

浸透流によるアサリ浮遊幼生の着底促進効果 に関する基礎的研究

SETTLEMENT INCREASING EFFECT OF THE INFILTRATION FLOW
TO THE LAVAL MANILA CLAM *Ruditapes philippinarum*

瀬戸雅文¹・吉田勇人²・荒川久幸³・小林 豊⁴

Masabumi SETO, Hayato YOSHIDA, Hisayuki ARAKAWA and Yutaka KOBAYASHI

¹正会員 水博 福井県立大学 生物資源学部海洋生物資源学科 (〒917-0003 福井県小浜市学園町 1-1)

²福井県漁業協同組合連合会 小浜支所 (〒917-0081 福井県小浜市川崎3-16)

³水博 東京海洋大学 海洋科学部海洋環境学科 (〒108-8477 東京都港区港南4-5-7)

⁴千葉県水産総合研究センター 東京湾漁業研究所 (〒293-0042 千葉県富津市小久保3091)

The settlement rate of the larval Manila clam has increased by 28.9 times compared with still water when the steady flow acts on the infiltration flow at the same time. The settlement rate has increased by 5.1 times as the infiltration flow velocity 0.3cm/s increases from 0.01cm/s. Larval Manila clam accumulates in a high density on the surface of the sediments with comparatively rough particle size to which the tidal circulation of groundwater flow develops.

If the distribution density of the larval Manila clam, the particle diameter of the sediments, and the flow condition are understood, the settlement rate can be presumed based on this research.

Key Words : *Ruditapes philippinarum*, floating larva, infiltration flow, settlement rate

1. はじめに

近年、アサリなど有用二枚貝資源の全国的な減少傾向を抑止するために、新たな干潟の造成、稚貝の移植放流、耕耘による漁場環境の改善など稚貝の発生促進や生息環境の向上を目指した様々な取り組みが実施されているが、増殖に適した理化学環境に不明な点が多いことから抜本的な解決策が見出されていないのが現状である。二枚貝類は、産卵後、数週間程度の浮遊幼生期に広範囲に分散し、出現密度が比較的高い海域でも数個体/ℓ程度まで著しく密度低下することから、浮遊幼生期の移流・拡散状況が資源加入量の多寡に大きな影響を及ぼすことが指摘されている。一方、稚貝の発生が良好な海域における浮遊幼生の着底個体数は1m²当たり数十万個体と極めて高濃度に集積して着底することが現場調査より確認されている¹⁾。本研究は、稚貝の高濃度の集積が認められる海域の底質粒径が一般に極めて粗いこと、及び底質粒径が粗い砂地盤内には潮間帯付近で浸透し、潮下帯以深で再び海中へ放出される海岸地下浸透流(循環流)が形成されることに着目し²⁾,

「着底後期の浮遊幼生は潮汐の干満とともに、繰り返し発生する海岸地下浸透流(以下浸透流)の影響を受けて、浸透流が発達する粒径の比較的粗い地盤の表面に累積的に高密度で集積する」との仮説を立てた上で(図-1参照)、浸透流を発生可能な水槽を試作し、アサリ浮遊幼生を用いた水槽実験を実施して、浸透流によるアサリ浮遊幼生の着底効率を定量的に評価することを目的とした。

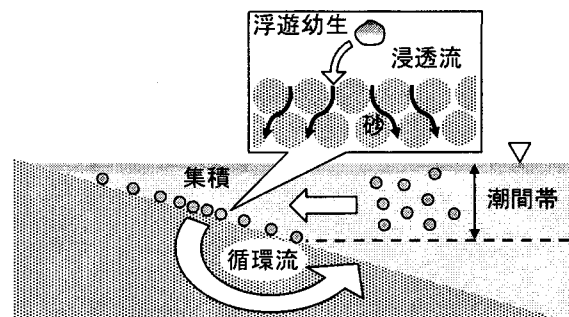


図-1 仮説の概念図

2. 浮遊幼生着底モデル

アサリは卵径約60 μm で産卵後、受精しトロコフォア幼生、ベリジャー幼生（D状期（100～130 μm ）、アンボ期（130～180 μm ）、フルグロウン期（180～250 μm ））の浮遊幼生期を経て、産卵後2～3週間で平均殻長が200～250 μm 前後になると変態し成殻を形成（着底）することが知られている³⁾。孵化直後のトロコフォア幼生は、遊泳行動が連続的で多くが水面近くに分布するが、ベリジャー幼生になると遊泳が間欠的となり、遊泳による上昇と下降を繰り返しながら鉛直方向に広く分散する⁴⁾。着底後期には、着底基質の探査行動を行いながら底面付近を遊泳し、好適な着底基質を選択する能力を有していることが指摘されている。既往知見によれば、浮遊幼生の上昇流速は0.1～10mm/秒程度であるが⁵⁾、螺旋状の軌跡を描きながら遊泳するため、運動速度の鉛直成分はこれよりやや小さいものと考えられる。

