

論 文

水滴を利用したパルスパワー放電による水処理

南谷 靖史^{*1}, 東山 祐夫^{*2}

(2002年9月11日受付; 2003年3月19日受理)

Treatment of Waste Water by Pulsed Power Discharge in a Water Droplets Spray

Yasushi Minamitani^{*1} and Yoshio Higashiyama^{*2}

(Received September 11, 2002; Accepted March 19, 2003)

Treatment of waste water sprayed into non-thermal plasma produced in air will show higher efficiency compared to conventional plasma treatment inside the body of waste water because non-thermal plasma in air produces high-energy electrons, free radicals and UV more than that in the water. Experimental trials for water droplets spray treatment were carried out using a plasma reactor driven by pulsed power. The tested water was 0.1 % solution of sodium dodecylbenzenesulfonate (C_{12} -LAS) and ejected from an air-assisted nozzle at a flow rate up to 1.9 mL/s. The mean diameter of the droplet was 35-60 μm . From the comparison of discharge characteristics in air and in the presence of the water droplets we found that the presence of water droplets in the reactor made discharge voltages decreased and discharge currents increased. The change in flow rate and diameter of water droplets never affected discharge characteristics. When the repetition rate of pulsed discharge and the transit time of water droplet were set such that the water droplets could be exposed at least once in the discharge, the concentration of C_{12} -LAS after the plasma treatment could be decreased less than 20 %. Measurements of infra-red absorption spectra indicate that C_{12} -LAS was decomposed to CO_2 and H_2O .

1. はじめに

近年水処理には、耐性菌、廃汚泥を生じない新しい殺菌、分解処理技術として、オゾン処理¹⁻³⁾が導入され始めている。しかし、オゾナライザによるオゾンの生成と反応槽による水との反応という2段階の作用になるため、発生後、反応槽までの間に分解してしまうオゾンがあり、水処理効率が低くなる。そのため直接水中で処理を行う新しい水処理技術としてパルスパワーを用いた水中パルス放電が研究され始めている⁴⁻⁶⁾。

水中パルス放電は紫外線、オゾン、ヒドロキシラジカル等の活性種が同時に発生し、更に衝撃波も発生するため水処理に非常に有効である。しかしパルス電圧に対する水の絶縁破壊電圧が高いため、水中でパルス放電を発生させるには大規模なパルスパワー発生装置が必要である。また、電極間全体に均一にストリーマ放電を作ることが難しく、放電と水が触れる領域が少ないため水処理効率が上がら

ないことが考えられる。

本研究ではこの問題の解決のため、処理対象水を水滴化した後、パルスパワーによって大気中に発生させた非熱平衡放電プラズマに曝露させる水処理方法を検討している。気中では、水中より絶縁破壊電圧が低いのでパルスパワー発生装置を小型化でき、化学反応性の高い高エネルギー電子、オゾン、ヒドロキシラジカル、紫外線を発生させることができるので、非熱平衡放電プラズマも生成できる。また、放電領域を広く拡散させて作ることが可能である。この大きい放電領域の中に処理対象水を水滴化して入れると、水量に対する水の表面積が増えるため、水中の有害物質と放電活性種との反応促進が期待できる^{7,8)}。

放電による処理装置を開発する上では、対象媒質中の放電特性および対象物の分解特性を把握することが重要である。ギャップ間に微粒子が存在する場合のフラッシュオーバ電圧、インパルスコロナの進展に与える影響については重要であり、電力、電気集塵分野では盛んに研究がおこなわれてきた⁹⁻¹¹⁾。しかし、これらの研究は金属微粒子存在下の標準開閉インパルス波形で行われており、数十nsのパルスストリーマ放電を水滴存在下の大気中で発生させた研究例は極めて少なく、放電特性についての報告はな

キーワード：パルスパワー、水処理、水滴、 C_{12} -LAS

*山形大学工学部 (992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16)

Faculty of Engineering, Yamagata University, 4-3-16 Jonan, Yonezawa, Yamagata 992-8510, Japan

¹ minami@yz.yamagata-u.ac.jp

² higashi@yz.yamagata-u.ac.jp

されていない。

本論文では水処理用放電の基礎特性として大気中パルスストリーマ放電に水滴を注入した時に、放電電圧、電流が受ける影響について調べた結果を報告するとともに、本方法で有害物を分解した結果について述べる。

有害物の分解特性は界面活性剤のドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム (C_{12} -LAS; $C_{12}H_{25}C_6H_4SO_3Na$) を用いて調べた。この物質は家庭用洗剤に使用されている界面活性剤の中で生分解性が最も悪く、2000年3月に「特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の促進に関する法律」(P R T R 法; Pollutant Release and Transfer Register) で第一種指定化学物質になった直鎖アルキルベンゼンスルホン酸ナトリウムの一種である。そのため効率の良い分解処理法の開発が必要とされている。

