



生態系モデルの現状と展望

田口 浩一（本研究会幹事・(株)コンピュータ・テクノロジー・インテグレイタ）

1. はじめに

海洋生態系の研究に数理モデルが登場したのは今からもう半世紀も前のことで、英国海峡における植物プランクトン生産の季節変化を説明するためにFleming (1939)が簡単なモデルを用いたのが発端であった。その後モデルは、ジョージバンク、北大西洋沿岸ほか各地の1次生産の研究（例えば、Rileyら,1949）に引き継がれていったが、現在のような生態系モデルに至ったのはコンピュータの利用が本格化した1970年代から、すなわち、Steele (1974)が北海の生態系の解析にはじめてコンピュータによる数値計算を導入してからのことである。以来、海洋の生態系モデルはコンピュータの進歩と共に急速に発展していった。その代表例には、フロリダ沿岸湧昇域のモデル研究（O'Brien and Wroblewski,1972; Walsh,1975）や北海でのERSEM研究（Euroean Regional Sea Ecosystem Model）等が挙げられる。内湾・エスチャリーの生態系モデルでは、ナラガンセット湾（Kremer and Nixon,1978）やエムスエスチャリー干潟域（Baretta and Ruardij,1988）のモデルがよく知られている。このように生態系モデルとは、一口に、コンピュータを使って海洋生態系の様々な現象や仕組みを調べる方法ということができる。

わが国の生態系モデルは内湾の物質循環の研究に始まり、流れと生物の相互作用を解析する方法で三河湾の植物プランクトン量の空間分布を調べたKishiら（1981）の研究を発端としている。この考え方はその後、環境管理のニーズから内湾の水質予測に応用され、沿岸開発の環境アセスメントや高栄養化水域の水質予測の手法として各方面で生態系モデルの開発が進められていった（例えば、中田ら,1983）。その原理は栄養塩や植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタス等で構成される低次栄養段階の生態系の物質動態解析を通じて水質汚濁を予測するというもので、構成要素の選び方や数式の組立て方には違いこそあれ、現在用いられているモデルのほとんどが同じ原理に基づいている。

コンピュータの発達とともに生態系モデルもここ十数年の間に大きく進歩した。初期のモデルに比べ構成要素の数が増え、物質循環の数式表現がずっと精密になったことや、季節平均などの定常状態を仮定した単純なシミュレーションから現実の変動海況のもとでの複雑なリアルタイムシミュレーションが可能になったこと、そしてモデルの精度自身も向上したことなどが挙げられる（田口,1988）。今では環境管理のみならず、広く地域、地球の環境への関心の高まりに応じていろいろな分野で生態系モデルが利用されている。漁業の分野では、資源管理の立場から生態系モデルを

使って漁場の環境収容力を評価したり、生物資源と環境との関わりを解析する試みが始まっている。（例えば中田,1998）。干潟や浅瀬の生物浄化機能の評価に生態系モデルを応用する取組みもある（Suzukiら,1997など）。また、地球環境の分野では、全海洋の生物生産力の評価や海洋中の炭素動態などの生物地球化学的な物質循環の研究に生態系モデルが適用されている（山中,1997、中田ら,1995など）。

2. 生態系モデルの概要

例えば内湾の酸素動態に着目すると、水中の溶存酸素量の変化には植物プランクトンの光合成による酸素供給に、プランクトンの呼吸やバクテリアによる有機物分解、窒素酸化（硝化）あるいは底泥堆積物の生分解過程での酸素消費といった生物化学的な要因が関与している。酸素に限らず窒素やリン、CODなどの物質の動態に着目して、その消長に関わる一連の生物化学的プロセスを数式に置き換え、コンピュータシミュレーションを使って水域内の物質動態の全体像を解析する、これが生態系モデリングの基本原理である。対象とする水域環境の特性や解析の目的に応じてモデリングにも様々なバリエーションが生じるが、一般には栄養塩や植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタス等で構成される低次栄養段階の生態系を対象として、物質循環のプロセスを評価していく。筆者らもこれまでに富栄養化内湾の水質解析を目的として、図1に示すような生態系モデルを開発してきた（例えば、Taguchi and Nakata,1988）。

