

相模湾東岸における大型アワビ類浮遊幼生の出現動態に影響する環境要因

旭 隆^{1,2†}, 黒木洋明³, 照井方舟^{1,2}, 鬼塚年弘^{3,4}, 三宅陽一^{5,6}, 早川 淳^{3,7},
河村知彦⁵, 滝口直之^{1,2}, 浜口昌巳⁸, 堀井豊充^{3,9}

Environmental factors affecting appearance of swimming larvae of large abalone species on the east coast of Sagami Bay, Japan

Takashi ASAHI^{1,2†}, Hiroaki KUROI³, Masashi TERUI^{1,2}, Toshihiro ONITSUKA^{3,4}, Yoichi MIYAKE^{5,6}, Jun HAYAKAWA^{3,7},
Tomohiko KAWAMURA⁵, Naoyuki TAKIGUCHI^{1,2}, Masami HAMAGUCHI⁸ and Toyomitsu HORII^{3,9}

Planktonic larvae of three abalone species (*Haliotis discus discus*, *H. madaka* and *H. gigantea*) were collected from October to January in 2004–2010 on the south (Miura) and the west coast (Yokosuka) of Miura Peninsula, Sagami Bay, Japan. Species identification by PCR-RFLP method was conducted for the larvae collected in Yokosuka from 2004 to 2006. The relationships between larval occurrence pattern and environmental factors were examined. High larval densities over 1 ind. m⁻³ were detected in every year except 2007 in Yokosuka, but only in 2007 and 2008 in Miura. Meanwhile, larval occurrences in lower densities were observed several times in every year in both areas. During the survey period, maximum larval densities were 0.06–2.64 and 0.57–5.07 ind. m⁻³ in Miura and Yokosuka, respectively. In many cases, high-density larvae appeared after passages of storms with high waves, suggesting that spawning events of the abalone species were induced by storms. Larval occurrences were not synchronized between Miura and Yokosuka although those were synchronized among the stations in each area. In the larvae collected from 2004 to 2006 in Yokosuka, *H. discus discus*, *H. madaka*, *H. gigantea* and the hybrid of *H. discus discus* and *H. madaka* occupied 41%, 2%, 51% and 6%, respectively. In Yokosuka, the maximum larval density in each year was positively correlated with the averaged water temperature from the previous July to December, especially with that in July. This result suggests that water temperature in the gonad developmental period (from July to December) is an important factor affecting maturation and fecundity of adult abalone. In both areas, the annual first occurrences of larvae from 2004 to 2010 were observed between 1969 and 2465°C·day in the effective accumulated temperature (EAT), indicating that adults of these abalone species become possible to spawn about 2260°C·day in EAT.

Key words: abalone, larval occurrence, seawater temperature, spawning cue, storm

2012年7月7日受付, 2012年12月25日受付

¹ 神奈川県水産技術センター

Kanagawa Prefectural Fisheries Technology Center, Yoroshi, Jogashima, Misakicho, Miura, Kanagawa 238–0237, Japan

² 現所属: 神奈川県庁

Present: Kanagawa Prefectural Government, 1 Nihon-odori, Naka, Yokohama, Kanagawa 231–8588, Japan

³ 独立行政法人水産総合研究センター増養殖研究所

National Research Institute of Aquaculture, Fisheries Research Agency, 6–31–1 Nagai, Yokosuka, Kanagawa 238–0316, Japan

⁴ 現所属: 独立行政法人水産総合研究センター北海道水産研究所

Present: Hokkaido National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency, 116 Katsurakoi, Kushiro, Hokkaido 085–0802, Japan

⁵ 東京大学大気海洋研究所

Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 5–1–5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277–8564, Japan

⁶ 現所属: 長崎大学

Present: Nagasaki University, 1–14 Bunkyo-machi, Nagasaki, Nagasaki 852–8521, Japan

⁷ 日本学術振興会特別研究員

Research Fellow of the Japan Society of the Promotion of Science

⁸ 独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所

National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea, Fisheries Research Agency, 2–17–5 Maruishi, Hatsukaichi, Hiroshima 739–0452, Japan

⁹ 現所属: 独立行政法人水産総合研究センター東北水産研究所

Present: Tohoku National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency, 3–27–5, Shinhama-cho, Shioyama, Miyagi 985–0001, Japan

† E-mail: asahi.cwm@pref.kanagawa.jp

はじめに

我が国には、エゾアワビ *Haliotis discus hannai*, クロアワビ *H. discus discus*, マダカアワビ *H. madaka*, メガイアワビ *H. gigantea* の3種1亜種の大型アワビ類が生息し、沿岸漁業の重要な対象種となっている。しかし、海面漁業生産統計（政府統計の総合窓口サイト <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/eStatTopPortal.do> より取得）によれば、寒流系のエゾアワビでは1970年代より、暖流系のクロアワビ、マダカアワビ、メガイアワビの3種については1980年代より資源量が減少しはじめ、漁獲量も著しく減少した。エゾアワビでは1990年代半ばより2000年にかけて天然稚貝発生量が増加し、それに伴って多くの地域で資源量の回復が見られたが、暖流域に生息する他の3種の大型アワビ類の漁獲量は現在も低迷しており、資源量の回復は見られない。各地先では長年にわたり人工種苗の放流も行われてきたが、現在に至るまで資源量、漁獲量の顕著な増加は認められない。

アワビ類は雌雄異体であり、放卵放精型の繁殖を行う。したがって、放卵・放精時における雌雄の個体間距離が長くなると受精の成功率が極端に低下する (Babcock and Keesing, 1999)。親貝資源量の減少に伴って産卵量自体が減少することに加えて、放卵・放精時における雌雄の個体間距離の増加により受精が正常に行われなくなり、幼生の発生量も減少する可能性がある。

日本におけるアワビの再生産研究は、エゾアワビにおいて盛んに行われ、多くの知見が報告されてきた。エゾアワビでは、台風や低気圧による時化がエゾアワビ雌雄の放卵・放精を誘発する引き金となっていることがわかっており、大きな時化では広範囲で同調する大規模な放卵・放精、小さな時化では地先の狭い範囲に限定した小規模な放卵・放精が起こると考えられている (佐々木, 1994; 2001)。浮遊幼生の分散範囲についても時化の大きさとの関係が示唆されており、大きな時化では数kmにわたって分散することが報告されている (Sasaki and Shepherd, 1995)。また、冬季水温が高いほど稚貝の生残率が良いこと (Takami et al., 2008)、漁獲量とアリューシャン低気圧指数が負の相関があること (中村ほか, 2005; 早川ほか, 2007)、冬季水温が高い場合の稚貝の発生量は親貝の生息密度に依存する可能性があること (西洞, 2002; 武藤・遠藤, 2006)、流動モデルによりエゾアワビ幼生の分散範囲が数十kmに及ぶこと (Miyake et al., 2011) などが明らかとなっている。

一方、暖流系大型アワビ類成貝の成熟・産卵過程や、浮遊幼生、初期稚貝の発生や成長・生残過程についての観察事例はきわめて少ない。

暖流域においては、相模湾において大型アワビ類3種と同所的に生息する小型種のトコブシについて、成貝の成熟や産卵過程、初期稚貝および稚貝の成長、生残過程が詳し

く調べられている (Onitsuka et al., 2007; 2008; 2010)。2001–2004年の調査では、この間に相模湾を通過した7つの台風の後だけに初期稚貝の発生や成貝の生殖腺指数の顕著な低下が認められ、相模湾においては台風の通過あるいはそれに伴う大時化がトコブシの放卵・放精を誘発すると考えられている (Onitsuka et al., 2007; 鬼塚・河村, 2008)。