2. 実験装置

図1にパルス発生装置に接続したコロナリアクタによる水処理装置の概略図を示す。本装置の放電電極は同軸状になっている。放電電極は中心の放電線に直径 0.28 mm のステンレス線を用い、外側円筒電極は直径 40 mm、網目 2 mm のステンレス網を用いた。外側円筒電極の長さは 300 mm である。外側電極をアクリル円筒の内壁に接して配置した。放電状態を外から観測できるようにするために、容器にアクリル円筒を使用し、外側円筒電極に網を用いた。

アクリル円筒容器は軸が垂直になるように設置し、外側円筒電極上方 200 mm にある容器の蓋の同軸中心軸位置に二流体ノズル(いとうち社製: BIMJ2004-S303NE303)を取り付け、軸方向から容器内に水を噴出した。ノズルに加える水圧と空気圧をそれぞれ変えることにより、生成する水滴の粒径、水量を変え

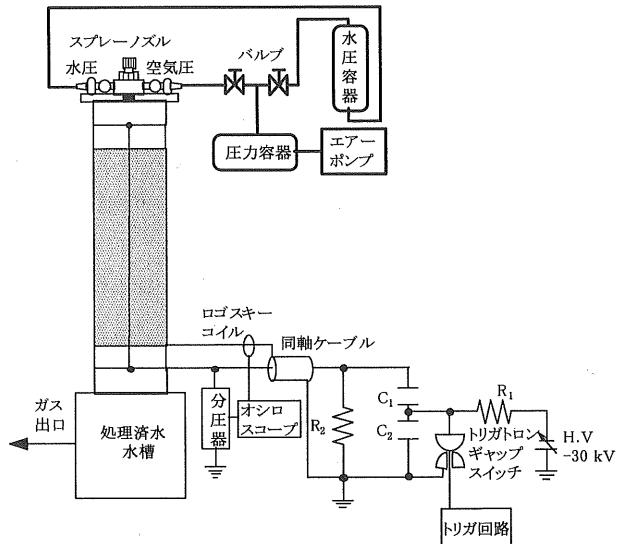


図1 パルスコロナリアクタ実験装置

Fig. 1 The experimental setup with the pulsed corona reactor.

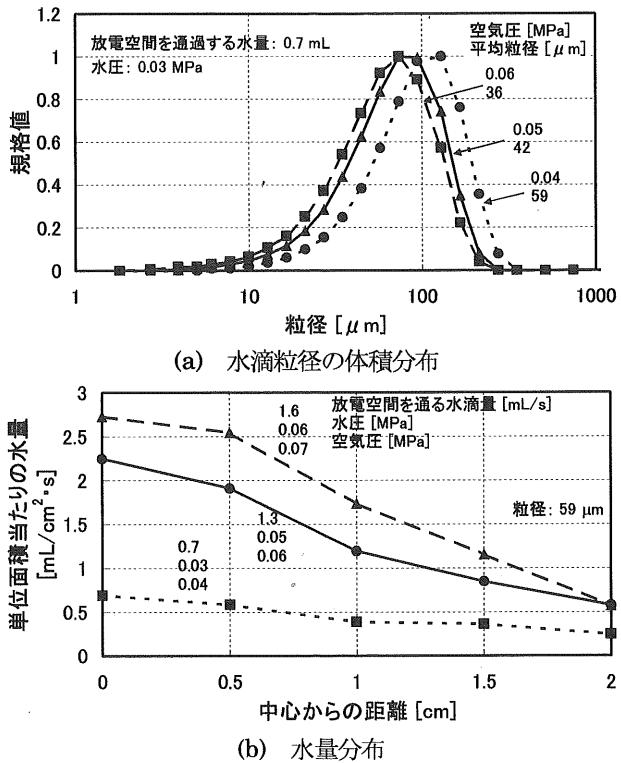


図2 ノズルから噴出する水滴の粒径体積分布とパルスコロナリアクタ入口における半径方向水量の分布

Fig. 2 Distributions of droplet diameter expressed with water volume and distributions of flow rate as a function of a radial distance from the center of the pulsed corona reactor.

