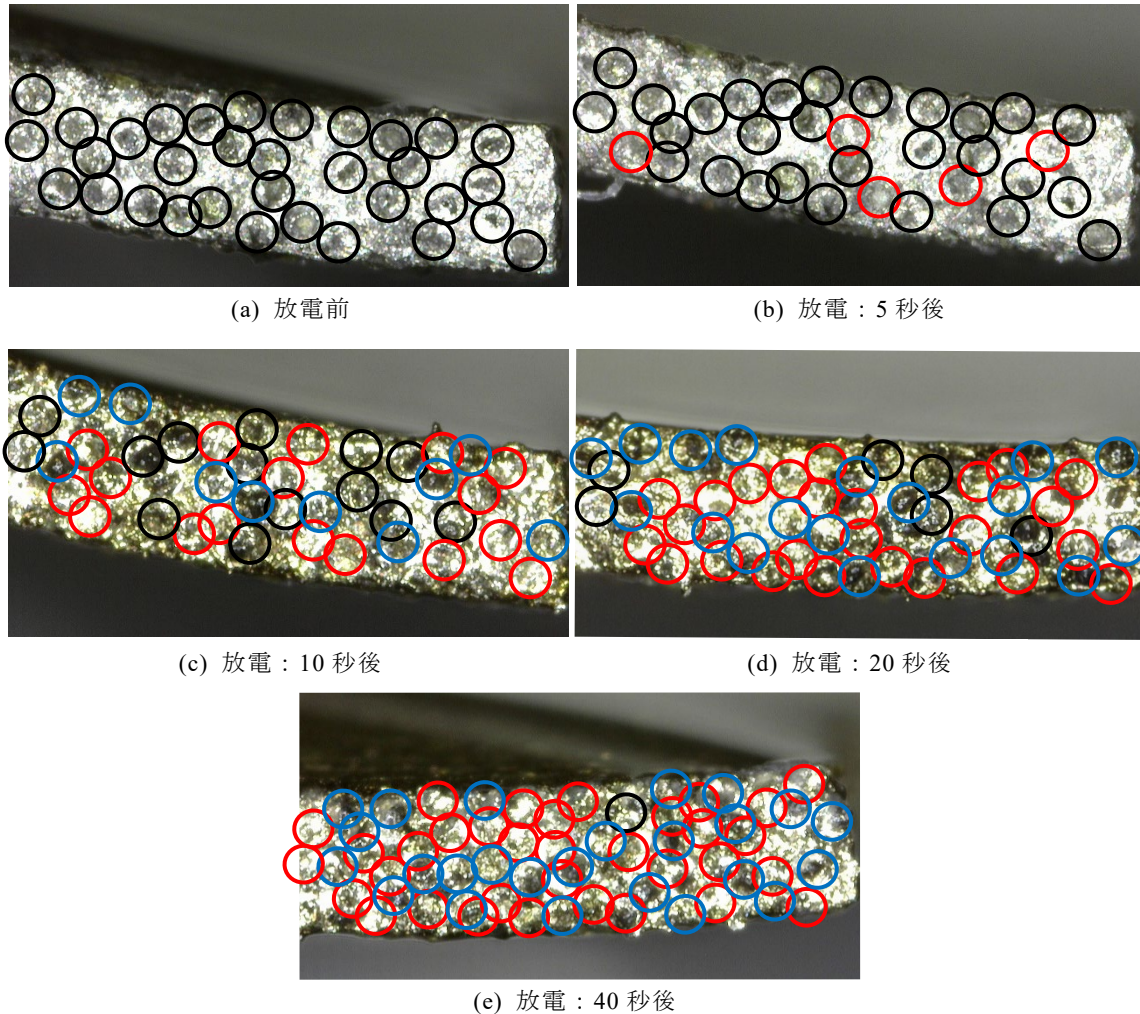


図 10 各放電時間における超薄型ダイヤモンド電鍍砥石底面のマイクロスコープ画像

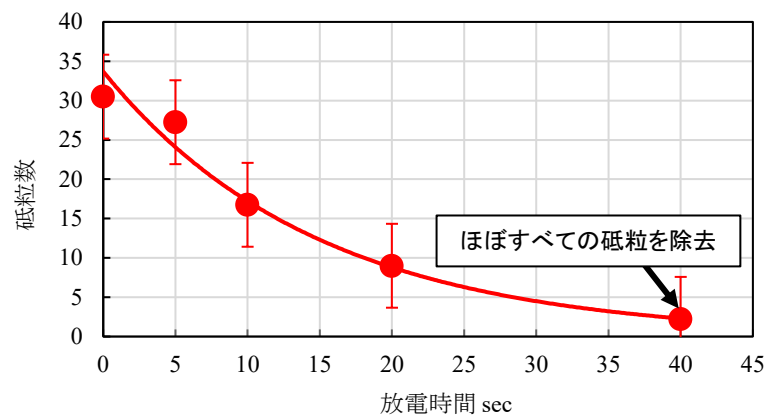


図 11 放電前に存在した超薄型ダイヤモンド電鍍砥石底面の砥粒数の推移

次に超薄型ダイヤモンド電鍍砥石底面における砥粒数の推移を図 12 に示す。前述のとおり、放電 20 秒までは初期に存在した砥粒は脱落していくため、砥粒数は減少傾向にある。しかし、その後は新層面が出現することで砥粒数が増加に転じている。この傾向より、放電を 50 秒程度行うことによって、完全に新たな砥石作用面が創成されることがわかった。

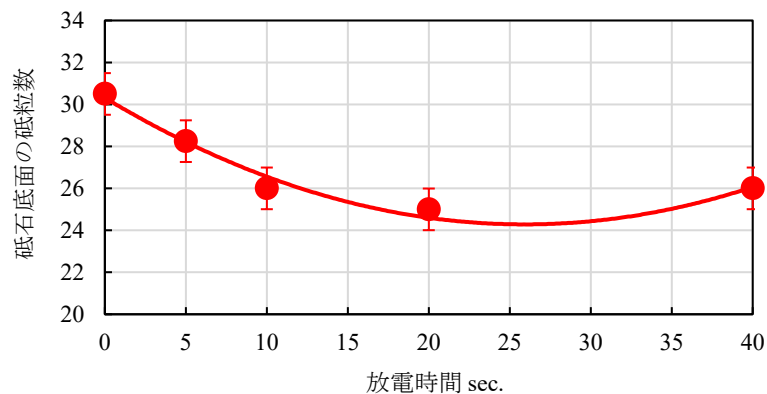


図 12 超薄型ダイヤモンド電鍍砥石底面における砥粒数の推移

以上のとおり、超薄型ダイヤモンド電鍍砥石に対して放電ツルーイングを 50 秒程度行うことでツルーイングが完了することがわかった。ここで、GC 砥石を用いてツルーイングした場合の想定所要時間と比較する。CVD-SiC ウェハから超薄型ダイヤモンド電鍍砥石でくり抜き加工する際の加工条件（研削速度：170 m/min，送り量：3.5 $\mu\text{m}/\text{rev}$ ）でツルーイングした場合，ツルーイング穴個数が 100 穴の場合は 4.2 時間，500 穴の場合は 21 時間，1000 穴の場合は 42 時間である。本研究における放電ツルーイング時間はおよそ 50 秒であるので，極めて大きな非加工時間の短縮を実現できることがわかった。

7. まとめ

