

機関番号：55401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20510084

研究課題名（和文）メカノケミカルキャビテーション噴流によるバラスト水処理技術の開発

研究課題名（英文）Development of ballast water treatment technology by mechanochemical cavitation

研究代表者

吉村 敏彦（YOSHIMURA TOSHIHIKO）

呉工業高等専門学校・機械工学分野・教授

研究者番号：20353310

研究成果の概要（和文）：エゼクタノズルを用いたメカノケミカルキャビテーションによるバラスト水処理技術を開発した。バラスト水流量が30ℓ/minで死滅率100%を達成することができた。メカノケミカルキャビテーションには、アルテミアや実海中のプランクトンに対する機械的処理と化学的処理の相乗効果が存在する。また、マイクロキャビテーションは薬品の化学的効果を高める効果があることが分かった。マイクロキャビテーションとプランクトンの相互作用を可視化し、薬品を含有したキャビテーションにはプランクトンを誘引する効果があることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The ballast water treatment technology was developed using mechanochemical cavitation provided by ejector nozzles. An extinction ratio of 100% was achieved, when the flow rate is set to 30 L/min. The superimposed effect of processing performance to *Artemia salina* and marine organisms was recognized by mechanical effect due to cavitation collapse and chemical effect in the mechanochemical cavitation. The chemical action to marine organism was enhanced by chemical microcavitation. It was found that the chemical microcavitation has an effect drawing plankton to cavitation by visualizing the interaction between cavitation and plankton.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学、環境技術・環境材料

キーワード：環境保全技術、バラスト水、メカノケミカルキャビテーション

## 1. 研究開始当初の背景

(1)バラスト水は、荷物を積載していない船を安定させるためのおもしとして、港で船に積み込まれる海水である。荷物を降ろした際に積み込まれ、荷物を積載する際に排出される。このバラスト水は世界で年間120億トンの移動があると推定されている。その内、日本では3億トンのバラスト水を輸出し、1700万トンを入力している。しかしこのバラスト

水の注入排出によって、多数の海洋生物が移動し、外来種の侵入と定着による生態系の攪乱や破壊が全世界で問題となっている。

(2)2004年2月に開催された「船舶のバラスト水管理に関する国際会議」で、排出されるバラスト水の水質を規制する国際条約が締結され、30カ国が批准した。本国際条約での基準値は、動物性プランクトンでは1m<sup>3</sup>あた

り 10 個と大変厳しい値が求められている。

(3) 従来のバラスト水処理方法として、濾過、オゾン、過熱、酸素除去、紫外線、化学薬品、ガス注入等がある。これらの技術は、処理性能や運転コスト、簡便性なども面で一長一短あり、濾過などでは、目詰まりなど改善すべき点が多い。また、これらのバラスト水の処理技術は、国際基準を満足しておらず、世界各国で高い効率を有するバラスト水処理技術の開発が急務の課題となっている。

(4) 我々は従来、高圧水を噴射し発生するキャビテーションの高い崩壊圧力を利用するウォータージェット (WJ) を用い、バラスト水処理への適用を検討してきた。また、既に船舶に搭載されているボイラーに着目し、ボイラーの高温蒸気をバラスト水中に噴射することにより発生する蒸気キャビテーションを用い、プランクトンの破壊条件についても研究した。このような研究開発により、バラスト水中のプランクトンの死滅率 95% 程度まで高めることができた。しかしながら、国際基準として求められている死滅率 100% を達成できていない。

(5) 薬剤含有水のキャビテーションを利用する機械的・化学的処理技術は初めての試みであり、国際基準を満足できる高効率バラスト水処理技術を確立できるものと大いに期待される。また、次亜塩素酸ナトリウムの効果については、既に検証済みである。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、ウォータージェットのノズル構造 (エゼクタノズルやベンチュリノズルの採用) を改良し、ウォータージェットの高圧水に薬剤を注入する。

(2) エゼクタノズルやベンチュリノズルにより発生する薬剤含有水のキャビテーションを用い、キャビテーションの崩壊圧力による機械的処理と薬剤による化学的処理の相乗効果 (メカノケミカル効果) を狙い、国際基準を満足する死滅率 100% の達成を目的とする (図 1 参照)。以上のように、薬剤含有水キャビテーションによる機械的・化学的 (メカノケミカル) 処理は、新しい概念のバラスト水処理技術となる。

