

沿岸域水環境の保全・再生技術の統合的評価法

Integrated Environmental Impact Assessment System for Estuarine and Coastal Waters

中 辻 啓 二
Keiji NAKATSUJI

1. はじめに

1992年にリオデジャネイロで開催された地球サミットで採択された「アジェンダ21」において、「持続可能な発展(sustainable development)」の思想のもと発展途上国と先進工業国との協調による環境保全と経済開発を地球規模で両立させる方策とともに、「気候変動枠組み条約」や「生物多様性条約」の締結等が進められてきた。わが国においても、環境の恵沢の享受と継承、環境への負荷の少ない持続的発展が可能な社会の構築、国際的協調による地球環境保全の積極的推進という3つを基本理念とする環境基本法が1993年に制定された。さらに、1997年に環境影響評価法の制定と、相次ぐ個別事業法の改正(河川法、海岸法、港湾法、公有水面埋立法、廃掃法、等)が行われてきた。

とりわけ、1997年6月の環境影響評価法(以後、「新アセス」という)の法制化の意義は大きい。それまでは、政府は1984年の「環境影響評価について」の閣議決定(「閣議アセス」という)により、その運用で一定の効果を上げてきた反面、一定の限界もあったことは否定できない。新アセスと閣議アセスの大きな違いは、法制化自体の意義はあげるまでもないが、環境影響評価を実施するか否かを事業の規模・内容や地域の状況を踏まえて個別に判断するスクリーニング(事業の絞り込み)の導入、環境影響評価を行う方法について調査方法書を作成して、公告・縦覧・意見聴取後、事業や地域の特性に応じた環境影響評価の調査項目や方法を決定するスコーピング(評価対象の絞り込み)の導入である。そして予測の不確実性と環境影響の重大性によっては事後調査の実施(フォローアップ)が義務付けられた。

このように仕組み作りはできたものの、環境へのインパクトの影響評価をどのように行うかが課題として残っている。閣議アセスでは事業者が項目ごとに設定する環境保全目標を達成できるかによる「絶対評価型」であったが、新アセスでは環境影響を回避・低減できるかに対する事業者の見解を明らかにする「相対評価型」に代わった。そのなかで強調されている環境影響の回避・低減はまさしく米国のミチゲーションの発想である。環境基本法に示された生物多様性の保存やミチゲーションの導入は、生物や生態系への影響評価に力点が移動し始めていることを示唆するが、現行の生態系モデルにはまだまだ不明な点、未解明な点が多い。早急に信頼性の高い生態系モデルを開発する必要があるが、それには浅海沿岸域の生物・生態系の専門家との連携・協働が必須となる。

沿岸海域は従来港湾域や所轄省海岸に分断され、当該行政機関の責任の下、狭域的視点から個々に計画され整備されてきた。そのような枠組みの中での発想であるから、大阪湾の将来のあるべき姿を議論しないままに、都市(沿岸陸域)の論理から大阪湾の浅海域を埋め立て、利用してきた。近年の赤潮の発生は自然を破壊する人間への警鐘であり、貧酸素水塊の発生は海の悲鳴である。中辻(1992)は大阪湾の環境保全や環境創造を具体的に行うには大阪湾全域の海事、港湾機能、漁業資源、沿岸域利用ならびに沿岸域環境を統合的に管理でき、且つそれらに責任を有する行政機関(仮称、Osaka Bay Authority)の実現が必要であること、そのためには湾全体の広域的長期的ビジョンに立脚し、且つ沿岸都市域の機能と一体化したものでなければならないことを強調してきた。また、それを具体化することを目標に「バーチャル大阪湾研究所構

想」を提唱してきた。

本文では、自然も社会構造も複合的な汚染状態にある大阪湾の環境を統合的に一元管理することを目的に開発した大阪湾環境情報管理システム（Osaka Bay Environmental Information System；以後、OBEISと称する）の設計思想を紹介する。それは当然のことながら、環境影響評価（Environmental Impact Assessment；EIA）への適用を前提としており、データ管理のみならず、モニタリングのためのデータ解析、数値モデル、環境評価のための知識工学、可視化技術、等が含まれる。EIAへの適用例として「中工試・明石海峡の地形改変による大阪湾の流況制御」を取り上げ、OBEISの環境影響評価法としての特徴を検討する。なお、大阪湾の流動や密度・水質構造は水工学夏期研修会講義集シリーズ94-A-9(1994)と98-A-5(1998)に掲載されているので、参照されたい。

2. 環境情報の重要性

2.1 ハイドロインフォーマティクスとは

Hydroinformatics という造語がデルフト研究所から発信されている。Hydraulics と Informatics という2語の合成である。ジャーナルも刊行されており、第6回国際会議が2004年にSingaporeで開催される。日本語では流体情報科学、もしくは水環境情報科学と訳すのが適切であろう。環境学は学際的取り組みが必須であると言われて久しい。Hydroinformatics の理念は、「水理学も、情報工学も、数値シミュレーションやデータ解析も全てが数値化されコンピューターの記憶装置に蓄えられる。政策決定という目的型実用システムにとっては、出処は何であれ、研究のツールや材料に過ぎない」という考え方である。体系化された理論も多少必要であるが、環境学が直面する種々の要因の絡み合った複雑な課題を解決するには、理論も、観測も、実験も、データも、ツールも、そして施策決定モデルも、ひとつのシステムに取り込まれる。それらが沿岸域環境の総合管理に効果的に働くのであれば、システムの実用的価値は高い。力学の公理を基礎に流体力学を学んできた研究者が崇める理論の崇高さも「何をか況や」である。それ程までに情報化が進んできている。

融通の利かない頭の固い計算屋（＝実はコンピューター）と、理論や経験から判断して柔軟な対応のできる真の研究者との協力によって、情報量の多い沿岸域環境の総合管理が可能となる。つまり、全ての情報が数量化されて入手できる今日、従前のような大型水理実験施設を持つ研究所ではなく、1台のコンピューターの中に大阪湾のモデルを作ることができる。さらに、あらゆる観測データを基に数値シミュレーション、情報管理アルゴリズム、可視化等の技術によって、沿岸域の3次元空間の動態がどのように変動するのかを目で見て理解することができる。一つのパソコンの中にすべてのデータを階層的に保管し、必要に応じて図化し、計算し、環境評価も可能な情報システムの開発も可能となる。

2.2 環境情報システム研究の現状

近年のコンピューターの大容量化、演算処理能力の高速化、そして、ビジュアル化、等の機能は、目を見張る速度で発展している。それらの機能を駆使することにより、環境データの管理や環境アセスメント等の政策決定のために必要な基礎資料を提供することが可能となる。また、専門知識を持っていない多数の市民にも理解しやすいようにアニメーション等の動画を提供することにより、環境教育の一助ともなり得る。もちろん、沿岸海域の環境に係わる課題が全て解決したわけではない。未解明の物理過程や生態系についても現地観測や数値実験によって明確化する必要がある。また、流動モデルや水質モデルの精度向上を図ると同時に、海域のデータのみならず、陸域からの外力の変動、例えば、社会、経済、文化、生活、等もデータとして整備する必要がある。

データ収集により得られた膨大な環境情報の利用や管理のためには、マッピング技術が必要となる。マッピングそのものは2次元あるいは3次元の地図であり、今までにも使われてきた。しかし、近年は人工衛星や航空機等、リモートセンシングの観測データが入手し易くなったことや、各種モニタリングによるデータもメッシュ毎に提供されるようになった。片や、陸上では資源管理のために各種のマッピングされた情報を解析する地理情報システム（GIS: Geological Information System）が開発され、様々な分野で実用化されている。GISとマッピングを用いて沿岸陸域の環境評価がなされようとしている。観測データもベースマップに入力してデータベース化したうえで、ユーザーの目的によりデータを加工・処理し、提供される。

このように、将来予測もコンピューターを用いた数値計算を用いて実施され、観測データとともに記憶容量内に収められる。環境診断や環境評価も全てが数値に変換されてコンピューターのなかで蘇る。コンピューターの中にバーチャルな大阪湾を復元できるのではないかというのが、バーチャル大阪湾研究所の発想の始まりである。

2.3 環境情報の管理と利用

環境情報システムには、環境を地球規模でとらえて全球的な見解を示そうとするものから、地域に密着した市民レベルの環境情報を提供するものまで、様々なレベルのものがある。また、それらの一つ一つがそれぞれの特徴を持っていることから、それらをリンクすることで一つの環境ネットワークが形成される。つまり、各地域ごとに官・学・民・市民が連帯する形で地域システムを構築し、それらをより大きなシステムにリンクしていくことにより地球規模のネットワークまでに発展し得る。このようなネットワークを構築することにより、世界中の地域レベルの情報が実時間で利用可能になり、文字通り高所から総合計画を立てることができる。

