

生態系の機能評価技術（包括的な評価指標）

中村 義治（本研究会会員・水産工学研究所）

寺澤 知彦（本研究会会員・（株）シーティーアイ）

1. 生態系の構造と機能に関する全体的指標 (Holistic index)

第2回目は、これまでほとんど議論が及んでいない生態系における構造と機能に関する評価指標を取り上げ、包括的に議論する。そして、宍道湖生態系を例に機能の価値判断に必要な指標化とその最適化によって得られる評価基準（Standard）を示す。

1.1 物質循環スペクトル

生態系を構成する各要素（生物項、非生物項）の置換率DR（Displacement rate）を横軸に、平均物質質量（生物項は生物量の窒素換算）を縦軸にして生態系の物質循環の動態を2次元表示したものが物質循環スペクトルである（図1）。置換率DRは物質循環による各要素の物質の単位時間当たりの置き換わり比率（cycle/△t）を示すもので、個体群動態のうち、純生産力のみを評価の対象とした生態学上の回転率P/B（Turn over rate）より広い概念として、非定常場の個体群及び非生物にも使える指数として定義した。

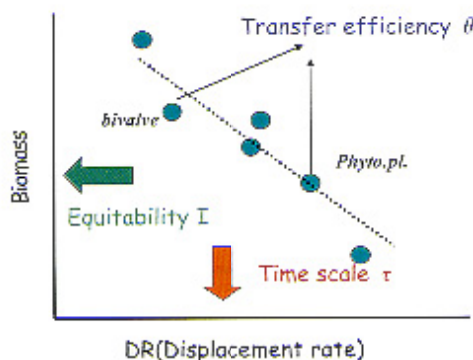


図1 物質循環スペクトルとその属性機能

個体群及び非生物項における変動について、内在的要因（成長、死亡、産卵、変質など循環量）と外部要因（移入量、移出量）の非定常的な収支により決定される物質タンク模型（図2）を用いてβ_iを更新分/（残余分+更新分）として計算する。次の時間ステップ（t+△t）では、tステップにおける物質の残余分+更新分（成長、移入量）が新たな物質質量として置き換わる。

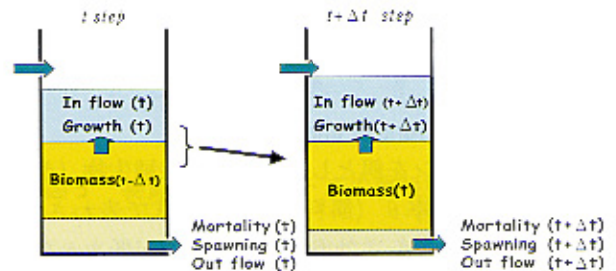


図2 生物項の置換率DRを説明するタンク模型

$$DR \cdot \Delta t = IN / (Sub - Out + IN)$$

IN = 純生産量（成長）+ 系外からの移入（生物項）
 系外からの移入 + 他要素からの循環（非生物項）
 Out = 死亡 + 産卵 + 系外への移出（生物項）
 系外への移出 + 他要素への循環（非生物項）
 Sub = 生物量（生物項）
 物質質量（非生物項）

1.2 物質循環スペクトルにおける3つの属性機能

1) 複雑度I (Eitability)

生態系を構成している各要素の平均物質質量の多様度を示し、パワーレベル（スペクトルのy軸上の値）から次式を用いて計算する。複雑度とスペクトル勾配との関係は急勾配になる程、複雑度は小さくなり（系の組織化と呼ぶこともある）¹⁾²⁾³⁾、緩勾配（ホワイトノイズ的）になると大きくなる。また、スペクトル勾配が一定なら、複雑度Iはパワーレベル、置換率DRに左右されない性質がある。

$$\beta_i = B_i / \sum_{j=1}^N B_j \quad (i, j = 1, 2, \dots, N)$$

$$I = - \sum_{i=1}^N \beta_i \cdot \ln \beta_i$$

ここで、B_i, B_j要素の物質質量及びその正規化したもので、Nは生態系を構成する最大要素数を示す。なお、ここで定式化した複雑度Iは、中村・田口⁴⁾が定義した複雑度Iの重み付けγ（要素に固有な循環量の多様度）を1にしたものに相当する。

