

三河湾におけるアサリ浮遊幼生の鉛直分布に与える貧酸素水塊の影響

山田 智^{1†}, 岩田靖宏¹, 堀口敏宏², 鈴木輝明³

Effects of hypoxic water mass on vertical distributions of planktonic larvae of the short-necked clam (*Ruditapes philippinarum*)

Satoshi YAMADA^{1†}, Yasuhiro IWATA¹, Toshihiro HORIGUCHI² and Teruaki SUZUKI³

2010年春–2012年秋に三河湾でアサリ浮遊幼生および溶存酸素の鉛直分布を調査した。アサリ浮遊幼生は通常、底層あるいは水柱に均一に分布していた。しかし、夏季、底層に貧酸素水塊が形成されるとアサリ浮遊幼生の分布は表層–中層に限られた。D型幼生の出現はDOが $4\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下の層で、アンボ期およびフルグロウン期幼生の出現はDOが $2\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下の層ではわずかであった。アサリ浮遊幼生の日周鉛直分布は底層に貧酸素水塊が形成されていない時には昼間底層に、夜間表層に分布した。しかし、貧酸素水塊が底層に形成されると、終日、表層–中層に分布した。これらのことから、アサリ浮遊幼生は貧酸素水塊を避けることが示唆される。アサリ浮遊幼生の出現のピークは5–6月（貧酸素水塊が発達する直前）と10月（貧酸素水塊が消失した直後）に観察された。これらのピークの出現時期は産卵のピークと一致する。春季のアサリ浮遊幼生出現のピークの生残率は秋季のピークの生残率より低く、おそらく、春季の貧酸素水塊の発達が、アサリ浮遊幼生の高い死亡率をもたらしていることが示唆される。

We investigated vertical distributions of the short-necked clam larvae and dissolved oxygen (DO) concentrations in Mikawa Bay, Japan, from spring 2010 to autumn 2012. Larvae of the short-necked clam were usually found in the bottom layer or almost uniformly distributed in the water column. However, in the summer, hypoxic water mass formed at the bottom layer, and the larval distribution was restricted to the surface or middle water layers. The occurrence of D-shaped larvae was rare in layers with DO below $4\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, while that of umbo and full grown larvae was limited in layers with DO below $2\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Diurnal vertical distribution of the larvae was observed when no hypoxic water mass formed at the bottom layer: larvae moved from the bottom at daytime to the surface layers at nighttime. Interestingly, they remained at the surface or middle layers for the whole day when the bottom layer of the water mass became hypoxic. These phenomena suggest that short-necked clam larvae avoid hypoxic water masses. Larval occurrence peaks (mainly D-shaped larvae) were observed during May to June (before hypoxic water mass formation) and in October (when the hypoxic water mass disappeared). These occurrence peaks were accompanied with spawning peaks. The survival rates of larvae in spring, however, seemed to be lower than those in autumn, suggesting that hypoxic water mass formation in spring may lead to high larval mortality.

Key words: vertical distributions, larvae of the short-necked clam, dissolved oxygen, Mikawa Bay, hypoxic

2014年5月8日受付, 2015年1月5日受理

¹ 愛知県水産試験場

Aichi Fisheries Research Institute, 97 Wakamiya, Miyacyo, Gamagori, Aichi 443-0021, Japan

² 国立環境研究所

National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, Japan

³ 名城大学大学院総合学術研究科

Graduate School of Environmental and Human Sciences, Meijo University, 1-501 Shiogamaguchi, Tempaku, Nagoya, Aichi 468-8502, Japan

† satoshi_5_yamada@pref.aichi.lg.jp

はじめに

環境省は東京湾、大阪湾、瀬戸内海および伊勢・三河湾等の主要な内湾で底層溶存酸素（以下DO）等の環境改善を一層進めるために、平成22年3月に“閉鎖性海域中長期ビジョン”（http://www.env.go.jp/press/file_view.php~serial=15178&hou_id=12192, 2014年11月19日）を策定し、底層DOを新たな環境基準に設定する作業を現在進めている。DOの環境基準化にあたってはそれぞれの湾の重要魚介類に焦点を当てた基準化について考慮する必要がある。三河湾においてアサリはその重要魚介類の一つである。

アサリは比較的貧酸素耐性が高く、室内実験から無酸素

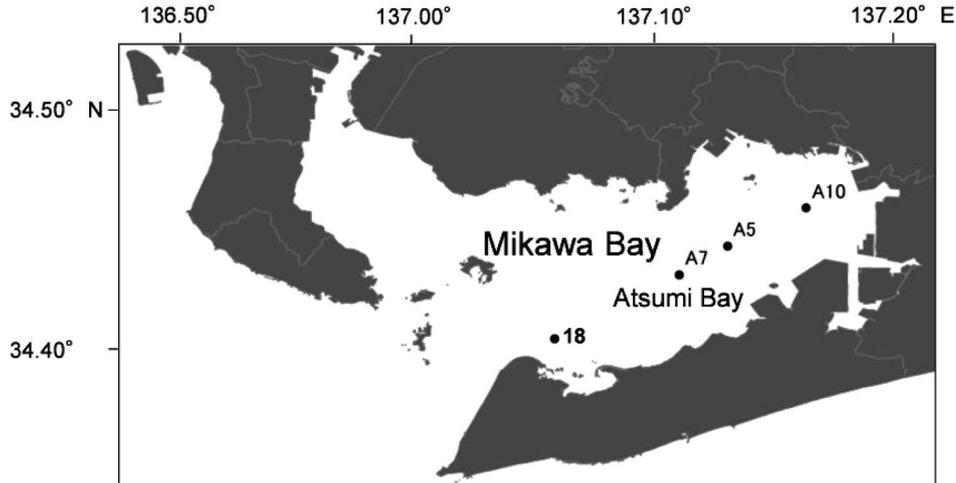


Figure 1. Sampling stations in Mikawa Bay. Sampling was conducted at Stns. A10, A5, A7 and 18 from June to October 2010, at Stns. A10 and A5 from May to November 2011 and at Stn. A5 from May to November 2012.

状態で2-4日は耐えられることが報告されている(萩田, 1985; 中村ほか, 1997). しかし, これらの実験は成貝を対象に行われており, 貧酸素耐性が最も低いとされる浮遊幼生期に関する知見は極めて少ない(Toba et al., 2008; 蒲原ほか, 2012, 2013). さらに, 実海域での現場観測によるアサリ浮遊幼生とDOとの対応を見たものはToba et al. (2008)が東京湾で行った事例しかない.

本研究は三河湾におけるアサリ浮遊幼生およびDO等の環境要因との鉛直分布を貧酸素水塊形成時期にあたる春季-秋季において3ヶ年にわたり詳細に観測し, これらの観測結果を用いてアサリ浮遊幼生の鉛直分布, 日周鉛直移動および季節的な出現傾向に対するDO等の環境要因の影響を解析した.

材料と方法

アサリ浮遊幼生調査は2010-2012年, 三河湾の東部, 渥美湾で数点を設定(Fig. 1, 2010年Stns. A10, A5, A7, 18の4地点, 2011年Stns. A10, A5の2地点, 2012年Stn. A5の1地点, 水深: 約8 m (Stn. A10)-14 m (Stn. 18))し, 5-11月に月2回(2010年は6-10月, 月1回)行った. 各定点で表層から海底直上まで, 2010年および2011年は3 m間隔(0 m, 3 m, 6 m, 9 m, Bottom-1 m), 2012年は2 m間隔(0 m, 2 m, 4 m, 6 m, 8 m, Bottom-1 m)で水中ポンプを用い, 200 lの海水を汲み上げ, 50 μ mのネットですり過してアサリ浮遊幼生を採集した.