ることができる。ここでは相対圧で水圧を 0.03~0.06 MPa、空気圧を 0.04~0.07 MPa とし、水滴のザウタ平均粒径¹²⁾が 35~60 μm 、放電管の中に注入する全水量が 0~1.9 mL/s の範囲で実験を行った。放電空間を通る水滴量は 0~1.6 mL/s であり、放電管の中に注入する全水量に対して 55~85 %である。残りは電極壁面を伝って通過する。このときの空気の流量は 60~80 mL/s であった。図2にノズルから 200 mm の外側円筒電極入口に相当する地点で測定した水滴粒径の体積分布と水量分布を示す。レーザ流速計で測定した円筒電極入口中心の水滴の平均速度は、本実験で使用したノズルの水圧、空気圧の範囲では 4~8 m/s であった。水量分布の測定においてパルス電圧は印加されていないが、実験時にパルス電圧の印加されている時間が 1 秒間のうち 1 ms にも満たないこ、注入する水滴の平均速度が 4 m/s 以上と速いことから水滴が荷電することによるドリフト等での水量分布の変化はないと考えられる。

パルスパワーの発生には充電電圧の 2 倍のパルス電圧波高値を得ることができる L C 反転回路を用いた。本回路では充電した電圧極性と逆極性のパルス電圧が outputされる。放電管全体に放電が広がった方が分解効率がよいと考えられるため、ストリーマ放電の進展しやすい正パルスが放電線に印加されるよう負の直流電源でキャパシタを充電した。キャパシタの容量は

C_1, C_2 とも1350 pFとした。キャパシタ C_2 の反転回路のスイッチには自作のトリガトロンギャップスイッチを用いた。充電用抵抗 R_1 には5 MΩ, R_2 には40 kΩを使用した。LC反転回路から放電電極までのパルスの伝送に550 mmの長さの同軸ケーブル(UR-M67)を用いた。

トリガ回路からトリガトロンギャップスイッチにトリガ信号を送るとギャップスイッチが導通し、キャパシタ C_2 に充電された電圧の極性が反転する。この C_2 の電圧極性が反転することでキャパシタ C_1 と C_2 の合成の電圧が発生し、電極間に印加される。パルス電圧の立ち上がり時間はキャパシタ C_2 の電圧の極性反転時間となる。本回路での立ち上がり時間は50 nsである。

3. 水滴存在下での放電特性

3.1 実験方法

放電電圧は分圧比2000:1の高電圧プローブ(パルス電子工業社製:EP-50K), 放電電流は0.1 V/Aのロゴスキー・コイル(ピアソン社製: model-110)を用いて、デジタルオシロスコープ(Tektronix社製:TDS-784D)で測定した。放電路の確認および撮影はイメージインテンシファイア(浜松ホトニクス社製:C3100)を用いデジタルカメラ(ニコン社製:COOLPIX880)で行った。放電特性測定時のパルス繰り返し数は10 ppsとした。

水処理を行うために使用した C_{12} -LAS 水溶液は水道水1Lに対し C_{12} -LASを1 g溶かしたものである。この濃度は家庭用洗濯機の洗濯槽に洗剤を入れたときの洗剤濃度とほぼ同じで、界面活性剤濃度で比較すると5倍の濃度に相当する。本実験に使用した水道水の導電率は206 μS/cmで、 C_{12} -LAS溶液の導電率は341 μS/cmであった。

3.2 実験結果

本装置に大気中および水滴存在下でキャパシタ C_1 の充電

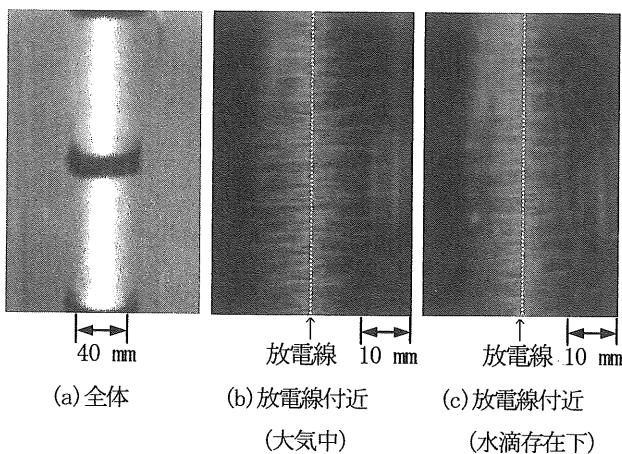


図3 大気中および水滴存在下での1回のパルス印加によるストリーマの発光様相

Fig. 3 Luminous aspects of streamer discharges caused by a single pulsed voltage with and without water spray.

電圧を30 kVとして単一のパルス電圧を印加した時の放電の様子を図3に示す。図3(a)は大気中における放電領域の全体図である。放電線を張った中心部が明るく光り、さらに電極間全体が薄く光っている。この状態は水滴存在下でも同じである。図3(b), (c)の大気中および水滴存在下の電極間の拡大図を見ると、どちらとも同じように多くのストリーマ放電が中心の放電線から伸びていることがわかる。

