

塩分と水温に応じたサルボウ (*Scapharca kagoshimensis*) の濾過速度と生残率の変化

宮本 康¹・初田亜希子¹

Changes in filtering and survival ratios of the ark shell *Scapharca kagoshimensis* depending on salinity and temperature.

Yasushi Miyamoto¹, Akiko Hatsuda¹

Abstract: To clarify the optimal environmental conditions for the ark shell *Scapharca kagoshimensis* in the brackish lagoon Nakaumi, its filtration and survival rates under various salinity (9.4-31.4 psu) and temperature (8-31d) were examined by laboratory experiments. The filtration rate varied with varying salinity and temperature conditions. The rate was highest at intermediate salinity (18.8-22.0 psu) and lowest at low salinity (9.4 psu). Under the low salinity condition, filtration was not observed. In addition, the filtration rate was highest at summer temperature (27d) and lowest at winter one (8d). The survival rate also varied with varying salinity and temperature conditions. Dead individuals were only observed under the combination of hot summer temperature (31d) and low salinity (9.4-15.7 psu) conditions. In particular, the combination of 31d and < 12.2 psu was critical for the shell, the survival rates were 0% and 25% at 9.4 psu and 12.2 psu, respectively. In the lagoon, where halocline is maintained whole through the year, the critical temperature and salinity for the shell's filtration activity and survival were only recorded in shallow zones above halocline. Therefore, it is suggested that shallow zones above halocline is not suitable habitat for the ark shell.

Key words: *Scapharca kagoshimensis*, filtration rate, survivorship, salinity, temperature

はじめに

中海はかつて日本屈指のサルボウ (*Scapharca kagoshimensis*) の産地であった。その当時、本種による湖水の濾過、および日本一の水揚げによる窒素やリンの持ち出しは、かつての清澄な中海を形作る上で重要な役割を担っていたに違いない。しかし 1950 年代以降、本湖における富栄養化の進行と同調して、本種の水揚げは著しく減少した (島根県農林水産部, 2006)。こうした資源量と水揚げの減少は湖底への有機物負荷を増大させ、栄養塩の内部負

荷を高めることで、今日の深刻な富栄養化の一因となっていることが十分に予想される。したがって、中海における本種の再生は、漁業振興のみならず、水質改善にも一石を投じるものと期待される。

中海におけるサルボウの分布は、古今を問わず、海水の流入と密接な関わりを持っているようである。大正時代中期におけるサルボウの主な漁場は大根島より南側の東部水域であったが、昭和初期にはこの漁場は荒廃し、南西水域と大根島北部の本庄水域へと移った (島根県水産試験場, 1920; 1934)。その主な理由は、境港の突堤延長による中海と日本

¹ 鳥取県衛生環境研究所 Tottori Prefectural Institute of Public Health and Environmental Science

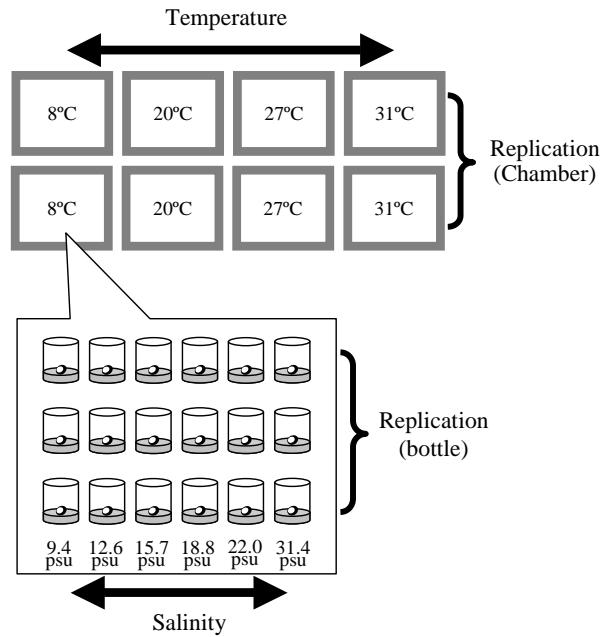


図1. 本実験の概念図.

