

微小光学素子のための誘電泳動を応用した研磨加工法の開発

慶応義塾大学理工学部 ○松田 莞, ◎柿沼 康弘

要旨

微小光学素子の高性能化に対する需要が高まっている。光学性能を高めるには、超精密加工による形状創成後に研磨加工を施す必要がある。しかしながら、微小光学素子の研磨手法は確立されておらず手作業による研磨が実施されている。そこで、本研究では砥粒の動きを誘電泳動によって制御する研磨手法を提案した。砥粒を捕捉する電極配置を検討し、複数の研磨装置を試作した。円柱蛍石の研磨試験により、その性能を評価した。

1. 緒論

高度に情報化された現代社会において、モバイル端末が必要不可欠となっており、インターネットの利用も増加し続けている。この通信量の増加に対応するために、高速で損失の少ない光ファイバー通信技術が広く導入されるようになった^[1]。それに対し、デバイス内の信号処理は電気で行われており、回路内や信号変換時のエネルギーロスが問題となっている。その解決策として光信号処理技術^[2]が注目されている。この実現には光を低損失で閉じ込める機能を持つ微小光共振器が必要である。現在、高性能な微小光共振器は超精密加工による形状創成後に手作業による研磨加工を施す必要がある。しかし、手研磨には多くの手間と時間が必要であり、更に再現性が低く、完成後の形状精度が悪いという欠点がある。そのため、微小光共振器の複雑な表面形状にも対応が可能な機械研磨手法の開発が望まれている。

本研究では、砥粒の動きを誘電泳動によって制御する研磨手法を提案した。スラリーが研磨対象の表面に効率よく作用するであろう2種類の電極配置を検討し、実験的に研磨加工性能を評価した。具体的には、円柱蛍石に対して研磨試験を行い、その表面粗さを研磨前後で比較することによって、それぞれ評価を行った。

2. 誘電泳動

誘電泳動とは、不平等電場下において、電場の作用で誘起された電気双極子と電場勾配の相互作用によって粒子が移動する現象である^[3]。図1に誘電泳動の原理を示す。

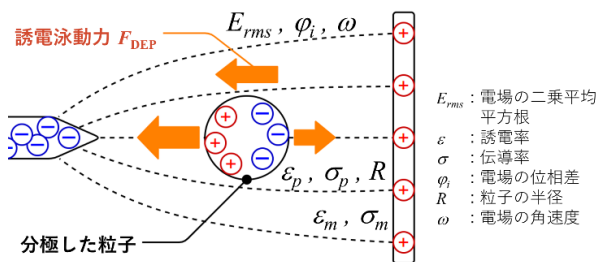


図1 誘電泳動の原理

交流電場下の球状粒子に対する平均誘電泳動力 F_{DEP} は式(1)で表される。また、式(1)に含まれる f_{CM} はクラウジウス・モソツティ係数であり、式(2)で表される。

$$F_{DEP} = 2\pi\epsilon_m Re[f_{CM}]R^3 \nabla E_{rms}^2 + 4\pi\epsilon_m Im[f_{CM}]R^3 (E_{rms,i}^2 \nabla \phi_i) \quad (1)$$

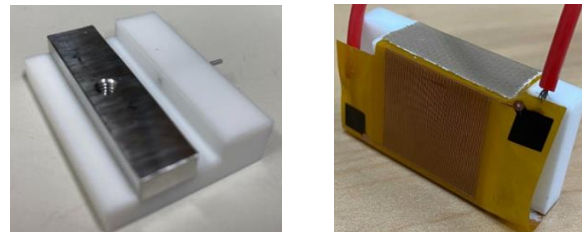
$$f_{CM}(\epsilon_p, \sigma_p, \epsilon_m, \sigma_m, \omega) = \frac{(\epsilon_p - \epsilon_m) + j/\omega(\sigma_p - \sigma_m)}{(\epsilon_p + 2\epsilon_m) + j/\omega(\sigma_p + 2\sigma_m)} \quad (2)$$

粒子の移動する方向は、溶媒と粒子の誘電率の大小によって決定される。本研究では、粒子の誘電率が溶媒のものよりも大きい場合、粒子は電場の強い方向へ移動する。

3. 誘電泳動を応用した研磨用電極の設計製作

図2に本研究で設計した研磨用電極を示す。また、表1,表2にその仕様を示す。針電極型は最大電場強度が大きく、針電極の先端に大きな電場勾配をつくることのできる。誘電泳動力は電場勾配の大きさに依存するため、砥粒を集め、保持する力が強くなる。

