

垂下式養殖網籠を利用した二枚貝と海藻の混合養殖の生産 ならびに環境効果

誌名	水産増殖
ISSN	03714217
著者名	濱岡, 秀樹 奥田, 昇 大森, 浩二
発行元	水産増殖談話会
巻/号	55巻4号
巻号補足	
掲載ページ	p. 547-555
発行年月	2007年12月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



垂下式養殖網籠を利用した二枚貝と海藻の 混合養殖の生産ならびに環境効果

濱岡秀樹¹・奥田 昇²・大森浩二¹

The Productive and Environmental Effects of Mixed Cultivation of Noble Scallop *Chlamys nobilis* and Macroalga *Meristotheca papulosa* Using Suspended Aquaculture Net Cages

Hideki HAMAOKA¹, Noboru OKUDA² and Koji OMORI¹

Abstract: The effects of mixed cultivation of noble scallop *Chlamys nobilis* and macroalga *Meristotheca papulosa* on their productivity and its potential in restoring eutrophic coastal ecosystems were examined under field and laboratory conditions. From the field, we compared the productivity among three cultivated systems, mono-culture of *C. nobilis*, mono-culture of *M. papulosa*, and their mixed culture, in the Uwa Sea. Field results showed the standing crop of *M. papulosa* was significantly higher in the mixed cultivation than in the mono-cultivation. This result was supported by our laboratory experiments that indicated *M. papulosa* effectively assimilated ammonia excreted by *C. nobilis*. Under mixed cultivation in the field, we found no effects of the macroalgal covering on the growth of suspension feeding *C. nobilis*. Furthermore, the number of barnacles attached to *C. nobilis* was fewer in the mixed culture than in the mono-culture. These results suggest that the incorporating mixed cultivation of scallops and macroalgae would be more profitable not only due to its higher algal productivity, but also due to lower labor costs in removing barnacles off the shell to improve market value. We finally discuss environmental effects of the mixed cultivation, focusing on increasing water quality and rehabilitation of macroalgal beds in the eutrophicated coastal ecosystems.

Key words: *Meristotheca papulosa*: Eutrophication; Mixed cultivation; Water quality

二枚貝養殖は、1980年代以降、その技術的進歩とともに世界的に普及・発展した (Naylor et al. 2000)。その養殖方法は様々な形態を取るが、その多くが主に沿岸域で営まれている。これらの養殖場は閉鎖性の高い浅海域に設置される場合が多く、過密養殖が沿岸生態系に与える負の影響が指摘されている (Nizzoli et al. 2006)。

二枚貝養殖が沿岸生態系に及ぼす影響は、主に底質環境への影響と水柱環境への影響に大別することができる。二枚貝類が濾過摂食した懸濁態有機物は糞や偽糞として速やかに沈降・堆積するため、過密養殖の営

まれる養殖場直下の海底に過剰な有機物負荷を引き起こす。Nizzoli et al. (2005) は、ラグーン内において二枚貝養殖が営まれている海域の底質は対照海域の底質に比べおよそ3倍も有機物含有量が高く、この有機物が二枚貝や養殖ロープに付着した生物に由来することを報告した。このような有機物負荷はバクテリアの酸化的分解による海底の貧酸素化を引き起こし、底生生物群集の組成や現存量、さらに、それらの生態系機能を変化させることによって、沿岸海域の物質循環に多大な影響をあたえることが懸念されている (矢持ら 1995; Christensen et al. 2003; Nizzoli et al. 2006)。

2007年2月16日受付：2007年9月6日受理。

¹ 愛媛大学沿岸環境科学研究センター (Center for Marine Environmental Studies, Ehime university, Matsuyama, Ehime, 790-8577, Japan)。

² 京都大学生態学研究センター (Center for Ecological Research, Kyoto university, Otsu, Shiga, 520-2113, Japan)。

一方、二枚貝養殖が水柱環境に及ぼす影響には、2つの過程がある。1つは、底質に負荷された有機物の微生物分解により溶出する無機栄養塩類が水柱に拡散する過程である (Prins et al. 1998)。もう1つは、二枚貝の排泄物中に含まれる無機栄養塩類が直接水柱に拡散する過程である。この栄養塩回帰は植物プランクトンの増殖を促進する効果を持つ。沿岸域で営まれる大規模な二枚貝養殖は、河川から運搬される有機物の一時的貯留と栄養塩類の再回帰を通じて、局所的な沿岸環境の悪化を引き起こす可能性が示唆される (Feng et al. 2004)。また、養殖海域に限らず、塩湿地や湖、潮間帯などにおいても、懸濁物濾過食性二枚貝類の排出する無機栄養塩類が水域の物質循環や一次生産に少なからぬ影響を与えていることが報告されている (Kautsky and Wallentinus 1980; Jordan and Valiela 1982; Prosch and McLachlan 1984; Dame and Libes 1993; Fahnenstiel et al. 1995; Conroy et al. 2005)。

二枚貝養殖による環境負荷の影響が懸念される一方で、懸濁物濾過食性二枚貝類の濾過能力に着目した水質浄化の可能性も検討されてきた。Takeda and Kurihara (1994) はムラサキイガイ *Mytilus edulis* に赤潮プランクトンを摂食させることで、水柱から赤潮を除去する方法について実験的検討を行った。また、カキ養殖の盛んな広島湾では、養殖されたカキ *Crassostrea gigas* が水揚げされることによって、水柱から栄養塩類が効果的に除去されているとの試算もある (Songsangjinda et al. 2000)。しかし、先述のように、二枚貝類から排出された栄養塩類は植物プランクトンの増殖を促進し、懸濁態有機物を増加させる効果を持つため、浄化装置としての機能を疑問視する声もある (山室 1992; Dame and Libes 1993)。近年、このような二枚貝養殖による環境負荷を低減するために、海藻類をバイオフィルターとして用いた混合養殖の研究が注目を浴びている (Troell et al. 1999; Yang et al. 2005)。海藻類は、排泄物を出すことなく栄養塩類を吸収するという点において効果的な生物浄化機能を持つ。また、近年ではこのようなバイオフィルターとして商業価値の高い海藻類を用いる試みも行われている (Troell et al. 1997)。

