

防汚システム管理最適化のための基盤的技術の開発

小島 隆志*, 藤本 修平**, 難波 信由***, サトイト グレン****

Development of Fundamental Technologies to Optimize Management of Antifouling Systems

by

KOJIMA Ryuji*, FUJIMOTO Shuhei**, NAMBA Nobuyoshi*** and SATUITO Glenn****

Abstract

Biofouling on ship hulls has been a growing concern due to its environmental impact, such as the translocation of aquatic invasive species and higher GHG emissions resulting from increased hull resistance. Currently, the use of antifouling paints is one of the prime means of mitigating biofouling. However, it is not possible to completely prevent biofouling on ship hulls. To address the negative impacts of biofouling on the marine environment, the International Maritime Organization (IMO) adopted the 2023 Guidelines for the control and management of ships' biofouling to minimize the transfer of invasive aquatic species (here after, the Guidelines) as well as for the in-water cleaning of ship hulls depending on the degree of biofouling as presented in the Guidelines.

Microfouling, which is the initial stage of hull fouling (biofouling), is not visible to the human eye, making it difficult to assess the degree of fouling early on. Assessment methods for *in-situ* monitoring systems are needed to objectively evaluate biofouling. In this study, two methods were investigated: the first is to evaluate changes in ultrasonic transmission at two points on the hull due to biofouling (ultrasonic bipolar method), and the second is to assess changes in surface parameters using CIELAB color coordinates (color space parameter method). These methods are characterized by the fact that they do not require sampling of attached organisms from the hull and enable *in-situ* observation.

In laboratory tests using specimens, actual states of biofouling were simulated, and both methods showed a correlation between the degree of biofouling and the amount of change in physical properties. These results indicate that both methods are applicable for determining the degree of biofouling.

* 環境・動力系, ** 構造・産業システム系, *** 北里大学 海洋生命科学部, **** 長崎大学大学院 水産・環境科学総合研究科

原稿受付 令和6年1月17日

審査日 令和6年2月26日

目 次

1. はじめに	80
2. 汚損生物種毎の防汚システム管理手法の構築	81
2.1 超音波二探法を用いた防汚システム管理手法の構築	81
2.1.1 フジツボ幼生を用いた実験方法	81
2.1.2 フジツボの成長に伴う超音波エコーの変化	82
2.2 色空間パラメータを用いた防汚システム管理手法の構築	82
2.2.1 褐藻の色空間パラメータを用いた防汚評価手法の構築	83
2.2.2 褐藻を用いた船底防汚塗料性能評価に関する予備的検討	83
3. まとめおよび今後の予定	85
謝辞	85
References	85

1. はじめに

全ての国際船舶が、船体表面を生物付着のない清浄で平滑な状態に維持する場合、船舶からの世界的な GHG 排出量は、少なくとも年間 19% (又は 1 億 9800 万トンの CO₂) 削減できるとされている¹⁾。さらに船舶の生物汚損は、生物越境移動により海洋環境へ悪影響を及ぼす。その一例が船舶のバラスト水を介した水生生物の越境移動であるが、すでに国際海事機関 (IMO) では、その防止に関して「バラスト水及び沈殿物の管制及び管理のための国際条約 (バラスト水管理条約)」を 2004 年に採択し、2017 年 9 月 8 日に発効している²⁾。この条約により、バラスト水起因の生物越境移動への規制・管理に関して、具体的な措置が取られるようになった。一方、船舶の外板等に付着した生物の移動は、海洋生態系の攪乱を促進する点で、バラスト水に取って代わり、海洋環境にとって大きな問題となっている。

そこで IMO は、非強制の船体生物付着管理に関するガイドライン (以下ガイドラインと記す) を 2023 年 10 月に採択し、ガイドラインに基づく、具体的な船体付着生物の管理について指針を示した³⁾。ガイドラインは、生物汚損を Microfouling と Macrofouling に分類し定義している³⁾。Microfouling とは、細菌、真菌、微細藻類、原生動物等の微細な生物がスライム層とも呼ばれる生物皮膜 (Biofilm) を形成する生物汚損を指し、Macrofouling とは、没水構造物や船舶上に、動植物が付着し、その後それらが増殖することで生じる生物汚損で、フジツボ、管性多毛類、二枚貝、藻類葉状体、ホヤ、その他大型の付着、包埋、移動生物等、人間の目に見える (Visible to the human eyes) 大型で明確な多細胞の個体又はコロニー状の生物を含む、と定義されている。

