

原著論文

バイ稚貝の成長に及ぼす水温および底砂の影響

中村幸雄*§

Effects of Water Temperature and Bottom Sands on Growth of
Young Ivory Shell *Babylonia japonica*

Yukio Nakamura*§

要約: バイ稚貝の成長に及ぼす水温および底砂の影響を調べた。自然水温 (平均: 18.0°C, 範囲: 10.9~29.9°C) のもとで581日間にわたり飼育した平均殻長 (殻高) 13mmの稚貝の成長は, 自然水温+4~6°Cあるいは自然水温+1~3°Cのもとで同期間飼育した稚貝の成長よりも有意に小さかった。いずれの実験区も20~30°Cでは高温側ほど成長が良かったが, 30°Cを越えると成長が鈍化し, 34°C前後で死亡個体が出現した。平均粒径0.5mmの中砂および同0.9mmの粗砂を敷いて飼育した殻長24mmの稚貝の成長は砂を敷かなかった稚貝よりも有意に大きかった。一方, 底砂の粒径の違いによる成長差はなかった。本種の種苗生産では低水温期の加温飼育および水槽への砂敷き飼育が成長を促進させることがわかった。

キーワード: *Babylonia japonica*, バイ, 水温, 底砂, 成長

Abstract: Effects of rearing water temperature and bottom sands on growth of ivory shell *Babylonia japonica* were examined through laboratory experiments. Young ivory shell (mean shell length, 12.9 mm) were reared under three different temperature conditions: natural seawater temperature (NT), natural seawater temperature + 4–6°C (warmed seawater temperature: WT), and natural seawater temperature + 1–3°C (temperature of the natural and the warmed seawater mixed: MT) for 581 days. Growth rates of ivory shell reared at NT (mean, 18.0°C; range, 10.9–29.9°C) were significantly lower than those of ivory shell reared at WT (mean, 22.7°C; range, 14.9–35.7°C) or MT (mean, 20.4°C; range, 11.1–32.4°C). Ivory shell grew larger at higher temperatures of 20–30°C. In contrast, growth was slow when water temperature was >30°C and death occurred at approximately 34°C. Growth rates of young ivory shell (mean shell length, 24 mm) reared in medium sand (mean long diameter, 0.5 mm) or coarse sand (mean long diameter, 0.9 mm) in tanks were significantly larger than those of ivory shell reared without sand. No significant difference was observed in growth rates between medium and coarse sand used in experiments. Thus, an increase in temperature during the low temperature season and sand spread at the bottom of the rearing tank would promote growth of ivory shell.

Key words: *Babylonia japonica*, ivory shell, water temperature, bottom sand, growth

まえがき

本邦産バイ *Babylonia japonica* は, 北海道南部か

ら九州までの日本沿岸の浅海砂浜域に広く分布する腹足類巻貝の一種で, かつてはその漁獲高も多く, 水産加工品や食用として盛んに用いられた。

(2015年6月8日受付, 2015年7月3日受理)

* 公益財団法人海洋生物環境研究所 事務局 (〒162-0801 東京都新宿区山吹町347番地藤和江戸川橋ビル7階)

§ E-mail: nakamura@kaiseiken.or.jp

しかし、1970年代に入るとバイの漁獲量は激減し、この原因の一つとして漁網や船体の生物付着防汚剤として使用されていたTBT（トリブチルスズ）等の有機スズ類の汚染による生殖異常であることが指摘された（堀口，2000）。すなわち、有機スズ類によるバイの生殖異常は、当時、国内においても大きな環境問題となった環境ホルモン影響あるいは内分泌かく乱化学物質影響のうち、雌の雄化というインポセックス現象が顕在化した例として学術雑誌はもとより新聞やテレビ等のマスメディアでも大きく取り上げられた。さらに、自然海域における資源量の激減や、本種の種苗生産事業を進めていた水産関係機関の事業中止等、バイ漁業の衰退が報告されるようになった（堀口，2000）。

しかしながら、1980年代後半から1990年代にかけて海域における有機スズ類の使用が制限・禁止されることによって、海域環境中の有機スズ類濃度も穏やかな減少傾向を示している（丸茂，2003）。こうした状況の中で本種の種苗生産および放流等の技術開発事業を継続的に実施している機関もあり、資源量も回復傾向にあるとの報告もある（道根・清川，2006；太田，2011）。本種の成長や産卵生態などに関する現場調査や実験的研究は資源解析や種苗生産、放流などの技術開発を目的として盛んに行われてきた（西広ら，1988；梶川，1999など；道根・清川，2006）。一方、これら調査研究の中でバイ稚貝の成長に対する水温あるいは底砂の影響を比較的長期にわたり室内実験で調べた研究は少ない。

そこで、本研究では稚貝期におけるバイの成長に及ぼす水温の影響を明らかにするための飼育実験（以下、水温実験）および底砂の影響を明らかにするための飼育実験（以下、底砂実験）を行い、種苗生産や放流技術の開発等に資する基礎情報を収集した。

材料と方法

親貝の飼育と採卵 水温実験および底砂実験に用いたバイ稚貝は、1996年5月に当時の柏崎漁業協同組合荒浜漁業振興組合（現在、新潟漁業協同組合柏崎支所荒浜分会）から提供された天然の成体（16個体、重量： 46.1 ± 7.0 g、殻長（殻高）： 67.4 ± 4.4 cm）を親貝として生産した。親貝は入手後、当所の実証試験場（新潟県柏崎市荒浜）構内にあ

る屋外流水式コンクリート水路の一部の区画（長さ400cm×幅50cm×高さ75cm）に収容し、約1ヶ月間、冷凍オキアミを餌料として、実証試験場の前面海域から取水した沿岸海水（以下、自然海水）をかけ流しながら、自然日長の条件下で飼育した。

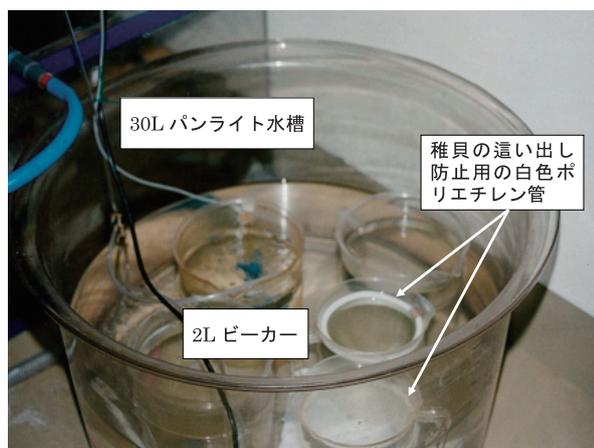
自然海水の水温が20℃前後となった6月8日、コンクリート水路内に設置した波板および水路側壁に初めて卵囊塊が確認された。コンクリート水路内ではその日以降も複数の親貝が継続的に産卵した（第1図）。そこで、6月15日にすべての親貝を飼育管理が容易な屋内の角型水槽1基に移し、屋外飼育の場合と同様に自然海水の流水下、自然日長のもとで冷凍オキアミを餌料として継続飼育した。屋内飼育においても6月下旬から7月下旬までの約1ヶ月間（20～25℃）を盛期として、水槽内に設置した波板および水槽側壁に多くの卵囊が観察された。その後、自然水温が25℃を上回る7月下旬頃から産卵量は徐々に減少し、28℃を越える8月に至ると産卵は停止した。さらに、最高水温期を経て水温が低下しても産卵は停止したままであった。

