

モデル解析に基づく汽水域生態系機能評価

寺澤知彦*・中村義治**・向井哲也***
青木伸一****・山下俊彦*****

島根県の宍道湖を対象として、汽水域における生態系の構造と機能を評価する手法を、生態系物質循環モデルによるシミュレーションを利用して検討した。宍道湖底生生物の優先種であるヤマトシジミに着目して、その生息環境という視点で、現地調査とシミュレーションの結果に基づいて HEP による生息環境の評価を行なった。ヤマトシジミの生息環境は、水深帯と溶存酸素濃度によって制限を受けていることが分かった。一方で、ヤマトシジミは宍道湖の生態系の形成に対してもインパクトを持っている。適正なヤマトシジミ資源量が、生態系を持続的に維持していくために必要な要因であるため、資源豊度が異なる場合の生態系の応答を調べた。適正な資源量は約 3 万 ton であると推定され、そのときの生態系の構造を物質循環スペクトルに基づいて整理した。

1. はじめに

筆者らは島根県の宍道湖を対象として、湖内に形成されている生態系の構造と機能を評価する手法を検討してきた(中村・田口, 2000)。従来の水域における生態系評価では、系を構成する生物の現存量把握や、その生物群集の構造を多様度な指標で示すなど、量的な検討が主である(中村, 2000)。しかし、生態系の構造は量での議論のみではなく、構成要素間の物質やエネルギーの輸送といったフラックスでの検討も重要となる。健全な生態系の姿を量とフラックスの両面で評価するため、生態系保全の指標となる包括的な評価手法を提案する。

生態系の構造と機能を評価するには、構成要素の量と要素間のフラックスを同時に測定することが必要となる。水域における現地調査は、量を測定すること自体がたいへんな量力を必要とする作業であり、このうえで要素間の物質・エネルギー輸送を測定するのは現実的ではない。ここでは簡便に構成要素量とフラックスを定量的に評価できる手法として、生態系モデルによるシミュレーションを検討材料とした。1998 年を対象とした宍道湖の生態系物質循環シミュレーションを行い、その結果を利用しては宍道湖における生態系・水質の現状と、その構造と機能を評価する手法を検討した。シミュレーションの詳細については、すでに報告しているので(中村ら, 2001) 本論文では割愛する。

モデルによる物質循環解析結果に基づく生態系評価の視点として、宍道湖生態系の中で中心的な役割を果たすヤマトシジミの生息環境、生態系要素間の物質循環、生態系自体の健全さを示す指標として健康度に着目した検討を行なった。

ヤマトシジミの生息環境は評価では、シミュレーションで得られる環境項目のうち、塩分や溶存酸素などヤマ

トシジミの生息環境として重要な項目について、適性指数 (Suitability Index : *SI*) を定義し、現況の生息環境とを相対的に評価した。いわゆる HEP(Habitat Evaluation Procedure) を適用した評価手法である。

物質循環系の評価は、生態系モデルで考慮した構成要素の現存量と要素間の物質収支を集計したもので、宍道湖生態系における全循環経路を定量的に評価した。この物質循環解析に基づいて、現況の宍道湖生態系を評価する基準として「健康度」を定義した。健康度は宍道湖における健全な生態系の姿を相対的に評価する指標である。さらに、生態系要素の量とその転換速度から健全な生態系の構造を整理するため、「物質循環スペクトル」を提案した。物質循環スペクトルは、生態系の基本構造を検討する手法であり、複雑度や転送効率など生態系全体の評価指標を包括的に表現している。

2. ヤマトシジミの生息環境評価

(1) ヤマトシジミ生息を制限する環境要素

生態系評価の視点として、その系を代表する生物種の生息環境に着目して評価する手法がある。HEP 法はその代表的な手法であり、宍道湖を代表するヤマトシジミの生息環境評価に適用した。HEP 法では個々の環境要素に対して適性指数 *SI* を求め、得られた *SI* を集計して生息域の評価指標 *HSI* を評価する。*HSI* はそれだけで生息環境を評価するだけでなく、人為的な環境改変のインパクトや代償措置の効果を想定的に評価する指標である。今後の宍道湖における環境改変や修復に対する評価基準として HEP 法を位置づけた。

