

超音波照射による水中パルス放電の活性化

山崎 晴彦^{*,1}, 熊澤 裕哉^{*}, 黒木 智之^{*}, 大久保 雅章^{*}

(2020年5月19日受付; 2020年7月9日受理)

Enhancement of a Pulsed Electrohydraulic Discharge by Ultrasound Irradiation Haruhiko YAMASAKI^{*,1}, Yuya KUMAZAWA^{*}, Tomoyuki KUROKI^{*} and Masaaki OKUBO^{*}

(Received May 19, 2020; Accepted July 9, 2020)

A pulsed electrohydraulic discharge combined with ultrasound is investigated by using a high-speed camera. The discharge and ground electrodes are a needle electrode and a perforated plate, respectively. Ultrasound is applied directly to the plasma reactor through water by using an ultrasonic transducer. As a result, when ultrasound is combined with an electrohydraulic discharge in water, it is confirmed that the discharge region expands, and the gas phase ratio increases. As the bubble diameter generated from the electrode expands when the pressure is reduced by ultrasonic waves, it is found that the discharge progress region extends.

1. はじめに

近年, 有毒な副生成物が発生しない廃液処理法の一つである水中パルス放電が注目を集めている^{1,2)}. また水中パルス放電と超音波照射を複合することで, 高効率に難分解有機化合物を分解できることが報告されている³⁾. 超音波を照射すると, 誘起される圧力勾配による減圧キャピテーション気泡が生成される. そのため, 減圧気泡内において放電プラズマ領域が拡大し, 放電発生率および有機化合物分解率が向上することが期待できる. しかしながら, 超音波照射時における, 印加電圧の経時変化に対応させた水中パルス放電の観察結果はこれまで報告されていない. 本研究では, 水中フェノール除去実験における大気圧下での超音波照射パルス放電の高速度カメラによる可視化を行い放電の様子を明らかにし, 超音波照射により水中パルス放電が活性化することを示した.

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図1に示す. プラズマリアクタは直径0.2 mmのタングステン針の放電電極と超音波が進展しやすい直径50 mmのステンレス製の多孔板状の接地電極からなる内径70 mm, 高さ125 mmのハウケイ酸ガラス製円筒型のものである³⁾. 電極間距離は10 mmとした. 放電電極にピーク値+30 kV, 幅約400 ns, パルス周波数210 Hzの極短パルス高電圧をパルス電源(増田

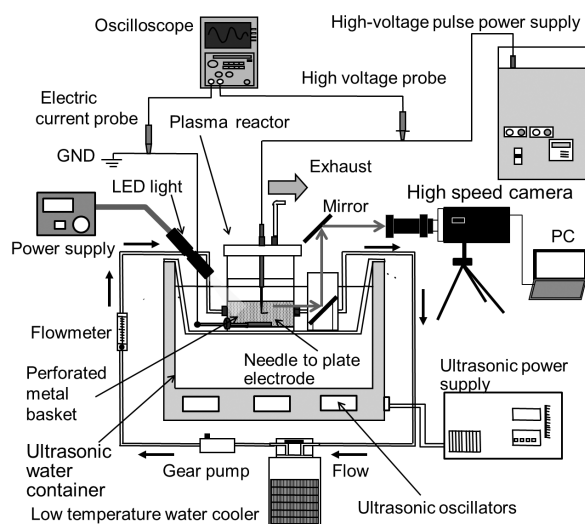


図1 実験装置概略

Fig.1 Schematic of experimental setup.

研究所製 PPCP Pulser SMC-30/1000, 500 W)により印加することで, 電極間にパルス放電プラズマが発生する. 処理流量は25°Cの一定温度に保たれたフェノール濃度0.5 mmol/L, 体積250 mLの純水水溶液を用いた. 底部に振動子が設置された超音波洗浄槽内を純水で満たし, 超音波発振器(日本エマソン製 Branson S8540-12)により振動子を駆動して超音波(40 kHz, 500 W)を下方からリアクタに照射した. 撮影には, ハイスピードカメラ(Vision Research社製 Phantom Miro M/LC), マクロレンズ(TAMRON 180 mm MACRO 72 mm), テレコンバータレンズ(KENKO 2X)を使用した. また, メタルハライド光源装置(LS-M210, 株式会社住田光学ガラス製)を使用し, リアクタにバックライトを当て撮影を行った. 撮影条件は10000フレーム/秒, 撮影間隔: 100 μ s, 解像度: 640 \times 400, 露光時間: 97.59 μ sとした.

キーワード: 水中パルス放電, 超音波, 可視化, 促進酸化法

^{*}大阪府立大学大学院工学研究科機械系専攻
(〒599-8531 堺市中区学園町 1-1)

Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai 599-8531, Japan

¹hyamasaki@me.osakafu-u.ac.jp

3. 実験結果および考察

図2に超音波複合放電時における印加電圧と電流の波形を示す。極短パルス高電圧は(ii)の区間で印加され、当該区間で電流値が上昇し放電が起きている。なお、超音波無しの単独放電の際の波形と図2の波形の差異は極めて小さかった。

図3に放電の連続写真を示す。写真の黒色箇所は気泡界面でのバックライトの屈折による気泡の影および放電電極であることを確認している。また、プラズマは自ら発光することから、水の領域よりも明るくなり白色となる。なお、すべての写真に対し輪郭強調のため、明度を40%、コントラストを20%増加させる画像処理を行っている。図3における時間区間(i) - (v)は図2に示す時間区間(i) - (v)に対応しており、100 μ sの間隔で撮影を行っている。