しかしながら、この分野の研究はまだ発展段階にあり、既存の環境情報システムにも多くの問題が山積している。公開されているシステムを操作して得られた感想をまとめると以下ようになる。第一に、データベースのデータ量が少ないことと、環境に関わる代表的なものしか扱っていないことである。環境因子間の相互作用や影響関係が理解できない。また、長期にわたる観測データの蓄積がなく、時系列解析が不可能である。つまるところ、研究に利用できる環境情報システムは皆無であるという結論になる。環境アセスメントを実施するに際しても現況の環境特性を把握しておくことは基本的なことであり、そのためには科学的根拠に基いて企画されたモニタリングが重要となる。第二はシステムの利用のし易さである。あまりにも細か過ぎると、逆に使いづらくなる。両者はトレードオフの関係であるが、そのシステムを利用する対象者を限定して設計する必要がある。第三は理解のし易さである。利用のし易さとも関連するが、一般の人に公開するのであれば、データや情報の提示だけではなく、データ項目の説明や、環境影響と生活との関わりなどを具体的に示す必要があり、環境問題をもっと身近に感じるものでなければならない。第四は判断、予測機能を備えていないシステムが多い。この機能がなければ、ただ単にデータの表示に終わってしまう。

これらの問題を解決するのは非常に難しい。しかし、沿岸域の環境管理の必要性が望まれるなか、また、国や地方自治体がデータベースの構築を計画するであろうことを勘案すれば、バーチャル大阪湾に要求されるシステムのレベルは環境影響評価における政策支援・合意形成支援システムであろう。

3. 大阪湾環境情報システム（OBEIS）の設計

3.1 OBEISの構造（中辻・沈，2002）

OBEISの企画・設計を例に、水環境管理や環境創造に対する支援システムのありようについて検討する。コンピューターの性能（超高速演算，超大容量）の開発に依存するが、将来的には、環境政策の実施に向けて行政と住民との間の合意形成過程、あるいはミチゲーションにおける環境評価過程におけるコンピュ

ーター支援システムとしての可能性を期待している。

OBEISはグラフィカル ユーザー インターフェース(GUI:Graphical User Interface)を用いた情報管理ツールであり、環境に関する情報を扱うとともに、環境影響評価を手助けしようとするものである。また、環境政策の代替案作成への情報提供を可能にする。そのために、このシステムは環境資源の質に大いに注目し、GISを用いたデータベースや他の複数のサブ システムとの統合を図ることにより、シミュレーションや予測機能をも合せ持つものである。このような沿岸域の環境特性を科学的知見からとらえ、分析、予測機能を兼ね備えていることから、水環境管理への応用も期待される。

図-1に示すOBEISは、環境に関する大量のデータを蓄積したデータベース、様々な範囲に及ぶ複雑な自然現象モデルを集積したモデルベース、環境に関する専門家の知識の集積である知識ベース、利用者に環境情報をWeb を介して提供するユーザー インターフェイス、さらに、それらの機能を統合する制御システムから構成される。このシステムにGIS機能を付け加えることによって、異なる情報源のデータや様々なモデルを統一できる。各構成ベースに関してそれらの概要を説明する。

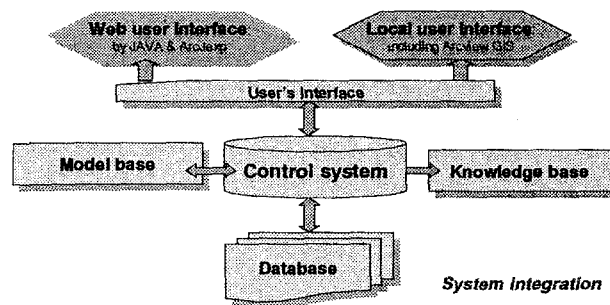


図-1 OBEISの基本構造

3.2 ユーザー インターフェイスと制御システム

OBEISの重要な機能に様々な専門領域におけるモデルとデータの統合がある。簡単に言えば、データベースと知識ベース、インターフェイス、可視化ツールとの統合である。制御システムはこれらの統合を図り、メニューやアイコンを用いたインターフェイス(GUI)を通して、環境関連データと地理データとの重ね合わせ、グラフ化、結果の描画機能、他の環境に関するホームページへのアクセス提供を可能にするものである。

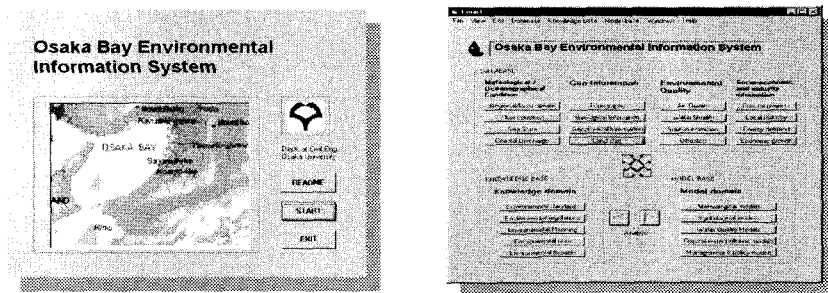


図-2 OBEISのユーザー インターフェイス (第1・2画面)

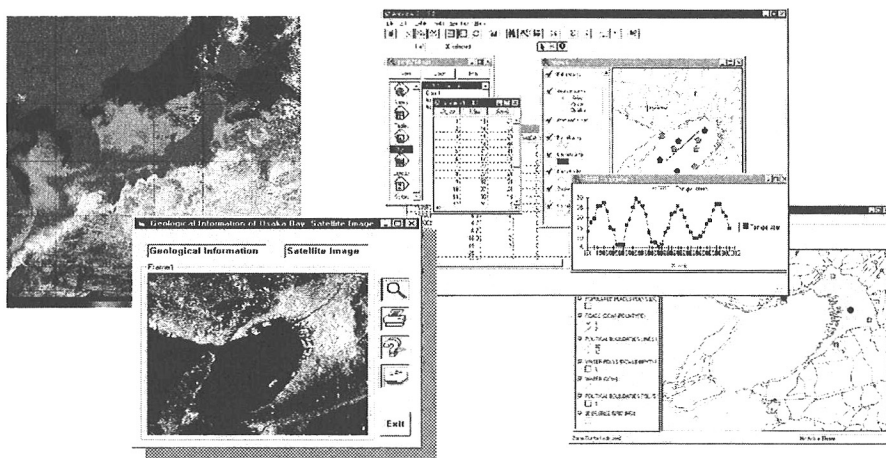


図-3 ユーザー インター フェイスのための図表の一例

図-2はユーザーがOBEISと会話を始める第1画面・第2画面である。この種のシステムの設計において重要なことは専門的知識を持ち合わせていない一般市民も対象であることである。つまり、ユーザーに優しい設計が必須となる。したがって、システムの指示する方向に進んでいくと、現象のとらえ方や問題点が学べて、その本質を理解できるような環境教育の側面も合わせ持つ必要がある。そのこともあって、図-2の第2画面では選択はボタンを押すような手法を設定しており、図-3のユーザー インター フェイスの図表はカラーをふんだんに使って少しでも分かり易い情報を提供するように心がけた。

3.3 データベース

環境要因の多くは時間・空間的に分布し、変動するものであり、複雑な特性、複雑な過程をもっている。計画や政策決定を効果的に支援するために、OBEISには大量の情報が蓄えられ、利用者のレベルに対応した環境を整える機能を有する。モニタリングとそのデータ管理は沿岸域の物理現象や生態系の環境監視のみならず、環境影響評価のために開発された数値計算の検証のためにも必要である。

GUIは、図-4に示すように、GISを用いたローカル インター フェイスと、IIS(Internet Information Server)を通して html や Java applet を用いたWeb上のインター フェイスとに分けられる。これら二つのインター フェイスは、LANを用いたクライアント サーバー技術を用いることにより統合さ

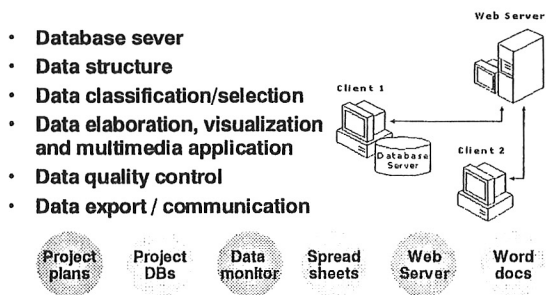


図-4 データ ベースのサーバー構造

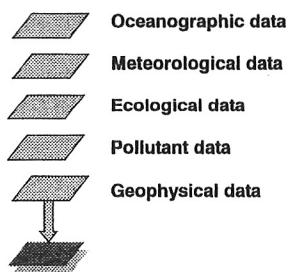


図-5 データの階層性

れる。これにより、データやプログラムをサーバー側に置き、それをクライアント側のWWWブラウザを通して利用することが可能になり、クライアント側に専用のアプリケーションを設置する必要がなくなる。