適切な船体付着生物管理に対して、現在最も効果的な防汚技術は、船底防汚塗料 (antifouling paint) である。防汚塗料は、船舶の没水部表面への生物付着を防止する塗料であり、塗料中の防汚機能を示す成分、すなわち防汚剤 (biocide) を非常に緩やかな速度 (1 日あたりの 1cm² の面積からの防汚剤の溶出量は数十 µg) で海水中に溶出させ、塗料表面近傍で防汚剤の忌避・殺生物効果により生物の付着を防止する。適切で効果的な船体付着生物の管理を達成するためには、生物汚損の異なるステージ毎に、すなわち、Microfouling および Macrofouling について、非破壊且つその場 (*In-situ*) で生物汚損を検出できるシステムを構築し、生物汚損の初期段階で、適切に除去することが非常に重要である。また、防汚システムの有効性についても、塗膜の適切な管理が必要となる。

そこで著者らは、船底防汚塗料を対象とする防汚システムにおいて、生物汚損の早期検知及び適切な塗膜管理システムの構築を目的として、超音波二探法および色空間パラメータを用いた簡易検出技術に関する基盤的技術の開発に取り組んだ。具体的には、前者については、汚損生物を動物種とする、フジツボ幼生を用いた検出法、及び塗膜管理の測定手法について、後者については、汚損生物を植物種とする、藻類を用いた検出法について検討したのでここに報告する。

2. 汚損生物種毎の防汚システム管理手法の構築

2.1 超音波二探法を用いた防汚システム管理手法の構築

船体外板(船体外板表面)に付着したフジツボを、船体内部からの超音波照射により検出する手法を検討した。従来は超音波探触子を一つだけ使用する一探法で付着生物検出の検討をおこなっていた⁴⁾。本研究では計測対象範囲を拡大させるために、2つの超音波探触子を使用する二探法を用いた計測方法を検討した。実験室内で試験片にフジツボを付着・成長させ、成長の各段階において二探法でエコーを計測した。その後、フジツボの成長に伴う超音波エコーの変化を解析し、超音波によるフジツボ付着検出技術の実現可能性について検討した。

2.1.1 フジツボ幼生を用いた実験方法

図1に実験装置の概要を示す。200mm×150mm×板厚10mmの一般構造用鋼SS400に防食塗装(中国塗料製バンノー500を100μmの膜厚で塗装)を施したものを試験片とした。試験片の片面に2本の超音波探触子(帝通電子研究所製、斜角探触子5Z10 10A45)を接触させてボルトで固定した。超音波探触子の一方は信号を発信し(発信子)、もう一方はその信号を受け取る(受信子)。発信子から発射された超音波は、図1の左図のように試験片内を複数回反射して受信子に到達する。このとき試験片の反対面(超音波探触子が接触している面の反対側の面)にフジツボが付着していれば、超音波エコーの反射に影響を及ぼす。具体的には、フジツボ付着により試験片表面でのエコー透過率等が変化するため、受信子で検出されるエコーが低下すると考えられる。そこで、このエコー低下を検知し、フジツボ付着を検出する方法を試みた。

フジツボを付着・成長させるため、試験片一式を海水で満たされた試験水槽中に浸漬した。超音波プローブに海水が直接接触しないように試験板にプラボックスを接着し防水処理を施した(図1の右図)。図2は試験片表面でのフジツボ成長の様子を示す。時間経過に伴いフジツボが成長していく様子が判る。一連のフジツボ付着・成長および超音波計測実験は、長崎大学内で実施した。