図4に大気中、水滴存在下、および C_{12} -LAS 溶液の水滴存

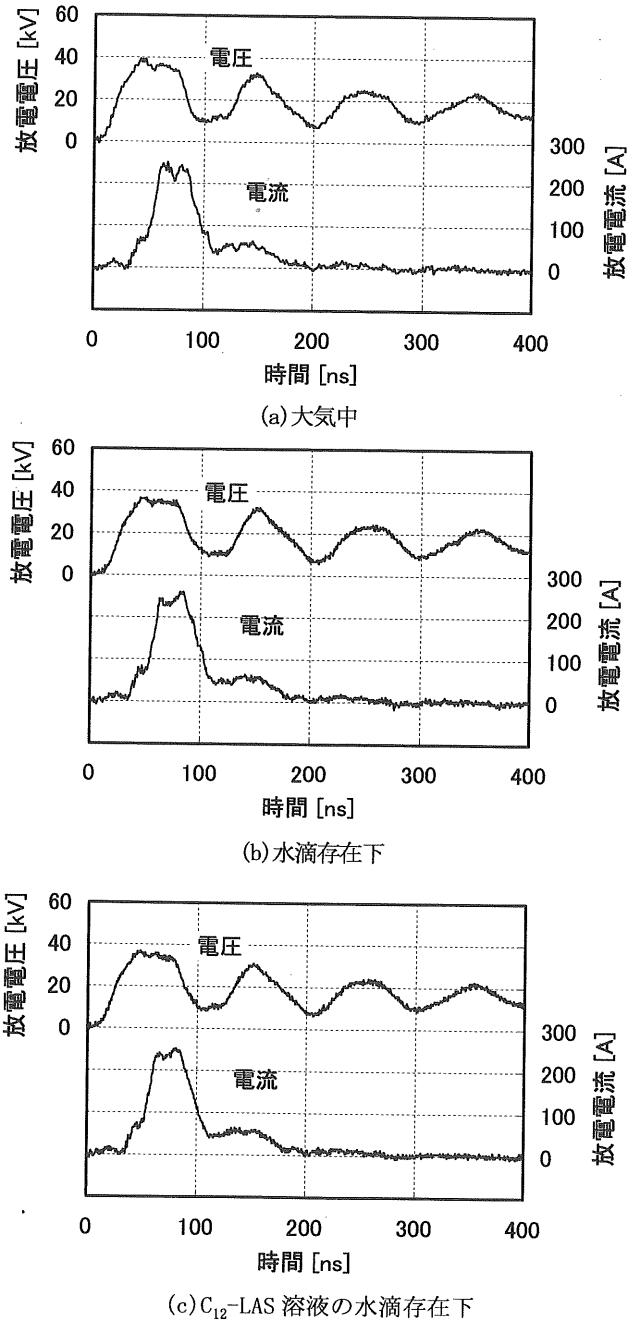


図4 大気中、水滴存在下、および C_{12} -LAS 溶液の水滴存在下での電圧、電流波形($V_{ci}=30$ kV)

Fig. 4 Waveforms of discharge voltage and current in air, in a presence of tap water spray and spray of water solution of C_{12} -LAS.

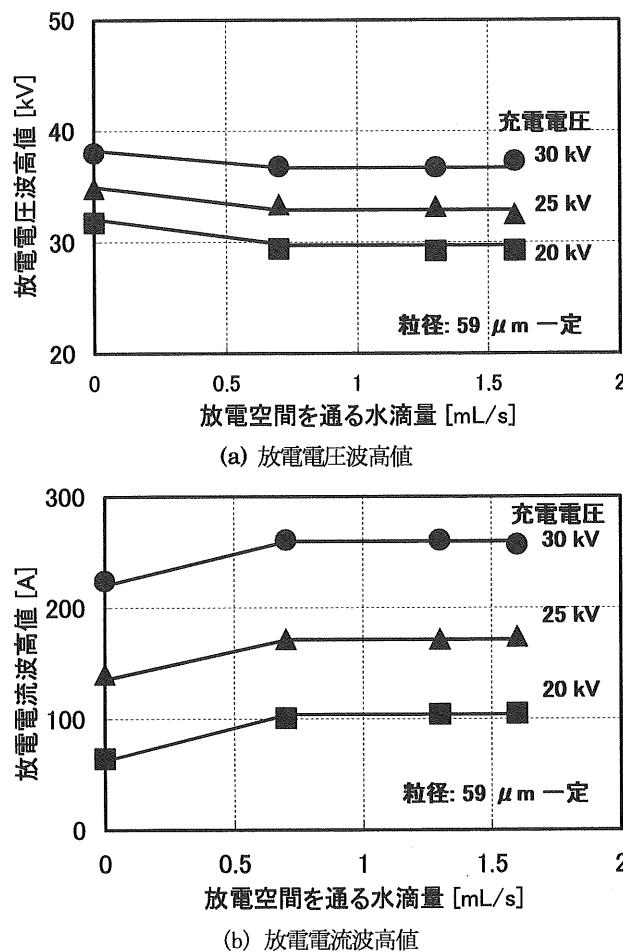


図5 水滴の噴出量を変えたときの放電電圧および放電電流波高値

Fig. 5 Magnitude of discharge voltage and current as a function of the flow rate of water droplets spray.