水温実験に用いた稚貝の養成方法 水温実験に供したバイ稚貝は、1996年6月下旬の数日間に産出された卵を実験開始日の11月6日まで養成したものである。卵から稚貝までの飼育は以下の方法で行った。

まず、水槽内に設置した波板上に付着している卵囊塊を傷つけないように金属ヘラを用いて波板から剥がした。次いで、複数の卵囊塊を1房毎にハサミで丁寧に切り分け、白濁や奇形などがない数十個の房を数分間、角形バット内で淡水洗浄した後、ウォーターバス方式で約23℃に調温した2L容ガラス製ビーカー3個にそれぞれ5～10房ずつ収容し、止水条件のもとで飼育した。ビーカー飼育を開始してから約2～3週間後までにはすべての卵が孵化して浮遊幼生となり、さらに産卵から約1ヶ月後の7月下旬までには、すべての浮遊幼生が着底稚貝となった。卵期から浮遊期までは緩やかなエアレーションを施すとともに適時、砂ろ過処理した海水（以降、ろ過海水）で換水した。着底稚貝が出現し始めた頃、餌として細かく砕いた少量の冷凍オキアミを1日2回、午前と午後にビーカー内に投与した。給餌から1時間以内に水質悪化を防ぐため残餌等を回収するとともに、飼育水のほぼ全量をろ過海水で交換した。なお、7月下



第1図 屋外長水路で飼育中の親貝と産出された卵塊（水路水面の上方から撮影した写真）。側壁を這う親貝は産卵中。



第2図 2Lビーカーを用いた止水式飼育で採用した稚貝這い上がり防止用の白色ポリエチレン円環の設置状況。稚貝は、30Lパンライト水槽を恒温水槽として止水式で飼育した。

旬から8月下旬までの稚貝の飼育にはウォーターバス内の水温を23～25℃で調節した。また、稚貝がビーカー上部から外へ這い出すことを防ぐために、第2図に示すようにビーカー上部の内側壁と飼育海水表面との境界には、これに沿うように直径約10mmの白色ポリエチレン管を円環状に設置した。

このようにして、ビーカー内飼育により稚貝の殻長（殻高）が数mmまで成長した頃、すべての稚貝を23～25℃に調温した30Lパンライト円形水槽1基に收容し、ビーカー内飼育と同様の方法で給餌および海水交換を行った。円形水槽上部の内側壁と飼育海水表面との境界には、これに沿うようにポリエチレン管を円環状に設置し稚貝がビーカー上部から外へ這い出すことを防いだ。さらに、殻長が10mm前後まで成長した時点で、約2L容の網蓋付角形水槽6基に30～40個体ずつ分けて收容し、実験に供するまで自然海水の流水条件下で飼育した。光周期は自然日長とした。給餌は2回/日、午前および午後水槽内に冷凍オキアミの飽食量



第3図 実験開始から約1ヶ月後の稚貝。実験開始時には貝殻表面に個体識別用番号を印字した耐水シートを各個体の貝殻表面に接着剤で貼り付けた。

を投与した。

水温実験の方法 角形水槽6基で継続飼育した193個体の稚貝のうち、貝殻の欠損等がある異常個体、極端に大きい個体や小さい個体などを除いたすべての個体の重量と殻長を測定した。測定終了後、稚貝の平均重量とそのバラツキが均等になるように20個体ずつ6群に分け、第3図に示すように個体識別用番号を印字した耐水シートを各個体の貝殻表面に接着剤で貼り付けた。その後、自然海水を注水した前述の角形水槽6基に收容した。角形水槽へ分けて收容してから約1週間後、自然海水区（自然海水を注水した実験区）、温海水区（自然海水温+4～6℃に加熱した海水（温海水）を注水した実験区）、混合海水区（自然海水と温海水を1：1の割合で混合して自然海水温+1～3℃とした海水を注水した実験区）をそれぞれ2区（AおよびB）ずつ設定するために、混合海水区および温海水区には温海水を数日かけて徐々に注水した。実験開始日は、自然海水温から所定の実験水温に設定するため温海水の注水を開始した1996年11月6日とし、実験終了日は実験開始から約19ヶ月経過した1998年6月10日とした。その間、原則1回/月、各実験区の稚貝の殻長（殻高）および重量を測定した。実験期間中は測定日を除き、餌として2回/日、午前と午後冷凍オキアミの飽食量を与えた。また、実験期間中の各実験区の水温は、午前あるいは午後の給餌前に測定した。光周期は自然日長とし、いずれの実験区の水槽にも砂等を敷かなかった。

底砂実験に用いた稚貝の養成方法 自然水温が

20℃を下回る11月以降に、一旦産卵を停止した親貝を20～25℃程度に加温して一定期間飼育することで、摂餌行動が活発化し産卵を再開した。本研究の底砂実験で用いた稚貝は、1996年11月中旬から約1ヶ月間、加温飼育していた親貝から12月17日に得られた卵を前述の水温実験と概ね同様の方法で約10ヶ月間飼育したものである。孵化後、殻長10mmに達するまで2Lビーカー数個および30Lパンライト水槽1基で飼育した後、稚貝約100個体を3基の12L容角形水槽に分けて収容した。餌料として冷凍オキアミを2回/日水槽内に投与した。光周期は自然日長とした。実験期間中の水温は、実験開始前および開始から1週間程度は混合海水を、その後の実験期間中は高温期には自然海水を、低温期には温海水を注水し15～30℃の範囲に調節した。なお、実験開始前の稚貝養成期では水槽内の底には砂等を敷かなかった。

底砂実験の方法 実験開始日の数日前に、角形水槽で飼育中の稚貝のうち異常個体を除いた稚貝の重量と殻長(殻高)を測定し、平均重量とそのバラツキが均等になるように20個体ずつ3群に分け、個体識別番号を印字した耐水シートを各個体の貝殻表面に接着剤で貼り付けた。実験水槽として粗砂(30粒の平均値、長径: 0.94±0.23mm, 短径: 0.77±0.20mm) および中砂(30粒の平均値、長径: 0.53±0.13mm, 短径: 0.47±0.13mm) を厚さ約4cmに敷き詰めた角形水槽2基と砂を敷かない水槽1基を用意し、20個体ずつ3群に分けた稚貝を各水槽に収容し、それぞれ粗砂区、中砂区、砂無し区として実験を開始した。なお、粗砂および中砂の粒径区分の名称は地盤工学会基準(改正案)(公益社団法人地盤工学会, 2015)に拠った。実験期間は1997年10月21日から1998年9月24日までの338日間であった。実験期間中の水温は、成長等への水温影響を避けるため、自然海水と温海水を用いて15～30℃の範囲に調節した。すなわち、実験期間中の水温低下期および低水温期には飼育海水として混合海水あるいは温海水を、また、実験期間後半の7月以降は混合海水あるいは自然海水をそれぞれ用いて実験を行った。測定日を除き餌料として冷凍オキアミの飽食量を2回/日、午前と午後には水槽内に投与した。日長条件は自然日長とした。