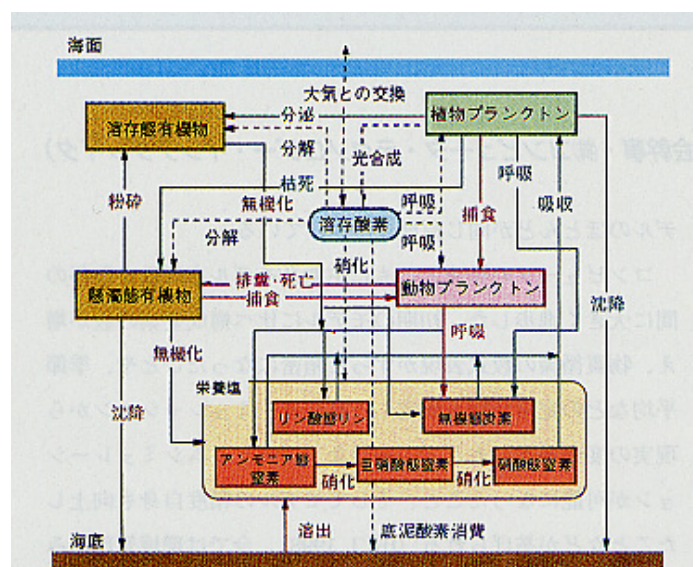


図1 内湾の生態系モデルの模式図

ところで、プランクトンや栄養塩などの水中の浮遊物質の多くは海域の流れに受動的であり、その分布は輸送や乱流混合のプロセスにも強く影響されている。したがって、浮遊物質の局所的な変化の予測には生物化学プロセスと物理プロセスの相互作用を取り扱うことが不可欠となる。こうして最終的には両者がモデル上で結合され、構成要素の現存量や濃度の時空間変化が求められていく。この仕組みは次のような数式であらわすことができる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -(\mathbf{v} \cdot \nabla)C - (w + w_p) \frac{\partial C}{\partial z} + [\nabla \cdot (\mathbf{K}_H \nabla)]C + \frac{\partial}{\partial z} (\mathbf{K}_z \frac{\partial C}{\partial z}) \pm \sum \beta_i + q$$

ここで、Cは任意の構成要素の現存量、 $\mathbf{v}$ 、 w は流れの水平、鉛直速度成分、 w_p は懸濁態要素の沈降速度、 $\mathbf{K}_H$ 、 $\mathbf{K}_z$ は水平鉛直渦拡散係数、 $\pm \sum \beta_i$ は生物化学プロセスによる現存量の増減変化、そして q は系外からの物質供給（沿岸からの流入や底泥からの溶出）を表わす。

モデルの数値計算、すなわちコンピュータシミュレーションでは各態窒素、リン、炭素の流入負荷量とともに、底泥からの窒素、リンの溶出量、底泥有機物による酸素消費量などが入力条件となり、逆にモデルからはプランクトンや栄養塩、溶存酸素などの現存量分布や、各種プロセスを通じての物質移動量（フラックス）、海域内の物質収支などの情報が出力される。

3. 環境アセスメントへの応用

冒頭にも述べたように、生態系モデルは現在環境アセスメントにおける水質予測に広く利用されている。沿岸の埋立や大規模構造物の設置に伴う水質汚濁の変化を上述のような生態系モデルを使って事前に予測し評価するというものである。モデルはもちろん、影響の予測評価だけでなく、環境対策やモニタリング計画の立案に役立てることもできる。その一例として、ここでは当生態系工学研究会が大阪湾で進めている研究の一端を紹介しておこう。

