

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：33108

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289079

研究課題名(和文)パルス大電力により生成した水中微細泡を活用した微生物および菌類の処理法の開発

研究課題名(英文)Development of inactivation method on zooplankton and bacterium in water using micro bubbles generated by pulsed power

研究代表者

今田 剛 (IMADA, Go)

新潟工科大学・工学部・教授

研究者番号：60262466

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：水中の微生物や菌類のパルス大電力による処理法を開発した。処理に係る微細泡や衝撃波を可視化観測し、泡の直径は約50 μ mで密度0.065個/mm²であり、衝撃波速度は200 μ sを経過するとマッハ1を下回ることなどを解明した。水中微生物(アルテミアの幼生)の処理特性を解明し、800回のパルス大電力印加で98%の不活化に成功した。エネルギー効率は25万個体/kWhである。同様に枯草菌では、100回のパルス大電力印加で97%が不活化され、エネルギー効率は4兆個体/kWhであった。

研究成果の概要(英文)：Inactivation method on zooplankton and bacterium in water has been developed. Micro bubbles and shock wave to inactivate the microorganisms are generated by pulsed power technology. The diameter and number density of the micro bubble are estimated to be 50 μ m and 0.065 mm², respectively. The velocity of the shock wave decreases to Mach number 1 if it propagates in 200 μ s. We found that 98 % of the larva of Artemia as a zooplankton is successfully inactivated by firing 800 injections of the pulsed power into water. The energy efficiency for inactivation reaches 0.25 million larvae a kWh. Bacillus subtilis as a bacterium are also inactivated by firing 100 injections. The inactivation rate and energy efficiency are 97 % and 4 trillion cells a kWh, respectively.

研究分野：電力工学

キーワード：パルスパワー 水中微生物 菌 不活化

1. 研究開始当初の背景

水環境をめぐる課題の一つとして、水中に生存する微生物や菌の不活化処理法の開発が挙げられる。例えば、船舶による到着先港でのバラスト水の廃棄に伴う地球規模の海洋生態系破壊問題では、バラスト水中の微生物(水中生物の幼生や卵、菌など)の不活化が不可欠である。国際条約によりバラスト水中の微生物や菌に関する規制が強化されているが、従来技術の組み合わせや手直しのみでは厳しい規制に対応することは難しく、現状の処理法を補う新たなアイデアが必要である。

さて、短時間パルスではあるが莫大な電力をピンポイントに注入できるパルス大電力技術の特長に基づけば、液体の処理が容易に行えることが想定できる。パルス大電力を水中に印加すると電極間の限られた空間内に高エネルギー密度状態となり水が瞬時に加熱気化され、直径が数十 μm オーダーの微細泡が多量に発生する。これによる衝撃波が微生物や菌類に暴露され、表皮や細胞壁を破壊し不活化させる。特筆すべきは、薬品等は用いずに不活化を達成する点である。また、パルスのエネルギーを注入することより、効率的な不活化が期待できる。

水中に高電界を印加し殺菌に成功した例があるが、本手法は衝撃波を積極的に利用することが大きく異なる点である。高電界印加ではなし得ない動物プランクトンやその卵の表皮をも破壊し不活化に至らしめることが可能であると考えられる。

処理に係るエネルギー効率は、研究代表者による予備的研究では1万匹/kWhにも達しており、これを1~2桁向上できれば、32万トン級以上の超大型タンカーULCC(Ultra Large Crude Carrier)でのバラスト水処理への本処理法の適用が期待でき、処理に係るコストを原油輸送費用のうちの1/100以下に抑えられる。

2. 研究の目的

水中に生存する微生物および菌の新たな処理法として、パルス大電力により水中に生成した微細泡を活用した処理法を開発する。パルス大電力の水中注入に伴う衝撃波や微細泡が破裂する際に発生する衝撃波により微生物や菌の細胞壁が破壊され不活化処理されるものと考えられる。なお、ここで言う不活化とは、その世代を死滅させ、また、次世代の増殖も絶つことを指す。処理のキーポイントとなる微細泡の生成プロセスや発生する衝撃波の振る舞いの詳細を明らかにし、本処理法の基礎条件を把握する。また、種々の条件下において微生物および菌の不活化特性を吟味し、エネルギー効率の高い処理条件を見いだす。

