

— 論 文 —

光沢度を用いたカキ着定基質の表面粗さの定量化の試み*

梶原 直人^{1**}・浜口 昌巳¹

要 旨

付着生物にとっての着定基質構造の評価を行う一環として、産業重要種であるマガキ *Crassostrea gigas* 幼生採苗器 (カキ幼生コレクター) の表面粗さの定量化を、光沢度を用いて試みた。その結果、カキ幼生コレクターの表面では光沢度が 3.6 以下で幼生は 24 個体/cm² 以上、裏面中心部では光沢度が 8.6 以上で幼生は 10 個体/cm² 以下となり、カキ幼生コレクターの部位毎の光沢度及びマガキ幼生の付着数には有意な相関が認められた。次に、紙やすりを用いて光沢度の値を凹凸の粗さに対応させることを試みた。その結果、紙やすりの粒径と光沢度は、決定係数が低いものの有意な相関が認められた。また、0.25 mm 以上の凹凸では光沢度が測定出来ないことも明らかとなった。表面粗さの定量化については今後もさらなる詳細且つ多様な解析が必要であるが、本研究結果からは、カキ稚貝の密度が最も高くなる基質表面の粗さとそれを示す光沢度を解明できる可能性が示された。これらの成果を応用することで、将来的にカキ幼生の採苗密度の向上が期待できる。

キーワード：光沢度，カキ幼生コレクター，着定基質，カキ浮遊幼生，マガキ

1. 緒言

付着生物にとって、着定する基質表面の性状は重要な生息環境要因の一つであることが知られている (浅井ら, 1997; 後藤ら, 2003; 大垣, 2008; 森ら, 2017; 花房, 1999b)。とりわけ、平滑な表面を持つ基質においては、付着生物の着定に適していないことを示す事例が多い。平滑な表面の基質において付着生物の着定に不利であるという現

象は、肉眼により観察された印象どおりの結果となることもあって、科学的・定量的な検討や知見が不足しており、その測定法も確立されていないのが現状である。一方で、付着生物の中にはカキ類をはじめとする二枚貝の他にも、海藻類等水産有用種が多く含まれており、これらは適切な時期に採集苗器を海中に投入して天然採苗が行われ、それを使って各地で養殖漁業が行われている。そのため、使用する天然採苗器の着定の効率を上げることが出来ればこれらの漁業に大きく貢献できると考えられる。しかし、これらの付着生物や藻類の好適な着定基質に関する科学的・定量的知見も同様に不足していることから、取り扱いや価格に優れる新たな材質の着定基質を評価する際には、採苗期を通して実際に対象種を着定させ、その密度から着定基質としての評価を行うという長期間にわたる作業が必要となる。さらに、高密度で着

* 2021 年 12 月 16 日受領 2022 年 2 月 18 日受理
著作権：日本海洋学会, 2022 年

1 国立研究開発法人 水産研究・教育機構水産技術研究所
廿日市拠点
〒739-0452 広島県廿日市市丸石 2-17-5

** 連絡著者：梶原直人
e-mail : naotok@fra.affrc.go.jp

定するという結果が得られたとしても、どのような作用機序でその結果に至ったのかが解析出来ないのが現状である。池上(2007)は、接着面の表面粗さについて、表面粗さの凹凸が大きくなると真実接着面積が増加して接着強度が向上するとしている(表面積効果)。一方で、表面粗さの凹凸があまりに大きい場合、接着剤は表面粗さの輪郭の底の部分を中心に覆うことが出来ず、この部分が接着部の欠陥となって見かけ上接着強度が低下するとしている(界面欠陥効果)。このように、基質の接着強度には最適な表面粗さの存在が認められる。付着生物においても、着定基質への確実な付着を接着強度の面から保障するために、その種類や大きさにおいて基質に付着するための最適な表面粗さが存在する可能性があり、それを定量的な計測によって確認することは非常に重要である。