図2は生態系モデルで予測された大阪湾東部海域の夏季の1次生産量（水柱積分値）と底層の溶存酸素濃度の分布を表わし、左側には現況値、右側には現在計画の各種埋立が同時に行われた場合の変化量が示されている。ここでは夏季を6～8月の平均と定義し、複合埋立後の予測では下水道整備に伴う湾奥河川からの汚濁負荷の減少も併せて考慮した。1次生産量については、現状はほぼ水深30mのラインを境に東部沿岸域で $2\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 以上の高い値で分布し、埋立後は大阪港新人工島や関西国際空港を中心に南東部海域一帯で上昇すると示唆されている（値は $0.1 \sim 0.2\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ）。また、夏季の底層の酸素環境については、大阪湾の南東沿岸部を中心に濃度の低い水塊（ 5mg/l 未満）が形成される様子が示されている。この低酸素水域の濃度変化自体は小さいが、埋立後には淀川河口から神戸港に至る湾奥北西部海域と関西空港北東部で酸素量が最大 $0.4 \sim 0.8\text{mg/l}$ 程度低下すると予測されている。

紹介した事例はあくまで各種埋立計画の同時進行を想定した一種の思考実験であり、予測結果を基に今ここで環境影響を評価しようとするものではない。しかし、将来埋立が行われる状況ではこうした環境変化が

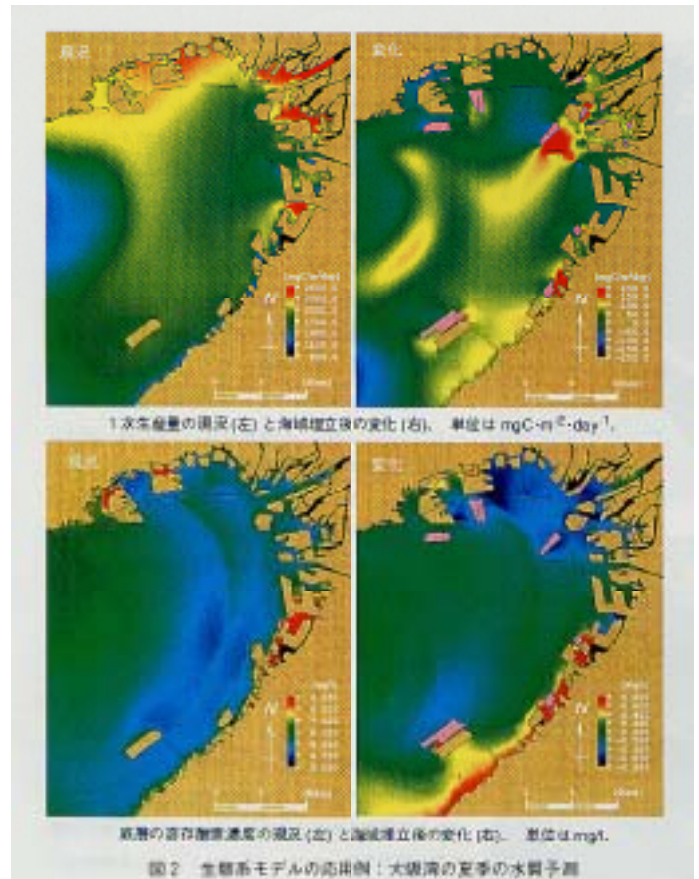


図2 生態系モデルの応用例：大阪湾の夏季の水質予測

生ずることも十分予想されるため、モデルの示唆を一つの手掛かりとして今後の環境調査やモニタリングを立案していくことが必要であろう。監視すべき項目や地点の選定にモデルの予測結果を活用していくこと、これが望ましい姿であると同時に生態系モデルの有効な利用法でもある。

4. 新たな方向への発展

生態系モデルは今や環境アセスメントに限らず海洋の幅広い分野で利用されており、今後もますますの発展が期待される。最後に、ここでは生態系モデルの新たな方向を目指した生態系工学研究会の最近の取り組みを紹介して、本稿を終えることにしたい。当研究会では、大規模な開発や人間活動によって劣化した沿岸域の環境の修復と新たな生態系創出の工学的手法を探ることを目的として、沿岸生態系の構造と機能を解明し、開発行為が環境に及ぼす影響を適切に予測評価する手法の開発に取り組んでいる。その一つが魚介類や甲殻類など高次栄養生物の環境応答を考慮した新しいモデルの研究で、当面は大阪湾における浮遊幼生期のヨシエビを対象に、個体群動態を考慮した総合的な生態系モデルの開発を進めている（小田ら, 1997）。ヨシエビの生息環境には上述のような流体-生態系結合モデルを、その遊泳行動には個体群動態モデルをそれぞれ応用し、環境の変化に応じた浮遊動態の変化を予測するという試みである。以下にその概要を紹介しよう。

