

第3章 環境耐性

これまで第1章では、宍道湖の環境特性を、そして、第2章ではその環境がヤマトシジミの生息に大きな影響を与えることを見てきた。汽水湖の特性は環境の変化が激しいこと、時として高水温、高塩分、DOの不足、硫化水素の発生などにその生息範囲が限定されていること、しかし、ヤマトシジミが厳しい環境の汽水湖宍道湖で水深4m以浅の湖棚部で圧倒的優占種となっていることが明確にされた。このことから、ヤマトシジミは、これらの環境要因に対して強い耐性を有していると推察される。したがって、ヤマトシジミ自身が保有する環境に対する耐性の強さを調べることで、汽水湖においてヤマトシジミが圧倒的な優占種となっている主要な理由を明らかにすることになり、また、湖の中での生息分布や時として起こる大量へい死原因を明らかにすることにもなると思われる。

これまでヤマトシジミの環境耐性に関する研究は、他の湖において塩分耐性に関して若干行われているにすぎず、宍道湖産ヤマトシジミについては全く報告されていない。

本章では宍道湖産ヤマトシジミの主要な環境要因であり、変化が大きく、この種の生存に大きな影響のある塩分、水温、酸素、硫化水素の種々の濃度における室内飼育実験を行い、それぞれの水質環境に対する耐性の強さを調べた。ここでは、実験ごとに、50%の供試貝がへい死した時間を半数死亡時間(LT₅₀)、100%が死亡した時間を全数死亡時間(LT₁₀₀)として求め、これをもって耐性の強さを表す指標とした。水温は、特に湖底において生物の生息にとって強い規制要因になりやすい夏期を重視し、高水温(25~30℃)を中心に実験条件を設定した。さらに、ヤマトシジミの環境耐性の特性を明らかにするため同じ水系の汽水産二枚貝、アサリ、サルボウ、ホトトギスガイとの比較試験も行った。

この章の構成は次の通りである。

第1節 ヤマトシジミの塩分耐性

第2節 ヤマトシジミの水温耐性

第3節 ヤマトシジミの貧酸素耐性耐性

第4節 ヤマトシジミの硫化水素耐性

第5節 汽水産二枚貝4種の環境耐性

第1節 塩分耐性

ヤマトシジミは本邦の汽水湖や河口域に広く分布する有用二枚貝である。本種が生息する汽水域の重要な特徴の一つは、塩分変動が激しいことである(Remane, 1971; Gilles & Jeuniaux, 1979; 益子, 1981; 國井ら, 1993)。このような環境に生息するヤマトシジミは広い範囲の塩分濃度の変

化に耐え得ると推察される。

これまでヤマトシジミの塩分に対する耐性については、藻琴湖における至適塩素濃度（朝比奈，1941），木曾三川可口域における至適塩分濃度（田中，1984a），印旛沼や利根川での淡水移植に伴う低塩分耐性（石田ら，1971，1972；高橋・川崎，1973a,b），利根川下流域の高塩分耐性（佐藤・内田，1978a,b）などの報告がある。しかしながら，これらの報告は塩分耐性と生息水温との関係については考慮されておらず，単一水温条件で調べられたものである。また，対象塩分域も多くは淡水から 20psu までの塩分域に限られ，20psu から海水までの高塩分域についても同時に研究し，広範な塩分耐性について検討した例は少ない。加えて，稚貝の塩分耐性に関する研究は田中（1984b）を除くとほとんどみあたらない。

この節では，宍道湖産のヤマトシジミを用い，0psu（淡水）から 35psu（海水）まで段階的に塩分濃度を上昇させ，このときの環境塩分濃度と体液塩分濃度の関係について検討した。次いで，高温期（8 月）と低温期（2 月）に採集した試料について，塩分 0～32psu における塩分耐性を調べた。また，水温別の高塩分域での耐性試験を行った。さらに，成貝と稚貝の耐性についても検討を加えた。

材料および方法

供試材料 実験に供したヤマトシジミは，宍道湖の玉湯沖保護区において Smith;MacIntyre 型採泥器（0.05 m²）を用いて底質と共に採集した。20ℓのコンテナに採集地点の底質を約 50cm 敷き，湖水で満たした状態で所要時間約 1 時間をかけて貝を実験室まで持ち帰った。採集地点の底質直上の水温と塩分は YSI Model 3800 で測定した。実験に供するまで 2～3 日間，採集時の宍道湖と同じ水温および塩分の飼育水中で馴致し，底質中に潜入し，底質直上に出している水管をガラス棒で刺激すると素早く反応する貝を実験に供した。

飼育水の調整 淡水から 35psu までの段階的な塩分濃度の調整は，淡水水槽（容量 40ℓ）中に人工海水（日本たばこ社製）を添加することによりおこなった。その他の実験で供した飼育水は，濾過海水を水道水により，設定塩分濃度に希釈したものを使用した。水温は，各設定水温の恒温水槽に実験容器を収容することで調節した。

飼育水の水質測定 飼育水の水温は棒状温度計，塩分は YSI Model 3800 で測定した。

体液の塩分測定 メスを用いて開殻し，殻腔内部からの滴下液を体液とした。体液の塩分は海水濃度計（アタゴ社製，サリニティ / Mill）で測定した。

実験方法 すべての飼育実験は，水槽内に底質を何も敷かず，止水中，自然光下で，エアストーンにより十分通気して行った。ヤマトシジミは無給餌で 60 日間全くへい死しなかった（中村未発表）ことから，本実験の飼育期間中（14～30 日）では，絶食の影響は比較的少ないと判断し，餌条件は無給餌とした。

生死の判定は、水管と足を出して、ガラス棒で刺激を与えても反応しないもの、および開殻してしまっただけものを死貝として、毎日一定時刻に、生死を確認した。死亡個体は腐敗、分解による水質悪化を引き起こすので、その都度できるだけ早く実験容器の中から除去した。生死の判定と死亡個体の処理は、本章の他節の実験についても同様の方法で行った。

実験1 環境塩分濃度と体液塩分濃度との関係 1993年1月に採集したヤマトシジミ 21.41 ± 0.97 mm (平均殻長 \pm 標準偏差, 以下同様に示す) を用いた。まず、塩分 5 psu の水槽 (容量 40ℓ) に 100 個体を約 2 日間馴致した後、淡水水槽に移し 12 時間飼育した。その後、5psu ずつ段階的に塩分を上昇させ、5, 10, 15, 20, 25, 30 および 35psu (海水) でそれぞれ 7 日間飼育し、経時的に生存個体数を調べた。また、淡水飼育個体については 12 時間後の、その他の塩分濃度の飼育個体については 7 日目の生存個体 (10 個体) の体液塩分濃度を測定した。飼育水温は 15℃ に設定した。

実験2 高温期と低温期の塩分耐性 高温期として、宍道湖の底層水温が 25℃ 以上になる 1993 年 8 月に採集した成貝 22.31 ± 0.88 mm を、低温期として、底層水温が 10℃ 以下になる 1994 年 2 月の成貝 19.88 ± 1.00 mm をそれぞれ用いた。塩分 0 (淡水飼育), 1.5, 5, 10, 17, 22 (汽水飼育) および 32psu (海水飼育) の淡水から海水までの 7 試験区の実験水槽 (容量 8ℓ) にそれぞれ 20 個体ずつを直接収容し、30 日間経日的に死亡個体数の変化を調べ、 LT_{50} と LT_{100} を求めた。飼育水温は高温期については 25℃, 低温期は 10℃ に設定した。

実験3 成貝と稚貝の水温別高塩分耐性 高塩分耐性と個体サイズおよび水温の関係を明らかにするため、ヤマトシジミを殻長約 3mm 前後の稚貝と殻長約 15mm 以上の成貝に分けて、以下の実験を行った。1994 年 11 月に採集したヤマトシジミの成貝 20.63 ± 1.08 mm, および稚貝 3.28 ± 0.54 mm を用い、25.6, 28.8 および 32.0psu の高塩分域の 3 試験区について、それぞれ 10, 20 および 30℃ の水温別の実験水槽 (容量 8ℓ) に各 20 個体ずつを直接収容し、死亡個体数の変化を 20 日間経日的に調べ、 LT_{50} と LT_{100} を求めた。

結果

実験1 飼育水温 15℃, 塩分 0~35psu の範囲で飼育期間中 (各塩分濃度で 7 日間) に、へい死するヤマトシジミは全く観察されなかった。体液の塩分濃度は、飼育した環境水の塩分濃度の増加に伴い上昇した。また、体液塩分は、0psu 飼育では 5psu, それより高い塩分濃度の飼育では飼育塩分より 2~3psu 高い値を示した (Fig. 3-1-1)。

実験2 実験における供試貝の生残率の変化を Fig. 3-1-2 に、生残率の経日的変化から求めた LT_{50} と LT_{100} を Table 3-1-1 に示した。

1.5~22psu (汽水飼育) では飼育期間中 (30 日間)、高温および低温の両試験区ともへい死する貝はほとんど見られなかった。0psu (淡水飼育) では高温 (25℃), 低温 (10℃) とともに汽水飼育よりへい死個体が目立ち、30 日目では 25℃ で 9 個体、10℃ で 5 個体のへい死が認められた。32psu (海水

飼育)においては、25 で3日目以降にへい死する貝が見られ、 LT_{50} および LT_{100} はそれぞれ4日と7日であった(Table 3-1-1)。一方、10 では9日目よりへい死する貝が見られ(Fig. 3-1-2)、 LT_{50} は14日目、 LT_{100} は17日目であった。

実験3 成貝と稚貝の生残率の変化を Fig. 3-1-3 に、生残率の経日的変化から求めた LT_{50} と LT_{100} を Table 3-1-2 に示した。

成貝では、10 でへい死する貝は32psuの海水飼育を含め、わずかしは見られず、かなりの高塩分耐性を示すと思われた。20 では6日目以降、28.8psuより高塩分の試験区でへい死する貝が目立った。特に32psu飼育の LT_{50} は9日であった。30 では2日目以降すべての試験区で著しい生残率の低下を示し、塩分25.6psuでも LT_{50} は7日目であった。以上より、飼育水温の上昇に伴いへい死する貝が著しく多くなることが判明した。

他方、稚貝についても飼育水温の上昇に伴い、へい死する貝が目立った。まず、水温10では25.6psu飼育でへい死する貝は実験期間中(20日間)3個体で成貝とほとんど変わらなかった。しかし、28.8psu以上の高塩分域でへい死個体数に違いがみられた。特に、32psu飼育の LT_{50} は約8日で、成貝と比べると高塩分耐性が著しく弱いことがわかる。水温20では25.6psu飼育でほとんどへい死個体はないが、28.8psu以上の高塩分では、 LT_{50} が5日となり、成貝と比較すると塩分耐性が弱くなっている。水温30では4日以内に全数死亡した。このように稚貝の生存個体数はすべての試験区で成貝より少なく、塩分に対する抵抗性は成貝より弱かった。

考察

環境塩分濃度と体液塩分濃度の関係についてのこれまでの報告は、古くから主に海産の二枚貝について行われている(Robertson, 1964; Lockwood, 1976)。それによると多くの二枚貝は外界の塩分濃度変化に体液の塩分濃度を合わせて生きる浸透圧順応型動物であると報告している。本研究でもヤマトシジミの体液塩分は馴致したすべての環境水の塩分とほぼ等しく、しかも、0~35psuの広範な塩分濃度の変化に耐え得る広塩性浸透圧順応型種と判断された。

ヤマトシジミの塩分耐性に関して、朝比奈(1941)は北海道藻琴湖におけるヤマトシジミの分布を調べ、環境水温が約20のとき、淡水域から18psuまでの汽水域に分布していると報じている。また、田中(1984a)は、木曾川河口域における生息に適した最適塩分濃度は、環境水温27~29において、3.5~10.5psuであり、0.3psu以下および21psu以上の環境塩分は生息に不適と述べている。石田・石井(1971)は利根川産のヤマトシジミを用い、各塩分における開殻率などを調べ、飼育水温15~23では22psu以上の高塩分域より淡水の方に適応性があり、塩分24.2psu以上の塩分環境が永續する水域ではヤマトシジミは生息しないと報告している。低塩分域の耐性について、佐藤・内田(1978a,b)や江川(1981)によると、ヤマトシジミは低塩分耐性が極めて強く、淡水でも死亡個体はほとんどみられず、淡水移植の可能性を指摘している。これらの報告を総合すると、水温15~

28 では0~20psu 付近までの低塩分域で長期間生存可能であり,24psu 以上の高塩分域では14 日間以上の長期の生存は不可能であるとしている。本研究でも同様に,高温期や低温期に関係なく長期間生存可能な塩分濃度範囲は1.5~22psu であった。しかし,淡水中では,高温飼育のヤマトシジミは低温飼育のものに比べへい死個体数が多く,さらに海水中でも高温飼育の貝が短期間にへい死した。0psu の淡水や22psu 以上の高塩分域では飼育水温が上がるほど塩分耐性は弱くなることが示唆された。

ヤマトシジミ以外の広塩性の動物を用い,温度と生息塩分濃度の関係を研究したものに,ムシロガイ科の巻貝 *Nassarius obsoletus* (Kasschau,1975)と *Nassarius reticulatus* (Veveberg & Silverthorn,1979)を試料とした報告がある。これらによると飼育水温が25 のときの生息塩分範囲は20~30 psu であるが,飼育水温を5 に下げると生息塩分範囲が10~40psu まで広がることを指摘している。本研究においても,飼育水温の低下により生残個体数が増えることから,ヤマトシジミの塩分耐性は生息環境水温に影響されることが判明した。

稚貝の高塩分耐性について報告した例は見当たらないが,田中(1984b)はヤマトシジミ稚子期の低塩分耐性について考察している。これによると後期発生期,初期稚貝期,後期稚貝期と発生段階がすすむにつれて,より淡水域で生息可能になると述べている。また,Lockwood (1976)は一般的な広塩性の無脊椎動物は成長段階初期の方が生息限界の塩分範囲が狭く,塩分変動に対して耐性が小さいと報じている。本研究の高塩分域においても成長段階における耐性は異なり,稚貝は成貝に比べ,塩分耐性が弱いものと判断された。

ヤマトシジミの主生息地である宍道湖は塩分変動が激しく(島根県,1980-1995),生息するマクロベントスはわずか14 種で,その中でヤマトシジミの生物量(貝殻部を除いた湿重量)は全体の97%と圧倒的に優占している(Nakamura *et al.*,1988)。したがって,本種の塩分耐性の研究は,汽水の生物と汽水環境との関係を知るために,またこの種の漁業資源の維持・向上を計るための基礎知見としても重要である。これまで干拓事業などで淡水化した八郎潟や霞ヶ浦などはいずれも資源量の激減をみている(中村,1993)。

今後は,ヤマトシジミの資源管理を考える上で,発生に必要な低塩分限界の3.1psu(朝比奈,1941)とともに,本種の塩分耐性,特に初期生活史(産卵,受精時期)の段階での最適塩分濃度と水温との関係についてさらに詳細な検討が必要であろう。

第2節 水温耐性

本種が生息する汽水域は,一般に水深が浅く,干潟が形成しやすいなどの特徴があり(益子,1981; 國井ら,1993; 中村ら,1993),しばしば急激な水温変化に曝される。このような環境に生息するヤマトシジミは広い範囲の水温に耐性を示すものと推察される。

これまでヤマトシジミの生理に及ぼす水温の影響については,発生(朝比奈,1941),発生後期

の成長(田中, 1984b), 濾過速度とアンモニア排出速度(Nakamura *et al.*, 1988), 酸素消費量(位田・浜田, 1978)などの報告がある。しかし, 水温耐性に関する報告はなく, ヤマトシジミと同属の *Corbicula fluminea* の研究例(Mattice & Dye, 1976; McMahon, 1979, 1983; McMahon & Williams, 1986)があるにすぎない。また, ヤマトシジミの致死水温に関しては全く知られていない。

本節では, 宍道湖産のヤマトシジミを用い, 0 から 40 まで段階的に水温を昇降させ, 24 時間後の生残個体数を観察し, 生残におよぼす水温の影響について検討した。次いで, 水温の異なる 6 試験区について長期間(30 日間)の高水温耐性試験を行った。馴致水温の違いによる水温耐性についても検討を加えた。

