

バーチャル大阪湾研究所に向けての沿岸域総合管理システム に関する研究

中 辻 啓 二*・沈 一 楊**

Hydroinformatics という造語の意味するところは、従来の Computer Hydrodynamics と言う環境水理をコンピューターで解くという範疇に甘んじることなく、環境一般にも研究対象を見出していく姿勢が感じられる。まさに、流動や水質予測に止まることなく、生態系をもシミュレーションの対象にという我国の研究者の方向とも一致する。理論も、観測も、シミュレーションも、そして社会科学や人文科学の情報さえ、数量化されて小さなパソコンの中に入ってくる時代である。その小さなパソコンの中に、大阪湾があっても、生物が棲んでいても不思議ではない。本研究ではバーチャルな大阪湾を可能にする環境情報管理システムの開発を検討した。

1. はじめに

Hydroinformatics という造語がデルフト研究所の研究者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 5 回国際会議が 2002 年に英国 Cardiff 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、政策決定という目的型実用システムにとっては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、もちろん必要であるが、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あがめる理論の崇高さも何をか言わんやである。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研究者 (= 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。

第一著者は第 1 回瀬戸内海研究者会議(1992)で, Estuary Engineering を提唱すると同時に, Osaka Bay Authority 構想を提案している。前者は平成 6 年から海岸工学委員会地球環境問題研究小委員会の公募研究として活動した。一方、後者で力説した内容は、環境保全や環境創造を具体的に実行するには大阪湾全域の海事、港湾機能、沿岸域環境管理を統括できる行政組織の実現が必要であること、それ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である。バーチャル大阪湾研究所構想はその延長線上にある。

本研究においては「バーチャル大阪湾研究所」の創設を提唱するとともに、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 OBEIS (Osaka Bay Environmental Information System) を開発する。

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、大阪湾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、等) もデータベースとして考慮する必要がある。

このような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

* 正会員 工 博 大阪大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻
** 博 (工) 地球フロンティア研究システム

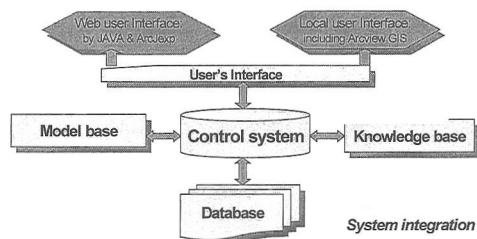


図-1 OBEISの概要

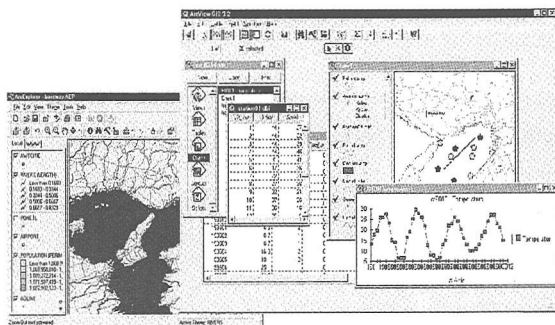


図-2 ユーザー・インターフェースの一例

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：Geographical Information System）が開発され，様々な分野で実用化されている。このGISとマッピングを用いて沿岸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シミュレーションにより行なわれる。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生き返る。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。

3. 大阪湾環境情報システム（OBEIS）の開発

本節では，大阪湾環境情報システム（OBEIS）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の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）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，環境政策の代替案の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きく注目し，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が期待される。

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・インターフェース，さらに，それらの機能を統合する制御システムにより構成される。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。

（1）ユーザー・インターフェースと制御システム

OBEISの重要な機能にモデルとデータの統合がある。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）を通じて，環境関連データを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。GUIの一例を図-2に示す。

（2）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，アセスメントのために開発された数値シミュレーションの検証のためにも必要である。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

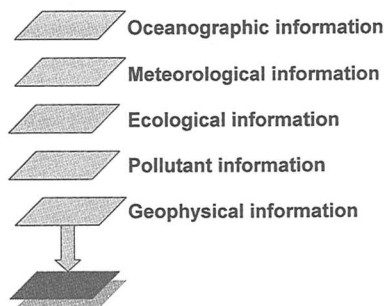


図-3 空間情報データと供給データ構造

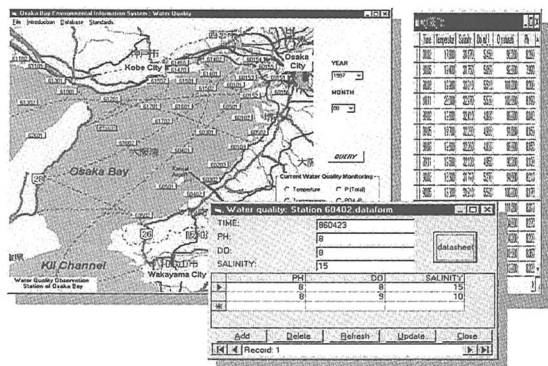


図-4 GISとデータクエリー

- ・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ース
- ・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