在下において、キャパシタ C_1 の充電電圧を 30 kV としたときに放電電極間に観測される典型的なパルス放電電圧、放電電流測定波形を示す。電圧波形は電圧印加後約 40 ns に放電電流が大きく流れ始めるため 40 kV 程度までしか上昇しない。水および C_{12} -LAS 溶液の水滴存在下でも大気中における放電電圧、電流波形の形に大きな違いは見られないが、電圧波高値に若干の減少、電流波高値に若干の増加が見られる。電圧波形は LC 反転回路を用いているため振動波形となっているが、放電電流の多くは最初の電圧パルスで流れている。

放電領域を通過する水滴の水量に対して調べた放電電圧波高値および放電電流波高値の変化を、図 5 に示す。放電空間に水滴が噴霧されることで放電電圧波高値が約 2 kV 減少し、放電電流波高値が約 40 A 増加したことがわかる。水滴の存在により放電状態が変化し、電極間が放電しやすい状態となったことを示している。この変化は放電電圧で約 5 %、放電電流で約 15 % の変化である。水量に関しては今回実験を行った 0.7~1.6 mL/s の範囲では放電電圧、電流波高値に変化はなかった。

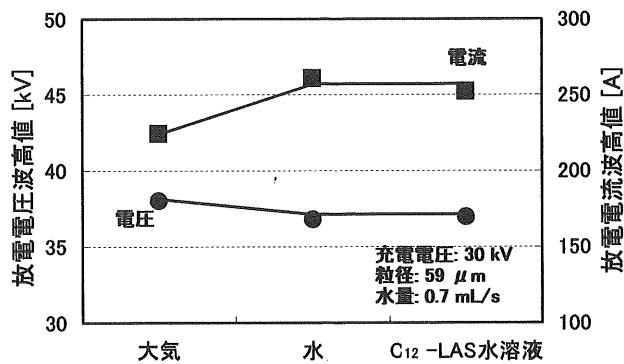


図6 放電空間の媒質の違いによる放電電圧、電流波高値

Fig. 6 Magnitude of discharge voltage and current on the difference of ambient conditions of the discharge electrode.

また、水滴の平均粒径に対する放電電圧波高値および放電電流波高値の依存性も調べてみたが、平均粒径 35~60 μm の範囲では、粒径に対する放電電圧波高値、放電電流波高値の依存性は見られなかった。

水滴を C_{12} -LAS 溶液の水滴とした場合の水量、平均粒径に対する放電電圧波高値および放電電流波高値の依存性も調べたが、 C_{12} -LAS 溶液の水滴存在下でも放電領域を通過する水量 0.7~1.6 mL/s、平均粒径 35~60 μm の範囲で放電電圧波高値、放電電流波高値に変化は見られなかった。 C_{12} -LAS 溶液の水滴が存在しない場合に比べると、図 6 に示すように放電電圧が減少し、放電電流が増加した。水道水単体の水滴存在下との放電電圧、電流波高値との違いではなく、水滴の種類による放電状態の変化は見られない。

これらの結果より、調べた範囲では水量、粒径にかかわらず水滴が放電空間に存在すると放電電圧が減少し、放電電流が増加するということがわかる。これは水滴の存在によりストリーマの進展が増長されたためと考えられる。しかし、正ストリーマは空間に存在する粒子径が大きいとき、また、粒子径が小さくても高密度粒子群存在下では進展が抑えられ、粒子の導電率の違いで進展の違いが現れるという報告もあり¹¹⁾、水滴存在下での正ストリーマはどのような振舞いをするのか今後さらに詳しく調べる必要がある。

4. C_{12} -LAS の分解特性

4.1 実験方法

C_{12} -LAS の分解実験では LC 反転回路のキャパシタ C_1 の充電電圧を 30 kV とした。 C_{12} -LAS 溶液の水滴の平均粒径は 59 μm 、放電管の中に注入する全水量は 1.2 mL/s に設定した。この条件において放電空間を通る水滴量は 0.7 mL/s である。水滴の平均速度は 4 m/s で標準偏差が 1.5 m/s であった。放電長は 300 mm であるので、注入された水滴に対して最低 1 回は放電が当たるようにパルスの繰り返し数を 25 pps に設定した。放電電圧、電流波形から計算した 1 パル

スあたりの放電消費エネルギーは 0.36 J であり、投入された放電電力は 9 W である。ここでは放電空間を通る水滴と円筒壁面に当たって流れ落ちた水を分けずに回収して測定しているため、放電空間での反応と円筒壁面での反応を合わせた結果となっている。