愛媛県宇和海の潮下帯に群生する紅藻類トサカノリ (*Meristotheca papulosa*) は、食用及び美容・医薬品の原料として商業価値が極めて高い海藻であるが、人間による生息環境の物理的・化学的攪乱に加えて、乱獲によって個体数が急激に減少している有用海藻類の1種である。本種の養殖技術は完全に確立されておらず、養殖増産技術の確立と天然個体群の回復は急務の課題となっている。このような有用海藻類をバイオフィルターとして二枚貝養殖に取り入れることが出来

れば、生産効率の向上と環境負荷の低減を両立した養殖を実現することが可能だろう。

本研究は、宇和海沿岸で盛んに営まれている垂下式二枚貝養殖の網籠を利用したヒオウギガイと紅藻トサカノリの混合養殖技術を確立することを目的とする。さらに、生物浄化機能を利用した水質改善効果について実験的な検証を行い、本養殖法の普及を通じた藻場再生や沿岸環境修復の可能性について検討する。

材料と方法

野外実験

愛媛県南宇和郡愛南町室手湾において、2003年6月から2004年4月までの10ヶ月間、野外養殖実験を行った (Fig. 1)。湾内に約100 mのロープを2本平行に張り、両端をアンカーで固定したものに、約25 mの間隔で3 m × 3 mの筏を3基設置した。これら3基の筏を沖合から順に海藻単独区、貝単独区、混合区として設定した (Fig. 2)。混合区では、ユカリ科トサカノリ *Meristotheca papulosa* の胞子を着生させた垂下式二枚貝養殖網籠 (以後、網籠と呼ぶ) にイタヤガイ科ヒオウギガイ *Chlamys nobilis* を入れ、筏に垂下させた。海藻単独区では、トサカノリ胞子を着生させた網籠にヒオウギガイを入れずに垂下させた。貝単独区では、ヒオウギガイの入った網籠から定期的に人為的な汚損生物の除去を行った。

野外養殖実験に先立って、2003年6月14日から6月31日の17日間、網籠をトサカノリ成熟葉体と共に培養タンク内に浸漬させ、ポンプによってくみ上げた海水をゆっくりと流水させることで網籠にトサカノリ胞子を付着させた。トサカノリ胞子付着法に関しては、秋月 (1987) 並びに喜田ら (1993) の培養法を参考にした。また、網籠は宇和海沿岸域で盛んな四角錐型網籠 (縦

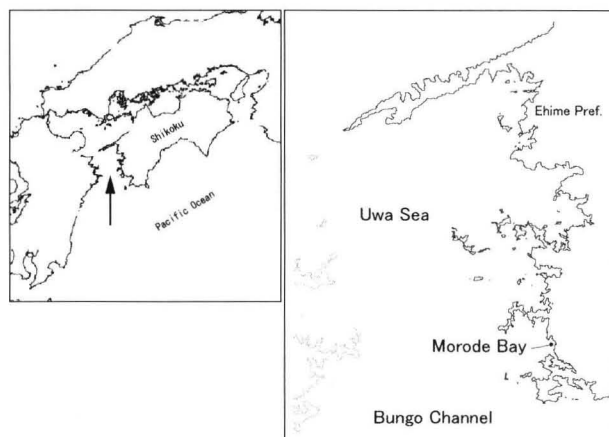


Fig. 1. Location of the study site, Murode Beach in the Uwa Sea.

30 cm×横 30 cm, 高さ20 cm, 網目0.7 cm×0.7 cm, クレモナ素材製)を用いた。胞子付けをした網籠はクレモナ製ロープに結びつけ、湾内に設置した筏から水深2 m, 5 m, 8 mの位置にそれぞれ9籠ずつ吊り下げた。

ヒオウギガイは、海水中に沈めた杉葉に着定した本種の天然稚貝を採取し、本実験に供試した。実験に先立ち、稚貝個体の湿重量を0.01 gの精度でそれぞれ計測し(ザルトリウス社製電子天秤, L610), 個体識別用タグを付けたあと、貝単独区及び混合区の網籠に1籠当り15個体(平均湿重量±標準偏差=28.97±7.89 g)となるように入れ飼育した。その後、貝単独区では1ヶ月ごとに網籠を海上に引き揚げ、網籠に付養する汚損生物を除去した。混合区及び海藻単独区については、同じ間隔で網籠を引き揚げ、汚損生物は除去せずにそのままの状態ですぐ海中に戻した。

以上の処理を施しながらトサカノリの培養及びヒオウギガイの飼育を行い、実験終了後にそれぞれの実験区から網籠を引き上げてトサカノリとヒオウギガイを全て回収した。回収したトサカノリは株数と乾燥重量(0.001 g)を計測し(HANSEN 高精度分析用上皿電子天秤, HR-182), ヒオウギガイについては湿重量(0.01 g)を測定した。さらに海藻類による網籠の被覆がヒオウギガイに与える生態影響を検討するため、ヒオウギガイ各個体の貝殻に付着していたフジツボ類の個体数を計数した。実験終了後に死亡していたヒオウギガイは計量・計数から除外した。ヒオウギガイの飼育前後の湿重量の変化量から1日あたりの比成長率を計算した。計算には次の式を用いた。

$$r = (\ln W_2 - \ln W_1) / (t_2 - t_1)$$

ここで r はヒオウギガイの比成長率(g wet day^{-1}), W_1 と W_2 は実験開始日(t_1)と終了日(t_2)の湿重量(g wet)を表す。これらの測定項目について、各実験区間での差異をパラメトリック検定によって比較した。

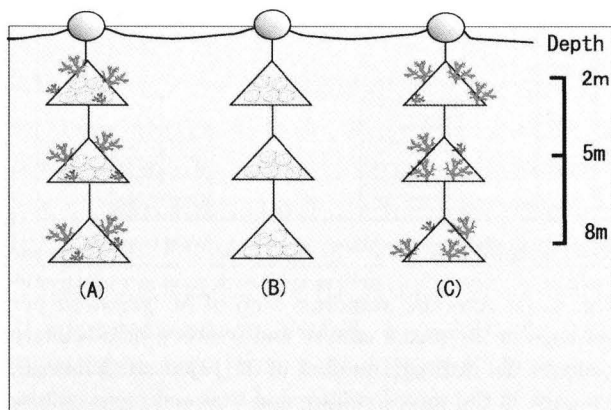


Fig. 2. Culture systems. A: Mixed culture of scallop *C. nobilis* and seaweed *M. papulosa*; B: mono-culture of scallop *C. nobilis*; C: mono-culture of seaweed, *M. papulosa*.