本研究では，CVD-SiC ウェハからガラスレンズ成形型素材である円柱状 CVD-SiC を高能率に取り出すために，超薄型ダイヤモンド電鍍砥石の高能率な放電ツルーイング装置の試作を試みた。放電ツルーイング装置を試作し，超薄型ダイヤモンド電鍍砥石に対して，放電ツルーイング実験を行った結果，ツルーイングに要する時間は 1 分未満であり，極めて高能率なツルーイングを達成した。

謝辞

本研究は中部大学先端研究センター 2023 年度プロジェクト 1 の援助を受け遂行されたものであり，ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) MarkWide Research: Glass Lens Market Analysis- Industry Size, Share, Research Report, Insights, Covid-19 Impact, Statistics, Trends, Growth and Forecast 2023-2030, 2023.
- 2) 福田達也，ガラスモールド用材料としての CVD-SiC，砥粒加工学会誌，63(8)，2019，p.411-414.
- 3) 阿部文一：水溶液中のイオンと電気伝導率，化学と教育，57（12），2009，562-565.
- 4) 奥野源次郎他：放電加工における放電回路の影響，精密機械，29(10)，1963，737-745.
- 5) Fuzhu Han et al., Experimental attempts of sub-micrometer order size machining using micro-EDM, Precision Engineering, 30(2), 2006, 123-131.