

「曲面に添って浮上するマイクロバブルの船底汚損生物に対する忌避効果の検証」
神戸大学大学院海事科学研究科 三村 治夫

研究の背景と目的

船体付着生物の越境移動

バラスト水へ侵入した生物種のみならず、フジツボや二枚貝類も船舶とともに越境移動し、その棲息域を拡大させている。フジツボの付着期幼生（図1）は、固体表面上で付着行動が完了した直後に、フジツボへと変態する。日本の多くの港湾では、以前から棲息が確認されているタテジマフジツボ、アメリカフジツボ、ヨーロッパフジツボ、及びキタアメリカフジツボに加え、新たにパナマ太平洋岸原産のココポーマアカフジツボの棲息が確認されている^[1]。



図1 フジツボの付着期幼生

付着期幼生の大きさは、 $100\text{-}200 \mu\text{m} \times 500\text{-}600 \mu\text{m}$ 程度である。姫路エコテック(株)
遠藤氏提供

付着生物による船体抵抗の増加

船体付着したフジツボ類は、船底表面粗度を増加させ、船速低下の主要因となる。生物汚損により船底粗度が増加すると船体抵抗が増加し、船速を維持するために必要な軸馬力も増加する。Schultzらは船底汚損が進行することを想定し、船舶（水線長 142.0 m, 船幅 18.0 m, 喫水 6.4 m, 没水船体表面積 3,001 m², 排水量 8,768 tons）の速度を 15.4 m s⁻¹ (30 knots) に維持するために要求される軸馬力の増加分を推定している（表1）^[2]。十分大きくなるまでフジツボが成長した船体では、船体抵抗値が 1088 kN 増加し、これにともない、軸馬力が 47% 増加すると推定している。内燃機関を主機関とする場合、燃料消費量を増加させることで機関出力を上げることができるが、排ガス量も増加し、排ガス中に含まれる CO₂, SO_x, NO_x, すす等の微粒子の大気への排出量も増加する。燃料消費率 (g (kW·h)⁻¹) の増加は、船舶運行の経済性を低下させる。船底の生物汚損対策は、付着生物の越境移動阻止と生物多様性の保全のみならず、船舶運行に係る海洋・大気環境への負荷低減と持続可能な経済活動を包括した重要な課題と言える。

船底防汚剤を使わないグリーン防汚技術開発の重要性

船底粗度の増加を抑制する付着生物汚損対策として、1960年代以降、有機スズ化合物が多用された。この化合物は、フジツボや多種多様な海洋微小生物に対して殺傷効果が高く、安価で比較的容易に合成できる利点があった。しかしながら、船体から溶出した有機スズ化合物が残留する湾内では、二枚貝の奇形や内分泌かく乱作用による生殖阻害が起り、食物連鎖と生物濃縮によって、マグロ等大型回遊魚にも汚染が拡大した。2008年に国際条約が発効し、有機スズ化合物の船底への使用が完全に禁止された。代替塗料として、シリコン系防汚塗料の開発が進んでいるが、有機スズ化合物と比べ高価である。シリコン系防汚塗料は撥水性が高く、当該塗料で被覆された船底はバイオフィルムの形成を抑制し、フジツボのキプリス幼生（図1参照）の付着を遅らせる効果がある。さらに、船速が増加すると、フジツボ等付着生物が船底から剥離しやすい。

空気微小気泡群は固体表面の洗浄や湖底・海底への酸素供給に有用である。気泡群作成のために海水ポンプ駆動が必要であり、電力消費は避けられないが、空気微小気泡群に毒性はなく、船底防汚への微小気泡群の利用を検討することは妥当である。運航上問題になるのは船体で成長したフジツボであるが、初期付着はドリフティング中や係留中に起こっている。つまり、微小気泡群がフジツボの付着期幼生に対して阻害効果を有するかどうか、この点を明らかにしなければならない。本研究では、フィールドから水槽へ海水を連続供給し、水槽内に設置した丸型フラスコ近傍を自由浮上する空気微小気泡群の、フジツボや二枚貝の付着期幼生に対する付着防止効果を検証した。