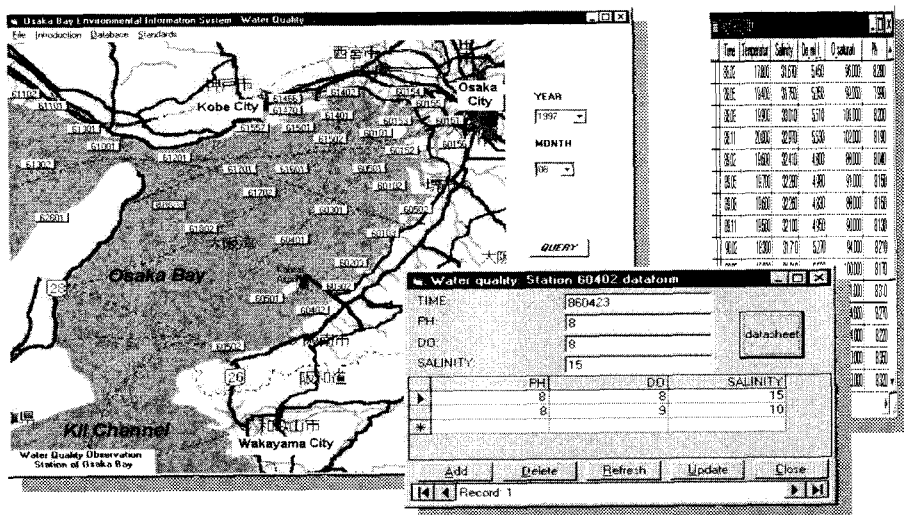
インターフェイスは、他のアプリケーションに見られるように、アイコンやステータスバーなどを用いたものである。利用者はマウスによって選択の表示ができ、必要な条件を代入することで必要な情報を得ることができる。さらに、ヘルプ機能を設けて、利用者の手助けを行う。

OBEISは1920年以降の大阪湾の環境に係る情報、海象、気象、地形、水質、水産、底泥、沿岸陸域の社会指標・経済指標、等を不完全ながら収納した。とくに、1972年以降の浅海定線調査ならびに公共用水域水質調査のデータは水質変化を理解するには有効である。このデータベースにおいては、以下のことを可能にする。

- ・ 最適なデータ コントロール、迅速なアクセス、データ プロセスと質の管理
- ・ 組織的なデータ管理、大量のデータ保管、使い易いインター フェイス
- ・ 集積されたデータの配分、大量の統計的データの分析
- ・ データの改善や更新の容易さ

OBEISではデータ コネクタにADO (Active X Data Objects)を用いる。ADOはデータタイプの違いを気にせずに、形式の異なったデータへのアクセスを可能にするものである。つまり、利用者がユーザー インターフェイスより要求する情報に関するデータを、データ ベースから取り込み、分析、評価、可視化などを行う他のベースのプログラムへの仲介の役割を果たす。

OBEISではデータ ベースを作成する際には、DBMS (Data Base Management System)を用いる。これはデータ ベースの構築の基本となる形式であり、表データの管理、データの関連付け、クエリー (形式) の作成などを行うものである。データ ベースの有効な利用のためには、データを共有すること、データの冗長を抑えることとともに、誰もが容易に使えるよう、適応性を高める必要がある。それには標準的な仕様が必要になる。マルチ メディアのGISは複雑に関連し合っているデータを目的に向って解きほぐし、グループ化するのに有効である。図-5は沿岸域環境に関連したデータを目的に応じて整理した海象、気象、生態系、水質汚染、地球物理、等の空間情報が構造的に蓄積されている状況を示している。図-6は利用者に提供するデータの形式の一例を示している。



OBEISでは、GISをデータベースとモデルベースに統合させる。その機能は統計的なデータを空間的にはもちろん時間的にも表示することが可能となる。データを重ね合わせるにより、環境要因相互間の関連を容易に分析できる。さらに、時系列分析の結果をアニメーションで可視化することにより、利用者は大阪湾沿岸域の環境を理解し易くなる。

3.4 モデルベース

OBEISのモデルベースは様々な決定論的・統計的モデルを統合し、総合的な見解を示そうとするものである。モデルベースに柔軟性をもたせるために、境界条件の変更なども考慮する。図-7にその構造を示し、以下にモデルベースの機能を示す。

- 統計的なモデルによる時系列分析・トレンド分析
- 決定論的モデルによる流体運動・水質の分散過程の再現
- 政策決定の支援

OBEISのモデルベースは沿岸域での環境影響アセスメントに関連して、3次元大気拡散モデルとしてHOTMAC・RAPTAD（山田, 1992）、3次元バロクリック流れモデルとしてODEM（中辻, 1996）とPOM（Blumberg・Mellor, 1987）、氾濫流解析を可能にする2次元流動モデルDIVAST（Falconer, 1986）、複雑地形のための潮流の有限要素法モデル（中辻ら, 1992）、水質予測には低次生態系水質モデル（山根ら 1997）、底生系を考慮した水質・底質モデル（韓ら；2000）を装備している。また、時系列解析を対象とした artificial neural network（Shen・Nakatsuji, 1999）や統計解析バックもある。

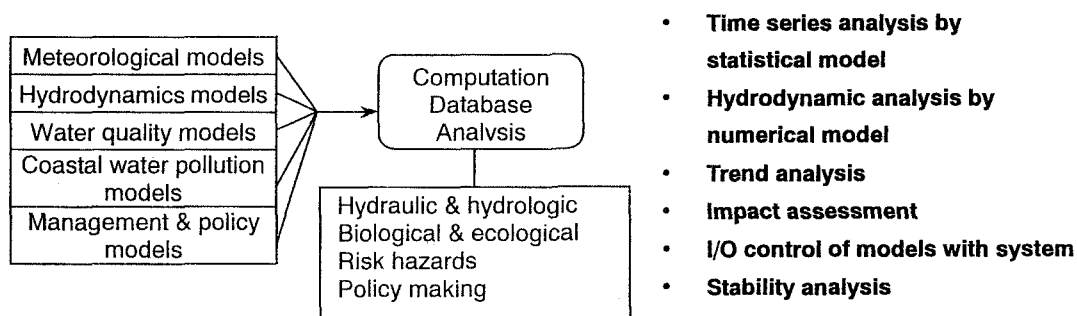


図-7 モデルベースの構造

3.5 知識ベース

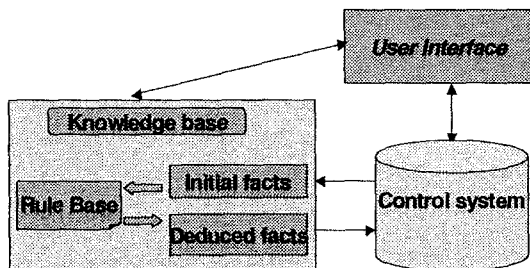
知識ベースの技術は、コンピューターソフトウェアの一研究分野であった人工知能（AI; Artificial Intelligence）から派生したものである。問題の処理に用いられている多くの理論、経験的知見、判断、論理思考などの情報を柔軟性の高い形式によって表現し、知識として蓄えておいて、それを問題解決に利用するものである。ある開発行為の環境影響評価や環境政策代替案の決定判断する段階において、アルゴリズムやモデルではなく、経験者の意見からの論理や規則を使うのものである。どのように専門家が問題を解決したのか、どのような判断を下したのか、というような知識の集積に基づくことになる。専門家に代わって結果を出すことから、エキスパート（専門家）システムとも言われる。OBEISにおける知識ベースの位置付けを図-8に示す。

知識の表現はエキスパートシステムの基本的な概念である。単純な「もし、・・・ならどうする」といったルール表現、フレーム型知識表現、論理式知識表現などがある。このようなシステムの最大の役割は専門の代替である。以下にその特徴と構造を示す。

- ・ 専門家の経験的知識をコンピューターに移入し易い。
- ・ 知識の定義，変更，追加が容易である。
- ・ 知識の利用の過程を専門家や利用者に提示することができ，知識の誤りや不足の検出が容易である。
- ・ 多様な知識の集積である反面，ルールがばらばらであるので，相互関係が掴みにくい。