材料および方法

供試材料 実験に供したヤマトシジミの採集地点, 採集方法, 実験室への運搬方法は, 本章第 1 節と同様である。採集地点の底質直上の水温と塩分は YSI Model 3800 で測定した。実験に供する前に, 冬期に採集したヤマトシジミについては室温 18 , 夏期の採集では室温 25 の実験室内で 5 日間, エアストーンで十分通気しながら水温馴致を行った。供試員の選別は, 本章第 1 節と同様の方法で行った。

飼育水の調整 実験に用いた試水は, ミリポアの孔径 20 μm のフィルターで濾過した海水と残留塩素を曝気により取り除いた水道水を混合し, 塩分濃度は採集地点の底層水の濃度約 5psu に調整した。水温の調整には, 電子サーモスタットに 150W のヒーターおよび冷却装置を用いた。

飼育水の水質測定 実験期間中, 設定した水温および塩分濃度を確認するために, 水温は棒状温度計, 塩分はセントラル科学 DIGITAL SALT UC-77 を用いて毎日定時に測定した。

実験方法 飼育実験は, 水槽内に底質を何も敷かず, 無給餌条件下で, エアストーンにより十分通気しながら行った。

実験 1 短期間(24 時間以内)の水温耐性 飼育実験には, 1994 年 12 月に採集したヤマトシジミの成貝, 殻

長 $23.26 \pm 1.03\text{mm}$, および稚貝, 殻長 $3.49 \pm 0.49\text{mm}$ を用いた。採集時の宍道湖の底質直上水の水温は 11.5 , 塩分濃度は 8.6psu であった。まず, 水温上昇試験では, 採集し 5 日間水温馴致した後選別したヤマトシジミを, 水温 18 の実験水槽(容量 35 ℓ)に稚貝 20 個体, 成貝 50 個体を入れ, 1 日間馴致させた。その後, 飼育水温が 40 に達するまで毎日 9 時にサーモスタットを調節し, 水温を 2 ずつ上昇させた。水温を 2 上昇するのに約 10 分間要した。水温 40 では 48 時間後の生残数も確認した。水温降下試験に関しては, 水温 13 の水槽で上記と同様に 1 日間馴致後, 飼育水温が 0 になるまで冷却装置を用いて毎日 9 時に 5~10 分間で水温を 2 ずつ下降させた。さらに, 水温 0 では 3 日間飼育し, 死亡個体数を調べた。低温では運動性に乏しく, 特に水温 0 での生死の判定は困難であったので, 3 日間 0 で飼育した後, 水温を室温(13)までヒーターを用いてできる

だけ緩やかに戻し、生死の判定を行った。

実験2 長期間(10日以上)の高水温耐性 飼育実験には、1995年8月に採集したヤマトシジミ(21.63 ± 1.56mm)を用いた。採集時の底質直上水の水温は28.4℃、塩分濃度は8.9psuであった。採集したヤマトシジミを予備飼育水槽から選別し、飼育水温30℃の水槽(56ℓ)に1日間馴致し、選別した供試貝を、28、30、32、34、36および38℃の6試験区の実験水槽(7ℓ)にそれぞれ20個体ずつ、水温馴致することなく収容し、30日間、経日的に死亡個体数を調べ、LT₅₀とLT₁₀₀を求めた。

実験3 馴致水温の違いによる水温耐性 飼育実験には、1995年1月に採集したヤマトシジミ(21.14 ± 1.55mm)を用いた。採集時の底質直上水の水温は5.8℃、塩分濃度は2.2psuであった。馴致水温および昇温幅の違いによる水温耐性について調べるために、まず、飼育水槽からヤマトシジミを取り出し、10、20および25℃の水槽(35ℓ)に移し、1日間馴致させた。各温度で馴致させた後、30℃の実験水槽(35ℓ)にそれぞれ50個体ずつを移し、20日間、経日的に死亡個体数を調べ、LT₅₀とLT₁₀₀を求めた。

結果

実験1 18℃から40℃までの昇温試験では成貝と稚貝の間に差は認められなかった。18℃から35℃の範囲で24時間以内はほぼ生残率が100%であった。しかし、36℃に達すると生残率は91%、38℃で87%、40℃では72%と急激に低下し、40℃48時間後では生残個体は確認されなかった(Fig.3-2-1)。また、飼育水温が13℃から0℃までの降温試験ではへい死個体は認められず、すべて生存していた(Fig.3-2-2)。成貝と稚貝の生残率の変化は試験したすべての温度帯でほとんど差は認められず、成貝と稚貝の水温耐性は変わらないと考えられる。

このように段階的に水温を昇降させた場合、24時間以内の短期間、100%生存可能な生息限界温度は0℃から35℃であり、50%生存可能な生息限界温度は広がり0℃から40℃の範囲であると思われた。

実験2 実験における供試貝の生残率の変化をFig. 3-2-3に、生残率の経日的変化から求めたLT₅₀とLT₁₀₀をTable 3-2-1に示した。

飼育水温28~32℃でへい死するヤマトシジミ(成貝)は30日間にわたりまったくみられなかった。34℃では15日目にへい死個体がわずかに見られ、30日目には80%以上の生残率であった。36℃では7日目からへい死個体が徐々に認められ、LT₅₀は12日目、LT₁₀₀は16日であった。また、38℃では早期にへい死個体が観察され、LT₅₀およびLT₁₀₀はそれぞれ2日と4日であった。これらより30日間の長期の高水温耐性において、100%生存可能な上限水温は32℃であると推測した。

実験3 実験における供試貝の生残率の変化をFig. 3-2-4に、生残率の経日的変化から求めたLT₅₀とLT₁₀₀をTable 3-2-2に示した。

10℃で馴致させたヤマトシジミ(成貝)を30℃の水槽に移した場合、2日目よりへい死個体が観

察され、以後直線的に生残率が低下した。20 に馴致させた貝についても同様の傾向を示し、LT₅₀ は8日目であった。一方、昇温変化が5 と変動幅が小さい25 に馴致させた試料は、10日目で生残率はほぼ96%であった。

考察

本研究のヤマトシジミでは0 の水温中で3日間以上生存可能であった。これまで、生残に及ぼす低水温耐性試験についての研究は、淡水産の *C.fluminea* (Mattice & Dye, 1976; McMahon, 1979, 1983; McMahon & Williams, 1986) を用いた報告があるのみである。これによると水温15 で馴致した *C.fluminea* では水温2 で200時間の生存は不可能であると報じている。

短期間(24時間以内)のヤマトシジミの高水温耐性は本実験では38 以上の高水温にも耐えられることが判った。同じような試験はアサリ(池末・松本, 1956; 木下, 1985), ハマグリ(道津・木下, 1985), アコヤガイ(渡辺, 1988)でも行われており、それぞれのLT₅₀ はアサリが36.4 (実験前の水温20.1, 以下同様に示す), ハマグリが41.4 (19.6), アコヤガイが35.3 (20.1) であった。また、渡辺(1988)は温度範囲25~46, 24時間での、アコヤガイの稚貝・幼貝・成貝の各発育段階の高水温耐性には、顕著な差はなかったと報じている。ヤマトシジミにおいても稚貝と成貝の比較では差は認められず、アコヤガイと同様発育段階によって水温耐性は変わらないものと考えられた。

一方、長期間の高水温耐性に関しても *C.fluminea* を用いた研究(Mattice & Dye, 1976; McMahon, 1979, 1983; McMahon & Williams, 1986)がある。それらによると、水温30 で馴致した *C.fluminea* では、水温34 で2週間以上の生存が可能であると報告している。また、ホッキガイに関する同様の研究(田中, 1980)では、水温20 で馴致したホッキガイは水温30 で1週間、29 では3週間以内にすべて死んでいる。さらに、ムラサキイガイにおいては21 から29 の日周変化のもとでは生存可能であるが、29 の定温では長期の生存は不可能としている(Widdows, 1976)。宍道湖産ヤマトシジミは32 においても30日間の実験でほとんどへい死する個体がなく、高水温中でも長期間生存できると推測された。

渡辺(1988)はアコヤガイを用いて、昇温幅と生残の関係を調べ、昇温幅が大きいほど生残率が低下すると述べている。また、Mattice & Dye(1976)やMcMahon(1979)は *C.fluminea* を試料とし、馴致温度と致死上限・下限温度の関係について研究し、高温環境に馴致させると致死上限温度が上昇し、低温環境に慣らすと致死下限温度が低くなると報じている。本研究においても馴致温度が低く、昇温幅が大きいほど生残率が低下することが判った。

以上より、高水温域への急激な水温変化はヤマトシジミの生残に重大な影響をおよぼすことが判明した。さらに、高水温環境に馴致させると生息限界温度が上昇する可能性が示唆された。宍道湖の水温変動(島根県, 1980-1995)は年間を通じ4 から30 の範囲にあり、ヤマトシジミの生存に

適した環境にある。したがって、宍道湖では水温によりヤマトシジミがへい死することはほとんどないと思われる。しかし、水温は DO や塩分の環境要因と複合的に作用すると考えられるので、これら水温以外の要因の耐性を検討する際には、水温条件を考慮する必要がある。

第3節 貧酸素耐性

我が国のほとんどの汽水湖は、現在富栄養化が進行しており、夏期に水温の上昇に伴い成層が形成される。湖水が停滞する底層では、バクテリアによる堆積有機物の分解による酸素の消費量が、補給量を上回るため、貧酸素水塊が形成される（國井ら、1993）。アサリやハマグリ等の漁場における貧酸素水塊の被害についての調査は、知見が多く蓄積されている（柿野、1982；荻田、1985；菅原ら、1967a, 1967b, 1968；菅原・佐藤 1967）。こうした漁場における貧酸素水塊の影響、特に生息密度や生残過程を検討するためには、その種の持つ低酸素濃度に対する生理的耐性を明らかにすることが必要である。しかし、ヤマトシジミの貧酸素に対する生理的耐性についての報告はわずかに位田・浜田（1978）があるにすぎない。

この節では宍道湖産ヤマトシジミの生残に及ぼす貧酸素の影響について室内実験を行い、この種の貧酸素耐性を検討した。

材料および方法

供試材料 実験に供したヤマトシジミの供試員の選別までは、本章第1節と同じである。

飼育水の調整 実験に用いた試水の塩分濃度の調整は、本章第2節と同様の方法で行った。無酸素区は、飼育水に N₂ ガスを溶存酸素（DO）が DO メーターで検出されなくなる（0.05 mg/l 以下）まで充分吹き込んで作った。DO 濃度の調整は、玉井（1993）の混合ガスボンベ法で行った。それぞれ N₂ ガスに対して O₂ ガスの割合を 1.4%、2.7%、4.1%、5.4%、8.1% の比率で混合したガスボンベを用いて、それぞれ DO 濃度を 0.5mg/l、1.0mg/l、1.5mg/l、2.0mg/l、3.0mg/l に調整した。対照区の DO 濃度の調整はエアポンプによる空気の吹き込みによって行い、常時、飽和状態を維持した。水温は、各設定水温の恒温水槽に実験容器を収容して調節した。

飼育水の水質測定 飼育水の水質として水温、DO 濃度、pH 濃度、塩分、アンモニア態窒素を測定した。水温は棒状温度計、DO 濃度は YSI DO メーター Model 57、pH は堀場コンパクト pH メーター ツイン B-112、塩分はセントラル科学 DIGITAL SALT UC-77、アンモニア態窒素は BRAN+LUEBBE オートアナライザー 型をそれぞれ使用して行った。水温、塩分、DO 濃度、pH は毎日、アンモニア態窒素は実験開始時と終了時に測定した。

実験方法 実験は、DO 濃度を調整した試水（塩分濃度 5psu、DO 濃度は各設定濃度）を 0.9 l の実験容器に入れ、それぞれの実験容器にヤマトシジミを 20 個体ずつ収容し、底質を敷かず、無給餌条件

下で行った。

貧酸素耐性を比較するために、実験から得られた死亡個体数の変化から LT_{50} および LT_{100} を求めた。

実験1 成貝と稚貝の水温別無酸素耐性 無酸素耐性と個体サイズおよび水温との関係を明らかにするために、稚貝・成貝ともに異なる温度条件のもと、無酸素に対する耐性を調べた。実験は、1994年11月に採集したヤマトシジミの成貝 $16.4 \pm 1.50\text{mm}$ および稚貝 $3.1 \pm 0.31\text{mm}$ を用いて、1994年12月3日～20日(17日間)に行った。無酸素状態の試験区とDO濃度を飽和にした対照区を設け、水温10、20、30の温度条件を設定した。

実験2 DO濃度の減少と貧酸素耐性 ヤマトシジミの呼吸によるDO濃度の減少と、DO濃度の減少に伴うヤマトシジミの貧酸素耐性について水温別に明らかにするため、密封した実験容器にヤマトシジミを封入し、DO濃度の減少とヤマトシジミの死亡個体数を調べた。実験は、1995年7月に採集したヤマトシジミ ($19.7 \pm 1.94\text{mm}$) を用いて、1995年7月14日～9月15日(60日間)に行った。水温20、30の2つの温度条件を設定した。それぞれの温度条件で、DO濃度を飽和に調整した試水を入れた0.9ℓの実験容器の中に20個のヤマトシジミを収容し、その容器中のDO濃度の減少をDOメーターにより連続的に測定すると共に、ヤマトシジミの死亡個体数の変化を調べた。また、それぞれの温度条件において、DO濃度を継続的なエアレーションにより飽和状態に維持した対照区を設定した。

実験3 貧酸素濃度別の耐性 高水温時(28)における最小必要酸素量を明らかにするため、低酸素濃度における耐性を調べた。飼育実験は、1996年4月に採集したヤマトシジミ($20.7 \pm 1.37\text{mm}$)を用いて、1996年4月23日～5月23日(30日間)に行い、へい死個体数の変化を調べた。試験区は、水温28で、無酸素(0.05mg/ℓ以下)から0.5、1.0、1.5、2.0、3.0mg/ℓ、そして対照区としてDO飽和の計7段階のDO濃度の試験区を設定した。

結果

実験中の水質測定結果をTable 3-3-1に示した。pHは、実験区と対照区でほとんど差が無く、おおむねpH8～9の間にあった。DO濃度については無酸素試験区は検出限界の0.05mg/ℓ以下に、そして対照区は飽和度95%以上に保たれていた。各試験区のDO濃度は、設定濃度の1割程度の誤差に収まっていた。アンモニア態窒素は、ほとんどの実験区で実験開始時に0.1～0.5mg/ℓであり、実験終了時に0.03～2.18 mg/ℓであった。実験3のDO1.5mg/ℓ設定区で、アンモニア態窒素は2.18mg/ℓと実験区では最高の値であったがそのときヤマトシジミは1個体もへい死していなかった。

実験1 対照区のへい死は10、20、30のいずれの水温でも観察されなかった。水温10、20では、17日間の実験中で、ヤマトシジミは、成貝が水温条件20で、13日目に1個体へい死したのみで、稚貝のへい死は認められなかった(Fig. 3-3-1)。それに対して、30の飼育実験では、へ

い死が認められなかったのは、稚貝においては3日目まで、成貝では4日目までであり、 LT_{50} と LT_{100} は稚貝でそれぞれ5日目と15日目、成貝ではそれぞれ8日目と10日目であった(Table 3-3-2)。無酸素耐性は成貝と稚貝で大きな差は認められず、高水温時より低水温時で高かった。

実験2 ヤマトシジミを入れた実験区のDO濃度は実験開始直後に急激に減少した。水温20℃ではDO濃度が約1.0mg/ℓ以下で減少傾向は緩やかになった(Fig. 3-3-2a)。DO濃度の減少の速さは30℃の方が20℃に比べ速く、20℃ではDO濃度が1.12mg/ℓになった後、5.8日間も酸素消費量が全くなかった。無酸素(DO濃度:0.05mg/ℓ以下)になったのは20℃では13日目、30℃では2日目であった。DO濃度が徐々に減少していく過程ではへい死する個体は観察されず、無酸素状態の後、へい死する個体が認められた(Fig. 3-3-2b)。初めて死貝が認められたのは20℃で52日後、30℃で5日後であった。 LT_{50} と LT_{100} は、20℃ではそれぞれ53日目と54日目、そして30℃ではそれぞれ8日目と10日目であった。いずれの水温でも対照区では、実験期間中にへい死個体は観察されなかった。