表1 船底汚損の進行にともなう船体抵抗の増加と船速を維持するために必要な軸馬力の增加

船体汚損状況	ΔR_{TS}		ΔSP	
	(kN)	(kW)	(kW)	(kW)
なめらかな船体表面	-	-	-	-
船底防汚塗料を塗布した船体表面	66	3%	1,533	3%
軽微なバイオフィルムが形成された船体表面	182	7%	4,300	7%
重厚なバイオフィルムが形成された船体表面	303	12%	7,202	12%
小さなフジツボが成長した船体表面	485	19%	11,699	20%
中ぐらいの大きさにフジツボが成長した船体表面	715	28%	17,519	30%
大きくフジツボが成長した船体表面	1,088	43%	27,315	47%

ΔR_{TS} : 船体抵抗の増加分; ΔSP : 軸馬力の増加分。

研究方法・研究内容

浅型水槽を使用した付着防止実験

兵庫県姫路市の八家川河口の東岸で実験を行った。水深1.5 mに設置した海水ポンプで海水タンク (1 m³) へ海水を移送し、その後浅型アクリル水槽 (450 mm × 890 mm × 450 mm) へ供給 (25 liter min⁻¹) した（図2）。空気微小気泡の発生方法はエジェクター方式を採用した。空気吸い込み量は、各ノズルへ供給する海水の供給量を調整し、100 ml min⁻¹に設定した。水槽底部に設置したノズルへ供給する海水は、カートリッジフィルター（ろ過径10 μm）でろ過したものを使用した。付着生物の付着対象物として、90 mmの丸型フラスコを使用した。浮上する微小気泡群がフラスコ下半球領域を被覆しながら浮上するようにノズル位置とノズル角度（迎角9°）を設定した（図3）。

深型水槽を使用した付着防止実験

深型水槽への海水の供給は、上述した浅型水槽の場合と同じ系統を使用した。ただし、海水の供給量を $40 \text{ liter min}^{-1}$ とした。給水は水槽の側面下部から行い、水槽上部に設置した排水管から排水できるように設計した(図4)。水槽底部 ($300 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$) から水面までの高さは、 1200 mm である。

微小気泡群の付着生物に対する付着防止効果の評価方法

浅型、及び深型水槽への海水供給は、6月末から10月末頃までの約一ヶ月間、連続して実施した。フラスコ下半球領域へ付着したフジツボとマガキの個体数と殻径、及び乾燥重量から、微小気泡群の付着生物に対する付着防止効果を評価した。