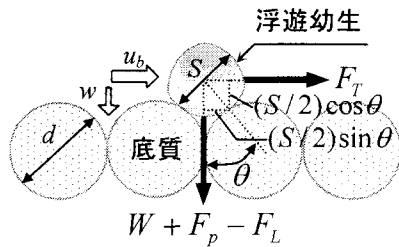


図-2 モデルの概念図

着底後期のアサリ浮遊幼生（殻長： S 、密度： ρ_s ）が着底基質を選択する過程で底質（粒径： d ）に瞬間的に着底した直後の安定性について検討する。簡単のために浮遊幼生、及び底質形状を球形状で近似し、水平方向より底層流（平均流速： u_b 、海水密度： ρ ）、底質（空隙率： ε ）より水底方向に浸透流（単位底面当たりの浸透流量： q ）が作用している場合に、浮遊幼生の物理的な移動限界における力の平衡条件は、浮遊幼生と底質の接点のまわりの回転モーメントについて検討すれば

$$F_T = (W + F_p - F_L) \tan \theta \quad (1)$$

ここに、 F_T は浮遊幼生に作用する水平方向の力で浮遊幼生が滑動する瞬間には最大静止摩擦力と釣り合うことから、単位面積当たりの最大静止摩擦力を τ_b 、底面摩擦係数を f とすれば

$$F_T = K \tau_b \pi \left(\frac{S}{2} \right)^2 = \frac{\pi}{4} K S^2 f \rho u_b^2 \quad (2)$$

また、 W は浮遊幼生の水中重量、 F_p は浸透流に伴い浮遊幼生に作用する流体力、 θ は浮遊幼生の静

止摩擦角でそれぞれ次式で定式化できる。

$$W = \frac{4}{3} (\rho_s - \rho) g \pi \left(\frac{S}{2} \right)^3 \quad (3)$$

$$F_p = \frac{1}{2} C_p \rho \pi \left(\frac{S}{2} \right)^2 \left(\frac{q}{\varepsilon} \right)^2 \quad (4)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{d}{\sqrt{S(2d+S)}} \right) \quad (5)$$

ここに、 C_p は浸透流に伴う抗力を評価する係数で、殻長を代表長さとするレイノルズ数（ Re ）のオーダーが概して1以下となることから、 $Re < 1$ の任意形状の3次元物体に適用可能なレイノルズの式（ $C_p = 24 / Re$ ）で与える。これらを釣り合い式に代入し、以下のように浮遊幼生の安定指標 Ψ_p を定義した。

$$\Psi_p = \frac{2}{3K} = \frac{(u^*)^2 \sqrt{S(2d+S)}}{\left\{ \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) g S + \frac{3}{4} C_p w^2 \right\} d} \quad (6)$$

ここに、 $w (= q / \varepsilon)$ は浸透流速、 $u^* (= (\tau_b / \rho)^{1/2})$ は摩擦速度であり、 Ψ_p は摩擦速度を代表流速としたレイノルズ数（ $Re^* = u^* S / \nu$ 、 ν ：動粘性係数）に依存する。安定指標 Ψ_p は着底直後の浮遊幼生の安定性を表し、値が大きいほど不安定となる。なお、 F_L は水平流速より発生する揚力であるが、他と比較してオーダー的に小さいため質量力と共に無視した。