これらの問題を克服するためには、基質の平滑さまたは粗さを定量化する手法が有効と考えられるが、水産分野においてそのようなアプローチを行った研究は見当たらない。これには、表面粗さを定量化する手法が水産分野において広く認知されているとは言いがたいことや、表面粗さの定量化にあたって高価で専門的な計測機器を調達する必要があることが懸念となっていると考えられる。これらの懸念を払拭し安価・簡便に表面粗さの定量化を行う上で、工業製品の仕上げ品質を現場で安価・簡便に定量的な指標として広く用いられている光沢度(童ら, 1991; 深尾ら, 2013; 松田ら, 1982)に着目した。これを付着生物の好適な基質の評価に応用できれば、非常に有効な手法となる可能性がある。

本研究では、付着生物の着定基質表面の性状を定量的に評価するための一端として、安価・簡便であり小型で現場への持ち運びも容易なことから他分野において広く用いられている光沢計を用いて光沢度を測定し、実際にマガキ *Crassostrea gigas* (以下カキ) の採苗に用いられているホタテガイ *Mizuhopecten yessoensis* 貝殻製の幼生採苗器(カキ幼生コレクター)においてカキ稚貝付着数と光沢度との関係を解析した。また、光沢度が基質の表面粗さの指標として妥当であるかどうか検証する目的で、規格の異なる紙やすりにおいても光沢度の測定を行い、表面粗さによる着定基質の評価における光沢度の有用性及び定量性を検証した。これらの結果から、付着生物に

おける着定基質の評価を安価・簡便に行うとともに、定量的に基づいた評価の高度化と両立することで、付着生物の生息場としての着定基質の評価とその普及に貢献することを目的とした。

2. 材料及び方法

本研究においては、基質の表面粗さの定量的な数値化を試行するための機材として、光沢計(佐藤商事 MJ-GM26C)を用いた。光沢計は主に工業製品の仕上げ品質を客観的に検証する目的で用いられ、測定対象を測定部で覆って閉鎖した空間とした後、測定部内の角度をつけた2カ所の光源から測定対象へ光を照射し、その反射によって得られた光の強弱を Gloss Unit (光沢度: 以下GU) という単位で計測するものである。すなわち、測定対象の表面が平滑であれば光源から反射した光は強いいため高い光沢度を示し、測定対象の表面が粗面であれば光源から反射した光は弱いいため、低い光沢度を示すという測定原理である。本機種の製品諸元によれば、測定部の測定面積は 7×14 mm の楕円である。さらに、光沢計の測定法は JIS (Z8741) に準拠しており、幅広い分野や用途で認められているものである。また、本機種は安価で小型及び乾電池駆動であることから、現場へ導入しやすい利点もある。なお、光沢計において光沢度を測定するにあたり、光源の測定角は標準的な光沢度の範囲の測定に適している 60° に設定した。

本研究では付着生物の着定基質として、ホタテガイ貝殻製のカキ幼生コレクター(以下コレクター)を用いた(Fig. 1a, b)。コレクターは2020年8月に広島県広島湾内に設置され、採苗後に回収されたもので、全てのコレクターにおいてカキ稚貝がある程度の付着数で着定されていることが確認できた左殻を用いた。Fig. 1a, b から明らかなように、コレクターの表面と裏面、さらに裏面においては中心の穴に近い部分と縁辺部(縁から約2 cm 程度内側まで)ではカキ稚貝の数に大きな差があると考えられた(Fig. 1c)。そこで、コレクターの表面について縁辺部と中心部の測定を分離して行う必要性を判断する目的で、コレクター表面において縁辺部と中心部においてカキ稚貝の付着数に差があるかをあらかじめ検証した。光沢度や表面及び裏面のカキ稚貝付着数を同時に測定す