櫛電極型は、電場勾配が針電極型と比較して緩やかになっており、誘電泳動力は弱くなるものの、電場勾配を面で作り出すことが可能であり、スラリー中の砥粒を面で集め、大きなペースト層を形成することができると考えた。電極面と被加工物の間に微小隙間を設けた状態で、被加工物を電極面と平行に移動させることで、常にペースト層による研磨が可能になる。被加工物がペースト層を押しのかけたとしても、電界が印加されている限り誘電泳動により砥粒は自然と集まってペースト層を形成し、元の状態に戻るため、研磨作用が持続すると考えた。



(a) 針電極型 (b) 櫛電極型

図2 誘電泳動を応用した研磨用電極

表1 針電極型の仕様

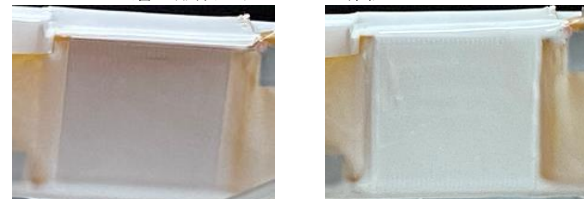
平板電極のサイズ [mm]	40×10×5
針電極の直径 [mm]	1
極板間距離 [mm]	5

表2 櫛電極型の仕様

サイズ [mm]	20×20
電極間隔 [mm]	0.15
電極幅 [mm]	0.15

4. 櫛電極を用いた誘電泳動力の評価

設計した電極に電圧を印加することで、実際に誘電泳動を発生させ、砥粒を集めることが可能なのかどうかを調べた。図3に結果を示す。印加電圧が0Vの場合は砥粒がほとんど付着していないのに対し、1200Vの場合は誘電泳動の作用で集められた砥粒によってペースト層が形成されることを確認した。



(a) 0 V (b) 1200 V

図3 櫛電極表面のペーストの様子

5. 実験方法・実験条件

図4に設計した装置を用いた研磨試験の実験装置, 表3にその実験条件を示す. スラリーで満たしたタンク内に電極を設置し, 被加工物に直接接しない程度で近づけた. 研磨時には, 誘電泳動によって形成した砥粒のペースト層に回転させた被加工物を接触させ, そのせん断力によって加工を行った. なお, 針電極型の場合は被加工物が針電極の先端の位置で固定し, 櫛電極型の場合はY軸方向に移動させた. 被加工物には, 微小光共振器と同様の工程で超精密切削によって作製された直径3 mmの蛍石の円柱を使用した. そして, 微小光共振器の性能に影響する要素の一つである表面粗さを45度おきに測定し, 研磨前後で比較することで提案した研磨手法の評価を行った.

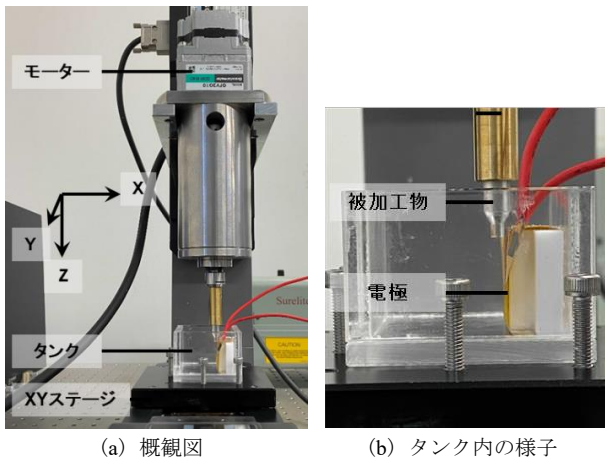


図4 実験装置

表3 実験条件

被削材	CaF ₂
結晶面	端面(100) OF [100]
砥粒	Al ₂ O ₃
砥粒径 [mm]	1, 3
溶媒	シリコンオイル(10 mm ² /s)
濃度 [wt%]	10(1 μm), 50(3 μm)
印加電圧 [V]	300(針), 1200(櫛)
加工時間 [min]	20
被削材回転速度 [min ⁻¹]	400

6. 針電極型を用いた研磨

図5に針電極型の研磨試験結果を示す. 砥粒径1 μmの砥粒を使用した. 面粗さは全測定面で悪化しており, 特に研磨前から比較的粗かった面が研磨後に更に悪化している. これは, 切削時に発生していた幅2 μm程度のうねり(切削痕)に砥粒が入り込み, これに沿って研磨が作用した結果, 溝が深くなってしまった. 図6に切削によって発生したうねりを示す. このような結果となったのは, 本研究で設計した研磨装置が被加工物の回転によるせん断力によって研磨を行っていた影響で, 砥粒の作用する方向が回転方向であり, うねりの方向と揃っていたこと, 砥粒径よりもうねりの幅のほうが大きかったことが原因である. この問題の解決には, 砥粒を軸方向に作用させる, もしくは砥粒径をうねりの幅よりも大きくする必要がある.

