

コンタクトレンズ用プラズマ殺菌装置の開発

佐藤 岳彦^{*.1}, 神山 秀人^{*}, 中嶋 智樹^{*}, 長沢 敏勝^{**}, 藤村 茂^{***}, 中谷 達行^{****}

(2017年9月11日受付; 2017年12月14日受理)

Development of Plasma Sterilization Device for Contact Lens

Takehiko SATO^{*.1}, Hideto KAMIYAMA^{*}, Tomoki NAKAJIMA^{*}, Toshikatsu NAGASAWA^{**},
Shigeru FUJIMURA^{***} and Tatsuyuki NAKATANI^{****}

(Received September 11, 2017; Accepted December 14, 2017)

A small plasma sterilization device was developed for the purpose of sterilization of contact lenses. Envisioning its practical application, a discharge method with high performance in sterilization was studied which is capable of generating ozone-based gas as well as reducing generation of nitrogen oxides, whose postprocessing is difficult. Dielectric barrier discharge was adopted for this device and shape of the electrodes, thickness and material of the insulator and the discharge conditions were optimized, and thereby the base development for the practical application was successfully done.

1. はじめに

コンタクトレンズの装用人口は現在も増え続け、その利用者はさらに増加すると予測されている。一方で、コンタクトレンズ装用に伴う眼障害も増加傾向にあり、装用者の7~10%にコンタクトレンズ関連角膜炎などが発生していると推察されている¹⁾。こうした角膜感染症の原因となる病原体としては原虫、細菌、真菌、ウイルス等が挙げられる。具体的に、コンタクトレンズ障害の三大原因菌と言われるのは、黄色ブドウ球菌、緑膿菌、アカントアメーバである。そのため、コンタクトレンズは細菌等の繁殖を防ぐ目的で装用後に消毒を行う必要がある。コンタクトレンズにおいて洗浄が必要なタイプは世界シェアで7割程度と洗浄需要は非常に大きい。

表1に主なソフトコンタクトレンズ消毒法の特徴を示

表1 既存のコンタクトレンズ消毒洗浄方法

Table 1 Conventional disinfection methods for contact lens.

方法	長所	短所
煮沸消毒	<ul style="list-style-type: none"> 優れた消毒効果 短い消毒時間 薬品由来の過敏症がない 	<ul style="list-style-type: none"> 過熱によるレンズの劣化や変形、装用感の悪化、寿命の短縮 コンセントが必要
過酸化水素消毒	<ul style="list-style-type: none"> コンセント不要 過熱によるダメージがない MPSより消毒効果が高い 	<ul style="list-style-type: none"> 煮沸消毒より消毒効果が低い 消毒後の中和作業 誤使用による眼合併症の恐れ
MPS	<ul style="list-style-type: none"> コンセント不要 過熱によるダメージがない ケアのすべてが行える 	<ul style="list-style-type: none"> 消毒効果が低い 過敏症がある

キーワード: プラズマ流, オゾン, 窒素酸化物, 水中殺菌, 化学輸送

^{*}東北大学流体科学研究所

(〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1)

Institute of Fluid Science, Tohoku University, Katahira 2-1-1, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, Japan

^{**}株式会社平山製作所

(〒344-0014 埼玉県春日部市豊野町 2-6-5)

Hirayama Manufacturing Corporation, Toyono-cho 2-6-5, Kasukabe-shi, Saitama, Japan

^{***}東北医科薬科大学

(〒981-8558 宮城県仙台市青葉区小松島 4-4-1)

Tohoku Medical and Pharmaceutical University, Komatsushima 4-4-1, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, Japan

^{****}岡山理科大学

(〒700-0005 岡山県岡山市北区理大町 1-1)

Okayama University of Science, Ridaicho 1-1, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama, Japan

¹sato@ifs.tohoku.ac.jp

す。コンタクトレンズの消毒は、発売当時は煮沸消毒のみであったが、現在では市販の消毒剤を用いた化学消毒が主流となっており、過酸化水素消毒やマルチパーパスソリューション (MPS) などが用いられる。特に、洗浄・すすぎ・消毒・保存の一連のケアを一つの商品で行うことができる MPS を使用する人が多く、コンタクトレンズ使用者の4分の3がMPSを使用しているとされる。しかし、国民生活センターによる報告では、現状で市販されているMPSでは病原性微生物の殺滅が不十分であるとされており²⁾、消毒性能において課題が挙げられる。また、消毒に最短でも4時間を要し、さらに、洗浄液を持ち運ぶことや買い足しの必要があるため、利便性の面でも課題が挙げられている。過酸化水素消毒は短時間で十分な消毒効果を得ることができるが、消毒後のコンタクトレンズを中和する必要があり、中和せずに装用すると重大な眼障害を引き起こしてしまう恐れがある。加えて、消