ヨシエビはクルマエビ科に属する暖海性甲殻類の一種で、瀬戸内海や有明海、土佐湾等で漁獲されている。大阪湾では、沖合で産卵されたヨシエビは孵化からおよそ2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

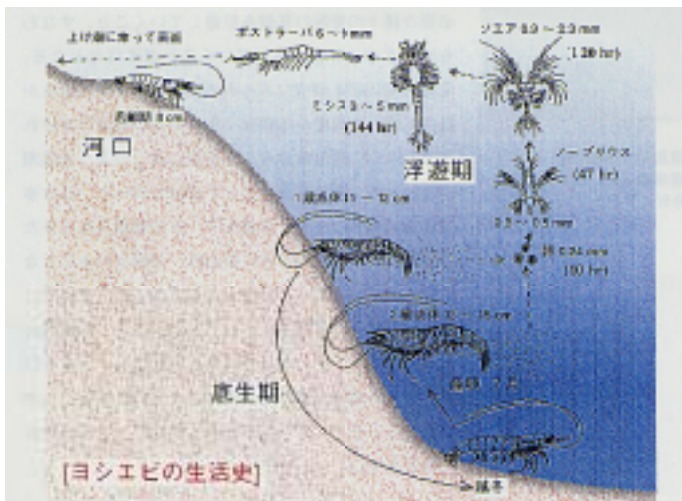


図3 ヨシエビの生活史
モデルは孵化からポストラーバまでの浮遊幼生期を対象

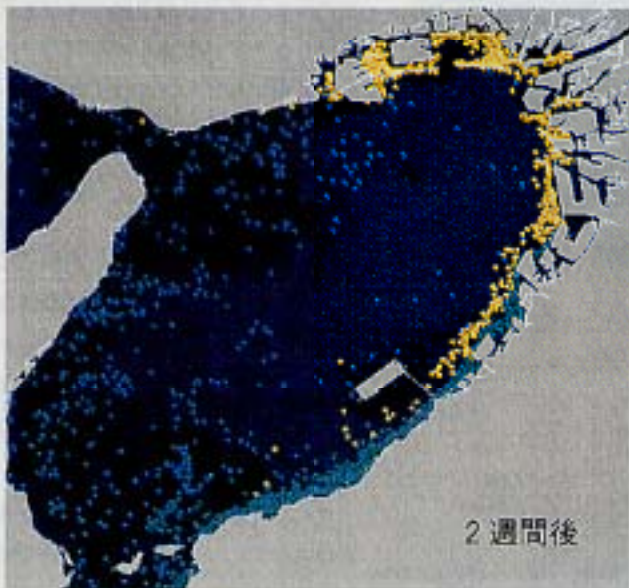
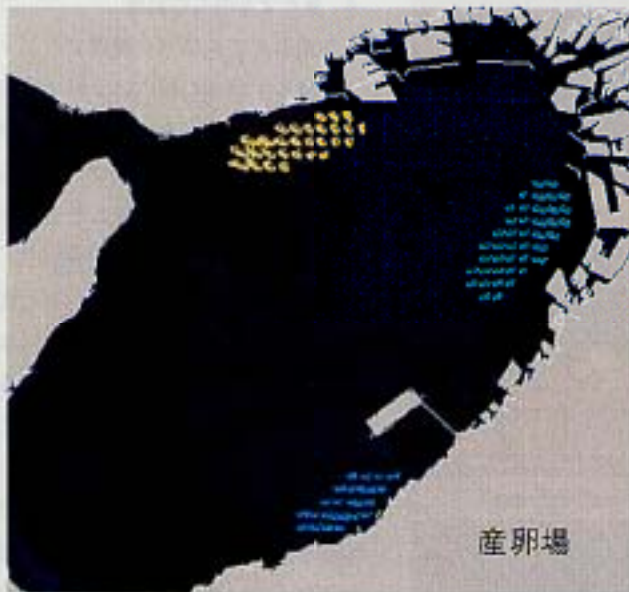