2) 物質循環の時間スケール τ

時間スケール τ は生態系を構成している各要素の置換率 DR について、物質量を重みにした加重平均値で、系全体の物質の置き換え時間を表す指数である。スペクトル勾配との関係は X 軸上の帯域幅が同じなら、急勾配になる程、物質循環速度は緩やかになり緩勾配では反対に早くなる。時間スケール τ もスペクトル勾配が一定なら、パワーレベルに左右されない。

$$\tau = \sum_{i=1}^N \beta_i \cdot DR_i^{-1}$$

3) 転送効率 θ (Transfer efficiency)

植物プランクトンを餌とした場合の優占種生物（ヤマトシジミ）の転送効率 θ （餌料効率）は次式で表わされる。海洋生態系における転送効率は、栄養段階が低次から高次に上がるたびに、呼吸によるエネルギー損失のため低下し、植物から食植動物間では約20%、2次～3次消費者間では10～15%と概算されている。また、水域別、栄養階層数でも異なり、外洋域、沿岸域、湧昇域では平均転送効率（階層数）は炭素量換算で、それぞれ10（5）、15（3）、20（2）%程である。

$$\theta = \text{年間純生産量(ヤマトシジミ)} / \text{年間純生産量(植物プランクトンPp)}$$

2. 物質循環の健康項目 (Individualistic index)

2.1 生産者の立場；一次生産量（植物プランクトンの年間純生産量 Pp ）の変化（ $\partial Pp / \partial C$ ）

基礎生産性力、ヤマトシジミの環境収容力及び水域の CO_2 固定能などの指標でヤマトシジミの資源豊度に対して単調減少の傾向が予想される。

2.2 消費者の立場；ヤマトシジミの年間純生産量 Pp の変化（ $\partial Pp / \partial C$ ）

漁業生産及び水中有機懸濁物の浄化能の指標で資源豊度に対して極大値の存在が期待され、餌料制約下におけるヤマトシジミの環境収容力が検証される。また、個体成長の阻害は未成熟など産卵機能の低下を招き、その結果再生産機能へ重大な影響を与える。

2.3 分解者の立場；水中溶存酸素濃度が2.0ppm以下になる年間日数 $days$ の変化（ $\partial days / \partial C$ ）

ヤマトシジミを含む生物群集全体の生育環境にとって重要な指標で、資源豊度に対して極小値の存在が期待される。

3. 最適化（物質循環の健康度における最適資源量度）

宍道湖では優占種生物であるヤマトシジミの水質・物質環境への役割が重要である。そこで、ヤマトシジミの資源量の変化に伴う物質循環における3つの健康項目の変化特性について考察し、その最適化からヤマト

シジミの適正資源豊度を求める。図3にヤマトシジミの資源量 C を0～10万tに変化させた場合の年平均の植物プランクトンの年間純生産量 Pp 、ヤマトシジミの年間純生産量 Cp 、水中溶存酸素濃度が2.0ppm以下になる年間日数 $days$ の変化を示す。

一次生産量 Pp は、シジミ資源量が増加すると単調に低下している。これは、貝の濾過により植物プランクトンの現存量が減少し、植物プランクトンの増殖への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ためと考えられる。

Cp については資源量4万tで最大となり、資源量が多くなっても少なくとも Cp は低下している。これは、宍道湖での餌量の限度に応じて、シジミ生産量の観点からは適正なヤマトシジミ資源量（環境収容量）が存在することを意味する。3万t以下では餌量は十分であるが、貝の個体数が少ないため貝の生産量が多くなれず、5万t以上では貝の個体数が多すぎるため、餌量が足りず貝の生産量が多くなることがわかる。特に餌量不足は、貝の成長阻害や産卵機能の低下等を招き再生産機能へも大きな影響をあたえることが考えられる。