図3(a)に示す単独放電時の区間(ii)において、放電電極先端に直径約0.3 mmの気泡とプラズマが生成される様子が確認できる。図3(a)の(iii) - (v)では、放電によって生成された残存気泡が確認できる。一方、図3(b)に示す超音波照射複合放電時の区間(ii)において、放電電極先端に直径約0.6 mmのより大きな気泡とプラズマが生成され、気泡内をプラズマが進展する様子が確認できる。超音波照射時にプラズマ領域が拡大した要因として、超音波による減圧時(絶対圧で約2 kPa)に気泡径が拡大することによって、気相領域およびその内部の換算電界が大きくなり放電が生成しやすくなったことが挙げられる⁴⁾。さらには図3(b)において、超音波照射時に気泡の数は大幅に増加している。プラズマが生成する気泡は沸騰、電気分解、水のプラズマ分解、放電に伴う衝撃波のいずれかのメカニズムに基づく。超音波によりプラズマ領域が拡大活性化することから、プラズマによる気泡生成

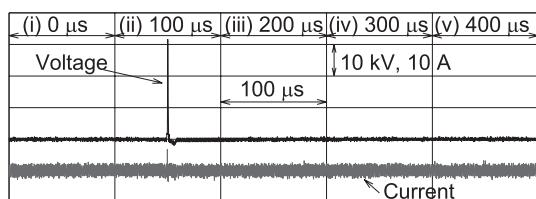


図2 超音波照射時における電圧と電流波形
Fig.2 Waveforms of voltage and current in the case with ultrasound.

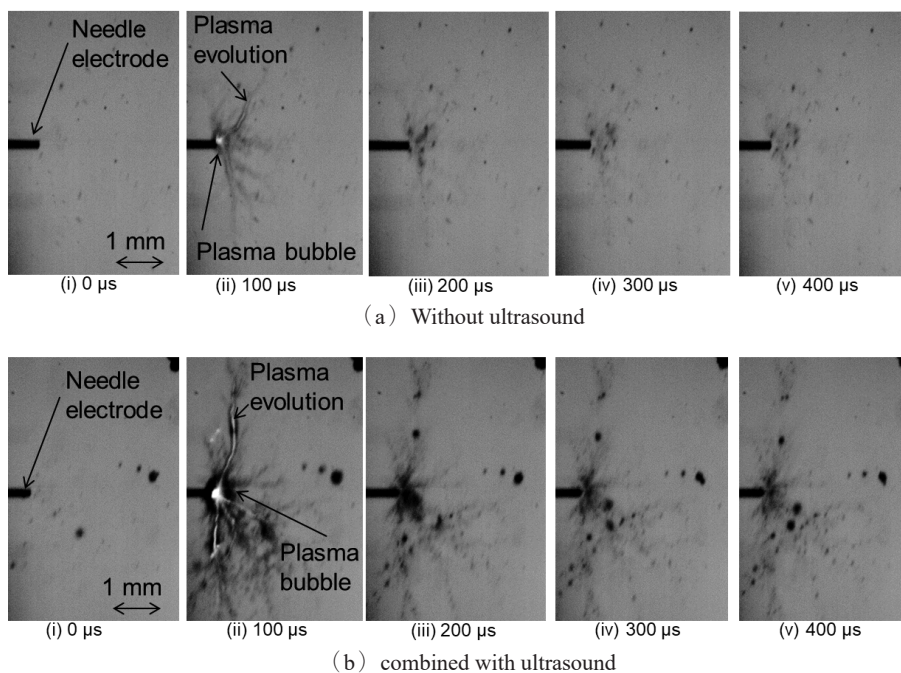


図3 水中パルス放電の連続写真(露光時間 = 97.59 μ s)
Fig.3 Continuous photographs of the pulsed electrohydraulic discharge (camera exposure time = 97.59 μ s).

が促進され気泡の数がさらに増加するものと考えられる。

撮影した1秒間の画像10000コマの中からプラズマが発生した回数をパルス周波数210 Hzで除した値を放電発生率と定義した。計測の結果、超音波照射を複合することで放電発生率は、11%から58%に増加した。また、高速液体クロマトグラフ(島津製作所製LC-10ATvp)によって計測したフェノール処理時間100分時におけるフェノール除去率³⁾は、単独放電時の6%から複合放電時の12%まで増加し、放電の活性化による除去率の向上を確認した。

4. 結論

超音波照射を複合することにより、水中パルス放電を活性化しプラズマ領域を拡大することができた。難分解性有機物の高効率な分解処理技術になることが期待できる。

本研究はJSPS 科研費JP17K06311の助成を受けた。

参考文献

- 1) B. Jiang, et al.: Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation. Chem. Eng. J., **236** (2014) 348
- 2) M. Tahara and M. Okubo: Detection of free radicals produced by a pulsed electrohydraulic discharge using electron spin resonance. J. Electrostat., **72** (2014) 222
- 3) 大瀧悠裕ら: パルス放電プラズマ - 超音波複合処理によるフェノールの分解. 静電気学会誌, **43** (2019) 19
- 4) N. Yu Babaeva and M. J. Kushner: Structure of positive streamers inside gaseous bubbles immersed in liquids. J. Phys. D: Appl. Phys., **42** (2009) 132003