図4 ヨシエビ浮遊幼生の漂流動態の解析例
モデルで仮定した湾内3ヶ所の産卵場（上）と
産卵後2週間後の幼生の分布（下）

活を始めることが知られている（図3）。この浮遊期幼生の動態を説明するため、流れに対して受動的に漂流する個体の集合に、環境因子に対するヨシエビ固有の応答（太陽光や水温、塩分等に対する忌避・選択行動）を考慮した数理モデルを試みた。親エビの産卵場や浮遊幼生の行動様式については未だよく知られていないため、既往知見や生物実験に基づいて情報を収集しモデルへ反映した。図4はこうして組立てたモデルのアウトプットの一例で、湾内の3ヶ所を産卵場と仮定して浮遊幼生の挙動をシミュレーションした結果、すなわち、産卵後漂流を開始してから2週間を経過した時点のポストラーバ期直前の幼生の分布を表わしている。この結果から、淀川河口への稚エビの集積現象には主に神戸沖で産卵された幼生が関わっていることが示唆された。また、図には示されていないが、発達段階ごとに幼生の挙動からは、ノープリウス～ゾエア期の段階では沖合の流れで受動的に漂流する傾向があることや、河口への集積はミシス期以降に認められることなどの興味深い結果も得られている。このようなモデリングの原理はヨシエビだけでなく、アサリなどの貝類浮遊幼生の漂流動態に対しても応用でき、環境アセスメントのほか漁業の分野への応用が期待される。

5 結び

以上のように、生態系モデルへのニーズは今後も様々な方向で一段と高まり、より高度で現実的なシミュレーションが普及していくものと思われる。しかし、そのためにはモデル研究者単独の努力だけでなく、モデルの信頼性を検証するためのデータや、計算の初期条件、境界条件、モデルパラメータなどの条件設定に必要な種々の情報の基盤を整備していくこと、すなわちデータセットを充実していくことが不可欠となる。北海のERSEM研究にみられるように、それは誰もが自由に様々な角度から利用できる共有の資産でなければならない。残念ながら、わが国にはこのような風潮がなかった。環境アセスメントをはじめいろいろな事業の海域調査のなかで貴重なデータが集積されてきたが、その事業の目的だけに使われ、公開されることなく葬られていくケースがほとんどであった。これでは闊達な学際研究は進まないし、わが国のモデル研究の現状を対外にアピールしていくことも難しい。新たに制定された環境影響評価法の施行を契機に情報の公開が普及し、データセットの整備を通じてモデルの発展に供されていくことを期待したい。

文献

- Baretta, J. W. and P. Ruardij, 1988 : 干潟の生態系モデル.
中田書三郎監訳, 生物研究社, 1995発行.
- Fleming, R. H. : The control of diatom populations by grazing.
J. Cons. Perm. Expl. Mer. , 14, 201-227, 1939.
- Kishi, M. J. , K. Nakata & K. Ishikawa : Sensitivity analysis
of a coastal marine ecosystem. J. Oceanogr. Soc. Japan,
37, 120-134, 1981.
- Kremer, J. N. & S. W. Nixon : A Coastal Marine Ecosystem,
Simulation and analysis. Ecological Studies 24, Springer-
Verlag, Berlin Heidelberg, New York, 1978.
- 田口浩一 : 水質と生態系モデル. 海洋と生物, 118, 366-
374, 1998.
- Taguchi K. . & K. Nakata : Analysis of water quality in Lake
Hamana using a coupled physical and biochemical model,
Special Issue : Modelling hydrodynamically dominated marine
ecosystems. Jour. of Marine Systems, Vol. 16, Nos.
1-2, 107-132, Elsevier, 1998.
- 中田喜三郎, 青木繁明, 石田明生, 田口浩一 : 海洋炭素循環モ
デルの開発と北太平洋への適用. 資源と環境, Vol. 4,
No. 1, 63-85, 1995.
- 中田喜三郎, 堀口文男, 田口浩一, 瀬戸口泰史 : 沿岸海域の3
次元生態-流体力学モデル. 公害研究所集報, Vol. 13,
No. 2119-134, 1983.