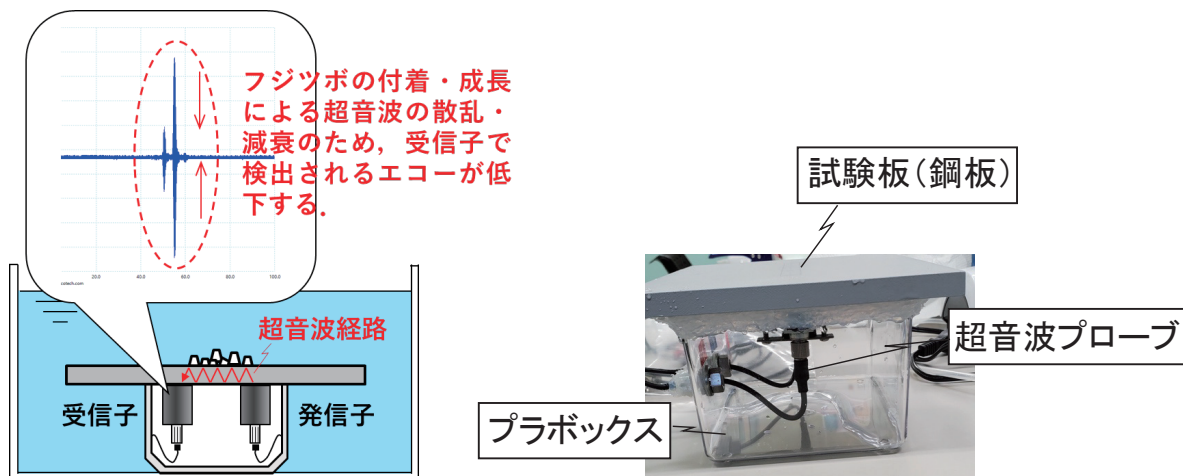


図1 実験装置の概要

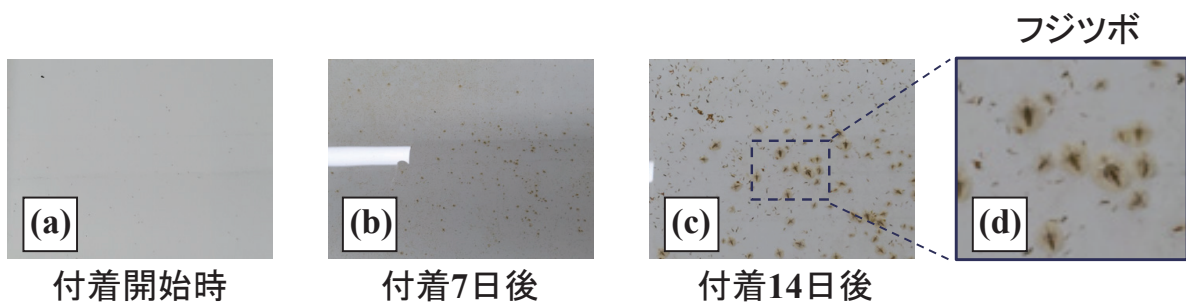


図2 試験板上でのフジツボの成長

2.1.2 フジツボの成長に伴う超音波エコーの変化

受信子で計測された超音波エコーの波形の例を図3(a)に示す。このエコー波形の変化を検出する一手法として、エコーの積分値を考えた。図3(a)の波形と横軸で囲まれた領域の面積（以下、エコー積分値と記す）を算出し、エコー変化の指標とした。図3(b)はエコー積分値の経時変化を表している。図3(b)の付着後経過日数0日は図2(a)に対応する。計測の結果、フジツボの成長に伴い、エコー積分値が減少していく傾向が見られた。全体の傾向としてフジツボ付着後の経過日数が増えるほどエコー積分値が低下していく。これはフジツボの成長に伴って試験片表面（フジツボが付着している面）での反射波の強度が減衰していることを意味している。反射波の強度低下の原因は、フジツボが付着することにより試験片表面での水中への透過波が増大（反射波が減衰）するためと考える。以上の結果から、エコー積分値を算出することによりフジツボの付着・成長を検出できる可能性を示した。

