

超磁歪動子を用いたキャピテーション発生とウイルスの不活性化

著者	鈴木 峻, 中村 翔太郎, 上野 敏幸, 柿川 真紀子, 山田 外史
著者別表示	Ueno Toshiyuki, Kakikawa Makiko, Yamada Sotoshi
雑誌名	日本AEM学会誌
巻	19
号	2
ページ	189-194
発行年	2011
URL	http://doi.org/10.24517/00049213



日本AEM学会誌

Journal of the Japan Society
of
Applied Electromagnetics and Mechanics

別 刷

Volume 19 Number 2

(平成23年6月)

日本AEM学会

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

Generation of Cavitation by Using Magnetostrictive Vibrator and Inactivation of Virus

鈴木 峻^{*1}, 中村 翔太郎^{*1}, 上野 敏幸 (正員) ^{*1}, 柿川 真紀子 (正員) ^{*1}, 山田 外史^{*1} (正員)

T. SUZUKI, S. NAKAMURA, T. UENO (Mem), M.KAKIKAWA (Mem), S.YAMADA(Mem)

It is well-known that the ultrasound creates micro-air bubbles as cavitation, and the collapse of the bubble contributes to the generation of a shock wave, heat, and radicals before. We examine that the adiabatic expansion phenomenon by two type apparatus with magnetostrictive element creates an aggressive and effective cavitation in an aquatic medium and the inactivation of a virus is discussed by bio-medical techniques. The experimental results denote that the inactivation occurred due to the pulse power of cavitation phenomena.

Keywords: magnetostrictive device, cavitation, pulse power, water purification, virus, inactivation.

1 はじめに

キャビテーションとは、水を短時間に断熱膨張した場合に飽和蒸気圧以下の圧力状態で無数の小さな気泡が発生し、気泡が崩壊する現象である。この無数の気泡が崩壊したとき、微小空間に大きな圧力衝撃波や相当する熱が生じる。これは、気泡が崩壊することによってできた空洞に気泡周囲の水が殺到し、衝突・分散するためである。このとき、瞬間的に発生する圧力衝撃波は、1 GPa, 10,000 Kに達するエネルギーのパルスパワーに相当する。また、二酸化チタン(TiO₂) 粒子を水媒質に添加すると、キャビテーションによる崩壊エネルギーによってTiO₂が励起し、強力な酸化分解力を示すラジカルが生成する。これは、紫外線による光触媒と同様の現象である。ラジカルは周囲の有機物を高効率で分解し、その反応性の強さから細菌滅菌をはじめとした環境浄化分野での応用が進んでいる[1,2]。

本研究は、水質浄化を視野に入れた研究としてキャビテーションの発生から水質汚濁の主要因となる有害微生物を滅菌・浄化することを目的としている。キャビテーションを発生させる装置としては、閉空間または開空間にキャビテーションを発生させる2種のキャビテーション発生装置を考案し用いた。閉空間にキャビテーションを発生させる装置としては、超磁歪素子 Terfenol-D を搭載した超磁歪アクチュエータ (Giant

magnetostrictive actuator : GMA) を利用した機構を用い、開空間においては、近年開発された鉄系の超磁歪素子 Galfenol[3,4] を利用した機構を考案した。GMA は高出力と高速応答が特徴であり、接続されたピストンに振動を伝えることで水媒質を封入した閉空間に断熱膨張を起し、キャビテーションを発生させ、キャビテーション崩壊エネルギーから圧力衝撃波、また TiO₂ の励起によりラジカルを発生させることができる[5]。また、これまでの検証により、閉空間型キャビテーション発生装置の駆動により、TiO₂ 粒子を添加した水媒質にキャビテーションを発生させ、圧力衝撃波、ラジカルの酸化分解作用から大腸菌・ウイルスを滅菌・不活性化できることが明らかになった[6]。また Galfenol は、2000 年に米国海軍研究所で開発された鉄ガリウム合金であり、延性材料であることから加工が容易で、透磁率が 50 と比較的高いため、容易に磁化できる。この Galfenol を小片に加工し振動子として開空間で高周波振動させることにより、水中に負圧部分を作り出しキャビテーションを発生させる。