実験3 水温28℃で、30日間の飼育実験中、DO濃度1.5mg/ℓ、2mg/ℓ、3mg/ℓ、飽和(対照区)の各試験区ではへい死したヤマトシジミは一個体もなかった。無酸素では LT_{50} は11日目、 LT_{100} は13日目、0.5mg/ℓでは LT_{50} は14日目、 LT_{100} は17日目、1.0mg/ℓでは LT_{50} は16日目、 LT_{100} は20日目であった(Fig. 3-3-3, Table 3-3-3)。DO濃度が1.5mg/ℓ以上あれば、ヤマトシジミの生存にはほとんど影響がなかった。

考察

温度の違いによって貧酸素耐性の強さが異なり、高水温時に耐性が弱くなることが明らかにされた(Fig. 3-3-1)。この傾向は、成貝・稚貝間で大きな差異はなく、高水温時に貧酸素耐性が弱くなる要因として、ヤマトシジミの酸素消費量が大きくなって酸素要求量が増大するためと思われる。本章第1節で述べたように、ヤマトシジミの塩分耐性においても、水温による耐性の違いは非常に大きく、高水温時の耐性が弱くなるのが認められている(中村ら, 1996)。宍道湖においては、湖底水温が25℃以上になるのは、夏期の約3カ月間のみである。したがって、これ以外の季節では、ヤマトシジミの貧酸素耐性の強さからみて、環境水の酸素不足によってへい死することはほとんどないものと思われる。

魚類の窒息時のDO濃度は、*Salmo falio* (Gardner & King, 1922)では、DO濃度2.4mg/ℓ(25℃)、*Carassius auratus* (Toryu, 1927)では0.42mg/ℓ(22℃)、*Pagrosomus major* (梶山, 1933)では0.93mg/ℓ(26℃)という。ヤマトシジミは20℃では無酸素になってから40日間も生存していた(Fig. 3-3-2)ことから、魚類に比べると非常に高い貧酸素耐性を有することが分かる。Hochachka (1984)は、二枚貝が非常に高い貧酸素耐性を有しており、それは、二枚貝が優れた嫌気代謝機構を持っているためであると説明している。同じ二枚貝の中でも汽水に生息し、貧酸素に強く汚濁指標生物と

されているシズクガイ *Theora fragilis* の貧酸素耐性は、無酸素の場合、水温 15.4 で 3 日間、水温 25.1 で 2 日間で全個体（それぞれ 10 個体）がへい死している（玉井，1993）。これに対し、ヤマトシジミ（成貝）は、無酸素、水温 30 の条件でも、全個体（20 個体）がへい死したのは 10 日目、そして、半数（10 個体）がへい死したのは 8 日目であり、水温 20 では、実験期間（17 日間）中に 1 個体へい死しただけであった（Table 3-3-2, Fig. 3-3-1）。また、ヤマトシジミと同水系の中海・宍道湖に生息する、アサリ、サルボウ、ホトトギスガイよりも（後述）、そして、同じシジミ属のセタシジミ、マシジミよりも貧酸素耐性が高いという結果が室内飼育実験より得られている（中村未発表）。これらのことから貧酸素耐性が強いと言われている二枚貝の中でも、ヤマトシジミは特に耐性の強い種であると思われる。

実験 3 の結果（Fig. 3-3-3）から、ヤマトシジミが生存するための DO 濃度の最小レベルは、水温 28 で 10 日間以内であれば 0.5~1.0mg/ℓと思われるが、30 日以上であると 1.0~1.5mg/ℓの間にあると推定された。この様に今回の室内実験よりヤマトシジミが高い貧酸素耐性を有していることが明らかになり、これが酸素の欠乏しやすい富栄養汽水湖の湖底環境において、この種が圧倒的な優占種となっている大きな要因の 1 つであると思われる。したがって、夏期に湖底の貧酸素水塊の発生に対するヤマトシジミの漁場の維持、回復には、1.5mg/ℓ以上の DO 濃度になることを目標にした対策が必要である。高い DO 濃度を保つ対策を施行するのは困難でも、1.5mg/ℓ程度の水質改善等を考えることは可能と思われる。

宍道湖においてヤマトシジミは、DO 濃度で 0.6mg/ℓ以上の場所に分布しており、その中でも、1 m²当たり 1000 個体以上生息しているのは、DO 濃度で 4mg/ℓ以上の場所である（中村ら，1984）。さらに、ヤマトシジミの生息制限要因として底質の粒度組成などと共に DO 濃度が重要である（Yamamuro *et al.*，1990）ということからヤマトシジミの生息、分布に DO 濃度が重要な環境要因であることが明らかである。

宍道湖においては汚濁負荷量の増大などで、富栄養化が進み、夏期の湖底では貧酸素化が生じて、その貧酸素水塊が拡大している（國井ら，1993）。したがって、シジミ資源の維持、増大には貧酸素水塊の対策が非常に重要である。

第 4 節 硫化水素耐性

富栄養化した汽水湖では夏期の高水温時、湖底に堆積した有機物の分解による底層水の貧酸素化が起こり（Santos，1980）、それに伴って生物に対して毒性の強い硫化水素の発生がみられる（Jørgensen，1980；Stachowitsch，1984）。底土に埋在して生息するヤマトシジミは底層水の塩分、貧酸素と共に硫化水素の影響を強く受けることになる。硫化水素耐性については、汽水湖、内湾のマクロベントスについての報告はあるが（柿野，1982；Shumway *et al.*，1983；荻田，1985；Bagarinao & Vetter，1989；Bestwick *et al.*，1989；玉井，1994；；Vismann，1990；Oeschger & Vetter，1992 姜ら，1995a，

b) , 本種の硫化水素耐性に関する報告は見られない。

本節では、宍道湖産のヤマトシジミを用いて、室内飼育実験を行い、本種の硫化水素耐性を明らかにした。

材料および方法

供試材料 実験に供したヤマトシジミの選別過程までの操作は本章第 1 節に述べた通りである。

飼育水の調整 実験に用いた試水の塩分濃度および水温の調整は、第 3 章第 2 節と同様の方法で行った。

硫化水素濃度は、直径 8.0cm、高さ 16.5cm の密封可能なアクリル製の円形管の実験容器に、塩分濃度を調整した飼育水を 0.7 ℓ 入れ、N₂ ガスを吹き込んで無酸素状態にした後、無酸素濾過海水に硫化ナトリウム 9 水合物 (Na₂S · 9H₂O) を溶かした硫化水素原液 (1,000mg/ℓ) を、硫化水素の設定目標濃度となるように、それぞれの実験容器に添加した。

飼育水の水質測定 飼育水の水質測定は以下の方法で行った。水温は棒状温度計、塩分はセントラル科学 DIGITAL SALT UC-77、DO 濃度は YSI DO メーター Model 57、pH は堀場コンパクト pH メーター ツイン B-112、アンモニア態窒素は BRAN+LUEBBE オートアナライザー 型をそれぞれ用いて測定した。また、硫化水素の測定は試水を 5mℓ ガス発生管に採取し、18N 硫酸を 2ml 添加し、発生した硫化水素をガステック ヘドロテック-S 検知管 No.201L および No.201H を用いて測定した。水温、塩分、DO 濃度、pH は毎日、アンモニア態窒素は実験開始時と実験終了時に測定した。硫化水素は、玉井 (1994) および柿野 (1982) によれば、実験中の時間経過とともに減少が著しいと報告されているので、1 日 2 回測定し、硫化水素濃度を一定に保つため、硫化水素原液 (1,000mg/ℓ) を添加し、設定濃度に再調整した。

実験方法 飼育実験は、底質を何も敷かず、自然光下、無給餌条件下で行った。飼育水を調整した各実験容器に、選別したヤマトシジミを 20 個体ずつ入れ、死亡個体数の変化を調べた。貧酸素耐性を比較するために、実験から得られた死亡個体数の変化から LT₅₀ および LT₁₀₀ を求めた。

実験 1 成貝と稚貝の水温別硫化水素耐性 硫化水素耐性と個体サイズおよび水温との関係を明らかにするために、異なる温度条件のもとで硫化水素に対する耐性を調べた。飼育実験は、1994 年 12 月に採集したヤマトシジミの成貝 (16.3 ± 1.30mm) および稚貝 (3.10 ± 0.40mm) を用いて、1994 年 12 月 5 日 ~ 19 日 (14 日間) に行った。試験区は水温 18、28 の 2 つの温度条件でそれぞれ硫化水素濃度が、5mg/ℓ、10mg/ℓ、および濃度 0mg/ℓ の対照区の計 3 つの濃度段階の試験区を設定した。

実験 2 異なる水温での硫化水素耐性 ヤマトシジミの水温の高低による硫化水素耐性の違いを明らかにするために、水温 18 と 28 の条件において硫化水素の濃度別に 40 日間の飼育実験を行った。飼育実験は、1995 年 11 月に採集したヤマトシジミ (21.1 ± 1.53mm) を用いて、水温 28 は 1995 年 11 月 22 日 ~ 12 月 6 日 (40 日間) に、水温 18 は 11 月 28 日 ~ 1996 年 1 月 6 日 (40 日間) に行っ

た。試験区は水温 18 と 28 のそれぞれにおいて、硫化水素濃度 0 (対照区), 3, 5, 7, 10, 20, 30, 50mg/ℓ の 8 段階の濃度を設定した。

実験 3 硫化水素の致死濃度 ヤマトシジミの生存に影響を与える硫化水素の最小濃度を明らかにするため、硫化水素の低濃度を中心に、硫化水素耐性試験を行った。飼育実験は、1995 年 12 月に採集したヤマトシジミ (20.7 ± 1.19mm) を用いて、1995 年 12 月 20 日 ~ 1996 年 1 月 29 日 (40 日間) に行った。水温 28 において、硫化水素濃度 0, 0.5, 1.0, 3.0mg/ℓ の 4 段階濃度の試験区を設定した。

結果

硫化水素耐性実験中の水温、塩分は設定した 18 と 28 のいずれの実験区でもほぼ 5psu に保たれていた。実験 2 における、硫化水素、pH、アンモニア態窒素の水質測定結果を Table 3-4-1 に示した。pH は硫化水素濃度が高くなるほど高くなる傾向が見られた。アンモニア態窒素は、ヤマトシジミがへい死すると急激に増加した。特に供試貝が全数へい死した 28 , 50mg/ℓ の実験区では、実験終了時のアンモニア態窒素が 3.41mg/ℓ になった。

実験 1 実験における供試貝の生残率の変化を Fig. 3-4-1 に、生残率の経日的変化から求めた LT₅₀ と LT₁₀₀ を Table 3-4-2 に示した。

水温 18 の耐性実験では、硫化水素濃度 10mg/ℓ で、14 日間に稚貝は全くへい死せず、成貝が 2 個体へい死したのみで、成貝、稚貝ともにこの間 LT₅₀ には達しなかった。しかし、28 では 10mg/ℓ で、稚貝と成貝の LT₅₀ はそれぞれ 8 日目と 7 日目であり、LT₁₀₀ は稚貝、成貝ともに 9 日目であった。本実験の結果では、稚貝と成貝の耐性に大きな違いはないが、温度の違いによる耐性の差は大きかった。

実験 2 実験におけるヤマトシジミの生残率の変化を Fig. 3-4-2 に、生残率の変化から求めた LT₅₀ と LT₁₀₀ を Table 3-4-3 に示した。

実験 1 より長期間 (40 日間)、しかも濃度の幅を広げて 50mg/ℓ まで 8 段階の濃度を設定した。水温 18 , 28 とともに硫化水素濃度が高い区ほど生存期間が短くなっている。また、実験 1 の 14 日間の実験では水温 18 , 硫化水素濃度 10mg/ℓ でへい死貝が見られず、LT₅₀、LT₁₀₀ に達しなかったが、実験 2 の 40 日間の実験では同じ 10mg/ℓ の LT₅₀ は 36 日目、LT₁₀₀ は 40 日目であった。18 では 3mg/ℓ 以下であれば、40 日間に生存に影響はなかった。40 日後の 5mg/ℓ で 1 個体、7mg/ℓ で 3 個体がへい死したのみである。10mg/ℓ では、LT₅₀ と LT₁₀₀ はそれぞれ 37 日目と 40 日目、20mg/ℓ で 24 日目と 29 日目、30mg/ℓ で 23 日目と 28 日目、そして 50mg/ℓ で 23 日目と 28 日目であった。28 では、18 の時に比べ、すべての設定濃度 (3, 5, 7, 10, 20, 30, 50mg/ℓ) で生存期間が短くなり、3mg/ℓ でさえ、LT₅₀ は 11 日目、LT₁₀₀ は 13 日目であった。10mg/ℓ 以上になると 10 日目までに全数のヤマトシジミがへい死した。これらの結果から、高温における硫化水素の影響が非常に大きいこ

とが伺える。

実験3 実験におけるヤマトシジミの生残率の変化を Fig. 3-4-3 に、生残率の経日的変化から求めた LT_{50} と LT_{100} を Table 3-4-3. に示した。0.5mg/ℓでは、実験期間の40日間で対照である無添加区(0mg/ℓ)と同様1個体のへい死もなかった。1.0mg/ℓでは8日目に最初のへい死が見られ、 LT_{50} は21日目、 LT_{100} は27日目であった。したがって、1ヶ月以上の長期間では、水温28℃において、ヤマトシジミの硫化水素に対する耐性の限界は、0.5～1.0mg/ℓの濃度の間にあると考えられる。

考察

硫化水素はヤマトシジミの生息にとって有毒である。生物に対する硫化水素の毒性は、好気呼吸において硫化水素が酸素分子の変わりにチトクロムCオキシダーゼのヘム部分に結合し、呼吸機能を抑制することによって発現するとされている(Evans, 1967; Smith *et al.*, 1977; Torrains & Clemens, 1982)。また、硫化水素の毒性に対する体内の適応として、二枚貝では好気呼吸から嫌気呼吸へ変換すると推察されている(Llanso, 1991)。生体内の生理現象(呼吸)は水温の影響を強く受け、そのため硫化水素の毒性の強度も水温により異なるものと考えられる。したがって、本研究では水温について考慮しながら、ヤマトシジミの硫化水素3, 5, 7, 10, 20, 30, 50mg/ℓの8段階濃度の毒性に対する耐性を室内実験により確かめた。その結果、硫化水素耐性は水温によって大きな影響を受けることが明らかになった。

これまで異なる水温における硫化水素耐性実験は、わずかに玉井(1994)がシズクガイについて15.1℃と24.2℃で行い、高温の方が硫化水素耐性が弱いことを報告している。ヤマトシジミの塩分耐性が同じように高温のとき弱くなることはすでに述べた。また、貧酸素耐性は硫化水素耐性と非常に良く似た水温の影響を受けることも分かった(中村ら, 1997a)。Bryant *et al.* (1984)は重金属(クロム, ニッケル, 亜鉛)の河口域底生無脊椎動物3種に与える毒性も水温が高くなると増加することを報告している。

水生生物に対する硫化水素の毒性は、種によって異なる。ヤマトシジミの硫化水素耐性の特性を知るため本実験結果とすでに報告されている、硫化水素の発生しやすい環境に生息し、比較的耐性の強いと思われる他のマクロベントスの硫化水素耐性とを比較した(Table 3-4-4)。これらの実験では、概ねDO濃度約0.5mg/ℓ、水温10～20℃の条件下で硫化水素濃度200μM(6.6mg/ℓ)前後における各種の LT_{50} を調べている。種により耐性に相違はあるものの LT_{50} はだいたい3日～24日の範囲内である。一方、ヤマトシジミは水温18℃、硫化水素濃度231μM(7mg/ℓ)では40日以上であった。また、330μM(10mg/ℓ)では LT_{50} が37日であった。硫化水素耐性はDO濃度、水温などの条件によって異なるので、その耐性を比較するときは、注意が肝要であるが、以上の結果から明らかにヤマトシジミはこれまで報告されたどの種より硫化水素に対する耐性が強い。この耐性の強さが、夏期に貧酸素化に伴って硫化水素が発生する富栄養化した汽水湖の湖底にヤマトシジミが優占