暖流系大型アワビについても、1970年代後半から1980年代前半にかけて千葉県外房海域において行われた浮遊幼生や着底稚貝の採集により、浮遊幼生の出現前に低気圧の通過や急激な水温変化が観察されたこと、着底稚貝密度の高い場所は浮遊幼生密度も高いことが報告されている (田中・石田, 1983; 田中ほか, 1986)。ほかにも時化が放卵・放精の引き金となっている可能性を指摘する報告がいくつかあるが (小宮ほか, 2009; Miyake et al., 2009)、十分な研究は行われていない。暖流系大型種の産卵期は晩秋から冬季であり、台風規模の大きな低気圧に遭遇する可能性は小さいことから、夏季から秋季に産卵期を持つトコブシとは異なる機構で放卵・放精を同期しているものと考えられる。

浮遊幼生の発生状況や分布に関する既往報告もきわめて限られている。幼生分散シミュレーションによる推定結果では、相模湾東岸に位置する三浦半島長井で発生した大型アワビ類浮遊幼生は、十数kmの広範囲に分散している可能性が示唆されているが (Miyake et al., 2009)、実際に浮遊幼生を採集した研究例は少なく、放卵・放精がどの程度の規模で同調しているかは明らかになっていない。分子生物学的手法により、房総半島から四国までがクロアワビの一つの繁殖集団であることがわかっているが (原, 2008)、これは地質学的時間スケールで遺伝子的交流があることを示したものであり、個々の地域個体群が通常どの程度の範囲で交流し、メタ個体群を構成しているかは不明である。

暖流系大型アワビ類の天然発生量が低迷している原因を明らかにするためにも、繁殖集団構造を理解し、親貝の再生産を保障する資源管理を行う上でも、これらアワビ類の浮遊幼生の発生状況や分散、減耗過程の解明は不可欠である。

そこで本研究では、2004–2010年に相模湾東岸の三浦半島沿岸において、暖流系大型アワビ類浮遊幼生の出現動態を調査し、波高、水温および漁獲量との関係を解析した。また、暖流系大型アワビの初期生態研究がエゾアワビに比較して遅れている原因として、幼生の種判別が困難であったことが挙げられるが、本研究では得られた幼生の一部について種判別を行い、その種組成についても検討した。

材料と方法

浮遊幼生の採集

神奈川県三浦半島南岸に位置する三浦地先にStn. 1–4を、三浦半島西岸に位置する横須賀地先にStn. 5–9を設定し、

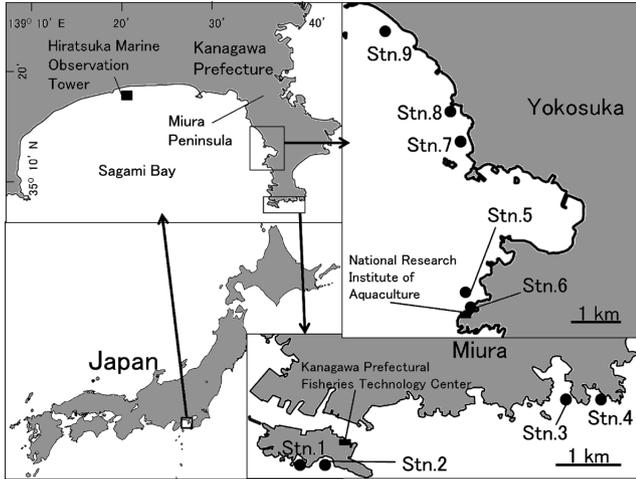


Figure 1. Location of the research area.

調査を行った (Fig. 1).

Stn. 1および3では2005–2006年に, Stn. 2では2005–2010年に, Stn. 4では2007–2010年に, Stn. 5および6では2004–2010年に (2005年の結果は Miyake et al. (2009) において既報), Stn. 7では2008–2010年に, Stn. 8では2008年に, Stn. 9では2010年に浮遊幼生の採集を行った. 各年の調査時期は, アワビの産卵期である10月下旬から翌年1月とし, 頻度は1週間に1–3回とした.

Stn. 1–4では口径45 cm, 側長180 cmの, Stn. 5–6では口径36 cm, 側長200 cmの, Stn. 7–9では口径30 cm, 側長100 cmの, いずれも網地NXX13 (網目幅0.1 mm) のプランクトンネットを用いて採集を行った. Stn. 1–4および7–9では表層を3分間, Stn. 5–6では深度6 m, 3 mおよび表層で網を入れたまま1分間ずつ, いずれの調査点においてもブライドル先端から50 cm前方にデプレッサを装着したプランクトンネットを目的水深まで垂下し, およそ1–2 ktの速度で水平曳きを行った. 曳網回数は1か所あたり3回とした. 濾水量は, ネットの開口面積に, 開口部に装着した濾水計の回転数を乗じ, 予め濾水計の無網試験により算出した曳網1 mあたりの回転数で除することで算出した. Stn. 1–4の曳網にはしおじ (0.5 t), Stn. 5–6ではあらいそIII (1.1 t), Stn. 7–9では第5勘網丸 (0.6 t) の船舶を使用した.

採集した試料をただちに研究室に持ち帰り, 10%エタノール海水に1時間以上浸漬し, 浮遊幼生を麻痺させた. 0.6 mmおよび0.1 mmメッシュ網を用いて, 0.6 mm以上または0.1 mm未満の夾雑物を除去した後, 実体顕微鏡下で観察を行い, 幼殻の形態 (佐々木, 1985) に基づきアワビ類のベリジャー幼生を選別, 計数した.

2004–2006年にStn. 5および6において採集された浮遊幼生については, 浜口ほか (2006) の方法に従い, DNAを抽出した後PCR-RFLP法によりクロアワビ, マダカアワビ, メガイアワビ, およびクロアワビとマダカアワビの交

雑個体の判別を行った.

海洋環境データ (水温, 波高) およびEATの計算

三浦地先の水温については, 神奈川県水産技術センター (Fig. 1, 三浦市三崎町) が地先の水深6 mからくみ上げている海水をワイパー式デジタル水温塩分センサ (JFEアドバンテック社製, 型番ACTW-Di) により10分間隔で自動観測した水温データの日平均値を用いた. 横須賀地先の水温は, 横須賀市長井地先にある独立行政法人水産総合研究センター増養殖研究所横須賀庁舎 (Fig. 1) が沖合25 m, 水深3 mからくみ上げた海水を, 開庁日の朝8時30分にポータブル電気伝導率計 (東亜ディーケーケー社製, 型番CM-21P) により測定した記録を用いた. 波高データは, 平塚市沖合約1 kmに設置された平塚沖総合実験タワー (Fig. 1) において東京大学生産技術研究所が観測した有義波高の日最大値を用いた.

各地先の水温データより, 成熟有効積算温度 (effective accumulated temperature: EAT) を算出した. 本研究では, 菊地・浮 (1974a) の方法を参考に, 前回産卵期後の最低水温を生物学的零度と定義し, 最低水温を記録した日を0日目として, 各日の水温より最低水温を減じた値を積算したものをEATとした. 両地先で比較のできる2005–2010年について, *t*検定によりそれぞれの地先のEATの平均の差を検定した.

