特集 2・閉鎖性海域の環境管理のあり方—大阪湾を例として—

環境評価のための数値モデルの変遷と課題

中村義治*・田口浩一**・寺澤知彦**

1. 環境評価法の基本設計

1.1 評価のための研究フロー

1.1.1 研究企画

生態系工学研究会（以下RACES）における環境評価研究では、研究企画に基づき評価のための実行プログラムを作成している。研究企画（図-1）では、開発が予定されている地域の特徴と開発等によって予想される問題点の抽出（研究ニーズの絞り込み）が行われ、作業連関表等による研究課題の検索と組織化（研究シーズの高度化）が行われる。研究課題としては、ハード研究としての環境修復技術の最適選定法、ソフト研究としての数値モデル開発、ゾーニング技術、評価手法等が含まれる。これら、環境評価技術を環境管理に結びつける研究企画の第三の軸が、GISによる広域地域情報のデータベース化を行う情報センター（クリアニングハウス）の開設である。情報センターは、事業段階アセスメント（EIA）にのみ必要なだけでなく、政策段階および計画段階における戦略的アセスメント（SEA）においてコア情報を収集、加工、提供することになる。

図-1 環境評価の研究企画

つまり、施工者、環境管理者、地域住民間における双方向情報交換の基地となる。

1.1.2 実行プログラム

ここでは、研究企画により検索された研究問題に対する現実的解決策を与えるための包括的研究フロー（図-2）を提示する。まず、開発予定地域の特徴を把握するための事前検討作業（研究情報の収集と分析）から評価対象（生物種、環境要素等）の選定を行う。次に、定量評価ツールとしての数値モデルを決定し、モデルを構成する主要パラメータについては生物実験計画を設計することになる。このように準備された数値モデルの感度解析や事例計算結果等から環境変化によってもたらされる生物の環境応答について予測することになる。計算結果については必要な現場調査を行い、現況の再現性や計算条件の妥当性について検証しなければならない。そして、一連の作業経過の後、解析結果は環境影響評価の1参考資料として提供され、スコーピング（合意形成のための民意収集）を踏まえた合意形成や評価基準との整合性、適切なミチゲーション設計に利用される。以下に、大阪湾の総合開発計画に対する具体的な評価手順を示す。

1.2 大阪湾における評価生物選定の考え方

環境アセスメント手続きの方法書の中で述べられているスコーピングの内容には評価対象種の選択も含まれており、生物関連のKey Wordとしては陸域生態系では上位性・典型性・特殊性などの用語が使用されている。しかしながら、海域は陸域に比べ調査に制約が多く、生物情報が得にくいことから現実的な対応もまた必要不可欠である。

以下にRACESで行った大阪湾での評価対象種の選定の考え方と選定種を示す（矢持，1999）。情報

*独立行政法人 水産総合研究センター Yoshiharu NAKAMURA

**株式会社シーティーアイ Koichi TAGUCHI, Tomohiko TERASAWA

図-2 RACES研究の組立て

量はどうしても漁業生物に関するものが多いのでそれを用いて考えたところ、大阪湾に出現する漁業生物約225種のうち、116種が定住種であった。定住種とは生活史の全過程が大阪湾の中で完結する種のことで、そのため湾外からの入り込み種に比べ相対的に開発などによる環境変化の影響が現れやすいと考えられる。そこで、「定住種」をはじめ「食物連鎖の上位種」や「漁業上の重要種」等を考慮した。前者は生態系のKey Stone種的な意味合いがあり、後者は漁獲量や生産金額など産業への影響が大きいのが選択した理由で、動態変化の結果に社会・経済的なインパクトを有することが特徴と言える。「移

動能力が小さい」ことも選択する上での要の一つと考えられる。固着性が強いほど当然、場の環境を反映することになる。最後の選定条件は、「対象種に関する情報量の豊富さ」である。特定海域における特定種の既往知見がとて充分と言えない現状では、けっこうこれが選択の決め手となるケースが多い。これらの4つの選定条件以外にも重要な項目があるかも知れないが、現実対応を考え、今回は取り敢えずこれらの項目でフィルターをかけてみたのが表1である。

その結果、ヨシエビ・サルエビ・ガザミ・シャコなどの甲殻類、それにマコガレイやスズキなどの魚類が予測・評価のターゲットとなった。以上のような経緯と稚エビが河口域に集中分布するという特性を踏まえ、環境影響評価のための対象種として今回ヨシエビを選び、個体群動態モデルの構築に取りかかった。

2. 個体群動態モデル

従来の海域における環境影響評価は、環境基準として評価対象となる項目のみに着目していたため、予測手法もそれに応じた構成となっていた。海域を鉛直層に区分して流動や水質変化を予測するモデルは20年以上前に確立されており、基本的な考え方は変わっていない。一方、この間にコンピュータの計算速度は飛躍的に向上し、流動解析の分野では乱流モデルが導入され、水質解析の分野では底生系とカップリングした物質循環モデルが取り上げられるようになってきた。これらは従来モデルの発展型であり、今後も精度向上の努力が必要である。