パルス放電による分解処理前後の C_{12} -LAS の測定には赤外分光光度計（島津製作所：IR-400）を用い、溶液を 0.01 mm 厚のテフロンシート 2 枚の間に挟み込んで分光測定した。分解実験での C_{12} -LAS 水溶液の濃度は 0.1 % であるが、分光測定時には 0.1 % 溶液では C_{12} -LAS による吸光が少ないので、20 倍に濃縮して測定した。

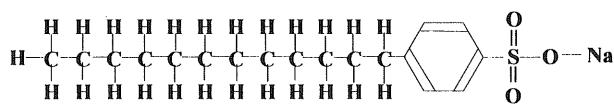
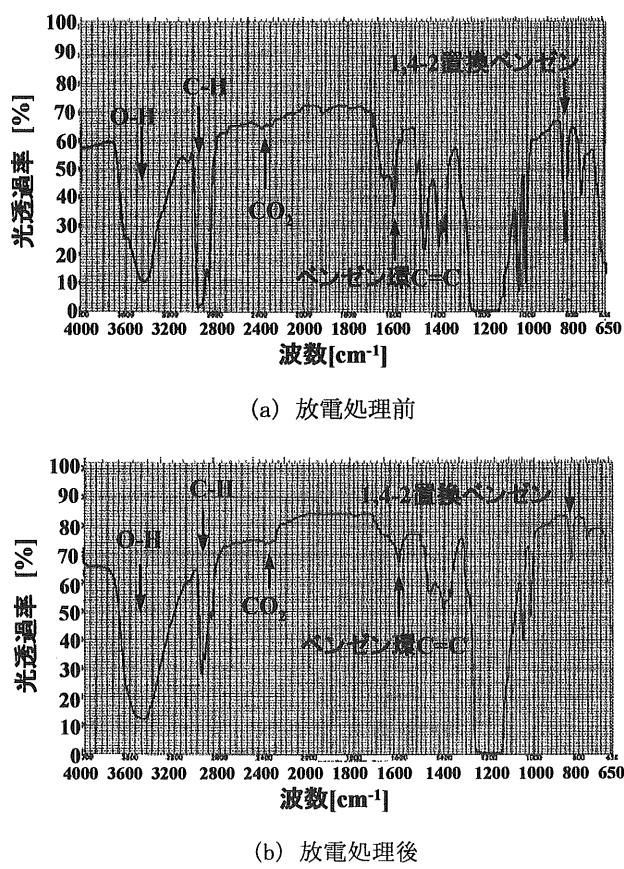


図 7 C_{12} -LAS の構造式

Fig. 7 The structural formula of C_{12} -LAS.



(水滴平均粒径: 59 μm , 水滴平均速度: 4 m/s,
全水量: 1.2 mL/s, 放電領域水量: 0.7 mL/s,
パルス繰り返し数: 25 pps)

図 8 放電処理前後の C_{12} -LAS 溶液の赤外吸収分光スペクトル

Fig. 8 Infra-red absorption spectra of C_{12} -LAS solution before and after the decomposition.

C_{12} -LAS の構造式を図 7 に示す。 C_{12} -LAS は大きく分けると直鎖アルカン、1,4-2 置換ベンゼン、スルホン酸塩部分から成っている。 C_{12} -LAS の分解特性の測定には 3000 cm^{-1} 付近の直鎖アルカン部の C-H 結合による吸光、 1600 cm^{-1} 付近のベンゼン環内の C=C 結合による吸光、 840 cm^{-1} 付近の 1,4-2 置換ベンゼンの C-H 結合による吸光¹³⁾を使用した。

4.2 実験結果

図 8 に分解処理前後の C_{12} -LAS 溶液の赤外吸収分光スペクトルを示す。図中には C_{12} -LAS の吸光スペクトル以外に 3500 cm^{-1} 付近の H_2O 分子の O-H 結合による吸光、 2350 cm^{-1} 付近の溶液中に溶解している CO_2 分子の C=O 結合による吸光が見られる。また 1200 cm^{-1} には溶液を挟んだテフロンの C-F 結合による強い吸収¹³⁾もある。

分解処理後の赤外吸収分光スペクトルを処理前のスペクトルと比べると、放電処理後には 3000 cm^{-1} 付近の直鎖アルカン部の C-H 結合、 1600 cm^{-1} 付近のベンゼン環内の C=C 結合、および 840 cm^{-1} 付近の 1,4-2 置換ベンゼンの C-H 結合による吸光の全てで光透過率が上がり、処理前に比べそれぞれの濃度が減少していることがわかる。