2010年は6月21-22日にStn. A5で, 2011年は6月20-21日にStn. A5および9月28-29日にStn. A10で, 2012年は6月18-19日および7月9-10日にStn. A5において, 4時間ごと(12時, 16時, 20時, 0時, 4時および8時)の一昼夜連続調査を上記の方法により実施した. 6月は貧酸素水塊が発達していない時期であり, 7月および9月は貧酸素水

塊が発達した時期である.

採集したサンプルは後日, 蛍光抗体法(浜口, 1999)により, 反応した幼生についてその形態から, D型期, アンボ(殻頂)期およびフルグロウン(変態)期に分けて(田中, 1979, 1982)計数した. 計数値から以下の式により分布中心深度および水柱平均出現個体数を算出した. ただし, 分布中心深度の算出の際, 出現個体数が全採集層の合計で10個体以下の場合は計算から除外した.

$$\text{分布中心深度} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i}{\sum_{i=1}^n Y_i}$$

$$\text{水柱平均出現個体数} = \frac{\sum_{i=1}^n ((Y_{i+1} + Y_i)(X_{i+1} - X_i)/2)}{X_n}$$

X_i : i 番目の採集層の深度 (m), Y_i : i 番目の採集層の出現個体数 (No. \cdot m⁻³)

各幼生採集と同時に多項目水質計(アレック電子AAQ1183-H)を用い, 水温, 塩分およびDOを測定した. 貧酸素水塊の定義をDiaz (2001)はDOが2 mg \cdot l⁻¹以下, Diaz and Rosenberg (2008)は2 ml \cdot l⁻¹(約2.9 mg \cdot l⁻¹)以下としている. 本研究では, 貧酸素水塊を生物へのより顕著な影響が現れるDO 2 mg \cdot l⁻¹以下とした. また, 貧酸素水塊の発達をみるため, 愛知県水産試験場が毎年6-10月の期間, 月3回, 伊勢・三河湾全域で実施している伊勢・三河湾貧酸素情報(<http://www.pref.aichi.jp/0000009720.html>, 2014年11月18日)の各調査時の三河湾におけるDO飽和度が30%(約2.4 mg \cdot l⁻¹)以下である貧酸素水塊の合計面積を求めた.

結果

海洋環境の季節変化

2010-2012年の調査期間を通して観測を行った地点であるStn. A5における水温, 塩分およびDOの変化は以下の通りである(Fig. 2). 2010年の水温は6月下旬から6 m以浅は25°C以上となり, 7月以降は表層で28°C以上となった. 塩

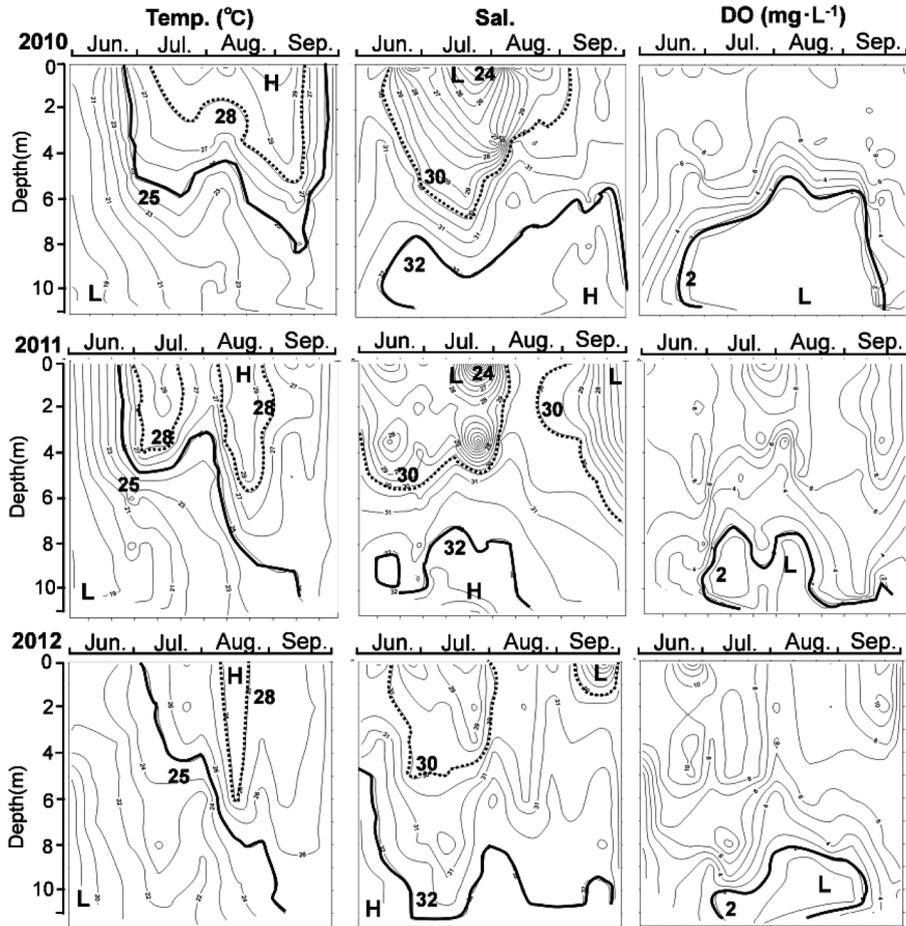


Figure 2. Isoleths of temperature, salinity, and DO from June to September 2010–2012 at Stn. A5.

分は下層（6–8 m）で32以上であり、6 m以浅は6–8月まで30以下、表層は24付近まで低下していた。すなわち、6月下旬–9月上旬まで6 m付近に水温・塩分躍層が形成され、それ以深ではDO 2 mg · l⁻¹以下の貧酸素水塊が発達していた。2011年の水温は2010年と同様に、6月下旬以降、表層–5 m以浅で25°C以上に上昇し、8月以降は6 m以深でも水温が25°C以上へ上昇した。塩分は2010年と同様に底層付近が32以上、6 m以浅が30以下であったが、この年は台風が7月下旬（T1106）および9月上旬（T1112）と下旬（T1115）に四国–本州に上陸し、降雨のため、表層塩分の低下がそれぞれの時期にみられた。DOは7月に入ってから2 mg · l⁻¹以下の貧酸素水塊が見られたが8 m以深と層が薄く、9月に入ると10 m付近のごく底層に見られるのみとなった。2012年は7月までは水温上昇が鈍く、25°Cの等温線が4 m以浅と浅かったが、その後、8月以降、水温が上昇し、9月には全層で25°C以上となった。また塩分は底層付近が約32、表層付近が約29と、期間中全層にわたって差が小さかった。したがって顕著な躍層は形成されず、DOが2 mg · l⁻¹以下の水塊は7月に10 m以深と極め

て薄く、8月に入ってから8 m以深に見られた。2010年は他にStn. A10, Stn. A7およびStn. 18の3地点、2011年は他にStn. A10の1地点においても観測を行ったが、これら環境項目の季節変動は同様の傾向であった。

