

投げ込み式水中バブル-パルス放電装置の殺菌特性

谷野 孝徳*, 柳沢 美貴*, 大嶋 孝之*¹

(2011年9月12日受付; 2011年12月27日受理)

Investigation of Microbial Inactivation Profile by Submerged Style Pulse Discharge System in Bubble Water

Takanori TANINO,* Miki YANAGISAWA,* Takayuki OHSHIMA*¹,

(Received September 12, 2011; Accepted December 27, 2011)

Inactivation profiles of microorganisms by submerged style pulse discharge system in bubble water were investigated. The survival ratio of 2 L *Escherichia coli* suspension with the cell density of 10^7 viable cells per milliliter was decreased to 1.1×10^{-4} by the pulsed discharge system in bubble water within relatively short time 120 seconds. The discharge plasma frequency increased with air flow rate and gas species used for bubble formation affected on the inactivation efficiency of *E. coli* suspension. Investigation with L-histidin as the radical scavenger demonstrated that radicals generated by the discharge plasma was only one of the important factor of inactivation mechanism. And inactivation efficiency was strongly affected by the initial cell density. The spore of *Bacillus subtilis* was also inactivated by pulsed discharge system in bubble water. Although, inactivation of *B. subtilis* spore required longer treatment time than that of *E. coli*, the survival ratio of 2 L suspension with the cell density of 10^7 viable cells per milliliter was decreased to 2.2×10^{-3} within 60 minutes treatment. And *B. subtilis* spore inactivation efficiency was also strongly affected by the initial cell density.

1. はじめに

近年、水中での放電プラズマ発生技術は水系に含まれる有機物の分解、ならびに微生物の殺菌を可能とする新たな技術の一つとして多岐に渡る分野から注目されている。特に排水処理分野においては、水中での放電プラズマの発生に伴い放電チャンネルから生成される酸化力の高い様々な活性種¹⁻⁶⁾に加え、同時に発生する紫外線、衝撃波を相乗的に利用することで効率の高い AOTs (Advanced Oxidation Technologies)としての利用が注目されている。しかしながら、空気中での絶縁破壊電圧は 30 kV/cm であるのに対し、水中での絶縁破壊電圧は 1 MV/cm 以上とされ非常に高いため、水中で安定した放電プラズマを発生させることは困難である。水中での放電プラズマ発生メカニズムとしてはいくつかの説があるが、高電界による水の分解によって生じるバブルが発生のトリガーとなって放電プラズマが発生しているとするバブル説⁷⁻¹⁰⁾が最も有力視されている。そこで、水中で容易に安定した放電プラズマを発生させるた

めの手法の一つとして、放電発生プラズマ発生トリガーとなるバブルを水中へ積極的に混合する手法が検討されている。筆者らもマイクロバブルを用いて放電プラズマを発生させタンパク質¹¹⁾、界面活性剤¹²⁾の分解においてその有効性を報告している。しかしながら、筆者らの報告を含む多くの研究報告においては電極構造または装置構造が複雑であるため、連続運転ならびにメンテナンスを行うためには多大な労力が必要となってしまう。また、電極構造体あるいは装置内に処理水を循環させる必要がある。

筆者らはこの問題点を解決するための一つの手法として、シンプルな電極構造の作製を試みている。その一例としてアース電極としたらせん状ワイヤーと、その中心を通る高電圧電極としたねじからなる電極に、バブル発生用エアストーンを組み合わせた単純な構造の放電ユニットを作成しこの放電特性を報告している¹³⁾。本放電ユニットはユニット自体を処理対象溶液だまりに「投げ込む」ことが可能であり、処理対象溶液の装置内への輸送の必要がなく *in situ* での AOTs 処理が行えるという利点を有している。本報告では、*in situ* での AOTs 処理と同時に微生物殺菌も可能であると考え、投げ込み式放電ユニットを用いた放電プラズマによる溶液だまり中に含まれる微生物に対する殺菌特性について検討したので報告する。

キーワード：パルス電圧、水中放電プラズマ、殺菌、大腸菌、芽胞

* 群馬大学大学院工学研究科環境プロセス工学専攻 (376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

Department of Chemical and Environmental Engineering, Graduated School of Engineering, Gunma University, 1-5-1, Tenjin-cho, Kiryu city, Gunma, 376-8515, Japan