本研究では、浮遊幼生の着底基質の選択性は、生物学的な要因と物理的な要因の複合要因によって決定されるものと仮定した上で、生物学的な要因については、静水下における底質粒径の選択性を実験的に定量化した上で、着底率 γ_{b0} （単位時間内に海水中に浮遊している幼生が着底した割合）で評価した。更に、底面流速や浸透流の存在する様々な流動条件下における着底率 γ_b の増減は、物理的な要因に起因して生ずるものと仮定し、その比率（着底効率 $R : \gamma_b / \gamma_{b0}$ ）は、今回新たに導入した安定指標 Ψ_p の関数 $R(\Psi_p)$ として次のように表現できるものと考えた上で、浮遊幼生を用いた水槽実験より各諸元を定式化した。

$$\gamma_b = \gamma_{b0} R(\Psi_p) \quad (7)$$

3. 実験の概要

(1) 供試幼生

着底後期のアサリ浮遊幼生は、2003年10月20日に千葉県水産研究センター富津研究所より入手した10

万個体を、福井県立大学海洋生物資源臨海研究センターより供給された濾過海水を $1\mu\text{m}$ で精密濾過後、紫外線殺菌処理し、水温 19°C に調温された飼育水槽（ $80\times 30\times 25\text{cm}$ ）に収容した（図-3参照）。

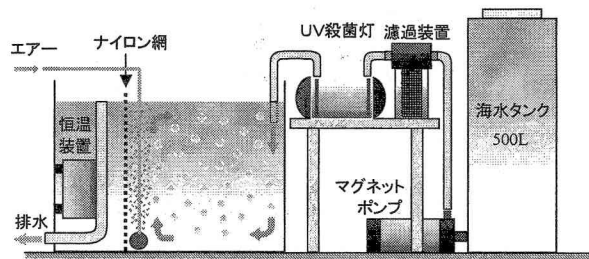


図-3 飼育水槽

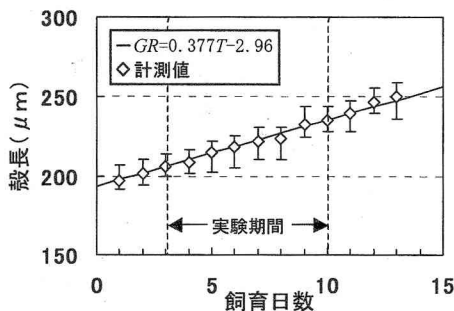


図-4 実験期間中の平均殻長

飼育期間中は*Chaetoceros caicitrans*を投餌しながら定期的に飼育海水を採取し、ローズベンガルで染色後、5%ホルマリンで幼生を固定した上で画像解析装置を用いて殻長を測定した。図-4は飼育期間中の殻長の変化を示したもので、図中の実線は飼育開始時の平均殻長（ $193.42\mu\text{m}$ ）を基準として、既往の成長率 $GR(\mu\text{m}/\text{日})$ より推定される幼生の成長過程を示したものであるが⁶⁾、両者はほぼ一致し、本実験で使用した浮遊幼生は、実験期間中、正常な状態で成長を続けていたことが確認された。

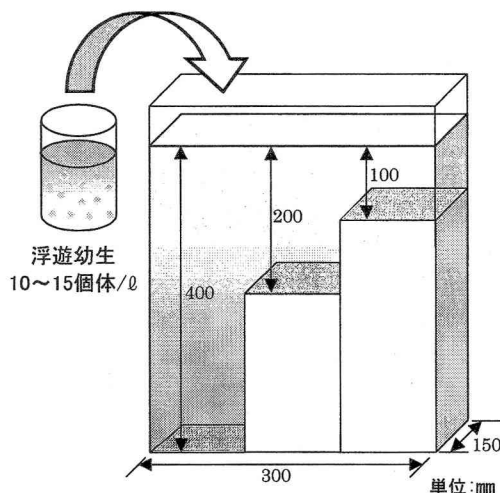


図-5 静水場における実験水槽

(2) 静水場における実験方法

図-5に示すように、水深が 10cm 、 20cm 、 40cm の3段階に異なる底面を有するアクリル製の水槽を試作した。水槽の底面には、ガラスビーズをシリコンボン드로接着した底板を配置し、ビーズの平均粒径を $0.212\sim 2.156\text{mm}$ の範囲内で5段階に変化させながら、浮遊幼生の底質粒径の選択性や、水深が着底に及ぼす影響について検討した。水槽に飼育水槽と同様な処理を施した精密濾過海水を入れ、水温を 19°C に調温後、水槽内の浮遊幼生密度が $10\sim 15$ 個体/ℓになるように飼育水槽より浮遊幼生を移した。実験では、幼生を水槽内に加入後、1, 3, 6, 12時間後に、底板表面に着底したアサリ浮遊幼生を採取し計数する作業を各底質条件毎に繰り返した。なお、浮遊幼生は光に対する負の走性を持つことに配慮して、暗条件（照度一定）で実施した。