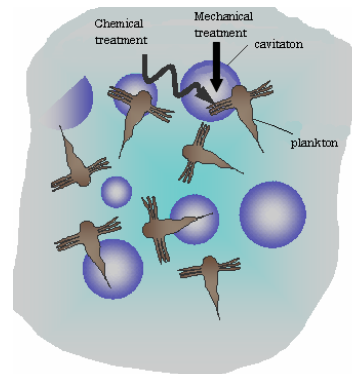


図1 メカノケミカルキャビテーションによるプランクトン処理の概念図

## 3. 研究の方法

### (1) エゼクタノズルの試作

図 2 に示すようにエゼクタノズルは高圧水中 (圧力 5MPa~70MPa) へ 低圧水を流入させることにより、高圧水の圧力低下を抑制するとともに、崩壊圧力が高いキャビテーション噴流を多量に発生させることが狙いのノズルである。本研究では、この低圧水に次亜塩素酸ナトリウムを添加し、薬剤含有水のキャビテーションを発生させ、キャビテーションの崩壊による機械的処理 (メカニカル処理) と、薬剤の化学的処理 (ケミカル処理) を同時に施すことにより、プランクトンに大きなダメージを加えて処理するものである。実験パラメータとしては、以下が挙げられる。下記パラメータを変えた各種エゼクタノズルを試作する。

- ・ 高圧ノズルの孔径と圧力
- ・ 低圧ノズルの孔径
- ・ エゼクタノズル出口の角度 (ホーン型)
- ・ 次亜塩素酸ナトリウムの添加量 (濃度)

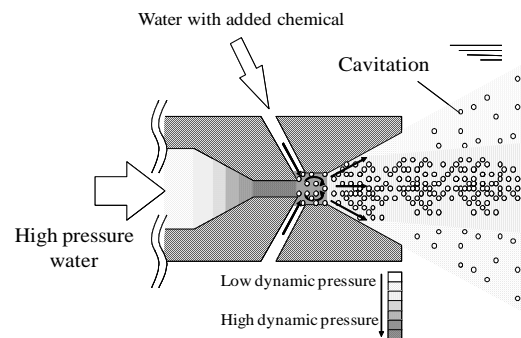


図2 エゼクタノズルの概略図

### (2) 旋回流型処理装置

噴射により発生した個々のキャビテーションは、崩壊、発生、成長を繰り返し、新たなキャビテーションを発生させる。これらのキャビテーションが、プランクトン近傍で崩壊すると、崩壊圧力によりプランクトンは死滅する。旋回ノズル内でバラスト水を旋回させることにより、旋回中心は低圧化され、崩壊圧力は向上すると考えられる。

本研究では旋回ノズルと、死滅率を向上させる

ワイヤーディスクを使用する。図3に旋回ノズルの概要図を示す。ワイヤーディスクは、旋回ノズル出口部のターゲット表面に設置し、バラスト水中のプランクトンがワイヤーディスクをすり抜ける際に衝突させて死滅させる効果を狙ったものである。ベンチュリノズルの場合、旋回流型処理装置のウォータージェットノズルまでの流路に、圧力水に薬品注入を可能とする吸込み型ノズルを装着した。エゼクタノズルの場合、旋回流型処理装置のウォータージェットノズルをエゼクタノズルで置き換えて適用した。

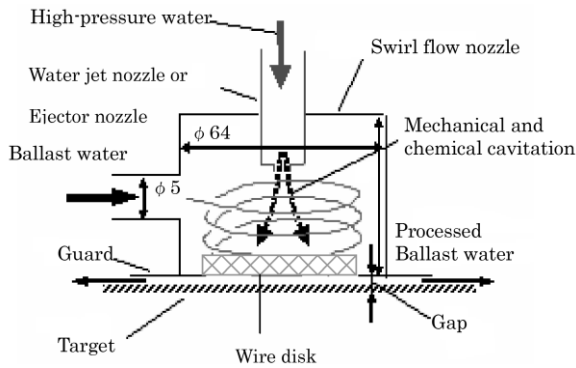


図3 旋回流型処理装置の概略図

(3) バラスト水中のプランクトンの処理能力としては、次式の死滅率で評価する。

$$\text{死滅率} = \frac{\text{初期生存数} - \text{噴射後生存数}}{\text{プランクトンの初期生存数}}$$

プランクトンとしては、エビの卵であるテトララインシュリンプエッグ（アルテミア）を孵化させた幼生を使用する。また、アルテミアより小さく、海水または混合海水域に生息するシオミズツボムシも実験に用いた。

