

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 24 日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656067

研究課題名（和文） 超磁歪アクチュエータによるパルスパワー生成と
殺菌・ウイルス失活作用の研究研究課題名（英文） Research on generation of pulse power, and sterilization
and inactivation by magnetostrictive actuator

研究代表者

山田 外史 (YAMADA SOTOSHI)

金沢大学・環日本海域環境研究センター・教授

研究者番号：80019786

研究成果の概要（和文）：本研究は、一般的な電磁アクチュエータとは異なる巨大な応力の発生できる超磁歪アクチュエータで構成したキャビテーション発生装置を用い、キャビテーションによるパルスパワー、酸化チタン添加によるラジカル発生による酸化分解作用により、ウイルス・大腸菌を不活性化・殺菌することを目的とした。まず、キャビテーションによるパルスパワーならびにラジカルの発生を検証し、細菌やウイルスの殺菌・不活性化について実験的、定量的に確認した。また、浄化対象液を循環させながら処理する機構を考案し、その装置を用いたウイルス・大腸菌の不活性化・殺菌評価を行った。

研究成果の概要（英文）：Giant magnetostrictive actuators have the potential to produce huge amounts of stress and minute strokes unlike electromagnetic actuators using magnetic excitation. We propose the powerful generation of cavitation in a water medium driven by the actuator. The collapse of cavitation generates a pulse shock wave and also brings about radicals generated by the addition of titanium oxide. The research has demonstrated the generation of cavitation and radicals based on the method of methylene blue testing, and the destructive influence of both viruses and bacteria have been identified. We also observed the biological conditions of the cell to check biological effects after sterilization. We proposed a new apparatus for a cyclical system that is aimed at large capacity, which we evaluated by using qualitative arithmetic.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,400,000	0	2,400,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	270,000	3,570,000

研究分野：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：アクチュエータ, 超磁歪, パルスパワー, ラジカル, 殺菌, 細菌, 不活化, ウイルス

1. 研究開始当初の背景

二酸化チタン光触媒の紫外線に代わって超音波を照射すると高濃度のラジカルが生成する現象が、研究分担者・清水により研究

され、応用特許を取得した。このメカニズムとして、超音波照射の縦波による媒質の断熱圧縮膨張がキャビテーション現象を発生し、微細な気泡（キャビテーター）の崩壊エネルギー（温度換算>10,000K）により二酸化チタンが

励起されラジカルが発生するとされている。

上記の現象から、強力な機械振動により密閉したシリンダー内を断熱減圧することで、キャビテーション現象を生じさせ、このパルスパワーによる衝撃波ならびに二酸化チタンを介したラジカルを発生させることを構想した。その振動源（パルスパワー源）として、申請者らの研究蓄積からその振動源として、超磁歪アクチュエータの応用を着想した。この場合、原理的にシリンダー内の液体媒質全体にキャビテーションが発生するので、大容量のラジカル発生装置が実現でき、従来の光、超音波などによる励起より強力、かつ大容量の薬品を用いないウイルス・細菌等の殺菌処理ができると仮定し、実験装置の製作、殺菌・不活化の実験的検証を試みた。

2. 研究の目的

21世紀の科学技術に課せられた課題「環境問題」の中の生物環境浄化技術について、電力・機械工学技術により細菌・ウイルスの殺菌・失活法の提案を行う。本研究は、超磁歪アクチュエータによるキャビテーションパルスパワー（衝撃波、ラジカル生成）により、バイオ環境の改善を目指す非化学的作用による環境に優しい斬新な技術の開発に向けた研究である。

研究の目的は、パルスパワー発生単体の効果的な装置の検討、ならびにバイオ環境への作用について、細菌・ウイルスを用いた生物学的評価を行い、実用化への検証情報の提供である。本研究は、電気工学、機械工学、生物工学の融合研究であり、申請者らの所属する環日本海域環境研究センターの組織においてのみ実施可能な研究項目で確実に研究計画を実施できる研究拠点である。