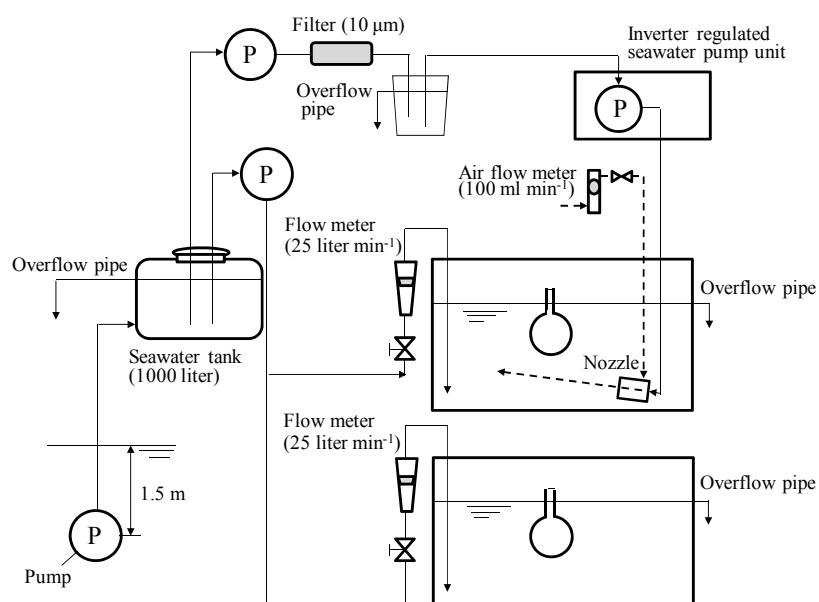


図2 浅型水槽を使用した実験装置の概略

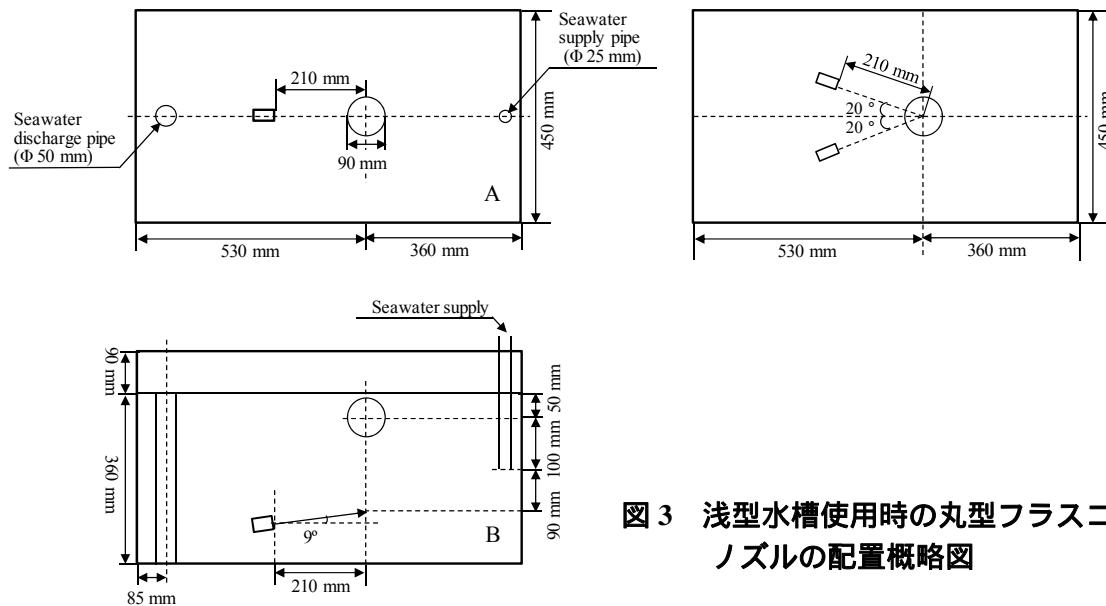


図3 浅型水槽使用時の丸型フラスコ及びノズルの配置概略図

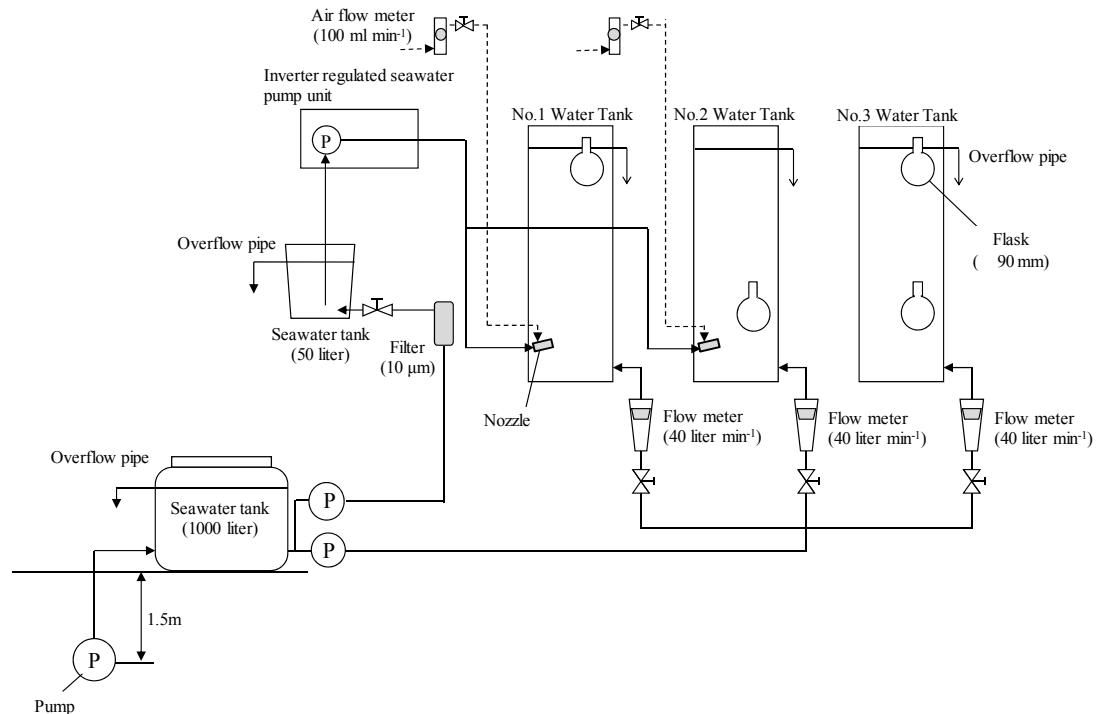


図4 縦型水槽を使用した実験装置の概略

微小気泡径の画像撮影

実験に使用した空気微小気泡群の気泡径を計測するための、画像撮影条件を図5に示す。海水表面を起点としたフラスコ及びノズルの相対位置は、図2及び図3のシングルノズルを使用した場合の実験条件を模擬している。画像撮影は、フラスコの赤道と最下位、及びノズルの軸方向へ伸ばした直線がフラスコ中心から降ろした垂線と交わる点の3点を対象とした。実態顕微鏡の焦点は、水槽内側から1 mmの位置に合わせた。実態顕微鏡の接眼レンズに接するように固定したデジタルカメラ (EXILIM EX-F1, Casio 製) を使用し、シャッター速度 100 s^{-1} でストロボ (PF20DX, Sunpak 製) と同期させ、浮上する気泡群を撮影した。