東京湾盤洲沿岸での夏季 1 潮汐間におけるアサリ幼生の鉛直分布の特徴

鳥羽 光晴,^{1*} 山川 紘,^{2a} 庄司紀彦,^{1b} 小林 豊¹

(2012 年 8 月 16 日受付, 2013 年 1 月 7 日受理)

¹千葉県水産総合研究センター東京湾漁業研究所, ²東京海洋大学生物資源学科Spatial distribution of Manila clam *Ruditapes philippinarum* larvae characterized through tidal-cycle observations at Banzu coast, Tokyo Bay, in summerMITSU HARU TOBA,^{1*} HIROSHI YAMAKAWA,^{2a} NORIHIKO SHOJI^{1b}
AND YUTAKA KOBAYASHI¹¹Tokyo Bay Fisheries Laboratory, Chiba Prefectural Fisheries Research Center, Futtsu, Chiba 293-0042,²Department of Marine Bioscience, Tokyo University of Marine Science and Technology, Minato, Tokyo 108-8477, Japan

Larvae of Manila clam were sampled at eight sites along an on-offshore transect line in Banzu, Tokyo Bay. Clam larvae were sampled at vertical points at each site during a tidal cycle (06 : 00 to 18 : 00) at 90-min intervals in a spring tide (August 7, 2001) and a neap tide (August 13, 2001). Small-sized larvae (SSL, shell length < 143 μm) were abundant in the surface and middle points throughout the tidal cycle in both the spring and neap tides. Medium-sized (MSL, 144–175 μm) and large-sized (LSL, > 176 μm) larvae were abundant in the middle and bottom points in the spring tide and in the surface and middle points in the neap tide. Densities of the SSL were not different between onshore and offshore divisions (foreset slope, subtidal flat) of the sampled sites. In the spring tide, high densities of MSL and LSL were observed in the bottom of the forset slope during an ebbing tide and in the tidal flat in a flooding tide. SSL appeared to be abundant in surface and middle points in relation to higher water temperature and lower salinity. However, the aggregation of MSL and LSL in the bottom of the forset slope and in the tidal flat may not have been related to water temperature and salinity.

キーワード：アサリ, 鉛直分布, 成長, 前置斜面, 潮汐, 遊泳行動, 幼生

全国のアサリ *Ruditapes philippinarum* の主要生産海域における漁獲量は 1990 年代以降大幅に減少し, 2010 年の全国漁獲量は最盛期であった 1983 年の約 4 分の 1 の約 4 万トンとなっている。アサリの資源減少の原因に関してはこれまで様々な議論がなされているが, 指摘されている問題点は赤潮や貧酸素などによる水質悪化,¹⁾ 過剰漁獲,²⁾ 排水水質規制などによる栄養塩の減少,³⁾ あるいは複数の要因の複合による幼生の生き残りの低下⁴⁾ など海域によって異なる。そのような中で, 全国の主要生産海域に共通する資源減少の特徴としてあげられているのは天然発生稚貝の減少である。⁵⁾

アサリの稚貝発生には着底場への幼生の来遊が不可欠

である。これまでにアサリの主要生産海域において幼生の分布実態の調査が多く行われ, 東京湾, 三河湾, 伊勢湾, 周防灘, 有明海などで幼生の分布密度とその季節変化が明らかになっている。^{6–13)} その結果, 稚貝発生が比較的豊富な三河湾では幼生が春から秋まで継続的に出現し, 年間の最高密度は数万～十数万個体 kL^{-1} に達することが確認されている。¹⁴⁾ これに対し, 資源減少の著しい周防灘では, アサリ幼生は限られた時期に散発的にしか出現せず, 最高密度も千個体 kL^{-1} 前後かそれ以下にとどまる。^{11,15,16)} 主要な生産海域ごとに見た場合, 幼生の出現密度が高く, 出現に季節的な継続性がある海域では稚貝発生量が多い傾向にあり, 幼生供給量と海域のア

* Tel : 81-439-65-3071. Fax : 81-439-65-3072. Email : m.tb2@pref.chiba.lg.jp

^a 現所属：東京海洋大学産学・地域連携推進機構 (Office of Liaison and Cooperative Research, Tokyo University of Marine Science and Technology, Minato, Tokyo 108-8477, Japan)^b 現所属：千葉県水産総合研究センター (Chiba Prefectural Fisheries Research Center, Minamiboso, Chiba 295-0024, Japan)

サリ稚貝発生には対応があることが推測される。

一方、個々の着底場を見た場合には、その着底場への幼生の来遊量と着底量の関係が重要になる。ところが、沿岸の潮間帯が底生個体の生息場となっている二枚貝では、着底場付近の沖側潮下帯への浮遊期幼生の来遊量と潮間帯にある着底場での着底量は必ずしも一致しない。^{17,18)} アサリにおいても、着底場付近への幼生の来遊量と着底場での稚貝発生量が対応する場合¹⁹⁾と対応しない場合がある。²⁰⁾

アサリの主な生息場は干潟を中心とした砂泥域であり、幼生の供給場となる親貝の産卵場および着場となる稚貝の着底場はいずれも潮間帯であることが多い。ところが、上にあげた研究を含めてこれまでのアサリ幼生の季節動態あるいは空間動態に関する研究のほとんどは潮下帯を研究対象域としている。これらの研究では、産卵後1日以上を経過したD状態以降の幼生から着底能力を備えた着底期幼生までについて、産卵場近くの潮下帯から着底場近くの潮下帯における分布を取り扱っている。

アサリ幼生が干潟域に着底する際には、着底能力を備えた大型幼生が冠水時に干潟域に来遊することが必要である。すなわち、着底場への幼生供給を評価する際には、産卵場から着底場近傍への幼生の動態だけでなく、着底場近傍の潮下帯での幼生の分布およびその潮間帯への輸送機構の理解が重要である。しかし、干潟域とその近傍での潮汐に対応したアサリ幼生の空間動態に関する研究は少なく、²¹⁻²³⁾ 特に幼生の大きさによる分布の差異とその分布の潮汐の干満に伴う変化、さらにそれらの分布と水温、塩分などの水質条件の関係を評価した研究は見当たらない。

著者らはアサリの生息場である干潟域とその近傍におけるアサリ幼生の分布およびその潮汐の干満にともなう変化を把握するために、他のアサリ主要生産海域と比べても幼生が比較的高い密度で出現する東京湾^{6,7,24)}の盤洲沿岸を調査対象域に選定し、大潮時および小潮時にそれぞれ一定時間間隔で12時間の幼生の密度調査を行った。本報告では、その結果明らかとなった大潮時と小潮時および幼生の大きさによる分布の差異、さらにそれら幼生の分布と同時観測した水質条件との関係について議論する。

方 法

調査場所 調査場所は東京湾中部東岸に位置する盤洲干潟とその前面海域である (Fig. 1)。盤洲干潟は汀線方向約12 km、岸沖方向約1.0~1.5 km、地盤高+0.8~±0 m (大潮時の平均干潮面=0 m) の干潟域である。盤洲での潮差は最大で約2 mであり、大潮の干潮時には沖合い約1.2 kmまでが空中に露出する。盤洲干潟は

Fig. 1 Locations of the sampling sites of the Manila clam larvae in Banzu, Tokyo Bay. Nine sites (A-I) were arranged along the on-offshore transect line. Numerals and dotted areas in the charts indicate water depth [MLWS (mean low water level in spring tide) = 0 m] and tidal areas, respectively.