結 果

浮遊幼生の出現状況

各年の各調査地点における浮遊幼生の出現状況, 三浦および横須賀地先における水温, および平塚における有義波高をFigs. 2–8に示す. 調査期間中に幼生の密度が1個体・m⁻³を超える比較的大きなピークが出現したのは, 2004年に横須賀地先で2回 (Fig. 2), 2005年に横須賀地先で1回 (Fig. 3), 2006年に横須賀地先で2回 (Fig. 4), 2007年に三浦地先で1回 (Fig. 5), 2008年に三浦地先で2回と横須賀地先で1回 (Fig. 6), 2009年に横須賀地先で1回 (Fig. 7), そして2010年に横須賀地先で2回 (Fig. 8) の計12回であった. 密度が1個体・m⁻³未満の小規模な発生は, 毎年各地先で1–15回確認された. 両地先とも地先内の調査点間では幼生の発生時期が同期していたが, 地先間では発生時期は同期しなかった. 各年の最大幼生密度は, 三浦地先では0.06–2.64個体・m⁻³, 横須賀地先では0.57–5.07個体・m⁻³であり (Table 1), 2007年を除く全ての年において横須賀地先で高かった. 両地先における最大幼生密度の増減の傾向は一致しなかった.

1個体・m⁻³以上の幼生の発生ピークが観察された日付と幼生密度, それぞれの地先におけるその日の水温, およびピーク前において高い波高が観測された日とその時の波高値をTable 2に示した. 発生のピークが観察された時の水温範囲は12.35–21.62°Cであったが, 三浦地先において

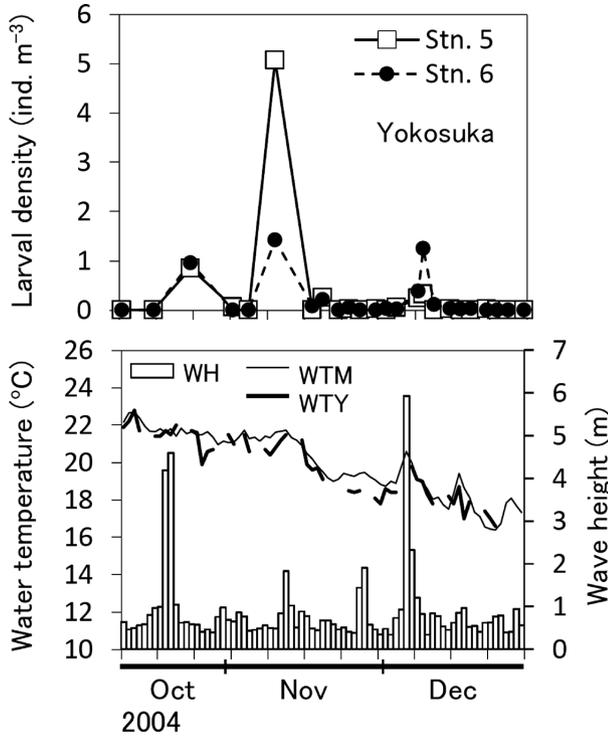


Figure 2. Total larval density of the three large abalone species at Stns. 5 and 6, and environmental factors in 2004. A thin line and a thick line indicate water temperature in Miura (WMT) and Yokosuka (WTY), respectively. White bars indicate the maximum value of significant wave heights (WH). WTY line sometimes breaks off because of no measurement.

Table 1. Maximum density of larval abalone in each year at stations in Miura and Yokosuka areas.

Year	Maximum density (ind. m ⁻³)	
	Miura	Yokosuka
2004	—	5.07
2005	0.13	2.30
2006	0.22	1.38
2007	1.83	0.57
2008	2.64	2.83
2009	0.17	1.60
2010	0.06	4.22

は12.35–15.96°Cと低水温期に多く、横須賀地先においては14.8–20.8°Cと比較的高水温期に多く見られた。両地先の12回のピークのうち8回について、ピーク前に波高1.5m以上の時化が生じていた。

各地先の年別の最大発生密度と、調査時期前年の11月から当年12月までの月平均水温との相関を調べたところ

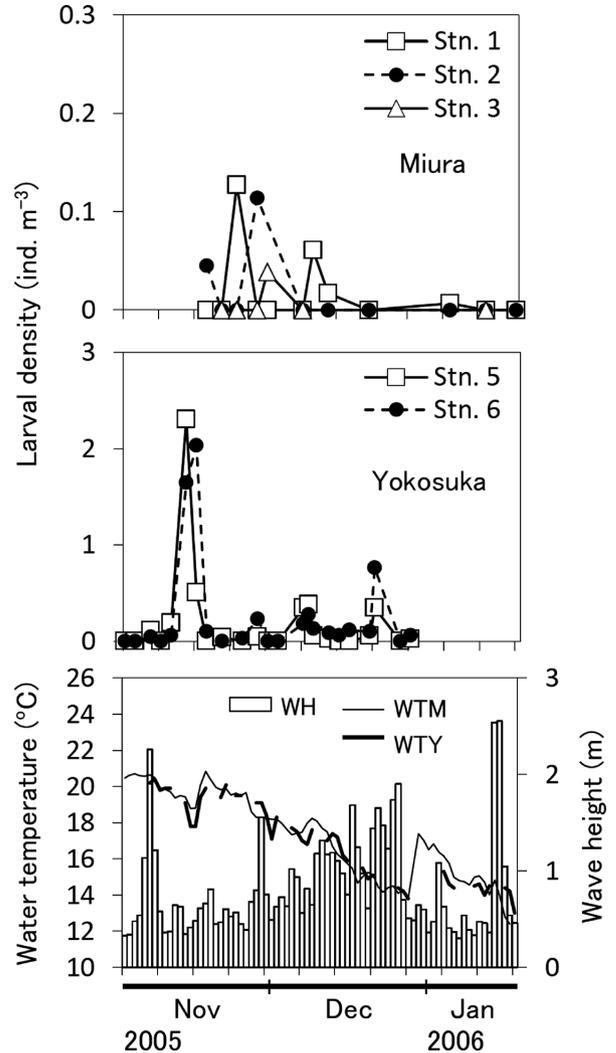


Figure 3. Total larval density of the three large abalone species, and environmental factors in 2005. Explanation of detail for the environmental factors is shown in Fig. 2.

(Figs. 9, 10), 横須賀地先において、7月の平均水温との間に強い正の相関関係が見られた ($p < 0.01$) (Fig. 10). 有意ではないものの、8月から12月にかけても平均水温が高いほど幼生密度が高い傾向があったため、当年7–9月および当年10–12月の平均水温と最大発生密度を比較したところ、横須賀地先において正の相関が確認された ($p < 0.01$) (Fig. 11). 三浦地先においては水温と幼生密度の関係性は有意ではなかった ($p > 0.05$).

また、各年について最初に幼生が出現した日(初出日)、生物学的零度出現日、生物学的零度、初出日におけるEATをTable 3に示した。初出日は10月23日から12月10日と、年または地先により差があったが、EATは1969–2465°C・dayの範囲にあり、三浦と横須賀で比較のできる2005–2010年の平均に有意な差は認められなかった (t 検定, $p >$