- 中田英昭 : 生物資源-環境系のモデリング. 海洋と生物, 118,
360-365, 1998.
- 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-. 海岸工学論文集, Vol. 44, 1196-
1200, 1997.
- O'Brien J. J & J. S. Wroblewski : An ecological model of the
lower marine trophic levels on the continental shelf of West
Florida. Technical Report, Geophys. Fluid Dyn. Inst. ,
Florida St. Univ. , 1972.
- Riley, G. A. , Stommel, H. & D. F. Bumps : Quantitative
ecology of the plankton of the Western North Atlantic. Bull.
Bing. Oceanogr. Coll. , 12, 1-169, 1949.
- Steele, J. H. : The structure of marine ecosystem. Cambridge,
Massachusetts, Harvard Univ. , 1974.
- 鈴木輝明, 青山裕晃, 畑恭子 : 干潟生態系モデルによる窒素循
環の定量化 -三河湾-色干潟における事例-. J. Adv.
Mar. Sci. Tech. Soci. , 3, 63-80, 1997.
- Walsh, J. J. : A spatial simulation model of the Peruvian upwell
ing ecosystem. Deep-Sea Res. , 22, 201-236, 1975.
- 山中康裕 : 海洋の生物化学的サイクルのモデリング. 天気, 日
本気象学会, Vol. 44, No. 12, 1997

事務局通信

〔新メンバーの紹介〕

当研究会の幹事、研究員として次の方が新メンバーとなりました。

役員	氏名	現在役職	専門分野
幹 事	鈴木 輝明	愛知県水産試験場 漁場環境研究部 漁場評価研究室長 農学博士	水産学
研究員	多部田 茂	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 環境学専攻 博士(工学)	海洋工学
〃	寺澤 知彦	(株)コンピューター・テクノロジー・インテグレイタ (略称:CTI) 科学技術事業部 数理科学部 海洋環境グループ長	海洋環境工学

〔RACES News Letter 購読会員募集のお知らせ〕

当研究会では、年間2回「RACES News Letter」(本誌)を発行しています。
この度、一般の方々に広く当研究会の活動を知ってもらうため、購読会員を一般募集することになりました。多く
の方々のお申し込みをお待ちしています。

- 定期購読会員費(年間2回発刊) : 年間1,000円/人(一口)
- お申し込み先 : 生態系工学研究会事務局
〒540-0019 大阪市中央区和泉町1-1-14
Tel.06-6945-6331, Fax.06-6945-9655, E-mail: races@sogokagaku.co.jp

環境修復技術の最適選定法（その1：必要性と全体像）

沿岸海域環境の保全や修復に関しては、これまでも様々な技術が開発・提案されており、それぞれの技術の特徴や期待される効果についてもある程度整理されている。しかし、波浪や潮流の制御など物理的な環境修復技術の評価を除けば、その効果の評価の多くは、経験的、定性的なものでしかなく、特に生態系工学的観点からの定量的な評価はほとんど行われていないのが現状である。それ故、どのような海域にどのような環境修復技術を適用すれば所期の「生態系を考慮した沿岸環境の保全・修復」が達成されるかが十分に理解されていないように思われる。実際、現状の「環境保全・修復事業」の事例をみれば、環境修復技術を対象海域に適用する場合に、論理的な手順を踏んで選定しているとは到底思えないようなケースが多く見られる。