¹ toshima@cee.gunma-u.ac.jp

2. 実験方法・手順

2.1 高電圧パルス発生装置および放電ユニット

高電圧パルス発生装置は前報^{12,13)}と同じ装置を用い、ピーク電圧 20 kV, 周波数 333Hz にて操作を行った。放電ユニットについても前報で報告したらせん状にした 1 mmφ のステンレスワイヤーをアース電極とし、この中心に高電圧電極とした 3 mmφ のステンレスねじ、直下にエアストーンが配置されるよう 5×5 mm のアクリル角棒で固定することで作製した投げ込み放電ユニット¹³⁾を用いた (図 1)。

2.2 殺液試料の調整

殺菌試験対象として大腸菌 (*Escherichia coli* K-12 株) と枯草菌 (*Bacillus subtilis* NBRC 3007) 芽胞を用いた。大腸菌は LB 培地 (ペプトン 1% (w/v), 酵母エキス 0.5%, NaCl 1%, 寒天培地として用いる場合には上記に加え寒天末 1.5%) を用い 35°C で一晚培養した後、遠心分離 (5,000 ×g, 10 min) により培養液から分離した。枯草菌芽胞は枯草菌を枯草菌用寒天培地 (ペプトン 1%, 酵母エキス 0.2%, MgSO₄ · 7H₂O 0.1%, 寒天末 1.5%) に植菌後、室温にて一週間インキュベートすることで形成させた。芽胞を形成した枯草菌を滅菌蒸留水に懸濁し、90°C で 15 min 処理することで栄養細胞を死滅させたものを枯草菌芽胞として用いた。大腸菌ならびに枯草菌芽胞共に、実験目的ごとに所定の菌体濃度となるよう滅菌蒸留水に再懸濁し、水中放電プラズマ殺菌試験に用いる菌液試料とした。

2.3 放電プラズマによる殺菌試験

100 mmφ × 300 mm のアクリル円筒容器に菌液試料 2 L と投げ込み式放電ユニットを投入し、パルス電界の印加とバブルを発生させるためのエアを吹きこみ放電プラズマを発生させることによる殺菌試験を行った。経時的にサン

リングを行い生理食塩水により適当に希釈した後、大腸菌は LB 寒天培地に、枯草菌孢子は枯草菌用寒天培地に植菌後、37°C で 20 h インキュベートした。寒天プレート上に形成されたコロニー数をカウントすることで生菌数を求め、これを処理前の生菌数で除することで生菌率を求めた。また、放電により発生するラジカルの殺菌への関与を調べるためには、ラジカルスカベンジャーとして L-ヒスチジンを菌液試料中に所定の濃度となるように添加した。

3. 実験結果および考察

3.1 投げ込み式放電ユニットを用いた水中放電プラズマによる大腸菌の殺菌

投げ込み式電極ユニットを用いて水中放電プラズマを発生させた際の電圧・電流波形を図 2 に示す。1 回の放電プラズマで消費されるエネルギーは 0.282J であった。

投げ込み式放電ユニットを用いた水中放電プラズマによる試料だまり中の大腸菌への殺菌効果を確認した (図 3)。試験条件は菌液試料の初発大腸菌濃度 10⁷ viable cells/ml, エア流量 4 L/min にて行った。

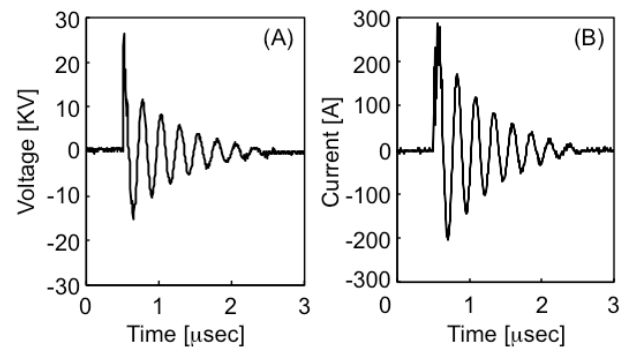


図 2 放電プラズマ発生時の電圧 (A)・電流 (B) 波形
Fig. 2 Voltage (A) and current (B) waveforms of discharged plasma.