成長の評価 水温実験および底砂実験とも実験開始日および終了日と、実験を開始してから1～2ヶ

月毎に稚貝の重量(湿重量: g) および殻長(殻高: mm)を測定し、増重量, 日間増重量, 日間増重率, 増殻長, 日間増殻長, 日間増殻長率を指標として、水温および底砂の影響を評価した。それら成長指標の算出方法は以下のとおりである。

$$\text{増重量(g)} = W_t - W_o$$

$$\text{増殻長(mm)} = L_t - L_o$$

$$\text{日間増重量(g/日)} = (W_t - W_o) / T$$

$$\text{日間増殻長(mm/日)} = (L_t - L_o) / T$$

$$\text{日間増重率(\%)} = 100 \times (W_t - W_o) / \{(W_t + W_o) / 2\} / T$$

$$\text{日間増殻長率(\%)} = 100 \times (L_t - L_o) / \{(L_t + L_o) / 2\} / T$$

W_t (g): 終了時重量

W_o (g): 開始時重量

L_t (mm): 終了時殻長

L_o (mm): 開始時殻長

T (日): 期間日数

統計計算 データは一元配置の分散分析により検定を行い、有意差が認められた場合にTukey-Kramerの多重比較検定により各実験区間の平均値の有意差($P < 0.05$)を判定した。

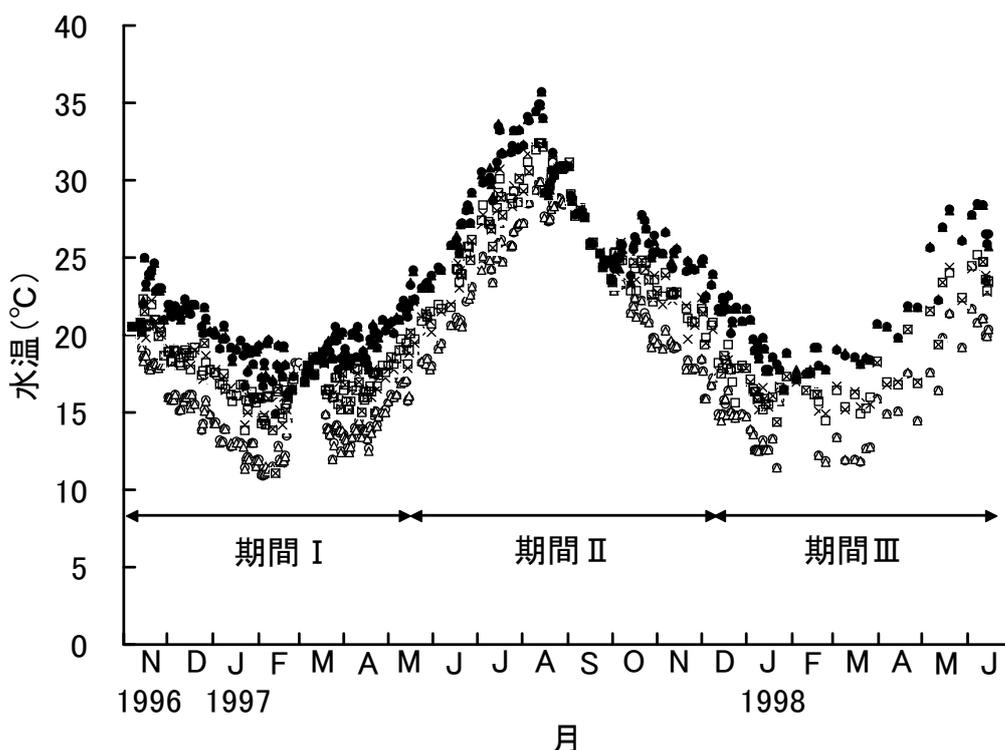
結果

水温の影響 実験期間中の自然海水区2区, 混合海水区2区, 温海水区2区の水温の経時変化を第4図に示す。いずれの実験区においても実験期間中の1997年2～3月および1998年1～2月の2期間には自然海水供給設備の点検により温海水のみを、1997年8～9月には温海水供給設備の点検により自然海水のみを注水した。また、本研究では第4図に示すように、実験期間を時系列順に水温下降期から最低水温期を経て水温上昇期に至るまでの期間Ⅰ(1996年11月6日～1997年5月20日), 水温上昇期から最高水温期を経て水温下降期に至るまでの期間Ⅱ(1997年5月20日～同年12月16日), さらに水温下降期から最低水温期を経て水温上昇期にあたる試験終了時までの期間Ⅲ(1997年12月16日～1998年6月10日)に区分した。第1表にはそれら3期間およびすべての実験期間を通じた全期(1996年11月6日～1998年6月10日)の平均水温, 最高水温および最低水温を示す。それらの図表から明らかのように、実験期間中に自然海水および温海水の供給が一時的に停止するケースがあったが、全期間を通じてみると、混合海水区および温海水区の水温はそれぞれ自然海水温+1～3℃および自然海

水温+4~6°Cで維持された。

全期581日間にわたる6実験区の稚貝の重量および殻長の変化をそれぞれ第5図および第6図に示す。また、各実験区の期間Ⅰ、期間Ⅱ、期間Ⅲおよび全期の増重量、日間増重量、日間増重率、増殻長、日間増殻長、日間増殻長率を期間別にまとめて第2表に示す。

いずれの実験区においても稚貝の重量および殻長は実験開始直後から徐々に増加した。期間Ⅰでは温海水区、混合海水区、自然海水区の順で日間増重量（増重率）および日間増殻長（増殻長率）がいずれも有意に大きい値を示した（第2表）。一方、期間Ⅱでは夏期の自然海水温の上昇に伴って温海水区および混合海水区の水温が著しく上昇し



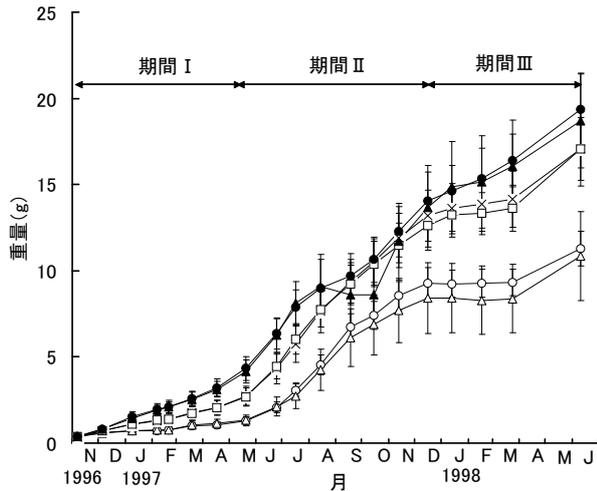
第4図 実験期間中（581日間、1996年11月6日～1998年6月10日）の自然海水区A、B、混合海水区A、B、温海水区A、Bにおける水温の推移。各海水区ともAおよびBの繰り返し2区を設定した。○：自然海水区A、△：自然海水区B、×：混合海水区A、□：混合海水区B、●：温海水区A、▲：温海水区B。混合海水区には原則として自然海水と温海水を半量ずつ混ぜて注水した。期間Ⅰ（195日間）：1996年11月6日～1997年5月20日、期間Ⅱ（210日間）：1997年5月20日～1997年12月16日、期間Ⅲ（176日間）：1997年12月16日～1998年6月10日。実験期間中の1997年2月23日～3月18日および1998年1月21日～2月18日の2期間には6水槽すべてに温海水あるいは混合海水を注水した。また、1997年8月15日～10月1日には同様に自然海水あるいは混合海水を注水した。

