

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560271

研究課題名(和文) 大電流パルスアーク放電の海水殺菌技術への適用性の評価

研究課題名(英文) Development of pulsed-discharge sterilizer of ballast sea water on board

研究代表者

林 則行(HAYASHI NORIYUKI)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：30156450

研究成果の概要(和文): 本研究では海洋環境問題に対して最重要課題のひとつであるバラスト水殺菌処理装置のコアとなる海水殺菌技術について研究を行なった。導電率が非常に高い海水中でパルスアーク放電を安定に、かつ繰り返し発生させることのできるパルス電源の開発を行なった。大規模(大処理容量)で充電エネルギーの大きなモデル試験装置を用いて、海水中における大電流パルスアーク放電の放電電圧や電流の特性、並びにアーク放電で生じる衝撃波の圧力分布特性を実験結果に基づいて明らかにした。さらに、大腸菌を用いた殺菌実験結果と上述の衝撃波圧力分布特性の測定結果に基づいて、パルスアーク放電処理の有効性や欠点を明らかにした。

研究成果の概要(英文): In order to investigate the required information on the development of pulsed-discharge sterilizer of ballast sea water on board, some experimental works were conducted. A pulsed power source that can cause a high-current pulsed-arc discharge in sea water with high conductivity. Characteristics of the arc voltages and currents are illustrated and discussed in terms of experimental parameters such a charging voltage, conductivity of solution, and so on. Spatial distribution of pressures of the shock-wave caused by the arc-discharge is also demonstrated and discussed. Based on the experimental data on the sterilizing experiments of E-coli and pressure distribution mentioned above, both advantage and disadvantage of the electrical sterilizing method are discussed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：高電圧工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：海洋環境，バラスト，海水，殺菌，衝撃波，パルスアーク放電

## 1. 研究開始当初の背景

貨物船や原油タンカーに積載されたバラスト水に混入した貝，プランクトン等の海洋

微生物及び病原体などの細菌類は，バラスト水と共に世界的規模で移動し，本来の生息域以外の海洋でバラスト水と共に排出される。

これらの海洋生物や細菌類が排出先の周辺海域の一部生態系に悪影響を与えたり、漁業被害を与えたりすることが問題視されている（プラスチック問題）。プラスチック問題に対処するため、国際海事機関は2004年に、海洋に排出されるプラスチックに含まれる動植物プランクトン（サイズ10 $\mu$ m以上）や細菌類（病毒性コレラ、大腸菌、腸球菌）の個体数を規定する国際条約（いわゆる「プラスチック管理条約」）を採択し、2009年から段階的な義務付けが始まり2017年までに貨物船全てにプラスチック処理装置を搭載することを義務付けた。

このような状況に対応するために、海洋上で、船舶に積載された装置を用いて、大量の海水が排水パイプ中を流れた状態で微生物や細菌類を殺菌処理するという特殊事情に適用できるようなプラスチック殺菌技術の研究開発が国内外で精力的に行われている。現在、濾過、遠心分離、磁気分離のような物理的除去法、せん断応力やキャビテーションを利用した機械的殺滅法、加熱処理法、化学薬品処理、電気化学処理、UV・ラジカル処理を用いた化学的殺菌法、その他酸素除去法などが提案され、一部は実用化に向けた試験開発が行われているしかし、プラスチック管理条約で規定された排出基準が厳しいため、未だ有効な殺菌技術は確立されておらず、新しい殺菌技術の開発・実用化が課題である。

申請者はこれまでにパルスパワー技術を用いた水中におけるパルス放電の酸化作用や殺菌作用に関連した基礎研究を行っている。このような研究の応用として、海水中のパルスアーク放電で生じた衝撃波の作用で動植物プランクトンや細菌類の非加熱殺菌を行うための基礎技術の開発、並びにその殺菌技術のプラスチック殺菌への適用性の検証に関する研究に取り組んでいる。パルス放電に依る衝撃波は、古くは小容量の静止した食品の非加熱殺菌への適用性が検討され、最近では医学的に胆石の破壊などで応用されている。しかし、本研究で対象としているように、パルスアーク放電に依る衝撃波を、パイプ中を流れた状態のまま大量の海水の殺菌に適用するのは報告例が無い。