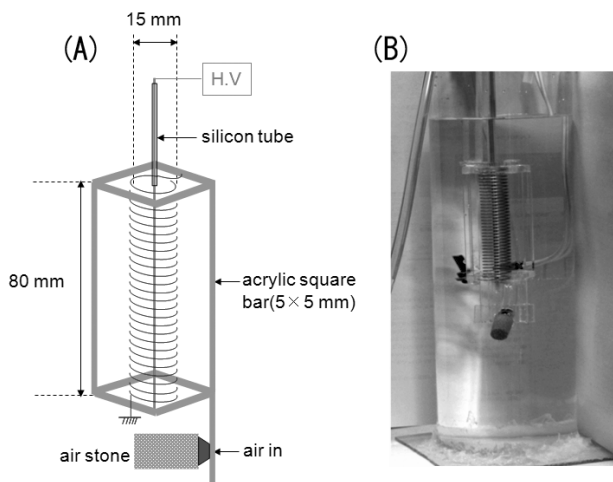


図 1 投げ込み式放電ユニットの概略図 (A) と水中にセットした写真 (B)

Fig. 1 Schematics of submerged style discharge plasma unit (A), and photograph of experimental setup (B).

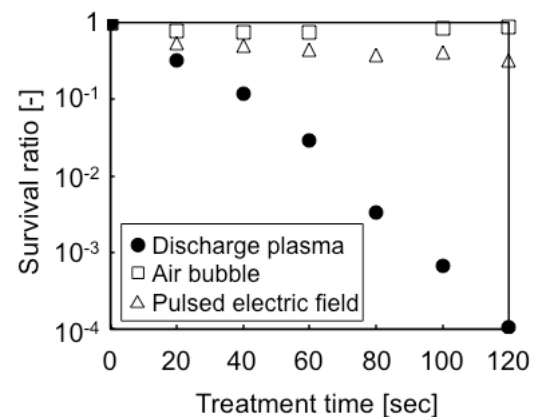


図 3 水中放電プラズマによる大腸菌の殺菌
Fig. 3 Time courses of *E. coli* inactivation by discharged plasma in water.

投げ込み式放電ユニットを用い2 Lの大腸菌試料溶液だまり中で放電プラズマを発生させることで、処理時間の経過と共に菌液試料中の大腸菌生菌数が減少することが確認された。2 Lの容量を有する大腸菌試料溶液に対し120 secの比較的短い処理時間で約4桁の生菌率の減少が確認された。電界を印加せずにエアのみをバブルとして大腸菌試料溶液中に通気した場合には生菌数の減少は確認されなかった。また、エアの通気を行わず電界のみを印加した場合には、わずかながら生菌率の減少が確認された。これは本実験で用いている電源が高電圧パルス発生装置であるため、電極間に生じたパルス状高電界による大腸菌細胞膜の損傷に起因する殺菌効果であると考えられる。以上の結果より、投げ込み式放電ユニットを用い水中で放電プラズマを発生させることによりエアの通気のみ、あるいは電界の印加のみでは得られない比較的短い処理時間で高い殺菌効果が得られることが示された。

3.2 放電プラズマを発生させるためのエア流量が大腸菌の殺菌に与える影響

本研究で用いている投げ込み式放電ユニットにより発生させる水中放電プラズマはバブルの電極への接触をトリガーとして発生し、その放電頻度はエア流量ならびに試料溶液の導電率により変化することが明らかとなっており、発生頻度を近似式にて計算可能であることが示されている¹³⁾。そこでエア流量の変化による水中放電プラズマ発生頻度が大腸菌の殺菌に及ぼす影響を初発大腸菌濃度 10^7 viable cells/mlにて調べた(図4)。この際、パルス周波数は一定であるが、放電頻度はエア流量により異なるため投入エネルギーは厳密には一定ではない。

水中放電プラズマ処理120 sec後の試料だまり中の大腸菌生菌率は、エア流量2 L/minでは 2.2×10^{-2} であったの

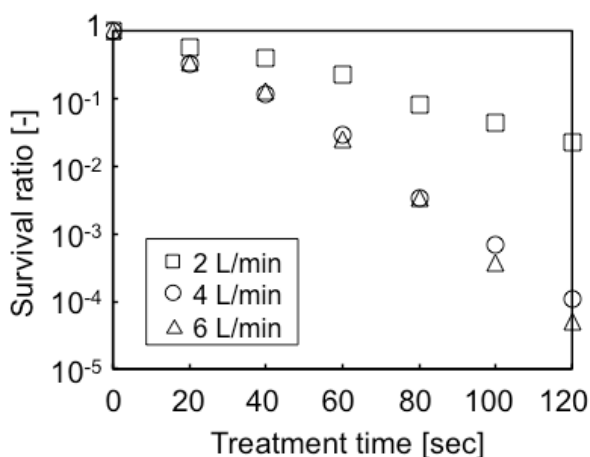


図4 エア流量が大腸菌の殺菌に与える影響
Fig. 4 Effect of air flow rate on time course of *E. coli* inactivation by discharged plasma in water.