環境影響評価や環境政策代替案決定判断を行うとき，考慮すべき情報が大量かつ複雑であり，専門家でも短時間に正確な判断を下すことが困難である．与えられた状況を判断して，どの規則が適用可能で，その結果どうなるかという処理は，演繹推論そのものであり，エキスパートシステムを用いることが有効である．

このように知識ベースとは，コンピューターとの対話形式により，環境問題の傾向や機構の解明をさぐっていくものである．代替案の評価や比較をも含み，利用者が必要とする情報を効果的に提供する．



- ・ **How knowledge base works**
- ・ **Problem identification and formulation**
- ・ **Hypothesis study**
- ・ **Uncertainty analysis and the restrictive factors involved in the implementations**

図-8 知識ベースの構造

4. OBEISを用いた環境アセスメント例

4.1 「明石海峡の地形改変による大阪湾の流況制御」のEIA

通産省中国工業技術試験所は1991年に瀬戸内海水理模型の水理実験に基づいて「大阪湾の残差流パターンがわずか数kmの構造物を明石海峡に建設することによって大きく変化する」という結果（樋端ら，1991）を発表した．沿岸海域の流動や物質移動の研究は従来から多分に海洋学の分野であったが，中工試の実験は，沿岸域環境は土木工学の分野であり，海岸工学が海岸の「防災」に止まらず「環境」にも積極的に貢献すべきことを示唆した点で重要である．ここでは流況制御の物理面のみならず，水質も含めた数値計算を実施して，OBEISを用いた環境アセスメント(EIA)の一例を紹介する．

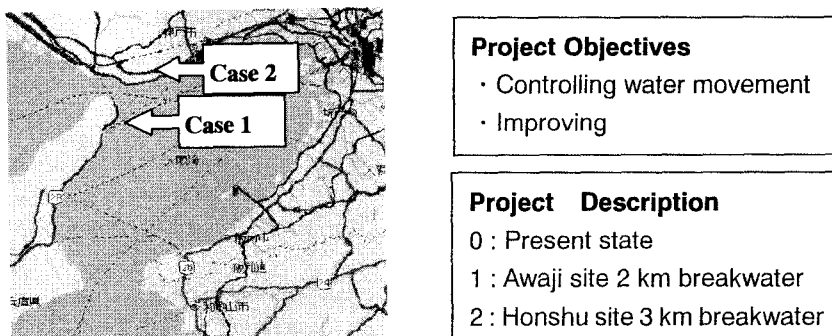


図-9 中工試の実施した流況制御構造物による流況制御の効果実験

4.2 EIAのシナリオ

内湾や閉鎖性海域の物質循環に関与する流動構造に支配的な役割を果たすのは残差流系であることは周知のことである。中工試の水理実験の狙いは、大阪湾の残差流系の一つである沖ノ瀬環流を利用して、湾内流況を制御することにある。そこで、図-9に示すように、明石海峡の淡路島側から垂直に突出した、長さ2kmの構造物を設置したCase 1、対岸の本州側須磨から長さ3kmの構造物を設置したCase 2、ならびに現況のCase 0の水理実験を実施した。水理実験では浮標追跡による流況変化と河川水による淀川河川水の拡がりを把握している。上述のように、対象とするプロジェクトは流況制御を目的としたものであり、埋立て等の開発行為が海域の環境にいかなる影響を及ぼすかを評価する、換言すれば、「開発」対「環境、正確には生態系の保全」の通常の問題設定とは異なる。

そこで、問題点を明確にするために、以下のようなシナリオを想定しよう。

- (1) 水理実験をEIAのスクリーニングとして位置付け、以下のことが明らかになったとしよう。
Case 1案では、沖ノ瀬環流の規模も循環も増大し、淀川河川水は現況よりも数倍早く拡散して播磨灘に抜けるパターンとなった。Case 2案では、沖ノ瀬環流の回転方向が現況と全く反転した。その結果、淀川河川水は神戸沖を這うように明石海峡に向かうパターンとなった。これらの結果から、大阪湾湾奥部の環境改善を優先度一位とするならば、淡路側に流況制御構造物を設置するCase 1をアセスメント対象にするが、以下の調査も必要とする。
- (2) 大阪湾の残差流系は複雑地形の下で生じる潮流を外力とする要因のほかに、水温差や塩分差に由来する密度流、地球の回転等の外力を受ける。水理実験だけでは検討し難い調査項目が多数残っている。数値実験を同時に実施してそれぞれの短所を補いつつ、現象の理解を高める。
- (3) また、流況や淀川河川水の拡がり等、物理面だけでの検討では不十分である。流況の変化に伴う生態系および物質循環も調査項目に加えるべきである。
- (4) 現況のCase 0はCase 1やCase 2の評価の相対値として必要であるが、その水質や生態系の評価が今までの水質汚濁に係わる環境基準を満たすならば、環境影響を回避するという意味で、何も実行しないという回避の代替案として考えることとする。

4.3 EIAのフロー

EIAのフローチャートは、図-10に示すように、先ず、対象海域の現状把握に始まる。大阪湾の海象、気象、土壌、堆積物、水質、生態系のデータは既に整備されているので、3次元潮流の数値計算に必要な初期・境界条件をデータベースから入手する。また、モデルベースから三次元パロクリニック流れモデルの数値実験を行い、流動・密度構造の時間変化を求める。水質モデルは植物プランクトンまで考慮した低次生態系水質予測モデル(山根ら,1998)を使う。対象とした水質項目はCOD、DO(溶存酸素)、Chl-a(クロロフィルa)、TP(総リン)、TN(総窒素)である。

数値計算は数字の集合体であるから、膨大な量に驚くだけで何の価値もない。ビジュアル化の機能を使って、理解しやすく、色鮮やかで、説得力のある図表、場合によっては動画(アニメーション)を用いて説得力のある手段を駆使する必要がある。それらの情報を用いて知識ベースで評価を総合的に行う。

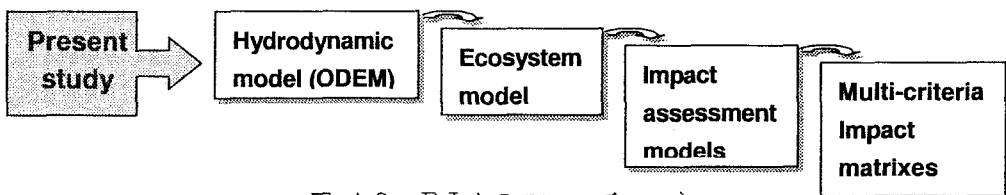


図-10 EIAのフローチャート

4.4 数値計算の概要

計算領域は大阪を原点とした64 km×64 kmの範囲であり、水平格子幅は1 km×1 km、鉛直方向には不等間隔で10層に分割した。また、紀伊水道側と播磨灘側の境界において12時間周期の潮汐変動を与えた。計算領域および流動モデルは中辻(1996)と同様である。大阪湾湾奥部の河川流量は1983～1992年の淀川における8月の平均流量 241 m^3/s を与えた。まず、計算条件の妥当性を検討するためにバロトロピック流れ場における数値実験を行い、中工試水理実験と数値実験の結果を比較した。つぎに、淡水流入、海面熱収支、地球自転を考慮したバロクリニック流れの数値実験を実施した。さらに、流動の数値実験により得られた結果を用いて、淀川河口の水深2 m、4 mに各500個づつ計1000個の中立粒子を配置した50日間の粒子追跡の数値実験を実施し、その分散特性から粒子の大阪湾での残留率の変化を調べた。

水質モデルは窒素、リン、COD、溶存酸素の生物化学的な変化過程をモデル化した低次生態系水質モデルである。(山根, 1998 参照) 物質の輸送・拡散には流動モデルで求めた流速と渦拡散係数の3方向成分を各計算格子点で与えた。計算対象とする物質形態は、生物体有機物を代表する植物プランクトン量としてクロロフィルa (Chl-a)、栄養塩として無機態窒素 (IN)、無機態リン (IP)、非生物体の有機物としての窒素 (NL-ON)、有機態リン (NL-OP)、COD (NL-COD)、さらに溶存酸素 (DO) を設定する。非生物体有機物はデトリタス態と溶存態の総称としている。水質の予測計算は25日間実施した。つぎの、つまり51周目の水質の計算結果を1周期間積分して、潮汐による変動を除去した値を考察対象とする。陸域からの栄養塩の負荷量や海底からの溶出等は夏季の代表値を用いた。