本来環境修復事業は、修復したい海域と環境改善目標（生態学的環境も含む）が提示されて初めて計画し実行することができる（この環境改善目標の設定方法にも多くの課題が残されているが、ここでは一応適当な目標が設定されたとする）。これに対して、最小の投資で改善目標を達成できる環境修復技術を選定しなければならないが、その際には、対象海域の環境特性や後背地の地理的・社会的特性、さらに対象海域以外の周辺海域にどのような影響を及ぼすのか、またその影響が経年的にどのように変化するかということを十分考慮する必要がある。

そこで生態系工学研究会では、図1に示すような、「環境修復技術の生態系工学的評価法および選定法の検討」というテーマの自主研究を開始した。この研究は3つの大きなステージからなっている。

第1ステージでは、沿岸域の環境保全・修復を目的とした技術についてレビュー、機能分析するとともに、保全・修復の対象となる海域の環境特性および後背地である陸域の地理的・社会的特性について調査し、ゾーニングを行う。対象海域・陸域については日本の代表的な閉鎖性海域の一つである大阪湾を取り上げる。

第2ステージでは海域・流域のゾーニングに基づいて適当な対象ゾーンと修復目標を設定し、これに技術の機能分析の結果を加味することによって適用可能な技術をいくつか抽出する（1次スクリーニング）。対象ゾーンについては複数考えられるので、1つの対象ゾーンについて第3ステージまで修了した後、次の対象ゾーンと修復目標を設定するという手

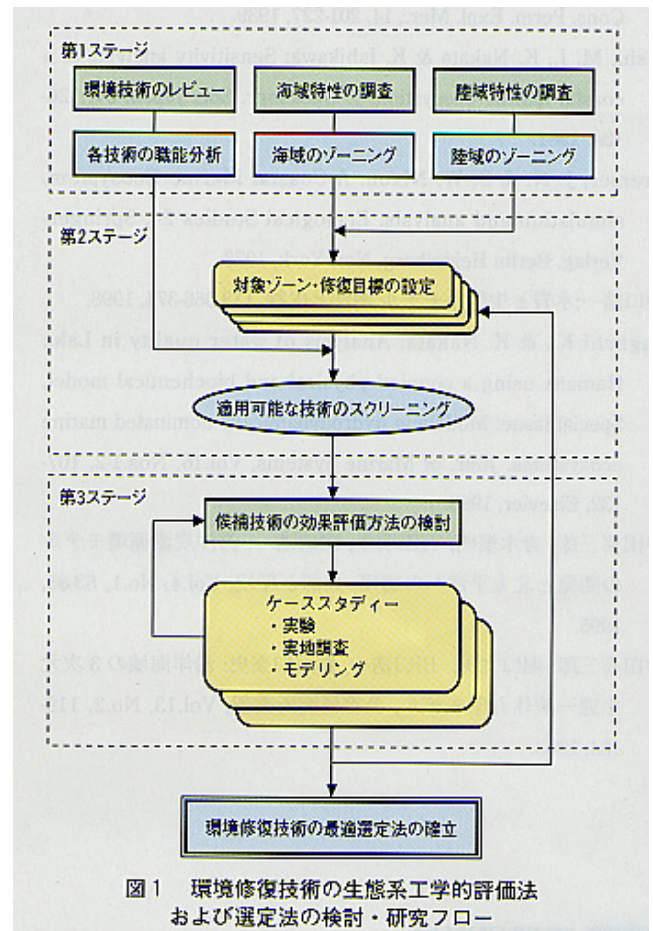


図1 環境修復技術の生態系工学的評価法
および選定法の検討・研究フロー

順を繰り返すことになる。

第3ステージでは、スクリーニングによって選択された候補技術について、その機能、効果、広域的影響、経年的影響などを生態系工学的に評価・予測する手法を検討し、さらにサイトや予算などの条件も含めて可能な技術については実際に実験、実地調査、モデル開発なども行う。

いくつかの対象ゾーンについて第2、第3ステージを繰り返した後、それらを総括することによって対象海域である大阪湾全体について環境修復技術の最適選定が完了することになる。

今回は自主研究の背景と全体像についてご紹介しました。詳細については今後もこのFree kickのコーナーで逐次ご報告したいと思います。

（大塚耕司：大阪府立大学工学部海洋システム工学科）