

宍道湖ヤマトシジミ個体群の水質浄化機能の評価解析

中村 義 治*・寺 澤 知 彦**・中 村 幹 雄***・三 村 信 男****

1. は じ め に

宍道湖は典型的な汽水性の閉鎖性水域であり、近年特に水質の悪化と夏季の貧酸素水塊形成が問題となってきた(図-1)。流入する主な河川は最奥部の斐伊川であるが、この他にも小水路が多数ある。外域との海水交換は狭い大橋川に限られており、その先は同様の閉鎖性水域の中海である。近年、負荷量の増加が宍道湖の浄化機能を上回り、水質と底質が劣化して貧酸素水が広範囲に形成されるようになり、この結果としてベントスの生息域を縮小させた(島根県水産試験場, 1998)。ベントスの減少は更に水質浄化機能を衰えさせ、富栄養化と貧酸素化を助長することになる。このような悪循環を断ち切るためには宍道湖の生物浄化能力を的確に評価することが、今後の環境修復策を考える上で重要な課題となる。

宍道湖の水質浄化を担うベントスのなかで圧倒的な優先種はヤマトシジミ (*Corbicula japonica*) である。島根県内水面水産試験場 (1998) の調査によると、底生生物のうち湿重量では 97.5% がヤマトシジミで占められている。また、水産有用種としても重要な位置を占めており、宍道湖のヤマトシジミ漁獲量は宍道湖全体の 93.4% に上る。ヤマトシジミの生物量を考慮すると水質浄化機能も多大であると推測され、定量的な評価が望まれる。

本論文では、ヤマトシジミの代謝特性を反映した個体群動態をモデル化した。そして、機能を組み入れた物質循環モデルを開発し、宍道湖の水質浄化機能を調べた。

2. ヤマトシジミ個体群の生物機能モデル

宍道湖生態系における物質循環解析として Nakata ら (2000) はヤマトシジミの摂餌と排出を考慮した低次生態系モデルを開発した。この例でもヤマトシジミの浄化量を評価しているが、生物量を現地調査データから設定しており、いわば境界条件としての取り扱いとなっている。実際には生物量やその代謝速度は、水温・水質の変化に連動して変動が大きいことが知られており、解析精度を向上させるためにもヤマトシジミの生物量と代謝特性を詳細に把握することが重要となる。こうした視点の下で、ヤマトシジミの代謝特性をできるだけ詳細にモデル化し、宍道湖物質動態に占めるヤマトシジミの役割を再評価するための検討を行った。

最初に物質循環モデルを構成するため、宍道湖の優占種であるヤマトシジミの殻長や重量等に関する知見を整理して表-1 に示した。軟体部重量と殻長の関係はアロメトリック式で精度よく評価できる。重量構成比等については島根県水産試験場の分析値を基に設定した。

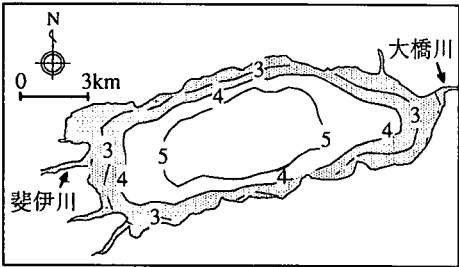


図-1 宍道湖の水深分布と計算領域
湖岸域 (影部), 湖央域 (白色部)

表-1 ヤマトシジミの生物パラメータ

項 目	設定値
軟体部重量: 殻重量	20 : 80
軟体部炭素含有量 (%)	0.198 (乾重比)
軟体部乾重: 湿重比	17.9%
軟体部 C/N	7.5
殻長と軟体部重量の関係	$W(\text{mg}) = 0.001 \times l(\text{mm})^{2.945}$

(1) 個体成長モデル

宍道湖の物質循環モデルに至る第一段階として、ヤマトシジミの個体成長モデルを作成した。このモデルでは、低次生態系モデルとの連成を念頭に置き、1 個体の軟体部の炭素量 B 及び成長過程 dB/dt を、摂餌による増加、呼吸、擬糞を含む排糞、産卵・放精による損失の差し引きによって表現する。