ピントの合っている单一気泡を各位置に対し、1000個計測し、多機能汎用画像解析ソフトウェア (Cosmos21 (株) ライブライバー製) を使用して気泡径を計測した。

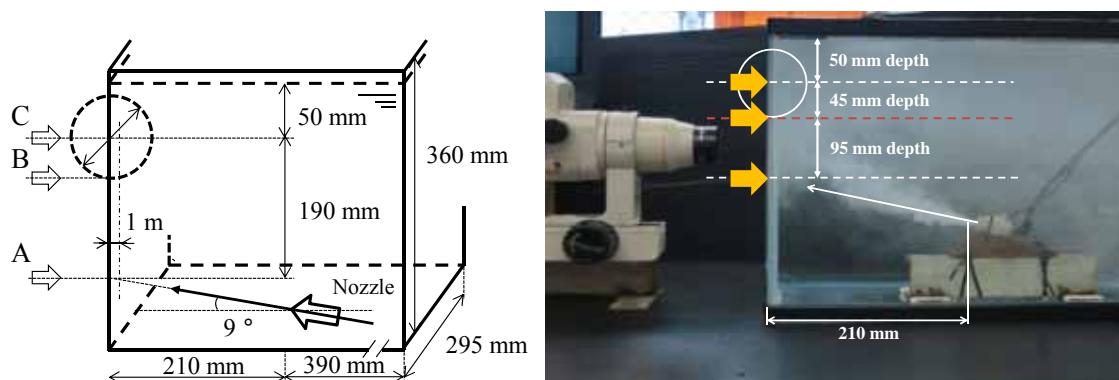


図5 空気微小気泡群の気泡径計測条件

研究成果（研究から得た考察，残された課題，今後の課題を含む）

微小気泡群の付着生物に対する付着防止効果（浅型水槽を使用した場合）

微小気泡群の付着生物に対する付着防止効果を，浅型水槽を使用して検証した。微小気泡群の丸型フラスコへの供給量は，使用したノズルの個数を1個及び2個に変えることで変化させた。丸型フラスコ下半球へ付着した付着生物の付着状況を図6に示す。微小気泡群がフラスコ近傍を浮上した結果，フジツボ固体数が，コントロールの場合と比べ，顕著に減少した。微小気泡群がフジツボ付着防止効果を有することが確認できた。