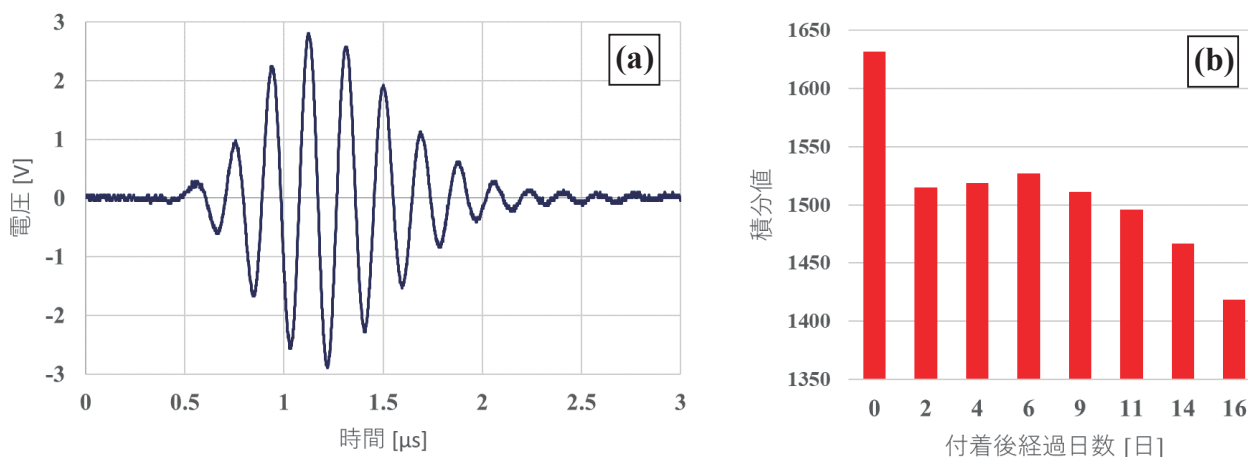


図3 フジツボ成長に伴うエコーの変化。(a) 超音波エコーの例、(b) エコー積分値の変化

2.2 色空間パラメータを用いた防汚システム管理手法の構築

船底防汚塗料の付着藻類への影響について、これまでの検討では、藻類に含まれる色素（クロロフィル等）を有機溶媒（*N,N*-dimethylformamide: DMF）で抽出し、その蛍光強度の減衰により評価した。しかし、用いたDMFの毒性が高いことや、抽出工程及び測定において試料を全量使用する必要があること、試験毎に測定する蛍光強度値が変わる等、評価方法の課題が判明した。これまでの実験結果からは、船底防汚塗料は付着藻類の色調に変化を与えていることを既に確認しており、色素の吸収する光の波長、すなわち色調が変化する現象に関して、藻類の明度、色彩、彩度をその場(*in-situ*)でパラメータ化（色空間パラメータ：Color space）することで、藻類の船底防汚塗料の影響を客観的に評価できると考えた。その評価手法として藻類の色変化を、色空間パラメータにより表現することの有効性について基礎実験を実施した。

色空間パラメータは、図4に示すようにCIELAB(白-黒： L^* 、 a^* ：緑-赤、 b^* ：青-黄)の各パラメータから、明度、色彩及び彩度を数値で3次元データとして表現したものである⁵⁾。主要な船底汚損藻類である褐藻を供試生物とし、船底防汚剤の一つである亜酸化銅 (Cu_2O) 含有量が、色空間パラメータで表現される褐藻の色に及ぼす影響を調査した。また、褐藻の色空間パラメータを用いた評価法の有効性⁶⁾を確認するため、適切な細胞染色法を検討し、これを用いて、褐藻の細胞生存率と亜酸化銅含有量との相関を調べた。また、流水式生物試験装置の最適化、付着基盤に合わせた供試試験片の塗装法、試験条件、及び藻類の供試条件を検討しラボ生物試験のための基礎的資料を蓄積した。