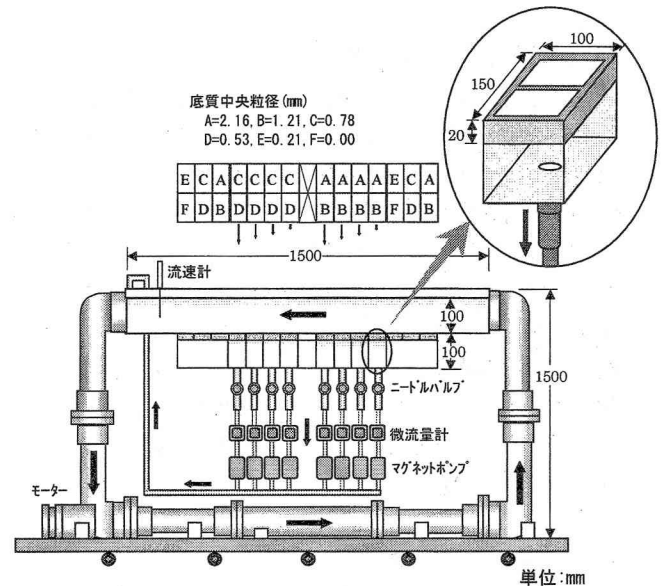


図-6 流動場における実験水槽

(3) 流動場における実験方法

本実験のために試作した浸透流発生水槽は、図-6に示すように海水対応の鉛直循環式小型回流水槽で、観測部（水路長 150cm 、水路幅 15cm 、水深 10cm ）底部に配置された砂層箱の内部を16区画に分割し、各区画（ $7.5\times 10\text{cm}$ ）毎に粒径の異なるガラスビーズ（中央粒径 $0.533\sim 2.156\text{mm}$ の4段階）を砂層厚 2cm まで敷き詰めた上で、各区画の最下部よりマグネットポンプで強制的に海水を吸引後再び水槽内に還流することによって各区画毎に流速の異なる浸透流場を形成した。更に、砂層箱の両側底面に、ガラスビーズ（中央粒径 $0.212\sim 2.156\text{mm}$ の5段階）を接着した底板を計12枚配置し、浸透流が発生しない状況下における浮遊幼生の底質選択性を調べた。

実験では、水槽内の幼生分布密度が $10\sim 15$ 個体/ℓとなるように飼育水槽より浮遊幼生を移し、主流

の流速を0～30cm/sの範囲内で4段階、浸透流速を0.01～0.3cm/sの範囲内で4段階に変化させて、合計12通りの流動条件に対して着底特性を調べた。各流動条件の作用時間は12時間（同一条件で3回繰り返し）とし、実験終了後、着底個体を5%ローズベンガルで染色し、ホルマリンで固定後計数など解析処理を実施した。

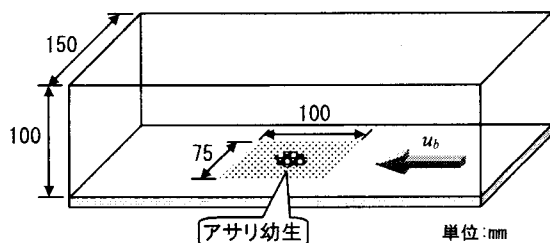


図-7 移動限界流速実験

(4) 移動限界流速の実験方法

着底直後の幼生の底層流に対する安定性を検討するため、図-6で示した水槽観測部に粗度（表面に中央粒径が0.212～2.158mmの5段階のガラスビーズを接着）を調整した底板（75×100mm）を配置し、ホルマリンで固定した着底直後の幼生を、底板中央にパッチ状（約100個体）に分布させた。実験では、主流流速を段階的に上昇させながら、幼生が移動を開始する初期移動限界流速（パッチの中心位置は変化しない）、および、全体的な幼生の移動が認められる全面移動限界流速（パッチの中心位置も移動）を計測した（図-7参照）。

4. 結果および考察

(1) 静水場における着底率

図-8 は、静水場における各水深で平均化された浮遊幼生着底率 γ_{b0} の経時変化を底質粒径毎に示したものである。更に、図-9 は、実験開始12時間後における γ_{b0} の底質中央粒径 d_{50} による変化を水深毎にプロットしたものである。これらより、 γ_{b0} は浮遊時間の経過とともに累積的に増加するが、増加率は底質の中央粒径に依存し、本実験範囲においては最大粒径（2.156mm）における γ_{b0} は最小粒径（0.212mm）に対して約1.68倍着底率が増加した。なお、水槽底板の一部を滑面（アクリル板）にすると着底が殆ど認められなかったことから、静水場における浮遊幼生は基質の粗度を選択していることが確認されるとともに、今回実験した水深条件範囲内では水深による着底率の有意な変化は認められなかったことから、水深10cmにおいても、幼生の底質選択行動には影響を及ぼさないことがわかった。