* 水博 (独)水産総合研究センター水産工学研究所 環境分析研究室長
** (株)シーティアイ
*** 水博 島根県内水面水産試験場長
**** 正会員 工博 茨城大学教授 広域水圏環境科学教育研究センター

$$\frac{dB}{dt} = B_1 + B_2 - B_3 - B_4 - B_5 - B_6 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 B_1 : 摂餌速度(植物プランクトン)、 B_2 : 摂餌速度(デトリタス)、 B_3 : 擬糞排出速度、 B_4 : 排糞速度、 B_5 : 呼吸速度、 B_6 : 産卵・放精である。

島根県水産試験場(1998)の実験によると、小貝(殻高0.53 cm~1.54 cm)、中貝(殻高1.82 cm~1.91 cm)、大貝(殻高2.06 cm~2.11 cm)の三段階に区分し、濾過水量を測定すると、各殻長ともに水温20°C~25°Cに極大値を持つ曲線で表現されており、最適な摂餌水温がある(島根県水産試験場, 1998)。こうした生物応答は他の代謝でも見出されており、例えばキタムラサキウニの摂餌やカジメの光合成速度も同様の水温応答を示す。Kawamata (1997) はこうしたキタムラサキウニの摂餌圧の季節変動をモデル化し、実測との整合性を評価した。ヤマトシジミの濾水速度についても同様な考え方で評価する方針とし、以下のようにモデルを構成した。

a) 濾水速度 F ($l \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$) と摂餌速度 ($mgC \cdot day^{-1}$)

$$\begin{aligned} B_1, B_2 &= F \cdot POC \cdot 24h \\ F &= G_{max} \cdot \theta \cdot (1 - \theta) \cdot POC \dots\dots\dots (2) \\ \theta &= \left(\frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \right)^b \end{aligned}$$

ここで、 θ は水温応答を評価する関数であり、 G_{max} は最適水温の濾水速度、 b は速度曲線の定数、 T は水温、 T_{max} 、 T_{min} はそれぞれ代謝の最大水温と最小水温である。このモデルでは T_{max} 、 T_{min} と b によって、ある温度で濾水速度の最大値を持つ上に凸な曲線を形作る。ヤマトシジミを三段階に区分したときの濾水速度は図-2のとおりである。実際の摂餌量は濾水速度と餌になる植物プランクトンとデトリタスの濃度を乗じて評価される。

b) 糞・擬糞排泄速度 D ($mgC \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$)

島根県水産試験場報告によると、ヤマトシジミ乾燥軟体部1gあたりの糞と擬糞の排出量は $33.4 mg \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ である。しかし、一般に二枚貝の排糞量は餌濃度、水温、個体の大きさ(殻長や個体重)によって異なるので体サ

イズや餌濃度の違いに適用するための工夫が必要となる。二枚貝は餌濃度が高くなると、糞・擬糞排出量が指数関数的に増加することが知られていることから、排糞量はマガキやムラサキイガイの知見(Tenore ら, 1973)に従って式(3)のようにモデル化し、測定されたサイズのヤマトシジミと整合するようにパラメータを調整した。

$$\begin{aligned} B_3, B_4 &= D \cdot 24h \\ D &= \alpha \cdot \exp[\beta \cdot POC] \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここで、 α は最低餌濃度のときの摂餌速度、 β は定数、 POC は餌料濃度である。懸濁物の濾過から擬糞・糞の排出に至る過程は、水中からの懸濁物除去と底質への有機物輸送の面で重要であるため、擬糞の排泄速度は実験により確かめる必要がある。

c) 呼吸速度 ($mgO_2 \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$)