Fig. 1. Schematic diagrams of the experimental design.

海との海水交換の減少であったと考えられている(早栗, 1955; 鳥取県水産試験場, 1959). その後, 漁場は本庄水域となり, 本種が中海の漁業統計から姿を消す直前の昭和40年代後半になると, 主な漁場は海水の流入口に最も近い江島近辺となった(門脇, 2005). そして現在, 本種の主な分布域は, 海水の流入口に近い大根島の東沖となっている(Sakurai et al., 2007). これら一連の報告は, サルボウの分布が海水流入の強い影響下にあることを強く示唆している.

では, サルボウの生息は, 海水流入に応じて変化するどのような環境要因に制限されるのか. 先行研究は, 特に塩分と溶存酸素, 底質の性状の影響を指摘している(福原ほか, 1986; 真崎・小野原, 2003; Nakamura, 2005). 中でも塩分は, 中海のような汽水湖では時間的・空間的に大きく変動するため, 生物の生息を決定する重要な要因として注目されている(Jeppesen et al., 1994; Yamamuro, 2000; 宮本, 2004). 同様に, サルボウの生息も塩分の強い影響下にある. 例えば, 本種の濾過速度や生残率は低塩分下で低下することが報告されている(福原ほか, 1986; Nakamura, 2005). しかし, 生物の塩分耐性は季節的に変化することが十分に予想されるにも拘わらず, 水温に応じた塩分耐性を調べた事例はない. こうした情報は, 今後, 中海においてサルボウの再生を試みる上で, 例えば再生の適地選択の折に不可欠なものになると思われる.

そこで本研究は, サルボウの塩分依存的な濾過速度と生残率が, 水温に応じてどのように変化するのかを室内実験により検証した. 中海で生じる塩分と水温の様々な組み合わせを室内で再現し, 各条件下における本種の濾過速度と生残率を定量化した. そして, 本実験の結果を踏まえて, 本種の活性を最大にする条件と致命的な条件を明らかにし, 最後に, 今日の中海においてどのような環境要因がサルボウの生息を制限しているのかを考察した.

方 法

材料と調査地

中海は高塩分の汽水湖であり, 水深3–4 mに明瞭な塩分躍層が季節に関係なく形成されている(清家, 2001). 上層の塩分は変動が大きい反面(約10–20 psu), 下層の塩分は比較的安定している(約30 psu)(Ishitobi et al., 2000). 今日におけるサルボウの生息は局所的であり, 大根島の東部水域に集中しているようである(Sakurai et al., 2007). 2006年の夏季に採集されたサルボウは2齢と思われる個体の出現頻度が最も高かった.

サルボウの飼育と実験方法

本実験で用いたサルボウは, 中海の米子空港沖(水深6–7 m, 塩分約28 psu)でSCUBA潜水により採集した. 採集した個体は室内の水槽内でエアレーションを施し, 室温下で畜養した. 畜養時は珪藻(*Chaetoceros gracilis*, ヤンマー製品)を一日に1回給餌した.

塩分と水温に応じたサルボウの濾過速度の変化を明らかにするために, 個体群の主要な構成要素である2齢以上の個体(殻長>20 mm, 軟体部乾燥重量>120 mg)を用いて室内実験を行った. 塩分は6段階, 水温は4段階に設定し, 全24通りの組み合わせの下でサルボウ個体の濾過速度と生残率を定量化した(Fig. 1). 中海の湖心では水温が約5–30°Cの範囲で変動することを考慮し(Ishitobi et al., 2000), 冬季の代表水温として8°C, 春季と秋季の代表水温として20°C, 夏季の代表水温として27°C, そして, 猛暑年の夏季水温として31°Cを設定した. 一方, 塩分の設定に関しては, 中海湖心の塩分が約10–30 psuの範囲で変動すること(Ishitobi et al., 2000), 15 psuの前後でサルボウの濾過速度が大きく変化すること(Nakamura, 2005)を考慮した. そして, 10–30 psuの範囲で15 psu近傍における濾過速度の変化を