アサリ浮遊幼生とDOの鉛直分布

2010年の4地点（Fig. 3）では、まだ躍層が形成されず、DOが均一であった6月にはアサリ浮遊幼生は水柱全体に均一に分布するか底層に多い傾向がみられた。躍層が形成され、6 m以深でDOが2 mg · l⁻¹を下回る7–9月（8月に下層DOが2 mg · l⁻¹を上回る地点があるが、湾外水が底層から進入し、一時的に貧酸素水塊が持ち上がったためであり、6 m層ではDOは2 mg · l⁻¹を下回っている）ではアサリ浮遊幼生は6 m以深の下層にはほとんど出現せず、3 m層に多く分布した。10月に底層のDOが回復した地点ではアサリ浮遊幼生は6 m以深に再び出現した。2011年のStn. A5およびStn. A10（Fig. 4）では、DOが底層で2 mg · l⁻¹を下回らない5–6月にはアサリ浮遊幼生は3 m以深に多く、6 m層でピークが見られた。7–10月に底層DOが2 mg · l⁻¹を下回ると底層でアサリ浮遊幼生は出現せず、

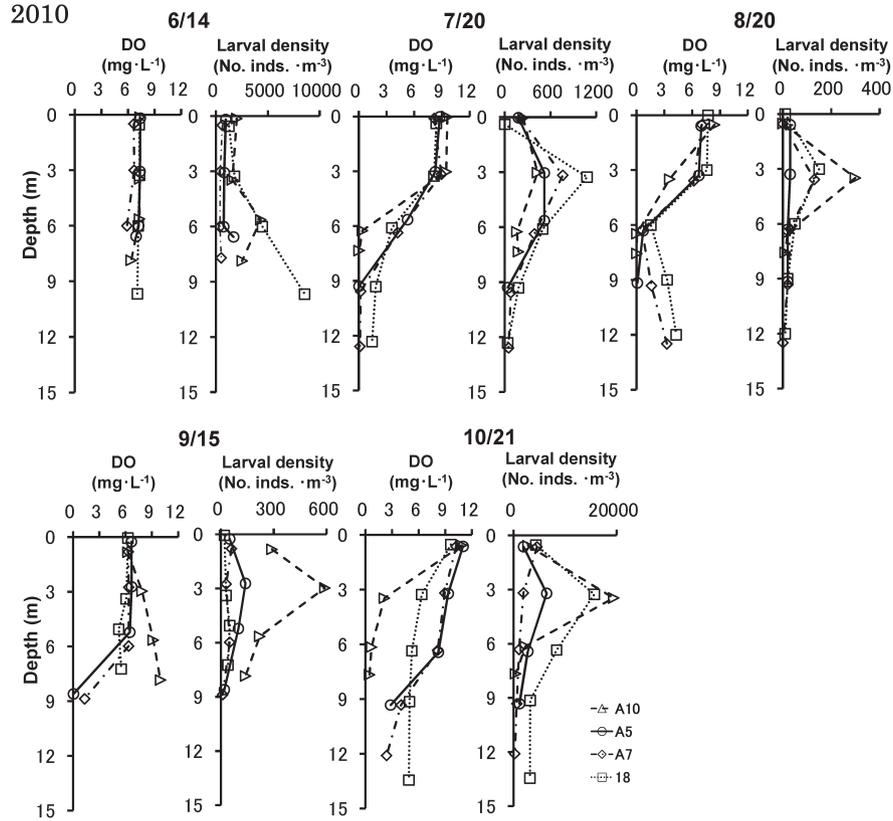


Figure 3. Vertical profiles of DO and larvae of the short-necked clam at Stns. A10, A5, A7 and 18 from June to October 2010.

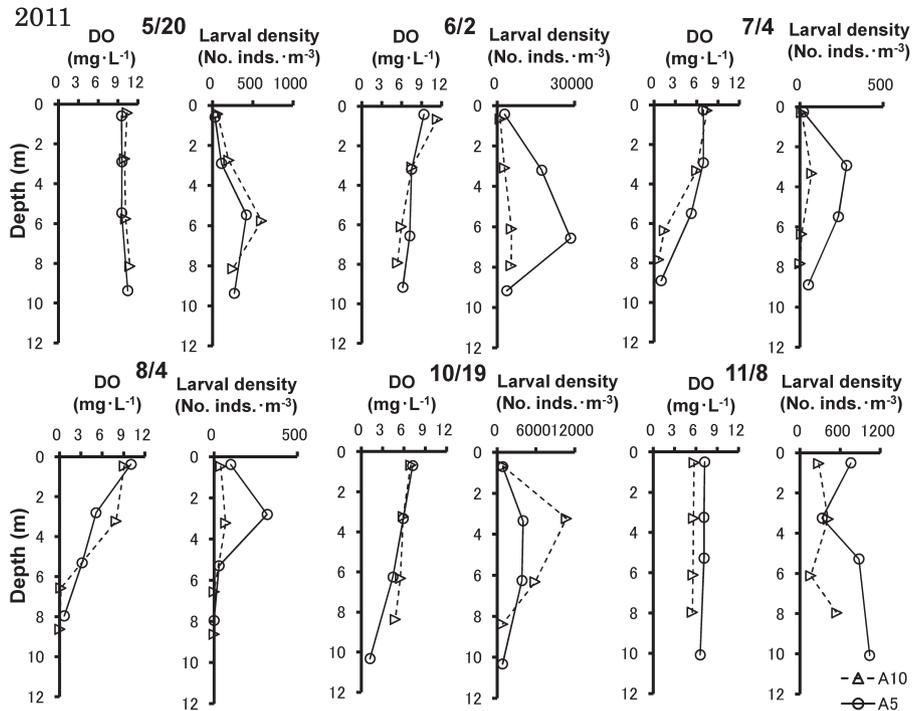


Figure 4. Vertical profiles of DO and larvae of the short-necked clam at Stns. A10 and A5 from May to November 2011.

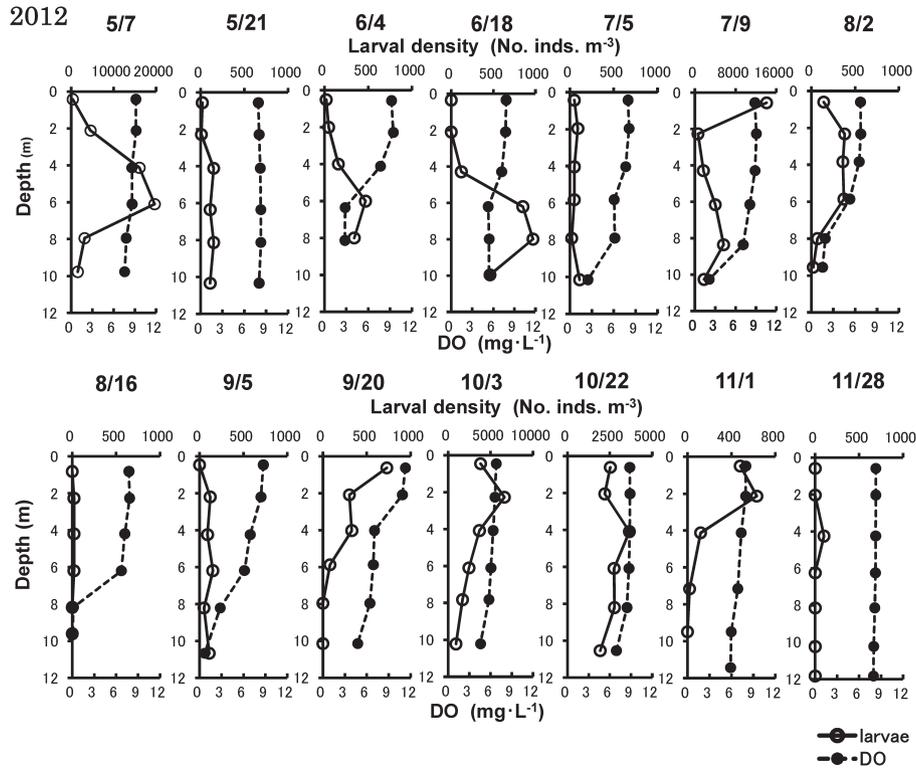


Figure 5. Vertical profiles of DO and larvae of the short-necked clam at Stn. A5 from May to November 2012.