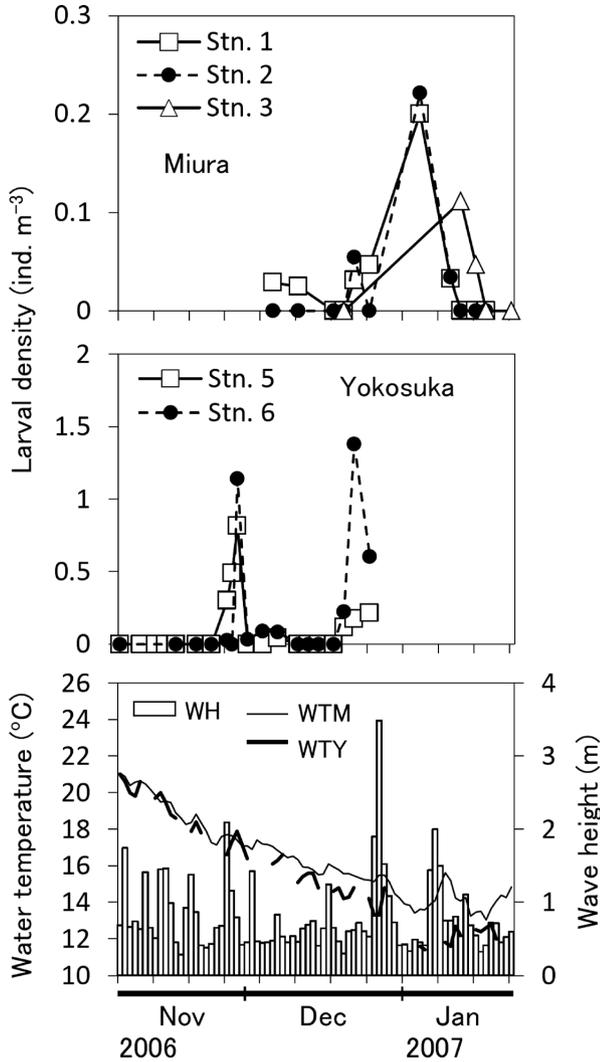


Figure 4. Total larval density of the three large abalone species, and environmental factors in 2006. Explanation of detail for the environmental factors is shown in Fig. 2.

0.05). EATの平均値は三浦で2224, 横須賀で2296°C·dayであり, 両者を合わせた全体の平均値は2263°C·dayとなった.

浮遊幼生の種組成

2004年に採集されたアワビ類幼生について種判別を行った結果, クロアワビは102個体, マダカアワビは1個体, メガイアワビは129個体であった. クロアワビは10月25日に, メガイアワビは11月10日と12月8日に特に多く, マダカアワビは11月24日に見られた (Fig. 12a). 2005年については, クロアワビ123個体, マダカアワビ14個体, 交雑個体 (クロアワビとマダカアワビの交雑; 以下同じ) 18個体, メガイ156個体が採集された. メガイアワビが11月14日に, クロアワビが11月16日に多く見られ, マダカアワビと交雑個体は11月から12月にかけて少量採集され

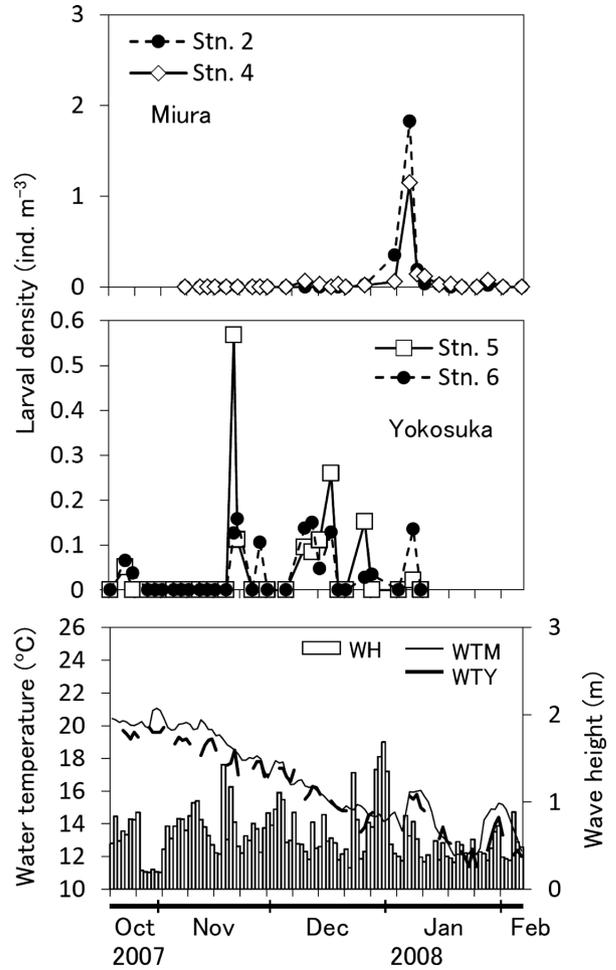


Figure 5. Total larval density of the three large abalone species, and environmental factors in 2007. Explanation of detail for the environmental factors is shown in Fig. 2.

た (Fig. 12b). 2006年には, クロアワビが66個体, 交雑個体が21個体, メガイアワビが74個体確認され, マダカアワビは確認されなかった. クロアワビは11月29日に, メガイアワビは11月29日と12月22日に特に多く, 交雑個体は12月22日と25日にのみ見られた (Fig. 12c). 2004年から2006年に種判別を行ったアワビ類幼生の合計個体数は704個体であり, メガイアワビが51%, クロアワビが41%, マダカアワビが2%, 交雑個体が6%であった (Fig. 12d). 比較的多くの幼生が捕獲されたクロアワビとメガイアワビについて, どちらの種も調査期間の前期 (11月以前) および後期 (12月以降) の両方で出現が見られた.

考察

幼生の出現時期と環境要因

浮遊幼生が比較的高密度に発生した時 (1個体・m⁻³以上) の水温は12–21°Cと幅広く, 幼生の各出現ピークと水温の間には明確な関係は見られなかった (Table 2). 一方, 各

Table 2. Date and density of large peaks of abalone larvae over 1 ind. m⁻³, water temperature in Miura and Yokosuka areas on the same day, and the maximum value of significant wave height at Hiratsuka before the peaks.

Date	Larval density (ind. m ⁻³)		Water temperature (°C)		The maximum value of significant wave height before larval occurrence (Hiratsuka)	
	Miura	Yokosuka	Miura	Yokosuka	Wave Height (m)	Date at measurement
10-Nov-2004		5.07	21.62	20.8	0.98	31-Oct
8-Dec-2004		1.26	18.90	19.0	5.93	5-Dec
14-Nov-2005		2.30	19.42	19.1	2.26	7-Nov
29-Nov-2006		1.14	17.41	17.9	2.09	27-Nov
22-Dec-2006		1.38	15.46	14.8	1.25	17-Dec
7-Jan-2008	1.83		15.96	15.7	1.69	31-Dec
23-Nov-2008		2.83	18.52	—	1.60	21-Nov
6-Jan-2009	2.21		14.12	15.9	1.30	30-Dec
22-Jan-2009	2.64		12.35	12.8	1.90	19-Jan
14-Dec-2009		1.60	17.57	17.5	1.08	6-Dec
15-Nov-2010		1.30	18.57	18.5	1.66	9-Nov
6-Dec-2010		4.22	18.78	17.7	3.17	3-Dec

Table 3. Date of the first occurrence of abalone larvae, date of biological zero point, biological zero point and EAT (effective accumulated temperature) on the day.

