

「化学農薬の代替となるキャビテーションプラズマ殺菌水生成装置の開発」

兵庫県立大学 大学院工学研究科

岡 好浩、木村 文義

1 研究の背景と目的

世界人口の増加に伴い農作物の収量確保が求められる一方で、環境負荷の低減のため、化学農薬に依存しない新たな植物病原菌防除技術の開発が急務となっている。本研究では、液中プラズマの一種であるキャビテーションプラズマ技術を活用して、水のみを原料としながらも高い殺菌効果を有する農業用殺菌水を開発する。「高い殺菌効果」および「安心・安全」を有する殺菌水の実用化を考えると、生成速度のさらなる向上が必要不可欠である。

本研究は3年計画で進めており、以下の3点を主な検討項目とした：

- (1)キャビテーション気泡生成量の増加(ノズル内部構造最適化、キャビテーション促進体の形状設計)
- (2)放電電極ギャップ長の調整によるプラズマ発生率の維持
- (3)殺菌水高速生成および効果検証(灰色カビ病菌に対する抗菌試験)

3年間の研究により、金属3Dプリンタ製ノズル(回転角度0°構造および正方形角柱促進体十字配置)でプラズマ発生率を88%まで向上させ、ギャップ長調整により60分処理で高い発生率を維持した。これにより殺菌水生成速度を大幅に向上させ、*Botrytis cinerea* に対しほぼ完全な生育阻害効果を確認した。本成果は、株式会社YSH総合研究所の設立(2025年3月)を通じ、社会実装に向けた基盤を確立した。

2 研究方法・研究内容

初期pH=6、初期導電率1 μ S/cmのイオン交換水4200gを大容量型キャビテーションプラズマ装置に導入した。ローターを3600rpmで回転させ、コンバージェントノズルで発生させた微小気泡を含む水を循環させた。タンク部の外周に冷却水を循環させることによって初期水温を30°Cに安定させた。ノズル直上に設置されたプラズマ反応室内には、直径2.0mmのタングステン電極2本をギャップ長1.0mmで対向させた。波高値5kV、パルス幅0.4 μ s、繰り返し周波数300kHz、の両極性パルス電圧を電極間に印加し、気泡内にキャビテーションプラズマを生成した。電圧電流波形は高電圧プローブ(PVM-12, North Star High Voltage)、変流器(Model 110, Pearson Electronics)をオシロスコープ(DLM3024, Yokogawa)に接続して測定した。殺菌水生成速度の指標であるプラズマ発生率は、75万パルス分の電圧電流波形から以下の式を用いて算出した。

$$\text{プラズマ発生率 (\%)} = \frac{\text{プラズマ発生パルス数}}{\text{印加パルス数}} \times 100$$

放電電極のギャップ長調整実験では、タングステン電極2本をギャップ長0.5mmで対向させた。電極の先端は上部から下部に向かって斜めに消耗した形状であり、最狭部をギャップ長と定義した。波高値10kV、パルス幅0.4 μ s、繰り返し周波数300kHzの両極性パルス電圧を電極間に印加することにより気泡内にキャビテーションプラズマを生成した。処理時間を60minとした。

大容量型装置のノズル製作は大規模であるため、より扱いやすい小容量型装置を用いてノズルの内部構造を検討した。初期pH=6、初期導電率100 μ S/cmの塩化ナトリウム水溶液260gを小容量タイプのキャビテーションプラズマ装置内に導入した。(評価中の導電率変動による印加電圧の変動の影響を低減するために初期導電率100 μ S/cmの水溶液を使用した。)ローターを7200rpmで回転させ、ローター部で発生さ

せたキャビテーション気泡を含む水を循環させた。プラズマ反応室内には、直径 2.0 mm のタングステン電極 2 本をギャップ長 1.0 mm として対向させた。電圧波高値 6 kV、パルス幅 1.0 μ s、繰り返し周波数 200 kHz の両極性パルス電圧を電極間に印加することによって、気泡内にキャビテーションプラズマを生成した。

試作用の樹脂製ノズルは AnkerMake PLA+ フィラメント(V6110221、Anker)を用いて樹脂 3D プリンタ(AnkerMake M5、Anker)によって作製した。また、本番用の金属製ノズルは SUS630 粉末を用いて金属 3D プリンタ(LUMEX Avance-25、松浦製作所)によって作製した。積層条件はレーザー出力 500 W、スキージング厚を 0.05 mm とした。