的に生存できる理由の一つと思われる。

次にヤマトシジミが優占種となっている宍道湖での硫化水素の発生とヤマトシジミの生息分布について若干の検討を行う。海や汽水湖では、堆積物中の硫酸還元細菌が水中の硫酸イオンを使って有機物を分解し、エネルギーを得る過程で硫化水素が発生する。水中の硫酸イオンはそのほとんどが海水由来のものである。この様に湖底の硫化水素は、有機物が豊富にあること、硫酸イオンがあること、高水温であること、そして貧酸素であることなどの条件がそろったときに発生する。これまで宍道湖の湖底水の硫化水素の詳細な報告は見当たらないが、底泥の硫化物については中村ら(1984)の報告がある。それによると 2.92mg/乾泥 g より多いところではヤマトシジミの生息は確認されていない。1 m²あたり 1,000 個体以上生息しているのは、0~0.09mg/乾泥 g のところである。また、このときの調査では底質硫化物は底質のシルト・粘土の含有量、強熱減量、および底質直上水の COD、DO 濃度、塩分との相関もかなり強いことが報告されている (Yamamuro *et al.*, 1990)。硫化物の少ないところは、水深 3m 以浅の砂礫質で底質中の有機物が少なく、底質直上水の DO 濃度の多い場所である。このような場所にヤマトシジミが多く分布し、良好なヤマトシジミ漁場が形成されている。宍道湖のヤマトシジミ資源の維持のためには、夏期、宍道湖の湖底に 0.5mg/ℓ以上の硫化水素が発生しないように努めることが重要と考えられる。

第 5 節 汽水産二枚貝 4 種の環境耐性

河川や海洋では環境要因が比較的均一であるのに対して、汽水湖では、空間的にも時間的にも著しく変化するのが大きな特徴である (川那部, 1991)。生息環境が変化することは、特に移動性に乏しいベントスにとっては強いストレスになり、その生存に大きな影響を与える (國井ら, 1993)。したがって、汽水環境に生息するベントスの分布や密度の減少を明らかにするためには、変化の大きい物理・化学的な環境要因に対するベントスの生理的耐性を知ることが大切である。

我が国の代表的汽水湖である宍道湖には、ヤマトシジミ、中海には、アサリ *Ruditapes philippinarum*、サルボウ *Anadara subcrenata* の他に、ホトトギスガイ *Musculista senhousia* の二枚貝が多数生息している (Yamamuro *et al.*, 1990; 園田ら, 1991; 沢村ら, 1991)。この 4 種の環境要因に対する生理的耐性については、これまで、ヤマトシジミの塩分 (石田・石井, 1971; 高橋・川崎, 1973a, b; 佐藤・内田, 1978 a, b; 田中, 1984a; 中村ら, 1996a)、水温 (中村ら, 1996b)、貧酸素 (中村ら, 1997a)、硫化水素 (中村ら, 1997b) およびアサリの水温 (池末・松本, 1956)、貧酸素 (荻田, 1985) に関する報告がある。一方、耐性試験の結果は実験条件によって大きく左右されるため、実験条件の異なる結果から種間の耐性を比較することは困難である。

本節では、上記 4 種について、環境要因のうち生存にとって重要な水温、塩分、DO、硫化水素に対する生理的耐性を、同一条件下の室内実験から求めた。この結果から 4 種間の耐性を比較し、それぞれの種の分布との関係を検討し、ヤマトシジミの環境耐性の特徴を明らかにする。

供試材料 実験に供したヤマトシジミは、宍道湖玉湯沖保護区において小型 Smith-MacIntyre 型採泥器で採集し、アサリ、サルボウ、ホトトギスガイは中海、境水道において潜水による手掘りで採集した (Fig. 3-5-1)。実験に供する前に、ヤマトシジミは塩分濃度 5psu、アサリ、サルボウ、ホトトギスガイは 25psu に調整した水槽内に採集場所の底質と共に入れて 2~3 日間馴致した。実験室内で 3~5 日間、エアストーンで十分通気しながら、徐々に水槽の水温を 25 に調整した。

飼育水の調整 塩分濃度は、濾過海水 (孔径 20 μ m フィルム使用) を残留塩素を曝気により取り除いた水道水で希釈調整した。水温耐性以外の実験の水温は、すべて恒温水槽を使用して 25 に設定した。

飼育水の水質測定 飼育水の水質の測定は、水温は棒状水温計で、DO 濃度は YSI DO メーター Model 57 で、塩分はセントラル科学 DIGITAL SALT UC-77 で、硫化水素はガステック ヘドロテック S No.201L・201H でそれぞれ測定した。

実験方法 実験は、実験水槽の中にはなにも敷かず、止水中、自然光下、無給餌条件で行った。

4 種の環境耐性実験の結果を比較するために、実験で得られた死亡個体数の変化から LT_{50} と LT_{100} を求めた。

水温耐性実験 1995 年 8 月に採集したヤマトシジミ (21.6 ± 1.56 mm)、1996 年 5 月に採集したアサリ (27.4 ± 2.09 mm)、サルボウ (34.4 ± 2.30 mm)、ホトトギスガイ (9.0 ± 0.64 mm) を、馴致後実験に供した。水温は、ヒーターとサーモスタットにより、30、32 および 34 の異なる水温条件に調整した。それぞれの水温条件の円形水槽 (8 ℓ) に各種を 20 個体ずつ収容し、30 日間、供試貝の死亡個体数の推移を見た。塩分濃度はヤマトシジミは 5psu、その他の 3 種は 25psu に設定し、実験中はエアストーンで微量通気を行った。

塩分耐性実験 1994 年 8 月に採集したヤマトシジミ (22.2 ± 1.06 mm)、アサリ (16.3 ± 3.00 mm)、サルボウ (41.5 ± 3.31 mm) およびホトトギスガイ (17.1 ± 2.18 mm) を、馴致後実験に供した。残留塩素を抜いた水道水と濾過海水を調合し、塩分濃度 0 (淡水)、1.5、2.5、5、10、15、20、32 (海水) psu の異なる条件を設定した。それぞれの塩分濃度の円形水槽 (8 ℓ) に各種を 20 個体ずつ収容し、14 日間、供試貝の死亡個体数の推移を見た。実験水温は 25 に設定し、実験中はエアストーンで微量通気を行った。

貧酸素耐性実験 1994 年 12 月に採集したヤマトシジミ (16.3 ± 1.57 mm)、アサリ (28.3 ± 2.53 mm)、サルボウ (13.6 ± 1.55 mm)、ホトトギスガイ (15.0 ± 1.27 mm) を、馴致後実験に供した。DO 濃度の調整は、 N_2 ガスを実験容器 (0.9 ℓ) に吹き込むことによって無酸素 (0.05mg/ ℓ 以下) 状態を作り出し、エアレーションで DO を飽和状態にした対照区も設定した。無酸素状態と DO 飽和状態のそれぞれの実験容器に、各種を 20 個体ずつ収容し、14 日間、供試貝の死亡個体数の推移を見た。実験水温は 25、塩分濃度はヤマトシジミは 5psu、その他の 3 種は 25psu に設定した。

硫化水素耐性実験 1995 年 8 月に採集したヤマトシジミ 19.3 ± 0.78 mm、アサリ 32.9 ± 1.06 mm、サルボウ 30.8 ± 1.25 mm、ホトトギスガイ 13.3 ± 0.81 mm を、馴致後実験に供した。硫化水素濃度の調

整は、まず、 N_2 ガスを吹き込み DO を $1\text{mg}/\ell$ 以下にした貧酸素水を実験容器 (0.7ℓ) に入れ、その後、硫化水素ナトリウム ($\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) を溶かして作った硫化水素原液 (約 $1,000\text{ppm}$) を添加し、硫化水素濃度 0, 10, 20, $30\text{mg}/\ell$ にそれぞれ調整した。それぞれの硫化水素濃度の実験水槽に、各種を 20 個体ずつ収容し、14 日間、供試員の死亡個体数の推移を見た。実験中に硫化水素の減少が大きかったので 1 日に 2 回 (午前 8 時と午後 4 時)、濃度の測定を行い、減少分だけ硫化水素原液を添加して、設定濃度に校正した。実験水温は 25°C 、塩分濃度はヤマトシジミは 5psu 、その他の 3 種は 25psu に設定した。

結果

水温耐性 実験における供試員の生残率の変化を Fig.3-5-2 に 生残率の経日的変化から求めた LT_{50} と LT_{100} を Table 3-5-1 にそれぞれ示した。

ヤマトシジミは、 30°C と 32°C では、へい死する個体が全くなかった。 34°C では、15 日目にへい死する個体が見られたが、30 日間では、 LT_{50} に達しなかった。

アサリは、 30°C では、へい死する個体が全くなかったが、ヤマトシジミと異なり、これより高い水温になると明らかな影響が見られ、 32°C では 6 日目、 34°C では 1 日目にへい死する個体が見られ始めた。 LT_{50} は、 32°C で 8 日目、 34°C で 2 日目であり、 LT_{100} は、 32°C で 18 日目、 34°C で 3 日目であった。

サルボウは、ヤマトシジミほどではないが、アサリよりは耐性が強く、アサリが実験期間中 (30°C 日間) に全数へい死した 32°C でも、実験終了時に 11 個体が生残していた。ただし、 34°C になると、大きな影響を受け、 LT_{50} と LT_{100} は、それぞれ 4 日目と 5 日目であった。

ホトトギスガイは、他の 3 種と同じく 30°C ではへい死する個体はなかったのに対し、 32°C 、 34°C では影響を受けた。しかし、 LT_{50} と LT_{100} は、 32°C で、それぞれ 23 日目と 28 日目、 34°C でそれぞれ 21 日目と 25 日目であり、 32°C と 34°C の耐性の間に大きな違いは見られなかった。

温度に対する耐性の強さは、 34°C ではヤマトシジミ > ホトトギスガイ > サルボウ > アサリの順序で、 32°C で見ると、ヤマトシジミ > サルボウ > ホトトギスガイ > アサリとなった。

塩分耐性 実験における供試員の生残率の変化を Fig.3-5-3 に 生残率の経日的変化から求めた LT_{50} と LT_{100} を Table 3-5-2 にそれぞれ示した。

ヤマトシジミは $0 \sim 20\text{psu}$ の間の塩分濃度では実験期間中 (14 日間) にほとんどへい死個体は見られなかった。 32psu では 4 日目よりへい死個体が見られ、 LT_{50} は 6 日目、 LT_{100} は 7 日目であった。淡水から、かなり高い塩分濃度まで充分生存可能であり、ほぼ海水に近い高塩分濃度になって影響を受けるようになる。

アサリは $10 \sim 32\text{psu}$ の間の塩分濃度ではほとんどへい死する個体は見られなかった。 5psu では明らかな影響が現れ、 LT_{50} は 9 日目であったが、実験期間中 (14 日間) に LT_{100} まで達しなかった。さ

らに低い塩分濃度では、2.5psu で LT_{50} が 7 日目、 LT_{100} が 12 日目であり、淡水で LT_{50} が 7 日目、 LT_{100} が 9 日目であった。塩分濃度が低くなるほど生存期間が短くなる傾向を示した。

サルボウはアサリと同じく、10~32psu の間の塩分濃度ではほとんどへい死する個体はなく、一方淡水側で耐性が弱かった。5psu では LT_{50} は 8 日目であったが、実験期間中（14 日間）に LT_{100} まで達しなかった。2.5psu では LT_{50} は 6 日目、 LT_{100} は 9 日目であり、淡水では LT_{50} は 5 日目、 LT_{100} は 9 日目であった。サルボウとアサリの塩分に対する耐性には大差はないが、サルボウよりアサリの方が若干淡水側で耐性があるようである。

ホトトギスガイの塩分濃度に対する耐性は、前記のアサリ、サルボウと同様の傾向を示した。5psu では LT_{50} は 6 日目であったが、実験期間中（14 日間）に LT_{100} まで達しなかった。2.5psu では LT_{50} は 3 日目、 LT_{100} は 5 日目であり、淡水では 2.5psu とほぼ同じ結果を示した。淡水に対する耐性は 4 種では最も弱かった。

以上の結果から、ヤマトシジミの生息可能な塩分濃度の範囲は 0~20psu で、サルボウ、アサリ、ホトトギスガイでは、10~32psu であると推察される。そして、淡水に対する耐性の強さは、ヤマトシジミ>アサリ>サルボウ>ホトトギスガイの順序であり、海水に対する耐性はアサリ>サルボウ>ホトトギスガイ>ヤマトシジミの順であった。

貧酸素耐性 実験における供試貝の生残率の変化を Fig.3-5-4 に、生残率の経日的変化から求めた LT_{50} と LT_{100} を Table 3-5-3 にそれぞれ示した。

ヤマトシジミは、9 日目に、へい死する個体が見られ始め、 LT_{50} と LT_{100} は、それぞれ 13 日目と 14 日目であった。

アサリは、1 日目にへい死する個体が見られ始め、 LT_{50} と LT_{100} は、それぞれ 2 日目と 4 日目であった。

サルボウは、ヤマトシジミよりは若干耐性が弱い、4 種の中では耐性が強い方で、 LT_{50} と LT_{100} は、それぞれ 10 日目と 11 日目であった。

ホトトギスガイは、アサリ同様非常に耐性が弱く、へい死し始めたのはアサリより少しおくれて 2 日目であったが、その 2 日目ですでに LT_{50} に達しており、 LT_{100} は、アサリより 1 日早く 3 日目であった。

4 種の LT_{50} 、 LT_{100} を比較してみると、貧酸素に対する耐性の強さはヤマトシジミ>サルボウ>アサリ>ホトトギスガイの順序であった。

硫化水素耐性 実験における供試貝の生残率の変化を Fig.3-5-5 に、生残率の経日的変化から求めた LT_{50} と LT_{100} を Table 3-5-4 にそれぞれ示した。

硫化水素無添加の条件では、4 種共に 14 日間でへい死する個体はなかった。

ヤマトシジミは、硫化水素濃度 10mg/l では、5 日目に最初のへい死個体が見られたが、実験期間中（14 日間）に LT_{50} まで達しなかった。20mg/l および 30mg/l では、 LT_{50} はそれぞれ 14 日目と 13 日目であったが、実験終了時に 20mg/l で 10 個体、30mg/l で 9 個体と、ほぼ半数が生残してお

り、以下に示す3種と比較して、ヤマトシジミの硫化水素に対する耐性の強さを示していた。

アサリの硫化水素に対する耐性はヤマトシジミに比べると非常に弱く、本実験における最小の硫化水素濃度である10mg/ℓですでに硫化水素の影響は大きく、LT₅₀は2日目、LT₁₀₀は4日目であった。20mg/ℓと30mg/ℓにおいても10mg/ℓの場合と大差はなかった。

サルボウは、5日目までは全ての濃度においてへい死する個体はなかったが、その後へい死する個体が見られ始めると硫化水素濃度が高い場合ほど急激に生残個体数が減少し、全ての濃度で実験期間中に全数がへい死した。LT₅₀とLT₁₀₀は、10mg/ℓでそれぞれ12日目と13日目、20mg/ℓで9日目と10日目、そして、30mg/ℓで7日目と8日目であった。

ホトトギスガイは、他の3種に比べて硫化水素に対する耐性はもっとも弱かった。LT₅₀とLT₁₀₀は、10mg/ℓでそれぞれ3日目と4日目、20mg/ℓで2日目と3日目、そして、30mg/ℓでは共に2日目であった。

この4種の硫化水素に対する耐性の強さは、ヤマトシジミ>サルボウ>アサリ ホトトギスガイの順であった。

考察

実験条件 水温耐性を除く他の実験では、全て水温を25℃に設定した。また、塩分耐性を除く他の実験では、ヤマトシジミは5psu、他の二枚貝3種は25psuの塩分条件で統一した。水温25℃は宍道湖と中海の年間変動の範囲内であり、水温耐性実験の結果からも、実験水温によって他の耐性実験の結果が種ごとに大きく左右されることはないと思われる。また、塩分耐性を除く実験で、ヤマトシジミと他の3種の塩分条件は異なるが、ヤマトシジミの5psuと他の3種の25psuの塩分濃度はこれらが生息する宍道湖と中海の底層水の平均値に近い値である。最適の塩分条件かどうかは不明であるが、塩分耐性実験の結果からも、実験に用いた塩分濃度によってヤマトシジミと他の3種の耐性がそれぞれ大きく異なることはないと推察した。

水温耐性 宍道湖に生息しているヤマトシジミは、実験水温32℃でへい死した貝は一個体もなかった。一方、宍道湖の湖底の水温は最近10年では31.3℃が最高である。この数値はヤマトシジミの30日間の致死水温以下であるので、湖底の水温によってへい死することはないと思われる。また、中海に生息するアサリ、サルボウ、ホトトギスガイは実験水温30℃、30日間ではへい死個体は全く無かった。中海の湖底の水温は最近10年では最高水温は27.8℃であり、宍道湖のヤマトシジミ同様水温によってこれら3種が、生息する中海でへい死することはないと思われる。