Year	Date of first occurrence of abalone larvae		Date of biological zero point		Biological zero point (°C)		EAT (°C·day)	
	Miura	Yokosuka	Miura	Yokosuka	Miura	Yokosuka	Miura	Yokosuka
2004		25-Oct		4-Mar		11.0		2382
2005	18-Nov	7-Nov	4-Mar	1-Mar	12.47	12.4	1999	1969
2006	6-Dec	27-Nov	13-Feb	21-Feb	10.97	10.9	2400	2465
2007	10-Dec	23-Oct	17-Jan	5-Jan	13.04	11.4	2019	2164
2008	2-Dec	20-Nov	20-Feb	25-Jan	11.67	11.4	2302	2323
2009	30-Nov	16-Nov	7-Feb	27-Feb	11.67	10.9	2218	2341
2010	26-Nov	4-Nov	14-Feb	12-Feb	11.73	11.1	2408	2430
Average							2224	2296

年における幼生の初出日までのEATは三浦と横須賀で非常に近い値を示した (Table 3)。本研究の結果より、相模湾東岸に分布する大型アワビ類では、EATが2260°C·day前後で産卵していたことが明らかとなった。菊地・浮 (1974b) の研究では、クロアワビはEATが3500°C·day以上で産卵可能になるとしており、本研究の結果とは大きく異なる。これは、菊地らがクロアワビの生物学的零度を5.3°CとしてEATを算出したことに起因すると考えられる。暖流系アワビの生息域では、厳寒期でも10°C程度までしか海水温が低下しないため、5.3°Cを生物学的零度とする

ことは適切でない。そのため本研究では、前回産卵期後の最低水温を生物学的零度と定義してEATを算出した。各年の生物学的零度は10.9–13.0°Cの範囲にあった。暖流系大型アワビ類のEATの正確な計算には、生物学的零度についてより詳細な検討が必要である。本研究の結果から、各年ともに幼生の初出日までのEATが三浦、横須賀で類似していたことから、一定の水温条件が産卵時期を決定している可能性が高いと考えられる。

波高1.5m以上3.0m未満を小さな時化、3.0m以上を大きな時化とすると、幼生の発生ピークが認められた12回

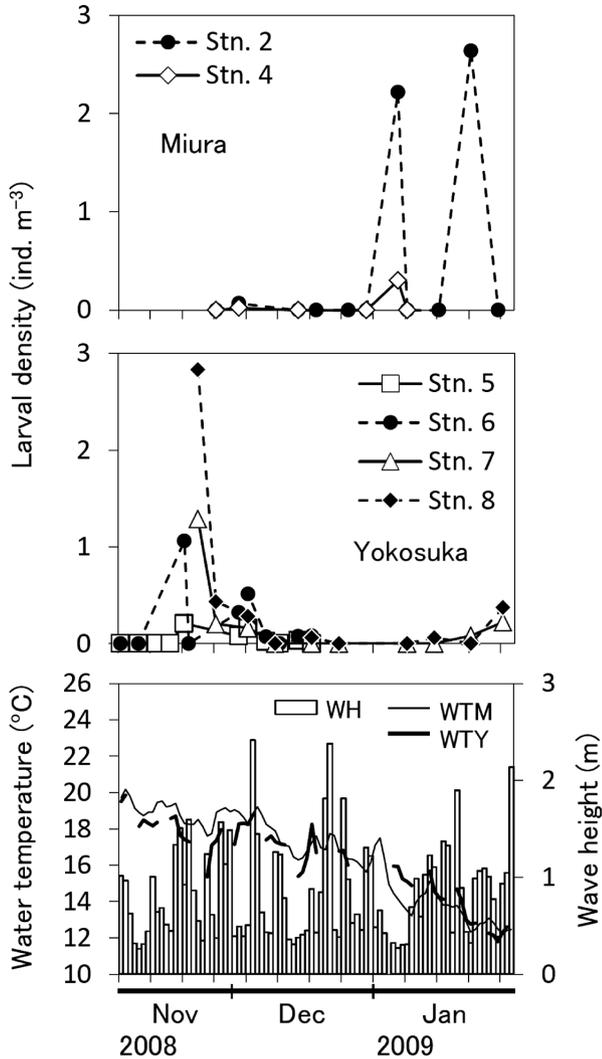


Figure 6. Total larval density of the three large abalone species, and environmental factors in 2008. Explanation of detail for the environmental factors is shown in Fig. 2.

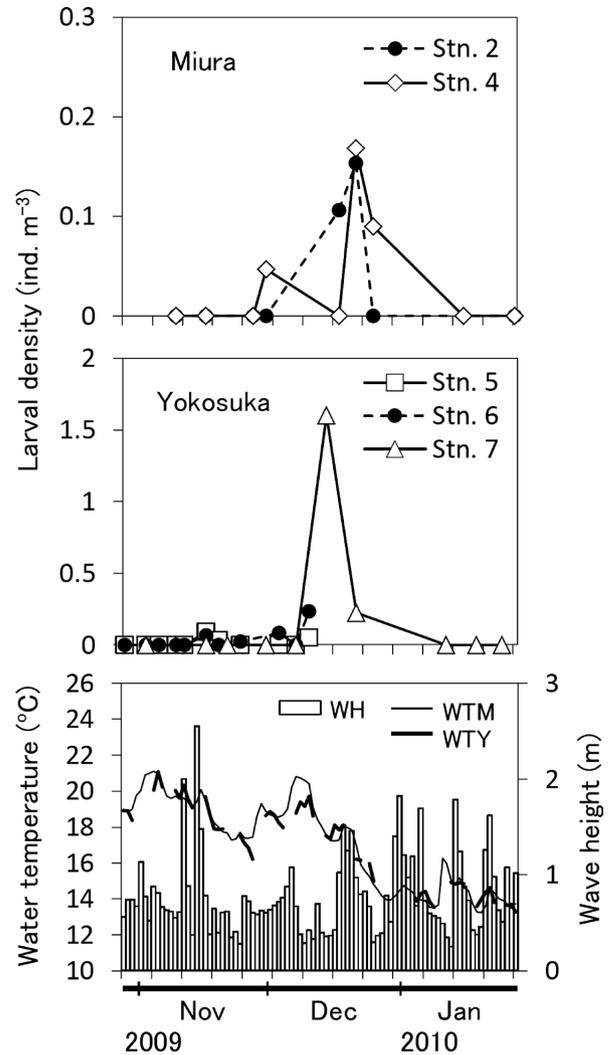


Figure 7. Total larval density of the three large abalone species, and environmental factors in 2009. Explanation of detail for the environmental factors is shown in Fig. 2.

のうち2回については大きな時化が、6回については小さな時化が幼生採捕の2-8日前に生じていた。本海域の水温では、アワビ類は産卵後2日以内にはベリジャー幼生になる(関・菅野, 1977)ため、これらの時化により放卵・放精が引き起こされた可能性が考えられる。しかし、波高と幼生密度に相関は認められなかったため(Fig. 13)、時化の大きさと放卵量との関連性は低いと推察される。

三浦地先(Stn. 1-4)において1個体・ m^{-3} 以上の比較的大きな幼生発生のピークが認められたのは2008年1月と2009年1月のみであった。横須賀地先(Stn. 5-9)では、2007-2008年の冬を除く全ての年に1個体・ m^{-3} を超えるピークがあり、これらはいずれも11月から12月に見られた。両地先ともに地先内の調査点間では幼生の発生時期が同期していたが、データの比較が可能な2005-2010年では、両地先間で幼生の発生時期が同調していた年は全くなかつ

た。エゾアワビでは、台風通過等の大波浪による広範囲にわたる大規模な放卵・放精と、小型低気圧等の中波浪による地域単位の小規模な放卵・放精の2つの繁殖形態が存在すると考えられている(佐々木, 1994)。一方、横須賀地先に生息するトコブシでは、2001-2004年にかけて調査を行った結果、台風通過による大時化の時にのみ大量産卵し、小規模な産卵は見られなかったことが報告されている(Onitsuka et al., 2007; 鬼塚・河村, 2008)。本研究では、暖流系大型アワビ類について年1, 2回の大規模発生と数回の小規模発生が起きていたことが確認された。したがって、これら暖流系大型アワビ類は、トコブシよりもエゾアワビによく似た放卵・放精様式を持っていると推察される。しかし、エゾアワビに見られるような広範囲にわたる大規模産卵は確認されず、三浦地先と横須賀地先で同時に大規模な幼生の出現が確認されることはなかった。これ