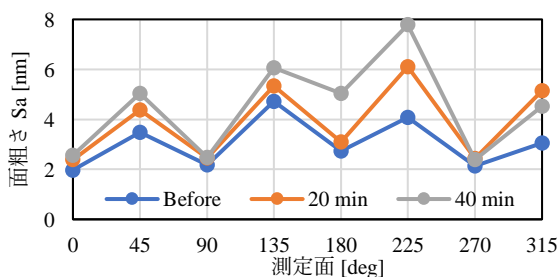


図5 研磨前後の面粗さ: 針電極型

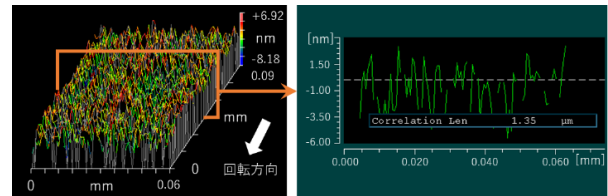


図6 切削痕による表面上の微小うねり

7. 櫛電極型を用いた研磨

図7に櫛電極型の研磨試験結果を示す. 砥粒は砥粒径3 μmのものを使用した. 砥粒径をうねりの幅よりも大きくしたことで, 砥粒が入り込まなくなったため, 加工時間20分では面粗さが0.1から0.2 nm程度改善した. しかし, 加工時間40分ではほとんど変化が見られなかった.

面粗さに大きな変化が見られなかった原因として加工力不足が考えられる. 研磨の加工力, すなわち研磨除去量 H に関する経験則であるプレストンの法則は, プレストン係数 k , 圧力 P , 速度 V , 時間 T を用いて式(3)で表される.

$$H = k \cdot P \cdot V \cdot T \quad (3)$$

このように, 研磨除去量は圧力と速度, そして研磨時間に比例する. 本研究で設計した研磨機構は, 被加工物の回転により研磨速度を調整する. しかし, 研磨圧力は誘電泳動によって形成したペースト層の保持力に依存するものであり, 十分な圧力を作用できなかったと考えられる. この問題を解決するためには, 電極を改良して誘電泳動力を大きくする, もしくは研磨圧力を調整する機構を新たに加える必要がある.

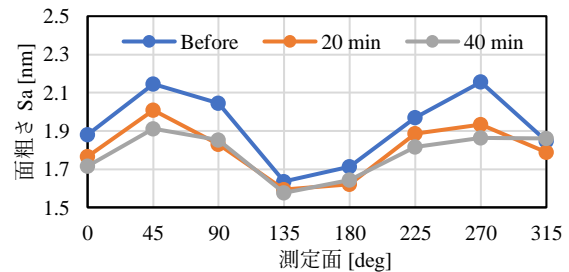


図7 研磨前後の面粗さ: 櫛電極型

8. 結論

本研究を通して以下の結論を得た.

1. 誘電泳動によって砥粒を電極表面に集め, ペースト状の層を形成することに成功した.
2. ペースト層を研磨パッドとして, 被加工物の表面を傷つけることなく研磨を行うことができた.
3. 砥粒径がうねりの幅よりも小さい場合, そのうねりに沿って砥粒が作用し, 面粗さが悪化した.
4. 一部の加工条件において, 櫛電極を用いた研磨によって表面品位が向上することを確認した.

参考文献

- [1] C. Ao, R. Luo and K. Takahata, "A Waveguide-Based Bidirectional Optical Delay Unit with Bragg Reflectors," 2019 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), pp. 1-3, 2019.
- [2] 田邊孝純, "光カー効果によるオンチップ型光スイッチの開発," TELECOM FRONTIER, vol. No.86, 2015.
- [3] Barbaros Çetin, S. Doğan Öner, Besim Baranoğlu, "Modeling of dielectrophoretic particle motion: Point particle versus finite-sized particle." ELECTROPHORESIS, Vol. 38, pp. 1407-1411, 2017.