研究項目は下記の2点である。

- (1) 超磁歪アクチュエータを駆動源とするラジカル発生装置の開発
- (2) ラジカル発生の評価と細菌・ウイルスの失活の定量的評価

3. 研究の方法

(1) キャビテーションおよびラジカル発生

沸騰現象は、液体の温度上昇により、その温度で決まる蒸気圧が外からの圧力より大きくなることで気泡が発生する。それに対し、キャビテーションは液体の蒸気圧を大きくするのではなく、外からの圧力を減圧することで気泡が発生する。ここで、液体に溶解する気体量が少ない場合、液体の絶対圧力を P 、蒸気圧を P_v とすると、

$$P - P_v \leq 0 \quad (1)$$

を満たせば、液中の気泡核が成長し、キャビ

テーションが発生する。

また、光触媒である二酸化チタン (TiO_2) を添加した液中においてキャビテーションを発生させた場合、二酸化チタンのバンドギャップである 3.2 eV を超えたキャビテーション崩壊エネルギーにより TiO_2 は励起する。これにより、酸化分解力の高いヒドロキシラジカル ($\cdot\text{OH}$) およびスーパーオキサイドアニオン ($\cdot\text{O}_2^-$) が生成する。

(2) キャビテーション発生装置による殺菌メカニズム

これまでの研究から、キャビテーション発生装置駆動による大腸菌・ウイルスの殺菌・不活性化メカニズムの概要を図1に示す。まず、装置上部の超磁歪アクチュエータの振動エネルギーが、接続されたピストンを介し、水槽中の水媒質に伝わることで、キャビテーションが発生する。また、このキャビテーション気泡が崩壊するときに発生する圧力衝撃波により、大腸菌などに物理的ダメージを与える。ここで、キャビテーション崩壊エネルギーにより光触媒である二酸化チタン (TiO_2) が励起することで高い酸化分解力をもつラジカルが発生し、これらが大腸菌などの膜タンパクにダメージを与える。つまり、キャビテーションによる衝撃波、ラジカルによる酸化分解力により、大腸菌・ウイルスを殺菌・不活性化している。

(3) 水循環機構を接続したキャビテーション発生装置

本研究で用いたキャビテーション発生装置の概略図を図2に示す。諸特性を表1に示す。この装置では、装置上部の超磁歪アクチュエータの振動が接続されたピストン・シリンダ機構から水媒質に伝わることで、キャビテーション発生を狙っている。ここで、装置下部の水槽部とピストン・シリンダは密着

表1 キャビテーション発生装置のパラメータ

パラメータ	値
アクチュエータ直径	103 mm
アクチュエータ高さ	192.9 mm
プランジャー材料 (超磁歪)	Terfenol-D
プランジャー形状	20mmφ×120L mm
起磁力	6,000 AT
最大ストローク	120 μm
最大応力	8,300 N 830 kgf
シリンダー内径	160 mm ^φ
シリンダー容量	500 mL
減圧能	4.2×10^5 Pa

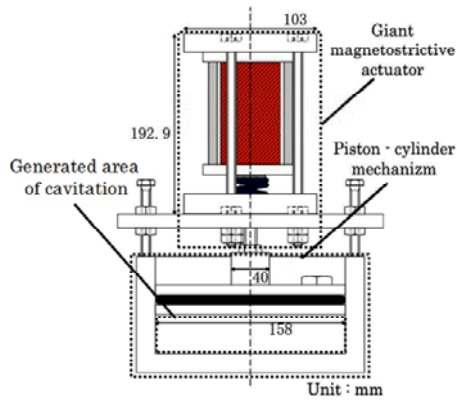


図2 キャビテーション発生装置

しており、超磁歪アクチュエータにより水槽内が真空まで減圧されることでキャビテーションの発生が引き起こされる。密閉環境下での水槽内の圧力変動 $\rho(t)$ は、大気圧を P 、アクチュエータの発生力を f_g 、ピストンの表面積を S とすると、