フジツボ類の付着数及びヒオウギガイの1日当りの比成長率是对数変換を行い正規化し、パラメトリック検定を用いて比較した。いずれも $P < 0.05$ を統計的に有意な差と判断した。

室内実験

ヒオウギガイから排出される無機栄養塩類の量、およびトサカノリが吸収する無機栄養塩類の量を推定するために室内水槽で飼育及び培養実験を行った。実験には容積3150 mlの亚克力製円筒型呼吸室、及び、幅60 cm×奥行45 cm×高さ30 cmの亚克力水槽を用いた(Fig. 3)。亚克力水槽は円筒型呼吸室の水温調節用バスとして使用した。呼吸室にはポンプ(エーハイム社製水中ポンプ, PowerHead1005)を取り付け、実験中は絶えず実験海水を循環させた。また、実験中は呼吸室内を密閉し通気を行わなかった。実験用海水として室手湾で採取した海水を砂濾過したものを用いた。水温は冷却装置を用いて $16 \pm 1^\circ\text{C}$ で一定に保った。実験中の光条件は、水槽上部から蛍光灯を照射することで光量子量 $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ となるように調整した。実験に用いた水温及び光条件は、室手湾においてトサカノリの成長量が最大となる2月の水温と光環境を再現した。

室内実験は3つの実験系で構成された。1つ目はヒオウギガイのみを入れた系(貝単独系), 2つ目はヒオウギガイとトサカノリを入れた系(混合系), 3つ目は濾過海水のみを入れた系(コントロール系)とした。実験にはヒオウギガイの当歳個体(平均湿重量±標準偏差=60.51±17.60 g)を使用した。実験前に貝殻の付着物を取り除いて、濾過海水でよく洗うことによって、付着生物が無機栄養塩類の増減に及ぼす影

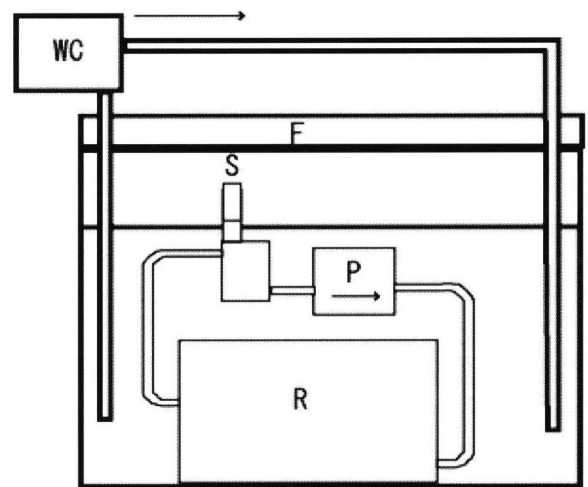


Fig. 3. A schematic diagram of respirometer equipments. Arrows indicate the direction of water flow. R: Respirometer, P: Water pump, S: Sampling hatch, F: Fluorescent luminaire, WC: Water cooler.

響を除外した。同様に、トサカノリ（平均乾燥重量 $\pm$ 標準偏差 = 0.993 ± 0.267 g）も実験前に付着物を取り除いて、濾過海水でよく洗ったものを用いた。なお、実験に際して、培養装置内でのヒオウギガイの馴致は行わなかった。

濾過海水で満たした呼吸室内に実験個体を1個体入れて（コントロール系の場合は何も入れず）密閉し、これを水温 16°C に調整したアクリル水槽内に静置した。静置後、0 min, 20 min, 40 min, 60 min の間隔で海水 20 ml を採水した。採取した海水はセルロース混合エステルタイプメンブランフィルター（DISMIC-25, $0.20\mu\text{m}$, ADVANTEC）で濾過した後、濾液を栄養塩類の分析試料として測定までの間、凍結保存した。分析には全自動栄養塩測定装置（BRAN LUBE 社製全自動水質分析装置, AutoAnalyzer 3）を用い、アンモニア態窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、リン酸態リンの濃度（ $\mu\text{g/l}$ ）を測定した。溶存態無機窒素濃度（DIN）はアンモニア態窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素の合算値とした。これら呼吸室内の溶存態無機窒素濃度、リン酸態リン濃度の経時的な変化から、ヒオウギガイの栄養塩類排出速度、及び、トサカノリの栄養塩類吸収速度を算出した。

結 果

野外実験

トサカノリの収穫量

実験終了後に採取した各実験区の網籠当りのトサカノリ収量（g）をFig. 4aに示した。トサカノリ収量は海藻単独区（ 1.277 ± 1.274 g, $n = 15$ ）に比べ混合区（ 4.532 ± 3.360 g, $n = 14$ ）のほうが有意に増加した（2-way ANOVA, $F_{1,23} = 12.72$, $P < 0.01$ ）。網籠当りのトサカノリ収量は深度間で有意な差が見られなかった（2 m: 2.281 ± 2.592 g, $n = 10$, 5 m: 2.472 ± 2.531 g, $n = 10$, 8 m: 3.897 ± 3.768 g, $n = 9$; 2-way ANOVA, $F_{2,23} = 1.48$, $P = 0.25$ ）。

各実験区における網籠当りのトサカノリ株数についても海藻単独区（ 2.7 ± 1.6 , $n = 15$ ）に比べ混合区（ 4.7 ± 1.9 , $n = 14$ ）のほうが有意に増加した（2-way ANOVA, $F_{1,23} = 13.76$, $P < 0.01$; Fig. 4b）。

ヒオウギガイ成長量

実験終了後、網籠あたりの平均ヒオウギガイ生残数は平均12個体（平均生残率79.7%）となり、現場海域で営まれている垂下式網籠養殖ヒオウギガイの生残率と同様の値を示した。1個体あたりの平均湿重量は 76.78 ± 22.10 g であった。各実験区におけるヒオウギガイの日当たり比成長率は貝単独区（ $4.3 \pm 1.9 \times 10^{-3}$,

$n = 113$ ）より混合区（ $4.8 \pm 1.8 \times 10^{-3}$, $n = 95$ ）で若干高い傾向が見られたが、統計的に有意な差は見られなかった（2-way ANOVA, $F_{1,202} = 3.774$, $P = 0.05$; Fig. 4c）。ヒオウギガイの比成長率には深度間で有意な差が見られ、培養深度が深くなるほどヒオウギガイの