OBIESではデータベースを作成するに際しては、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、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かって解きほぐし、グループ化するのに有効である。図-3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-4は利用者に提供するデータの形式（クエリー）の一例を示している。

OBIES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ことで、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、利用者に大阪湾沿岸域の環境の理解を助ける役割を果たすことができる。

大阪湾の密度構造と淀川河川流出量との応答を明らかにするために、浅海定線調査と公共用水域水質調査の各観測点で得られた表層塩分濃度（20年×12月＝240データ）と淀川流出量との相関解析を山根ら（1997）が行っている。淀川流出量は枚方地点の日平均流量（建設省、1973～1992）をもとに表層塩分の観測日から逆上る1～20日間の20ケースの累積流量を設定した。各観測点の表層塩分と淀川流出量との相関関数で相関値の最も高

くなる累積日数から「遅れ日数」を求めた。その結果、相関係数が0.7以上の海域は潮汐フロントから東部の海域、つまり西宮沖環流が形成される海域に相当している。また、この遅れ日数を小さい順に追っていくと、それは西宮沖環流の流動（中辻・藤原、1995）と一致した。成層効果や地球の回転系が関与する地球流体的にも複雑な高気圧性循環が観測データのなかに内在していたことを示すものであり、観測データの蓄積がいかに重要であるかの証左である。

(3) 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にいれる。図-5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・傾向分析
- 決定論的モデルによる流体の分析
- 政策決定の支援

OBIESのモデルベースには、大気拡散モデルとしてHOTMAC-RAPTAD(山田, 1992)、3次元パロクリニック流れモデルとしてODEM(中辻, 1996)とPOM、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(丸谷ら; 2000)を装備している。近年、動物プランクトン以上の高次生態系モデルが開発され実用化に向いつつあるが、検証用の観測

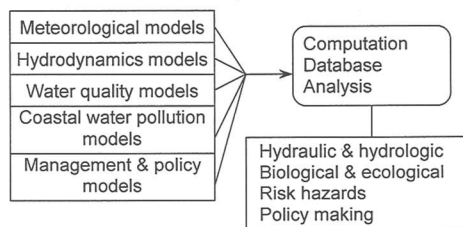


図-5 モデルベースの構造

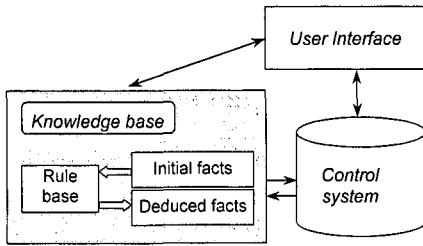


図-6 知識ベースの構造

データが少なく、モデルの信頼性が乏しい。

(4) 知識ベース

知識ベースは、環境分野における政策支援システムによく用いられるものである。これは環境影響評価や環境政策代替案決定判断システムに、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ものである。知識ベースまたはエキスパートシステムは、AI (Artificial Intelligence 人工知能) という概念に基づくものである。それは、多くの経験的知識、判断、論理思考などを知識として表現し、それらを集積することにより、結果をもたらすシステムである。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。OBEISにおける知識ベースの位置付けを図-6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。

- ① 専門家の経験に基づく知識をコンピューターに移入し易い。
- ② 知識の定義、変更、追加が容易である。
- ③ 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。
- ④ 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には、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。

以上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含み、利用者が必要とする情報を効果的に提供するものである。

一方、沿岸開発による環境影響評価やミチゲーション

効果の数量化のために、HEP, WET, HGM, BEST 等が米国で数多く開発されている。それらが風土、自然観、社会制度、法体系、等の異なる我国に適用するには一考を要する。

4. OBEIS による環境アセスメント

(1) 水質の評価をどのように考えるのか？

最後に、OBEISを用いて大阪湾での仮想プロジェクトの環境アセスメントを試みる。毒性物質のような致死量的な値を与えられる物質の影響評価は易しい。しかし、複合汚染にみられるように、種々の要因が単独だけでは与える影響は少ないが、ある種のものと合成すれば、異常な現象を生起するような場合の取り扱いには難しい。現状の評価法では、海域を類型に分け、水質項目毎にそれぞれの海域で異なる基準値(目標値)を設定して達成率で評価している。例えば、内湾の15測定点のうち達成している測定点が9点であれば、達成率は60%となる。一見問題がないように感じるが、現実には年々積み重なっていくことになるから、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TPは目標値を満たしていない。この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、「影響なし」と判定される。