検出しやすくするために、9.4・12.6・15.7・18.8・22.0・31.4 psu の6段階を設定した。塩分の調整は日本海で採水した海水 (31.4 psu) を濾過した後、脱イオン水で希釈することで行った。また、水温は恒温チャンバーを用いて設定した。このチャンバーは1つの温度のみが設定可能なため、1回の実験で1水温-6塩分の設定を3反復ずつ設けた (Fig. 1)。そして、各水温の実験を2回ずつ行い、合計8回の実験 (4水温×2反復) を行った (Fig. 1)。全体で、1つの塩分と水温に対して6反復 (3恒温層内反復×2恒温層間反復) を設け、合計144個体のサルボウを実験に供した。

飼育方法

約3 cmの厚さに砂を敷いた円筒型のプラスチック製容器 (直径95 mm, 高さ160 mm, 容積1000 mL) に、GF/Cで濾過後、脱イオン水を用いて設定塩分に調整した海水800 mlを入れた。そこに畜養した2齢以上の個体を殻高と殻長を測定した後に1個体ずつ入れ、これを恒温チャンバーに設置して給気を施した。その後、チャンバー内の温度を設定温度に調整した。

特定の塩分条件におけるサルボウの濾過速度は5日間の飼育で安定することが Nakamura (2005) の実験で示されている。そこで、実験開始の翌日 (1日目) より5日間、Nakamura (2005) に準じた飼育を行った。まず、各個体を前日の飼育に用いた水100 ml とともにビーカーに移した。その後、残りの飼育水を捨て、砂を濾過海水で洗浄した後、設定水温に加温・減温した飼育水700 ml を飼育容器に加え、最後にサルボウ個体を前日の飼育水100 ml とともに飼育容器へ戻した。飼育水は設定塩分に調整した海水に、ヤンマー製品の珪藻 (*Chaetoceros gracilis*) を海水700 ml あたり15 ml 加えたものである。本製品の細胞密度は1億 cells/mL である。

飼育水の交換の際に個体の生死を確認した。個体の死亡は (1) 殻が開いており刺激を与えても反応がない、もしくは (2) 殻の閉じ方が不完全で、かつ腐臭がすることを基準に判定した。

濾過速度の測定

サルボウ個体の濾過速度を定量化するため、サルボウ個体による接餌前・後の飼育水の Chl.a 濃度を実験最終日 (5日目) に測定した。上記の要領で飼育水を交換し30分間静置した後、接餌前の採水 (50 ml) をガラス製シリンジを用いて行った。その後2

時間が経過した後、同様に接餌後の採水を行った。そして、これらの Chl.a 濃度を測定した後、以下の式 (1) を用いてサルボウの濾過速度を算出した。

$$CR = ([V/t_s] \cdot \ln[C_0/C_1] - CR^*)/w_i \quad (1)$$

ここで V は飼育容器内の飼育水の容積、 C_0 と C_1 は接餌前と後 (t_s 時間後) の Chl.a 濃度、そして w_i は実験に供した個体 i の軟体部乾燥重量である。 w_i は実験に供した個体から無作為に抽出した29個体を対象に算出した以下のアロメトリー式 (2) を用いて求めた。

$$\text{Log}(w_i) = 2.359 \text{Log}(L_i) - 0.954 \quad (2)$$

ここで w_i は個体 i の軟体部乾燥重量、 L_i は個体 i の殻長である。軟体部乾燥重量は各個体の軟体部を80°Cのオープン中で3日間乾燥した後に測定した値である。なお、このアロメトリー式の回帰係数は0.849であった。

式 (1) の CR^* はサルボウがいない状態での見かけ上の濾過速度であり、以下の式 (3) で表される。

$$CR^* = (V/t_s) \cdot \ln(C_0^*/C_1^*) \quad (3)$$

ここで C_0^* と C_1^* は実験開始時と後 (t_s 時間後) の Chl.a 濃度である。 CR^* の測定は本実験で設定した全ての塩分と水温の組合せの下で行った。