島根県水産試験場 (1998) では宍道湖における豊富な現地調査データを分析し、ヤマトシジミとその生息環境との関連を整理している。図-1 には *SI* として評価する環境項目を検討する参考として、島根県水産試験場研究報告 (1998) から、生息水深、溶存酸素飽和度、塩素量と個体数の関連を転記した。

水産試験場研究報告によると、ヤマトシジミの生息範囲は水深 4.0 m 以浅、DO 飽和度 50% 以上、IL 14% 未満、

* (株)シーティーアイ
** 水博 (独法) 水産工学研究所 水産土木工学部
*** 水博 島根県内水面水産試験場
**** 正会員 工博 豊橋技術科学大学助教授 建設工学系
***** 正会員 工博 北海道大学助教授 大学院工学研究科

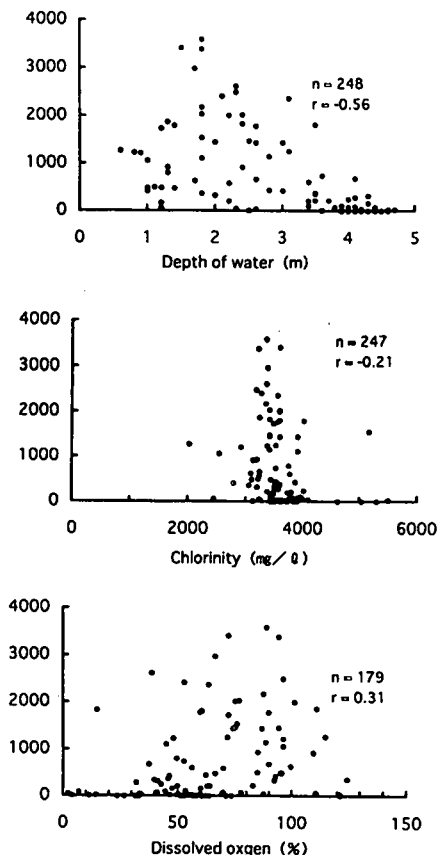


図-1 ヤマトシジミ個体数と環境要因との関連島根県水産試験場 (1998) から転記縦軸はヤマトシジミの生物量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)

COD 50 mg/L 未満, シルト・粘土含有率 50% 未満であり, このうち好適環境は, 水深 3.5 m 以浅, DO 飽和度 80% 以上, IL 5% 未満, COD 5 mg/L 未満, シルト・粘土含有率 10% 未満としている。シミュレーションで得られる環境項目のうち, ヤマトシジミの生息に関連すると考えられるのは, 水温, 塩分, 溶存酸素, 餌量 (植物プランクトン), 等である。島根県水産試験場報告とモデルで考慮できる環境要素を勘案して SI の評価項目を絞り込んだ。

(2) 生息水深

ヤマトシジミは宍道湖の 3 m 以浅に多く分布していることが知られている。図-1 をみても水深 0~2 m に全個体数の 45.6%, 2~3 m に 43.2%, 3~4 m に 9.8% が分布している。相対的なヤマトシジミ個体数を水深帯別の SI として読み替えることができる。水産試験場報告に従って水深 3.5 m 以浅の好適な水深帯を 1 とし, 水深 5 m を 0 とする SI の関係式を図-2 のように設定した。

(3) 塩分

水産試験場報告に記載された実験によると, 成貝・稚

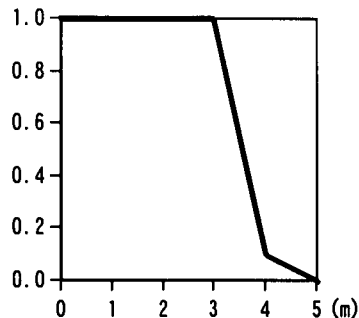


図-2 ヤマトシジミの生息水深帯に対する SI 曲線

貝ともに塩分 1.5~22 psu 程度の範囲で十分に生息できる。淡水 (塩分 0 psu) に 1 週間以上さらされるとへい死がみられるとの実験結果であるが, 宍道湖での塩分観測結果をみると, ヤマトシジミの主要な生息水深帯である 0~3 m では 2~5 psu 程度であることから, 塩分は生息域を制限する要因とは考えにくい。若底後の稚貝・成貝についてみれば, 宍道湖の塩分は生息環境の制限因子とはならないとした。