## 2. 研究の目的

本研究は、海洋環境問題に対して最重要課題のひとつであるプラスチック殺菌処理装置のコアとなる海水殺菌技術として、海水中における大電流パルスアーク放電で生じる衝撃波の適用性を評価する。そのために、大規模（大処理容量）で充電エネルギーの大きなモデル試験装置を用いて、海水中におけるパルスアーク放電の放電基礎特性、衝撃波の伝搬特性や圧力分布特性、ならびにそれらの相互の関連性を定量的に解明し、殺菌に最適な

放電リアクタの形状、放電条件、衝撃波条件、ならびにパルス電源装置に要求される性能を明らかにする。

## 3. 研究の方法

### (1) パルス放電と衝撃波の発生

図1は実験装置の全体写真である。同図上方にある長さ5m、内径220mmの放電リアクタ内に、図2で示したようなステンレス製の対向電極を設置している。放電リアクタ内は海水または水道水で満たされ、これらの溶液を流水させ、循環させることも可能である。手前左側は衝撃電流発生装置である。



図1 実験装置の外観

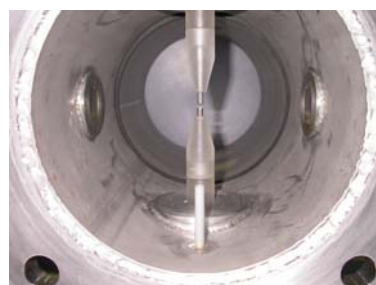


図2 放電電極の外観

図3は衝撃電流発生回路図と衝撃電流電圧・電流の計測回路である。低インダクタンス充電放電用コンデンサ（52 $\mu$ F）にDC充電されたエネルギーはトリガトロンスイッチのON動作とともに放電リアクタ内の電極間に印加され、一定時間経過した後に、電極間でパルスアーク放電が発生する。このとき流れる衝撃電流に伴って衝撃波が発生する。

一連の実験で採用した実験条件を以下に示す。

- 充電コンデンサ容量： $C_0 = 11 \mu\text{F}, 50.3 \mu\text{F}$
- 充電電圧： $V_0 = 2 \sim 7 \text{kV}$
- 充電エネルギー： $W_0 = 20 \sim 1300 \text{J}$
- 溶液：水道水、海水、食塩水
- 溶液導電率： $\sigma = 10 \text{mS} \sim 10 \text{S}$
- ギャップ長： $g = 2 \sim 8 \text{mm}$

- 電極材質：タングステン，他 3 種類

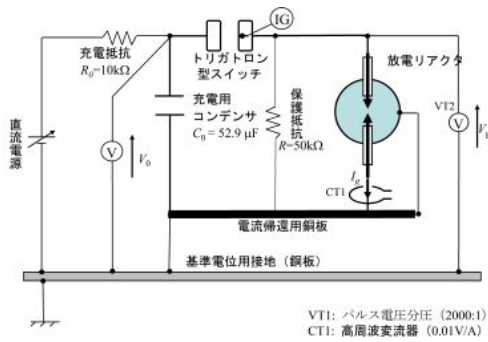


図 3 実験回路：電気的回路

## (2) 衝撃波の分布特性

放電チャンバー内で発生した衝撃波の圧力分布は図 4 に示したような光学系で測定した。衝撃波の伝搬方向に 3 mm 離れた二本のレーザビームの強度をフォトダイオードでモニターしている。衝撃波がビームを通過した瞬間にフォトダイオードの受光強度が低下することを利用して、二本のビーム光の受光強度が低下する時間差から衝撃波の速度を求め、ランキン・ユゴニオの式から両ビーム間の衝撃波の平均圧力を計算した。