さらに、本処理法の実用化も勘案して、処理装置をスケールアップする際の基本的な知見も得る。薬剤などを使用しない水中の微生物および菌の処理技術の確立を目指す。

3. 研究の方法

(1) 微細泡および衝撃波の可視化観測

水中(真水または食塩水)に設置した電極間(ギャップ長:数mm)にパルス大電力(最大電圧15kV、最大電流0.3kA、パルス幅4 μs 、最大ピーク電力4.5MW、最大エネルギー18J、PFN電源回路で発生)を印加し、微細泡の発生状況および衝撃波の伝播状況を解明する。

バックライト法による泡の挙動の観測

微細泡にバックライト照明を当てることにより泡の輪郭を強調し、それをマイクロSCOPE等にて撮影する。微細泡の数密度、直径分布、空間的な拡がりや拡散速度などを把握する。

シャドウグラフ法による衝撃波の観測

パルス大電力の印加や微細泡の崩壊に伴う衝撃波をシャドウグラフ法により可視化し高速度カメラにより時間分解撮影することにより、放電状態と衝撃波の発生特性の相関関係、および、容器中での衝撃波の伝播特性を把握する。

(2) 処理実験容器の設計製作と高電圧電源の設計製作

微生物および菌の不活化実験に用いる処理実験容器を設計・製作する。容器は放電電極や観測窓などから構成され、微生物および菌類が放流される。また、微細泡および衝撃波を余すことなく利用できる構造とする。

不活化処理に適する電源条件の検討、および、それに基づく高電圧繰り返し電源の設計・製作を進める。上述の研究で得られた微細泡や衝撃波の発生状況などの実験結果を参考に、電源の電圧、電流や繰り返し周波数などの調整範囲を決定する。

(3) 微生物および菌の不活化

微生物の不活化特性

微生物として動物プランクトン(アルテミアの幼生)を処理対象とし、パルス大電力による微細泡および衝撃波の不活化への作用を調べる。アルテミアは節足動物(甲殻類、ミジンコ綱)で生命力が強く、卵は冷凍や乾燥にも耐える。なお、不活化の判定は、幼生の場合はその運動性の有無で判断する。

菌の不活化特性

菌として枯草菌(ATCC 21332)を処理実験の対象とし、パルス大電力による微細泡および衝撃波の作用を調べる。枯草菌は土壌や植物に普遍的に存在し、また、海水中

でも増殖する。この菌は煮沸程度では殺菌できず生命力の高い菌であるが、病原性がなく安全性が高いため、処理対象の菌として採用した。枯草菌を懸濁した処理水中にパルス大電力を加えて不活化を試みる。なお、不活化の判定は、パルス大電力印加の前後における寒天培地に培養された菌数（コロニー数）から判断する。

4. 研究成果

(1) 微細泡および衝撃波の可視化観測

パルス大電力の水中への注入特性

図1はパルス大電力印加時の試験水に注入される電流 I および電極間電圧 V である。パルス高電圧電源としては、既存のPFN方式電源を用いた。 I および V より、試験水に投入される電力 P およびエネルギー E は、それぞれ、 0.84 MW および 0.57 J と算定された。

微細泡の発生特性

図2は微細泡の発生状況を示す。泡が水中に最も広がった際の写真（おおよそ、放電の1~2s後）である。ここで、露光時間は30msである。微細泡の直径は $50 \mu\text{m}$ 程度で、その密度は 0.065 個/mm^2 である。

シャドウグラフ法による衝撃波の観測

図3は水中衝撃波の挙動である。放電開始時を $t = 0$ として各写真の経過時間を表している。衝撃波は電極を中心に同心円状に伝播している。図4は衝撃波の伝播速度（マッハ