本論文では、閉空間および開空間にキャビテーションを発生させる2種の装置におけるそれぞれの微生物の滅菌能力について評価したので報告する。閉空間および開空間型のキャビテーション発生装置の駆動でメチレンブルー脱色実験を行うことにより、ラジカル生成量の評価を行い、両キャビテーション発生装置の微生物滅菌能力の評価を行った。さらに微生物滅菌評価として、閉空間型キャビテーション発生装置を用いて電気泳動法によるウイルスのコートタンパクの損傷評価を行った。

連絡先：山田外史，〒920-1192 石川県金沢市角間町，金沢大学環日本海域環境研究センター

e-mail: yamada@magstar.ec.t.kanazawa-u.ac.jp

^{*1}金沢大学環日本海域環境研究センター

2 キャビテーション発生装置および滅菌能力の評価方法

2.1 キャビテーションおよびラジカルの発生

キャビテーションは、外圧が液体の蒸気圧より低くなると、液体は蒸発しキャビテーションが発生する。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、液体中に存在する気泡核が徐々に気泡に成長し、キャビテーションが発生する。

また、 TiO_2 を含有した水媒質中にキャビテーションを発生させると、 TiO_2 のバンドギャップ 3.2 eV を超えるキャビテーション崩壊エネルギーによりチタンは励起し、ヒドロキシルラジカル ($\cdot\text{OH}$) およびスーパーオキサイドアニオン ($\cdot\text{O}_2^-$) が発生する [5]。

2.2 磁歪振動子を用いたキャビテーション発生装置

2.2.1 閉空間型キャビテーション発生装置

閉空間型キャビテーション発生装置の概形を Fig. 1、諸特性を Table 1 に示す。また、GMA の電流-変位特性を Fig. 2 に示す。キャビテーション発生装置は励磁コイルによる交流磁界により円柱状の超磁歪素子 Terfenol-D を伸縮させている。キャビテーション発生装置では、装置上部の GMA を励磁コイルによる交流磁界によって励磁することで内部の超磁歪素子 Terfenol-D が伸縮し、その振動は直結したピストン・シリンダーに伝わる。装置下部の水槽とピストンは密着しており、GMA の振動によって水槽内の水媒質が断熱圧力変化し、キャビテーションが発生する。水槽内の圧力 $P(t)$ は、

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

P : 大気圧 f_g : GMA 発生力 S : ピストン断面積となるから、キャビテーションの静的な発生条件は、(1)式より、

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

である。GMA 最大発生力 8,300 N、ピストン径 160 mm ϕ より、

$$\frac{f_{g \text{ Max}}}{S} \approx 4.1 \times 10^5 \text{ Pa} \quad (4)$$

と求まる。ここで、

$$P - P_v \approx 1.00 \times 10^5 \text{ Pa} \quad (5)$$

であるから(3)式の条件を満たし、水槽内にキャビテーションが発生する。

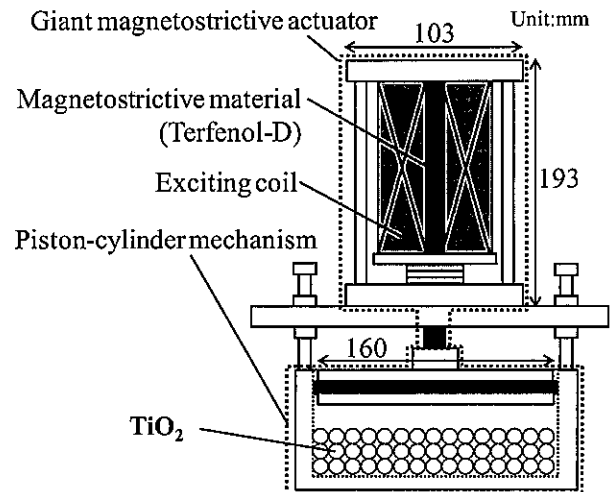


Fig. 1 Close type cavitation generator with GMA and piston-cylinder mechanism.

Table 1 Parameters of close type cavitation generator.