に対し、エア流量4 L/minでは 1.1×10^{-4} であり、エア流量の増大に伴い生菌率の減少が確認された。この際、放電頻度はエア流量2, 4 L/minでそれぞれおおよそ50, 150回/sであり、殺菌効果の向上は水中放電プラズマの発生頻度の向上に起因するものと考えられる。しかしながらエア流量6 L/minでは、放電頻度はおおよそ190回/sとエア流量4 L/minの場合に比べ増加しているにもかかわらず、120 min後の大腸菌生菌率は 4.9×10^{-5} とわずかに向上したのみであった。これは前報にてインジゴカルミンおよびアルキルベンゼンスルホン酸ナトリウムの分解を行った場合にも見られた傾向である¹³⁾。大腸菌の殺菌においても処理対象物の電極近傍に発生し処理槽体積と比較して小規模である放電プラズマ反応場への拡散が律速になっていることを示唆している。以上の結果よりエア流量4 L/minとして以降の実験を行った。

3.3 放電プラズマ発生に用いるガス種が大腸菌の殺菌に与える影響

放電プラズマ発生トリガーとなるバブルのガス種が大腸菌の殺菌に及ぼす影響をガス流量4 L/min、初発大腸菌濃度 10^7 viable cells/mlにて調べた(図5)。

バブルのガス種としてアルゴン、酸素を用いることで空気を用いていた場合に比べ殺菌効果の向上が確認された。この理由として、酸素を用いた場合には空気を用いた場合に比べ雰囲気中の酸素分子が増大することでOHラジカルの生成量が増えたためではないかと考えられる。またオゾンの発生量も増えていると考えられ、この殺菌効果も大きいものと考えられる。アルゴンを用いた場合には空気を用いた場合に比べわずかに殺菌効率が上昇している。これは空気や酸素の場合より激しく水中放電プラズマが発生していたため、OHラジカルをはじめとする反応性の高い種々のラジカルや分子の生成量の増加、ならびに放電プラズマ

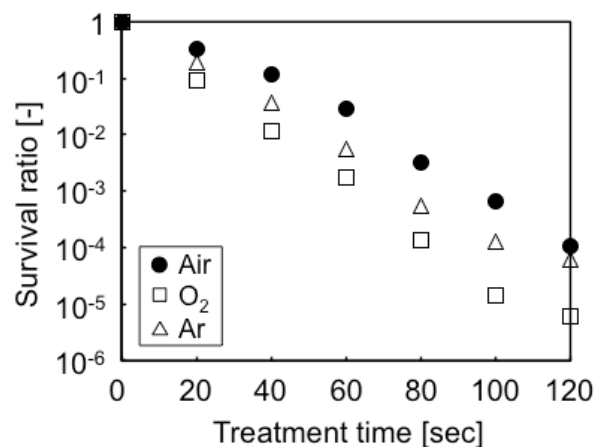


図5 ガス種が大腸菌の殺菌に与える影響
Fig. 5 Effect of gas species on *E. coli* inactivation by discharged plasma in water.

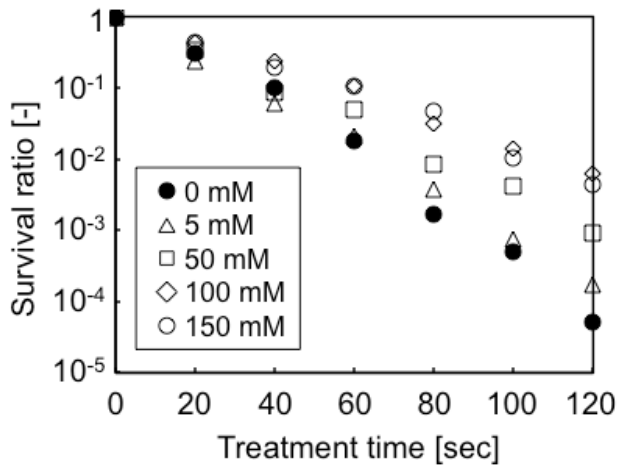


図6 ラジカルスカベンジャーが大腸菌の殺菌に与える影響
Fig. 6 Effect of radical scavenger (L-histidine) on *E. coli* inactivation by discharged plasma in water.