ここでは、海域の区分をやめ、基準値も一定値に定める。自然現象が多くのファジィ(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。

(2) 検討すべき内容はなにか？

中工研の水理実験で実施された仮想プロジェクト「明石海峡の本州側および淡路島側から堤防を設置した場合の大阪湾における流動構造と水質分布への影響」(樋端ら, 1991)をとりあげた。まず、データベースから大阪湾の物理・地理・気象・海象に関する初期状態や時間変動する境界条件を入手し、モデルベースから三次元バロクリニック流れモデルの数値実験を行い、流動・密度構造の変化を求めた(石塚・中辻, 2001)。潮汐は半日周潮

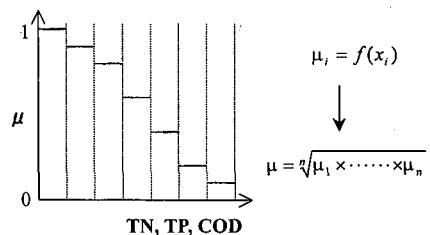


図-7 メンバーシップ関数による階級化と統合評価値

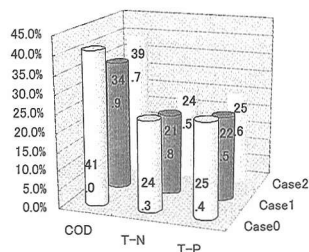
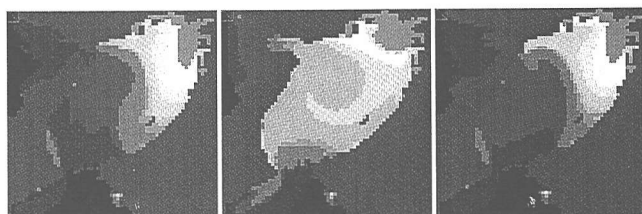


図-8 目標値達成型プロジェクト評価



Case0 14608.854 Case1 12916.373 Case2 14571.960

図-9 ファジィセット理論によるプロジェクト評価

を採用し、対象とする時期は夏季とした。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(石塚・中辻, 2001)であり、対象とした水質項目はCOD, DO(溶存酸素), Chla(クロロフィル a), TP(総リン), TN(総窒素)である。

自然現象の不確定さを考慮するために、ファジィ理論のなかでも最も単純なファジィセット理論を導入する。その概要を図-7に示す。それは影響の度合いを0か1かの判定ではなく、0から1へと階級化を施すことによりファジィ性を配慮するとともに、複数の項目の相乗平均で総合的評価を可能にしようとするものである。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, TP, TNを対象にする。メンバーシップ関数として階段型を用いた。

(3) 何がわかったのか?

水理実験や3次元シミュレーションでは、現況(Case-0)や本州側3km堤防(Case-2)の実験では存在した湾奥部の時計回り循環が、淡路側堤防2km(Case-1)の実験で消滅するという興味深い結果を示した。各種水質項目の水平・鉛直分布を図示することにより、循環が水質輸送に果たす影響がより明瞭になった。

図-8は、プロジェクト3件が実施された時の水質3項目の達成率を示している。CODと比べてTNやTPの達成率が低いことが分かる。また、Case-2の達成率が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。そこで、CODに関してはA類型水域の2mg/lの値を $\mu=1.0$ としたメンバーシップ関数を、同様にTNとTPも類型II水域の0.3mg/l, 0.03mg/lをそれぞれ $\mu=1.0$ とした関数を設定し、評価は図-7の右図に示す単純な n 乗根を各メッシュで計算した。表層から10層位(20m)まで鉛直方向に加えた値を示したのが図-9である。淀川河口の値が最も大きく、図

で薄い色ほど、水質の基準値からの隔たりが大きいことを示す。3者の分布形状と合算値から、3ケースの中でCase-2が最も悪く、現状が一番よいという結果が客観的に得られた。Case-2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様子が見てとれる。各格子点の数値を、あるいは層毎の数値を比較することにより定量的評価が可能になった。

5. あとがき

以上のように、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、このような総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。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が目的である。その認識が乏しいことが挫折を招く。

参考文献

- 石塚正秀・中辻啓二(2001): 海峽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.
- 中辻啓二・藤原建紀(1995): 大阪湾におけるエスチュアリー循環構造, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 396-400.
- 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.
- 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, p. 48.
- 丸谷尊彦・韓 銅珍・中辻啓二(2000): 大阪湾における水質の長期予測計算, 海岸工学論文集, 47巻, pp. 1051-1055.
- 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(1996): 浅海定線調査データに基づく大阪湾の水質・密度構造の季節変化, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 331-335.
- 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.