毒液と中和剤を常にセットで持ち合わせる必要があり、MPS 同様に利便性に課題がある。一方、医療現場で用いられている滅菌法は、高圧蒸気滅菌、酸化エチレンガス滅菌、放射線滅菌などがあるが、いずれも装置が大型であり一般家庭における日常使いには適していない。

低温プラズマは、室温程度で UV や反応性化学種を生成することが可能である。プラズマにより生成される UV や反応性化学種は、滅菌に有効であることが知られている³⁾。Sato らは、大気圧条件下で Ar プラズマを用いた大腸菌の不活化実験において、UV による核酸の損傷、細胞膜および外膜の損傷が滅菌要因であったことを報告している⁴⁾。J. Pollack らは、減圧環境下で Ar プラズマを生成し、UV により *Bacillus atrophaeus* の芽胞を滅菌することに成功したと報告している⁵⁾。K. G. Kostov らの報告によると、大気圧下、空气中で誘電体バリア放電 (Dielectric barrier discharge: DBD) を用いて黄色ブドウ球菌と大腸菌の滅菌を行い、20分以内に滅菌することに成功し、滅菌要因は活性酸素種と活性窒素種によるエッチングであったとしている。また、大気圧プラズマでは、O, OH, O₃, NO, NO₂ などの反応性化学種が滅菌に大きく寄与していると報告されている⁶⁻⁸⁾。プラズマ処理は多様な微生物の滅菌が可能であり、V. Scholtz らは大腸菌や表皮ブドウ球菌といった10種類の微生物および酵母を播種した寒天や懸濁液に対してコロナ放電を行い、程度の違いはあるものの放電処理の効果がすべての微生物において認められたと報告している⁹⁾。

著者らも、大気圧低温プラズマを利用した滅菌装置の開発に取り組んでおり、プラズマは一般家庭用のコンタクトレンズ殺菌法として適していると判断した。実用化においては、窒素酸化物の発生抑制に加え、装置の小型化が重要課題となる。

そこで本研究では、±3.1 kV の低電圧電源を用い、直線状および鋸歯状の電極を小型化するため円形とし、その大きさを最適化する。また、最適化した円形電極を用いて、低電圧化した±1.4 kV の電源を利用した場合について、電圧印加条件などの最適化を図り、プラズマ特性や容器内の気液流動特性ならびに滅菌特性を明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法

図1に実験装置の概要を示す。プラズマは誘電体バリア放電 (DBD) により生成した。円形ガラス板もしくは正方形型アルミナ板の両面に円形状のアルミテープ電極を接着させた電極を容器の蓋の内側に設置した。電極間に周波数 25 kHz, ±3.1 kV の擬似正弦波を電源 (利佳, LM-

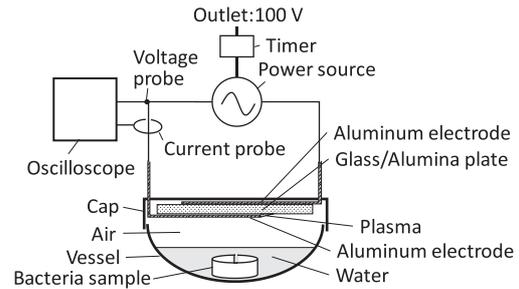


図1 実験装置
Fig.1 Schematic of experimental setup.

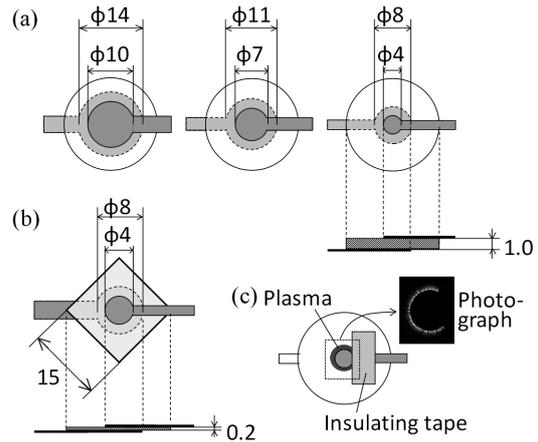


図2 電極構造。(a) 厚さ 1.0 mm のガラス平板、(b) 厚さ 0.2 mm のアルミナ平板、(c) 放電領域。
Fig.2 Details of electrode configurations. (a) Glass plate of 1.0 mm in thickness. (b) Alumina plate of 0.2 mm in thickness. (c) Discharge region.