Fig. 2 Schematic diagram of the arrangement of vertical points for the sampling of clam larvae. The chart shows the vertical positions of the sampled points in a flood spring tide [August 7, 2001; tidal height was approximately 1.9 m (MLWS=0 m) in the flood tide]. Sampled sites were divided into three on-offshore groups (tidal flat, foreset slope, subtidal flat) according to bottom depth and topography. Vertical points in the foreset slope and subtidal flat were divided into three depth layers (surface, middle, bottom) according to the vertical positions of the points. In every sampling, the vertical positions of the surface points and middle points were determined by depth from the surface, and those of the bottom points and tidal flat points were determined by height from the bottom surface.

ほぼ全域がアサリ漁場として利用されており、調査年（2001年）には放流個体と合わせて全域平均で $140 \sim 265$ 個体 m^{-2} のアサリの分布が確認されていた。（内湾貝類漁場調査事業，平成13年度千葉県水産研究センター業務年報，61～63。）

調査に当たっては干潟域からその沖合部にかけて岸沖方向に1測線を設定し，その測線上に調査地点9点（A～I）を配置した（Figs. 1, 2）。最も岸寄りのAは，地盤標高が約+0.6 mであり，干潟域の岸沖方向のほぼ中央部に当たる。Aから沖方向に約600 m離れたDまでは干潟域である。Dの沖側約700 mの間は海底面が急勾配で落ち込む前置斜面域であり，水深が約9 mに達して以降はほぼ平坦な緩勾配となって沖へ続いている。調査地点のうち岸寄りの4点（A～D）は干潟域，中間の3点（E～G）は前置斜面域，沖寄りの2点（H, I）は沖側の平坦域に当たる。

幼生の採集と計測 調査地点9地点のうちEを除く8地点において幼生を採集した。幼生を採集した水深は，A～D（干潟域）では海底面上0.3 mである。F～I（前置斜面域および沖側平坦域）での採集水深は海面下0.3 mおよび海底面上0.5 mとし，水深の深いG～Iでは中間の採集水深を加えた。中間の採集水深は，Gでは4 m，Hでは2, 4, 6 m，Iでは4 mであり，幼生を採集した鉛直層数はF～Iでそれぞれ2, 3, 5, 3層である。

幼生は調査船から垂下した水中ポンプで海水とともに採集した。採集時間は1水深1回当たり約2分間であり，採取した海水量は150～250 Lである。採取した海水は直ちに船上で目合い50 μm のネットでろ過し，残留物を試料とした。採集した試料数は1水深当たり1試料である。試料は水冷しつつ実験室に持ち帰り，計測まで $-80^{\circ}C$ で保存した。また，幼生の採集と同時に携帯型の水質測定器（Model 85D; YSI Inc.）を用いて，水深1 mごとおよび表層（海面下0.3 m）と底層（海底面上0.5 m）で水温，塩分，溶存酸素量（DO）を観測した。Eでは水温，塩分，DOの観測のみを行った。

幼生の採集は，2001年8月7日（大潮期）と8月13日（小潮期）に実施した。幼生の採集は，両採集日ともに午前6時から午後6時まで90分間隔で9回行った（Fig. 3）。幼生の採集には調査船2隻を充当し，各時刻の作業は30分以内に終了させた。なお，干潟域では干潮時に水深が0.3 m以下になった場合には幼生を採集しなかった。

採集した幼生は計測に先立って，浜口（1999）²⁵⁾に従ってFITC蛍光抗体染色を施した。計測に当たっては，蛍光顕微鏡下で観察して面盤部分を中心に緑色蛍光を発する個体をアサリ幼生として取り扱った。幼生の殻長の計測には接眼マイクロメータを用い，殻長はマイクロメータの最小目盛（8.2 μm ）を単位として求めた。

Fig. 3 Changes of tidal height on the days when clam larvae were sampled, August 7, 2001 (spring tide) and August 13, 2001 (neap tide). Tidal height represents water depth (MLWS=0 m). Vertical lines indicate the times of larval sampling (90-min intervals).

解析 鳥羽ら（2012）²⁶⁾による東京湾沿岸での調査ではアサリ幼生は成長に伴って分布水深が変化し，殻長約143 μm 以下の小型幼生は主として表・中層に分布したが，殻長の大型化とともに底層に分布する傾向を強め，176 μm 以上の大型幼生は底層を中心に分布していた。そこで，本報告でも同様のサイズ区分を適用して解析を行うこととし，幼生の空間分布の解析に当たっては，幼生の大きさを計測目盛に合わせて，143 μm 以下の小型幼生，144～175 μm の中型幼生，176 μm 以上の大型幼生に区分して大きさごとに密度を比較した。小型幼生，中型幼生，大型幼生はそれぞれ幼生の发育段階区分でD状期幼生，アンボ期幼生，フルグロウン期幼生にほぼ該当する。²⁷⁾ なお，アサリ幼生のふ化時および着底時の殻長はそれぞれ約100 μm および200～220 μm であり，²⁸⁾ ふ化から着底までに要する日数は調査時の水温に近い $25^{\circ}C$ では約15～18日間と推定される。²⁹⁾ 解析に当たって幼生密度はあらかじめ対数変換した。

幼生の鉛直密度を比較するために，干潟域を除く4地点（F～I）の幼生採集水深を表層，中層，底層に3区分した（Fig. 2）。また，岸沖方向の密度を比較するために，採集地点を干潟域（A～D），前置斜面域（F, G），沖側平坦域（H, I）に3区分した。

まず大潮時と小潮時のそれぞれにおいて，鉛直区分，岸沖区分，および採集時刻による幼生密度を比較するために多元配置分散分析（MANOVA）を適用した。このとき，干潮時を中心に干潟域で幼生の採集ができなかった時刻があったため，干潟域で幼生が採集できた時刻も含めて干潟域のデータは解析に使用しなかった。

次に採集時刻ごとの鉛直区分間および岸沖区分間の幼生密度の比較を行った。まずShapiro-Wilkの方法で各区分内の正規性を検定し，正規性が認められた場合にはLevene方法で等分散性を比較し，等分散性の有無に応じた一元配置分散分析（ANOVA）を行って区分間の有意差を検定した。有意差が認められた場合には，Tukeyの方法（等分散）あるいはGomes-Howellの方法（不

等分散)で各区分の多重比較を行った。正規性が認められなかった場合には Kruskal-Wallis の方法で区分間の有意差の検定を行い, 有意差が認められた場合には Steel-Dwass の方法で各区分の多重比較を行った。なおこのとき, 鉛直区分の比較は潮下帯 (F~I) のみについて行うこととし, 干潟域のデータは使用しなかった。また, 岸沖区分の比較に当たっては, 干潟域の A~D の全ての地点で採集ができた時刻については前置斜面域および沖側平坦域と合わせて3区分間の比較を行い, それ以外の時刻については前置斜面域と沖側平坦域の2区分のみの比較を行った。