宍道湖に生息しているヤマトシジミが中海産の3種に比べて高温耐性が高いのは、過去10年間の最高水温が中海より宍道湖の方が3.5℃高いことから首肯されよう。

塩分耐性 汽水域では特定の塩分に適応できる生物しか生息できないため、生物の種類数は少なく、淡水種や海産種が進入しにくい5psu附近の汽水域では、特に種類数が少なくなる(Remane, 1971)。

ヤマトシジミは淡水側ではほとんどへい死する個体はなく、高塩分側（20psu 以上）に致死限界があるのに対して、中海産のアサリ、サルボウ、ホトトギスガイの 3 種は高塩分側（海水）ではへい死個体はなく、淡水側（5psu 以下）で生息不可能であった。最近 10 ヶ年では、宍道湖湖底直上の塩分濃度は 0.93 ~ 24.2psu の範囲で、平均 6.17psu であり、中海の湖底は 10.7 ~ 33.5psu、平均 27.6psu の塩分濃度である。したがって、宍道湖の様に年間ほとんど 5psu 附近の湖底はアサリ、サルボウ、ホトトギスにとって生存限界の範囲外にある。一方、中海の場合は、平均 27.6psu 附近であるため 3 種の二枚貝が生息し得るのに対して、ヤマトシジミは生息不可能である。

貧酸素耐性 DO は水生生物にとって呼吸に欠くことのできない重要な環境要因であり、その欠乏は生物の生存を困難にする（板沢，1977）。二枚貝は DO が欠乏すると呼吸を停止し、嫌気代謝を行う体内適応で生命維持をはかるが（Hochachka，1984）、その適応可能な時間にも限りがある。適応できる時間がその生物の無酸素環境に対する耐性の限界といえる。水温 25℃ におけるこれら 4 種の無酸素の LT₅₀ は 2 ~ 13 日間であった。したがって、宍道湖、中海では夏期に恒常的長期的に DO が無酸素状態に近くまで減少する中心部の湖底には、これら二枚貝は生息しない。しかし、貧酸素水塊の影響を長期に受けにくい沿岸部（3-4m 以浅）では生息が確認されている（Yamamuro *et al.*，1990；園田ら，1991；沢村ら，1991）。宍道湖におけるヤマトシジミは、夏期 DO 飽和量が 4 % 以下の 4m 以深の水域では全く生息していなかった（Yamamuro *et al.*，1990；園田ら，1991）のに対して、1 m² 当たり 1,000 個以上生息しているのは DO 飽和度が約 50% 以上の 2m 以浅の場所であった（中村ら，1984）。中海では夏期の貧酸素水塊は湖底のほぼ全体を占めるため、これまでのベントス調査における Smith-MacIntyre 型採泥器ではアサリ、サルボウは採集されておらず（沢村ら，1991）、貧酸素水塊が形成されない沿岸の、水深 1 ~ 2m の狭い砂礫質の場所にのみ生息している（中村，未発表）。

硫化水素耐性 硫化水素耐性の実験は、硫化水素の分解による減少を緩和するため DO 濃度を 1mg/ℓ 以下に保って行ったが、硫化水素無添加の条件において、ヤマトシジミ、アサリ、サルボウおよびホトトギスガイのいずれも、実験期間中（14 日間）にへい死した個体はなかった。このことから、硫化水素耐性の実験結果は、1mg/ℓ 以下という実験水の低い DO 濃度の影響はほとんど無く、硫化水素のみの影響によるものと考えられる。

湖底の還元層では底層水が無酸素になると嫌気性の硫酸還元菌の活性で生物に有毒な硫化水素が発生する。生物に対する硫化水素の毒性は、好気呼吸において、硫化水素が酸素分子の代わりにチトクロム C オキシダーゼのヘム部分に結合し、その機能を抑制することによって発現する。この硫化水素に対する体内の適応は、二枚貝では好気呼吸から嫌気呼吸への変換機構によるものと思われる。したがって、硫化水素耐性の強さを見ると、貧酸素耐性と全く同じ傾向を示し、耐性の強さは、ヤマトシジミ > サルボウ > アサリ > ホトトギスガイの順であった。

宍道湖・中海の環境要因の中では、水温と塩分濃度によって宍道湖にヤマトシジミ、中海に他の 3 種の二枚貝が生息し得ることが分かった。さらに、貧酸素および硫化水素が主要な水産資源生物である宍道湖のヤマトシジミ、中海のアサリ、サルボウの生息を規制する環境要因とな

ることが示唆された。現在の宍道湖と中海の塩分濃度は、それぞれヤマトシジミと、アサリおよびサルボウの生息に相当であると思われる。しかし、これら有用二枚貝にとって両水域で貧酸素と、これによる硫化水素の発生が、生息分布範囲や密度の減少の大きな要因となっていると考えられるので、貧酸素対策を講じて、貧酸素水塊を縮小させ、漁場を拡大することが漁業生産拡大のためには重要であると思われる。そのための目安となる数値を明らかにし

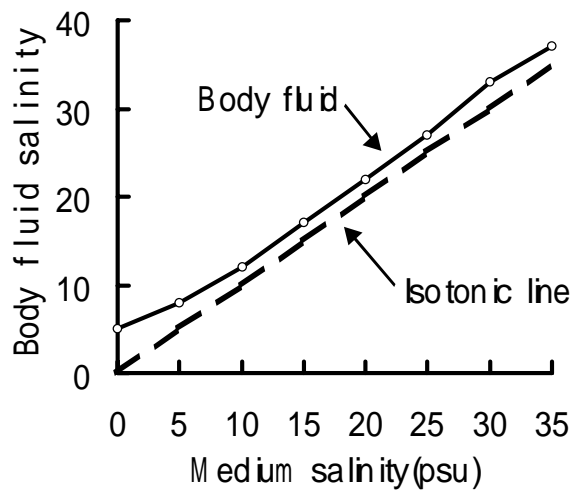


Fig. 3-1-1. Change in salinity of body fluid of the brackish water bivalve *C. japonica* acclimated to different salinities.

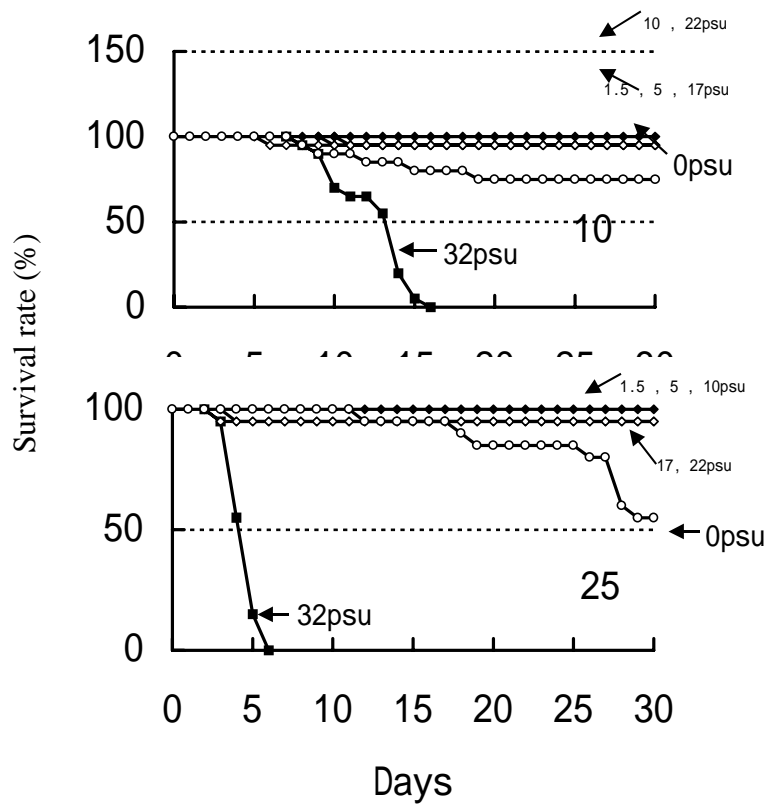


Fig. 3-1-2. Effects of salinity on the survival rate of *C. japonica* at 10 and 25 psu. n=20.

Table 3-1-1. Salinity tolerance of *C. japonica* to at different water temperatures(TW).

WT ()	Salinity (psu)	Lethal time (days)	
		LT ₅₀	LT ₁₀₀
10	0	> 30	> 30
	2	> 30	> 30
	5	> 30	> 30
	10	> 30	> 30
	17	> 30	> 30
	22	> 30	> 30
	32	14	16
25	0	> 30	> 30
	2	> 30	> 30
	5	> 30	> 30
	10	> 30	> 30
	17	> 30	> 30
	22	> 30	> 30
	32	5	6

Table 3-1-2. Tolerance of adult and juvenile *C. japonica* to high salinities at different water temperature(WT).

WT ()	Salinity (psu)	Lethal time (days)			
		LT ₅₀		LT ₁₀₀	
		juvenile	adult	juvenile	adult
10	25.6	> 20	> 20	> 20	> 20
	28.8	> 20	> 20	> 20	> 20
	32.0	9	> 20	> 20	> 20
20	25.6	> 20	> 20	> 20	> 20
	28.8	6	> 20	> 20	> 20
	32.0	6	10	7	11
30	25.6	2	8	4	20
	28.8	2	4	3	10
	32.0	2	3	4	4

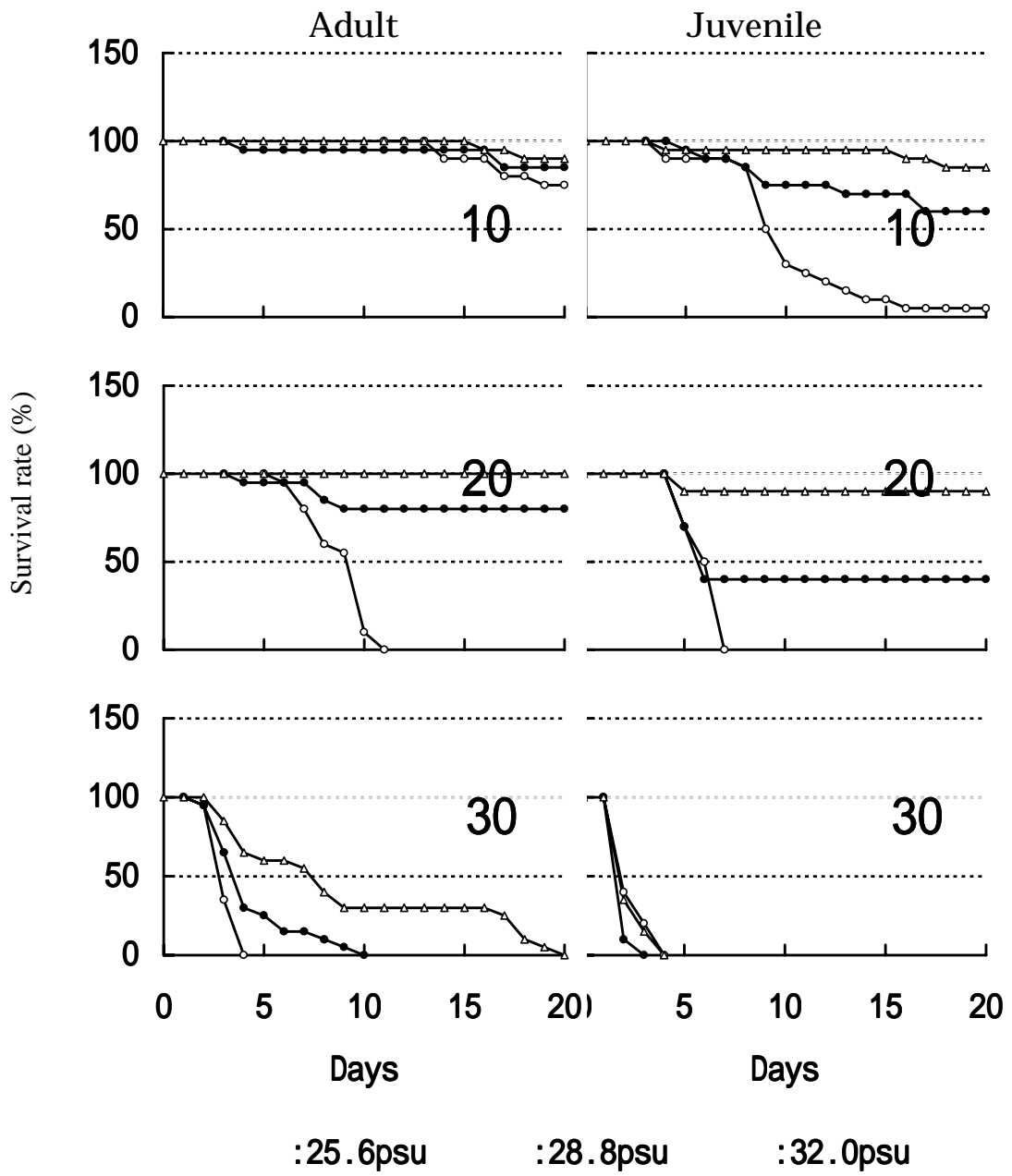


Fig. 3-1-3. Effects of high salinities on the survival rate of adult and juvenile *C. japonica* at 10, 20 and 30 psu. n=20.

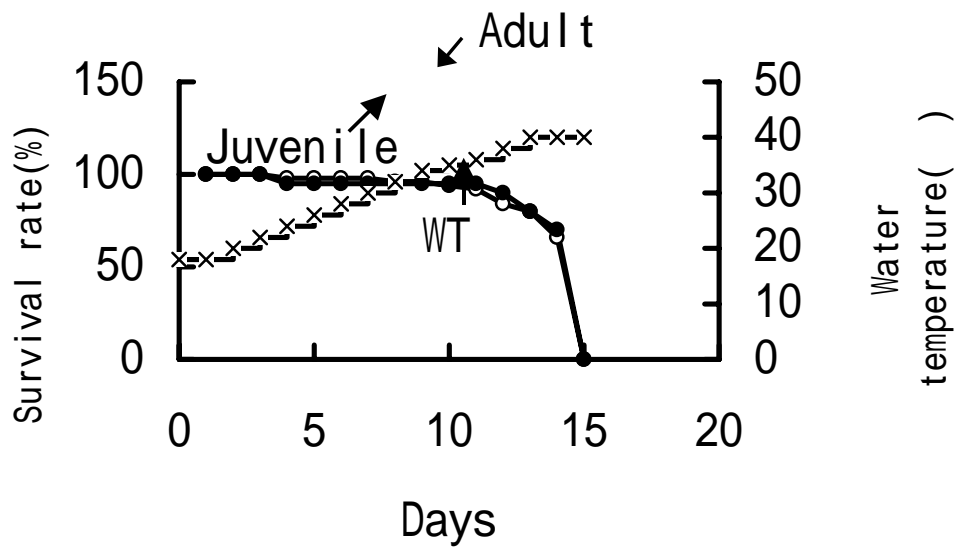


Fig. 3-2-1. Survival of adult and juvenile *C. japonica* exposed to water temperatures(WT) ranging 18 - 40 .

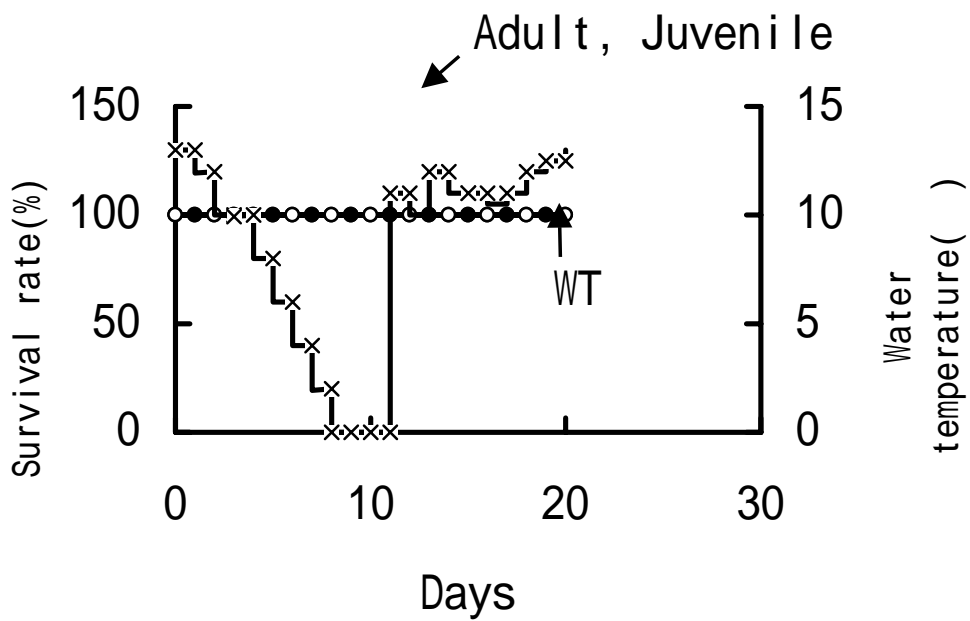


Fig. 3-2-2. Survival of adult and juvenile *C. japonica* exposed to water temperatures(WT) ranging 13 - 0 . Adult : n=50; Juvenile : n=20.