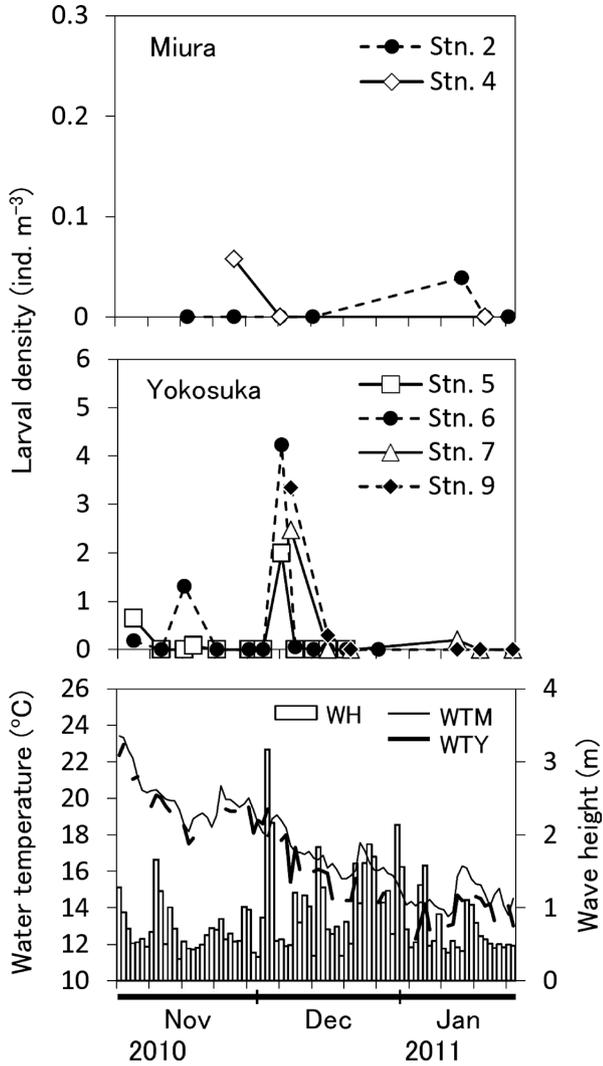


Figure 8. Total larval density of the three large abalone species, and environmental factors in 2010. Explanation of detail for the environmental factors is shown in Fig. 2.

は、エゾアワビやトコブシの産卵期が夏季から秋季に当たり、調査期間中に台風が多く通過したのに対し、暖流系大型アワビ類の産卵期は台風の少ない晩秋から冬季であるため、相模湾全体で同調する広範囲のアワビの放卵・放精を誘発するような大規模な時化が起こりにくいためと推察される。また、2地先間でもっとも近い三浦地先のStn. 1と横須賀地先のStn. 6は直線距離で約7.5kmしか離れておらず、地先内調査点間の最大距離（三浦地先：約5km（Stn. 1と4）、横須賀地先：約6km（Stn. 6と9））とそれほど異なることから、産卵の同期範囲は、時化の規模以外の要素も関連している可能性も考えられる。

年別最大幼生密度と水温の関係

横須賀地先の年別の最大発生密度と高水温期（7-9月）および産卵期（10-12月）の平均水温との間には正の相関が

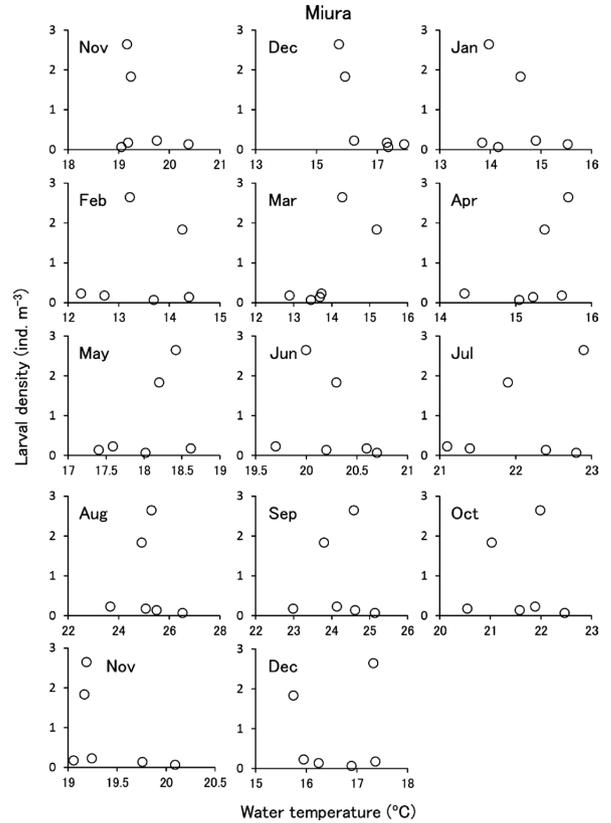


Figure 9. Relationship between mean water temperature in each month and maximum density of abalone larvae in each year in Miura area.

あり (Fig. 11), 特に7月の平均水温との間には強い相関関係があった (Fig. 10). また発生前の冬季から春季までの水温の間には相関がほとんど見られなかった (Figs. 9, 10). 菊地・浮 (1974b) は、飼育条件下のクロアワビについて、水温が高いほど生殖巣指数の増加速度が高く、放卵・放精時までの積算水温が高いほど放卵・放精量も多い傾向にあることを報告している。天然環境下においても、成熟開始後の環境水温が成熟および放卵・放精量に大きく関与すると考えると、水温の高い年には放卵・放精量も多くなり、幼生密度が高くなると推察される。横須賀地先における結果は、このことを裏付けるものと考えられる。三浦地先については、水温と幼生発生量に関連性が認められなかったが、採集された幼生量が非常に少なかったため、海域全体における幼生発生量の変動傾向を反映していない可能性がある。

幼生密度と資源量

小宮ほか (2009) は、千葉県外房海域において2001年から2007年にかけてアワビ類幼生の分布密度調査を行い、鴨川市太海地先で2.2-96.7個体・m⁻³、南房総市川口地先で0.4-17.5個体・m⁻³のベリジャー幼生が出現したことを報告している。これは本研究で2004-2010年に観測された

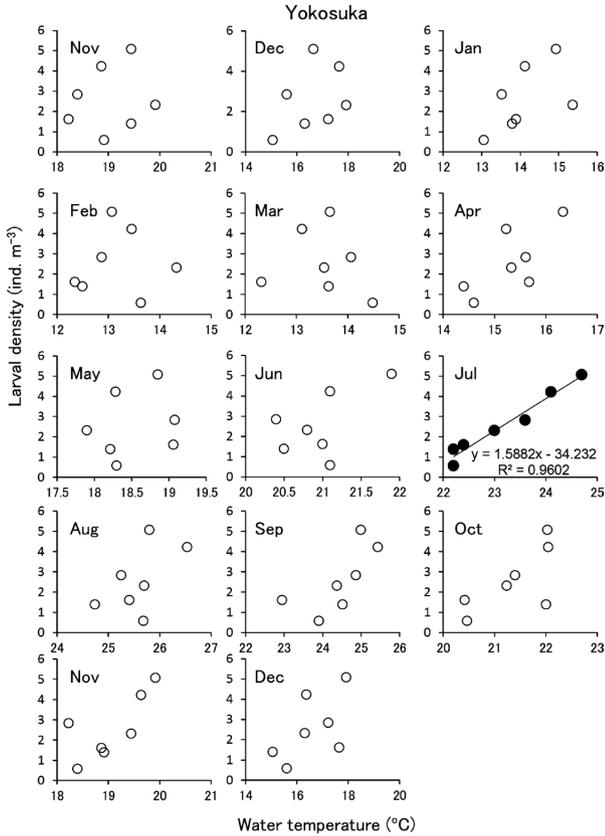


Figure 10. Relationship between mean water temperature in each month and maximum density of abalone larvae in each year in Yokosuka area.