3 研究成果

(1)キャビテーション気泡生成量の増加に関する検討

(i) ノズル内部構造の検討 1

樹脂 3D プリンタを用いて様々な形状のノズルを作製し、ノズル内部形状がプラズマ発生率に及ぼす影響を評価した。図 1 にプラズマ発生率の螺旋流路回転角度依存性を示す。回転角度 0° のときプラズマ発生率は 98 % と最も高く、回転角度の増加に伴い急速に減少し、180° で 10 % まで低下する。しかし、回転角度を増加すると逆にプラズマ発生率は増加し、270° のとき 32 % となる。別途、高速度カメラを用いて電極近傍を観察した結果、回転角度 0° のノズルにおいて、反応室内の気泡量が増加していることが確認された。これらの結果から、回転角度 0° のノズルにおけるプラズマ発生率の増加は、気泡生成量の増加に起因すると考えられる。一方、回転角度増加に伴うプラズマ発生率の低下は、ノズル内部の圧力損失増加による流速の低下が原因である可能性があり、回転角度 180° から 270° に増加した際にプラズマ発生率が上昇する現象は、渦流の中心部に生じる圧力低下が影響していると考えられる。ここには示していないが、回転角度 0° のノズルにおいて、流路数の影響も検討したが流路の出口面積を統一すると 1~4 本の範囲ではプラズマ発生率に影響がないことがわかった。これらの結果から、金属 3D プリンタでは回転角度 0°、流路数 3 本のノズルを製作することに決定した。

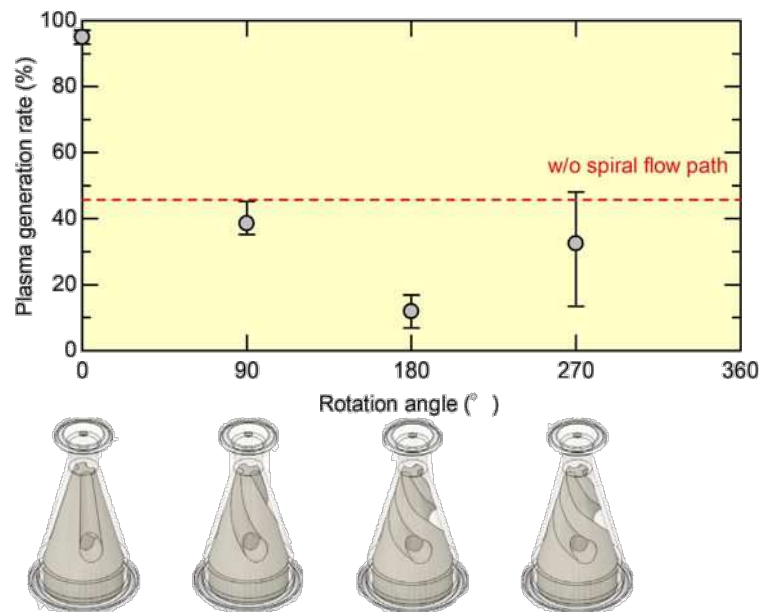


図 1 プラズマ発生率のらせん流路回転角度依存性

(ii) ノズル内部構造の検討 2

キャビテーション気泡生成量をさらに増加させるため、図2に示すように、プラズマ反応室直下の配管にキャビテーション促進体(幅 3.0 mm)を挿入したカートリッジ(促進体設置部内径 6.0 mm)を設置し、促進体の形状がプラズマ発生率に及ぼす影響を小容量型装置を用いて評価した。促進体を設置しない場合のプラズマ発生率が約 18%であるのに対し、円柱、逆三角柱、六角柱の促進体を設置した場合は約 30%となり、約 1.6 倍の改善が見られた。特に、正方形角柱および三角柱の促進体を設置した場合には、プラズマ発生率が約 90%となり、促進体を設置しない場合に比べて約 5 倍に向上した。以上の結果から、流路の上流側に平面を有する正方形角柱または三角柱の促進体を流れ方向に対して垂直に設置することがキャビテーション気泡の生成促進に有効であると考えられる。これらの結果から金属 3D プリンタでは、下部部(出口部)に正方形角柱の促進体を十字に配置したノズルを製作することに決定した。