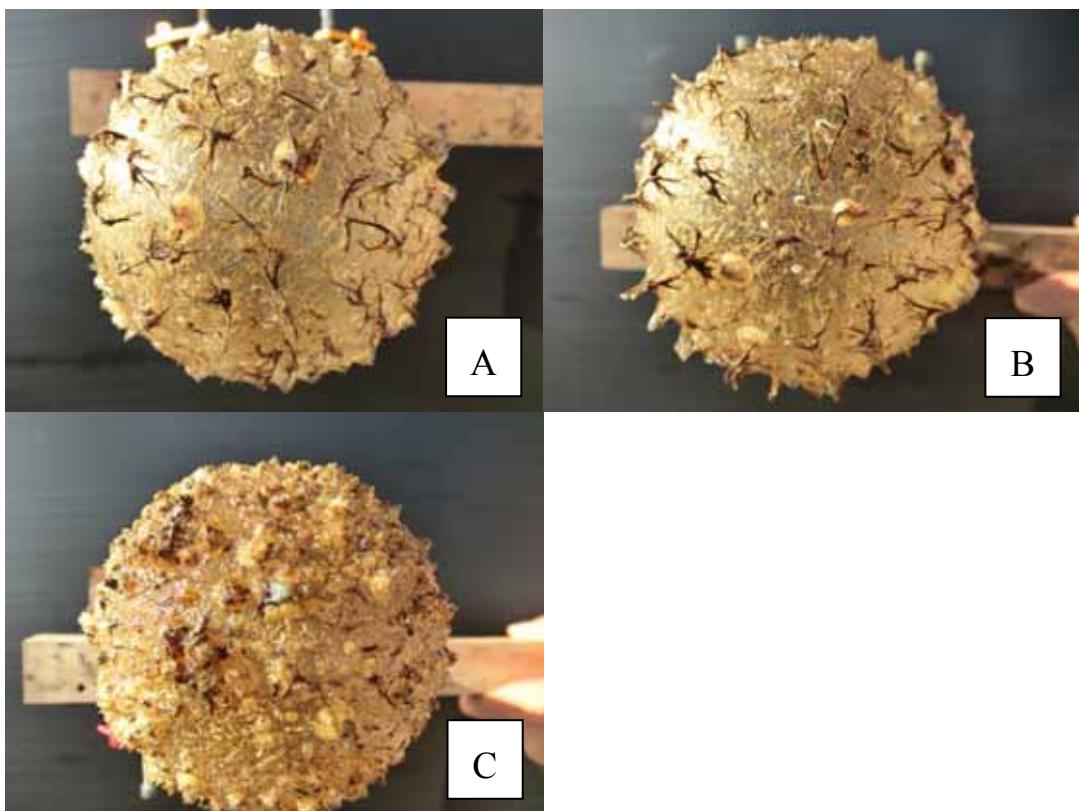


図6 微小気泡群供給下に丸型フラスコ底部へ付着し成長したフジツボ
海水を30日連続して供給後，ノズル1個(A)，離して設置したノズル2個(B)から
微小気泡群を供給した場合，及び微小気泡群を供給しなかった場合(C)の丸型フラス
コ底部への付着生物の付着状況を示す。