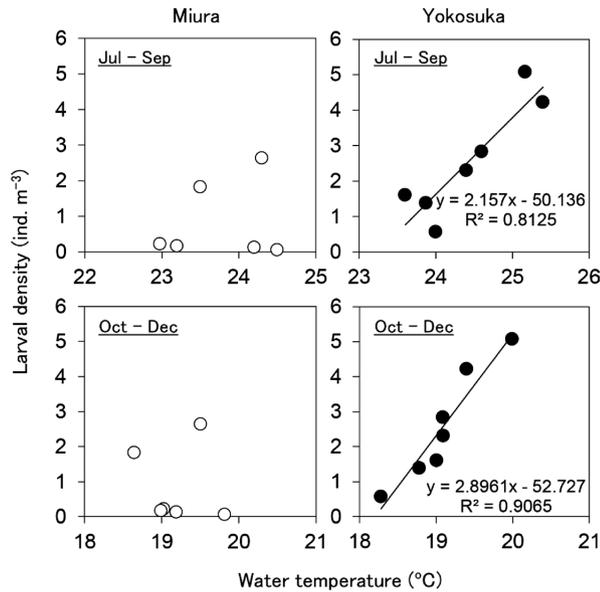


Figure 11. Relationship between mean water temperature and maximum density of abalone larvae, in high-temperature-season (July to September) and spawning season (October to December) in each year in Miura and Yokosuka areas.

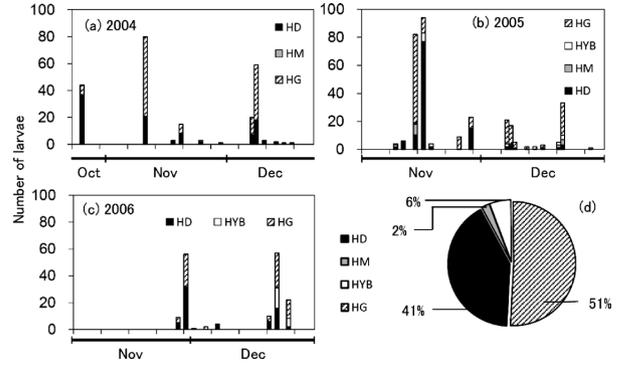


Figure 12. Species composition of larval abalone collected at stns. 5 and 6 in Yokosuka area. (a) 2004, (b) 2005, (c) 2006, (d) percentage of 3 abalone species plus hybrid collected from 2004 to 2006. HD: *Haliotis discus discus*, HM: *H. madaka*, HG: *H. gigantea*, HYB: hybrid of *H. discus discus* and *H. madaka*.

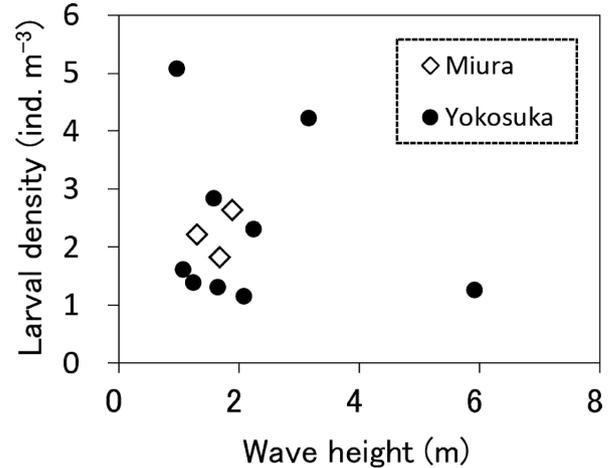


Figure 13. Relationship between abalone larval density of over 1 ind. m⁻³ and the maximum value of significant wave height just before the larval occurrence in Miura and Yokosuka areas.

0.06–2.64 個体・m⁻³ (三浦地先) および 0.57–5.07 個体・m⁻³ (横須賀地先) と比較してかなり高い密度である。2004–2009年の神奈川県における大型アワビ類総漁獲量は19–24トンであったのに対し、2001–2007年の千葉県における大型アワビ類総漁獲量は109–175トンである。神奈川県沿岸の水深20m以浅で底質が岩質とされる海底面積は、千葉県のその約3分の1 (全国漁業協同組合連合会, 1977) ではあるが、両県に生息する大型アワビ類の資源量や生息密度には大きな差があると考えられる。本研究で得られたアワビ類の浮遊幼生密度が千葉県海域での報告密度に比べて低いのは、親貝資源量および生息密度が小さかったことに起因する可能性が考えられる。

幼生の種組成

クロアワビとメガイアワビの幼生は調査期間を通じて出現が見られた (Fig. 12). クロアワビの産卵盛期は暖流系大型アワビ3種の中では最も早く、メガイアワビとマダカアワビはこれより遅いとされている (浮, 1995) が、本研究においては明確に出現時期が異なることはなかった。調査期間を通して3種の大型アワビ類幼生が同時に出現したことから、放卵・放精の時期は3種間で重複していると考えられる。また、複数年にクロアワビとマダカアワビの交雑個体が確認されたことから、これら両種の交雑は頻繁に発生していると推察される。

神奈川県水産技術センターによる調査 (滝口, 未発表) では、2004年に長井地先で漁獲された大型アワビ類は、クロアワビが11%、マダカアワビが27%、メガイアワビが62%であった。本研究で得られた幼生の種組成と比較すると、メガイアワビが最も多いことは共通している。しかし、本研究ではクロアワビの幼生が半数近くを占めたのに対し、2004年のクロアワビ成員の漁獲量は低かった。また、マダカアワビの幼生は極めて少なかったが、同種の漁獲量は約3割に上っているなど、幼生の種組成と漁獲物の種組成は対応しなかった。マダカアワビでは、成員の成熟や放卵・放精、受精や幼生発育などの再生産の過程が順調に進んでいない可能性がある。また、この海域では、漁獲される成員の約9割を放流貝が占めており (今井ほか, 2006)、天然発生個体が極めて少ない。放流された人工種苗は順調に成長して漁獲されている (滝口, 2002) ことから、人工的に飼育されて放流された個体が再生産していない可能性も考えられる。

暖流系アワビの浮遊幼生については、相模湾における種ごとの鉛直分布 (堀井ほか, 2006) や、流動モデルによる幼生の分散シミュレーション (Miyake, et al., 2009) に関する報告、千葉県外房海域における浮遊幼生と着底稚貝出現状況の報告 (田中・石田, 1983; 田中ほか, 1986; 小宮ほか, 2009) があるが、長期にわたる幼生採集結果をもとに海況との詳細な検討を行った報告は少ない。本研究では、相模湾東岸の2つの地先において、比較的長期にわたり暖流系大型アワビ類の浮遊幼生の出現動態を調査し、水温や波高、親貝資源量との関係を検討することにより、この海域における大型アワビ類3種の再生産状況を考察した。その結果、産卵は数kmの範囲で同調していること、エゾアワビと同様に時化が産卵の引き金となっており、毎年の産卵期に1、2回の大規模な産卵と数回の小規模産卵が行われていることが示唆された。また、最低水温日からの積算水温が幼生出現開始時期と関係していることが示され、高水温期と産卵期の水温が高い年ほど浮遊幼生の発生量が大きい傾向が見られた。しかし、産卵期および着底期の水温が低いほうが着底後の稚貝の生残に有利であることが報告されているため (小島, 2005)、産卵期の水温が高い年ほど