また次亜塩素酸ナトリウムは水道水やプールの殺菌等に使用される薬品であり、環境にも優しく生態系にも特に影響は与えない。しかしながら、必要最小限の薬品量で最大の処理能力を引き出すことが望ましい。したがって、メカノケミカル効果のメカニズムを解明し、次亜塩素酸ナトリウムの添加量（濃度）の適正化を図る。

(4) かい脚類や二枚貝などの実海水に含まれるプランクトンについてのメカノケミカル効果を検討する。

(5) 機械的・化学的作用のメカニズムについて検討した。キャビテーションは電気的陰性を帯びており、またプランクトンには走光性を有しているものがある。正電位を与えた透明電極に光を照射することにより、キャビテーションとプランクトンを接近させて、キャビテーションの崩壊とプランクトンの挙動を可視化する（図4）。

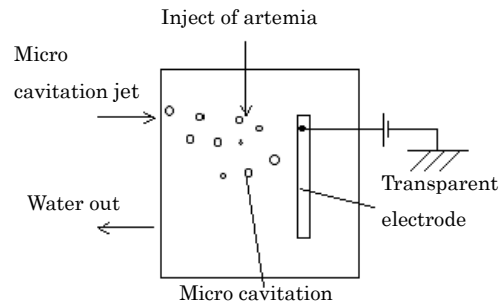


図4 キャビテーション-プランクトン相互作用可視化装置の概略図

#### 4. 研究成果

(1) エゼクタノズルの基本構造について検討した。エゼクタノズル出口部の角度（ホーン角度）や高圧ノズル径、副流ノズル径を変化させた各種ノズルを用いて吸込み特性の実験を行った。図5のように、ホーン角度をa、高圧ノズル径をb、副流ノズル径をc、主流ノズル径をdとして実施した各条件における試験結果を表1に示す。ホーン角度60°では大気圧流入しないが、ホーン角度が40°以下では高圧ノズル径、副流ノズル径ともにφ2mmまで流入させることが可能であった。この結果からエゼクタノズルは、ベンチュリノズルより小さい径で薬品注入できることが明らかになった。ホーン角度が大きいと、主流の動圧が低下し静圧が上昇するために、副流の吸込み圧力が上昇する。そのため、副流の吸込み能力が下がると考えられる。また、ホーン角度30°、高圧ノズル径φ2mm、副流ノズル径φ2mmでの吸込み量を、圧力を変えて測定した。結果を図6に示す。図6より、主流圧力が6MPaを超えると吸込み量はほぼ一定となる。以上のような基礎試験により、ホーン角度30°、高圧ノズル径φ2mm、副流ノズル径φ2mmをエゼクタノズルの基本形状と定めた。

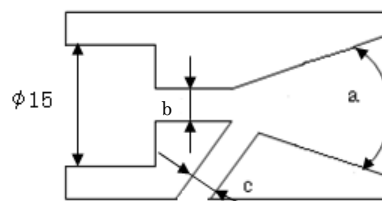


図5 エゼクタノズルの基礎試験パラメータ

表1 エゼクタノズルの基礎試験結果

Horn angle	Nozzle diameter of high pressure b [mm]	Nozzle diameter of sub current c [mm]	Pressure of main current [MPa]	Injection of atmospheric pressure
a[deg]	b [mm]	c [mm]	[MPa]	
60°	φ1	φ1	6	×
60°	φ2	φ2	6	×
60°	φ2	φ4	6	×
40°	φ2	φ2	6	○
30°	φ2	φ2	6	○
20°	φ2	φ2	6	○

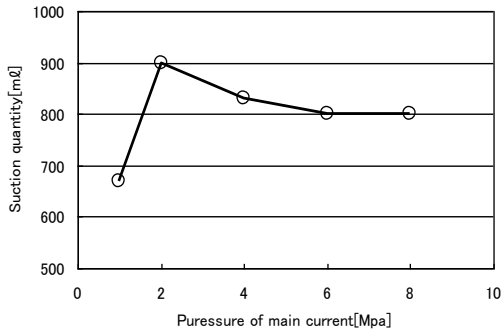


図6 主流圧力と吸い込み量の関係

(2)副流に薬剤（次亜塩素酸ナトリウム）を含有させたメカノケミカルキャビテーション噴流により、従来の機械的処理のみのキャビテーションに比較して、低い濃度の薬剤含有量（20ppm）でも死滅率向上の効果があることを明らかにした。