水温, 塩分, DO の各区分間の比較には, 幼生を採集した水深で観測した値を用い, 幼生密度の比較と同様の方法を適用した。また, 幼生密度と水温, 塩分, DO の関係の評価するために, 潮下帯 (F~I) において各幼生試料の採集と同時に観測した水温, 塩分, DO について, 大潮時と小潮時のそれぞれで Spearman の順位相関係数を求めた。

以上の統計解析の計算には R (ver. 2.8.1) を使用した。

結 果

2001年8月7日の天気は曇り, 気温は23.0~25.7℃, 風向は北東~東, 風速は1~2 m s⁻¹で穏やかな天候であった(国土交通省気象庁気象統計情報, 木更津, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>)。8月13日の天気は曇り時々晴れで, 気温は22.3~28.8℃, 風向は東北東~南南東あるいは北北西~西北西, 風速は1~3 m s⁻¹で同じく穏やかな天候であった。

2001年8月7日(大潮時)および8月13日(小潮時)の採集では, いずれも小型(殻長<143 μm), 中型(144~175 μm), 大型幼生(>176 μm)がともに採集された(Fig. 4)。8月7日に採集された幼生の殻長頻度分布は103~110 μmと176~183 μmにピークを持つ二峰性であり, それぞれのピークの密度は138, 207 個体 100 L⁻¹であった。8月13日に採集された幼生の殻長頻度分布は103~110 μmに大きなピークのある単峰性であり, ピークの密度は1,495 個体 100 L⁻¹であった。採集された幼生の殻長ごとの密度は8月7日と8月13日で大きく異なっていたが, それぞれこれまで東京湾で報告されているアサリ幼生の密度の範囲内であった。^{6,7,26)}

大潮時の幼生密度 2001年8月7日に採集された小型, 中型, 大型幼生の各鉛直層1試料当たりの最低密度~最高密度は, それぞれ0~228, 0~484, 0~416 個体 100 L⁻¹であった。小型, 中型, 大型幼生ともに鉛直区分間の密度に有意差が認められ ($p < 0.01$, MANOVA), 特に小型幼生と大型幼生の鉛直区分間の密度差

Fig. 4 Size frequency composition of the clam larvae sampled on August 7 and 13, 2001. Division of shell length is based on the minimum scale of the optical micrometer (=8.2 μm).

は有意性が高かった ($p < 0.001$, Table 1)。また, 小型幼生は岸沖区分間の密度に差が認められなかったのに対し, 中型幼生と大型幼生は岸沖区分間の密度に有意差が検出された ($p < 0.01$)。さらにいずれの大きさ区分の幼生でも採集時刻間に有意差が認められ ($p < 0.05$), 中型幼生 ($p < 0.001$) と大型幼生 ($p < 0.01$) で採集時刻間の密度差の有意性が高かった。さらに, 中型幼生と大型幼生では鉛直区分と岸沖区分の間の交互作用に有意差が認められた ($p < 0.01$)。

小型幼生は朝の満潮時に当たる 06:00 には, F~I の表層から中層で 33~168 個体 100 L⁻¹ の比較的高い密度で採集され (Fig. 5a), 表・中層と底層の密度には有意差が認められた ($p < 0.05$, Fig. 6a)。小型幼生は 07:30 以降 18:00 までの 8 回のいずれの採集でも表・中層で多く採集され, 09:00 と 18:00 の採集では表層あるいは表・中層の密度が底層に比べて有意に高かった ($p < 0.05$)。

これに対し, 中型幼生は表層に比べて中層あるいは中・底層で高密度で採集されることが多く (Fig. 5b), 09:00 と 10:30 の採集では表層と底層の密度に有意差が認められた ($p < 0.05$, Fig. 6b)。大型幼生は, 中型幼生に比べて中層あるいは中・底層で多く採集される傾向がやや強く (Fig. 5c), 9 回の採集のうち 4 回の採集で中・底層あるいは底層の密度が表層に比べて有意に高

7 August 2001

Fig. 5 Time-series changes of the spatial density of clam larvae in three size classes: (a) small-sized larvae (shell length <143 μm), (b) medium-sized larvae (144–175 μm), and (c) large-sized larvae (>176 μm) on August 7, 2001 (spring tide). Numerals in the charts in the left row indicate the time (hour: minute) and tidal height (MLWS = 0 m) at larval sampling.

Table 1 MANOVA of spatial density of 3 size classes (S, shell length <143 μm ; M, 144–175 μm ; L, >176 μm) of Manila clam larvae in relation to depth division (3 levels; surface, middle, bottom), on-offshore division (2 levels; foreset slope, subtidal flat) and sampled time (9 levels; 06:00–18:00) August 7, 2001 (spring tide) and August 13, 2001 (neap tide) in Banzu

	df	MS	F	P
August 7, 2001				
S-sized larvae				
Depth (D)	2	8.830	30.438	0.0000***
On-offshore (O)	1	0.172	0.593	0.4441
Time (T)	8	0.668	2.371	0.0267*
D $\times$ O	2	0.681	2.349	0.1038
D $\times$ T	16	0.188	0.647	0.8330
O $\times$ T	8	0.383	1.321	0.2495
D $\times$ O $\times$ T	16	0.192	0.663	0.8182
Residual	63	0.290		
M-sized larvae				
D	2	0.714	6.440	0.0029**
O	1	1.516	13.673	0.0005***
T	8	0.803	7.245	0.0000***
D $\times$ O	2	1.210	10.915	0.0000***
D $\times$ T	16	0.155	1.399	0.1715
O $\times$ T	8	0.195	1.757	0.1028
D $\times$ O $\times$ T	16	0.046	0.418	0.9725
Residual	63	0.111		
L-sized larvae				
D	2	11.036	45.864	0.0000***
O	1	1.917	7.965	0.0064**
T	8	0.850	3.531	0.0020**
D $\times$ O	2	1.415	5.879	0.0046**
D $\times$ T	16	0.366	1.552	0.1202
O $\times$ T	8	0.345	1.436	0.1994
D $\times$ O $\times$ T	16	0.212	0.880	0.5939
Residual	63	0.241		
August 13, 2001				
S-sized larvae				
D	2	7.729	47.122	0.0000***
O	1	2.213	13.494	0.0005***
T	8	0.860	5.241	0.0000***
D $\times$ O	2	0.090	0.546	0.5822
D $\times$ T	16	0.480	2.927	0.0012**
O $\times$ T	8	0.118	0.718	0.5822
D $\times$ O $\times$ T	16	0.118	0.719	0.7645
Residual	63	0.164		
M-sized larvae				
D	2	4.768	20.927	0.0000***
O	1	2.646	11.612	0.0011**
T	8	1.736	7.620	0.0000***
D $\times$ O	2	0.393	1.723	0.1869
D $\times$ T	16	0.694	3.046	0.0008***
O $\times$ T	8	0.109	0.477	0.8679
D $\times$ O $\times$ T	16	0.149	0.653	0.8274
Residual	63	0.228		
L-sized larvae				
D	2	3.757	17.619	0.0000***
O	1	0.701	3.287	0.0746
T	8	1.235	5.790	0.0000***
D $\times$ O	2	0.249	1.166	0.3182
D $\times$ T	16	0.531	2.488	0.0053**
O $\times$ T	8	0.094	0.441	0.8918
D $\times$ O $\times$ T	16	0.115	0.541	0.9144
Residual	63	0.213		

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$.