再生産に有利とは一概に言い切れない。また、成熟については水温だけでなく餌料環境も影響していると考えられる。暖流系大型アワビ類の天然発生量の変動とその要因を解明するためには、今後さらに、餌料環境が成熟に及ぼす影響や、幼生から資源に加入するまでの減耗要因などを明らかにする必要がある。

謝辞

城ヶ島漁業協同組合、長井町漁業協同組合、みうら漁業協同組合南下浦支所、横須賀市大楠漁業協同組合の関係者の皆様には調査への深いご理解とご協力をいただいた。特定非営利活動法人マリンサポートの小池康裕氏には横須賀地先の調査においてお世話になった。(独)国立環境研究所研究協力員の小嶋光浩氏、(独)水産総合研究センター増養殖研究所契約職員の佐藤真弓氏には採集試料の処理にご協力いただいた。調査船の運行については、梶ヶ谷義一氏、金子栄一氏にお世話になった。平塚沖の波高データは東京大学生産技術研究所 林昌奎教授にご提供いただいた。ここに記して感謝申し上げる。また、長期にわたり水温データを蓄積している (独)水産総合研究センター増養殖研究所横須賀庁舎および神奈川県水産技術センターの担当職員の地道な努力に敬意を表する。なお、三浦地先における調査は (独)国立環境研究所と神奈川県水産技術センターとの共同研究の一部として実施された。

引用文献

- Babcock, R. and J. Keesing (1999) Fertilization biology of the abalone *Haliotis laevigata*: laboratory and field studies. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **56**, 1668-1678.
- 浜口昌巳・佐々木美穂・堀井豊充・清本節夫・大橋智志・藤井明彦・滝口直之・橋本加奈子・竹内泰介 (2006) アワビ類初期生態解明のための種判別技術の開発. *水研セ研報*, 別冊5, 75-83.
- 原 素之 (2008) 遺伝学的観点からのアワビ種苗放流の現状と課題. *月刊海洋*, **40**, 538-542.
- 早川 淳・山川 卓・青木一郎 (2007) アワビ類およびサザエ資源の長期変動とその要因. *水産海洋研究*, **71**, 96-105.
- 堀井豊充・黒木洋明・梶ヶ谷義一・滝口直之・浜口昌巳 (2006) 相模湾沿岸でみられたアワビ類浮遊幼生と付着初期稚貝の種組成の相違. *水研セ研報*, 別冊5, 85-89.
- 今井利為・滝口直之・堀口敏宏 (2006) 城ヶ島におけるアワビ漁獲量減少要因の推定. *神奈川県水産技術センター水産技術研報*, **1**, 51-58.
- 菊地省吾・浮 永久 (1974a) アワビ属の採卵技術に関する研究第1報エゾアワビ *Haliotis discus hannai* INOの性成熟と温度との関係. *東北水研研報*, **33**, 69-78.
- 菊地省吾・浮 永久 (1974b) アワビ属の放卵技術に関する研究第5報クロアワビ *Haliotis discus Reeve*の性成熟と温度との関係. *東北水研研報*, **34**, 77-85.
- 小島 博 (2005) クロアワビの資源管理に関する生態学的研究. *徳島水総セ研報*, **3**, 1-120.
- 小宮朋之・橋本加奈子・柴田輝和・田中種雄 (2009) 千葉県外房海域におけるアワビ類の浮遊幼生、着底稚貝の出現状況と成長過程. *千葉水研セ研報*, **4**, 21-34.
- Miyake, Y., S. Kimura, T. Kawamura, T. Horii, H. Kurogi and T. Kitagawa (2009) Simulating larval dispersal processes for abalone using a

- coupled particle-tracking and hydrodynamic model: implications for refugium design. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **387**, 205–222.
- Miyake, Y., S. Kimura, T. Kawamura, T. Kitagawa and H. Takami (2011) Population connectivity of Ezo abalone on the north Pacific coast of Japan in relation to the establishment of harvest refugia. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **440**, 137–150.
- 武蔵達也・遠藤 敬 (2006) エゾアワビ稚貝の生き残りとの冬季水温との関係. *月刊海洋*, **38**, 200–204.
- 中村 藍・北田修一・浜崎活幸・大河内裕之 (2005) アワビ類の漁獲変動: エゾアワビの漁獲量と気候変動および種苗放流の関連について. *栽培技研*, **33**, 45–54.
- 鬼塚年弘・河村知彦 (2008) 相模湾におけるトコブシの新規加入量変動要因. *月刊海洋*, **40**, 500–506.
- Onitsuka, T., T. Kawamura and T. Horii (2010) Reproduction and early life ecology of abalone *Haliotis diversicolor* in Sagami Bay, Japan. *JARQ- Jpn. Agr. Res. Q.*, **44**, 375–382.
- Onitsuka, T., T. Kawamura, T. Horii, N. Takiguchi, H. Takami and Y. Watanabe (2007) Synchronized spawning of abalone *Haliotis diversicolor* triggered by typhoon events in Sagami Bay, Japan. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **351**, 129–138.
- Onitsuka, T., T. Kawamura, T. Horii, N. Takiguchi and Y. Watanabe (2008) Survival, growth and recruitment of abalone *Haliotis diversicolor* in Sagami Bay, Japan. *J. Shellfish Res.*, **27**, 843–855.
- 西洞孝広 (2002) 岩手県におけるエゾアワビ資源の回復とその要因. *月刊海洋*, **34**, 477–481.
- 佐々木 良 (1985) 気仙沼湾周辺におけるエゾアワビ浮遊幼生の査定と出現. *水産増殖*, **32**, 199–206.
- 佐々木 良 (1994) 宮城県北部海域におけるエゾアワビ浮遊幼生の加入初期過程. *宮城水研セ気仙沼研報*, **9**, 1–17.
- 佐々木 良 (2001) エゾアワビの加入機構に関する生態学的研究. *宮城水研セ研報*, **1**, 1–86.
- Sasaki, R. and S. A. Shepherd (1995) Larval dispersal and recruitment of *Haliotis discus hannai* and *Tegula* spp. on Miyagi coast, Japan. *Mar. Freshw. Res.*, **46**, 519–529.
- 関 哲夫・菅野 尚 (1977) エゾアワビの初期発生と水温による発生速度の制御. *東北水研研報*, **38**, 143–153.
- Takami, H., T. Saido, T. Endo, T. Noro, T. Musashi and T. Kawamura (2008) Overwinter mortality of young-of-the-year Ezo abalone in relation to seawater temperature on the North Pacific coast of Japan. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **367**, 203–212.
- 滝口直之 (2002) 神奈川県におけるアワビの資源状況と生態. *月刊海洋*, **34**, 482–488.
- 田中邦三・田中種雄・石田 修・大場俊雄 (1986) 千葉県南部沿岸のアワビ浮遊幼生並びに着底稚貝の分布. *日水誌*, **52**, 1525–1532.
- 田中種雄・石田 修 (1983) アワビ浮遊幼生の出現状況について. *千葉水試研報*, **41**, 1–10.
- 浮 永久 (1995) アワビ類の繁殖生理と種苗生産の組み立て. 「アワビ類の種苗生産技術」日本栽培漁業協会, 東京, 1–92.
- 全国漁業協同組合連合会 (1977) 日本近海底質図. 全国漁業協同組合, 東京.