反応場の拡大によりラジカルや分子が大腸菌と接触しやすくなり反応性の増大が生じたためと推測される。

3.4 大腸菌の殺菌におけるラジカルの影響

水中放電プラズマによる大腸菌の殺菌メカニズムにおいてラジカルが大きく関与している可能性が示唆されるため、ラジカルスカベンジャーを用い発生するラジカルをクエンチングすることによる大腸菌殺菌効果の変化を調べた。ラジカルスカベンジャーとして特定のラジカルではなく種々のラジカルへのクエンチング能が期待できるL-ヒスチジンを用いた。初発大腸菌濃度 10^7 viable cells/ml の条件にて、菌液試料中へL-ヒスチジンを様々な濃度となるよう添加し、ガス流量 4 L/min で水中放電プラズマを発生させ 120 sec の処理を行った (図6)。

L-ヒスチジンを菌液試料中に加えることにより大腸菌の殺菌効果の減少が確認された。この時、L-ヒスチジンを加えることによる菌液試料の導電率変化は微小であり、硫酸アンモニウムを用いて同じ導電率に調整した場合には殺菌効果の減少は確認されなかった (data not shown)。L-ヒスチジン添加量の増加に伴い大腸菌の殺菌効果の減少が確認され、L-ヒスチジンにより放電プラズマによって発生するラジカルがクエンチングされることで殺菌効果が減少していることが示された。各ヒスチジン濃度を添加した試料菌液における大腸菌の死滅速度定数を式 (1) を用い求めた。

$$K = -\frac{1}{t} \ln \frac{N}{N_0} \quad (1)$$

ここで N_0 : 初発生菌数, N : 処理後の生菌数, t : 処理時間である。L-ヒスチジン濃度 0, 5, 50, 100, 150 mM において死滅速度定数はそれぞれ 7.7×10^{-2} , 7.1×10^{-2} , 5.8×10^{-2} ,

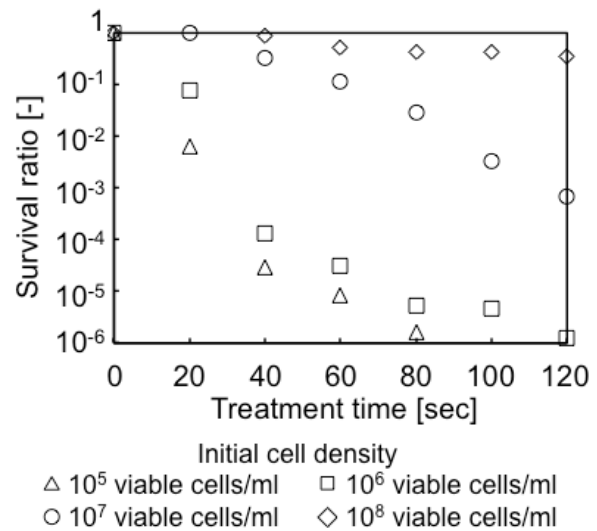


図7 初発大腸菌濃度が大腸菌の殺菌に与える影響
Fig. 7 Effect of initial cell concentration on *E. coli* inactivation by discharged plasma in water.

4.2×10^{-2} , 4.5×10^{-2} /sec であり、死滅速度定数の面からも殺菌効率が減少していることが確認された。

またL-ヒスチジン濃度が 100–150 mM 付近で熱死滅速度定数の低下は頭打ちとなっていることがわかり、全てのラジカルが大腸菌と反応する前にL-ヒスチジンにクエンチングされるものとは考えられないことを考慮すると、ラジカルの関与による殺菌の割合は最低 42%程度である。これらの結果から水中放電プラズマで発生するラジカルは殺菌において重要な役割を果たしているが、ラジカルが殺菌メカニズムの全てではないことが示された。

3.5 大腸菌の殺菌における初発大腸菌濃度の影響

菌液試料中の初発大腸菌濃度が水中放電プラズマによる殺菌に及ぼす影響を調べるため、初発大腸菌濃度が 10^5 , 10^6 , 10^7 , 10^8 viable cells/ml となるように菌液試料を調整し、放電プラズマ処理を行った (図7)。