Parameter	Value
Actuator diameter	103 mm
Actuator height	192.9 mm
Plunger material	Terfenol-D
Size of plunger	20 mm ϕ × 120 L mm
Exciting coil	1,200 turns
Magneto motive force	6,000 AT
Maximum stroke	120 μm
Maximum force	8,300 N
Cylinder inside diameter	160 mm ϕ
Water tank capacity	500 ml

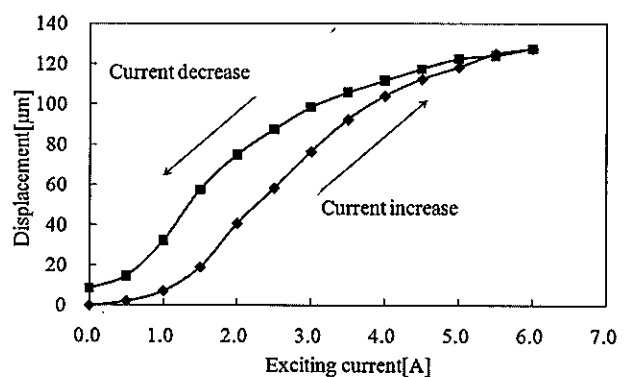


Fig. 2 Current vs. displacement response of GMA.

2.2.2 開空間型のキャビテーション発生装置

前項の閉空間型キャビテーション発生装置では数十Hzという比較的low周波数でのキャビテーション発生が可能であるが、キャビテーション発生には密閉空間が必要であり、浄化の対象物を密閉空間に置く必要がある。そこで、開空間でもキャビテーションを発生させる装置を考案した。開空間型キャビテーション発生装置の概形をFig. 3に示す。振動子として、1.0 mm角、10 mm長の磁歪振動子(Galfenol : $Fe_{81.6}Ga_{18.4}$)を用いた。振動子の両端にバイアス磁石(ネオジウム磁石)を接着することで、Fig. 4のように振動子の電流-変位特性の線形領域のみ利用し、効率よく振動子を振動させられるようにしている。

コイルに電流を印加すると、コイルからの交流磁界によって振動子が振動する。その振動によって水中に圧力分布が生じ、圧力が負圧となったところでキャビテーションが発生する。ここで、どのような周波数でもキャビテーションが発生するわけではなく、周波数に応じて必要なエネルギーを水に与える必要があり、周波数20 kHzで振動子を振動させる場合、約0.3 W/cm²でのエネルギーを水に伝搬させる必要がある。ここで、振動子から水に伝搬するエネルギーを振動子が水に及ぼす力積と考え、水の音強度 W は、

$$W = \frac{1}{2S} F_{max} X \omega \quad (6)$$

として計算を行った。ここで、 S は振動体の断面積、 F_{max} は最大発生力、 X は振動子の振幅、 ω は振動角周波数である。水中において周波数20 kHzで振動子を振動させた場合の各パラメータをTable 2に示す。Table 2のパラメータを用いると式(6)から水の音強度 W は約12.7 W/cm²となり、キャビテーション発生条件を十分満たす。

2.3 キャビテーション発生装置の滅菌能力の評価方法

2.3.1 メチレンブルーの脱色実験

メチレンブルー脱色実験を行うことにより、ラジカル生成量の評価を行い、閉空間、開空間型の両キャビテーション発生装置の微生物滅菌能力の評価を行った。

反応性の高い $\cdot OH$ は存在時間が約10 nsと非常に短寿命なため、メチレンブルー(Methylene blue : MB)の還元反応によって間接的定量を行う。Fig. 5のように通常青色を示すMB溶液は、還元することで無