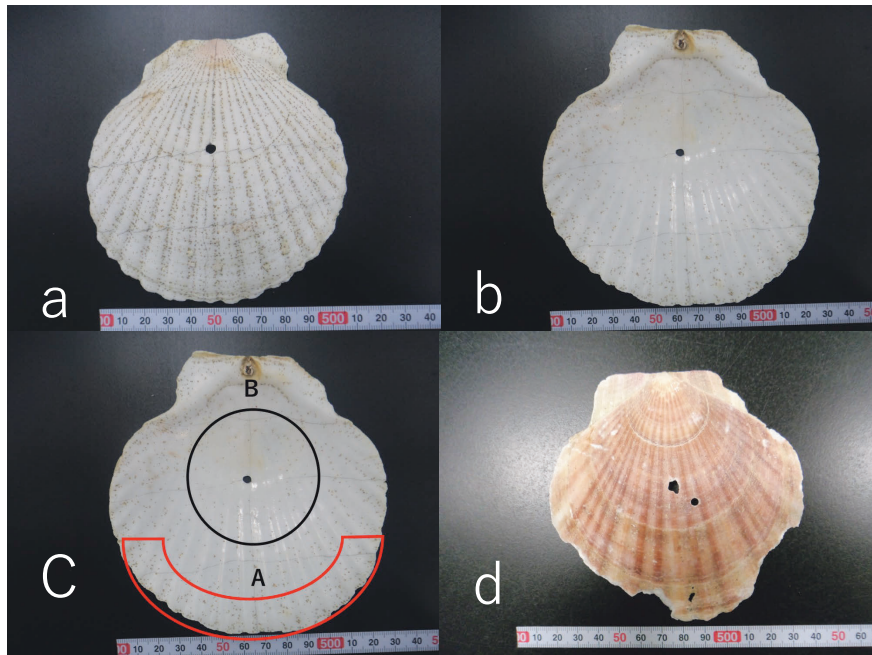


Fig. 1 a : Front of the collector for spat collection made of scallop shell (left valve). Oyster larva with small dots attached. b : Back of the collector for spat collection made of scallop shells (left valve). Oyster larva with small dots attached. c : Backside edge (A) and center (B) of the collector for spat collection (left valve). Oyster larva with small dots attached. d : Front of the collector for spat collection (right valve).

るコレクターの予備である5枚のコレクターを用いて、表面の縁辺部（縁から約2 cm 程度内側まで）と中心の穴付近で1 cm 四方の枠取りをコレクター1枚あたり5回ずつ行いカキ稚貝の計数を行った。その結果、表面の縁辺部が平均 14.84 ± 3.16 個体（標準偏差）、中心の穴付近で平均 15.76 ± 3.37 個体（標準偏差）であり、顕著な差は認められなかった。また、Kruskal-Wallis の検定を用いて解析した結果、表面の縁辺部と中心の穴付近のカキ稚貝付着数に有意な差は認められなかった。この結果から、本研究ではコレクターの表面については縁辺部と中心部の測定を分離して行わなかった。

次に5枚のコレクターの表面と裏面縁辺部及び裏面中心部において、1 cm 四方の枠取りをコレクター1枚あたり各5回ずつ行いカキ稚貝の計数を行った。そのうえで、粘着性のある柔軟なシリコンパテにカキ稚貝のみを付着させてコレクターから剥離させた後、コレクターの表面と裏面縁辺部及び裏面中心部において光沢計による光沢

度の測定をコレクター1枚あたり各5回ずつ行なった。また、コレクターには曲面の部分があり、特に光の反射を計測する光沢計での測定に支障を来すことから、コレクターを裏面縁辺部及び裏面中心部に分割して平面に近づけたうえで測定を行った。さらに、Fig. 1b のコレクターに付着しているカキ稚貝について、殻長を把握する目的でランダムに30個体の殻長（長径）を画像計測アプリケーション Touch De Measure Ver. 0.5（榎本ら, 2017）を用いて計測した。

また、光沢度による表面粗さの定量化の妥当性を検証する目的で、粗さの異なる紙やすりを用いた光沢度の比較を行った。紙やすりはJIS R 6010（研磨布紙用研磨材の粒度による規定）によって研磨剤の粒径が細かく定められており、これを利用して数種の研磨剤の粒径を持つ紙やすりの光沢度を求めた。用いた紙やすりの規格（番手）は、#30（研磨剤の粒径は0.5 mm が92%以上：以下粒径0.5 mm とする）、#50（研磨剤の粒径は0.250 mm