こうした取り組みの他に、高次生態系を対象とし

表1 評価対象種の選定

種 類	食物連鎖 の上位性	漁 業 重要種	移動が 少ない	生理・生態 の知見	総合 評価
キス	○	△	×	×	
スズキ	◎	◎	△-×	△	△
マコガレイ	○	◎	△	△	△
クロダイ	○	○	△-×	△	
コチ	◎	△	?	×	
メバル	○	△	△	×	
ヨシエビ	△	◎	△	○	○
サルエビ	△	◎	△	○	○
ガザミ	△	◎	△	△-○	△
シャコ	△	◎	△	△	△
ジンドウイカ	◎?	△	×	×	
マダコ	◎	○	△	×	
アカガイ	△-×	△	◎	×	
トリガイ	△-×	△	◎	×	
ナマコ	△-×	△	◎	×	
ムラサキウニ	△-×		◎	×	
ワカメ	×	○	◎	△-×	
オゴノリ	×		◎	×	
マクサ	×		◎	×	

た予測評価の手法開発が始まっている。従来のアセスメントでは対象となっていなかった高次系の環境応答を、どのようにしてモデル化するのが課題となるが、その一つの手法として個体群動態モデルがある。RACESでは高次生物としてヨシエビを選択し、リクルートの面でも重要であり、流動や水質などの環境変動の影響を受けやすいラバ期の個体群動態を評価対象として取り上げ、環境応答を評価するモデルを構築した。

2.1 モデルの基本構成

RACESでは高次栄養生物の環境応答を考慮した新しい数値モデルとして、浮遊幼生期のヨシエビを対象とした個体群動態モデルの開発を進めている。従来の環境アセスメントに適用されてきた流動や低次生態系の数値モデルと、ヨシエビ浮遊幼生の環境応答を評価する個体群動態モデルを組合せ、環境の変化に対する個体群動態を予測するという試みである。

ヨシエビの生活史は図-3のとおりで、孵化から2～3週間の間に浮遊幼生期を経て淀川河口を中心とする湾奥沿岸域に至り、着底して稚エビとしての生活を始めることが知られている。幼生期の行動特性については生物実験に基づく基礎的な研究が行われ、モデル構築に必要なパラメータが明らかにされてきた。これらの成果に基づいて幼生の個体群動態モデルを構築し、浮遊動態の数値実験を行っている。

2.2 モデルの概要

予測手法の中心は個体群動態モデルであるが、内湾の流動モデル、低次生態系モデルと結合してヨシエビ浮遊幼生の成育環境条件を予測する仕組みになっている。

図-3 大阪湾のヨシエビの生活史

2.2.1 個体群動態モデル

浮遊幼生期のヨシエビの動態を、受動的なラグランジェ粒子の漂流に生物固有の環境応答（水温、塩分、餌生物等に対する忌避・選択行動）を考慮した数値モデルで表現した。行動様式を加味した粒子の漂流動態は次のように表わされる。

$$x^{t+\Delta t} = x^t + \{v(t) \cdot \exp(i\theta) + v_p(t)\} \cdot \Delta t$$

$$z^{t+\Delta t} = z^t + \{w(t) + w_p(t)\} \cdot \Delta t$$

ここで t は時刻、 Δt はタイムステップ、 x^t は時刻 t における粒子の水平座標、 z^t は水深位置、 v は水平流速成分、 w は鉛直流速成分、 v_p は浮遊幼生の自律的な水平遊泳速度、 w_p は鉛直遊泳速度である。ただし、水平方向については場の流速に比べ幼生個体の遊泳力が小さいため、考慮していない。また、 θ は乱流輸送を考慮するための水平流のドリフト角であり、各粒子の輸送方向が流れの向きのみではなく、角度 θ 内でランダムに選択されるように調整するパラメータとして導入した。

2.2.2 流動モデル

ヨシエビ産卵時期にあたる7月は、河川水の流入や海面からの熱供給によって大阪湾湾奥域には密度流が発達し、潮流や吹送流とならんで浮遊幼生の漂流を左右する。このような内湾域の流れの特徴を再現するために、流動解析には3次元非定常傾圧流動モデルを適用した。数値モデルは静水圧近似、ブシネスク近似、f平面近似を導入した回転地球流体の運動方程式、流量連続式、熱・塩分保存式および状態方程式に基づいて、速度の3軸成分、潮位、水温・塩分の時空間分布を予測する。鉛直混合過程の定式化には乱流モデルを利用し、勾配リチャードソン数の経験的な関数式を使って成層に伴う鉛直混合の浮力減衰を表現した。