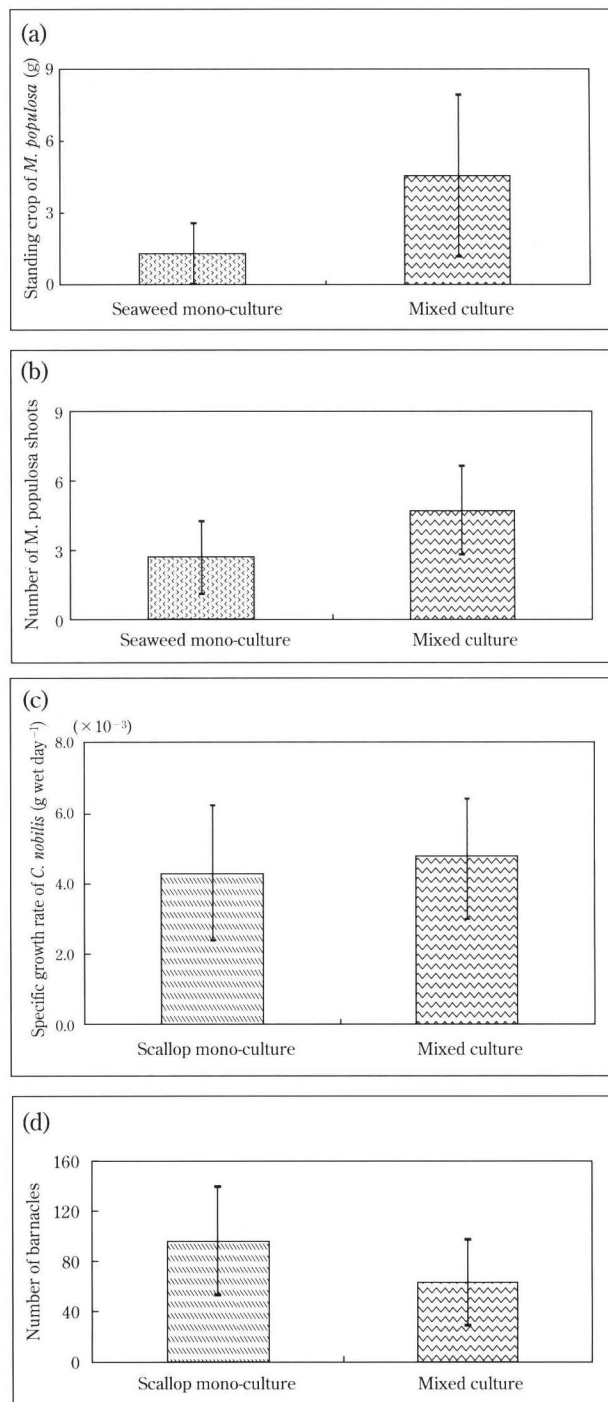


Fig. 4. (a) Average standing crop of *M. papulosa* per net cage in the mixed culture and seaweed mono-culture systems, (b) Average number of *M. papulosa* shoots per net cage in the mixed culture and seaweed mono-culture systems. (c) Specific growth rate of *C. nobilis* in the mixed culture and scallop mono-culture systems. (d) Average number of barnacles attached to scallop shells in the mixed culture and scallop mono-culture systems.

比成長率は有意に増加した (2 m: 4.0 ± 0.21 , $n = 70$, 5 m: 4.7 ± 0.21 , $n = 70$, 8 m: 4.9 ± 0.22 , $n = 68$; 2-way ANOVA, $F_{2,202} = 5.138$, $P < 0.01$; Fisher'PLSD, 2 m vs 5 m: $P = 0.02$, 2 m vs 8 m: $P < 0.01$, 5 m vs 8 m: $P = 0.44$)。

フジツボ付着数

実験終了後のヒオウギガイの貝殻に付着していたフジツボ類の個体数を計数し、その平均付着数を実験区間で比較した (Fig. 4d)。付着していたフジツボ類の個体数は、貝単独区に比べ混合区のほうが有意に少なかった (貝単独区: 95 ± 43 , $n = 115$, 混合区: 63 ± 34 , $n = 95$; 2-way ANOVA, $F_{1,204} = 40.21$, $P < 0.01$)。各深度におけるヒオウギガイ 1 個体あたりのフジツボ類付着数に有意な差は見られなかった (2 m: 83.10 ± 44.23 , $n = 70$, 5 m: 79.99 ± 47.57 , $n = 71$, 8 m: 78.64 ± 35.26 , $n = 69$; 2-way ANOVA, $F_{2,204} = 0.061$, $P = 0.94$)。

室内実験

無機窒素濃度

各系における溶存態無機窒素濃度 (DIN) の経時変化を Fig. 5 に示した。混合系とコントロール系における溶存態無機窒素濃度は有意に変化しなかったが (1-way ANOVA; 混合系: $F_{3,48} = 1.16$, $P = 0.33$, コントロール系: $F_{3,24} = 0.44$, $P = 0.72$; Fig. 5a,c), 貝単独系の溶存態無機窒素濃度は時間と共に増加した (1-way ANOVA, $F_{3,30} = 3.33$, $P = 0.02$; Fig. 5b)。溶存態無機窒素濃度の経時変化は貝単独系のみ有意に異なるパターンを示した (repeated measures ANOVA, $F_{2,3} = 4.04$, $P < 0.01$; Fisher'PLSD, コントロール系 vs 貝単独系: $P = 0.18$, 貝単独系 vs 混合系: $P < 0.01$, 混合系 vs コントロール: $P = 0.22$)。

貝単独系における 60 min 後の溶存態無機窒素はその大部分がアンモニア態窒素と硝酸態窒素によって構成されていた (アンモニア態窒素: 59.5%, 硝酸態窒素: 36.8%)。混合系とコントロール系のいずれの系においてもアンモニア態窒素濃度は変化しなかったが (1-way ANOVA; 混合系: $F_{3,48} = 0.27$, $P = 0.86$, コントロール系: $F_{3,24} = 0.54$, $P = 0.66$)。貝単独系のアンモニア態窒素濃度は時間とともに有意に増加した ($F_{3,80} = 5.63$, $P < 0.01$)。アンモニア態窒素濃度の経時変化は貝単独系のみ有意に異なるパターンを示した (repeated measures ANOVA, $F_{2,3} = 6.93$, $P < 0.01$; Fisher'PLSD, コントロール系 vs 貝単独系: $P = 0.004$, 貝単独系 vs 混合系: $P < 0.01$, 混合系 vs コントロール: $P = 0.90$)。硝酸態窒素濃度に関して、混合系, 貝単独系, コントロール系のいずれの系においても有意な変化は見られなかった (1-way ANOVA; 混合系:

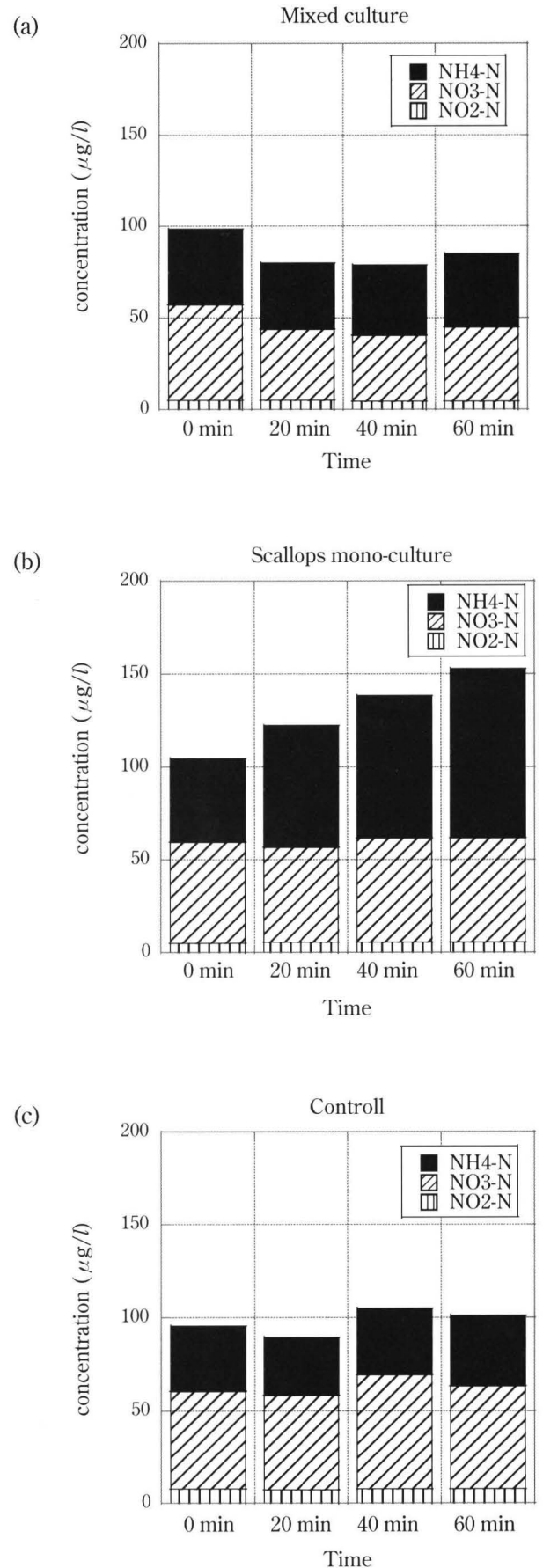


Fig. 5. Temporal changes in ammonium, nitrate and nitrite nitrogen concentrations in the mixed culture (a), the scallop mono-culture (b) and control (c) systems.

$F_{3,48} = 1.96$, $P = 0.13$, 貝単独系: $F_{3,80} = 0.17$, $P = 0.92$, コントロール系: $F_{3,24} = 0.32$, $P = 0.81$). 同様に, いずれの系においても亜硝酸態窒素濃度の有意な変化は見られなかった (1-way ANOVA; 混合系: $F_{3,48} = 0.77$, $P = 0.52$, 貝単独系: $F_{3,80} = 0.68$, $P = 0.56$, コントロール系: $F_{3,24} = 0.12$, $P = 0.95$).

リン酸態リン

各系におけるリン酸態リン濃度の経時変化を Fig. 6 に示した。混合系, 貝単独系, コントロール系のいずれの系においてもリン酸態リン濃度の有意な経時変化は見られなかった (1-way ANOVA; 混合系: $F_{3,48} = 1.09$, $P = 0.36$, 貝単独系: $F_{3,80} = 1.97$, $P = 0.13$, コントロール系: $F_{3,24} = 0.46$, $P = 0.72$).

考 察

混合養殖の栄養塩類収支

室内実験の結果より (Fig. 5a-c), 貝単独系においてのみアンモニア態窒素濃度の増加が見られたことから, ヒオウギガイは海水中にアンモニア態窒素を排出すると結論できる。一方, 混合系とコントロール系ではアンモニア態窒素濃度の増加が見られなかったことから, トサカノリはヒオウギガイが排出したアンモニア態窒素を大部分吸収していると推察された。これまでの研究においても, 二枚貝類の排出する溶存態無機窒素の大部分はアンモニア態であることが報告されている (Bayne et al. 1976)。また, 二枚貝類によって水柱に排出されたアンモニア態窒素は植物プランクトンによる一次生産のための主な窒素源となることが報告されている (Prins et al. 1998)。そこで, 我々は室内

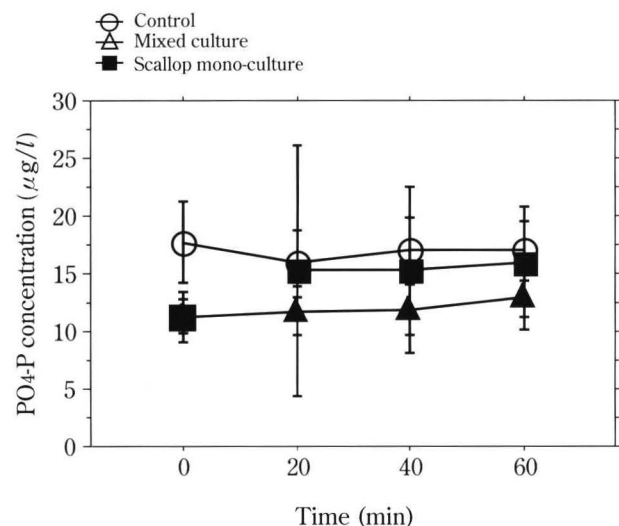


Fig. 6. Temporal changes in dissolved inorganic phosphorus concentration in the mixed culture, the scallop mono-culture and control systems.