(4) 溶存酸素

中村ら (1997) によるとヤマトシジミは貧酸素に対する耐性が高く, 1.5 mg/L 以上であれば支障はない。酸素濃度が 1.0 mg/L でも 2 週間程度, 0.0 mg/L でも 1 週間程度耐え得る。ヤマトシジミの貧酸素耐性は高く, 主な生息水深である 0~3 m 付近では問題とはならない。一方で, 現地調査では貧酸素水塊が出現する水域とヤマトシジミが生息できない水域が重なっていることも事実であり, 自然の中では長期的な低酸素環境が生息を制限する要因として考えられる。観測によると海底直上の薄い層では貧酸素化が顕著に現れることが確認されており, 湖底直上の薄い層内における貧酸素化が, ヤマトシジミの生息を制限する要因といえる。

溶存酸素によるヤマトシジミ生息域の制限を評価するため, 島根県内水面水産試験場によるヤマトシジミ個体数分布調査による生物量とシミュレーションで得られた 8 月 1 ヶ月間海底直上水の溶存酸素濃度平均値との関連を調べて SI を設定した。8 月の平均溶存酸素濃度は底層の中期的な酸素環境を示す指標と考えた。図-3 に示した両者の関連を見ると, DO 濃度が 4 mg/L 以下の場所にはヤマトシジミが生息していないことがわかる。この検討結果に基づいて, 溶存酸素濃度に対するヤマトシジミの生息環境 SI を図-4 のように表現した。

以上の環境要因のほかに, ヤマトシジミの餌となる植物プランクトンと生息域における底質環境が, ヤマトシジミの生息域を制限する環境要因として挙げられる。1 年間のクロロフィル a 測定データの変動を見ると, 湖岸

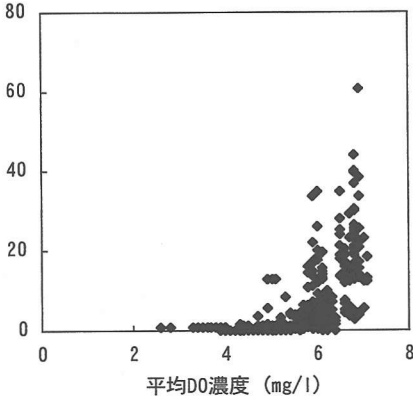


図-3 シミュレーションから求めた8月の湖底直上の平均DOとヤマトシジミ生物量の関係

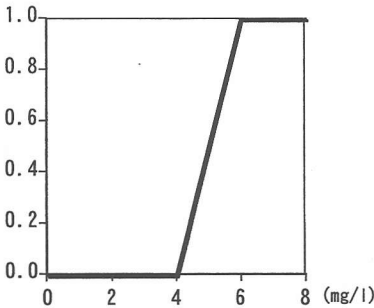


図-4 湖底直上の8月平均DOに対するSI曲線

部・湖央部ともに底層において10~20 $\mu\text{g/L}$ 程度で推移しており、ヤマトシジミの餌環境としては十分な量であるため、生息域を制限する要因ではないと判断した。

島根県水産試験場報告では、底質環境についてILとシルト・粘土含有率等に注目している。両者ともヤマトシジミ個体数と高い相関があり、生息環境を評価する上で重要な項目であるが、底質項目はシミュレーションで直接評価が難しい。この理由から底質項目は環境改善効果の予測評価の対象とはしないこととした。