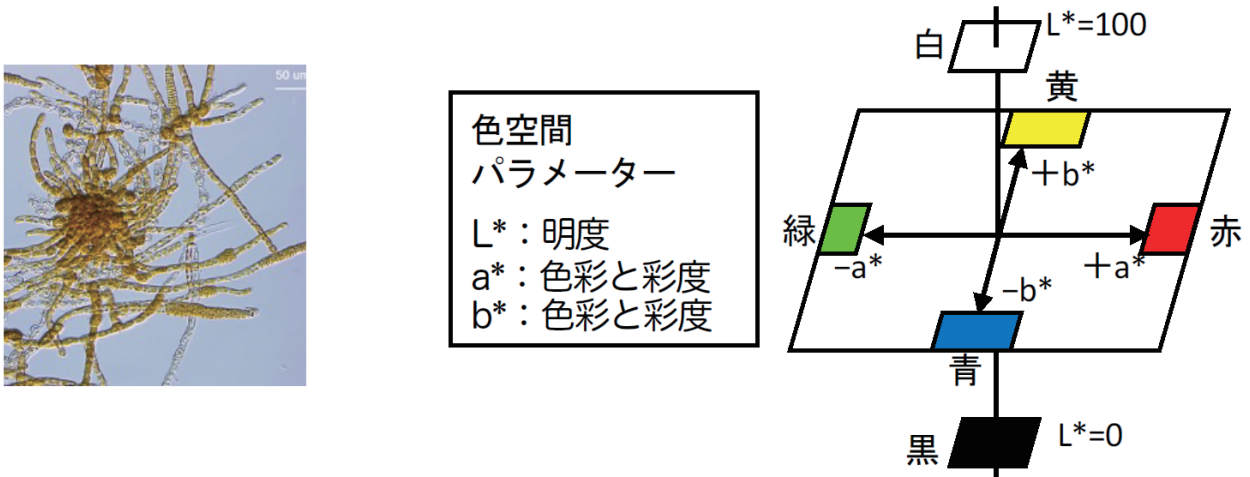


図4 供試生物 (褐藻シオミドロ : Ectocarpus sp.) (左), 及び色空間パラメーターの概念図 (右)

2.2.1 褐藻の色空間パラメータを用いた防汚評価手法の構築

Cu₂O 配合量を 0wt%~40wt%の範囲で系統的に変化させた試験塗料を, 5cm 角の PVC (Polyvinyl Chloride) 板へ塗装し, これを供試試験片とした. 供試試験片は, 回転養生装置に取り付けられ, 水温 20°C, 回転速度 20 ノット, 45 日の養生条件に付された. 養生後の試験片 (実験区とする), 及び PVC 板 (対照区とする) に, 褐藻を固定した付着基盤を取り付け, 煮沸処理した天然海水中で, 水温 20°C, 光照射 20μmol/m²/s (12 時間明/12 時間暗のサイクル), 24 時間の暴露試験を実施した. 暴露試験後, 実験区および対照区の褐藻に対して, 色彩色度計 (RM200QC, X-rite 社) を用いて色空間パラメータを測定した. この結果, Cu₂O 配合量に対して, 褐藻の実験区と対照区の色空間パラメータとの間に有意差を示し, 色空間パラメータを用いた評価法は妥当であることを示した (図5).

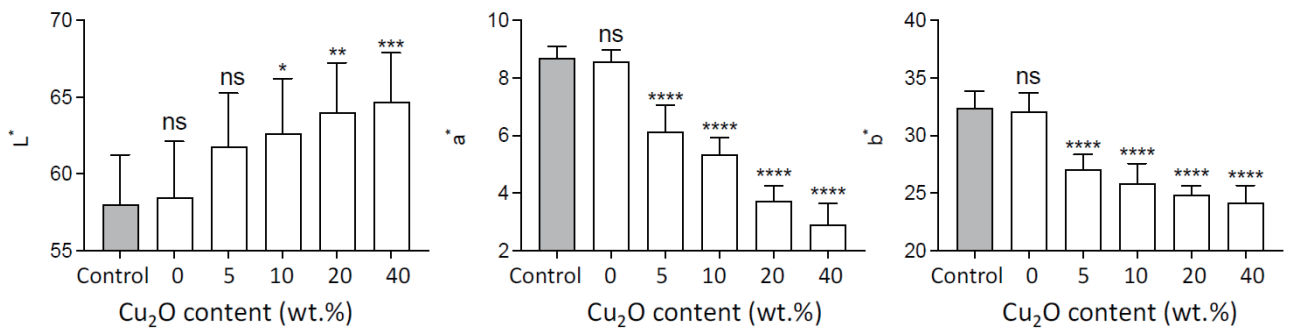


図5 Cu₂O 配合量と色空間パラメータとの関係. 図中の NS は Non-significance を, エラーバーは色空間パラメータの標準偏差 (Standard Deviation: SD) を, アスタリスク *, **, ***, **** は変数間の統計的有意差 (p < 0.05) を表す.

2.2.2 褐藻を用いた船底防汚塗料性能評価に関する予備的検討

色空間パラメータを用いた評価が妥当であることから, 船底防汚塗料の性能評価のためのラボ生物試験に関する予備的検討を行った. 生物試験装置 (図6) を作成し, 付着基盤に合わせて供試試験片の塗装法の検討 (図7), 試験水交換率 (0.67 turnover/h) や暴露期間 (24 時間), 水温 (20°C) 等の試験条件を最適化し, 藻類の供試条件 (生物活性) を検討する等, 生物試験法を完成した⁷⁾. 生物試験法の妥当性を示すため, 適切な細胞染色法を用いて, ラボ生物試験後の褐藻の色空間パラメータと, 細胞生存率との関係を調査した.