実験の結果に基づいて, ヒオウギガイによる栄養塩類排出量とトサカノリによる吸収量の推定を行い, 現場における本混合養殖法の環境影響評価に外挿することを試みた。硝酸・亜硝酸態窒素やリン酸態リンの増減にヒオウギガイがほとんど寄与しなかったことから, 栄養塩類収支の計算にはアンモニア態窒素のみを考慮した。

室内実験における貝単独系とコントロール系のアンモニア態窒素濃度の差分の経時変化を Fig. 7a に示した。コントロール系と貝単独系の濃度差の時間変化に対する回帰直線の傾きは0.68であった。これはヒオウギガイが存在することによって呼吸室内のアンモニア態窒素濃度が1分間当たり0.68 μg/l上昇することを意味する。呼吸室内の容積は3150 mlであるから, ヒオウギガイ1個体が1分間に排出するアンモニア態窒素量は2.1 μg/minと見積もられる。室内実験における混合系と貝単独系のアンモニア態窒素濃度の差分の経時変化を Fig. 7b に示した。混合系と貝単独系の濃度差の時間変化に対する回帰直線の傾きは-0.75であっ

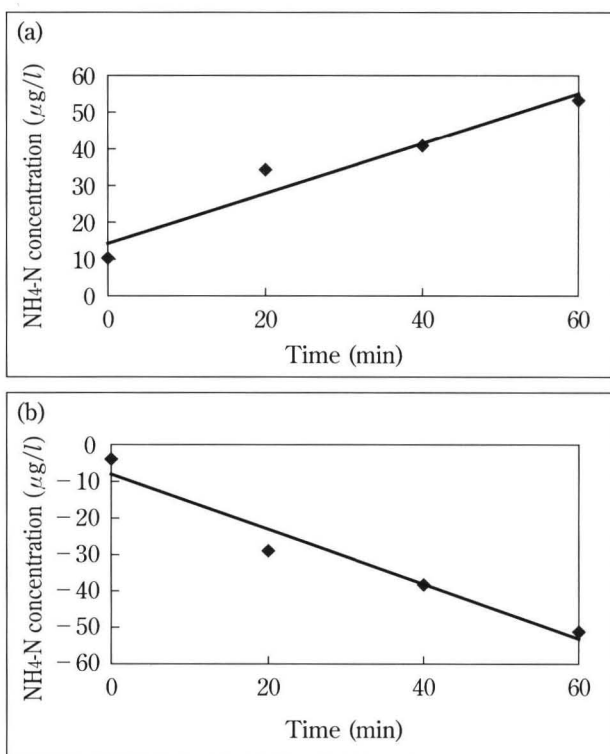


Fig. 7. (a) A linear increase in ammonium nitrogen concentration due to scallop excretion. Its increase rate was estimated by subtracting the mean ammonium nitrogen concentration in the control tank from that in the scallop mono-culture tank at each sampling time. Regression line: $y = 0.68x + 14.2$. (b) A linear decrease in ammonium nitrogen concentration due to seaweed consumption. Its decrease rate was estimated by subtracting the mean ammonium nitrogen concentration in the scallop mono-culture tank from that in the mixed culture tank at each sampling time. Regression line: $y = -0.75x - 7.98$.

た。これはトサカノリが存在することによって呼吸室内のアンモニア態窒素濃度が1分当り $0.75\mu\text{g}/\text{l}$ 低下することを意味する。ヒオウギガイの場合と同様に呼吸室の容積を考慮すると、トサカノリの1分間当たりのアンモニア態窒素吸収量は $2.4\mu\text{g}/\text{min}$ と見積もられる。実験に用いたトサカノリ1株当りの平均乾燥重量は $0.993\pm 0.267\text{g}$ なのでトサカノリ1g当りのアンモニア吸収量は $2.4\mu\text{g}/\text{min}$ と推定される。

以上の結果より、平均湿重量 $60.51\pm 17.60\text{g}$ のヒオウギガイ1個体に対してトサカノリを乾燥重量換算で 0.908g 以上養殖すれば、貝類から排出されたアンモニア態窒素はトサカノリによって全て吸収できると試算できる。しかし、野外環境と実験環境の微妙な違いが二枚貝類にストレスを与え、栄養塩類排出速度や吸収量などに大きな影響を与えることも考えられる(山室 1992)。今回の室内実験の場合も比較的小さな容器内で行っているため、野外の生息環境を十分に再現しているとは言い難い。そのため、室内実験の結果から算出されたヒオウギガイによるアンモニア態窒素の排出量は過小評価されているかもしれない。また、これまでの海藻類をバイオフィルターとして用いた混合養殖の研究においても、排出された栄養塩類が物理・化学的な要因によって拡散するため、海藻による栄養塩類の吸収効率は野外において低下することが報告されている(Troell et al, 1997; Troell et al. 1999)。したがって、トサカノリが効率良くアンモニア態窒素を吸収する効果は室内環境でしか再現できない可能性も否定できない。今回の野外における実験条件では、ヒオウギガイに対するトサカノリの重量比はあまり小さくなく(網籠当りの生残ヒオウギガイ個体数は平均12個で総湿重量 912g であるのに対してトサカノリの総乾燥重量は $4.5\pm 3.4\text{g}$)、室内実験のようにヒオウギガイの排出した栄養塩類をトサカノリが全て吸収しているとは考えにくい。しかしながら、二枚貝類を単独で飼育した場合に比べて、混合養殖を行うことで多かれ少なかれ栄養塩類吸収効果が期待できることは確実であろう。

混合養殖の収率

野外実験におけるトサカノリの収穫量は海藻単独で養殖する場合よりも、ヒオウギガイと混合養殖することによって顕著に増加した(Fig. 4a)。室内実験の結果を勘案すると、これはヒオウギガイの排出した栄養塩類をトサカノリが吸収することによって成長率が増加した効果であると考えられる。