2.2.3 低次生態系モデル

稚エビの遊泳行動を規定する餌料（珪藻類）や溶存酸素等の水質環境因子については、沿岸生態系モデルを利用して時空間分布を予測した（図-4）。

このモデルは湾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、系内の生物学的な物質循環過程を定量的に見積る方法である。生態系要素の現存量分布は同時に流れによる輸送過程にも支配されるため、モデルは物理過程と生物過程の相互作用を考慮した構造となっている。

図-4 低次生態系モデルの模式

3. 個体群動態モデルによる環境影響評価手法の検討

3.1 検討の前提条件

従来の環境アセスメントでは、年間や季節の平均的な海況条件で予測・評価が行われてきた。しかし、現実には降雨や風、日射等の気象状態によって海況は絶えず変動しており、それに応答して生物、生態系の振舞も変動する。これからの環境アセスメントでは、数値モデルにとっても海域のイベントを考慮したりリアルタイムな予測が求められよう。RACESでもモデル開発の過程で実海況での検討に重点を置き、変動環境条件の下でヨシエビ浮遊幼生の応答を調べることにした。

ここでは、1996年の実海況を対象として、産卵時期に相当する夏季3ヶ月間(7～9月)の環境シミュレーションを行い、大阪湾の流動と海洋構造、水質・生態系を時系列に再現した。これを個体群動態モデルに適用してヨシエビ幼生の漂流動態を調べた。

3.2 ヨシエビ幼生の生育環境の予測

3.2.1 流動環境解析

浮遊幼生の漂流環境となる大阪湾の流れと海洋構造を再現するために流動モデルを使ってシミュレーションを行った。潮汐や河川流量、風、気象パラメータ等の外力条件については、既存資料を利用して1996年7月～9月の時間変化を設定している。条件データのうち沿岸からの淡水流入については図-5のとおりで、計算期間中には7月上旬と8月

図-5 大阪湾へ流入する河川流量の季節変動
主要9河川の合計流量

下旬に大きな出水があった。

以上の条件の下で、流況の再現計算を行った結果の中から、上旬に出水を記録した7月を選んで月平均流況を図-6に示した。流況の再現性を検証できる観測データがないものの、既往知見から得られる定性的な傾向として、大阪湾の西部は全般に強混合状態にあり、明石沖には潮汐残差流を主因とする顕著な時計回りの環流が発達する状況や、東部は淀川系淡水の流入によって上層水が低塩分化し成層を形成する状況がモデルでも再現されている。湾の水塊構造についても、大阪府の定点水質調査結果を利用してモデルの再現性を調べており、全体として満足のいく結果が得られている。

変動海況という条件の違いを別にすれば、ここまでは従来環境アセスメントで行われている流況予測と本質的に変わらない。RACESの取り組みでは、流れの予測結果を個体群動態モデルとして、実際に生物の評価に応用していく。ここが従来と異なる点で、生態系評価に向けての新たな試みである。

図-6 流動シミュレーションの結果
表層の平均流況

3.2.2 水質環境解析

水質予測の目的はヨシエビ浮遊幼生の生育条件として、植物プランクトンなどの餌料の分布や、忌避行動の要因となる貧酸素水塊の挙動を把握することである。ここでは低次生態系モデルを適用し、流動モデルで得られた物理要素（流れ、水温、塩分および鉛直渦拡散係数）と連結して、リアルタイムに夏季3カ月間の水質現況解析を行った。

解析結果の一例として海底直上層の溶存酸素濃度を選び、8月の平均濃度分布を示した（図-7）。

生態系モデルはこうした一般的な水質項目だけでなく、湾内の有機物生産や消費、沈降等の生物化学過程を定量的に捉えることができ、植物プランクトン群集など低次栄養生物の現存量や生産力を見積るツールとしても利用することもできる。

3.3 ヨシエビ幼生の個体群動態解析

上記の物理環境および水質環境を基に、個体群動態モデルを大阪湾の変動海況に適用して、浮遊期のヨシエビ幼生の振舞いを調べた。大阪湾内の3ヶ所に親エビの産卵場を仮定し、単純な条件から環境応答を考慮した複雑な条件へとケーススタディーを繰り返した結果、幼生の鉛直移動に塩分忌避の行動様式を考慮することではじめて淀川河口域への集積が説明されることや、酸素耐性を反映して湾奥の底酸素環境にはあまり応答しないこと等がわかった。

こうして幼生の行動特性の重要性が示唆されたた

図-7 水質シミュレーションの結果
海底直上における溶存酸素濃度の分布

め、第2段階の研究では室内での飼育実験を行い、塩分や餌料プランクトンに対するヨシエビ固有の応答を調べた（矢持，1999）。この実験結果に基づいてモデルを改良しており、低塩分に対する忌避行動や、餌料プランクトンに対する選択行動が幼生の発達段階ごとに考慮されている。