$$\rho(t) = P - \frac{f_g}{S} \quad (2)$$

となるので、キャビテーションの静的な発生条件は、

$$P - P_v \leq \frac{f_g}{S} \quad (3)$$

である。超磁歪アクチュエータの発生力は8300 N、水槽の内径は160 mmであるので、アクチュエータによる減圧能力は、

$$\frac{f_g \text{ Max}}{S} \approx 4.23 \times 10^5 \text{ Pa} \quad (4)$$

と求まる。ここで、 $P - P_v \approx 1.00 \times 10^5 \text{ Pa}$ であるから(3)式より、キャビテーション発生の条件を満たしている。

本研究で使用した水循環機構を連結したキャビテーション発生装置を図3に示す。この装置は、外部に水槽を設けてあり、これをシリコンチューブとポンプによりキャビテーション発生装置と接続している。ポンプを停止している際、シリコンチューブに取り付けられた逆止弁により水槽内が密閉状態となるため、前述のキャビテーション発生条件から装置水槽内でキャビテーション、ラジカルが発生する。また、ポンプを駆動している間、浄化対象液が循環される。これらポンプのON、OFFを繰り返すことで、浄化対象液を循環させながら、連続的に浄化対象液を処理することを狙っている。ここで、全体の菌量を N 、装置水槽内の菌液の割合を α とし、全体の菌液の濃度が常に均一であるという仮定をした場合、菌の増殖率は、

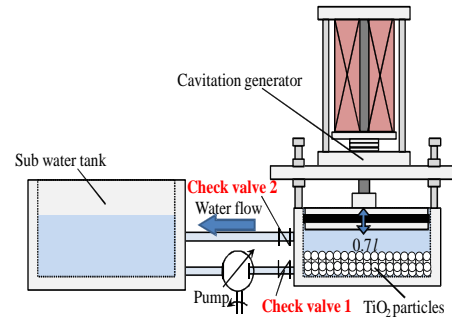


図3 循環型キャビテーション発生装置

$$\frac{dN}{dt} = [-\alpha\lambda_d + (1 - \alpha)\lambda_1] N \quad (5)$$

で表される。ただし、 λ_d は単位時間あたりの大腸菌・ウイルスの減少率、 λ_1 は単位時間あたりの増殖率である。ウイルスは自身で増殖することができず、大腸菌は自身で増殖するため、 λ_1 は大腸菌を殺菌対象とする場合にてくる係数である。

しかし、この装置では前述の装置と異なり、浄化対象液が常にキャビテーション曝露下にあるわけではないため、大腸菌やウイルスの殺菌が行えるか不明である。よって、大腸菌、ウイルスを用いた、殺菌検証実験を行った。

(4) ウイルス不活性化評価実験

浄化対象液を循環させながらキャビテーション発生装置を駆動した場合の、ウイルスの不活性化評価実験を行った。ウイルスとしては、構造が単純であるMS2ファージを用いた。また、ウイルス溶液2.5 l、2 mmΦのTiO₂ 500 gを装置内に充填し、装置駆動条件を励磁電流5 A_{rms}、駆動周波数240 Hzとして、180分間の装置駆動を行った。ここで、装置駆動60分間ごとに、ポンプにより流速2.5 l/minで3分間溶液全体を攪拌し、溶液全体のウイルス濃度が均一になった後、水槽からウイルス溶液500 μlを取り出し、プラークアッセイ法による評価を行った。

(5) 大腸菌殺菌評価実験

浄化対象液を循環させながらキャビテーション発生装置を駆動した場合の、大腸菌の殺菌評価実験を行った。ここで、大腸菌としてはサルモネラ菌などの水系感染性細菌と似た特徴を持つXL1-Blueを用いた。また、大腸菌溶液2.5 l、1 mmΦのTiO₂ 750 gを装置内に充填し、装置駆動条件を励磁電流5 A_{rms}、駆動周波数240 Hzとして、180分間の装置駆動を行った。ここで、装置駆動60分間ごとに、ポンプにより流速2.5 l/minで3分間溶液全体を攪拌し、溶液全体の大腸菌濃度が均一に