第1表 期間別の各実験区の水温（°C）

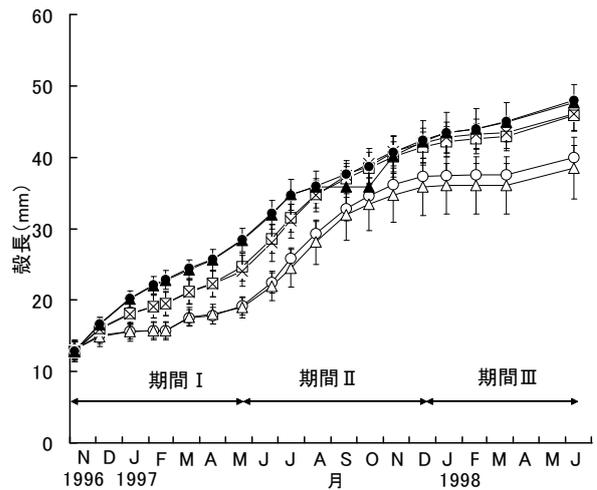
	期間Ⅰ ^{*1}			期間Ⅱ ^{*1}			期間Ⅲ ^{*1}			全期 ^{*2}		
	平均±SD	最高	最低	平均±SD	最高	最低	平均±SD	最高	最低	平均±SD	最高	最低
自然海水区A	15.0±2.4	20.5	10.9	23.2±4.2	29.9	14.6	15.1±2.7	21.7	11.4	18.0±5.1	29.9	10.9
自然海水区B	14.9±2.4	20.5	11.0	23.2±4.2	29.9	14.5	15.1±2.7	21.7	11.4	18.0±5.1	29.9	11.0
混合海水区A	17.4±1.9	22.2	11.1	25.5±3.9	32.4	17.6	17.7±2.7	24.7	14.4	20.4±4.8	32.4	11.1
混合海水区B	17.4±1.9	22.3	11.1	25.5±3.8	32.4	17.5	17.7±2.8	25.2	14.4	20.4±4.8	32.4	11.1
温海水区A	19.8±1.9	25.0	14.9	27.5±3.6	35.7	21.5	20.6±3.2	28.5	16.5	22.7±4.6	35.7	14.9
温海水区B	19.9±1.9	25.0	14.9	27.5±3.6	35.7	21.5	20.6±3.1	28.4	16.5	22.7±4.6	35.7	14.9

^{*1}第4図参照

^{*2}581日間



第5図 異なる3水温条件下で飼育したバイ稚貝の重量変化。○:自然海水区A, △:自然海水区B, ×:混合海水区A, □:混合海水区B, ●:温海水区A, ▲:温海水区B。縦線は標準偏差を示す。期間 I, II, IIIについては第4図を参照。



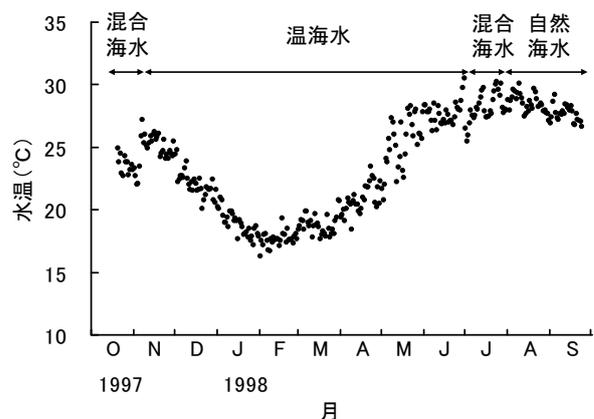
第6図 異なる3水温条件下で飼育したバイ稚貝の殻長変化。○:自然海水区A, △:自然海水区B, ×:混合海水区A, □:混合海水区B, ●:温海水区A, ▲:温海水区B。縦線は標準偏差を示す。期間 I, II, IIIについては第4図を参照。

た(第4図)。両実験区の飼育水温が30℃前後となる7月中旬には稚貝の摂餌行動が不活発化し、さらに温海水温が30~36℃まで上昇する8月から9月(最高水温は35.7℃)に至ると、温海水区の稚貝40個体のうち17個体が死亡した。また、第2表に示すように、期間IIの温海水区および混合海水区の日間増重量は自然海水区よりも大きかったが、両区の日間増重量、日間増殻長、日間増殻長率は期間Iの場合とは逆に自然海水区の値より有意に小さかった。例えば、期間IIの日間増重量および日間増殻長率は自然海水区2区の平均値でそれぞれ0.710%および0.305%、同様に混合海水区で0.623%および0.251%、温海水区で0.508%および0.190%であった(第2表)。期間IIIでは再び日間増重量(率)および日間増殻長(率)が自然海水区よりも温海水区で有意に大きい値を示す傾向があったが、いずれの実験区でも期間IIIの日間増重量および日間増殻長率は期間Iの値のそれぞれ約18~25%および16~23%であった(第2表)。

全期間を通じた日間増重量(増重量率)および日間増殻長(増殻長率)は自然海水区の2区の平均でそれぞれ0.0188g/日(0.323%)および0.0458mm/日(0.174%)、同様に混合海水区が0.0288g/日(0.330%)および0.0571mm/日(0.195%)、温海水区が0.0322g/日(0.332%)および0.0606mm/日(0.200%)であった(第2表)。また、全期間を通じて算出したいずれの成長指標値も温海水区あるいは混合海水区が自然海水区より大きい値を示す傾向があった(第2表)。本実験の約19ヶ月間にわ

たる水温実験の結果、終了時のバイの重量および殻長は開始時に比べ、自然海水区2区の平均でそれぞれ32.7倍および3.1倍、同様に混合海水区で51.7倍および3.6倍、温海水区で59.7倍および3.8倍に増加した。

底砂の影響 約11ヶ月間にわたる3実験区の水温の推移を第7図に示す。実験期間中は水温がバイの成長停止や死亡が起こらない15~30℃の範囲となるように、自然海水、温海水、混合海水を適宜切り替えて飼育海水として使用した。実験期間中の水温は、平均が23.6℃、最低が16.3℃、最高が30.5℃であった。