統計解析

塩分と水温が濾過速度に与える影響を評価するために Split-plot design による分散分析を行った (Underwood, 1997)。チャンバーの効果が水温の効果にネストしていることを考慮し (Fig. 1)、以下のモデル式 (4) を用いた分析を行った。

$$CR = \mu + S + T + B(T) + S \cdot T + S \cdot B(T) + \varepsilon \quad (4)$$

ここで μ は全平均、 S は塩分による変動、 T は水温による変動、 $B(T)$ はチャンバーによる変動、そして ε は誤差である。分散分析では検出力を向上させるために従属変数を対数等に変換することが一般的であるが (Sokal and Rolf, 1995)、本分析の従属変数にあたる濾過速度 (CR) が対数値として算出されていること考慮し (式 (2) 参照)、変数変換は行わなかった。なお、水温31°Cでは死亡個体が現れ、濾

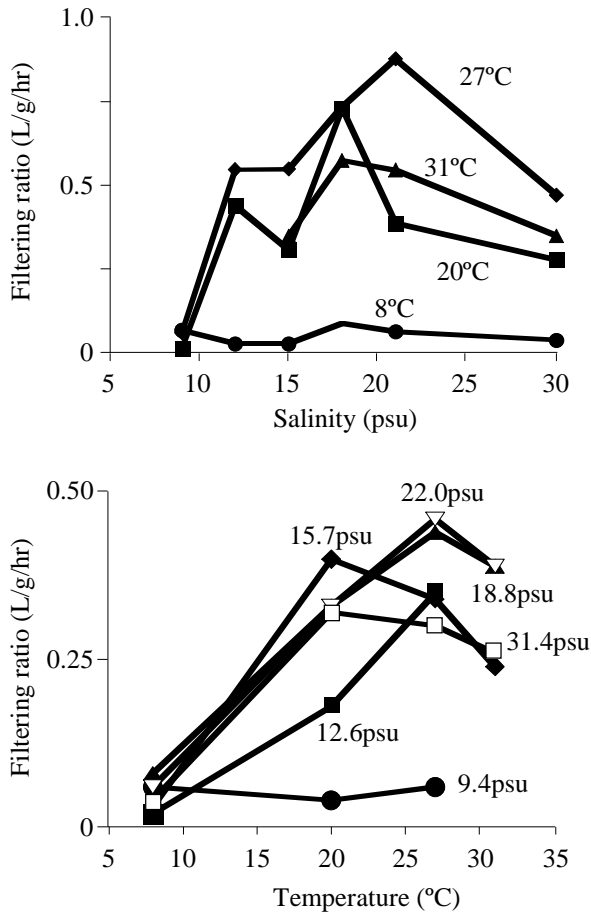


図2. 塩分と水温がサルボウの濾過速度に与える影響.

Fig. 2. Effects of salinity (upper) and temperature (lower) on the filtration rate of *Scapharca kagoshimensis*.

過速度の測定が行えないことが多かったため、この分散分析では水温 8°C・20°C・27°Cの結果のみを用いた。以上の分散分析は、SPSS 11.0J (SPSS Inc.)を用いて行った。

結 果

濾過速度

サルボウの濾過速度は塩分に応じて変化した ($F_{\text{Sal}} = 6.48, P < 0.001$)。中程度の塩分 (18.8~22.0 psu) で濾過速度は最大になる反面、低塩分 (9.4 psu) で最小となる傾向が、水温 20・27・31°Cの下で認められた (Fig. 2)。しかし、水温 8°Cの下では、そのような塩分変化に応じた濾過速度の変化は認められなかった (Fig. 2)。この水温に応じて塩分と濾過速度の関係が変化する傾向は、統計的に有意であった ($F_{\text{Sal} \times \text{Temp}} = 2.15, P < 0.05$)。

また、本種の濾過速度は水温に応じて変化した

た ($F_{\text{Temp}} = 29.41, P < 0.001$)。水温に応じた濾過速度の変化は、中程度の塩分の下 (18.8~22.0 psu) で顕著であり、濾過速度は水温 27°Cで最大、そして 8°Cで最小となった (Fig. 2)。しかし、9.4 psuの塩分下では、そのような水温変化に応じた濾過速度の変化は認められなかった (Fig. 2)。上記のように、塩分と水温の効果の交互作用が有意であったことから ($F_{\text{Sal} \times \text{Temp}} = 2.15, P < 0.05$)、塩分に応じて水温と濾過速度の関係が変化する傾向は、統計的にも裏付けられた。