3 m層および表層で多く出現する傾向が見られた。11月に底層の貧酸素層が解消すると浮遊幼生は6 m以深にも多く出現した。2012年のStn. A5 (Fig. 5) では、混合期である5-6月は4-8 m層に多く、底層DOが $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ を下回った8-9月では6 m以浅に出現した。貧酸素水塊が解消した10月上旬以降は底層にも出現し、10月下旬には水柱全体に分布する傾向が見られた。

各发育段階のStn. A5における分布中心をみると (Fig. 6), 3年間とも、6月下旬までは各发育段階の幼生の分布中心深度は6-8 mであるが、貧酸素水塊が形成される7月以降は分布中心深度が浅くなる傾向が見られ、9月以降、貧酸素水塊が解消すると2011年のように再び分布中心深度が深くなる傾向が見られた。发育段階での分布深度の違いは2011年の5月にフルゲロウン期とアンボ期の深度がD型期より深かった以外はほとんど差がなかった。

3年間の調査を通じた全採集層のアサリ浮遊幼生出現個体数と水温・塩分の関係 (Fig. 7) から、塩分についてはすべての観測値に対し、出現が極端に少なくなる塩分帯は見られなかったが、水温では 15°C 以下および 27°C 以上で出現がかなり少なくなる傾向が見られた。次に、DOに対するアサリ浮遊幼生の出現をみると (Fig. 8), D型期幼生はDOが $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、アンボ期およびフルゲロウン期ではDOが $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ を下回ると出現はかなり少なかった。

終日観測

2010年6月21-22日では、底層溶存酸素は $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上であった (Fig. 9a)。各採集時のアサリ浮遊幼生全体の鉛直分布は終日6 m層に多かったが、夜間、表層に多く出現する傾向もみられた。发育段階毎の鉛直分布 (Fig. 9b) では、最も多く出現したD型期幼生は終日6 m層に多かったが、アンボ期およびフルゲロウン期と成長段階が進むにつれて昼間底層に多く分布し、夜間、中層-表層に多くなり、夜明け前の午前4時には表層-中層に最も多く出現し、朝8時には再び底層に多く出現した。しかし、底層付近にDO $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下の貧酸素水塊が形成されていた2011年9月28-29日の結果 (Fig. 10a) では、アサリ浮遊幼生全体の鉛直分布は貧酸素水塊が形成されていない2010年6月とは異なり、昼間でも表層-中層に多く分布し、夜間、3 m層に多くなる傾向がみられるが、6 m以深には終日、少なかった。この傾向は发育段階毎でも同じであった (Fig. 10b)。上記以外の日周鉛直移動調査を行った2012年6月18-19日および7月9-10日の分布中心深度 (2011年6月20-21日は全发育段階、2011年9月28-29日はD型期幼生、2012年7月9-10日はフルゲロウン期幼生において全層合計で10個体以下と出現が少なかったため除外) は、貧酸素水塊が存在しなければ、昼間底層、夜間表層に出現し、貧酸素水塊が発達すると、終日表層-中層に分布する傾向が見られた (Fig. 11)。

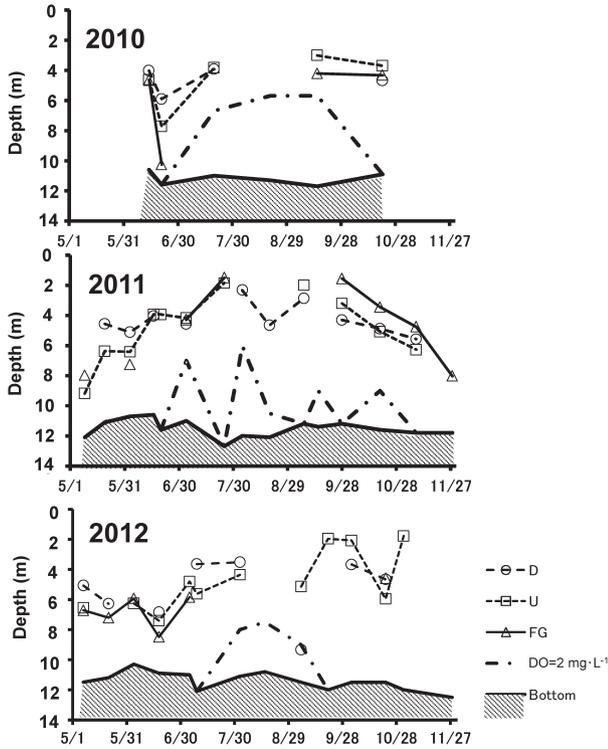


Figure 6. Seasonal changes in weighted mean depth of each larval stage of the short-necked clam and depths of DO $2 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ at Stn. A5, 2010–2012. D, U and FG denote D-shaped larvae, umbo larvae and full grown larvae.

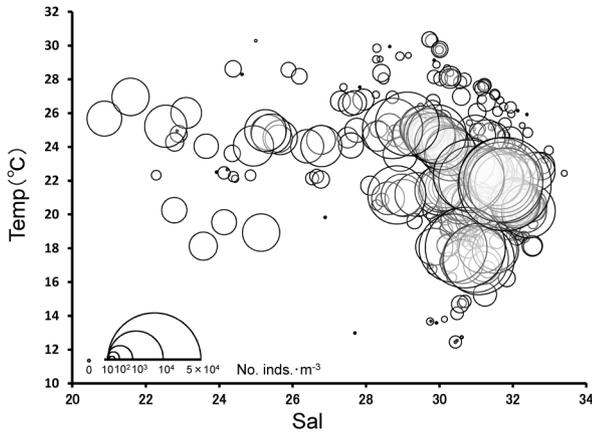


Figure 7. Occurrence of larvae of the short-necked clam in relation to temperature and salinity at all sampling layers in Mikawa Bay.

アサリ浮遊幼生出現量と貧酸素水塊面積の経年変化

各採集日のアサリ浮遊幼生の水柱平均個体数および貧酸素水塊面積の季節変動 (Fig. 12) から, 各年, 共通して貧酸素水塊が発達する直前の6月あるいは5月に春季のアサリ浮遊幼生の出現ピークがみられ, 貧酸素水塊が収束した直

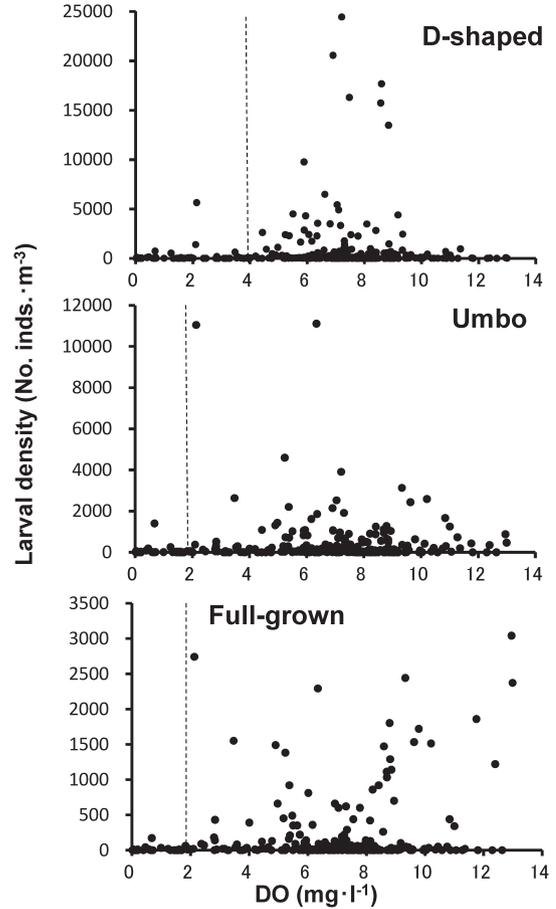


Figure 8. Occurrence of each larvae stage of the short-necked clam in relation to DO at all sampling layers in Mikawa Bay. Dote lines denote the DO which the occurrence of each stage larva were very few.