呼吸速度については相崎ら(1998)が詳細な室内実験を実施した。この成果により水温と殻長の関数として呼吸速度を求めることができる。呼吸速度は5°Cから25°Cまでの区間で指数関数的に増加するが、25°C付近を境にして、それ以上の水温では逆に低下する。そこで濾水速度モデルに習って、式(2)のように25°Cを最適水温とする曲線で温度応答を定式化した。呼吸速度は殻長によっても異なる。殻長と呼吸速度の関係を20°Cにおける殻長10 mm~25 mmのヤマトシジミについて整理した上で、上記の温度応答式に適用した。これらの呼吸に関する知見からモデルを整備した結果が図-3である。殻長が大きいほど呼吸速度が大きくなるが、単位重量あたりの呼吸量でみると大型の個体のほうが小さい呼吸量となる。

d) 成熟と産卵

ヤマトシジミの産卵期は夏季から秋季の間である。この間に体重の相当量が減少すると考えられるが、産卵・放精に伴う体重の減少量について詳細な知見はない。殻長の季節変化をみると、春季から夏季にかけて成長するものの、秋季から翌年の春季までは殻長はほとんど一定

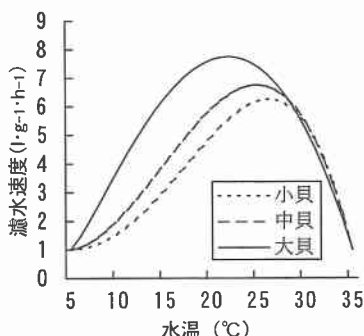


図-2 ヤマトシジミの濾水速度

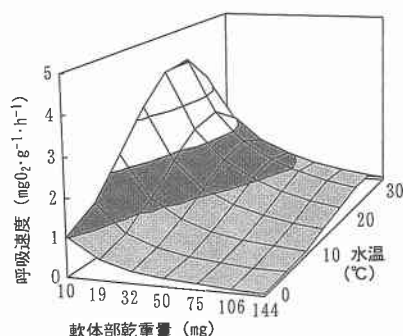


図-3 ヤマトシジミの呼吸速度

である。産卵・放精した軟体部の損失分を冬季から春季の期間で補填しているといえる。そこで産卵後から翌年の春季に至る成長量が実測に整合するように、産卵損失量を調整することにした。8月～9月の2か月間を産卵期とし、この間に一定速度で産卵・放精すると仮定したときに、数ケ年にわたる長期的な個体の成長曲線が、実際のヤマトシジミの成長曲線と整合するようにした。なお、生物学的最小形は殻長15 mm程度であり、新規加入群は1年後には成熟していることになる。

こうして構築したヤマトシジミ個体成長モデルにより、水温と餌料濃度の季節変動の下で軟体部炭素量の変化を再現した結果が図-4である。水温と餌料は観測値を調和解析し、近似式を作成した上で条件とした。

このシミュレーションでは春季を基点として、稚貝の成長を5年間にわたり追跡した。春季から夏季の間に急激に成長するが、その後の産卵・放精によって短期間に個体重は減少する。秋季から次年の春季に至る間にはほとんど成長しておらず、身が痩せた状態である。こうしたモデルの応答は一般的な二枚貝の成長過程の知見と整合するが、ヤマトシジミでは十分な検証データがないのが現状である。そこでモデルの再現性については、個体レベルではなく、以下に示す個体群動態モデルを基に、殻長組成の詳細なデータと比較・検証することとした。

(2) 個体群動態モデル

個体成長モデルで評価される時事刻々の成長速度を基にして、殻長組成の成長過程を評価する個体群モデルを整備した。ヤマトシジミ個体群の時間変化は以下の式により評価される。

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial UN}{\partial t} = -(m+f) \cdot N \cdots \cdots (4)$$

ここで、 N は時刻 t における殻長 l の個体数密度、 U は殻長の成長速度、 m は年間の自然死亡係数(0.2)、 f は漁獲による損失係数(ここでは漁獲を考慮しないため零)である。殻長の成長速度 U は、個体成長モデルから

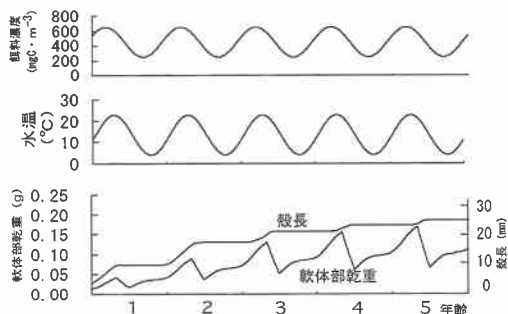


図-4 餌料変動(水温・餌濃度)およびヤマトシジミ軟体部と殻長の成長

軟体部炭素量の増分を予測した後、殻長の成長速度に換算して個体群モデルに反映した。

島根県内水面水産試験場では4区分の年級群について、漁獲損失のない試験区において殻長の成長過程を1ヶ月ごとに調査し、殻長組成の変化を調べた。この殻長組成データと宍道湖の環境データに沿って、個体群動態モデルを検証した。