生残率

サルボウの生残率も塩分と水温に応じて変化した (Fig. 3)。5日の飼育期間における生残率は、水温 31°Cにおける海水の 1/3 (12.6 psu) 以下の条件で著しく低下し、9.4 psuの塩分下で 0%、12.6 psuで 25%であった (Fig. 3)。なお、18.8 psu以上の塩分下では死亡が認められなかった。

考 察

サルボウの濾過速度は塩分と水温に応じて変化した。濾過速度は中程度の塩分 (18.8~22.0 psu) で最大になることが明らかになった (Fig. 2)。塩分低下による濾過速度の低下は有明海のサルボウでも報告がある (Nakamura, 2005)。有明海の個体は 15 psu (海水の約半分) 未満の塩分で濾過活動が認められなくなり、かつ、塩分が 10 psuを下回ると潜砂行動も見られなくなることが報告されている。中海のサルボウを用いた本研究においても同様の傾向が認められた。12.6 psu以下の塩分で濾過速度が著しく低下し (Fig. 2)、かつ、9.4 psuでは潜砂行動が認められなくなった。Nakamura (2005)は水温 18°Cで塩分低下に応じた濾過速度の低下を見出したが、こうした塩分低下に応じた濾過速度の低下傾向は、水温に拘わらず一貫していることが本研究の結果より明らかになった。したがって、低塩分は水温に拘わらずサルボウの濾過活動に不適であると結論できる。

また、濾過速度は高塩分の下 (31.4 psu) でも低下することが明らかになった (Fig. 2)。しかし、高塩分下における濾過速度の低下は低塩分下ほど顕著ではなく、かつ常に潜砂行動が認められた。そして、この傾向は全ての水温条件で共通していた。したがって、海水に近い高塩分は、本種の濾過速度に若干の低下を引き起こすものの、濾過活動を停止させるほど不適なものではないと言える。

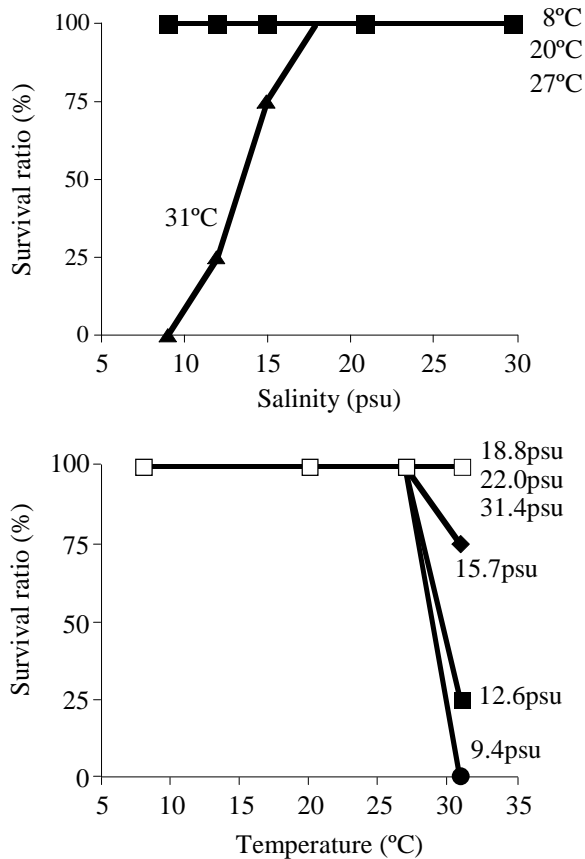


図3. 塩分と水温がサルボウの生残に与える影響。
Fig. 3. Effects of salinity (upper) and temperature (lower) on the survival of *Scapharca kagoshimensis*.