7 August 2001

Fig. 6 Comparisons of the mean density of clam larvae among the three depth divisions of the sampled points (surface, middle, bottom layers) in the foreset slope and subtidal flat on August 7, 2001 (spring tide). Vertical bars represent standard errors. Different letters indicate significant difference between the depth divisions ($p < 0.05$; Tukey-HSD, Gomes-Howell, or Steel-Dwass).

かった ($p < 0.05$) (Fig. 6c).

2001年8月7日に干潟域のA～Dの全ての地点で採集が行えたのは06:00～09:00および06:30～18:00の5回であった。小型幼生は、干潟域での採集が行えた時刻には、前置斜面域あるいは沖側平坦域の密度が干潟域に比べて高かった (Figs. 5a, 7a)。前置斜面域と沖側平坦域の比較では、干潮時の10:30の採集で沖側平坦域の密度が有意に高かったが ($p < 0.05$)、採集時刻によって密度の高低は一定しなかった。

中型幼生は、夕方の満潮時に当たる18:00を除いて、前置斜面域の中・底層で高密度に採集された (Fig.

7 August 2001

Fig. 7 Comparisons of the mean density of clam larvae among the three on-offshore divisions of sampled sites (tidal flat, foreset slope, subtidal flat) on August 7, 2001 (spring tide). The sites in the tidal flat were not sampled during 10:30–15:00 due to low tide.

5b)。満潮から干潮に当たる06:00～09:00の採集では前置斜面域と沖側平坦域での密度が干潟域に比べて高かったが ($p < 0.05$)、干潮から満潮に当たる16:30と18:00には干潟沖側に当たるDでの採集密度が高くなって3区分間に有意差はなかった (Fig. 7b)。前置斜面域と沖側平坦域を比較すると、全ての採集時刻で両者に差はないか前置斜面域の密度が高かった。

大型幼生は、中型幼生に比べてさらに前置斜面域の中・底層で高密度に採集される傾向が強かった (Fig. 5c)。大型幼生は中型幼生と同様に、満潮から干潮に当たる06:00～09:00の採集では前置斜面域と沖側平坦域での密度が干潟域に比べて高かったが、干潮から満潮に当たる16:30と18:00には干潟沖側に当たるDでの密度が高く、3区分間の差はなかった (Fig. 7c)。前置斜面域と沖側平坦域を比較すると、満潮から干潮に当

たる06:00～12:00は前置斜面域の密度が高かった。

小潮時の幼生密度 2001年8月13日に採集された小型、中型、大型幼生の最低密度～最高密度はそれぞれ0～916, 0～174, 0～78個体100 L⁻¹であった。小型幼生、中型幼生、大型幼生ともに06:00と07:30の密度は低く、09:00以降に密度が増加した (Fig. 8)。

密度は小型、中型、大型幼生ともに鉛直区分および採集時刻によって強い有意差が認められ ($p < 0.001$)、小型幼生と中型幼生では岸沖区分間で有意差が認められた ($p < 0.01$) (Table 1)。また、小型、中型、大型幼生のいずれでも鉛直区分と採集時刻の間に交互作用が認められた ($p < 0.01$)。

小型幼生は06:00～18:00の全ての採集で表層と中層で高い密度で採集された (Fig. 8a)。07:30～09:00および15:00～18:00の採集では表層、中層、あるいは表・中層と底層の間に有意差が検出され ($p < 0.05$)、特に各採集密度が増加した15:00～18:00では、底層と表・中層の密度差が大きかった (Fig. 9a)。中型幼生は比較的高密度の幼生が採集された09:00と15:00～18:00では表・中層あるいは中層の密度が底層に比べて有意に高かったが ($p < 0.05$)、それ以外の時刻では採集密度が低く有意差は認められなかった (Figs. 8b, 9b)。大型幼生はいずれの採集でも密度が低く、表層、中層、底層の各平均密度は最高で30 ($\approx 10^{1.5}$) 個体100 L⁻¹前後かそれ以下であった (Figs. 8c, 9c)。大型幼生は表・中層あるいは中層での密度がやや高く、09:00～13:30では有意差が認められた ($p < 0.05$)。

8月13日に干潟域のA～D全てで採集が行えたのは09:00～13:30の4回であった。小型幼生と中型幼生は、干潟域での採集が行えなかった時刻を含めて前置斜面域で高密度で採集されることが多かったが、いずれの採集でも有意差は認められなかった (Fig. 10a, b)。大型幼生はいずれの時刻でも採集密度が低く (Fig. 8c)、岸沖区分間の差異は明確でなかった (Fig. 10c)。

大潮時の水温、塩分、DO 2001年8月7日に観測された水温は22.6～24.4℃、塩分は30.3～32.9、DOは2.5～6.4 mg O₂ L⁻¹の範囲にあり、各採集地点ともに上層において高水温、低塩分、高DOの傾向であった (Fig. 11)。前置斜面と沖側平坦域では24℃を越える水温および31以下の塩分は干潟上の海水が干潮時に沖側に流出した09:00～12:00を中心に表面付近で一時的に観測されたものであり、それ以外の時刻の水温と塩分はそれぞれ22.8～24.0℃、32.0～32.6の範囲にあった。

水温、塩分、DOはともに鉛直区分と採集時刻間で強い有意差が認められ ($p < 0.001$)、水温と塩分は岸沖区分間でも有意差が認められた ($p < 0.01$) (Table 2)。また、水温、塩分、DOともに鉛直区分と採集時刻の間の交互作用に有意差が認められ ($p < 0.01$)、水温とDO

13 August 2001

(a) Small-sized larvae
(SL <143 μm) (b) Medium-sized larvae
(144-175 μm) (c) Large-sized larvae
(>176 μm)

Fig. 8 Time-series changes of the density of clam larvae in the three size classes sampled on August 13, 2001 (neap tide).

13 August 2001

Fig. 9 Comparisons of the mean density of clam larvae among the three depth divisions of the sampled points (surface, middle, bottom layers) in the foreset slope and subtidal flat on August 13, 2001 (neap tide).

では鉛直区分と岸沖区分の間に交互作用に有意差が認められた ($p < 0.01$)。

各採集時刻での表層と底層の平均水温はそれぞれ 23.6~24.0°C, 22.8~23.3°C の範囲にあり, 表層と底層の平均水温の最大差は 1.2°C (10:30) であった (Fig. 12a)。同じく平均塩分は表層と底層でそれぞれ 31.4~32.4, 32.4~32.8 で両者の最大差は 1.4 (12:00) であった (Fig. 12b)。ほぼすべての採集時刻で表層が最も高温, 低塩分で底層が最も低温, 高塩分であり, 水温, 塩分ともに多くの採集時刻で表層と底層の間に有意差が認められた。DO は前置斜面域と沖側平坦域のそれぞれ底層で 4.0 mg O₂ L⁻¹ 以下の値が観測されたが, 幼生の生存に影響を与える 1.0 mg O₂ L⁻¹ 未満の貧酸素状態³⁰⁾は認められなかった (Fig. 12c)。

13 August 2001

Fig. 10 Comparisons of the mean density of clam larvae among the three on-offshore divisions of sampled sites (tidal flat, foreset slope, subtidal flat) on August 13, 2001 (neap tide). The sites in the tidal flat were not sampled during 06:00–07:30 and 15:00–18:00 due to low tide.

