

令和 5 年 9 月 1 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04446

研究課題名（和文）キャビテーション放電プラズマ方式を使った水質浄化装置の実用化のための研究

研究課題名（英文）Development of practical water purification system using water cavitation and plasma

研究代表者

猪原 哲（Ihara, Satoshi）

佐賀大学・理工学部・准教授

研究者番号：90260728

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：循環型社会、持続可能な社会を世界的な視点で実現するためには、水質浄化は必須の技術であるが、高度化・多様化した現在は、既存の水処理技術では限界がある。本研究は、プラズマを使った水質浄化装置の実用化を目指したものである。独自の方式である「水中キャビテーション放電」を採用し、装置設計に必要な知見を明らかにするために実施した。本研究では、流体力学的条件と放電発生周波数との関係を実験的に取得した結果、両者には明らかに相関があり、リアクタの最適化設計をするための評価指標として妥当であることが実証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水質浄化の問題は循環型社会、持続可能な社会の構築、より健康的で快適な生活において重要な問題である。プラズマはその高い反応性のため、水質浄化への応用が期待されてきた。そのための基礎的な研究は1970年代から行われ、多くの先行研究があるが実用化に至っていない。

本研究は、プラズマを使った短時間で強力な殺菌能力を持つ水質浄化装置の実用化を目指したものである。学術的特徴は、「水中キャビテーション放電」という新しい方式を提案した点であり、実用化のポイントである、高いラジカル生成効率とシンプルな装置構成となる。本研究では、水質浄化の心臓部である「リアクタ」の最適な設計の指針となる知見を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：In order to realize a recycling-based society and a society in which safety and security are guaranteed from a global perspective, water treatment, including water purification, is an essential issue. Water treatment technology has limitations. This research aims at practical application of water treatment equipment using underwater plasma. We have adopted an original plasma generation method, "underwater cavitation discharge," and carried out the research with the aim of clarifying the knowledge necessary for its practical application. In this study, the "cavitation number" was calculated from the hydrodynamic conditions, and the relationship between the value and the discharge generation frequency was experimentally obtained. It was demonstrated that it is appropriate as an evaluation index for optimizing the reactor conditions.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：放電プラズマ 水質浄化 キャビテーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

循環型社会と安全安心が担保された社会を世界的な視点で実現するためには、水質浄化を含めた水処理は必須の課題であり、高度化・多様化した現在は、既存の水処理技術では限界がある。本研究は、水中プラズマを使った水処理装置の実用化を目指したものである。

水中に直接プラズマを発生させて行う水処理（以下、「プラズマ水処理」と呼ぶことにする）は、既存の水処理技術である「次亜塩素酸処理」、「オゾン処理」、「膜処理」に比べて、強い反応性と殺菌力、フッ素化合物などの難分解性物質が処理可能、などの優位性があることから、とりわけ1990年台から活発な研究がなされ、水中プラズマの基礎的振舞いやラジカル反応に関する基礎的研究、プラズマ生成法の提案、具体的な有害化学物質、細菌、微生物の処理効果を実証した研究まで様々な先行研究例がある（これらはたとえば、P JBruggeman et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* 25, 053002 (59pp) (2016)や、J. E. Foster, *Physics of Plasmas* 24, 055501 (2017), などでレビューされている)。しかしながら、プラズマ水処理は実用化された例がなく、基礎的研究の域から脱していない。

2. 研究の目的

本研究では、独自のプラズマ発生方式である「水中キャビテーション放電方式」を採用し、実用化のために必要な知見、具体的には低コスト・小型化、長寿命化のために必要な設計指針を実験的に明らかにし、実用機のプロトタイプを試作する。さらに、実用的な観点から総合的な性能評価を行う。実用機のプロトタイプ概念図は右図であり、その目標仕様を以下のように決めた。

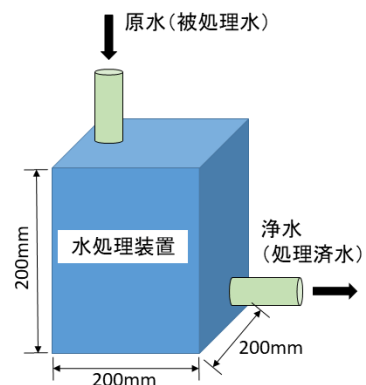


図1 水質浄化装置概念図

水処理装置サイズ, 総消費電力:高さ300×幅300×奥行300 mm以下, 100 ワット以下

殺菌能力(大腸菌): 10^2 個/mLのレベルを滅菌可能(国内外の最高細菌汚染レベル)

想定する原水の電気伝導率:10 mS/m ~ 100 mS/m(河川・湖沼と同等レベル)

電極寿命:1000 時間(使用水量 10 リットル/日として 1 年間の稼働を想定)

本研究の目的は、①目標仕様の実用機的设计指針を明らかにするに、②実用化を決めるパラメータを見つけることである。処理性能を左右する制御因子と誤差因子を定め、総合的な性能評価を行う。