12500A-3) から供給した。低電圧タイプは、周波数 40 kHz, ±1.4 kV の正弦波を電源 (HARCLON, HR191919) から供給した。電圧を断続して供給する場合は、タイマーを利用して時間を制御した。電圧は下側の電極に印加し、電極の周囲にプラズマを発生させた。プラズマを発生させる箇所以外は絶縁テープで被覆した。容器内には、水を入れず空気だけの場合と、水を入れる2つの条件について検討した。水を入れる場合は、純水を 2 mL 注入した。容器は容積 5 mL のコンタクトレンズ保管用の容器を利用した。

図2に試作した電極形状を示す。(a)は直径 20 mm, 厚さ 1.0 mm の円形ガラス板に、直径 10 mm, 7 mm, 4 mm の3種類のアルミ電極を配置し、±3.1 kV の電源に利用した。(b)は一辺 15 mm, 厚さ 0.2 mm の正方形のアルミナ板に直径 4 mm のアルミ電極を配置した。いずれも、接地電極は円形電極の直径を内径、円形電極 + 4 mm の外径を有するリング状であり、放電を行わない箇所は絶縁テープで被覆した。

滅菌の効果を確認するために、指標菌として、*Geobacillus Stearothermophilus* (ATCC 7953) の芽胞が塗布された生物学的インジケータ (3M Health Care, Attest 1291) を使用

した. Attest 1291 は, 5桁低減を保証する. 指標菌の滅菌判定には滅菌判定器 (3M Health Care, 290 オートリーダー) を用いた. 図1に示すように, 気中および水中のいずれにおいても, 芽胞が塗布された紙片を滅菌容器内に入れて, プラズマを発生させ曝露し, 処理後に紙片を生物学的インジケータに戻し判定した. この工程は無菌状態を保つため, クリーンベンチ内で行った. 紙片は1回の実験で1つを用い, 同じ条件で検証を3回行い, すべての紙片が滅菌された場合を滅菌完了とした.

電圧電流波形の計測は, オシロスコープ (LeCroy, WaveRunner 62Xi), 電圧は電圧プローブ (LeCroy, PPE 4 kV), 電流プローブ (PEARSON, CURRENT MONITOR, MODEL4100) を用いた. 放電部の投入電力は, 接地電極側に 460 pF のコンデンサを挿入し, Q-V リサージュ図形を計測し算出した. 装置全体の投入電力は, ワットアワーメーター (SYSTEMARTWARE, SHW3A) を用いて測定した.

気中のオゾンおよび NO+NO₂ は, ガス検知管 (GASTEC, MODEL-GV100) を用いて測定した. 実験は, 5 mL の空気を吸引したシリンジ内で放電を行い, 放電後に気体をサンプリングバッグ内に移し 20 倍に希釈して 100 mL の気体とし濃度を測定した.

水中の溶存オゾン, 亜硝酸イオン, 硝酸イオンは, パックテスト (共立理化学研究所, WAK-O_3, WAK-NO_2, WAK-NO_3) とデジタルパックテスト (共立理化学研究所, DPT-MT) を用いて測定した. 水中におけるオゾン濃度を測定する際は, プラズマ放電後の純水にカタラーゼ (24000 U/mL) を 30 μL 混合し過酸化水素を消去してから測定した.

温度測定は, E 熱電対 (石川産業, T/T-E40-1) およびデジタル調節計 (OMRON, ESCN-H) を使用した.

化学種, 温度は 3 回測定を繰り返し, その平均値と標準偏差を示した.

水中の流れ場の可視化はメチルレッド水溶液を利用し, 気中の流れ場はシュリーレン法を用いた.

プラズマ処理後のコンタクトレンズ (SEED, 2week

Pure) の表面粗さは, 顕微鏡 (キーエンス, VK-X200) を用いた. 比較として, MPS (SEED, シードウソフトラケアピュア) と過酸化水素消毒 (SEED, コンセプトクイック) においても処理後に表面粗さを計測した.

3. 実験結果および考察

3.1 円形ガラス板, ±3.1 kV の場合の電極径最適化

図3に±3.1 kV, 直径 10 mm の場合の印加電圧と放電電流波形を示す. 印加電圧波形は正弦波状の波形で, 0 V 近傍で電圧変化が大きいので, 放電電流では変位電流が大きくなる. 電圧の上昇, 下降に伴いパルス状の放電電流が繰り返し発生する. 放電電力は, 0.42 W である.

図4に水がない場合に生成されるオゾンおよび一酸化窒素 (NO) + 二酸化窒素 (NO₂) の濃度を示す. 電極径が 10 mm の場合, オゾン濃度は, 最初の 0.5 分で 2500 ppm 以上に達するが, その後減少し, 3 分以降は検出限度以下となる. NO+NO₂ は, 最初の 1 分間は検出限度以下であるが, 2 分後に増加を始め, 5 分後には 5500 ppm に達する. 直径 7 mm の場合, オゾン濃度は, 1 分後には 3000 ppm 以上になり, 2 分後に最大値を取ると, その後減少を始め 5 分後には 2500 ppm 程度となる.