干潟域, 前置斜面域, 沖側平坦域での各採集時刻の平均水温はそれぞれ 23.7~24.0°C, 23.4~23.7°C, 23.1~23.6°C, 平均塩分はそれぞれ 30.8~31.0, 32.0~32.5, 32.1~32.6 であった (Fig. 13)。前置斜面域と沖側平坦域の間での平均水温と平均塩分の最大差はそれぞれ 0.3°C (10:30), 0.5 (10:30) であった。岸沖区分では干潟域が最も高温, 低塩分であり, 塩分は干潟域での幼生採集が可能であった全ての時刻で前置斜面域および沖側平坦域と有意差があった ($p < 0.05$)。前置斜面域と沖側平坦域の間では, 水温と塩分はともに全ての時刻で有意差が認められなかった ($p > 0.05$)。

小潮時の水温, 塩分, DO 2001 年 8 月 13 日に観測された水温は 23.2°C, 塩分は 23.6~33.0, DO は 1.6~8.2 mg O₂ L⁻¹ の範囲にあり, 8 月 7 日と同様に各採集

7 August 2001

Fig. 11 Time-series changes of vertical profiles of (a) water temperature, (b) salinity, and (c) dissolved oxygen measured concurrently with larval sampling on August 7, 2001 (spring tide).

時刻とともに上層で高温、低塩分、高 DO の傾向にあった (Fig. 14)。前置斜面域と沖側平坦域では 25.1°C 以上の水温、 31.0 以下の塩分、および $6.1\text{ mg O}_2\text{ L}^{-1}$ 以上の DO は、干潟上かあるいは干潟上の海水が沖側に流出した $12:00\sim 18:00$ に表面付近で観測された。これらの時刻での表面付近を除くと、水温と塩分はそれぞれ

$23.2\sim 25.0^{\circ}\text{C}$, $31.2\sim 33.0$ の範囲にあって空間的な差は小さかった。前置斜面域から沖側平坦域の底層で $07:30\sim 18:00$ に $1.6\sim 2.0\text{ mg O}_2\text{ L}^{-1}$ の低い DO が継続して観測された。

水温、塩分、DO はともに鉛直区間と採集時刻間で有意差が認められ ($p < 0.001$), 水温と DO は岸沖区分

Table 2 MANOVA of water temperature, salinity and dissolved oxygen in relation to depth division (3 levels; surface, middle, bottom), on-offshore division (2 levels; foreset slope, subtidal flat) and sampled time (9 levels; 06 : 00–18 : 00) August 7, 2001 (spring tide) and August 13, 2001 (neap tide) in Banzu

	df	MS	F	P
August 7, 2001				
Water temperature				
Depth (D)	2	6.483	169.650	0.0000***
On-offshore (O)	1	0.930	24.326	0.0000***
Time (T)	8	0.189	4.957	0.0000***
D×O	2	0.442	11.555	0.0000***
D×T	16	0.120	3.149	0.0006***
O×T	8	0.013	0.342	0.9463
D×O×T	16	0.034	0.882	0.5915
Residual	63	0.038		
Salinity				
D	2	4.287	140.854	0.0000***
O	1	0.316	10.368	0.0020**
T	8	0.295	9.692	0.0000***
D×O	2	0.034	1.105	0.3376
D×T	16	0.276	9.054	0.0000***
O×T	8	0.095	3.127	0.0049**
D×O×T	16	0.088	2.890	0.0014**
Residual	63	0.030		
Dissolved oxygen				
D	2	34.754	100.952	0.0000***
O	1	0.100	0.290	0.5919
T	8	1.858	5.360	0.0000***
D×O	2	3.357	9.752	0.0002***
D×T	16	1.769	5.138	0.0000***
O×T	8	0.892	2.592	0.0163*
D×O×T	16	0.244	0.710	0.7737
Residual	63	0.344		
August 13, 2001				
Water temperature				
D	2	22.719	281.013	0.0000***
O	1	0.549	6.793	0.0114*
T	8	1.357	16.790	0.0000***
D×O	2	0.323	3.993	0.0234*
D×T	16	0.491	6.071	0.0000***
O×T	8	0.034	0.419	0.9056
D×O×T	16	0.024	0.2934	0.9957
Residual	63	0.081		
Salinity				
D	2	11.339	112.187	0.0000***
O	1	0.040	0.393	0.5332
T	8	0.431	4.262	0.0004***
D×O	2	0.206	2.037	0.1390
D×T	16	0.070	0.692	0.7910
O×T	8	0.176	1.743	0.1060
D×O×T	16	0.024	0.239	0.9987
Residual	63	0.101		
Dissolved oxygen				
D	2	103.024	413.024	0.0000***
O	1	1.469	5.889	0.0181*
T	8	3.808	15.266	0.0000***
D×O	2	0.267	1.070	0.3492
D×T	16	3.612	14.480	0.0000***
O×T	8	0.138	0.553	0.8119
D×O×T	16	0.113	0.452	0.9603
Residual	63	0.249		

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$.

7 August 2001

Fig. 12 Comparisons of (a) mean water temperature, (b) mean salinity, and (c) mean dissolved oxygen among the three depth divisions of the vertical points (surface, middle, bottom layers) in the foreset slope and subtidal flat on August 7, 2001 (spring tide). Vertical bars represent standard errors. Different letters indicate significant difference between the depth divisions ($p < 0.05$; Tukey-HSD, Gomes-Howell, or Steel-Dwass).

間でも有意差があった ($p < 0.05$) (Table 2)。また、水温と DO は鉛直区分と採集時刻の間に交互作用が認められた ($p < 0.001$)。

各採集時刻での表層と底層の平均水温はそれぞれ 24.4~26.3°C, 23.2~23.7°C, 平均塩分はそれぞれ 31.3~31.8, 32.6~32.9 であった (Fig. 15a, b)。平均水温と平均塩分の表層と底層の間の最大差はそれぞれ 2.6°C (15 : 00), 1.3 (06 : 00) であった。8 月 7 日の観測と同様に、すべての採集時刻で表層が最も高温、低塩分で底層が最も低温、高塩分であり、水温、塩分ともに

7 August 2001

Fig. 13 Comparisons of (a) mean water temperature, (b) mean salinity, and (c) mean dissolved oxygen among the three on-offshore divisions of sampled sites (tidal flat, foreset slope, subtidal flat) on August 7, 2001 (spring tide).