水温に応じた濾過速度の変化は、中程度の塩分下で顕著であった (Fig. 2). 濾過速度は 18.8 psu と 22.0 psu の塩分下では水温 27°C で最大、反対に 8°C で最小となった. なお、水温 8°C では塩分に拘わらず濾過活動がほとんど認められなかった (Fig. 2). 20°C 以下の水温における本種の水温低下に応じた濾過速度の低下は有明海の個体でも認められている (Nakamura, 2005). 一方、水温 20°C 以上での水温と濾過速度の関係は報告例がない. 本研究では、27°C の水温で濾過速度が最大になり、さらに 31°C になると濾過速度がやや低下することが示された. 27°C が夏季の代表水温であり 8°C が冬季の代表水温であることを考慮すると、中海産サルボウの濾過活動は冬季に著しく低下し、夏季に最大になると結論できる.

生残率も塩分と水温に応じて変化する傾向が認められた. 中海産サルボウの生残率は、猛暑年の夏季水温 (31°C) における低塩分条件 (<12.6 psu) で著しく低下した (Fig. 3). こうした高水温、低塩分の条件は、中海では 7-8 月の浅場環境に該当する. 過

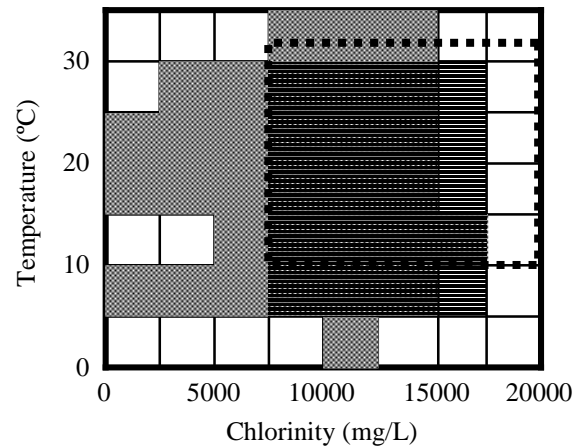


図4. 中海の上層 (薄い領域)・下層 (濃い領域) における水温と塩分の変動域とサルボウの活動できる領域 (破線の内側). 水温と塩分の領域は湖心における過去 15 年間 (1990-2004) の情報に基づく (国土交通省水門水質データベース).

Fig. 4. Schematic representation of the results: Temporal variations in salinity and temperature in epilimnion (light shade) and hypolimnion (dark shade) during past 15 years (1990-2004) at the center of lake Nakaumi in comparison with active conditions (inside the broken line) for *Scapharca kagoshimensis*.

去約 80 年間における松江气象台の観測結果は、中海周辺は 7 月が一年を通して降水量が最も多いことを示している (気象統計情報). さらに、夏季における降水量の増加は、躍層上部の浅場の塩分低下を伴う一方、躍層下部の深場の塩分低下は伴わないことが示されている (福井ほか, 1997). これらの点から、沿岸域の浅場は、夏季にはサルボウにとって致命的な条件になりやすいことが示唆される.

明瞭な塩分躍層が形成される中海では、塩分と水温の変動幅が浅場と深場で大きく異なる. 前述の通り、塩分・水温ともに浅場 (躍層上部) における変動幅は、深場 (躍層下部) に比べて著しく大きい (Fig. 4). 浅場の塩分と水温の変動領域は、サルボウが摂餌を行えない領域にも大きな広がりをもつことに加え、致命的な領域とも重複がある (Fig. 4). これに対し、深場の塩分と水温の変動領域はサルボウが摂餌を行う領域と重複が大きいことに加え、致命的な領域との重複がない (Fig. 4). したがって、塩分と水温の環境に関しては、中海産サルボウの生息に適しているのは躍層上部の浅場ではなく、躍層下部の深場であることが示唆される. この点は、中海におけるかつての主なサルボウ漁場が塩分躍層の下部にあたる水深 6 m 前後の深場であった事実とも符合する (島根県水産試験場, 1920).