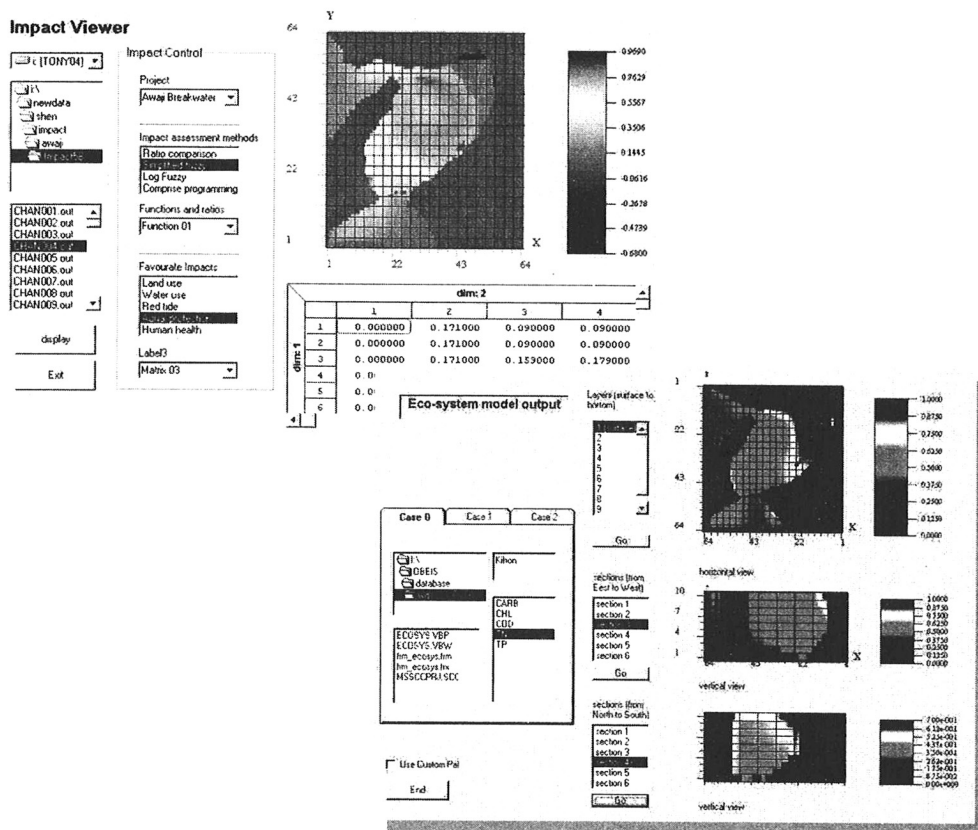


図-11 モデルベースの標準的な入・出力シート

図-11はモデルベースの標準的な入出力シートを示しており、ボタンの操作で種々の階層性、時間・空間のデータが収納できるように設計されている。上段のシートは、種々の水平2次元の情報をGIS流に1km表現したものであり、その項目の内容は左の数多くのウィンドウのボタン操作で選択することができる。右の図は当該データの水平分布を示している。異常値が見つかった場合、あるいは異なる値を入力したい場合には、変更したい値は図下の表を用いて入力できる。下図は主としてモデルベースの計算結果の出力に用いられる。代替案の計算結果もこの図面上に出力されてくるので、利用者は出力データを計算機の中で足したり引いたりするだけで、データ群の後ろに隠されている真実を探り当てることも可能である。上段と同様に図の左にはデータの内容を示してあり、右には3つのマップが示されており、上から順に層毎の水平分布、東西方向の鉛直分布、そして南北方向の鉛直分布である。すなわち、任意の水平面あるいは任意の鉛直面での分布がカラー図面で表示されるので、未処理のままの生データであっても現象の理解に役に立つ。

4.5 数値計算結果：残差流系と栄養塩の分布

複雑地形の沿岸域における物質循環には、潮流よりも潮流一周期間積分して得られる残差流の貢献が大きいことはよく知られている。大阪湾における残差流系の特徴は、① 淀川河川水の影響で大阪湾湾奥部の20m以浅の海域は一年中成層状態にあること、② この成層化と、エスチュアリー循環と地球自転の影響を受けて生起する高気圧性循環（つまり時計回りの西宮沖環流）が海面下3mから5mの水深にのみ発達していること、④ 明石海峡の南東部の沖ノ瀬を中心に循環流の発達が見られ、それは水深方向に一樣であることから地形性潮汐残差流であることである。大阪湾でのEIAの評価基準のひとつはこの残差流系がどの程度の影響を受けるかどうかである。

図-12は計算開始後26日の1周期目の残差流のベクトル一周期間積分したCODの平面分布を水深別に表示した。図(a), (b), (c)はそれぞれCase 1, 2, 3に対応している。図-12(a)は現況であり、沖ノ瀬環流が全水深で、また西宮沖循環は水深3mと5mで発達しているのがよくわかる。COD分布は湾奥に

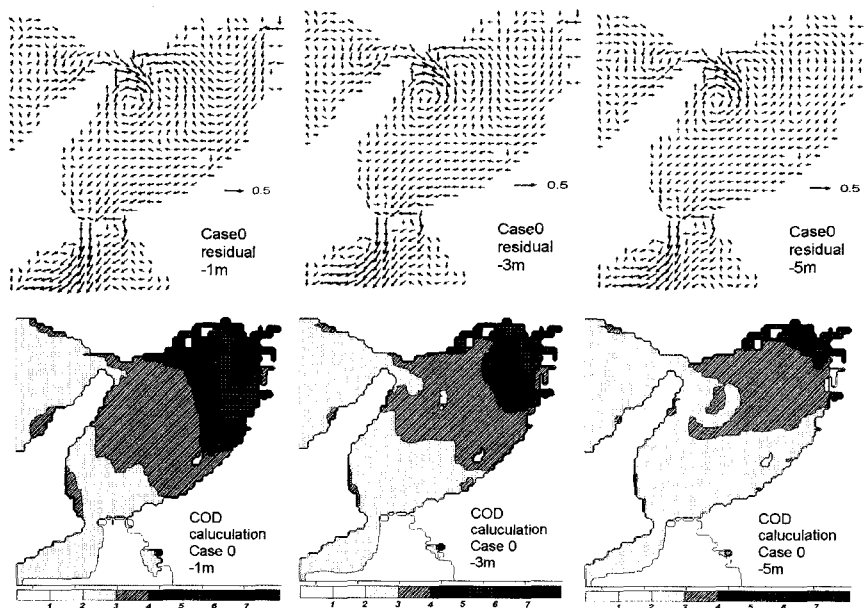


図-12(a) 計算開始から25日後の残差流と一周期積分したCODの水平分布：Case 0
(水深は海表面から1m, 3mおよび5mである)

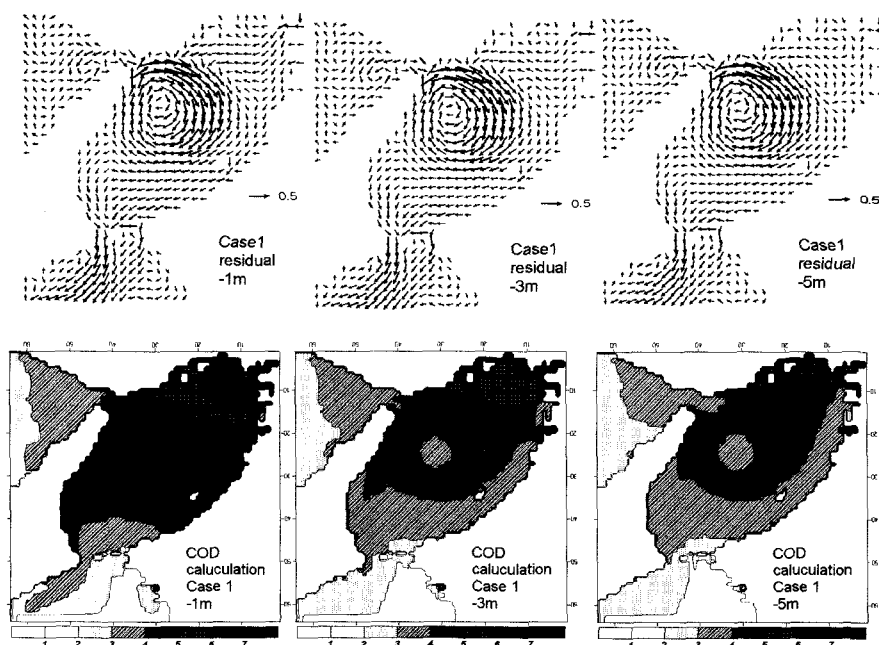


図-1 2 (b) 計算開始から 25 日後の残差流と一周期積分した COD の水平分布： Case 1
(水深は海表面から 1m, 3m および 5m である)