第7図 底砂実験における水温の推移。混合海水は自然海水と温海水を半量ずつ混ぜた。各実験区(砂無し区, 中砂区, 粗砂区)の水温は共通。

各実験区の稚貝の平均重量および平均殻長の経時変化をそれぞれ第8図および第9図に、実験開始

中村：バイ稚貝の成長に及ぼす水温および底砂の影響

第2表 水温実験における各実験区の期間別成長指標値

成長指標	実験区	開始時		期間Ⅰ ^{*1}		期間Ⅱ ^{*1}		期間Ⅲ ^{*1}		全期 ^{*1}	
		平均 ± SD	n ^{*2}	平均 ± SD	n ^{*2}	平均 ± SD	n ^{*2}	平均 ± SD	n ^{*2}	平均 ± SD	n ^{*2}
重量 (g)	自然海水区A	0.37 ± 0.10	20								
	自然海水区B	0.37 ± 0.11	19								
	混合海水区A	0.36 ± 0.10	20								
	混合海水区B	0.36 ± 0.11	20								
	温海水区A	0.36 ± 0.10	20								
	温海水区B	0.36 ± 0.11	20								
増重量 (g) ^{*3}	自然海水区A			0.95 ± 0.16	20	7.98 ± 0.78	20	2.00 ± 0.45	20	10.92 ± 1.00	20
	自然海水区B			0.96 ± 0.22	19	7.45 ± 1.18	19	2.56 ± 0.93	19	10.97 ± 1.53	19
	混合海水区A			2.38 ± 0.53	20	10.47 ± 1.12	20	3.86 ± 1.07	20	16.71 ± 1.70	20
	混合海水区B			2.34 ± 0.45	19	9.93 ± 1.17	19	4.44 ± 1.28	19	16.71 ± 2.26	19
	温海水区A			3.99 ± 0.65	20	9.70 ± 1.34	13	5.30 ± 1.20	13	19.02 ± 2.16	13
	温海水区B			3.79 ± 0.63	20	9.59 ± 1.87	10	5.02 ± 0.86	10	18.33 ± 3.07	10
日間 増重量 (g/日) ^{*4}	自然海水区A			0.0048 ± 0.0008 ^c	20	0.0380 ± 0.0037 ^b	20	0.0113 ± 0.0025 ^c	20	0.0188 ± 0.0017 ^c	20
	自然海水区B			0.0049 ± 0.0011 ^c	19	0.0355 ± 0.0056 ^b	19	0.0146 ± 0.0052 ^c	19	0.0189 ± 0.0026 ^c	19
	混合海水区A			0.0122 ± 0.0027 ^b	20	0.0499 ± 0.0054 ^a	20	0.0219 ± 0.0059 ^b	20	0.0288 ± 0.0031 ^b	20
	混合海水区B			0.0120 ± 0.0023 ^b	19	0.0473 ± 0.0056 ^a	19	0.0252 ± 0.0071 ^{ab}	19	0.0288 ± 0.0038 ^b	19
	温海水区A			0.0204 ± 0.0033 ^a	20	0.0462 ± 0.0064 ^a	13	0.0301 ± 0.0068 ^a	13	0.0327 ± 0.0037 ^a	13
	温海水区B			0.0195 ± 0.0032 ^a	20	0.0457 ± 0.0089 ^a	10	0.0285 ± 0.0047 ^a	10	0.0315 ± 0.0050 ^{ab}	10
日間 増重量 (%) ^{*5}	自然海水区A			0.578 ± 0.057 ^c	20	0.718 ± 0.024 ^a	20	0.110 ± 0.023 ^b	20	0.322 ± 0.005 ^b	20
	自然海水区B			0.586 ± 0.057 ^c	19	0.702 ± 0.037 ^a	19	0.146 ± 0.047 ^a	19	0.323 ± 0.006 ^b	19
	混合海水区A			0.788 ± 0.043 ^b	20	0.628 ± 0.040 ^b	20	0.145 ± 0.037 ^a	20	0.330 ± 0.003 ^a	20
	混合海水区B			0.789 ± 0.038 ^b	19	0.619 ± 0.053 ^b	19	0.168 ± 0.035 ^a	19	0.330 ± 0.005 ^a	19
	温海水区A			0.869 ± 0.031 ^a	20	0.503 ± 0.047 ^c	13	0.181 ± 0.038 ^a	13	0.332 ± 0.003 ^a	13
	温海水区B			0.861 ± 0.041 ^a	20	0.515 ± 0.034 ^c	10	0.179 ± 0.036 ^a	10	0.331 ± 0.004 ^a	10
殻長 (mm)	自然海水区A	13.11 ± 1.29	20								
	自然海水区B	13.10 ± 1.41	19								
	混合海水区A	12.83 ± 1.31	20								
	混合海水区B	12.80 ± 1.49	20								
	温海水区A	12.85 ± 1.19	20								
	温海水区B	12.81 ± 1.41	20								
増殻長 (mm) ^{*6}	自然海水区A			6.05 ± 0.76	20	18.16 ± 0.99	20	2.70 ± 0.42	20	26.90 ± 1.52	20
	自然海水区B			5.90 ± 0.89	19	17.62 ± 1.29	19	2.76 ± 0.50	19	26.29 ± 1.48	19
	混合海水区A			11.25 ± 1.61	20	17.92 ± 1.41	20	4.10 ± 0.71	20	33.28 ± 1.77	20
	混合海水区B			11.92 ± 1.24	19	16.77 ± 1.98	19	4.43 ± 0.71	19	33.11 ± 2.35	19
	温海水区A			15.64 ± 1.72	20	13.99 ± 1.72	13	5.55 ± 1.01	13	35.40 ± 1.96	13
	温海水区B			15.61 ± 1.86	20	14.15 ± 1.58	10	5.49 ± 1.04	10	34.96 ± 3.46	10
日間 増殻長 (mm/日) ^{*7}	自然海水区A			0.0310 ± 0.0039 ^c	20	0.0865 ± 0.0047 ^a	20	0.0153 ± 0.0023 ^c	20	0.0463 ± 0.0026 ^c	20
	自然海水区B			0.0303 ± 0.0046 ^c	19	0.0839 ± 0.0061 ^a	19	0.0157 ± 0.0028 ^c	19	0.0452 ± 0.0025 ^c	19
	混合海水区A			0.0577 ± 0.0083 ^b	20	0.0853 ± 0.0067 ^a	20	0.0233 ± 0.0041 ^b	20	0.0573 ± 0.0031 ^b	20
	混合海水区B			0.0611 ± 0.0064 ^b	19	0.0798 ± 0.0094 ^a	19	0.0252 ± 0.0041 ^b	19	0.0570 ± 0.0040 ^b	19
	温海水区A			0.0802 ± 0.0088 ^a	20	0.0666 ± 0.0082 ^b	13	0.0315 ± 0.0058 ^a	13	0.0609 ± 0.0034 ^a	13
	温海水区B			0.0800 ± 0.0096 ^a	20	0.0674 ± 0.0075 ^b	10	0.0312 ± 0.0056 ^a	10	0.0602 ± 0.0059 ^{ab}	10
日間 増殻長率 (%) ^{*8}	自然海水区A			0.193 ± 0.029 ^c	20	0.307 ± 0.017 ^a	20	0.040 ± 0.006 ^c	20	0.175 ± 0.011 ^b	20
	自然海水区B			0.190 ± 0.032 ^c	19	0.302 ± 0.023 ^a	19	0.042 ± 0.009 ^c	19	0.173 ± 0.012 ^b	19
	混合海水区A			0.313 ± 0.037 ^b	20	0.259 ± 0.027 ^b	20	0.053 ± 0.009 ^b	20	0.195 ± 0.009 ^a	20
	混合海水区B			0.329 ± 0.035 ^b	19	0.242 ± 0.031 ^b	19	0.057 ± 0.010 ^b	19	0.195 ± 0.014 ^a	19
	温海水区A			0.388 ± 0.037 ^a	20	0.189 ± 0.029 ^c	13	0.070 ± 0.013 ^a	13	0.201 ± 0.011 ^a	13
	温海水区B			0.389 ± 0.047 ^a	20	0.192 ± 0.016 ^c	10	0.070 ± 0.017 ^a	10	0.199 ± 0.016 ^a	10