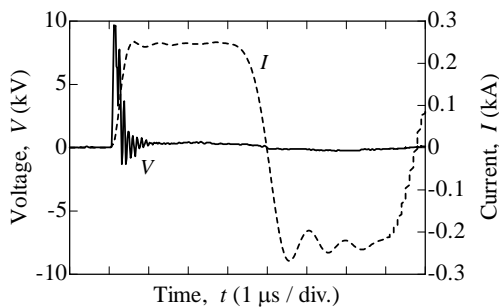


図1 試験水中に注入されたパルス大電力の電流と電圧

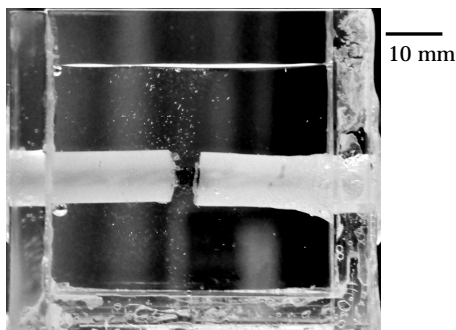


図2 微細泡の発生

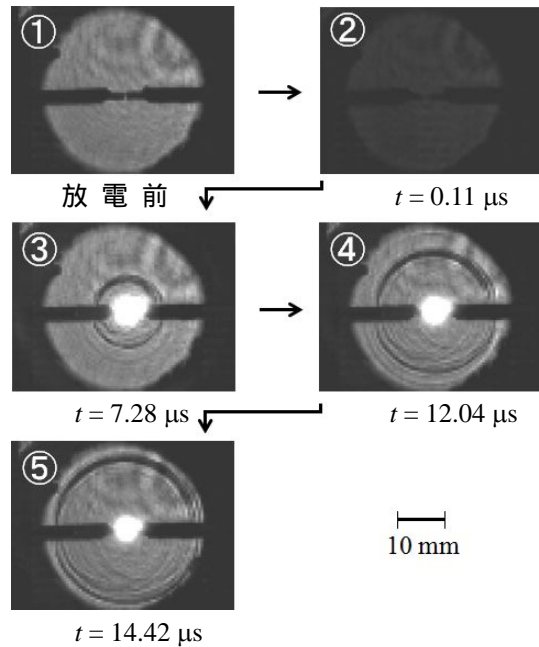


図3 水中衝撃波のシャドウグラフ

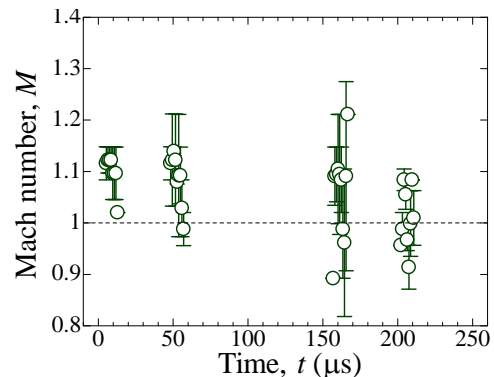


図4 衝撃波の伝播速度の時間推移

数)の時間推移である。時間の経過とともに速度が下がっていき、 $200 \mu\text{s}$ が経過するとマッハ1 (約 1500 m/s)を下回る。また $220 \mu\text{s}$ 以降ではシャドウグラフ画像中に衝撃波は確認できなかった。

(2) 処理実験容器の設計製作と高電圧電源の設計製作

容器中に衝撃波が存在している時間、すなわち、処理に寄与する時間は、約 $200 \mu\text{s}$ であることがわかった。衝撃波の伝播距離に換算する約 30 cm となる。水面や壁面での衝撃波の反射を勘案し、電極から容器底面までの距離が約 10 cm の処理容器を設計製作した。

実験結果によれば、微細泡の寿命は約 1 s であり、また、衝撃波が処理に寄与する時間は約 $200 \mu\text{s}$ と想定される。これらより、微生物または菌の処理において使用する高電圧パルス大電力電源としては、最低限、衝撃

波の寄与が終息してから微細泡の寿命となる時間までに次のパルス大電力を印加する必要がある。そこで、民生用のパルス大電力機器の開発・製作技術も勘案し、パルス繰り返し率が1～10pps (pulse per second) すなわち、パルス印加の時間間隔が100ms～1sの高電圧電源を設計製作した。

(3) 微生物および菌の不活化

微生物の不活化特性

パルス大電力による微細泡を利用した動物プランクトンの不活化特性を吟味するにあたり、以下の2つの対照群(コントロール)についてのアルテミアの幼生の不活化率を検討した。対照群(a): 試験水中に幼生を放流し、不活化実験を行う最長時間2640s (= 3.3s × 800パルス分) 放置した場合。対照群(b): 不活化実験を行う最大パルス回数800回のパルス大電力パワーを印加した試験水に幼生を放流し、不活化実験を行う最長時間2640s 放置した場合。さて、例えば、東京湾内の海水中で $3 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$ 個体/m³ の個体数密度の動物プランクトンが観測された報告がある。これを試験水の容量48cm³に換算すると、試験水中では14～25個体となる。船舶バラスト水処理を念頭におくならば、この程度の個体数を試験水中に放流すべきではあるが、本研究で目的とする微細泡や衝撃波が不活化特性に及ぼす効果を鮮明に検証するため、アルテミアの幼生の放流数は200個体 ± 10%と多くした。実験によれば、対照群(a)では7～8%のアルテミアの幼生が、実験時間中に自然死することがわかった。対照群(b)においては、試験水中へのパルスパワー印加による水質の何らかの変化(例えば水中のCO₂濃度の上昇の可能性など)により不活化が上昇し、9～23%となった。しかるに、不活化率は自然死のそれから10ポイント程度の上昇に留まっており、水質変化による不活化は限定的であると考えられる。