が96%以上：以下粒径0.25 mmとする), #100 (研磨剤の粒径は0.125 mmが96%以上：以下粒径0.125 mmとする), #180 (研磨剤の粒径は63 μm が90%以上：以下粒径0.063 mmとする), #1200 (研磨剤の累積沈降高さ95%の粒径は10.2 μm ：以下粒径0.010 mmとする)の5種類に設定した。また, #2500 (研磨剤の累積沈降高さ95%の粒径は5.4 μm ：以下粒径0.005 mmとする)では同じく研磨目的に用いるダイヤモンドシートの光沢度を測定したため, 計6種類の設定とした。これらの測定についても各粒径毎に5回ずつ行った。統計検定について, 相關にはEXCELの関数ライブラリを, Kruskal-Wallisの検定にはKTS&C社のフリープログラム tah48.exeを使用した。

3. 結果

各番手の紙やすりにおける光沢度を Fig. 2 に示す。光沢計では, 粒径0.25 mmの紙やすりにおいて光沢度を検出できなかった。また, 粒径0.5 mmの紙やすりにおいても同様に光沢度を検出できなかったため, 粒径0.25 mmよりも粗い粒径では光沢度の測定は不可能と判断して図示しなかった。粒径0.125 mmから粒径

0.005 mmでは光沢度が測定され, 紙やすりの粒径が小さくなるほど光沢度が大きくなる傾向がみられた。紙やすりの粒径と光沢度との関係は, 5%水準で有意な相關が認められた。なお, グラフ上の粒径0.010 mmでは, 5回の測定値が同じであったために平均値だけが図示されているように標記されている。

コレクターに付着しているカキ稚貝の殻長は, 0.39 ~ 1.23 mmの範囲で, 平均殻長は 0.59 ± 0.15 mm (標準偏差)であった。コレクター5枚の各部位における1 cm四方のカキ稚貝付着数を Fig. 3 に, 光沢計の測定値を Fig. 4 に示す。カキ稚貝の付着数は, コレクター表面, 裏面縁辺部, 裏面中心部の順に少なくなった。カキ稚貝の付着数の範囲は, コレクター表面で24 ~ 50 個体/cm², 裏面縁辺部で4 ~ 28 個体/cm², 裏面中心部で1 ~ 10 個体/cm²であった。光沢度は, カキ稚貝の付着数とは逆にコレクター表面, 裏面縁辺部, 裏面中心部の順に高い値となった。その範囲は, コレクター表面で0.8 ~ 3.6, 裏面縁辺部で3.7 ~ 8.9, 裏面中心部で8.6 ~ 18.2であった。Kruskal-Wallisの検定+Scheffeの多重比較法を用いてコレクター各部位による比較を行った結果, コレクターの各部位におけるいずれの部位の比較においても1 cm四方のカキ稚貝付着数では, 1%水準で, 光沢度に

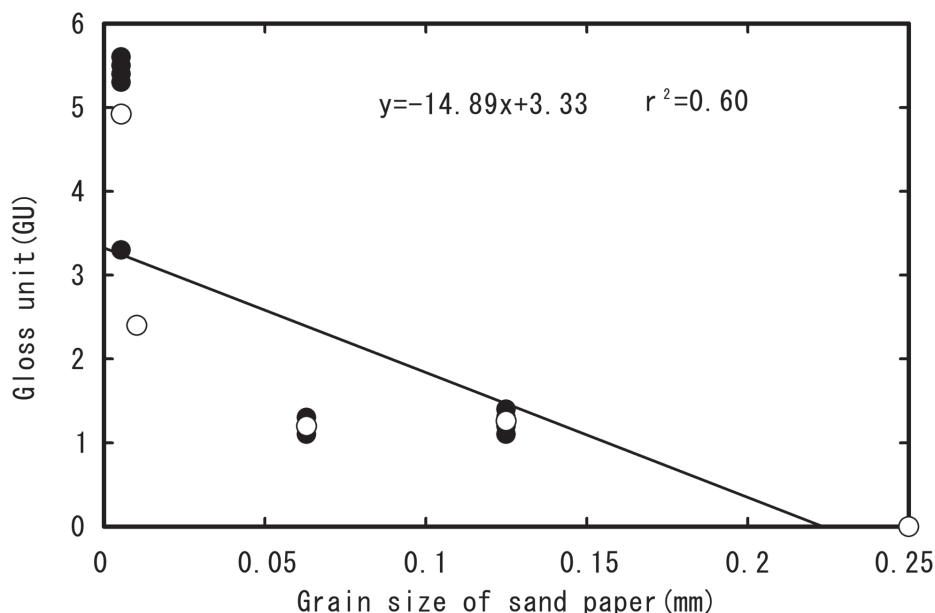


Fig. 2 Relationship between grain size of sandpaper and gloss unit. ○:Mean.