一方、混合養殖によってヒオウギガイの成長率が低下する効果は見られなかった(Fig. 4c)。従来、貝類養殖では、養殖網籠へ付着した海藻が養殖対象種の成

長へマイナスの効果を持つと考えられていた。これは懸濁物濾過食者である二枚貝類への有機懸濁物の供給が海藻類の被覆によって妨げられると考えられたからである。実際、養殖現場では養殖網籠の付着生物(主に海藻)を定期的に除去している。しかし、我々の野外実験から、混合養殖においてトサカノリがヒオウギガイの成長にマイナス効果を及ぼさないとの結果が得られた。もちろん、二枚貝類の成長抑制効果は海藻類の生育密度に依存するだろう。我々の野外実験におけるトサカノリの養殖密度は網籠単位面積あたり $1.9\times 10^{-3}\text{株}/\text{cm}^2$ 、生物体量は乾燥重量換算で $2.7\times 10^{-4}\text{g}/\text{cm}$ であった。この程度の密度条件で海藻類と混合養殖した場合には、二枚貝類の成長抑制効果を考慮する必要はないと言えるだろう。

一方、混合養殖したヒオウギガイに付着するフジツボ類の数は貝単独で養殖したヒオウギガイよりも有意に減少した(Fig. 4d)。この結果は、混合養殖網籠を海藻類が被覆することによって、網籠内への付着動物幼生の侵入および貝への付着が妨げられることを示唆する。これは海藻の被覆によって網籠内への懸濁態有機物の供給が妨げられないという結論と一見矛盾しているようにみえる。しかし、ヒオウギガイが餌とする微細な藻類はフジツボ類幼生よりはるかに粒子サイズが小さく均一に分布する。海藻類の被覆や海藻が引き起こす乱流が粒子の拡散を阻害する効果は、フジツボ類幼生のような体サイズの大きなプランクトンで顕著となるのかもしれない。フジツボ類や管棲ゴカイ類などの付着動物は二枚貝類の成育に負の影響を与えるばかりでなく(Paine 1976)、それらの商品価値を低下させるため、養殖業者はこれらを除去することに相当な時間と労力を費やしている。混合養殖を行うことによって、単に収率が高まるだけでなく、人件費の削減と商品価値の高い養殖貝の生産という副次効果も期待できるだろう。

本養殖方法を実践する際には、養殖網籠を垂下させる深度にも注意を払う必要がある。今回の実験結果から、トサカノリの収量は深度に依存しないが、ヒオウギガイの成長率が深度に依存することが明らかとなった。しかし、これらの結果は現場海域の環境条件によって大きく左右されるだろう。トサカノリの生育条件が照度や水温によって決定される一方、ヒオウギガイの成長率も植物プランクトン密度や水温によって決定される。水温については、両種にとって共通の環境変数として最適養殖深度を求めることが可能である。しかし、植物プランクトン濃度は両種にとって拮抗的な作用をもたらす(すなわち、植物プランクトン濃度が高いとヒオウギガイ類の餌環境は向上するが、トサカノリの生育に重要な照度が減衰する)ので、単純に最適

解を求めるのは困難である。したがって、養殖現場の環境条件に応じて、予備的な試験を行うのが望ましい。

要 約

混合養殖の環境効果

二枚貝類は相当量の懸濁態有機物を海水中から濾過する能力を持つことが知られており、二枚貝類養殖は沿岸域における生物浄化装置として機能するという報告が幾つかなされている（細川 1991; Takeda and Kurihara 1994; Songsangjinda et al. 2000）。しかし、冒頭で述べたように、二枚貝類から排出された栄養塩類が植物プランクトン生産を促進し、懸濁態有機物を増加させるため、浄化装置としての機能を疑問視する声もある（山室 1992; Dame & Libes 1993）。今回の野外及び室内実験から明らかになったように、トサカノリとヒオウギガイの混合養殖では貝の排出した栄養塩類を海藻が効率良く吸収することによって高い浄化効果が期待される。貝単独養殖に比べれば、混合養殖を行うことで海藻類収量の増加した分は、少なくとも、栄養塩類を水系から除去する効果につながったと言えるだろう。現在、日本各地の沿岸では富栄養化に伴う水質の悪化が大きな環境問題となっている。水質浄化を人工的に行うには莫大な費用と多大なエネルギーを必要とする。本研究によって提案された養殖法を活用すれば、海水中の懸濁態有機物濃度を削減することに多少なりとも貢献することが可能だろう。

また、二枚貝類の濾過食によって海水中の懸濁態有機物濃度が減少することは、天然藻場の育成にも大いに役立つと期待される。懸濁態有機物除去によって透明度が増加すると、有光層の補償深度が増し、大型藻類の生育可能域が増大するかもしれない。本養殖法を試験的に導入している水域では天然藻場の海藻密度の増加が確認されており（未発表データ）、養殖海藻から放出された胞子が養殖場周辺に効果的に分散・着底していることも示唆されている。以上のことから、本養殖方法は富栄養化海域における栄養塩類の除去効果だけでなく、消失した天然藻場の再生を促進する効果も期待できる。

本研究では二枚貝類による底質への影響や栄養塩類が過剰に流入する過栄養化した海域での効果を考慮していないため、今回の環境効果の試算は過大評価であるかもしれない。しかし、本研究で提案する養殖法を既存の垂下式網籠による二枚貝類養殖に適用することで収穫効率の増加と海域からの無機栄養塩類の除去を両立することが可能である。様々な沿岸海域で本養殖法を大規模に導入することによって、環境改善効果をモニタリングしてみることは将来の持続可能な海面養殖の在り方を探る上でも大変意義深い試みとなるだろう。

垂下式二枚貝養殖の網籠を利用したヒオウギガイと紅藻トサカノリの混合養殖の生産効率と環境効果について検討した。野外において、貝単独、海藻単独、両者を混合した養殖実験を行ったところ、トサカノリの収穫量は単独で養殖するよりも、混合養殖することによって顕著に増加した。室内実験から、ヒオウギガイが排出した栄養塩類はトサカノリによって効果的に吸収されていることが明らかとなった。野外において、混合養殖に伴う海藻類の被覆が懸濁物濾過食者であるヒオウギガイの成長を阻害する効果は認められなかった。また、混合養殖したヒオウギガイに付着するフジツボ類の個体数は単独で養殖したものよりも有意に減少した。これらの結果から、混合養殖を行うことによって、単に収率が高まるだけでなく、付着生物除去コストの軽減という副次効果が期待された。最後に、混合養殖による生物浄化機能を利用した環境修復効果について若干の考察を加えた。