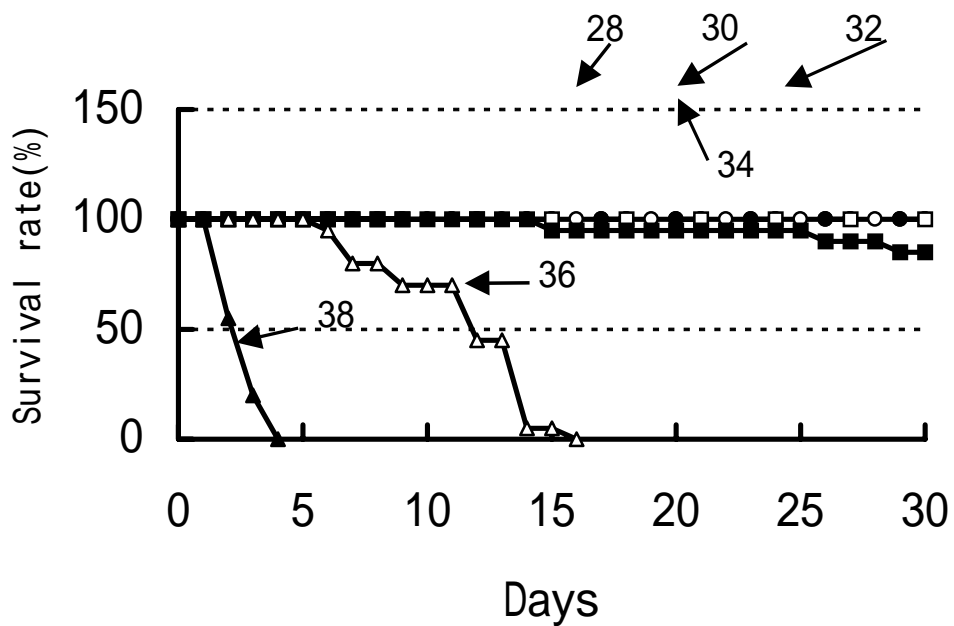


Fig. 3-2-3. Effects of high temperatures on the survival rate of *C. japonica*. n=20.

Table 3-2-1. Tolerance of *C. japonica* to high water temperature(WT).

WT ()	Lethal time (days)	
	LT ₅₀	LT ₁₀₀
28	> 30	> 30
30	> 30	> 30
32	> 30	> 30
34	> 30	> 30
36	12	16
38	3	4

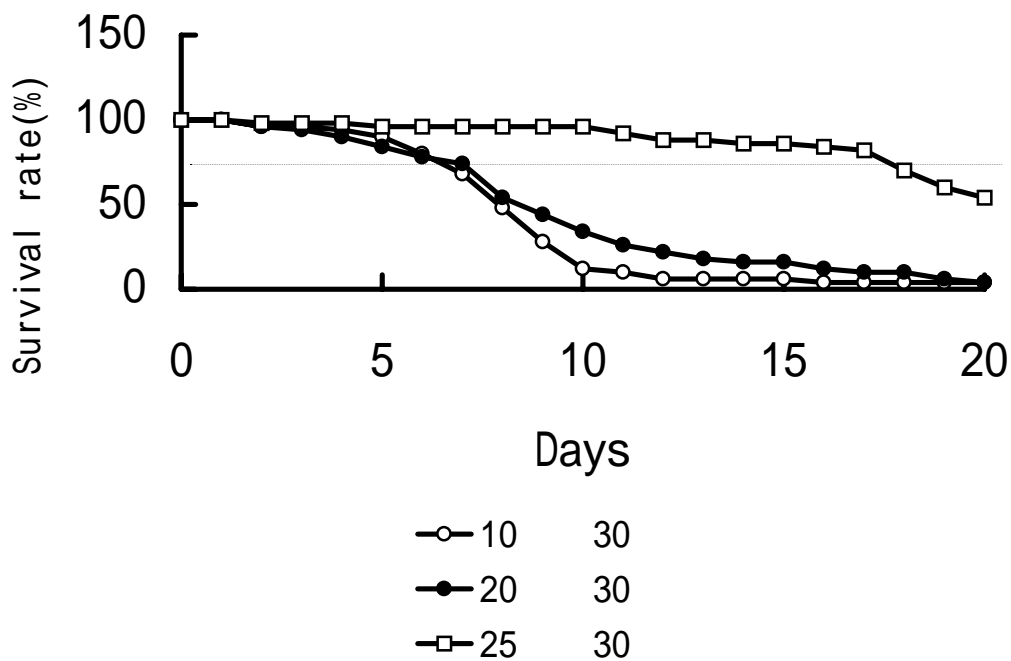


Fig. 3-2-4. Survival rate of *C. japonica* acclimated to different temperatures at 30 . n=50.

Table 3-2-2. Tolerance of *C. japonica* acclimated to different temperature(WT).

WT		Lethal time (days)	
()		LT ₅₀	LT ₁₀₀
10	30	8	> 30
20	30	9	> 30
25	30	> 30	> 30

Table 3-3-1. Experimental water conditions.

		Experiment 1					
		Target water temperature()					
		10		20		30	
		Anoxia	DO saturated	Anoxia	DO saturated	Anoxia	DO saturated
Water temp.()	Initial	9.0	9.0	17.8	17.8	31.1	31.1
	Final	9.5	9.5	18.0	18.0	29.9	29.9
	Mean ± SD	8.9 ± 1.59	8.9 ± 1.16	17.7 ± 0.22	17.7 ± 0.22	29.9 ± 0.67	29.9 ± 0.67
PH	Initial	9.08	7.91	8.81	7.91	8.75	8.11
	Final	8.96	8.01	9.21	8.10	8.23	8.20
	Mean ± SD	8.96 ± 0.16	7.94 ± 0.18	9.10 ± 0.12	7.91 ± 0.15	8.47 ± 0.25	8.26 ± 0.10
DO(mg/ ℓ)	Initial	< 0.05	10.10	< 0.05	8.83	< 0.05	7.03
	Final	< 0.05	9.89	< 0.05	8.79	< 0.05	6.89
	Mean ± SD	< 0.05	10.20 ± 0.48	< 0.05	8.85 ± 0.34	< 0.05	7.06 ± 0.27
NH ₄ -N(mg/ ℓ)	Initial	0.16	1.16	0.16	0.16	0.16	0.16
	Final	0.03	1.84	0.03	1.41	0.34	7.12

		Experiment 2			
		Target water temperature()			
		20		30	
		DO consum.	DO saturated	DO consum.	DO saturated
Water temp.()	Initial	20.2	20.2	30.6	30.4
	Final	21.1	21.1	30.3	29.5
PH	Initial	7.92	7.94	7.94	7.81
	Final	6.56	7.91	6.66	8.02
DO(mg/ ℓ)	Initial	8.15	8.12	6.8	7.4
	Final	< 0.05	8.22	< 0.05	8.02
NH ₄ -N(mg/ ℓ)	Initial	0.58	0.58	0.58	0.58
	Final	2.02	1.77	2.06	0.13

		Experiment 3						
		Target concentration of DO(mg/ ℓ)						
		DO saturated	0	0.5	1	1.5	2	3
Water temp.()	Initial	28.4	28.3	28.3	28.1	28.3	28.4	28.4
	Final	27.7	27.8	27.9	27.0	27.8	27.9	27.8
	Mean ± SD	28.0 ± 0.26	28.0 ± 0.39	28.1 ± 0.16	28.0 ± 0.34	28.0 ± 0.34	28.1 ± 0.26	27.9 ± 0.29
PH	Initial	7.64	7.93	7.91	7.97	8.29	7.72	7.98
	Final	7.93	8.05	8.02	8.02	8.34	8.23	8.19
	Mean ± SD	7.78 ± 0.26	8.59 ± 0.22	7.87 ± 0.09	8.09 ± 0.15	8.39 ± 0.14	8.06 ± 0.15	7.83 ± 0.15
DO(mg/ ℓ)	Initial	7.70	< 0.05	0.46	1.20	1.31	1.92	3.10
	Final	7.09	< 0.05	0.40	1.11	1.63	2.06	3.18
	Mean ± SD	6.99 ± 0.29	< 0.05	0.44 ± 0.02	1.04 ± 0.14	1.50 ± 0.10	1.98 ± 0.15	3.47 ± 0.34
NH ₄ -N(mg/ ℓ)	Initial	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
	Final	0.36	1.21	0.53	0.98	2.18	1.50	2.02

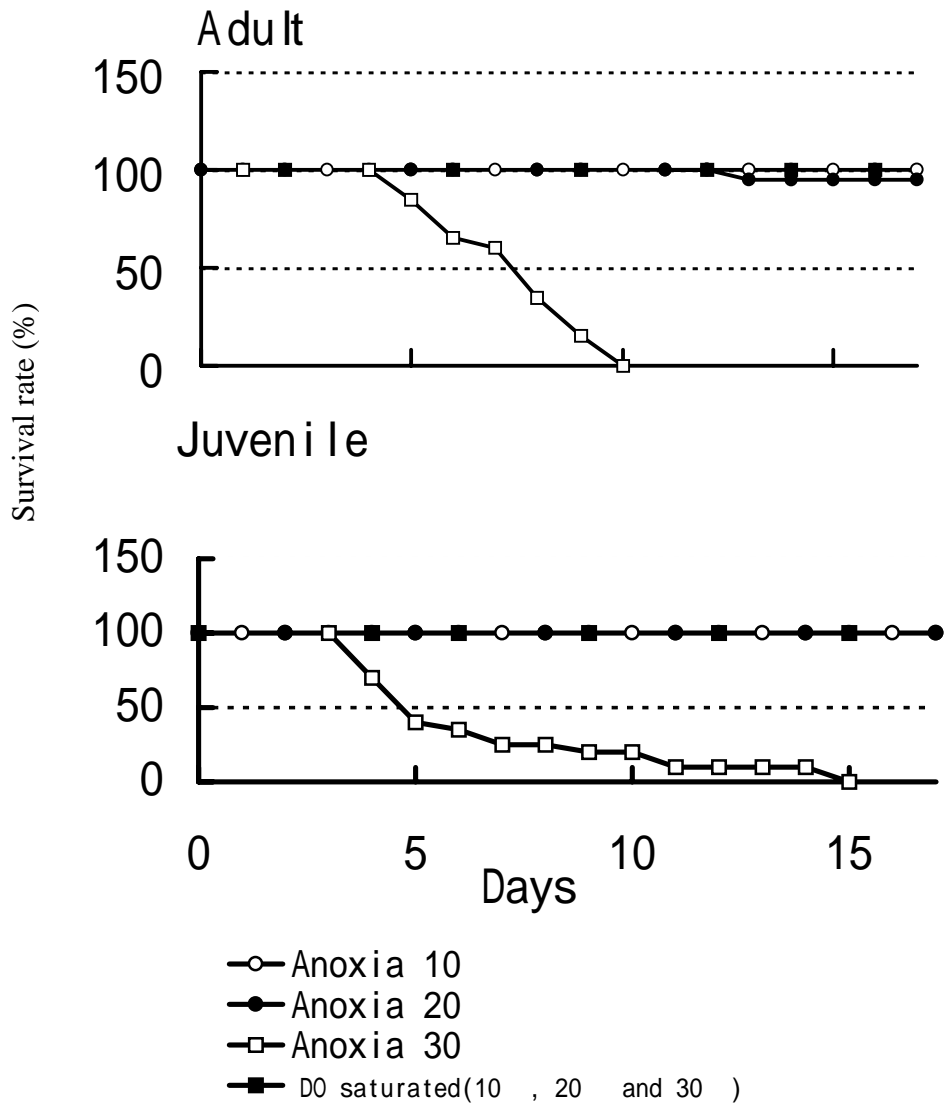


Fig. 3-3-1. Influence of dissolved oxygen concentrations on the survival of adult and juvenile *C. japonica* at 10, 20 and 30 days. Dissolved oxygen concentration of anoxia was maintained under 0.05mg/l. n=20.

Table 3-3-2. Tolerance of adult and juvenile *C. japonica* to low dissolved oxygen concentrations at different water temperatures(WT).

Experiment 1

W.T. ()	Lethal time (days)			
	LT50		LT100	
	juvenile	adult	juvenile	adult
10	> 17	> 17	> 17	> 17
20	> 17	> 17	> 17	> 17
30	5	8	15	10

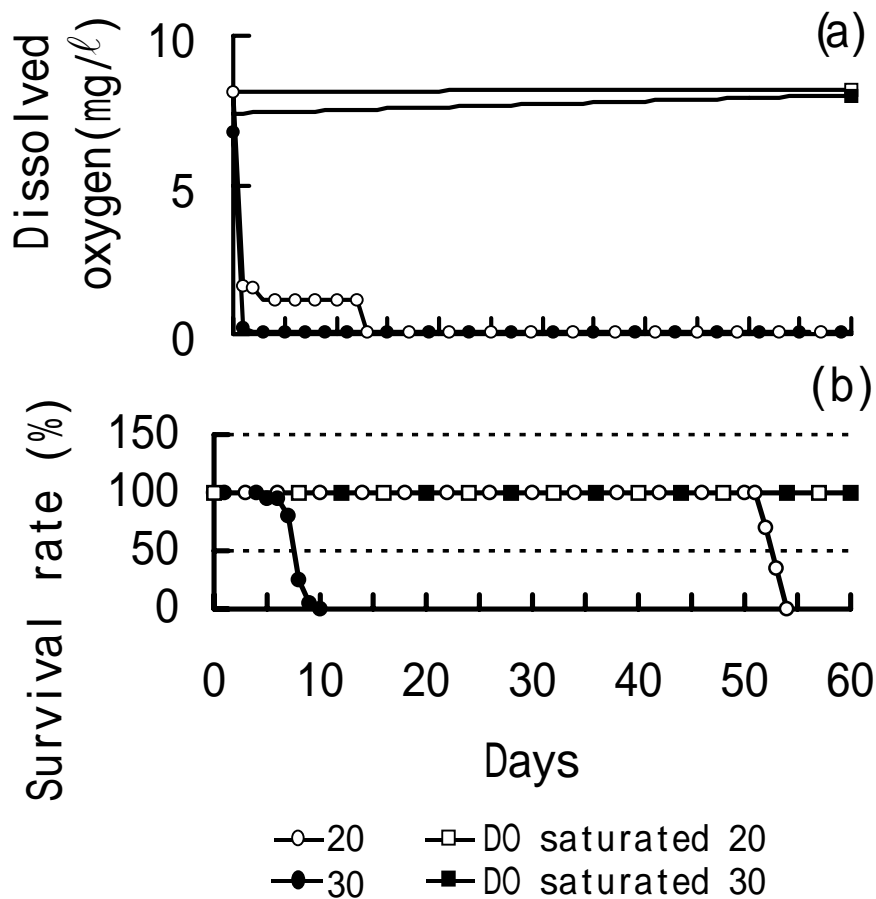


Fig. 3-3-2. The change of oxygen levels (a) and survival rate of *C. japonica* at 20 and 30 (b) with time in closed bottles. n=20.