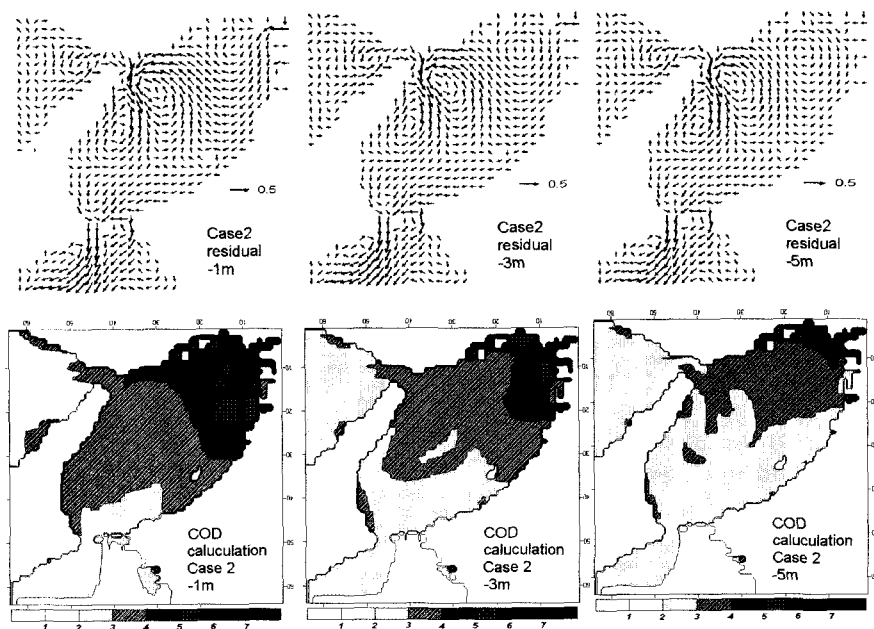


図-1 2 (c) 計算開始から 25 日後の残差流と一周期積分した COD の水平分布： Case 2
(水深は海表面から 1m, 3m および 5m である)

向かって大きくなる傾向を示す。海表面でのCOD = 4 mg/L の等値線は東部成層海域と西部鉛直混合海域の境界に発達する潮汐フロントの位置と合致しているのは興味深い。

淡路島側に構造物を設置した Case 1 では、明石海峡からの強い潮流により形成される時計回りの沖ノ瀬環流が、現況地形の Case 0 と比較して約 2 倍も拡大した。また、湾奥部の成層海域の面積が現況地形と比較して縮小しており、西宮沖環流や大阪湾東岸に沿って南下する残差流も見られない。海表面のCODの値は紀淡海峡の周辺海域を除いて大阪湾全域で 4 mg/L 以上である。水深 3 m, 5 m であっても、COD は全海域で 3 mg/L 以上、3/4 程度の海域が 4 mg/L 以上となっている。図-1 2 (b) の COD 分布で丸い濃度の低い海域が認められるが、その位置はまさしく沖ノ瀬環流の中心に相当する。

本州側に構造物を設置した Case 2 では、時計回りの沖ノ瀬環流の規模が現況地形の Case 0 と比較して約 1/2 に縮小し、その中心位置は淡路島付近まで移動する。そして、今まで不明瞭であった反時計回りの循環が明石海峡の南東部に現れ、両方で渦対を形成しているのが分かる。明石海峡の海水交換に関連する有効幅が狭くなった。湾奥部における西宮沖環流の存在は現況と変わらない。COD の分布もほぼ同じである。

4.6 数値計算の結果 : 可視化技術の利用

専門的知識を持たない人に大阪湾の水の流れを理解してもらうには、微分方程式を懸命に説明するよりも、美しい絵や写真を見せるよりも、実際の水の流れを見るのが一番である。水理実験の利点はそこにある。漁師は自分の経験と模型実験の流れが合っていれば、水理実験を無条件に信頼する。近年のコンピューターソフトの開発はアニメーションの作成を可能にした。図-1 3 は淀川河口から放流した粒子群の挙動を示す 1 画像である。左図は 3 次元表現であるが、粒子群の位置が歪むので、現象の理解はなかなか難しい。専ら右図の平面図と立面図を情報として提供して各人の頭脳のなかでの 3 次元化に期待せざるを得ない。3 次元描写できるソフトの開発が俟たれる。それでも、可視化に訴えるアニメーションが理解の増進に果たす役割は大きい。(中辻, 1997 参照)

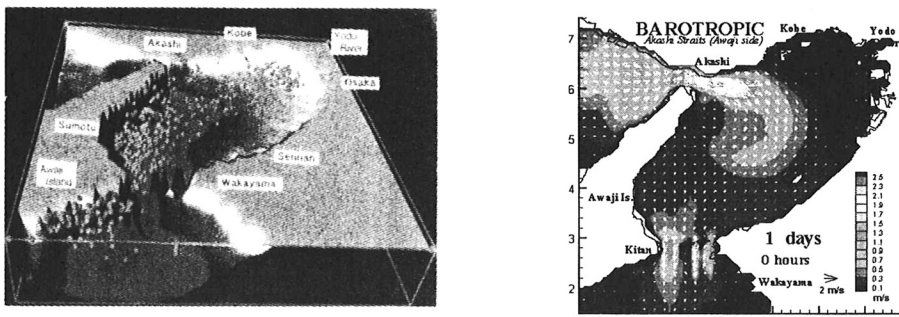


図-1 3 粒子群の 3 次元追跡による流動解析

さて、このアニメーションを用いた海水交換の定量化の試みる。図-1 4 は淀川から放出された計算開始後 50 日の粒子の大阪湾、紀伊水道、播磨灘における存在割合を示す。図中の数値は各海域に分布する粒子数を全粒子で除した値である。現況地形の場合 (Case 0)、大阪湾に 30%、播磨灘に 4%、紀伊水道に 66% の粒子が分布する結果となった。明石海峡に構造物を設置した場合は、堤防の設置場所の違いにより、粒子の存在割合が大きく異なる結果が得られた。淡路島側に構造物を設置した Case 1 では、沖ノ瀬環流の規模が大きくなるため、図-1 2 (b) で示したように沖ノ瀬環流に取り込まれた水塊はそこから抜け出すことができなくなり、大阪湾内に残留する。この場合、淀川河川水の大阪湾への残留率は 61% と最も高くなり、海水交換が悪くなる。また、播磨灘における粒子の残留率は 17% と他のケースと比較して大きくなった。これは、粒子群が沖

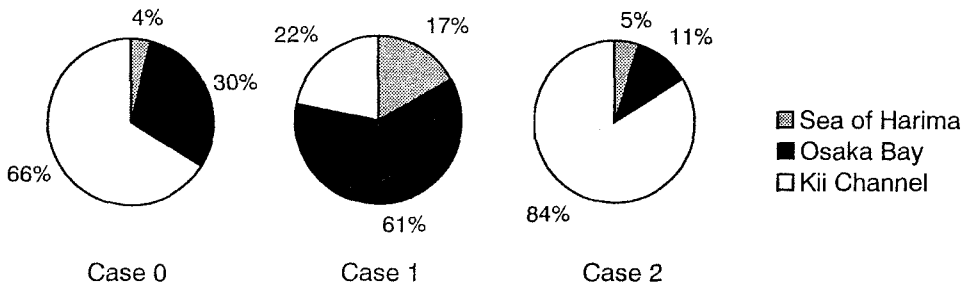


図-1 4 粒子群の放流開始から50日経過後の淀川河川水の分布（石塚・中辻；2001）

ノ瀬周辺海域に留まる時間が長くなり、明石海峡における潮流振動により播磨灘まで運ばれたためである。一方、本州側に設置した Case 2 では、淀川河川水の大阪湾への残留率は11%となり、現況地形の結果よりも大幅に減少している。これは 図-1 2 (c)で示したように、粒子を滞留させる役割を有する時計回りの沖ノ瀬環流の規模が従来よりも小さくなり、反対に、沖ノ瀬環流と渦対を形成する反時計回りの須磨沖反流の規模が大きくなっているためである。したがって、淀川河川水は明石方向に移動し、須磨沖反流にいったん取り込まれるが、水塊を残留させることができずに粒子は紀伊水道へとただちに流出する。汚濁負荷源として淀川河川水をとらえた場合には、大阪湾での残留率の少ない Case 2 が流況制御に最も効果的である。このようにアニメーションは停止画像では得られない情報を入手できる点で貴重なツールである。