3. 研究の方法

A. 低コスト・小型化

装置小型化（電源の小型化）のためには、プラズマ発生に必要な電圧を低減させる必要がある。そのための有効な方法は、水中の電極間に微小気泡を導入することである。従来本研究では、図2aのようにノズルを使うことによって、被処理水中にミクロンサイズのキャビテーション気泡を発生させていた（水中キャビテーション放電方式）。この方法は、他の先行技術よりも装置が簡素にできるが、ノズルの圧力損失のために送水ポンプの負担が大きくなるのが欠点であった。この欠点を改善するために、図2のbのようにノズルを取り外し、電極を障害物とし、その下流域でキャビテーション気泡が発生させた（「ノ

ズレス方式」)。これにより、小電力で小型の送水ポンプが使えるようになり、装置を簡素化することができた（この成果は、S. Ihara et al., AIP Advances 9, 045005 (2019)にて論文発表、掲載済み）。

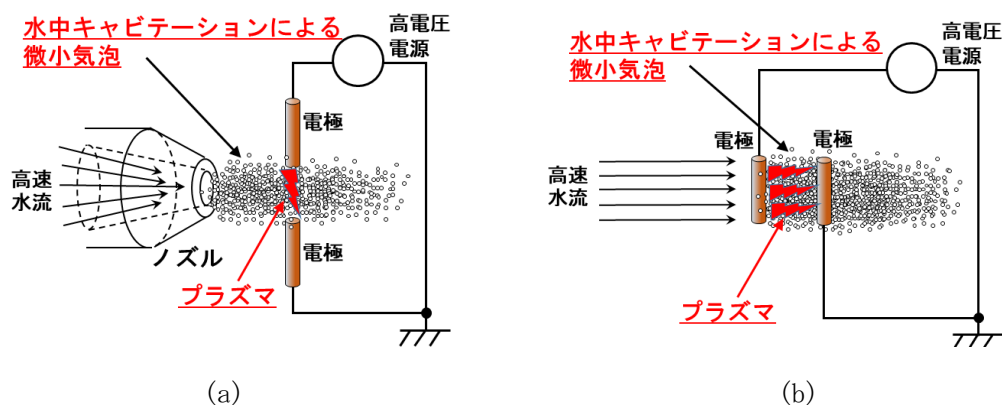


図2 水中での気泡発生方法

B. プラズマ発生と長寿命化

プラズマの安定な発生と電極の長寿命化のために、図3のように新しいプラズマリアクタと電極の構造を考案した。2本の電極はセラミック管で被覆され、かつ先端部のみ被覆が取り除かれている。また、より安定なキャビテーション気泡の発生を促進するために、電極から下流の流路はテーパ形状にしている。高導電率の被処理水でも安定なプラズマ生成が可能になる（特願2019-153276にて出願）

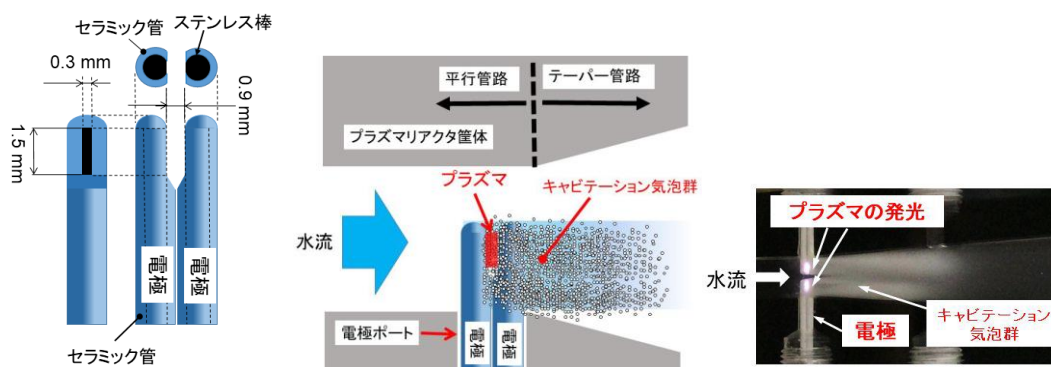


図3 プラズマリアクタ構造，電極，プラズマ生成

4. 研究成果

2021年年度は、電気導電率50mS/m（国内水道水の約5倍）の被処理水に対応するため、電極間の電気抵抗から気泡量を定性的に推定する方法を考案し、その方法の妥当性の実証と最適なリアクタを設計するための指針が得られた。さらにイオン交換樹脂カートリッジにより、十分にプラズマ発生できる程度まで導電率を低下させるための条件を把握できた。

これらの結果を踏まえ、2022年度では、水圧測定結果も検討事項に加え、より定量的な条件の下での最適化を試みた。試験用リアクタは3Dプリンターで製作して効率化を図った。実験では各リアクタごとに流路圧力、流量を測定し、それらの値から「キャビテーション数」を算出した。その値と電極間電気抵抗値と放電発生周波数の関係を実験的に取得し、両者の相関をリアクタ条件、流量条件において調べた。キャビテーション数は水中でキャビテーションが発生しやすいかどうかを表す指標であり、その数値が小さいほどキャ