色透明のロイコメチレンブルー溶液に変化する。このことより、キャビテーション装置駆動前後の吸光度を比較することによってラジカル生成量を評価することが可能である。

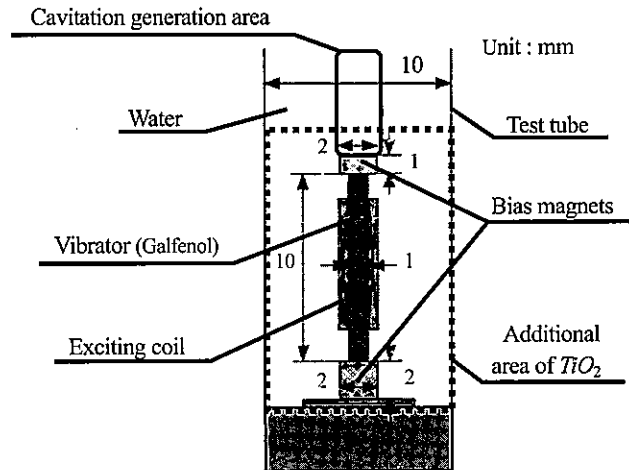


Fig. 3 Open type cavitation generator with Galfenol.

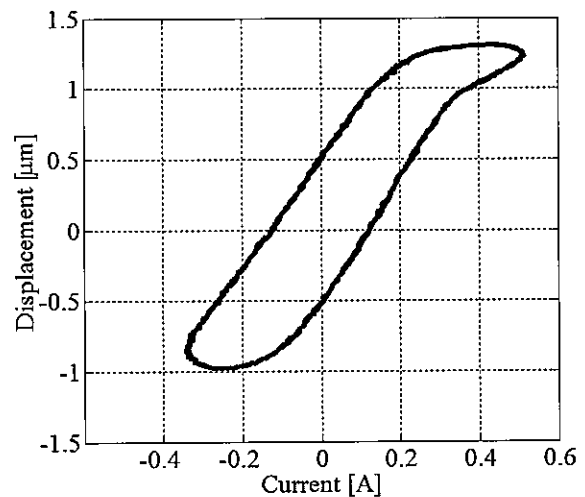


Fig. 4 Current vs. displacement response of vibrator.

Table 2 Parameters of open type cavitation generator.

Parameter	Value
Plunger material	Galfenol $Fe_{81.6}Ga_{18.4}$
Size of plunger	1 × 1 × 10 mm
Exciting coil	390 turns
Magneto motive force	137 AT
Cross-sectional area S	$3.1 \times 10^{-6} m^2$
Maximum stroke X	2 μm
Maximum force F_{max}	10 N
Angular frequency of vibration ω	$1.3 \times 10^5 rad/s$

MB脱色実験ではTable 3に示すMB溶液で行った。蒸留水500 mlに濃度8.3 g/lのMB溶液を0.5 ml, ラジカル捕捉剤としてH₂O₂を10 ml混合した。また, 閉空間型キャビテーション発生装置における試験条件をTable 4, 開空間型キャビテーション発生装置における試験条件をTable 5に示す。閉空間型キャビテーション発生装置において, C1の試験液はTable 3に示すMB溶液を添加し, C2の試験液はMB溶液に2 mm^φのTiO₂粒子を500 g添加した。試験液C1, C2は遮光袋に入れることにより紫外線による脱色の影響を最小限にした。また, Eの試験液は, C2の試験条件に加え, 閉空間型キャビテーション発生装置駆動による振動印加を与えた。超磁歪アクチュエータの駆動条件は, 励磁電流5 A, 振動周波数120 Hzで行い, 駆動時間は0から30分の計6点について吸光度の測定を行った。このとき, 装置への平均入力電力は約154 Wとなっている。開空間型キャビテーション発生装置においては, C1, C2, Eの小試験管にTable 3のMB溶液を2 ml添加し, C2, Eには1 mm^φのTiO₂粒子を2.2 gを添加した。ここで, キャビテーションのTiO₂に対する曝露面積を増やしMB還元反応が進行しやすくするため, 閉空間型と比べTiO₂の径を小さくしている。さらにEには開空間型キャビテーション発生装置での振動印加を行った。装置の駆動条件は励磁電流0.35 A, 振動周波数20 kHzとし, 駆動時間0, 30, 60分間の各溶液の吸光度を測定した。このとき装置への平均入力電力は約2.34 Wとなっている。なお, C2, Eに関してはアルミニウム箔による遮光を行い, 紫外線によるMB脱色影響を小さくした。