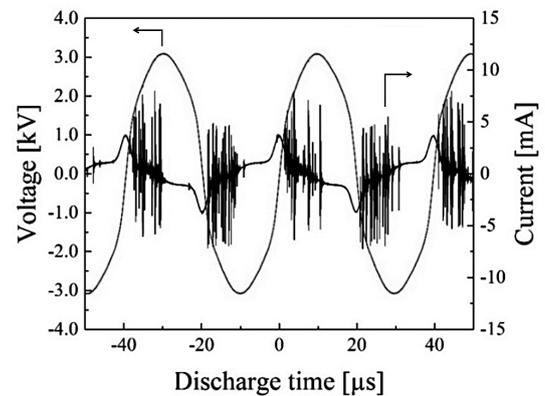


図3 印加電圧と放電電流波形 (電極径 10 mm, ガラス板)
Fig.3 Waveforms of applied voltage and discharge current in the case of 10-mm diameter.

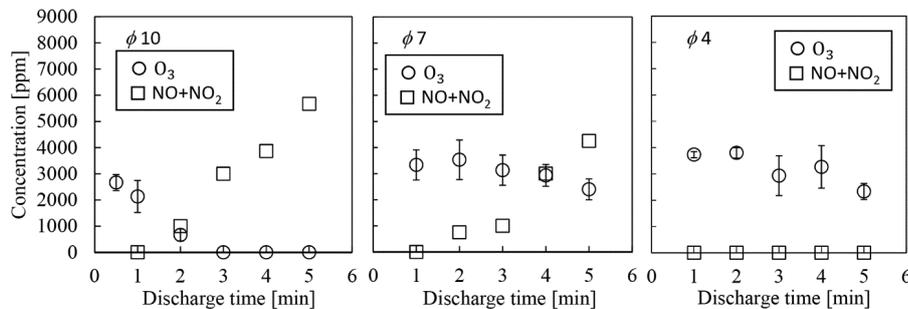


図4 O₃ と NO+NO₂ ガス濃度の放電時間に対する変化 (左よりそれぞれ電極径が 10, 7, 4 mm の場合)
Fig.4 Concentrations of the ozone and nitrogen monoxide + nitrogen dioxide on the glass plate for the different diameter of the electrodes, 10, 7 and 4 mm, against the discharge time.

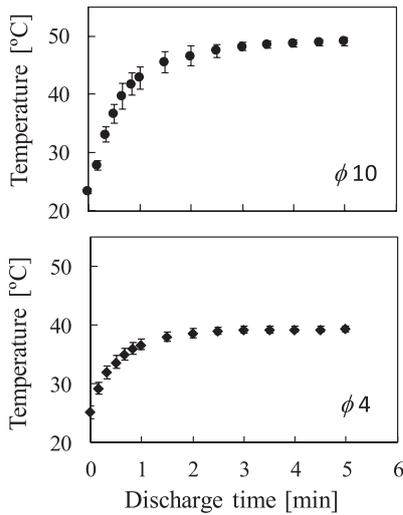


図5 ガラス板上の温度の放電時間に対する変化
Fig.5 Temperature on the glass plate at the position of 2.5 mm from the edge of the electrode.

NO+NO₂ は、2分後に増加を始め、5分後には4000 ppmを越える。直径4 mmの場合、オゾン濃度は、直径7 mmの場合と同様に1分後には3000 ppm以上になり、2分後に最大値を取ると、その後減少を始め5分後には2500 ppm程度となる。一方、NO+NO₂ は、5分後においても検出限度以下と大きく低減した。なお、いずれの場合も3回の計測結果の平均値を示しているが、φ10およびφ7のNO+NO₂の結果についてはばらつきが大きいため、平均値のみの表示とし誤差棒は表示していない。

オゾンは温度が上昇すると分解速度が速まることが知られている。そこで、図5に直径10 mmと4 mmの場合の電極の縁から2.5 mm離れた場所のガラス板上の温度の時間変化を示す。直径が10 mmの場合は、1分で45°Cまで上昇し、5分後には50°Cに達している。直径4 mmの場合、最大でも40°Cと温度上昇が抑えられていることが示されている。この温度上昇の違いが、10 mmの場合にオゾン濃度が急激に減少する一方で、4 mmにおいて低減が抑えられている要因であると考えられる。また、窒素酸化物の増大もオゾンの分解速度の違いに一因があると考えられる。

表2に水がない場合の直径10 mmと4 mmの滅菌性能試験の結果を示す。いずれも、2分で滅菌が完了していることから、曝露される生成されるガスの種類や濃度が異なるものの、十分な滅菌性能を有していることが示された。

表3に、水がある場合で、水中に検査紙片を入れた時の滅菌性能試験の結果を示す。直径が10 mmの場合は、15分で滅菌が完了するが、4 mmの場合は30分と長くなる。原因としては、4 mmの方が気中の窒素酸化物の生成が少ないため、水中に溶存する亜硝酸や硝酸などの量が10 mmに比べ低くなることや、放電電力が小さいこ

表2 水を注入していない場合の滅菌試験結果 (電極径 10 mm と 4 mm, ガラス板)

Table 2 Results of sterilization test in the cases of 10-mm and 4-mm in diameter and without water.