この際導電率の変化は微小であり放電頻度の変化は確認されなかったが、初発菌体濃度の違いにより殺菌効率に大きな違いが確認された。初発大腸菌濃度が低い場合では高い殺菌効率が確認されたが、初発大腸菌濃度が高い場合では殺菌効率は低くなった。具体的には、初発大腸菌濃度 10^5 では 100 sec 処理後には大腸菌の生存は確認されず滅菌されたものと考えられ、 10^6 では 120 sec 処理後には大腸菌の生菌率は 2.5×10^{-6} であった。一方で初発大腸菌濃度が 10^8 の場合では殺菌効率の著しい低下が確認され、120 sec 処理後の大腸菌生菌率は 3.5×10^{-1} となり一桁の殺菌も確認されなかった。これらを (1) 式を用いて求めた熱死滅速度定数で表すと初発大腸菌濃度 10^5 , 10^6 , 10^7 , 10^8 においてそ

れぞれ 1.7×10^{-1} , 1.1×10^{-1} , 7.7×10^{-2} , $8.7 \times 10^{-3}/\text{sec}$ と明確に死滅速度が減少していることがわかる. 以上の結果より水中放電プラズマを用いた殺菌では初発大腸菌濃度が殺菌効率に大きな影響を及ぼし, 初発大腸菌濃度の上昇に伴い殺菌効率は低下してしまうことが明らかとなった.

水中放電プラズマによる殺菌メカニズムとして考えられる一つの可能性としては, 放電プラズマ反応場に存在する大腸菌が加熱殺菌と同様に一定の割合で殺菌される可能性である. しかしながら, 上記に示したように初発大腸菌濃度に依存して殺菌効率に変化が生じていることから, このメカニズムに従い殺菌されている可能性は否定される. つまり従来の加熱殺菌とは異なる説明が必要となる.

殺菌メカニズムとして考えられる別の可能性としては一度の放電で一定数の殺菌効果を有するファクターが発生し, その発生数に依存した殺菌がなされている可能性である. この可能性は最も現実的であると考えられるが, 図8に示すように初発大腸菌濃度によらず死菌数は一定というわけではなく単純にこの可能性を当てはめることは出来ない. 殺菌効果を有するファクターとしては酸化力の高いラジカル, 紫外線, 衝撃波を挙げることができる. これらのファクターと大腸菌とのアクセシビリティを考慮した大腸菌殺菌メカニズムの構築が必要となる. 言い換えるならば, 水中における酸化力の高いラジカルについてはその寿命を, 紫外線・衝撃波については伝達に伴う減衰とシャドウエフェクトを大腸菌の流動状態・拡散と組み合わせたシミュレーションモデルを *in silico* にて構築し, 本報告で示す実際の実験データとの照合により優位性を立証することではじめてメカニズムの解明が可能になる. 現時点で本システム

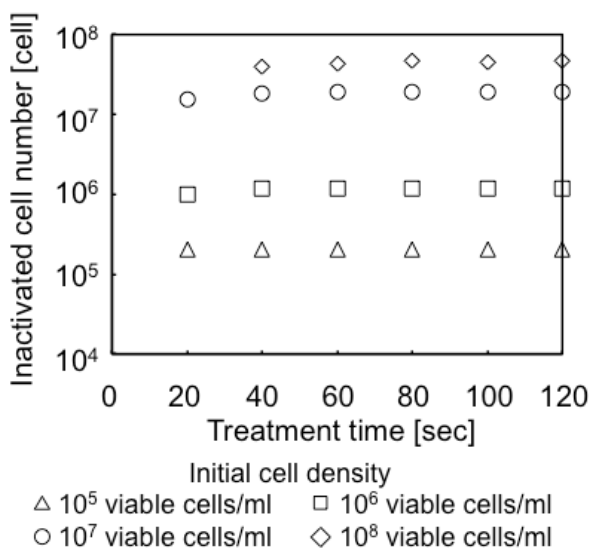


図8 各初発大腸菌濃度における大腸菌の死菌数
Fig. 8 Time course of total inactivated cell number in *E. coli* inactivation by discharged plasma in water.

における殺菌メカニズムは確定できないが, 本研究でこれまでに示してきた実験データは上記メカニズム解析において非常に有益な情報となるものと考えられる.

3.6 投げ込み式放電ユニットを用いた水中放電プラズマによる枯草菌芽胞の殺菌

枯草菌は生育環境の栄養状態不良時に非常に強固な構造を有する芽胞を形成する. 芽胞は栄養細胞に比べ種々のストレスに対し非常に高い耐性を示し¹⁴⁾, 芽胞発芽に関する様々な研究^{15,16)}がなされているがメカニズムは完全には解明されていない. このため枯草菌胞子は殺菌を行うことが最も難しい微生物の一つに挙げられる.