図5はアルテミアの幼生の不活化率のパルス大電力印加積算回数依存性である。微細泡の発生量を増やすため炭酸水素ナトリウム(重曹)を添加した試験水の場合も合わせて示す。不活化率は対照群を超える値となっており、パルス大電力印加の作用による不活化が実証されている。パルス大電力印加の積算回数を増やしていくにしたがい、不活化率は上昇していく。炭酸水素ナトリウム添加の試験水では、800回のパルス大電力印加により、98%ものアルテミアを不活化することに成功した。電源のコンデンサ部の充電エネルギーの800回分の積算値は 8×10^{-4} kWhであるから、不活化に係るエネルギー

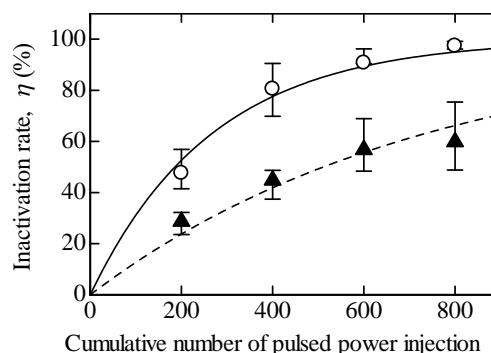


図5 アルテミアの幼生の不活化率のパルス大電力印加積算回数依存性
○:水道水、△:水酸化ナトリウム5.7wt%添加水道水

効率は25万個体/kWhと見積もられる。一方、水道水での不活化率は60%に留まったが、エネルギー効率は15万個体/kWhとなっている。なお、これらの効率は、機械的方式により発生した微細泡による処理のそれ(5.5万個体/kWh)を上まわっており、パルス大電力印加方式の優位性が認められる。

さて、不活化率の上昇の度合いはパルス大電力印加の積算回数が増えると鈍化の傾向にある。パルス大電力印加が積算され不活化が進行するにしたがい生存するアルテミア、言い換えれば不活化対象の個体は減数していくことになる。ここで、パルスパワー印加1回あたりにアルテミアが定率的に不活化されると仮定すると、積算回数が増えるにしたがい不活化される個体数は減少することになる。この特性をモデル化すると、次式により不活化率 η を推定することができる。

$$\eta = \frac{N_0 \{1 - (1 - k)^n\}}{N_0}$$

ここで、 N_0 は試験水中に放流されるアルテミアの総個体数(200個体)、 k はパルス大電力印加1回あたりに不活化される個体数の割合、 n はパルス大電力印加の積算回数である。この式に基づき不活化率の実験値を最小二乗法にて近似した曲線を図5中の実線および破線で示す。近似曲線は実験結果の傾向を適切に表しており、上式によるモデルにてアルテミアの不活化特性を説明できることがわかる。なお、最小二乗法にて算定された k は、炭酸水素ナトリウム添加の試験水では0.37%/回、水道水では0.14%/回であり、本処理法の実応用に際し、設計指標の1つとなる。