φ10	Discharge time [min]		
	0.5	1	2
Result of sterilization	+++	++-	---

φ4	Discharge time [min]		
	1	2	3
Result of sterilization	+--	---	---

表3 水中における滅菌試験結果 (電極径 10 mm と 4 mm, ガラス板)

Table 3 Results of sterilization test in the cases of 10-mm and 4-mm in diameter and with water.

φ10	Discharge time [min]		
	5	10	15
Result of sterilization	+++	++-	---

φ4	Discharge time [min]		
	10	20	30
Result of sterilization	+++	++-	---

+ : Unsterilized, - : sterilized

とから、誘起される流れが小さくなることが考えられる。

以上の結果より、水中の滅菌時間が長くなるが、窒素酸化物の発生を大きく低減できる電極直径4 mmの方が、実用化に適していることが明らかになった。

3.2 アルミナ板による低電圧化と性能評価

電極の直径が4 mmに決定したので、安全性向上と窒素酸化物生成により一層の低減を目指し、放電電圧を±1.4 kVに低下させ、周波数を40 kHzに増大させた。これに伴い、絶縁板を図2(b)に示す厚さ0.2 mmのアルミナ板に変更した。アルミナ板は比誘電率がガラスの3倍程度ある上、機械的強度もガラスよりあるため、絶縁板として適している。印加電圧波形は正弦波で、放電電力は、0.31 Wである。

図6にオゾンとNO+NO₂の濃度の時間変化を示す。オゾン濃度は、0.5分後で900 ppm以上に達するが、その後急速に低下し、5分後には200 ppmを下回る。窒素酸化物濃度も4分後までは検出限度以下の濃度であるが、5分後に増加を始める。この結果は、窒素酸化物の低減に大きな効果を示した、ガラス厚1.0 mm、直径4 mmの条件よりも窒素酸化物を生成することを意味している。これは、図7に示すように、直径4 mmの場合のアルミナ板上の温度が、放電後急激に温度が上昇し、1分後には47°Cに達し、10分後には63°Cまで上昇するため、オゾンの分解がガラス板の場合よりも速く進むためと考えられる。

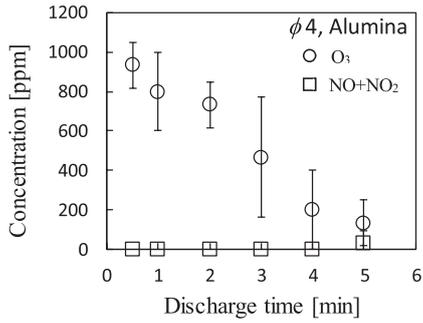


図6 O₃とNO+NO₂ガス濃度の放電時間に対する変化 (電極径4mm, アルミナ板)

Fig.6 Concentrations of O₃ and NO+NO₂ for the diameter of 4 mm with alumina plate against the discharge time.

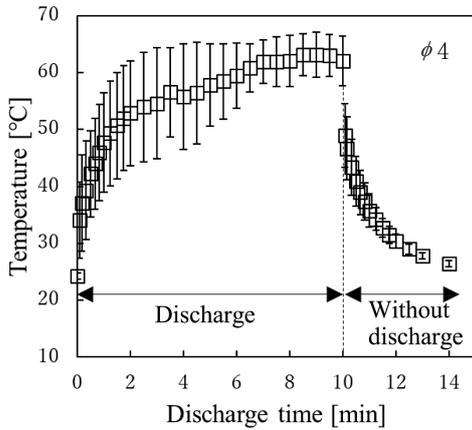


図7 アルミナ板上の温度の放電時間に対する変化

Fig.7 Temperature on the alumina plate at the position of 2.5 mm from the edge of the electrode.

アルミナ板の場合の滅菌結果を表4に示す。気中では4分と滅菌性能は低下するが、これは気中のオゾン濃度が低下したためと考えられる。一方、水中では20分と滅菌性能が向上するが、窒素酸化物がより多く生成され溶解するためと考えられる。

ここで、窒素酸化物の増加を抑えるため、断続放電によるプラズマ発生について検討した。気中のオゾン濃度は、放電1分で最大値付近の濃度に達するため、1分間放電する。その後、図7に示すように放電を止めてから2分後に30°C近くまで下がることから、2分間冷却させる。この放電と冷却をセットとし繰り返した。

図8に断続放電時のオゾンとNO+NO₂の濃度の時間変化を示す。放電1分後にオゾン濃度は1500ppmに達するが、2分間の冷却時間の間に700ppmまで低下する。1分間の放電後に1400ppmまでオゾン濃度は増加し、冷却時間に1000ppmまで低下した。この間、窒素酸化物は増加せず、43分後においても増加しないことを確認している。すなわち、この方法により、継続的に窒素酸化物の発生を抑えることに成功した。

表4 電極径4mmの場合の滅菌試験結果 (アルミナ板)

Table 4 Results of sterilization test in the cases of 4-mm in diameter with the alumina plate.