図7に丸型フラスコ下半球へ付着したフジツボの個体数及び殻径分布を示す。個体数の総数は，コントロールの664個体に対し，ノズル1個を使用して微小気泡群を供給した場合は45個体，ノズル2個から微小気泡群を供給した場合は，フジツボ付着個体数は33個体であった。殻径が6mm以上の個体数は，コントロールで30個体，ノズル1個使用時で6個体，ノズル2個使用時で10個体であった。一方，殻径が5.9mm以下の個体数は，コントロールで634個体，ノズル1個使用時で39個体，ノズル2個使用時で24個体であった。二枚貝の付着は，コントロールとして使用したフラスコからも確認できなかったのは，採水地の海水に含まれる二枚貝幼生の個体数が顕著に少なかったことが原因と考えられる。これらの結果は，微小気泡群が壁面近傍に存在すると，付着期幼生の付着行動が阻害されることを示唆している。

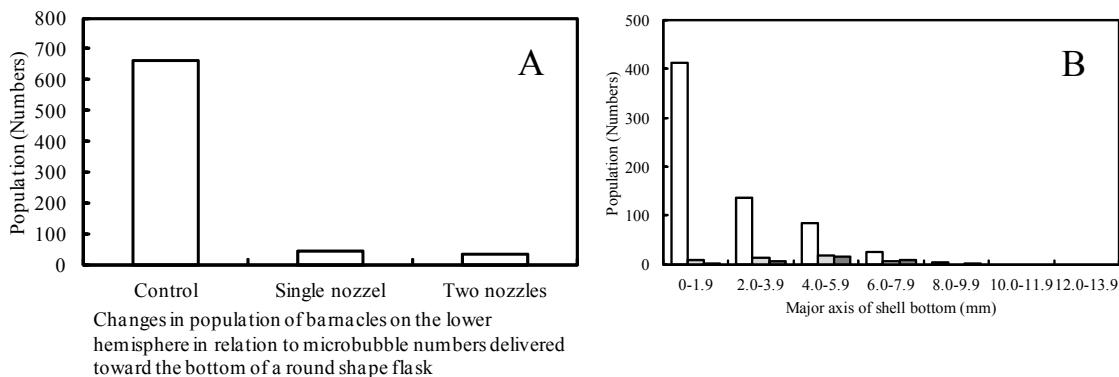


図7 丸型フラスコ下半球へ付着したフジツボの個体数及び殻径分布
微小気泡群の供給量は、使用したノズル数を1個から2個へ変えることで行った。図6で示したフラスコを対象に、付着個体数(A)と殻径(B)を計数した。

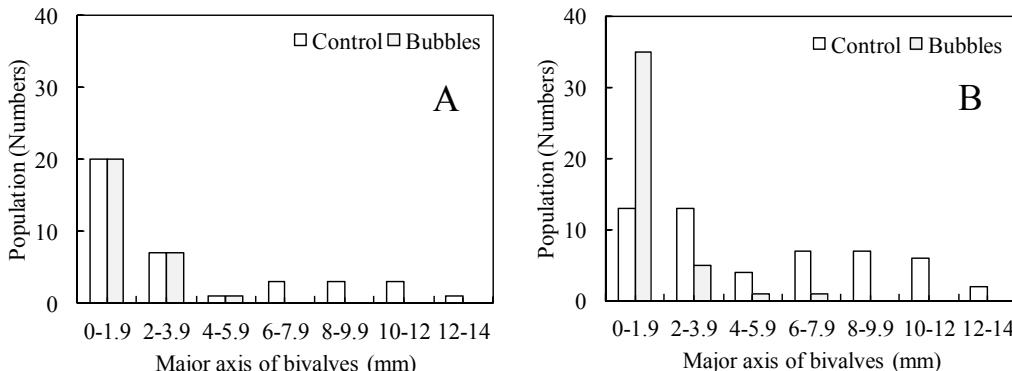
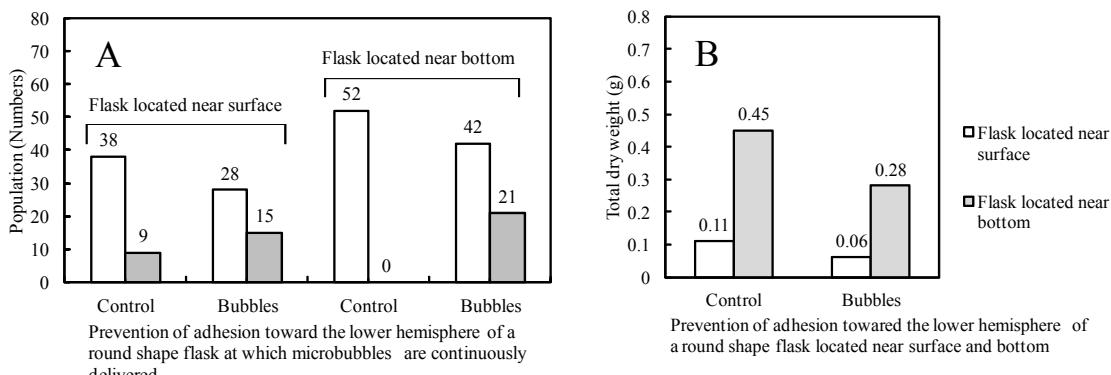
微小気泡群の付着生物に対する付着防止効果（深型水槽を使用した場合）