その結果, 色空間パラメータによっては, 細胞生存率との高い相関を示し, 色空間パラメータの再現性および有効性を確認できた (図8). このことから, 実際に船体外板に付着した藻類活性に関して, 色空間パラメータを用

いて *in-situ*, かつ非破壊で推測できる可能性が示された. 以上より, 褐藻を用いた船底防汚塗料の性能評価について, 流水条件下でのラボ生物試験に必要な基礎的資料が蓄積できた⁷⁾.

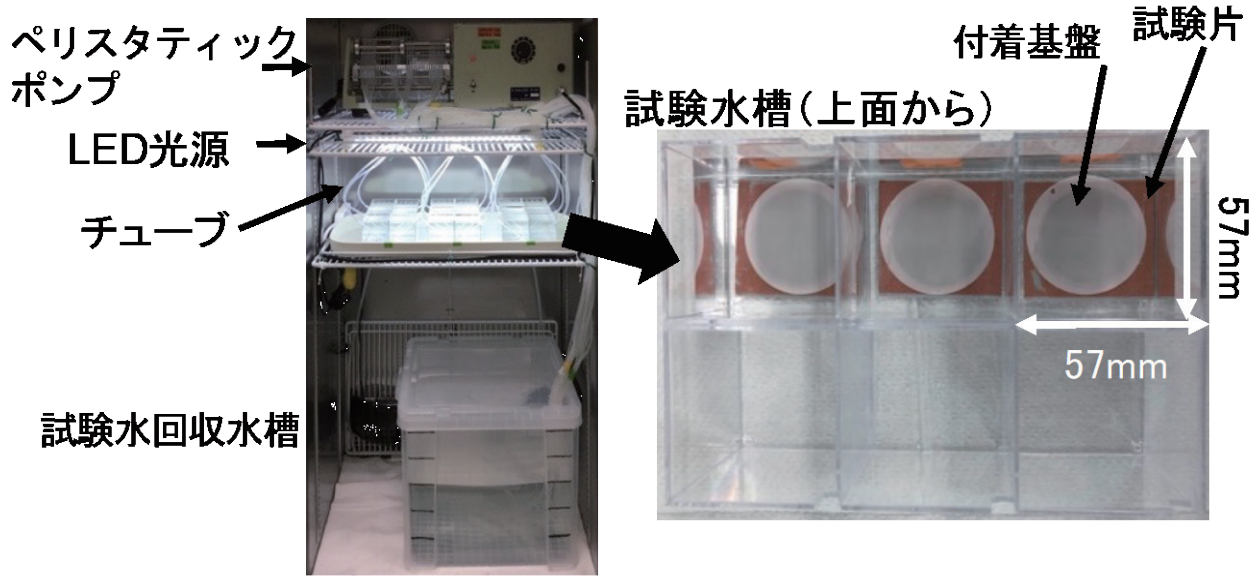


図6 ラボ生物試験装置及び試験水槽

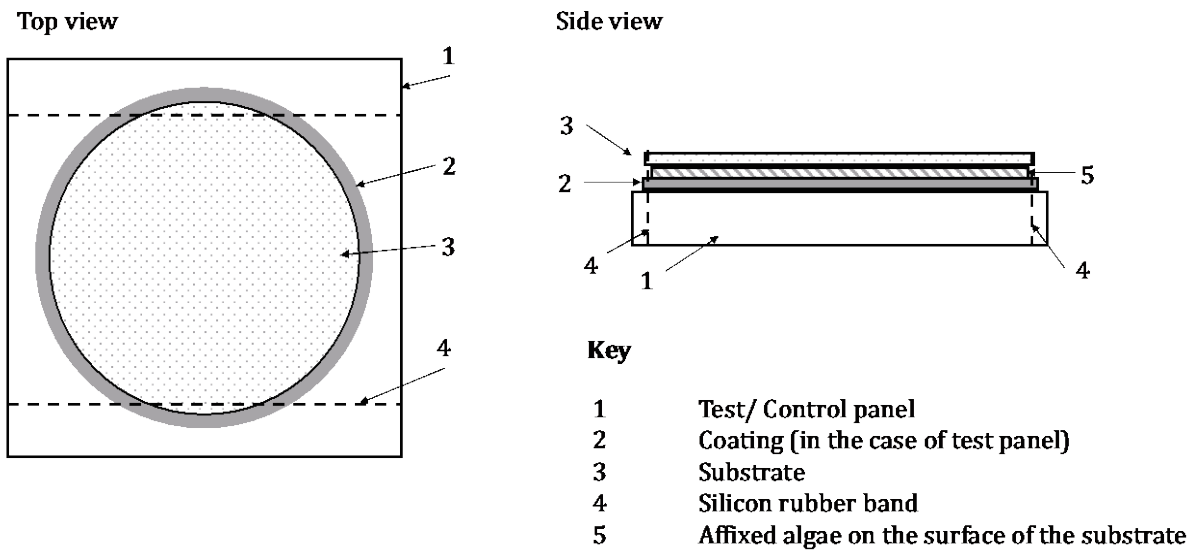


図7 供試試験片の上面図(左図)及び側面図(右図)

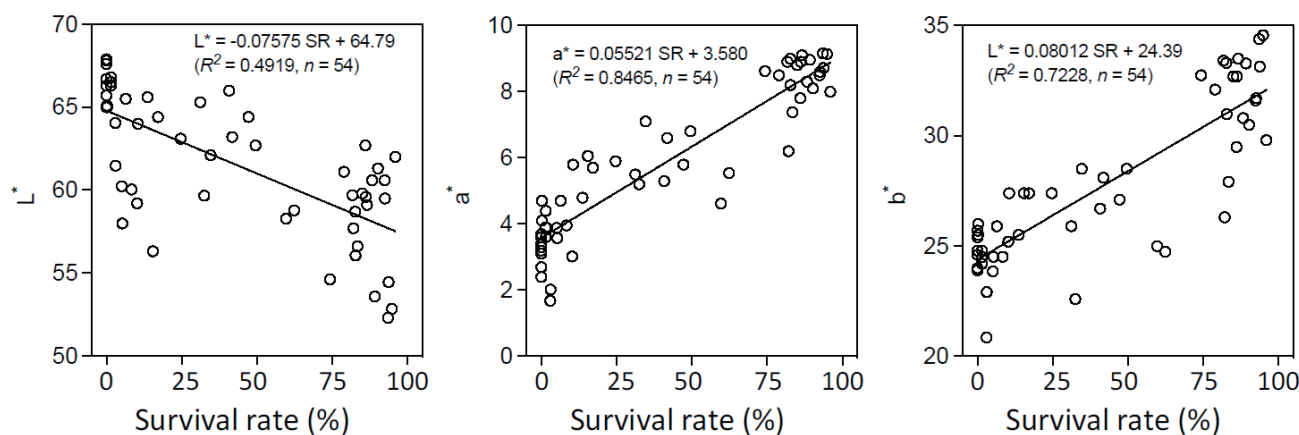


図8 褐藻を用いたラボ生物試験での細胞生存率と色空間パラメータとの関係 (図中に相関式, 相関係数(R^2)及び試料数(n)を示す.)

3. まとめおよび今後の予定

本研究で検討した, (1) 超音波二探法を用いた, フジツボによる汚損の簡易評価手法, (2) 色空間パラメータを用いた, 藻類による汚損の簡易評価手法は, いずれも基礎技術(音響計測技術/分光計測技術)を新規分野に適用し, 実用化を目指す応用研究である. 