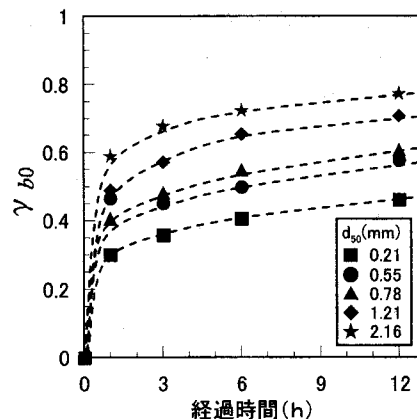


図-8 着底率 γ_{b0} の底質粒径依存性

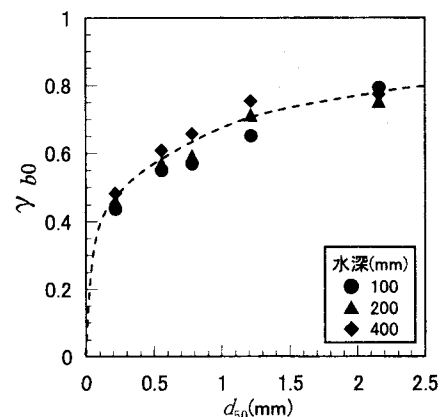


図-9 着底率 γ_{b0} の水深依存性

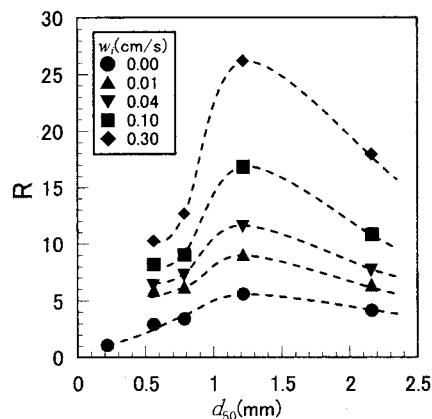


図-10 着底効率 R の底質粒径依存性

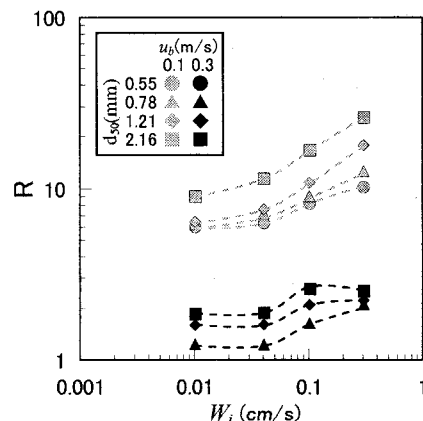


図-11 着底効率 R の浸透流速による変化

(2) 流動場における着底率

図-10は、底層流速 u_b が10cm/sで、浸透流速を0～0.3cm/sまで5段階変化させた場合における着底効率の底質中央粒径による変化を示したものである。更に、図-11は、底層流速 u_b および中央粒径 d_{50} をパラメータとして、着底効率の浸透流速 w_i による変化を示したものである。

これらより、流動場における浮遊幼生の着底率は、浸透流が発生しない条件下においても、底層流に伴う移流効率で幼生の好適基質への遭遇率が向上するため、静水場における着底率と比較して総じて増加し、本実験範囲内では、最大5.7倍（中央粒径1.21mm）の着底率が確認された。また、浮遊幼生の着底率は静水時と比較して、浸透流の増加とともに、底質粒径に依存しながら一様に増大し、本実験範囲内においては、主流流速10cm/sで底質粒径1.21mmの極粗砂において、静水時と比較して最大26.3倍の着底率が確認された。着底効率は主流流速の増加とともに減少し主流流速30cm/sでは最大で5.1倍程度の着底効率に留まった。