深型水槽を使用し、海水表面付近と水深が1mを超える水槽底面付近に丸型フラスコを設置し、微小気泡群は水槽底面から供給した。実験開始から30日後に、フラスコ下半球へ付着した付着生物の個体数(図8A)と乾燥重量(図8B)、及び二枚貝の殻径(図9)を測定した。実験開始時期が夏季を過ぎていたため、付着したフジツボの成長が遅く、フジツボを対照とした殻径計測は実施できなかった。

水槽底面に設置したフラスコでは、微小気泡群で被覆したフラスコに付着したフジツボ個体数は21個体であったが、コントロールとして設置したフラスコへの付着個体数はゼロであった(図8A)。海水表面付近に設置したフラスコは、水槽底部に設置したノズルから供給された微小気泡群が1m程度浮上する位置にある。このフラスコの下半球に付着したフジツボ個体数は15個体で、コントロールの9個より多かった。二枚貝であるマガキの付着個体数は、海水表面付近及び水槽底面付近に設置したフラスコ共に、微小気泡群で被覆したフラスコの方がコントロールと比べ、個体数が抑制された。海水表面付近のフラスコでは個体数がコントロールの38個体から28個体に、水槽底面付近のフラスコでは個体数がコントロールの52個体から42個体へ、それぞれ減少した。

二枚貝とフジツボを合算した乾燥重量を図8Bに示す。海水表面付近に設置したフラスコでは、コントロールの0.11gに対して、微小気泡群被覆によって0.06gへ、水槽底面付近に設置したフラスコでは、コントロールの0.45gに対して、微小気泡群被覆によって0.28gへ、それぞれ減少した。減少率は、海水表面付近に設置したフラスコで45.5%、水槽底面付近に設置したフラスコで37.8%であった。

図9にフラスコ下半球に付着した二枚貝の殻径分布を示す。海水表面付近に設置したフラスコでは、殻径が3.9mm以下の個体数は、コントロールで27個体、微小気泡群被覆で27個体であった。殻径が4mm以上の個体数は、コントロールで11個体、微小気泡群被覆で1個体であった。水槽底面付近に設置したフラスコでは、殻径が3.9mm以下の個体数は、コントロールの26個体に対し、微小気泡群で被覆したフラスコ下半球では40個体と増加した。殻径が4mm以上の個体数は、コントロールの26個体に対し、2個体と顕著に減少した。これらの結果は、微小気泡群の気泡径分布や単位体積あたりの気泡数に依存せず、微小気泡群がフラスコ近傍を浮上することで、二枚貝幼生の付着・成長が阻害されることを示唆している。