ビテーションが発生しやすい条件であることを示す。

図4は気泡量推定試験の実験装置構成を示し、図5はその装置によって得た実験結果を示す。横軸はキャビテーション数、縦軸を ΔI である。この ΔI とは、電極間の気泡の有無における直流電流値である。 ΔI が大きいほど電極間の気泡量が多いことを示す。図5(a)～(c)はいずれもキャビテーション数の減少により高い ΔI を示しており、この傾向はキャビテーション数が示す本来の指標と定性的に一致する。図6は、キャビテーション数に対する平均放電周波数と ΔI の変化を示す。平均放電周波数と ΔI の変化はほぼ同じ傾向で変化していることから、電極間電気抵抗値および放電発生周波数との間には明らかに相関があり、リアクタの最適化設計をするための評価指標として妥当であることが実証された。

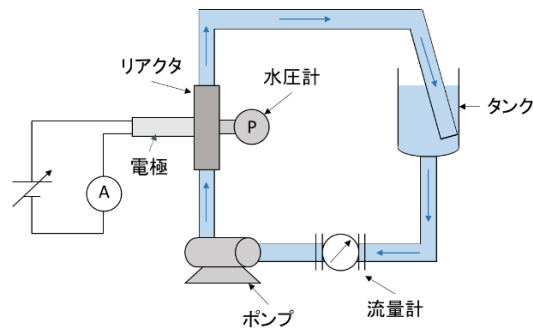
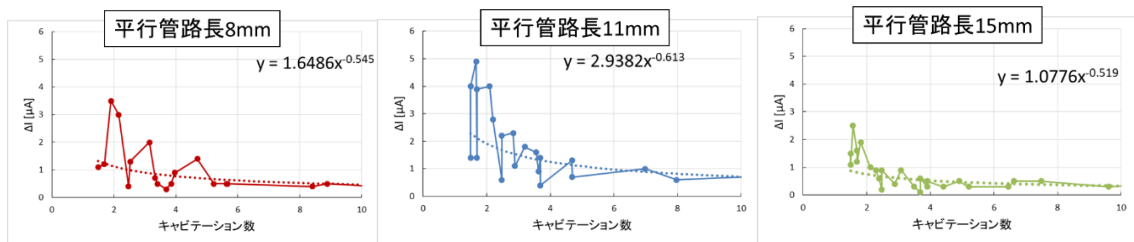


図4 実験装置構成（気泡発生量推定試験）



(a) 平行管路長 8 mm

(b) 平行管路長 11 mm

(c) 平行管路長 15 mm

図5 キャビテーション数に対する ΔI

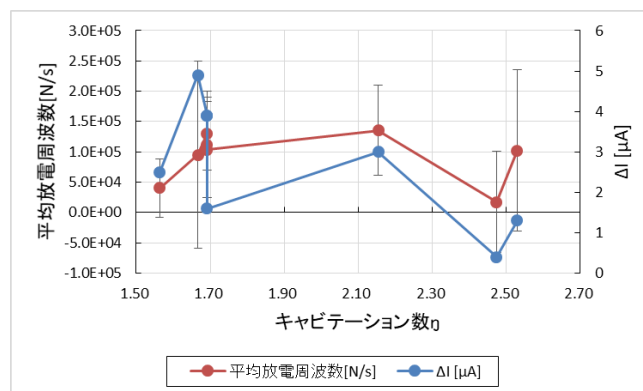


図6 キャビテーション数に対する ΔI 、平均放電周波数の関係性

論文発表：

- (1) Hiroaki Terato, Yuka Tokuyama, Hiroki Nishiyama, Takashi Matsunaga, Yuki Yoshida, and Satoshi Ihara, "Sterilizing Ability of High-Voltage Pulsed Discharge Plasma with Cavitation

for Microorganisms Including Radio-Resistant Bacterium in Water”, *Biocontrol Science*, 2022, Vol. 27, No. 1, 41-46. (査読あり), DOI: 10.4265/BIO.27.41

(2) Satoshi Ihara, Tomoya Matsuo and Kento Ishibashi, “Plasma Generation in Water Using a Compact Electrode with a Semi-covered Structure”, *Physica Scripta*, IOP Science, 98 055608(10pages) 2023(査読あり), DOI: 10.1088/1402-4896/acc704

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hiroaki Terato, Yuka Tokuyama, Hiroki Nishiyama, Takashi Matsunaga, Yuki Yoshida, and Satoshi Ihara	4. 巻 27
2. 論文標題 Sterilizing Ability of High-Voltage Pulsed Discharge Plasma with Cavitation for Microorganisms Including Radio-Resistant Bacterium in Water	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Biocontrol Science	6. 最初と最後の頁 41-46
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4265/B10.27.41	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Satoshi Ihara, Tomoya Matsuo and Kento Ishibashi	4. 巻 98
2. 論文標題 Plasma Generation in Water Using a Compact Electrode with a Semi-covered Structure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physica Scripta	6. 最初と最後の頁 55608
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1402-4896/acc704	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 国際出願（PCT出願）	発明者 猪原哲	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2020/025987	出願年 2020年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究 分担者	寺東 宏明 (Terato Hiroaki) (00243543)	岡山大学・自然生命科学研究支援センター・教授 (15301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------