In air	Discharge time [min]		
	2	3	4
Result of sterilization	+++	+--	---

In water	Discharge time [min]		
	10	20	30
Result of sterilization	+++	---	---

+ : Unsterilized, - : Sterilized

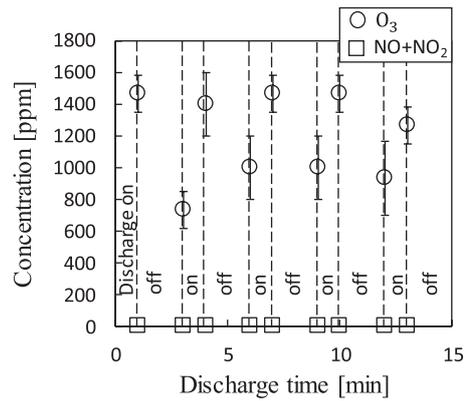


図8 O₃とNO+NO₂ガス濃度の断続放電時間に対する変化 (電極径4mm, アルミナ板)

Fig.8 Concentrations of O₃ and NO+NO₂ for the diameter of 4 mm on the alumina plate against the intermittent discharge time.

表5 滅菌試験結果 (電極径4mm, アルミナ板)

Table 5 Results of sterilization test under the intermittent discharge in the case of 4-mm in diameter with the alumina plate.

In air	Discharge time [min]		
	4	7	10
Result of sterilization	+--	+--	---

In water	Discharge time [min]		
	28	43	58
Result of sterilization	+++	+++	---

+ : Unsterilized, - : Sterilized

表5に断続放電による滅菌結果について示す。水がない場合、10分間で滅菌は完了する。一方、水中においては滅菌完了に58分を要した。他の場合と比較して滅菌時間は延びたものの、コンタクトレンズの消毒で用いられているMPSと比較すると十分に短い時間での処理が可能であることを示した。

ここで、水中の溶存オゾンおよび亜硝酸、硝酸の各濃度の時間変化を図9に示す。断続放電をしない場合とする場合について比較すると、断続放電をすることで、30

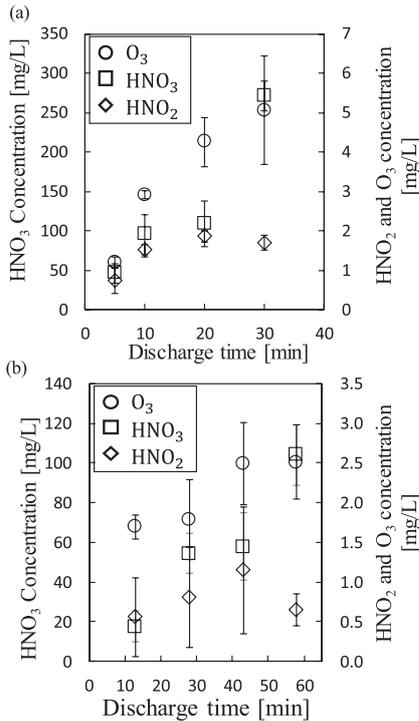


図9 O_3 および HNO_3 , HNO_2 の溶存濃度の放電時間 (a) と断続放電時間 (b) に対する変化 (電極径 4 mm, アルミナ板)

Fig.9 Dissolved concentrations of O_3 , HNO_3 and HNO_2 in the cases of the continuous discharge (a) and the intermittent discharge (b).

分後において硝酸濃度は、270 mg/L から 55 mg/L に、亜硝酸は 1.7 mg/L から 0.8 mg/L, 溶存オゾン は 5 mg/L から 1.8 mg/L に低減した。特に、生成量の大きい硝酸を大きく低減させることに成功した。この結果は、気中の窒素酸化物の濃度の低減の傾向と一致している。また、水中の滅菌時間が 20 分から 58 分に伸びたのは、溶存オゾン濃度が低減したことによると考えられる。