後の10月に秋季のアサリ浮遊幼生の出現ピークがみられた。夏季 (7–9月) は各年, 出現が少ないが, 7月の出現には以下のような特徴がみられた。2010年のように貧酸素水塊の規模が大きい年に浮遊幼生の出現は僅かであったが, 2011年は台風の襲来があり, 貧酸素水塊の解消した直後にやや多く出現がみられた。また, 2012年のように貧酸素水塊の発達が遅く, 7月でもまだ発達していない年は7月に10月のピークに相当するようなピークが出現した。

考察

貧酸素水塊の形成時期および規模については年による差が見られた。2010年のように顕著な水温・塩分躍層が形成されると躍層下はDO濃度 $2 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下の貧酸素状態となり, その状態が6月下旬から10月まで続く。これが典型的な三河湾の貧酸素水塊形成過程である (石田・原, 1996)。2011年は2010年とほぼ同じ傾向を示すが, 貧酸素水塊の規模がやや小さかった。これは7月に1回, 9月に2

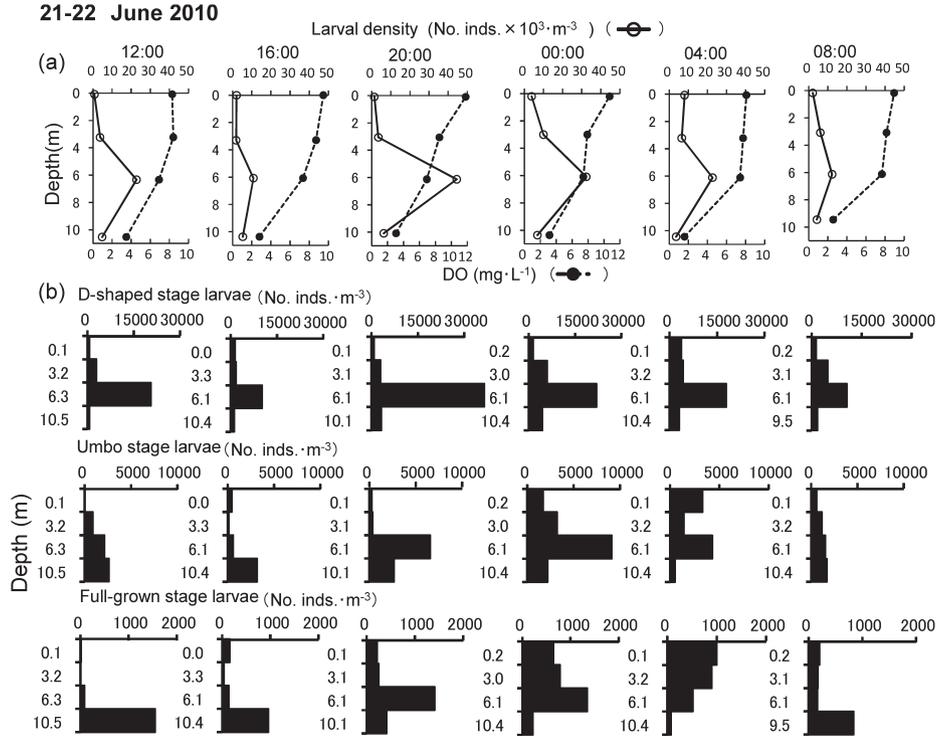


Figure 9. Vertical profiles of larvae of the short-necked clam and DO (a) and vertical distributions of each larvae stage (b) during 21–22 June 2010.

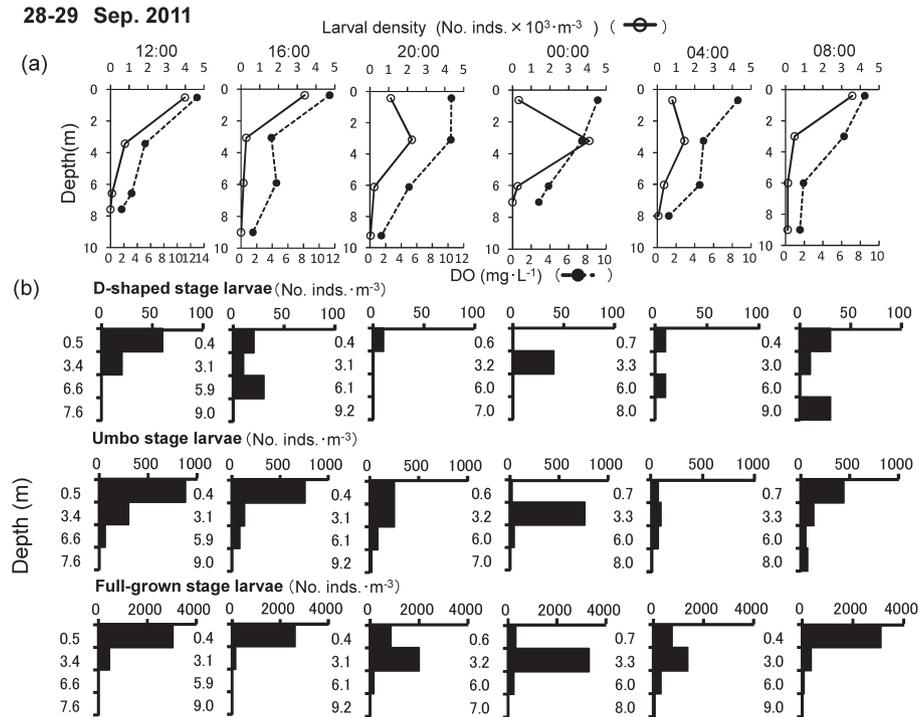


Figure 10. Vertical profiles of larvae of the short-necked clam and DO (a) and vertical distributions of each larvae stage (b) during 28–29 September 2011.