2.3.2 電気泳動法を用いたウイルスのコートタンパク損傷評価

電気泳動法を用いて, ウイルスのコートタンパクの損傷評価を行った。また, 装置としては閉空間型キャビテーション発生装置を用いた。今回, ウイルスの中では特に簡単な構造であるMS2ファージを用いた。MS2ファージは直径約26 nmの正二十面体構造であり, 中心部に核酸のRNAを有している。核酸の周囲にはコートタンパクと呼ばれるタンパク質が取り囲んでおり, コートタンパクが損傷を受けると, ウイルスは本来の感染力を失い, 不活性化に至る。電気泳動法は泳動距離の違いからタンパク質の分子量を定量する方法である。キャビテーションの発生から生じる圧力衝撃波,

ラジカルの酸化分解作用によって, ウイルスのコートタンパクが大きな損傷を受けていれば, タンパク質の分子量の差異によって泳動距離が変わる。よって, 振動印加を与えていないウイルスとの比較により, ウイルスの損傷の程度を明確にすることができる。

Table 6に電気泳動評価の試験条件を示す。3種類の試験液E1, E2, E3のウイルスには超磁歪アクチュエータによる振動印加を与え, さらに試験液E2, E3のウイルスにはTiO₂粒子を添加し, ラジカルの発生を狙う。また, 比較のために試験液C1はウイルス溶液のみ, C2, C3のウイルスにはそれぞれ試験液E2, E3と同量のTiO₂粒子を添加し, 水中で暗所保管した。

超磁歪アクチュエータは5 A, 120 Hzで駆動を行い, 60, 90, 120分間の駆動後にそれぞれウイルス溶液を取り出し, サンプルとした。電気泳動終了後, ゲル中

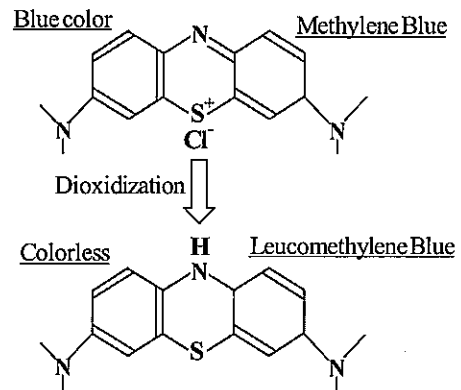


Fig. 5 Methylene blue & Leucomethylene blue.

Table 3 Methylene blue bleaching experiment solution.

Material	Value
Distilled water	500 ml
Methylene blue	0.5 ml
H ₂ O ₂ (Oxydol; 3.0 %)	10 ml

Table 4 Condition for close type cavitation generator.

Sample	Conditions
C1	MB only
C2	MB + TiO ₂ (2 mm ^φ , 500 g)
E	MB + TiO ₂ (2 mm ^φ , 500 g) + Driving

Table 5 Condition for open type cavitation generator.

Sample	Conditions
C1	MB only
C2	MB + TiO ₂ (1 mm ^φ , 2.2 g)
E	MB + TiO ₂ (1 mm ^φ , 2.2 g) + Driving

のタンパク質の染色を行い、画像処理によってタンパク質の量を濃度換算値として数値化した。

3 キャビテーション発生装置による滅菌能力の評価結果

3.1 MB脱色の評価結果

3.1.1 閉空間型キャビテーション発生装置駆動によるMB脱色評価結果

Fig. 6に閉空間型キャビテーション発生装置駆動によるMB脱色評価結果を示す。この図を見ると、閉空間型キャビテーション発生装置の駆動時間に依存して溶液の脱色を進行している。よって、溶液中にキャビテーションが発生し、TiO₂の励起からラジカルが発生したものと考えられる。また、30分間の駆動を行った場合、キャビテーション発生装置による振動印加の有無(C2およびEの比較)で、約13%の差が見られた。ここで、MB溶液に2 mm^φのTiO₂粒子を500 g添加したC2の試験液において、駆動時間に依存して吸光度に変化が見られるのは、遮光が不十分なためにTiO₂粒子に紫外線が照射され、MB脱色反応が進んだものと考えられる。