実験期間ごとの各成長指標値のアルファベットは、それらが互いに異なる場合に実験区間で有意差が認められたことを示す (P < 0.05)。

*1 第4図および第1表を参照

*2 供試個体数

*3 増重量=期間終了時重量-期間開始時重量

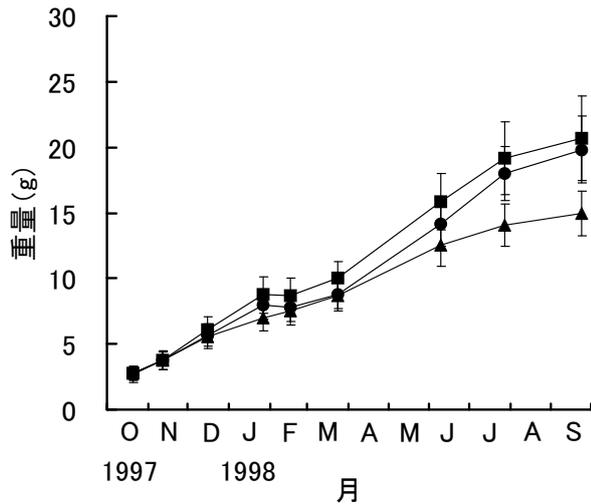
*4 日間増重量=(期間終了時重量-期間開始時重量)/期間飼育日数

*5 日間増重量率=100×(期間終了時重量-期間開始時重量)/{(期間開始時重量+期間終了時重量)/2}/期間飼育日数

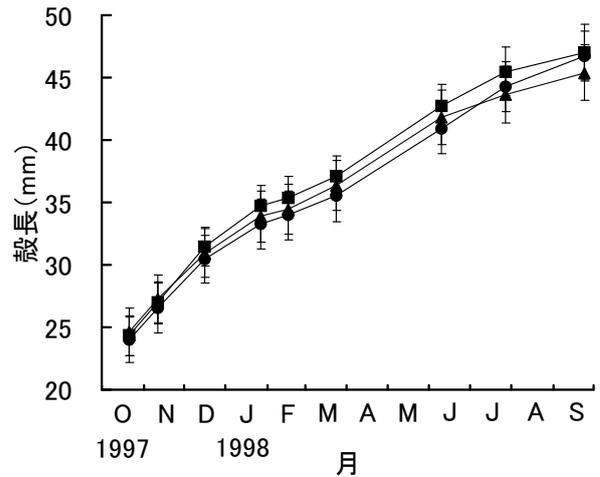
*6 増殻長=期間終了時殻長-期間開始時殻長

*7 日間増殻長=(期間終了時殻長-期間開始時殻長)/期間飼育日数

*8 日間増殻長率=100×(期間終了時殻長-期間開始時殻長)/{(期間開始時殻長+期間終了時殻長)/2}/期間飼育日数



第8図 底砂実験におけるバイ稚貝の重量変化。▲:砂無し区, ■:中砂区, ●:粗砂区。縦線は標準偏差を示す。



第9図 底砂実験におけるバイ稚貝の殻長変化。▲:砂無し区, ■:中砂区, ●:粗砂区。縦線は標準偏差を示す。

第3表 底砂実験における各実験区のバイ稚貝の成長指標値

成長指標	砂無し区 ^{*1}	中砂区 ^{*2}	粗砂区 ^{*1}
開始時重量(g)	2.75 ±0.51	2.85 ±0.50	2.67 ±0.57
終了時重量(g)	14.96 ±1.66 ^b	21.31 ±1.79 ^a	19.82 ±2.50 ^a
増重量(g) ^{*3}	12.21 ±1.33 ^b	18.47 ±1.76 ^a	17.15 ±2.29 ^a
日間増重量(g/日) ^{*3}	0.036±0.004 ^b	0.055±0.005 ^a	0.051±0.007 ^a
日間増重率(%) ^{*3}	0.409±0.019 ^b	0.452±0.021 ^a	0.451±0.024 ^a
開始時殻長(mm)	24.61 ±1.86	24.45 ±1.51	24.00 ±1.79
終了時殻長(mm)	45.40 ±2.18 ^b	47.44 ±1.22 ^a	46.77 ±1.92 ^a
増殻長(mm) ^{*3}	20.79 ±1.45 ^b	22.99 ±1.42 ^a	22.77 ±1.34 ^a
日間増殻長(mm/日) ^{*3}	0.503±0.054 ^b	0.068±0.004 ^a	0.067±0.004 ^a
日間増殻長率(%) ^{*3}	0.044±0.003 ^b	0.047±0.004 ^a	0.048±0.004 ^a

各成長指標値のアルファベットは、それらが異なる場合に実験区間で有意差が認められたことを示す($P < 0.05$)。

^{*1}平均±SD(n=20)

^{*2}平均±SD(n=19)

^{*3}第2表参照

時および終了時の重量および殻長, さらには終了時の増重量, 増殻長, 日間増重量, 日間増殻長, 日間増重率, 日間増殻長率をまとめて第3表に示す。各実験区の供試個体数は20個体としたが, 中砂区のうちで開始時に最も小さかった1個体は期間中ほとんど成長せず異常個体と判定されたため除外した。重量の変化については, 実験開始から3ヶ月後までは各実験区の稚貝の重量に差はみられなかったが, それ以降実験終了時まで砂を敷いた区, 特に中砂区の重量が砂なし区よりも大きい値を示す傾向があった(第8図)。一方, 殻長については実験期間中に大きい差はなかったが, 11カ

月後の実験終了時には, 中砂区および粗砂区の殻長が砂なし区よりも有意に大きい値を示した(第3表)。

第3表に示すように, 実験期間を通じて中砂区および粗砂区の増重量, 日間増重量, 日間増重率, 増殻長, 日間増殻長, 日間増殻長率は, 砂なし区の値より有意に大きかった。一方, 中砂区と粗砂区の間では各成長指標値に有意差はなく, 本実験条件の範囲内では底砂粒径の違いによる成長差は確認されなかった。

考 察

親貝の産卵 室内の実験水槽で飼育した親貝の産卵量および産卵回数は、水温が20～25℃となる6月から7月中旬にかけて多く、それ以降は水温の上昇とともに減少し、28℃を越える8月以降、産卵は停止した。金子（2006）によれば新潟県沿岸の海域ではバイの産卵盛期は6月下旬～7月上旬にかけてで、水温が20℃前後としており、本研究において産卵量等が最も多かった時期の水温と概ね一致する。また、野外調査に基づく既往知見でも日本沿岸のバイの産卵水温はほぼ20～27℃の範囲内にある（庄司ら，2003）とされている。以上のことから、本種の産卵適水温は20～25℃、産卵可能な高温側の上限水温は28℃であろうと考えられた。