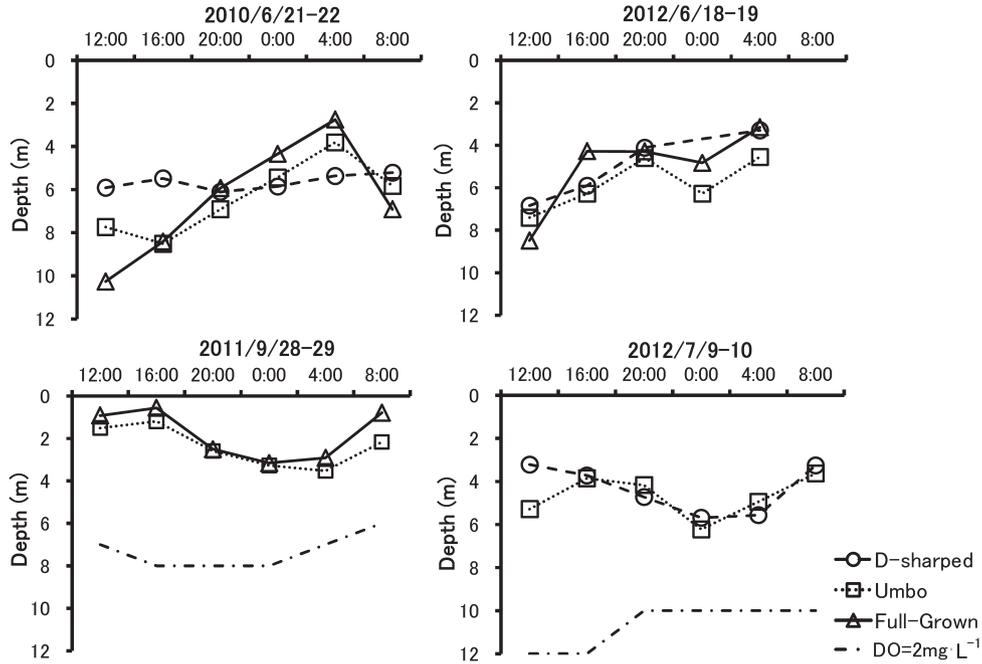


Figure 11. Diurnal changes of weighted mean depth of each larvae stage between 2010–2012.

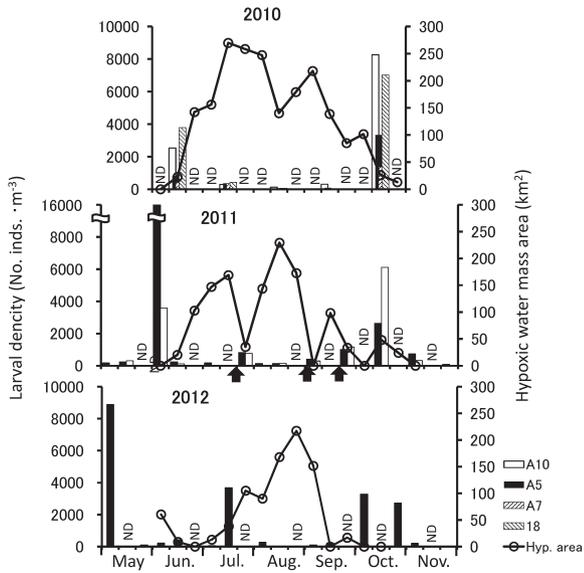


Figure 12. Seasonal changes of occurrence of larvae of the short-necked clam and hypoxic water mass area in Mikawa Bay at 2010–2012. Arrows denote the day when a typhoon came close most.

回, 台風が三河湾に接近し, その都度, 表層から底層まで混合され, 一時的に貧酸素水塊が解消 (縮小) したためである. 2012年は貧酸素水塊の発達が始まる7月下旬からと遅く, 8月に入ってから発達した. この原因として曾根ほか (2013) は6, 7月に過去5年平均と比べ, 10 m以上の強風が吹く割合が高く, それによって海水中が攪乱され, 成層

の発達を妨げられたため, としている. 三河湾のような浅い海では, 初夏の強風等の気象条件が密度躍層の形成に大きく関与し, その年の貧酸素水塊の発達時期および程度を決めている (石田・原, 1996; 黒田・藤田, 2006).

貧酸素水塊が発達していなかった2010年6月21–22日の終日調査 (Fig. 9) でD型期幼生が中層に終日分布していたが, これは底層DOがD型期幼生の出現が少なくなる $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ を下回っていたためではないかと考えられる. 本研究と同様に, Toba et al. (2008) は東京湾においてアサリ浮遊幼生とDOの鉛直分布を観測し, DOが $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下の層にはアサリ浮遊幼生は出現しないことを報告している. 貧酸素水塊中で動物プランクトンの出現が極めて少なくなる現象はシャコの浮遊幼生およびカイアシ類等のその他の動物プランクトンでも報告されている (中田, 1986; 鈴木, 1988; Roman et al., 1993; 上, 1997). このように, 貧酸素水塊中で出現しなくなる理由として, 斃死あるいは忌避が考えられる. アサリ浮遊幼生の貧酸素耐性実験から, DOが $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下 (Toba et al., 2008) および $1\text{--}2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下 (蒲原ほか, 2012, 2013) では, アサリ浮遊幼生は遊泳を停止し, 24–48時間以内にほとんどが斃死する. このことから, 実際の海域でも貧酸素水塊に遭遇したアサリ浮遊幼生は遊泳を停止し, 海底へ沈降し, やがて斃死すると Toba et al. (2008) および蒲原ほか (2013) は推測している. 一方, かいあし類の *Acartia tonsa* はチェサピーク湾で採集された個体は塩分・酸素躍層を作成したカラム中では下層の低酸素域を避ける行動を示した (Decker et al., 2003). しかし, カリフォルニアのターキー岬で採集

された *A. tonsa* (Decker et al., 2003) および同種を含むかいあし類3種 (*Labidocera aestiva*, *Acartia tonsa*, *Centropages hamatus*) (Stalder and Marcus, 1997) は同様の実験において忌避行動を示さず、貧酸素のカラム下層に多く存在した。すなわち *A. tonsa* は生息場所により忌避行動に差が見られた。Decker et al. (2003) は、チェサピーク湾では、この50–250年の間の人間活動により、季節的に貧酸素水塊が現れるようになり、*A. tonsa* についてはこのような環境の人為的改変に適応し、貧酸素水塊からの忌避行動を獲得した可能性を指摘している。三河湾でも貧酸素水塊は少なくとも40年以上前の70年代初頭から観測されている(石田・原, 1996; 黒田・藤田, 2006)。前述した蒲原ほか(2013)の貧酸素耐性実験は三河湾産のアサリを母貝とした種苗生産で得た幼生を用い、80 cmのガラス管に塩分・DO躍層を作成し、アサリ浮遊幼生を水面から投入しているが、ほとんどの幼生に忌避行動は見られなかった。蒲原ほか(2013)の実験では、浮遊幼生は投入時、殻を閉じ、遊泳せず、低DOの底層まで一時的に沈降し、そこから再浮上する。それに対し、Decker et al. (2003)の実験に用いた *A. tonsa* は投入直後から遊泳を開始し、徐々に貧酸素の下層へ降りていく。アサリ浮遊幼生も実際の海域では遊泳しており、躍層中でのDOの変化に対応し、遊泳が停止するDOの閾値に達するまでに忌避行動を開始する可能性は否定できない。東京湾のシャコの浮遊幼生は本来、水深20–30 mに分布中心を持つが、夏季に低酸素水(DO: $2 \text{ ml} \cdot \text{l}^{-1}$ (約 $2.9 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) 以下)が海底に広がると、低酸素水を避け、密度躍層の上(水深10 m)に分布していた(中田, 1986)。また、鳥羽ほか(2012)は東京湾では貧酸素水塊が常時存在しない干潟浅海域(水深6–8 m)と貧酸素水塊が発達・消滅を繰り返す湾中央部でアサリ浮遊幼生の鉛直分布に違いが見られ、浅海域では発達の進んだ幼生ほど分布水深が深くなるのに対し、湾中央部では下層に貧酸素水塊がない場合でも成長段階における分布水深の差は見られず、表層–中層に分布していることを見いだし、湾中央部に出現するアサリ浮遊幼生は過去に貧酸素水塊に遭遇し、その影響が貧酸素水塊のない状態でも鉛直分布に反映されているのではないかと推測している。