閉空間型キャビテーション発生装置では密閉空間にキャビテーションを発生させるため、大容量の汚濁水を浄化するのに適していると考えられる。

3.1.2 開空間型キャビテーション発生装置によるMB脱色評価結果

Fig. 7に開空間型キャビテーション発生装置駆動によるMB脱色評価結果を示す。縦軸は各MB溶液の吸光度の相対比、横軸はEの振動印加時間である。ここで相対比は、各試験液の(30, 60分での吸光度)/(0分での吸光度)で算出した。振動印加を行わない試験液C1とC2の吸光度を比べると、TiO₂粒子を添加したC2に吸光度の減少がみられた。これは遮光が不十分でTiO₂粒子が励起したものと考えられる。一方、振動印加を行った試験液Eでは、試験液C2より大きな吸光度の減少が見られ、30分間の駆動で約10%、60分間では約26%の差が見られた。これは、振動印加時間を増やすとMB溶液の脱色も顕著になったことを示している。よって閉空間型と同様の現象が確認されたため、キャビテーション・ラジカルが発生しているものと考えられる。

開空間型キャビテーション発生装置では、閉空間型

とは異なり、密閉空間に水を封入する必要がない。よって、例えば、水に流れがある配管内などでも適用できると考えられる。

Table 6 Condition for electrophoretic method.

Sample	Conditions
C1	Virus only
C2	Virus + TiO ₂ (2 mm ^φ , 0.2 g)
C3	Virus + TiO ₂ (2 mm ^φ , 2 g)
E1	Virus + Driving
E2	Virus + TiO ₂ (2 mm ^φ , 0.2 g) + Driving
E3	Virus + TiO ₂ (2 mm ^φ , 2 g) + Driving

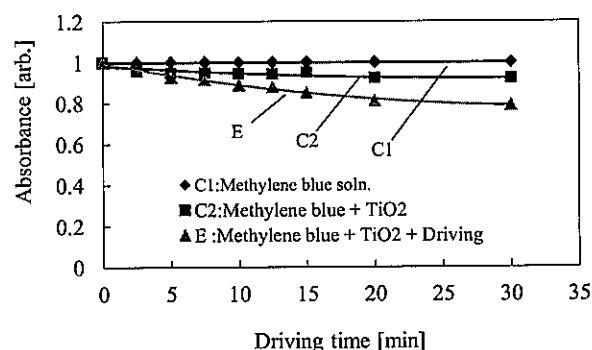


Fig. 6 Close type cavitation generator driving time dependence of methylene blue bleaching.

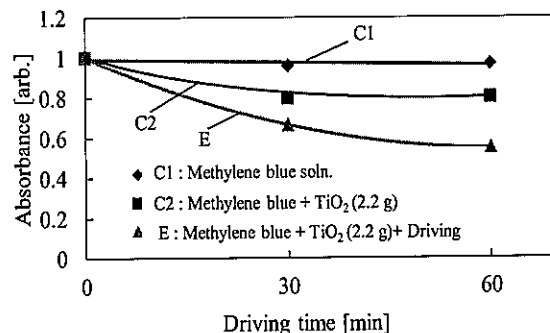


Fig. 7 Open type cavitation generator driving time dependence of methylene blue bleaching.

3.2 電気泳動法を用いたウイルスのコートタンパク損傷評価結果

電気泳動後のゲルに対し画像処理を行い、濃度換算した値を相対比で表した結果をFig. 8に示す。結果は振動印加群(E), 比較群(C)の間でより顕著な差を示した分子量13 kDaでの濃度換算値を相対比にした。結果から、振動印加のみを120分間与えたウイルス(E1)は、ウイルス溶液のみの場合(C1)と比べ、約4%の濃度減少があり、キャビテーションによる圧力衝撃波の影響が見られた。また、 TiO_2 粒子を添加した試験液において、120分間の振動印加を与えたウイルス(E2, E3)では、水中保管したウイルス(C2, C3)と比べ、 TiO_2 粒子の添加量が少ない場合(C2, E2間)で8%, 多い場合(C3, E3間)で13%の濃度減少が見られ、ラジカルによる酸化分解作用の影響が見られた。さらに、これらの影響はキャビテーション発生装置の駆動時間および、 TiO_2 粒子量に依存してより顕著になっていることが分かった。これらの結果から、キャビテーション発生装置の駆動によりウイルスのコートタンパクが損傷を受けたことが示唆された。