なった後、水槽から大腸菌溶液500 μ lを取り出し、コロニーアッセイ法による評価を行った。

4. 研究成果

(1) ウイルス不活性化評価実験結果

浄化対象液を循環させながらキャビテーション発生装置を駆動した場合の、ウイルスの不活性化評価実験結果を図4に示す。結果は装置の駆動開始時間(0分)のプラーク数を1とした相対比で示し、装置による振動印加時と否印加時の結果をそれぞれ示した。振動否印加時もウイルスの数の減少がみられるが、これはウイルスが自身で増殖することができないことや、ポンプによる水圧により不活性化されたことが原因だと考えられる。また、振動印加時には、駆動開始から60分後にプラーク数が装置駆動0分と比べ約59%減少し、さらに駆動時間を延ばすと120, 180分後にはプラーク数が、それぞれ74, 87%減少した。

ここで、(5)式において、キャビテーション発生装置を駆動しない場合の単位時間当たりのウイルスの減少率を λ_{dn} とすると、 $\alpha=1/5$ であるので装置を駆動した場合のウイルス数 M は、

$$\frac{dN}{dt} = [-0.2\lambda_d + \lambda_{dn}]N \quad (6)$$

$$N = \exp[-(0.2\lambda_d + \lambda_{dn})t] \quad (6)'$$

と表される。ここで、図4をみると、指数関数的にウイルス数の減少が見られ、実験により得られた近似関数と(6)式を比較すると、

$$\lambda_d \sim 5 \times 10^{-2} \quad (7)$$

$$\lambda_{dn} \sim 1 \times 10^{-3} \quad (8)$$

と求まった。

(2) 大腸菌殺菌評価実験結果

浄化対象液を循環させながらキャビテーション発生装置を駆動した場合の、大腸菌の

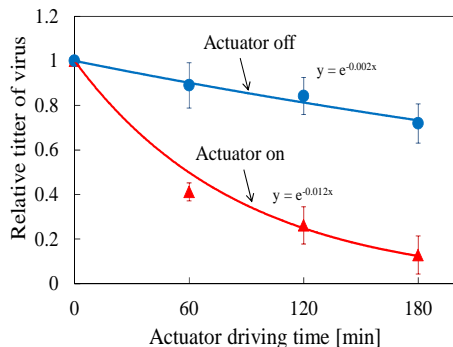


図4 ウイルス不活性化の評価結果

評価実験結果を図5示す。この結果は、横軸をアクチュエータの振動回数としており、装置の駆動開始時間(0分)のコロニー数を1とした相対比で示し、振動印加時と否印加時の結果をそれぞれ示した。また、◆マークでプロットしてあるのは、図2に示す非循環型のキャビテーション発生装置での結果である。ここで、大腸菌はウイルスとは異なり、自身で増殖することができるため、振動否印加において大腸菌数の増加がみられる。また、振動印加時には、駆動開始から60分後に装置駆動0分と比べコロニー数が約18%減少し、さらに駆動時間を延ばすと120, 180分後にはコロニー数がそれぞれ27, 40%減少した。

ここで、(5)式において、 $\alpha=1/5$ であるので大腸菌数 N は、

$$N = \exp[48(-\lambda_d + 4\lambda_i)x] \quad (9)$$

となる。ただし、アクチュエータの振動回数を x とし、駆動周波数が240 Hzであるので $t=240x$ としている。ここで、図5をみると、実験により得られた近似関数と(6), (9)式を比較すると、

$$\lambda_i \sim 4.2 \times 10^{-10} \quad (10)$$

$$\lambda_d \sim 5.8 \times 10^{-9} \quad (11)$$

と求まった。さらに、非循環型の装置での結果に関して、 $\alpha=1$ であるので、これと(11)の値を(5)式に代入すると、

$$N = \exp(-1.4 \times 10^{-6}t) \quad (12)$$

となり、図5の結果と比較して、同じオーダーの結果が得られた。

(3) 自然界の菌類における殺菌評価結果

低周波キャビテーション発生装置の駆動により、自然界の菌類が殺菌可能か検証するため、都市河川の水を用いた検証実験を行った。サンプルの条件と装置の駆動条件は同じく、雑菌による影響を防ぐために透析膜を用いた。そして、コロニーアッセイ法による殺菌評価を行った。