この光透過率よりランベルト-ベールの法則¹³⁾を用いて C_{12} -LAS の各構造部分の放電処理前に対する残存率および CO_2 の存在率を求めた。図 9 に示すように、 C_{12} -LAS の直鎖アルカン、1,4-2 置換ベンゼンは処理前の 20 % まで分解されている。 C_{12} -LAS は、パルス放電処理により処理前の 20 % 以下まで分解されたことがわかる。ベンゼン環は、ベンゼン環内の C=C 結合が二重結合なので分解に必要なエネルギーも高く残存率は高いが、処理前の 40 % まで分解されている。また、溶液に溶解している CO_2 の吸光は放電処理前に比べ 60 % 程度増加している。これは、分解し

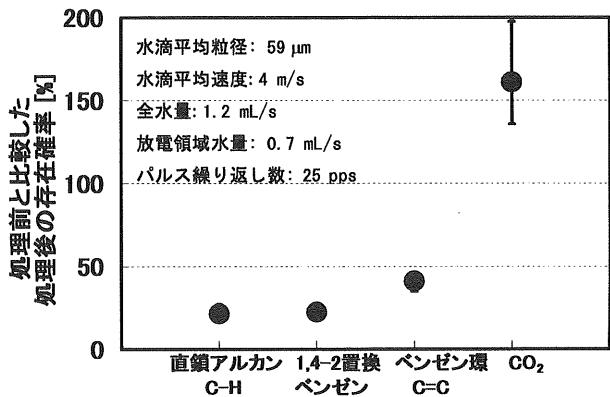


図 9 放電処理後の C_{12} -LAS の直鎖アルカン、1,4-2 置換ベンゼン、ベンゼン環および CO_2 の存在確率

Fig. 9 The ratios of existence of the components of C_{12} -LAS and CO_2 after treatment to those before the treatment.

た C_{12} -LAS の炭素が二酸化炭素に変化したことを示している。この結果は、本方法で C_{12} -LAS の C と H に関する結合を水と二酸化炭素に完全分解できる可能性を示している。

C_{12} -LAS の分解効率は、実験で用いた条件では約 500 mg/kWh である。他方法で C_{12} -LAS を分解した結果がないため比較できないが、参考として水中放電でのフェノール分解効率は 2.6 mg/kWh という結果があり¹⁴⁾、本方法でかなりの効率向上が期待できる。

また、放電処理前の図 8(a)に現れた吸収スペクトル以外は放電処理後の図 8(b)には見られず、少なくとも実験で使用した赤外分光光度計で測定可能な新たな結合は放電処理によって生成されてはいない。水処理装置の性能として、有害副生成物を作らないことは重要なことであり、今後分解生成物についても調べる必要がある。

5. まとめ

水と放電を直接作用させるパルスパワー放電による水処理において、処理対象物質が含まれた水を水滴化した空間で放電を発生させ分解処理を行う方法について検討した。得られた主要な結果を以下に示す。

- (1) 水滴が放電空間に存在すると放電電圧が小さくなり、放電電流が増す。
- (2) 水滴中に含まれた C_{12} -LAS の分解実験では水を 1 回放電に曝露するだけで C_{12} -LAS の残存率を 20 %以下にすることができる。
- (3) 分解処理の結果二酸化炭素の増加が確認され、有機物を水と二酸化炭素に完全分解できる可能性がある。

本結果より水滴を利用したパルスパワー放電は水処理に十分適用できると考えられる。

参考文献

- 1) 中西準子：水の環境戦略，p49，岩波書店（1994）
- 2) 横山明彦、石川鉄郎、安田祐治：電気学会誌，121（2001）166
- 3) 高橋信行：静電気学会誌，24（2000）139
- 4) 佐藤正之：応用物理，69（2000）301
- 5) 国友新太：平成12年電気学会全国大会講演論文集[1]（2000）488
- 6) 廣岡達也、寺本雄介、勝木淳、秋山秀典：電気学会研究会資料，ED-01-34（2001）93
- 7) V. M. Bystritskii, A. Gonzales, T. Olson, V. Puchkarev, L. Rosocha, F. Wessel, and Y. Yankelevich: Proc. Int. Conf. On High Power Particle Beams, BEAMS'96, July 10-14, (1996) 886
- 8) V. M. Bystritskii, T. K. Wood, Y. Yankelevich, S. Chauhan, D. Yee, and F. Wessel: Proc. 11-th IEEE Intern. Pulsed Power Conf., 1 (1997) 79
- 9) 原雅則、赤崎正則：電気学会雑誌，90（1971）557
- 10) 原雅則、西嶋喜代人、赤崎正則：電気学会論文誌 A, 97 (1977) 197
- 11) 原雅則、副島和昌、西嶋喜代人、赤崎正則：電気学会論文誌 A, 97 (1977) 205
- 12) 早川和也監訳：「エアロゾルテクノロジー」，p80，井上書院（1985）
- 13) 野村正勝 監訳：「有機化学のためのスペクトル解析法」，p27，化学同人（2000）
- 14) アントン・トリ・スギアルト、佐藤正之：静電気学会講演論文集'98（1998）37