4.7 ファジィ セット 理論を用いた環境影響評価法

（1）環境基準値を用いた評価

閣議アセス法では、行政が予め設定した環境基準（環境保全目標）に照らして事業者の見解を明らかにすることが評価の基本になっていた。すなわち、アセスメントで予測した値が行政目標をクリアしているかどうかだけが評価であった。具体的に述べると、海域をCODとDOに関してはA、B、Cの3類型に、T-N（総窒素）とT-P（総リン）に関してはIからIVの4類型に分けて、水質項目毎にそれぞれの類型海域で異なる環境基準値を設定して、その達成率で環境への評価を数量化している。例えば、CODについては、環境基準値は 2 mg/L 以下（A類型）、3 mg/L 以下（B類型）、8 mg/L 以下（C類型）と、湾奥に向かって基準値が低くなるように設定されている。閉鎖性海域の特徴を考慮して努力目標値を低くしたと解釈できるが、

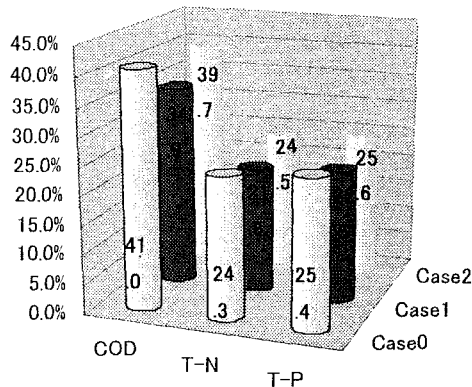


図-1 5 各予測ケースのCOD、T-NとT-Pの目標達成率の比較

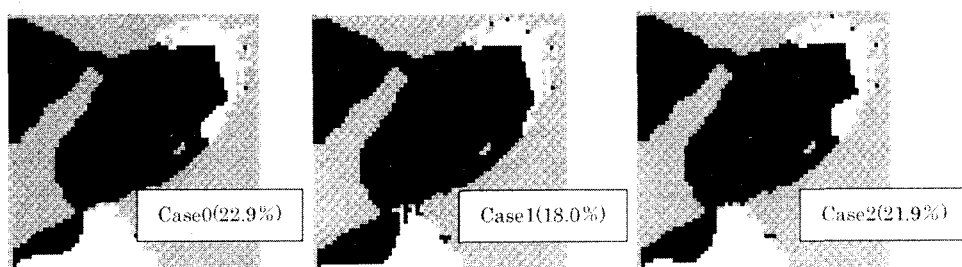


図-1 6 海面下5 mにおけるCOD目標達成率の比較

わずか20 km離れた海域で環境基準値が4倍も変わるのには理解できない。

図-1 5は水質3項目の各ケース毎の目標達成率を示している。CODと比べてT-NやT-Pの達成率が低いことが分かる。また、Case 1の達成率がすべての水質で悪いことも明瞭に理解できる。しかしながら、個々の水質の達成率が分かっても、どのケースが一番良いのかの判断を下すことは難しい。因みに、図-1 6は水深5 mにおけるCODの目標達成率とその水平分布を示す。白色は基準値を満たしている海域である。3ケースともに、達成率が低く20%前後であり、図-1 5と同様に判別をつけ難い。興味あることは、環境目標値を満たしているのは湾奥部の類型C海域である。これは湾奥部で達成可能と思われる低い目標値を設定したために生じた。しかしながら、一般的に解釈すれば、水質汚濁が進んでいるC類型の内湾が、目標を達成したということは、「水質がよい」とみなされる。この点でも環境基準の概念は矛盾を露呈している。

(2) ファジイとは

自然環境は現代科学では解明しきれない、多くのファジイ性(あいまいさ)と不確かさを併せもっており、しかも要素間の相互関係も複雑である。観測や数値計算で得られる情報も誤差を含み厳密さに欠く。また、評価価値の高い情報の中には定性的記述にとどまるデータも多々ある。例えば、毒性物質のように致死量が明瞭な数値で与えられる物質が環境や人間への影響を評価することは易しい。しかし、複合汚染にみられるように、種々の要因は単独では環境に与える影響は少ないが、ある種のものと合成すれば、異常な現象を惹起するような場合の取り扱いが難しい。

環境基準の概念では、ある海域に15の観測点があり、その中で環境基準値を満たす測定点が9点であれば、達成率は60%と判断する。しかし、海域での栄養塩分布は種々の物理因子の影響を受けて、それらの変動幅も大きい。流況状況によっては、昨日達成率が70%であったのが、今日は50%あるいは80%になる可能性も高い。かりに類型B海域の環境基準値を適用すれば、達成率は0%となるかもしれない。一見合理的に見えるが、実態とは合っていない。また、CODでは目標値に達しているが、総リンT-Pは目標値を満たしていない場合の評価をどのように考えるべきか。全ての物質の値が基準値の95%であっても、「水質は悪い」と判定される。

(3) ファジイセット理論 (Zimmerman; 1991)

ここでは、海域の類型区分の考え方をやめ、環境基準値も大阪湾で一定値に定める。自然現象が多くのファジイ(あいまいさ)と不確定さを含んでいる限り、その確定的方法では問題が多いことから、各水質ではなく、統合した水質群の評価法を検討する。自然現象の不確定さを考慮するために、ファジイ理論のなかでも最も単純なファジイセット理論を導入する。その概要を図-1 7に示す。それは影響の度合いを0か1かの不連続な判定ではなく、0から1へと連続的に階級化を施すことによりファジイ性の導入を図る理論である。

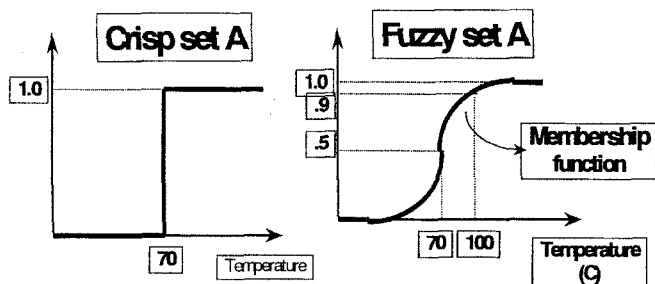


図-17 ファジイセット理論の階級化関数

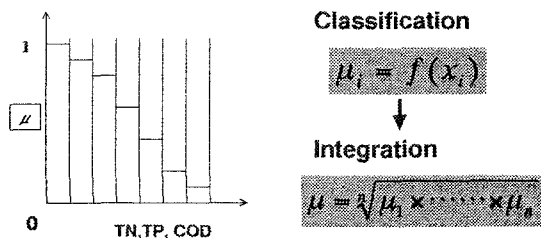


図-18 階級化と総合評価関数

表-1 メンバーシップ関数による階級化

μ	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	1.0
T-N	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.2
T-P	0.14	0.12	0.01	0.08	0.06	0.04	0.02
COD	10.0	8.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0

(Unit: mg/L)

各評価項目が0から1の数字で定量化されるから、総合評価は図-18に示すような複数の項目の相乗平均を求めることができるので容易である。もちろん、各項目の重要度が既知であれば、重みつき係数を掛け合わせるによって評価の精度があがる。階級化のメンバーシップ関数の決定や総合評価関数での水質項目の評価は知識ベースで述べたように、専門家の判断に委ねられる。関数をうまく表現できれば、単純ではあるが有用な手法である。目標値達成型との比較もあるので、ここではCOD、T-P、T-Nを対象にする。メンバーシップ関数として表-1に示す階段型を用いた。

(4) ファジイ セット理論による評価

表-2は各層位の各格子点で得られる総合評価値 μ (=0~1)の合計値 $\Sigma \mu$ を水深方向に累積した値 $\Sigma \Sigma \mu$ の各ケースの比較を示す。また、図-19は全水深積分した総合評価値の水平分布を示す。総合評価値は評価する格子点の数に依存するので、ここでは相対的な評価となる。したがって、図-19の表示も総合評価値の合算値は図中に示すが、分布形には等値線の値は示していない。淀川河口周辺域での値が最も大きく、河口周辺を除いては、白色から灰色へ、黒色へと海域の色が濃くなるほど、水質の基準値へ近づくことを示す。3ケースの分布形状と合算値から判断できることは、3ケースの中でCase1が他の二つと比べて明らかな