多くの採集時刻で表層と底層の間に有意差が認められた。

干潟域, 前置斜面域, 沖側平坦域での各採集時刻での平均水温はそれぞれ 24.7~26.6°C, 24.1~24.7°C, 23.9~24.7°C, 平均塩分はそれぞれ 25.4~29.0, 31.8~32.5, 31.9~32.6 であり, 干潟域が最も高水温, 低塩分であった (Fig. 16)。各採集時刻で観測された前置斜面域と沖側平坦域での平均水温と平均塩分の差の最大値はそれぞれ 0.4°C (10:30), 0.5 (13:30) であった。水温と塩分はすべての採集時刻で前置斜面域と沖側平坦域の間でそれぞれ有意差は認められなかった ($p > 0.05$)。

幼生密度と水温, 塩分, DO の相関 8月7日の採集では, 小型幼生の密度と幼生採集時に同じ水深で観測した水温, 塩分, DO の間にはそれぞれ $r = 0.57$, -0.50 ,

0.53 の相関が認められた ($p < 0.001$) (Table 3)。一方, 中型幼生および大型幼生の密度と水温, 塩分, DO の間では $|r| = 0.01 \sim 0.41$ であった。8月13日の採集では, 小型幼生の密度と水温, DO の間にはそれぞれ $r = 0.58$, 0.55 の相関が認められたが ($p < 0.001$), 小型幼生の密度と塩分, および中型幼生と大型幼生の密度と水温, 塩分, DO の間では $|r| = 0.19 \sim 0.44$ であった。

考 察

幼生の大きさと潮時による分布の差異 8月7日および8月13日の採集では小型, 中型, 大型幼生はいずれも採集時刻による密度差が認められた (Table 1)。これは, いずれの大きさの幼生も採集時間帯に調査域外との移出入, すなわち岸沖断面以外の南北方向などからの移出入があった可能性を示している。特に8月13日には各サイズの幼生とともに 09:00 以降に採集密度が増加しており (Fig. 9), 調査域外からの移入があったと思われる。そのような中で殻長 143 μm 以下の小型幼生は, 8月7日 (大潮時) (Fig. 6a) と8月13日 (小潮時) (Fig. 9a) とともに朝 06:00 から夕方 18:00 まで干満変化に関わりなく継続的に表・中層に高密度で分布した。東京湾におけるアサリ幼生の周年調査データを集約した結果として, 沿岸域では殻長 143 μm 以下のアサリ小型幼生は表・中層を中心に分布するが, 176 μm 以上の大型幼生は中・底層に分布することが示されている。²⁶⁾ また, 三河湾においても 10 m 以浅の海域でアサリ小型幼生は主として表層に, 大型幼生は底層に分布することが報告されている。¹⁴⁾ 本研究において小型幼生が大潮時と小潮時ともに上層に継続的に分布したことはこれらの調査結果と整合する。

一方, 殻長 144~175 μm の中型幼生と殻長 176 μm 以上の大型幼生は, 8月7日には中層あるいは底層を中心に分布したが (Fig. 6b, c), 8月13日には中層あるいは表層に分布し (Fig. 9b, c), 調査日によって異なる鉛直分布を示した。8月7日の分布を岸沖区分で比較すると, 小型幼生は前置斜面域と沖側平坦域との密度差が明確でなかったのに対し (Fig. 7a), 中型幼生と大型幼生は前置斜面域での密度が高いことが多かった (Fig. 7b, c)。このとき中型幼生と大型幼生で鉛直区分と岸沖区分の密度に交互作用が認められ (Table 1), これらの幼生では鉛直区分の密度差が大きい時には岸沖区分の密度差が大きくなっていた。つまり, 中型幼生と大型幼生が前置斜面域で高密度に採集された干潮時前後には, これらの幼生は前置斜面域の底層に分布する傾向を強めていた。これは, アサリ幼生の遊泳層は成長に伴って単に深い水深に移行するだけでなく, 中・大型幼生は沿岸域においては底生期の生息場である干潟近傍の底層に集積する場合があることを示している。アサリのフルグロウ

13 August 2001

Fig. 14 Time-series changes of vertical profiles of (a) water temperature, (b) salinity, and (c) dissolved oxygen measured concurrently with larval sampling on August 13, 2001 (neap tide).

ン期幼生が干潟域沖側の前置斜面に多く、そのさらに沖側の水深の深い海底の平坦な場所には少ないことは有明海の菊池川河口でも認められている。²¹⁾

さらに、8月7日の満潮時から干潮時に前置斜面域の中・底層にあった中・大型幼生の密度の高い分布は、上げ潮から満潮時には干潟沖寄りの縁辺部に移り (Fig.

5b, c), 上げ潮に対応してアサリ大型幼生が干潟域へ進入していたことを示していた。上げ潮時の大型幼生の干潟域への進入を干潟域に着底するための行動と考えると、大型幼生が干潮時に前置斜面中・底層に分布したことも着底場近傍に滞留するという着底のための一連の行動と想定することができる。上げ潮に伴ってアサリ幼生

13 August 2001

Fig. 15 Comparisons of (a) mean water temperature, (b) mean salinity, and (c) mean dissolved oxygen among the three depth divisions of the vertical points (surface, medium, bottom layers) in the foreset slope and subtidal flat on August 13, 2001 (neap tide).

13 August 2001

Fig. 16 Comparisons of (a) mean water temperature, (b) mean salinity, and (c) mean dissolved oxygen among the three on-offshore divisions of sampled sites (tidal flat, foreset slope, subtidal flat) on August 13, 2001 (neap tide).

が沖合域から沿岸干潟域に進入することは以前から想定されていたが,^{21,23)} 着底場である干潟の近傍の岸沖断面においてアサリ大型幼生の滞留と干潟域への進入を示す分布変化を確認した例は本研究が初めてである。

水温, 塩分, DOの変動と幼生の分布 2001年8月7日および8月13日の観測では, 水温, 塩分, DOはいずれも採集時刻によって有意に異なっていた (Table 2)。両日ともに曇った穏やかな天気で気温と水温との差は小さかったことから, 水温と塩分の採集時刻による違いは気象条件による変動というより調査域外との海水の流出入によって生じた可能性が高い。8月7日には水温, 塩分, DOについて, また8月13日には水温と

DOについてそれぞれ鉛直区分と採集時刻の間に交互作用が認められたことは, 海水の流出入によってこれらの水質成分の鉛直差が拡大あるいは縮小したことを示している。しかし, このような海水の流出入にもかかわらず, 表層と底層の間の平均水温と平均塩分の最大差は8月7日ではそれぞれ1.2°Cと1.4 (Fig. 12a, b), 8月13日ではそれぞれ2.6°Cと1.3 (Fig. 15a, b) と小さかった。水温, 塩分, DOについて8月7日と8月13日のほぼすべての採集時刻で表層と底層の間に有意差が認められた理由は, それぞれの値の上下差が大きかったためではなく, 差が小さいながらも上層で高温, 低塩分, 高DOの状態が安定して継続していたためと思われる。

Table 3 Spearman's rank-order correlations (r) between density of larvae and water temperature, salinity, dissolved oxygen, which were measured concurrently with larval sampling

	Density of larvae		
	S	M	L
August 7, 2001			
Water temperature	0.57***	0.16*	0.41***
Salinity	-0.50***	-0.06**	-0.30***
Dissolved oxygen	0.53***	-0.01	0.31*
August 13, 2001			
Water Temperature	0.58***	0.44***	0.31***
Salinity	-0.44***	-0.19*	-0.07
Dissolved oxygen	0.55***	0.44***	0.28**

S, small-sized larvae (shell length <143 μm); M, medium-sized larvae (144–175 μm); L, large-sized larvae (>176 μm).

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$.