キャビテーション発生装置を用いて行っ

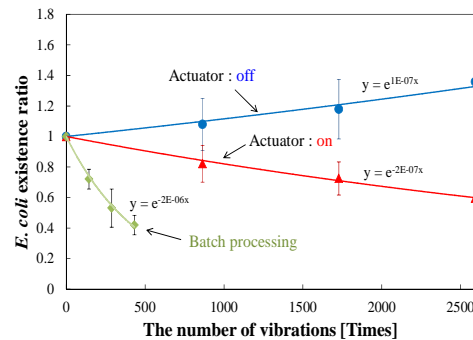


図5 大腸菌殺菌評価

た川の菌類に対する殺菌評価の結果を図 6 に示す。結果は装置駆動 0 分の生菌数を 1 とした相対比で示している。また、振動印加サンプル (E1, E2) に関しては大腸菌を使って同条件で行った結果も載せている。この結果をみると、E2 で 93 % の生菌数の減少がみられたが、E1 では 23 % の減少しかみられなかったため、TiO₂ 励起から発生したラジカルによる殺菌効果が大きい結果となった。さらに大腸菌での結果と比較すると、大腸菌の方で生菌数の割合が大きくなっており、大腸菌の方が川の水に生息する菌類よりもキャビテーション・ラジカルに耐性がある結果となった。つ

(4) 結果のまとめ

本論文では、超磁歪アクチュエータで構成したキャビテーション発生装置を用い、キャビテーションによるパルスパワー、ラジカルによる酸化分解作用により、ウイルス・大腸菌を不活性化・殺菌することを目的とした。そして、浄化対象液を循環させながら処理する機構を考案し、その装置を用いたウイルス・大腸菌の不活性化・殺菌評価を行った。

以下に、結論を列記する。

- (1) 循環型キャビテーション発生装置により、駆動時間に依存したウイルスの存在数の減少がみられ、駆動時間 180 分後には駆動時間 0 分のウイルス数と比べ、87 % のウイルスを不活性化することができた。
- (2) 同様に、大腸菌の生菌数の減少がみられ、駆動時間 180 分後には 40 % の大腸菌を殺菌することができた。
- (3) 浄化対象液をキャビテーション発生装置に循環させることにより、2.5 l のウイルス・大腸菌溶液を処理することができ、非循環型の装置と比べ、浄化対象液の量が 5 倍となってもウイルス・大腸菌の不活性化・殺菌ができた。
- (4) ウイルス・大腸菌の増加率を表す式を導出し、この式と同様にウイルス・大腸菌の存在数が指数関数的に減少することを実験的に確認で