今回の実験では高水温期を過ぎた水温低下期および低水温期に産卵はほとんどみられず、摂餌・匍匐行動も不活発となった。一方、一旦、低水温期を経た時期に20℃以上に昇温させたまま一定期間飼育することで産卵を再開した。このように本研究の結果から、初夏の産卵期を終えたバイは、秋季から冬季にかけての水温低下期および低水温期には産卵を停止するものの、それらの時期に加温飼育を行うことによって、摂餌活性が増大し再び産卵することが明らかとなった。

卵の孵化から稚貝の成長 これまでに報告されたバイの産卵から孵化までの積算水温は300～450℃の範囲内にあるとされている（平本，1976；梶川，1976；金子，2006）。本研究においては正確な数値データを収集しなかったが、産卵から孵化までの卵の飼育水温は23℃前後、日数は約2～3週間程度であったことから、概ね上記の範囲にあったと考えられる。網尾（1963）は、バイの卵が孵化するまでの時間は水温、塩分や水槽内での攪拌速度などにより影響を受けるとしているが、通常の本種の種苗生産過程においては、上記の積算水温の範囲を想定した生産計画を策定することが妥当であろう。

バイの種苗生産では浮遊期から着底期までの給餌および水質管理が最も重要である。特に、浮遊期から着底期にかけて浮遊幼生および着底稚貝を同一水槽内で飼育する場合には、着底稚貝の残餌や排泄物、死亡個体の残骸などによって水質が悪化しやすくなり、浮遊幼生に対して悪影響を及ぼ

す。また、この時期には共食いが頻繁に見られ減耗の一因となる。従って、水質を良好に保ち、共食いを防ぐためには、浮遊幼生と着底稚貝を分けて飼育する、浮遊幼生が着底し始めてから着底が完了するまでの期間を可能な限り短縮させる、などの対策が必要であろう。

水温上昇の影響 実験期間581日間のうちの期間Ⅱにおいて、8月上旬から中旬にかけての温海水区では、水温が34℃を越える日が10日以上も続き、その後数日以内で稚貝の約半数が次々と死亡した。一方、同時期の自然海水区および混合海水区では高温側水温がそれぞれ29～30℃および32～33℃となったが、死亡個体はなかった。第2表に示すように、期間Ⅱの自然海水区の日間増重率および日間増殻長率は期間Ⅰに比べ高値を示したが、混合海水区および温海水区では期間Ⅱの日間増重率および日間増殻長率が期間Ⅰに比べ低い値を示す傾向があった。これは混合海水区および温海水区では期間Ⅱの高水温が成長の著しい鈍化を引き起こしたためと推察される。さらに、期間Ⅰに比べより大きい日間増重率および日間増殻長率を示した期間Ⅱの自然海水区においても、最高水温29.9℃を示す8月中旬には著しく低下し摂餌行動も不活発になったことから、30℃前後がバイの成長可能な上限温度になるものと考えられた。

中津川（1989）は初夏の6月に採卵し4ヶ月間飼育養成した平均殻高12.8mmのバイ稚貝を10月末から翌年6月一杯までの8ヶ月間、飼育水温を23～25℃に保ったまま、それらの殻高および重量の変化を調べた。その結果、稚貝の重量および殻高は、それぞれ0.52gから10.15g、4.0mmから34.2mmに増加し、両者とも増加率は最初の1ヶ月間に高く、その後漸減するとした。また、期間中の平均日成長速度は0.081mm/日（実験開始時殻長：14.0mm）および0.039g/日（実験開始時重量：0.52g）であったとしている。本研究において11月6日から翌年の7月16日までの約8ヶ月間、温海水区2区（平均水温：21.1℃、範囲：14.9～33.5℃）の平均日間増殻長量は0.087mm/日（実験開始時殻長：12.8mm）、平均日間増重量は0.031g/日（実験開始時重量：0.36g）であった。約8ヶ月間にわたる中津川の飼育実験では飼育期間中ほぼ23～25℃の定温飼育を行っているのに対して、本研究の温海水区では夏場はほぼ30℃となり、低水温期には15℃を下回る期間が長かったにもかかわらず、中津川（1989）

が得た値にほぼ一致した。中津川によれば、バイ稚貝の種苗生産において飼育密度と日間増殻長量との間に負の相関関係がみられるとしている。ちなみに、本研究のバイ稚貝の飼育密度 ($12\text{mg}/\text{cm}^2$) は中津川が採用した飼育密度 ($28.8\text{mg}/\text{cm}^2$) のほぼ2/5程度と低かった。従って、本研究における稚貝の成長が、著しい水温変化があったにもかかわらず、適水温の一定条件で飼育した中津川の結果とほぼ同等であったのは、こうした飼育密度条件の違いもその一因と考えられた。

本研究において581日間にわたる全期間を通じた日間増殻長は、自然海水区2区の平均が $0.0458\text{mm}/\text{日}$ ($16.7\text{mm}/\text{年}$)、混合海水区2区の平均が $0.0572\text{mm}/\text{日}$ ($20.88\text{mm}/\text{年}$)、温海水区2区の平均が $0.0606\text{mm}/\text{日}$ ($22.12\text{mm}/\text{年}$)であった(第2表)。西広ら(1985)は種苗放流した標識バイの放流後の成長を数カ月おきに1年3ヶ月間程度追跡したところ、殻長を指標とした日間成長率がほぼ $0.020\sim 0.055\text{mm}/\text{日}$ であったと報告している。上野ら(1991)によれば、京都府下海域の蒲入および神崎の両海域における放流バイの成長について、蒲入海域への放流稚貝(放流時: 13.5mm)の年間成長率は $10.6\text{mm}/\text{年}$ (日間成長率: $0.029\text{mm}/\text{日}$)、神崎海域への放流稚貝(放流時: 11.0mm)の年間成長率は蒲入放流稚貝の約2倍、 $20.6\text{mm}/\text{年}$ (日間成長率: $0.056\text{mm}/\text{日}$)であったとしている。さらに、この成長差が、外海に面し底質が砂礫で栄養塩類や有機物等の供給量も少ない蒲入海域に比べ、神崎海域が湾奥部河口域の砂浜帯にあり、栄養塩類や有機物も豊富で餌料生物も多いなど、バイにとって良好な生息環境を有することに起因するものとしている。また、梶川(1999)は、海域環境が異なる3海域に殻長 $20\sim 50\text{mm}$ 程度のバイを放流し、約 $350\sim 450$ 日後に再捕した貝の成長等を計測した。その結果、日間成長量は概ね $0.030\sim 0.080\text{mm}/\text{日}$ の範囲にあり、成長量が大きい海域の特徴として、堆積物の粒度が小さく、有機物量の多い場所であったと報告している。

本研究における約19ヶ月間の日間増殻長はいずれの実験区も $0.0458\sim 0.0606\text{mm}/\text{日}$ となり(第2表)、西広ら(1985)および上野ら(1991)が示す上記の放流貝の殻長の日間成長量よりも若干大きく、梶川(1999)が報告した値の範囲に入る値であった。以上のように、バイの成長に関する既往の知見などを総合的に判断して、生後1年未満の放流バイの年間成長量は $10\sim 30\text{mm}/\text{年}$ の範囲に