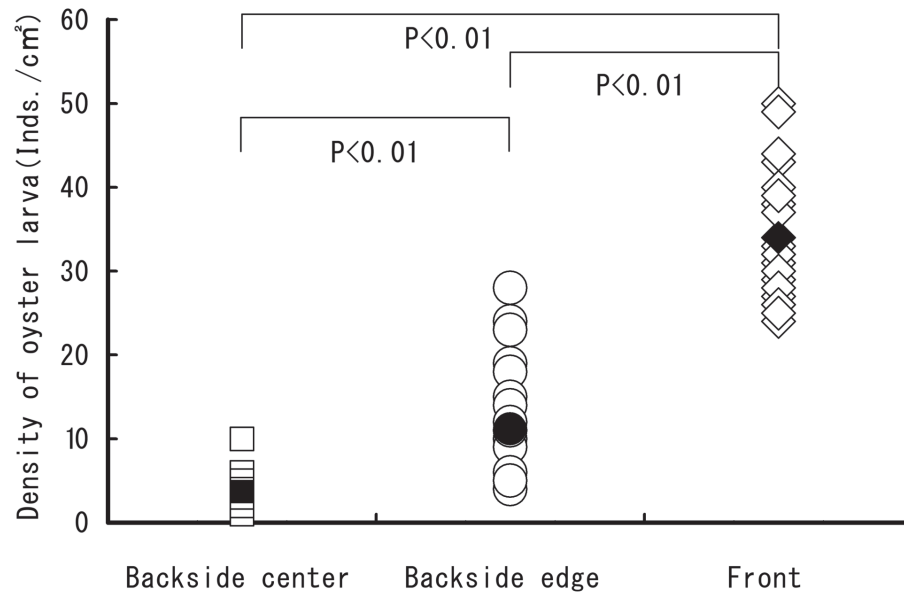


Fig. 3 Density of oyster larva in each part of five collectors for spat collection. □ : Backside center. ○ : Backside edge. ◇ : Front. Each black symbol is mean number. P: significant level at Kruskal-Wallis+ Scheffe's multiple comparison procedure.