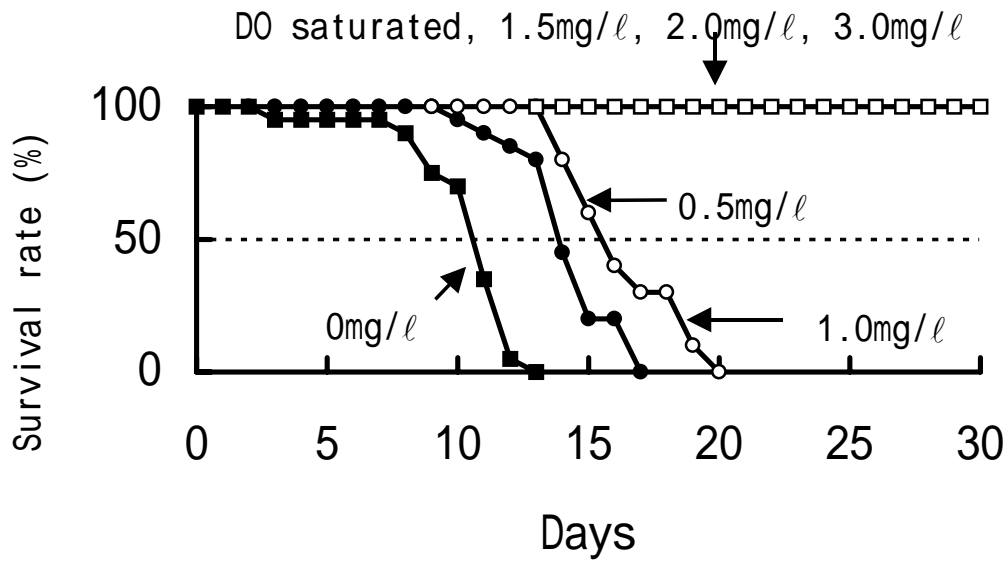


Fig. 3-3-3. Influence of dissolved oxygen concentration on the survival of *C. japonica*. n=20.

Table 3-3-3. Tolerance of *C. japonica* to different low dissolved oxygen concentrations(DO) .

Experiment 3

Mean DO (mg/l)	Lethal time (days)	
	LT ₅₀	LT ₁₀₀
control	> 30	> 30
0	11	13
0.5	14	17
1.0	16	20
1.5	> 30	> 30
2.0	> 30	> 30
3.0	> 30	> 30

Table 3-4-1. Experimental conditions and the test concentrations of hydrogen sulfide.

		Target concentration of H ₂ S(mg/ℓ)							
		0	3	5	7	10	20	30	50
18									
H ₂ S(mg/ℓ)		0.00	1.6 ± 1.46	2.7 ± 2.40	4.0 ± 3.27	6.0 ± 4.56	14.7 ± 6.33	25.6 ± 6.72	44.8 ± 6.75
PH	Initial	8.03	8.67	9.80	9.29	9.46	9.85	10.15	10.34
	Final	8.24	8.26	7.94	8.57	9.31	10.04	10.34	10.44
NH ₄ -N (mg/ℓ)	Initial	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
	Final	0.04	1.31	0.88	0.28	0.15	0.09	0.39	0.83
28									
H ₂ S(mg/ℓ)		0.00	1.6 ± 1.46	2.7 ± 2.40	4.3 ± 3.21	6.0 ± 4.43	15.0 ± 6.21	23.0 ± 8.15	40.8 ± 10.91
PH	Initial	8.09	8.43	8.73	8.88	9.06	9.56	9.93	10.06
	Final	7.31	7.21	7.28	7.28	7.68	9.21	9.48	9.56
NH ₄ -N (mg/ℓ)	Initial	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
	Final	0.23	0.3	2.57	0.91	0.06	0.93	0.11	3.41

* H₂S indicates mean ± SD.

* Dissolved oxygen concentration was maintained under 0.05mg/ℓ for the experiments.

* Salinity (5 psu) and temperatures (18 and 28) were stable for the experiments , respectively.

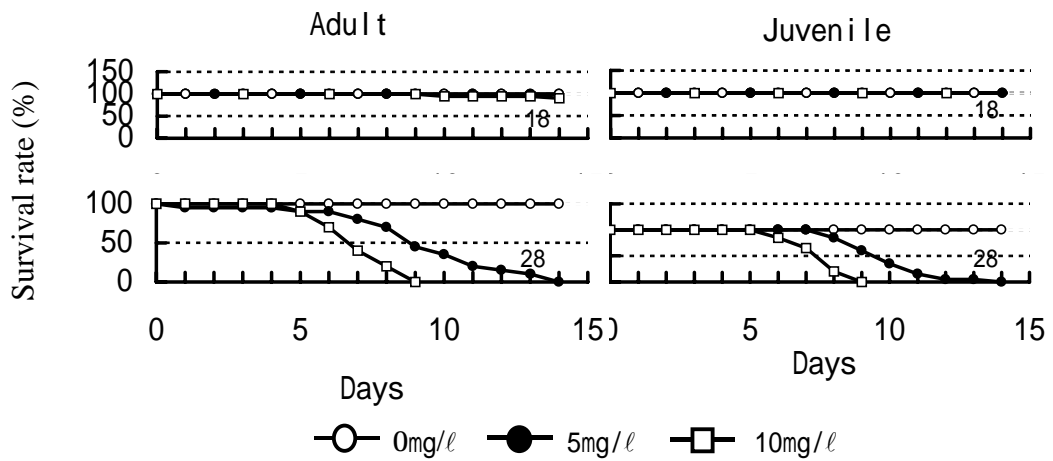


Fig. 3-4-1. Survival rates of adult and juvenile *C. japonica* exposed to different concentrations of hydrogen sulfide at 18 and 28 °C. n=20.

Table 3-4-2. Tolerance of adult and juvenile *C. japonica* to hydrogen sulfide.

Experiment 1

Temperature (°C)	Mean H ₂ S (mg/ℓ)	Lethal time(days)			
		LT50		LT100	
		juvenile	adult	juvenile	adult
18	0	> 14	> 14	> 14	> 14
	5	> 14	> 14	> 14	> 14
	10	> 14	> 14	> 14	> 14
28	0	> 14	> 14	> 14	> 14
	5	10	9	10	14
	10	8	7	9	9

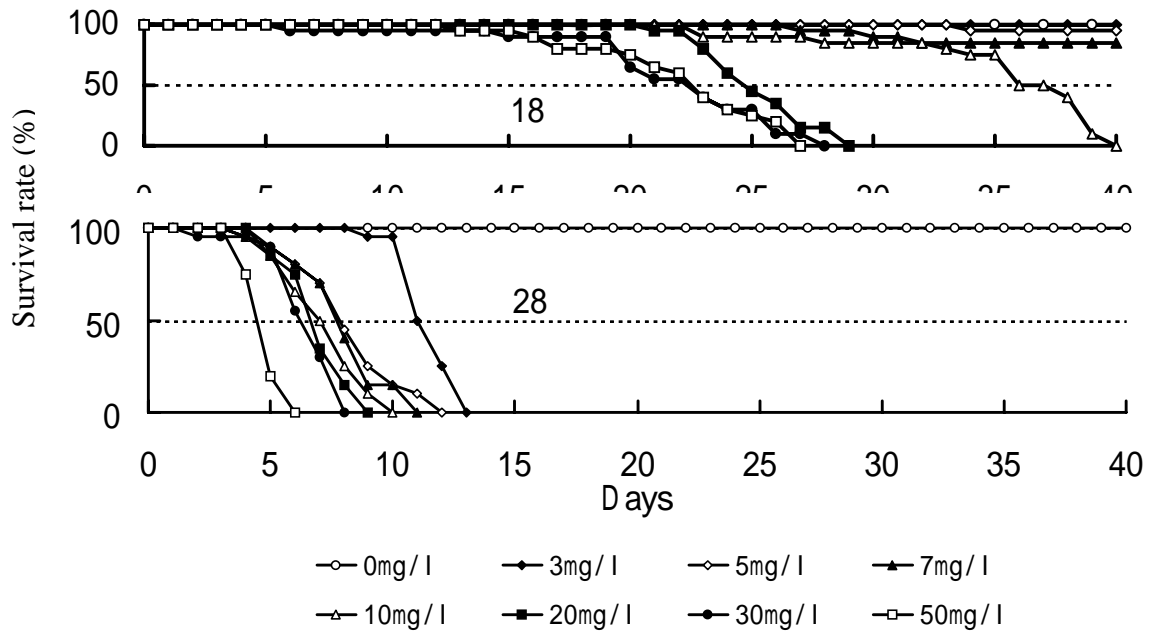


Fig. 3-4-2. Survival rate of *C. japonica* exposed to different concentrations of hydrogen sulfide at 18 and 28 . n=20.

Table 3-4-3. Tolerance of *C. japonica* to hydrogen sulfide in Experiments 2 and 3.

Temperature ()	Mean H ₂ S (mg/l)	Lethal time(days)	
		LT ₅₀	LT ₁₀₀
18	0	> 40	> 40
	3	> 40	> 40
	5	> 40	> 40
	7	> 40	> 40
	10	37	40
	20	25	29
	30	23	28
	50	23	27
28	0	> 40	> 40
	0.5*	> 30*	> 30*
	1.0*	21*	27*
	3	11	13
	5	8	12
	7	8	11
	10	7	10
20	7	9	

* Data are indicated from only Experiment

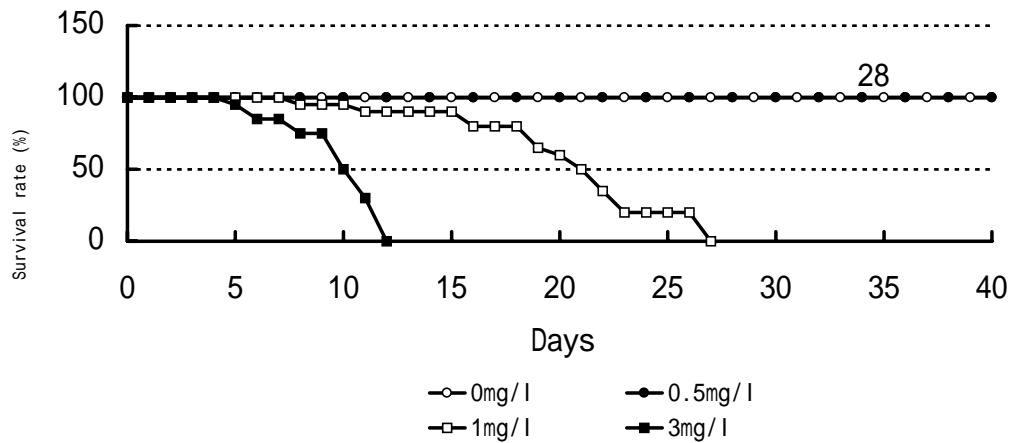


Fig. 3-4-3. Survival rate of *C. japonica* exposed to low hydrogen sulfide concentration at 28 °C. n=20.

Table 3-4-4. Median tolerance time for aquatic invertebrates to hydrogen sulfide.

Test animal	LT ₅₀ (day)	H ₂ S (mg/ℓ)	Temp.(°C)	DO (mg/ℓ)	Author
<i>Mulinia lateralis</i>	6	6.9	20.0	< 0.5	SHUMWAY et al.(1983)
<i>Cirriformia</i> sp.	5	6.3	12.0	< 0.5	BESTWICK et al. (1989)
<i>Nereis diversicolor</i>	24	6.2	-	1.0	VISMANN (1990)
<i>Neanthes virens</i>	8	5.7	-	1.0	VISMANN (1990)
<i>Halicryptus spinulosus</i>	> 10	6.3	9.5	0.5	OESCHGER & VETTER(1992)
<i>Theora fragilis</i>	1.7	5.0	15.1	1.0	玉井(1994)
<i>Macrobrachium nipponense</i>	< 4	1.6	19.9	6.4	姜ら(1995)
<i>Corbicula japonica</i>	> 50	7.0	18.0	0.5	Present study
<i>Corbicula japonica</i>	37	10.0	18.0	0.5	Present study

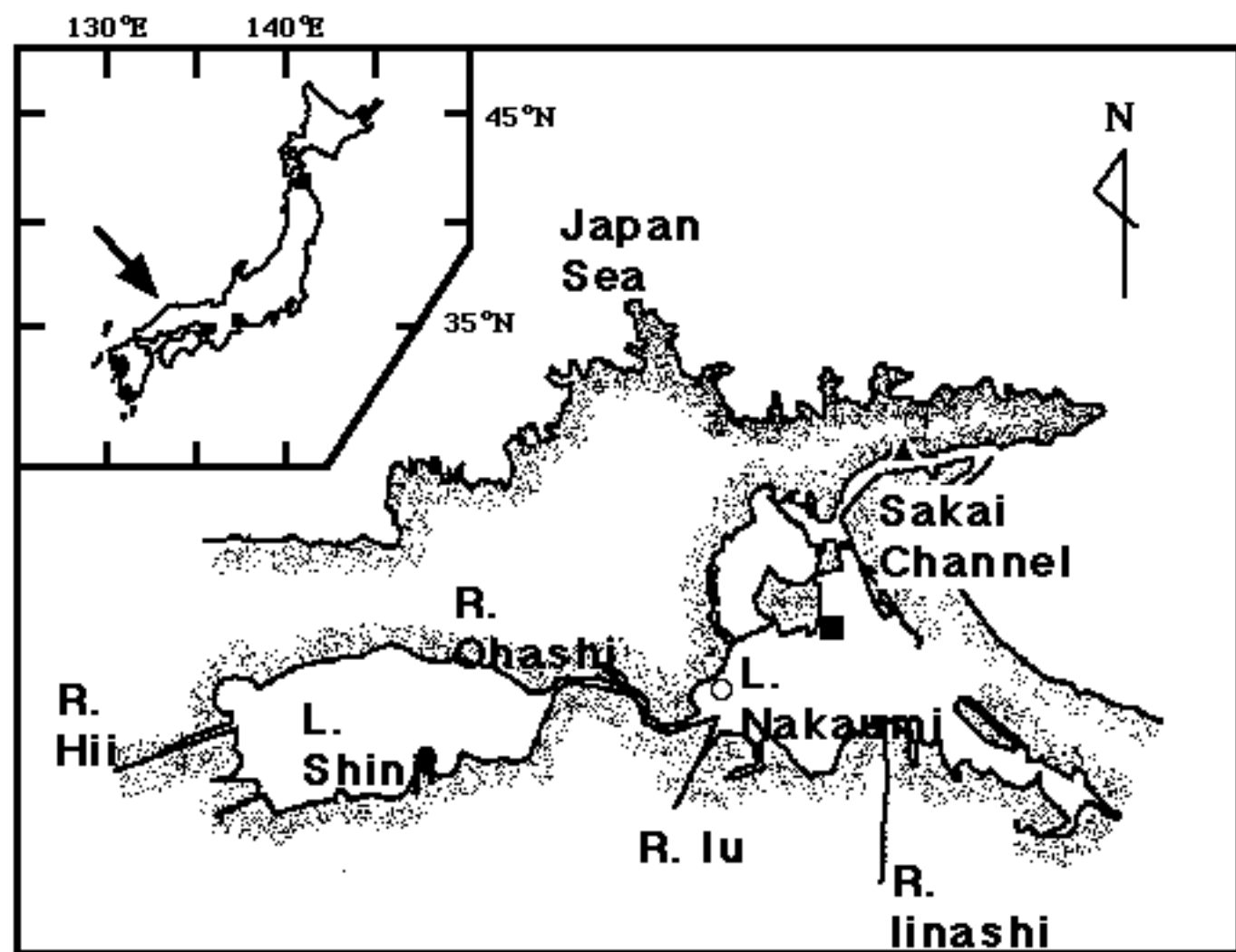


Fig. 3-5-1. Location of sampling sites in Lake Shinji, Lake Nakaumi and Sakai Channel.

- : *C. japonica* ; ▲ : *Ruditapes philippinarum* ; ■ : *Anadara subcrenata* ;
- : *Musculista senhousia* .