3.4 実海況での漂流予測

生物実験を経て現実的な個体群動態モデルが整備されたことから、これを大阪湾の実海況の場合（1996年7～9月）に応用してヨシエビ浮遊幼生の漂流動態予測を行った。なお、産卵のタイミングによる漂流動態の違いを調べる目的で、7月下旬～8月上旬の期間内に大潮期と小潮期とで延べ4通りの産卵ケースを想定した。

産卵後3週間の漂流シミュレーションを行った一例が図-8で、産卵開始時を7月20日の小潮期とした場合の計算結果を示してある。このケースでは神

図-8 ヨシエビ浮遊幼生漂流動態の解析例
産卵時期を小潮期と仮定した幼生分布

戸沖で産卵された幼生が湾奥河口部へ集積する傾向にあるが、産卵時期の異なるケースでは状況が一変し、南部からの産卵個体が到達する傾向も確認されている。初期段階の浮遊幼生が流れの影響を強く受けていることの現れであり、湾内の流況がケース毎に著しく異なっている様子が伺える。

モデル解析の結果、浮遊幼生の漂流状況を反映して着底も産卵の時期で大きく異なることや、どの海域でも近隣の産卵場から放出された幼生が着底しやすい傾向にあること、主要な集積域と考えられる淀川河口部については、境沖と神戸沖で産卵された幼生が寄与していること等がわかった。幼生の着底機構が流況に応じて変動するというモデルの結果は、ヨシエビの漁、不漁がその年の産卵時期の海況に左右される実態を示唆している。

4. ま と め

大阪湾を事例として、個体群動態モデルによる生態系評価へのアプローチを解説した。従来の流況モデルや水質モデルに湾の生態系を代表する上位生物種の動態モデルを付加する方法で、一歩踏み込んだ生態系の予測を試みたものである。もちろん、ここで紹介した数理モデルだけが唯一の方法ではないが、今後の環境影響評価手法の手掛かりとして、この事例研究の方法論は十分参考になる。

しかし、この手法開発は途に付いたばかりであり、更に研究を重ねる必要がある。一番の課題は予測の信頼性であり、流動モデルや水質モデルと異なり、残念ながら検証がなされていないのが実情である。最近になってRACESでは湾内の産卵場を明らかにするため、有力視されている神戸市沖においてヨシエビ成体の採捕調査を行い、抱卵した成熟個体の存在を確認した(図-9)。

モデルの適用に際しては、現地調査での確認を含め予測の信頼性を高めていくことが課題である。ここでは大阪湾の実況解析を中心に手法を解説したが、湾内で計画されている埋立地形を考慮した将来時点の予測に応用すれば、埋立による流況、水質環境の影響とともにヨシエビ幼生の漂流動態の変化を考察することができる。このように、一旦モデルの

図-9 神戸沖で採捕されたヨシエビ成熟個体
個体群動態モデルで仮定した産卵場を確認した。

信頼性が確認されれば、モデルは環境影響の予測評価に有力な情報を提供する手段となる。

加えて、モデルの結果をどのように解釈し、評価に結びつけるかという影響評価の方法論についても入念な検討が求められる。短期的な個体群動態の予測で大阪湾生態系のどこまでが評価できるかという手法の限界や、今後さらにどんな取組みが必要かについても十分に認識し、これらを体系的に検討し、影響評価の手法を確立していくことが望まれる。

参 考 文 献

- 1) 石川公敏, 北沢克巳, 小松輝久, 田中研一, 勝田穂積, 蔵元武明: 新たな「環境アセスメント(環境影響評価制度)」への対応; 日本海洋学会編「明日の沿岸環境を築く」, 第三章, 恒星社厚生閣, pp.73-139 (1999)
- 2) 小田一紀, 石川公敏, 城戸勝利, 中村義治, 矢持進, 田口浩一: 内湾の生物個体群動態モデルの開発, 大阪湾の「ヨシエビ」を例として, 海岸工学講演会論文集, pp.1196-1200 (1997)
- 3) 田口浩一: 浮遊生態系モデル—構造と応用例—, 生態系工学研究会第17回シンポジウム講演予稿集, 第三章, 白亜書房, pp.9-23 (1997)
- 4) Taguchi, K. and Nakata, K.: Analysis of water quality in Lake Hamana using a coupled physical and biochemical model, Jour. of Marine Systems, Vol.16, pp.107-132 (1998)
- 5) 藤原建紀, 澤田好史, 中辻啓二, 倉本茂樹: 大阪湾東部上層水の交換時間と流動特性—内湾奥部にみられる高気圧性渦—, 沿岸海洋研究ノート, 31 (2), pp.227-238 (1994)
- 6) 矢持進: RACESモデル構築のための生物学的検討, 生態系工学研究会第19回シンポジウム講演予稿集, (1999)