年間日数 $days$ については、 Cp とほぼ逆の傾向であり、資源量3万tの時に最低になっている。資源量3万t以下は、ヤマトシジミが摂餌のために懸濁物を濾過し、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の量が減少したためと考えられる。ヤマトシジミの資源量が4万t以上に増加すると、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の減少量よりも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と考えられる。

生産量 Pp , Cp の最大値、 $days$ の最小値を最適値として、その値を基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。ヤマトシジミの資源豊度に対する3項目の総合得点から求めた宍道湖の適性資源豊度は3万tと見積もられる（図3）。ただし、ここで得られた結果はある年度の殻長組成（年令分布）に対する最適解である。一般的に生物機能は資源量が同じでも年令によって大きく異なるので、この点については再生産の立場も含め、今後検討する必要がある。

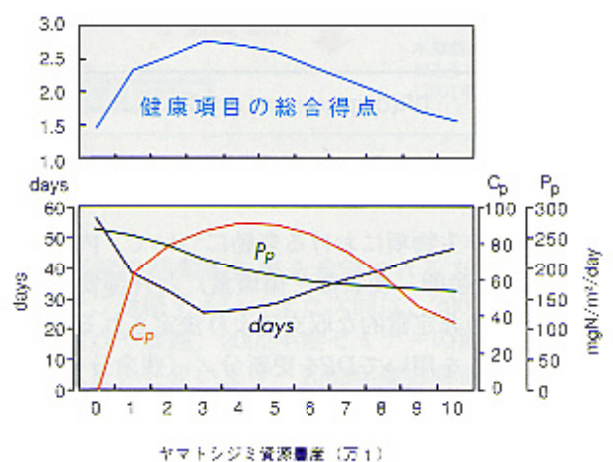


図3 ヤマトシジミの資源豊度と健康項目の関係

4. 評価基準と管理目標

4.1 物質循環スペクトル

ここでは、円滑な物質循環を支える宍道湖生態系の評価基準（目標値）として、シジミの適正資源量に対する全体的指標値を定める。ヤマトシジミの資源量を0～10万tに変化させた場合の年平均の物質循環スペクトルを図4について示した。図中の矢印はシジミの資源量を0～10万tに増加させた場合の各量の変化方向を示す。この2次元表示の図より、各要素における物質量とDRのシジミ資源量に対する変化が一目でよくわかる。例えばヤマトシジミは物質量約1000mgN/m²、入れ換わり時間（1/DR）約50日、浮遊系の有機物は約100mgN/m²と4～5日である。シジミの資源量増加に伴い、シジミが濾過する植物・動物プランクトン量や懸濁態有機物量および堆積物量等が減少する様子が視覚的によくわかる。物質循環スペクトルについては、今後他の水域でも計算を行うことにより、全体的なスペクトル勾配や物質レベルとその順位関係等から、各生態系の特徴をより明確に判別するツールとなることが期待される。

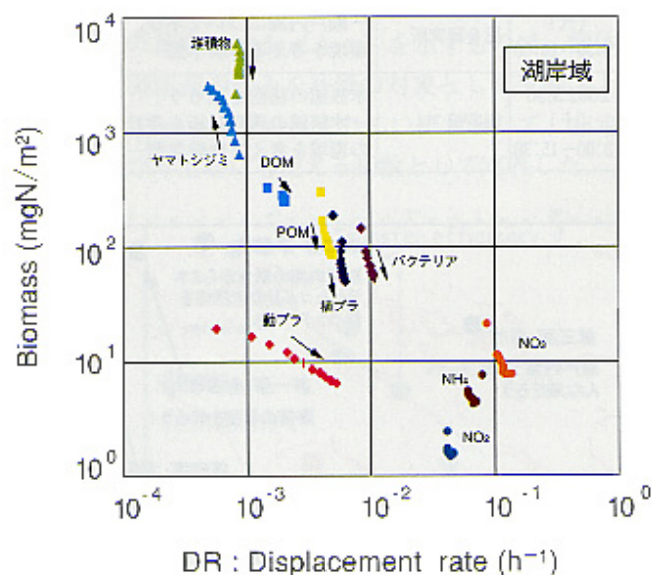


図4 物質循環スペクトル

4.2 物質循環スペクトルにおける3つの属性機能

物質量の多様度から求めた複雑度Iは、4万tで最大値となる（図5）。物質循環のタイムスケールは、シジミ資源量の増加に伴い、単調に増加している。推定適性資源量3万tのτは45日程度である。