しかし、今日の中海では、深場の広い水域においてサルボウの生息が認められていない。この事実は、塩分と水温以外の環境要因が今日におけるサルボウの生息域を制限していることを示唆している。そして、そのような要因として溶存酸素と底質が候補に挙げられている。中海においてサルボウの生息適所を把握して漁場を再生し、湖内に健全な物質循環を取り戻すために、今後、溶存酸素と底質を含む他の環境要因が本種の濾過速度と生残率に与える影響を評価する必要がある。

謝 辞

中海漁業協同組合の石倉正夫氏と島根大学生物資源科学部の山口啓子博士には、中海におけるサルボウの空間分布に関する情報を提供していただいた。また、中海でのサルボウ採集の折は、島根大学中海分室の松本貞夫氏にご協力いただいた。さらに、中海の塩分と水温の情報を得るために、国土交通省の水門水質データベースを利用させていただいた。以上の機関と方々に、この場を借りて厚くお礼申し上げます。なお、本研究は鳥取県衛生環境研究所の調査研究「アマモ・サルボウを用いた中海の水質浄化に関する研究」(2007年4月～2009年3月)の一環として実施した。

引用文献

福井克也・山根恭道・清川智之・内田 浩・中村幹雄 (1997) 宍道湖・中海水産振興対策検討調査事業貧酸素水調査。鳥根県水産試験場事業報告(平成9年度): 247-261。
 ルボウ養殖種苗の塩分耐性。南西水研報 20: 1-12。
 Ishitobi, Y., Hiratsuka, J., Kuwabara, H. and Yamamuro, M. (2000) Comparison of fish fauna in three areas of adjacent eutrophic estuarine lagoons with different salinities. *J. Mar. Syst.*, 26: 171-181。
 Jeppesen, E., Søndergaard, M., Kanstrup, E., Petersen, B., Eriksen, R. B., Hammershøj, M., Mortensen, E., Jensen, J. P. and Have, A. (1994) Does the impact of nutrients on the biological structure and function of brackish and freshwater lakes differ? *Hydrobiologia*, 275/276: 15-30。

門脇義雄 (2005) 中海の赤貝漁。「宍道湖・中海の貝類」(古林敏彦・山口勝秀・黒崎光恵・越川敏樹編), pp. 46-48. 鳥根県立宍道湖自然館, 出雲市。
 気象統計情報(気象庁 HP) <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>
 真崎邦彦・小野原孝幸 (2003) 有明海湾奥部におけるサルボウの漁業実体と分布状況。佐有水研報 21: 29-36。
 宮本 康 (2004) 汽水湖の生物相: 塩分による直接・間接的な生物相の維持。LAGUNA(汽水域研究) 11: 97-107。
 Nakamura Y. (2005) Suspension feeding of the ark shell *Scapharca subcrenata* as a function of environmental and biological variables. *Fish Sci* 71: 875-883。
 Sakurai, M., Yamaguchi, K., Ishikura, M. and Ueda, K. (2007) Environmental examinations for habitat and tolerance of *Scapharca subcrenata* in Lake Nakaumi. *Proceedings of International Symposium Restoration and Sustainability of Estuaries and Coastal Lagoons*. p 222。
 清家 泰 (2001): 汽水域の水質特性。「汽水域の科学」(高安克巳編), pp. 10-18. たたら書房, 米子市。
 鳥根県水産試験場 (1920) 大正九年度鳥根県水産試験場事業報告. 108pp。
 鳥根県水産試験場 (1934) 中海赤潮調査報告. 94 pp。
 鳥根県農林水産部 (2006) 宍道湖・中海水産資源維持再生構想。
 Sokal, R. R. and Rohlf, F. J. (1995) *Biometry: the principals and practice of statistics in biological research*. WH Freeman & Company, New York。
 早栗 操 (1955) 中海の漁業概観。鳥取県水産試験場研究報告, 35: 1-15。
 水門水質データベース(国土交通省 HP) <http://www1.river.go.jp/>
 鳥取県水産試験場 (1959) 中海干拓基本調査報告書. 374 pp。
 Underwood, A. J. (1997) *Experiments in ecology: their logical design and interpretation using analysis of variance*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K。
 Yamamuro, M. (2000) Abundance and size distribution of sublittoral meiobenthos along estuarine salinity gradients. *J. Mar. Syst.*, 26: 135-143。