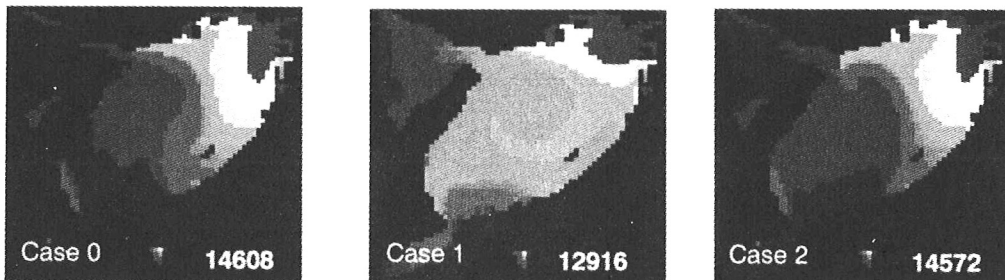


図-1 9 全水深積分した総合評価値の水平分布（図中の数値は総合評価の合算値を示す）

表-2 各層位毎の総合評価値の合計値 $\Sigma \mu$ を水深方向に累積した値 $\Sigma \Sigma \mu$ の比較

Layer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total
Case 0	460.7	822.9	1149.2	1571.2	1882.6	1856.0	1820.7	1773.6	1689.9	1581.6	14608.8
Case 1	437.3	759.4	1037.5	1374.9	1637.3	1618.3	1591.9	1553.9	1507.8	1397.6	12916.3
Case 2	458.5	818.0	1143.3	1564.0	1876.9	1851.9	1818.8	1772.0	1689.2	1578.9	14571.9

違いがあり、合算した値も小さい。したがって、水質に及ぼす影響の評価から、Case 1 の流況制御工法は却下される。従来型の環境基準値の評価（図-1 5）では、判定することは不可能であった評価である。Case 1 では沖ノ瀬環流が強化され、淀川から流入してくる栄養塩を神戸側に引きずり込んでいる。図-1 2で見られた流動の影響が 図-1 9にも現れている。総合評価の合算値からみて、Case 0 と Case 2 との間には有意な違いが認められないことから、両者の優先度を定めるまでには到っていない。何もしないという代替案（Case 0）も含めて検討するには、生態系への影響評価等を検討してみる必要がある。

5 まとめ

大阪湾の環境を統合的に一元管理することを目的に開発した大阪湾環境情報管理システム（O B E I S）の設計思想ならびに環境影響評価（E I A）への適用例を示した。環境情報システムは大きな可能性を秘めながらも、現段階ではいまだ試行的な段階にある。データベースの整備の必要性が到るところで強調されているが、成功した例はあまり聞かない。それは知的財産という認識に欠けていることに加えて、このような統合的な環境情報システムを実際に役立て、活かそうとする方向で検討されたことが少ないことも原因している。また、積み木細工のようなシステム作りは学問ではない、研究ではないと考える大学人が多過ぎた。システムの構築は、構築自体を目的とするのではなく、それによる水域の環境の保全や創造の技術開発やその評価技術の開発が目的である。その認識が乏しいことが、環境学の発展を抑える。

本文でE I Aに触れながら、言及しなかったことが二つある。それは「生態系（モデル）」であり、「生態系への影響評価法」である。新アセス法の基礎となる中央環境審議会の「今後の環境影響評価制度の在り方について（答申）」（平成9年）において、以下の記述がなされている。2.⑤ 環境基本法に対応して、生物の多様性などの新たな要素を評価できるよう、評価対象を見直すとともに、評価に当たっては、環境基準等の行政目標をクリアしているかどうかだけでなく、環境影響をできる限り回避し低減するという観点から評価する視点を取り入れること。また、5. 調査・予測・評価の実施の項においても、キーワードのみを記す

が、生物の多様性、回避・低減、複数案の比較・検討、代償的措置、名前の明示等である。答申から判断すれば、言葉はもとより、ミチゲーションの思想を導入していることがよく分かる。また、環境省が推進している地球規模での生物多様性保全の思想もまた色濃く反映されている。

米国のミチゲーション政策は 1985 年に提案され、1988 年にブッシュ大統領が選挙公約の中で NO NET LOSS を提唱するに及んで、その政策は決定的なものとなった。その概念は、「開発による自然生態系への被害を最小限に軽減するとともに、損なわれるであろう環境と同等で同質のものを、代替措置を講じて再生、修復あるいは復元する」ことであり、「開発行為の環境への損害をゼロにする」とするものである。その実施に際して開発対象となる海域での環境価値を定量的かつ客観的に評価することが最も重要であることから、生物の種々の生息場評価手法が米国では熱心に継続して開発されている。また、生態系モデルの開発も物質循環と収支に着目した低次生態系から、水産資源の育成と漁獲量を対象とした高次生態系まで盛んに行われている。これに対して、わが国における生態系のモデルおよび評価技術の信頼性は極めて低い。識者は言う、「生態系の素過程には不明な点、未解明な点が多く、開発した評価法や生態系モデルを検証する信頼できる観測データがないかぎり難しい。先ずは観測データの蓄積から始めるべきだ。」「土木の人間が水質ならまだしも、何をいまさら生物や、生態系や、生態系モデルやと、専門外のことに振り回されるのか」云々。とはいっても現実の E I A を進めるには、水質だけでは議論にならない。生態系の機能を正確に、确实性の勝った、信頼できる予測モデルや評価技術が必要とされている。従来の環境基準値の概念では生態系との関わりが乏しいことは本研究で議論したとおりである。生態系の機能を統合的に評価できるソフトの研究が今後重要になるだろう。環境行政の進展は環境研究のそれを追い抜く勢いである。研究者は、実務者はこの現実に対してどのように対処するのか、楽しみである。

謝 辞

本研究は、沈一楊博士（現：地球フロンティア研究システム）の学位論文の一部である。数値計算は山根伸之博士（現：(株)建設技術研究所）と石塚正秀博士（現：和歌山大学システム工学部）の協力を得た。また、平成14～16年度日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究（A）「閉鎖性海域の統合型水環境管理システムの開発—大阪湾研究の中国渤海への展開」（研究代表者：中辻啓二、課題番号14205073）の補助を受けた。記して関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 石塚正秀・中辻啓二(2001)：海峡部における人工的地形改変が内湾の流動構造に及ぼす影響の数値実験，海岸工学論文集，第 48 巻，pp.1291-1296.
- 樋端保夫ら(1991)：潮流制御による瀬戸内海環境保全技術に関する研究，中国工業技術試験所研究報告，第 8 号，48pp.
- 中辻啓二(1992)：ESTUARINE ENGINEERING の提唱，瀬戸内海研究フォーラム in 広島，pp.45-47
- 中辻啓二・栗田秀明・狩野晋一(1992)：S G S 渦動粘性係数を用いた大阪湾潮流の有限要素法解析，水工学論文集，第36巻，pp.693-696.
- 中辻啓二(1994)：大阪湾における残差流系と物質輸送，土木学会水理委員会・海岸工学委員会，水工学シリーズ94-A-9，28 pp.
- 中辻啓二(1997)：大阪湾における流れの可視化，月刊「水」，pp.16-24.
- 中辻啓二(1998)：環境水理シミュレーションの組み立て方と留意点，土木学会水理委員会・海岸工学委員会，水工学シリーズ 98-A-5，20pp.

- 中辻啓二 (1996) : 海洋・閉鎖性海域, 環境数値流体力学講座 2, 4 巻 4 号, pp.306-332
- 中辻啓二・寺口貴康・山根伸之 (1988) : 近年70年の大阪湾水質の時間と環境事後評価の試み, 海岸工学論文集, 45巻, pp.1011-1015, 1988.
- 中辻啓二・沈一楊(2002) : バーチャル大阪湾研究所構想に向けての沿岸域総合管理システムに関する研究, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.1456-1460.
- 韓銅珍・丸谷尊彦・中辻啓二 (2000) : 閉鎖性内湾における水質・底質モデルの構築とその検証, 海岸工学論文集, 47巻, pp.1091-1095. .
- 山田哲二(1992) : 大気環境シミュレーション, 第 3 章, 白亜書房, pp.134-202.
- 山根伸之・寺口貴康・中辻啓二・村岡浩爾 (1998) : 大阪湾における水質の季節変動に関する数値実験. 水工学論文集, 42巻, pp.739-744.
- Blumberg, A. F. and G. L. Mellor (1987) : A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, Three-dimensional Coastal Ocean Models, Coastal Estuarine Science, Vol.4 N. .Heaps, ed., American Geophysical Union, Washington D.C., pp.1-16.
- Falconer, R. A. (1986)) : Water quality modelling in the inland natural environment, Bournemouth, England, 10-13 June 1986.
- Shen, Y. and K. Nakatsuji (1999) : Applying artificial neural networks in Chlorophyll time series simulation in water environment, J. Hydrosience and Hydraulic Engineering, Vol.17, No.2, pp.51-57.
- Zimmermann, H. J. (1991) : Fuzzy Set Theory and Its Applications, Kluwer Academic Publishers.