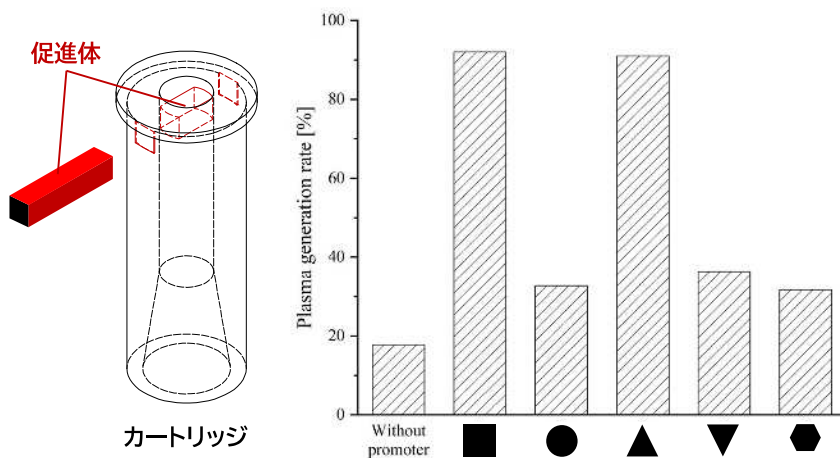


図2 プラズマ発生率の流路内に設置した促進体形状依存性

(iii) 金属 3D プリンタ製ノズルによる評価

ノズル内部構造を検討した結果、高いプラズマ発生率を示した回転角度 0° のノズルおよび正方形角柱の促進体を十字に配置したノズルを、金属 3D プリンタで製作した。図3に製作した金属 3D プリンタ製ノズルを示す。ストレートノズル、回転角度 0° ノズル、十字ノズルを大容量型キャビテーションプラズマ装置に設置して測定したプラズマ発生率はそれぞれ 60%、88%、80%であった。ノズルの内部構造を工夫することによってプラズマ発生率が 30-40% 高くなり、処理効率が改善することが示唆された。



(a)ストレート (b)回転角度 0° (c)十字

図3 金属 3D プリンタ製ノズル

(2)放電電極ギャップ長の調整によるプラズマ発生率の維持

図4にプラズマ発生率の処理時間依存性を示す。ギャップ長調整を実施しない場合($N=0$)、プラズマ発生率は処理開始から5分(処理時間 $t_p=0-5$ min)までは約100%を維持するものの、その後は処理時間の増加に伴い急激に低下し、30分後($t_p=30$ min)には14%、60分後($t_p=60$ min)には7%まで減少する。処理時間増加に伴うプラズマ発生率の低下は、電極消耗によってギャップ長が拡大し、電界強度が低下したことが原因と考えられる。一方、ギャップ長を5回調整した場合($N=5$)は、処理開始から5分まではプラズマ発生率が100%を維持し、その後も緩やかに減少し、10分後($t_p=10$ min)でも96%の高い値を維持する。ギャップ長を調整するたびにプラズマ発生率は100%に戻り、処理開始直後と同様の傾向を示すことから、ギャップ長の調整はプラズマ発生率の維持に有効であることが示唆される。また、ギャップ長調整回数を増やすことで、電界強度が低下する時間を短縮し、より高いプラズマ発生率を維持できることが明らかになった。

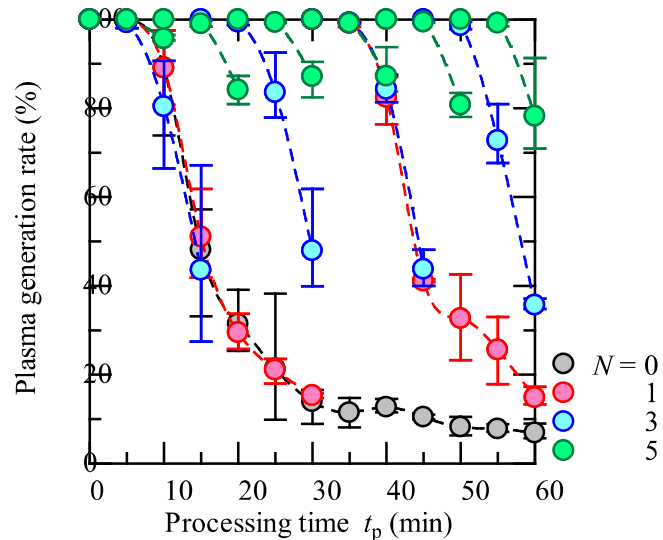


図4 プラズマ発生率の処理時間依存性

(3)抗菌試験

上記の回転角度 0° のノズルおよび正方形角柱の促進体を十字に配置したノズル2種を大容量型キャビテーションプラズマ装置に設置し、銀電極のギャップ長を60 min処理の間に3回調整して農業用殺菌水を作製し、抗菌性能を評価した。いずれのノズルにおいても、対象菌として採用した*Botrytis cinerea*(灰色カビ病)に対して、99.5%以上の生育阻害効果が得られた。

4 生活や産業への貢献および波及効果

キャビテーションプラズマ殺菌水は「高い殺菌効果」および「安心・安全」という従来の殺菌技術にはない特徴を兼ね備えており、総合的有害生物管理(IPM)の革新的な中核技術として貢献できる可能性を秘めている。化学農薬の使用量削減に貢献することはもちろん、残留農薬の問題や環境負荷の低減にもつながる、持続可能な農業の実現に不可欠な技術と言える。本技術の応用範囲は農業分野に留まらず、食品加工における殺菌、院内感染対策、環境浄化、創傷治療など、安心・安全な殺菌が求められる幅広い分野への応用が期待される。本技術を基盤とした大学発スタートアップ「株式会社YSH総合研究所」を2025年3月10日に設立し、キャビテーションプラズマ殺菌水を社会実装にむけて取り組んでいる。