バラスト水流量を70ℓ/minと定め、ベンチュリノズルを用いて次亜塩素酸ナトリウムの濃度を0～100ppm程度まで変化させたときの死滅率の変化を図7に示す。ここで、高压ノズル径は、φ2.5mm～φ3.1mmとした。次亜塩素酸ナトリウムの濃度が0ppmのとき、すなわち機械的キャビテーションのみによる処理条件では死滅率に多少の誤差があるが、どの径も死滅率は平均すると80%台と低い値となっている。濃度20ppmまで増加すると死滅率は95%台まで向上し、薬品注入の効果が見られる。しかし、濃度を20ppm以上にした場合では死滅率の向上が見られない。キャビテーションの化学的効果をもたらす次亜塩素酸ナトリウムの濃度は20ppm近辺が限界であると考えられる。

0ppmのときの死滅率は約85%である。薬品注入のみの効果は約20%である。機械的キャビテーションで処理できなかった15%のアルテミアを薬品注入の効果で処理したとしても、3%の向上しかなく死滅率は88%となると考えられる。しかしながら実際には95%の死滅率となっている。この差はキャビテーションによる薬品注入により死滅率が向上したことを示している。すなわち、キャビテーションの機械的効果と化学的効果には相乗効果があることを示唆している。

一方、バラスト水流量が30ℓ/minの場合では、図8に示すように、濃度に関わらず、98%程度以上の高い死滅率が達成された。データのばらつきがあるものの、濃度50ppmで死滅率100%の結果も得られた。

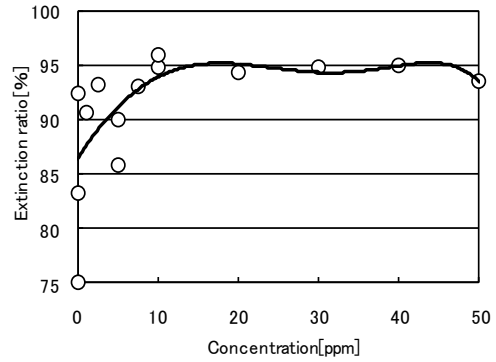


図7 次亜塩素酸ナトリウム濃度と死滅率の関係  
(メカノケミカルキャビテーション、ベンチュリノズル、流量:70ℓ/min)

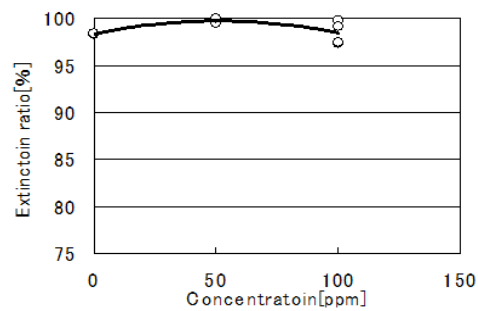


図8 次亜塩素酸ナトリウム濃度と死滅率の関係  
(メカノケミカルキャビテーション、ベンチュリノズル、流量:30ℓ/min)

一方、開発したエゼクタノズルを用いて実験を行った結果を図9に示す。ベンチュリノズルでの機械的キャビテーションのみによる処理では、平均死滅率 80%台と低い値となっているが、エゼクタノズルでは機械的キャビテーションのみでも 70ℓ/min で 95%以上の高い死滅率を記録した。ノズル径縮小に伴うキャビテーションの崩壊圧力上昇により、死滅率が高くなったものと考えられる。しかし濃度増加させても大きな変化が見られな

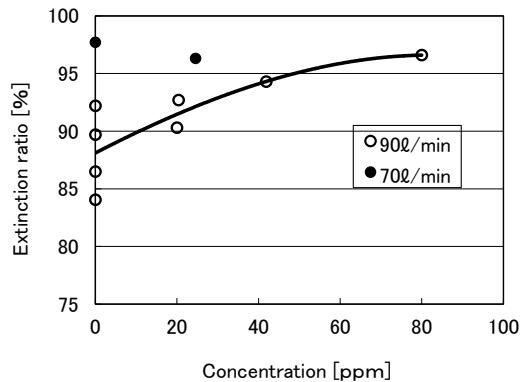


図9 次亜塩素酸ナトリウム濃度と死滅率の関係  
(メカノケミカルキャビテーション、エゼクタノズル、流量:90ℓ/min)