すなわち、8月7日と8月13日ではともに調査域を含めたある程度の空間範囲でこれらの相対的な水質構造が形成されていたことが考えられる。さらに幼生の採集結果と合わせると、両日ともに表・中層に高い密度で分布したという小型幼生の鉛直分布の特徴は、水質の空間構造とともに、調査断面だけの現象ではなくある程度の空間的な広がりを持った現象であったことが想定できる。

岸沖区分間の比較では、前置斜面域と沖側平坦域の平均水温と平均塩分の最大差は8月7日ではそれぞれ0.3°Cと0.5 (Fig. 13a, b), 8月13日ではそれぞれ0.4°Cと0.5 (Fig. 16a, b) で鉛直差よりさらに小さく、すべての採集時刻で有意差は認められなかった。

小型幼生は8月7日および8月13日ともに表・中層に高密度で分布した。このとき両日とも上層で高温、低塩分の状態が継続しており、小型幼生の密度と水温の間には両日でそれぞれ $r = 0.57, 0.58$ の相関が認められた。これらの結果からは、小型幼生はこれら水質成分の鉛直構造と対応して高温域あるいは低塩分域に高密度で分布しているように見受けられた。

一方、中型幼生と大型幼生は8月7日には中・底層に高密度で分布した。このとき中型幼生と大型幼生は小型幼生とは逆に低温、高塩分条件に対応して分布しているように見受けられた。しかし、8月13日には中・大型幼生は8月7日とは逆に高温、低塩分である表層あるいは中層に高密度で分布した。すなわち、中・大型幼生の分布と水温と塩分の観測結果の間には両調査日に一貫した関係が認められなかった。

また、8月7日には中・大型幼生は干潮時を中心に前置斜面の底層に高密度で分布したが、水温と塩分は前置斜面と沖側平坦域でほとんど差がなく、幼生の分布とこれらの水質条件は対応していなかった。さらに、前置斜

面の底層にあった中・大型幼生の密度の高い分布が上げ潮時に干潟域縁辺部に移ったが、前置斜面域と干潟域の水温と塩分はこの時間帯に大きな変化はなかった (Fig. 11)。

二枚貝の幼生が鉛直方向に偏った分布を形成する要因の一つとして幼生の遊泳行動があげられる。^{31,32)} 幼生の遊泳行動は水温、塩分、光、水圧³³⁻³⁶⁾ や餌料の存在³⁷⁾ などの影響を受けるため、鉛直的にこれらの環境条件が異なる場合にはそれによって遊泳行動の活性化や停滞などが起きる。その結果、これらの環境条件に対応して偏った鉛直分布が形成される。一方、鳥羽ら (2012)²⁶⁾ は、アサリ幼生の鉛直分布位置が幼生の成長に伴って深くなるのが水温3区分 (15.1~20.0°C, 20.1~25.0°C, 25.1~30.0°C) および塩分2区分 (25.1~30.0, 30.1~35.0) でそれぞれ共通して認められたこと示し、幼生のそのような鉛直分布特性が水温あるいは塩分によって変化しないことを推定している。

本研究において小型幼生が高温・低塩分の表・中層に分布したことは、小型幼生の鉛直分布がこれらの水質条件の影響を受けていたことを想定させる。しかし、15.1~30.0°C および 25.1~35.0 の広い水温・塩分範囲で小型幼生が表・中層に分布したこと²⁶⁾ を考えると、本研究で観察された小型幼生の鉛直分布と水温塩分条件との対応は見かけ上の現象である可能性もある。さらに、中・大型幼生については分布と水温あるいは塩分との対応は認められなかった。

数種の二枚貝では成長に伴って遊泳行動が変化し、それによって鉛直分布位置が変化することが報告されている。ヨーロッパホタテガイ *Pecten maximus* の幼生は、水温と塩分を一樣にした水槽実験でふ化後12日目までは表層を多く遊泳したが、23日目以降は底層を遊泳する傾向を強め、41日目にはほぼ全てが底層を遊泳した。³⁸⁾ また、ホンビノスガイ *Mercenaria mercenaria* 幼生の室内観察では、発育初期のD状幼生は表面を遊泳する傾向が強いのにに対し、アンボ期幼生は一樣に分散するようになり、pediveligerは底層近くを遊泳するようになる。³⁹⁾ ヨーロッパホタテガイ³⁸⁾ やチョウセンハマグリ *Meretrix lamarckii*⁴⁰⁾ の幼生では、発育初期には連続的であった面盤の纖毛運動が成長に伴って間欠的になり、結果的に大型幼生は底層を遊泳するようになることが実験的に確認されている。すなわちこれらの二枚貝幼生は、塩分や水温に対応して変化する遊泳特性とは別に、成長に伴って遊泳行動が変化し、遊泳層が上層から底層に変化する性質を持つと思われる。

本研究において、小型幼生が大潮時小潮時ともに表・中層に分布したこと、および中・大型幼生が大潮時に中・底層に分布したことには、鳥羽ら (2012)²⁶⁾ が指摘しているようにアサリ幼生の成長に伴う遊泳行動の変化が

鉛直分布に反映した結果である可能性がある。しかし、大潮時に中・大型幼生が前置斜面域底層に偏在したこと、および上げ潮とともに干潟域に高密度域が移動したことに対しては、水温や塩分との対応だけでなく、幼生の成長に伴う遊泳行動の変化の影響によっても十分に説明できない。中・大型幼生の前置斜面域底層への偏在に影響した要因、および上げ潮時の干潟域への移動に影響した要因、さらには大潮時と小潮時で分布が異なった要因は不明である。これらの分布およびその変化は前置斜面と干潟沖寄り縁辺部の限られた空間での時間単位の変動を含む現象であり、海水の流動を含めて、本研究よりさらに小さな時間空間スケールでの調査が必要かもしれない。