5月以降の稚貝の殻長組成変化について、モデルの予測結果と測定で得られた殻長変動を比較したところ、図-5に示すようにほぼ整合する結果が得られた。初期の春季から夏季には成長に伴ってモードの位置が変化するが、9月以降には成長が抑えられモードは一定となる。このようにヤマトシジミの殻長は水温の上昇や餌量濃度の増加に伴い、5月～8月にかけて急激に成長するが、その後の産卵や水温の低下により、秋季以降は殻長の成長がとまる周年変動が再現された。

(3) 物質循環モデル

個体群成長モデルでの検証により、ヤマトシジミの個体成長モデルは代謝過程の実態を反映していると判断できる。宍道湖の窒素循環におけるヤマトシジミの役割を検討するため、この個体群動態モデルと浮遊系の低次生態系モデルとを結合した。低次生態系モデルは宍道湖の水質環境を栄養塩やプランクトン、デトリタス等で構成される低次栄養段階の生態系で模擬し、系内の生物化学的な物質循環過程を定量的に見積る方法である(Kremer・Nixon, 1978)。ここでは、宍道湖をヤマトシジミの生息する水深4 mまでの湖岸域と、以深の湖央域に分け、湖内の物質循環をボックスモデルによって解析することにした。なお、鉛直方向には1 m層に区分した。