ったため、流量を 90ℓ/min として薬品注入効果の推移を調べた。ベンチュリノズルと同様に、薬品注入効果が見られる。

以上の実験結果より、エゼクタノズルのほうがベンチュリノズルよりもバラスト水処理において有効であることが明らかになった。また、メカノケミカルキャビテーション噴流は、従来の機械的キャビテーション噴流に比べて、バラスト水処理に対してより有望な技術であることが示された。

(3) 開発したエゼクタノズルを用い、実海水に対するメカノケミカルキャビテーションによるバラスト水処理技術について検討した。アルテミアと同様に、実海水に含まれる甲殻類、かい脚類、珪藻類に対しても、メカノケミカル効果があることを明らかにした。死滅率はアルテミアには及ばないものの、バラスト水流量 90ℓ/min で 90%の死滅率を達成することができた (表 2)。

表 2 実海水中プランクトンの処理結果

Concentration (ppm)	0	15.8	52.8
Extinction ratio (%)	76.7	90.0	86.7

(4) 機械的処理能力のないマイクロキャビテーションを用いて、化学的効果について調べた。プランクトンを加えた塩水 25ℓ にマイクロキャビテーションを 50ℓ 噴射し、死滅率を測定した。次亜塩酸ナトリウムの濃度を 0~500ppm 程度まで変化させたときの死滅率の変化を図 10 に示す。薬品注入のみの場合と、薬品を含んだマイクロキャビテーショ

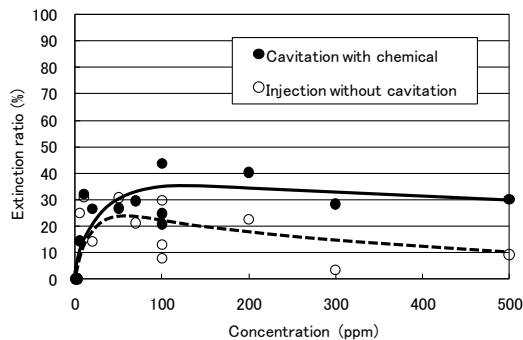


図 10 次亜塩素酸ナトリウム濃度と死滅率の関係 (マイクロキャビテーション、孵化後アルテミア)

ンを噴射した場合には、死滅率に違いが見られる。マイクロキャビテーションのみでは死滅率は全く変化しなかったことから、キャビテーションが薬品の化学的作用を高めたことがわかる。これは崩壊圧力の高いウォータージェットを用いたメカノケミカルキャビテーションの相乗効果に相当するものと考

えられる。

プランクトンの幼生体だけでなく成長したプランクトンでも同じような効果が出るかどうか、同じ装置で引き続き実験を行った。プランクトンは孵化後 2 週間飼育し、図 11 のように体長は 1.5 倍ほどに成長したものを使用した。図 12 に示すように、成長したプランクトンによる実験においても薬品注入のみと薬品入りのマイクロキャビテーションとの間に差が見られることから、成長段階に依存せずキャビテーションが薬品の効果を高める作用があることが明らかになった。



図 11 成長したアルテミアの光学顕微鏡像 (孵化後 2 週間)

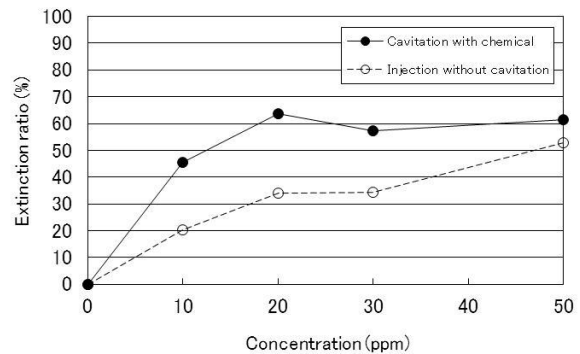


図 12 次亜塩素酸ナトリウム濃度と死滅率の関係 (マイクロキャビテーション、成長アルテミア)