菌の不活化特性

図6はパルス大電力の印加前後および対照群における生菌数のパルス大電力印加積算回

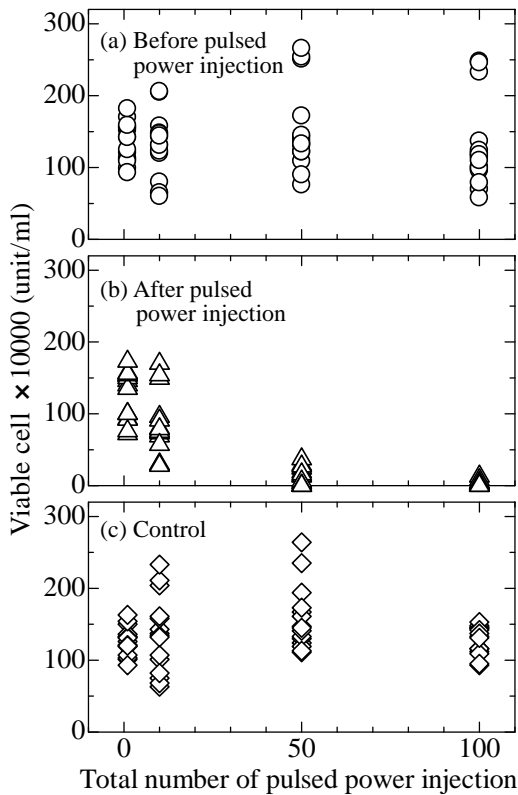


図6 生菌数のパルス大電力印加の積算回数依存性

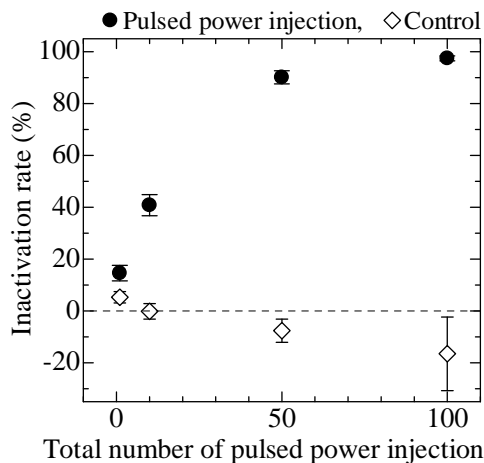


図7 枯草菌の不活化率のパルス大電力印加積算回数依存性

数依存性である。対照群は、周囲環境や経過時間はパルス大電力印加時と同条件とし、パルス大電力を印加しなかった場合の菌数である。パルス大電力印加の積算回数を増やしていくにしたがい、枯草菌の死滅することがわかる。

図7は枯草菌の不活化率のパルス大電力印加積算回数依存性である。100回のパルス大電力印加により、97%もの枯草菌を不活化することに成功した。また、100回相当の対照群では15%程、菌が増殖しており、

パルス大電力印加では、この増殖分も処理されることがわかる。不活化に係るエネルギー効率は 4×10^{12} 個体/kWhと見積もられる。バラスト水管理条約によれば、バラスト水を他海域で排水する場合、菌数を250 CFU/100mL以下としなければならない。例えば、日本の港湾海中には 10^5 個体/mLオーダーの菌類が存在する。これを条約の排出基準に適合させるには、本手法ではバラスト水1tあたり約0.1kWhと僅かなエネルギーのみで処理可能である。例えば、32万t級タンカーを想定するとバラスト水は13万t程度であり、その中の菌類を処理するためには13000kWhの電力量が必要となる。船上に出力30kWの太陽電池パネル(面積は約150m²)を設置し2ヶ月の航海をしたと想定すると、日照時間やパワーコンバータによるロスを考慮しても、少なくとも10000kWh程度の電力量を確保できる。したがって、電源面から見てもバラスト水処理への本手法の適用の可能性が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

今田 剛、水中へのパルスパワー注入による微細胞の生成と動物プランクトン不活化への適用、電気学会論文誌A、135-A(6)、334-340、2015、査読有

〔学会発表〕(計5件)

佐藤将太、金井晃一、竹園 恵、今田 剛、パルスパワー衝撃による水中の菌処理における生菌数と死菌数の計測、平成29年度大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所共同研究形式研究会「パルスパワーおよび高密度プラズマ生成とその応用」、2017

佐藤将太、竹園 恵、今田 剛、パルスパワー処理における水中の枯草菌の不活化特性、第27回電気学会東京支部新潟支所研究発表会、2017

永井健人、石塚裕斗、平井正聡、今田 剛、パルス大電力による水中微生物の不活化における電撃作用の効果、第26回電気学会東京支部新潟支所研究発表会、2016

西巻健一、小林 慧、桑田大輔、今田 剛、パルス大電力を水中に注入した際に発生する微細胞の挙動、第25回電気学会東京支部新潟支所研究発表会、2015

中尾弦基、梅沢弘徳、今田 剛、パルスパワー注入による水中微生物不活化のパルス

印加回数依存性、第24回電気学会東京支部新潟支所研究発表会、2014

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.niit.ac.jp/info/teacher/file/im/imada.pdf>

http://www.niit.ac.jp/ex_sp/laboratory/im_imada.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今田 剛 (IMADA, Go)

新潟工科大学・工学部・教授

研究者番号：60262466

(2) 連携研究者

竹園 恵 (TAKESONO, Satoshi)

新潟工科大学・工学部・教授

研究者番号：20288252