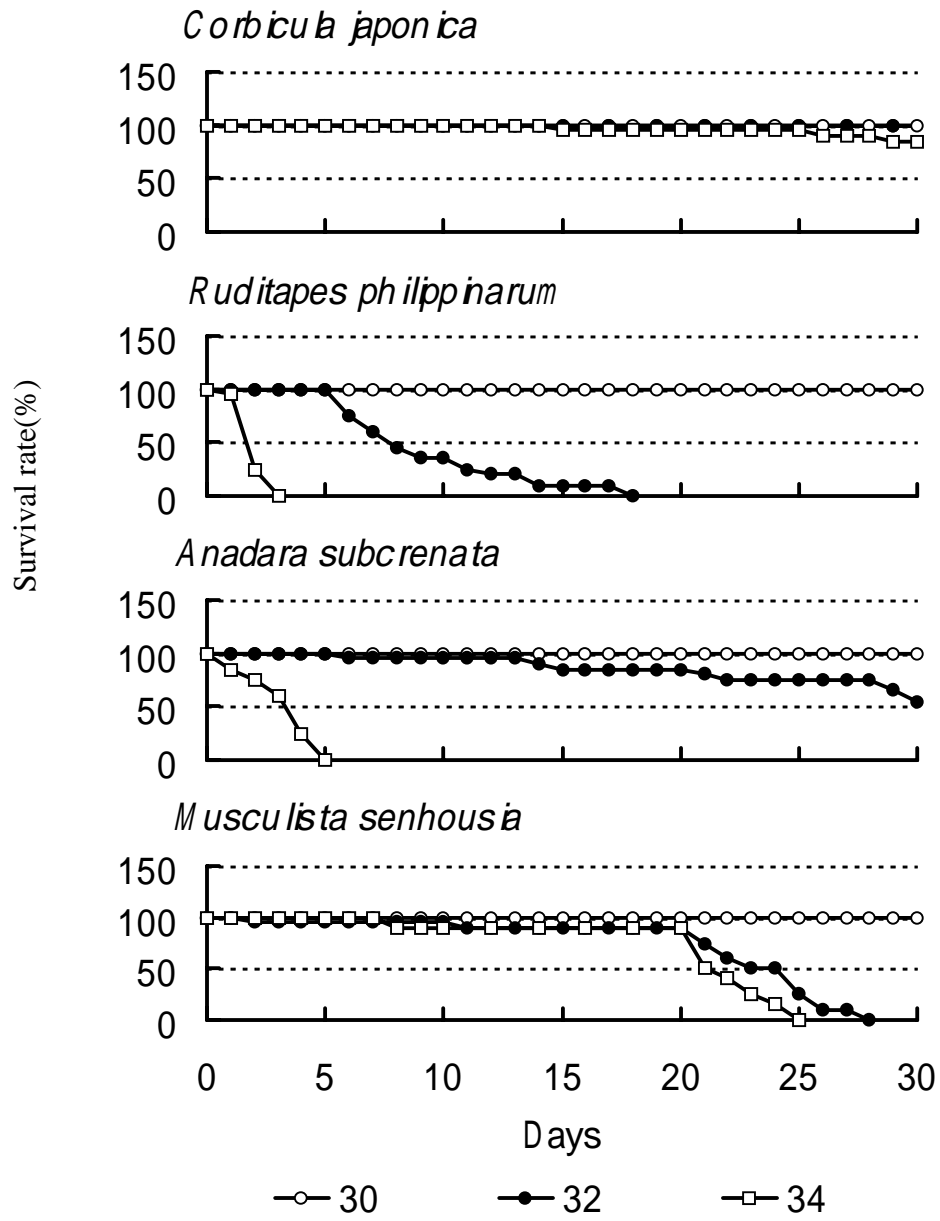


Fig. 3-5-2. Effects of high temperature on the survival rate of four brackish water bivalves. n=20.

Table 3-5-1. Tolerance of four brackish water bivalves to high water temperatures(WT).

Species name	WT ()	Lethal time(days)	
		LT ₅₀	LT ₁₀₀
<i>Corbicula japonica</i>	30	> 30	> 30
	32	> 30	> 30
	34	> 30	> 30
<i>Ruditapes philippinarum</i>	30	> 30	> 30
	32	8	18
	34	2	3
<i>Anadara subcrenata</i>	30	> 30	> 30
	32	> 30	> 30
	34	4	5
<i>Musculista senhousia</i>	30	> 30	> 30
	32	23	28
	34	21	25

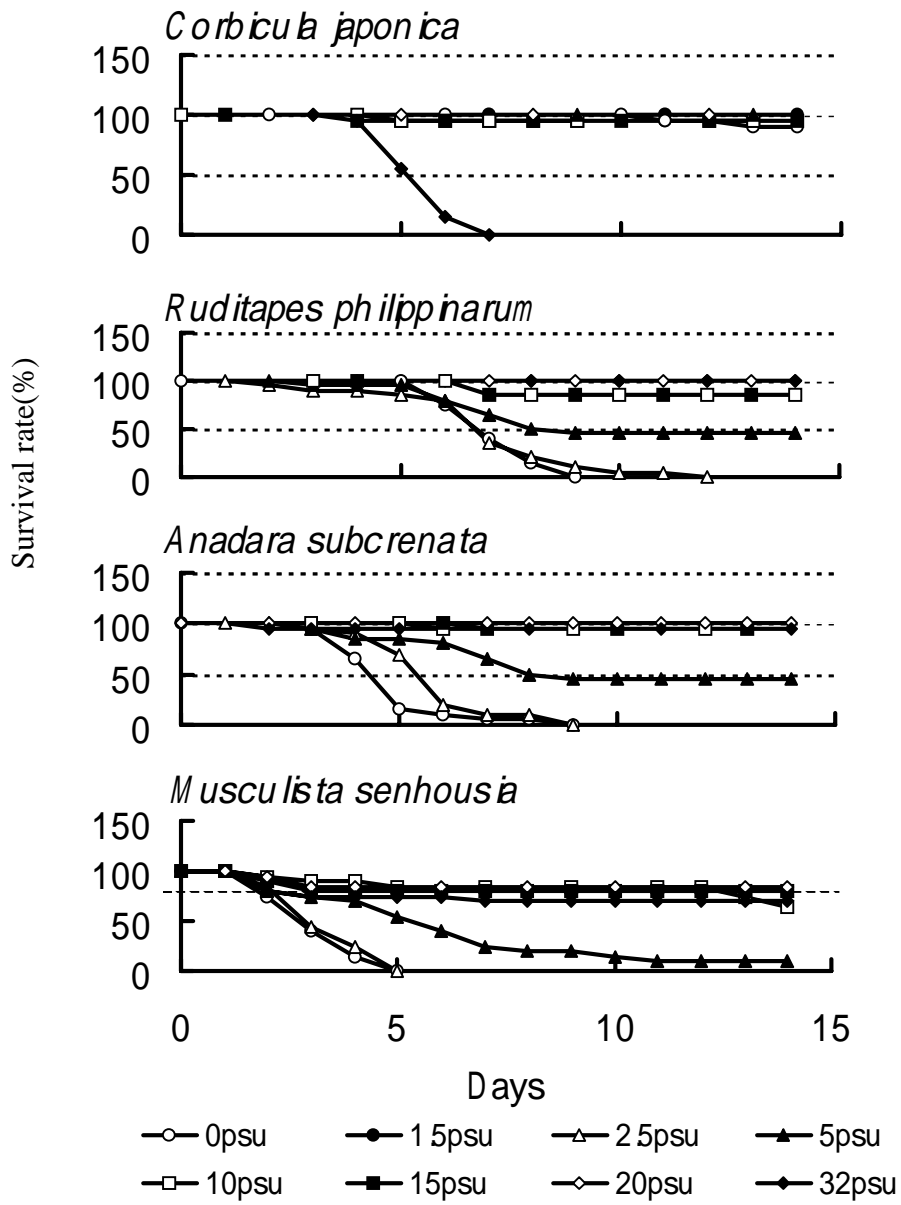


Fig. 3-5-3. Effects of salinity on survival rate of four brackish water bivalves. n=20.

Table 3-5-2. Tolerance of four brackish water bivalves to salinities.

Species name	Salinity (psu)	Lethal time(days)	
		LT ₅₀	LT ₁₀₀
<i>Corbicula japonica</i>	0	> 14	> 14
	1.5	> 14	> 14
	2.5	-	-
	5.0	> 14	> 14
	10	> 14	> 14
	15	> 14	> 14
	20	> 14	> 14
	32	6	7
<i>Ruditapes philippinarum</i>	0	7	9
	1.5	-	-
	2.5	7	12
	5.0	9	> 14
	10	> 14	> 14
	15	> 14	> 14
	20	> 14	> 14
	32	> 14	> 14
<i>Anadara subcrenata</i>	0	5	9
	1.5	-	-
	2.5	6	9
	5.0	8	> 14
	10	> 14	> 14
	15	> 14	> 14
	20	> 14	> 14
	32	> 14	> 14
<i>Musculista senhousia</i>	0	3	5
	1.5	-	-
	2.5	3	5
	5.0	6	> 14
	10	> 14	> 14
	15	> 14	> 14
	20	> 14	> 14
	32	> 14	> 14

Table 3-5-3. Tolerance of four brackish water bivalves to anoxia.

Species name	Dissolved oxygen	Lethal time(days)	
		LT ₅₀	LT ₁₀₀
<i>Corbicula japonica</i>	Control	> 14	> 14
	Anoxia	13	14
<i>Ruditapes philippinarum</i>	Control	> 14	> 14
	Anoxia	2	4
<i>Anadara subcrenata</i>	Control	> 14	> 14
	Anoxia	10	11
<i>Musculista senhousia</i>	Control	> 14	> 14
	Anoxia	2	3

Table 3-5-3. Tolerance of four brackish water bivalves to anoxia.

Species name	Dissolved oxygen	Lethal time(days)	
		LT ₅₀	LT ₁₀₀
<i>Corbicula japonica</i>	Control	> 14	> 14
	Anoxia	13	14
<i>Ruditapes philippinarum</i>	Control	> 14	> 14
	Anoxia	2	4
<i>Anadara subcrenata</i>	Control	> 14	> 14
	Anoxia	10	11
<i>Musculista senhousia</i>	Control	> 14	> 14
	Anoxia	2	3

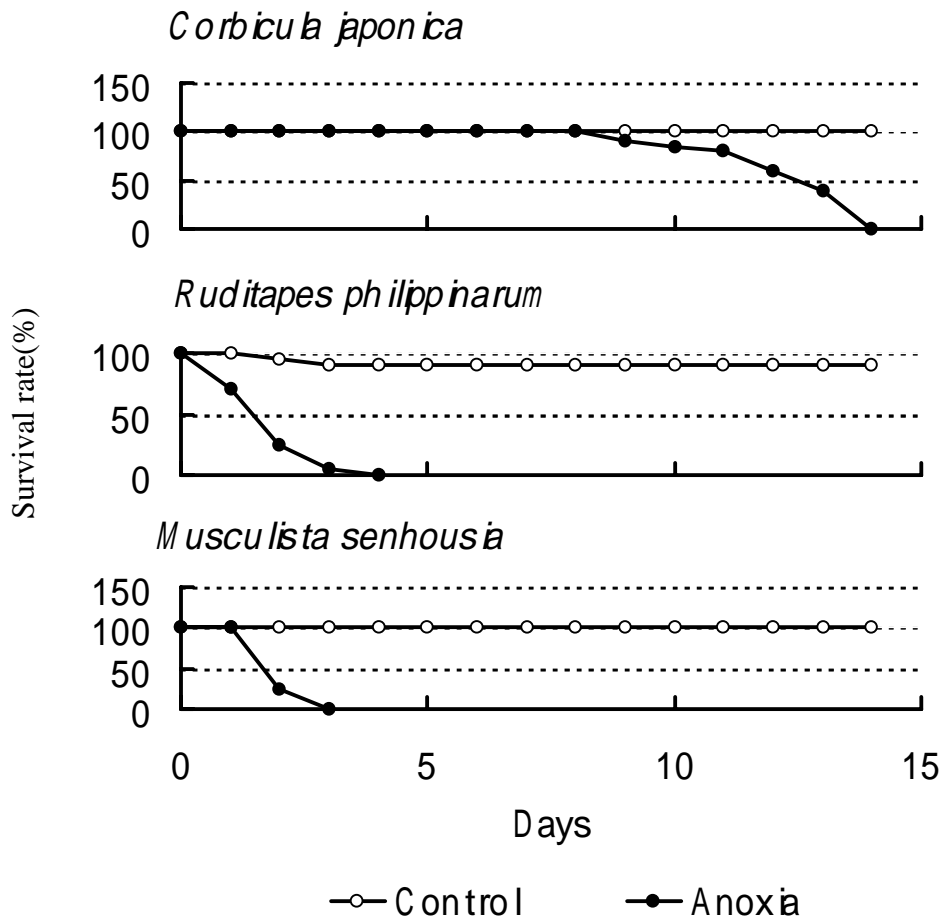


Fig. 3-5-4. Effects of anoxia on survival rate of four brackish water bivalves. Dissolved oxygen concentration of anoxia was maintained under 0.05mg/l. n=20.

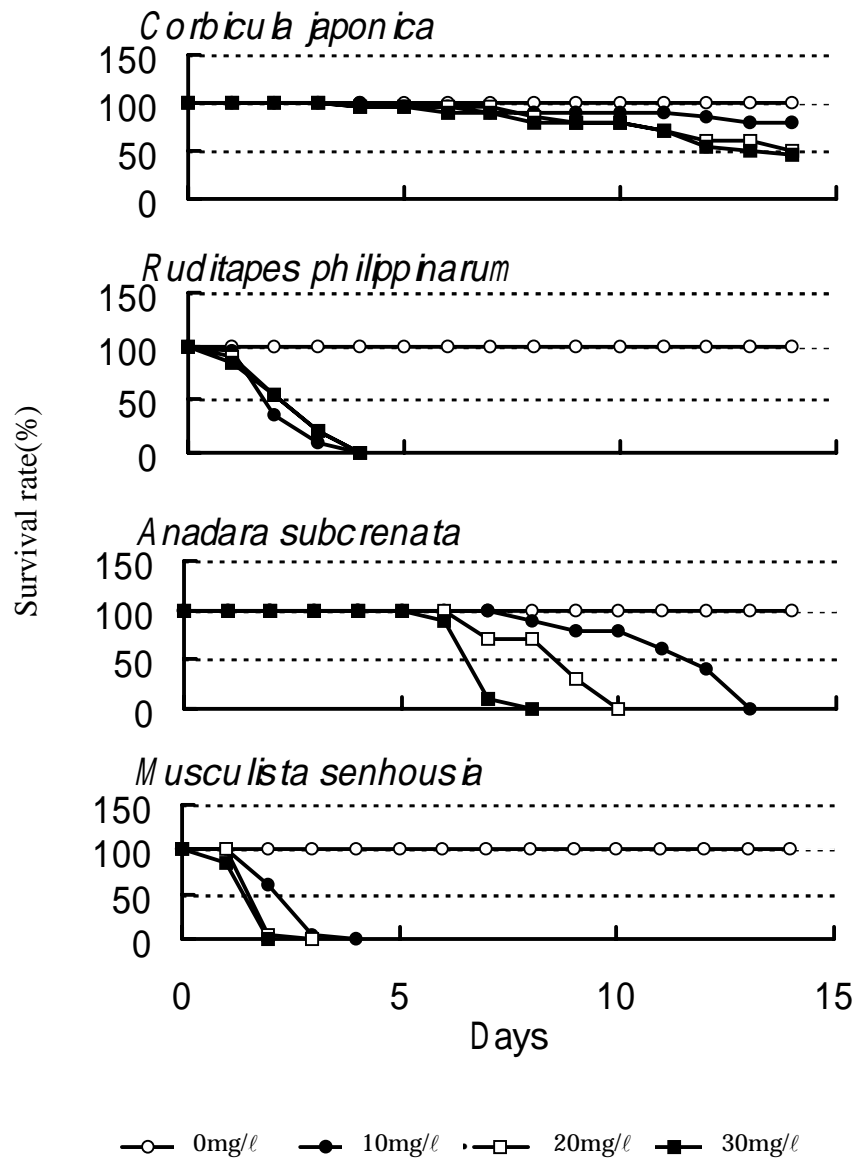


Fig. 3-5-5. Survival rate of four brackish water bivalves exposed to different concentrations of hydrogen sulfide. n=20.

Table 3-5-4. Tolerance of four brackish water bivalves to hydrogen sulfide concentrations.

Species name	Mean H ₂ S (mg/ℓ)	Lethal time(days)	
		LT ₅₀	LT ₁₀₀
<i>Corbicula japonica</i>	0	> 14	> 14
	10	> 14	> 14
	20	14	> 14
	30	13	> 14
<i>Ruditapes philippinarum</i>	0	> 14	> 14
	10	2	4
	20	3	4
	30	2	4
<i>Anadara subcrenata</i>	0	> 14	> 14
	10	12	13
	20	9	10
	30	7	8
<i>Musculista senhousia</i>	0	> 14	> 14
	10	3	4
	20	2	3
	30	2	2