(5) ヤマトシジミの生息環境評価

中海の環境修復案のシミュレーション結果を基に、ヤマトシジミ生息環境についてHSIでの評価を行った。SIの項目は生息水深と8月の平均酸素濃度である。メッシュで計算された環境要因を各SI曲線で相対評価し、水深帯毎にHSIを求めた。水深帯はヤマトシジミの主な生息域である0~3m、生息が困難な3~4mおよび4~5m、湖央に相当する5m以深に区分した。HSIは水深と8月平均酸素濃度のSIから以下の式で算出した。

$$HSI = \sqrt{SI_{\text{dep}} \times SI_{\text{DO}}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで SI_{dep} は水深に対する適性指数、 SI_{DO} は8月平

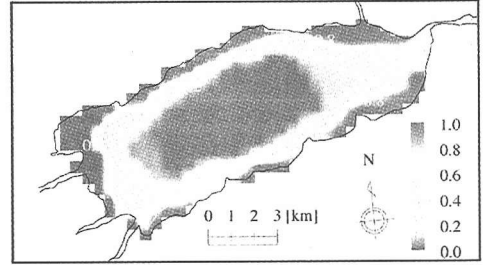


図-5 宍道湖ヤマトシジミのHSI

表-1 シミュレーションから算定した宍道湖ヤマトシジミ生息環境のHSI

項目	区分	値
水深帯面積 (km^2)	0-3 m	16.28
	3-4 m	18.66
	4-5 m	25.24
	5 m<	22.38
水深帯毎の Total HSI	0-3 m	0.995
	3-4 m	0.619
	4-5 m	0.173
	5 m<	0.000
宍道湖の Total HSI		0.392

均酸素濃度に対する適性指数である。宍道湖内のヤマトシジミ HSI 分布を図-5に示す。また、こうして得られた HSI に各メッシュの面積を掛けて、水深帯毎に集計した Total HSI と宍道湖全域で見た集計結果を表-1に示す。なおこの表中で示した水深帯面積はシミュレーションの計算メッシュ上で近似された集計値であり、実際の詳細な面積計測値とは異なる。

3. 宍道湖の健康度評価

(1) 物質循環の健康度

宍道湖生態系における優占種生物であるヤマトシジミは生態系の構造と種の持続的生産の両面で大きな役割を有しているといえる。また、ヤマトシジミは湖内の主要な漁業対象種であり、漁業という形で人為的な物質輸送とコントロールを受けている。宍道湖において適正な生態系を構成するためにはヤマトシジミの資源量が大きな検討要因となる。これまでの記録ではヤマトシジミの現存量は $8 \times 10^4 \text{ton}$ 程度にまで達すると考えられている。ヤマトシジミの現存量 C を $0 \sim 10^5 \text{ton}$ まで11段階に設定したシミュレーションを行い、物質循環の生産者、消費者、分解者に関する次の健康項目に着目して、その変化から宍道湖における適正な生態系の姿を「健康度」の視点で評価した。

(2) 適正な宍道湖生態系

宍道湖では優占種生物であるヤマトシジミの水質・底質環境への役割が重要である。そこで、ヤマトシジミの現存量の変化に対する健康項目の変化特性を考察し、そ

の最適化からヤマトシジミの適正資源豊度を検討した。

図-6 にヤマトシジミの現存量 C を 0~10 万 ton に変化した場合の年平均の植物プランクトンの年間純生産量 P_p , ヤマトシジミの年間純生産量 C_p , 水中溶存酸素濃度が 2.0 ppm 以下になる年間日数 $days$ の変化を示す。

一次生産量 P_p は, ヤマトシジミ現存量が増加すると単調に低下している。ヤマトシジミによる摂餌のため, 植物プランクトン増殖に対する栄養塩等の制限要因よりも現存量の低下の影響が大きいとみられる。

C_p については現存量 4 万 ton が極大となり, 現存量が多くても少なくても C_p は低下する。ヤマトシジミ生産量の観点からみると, 適正なヤマトシジミ現存量は 4 万 ton 程度であるといえる。3 万 ton 以下では餌料は十分であるが, ヤマトシジミ個体数が少ないため生産量に制限され, 逆に 5 万 ton 以上では餌料が足りず, 生産量を制限することがわかる。