浅型水槽を使用した場合の空気微小気泡群の気泡径分布

単一微小気泡の気泡径分布を、図5に示した3か所で計測した。撮影した画像の一コマを図10に示す。輪郭が明瞭な画像が撮影されており、気泡径計測は十分可能と判断した。画像計測は、各気泡の輪郭が明瞭に写っている気泡のみを対象に、各測定位置で撮影した画像から任意に気泡1000個を対象に、直径を測定した。各測定位置での気泡径分布を図11に示す。ノズルから供給された微小気泡は、上昇するにつれて気泡径分布のピーク径がより大きい方へと推移していた。微小気泡群は、気泡同士の衝突による合体や、気泡の上昇にともなう水圧の減少により、気泡径が増加($PV = \text{一定}$)したと考えられる。

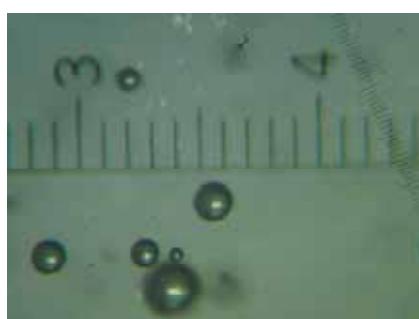


図10 撮影した微小気泡群

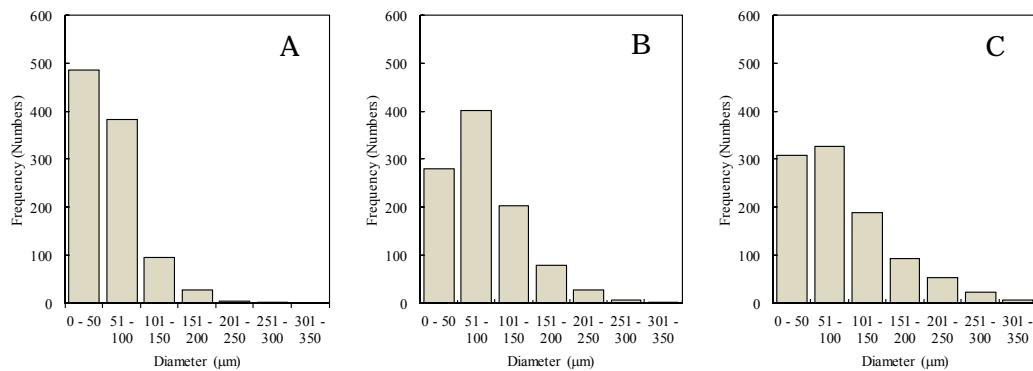


図 11 微小気泡群の気泡径分布

図 11 (A), (B), 及び(C)は、図 5 に示した測定位置に該当する。

研究がもたらす効果及び波及効果

船舶の経済性運航にとって、船底粗度の増加はネガティブ要因である。燃料消費量の増加によって、大気環境へ CO₂ や NO_x, SO_x, particulate matter (PM) の排出量が増加する。船底粗度の増加を抑制するには、船底への生物付着を阻害することが不可欠である。しかしながら、従来同様、難分解性で生物濃縮されやすい船底防汚剤を使用したのでは、海洋環境や生態系の保全が十分ではない。燃料消費量を抑制し、かつ海洋環境への影響を最小にできる船体防汚手法の一つとして、浮上する空気微小気泡群の利用を検討した。この手法は、付着生物の船底への付着を完全に阻害することはできなかったが、付着抑制効果が確認できた。入港前の船速低下時や錨泊時の海域に生息するフジツボ付着期幼生の個体数をリアルタイムで検出できる手法等の開発を行うとともに、微小気泡群で船体被覆し、船底粗度の増加を抑制することが経済性運航につながる。

参考文献

- [1] 山口寿之, 大城 祐, 稲川 翔, 藤本 順, 木内将史, 大谷道夫, 植田育男, 浦 吉徳, 野方靖行, 川井浩史: 外来種ココポーマアカフジツボの越境と遺伝的特性. 遺伝, Vol. 65, p. 90-97 (2011)
- [2] M. P. Schultza, J. A. Bendickb, E. R. Holmb and W. M. Hertel: Economic impact of biofouling on a naval surface ship. *Biofouling*, Vol. 27, p. 87–98 (2011)