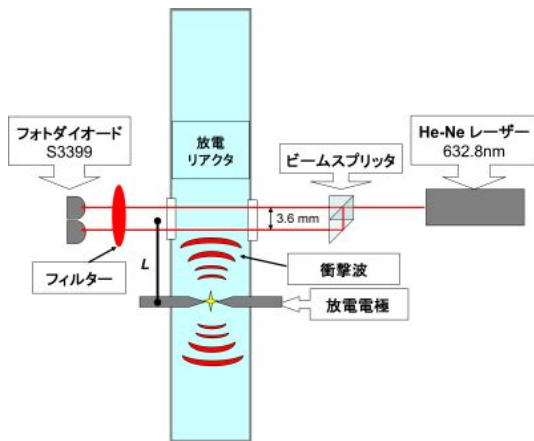


図 4 実験回路：光学的回路

## 4. 研究成果

### (1) パルスアーク放電の電気的特性

#### 典型的な電圧特性・電流特性

典型的な電圧波形と電流波形の時間変化を図 5 に示す。同図は  $\sigma = 3.4 \text{ S}$  (海水を模擬した食塩水),  $g = 2 \text{ mm}$ ,  $V_0 = 4.0 \text{ kV}$  の場合の結果である。

図 5 から、トリガトロンスイッチが ON になってから遅れ時間  $t_d$  経過した後には放電電流が流れ始めていること、及び電圧と電流は共に周期がおよそ  $26 \mu\text{s}$  の減衰振動波形であることが分かる。

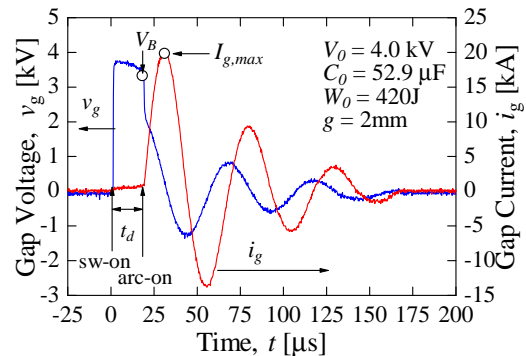


図 5 放電した時の典型的な電圧・電流波形

図 6 から、放電電流の最大値  $I_{g,max}$  は充電用コンデンサの容量に依存せず、充電エネルギーの平方根に比例していることが分かる。3.1 節で述べた実験条件を変えても、減衰振動の周期や減衰率はほとんど変化しなかった。また、電極ギャップ長の変化によるインダクタンスの変化は回路全体のインダクタンスに比べ無視できる大きさである。

放電回路を LRC の直列回路で模擬した場合、今回得られたアーク放電の電気的特性からその値はおよそ  $L = 1.5 \mu\text{H}$ ,  $R = 0.044 \Omega$ ,  $C$  は充電用キャパシタ容量と同じであることがわかった。

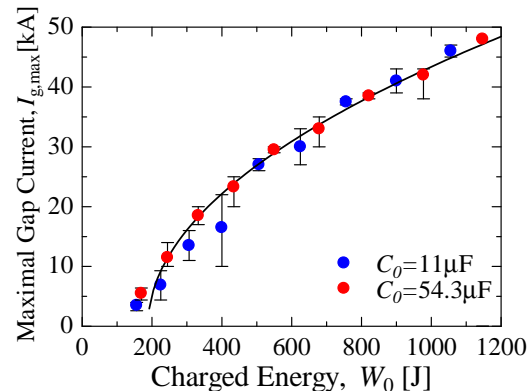


図 6 充電エネルギーとギャップ電流最大値の関係

#### 放電までの遅れ時間

電圧が印加されてから放電電流が流れ始めるまでの時間は溶液の導電率や印加電圧、そしてギャップ長に大きく依存する。

図 7 に導電率を変化させた場合の遅れ時間  $t_d$  の変化を示す。導電率や充電電圧が大き

くなると、漏れ時間は急激に短くなるのが分かる。特に、水道水 ( $\sigma = 10 \text{ mS}$  程度) では遅れ時間が  $\text{ms}$  のオーダーであることが分かる。図には示さないが、ギャップ長が長くなると漏れ時間も急激に大きくなる。