$days$ については現存量 3 万 ton の時に最低になっている。現存量 3 万 ton 以下では, ヤマトシジミの摂餌による有機懸濁物の減少が少なく, 水中のデトリタスの分解やプランクトンの呼吸で消費される酸素量が増大するためである。逆にヤマトシジミの現存量が 4 万 ton 以上に増加すると, ヤマトシジミ自体の呼吸による酸素消費量が増加するため, $days$ は増加することになる。

P_p および C_p の最高値, $days$ の最小値を最適値として, その値を標準に規格化した値の合計値を「健康項目の総合得点」として同図に示した。ヤマトシジミの現存量に対する 3 項目の総合得点から求めた宍道湖の適正資源豊度は 3 万 ton 程度であると見積もられた (図-6)。

結果は 1998 年の宍道湖における殻長組成 (年令分布) に対する最適解であることに注意を払う必要がある。

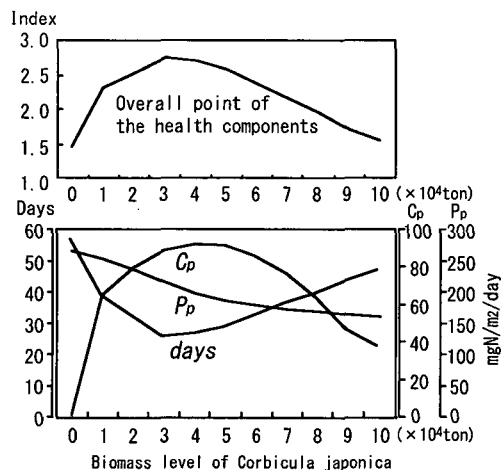


図-6 ヤマトシジミの適正資源豊度

(3) 物質循環スペクトル

生態系物質循環シミュレーションの結果から, 生物と栄養塩などを含む構成要素の量を縦軸に, 各要素の置換率 DR を横軸に取り 2 次元平面で表現したものが物質循環スペクトルである。生態系の量と時間変動を簡単に表現した図であり, 宍道湖の健康な生態系の姿を検討するために採用した指標である。ヤマトシジミの現存量が 0 万 ton, 4 万 ton, 8 万 ton について年間の窒素に注目して物質循環スペクトルを示したものが図-7 である。

図中の矢印はヤマトシジミの現存量を 0~10 万 ton に増加させた場合の各物質質量の変化方向を示す。各ケースについて現存量や置換率変動するものの, 底生系のヤマトシジミや海底堆積物を左上に配置する右下がりの構造を持っていることがわかる。つまり, 生態系の中で現存量が多い要素は置換率が緩やかであり, 逆に現存量が小さい要素は置換率が高いことを意味している。また, ヤマトシジミが濾過する植物・動物プランクトン量や懸濁有機物量および堆積物量等が減少する様子が容易に判断できる。適正資源豊度 3 万 ton におけるヤマトシジミの平均生物量は約 1 gN/m^2 で入れ換わり時間 ($1/DR$) は約 50 日。浮遊系の有機物ではそれぞれ約 100 mgN/m^2 と 4~5 日である。

次に適性資源豊度について, ヤマトシジミが生息する湖岸域と生息しない湖中央域を比較し, 生態系の構造の違いを検討した (図-8)。図中の直線は各領域の生態系構成要素の近似曲線を示す。湖岸域ではヤマトシジミの存在が生態系を特徴づけており, 湖中央域に対してスペクトルの傾きが大きい。つまり, 生態系全体の物質輸送の速度が緩やかであり, より安定的な系であることを示している。ヤマトシジミが生態系の安定に寄与していることがわかる。