あり、成長量は放流場所の底質や餌料環境などによって影響を受けるものと推察される。一方、本研究の結果は室内実験によって得られた結果であり、天然放流貝の場合とは異なるが、温海水区で得られた年間成長量である $0.0606\text{mm}/\text{日}$ ($22.12\text{mm}/\text{年}$)を、例えば殻長 10mm (およそ生後3ヶ月程度)の稚貝に適用した場合、1年で 32.1mm 、2年で 54.2mm 、3年で 76.4mm となることを示す。一般的に天然放流バイの場合、卵から商品サイズの 30mm まで成長するためには生後1年以上、成熟サイズの 50mm に達するまでには3年以上かかることとされている。従って、本研究の結果に基づけば、夏場の高水温に留意しつつ水温下降期および低水温期の加温飼育などによって1年程度は成長が早まることになり、バイの養殖も可能になるものと推察される。

底砂の影響 バイ稚貝の飼育における砂敷きの効果に関する実験的研究は少ない。通常の種苗生産等では、浮遊幼生が着底する時期に水槽底部に厚さ数cmの細砂を敷いて飼育することが多いが、底砂の効果を定量的に調べた研究はほとんどない。上野ら(1991)は、底砂粒径の異なる海域に放流した稚貝は $125\sim 250\mu\text{m}$ の細砂を好む傾向があるが、粒径とバイの成長には明確な関係が認められなかったとしている。また、梶川(1999)は底質環境の異なる海域へバイ稚貝を放流し成長を調べたところ、底質が砂浜で堆積物の粒が小さく、有機物の多いところではバイの餌となる生物も豊富であることから、成長が良く、稚貝の分散・移動も少ない傾向があることを報告している。さらにまた、金子(2006)は細砂区(粒径 0.4mm)と砂無区の生残率および成長率は粗砂区(粒径 2.3mm)よりも高いこと、砂無区と細砂区では砂無区の水槽内に濁りが発生しやすくなり、飼育管理面では細砂区の方が有利であるとしている。本研究で用いた2種類の粒径は、一つが中砂区の $400\sim 600\mu\text{m}$ 、もう一つが粗砂区の $700\sim 900\mu\text{m}$ で、両者とも上野らが報告した海域の底質粒径よりも著しく大きかった。中砂区のバイの成長は、粗砂区のそれよりも若干大きい傾向が認められたものの統計学的には差がなかった(第3表)。西田(2008)は平均殻長 14mm のバイ稚貝の越冬試験を行い、 $8\sim 9^\circ\text{C}$ を下回る水温下ではほとんどのバイが死亡したにもかかわらず、砂を敷いた実験区の稚貝はこの水温下でも95%以上が生残することから、バ

イの越冬には底砂を敷くことが重要であることを報告している。このように、バイの種苗生産における生残率の向上、成長量増大による早期成長をめざした技術拡大のために、水槽底部に敷く底砂等の底質の種類や大きさなどに対する定量・定性的な反応特性をさらに詳細に明らかにする必要がある。

以上、本研究の水温実験および底砂実験の結果から以下のことがわかった。バイ親貝の産卵には水温が重要であり、水温低下期に適水温を維持しつつ豊富な餌料を与えることによって、一旦停止した産卵を再開させることができた。本種の稚貝の成長促進には水温低下期の加温と、高温期の水温を30℃以下に維持することが重要であった。また、砂無し飼育よりも砂敷き飼育の方が稚貝の成長率を高めることができた。

今後、本種の種苗生産技術を高度化するためには稚貝期養成時の最適な水温条件および底砂等の底質条件の定量的な情報を得ることが必要である。また、放流に際してもそれら情報に基づいた海域の放流時期・場所などの選定を行うことが必要である。さらに、高水温期および低水温期の水温調節によって比較的短期間で出荷サイズあるいは成熟サイズの成貝を生産できる可能性が示唆されたことから、本種の養殖の可能性を検討することも重要と考えられた。

謝 辞

本研究で使用した稚貝を生産するための親貝として、健全なバイ成体を提供していただいた新潟漁業協同組合柏崎支所荒浜分会の^敬品田克郎さま、品田美好さま、柴野一志さま他同組合の方々には大変お世話になりました。ここに記し厚く御礼申し上げます。また、本研究を実施するに当たり、バイの飼育、成長量および水温の測定等で連日お手伝いいただいた眞道愛子氏並びに箕輪 康氏に心より御礼申し上げます。

引用文献

網尾 勝 (1963). 海産腹足類の比較発生学ならびに生態学的研究. 水大校研報, **12**, 229-358.
平本義春 (1976). バイの種苗生産に関する研究 - II. 水産増殖, **24**, 89-92.

堀口敏宏 (2000). 野生生物の内分泌攪乱現象の現状と原因物質/貝類. 「水産環境における内分泌攪乱物質」(川合真一郎・小山次朗編), 恒星社厚生閣, 東京, 54-72.
金子 輝 (2006). バイ資源の増殖管理に向けた展望. 水海研だより, **No. 14**, 1-3.
梶川 晃 (1976). バイ *Babylonia japonica* REEVE の生活史及びその増養殖に関する研究. 鳥取水試報告, **No. 18**, 1-83.
梶川 晃 (1999). 美保湾におけるバイ (*Babylonia japonica* REEVE) の分散・移動と成長及び底質環境について. 鳥取水試報告, **No. 36**, 1-6.
公益社団法人地盤工学会 (2015). 地盤材料の工学的分類方法 JGS0051. 地盤工学会基準(改正案), WG1: 127-135. http://www.jiban.or.jp/organ/bu/kijyunbu/kouji/200807/JGS_0051_080411.pdf (2015年6月16日アクセス)
丸茂恵右 (2003). 有機スズ類の生物影響に関する文献調査 特に規制前後から近年における野外濃度レベルおよび暴露実験を中心として. 海生研研報, **No. 5**, 35-83.
道根 淳・清川智之 (2006). 島根県沿岸域におけるバイの漁獲動向と生態. 島水試研報, **No. 13**, 11-20.
中津川俊雄 (1989). バイの加温飼育について (短報). 京都海洋セ研報, **No. 12**, 67-69.
西田健志 (2008). イワガキ等増養殖技術開発事業 b. バイ種苗生産・放流試験. 新潟県水産海洋研究所年報, 平成18年度, 84-85.
西広富夫・生田哲郎・山崎 淳 (1985). バイの生態およびその増殖に関する研究 - II 天然稚貝の生息水域と放流稚貝の成長. 京都海洋セ研報, **No. 9**, 31-39.
西広富夫・中津川俊雄・生田哲郎 (1988). バイの生態およびその増殖に関する研究 - V 浅海域における放流バイ稚貝の成長と生残. 京都海洋セ研報, **No. 11**, 25-32.
太田武行 (2011). 美保湾におけるバイの産卵促進試験 (鳥取県バイ資源回復計画の取り組み). 豊かな海, **No. 25**, 2-4.
庄司康雄・大畑 聡・三田久徳・藤元香世・田辺伸・清水利厚・石田 修 (2003). バイの産卵とインボセックスについて. 千葉水研研報, **No. 2**, 7-13.
上野陽一郎・西広富夫・中津川俊雄 (1991). 蒲

中村：バイ稚貝の成長に及ぼす水温および底砂の影響

入漁場と神崎漁場の放流バイの成長差について．京都海洋セ研報，**No. 14**, 20-25.