以上のように、貧酸素水塊が発達した夏季に、終日表層に分布することによるリスクとして、魚類およびくらげ等の捕食者に遭遇する機会が増大し、捕食圧が強まり、その結果として減耗が大きくなるのがバージニアカキの浮遊幼生(Widdows et al., 1989)、かいあし類(Roman et al., 1993)およびシャコの浮遊幼生(Kodama et al., 2006)等で推測されている。三河湾では、春季(5–6月)–秋季(9–10月)にかけて、マイワシ(Suzuki et al., 1987; 船越, 1996)およびカタクチイワシ(愛知県水産試験場, 2013)等の浮き魚類およびミズクラゲ(青木ほか2012; Aoki et al., 2012)等のくらげ類が多数出現している。これらのいわし類およ

びミズクラゲは二枚貝類幼生を捕食していることが確かめられている(船越, 1993; Schneider and Behrends, 1994; Ishii and Tanaka, 2001; 青山ほか, 2005; 広海ほか, 2005; Lo and Chen, 2008)。特にマイワシの摂餌速度は動物プランクトン生産速度と匹敵するかそれ以上と推定され(Suzuki et al., 1987; 船越, 1996)、ミズクラゲについても動物プランクトンへの摂餌圧が高いことが知られている(Schneider and Behrends, 1994, 1998; Olesen, 1995; Omori et al., 1995; Brodeur et al., 2002; Uye and Shimauchi, 2005; Kinoshita et al., 2006; Lo and Chen, 2008)。したがって、アサリ浮遊幼生は表層に常時存在することにより、これらの捕食者から多大な捕食圧を受けていることが示唆される。また、東京湾のシャコの浮遊幼生については常時表層に留まることにより、湾外へ流出し、無効分散になってしまうと指摘されている(中田, 1986)。青木ほか(2012)は三河湾におけるミズクラゲの輸送過程を数値シミュレーションで解析し、くらげに見立てた粒子を常時表層に存在させた場合、ほとんどが湾外へ流出してしまい、粒子に日周鉛直移動を与えた場合、湾内に残留したと述べている。三河湾の夏季の平均流動場は表層流出、底層流入の傾向がみられ(宇野木, 1985; 青木ほか, 2012)、アサリ浮遊幼生も常時表層に分布すれば、湾外流出のリスクが大きい。これらのことから、貧酸素水塊が形成されるとアサリ浮遊幼生は貧酸素水塊中での斃死や忌避(直接的)に加え、捕食および流出等(間接的)の種々の影響により、減耗することが示唆される。

本研究でアサリ浮遊幼生は塩分で20.8–33.4の範囲で出現し、水温では、D型期幼生で17°C、アンボ期およびフルグロウン期幼生で15°Cを下回るとほとんど出現せず、D型期幼生で26°C、アンボ期およびフルグロウン期幼生で27°Cを上回ると出現が極端に少なくなった。この出現範囲は、おおむね、東京湾で報告された塩分(25.1–35.0)および水温(15.1–30.0°C)の範囲(鳥羽ほか, 2012)内であった。アサリの産卵は関東地方以南ではおおむね春と秋を中心に年2回の産卵盛期があり(安田ほか, 1945; 鳥羽ほか, 1993)、アサリをはじめとする二枚貝の成熟・産卵は水温に依存している(鳥羽ほか, 1993; Toba and Miyama, 1995; Chicharo and Chicharo, 2001)。本研究でアサリ浮遊幼生が出現した水温範囲はアサリの配偶子形成が行われる水温範囲である(Toba and Miyama, 1995)。東京湾でのアサリの成熟調査から春の産卵ピークは、水温上昇期の配偶子形成であり、同調性が高く、産卵直前の肥満度は常に年間最高値を示すことから孕卵数も多いが、秋の産卵ピークは水温および餌料等の環境条件が良い場合に形成される付加的なものであり、肥満度も春に比べて低いことが報告されている(鳥羽ほか, 1993)。本研究においてアサリ浮遊幼生の出現は春季(5–6月)に最大のピークが出現し、秋季(10–11月)のピークは春季より小さく、おそらく、三河湾においても同様な産卵様式であることが浮遊幼生の出現から示唆

Table 1. Number of individuals of D-shaped larvae and full-grown larvae which occurred 2–3 weeks later and the ratio of full-grown to D-shaped (%).

Date	Larvae stage	Larval density (No. inds. m ⁻³)
2011/6/3	D-shaped	14031.9
2011/6/16	Full-grown	22.9
	FG/D (%)	0.16
2011/10/19	D-shaped	1827.0
2011/11/8	Full-grown	95.4
	FG/D (%)	5.22
2012/5/7	D-shaped	8028.1
2012/5/21	Full-grown	32.5
	FG/D (%)	0.40
2012/10/3	D-shaped	3012.3
2012/10/22	Full-grown	1105.4
	FG/D (%)	36.70

される。しかし、7月に見られた小ピークの出現個体数はその年の貧酸素水塊が発達すると少なくなる傾向も見られ、アサリ浮遊幼生の出現量と貧酸素水塊の関連が示唆される。2010–2012年の各地点における5–6月および10–11月の出現ピークはD型期幼生が70%以上を占めていた。したがってこの時期に周辺海域でアサリ産卵のピークがあったと考えられる。アサリ浮遊幼生の浮遊期間は2–3週間である(千葉県水産研究センター, 2004)のでD型期幼生の大きなピークが出現した2–3週間後の採集におけるフルグロウン期幼生の出現個体数との割合(フルグロウン期/D型期%)を求めた(Table 1)。春季では13–14日の採集間隔に0.16–0.40% (平均0.28%) に対して秋季は19–20日の採集間隔で5.22–36.70% (平均20.96%) と高い値を示した。これを生残率と考えると、春季のアサリ浮遊幼生の生残率は秋季と比べて低いことになる。春季は貧酸素水塊の発達期に当たり、上述の通り、浮遊期間中に貧酸素水塊の影響を直接・間接的に受ける可能性が大きく、それに対し秋季は貧酸素水塊の解消期であり、その影響は少ないと考えられる。したがって、春季は貧酸素水塊等の影響により、浮遊幼生の減耗が大きく、着底に至る幼生数そのものが秋季より少ない可能性が示唆される。

謝 辞

調査の実施においては愛知県漁業取締・水質調査兼用船「へいわ」の石川船長始め、乗組員の方々に多大なる援助

を賜った。また、愛知県水産試験場漁場環境研究部の研究員の皆様には調査を手伝って頂いた。ここに感謝の意を表す。本研究は環境省環境研究総合推進費「貧酸素水塊が底棲生物に及ぼす影響評価手法と底層DO目標の達成度評価手法の開発に関する研究(平成22年度–24年度 課題番号B-1003)」により実施された。