4 まとめ

今回、閉空間および開空間にキャビテーションを発生させる装置として、Terfenol-Dを搭載した超磁歪アクチュエータおよび磁歪振動子Galfenolを用いた2種のキャビテーション発生装置を用いて、MB脱色実験を行い、発生するラジカルの定量を行った。また、閉空間型キャビテーション発生装置による振動印加を与えたウイルスに対し、電気泳動法によるウイルスのコートタンパクの影響分析を行った。以下に、検証結果を示す。

- (1) 閉空間型キャビテーション発生装置を用いた、MB脱色実験により、30分間の駆動で500 mlのMB溶液を13%脱色させることができた。また、MB溶液は装置駆動時間に依存して脱色が進んだ。
- (2) 開空間型キャビテーション発生装置を用いた、MB脱色実験により、60分間の駆動で2 mlのMB溶液を26%脱色させることができ、さらにMB溶液は装置駆動時間に依存して脱色が進んだ。
- (3) 電気泳動法によるウイルスのコートタンパクの影響分析結果から、ウイルス溶液に TiO_2 粒子を2 g添加し、キャビテーション発生装置を120分駆動した場合に、13%のコートタンパクの分子量が変わり、キャビテーションによる圧力衝撃波、およびラジカルの酸化分解作用による影響が見られた。

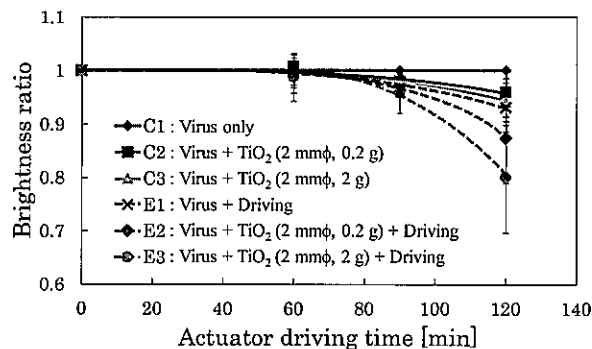


Fig. 8 Evaluation of coat protein damage by electrophoretic analysis.

謝辞

本研究の一部は、科学研究補助金挑戦的萌芽研究(課題番号22656067)により行われた。

(2010年9月24日受付, 2011年2月16日再受付)

参考文献

- [1] N.Shimizu, C.Ogino, M.F.Dadjour and T.Murata, Sonocatalytic degradation of methylene blue with TiO_2 pellets in water, *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol.14, pp.184-190, 2007.
- [2] M.Cho, H.Chung, W.Choi and J.Yoon, Different Inactivation Behaviors of MS-2 Phage and Escherichia coli in TiO_2 Photocatalytic Disinfection, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol.71, pp.270-275, 2005.
- [3] A. E. Clark, M. Wun-Fogle, J. B. Restorff, Magnetostrictive Properties of Body-Centered Cubic Fe-Ga and Fe-Ga-Al Alloy, *IEEE, Trans. Mag.*, Vol.37, pp. 3238-3240, 2000.
- [4] A. E. Clark, M. Wun-Fogle, J. B. Restorff, Magnetostrictive Properties of Galfenol Alloys under compressive stress, *Materials Transaction*, Vol.43, pp.881-886, 2002.
- [5] H.Suzuki, S.Yamada, M.Kakikawa, Y.Matsumoto and M.Iwahara, Application of Giant Magnetostrictive Actuator in the Generation of Radicals, *J. of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.17, pp.145-148, 2009.
- [6] T.Suzuki, S.Nakamura, T.Ueno, M.Kakikawa, S.Yamada, Inactivation of virus by pulse power based on cavitation phenomenon, *The Papers of Technical Meeting on Magnetics, IEE Japan*, MAG-09-154, 2009.