謝 辞

本研究を行うにあたって、愛南町漁業協同組合および、瀧岡隆雄氏には多大な協力を頂いた。また、愛媛大学沿岸環境科学研究センター並びに、同大学理学部生態研究室から多くの助言を頂いた。また、愛媛大学沿岸環境科学研究センター Todd Miller 博士には、要旨ならびに図表説明の英文閲覧を引き受けていただいた。ここに感謝の意を表し、厚く御礼申し上げる。本研究は平成16年度（公）ミキモト海洋生態研究助成基金の助成を受けて行われた。

文 献

- Bayne, B. L., J. C. Widdows and R. J. Thompson (1976) Physiology II. In "Marine mussels" (ed. by B. L. BAYNE), Cambridge University Press, Cambridge, pp. 207-260.
- Christensen, P. B., R. N. Glud, T. Dalsgaard and P. Gillespie (2003) Impacts of longline mussel farming on oxygen and nitrogen dynamics and biological communities of coastal sediments. *Aquaculture*, **218**, 567-588.
- Conroy, J. D., W. J. Edwards, R. A. Pontius, D. D. Kane, H. Z. Zhang, J. F. Shea, J. N. Richey and D. A. Culver (2005) Soluble nitrogen and phosphorus excretion of exotic freshwater mussels (*Dreissena* spp.): potential impacts for nutrient remineralisation in western Lake Erie. *Freshwater Biology*, **50**, 1146-1162.
- Dame, R. and S. Libes (1993) Oyster reefs and nutrient retention in tidal creeks. *Journal of Experimental Marine Biology and*

- Ecology*, **171**, 251-258.
- Fahnenstiel, G. L., G. A. Lang, T. F. Nalepa and T. H. Johengen (1995) Effects of Zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) colonization on water quality parameters in Saginaw Bay, Lake Huron. *Journal of Great Lakes Research*, **21**(4), 435-448.
- Feng, Y. Y., L. C. Hou, N. X. Ping, T. D. Ling and C. I. Kyo (2004) Development of mariculture and its impacts in Chinese coastal waters. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, **14**, 1-10.
- Jordan, T. E. and I. Valiela (1982) A nitrogen budget of the ribbed mussel, *Geukensia demissa*, and its significance in nitrogen flow in a New England salt marsh. *Limnology and Oceanography*, **27**, 75-90.
- Kautsky, N. and I. Wallentinus (1980) Nutrient release from a Baltic *Mytilus*-Red algal community and its role in benthic and pelagic productivity. *Ophelia Supplement*, **1**, 17-30.
- Naylor, R. L., R. J. Goldburg, J. H. Primavera, N. Kautsky, M. C. M. Beveridge, J. Clay, C. Folke, J. Lubchenco, H. Mooney and M. Troell (2000) Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*, **405**, 1017-1024.
- Nizzoli, D., D. T. Welsh, E. A. Fano and P. Viaroli (2006) Impact of clam and mussel farming on benthic metabolism and nitrogen cycling, with emphasis on nitrite reduction pathways. *Marine Ecology Progress Series*, **315**, 151-165.
- Nizzoli, D., D. T. Welsh, M. Bartoli and P. Viaroli (2005) Impact of mussel (*Mytilus galloprovincialis*) farming on oxygen consumption and nutrient recycling in a eutrophic coastal lagoon. *Hydrobiologia*, **550**, 183-198.
- Paine, R. T. (1976) Biological observations on a subtidal *Mytilus californianus* bed. *The Veliger*, **19**, (2), 125-130.
- Prins, T. C., A. C. Smaal and R. F. Dame (1998) A review of the feedbacks between bivalve grazing and ecosystem processes. *Aquatic Ecology*, **31**, 349-359.
- Prosch, R. M. and A. McLachlan (1984) The regeneration of surf-zone nutrients by the sand mussel, *Donax serra roding*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **80**, 221-233.
- Songsangjinda, P., O. Matsuda, T. Yamamoto, N. Rajendran and H. Maeda (2000) The role of suspended oyster culture on nitrogen cycle in Hiroshima Bay. *Journal of Oceanography*, **56**, 223-231.
- Takeda, S. and Y. Kurihara (1994) Preliminary study of management of red tide water by the filter feeder *Mytilus edulis galloprovincialis*. *Marine Pollution Bulletin*, **28**, (11), 662-667.
- Troell, M., C. Halling, A. Nilsson, A. H. Buschmann, N. Kautsky and L. Kautsky (1997) Integrated marine cultivation of *Gracilaria chilensis* (Gracilariales, Rhodophyta) and salmon cages for reduced environmental impact and increased economic output. *Aquaculture*, **156**, 45-61.
- Troell, M., P. Ronnback, C. Halling, N. Kautsky and A. Buschmann (1999) Ecological engineer in aquaculture: use of seaweeds for removing nutrients from intensive mariculture. *Journal of Applied Phycology*, **11**, 89-97.
- Yang, H., Y. Zhou, Y. Mao, X. Li, Y. Liu and F. Zhang (2005) Growth characters and photosynthetic capacity of *Gracilaria lemaneiformis* as a biofilter in a shellfish farming area in Sanggou Bay, China. *Journal of Applied Phycology*, **17**, 199-206.
- 秋月定良 (1987) トサカノリの養殖方法. 公開特許公報, 特開昭 63-216413.
- 喜田和四郎・赤野裕文・川村吉也 (1993) トサカノリの胞子着生方法. 公開特許公報, 特開平 5-41929.
- 細川恭史 (1991) 浅海域での生物による水質浄化作用. 沿岸海洋研究ノート, **29**, (1).
- 山室真澄 (1992) 懸濁物食性二枚貝と植物プランクトンを通じた窒素循環に関する従来の研究の問題点. 日本ベントス学会誌, **42**, 29-38.
- 矢持 進・有山啓之・日下部敬之・佐野雅基・鍋島靖信・睦谷一馬・唐沢恒夫 (1995) 人工護岸構造物の優占生物が大阪湾沿岸域の富栄養化に及ぼす影響. 1. 垂直護岸でのムラサキガイ (*Mytilus edulis galloprovincialis*) の成長と脱落. 海の研究, **4**, (1), 9-18.