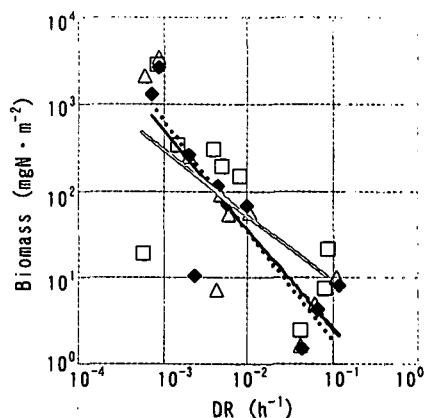
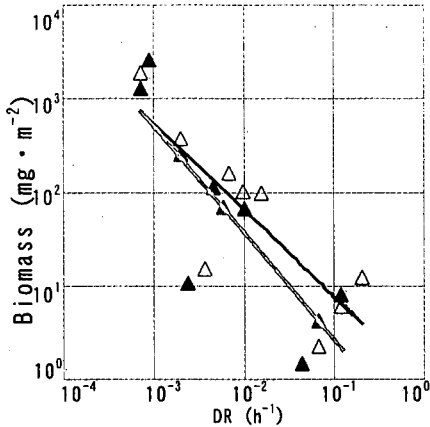
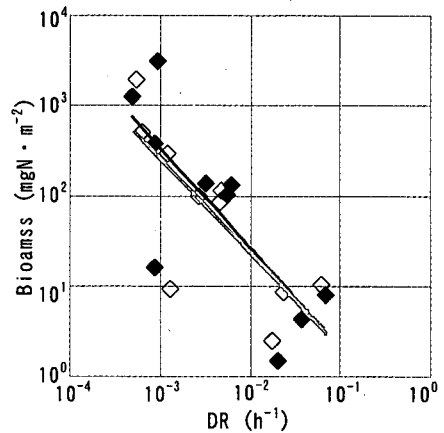


図-7 宍道湖生態系の物質循環スペクトル

◆と黒線はヤマトシジミ資源豊度 4 万 ton, □と灰線は 0 万 ton, △と破線は 8 万 ton を示す。



図—8 湖岸域と湖央域のスペクトルの比較、▲と黒線が湖岸域、△と灰線が湖央域を示す。



図—9 物質循環スペクトルの季節変動、◆と黒線が夏季、◇と灰線が冬季を示す。

生態系の構造は季節によっても変動している。夏季(7～8月)と冬季(1～3月)について物質循環スペクトルを比較して検討を行なった。生物の活性が高い夏季にはより高次段階に窒素量がストックされるため、スペクトルの傾きが急になり、逆に生理活性が低下する冬季には栄養塩に窒素量が移行するため、スペクトルの傾きは緩やかになる。ここでもヤマトシジミの存在が生態系の構造を左右する働きがあり、濾過食によって水中の窒素を取り込み底生系にストックする夏季に対して、浮遊生態系での物質循環量が相対的に多くなる冬季には、宍道湖全体の物質循環が速くなることを示している。

4. おわりに

物質循環スペクトルについては、今後、他の水域での計算例を踏まえ比較検討することにより、スペクトル構造(勾配や各要素の順位関係)の解明が進み、具体的な生態系の特徴を表示する指標となることが期待される。

本研究は土木学会沿岸生態系評価研究会における研究成果の一部である。機能指標化の考え方については WG

の多様な専門家の有意義な論議が土台になっている。貴重な調査データを提示頂いた肥後和雄氏(島根県内水面水産試験場)、階層的評価法の枠組みについて示唆を頂いた石川公敏氏(環境アセスメント学会)に感謝の意を表します。

参考文献

- 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.
- 中村幹雄・品川 明・戸田顕史・中尾 繁(1997): ヤマトシジミの貧酸素耐性, 日本水産増殖学会誌, 45巻1号, pp. 9-15
- 中村義治編(2000): 生態系における構造と機能の評価方法に関するレビュー, 水産工学研究集録, 8, 水産庁水産工学研究所, 205 p.
- 中村義治・田口浩一(2000): 新しい評価指標の提案と適用例, 沿岸域における広域環境問題の取り組み, 平成12年度調査研究報告, 土木学会海岸工学委員会地球環境問題小委員会: 1, 4, 1-1, 4, 30.
- 中村義治・寺澤知彦・中村幹雄・三村信男(2001): 宍道湖ヤマトシジミ個体群の水質浄化機能の評価解析, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1236-1240