引用文献

- 愛知県水産試験場(2013)平成24年度漁況海況予報事業結果報告書。愛知県水産試験場, 愛知県, 64 pp.
- Aoki, K., S. Yamada, M. Toyokawa, A. Yasuda and T. Kikuchi (2012) Horizontal distribution and growth of jellyfish, *Aurelia aurita* (Linnaeus 1758) *sensu lato*, in Mikawa Bay, Japan. *Coast. Mar. Sci.*, **35**, 103–111.
- 青木一弘・清水 学・黒田 寛・豊川雅哉・山田 智(2012)三河湾におけるミズクラゲの輸送過程に関する数値的研究。水産海洋研究, **76**, 9–17.
- 青山昌史・上 真一・武岡英隆(2005)宇和海に及ぼすミズクラゲの出現量の経年変動と中型動物プランクトンに及ぼす捕食インパクトの推定。日本プランクトン学会報, **52**, 38–41.
- Brodeur, R. D., H. Sugisaki and G. L. Hunt Jr. (2002) Increases in jellyfish biomass in the Bering Sea: implications for the ecosystem. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **233**, 89–103.
- 千葉県水産研究センター(2004)アサリ種苗生産の現場基礎技術—富津研究所の経験—。千葉県水産研究センター業績, **IV**, 98 pp.
- Chicharo, L. and M. A. Chicharo (2001) Effects of environmental conditions on planktonic abundances, benthic recruitment and growth rates of the bivalve mollusk *Ruditapes decussatus* in a Portuguese coastal lagoon. *Fish. Res.*, **53**, 235–250.
- Decker, M. B., D. L. Breitburg and N. H. Marcus (2003) Geographical differences in behavioral responses to hypoxia: local adaptation to an anthropogenic stressor? *Ecol. Appl.*, **13**, 1104–1109.
- Diaz, R. J. (2001) Overview of hypoxia around the world. *J. Environ. Qual.*, **30**, 275–281.
- Diaz, R. J. and R. Rosenberg (2008) Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, **321**, 926–929.
- 船越茂雄(1993)伊勢湾, 三河湾周辺海域の主要魚類の食性—とくに夏秋季の食性—。愛知水試研報, **1**, 1–18.
- 船越茂雄(1996)伊勢・三河湾における動物プランクトンの変動。月刊海洋, **28**, 142–149.
- 萩田健二(1985)貧酸素水と硫化水素水のアサリのへい死に与える影響。水産増殖, **33**, 67–71.
- 浜口昌巳(1999) (3) 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, 66–77.
- 広海十朗・粕屋智之・石井晴人(2005)クラゲ類のプランクトン生態系に及ぼす影響。日本プランクトン学会報, **52**, 82–90.
- 石田基雄・原 保(1996)伊勢・三河湾における水質変動と富栄養化について。愛知水試研報, **3**, 29–41.
- Ishii, H. and F. Tanaka (2001) Food and feeding of *Aurelia aurita* in Tokyo Bay with an analysis of stomach contents and a measurement of digestion times. *Hydrobiologia*, **451**, 311–320.
- 蒲原 聡・山田 智・曾根亮太・堀口敏宏・鈴木輝明(2013)貧酸素水塊がアサリ浮遊幼生の遊泳停止と沈降後のへい死に及ぼす影響。水産海洋研究, **77**, 282–289.
- 蒲原 聡・和久光靖・山田 智(2012)アサリ浮遊幼生の貧酸素耐性。愛知水試研報, **17**, 27–30.
- Kinoshita, J., J. Hiromi and Y. Yamada (2006) Abundance and biomass of

- scyphomedusae, *Aurelia aurita* and *Chrysaora melanaster*, and ctenophore, *Bolinopsis mikado*, with estimates of their feeding impact on zooplankton in Tokyo Bay, Japan. *J. Oceanogr.*, **62**, 607–615.
- Kodama, K., T. Horiguchi, G. Kume, S. Nagayama, T. Shimizu, H. Shirai-shi, M. Morita and M. Shimizu (2006) Effects of hypoxia on early life history of the stomatopod *Oratosquilla oratoria* in a coastal sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **324**, 197–206.
- 黒田信郎・藤田弘一 (2006) 伊勢湾と三河湾の貧酸素水塊の短期変動及び長期変動の比較. *愛知水試研報*, **12**, 5–12.
- Lo, W. T. and I. L. Chen (2008) Population succession and feeding scyphomedusae, *Aurelia aurita*, in a eutropical lagoon in Taiwan. *Est., Coast. Shelf Sci.*, **76**, 227–238.
- 中村幹雄・品川 明・戸田顕史・中尾 繁 (1997) 宍道湖および中海産二枚貝4種の環境耐性. *水産増殖*, **45**, 179–185.
- 中田尚宏 (1986) 東京湾におけるシヤコ幼生の分布について. *神水試研報*, **7**, 17–22.
- Olesen, N. J. (1995) Clearance potential of jellyfish *Aurelia aurita*, and predation impact on zooplankton in a shallow cove. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **124**, 63–72.
- Omori, M., H. Ishii and Ai Fujinaga (1995) Life history strategy of *Aurelia aurita* (Cnidaria, Scyphomedusae) and its impact on the zooplankton community of Tokyo Bay. *ICES J. Mar. Sci.*, **52**, 597–603.
- Roman, M. R., A. L. Gauzens, W. K. Rhinehart and J. R. White (1993) Effects of low oxygen waters on Chesapeake Bay zooplankton. *Limnol. Oceanogr.*, **38**, 1603–1614.
- Schneider, G. and G. Behrends (1994) Population dynamics and trophic role of *Aurelia aurita* medusa in the Kiel Bight and western Baltic. *ICES J. Mar. Sci.*, **51**, 359–367.
- Schneider, G. and G. Behrends (1998) Top-down control in a neritic plankton system by *Aurelia aurita* medusae—a summary. *Ophelia*, **48**, 71–82.
- 曾根亮太・蒲原 聡・山田 智・二ノ方圭介 (2013) 2012年夏季の三河湾における貧酸素水塊に対する底生性魚介類の分布及び1986年調査との比較. *愛知水試研報*, **18**, 21–32.
- Stalder, L. C. and N. H. Marcus (1997) Zooplankton responses to hypoxia: Behavioral patterns and survival of three species of calanoid copepods. *Mar. Biol.*, **127**, 599–607.
- 鈴木輝明 (1988) 貧酸素水塊と赤潮—その海洋生態学的一考察—。水質汚濁研究, **11**, 422–424.
- Suzuki, T., K. Ishii, K. Imao and Y. Matsukawa (1987) Box model analysis on phytoplankton production and grazing pressure in a eutrophic estuary. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, **43**, 261–275.
- 田中彌太郎 (1979) 二枚貝類幼生の同定-①. *海洋と生物*, **2**, 27–33.
- 田中彌太郎 (1982) 二枚貝類幼生の同定-⑩. *海洋と生物*, **18**, 23–26.
- Toba, M., T. Kosemura, H. Yamanaka, Y. Sugiura and Y. Kobayashi (2008) 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.*, **3**, 165–173.
- Toba, M. and Y. Miyama (1995) Influence of temperature on the sexual maturation in Manila clam, *Ruditapes philippinarum*. *水産増殖*, **44**, 305–314.
- 鳥羽光晴・夏目 洋・山川 紘 (1993) 東京湾船橋地先におけるアサリの生殖周期. *日本水産学会誌*, **59**, 15–22.
- 鳥羽光晴・山川 紘・庄司紀彦・小林 豊 (2012) 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. *日本水産学会誌*, **78**, 1135–1148.
- 宇野木早苗 (1985) 第13章 伊勢湾・三河湾 II 物理. 「日本全国沿岸海洋誌」日本海洋学会沿岸海洋研究会編, 東海大学出版会, 東京, 513–527.
- 上 真一 (1997) 汽水域における動物プランクトンの特徴. *沿岸海洋研究*, **35**, 49–55.
- Uye, S. and H. Shimauchi (2005) Population biomass, feeding, respiration and growth rates, and carbon budget of the scyphomedusa *Aurelia aurita* in the Inland Sea of Japan. *J. Plankton Res.*, **27**, 237–248.
- Widdows, J., R. I. E. Newell and R. Mann (1989) Effects of hypoxia and anoxia on survival, energy metabolism, and feeding of Oyster larvae (*Crassostrea virginica*, Gmelin). *Biol. Bull.*, **177**, 154–166.
- 安田治三郎・浜井生三・堀田秀之 (1945) アサリの産卵期について. *日水誌*, **20**, 277–279.