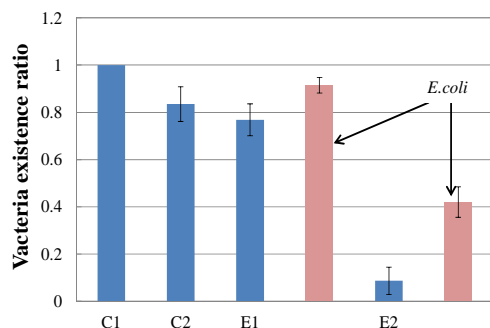


図6 川の菌類に対する殺菌評価の結果
 C1:無作用, C2:酸化チタン添加
 E1:振動印加, E2:酸化チタン+振動印加

きた。

- (5) 大腸菌殺菌効果に関して、TiO₂ 励起から発生するラジカルにより、大腸菌の細胞膜が破壊され、中の DNA, RNA が流出していることを確認できた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① 鈴木 峻, 山田外史, 上野敏幸, 柿川真紀子, 超磁歪アクチュエータ駆動によるキャビテーション作用とウイルスの不活性化, 日本磁気学会学術論文誌, Vol. 19, No. 1, pp. 189-194. 2011.
- ② 鈴木 峻, 中村翔太郎, 上野敏幸, 柿川真紀子, 山田外史, 磁歪振動子を用いたキャビテーション発生とウイルス不活性化, 日本AEM学会論文, Vol. 34, pp. 131-135 2010.

[学会発表] (計8件)

- ① 中村翔太郎, 山田外史, 柿川真紀子, 上野敏幸, 木村繁男, 清水宣明, 超磁歪素子を用いたキャビテーションによる殺菌効果, 平成24年度電気学会全国大会, 平成24年3月22日, 広島工業大学 (広島県)
- ② 中村翔太郎, 山田外史, 柿川真紀子, 超磁歪アクチュエータ駆動による殺菌・不活性化作用, 電気学会マグネティックス研究会, MAG-11-074, 平成23年11月16日, 電力中央研究所 (千葉県)
- ③ 中村翔太郎, 鈴木 峻, 上野敏幸, 柿川真紀子, 山田外史, 超磁歪アクチュエータ駆動によるキャビテーション発生と殺菌効果, 日本磁気学会学術講演会, 平成23年9月27日, 朱鷺メッセ (新潟県)
- ④ 中村翔太郎, 上野敏幸, 鈴木 峻, 柿川真紀子, 山田外史, 超磁歪アクチュエータ駆動によるキャビテーション発生と殺菌への適用, 平成23年度電気学会全国大会, 平成23年3月16日 (震災のため発表は中止)
- ⑤ 中村翔太郎, 鈴木 峻, 池畑芳雄, 上野敏幸, 柿川真紀子, 山田外史, 超磁歪振動子によるキャビテーション発生と殺菌効果, 電気学会マグネティックス研究会, MAG-10-173, 平成22年11月27日, 九州大学 (福岡県)
- ⑥ 中村翔太郎, 鈴木 峻, 上野敏幸, 柿川真紀子, 山田外史, 超磁歪振動子を用いたキャビテーション発生とウイルスの不活性化, 日本 AEM 学会 MAGDA コンファレンス, 平成22年11月22日, 北海道大学 (北海道)
- ⑦ 中村翔太郎, 鈴木 峻, 上野敏幸, 柿川真紀子, 山田外史, 小形磁歪振動子を用いたキャビテーション・ラジカル発生の検討, 平成22年度電気関係学会北陸支部

連合大会，平成22年9月12日，平成22年9月12日，福井工業高等専門学校（福井県）

- ⑧ 鈴木 峻，中村翔太郎，上野敏幸，柿川真紀子，山田外史，超磁歪アクチュエータ駆動によるキャビテーション発生とウイルスの不活性化，平成22年度電気関係学会北陸支部連合大会，平成22年9月12日，福井工業高等専門学校（福井県）

〔その他〕

ホームページ等

<http://magcap.w3.kanazawa-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 外史 (YAMADA SOTOSHI)
金沢大学・環日本海域環境研究センター・教授
研究者番号：80019786

(2) 研究分担者

木村 繁男 (KIMURA SHIGEO)
金沢大学・環日本海域環境研究センター・教授
研究者番号：70272953

清水 宣明 (SHIMIZUMOBUAKI)
金沢大学・環日本海域環境研究センター・教授
研究者番号：50019634

上野 敏幸 (UENO TOSHIYUKI)
金沢大学・電子情報学系・准教授
研究者番号：30338256

柿川 真紀子 (KAKIKAWA MAKIKO)
金沢大学・環日本海域環境研究センター・助教
研究者番号：10359713