より小さな他の種類のプランクトンにもキャビテーションと薬品との相乗効果があるかどうか、ワムシ (図 13 参照) を用いてアルテミアと同様の実験装置と手順で実験を行った。次亜塩素酸濃度 10ppm 以上の高濃

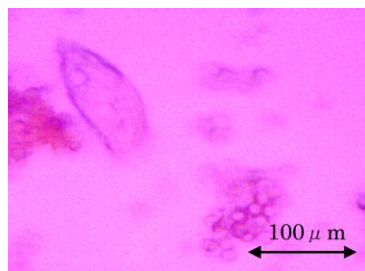


図 13 孵化後のワムシの光学顕微鏡像

度領域においては、ワムシが次亜塩素酸に対し脆弱であるため薬品効果が大きくキャビテーションによる薬品効果の向上はほとんど見られなかった。これに対して、図14に示すように低濃度領域においては、薬品の場合と薬品注入されたマイクロキャビテーションを加えた場合に差がみられた。この結果より、ワムシに対してもキャビテーションが薬品効果を向上させることが分かった。ここで、0ppmでも処理能力があることが示されている。これは、使用した水道水には元々次亜塩素酸ナトリウムが添加されていることが原因である。これを検証するため、水道水を中和して実験を行うと、0ppmでの死滅率が大幅に減少した。

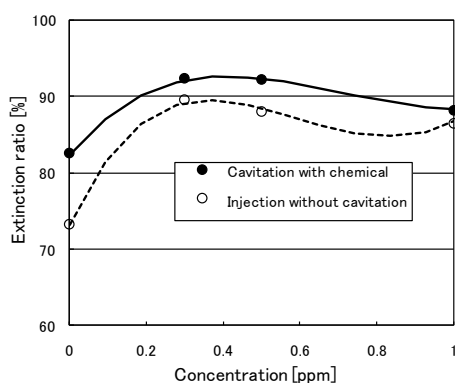
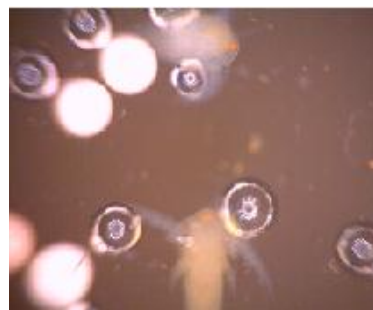


図14 次亜塩素酸ナトリウム濃度と死滅率の関係(マイクロキャビテーション、ワムシ)

(5) 図4の装置を用いて、プランクトンとキャビテーションの相互作用を可視化した。キャビテーションには卵やプランクトンを引き寄せる効果があることが明らかになった。

薬品入りのマイクロキャビテーションについても同様な実験を行った。薬品無しの場合と同様に、卵やプランクトンの強い誘引効果が確認できた。さらに、図15に示すように、薬品無しのキャビテーションに比べて薬品入りのキャビテーションの方が卵やプランクトンの吸着率が高く観察された。この誘引効果が、図10、図12及び図14に示した薬品の有無による死滅率の相違をもたらす一因になると考えられる。その理由は次の通りである。薬品はキャビテーションが存在する所も存在しない所も含まれている。薬品を含有したキャビテーションからの化学作用とキャビテーションが存在しない場所での薬品だけの化学作用が等しければ、上記誘引作用の有無が死滅率の違いを発生させないためである。しかしながら、薬品を含有したキャビテーションからの化学作用の方が、薬品だけの化学作用より高ければ、上記誘引作用により死滅率の相違を更に大きくすると考えられる。

以上のように、バラスト水処理においてメカノケミカルキャビテーションの機械的処理作用と化学的処理作用の相乗効果を検証することができた。またメカノケミカルキャビテーションは、バラスト水のみならず、農業や医療分野等、多分野への応用も期待される。



(a) 薬品含有キャビテーション



(b) キャビテーションのみ

図15 マイクロキャビテーションとプランクトン及び卵の相互作用の可視化

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計1件)

T. Yoshimura, S. Kubota, T. Seo, and K. Sato, "Development of ballast water treatment technology by mechanochemical cavitation", 7th International Symposium on Cavitation, (2009年8月, Ann Arbor, MI USA)p. 5.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉村 敏彦 (YOSHIMURA TOSHIHIKO)  
 呉工業高等専門学校・機械工学分野・教授  
 研究者番号：2 0 3 5 3 3 1 0