3.3 容器内の流れ場の可視化

著者らは、電極形状を直線状にしたものについても研究を進めているが、これは、直線状の電極はプラズマにより流れが一方にできるため、水中の流れもより強く誘起され、それに伴い水中の滅菌性能も向上すると考えていた。しかしながら、本研究で採用した小型化を図るための円形電極でも、直線状の電極に対して同等の滅菌性能を示すことが明らかになった。そこで、その原因を明らかにするために、透明な円形容器を利用し水中の流れを可視化した。水には pH が 4.2 以下になると黄色から赤色に変色するメチルレッド試薬を添加し、円形容器のふたの裏側に電極を設置しプラズマを発生させた。プラズマで発生した窒素酸化物が水に溶解し pH が低下すると赤く変色し、赤色領域の移動を観察することで可視化した¹⁰⁾。図 10 に赤色領域が時間と共に広がる様子を示す。容器の底側から可視化し

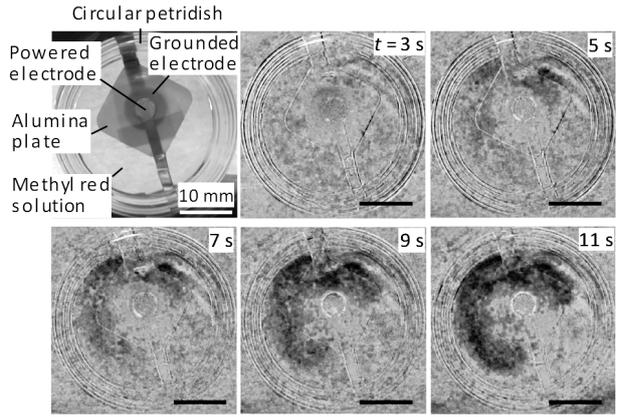


図 10 メチルレッド水溶液を利用した水面の流れの可視化
Fig.10 A series of visualization images for the surface flow of water using the methyl red solution.

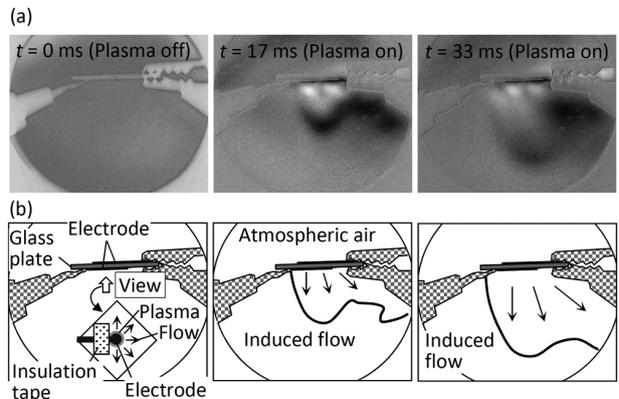


図 11 シュリーレン法による気中の流れの可視化 (a) と誘起流の広がりモード図 (b)
Fig.11 Schlieren images of the gas flow induced by the plasma (a) and the schematic model of the flow expansion (b).

ているため、電極直下の変色の様子も撮影されている。赤い(グレースケールでは濃い)領域はプラズマにより発生した流れにより、中心から概ね同心円状に広がる。完全な同心円にならないのは、図 2(c)に示すよう円周上の一部分でプラズマを発生させていないことによる。なお、側面から観察すると表面のみに赤色領域が存在するため、水面の流れを示すと考えられる。この水面の流れは、容器側壁まで達した後、容器の底に回り込み循環流を形成する。また、図 11(a)にシュリーレン法により撮影した電極周辺の流れ場を示す。ここでは、電極から形成される流れの状態に着目し、電極を静止した大気中に設置した場合について示す。シュリーレン法では、密度差を濃淡で表すため、プラズマにより加熱された気流の変化が可視化されている。プラズマを発生させると下向きと右方向の流れが形成され、時間と共にモード図に示すように放射線状に流れが形成される。中心付近の下向きの流れは、右側に広がる流れのように水平方向成分を有しながら下方に向かう流れであることが推測される。図 10 と同様にテープで絶縁されている側には

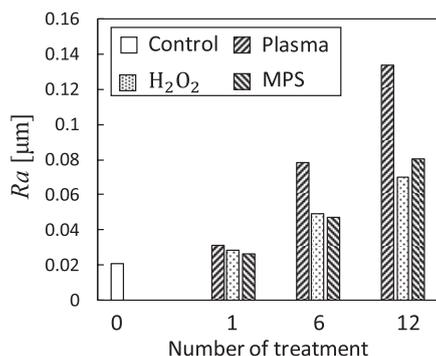


図 12 異なる処理法に対するコンタクトレンズの表面荒さの変化
 Fig.12 Surface roughness of the contact lens for different treatments and number of treatments.