転送効率θは、CpとPpの比で定義され、推定適正資源量3万tよりも大きい5万tで最大値を示すことがわかる。の最大値は0.34で前述の沿岸域や湧昇域の値と比較しても、汽水域である宍道湖の転送効率は高いことがわかる。なお、推定適正資源量3万tではθ=0.28となる。

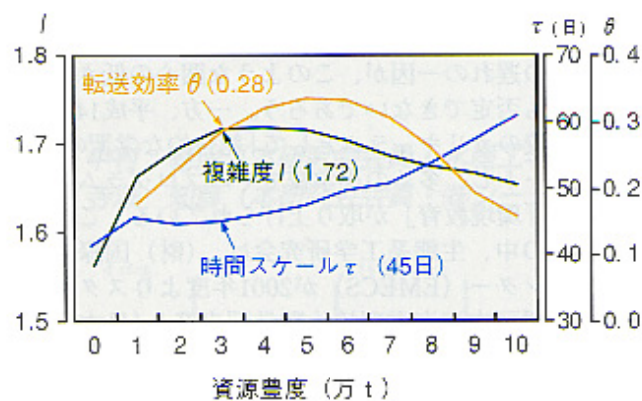


図5 物質循環スペクトルの属性機能の変化

4.3 環境調和型管理目標

健全な物質循環機能とヤマトシジミの持続的生産との調和には、もう一つのサイクルであるヤマトシジミの生活史（Life history）における再生産応答への検討がさけて通れない課題である。従って、宍道湖生態系では優占種であるヤマトシジミの資源豊度（3万t）だけではなく、持続的生産を確保する安定令構造を維持することが、環境保全の調和を図る上で管理目標となる（図6）。



図6 宍道湖生態系における環境調和型管理目標

参考文献

- 1) 平田廣則（1998）：生態ネットワークと情報，数理生態学，共立出版，pp.167-17.
- 2) R. E. Ulanowicz（1997）：Ecology, The Ascent Perspective. , Columbia University Press, 210pp.
- 3) 駒井由美・糸洲長敬・大久保名大（2001）：生態系ネットワーク指標による東京湾の環境評価（1），（2），（3），平成13年度日本水産工学会学術講演会論文集，pp.195-206.
- 4) 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，pp.1, 4, 1-1, 4, 30.

F r e e k i c k

瀬戸内海洋環境体験学習事業（その1）

一般市民、特に青少年の海への関心の低さが指摘されるようになって久しい。沿岸域における環境問題への対策の遅れの一因が、このような関心の低さにあるとしても否定できないであろう。一方、平成14年度から小学校のカリキュラムとして「総合的な学習の時間」がスタートし、多くの小学校でそのプログラムの中心課題に「環境教育」が取り上げられている。このような背景の中、生態系工学会は、（財）国際エメックスセンター（EMECS）が2001年度よりスタートさせた「瀬戸内海海洋環境体験学習事業」（日本財団助成）に特別協力として参加し、企画、運営に中心的役割を果たすこととなった。

本事業では、一般市民（特に青少年）を対象とし、瀬戸内海等の閉鎖性海域の中で、環境質の高い水域と劣化の著しい水域、歴史・風土性を感じることのできる水域、希少な生物の保護活動、環境保全運動の先進地等を実際に訪ね、当地で体験学習を行っている。