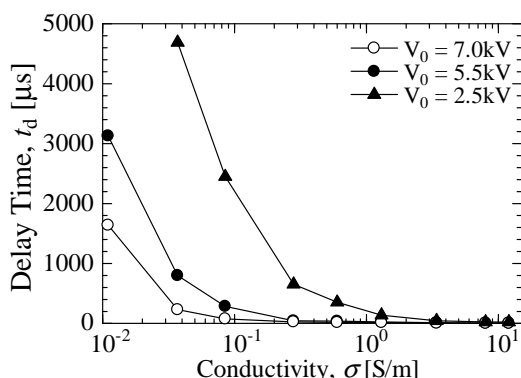


図6 遅れ時間に及ぼす印加電圧や導電率の影響

図5では読み取りが困難であるが、遅れ時間  $t_d$  の間、溶液の導電率に応じた漏れ電流が流れている。この漏れ電流が  $t_d$  の間流れることで発生するジュール加熱によってギャップ中の溶液が加熱され、その一部が沸騰してギャップ中に生じた気泡がある一定の割合に達した時にアーク放電が発生すると仮定すると、上述の漏れ電流の実験条件依存性が説明できることが分かった。

#### 電極の消耗と溶液の着色

電極の消耗割合（放電1回当たりの消耗量）はタングステン、銅タングステン、ステンレス、チタンの順に少ないことが分かった。このとき、タングステンの消耗割合は  $2 \sim 3 \mu\text{m/pulse}$  であった。さらに、実測結果は電極の消耗量が印加電圧の自乗、つまり充電エネルギーに比例することを示した。

図7に示したように、電極の消耗は遅れ時間の増加、そして放電電流の最大値  $I_{g,max}$  の減少となって現れた。しかし、LRC等価回路の電気定数への影響は認められなかった。

電極の消耗によって Ti 電極の場合は青色に着色し、SUS 電極の場合は茶色に着色した。銅・タングステン電極の場合でも着色（薄い青色）は認められたが、目視でかろうじて確認できる程度の着色であった。

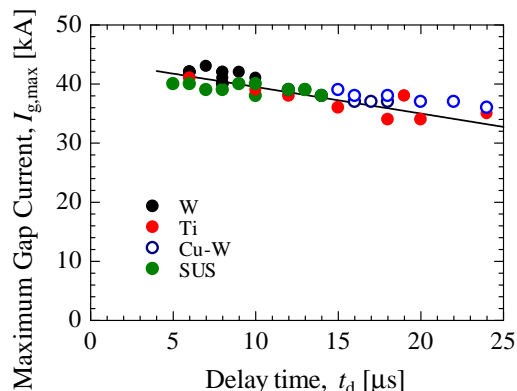


図7 電極材質と  $I_{g,max}-t_d$  特性の関係

## (2) 衝撃波圧力

### 典型的な信号波形

図8は放電電流、二つのフォトダイオードの受光信号の典型的な波形を示している。放電電流が流れ始めてから、ある時間経過後に、先ず放電電極に近い側の受光信号が急激に減少し、それに遅れて遠い方の受光信号が急激に減少し始めていることが分かる。前章で述べたように、二つの受光信号間の時間差から計算する。