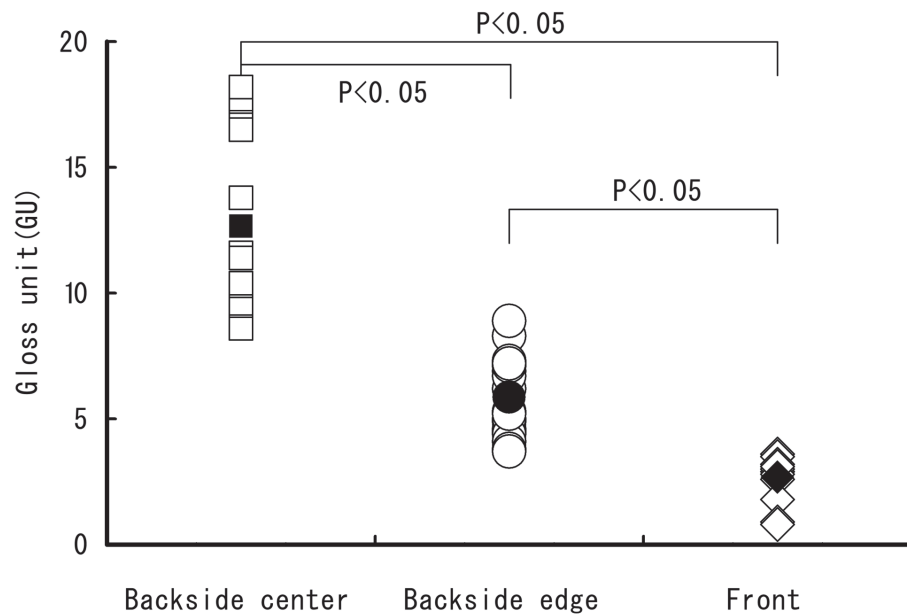


Fig. 4 Gloss unit in each part of five collectors for spat collection. □ : Backside center. ○ : Backside edge. ◇ : Front. Each black symbol is mean value. P: significant level at Kruskal-Wallis+ Scheffe's multiple comparison procedure.

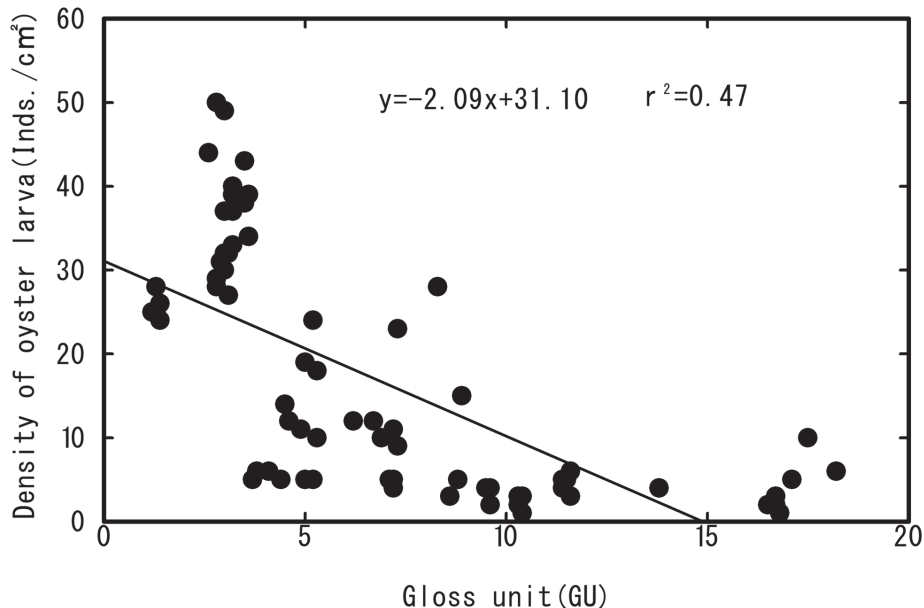


Fig. 5 Relationship between gloss unit and density of oyster larva.

においては5%水準で有意な差が認められた。

光沢計の測定値とコレクターにおけるカキ稚貝付着数との関係を Fig. 5 に示す。両者には5%水準で有意な相関があり、光沢度の増加に伴ってカキ稚貝の付着数は減少した。

4. 考察

本研究結果においては、粒径0.5 mm、粒径0.25 mmの紙やすりにおいて光沢度を検出できなかった。これについては、ある一定以上の粗面では本研究に用いた光沢計の測定範囲を逸脱していることを示していると考えられ、光沢度の利用における適性を示していると考えられる。すなわち、粒径0.25 mmに相当する着定基質の表面粗さの評価には、光沢度を利用することは困難であることを示している。光沢計は光沢を光源からの光の反射を受光することによって計測する原理であり、粒径0.25 mm程度の粒径では乱反射が頻発して光源の反射光を受光できずに光沢度が測定出来ないものと考えられる。ただし、マガキ幼生は殻長0.3 mm程度で浮遊生活から着定に移行するとされており(日本水産資源保護協会, 2003), 着定期に移行する幼生と同程度のサイズの凹凸