第1回セミナーは、「海苔（のり）の秘密を知ろう！」というテーマで、兵庫県立水産試験場、兵庫のり研究所、およびのり流通センターで行った。我々が身近に口にしてしている海苔の生態、養殖方法、加工・流通方法などをビデオ鑑賞、実物の顕微鏡観察、ノリの入札現場の見学などを通して学ぶとともに、講演やクイズなどを行って、海苔の成長が閉鎖性海域の環境にとって、どのような役割を果たしているのかについて考えた。

赤穂市立海洋科学館で行った第2回セミナーでは、「瀬戸内海の海水からミネラルたっぷりの天然塩を作ろう！」というテーマで、講演会や、塩田の見学、実際の塩づくり体験などを行い、塩田の歴史や海からの恩恵について学び、環境を守ることの大切さについて考えた。



図1 第2回セミナーでの塩田見学の様子

第3回のセミナーは、瀬戸内海大型水理模型がある（独）産業技術総合研究所中国センターで「瀬戸内海ってどんな海だろう！」というテーマで行っ

た。まず潮流によって生じる渦や干潟の現場を見学した後、水理模型施設を見学して瀬戸内海の構造と流れの仕組みを学んだ。さらに地形を変化させることができる水理模型を用いて地形と流れとの関係について観察実験を行い、流れと水質環境との関係について考えた。

海遊館で行った第4回セミナーでは、「水族館の秘密を知ろう！」というテーマで、ろ過装置などのバックヤードの見学を行い、人工的に海洋生物の生息環境を作ることの難しさについて体験的に学んだ。また、第3回までの総括として講師による報告と参加者による感想の発表を行うとともに、今後の環境教育・体験学習のあり方について意見交換を行った。

表1 2001年度セミナー概要

回	日時	場所	テーマ内容	参加者数
1	2002.1.23 (水) 9:30~12:30	兵庫県立水産試験場、兵庫のり研究所	海苔（のり）の秘密を知ろう！ —ノリの養殖について学び、海の環境を考える体験学習—	40
2	2002.2.9 (土) 10:30~14:30	赤穂市立海洋科学館	瀬戸内海の海水からミネラルたっぷりの天然塩を作ろう！ —塩田開発の歴史を学び、海の環境を考える体験学習—	51
3	2002.3.26 (火) 10:30~16:00	（独）産業技術総合研究所	瀬戸内海ってどんな海だろう！ —瀬戸内海について学び、海の環境を考える体験学習—	40
4	2002.3.30 (土) 13:00~15:30	海遊館	水族館の秘密を知ろう！ —水族館の管理技術を学び、海の環境を考える体験学習—	24

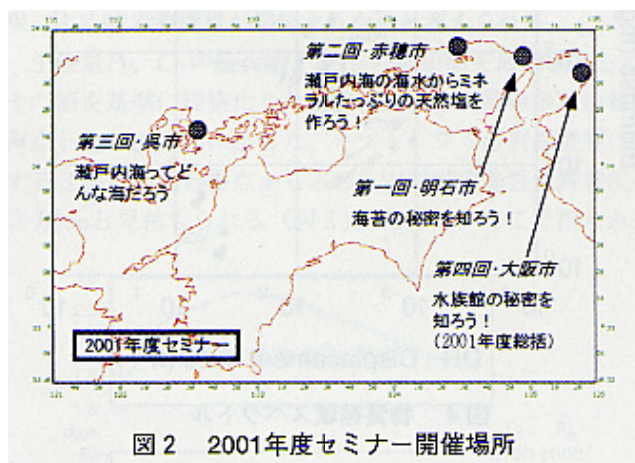


図2 2001年度セミナー開催場所

2001年度の活動報告書を希望される方はRACES事務局までご連絡下さい。また次回は、2001年度セミナーの反省点や課題、2002年度セミナーの内容についてご紹介したいと思います。2002年度の具体的な実施要領については順次EMECSやRACESのHPで紹介いたしますので、ぜひご覧下さい。

（大塚耕司：大阪府立大学大学院工学研究科）