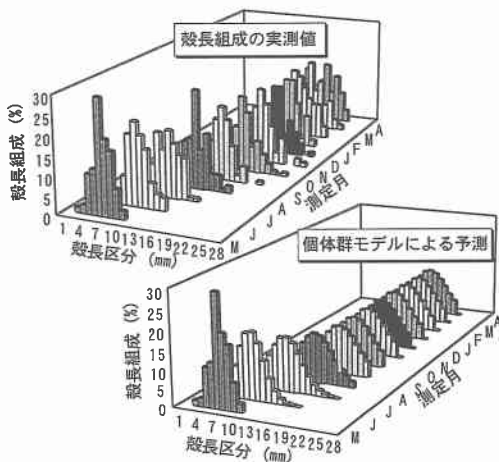


図-5 殻長組成変化の実測値とモデル予測との比較

3. 解析結果と考察

(1) 解析の条件

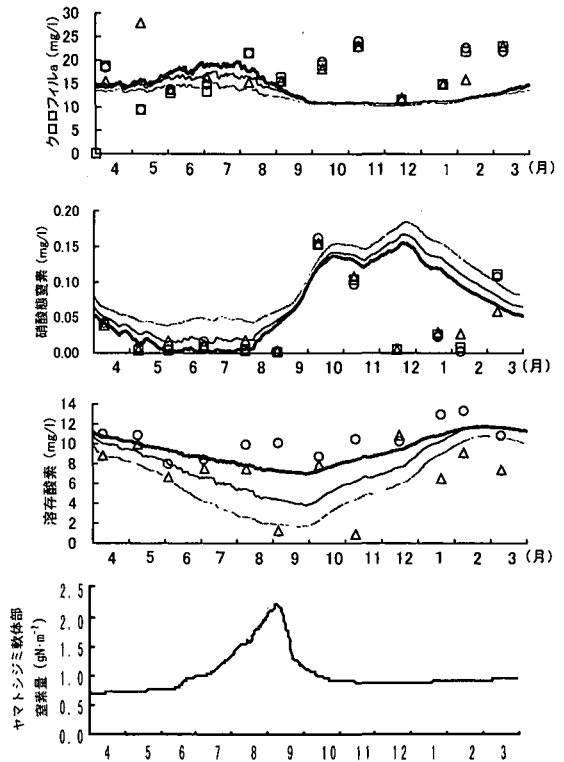
表—2 宍道湖水質循環解析のモデルパラメータ

項 目	設定値
[植物プランクトン]	
最大可能成長速度 (day ⁻¹)	$0.59 \times \exp(0.0633t)$
最適光強度 (cal·cm ⁻² ·day ⁻¹)	50.0
NH ₄ -N 摂取半飽和定数 (μmol/l)	2.0
NH ₃ -N 摂取半飽和定数 (μmol/l)	3.0
呼吸速度 (day ⁻¹)	$0.03 \times \exp(0.0524t)$
窒素クォータの上限值	8.0
C/Chl a 比 (重量比)	50.0
C/N 比 (重量比)	7.5
[動物プランクトン]	
最大可能摂餌速度 (day ⁻¹)	$0.2 \times \exp(0.0693t)$
Ivlev 定数 (m ³ ·mgC ⁻¹)	0.007
同化効率 (%)	70.0
C/N 比 (重量比)	5.0
[その他パラメータ]	
デトリタスの分解速度 (day ⁻¹)	$0.003 \times \exp(0.0693t)$
デトリタスの C/N 比 (重量比)	13.5
溶存態有機物の分解速度 (day ⁻¹)	$0.001 \times \exp(0.0693t)$
溶存態有機物の C/N 比 (重量比)	15.0
[ヤマトシジミ]	
最大濾水速度 (l·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	23.0
温度関数の指数	1.7
排糞速度の定数 α, β	0.18
最大呼吸速度 (l·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	0.18
温度関数の指数	1.9
有機堆積物の分解速度 (day ⁻¹)	$0.002 \times \exp(0.0693t)$

(2) 解析結果

宍道湖における窒素循環解析の結果の整合性を確認するため、水質項目について、計算結果(図—6)と観測値との比較を行った。ここでは島根大学の中海・宍道湖水質月報の観測項目から、湖央におけるクロロフィル a, 硝酸態窒素, 溶存酸素濃度について、検証した。また、同時に予測されるヤマトシジミの軟体部乾重量の季節変動を併記した。

生態系物質循環解析は1年間を対象とし、この間の駆動因子となる水温変動は、島根大学による中海・宍道湖水質月報(1998~1999年)の測定値を用いた。境界条件となる中海の水質も同月報から設定し、中海との間の交換水量は島根県内水面水産試験場の自動監視システムの測定結果から求めた。河川からの淡水流量と栄養塩や有機物負荷量は、公共用水域水質監視点がある斐伊川観測結果を基にして流量と負荷量の相関式を作成し、流量に応じた負荷量変動を算定した。その他の中小河川については知見がないため、流域面積から流量を推定し、これに斐伊川の流量-負荷量相関式を当てはめた。以上の計算条件の下で、表—2に示したモデルパラメータでシ



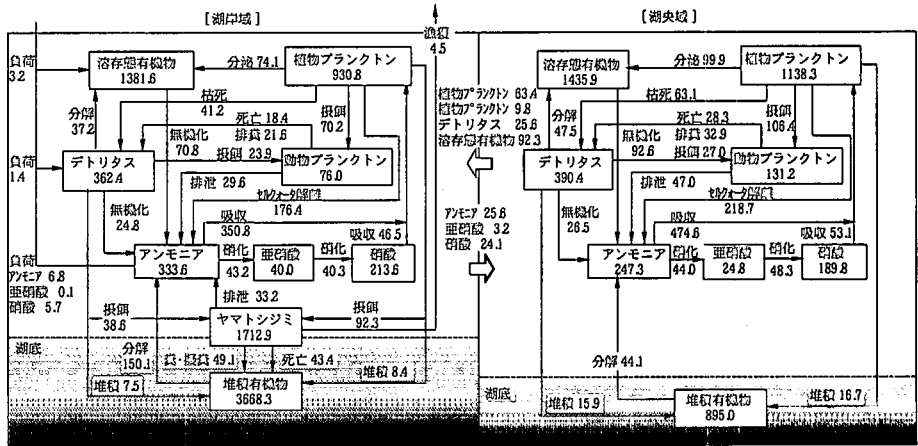
図—6 モデルの再現性検証とヤマトシジミ生物量の年変動
観測値は○：上層，□：中層，△：下層，計算値は太線：-1 m，細線：-2 m，点線：-7 mを表す
ヤマトシジミ軟体部窒素量は単位面積の生物量を示す