文 献

- 1) Tsutsumi H. Critical events in the Ariake Bay ecosystem: clam population collapse, red tides, and hypoxic bottom water. *Plankton Benthos Res.* 2006; **1**: 3–25.
- 2) 松川康夫, 張 成年, 片山知史, 神尾光一郎. 我が国のアサリ漁獲量激減の要因について. 日水誌. 2008; **74**: 137–143.
- 3) 浜口昌巳. 一次生産の変化と有用種の関係 (二枚貝). 水研セ研報 2011; **34**: 33–47.
- 4) 関口秀夫, 石井 亮. 有明海環境異変, 有明海アサリ漁獲量激減の原因について. 海の研究 2003; **12**: 21–36.
- 5) 町口裕二. 日本のアサリを増やすために—アサリ資源全国協議会の提言. 日水誌 2006; **72**: 766–771.
- 6) 粕谷智之, 浜口昌巳, 古川恵太, 日向博文. 夏季東京湾におけるアサリ (*Ruditapes philippinarum*) 浮遊幼生の出現密度の時空間変動. 国総研研報 2003; **8**: 1–13.
- 7) 粕谷智之, 浜口昌巳, 古川恵太, 日向博文. 秋季東京湾におけるアサリ (*Ruditapes philippinarum*) 浮遊幼生の出現密度の時空間変動. 国総研研報 2003; **12**: 1–12.
- 8) 鷺山裕史, 小泉康二, 松浦玲子, 和久田 昌勇. アサリ浮遊幼生のアマモによる着底促進研究. 平成 16 年度静岡水試事報 2006; 151–153.
- 9) 松村貴晴, 岡本俊治, 黒田伸郎, 浜口昌巳. 三河湾におけるアサリ浮遊幼生の時空間分布—間接蛍光抗体法を用いた解析の試み. 日本ベントス学会誌 2001; **56**: 1–8.
- 10) 水野知巳, 丸山拓也, 日向野純也. 三重県における伊勢湾のアサリ漁業の変遷と展望. 三重水研研報 2009; **17**: 1–21.
- 11) 手塚尚明, 浜口昌巳, 樽谷賢治, 桑原久実, 齊藤 肇, 清水 学, 武岡英隆, 井関和夫. 広域アサリ漁場整備開発のための海況調査. 平成 19 年度水産基盤整備調査委託事業報告書, 水産庁, 東京. 2008; 1–10.
- 12) 那須博史. 有明海熊本県沿岸のアサリ資源の現状と今後の課題. MF21 2004; **49**: 25–34.
- 13) 西濱士郎, 坂本達也, 内藤 剛, 森 勇一郎, 藤井明彦, 那須博史, 木元克則, 前野幸男. 有明海におけるアサリ浮遊幼生の出現傾向と殻長組成. 水産増殖 2011; **59**: 255–264.
- 14) 黒田伸郎, 落合真哉. 三河湾におけるアサリ D 型幼生の分布. 愛知水試研報. 2002; **9**: 19–26.
- 15) 吉松隆司, 渡邊 直, 多賀 茂, 松野 進, 畑間俊弘, 和西昭仁. 広域アサリ漁場整備開発のための海況調査成果報告書. 平成 19 年度水産基盤整備調査委託事業報告書, 山口水研セ, 2008; 1–7.
- 16) 岩野英樹, 福田祐一, 江頭潤一, 平川千修. 広域アサリ漁場整備開発のための海況調査. 平成 19 年度水産基盤整備調査委託事業報告書, 大分水研, 2008; 1–17.
- 17) Rilov G, Dudas SE, Menge BA, Grantham BA, Lubchenco J, Schiel DR. The surf zone: a semi-permeable barrier to onshore recruitment of invertebrate larvae? *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2008; **361**: 59–74.
- 18) Porri F, McQuaid CD, Lawrie Sm, Antrobus SJ. Fine-scale spatial and temporal variation in settlement of the intertidal mussel *Perna perna* indicates differential hydrodynamic delivery of larvae to the shore. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2008; **367**: 213–218.
- 19) Ishii R, Sekiguchi H, Nakahara Y, Jinnai Y. Larval recruitment of the manila clam *Ruditapes philippinarum* in Ariake Sound, Southern Japan. *Fish. Sci.* 2001; **67**: 579–951.
- 20) Miyawaki D, Sekiguchi H. Long-term observations on larval recruitment processes of bivalve assemblages on temperate tidal flats. *Benthos Res.* 2000; **55**: 1–16.
- 21) 陣内康成, 鎌賀泰文, 鳥羽瀬憲久. 菊池川河口域におけるアサリ浮遊幼生の分布状況について. 熊本水研セ研報 2002; **5**: 47–50.
- 22) Ishii R, Sekiguchi H, Jinnai Y. Vertical distributions of larvae of the clam *Ruditapes philippinarum* and the striped horse mussel *Musculista senhousia* in eastern Ariake Bay, southern Japan. *J. Oceanogr.* 2005; **61**: 973–978.
- 23) 黒田伸郎. アサリ幼生の干潟への侵入機構. 水研セ研報 2005; 別冊 3: 63–73.
- 24) Toba M, Yamakawa H, Kobayashi Y, Sugiura Y, Honma K, Yamada H. Observations on the maintenance mechanisms of metapopulations, with special reference to the early reproductive process of the manila clam *Ruditapes philippinarum* (Adams & Reeve) in Tokyo Bay. *J. Shellfish Res.* 2007; **26**: 121–130.
- 25) 浜口昌巳. 瀬戸内海アサリ漁場生態調査における適用方法の開発. 魚介類の初期生態解明のための種判別技術の開発, 農林水産技術会議事務局, 東京. 1999; 66–77.
- 26) 鳥羽光晴, 山川 紘, 庄司紀彦, 小林 豊. 東京湾での周年採集によるアサリ幼生の鉛直分布の特徴. 日水誌. 2012; **78**: 1135–1148.
- 27) 全国沿岸漁業振興開発協会. アサリの生態と漁業. 沿岸漁場整備開発事業増殖場造成計画指針 ヒラメ・アサリ編 平成 8 年度版 (増殖場造成計画編集委員会編) 全国沿岸漁業振興開発協会, 東京. 1997; 123–164.
- 28) Loosanoff VL, Davis HC. Rearing of bivalve mollusks. In: Russel FS (ed). *Advances in marine biology Vol. 1*. Academic Press, New York. 1963; 1–136.
- 29) 鳥羽光晴. アサリ幼生の成長速度と水温の関係. 千葉水試研報 1992; **50**: 17–20.
- 30) Toba M, Kosemura T, Yamakawa H, Sugiura Y, Kobayashi Y. Field and laboratory observations on the hypoxic impact on survival and distribution of short-necked clam *Ruditapes philippinarum* larvae in Tokyo Bay, central Japan. *Plankton Benthos Res.* 2008; **3**: 165–173.
- 31) Shanks AL. Mechanisms of cross-shelf dispersal of larval invertebrates and fish. In: McEdward LR (ed). *Ecology of marine invertebrate larvae*. CRC Press, Boca Raton. 1995; 323–367.
- 32) Shanks AL, Brink L. Upwelling, downwelling, and cross-shelf transport of bivalve larvae: test of a hypothesis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2005; **302**: 1–12.
- 33) Mann R, Wolf CC. Swimming behaviour of larvae of the ocean quahog *Arctica islandica* in response to pressure and

- temperature. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1983; **13**: 211-218.
- 34) Mann R, Campos BM, Luckenbach MW. Swimming rate and responses of larvae of three mactrid bivalves to salinity discontinuities. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1991; **68**: 257-269.
- 35) Jonsson PR, Andre C, Lindegarth M. Swimming behaviour of marine bivalve larvae in a flume boundary-layer flow: evidence for near-bottom confinement. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1991; **79**: 67-76.
- 36) 寺崎 誠. 光学的手法による迅速前処理法の開発. 魚介類の初期生態解明のための種判別技術の開発, 農林水産技術会議事務局, 東京. 1999; 47-55.
- 37) Raby D, Lagadeuc Y, Dodson JJ, Mingelbier M. Relationship between feeding and vertical distribution of bivalve larvae in stratified and mixed waters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1994; **103**: 275-284.
- 38) Cragg SM. Swimming behaviour of the larvae of *Pecten maximus* (L.) (BIVALVIA) . *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.* 1980; **60**: 551-564.
- 39) Carriker MR. Functional morphology and behavior of shelled veligers and early juveniles. In: Kraeuter JN, Castagna M (eds). *Biology of the hard clam*. Elsevier Science, Amsterdam. 2001; 283-303.
- 40) 日向野純也, 安永義暢. チョウセンハマグリ浮遊幼生の遊泳行動に関する基礎的研究. 水工研報告 1990; **11**: 43-51.