本研究は, 従来方式と比して現場の計測員が簡易に, かつ *in-situ* で観察ができる手法であり, これら手法の有効性及び再現性を示した. また, 本試験法で構築した流水式ラボ生物試験及び評価法の妥当性を予備的に評価し, 色空間パラメータによる評価のための基礎的資料を蓄積した. 現在, ガイドラインでは, 代表的な汚損生物である, フジツボ幼生や藻類による汚損度を実際に現場で判断・評価するための手法が十分に整備されていない状況である. 本研究で構築した手法を実船に管理及び適用することが期待されるが, そのためには, 船体外板の状況, 船舶運航管理の把握, 計測位置の検討等, さらに実条件での検討が必要であることも, 今後の課題として示された. 今後, 超音波による船体付着生物検出技術が確立できれば, 先進的な船体外板メンテナンス法の基礎となり, 国際競争力の向上に繋がることを期待される. また, 褐藻を用いた本研究の成果を基に, これまで動物種(イガイ, フジツボ)^{8, 9)}を用いて規格化した ISO 21716 シリーズ^{10, 11, 12)}への追加提案(part-4: 藻類)及びその規格化が期待される. その結果, 上市されている船底防汚塗料の中から, 防汚性能の明確な区別, および適切な製品の総合的な選択が, 誰でもできるようになり, 我が国の塗料メーカーの技術的優位性について, 高まることを期待される¹³⁾.