であるため、着定に対して影響することは考えにくく、ホタテ貝殻製のカキ幼生コレクターにおいて光沢度を基質の表面粗さを定量的に評価する指標として、粒径0.25 mmまでの着定基質表面の性状の解析に用いることに支障は無いと考えられる。さらに、粒径0.25 mm程度の着定基質では着定時の殻長とほぼ同等の凹凸が存在することになるため、カキ幼生着定基質としての粒径0.25 mm以上の表面粗さの評価の必要性については今後別途議論する必要がある。また、カキ稚貝の殻長より十分に大きな凹凸がある場合、凹部に集中して付着することも考えられるため (Fig. 1a), それについての議論も今後の課題である。一方で、粒径0.25 mm程度の表面粗さの着定基質としての評価は、着定サイズがカキ幼生よりも大きい(0.5 ~ 1 mm)フジツボ類(野方・遠藤; 2012)への応用も考慮すると、何らかの定量的な手法を模索・確立しておく必要があるだろう。また、本研究では暫定的に紙やすりの粒径と光沢度との関係をホタテガイ貝殻製のコレクターの光沢度に当てはめて表面粗さを推定しているが、これについては今後より精密・詳細な調査や新たな測定法が用いられた場合にホタテガイ貝殻製のコレクターの実際の表面粗さとは一致しない可能性がある。ホタテガイ貝殻製のコレクターの表面粗さの直接測定につ

いても今後の検討課題である。

光沢度については、色彩や明度が測定値に大きく影響しているという知見があるが(花房, 1999a), 本研究で用いたホタテガイ貝殻製のコレクター左殻については、ほぼ白色であり、その懸念はあたらないと考えられる(Fig. 1a, b, c)。一方で、本研究では用いなかったコレクターの右殻の表面(Fig. 1d)等を用いてそれらの関係について検証する必要がある。その際、色彩や明度による影響か、着色した皮膜による影響かを判別できる手法の確立が今後の課題である。

本研究の結果から、コレクターの各部位におけるカキ着定基質としての評価について、各部位のカキ稚貝の密度と光沢度及び紙やすりの粒径との関係から好適な表面粗さの範囲を示すことができた。1 cm 四方のカキ稚貝の個体数が 30 以上では光沢度で 3 程度、紙やすりでは粒径 0.010 mm に対応している。上述の理由により、粒径 0.25 mm 程度の表面粗さが殻長 0.3 mm 程度のカキ稚貝にとって着定に好適な環境かどうかは判断できない。今後は、表面粗さと光沢度及びカキ稚貝の密度との関係についてさらに事例と知見を蓄積し、カキ稚貝の密度が最も高くなる表面粗さ及び光沢度を解明する必要がある。さらに、表面粗さと接着力には一定の関係性が認められることから(内田・田中, 2000), カキ稚貝密度と表面粗さの差による接着力の変動という視点からも考察することで、付着生物にとっての好適な着定環境として表面粗さや光沢度を、より普遍的な位置づけに向上させることが期待できる。

また、現在カキ採苗においてはシングルシード養殖の普及(佐々木ら, 2018)や養殖作業の簡便化のために、たわむことで着定稚貝を容易に剥離できる樹脂などの素材を用いたコレクターが使用されることもある。そのような場合には本研究結果を応用することにより、高密度で効率的な採苗が行えるコレクターの設計指針の確立に応用できよう。

このように、本研究の結果からはコレクターの左殻を用いたコレクター表面、裏面縁辺部、裏面中心部のカキ稚貝の密度と光沢度の測定によって、着定基質の定量的評価が安価・簡便に行えることが明らかとなった。また、この結果はコレクターによるカキ稚貝の効率的な採苗や、樹脂性コレクター製造の際の設計指針として応用可能と

考えられた。今後は、上述の諸課題に取り組むと共に、表面粗さを定量的に測定しうる他の指標についてもさらに検討を進める必要がある。

謝 辞

カキ稚貝の殻長の測定には滋賀県立大学榎本洗一郎、熊本大学戸田真志両先生が作成された画像計測アプリケーション「Touch De Measure Ver. 0.5」を使用させていただいた。また、(公財)広島市農林水産振興センター水産部普及指導課佐藤尚史氏には、本研究で使用したコレクターを提供いただいた。