水中放電プラズマにより大腸菌は容易に殺菌可能であったので, 殺菌が難しいとされる枯草菌芽胞に対して殺菌作用を示すことができるかを調べた (図9).

試験条件は菌液試料の初発芽胞濃度 10^7 viable cells/ml, エアー流量 4 L/min にて 2 L の芽胞溶液試料に対し処理を行った. 大腸菌を殺菌対象とした場合とは異なり, エアーを通過しない電界効果のみでは生菌数の減少はほぼ確認されなかった. これは芽胞が強固な細胞構造を有しているため, パルス状高電界による細胞膜損傷に起因した殺菌効果が発現しなかったためであると考えられる. 水中放電プラズマを発生させた場合では, 大腸菌を対象とした場合と異なり殺菌効果を確認するためには分単位の処理時間が必要ではあるが, 処理時間の経過に伴う生菌率の減少が確認された. 具体的には 10^{-2} の殺菌率を達成するために大腸菌ではおよそ 60 sec 必要であったのに対し (図3), 枯草菌芽胞ではおよそ 40 min 必要であった. 枯草菌芽胞殺菌における死滅速度定数は $1.7 \times 10^{-3}/\text{sec}$ であり, 大腸菌殺菌と比べ 45 分の 1 であった. 殺菌に時間を要する原因としては, 芽胞細胞の強固な構造に加え, 芽胞細胞調整時に熱殺菌した栄養細胞の残骸がラジカルスカベンジャー様効果をもたらしていると推測される. 以上の結果より, 投げ込み式放電ユ

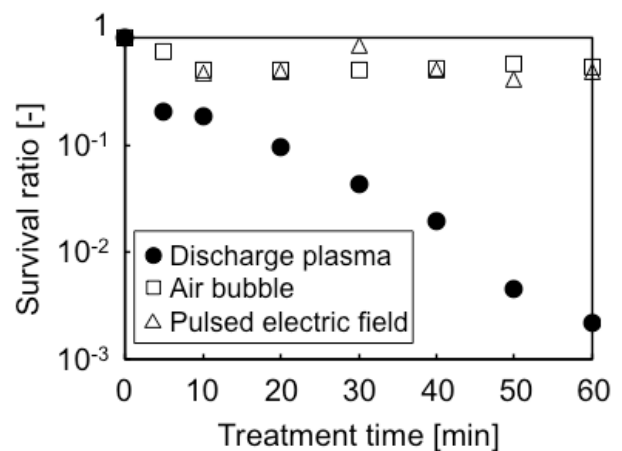


図9 水中放電プラズマによる枯草菌芽胞の殺菌
Fig. 9 Time courses of *B. subtilis* spore inactivation by discharged plasma in water.

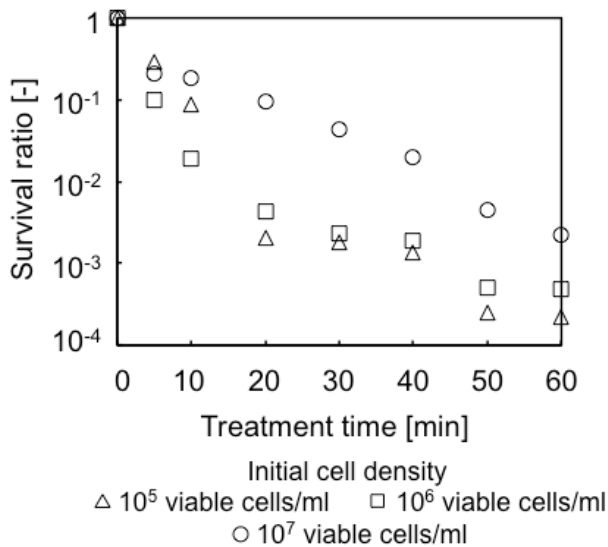


図10 初発芽胞濃度が殺菌に与える影響

Fig. 10 Effect of initial cell concentration on time course of *B. subtilis* spore inactivation by discharged plasma in water.