論文

Optimum Operating Conditions for Ozone Generation
in AC Corona and AC Silent-discharge ReactorsA. Hashem[†], M. Abdel-Salam[§], A. Mizuno[‡], A. Yehia[†], A. Turky[†] and A. Gabr[†]

(Received October 24, 2002; Accepted April 24, 2003)

The linear relationships between the specific energy and the energy density (or Becker parameter) are investigated for ozone generation by AC corona and AC silent-discharge. These relationships are used to determine the ozone formation and destruction coefficients in dry-air-fed wire-cylinder AC-corona and silent-discharge reactors. These coefficients depend on the investigated parameters of the reactor; namely, the radius of the discharge wire, the air flow rate and the active length of the reactor. The ratio between the specific energy and the ozone concentration, referred to as the economical criterion parameter, is assessed as a function of the energy density for the different investigated parameters. The optimum operating conditions for ozone generation can be estimated by the minimum values in the economical criterion parameter proposed in this study. This condition is valid both for the AC corona and AC silent-discharges until the saturation of the ozone concentration.

1. Introduction

Among the methods for generating non-equilibrium plasmas at atmospheric pressure and temperature are the AC corona and the AC-silent discharge¹⁾.

There are numerous applications of AC silent discharges. Typical examples include the elimination of NO_x and SO_x from flue gases²⁻⁴⁾, pumping CO₂ lasers and excimer lamps, surface treatment and modifications as well as CO₂ hydrogenation⁵⁾. On the other hand, AC corona generates light, audible noise, radio noise and ozone⁶⁾ around the stressed conductor. AC corona produces also bipolar ions used for discharging charged dielectric plates by neutralizing their charges^{7,8)}. AC corona on EHV lines is used to attenuate the over voltage traveling waves along these lines⁹⁾, thus relieving the electric stress on the line insulation.

The characteristics of corona and silent discharges as influenced by the geometry of the discharge electrode have been investigated before by the same authors¹⁰⁾. The corona discharges have been generated in wire-cylinder and wire-duct reactors stressed by dc and ac voltages. The pulse characteristics of silent discharges are compared with those of ac corona discharges. The current-voltage and the ozone generation characteristics of these discharges are recorded. These characteristics depend significantly on the geometry of the reactor irrespective of the discharge type.

Ozone being generated by AC corona and AC silent discharge has many applications in industries. These include deNO_x and deSO_x processes²⁻⁴⁾, water purification without objectionable byproducts and residues^{3,4)}, oxidation

of oleic acid and synthesis of certain hormones, vitamins and some perfumes¹¹⁾. The ozone layer, which is apparently endangered by anthropogenic emissions, protects the biosphere against dangerous short-wave radiations from the sun¹²⁾.

A global approach was first proposed by Becker and Lunt¹³⁻¹⁵⁾ from the electrosynthesis of some chemical products (ozone). Global rate coefficients K_f and K_d were introduced to describe respectively the ozone formation and destruction phenomena in discharge reactors. These kinetic rates are generally considered as proportional to the energy density¹⁶⁾.

Experimental measurements resulting from ozone electrosynthesis pointed out a fundamental parameter $\beta = P/Q$, relating the discharge power input into the reactor P with the gas flow rate Q, assuming homogeneous energy distribution in the flowing gas inside the reactor¹³⁻¹⁵⁾. This is well known as the Becker (or energy density) β parameter and is acknowledged as an important dynamic characteristic of the reactor. The gas flow rate Q is equivalent to the volume of the reactor V_{reactor} swept by the running out gas during the residence time t_r ($Q = V_{reactor}/t_r$). Both V_{reactor} and t_r depends on the geometrical characteristics of the reactor.

In relation to the Becker parameter, the specific energy ε is defined as representing the energy necessary to obtain one molecule of product per unit volume; $\varepsilon = \beta/C$, where C is the volumetric concentration of the resulting product (ozone) inside the flowing gas. The optimum product concentration inside the reacting carrier gas corresponds to the minimal energy consumption in the reactor. Thus, it is possible to define an economical criterion related parameter γ as equal to the ratio between the energy expended for one molecule of product (the energy density) and the product concentration C: $\gamma = \varepsilon/C = \beta/C^2$. The minimum value of γ dictates the reactor operating conditions for optimum ozone generation.

Key words: Ozone, Ozonizer, Non-thermal plasma, Silent discharge, Corona discharge,

† Department of Physics, Faculty of Science, Assiut University, Assiut 71516, Egypt

§ Department of Electrical Engineering, Assiut University, Assiut 71516, Egypt

‡ Okazaki National Institutes, Institute for Molecular Science, Saigo-naka 38, Myodaiji-cho, Okazaki, 444-8585, Japan