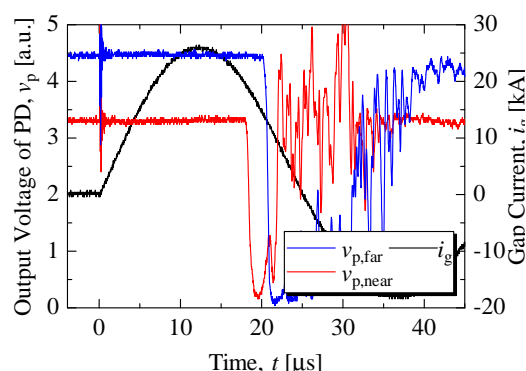


図8 典型的な電流波形と受光信号波形

### 衝撃波分布の印加電圧依存性

図9は充電電圧を変えた場合の圧力分布特性を示している。同図から、衝撃波の圧力は電極の近く数  $\text{mm}$  の地点では  $200 \text{ MPa}$  以上に達するが、放電電極からの距離が離れると急激に減少していることが分かる。殺菌に有効といわれている  $100 \text{ MPa}$  以上の圧力は充電電圧  $5 \text{ kV}$ 、水道水、電極ギャップ長  $2 \text{ mm}$  の条件の場合、電極から約  $10 \text{ mm}$  以内の位置で得られている。

さらに、電極の近傍(図9では  $10 \text{ mm}$  以内)では充電電圧が高いほど、衝撃波圧力も高い

ことが分かる。しかし、遠方では充電電圧の影響はほとんど認められない。

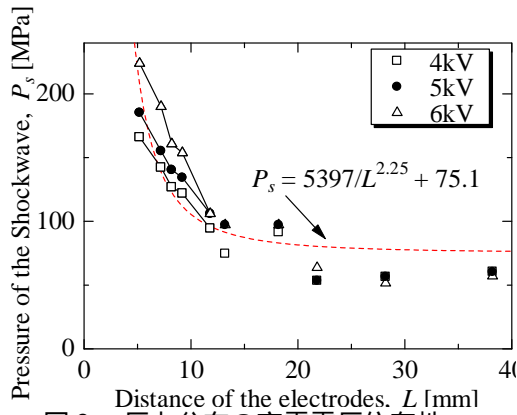


図9 圧力分布の充電電圧依存性

#### 衝撃波分布のギャップ長依存性

図10は圧力分布特性の放電ギャップ長依存性を示している。衝撃波圧力分布特性は電極ギャップ長 $L$ が2mmの時は $L^{-2.25}$ に比例して減衰し、ギャップ長が8mmの時は $L^{-1.5}$ に比例して減衰することが分かる。この減衰割合の違いは、ギャップが短いときには衝撃波面が球面であり、長い場合には円筒面であると仮定することで説明できる。

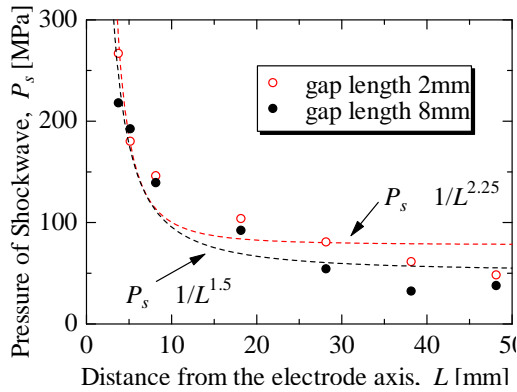


図10 圧力分布のギャップ長依存性

#### その他のパラメータ

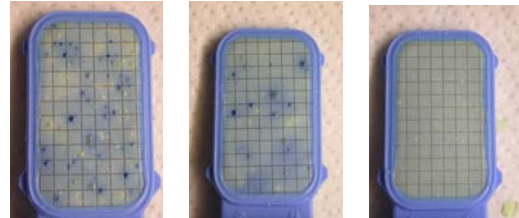
海水と水道水の両方で衝撃波圧力分布を実測したが、実験条件が同じ場合両者の分布特性に顕著な違いは認められなかった。