ユニットを用い水中で放電プラズマを発生させることで枯草菌芽胞も殺菌可能であることが示された。

3.7 枯草菌芽胞の殺菌における初発芽胞濃度の影響

大腸菌を殺菌対象とした場合に確認された初発菌体濃度の殺菌効果に及ぼす影響について、枯草菌芽胞を殺菌対象とした場合についても調べた。初発芽胞濃度が 10^5 , 10^6 , 10^7 viable cells/ml となるように芽胞溶液試料を調整し水中放電プラズマ処理を行った (図10)。

60 min 処理後の生菌率は初発芽胞濃度 10^5 , 10^6 , 10^7 viable cells/ml においてそれぞれ 2.3×10^{-4} , 4.9×10^{-4} , 2.2×10^{-3} であり、枯草菌芽胞を殺菌対象とした場合においても初発芽胞濃度の違いにより殺菌効果の差が確認された。大腸菌を対象とした場合と同様に、メカニズムの解明には種々のファクターの考慮が必要であると推測される。

本研究では投げ込み式放電ユニットを用いた放電プラズマによる AOTs のアプリケーションとして殺菌に使用可能であることを実証した。病原性微生物や医療排水の *in situ* での殺菌へと応用可能であると考えられる。

4. 結言

投げ込み式放電ユニットを用いた *in situ* での試料だまりへの殺菌処理を行い、以下の結果を得た。

- (1) 投げ込み式放電ユニットによる放電プラズマにより大腸菌が殺菌可能であり、比較的短時間で高い殺菌効果が得られた。
- (2) 大腸菌の殺菌効果はエアフロー量に起因した放電頻度、ガス種、初発菌体濃度により影響をうけることがわか

った。これらの中でも初発菌体濃度は殺菌効果に大きな影響を与えることが明らかとなった。

- (3) ラジカルスカベンジャーを用いた実験結果から、ラジカルの関与による大腸菌の殺菌割合は最低 42%程度であった。水中放電プラズマで発生するラジカルは殺菌において重要な役割を果たしているが、ラジカルが殺菌メカニズムの全てではないことが示された。
- (4) 大腸菌に比べ長時間の処理時間が必要となるが、投げ込み式放電ユニットによる放電プラズマにより枯草菌芽胞が殺菌可能であることが示された。また大腸菌の場合と同様に、初発芽胞濃度が殺菌効率に大きな影響を与えることが明らかとなった。

本研究の一部は科学研究費補助金、基盤研究 C (22510082) を受けて行われたものであり、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) M. Sato, T. Ohgiyama and J.S. Clements: IEEE Trans. Ind. Appl., **32** (1996) 3
- 2) B. Sun, M. Sato and J.S. Clements: J. Electrostat., **39** (1997) 189
- 3) B. Sun, M. Sato, A. Harano and J.S. Clements: L. Electrostat., **43** (1998) 115
- 4) M.A. Malik, A. Ghaffar and S.A. Malik: Plasma Sources Sci. Technol., **10** (2001) 82
- 5) P. Sunka, V. Babicky, M. Clupek, P. Lukes, M. Simek, J. Schmidt and M. Cernak: Plasma Sources Sci. Technol., **8** (1999) 258
- 6) P. Bruggeman, L.J. Walsh, C.D. Schram, C. Leys and G.M. Kong: Plasma Sources Sci. Technol., **18** (2009) 045023
- 7) J.F. Kolb, R.P. Joshi, S. Xiao and K.H. Schoenbach: L. Phys. D. Appl. Phys., **41** (2008) 234007
- 8) S. Ghershman, O. Mozgina, A. Belkind, K. Becker and E. Kunhardt: Contrib. Plasma Phys., **47** (2007) 19
- 9) K. Schoenbach, L. Kolb, S. Xiao, S. Katsuki, Y. Minamitani and R. Joshi: Plasma Sources Sci. Technol., **17** (2008) 024010
- 10) L. Quian: L. Apple. Phys., **97** (2005) 113304
- 11) 大嶋孝之, 堀野太希, 柴田義幸, 長谷川優子, 佐藤正之: 静電気学会誌, **33** (2009) 14
- 12) 谷野孝徳, 中村ふみ, 大嶋孝之: 静電気学会誌, **34** (2010) 31
- 13) 大嶋孝之, 谷野孝徳, 成毛由典: 静電気学会誌, **35** (2011) 145
- 14) P. Stelow: J. Apple. Microbiol., **100** (2006) 514
- 15) I.M. Shah, M.H. Laaberki, D.L. Popham and J. Dworkin: Cell, **135** (2008) 486
- 16) M. Paidhungat and P. Setlow: J. Bacteriol., **182** (2000) 2513