ここに記して謝意を示すものである。

References

- 浅井正・小笹博昭・村上和男 (1997): ブロック式構造物への海洋生物の着生実験とその着生条件について。港湾技術研究所資料, **881**, 41pp.
- 榎本洗一郎・戸田真志・川崎琢真・清水洋平 (2017): タッチ教示を用いた画像計測支援システム: 水産業の現場を起点に“ハカル”を変える。画像ラボ, **28**, 1-7.
- 深尾宙彦・北垣亮馬・佐藤幸恵・野口貴文 (2013): コンクリート表面の明度および光沢度に及ぼす表面性状の影響に関する研究。コンクリート工学年次論文集, **35**, 649-654.
- 後藤克史・井上純一・小沢大造 (2003): 生物着生基盤として見た石材の特徴について。沿岸技術研究センター論文集, **3**, 21-24.
- 花房元顕 (1999a): 海洋付着生物の付着傾向に関する一考察-I。一付着個体数からみた基質の色相・明度との相関。Navigation, **139**, 90-101.
- 花房元顕 (1999b): 基質の材質と海洋付着生物の付着傾向—折戸湾奥における調査実験結果—。Navigation, **142**, 47-53.
- 池上皓三 (2007): 2.2 表面粗さ。第 1 章力学機能, 第 II 編接着相の機能—硬化接着物を中心に一, 接着剤と接着技術, 永田宏二 (監修), シーエムシー出版, 東京, 72-73.
- 松田守弘・鬼頭完爾・久保田毅 (1982): 塗膜の光沢測定。計測自動制御学会論文集, **18**, 5, 471-475.
- 森慎也・日高研人・後川龍男 (2017): 新たな海藻の採苗基質の検討。福岡県水産技術センター研究報告, **27**, 19-26.
- 日本水産資源保護協会 (2003): マガキの生態。我が国の水産業 かき, 日本水産資源保護協会, 6-7.
- 野方靖行・遠藤紀之 (2012): 遺伝情報を用いた付着生物幼生の動態観測。電力中央研究所報告 V11031, 電力中央研究所, 東京, 18pp.
- 大垣俊一 (2008): 海岸生物と岩礁基盤。Argonauta, **15**, 23-30.
- 佐々木正・近藤徹郎・常盤茂・小中大輔・鈴木和弘・大脇安則・木村克彦 (2018): 樹脂製軟質採苗器を用いたイワガキ *Crassostrea nippona* シングルシードの人工種苗生産試験。水産増殖, **66**, 71-84.
- 童 平・山田敏元・猪越重久・細田裕康 (1991): 歯刷子摩耗試験前後のコンボジットレジンの表面粗さおよび光沢度変化に関する研究。歯科材料・器械, **10**, 831-838.
- 内田昌宏・田中享二 (2000): エポキシ樹脂塗り床の付着性に及ぼすセメントモルタルの表面粗さの影響。日本建築学会構造系論文集, **531**, 41-46.

An attempt to quantify favorable environmental factors of epiphytic substrate for Pacific oyster *Crassostrea gigas* (Thunberg) larva using gloss unit

Naoto Kajihara^{1*} and Masami Hamaguchi¹

Abstract

To quantify the effect of surface roughness of epiphytic substrates on sessile organisms, the density of oyster larva and gloss unit were measured at three sites of five collectors for spat collection of scallop shells. As a result, higher oyster larva densities were observed at lower gloss units with statistically significant differences. In this study, the surface roughness of greater than 0.25 mm on the grain size of sandpaper was not measured by the gloss unit. The findings demonstrate that it is possible to determine the roughness of the substrate surface where the density of oyster larva is maximum and the gloss unit that indicates it. Through the application of these results, it is expected that oyster larva densities will improve in the future.

Key words: Gloss unit, The collector for spat collection, Epiphytic substrate, Planktonic larva of oyster, *Crassostrea gigas*

(Corresponding author's e-mail address: naotok@fra.affrc.go.jp)

(Received 16 December 2021; accepted 18 February 2022)

(doi: 10.5928/kaiyou.31.2_39)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2022)

¹ Hatsukaichi Field Station, Fisheries Technology Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency, Maruishi 2-17-5, Hatsukaichi Hiroshima, 739-0452, Japan.

* Corresponding author: Naoto Kajihara
e-mail: naotok@fra.affrc.go.jp