流れが誘起されないため、中心から右側に流れが形成される。また、電極部には電極下側ならびに左側から流れが流入し、容器内でプラズマを発生させた場合は循環流が形成されると考えられる。なお、電極形状が直線状の場合は、電極辺に垂直でやや基板から離れる方向に気流が誘起されるため、電極辺を紙面手前から奥行き方向に設置すると図 11 に示すような中心付近で下方に向かう流れは観察されない。このように、円形電極の場合、流れが放射状に拡がるため、円形容器においては、水を中心から外側に均一に駆動させることができ、水中に流れを効率よく形成できることが明らかになった。これにより、円形電極においても、滅菌効果が十分に確保できたと考えられる。

3.4 コンタクトレンズの表面粗さへの影響

図 12 にコンタクトレンズ表面粗さへのプラズマ、過酸化水素入り洗浄液、MPS の 3 種類の処理法による影響を示す。未処理の場合の表面粗さは 20 nm 程度であり、処理を 1 回すると表面粗さは 30 nm 程度に増加する。6 回処理後では、プラズマ処理時に 78 nm、H₂O₂ と MPS は 47 nm 程度である。12 回処理後では、プラズマ処理では 134 nm まで増大するが、MPS では 80 nm、H₂O₂ では 70 nm と、プラズマ処理の場合概ね表面粗さが 2 倍になることが明らかになった。

4. 結論

本研究では、コンタクトレンズの殺菌を目的に、超小型プラズマ殺菌装置の開発を行った。実用化を想定し、高い殺菌性能を有する、オゾン主成分とするガス生成が可能で後処理の難しい窒素酸化物の発生を低減できる放電方法について検討した。本装置では、誘電体バリア放電を採用し、電極形状や絶縁板の厚さや材質、放電条件などを最適化することで、実用化の基盤となる開発に成功した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) ±3.1 kV、周波数 25 kHz の条件において、直径 20 mm、厚さ 1 mm の円形ガラス板上に配置した円形電極の直径は直径 4 mm が最適であることを明らかにした。直径 4 mm の場合、NO+NO₂ の大幅な発生の抑制が行える上に、滅菌時間は、気中では 2 分、水中では 30 分と高い性能を示した。
- (2) 安全性を高めるため、放電電圧を ±1.4 kV に低電圧化、40 kHz へ高周波数化した。低電圧化に伴い、絶縁板をガラス板から一辺 15 mm、厚さ 0.2 mm のアルミナ角板に変更し、気中 4 分、水中 20 分で滅菌を完了できることを示したが、NO+NO₂ の生成量の増大を伴うため、放電 1 分、冷却 2 分を繰り返す断続放電を行い、NO+NO₂ の発生を抑えることに成功した。滅菌時間は気中 10 分、水中 58 分と長くなるが、MPS よりは十分短い。
- (3) コンタクトレンズの表面粗さが、プラズマ処理の場合、既存の過酸化水素入り洗浄液や MPS よりも 1.7 ~ 1.9 倍増大した。

参考文献

- 1) 高橋和博, 宇津見義一, 藤堂勝巳, 魚谷 純, 福下公子, 高野 繁: コンタクトレンズによる眼障害アンケート調査の集計結果報告 (平成 22 年度). 日本の眼科, **82** (2011) 983
- 2) (独)国民生活センター, 2009.12.16 報道資料 (2009) (http://www.kokusen.go.jp/pdf/n-20091216_1.pdf)
- 3) M. Moreau, N. Orange, and M. G. J. Feuilloley: Non-thermal plasma technologies: New tools for bio-decontamination. *Biotechnol. Adv.* **26** (2008) 610
- 4) T. Sato, T. Miyahara, A. Doi, S. Ochiai, T. Urayama, and T. Nakatani: Sterilization Mechanism for Escherichia Coli by Plasma Flow at Atmospheric Pressure. *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 073902
- 5) J. Pollak, M. Moisan, D. Kéroack, J. Séguin, and J. Barbeau: Plasma Sterilisation within Long and Narrow Bore Dielectric Tubes Contaminated with Stacked Bacterial Spores. *Plasma Process. Polym.* **5** (2008), 14
- 6) M. Laroussi and F. Leipold: Evaluation of the roles of reactive species, heat, and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasmas at atmospheric pressure. *Int. J. Mass. Spectrom.* **233** (2004) 81
- 7) K. Shimizu, H. Fukunaga, and M. Blajan: Biomedical applications of atmospheric microplasma. *Curr. Appl. Phys.* **14** (2014) S154
- 8) Z. Machala, L. Chládeková, and M. Pelach: Plasma agents in bio-decontamination by dc discharges in atmospheric air. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** (2010) 222001
- 9) S. Deng, C. Cheng, G. Ni, Y. Meng, and H. Chen: Bacillus subtilis devitalization mechanism of atmosphere pressure plasma jet. *Curr. Appl. Phys.* **10** (2010) 1164
- 10) T. Shimizu, Y. Iwafuchi, G. E. Morfill, and T. Sato: Formation of Thermal Flow Fields and Chemical Transport in Air and Water by Atmospheric Plasma. *New J. Phys.* **13** (2011) 053025