謝 辞

本検討を実施するにあたり, 神戸大学の川井浩史先生には, 海藻系統株コレクション(The Kobe University Macro-Algal Culture Collection: KU-MACC)の褐藻(KU-1372)の分譲で, また, 中国塗料株式会社の谷野聡一郎氏及び名部玲乃氏には, 試験片の作成及び養生で, 大変お世話になった. ここに感謝の意を表する.

References

- 1) GEF-UNDP-IMO GloFouling Partnerships Project and GIA for Marine Biosafety. Analyzing the impact of Marine Biofouling on the Energy Efficiency of Ships and the GHG Abatement Potential of Biofouling Management Measures, 2022.

- 2) IMO. The International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments (The Ballast Water Management Convention). 2004.
- 3) IMO. 2023 GUIDELINES FOR THE CONTROL AND MANAGEMENT OF SHIPS' BIOFOULING TO MINIMIZE THE TRANSFER OF INVASIVE AQUATIC SPECIES, Resolution MEPC.378(80), 2023.
- 4) 藤本修平, 亀山道弘, 谷口智之, 島田道男, 西崎ちひろ, 船体内部からの船体外板生物付着検知手法の基礎検討, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 29 号, (2019), pp.535-539.
- 5) ASTM D 2244-07. Standard practice for calculation of colour tolerances and colour differences from instrumentally measured colour coordinates; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2005.
- 6) Nanba N, Machii M, Keng LB and Sakurai N, 1995. Studies on inoculation of aerial algae. I. Semi-mass culture and quantification of algal colour of *Klebsormidium flaccidum* (Ulotrichales, Chlorophyceae) sprayed on to concrete board, *Physiological Research*, 43: 117-119.
- 7) Kojima R, Nanba N, Satuito G. A method for screening antifouling paints using the CIELAB coordinates of *Ectocarpus* sp. under a flow-through condition. *Biofouling* 2023; 39: 399–409.
- 8) R. Kojima, S. Kobayashi, K. Matsumura, C. G. P. Satuito, Y. Seki, H. Ando and I. Katsuyama, 2019. Designing a Laboratory Bioassay for Evaluating the Efficacy of Antifouling Paints on *Amphibalanus amphitrite* Using a Flow-through System. *Coatings*, 9 (2), 112; doi. 10.3390/coatings9020112.
- 9) R. Kojima, S. Kobayashi, C. G. P. Satuito, I. Katsuyama, Y. Seki, H. Ando and T. Senda, 2016. A Method for Evaluating the Efficacy of Antifouling Paints Using *Mytilus galloprovincialis* in the Laboratory in a Flow-through System, *PLoS ONE*, 11 (12), e0168172; doi. 10.1371/journal.pone/0168172.
- 10) International Organization for Standardization. (2020). Ships and marine technology- Bioassay methods for screening anti-fouling paints- Part 1: General requirements (ISO 21716-1: 2020).
- 11) International Organization for Standardization. (2020). Ships and marine technology- Bioassay methods for screening anti-fouling paints- Part 2: Barnacles (ISO 21716-2: 2020).
- 12) International Organization for Standardization. (2020). Ships and marine technology- Bioassay methods for screening anti-fouling paints- Part 3: Mussels (ISO 21716-3: 2020).
- 13) 小島隆志, 千葉知義, 安藤裕友. 船底防汚塗料の防汚性能評価試験法に関する国際規格化への取組, 2018 年. 海上技術安全研究所報告, 第 19 巻, 第 2 号特集号 (令和元年度) 総合報告, pp. 33-41.