ミュレーションを行った。

クロロフィル a は秋季の現存量に相違があるものの、夏季や冬季の状況は再現された。硝酸窒素は変動が大きい、夏季に枯渇し冬季に増加する変動が示された。溶存酸素は湖央であるため、夏季には下層で貧酸素化する状況が捉えられている。ヤマトシジミ乾重量は水温と植物プランクトンの増加に伴って春季から夏季に増加するが、産卵後は次年までほぼ平衡となる。

主要な水質項目の再現性は妥当であると考えられることから、この結果を基にして宍道湖の窒素循環を解析した。ここではヤマトシジミの現存量が大きくなるとともに、底層での貧酸素化が進む夏季(7~8月)に着目した。図—7に生態系要素の現存量と窒素循環過程を示す。

湖岸域では陸域からの負荷により、湖央域よりも無機態窒素が多い。無機態窒素は湖岸域で消費された後に湖央域に輸送される。一方、湖岸域では植物プランクトンとデトリタスがヤマトシジミに摂餌されるため、有機物が少ない傾向にある。ヤマトシジミの摂餌量は植物の栄養塩摂取より多く、結果として湖央域の有機物も取り込んでおり、宍道湖全体の水質浄化に寄与しているといえ



図一七 モデルにより推定した宍道湖における夏季の窒素循環
現存量は $\text{mgN} \cdot \text{m}^{-2}$, 循環量は $\text{mgN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$

る。湖岸域ではヤマトシジミをめぐる循環量が浮遊系に比べて大きく、沖合よりも活発な窒素循環を担っている。

ヤマトシジミは宍道湖の窒素保持としても大きな役割を果たしている。ヤマトシジミは植物プランクトンの2倍程度の現存量があり、溶解態有機物に匹敵する。また、ヤマトシジミを介して水中から除去される有機物は擬糞・糞として排泄され、春季からの経過により多量の堆積有機物が湖岸域に蓄積されている。漁獲による系外への窒素除去の効果は小さいが、年間に渡り継続されていることから、累積値としては十分な効果があるといえる。

この堆積有機物は湖中央域よりも多いが、湖岸域が貧酸素化しないのは、浅いために植物プランクトンによる供給のほか、現実には波浪などの物理的な効果により酸素が常時供給されているためであると考えられる。これに対して、湖中央域は水深が深いので、湖岸域よりも堆積有機物量は少ないものの表層からの酸素供給が十分でなく、貧酸素化しやすいといえる。

参考文献

- 相崎守弘・盛岡美津子・木幡邦夫 (1998): ヤマトシジミを利用した汽水域の水質浄化に関する基礎的研究, 用水と排水, 40 (2), pp. 34-39.
- 島根県水産試験場 (1998): 島根県水産試験場研究報告, 第9号, 192 p.
- 島根県内水面水産試験場 (1998): 島根県内水面水産試験場事業報告, 230 p.
- 島根大学理学部化学科環境分析化学研究室 (1998): 中海・宍道湖水質月報 1998年4月～1999年4月.
- Kremer, J. N. and S. W. Nixon (1978): A coastal marine ecosystem, simulation and analysis, Ecological Studies 24, Springer-Verlag, 234 p.
- Tenore, K. R. and W. M. Dunstan (1973): Comparison of feeding and biodeposition of three bivalves at different food levels, Mar. Biol. 21, pp. 190-193.
- Kawamata, S. (1997): Modelling the feeding rate of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus* (A. Agassiz) of kelp, J. Exp. Mar. Biol. and Ecol., 210, pp. 107-127.
- Nakata, K., F. Horiguchi and M. Yamamuro (2000): Model study of lakes Shinji and Nakaumi—a coupled coastal lagoon system, J. of Mar. Sys., 25, No. 3-4, pp. 145-149.