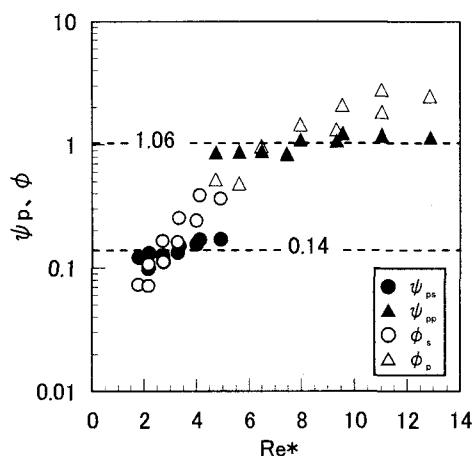


図-12 ϕ および ψ_p の Re^* による変化

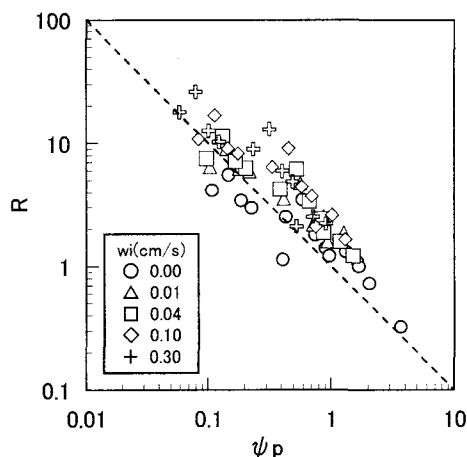


図-13 着底効率 R の ψ_p による変化

(3) 安定指標の適応性

図-12は、着底直後の浮遊幼生の、主流流速の増加に伴う初期移動限界条件（添字 S ）、および全面移動限界条件（添字 p ）のレイノルズ数 Re^* による変化を、殻長を代表長さとして計算される移動限界シールズ数 ϕ 、および今回新たに導入した安定指標 ψ_p で示したものである。

これより、今回新たに導入した安定指標 ψ_p によれば、主流の流速が作用した場合の浮遊幼生の移動限界流速はレイノルズ数や底質の粒径によらずほぼ一定値を取り、初期移動限界流速および全面移動限界流速に対応する ψ_p 値は、それぞれ0.14, 1.06程度を維持した。一方、移動限界シールズ数はレイノルズ数や底質粒径に依存して変化し、同一レイノルズ数に対しても値にばらつきが生じている。これより、今回新たに提案した安定指標 ψ_p の妥当性が検証されるとともに、殻長が底質粒径とオーダー的に等しい浮遊幼生においては、シールズ数は安定指標としては適当でないことが示唆された。

図-13は、浮遊幼生の着底効率 R と ψ_p の関係を、流動環境下の全ての実験ケースについてプロットしたものである。これより、浮遊幼生の着底効率 R は、主流流速、浸透流速、底質粒径によらず ψ_p に反比例し、同一曲線上にプロットされ、安定指標 ψ_p によって統一的に整理できることがわかった。すなわち、主流流速や浸透流速が存在する流動場における浮遊幼生の着底効率は物理的な安定性に強く依存して決定されていることが明らかとなった。更に、着底効率 R が1（流動場における着底率が静水下の着底率と同一になる場合）に対応する ψ_p は1.0程度で全面移動限界条件とほぼ一致することから、流動場における浮遊幼生の着底率は、浮遊幼生が物理的に底質上で安定となる条件下においては、静水下の着底率よりも総じて増加することが明らかとなった。

参考文献

- 1) 柳橋茂昭: アサリ幼生の着底場選択性と三河湾における分布量, 水産工学, 第29巻1号, pp. 55-59, 1992.
- 2) 内山雄介: 砂浜海岸帯水層における潮位変動に伴う循環流の形成機構, 土木学会論文集, No. 670/II-54, pp. 37-48, 2001.
- 3) 鳥羽光晴, 夏目洋, 山川紘: 東京湾産アサリの成熟と産卵に関する二・三の知見, 水産工学, 第29巻1号, pp. 47-54, 1992.
- 4) Cragg, S.M.: Swimming behaviour of the larvae of *Pecten maximus*(L.)(Bivalvia), *Jour. Mar. Biol. Assoc. U.K.*, 60, pp. 551-564, 1980.
- 5) Mann, R.: The effects of temperature on growth, physiology, and gametogenesis in the manila clam *Tapes philippinarum*, *Jour. exp. mar. Biol. Ecol.*, 38(2), pp. 121-133, 1979.
- 6) 鳥羽光晴: アサリ幼生の成長速度と水温の関係, 千葉県水産試験場研究報告, 第50巻, pp. 17-20, 1992.