また、流れの影響を調査するために、秒速約7cm/sの流水の上流と下流で分布特性を実測した。その結果、両者に顕著な違いは認められなかった。

#### (3) 大腸菌の殺菌特性

大腸菌数の計測には、放電条件や回数を変えながら放電リアクタから直接採取した溶液をMILLIPORE社のMICROBIOLOGICAL SAMPLERSを使用して指定された条件で培養し、コロニーを目視で計数する方法を用いた。

図11に培養後のコロニーの一例を示す。



(a) n=0 (b) n=20 (c) n=30

図11 コロニーの様子 (n: 放電回数)

図12は放電を繰り返すことでコロニーの数がどのように減少したかを示している。同図から分かるように、コロニーの数は放電回数と共に指数関数的に減少している。この減少の割合は、充電電圧やチェンバーの長さ、溶液の流れの有無などに依存することが分かっている。

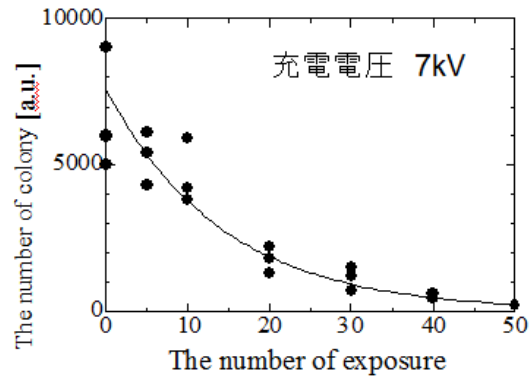


図12 コロニーの数と放電回数の影響

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

- H. Shinozaki and N. Hayashi, Measurement of Pressure Distribution of Shock Wave Generated by a Pulsed Arc Discharge in Water under Various Experimental Conditions, Proceedings of Asian Conference on Electrical Discharge, pp. 1-4 (CD-ROM) (2010).

査読有。

- ・ H. Shinozaki and N. Hayashi, Measurement of Pressure Distribution of Shock Wave Generated by a Pulsed Arc Discharge in Water, Proceedings of 2009 Japan-Korea Joint Symp. on Electrical Discharge and High Voltage Engineering, pp. 226-229 (2009).

査読無。

- ・ W. Imanishi, and N. Hayashi, Measurement and Analysis of Electrical Characteristics of Pulsed Arc Discharge in Conductive Solutions, Proceedings of Asian Conference on Electrical Discharge, pp. 68-71 (2008). 査読有。

〔学会発表〕(計6件)

- ・ 篠崎博文, 林則行, 水中パルスアーク放電で発生する衝撃波圧力分布特性, 電気学会放電/誘電・絶縁材料/高電圧合同研究会, 2011年1月27日, 宮崎市。
- ・ 篠崎博文, 林則行, 海水中におけるパルスアーク放電で発生する衝撃波圧力の測定, 平成22年度電気関係学会九州支部連合大会, 2010年9月25日, 九州産業大学。
- ・ 篠崎博文, 林則行, 水中パルスアーク放電の衝撃波圧力測定系の改良, 平成22年度電気学会全国大会講演論文集, 2010年3月17日, 明治大学。
- ・ 篠崎博文, 今西渉, 林則行, 水中パルス放電で発生する衝撃波圧力の測定, 第62回電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, 2009年9月28日, 九州工業大学。
- ・ 今西 渉, 林 則行, 水中パルスアーク放電の衝撃圧力測定系の構築, 電気学会全国大会, 2009年3月17日, 北海道大学。
- ・ 今西 渉, 林 則行, 高導電率液体中パルスアーク放電における放電電極消耗量, 電気関係学会九州支部連合大会, 2008年9月24日, 大分大学。

〔図書〕(計1件)

- ・ 林則行, 他, 三松株式会社, エレクトロニクス機器設計と電磁波による生体影響, pp. 55-81 (2011)。

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:

出願年月日:  
国内外の別

取得状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://emf.opt.miyazaki-u.ac.jp/hv/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 則行 (HAYASHI NORIYUKI)  
宮崎大学・工学部・教授  
研究者番号: 30156450

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし