

水域生態系モデリングツールSSEMを用いた 水門工事に伴う魚のへい死事故の解析

関根雅彦*・中西 弘**・浮田正夫**

干拓地排水路で発生した魚のへい死事故を調査し、生態系モデリングツール SSEM を用いて原因を解析した。調査の結果、水門工事に伴う淡水化、貧酸素化に加え、農業が原因である可能性も示唆された。これらの影響を定量化するため、ボラを用いた生物実験を行った。得られた知見に基づいて SSEM を拡張し、へい死事故のシミュレーションを行うことにより、事故の原因が水量減少、淡水化および農業散布である可能性が極めて高いことを示し、事故を起こさない農業散布量を提示した。

Key Words : ecological model, coastal development, fish, pesticide

1. はじめに

著者らは、浅海域における開発行為が生態系、特に人間にとって直接的に影響の大きい魚を中心とした高次栄養段階生物に与える影響を評価することを目的とした生態系モデリングツール SSEM(Shallow Sea Ecological Model)を開発してきた¹⁾。プランクトンによる一次生産までを考慮した生態系モデルは数多いが、魚をモデルに取り入れ、かつ工事が漁獲に与える影響の予測をも可能にしようとした場合、特に考慮しなければならない事柄として、

- 魚の行動範囲に較べて、モデル化すべき対象水域が狭い。
- 魚は遊泳能力を持ち、自己の嗜好に合致した水域に移動できるため、対象水域の狭さもあって物質の収支がとれない。
- さまざまな嗜好を持つ多種の魚が存在する。また、同じ魚でもその成長段階によって嗜好が変化する。しかも、漁業にとって有用なもの、そうでないものがある。

等が挙げられる。つまり、一次生産モデルの延長では意味のある生態系への影響評価を行うことは不可能であり、多種の魚のさまざまな成長段階をそれぞれ別のものとして評価できるようなモデルが必要ということである。このようなモデルは、もちろん概念としては作成可能であるが、FORTRAN に代表されるような既存のプログラミング言語では取り扱いが非常に難しくなり実現困難であった。一方、近年プログラミングにおけるすべての対象を「物体(オブジェクト)」として理解するという新しい概念(=オブジェクト指向)が提唱され、注目されている。この概念を実現したプログラミング言語を用いると、同じ「魚」

の性質を持ちながら微妙に嗜好の異なる複数の魚種を簡単に生成することが可能である。そして、一旦生成された魚はモデル環境中でその嗜好に従って自由に移動し、産卵し、死ぬことができる。

本論文では、オブジェクト指向プログラミング言語の代表である Smalltalk を用いて作成した生態系モデリングツール SSEM を用いて、水門工事に伴って発生した魚の大量へい死事故をモデル化し、その原因を解析した結果について報告する。

2. SSEM の概要

SSEM については既に発表^{1),2)}しているが、ここであらためて概要を述べる。図-1に Smalltalk による SSEM のプログラミング中の画面の一例を示す。Smalltalk ではこのようなウィンドウ上でプログラムを行う。もちろんこのような外観はモデルの本質とは関わりはないが、プログラミングの段階からモデルをわかりやすくするのに一役買っている。図-1において Components, Box, EcoModel というラベルのついたウィンドウに表示されているのは SSEM の“クラス”である。クラスとは、あるまとまった概念を表す抽象的なオブジェクトである。例えば Fish は“魚”という概念のオブジェクトである。各クラスの内容は以下の通りである。

- Box 海域の 1 ボックス
- Components 存在量を持つもの
 - Inanimate 無生物
 - * Detritus デトリタス
 - * Nutrient 栄養塩
 - Living 生物
 - * Benthos 底生生物
 - * Fish 魚
 - * Phyto 植物プランクトン
 - * Shellfish 貝

* 正会員 工博 山口大学講師 工学部社会建設工学科
(〒755 宇部市常盤台 2557)

** 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

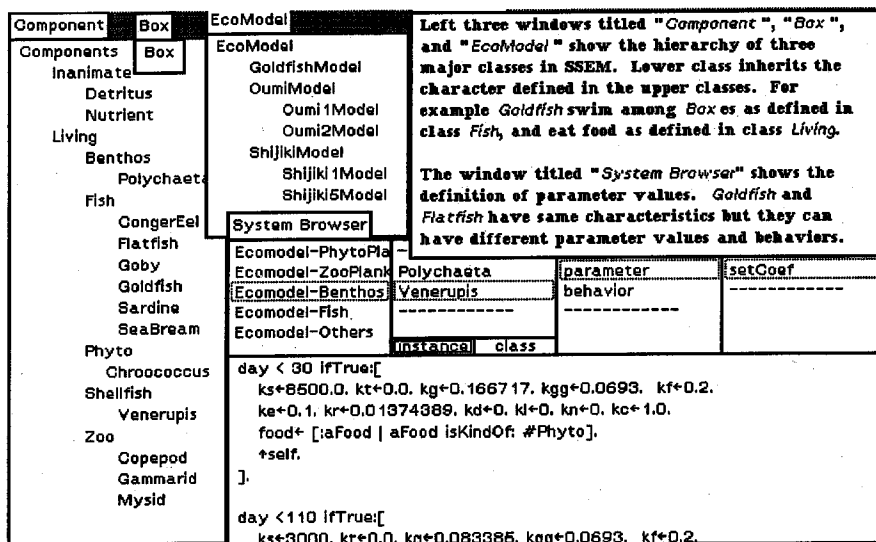


図-1 Smalltalk による SSEM のプログラミング

- * Zoo 動物プランクトン
- EcoModel 生態モデル全体の制御

段付けの下位のものは、上位の性質を継承している。すなわち、Fish は Living としての性質を持ちながら、生理や捕食対象が Zoo や Phyto とは異なっている。Fish は Living のサブクラスと呼ばれ、反対に Living は Fish のスーパークラスと呼ばれる。Fish のサブクラスには、より具体的な性質を備えた CongerEel(アナゴ) や Flatfish(ヒラメ) といったクラスがある。Box は、対象海域の水温や水量といった環境情報を持つ。全体の物質の動きは EcoModel によって制御されるが、物質の移動量を決定するのは Box の環境条件によって影響を受けた Components の生物 あるいは 物質たち自身である。なお、Components の物質量は農業等の特殊なものを除きすべて窒素換算重量である。

モデルの構成の概念を図-2に示す。図-2では Box が 3つ作られているが、これらはそれぞれクラス Box のインスタンス(実体)と呼ばれるものである。インスタンスはクラスで定義された性質を持っており、いくつでも自由に生成することができる。また、Box1 において Fish が 3種類存在するが、この数は産卵や死亡によって実行中に動的に変化する。Zoo と Phyto には産卵、死亡を考えていないが、これらの機構を導入することも簡単にできる。Box 内の Components は、それぞれの嗜好や水交換によって Box 間を移動する。水交換は流況シミュレーションや実測等の他の手段で求め、データとして与える。また、生物の成長速度や嗜好等のパラメータも文献調査や実験等別の方法で決定し、Components のサブク

ラスとして定義する。もちろんごく標準的な“魚”や“植物プランクトン”としての性質が欲しいだけなら Fish, Phyto といった既存のクラスをそのまま用いることができる。

結局、SSEM を用いてある水域の生態系シミュレーションを行うのに必要な情報は、生物パラメータを除くと

- Box 間の交換流量
- Box の環境条件(水量、水温、水深、底質等)
- Box への栄養塩負荷量
- Box 内の初期存在物質質量(生物量を含む)
- 計算開始日、終了日

である。これらはすべてデータファイルとして与える。また、後述するように、Box からの漁獲や農業の投入といった目的に応じた特殊な操作も比較的容易に実現できる。以上述べたように、SSEM では現実の世界を非常に柔軟にモデル化できる。

先述の文献¹⁾では室内における養殖実験のモデル化を通じて SSEM の生理に関わるモデル式の妥当性を、また長崎県平戸島の志々伎湾におけるマガイ稚魚の行動のモデル化を通じて嗜好に関するモデル式の妥当性を検討した。また文献²⁾では山口県大海湾における埋め立てにともなうアサリの漁獲量変化を SSEM により解析した。これらより、SSEM には生物の生理や行動に対する十分な表現力がある事が明らかとなっている。しかしながら、水中の生物量自体を正確に求める方法が確立されていないため、実水域で SSEM の計算結果を検証する事が難しいという問題点が挙げられる。本論文で述べる事例は、比較的正確な環境条件や生物量の情報が得られた貴重な例

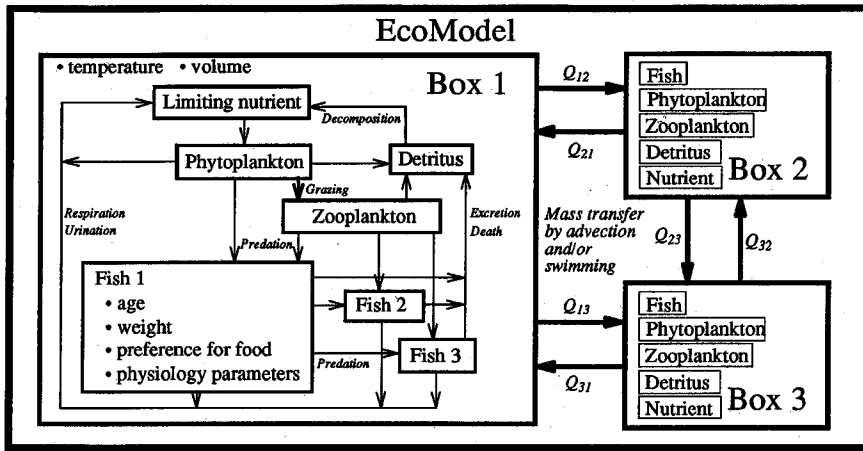


図-2 モデルの構成の概念

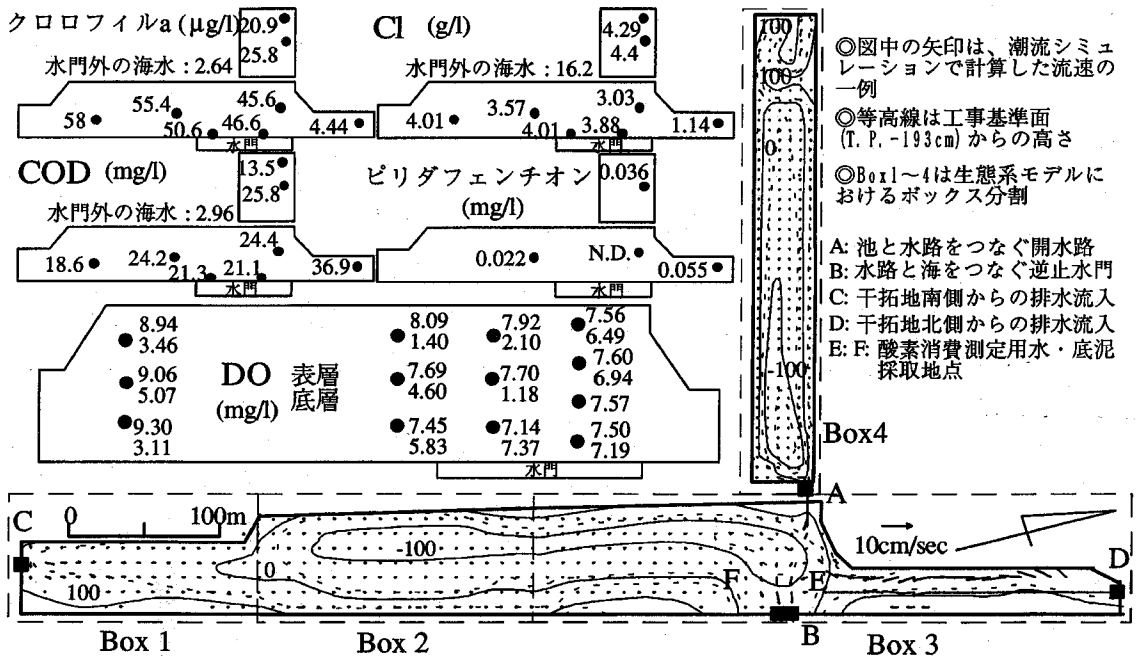


図-3 へい死事故の発生した水路とその水質

である。

3. 魚大量へい死事故の概要

1991年5月、図-3に示す水路全域においてボラを中心とした魚の10000匹にも及ぶ大量へい死事故が発生した。この水路は干拓地の唯一の排水路である。現場は水路CとDを通じて干拓地からの排水が流入してくる。干拓地は現在も埋め立てが進行中であるため、海水とともに土砂がポンプアップされた場合にはCとDから海水

が流入することもあるが、3月から5月の間は埋め立て作業が行われておらず、雨水を中心とした淡水が流入していたと考えられる。Box 4は開水路Aを通じてBox 3と結合した遊水池であり、開水路A以外には流入流出はない。平成3年3月の逆止水門(図-3中のB)の改修前は、水門は有効に機能しておらず、水路内はほとんど海水状態であった。水門改修後海水の侵入がなくなり急速に淡水化したこと、および気温の急上昇による貧酸素化が事故の原因であると報道された。

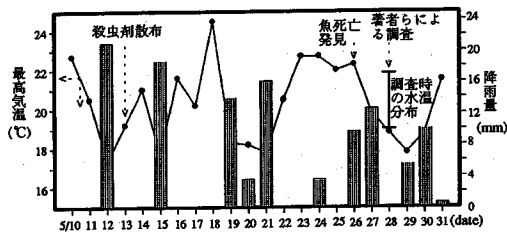


図-4 事故当時の最高気温と降雨量の変化

事故当時の最高気温と降雨量の変化を図-4に示す。確かに気温の急上昇は認められる。

事故が報道された翌日(5月28日), DOが最低となると考えられる早朝に現地水質調査を実施した。結果は図-3に示している。DOは底層の一部で低い他は飽和値に対し80~90%であり, 貧酸素状態とはいえなかった。水門内の塩素イオン濃度は水門外の20%程度であり, 淡水化が認められた。その他, クロロフィルaとCODが極端に高いこと, 有機リン系殺虫剤であるピリダフェンチオンが検出されたことが特筆される。クロロフィルaは検鏡の結果藍藻類によるものと判断された。また, 事故12日後(6月8日)に採取した現場水(水質はほぼ5月28日と同様であった。)を用いた3日にわたるメダカの飼育実験から, 高CODは魚の死亡には短期的には影響しないことを確認した。農業は事故の14日前に蚊の駆除のために干拓地に散布されたものと同成分であった。聞き取り調査により, この農業散布は毎年行われているがこれまでへい死事故が発生したことはないとの情報を得た。

4. 水および底泥の酸素消費速度の測定

5月28日に採取した現場水および底泥を用いて, 酸素消費速度および光合成による酸素生産速度を測定した。(一部事故報道の12日後(6月8日)に採取した水も使用。)底泥は図-3のE,F点より表層1-3cm部分を採取し, 窒素ガスを満たした容器にて実験室に持ち帰った。2mmのふるいで含まれていた貝類や節足動物を除去した後ポリビンに敷きつめ, 所定温度で酸素飽和した蒸留水を静かに満たしてインキュベートし, 上部水の溶存酸素の変化を調べた。水の酸素消費, 生産については明暗びん法による。測定結果を図-5,6に示す。これらより, 光合成による酸素生産速度が卓越しているため, 日中は酸素飽和状態であったと考えられる。水深1mとして光合成が無い場合に飽和溶存酸素を消費するのに必要な時間を概算すると, 21°Cで111hr, 28°Cで78hr, 35°Cで50hrとなる。図-4より水温が35°Cに達するとは考えられないため, 事故当時夜間においてさえ水路全体に渡って貧酸素状態となった可能性は極めて小さい。

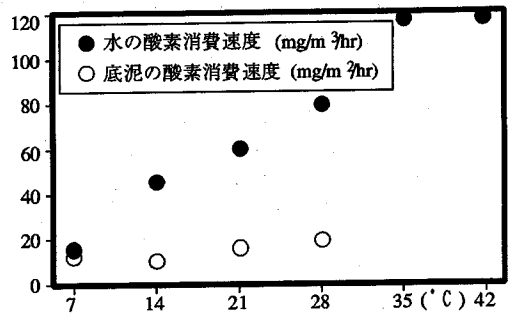


図-5 水・底泥の酸素消費速度

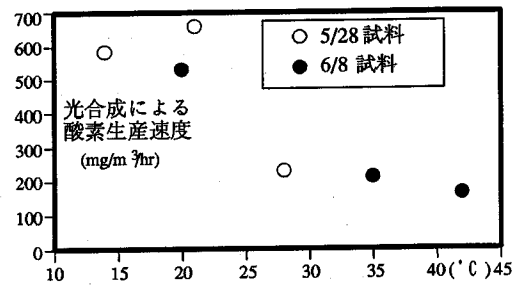


図-6 光合成による酸素生産速度

以上より, 貧酸素化は主要な死亡原因でない可能性が高いと判断された。

5. 水交換のモデル化

まず現地での水交換を明らかにするため, 一潮汐間の水路Aと水門Bの通過水量調査, 水路Aの上流端と下流端および水門Bの内側と外側の4点における水位の時間変化調査, 水路Aの通過塩素イオン量調査, 水路Cと水路Dからの流入量調査, 水量を決定するための水地形測量を実施した。この結果に基づき, AとBの通過水量を定式化した結果を表-1に示す。

次いで, 現場の2次元潮流シミュレーションモデル, 移流拡散水質シミュレーションモデルを作成した。図-3に潮流計算結果の一例を示している。図中の小さな矢印が潮流計算, 水質計算で用いた格子点である。モデルのキャリブレーションは, 水路Aを1潮汐間に流入出する水量および塩素イオン量の測定値と, 計算値が合致するよう海底摩擦係数を定めることにより行った。

一方, SSEMはBoxモデルであり, 移流・拡散はBox間の交換水量として表現している。このため, SSEMのBoxに対応する移流拡散モデルの領域に, 最大水位時にある水質濃度を与え, 水門B外部にM₂潮を与えて1潮汐後の濃度を計算した結果と, SSEMによる同条件の濃度計算結果ができるだけ等しくなるような交換水量を準

表-1 水路 A, 水門 B の通過水量の定式化

水路 A の流量 $Q_A [m^3/s]$ (Box 3 から Box 4 への流れを正とする)		
$Q_A = \begin{cases} A \times 2.84R^{2/3}\sqrt{H_3 - H_4} & (\text{at } H_3 \geq H_4) \\ -A \times 4.25R^{2/3}\sqrt{H_4 - H_3} & (\text{at } H_3 < H_4) \end{cases}$		
$H = \max(H_3, H_4)$		
$H > 0.826$	A	R
$0.826 \geq H > 0.732$	$3.9H - 2.654$	$A/(6H - 0.183)$
$0.732 \geq H > 0.483$	$2.6H - 1.58$	$A/(4H + 0.169)$
$0.483 \geq H$	$1.3H - 0.628$	$A/(2H + 0.333)$
	0	0
ゲート B の流量 $Q_B [m^3/s]$		
$Q_B = \begin{cases} A \times 3.507R^{2/3}\sqrt{ H_3 - H_7 - 0.022} & (\text{at } \max(H_3, H_7) \geq -0.104) \\ 0 & (\text{at } \max(H_3, H_7) < -0.104) \end{cases}$		
$A = 18 \cdot \max(H_3, H_7) + 1.872$		
$R = A/(20 \cdot \max(H_3, H_7) + 20.08)$		
$\max(a, b)$: a と b のうち大きな方, A: 流路断面積 [m^2], R: 径深 [m], H_3 : Box 3 水位, H_4 : Box 4 水位, H_7 : 海水位 (水位はすべて工事基準面 (T.P. -1.93m) からの高さ [m])		

表-2 係数値探索により得られた交換水量式

	水門改修前	水門改修後
Q_1	0.8 × R	
Q_2	$\max(13.05 - 0.909Q_1, 0)$	$\max(1.69 - 0.14Q_1, 0)$
Q_3	$88.65 + 0.796Q_1$	$\max(4.0 - 0.156Q_1, 0)$
Q_4	$61.24 + 0.402Q_1$	$4.87 + 0.315Q_1$
Q_5	33 + Q_1	
Q_6	$265.5 + 2.058Q_1$	-
$V_1(h_1)$	19(2.44)	5(0.66)
$V_2(h_2)$	45(3.4)	21(1.61)
$V_3(h_3)$	56(3.0)	22(1.4)
$V_4(h_4)$	39(3.0)	17(1.45)

交換水量 ($10^3 m^3/day$)

1日毎に交換水量だけの水が Box_i 間で交換され、 Box_i 内で完全混合されるとにより濃度変化が引き起こされると考える。

R: 降雨量 [mm/day], Q_1 : 水路 C からの流入流量, Q_2 : Box 1, 2 間の交換水量, Q_3 : Box 2, 3 間の交換水量, Q_4 : Box 3, 4 間の交換水量, Q_5 : 水路 D からの流入流量, Q_6 : 水門 B からの逆流量 (流量の単位はすべて [$10^3 m^3/day$]). Q_1 の算定にあたっては, 267ha の干拓地から流出率 60% で流出した雨水が, 水路 C, D から均等に平水時流量に上乘せられて流出すると仮定, $V_i (i = 1-4)$: Box i の水量 [$10^3 m^3$], $h_i (i = 1-4)$: Box i の水深 [m], $\max(a, b)$: a と b の大きい方

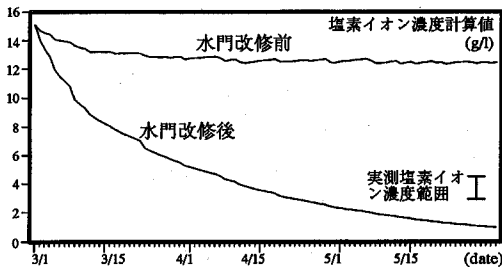


図-7 SSEM による水路の塩素イオン濃度変化

ニュートン法³⁾を用いて定めた。SSEM における Box 水量としては, 水門 B 改修前については M_2 潮の最大水位時水量, 水門 B 改修後については M_2 潮を与えて潮流計算した平水時最大水量を用いた。交換水量は水門改修前/後, および平水時/15mm 降雨時の 4 通りの組み合わせについて求め, 直線近似により任意の降雨量に対する交換水量を定式化した。移流拡散モデルによる濃度計算と SSEM による濃度計算の比較の一例を図-8 に, 得られた交換水量式を表-2 に示す。

以上のキャリブレーションを施した SSEM を用いて 3 月以降の降雨条件を与え, 水門改修前後の塩素イオン濃度の変化を計算した結果を図-7 に示す。これによると, 塩素イオン濃度は水門改修後徐々に低下しており, へい死事故時に急激に低下したわけではないことがわかる。ボラは淡水化に強いといわれているため, これだけの時間があれば十分馴化できたか, さもなければ逃避できたのではないかと考えられる。なお, 計算結果は実測値より低い値になっているが, これは改修後の水門 B からいくぶん海水の逆流が見られること, 干拓地の土壤に塩分が含まれていること等によるものであろう。

6. 農薬濃度の推定

干拓地には 5 月 13 日, オフナックと呼ばれる殺虫剤が $2g/m^2$ 散布された。オフナックにも数種あるが, 一般的な粉剤と仮定すればピリダフェンチオン含有量は 2%, 干拓地全域 (267ha) に散布されたピリダフェンチオンは 107kg と推定される。図-4 より, 農薬散布から事故報道までに 10mm 以上の降雨が 3 回見られる。散布された農薬が最初の降雨で全量流出した場合/3 回の降雨に分けて流出した場合, 農薬分解速度が遅い/速い, および水門改修前/後の 8 通りの組み合わせについて SSEM により水路の農薬濃度を計算した。ここで, 「農薬の分解速度が速い」とは, 7. で述べる曝気水槽で求めた水中農薬減少速度係数 0.52 [$1/day$] を用いた場合である。「分解速度が遅い」の場合には, この 1/2 の値を用いた。現実の水域では曝気水槽より減少速度がゆるやかであると考えられるからである。また, 降雨流出率は 60% と仮定した。オフナックは持続効果のある殺虫剤であるところから, 非降雨時の系外損失は特に考慮しなかった。図-9 より, 3 回に分けて流出・分解遅い場合, ほゞ実測値に近い農薬濃度が得られた。これより, 農薬濃度は少なくとも $0.11mg/l$ 程度に達した可能性が高いと判断される。

7. 環境変化と農薬の複合影響に対する魚の反応

本へい死事故では貧酸素化, 淡水化, 農薬が複合して魚に作用した可能性がある。そこでこれらのインパクト

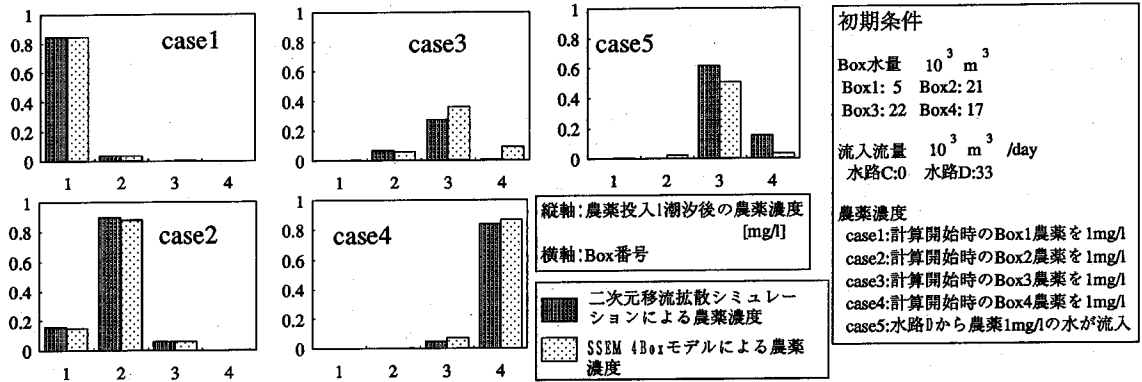


図-8 移流拡散モデルによる濃度計算と SSEM による濃度計算の比較 (平水時、逆止水門ありの場合)

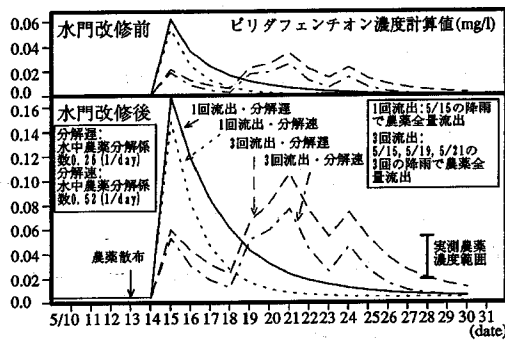


図-9 SSEM によるピリダフェンチオン濃度変化

が魚に与える影響を定量化することを目的として室内実験を行った。実験に用いた魚は、事故からおおよそ5ヵ月後の1991年11月の実験当日または前日、事故現場にて投網で捕獲したボラである。事故当時死んだボラは体長20cmから30cm、中には40cmに達する大型のものも見られたが、実験時に得られたものは小型(平均体長11cm、体重17g)のものばかりであった。農薬試料としてはピリダフェンチオンを用い、現地の水(塩素イオン濃度14.96パーミル)または河川水(塩素イオン濃度0.034パーミル、淡水化に対応)により希釈した。実験は、まず希釈水を発泡スチロール製の試験水槽に7リットル入れ、空気曝気または窒素曝気(貧酸素化に対応)を十分に行った後、ボラを6尾ずつ入れた。次に、設定農薬濃度に応じた農薬試料を流し込み、均一に攪拌して実験開始とし、その後のボラの死亡した時刻を記録した。実験中は空気曝気あるいは窒素曝気を継続した。空気曝気した水槽のDOは飽和状態、窒素曝気した水槽では1~3mg/lであった。また、実験中の水温は15~18℃であった。複数の水槽を用いて8ないし10実験を同時に実施し、水温、曝気強度等の条件が同一になるよう注意した。ボラを入れない

水槽も用意し、魚の新陳代謝を受けない場合の農薬の減少速度も調べた。実験結果を図-10に示す。

貧酸素化だけではボラは死亡しないが、淡水化では死亡がみられる。また、農薬に貧酸素化、淡水化が加わることで、農薬単独の場合より死亡速度が高まることが読み取れる。

8. 死亡速度の定式化

農薬により生物が死亡にいたるメカニズムは農薬のタイプによって種々存在し、厳密には単一のモデルで表現することはできない⁴⁾。しかしながら、巨視的に見た場合には、生物は常に農薬を吸収・排泄・代謝分解しており⁵⁾、これらのバランスで決まる生物体内の農薬濃度がある閾値を越えた時はじめてその効果を発現すると考えて大きな間違いではない。これを定式化すると以下のようになる。

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = \begin{cases} -WK_{dd} & (\text{at } C_x - K_{tx} \leq 0) \\ -W(K_{dc} \frac{C_x - K_{tx}}{K_{tx}} + K_{dd}) & (\text{at } C_x - K_{tx} > 0) \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta C_x}{\Delta t} = K_{cx}W_c/V - (K_{cx} + K_{xd})C_x \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\Delta W_c}{\Delta t} = -K_{cx}W_cW/V + K_{cx}C_xW - K_wW_c \dots\dots\dots (3)$$

ここにW:魚重量[kg-魚], C_x:魚体中農薬濃度[kg-農薬/kg-魚], W_c:水中農薬重量[kg-農薬], K_{tx}:魚体内農薬に対する閾値[kg-農薬/kg-魚], K_{dd}:分解速度係数[1/day], K_{cx}:吸収速度係数[10³m³/kg-魚-day], K_{xc}:排泄速度係数[1/day], K_w:水中農薬減少速度係数[1/day], K_{dc}:農薬による死亡速度係数[1/day], K_{dd}:貧酸素化、淡水化それぞれの単独または複合影響による死亡速度係数[1/day], V:ボックス水量[10³m³]である。

一方、大きな水域を対象としたモデルでは、農薬濃度を単に生物の死亡速度を高める外的要因として取り扱ったほうが単純で扱いやすい。え、モデル計算の実行時間

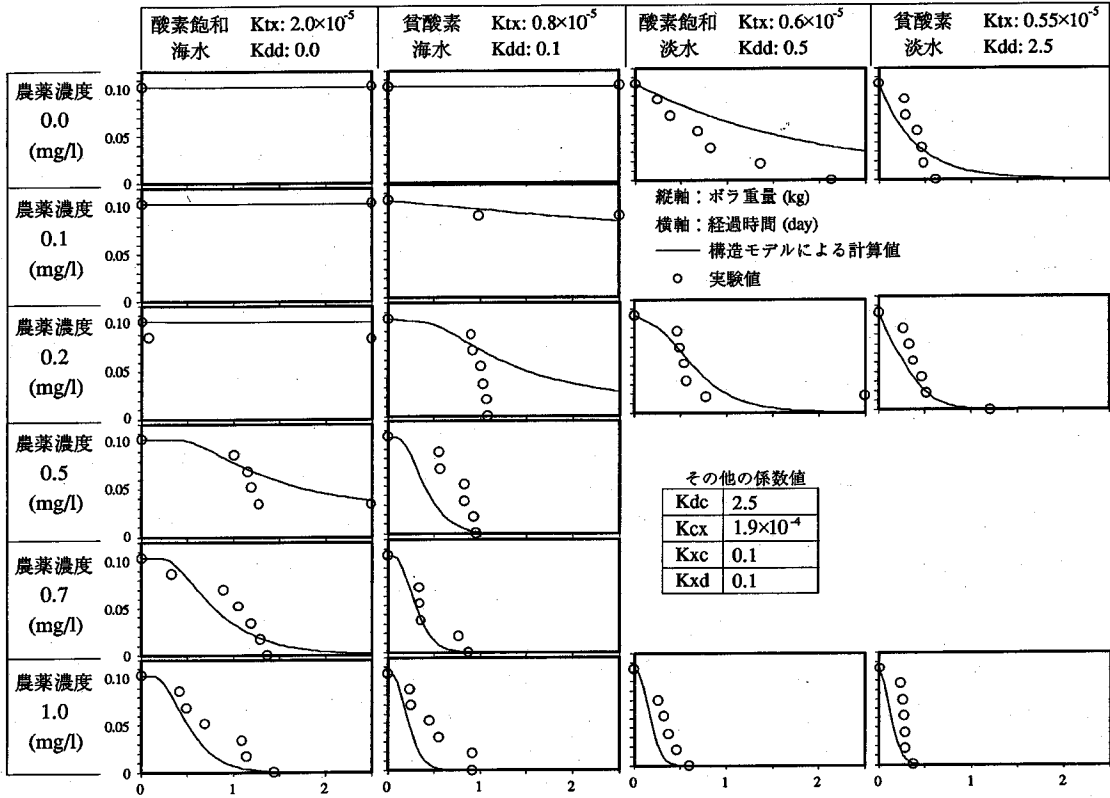


図-10 種々の農業濃度、塩素イオン濃度、酸素濃度に対するボラの生存重量の時間変化と構造モデルによる係数値探索結果

の上でも有利になる。この視点で農薬の効果を定式化すると以下ようになる。

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = \begin{cases} -WK_{dd} & (\text{at } W_c/V - K_{tx} \leq 0) \\ -W(K_{dc} \frac{W_c/V - K_{tx}}{K_{tx}} + K_{dd}) & (\text{at } W_c/V - K_{tx} > 0) \end{cases} \quad (4)$$

ここに W : 魚重量 [kg-魚], W_c : 水中農薬重量 [kg-農薬], K_{tx} : 水中農薬濃度に対する閾値 [kg-農薬/ $10^3 m^3$], K_{dc} : 農薬による死亡速度係数 [1/day], K_{dd} : 貧酸素化, 淡水化それぞれの単独または複合影響による死亡速度係数 [1/day], V : ボックス水量 [$10^3 m^3$] である。

本論文では、前者を構造モデル、後者を簡易モデルと呼ぶ。簡易モデルは実際の水域のように十分水量が大きく魚による農薬の吸収が水中農薬濃度に影響しない場合に適用し、構造モデルは、前節の室内実験のように魚による農薬の吸収が水中農薬濃度に影響を与える場合に適用するものとした。

9. SSEM の拡張

SSEM を本事故に適用するに際して、いくつかの拡張を行った。

塩素イオンと農薬は、Inanimate のサブクラス Salt および Chemicals として定義し、Chemicals には実験によ

り求めたピリダフェンチオンの分解速度係数を与えた。貧酸素は本事故においては大きな役割を果たしていないと判断されるので、SSEM では考慮しなかった。

Box に Salt と Chemicals を導入する方法は種々考えられる。最も汎用的には、他の魚と同様に単に Box 内に投入するという方法があるが、ここでは計算速度を重視して、特に Salt と Chemicals を素早く参照できるようにした Box のサブクラス、ChemicalPollutedBox を導入した。魚については、まず K_{tx} , K_{dc} , K_{dd} をパラメータとして持ち水中の農薬濃度に反応できる ChemicalReceptiveFish を Fish のサブクラスとして定義し、簡易モデルで使用する魚としてこのサブクラスに ChemicalAffectedFish を定義した。構造モデルの場合、農薬の代謝も行うため、 C_x , K_{xc} , K_{cx} , K_{xd} をパラメータとして持つ ChemicalPollutedFish を ChemicalReceptiveFish のサブクラスとして定義した。実際に計算に用いたのは ChemicalAffectedFish のサブクラス MulletB(簡易モデル用ボラ) と ChemicalPollutedFish のサブクラス Mullet(構造モデル用ボラ) である。

EcoModel については、農薬の流入をデータファイルから与えることのできる ChemicalPollutionModel を定義

し、このサブクラスとして現場の水路モデル AjsuChemicalModel および水槽によるボラの死亡モデル MulletModel を作成した。以上、今回作成したクラスをまとめると以下のようになる。

Fish

- ChemicalReceptiveFish 農業に対する感受性を持つ魚
 - ChemicalAffectedFish 簡易モデル式を組込んだ魚
 - ・ MulletB 簡易モデル用ボラ
 - ChemicalPollutedFish 構造モデル式を組込んだ魚
 - ・ Mullet 構造モデル用ボラ

Inanimate

- Chemical ある速度で分解する農業
- Salt 塩素イオン

Box

- ChemicalPollutedBox Chemicals と Salt を素早く参照できる Box

EcoModel

- ChemicalPollutionModel Chemical と Salt データを読み込むことのできる EcoModel
 - AjsuChemicalModel 干拓地水路 5Box モデル
 - MulletModel 実験水槽 1Box モデル

今回の事故の計算は 3 月から 6 月という短期間なので、Mullet と MulletB には摂食、排泄等の生理に関するパラメータを与えていない。従って、モデルの計算では Mullet と MulletB の餌となる Phyto や Zoo も加えていない。また、対象水域が小さいため、農業に対する忌避行動も考慮しなかった。単に農業濃度と塩分濃度によって死亡速度が影響されるだけである。

ところで、ChemicalPollutedFish あるいは ChemicalAffectedFish に対して特にプログラムする必要があるのは、式(1)~(4)で定義した農業と塩素イオンに対する反応だけであり、魚として必要な性質はすべて Fish から受け継いでいる。ChemicalPollutedBox とその他の新たに定義した部分についても同様である。このように、SSEM では特殊な状況をモデル化する場合でもほとんどの部分を標準で用意されている機能でまかなうことができ、特に注目したい部分のみをプログラミングすることにより新しい機構を組み込むことが簡単に実現できる。

10. 農業に対する係数値の決定

文献⁶⁾では連続流水法により 5 種類の農業に対するモツゴの体内農業濃度の時間変化を調べている。これより概算すると、構造モデルにおける係数値は $0.1 < K_{zc} + K_{zd} < 2.0$ (1/day), $2.5 \times 10^{-6} < K_{cz} < 5.0 \times 10^{-4}$ ($[10^3 m^3 / kg \cdot day]$) 程度と見積もられた。モデルの係数決定にあたっては、これらの値を参考にし、まず MulletModel と Mullet を用いて図-10の全実験結果を同時に満たすような構造モデル係数値を求めた。この結果は図-10に並記してある。構造モデルとはいえ農業の作用機構まで考慮したものではないため、個々の実験についてのモデルの合致度

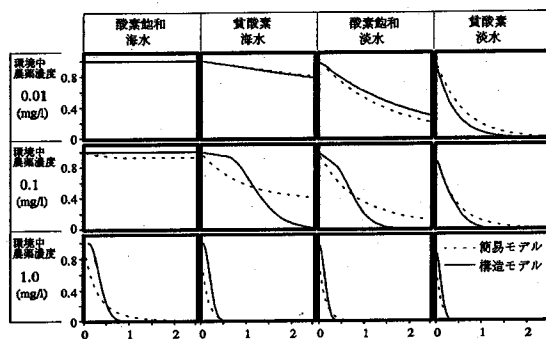


図-11 構造モデルの計算結果を教師データとして用いた簡易モデルの係数値探索 (実際には図の他に農業濃度 0.001, 0.005, 0.05, 0.5 [mg/l] についても数値実験を行い、その合致度も含めて総合的に評価したが、ここでは省略している。)

はそれほど高くはないが、全実験結果に対して同時に係数値探索を行うことにより、広い環境条件にわたって良好な再現性を確保している。次いで、魚による農業の吸収が水中農業濃度に影響しない大水域を想定し、7.の試験水槽と同様の諸元を持つが水中農業濃度が変化しない仮想水槽を SSEM 上に作成した。この仮想水槽に対して構造モデル (=MulletModel と Mullet) および簡易モデル (=MulletModel と MulletB) をそれぞれ適用し、先に係数値の定まっている構造モデルの計算結果とできるだけ同一になるような簡易モデルの係数値を求めた。係数値決定手法はボックスの交換水量を決定した方法³⁾と同じである。この仮想水槽に対する数値実験結果を図-11に、また、得られた簡易モデル係数値を表-3に示す。なお、本係数決定過程では魚重量として湿重量を用いたが、得られた簡易モデル係数値は通常的空素換算重量を基本とする SSEM でもそのまま使用できる点に注意されたい。

簡易モデル式による仮想水槽計算から得られた淡水化・貧酸素化・農業の死亡速度係数を図-12に示す。この結果、淡水化は貧酸素化に対して約 7 倍、貧酸素・淡水化は淡水化に対して約 3 倍の死亡速度となった。貧酸素化の影響と淡水化の影響は相乗的に作用することがわかる。また、淡水化および貧酸素化は農業に対する閾値を引き下げる効果があった。

11. SSEM による事故の再現

ボラの体長と年齢、体重の関係は、

$$L = 68.87(1 - \exp(-0.22(t + 0.033))) \dots\dots\dots (5)$$

$$W_{wet} = 0.02L^{2.85} \dots\dots\dots (6)$$

$$W_N = 0.031W_{wet} = 0.111W_{dry} \dots\dots\dots (7)$$

ここで L: 体長 [cm], t: 年齢 [year], W_{wet} : 湿重 [g], W_{dry} : 乾重 [g], W_N : 窒素換算重量 [g] である。式(5)は文献⁷⁾、式

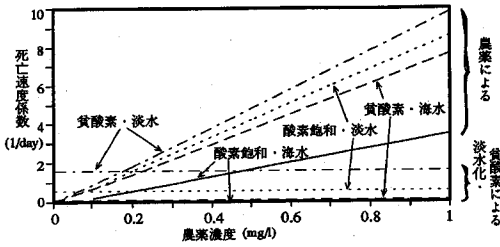


図-12 簡易モデル式による仮想ボックス計算から得られた淡水化・貧酸素化・農薬の死亡速度係数

表-3 簡易モデルの係数値

	K_{tx} [mg/l]	K_{dd} [1/day]	K_{dc} [1/day]
酸素飽和・海水	0.06	0	0.22
貧酸素・海水	0.025	0.09	0.22
酸素飽和・淡水	0.028	0.64	0.22
貧酸素・淡水	0.022	1.68	0.22

(7)は文献⁹⁾から推定した。式(6)に関してはボラの情報が得られなかったため、体形の似たカタクチイワシのデータ⁹⁾より推定した。事故で死亡したボラの窒素量は、ボラの体長20cm(生後1.5年相当)のものが、10000匹死亡したとしておよそ32kg-Nとなる。事故で死ななかったボラも含め、40kg-Nが事故以前に対象水域に全域に分布したと仮定した。この値を各Boxに水量比例配分してMulletBの初期値とし、前節までで求めたBox間交換水量、農業流入量、水門の流出量を用いてAjisuChemicalModelを実行した結果を図-13に示す。図-13では農業の流入以前に淡水化によりMulletB(ボラB)が全滅した。この場合、死亡事故は実際より早期に発生したことになる。これは、生物実験の急激な塩分低下に対する係数値をMulletBに与えたことで、淡水化による死亡速度への影響が過大評価されたためと考えられる。実際、筆者らは別の実験で、ボラを飼育する水槽を2カ月にわたって徐々に淡水化し、まったくボラの死亡が見られないことを確認した。そこで、淡水化の影響は閾値 K_{tx} の低減に限られるというシナリオの下で計算を実行した結果を図-14に示す。この場合、水門改修前は農薬散布による死亡はわずかであるが、改修後は大半のボラが死亡し、今回のへい死事故が再現された。また、図-14には水門改修後について農薬散布量を変化させた計算結果を併せて示している。これより、本シナリオ下では大量へい死事故を起こさないためには農薬散布量を実際に散布された量(オフナック2.0g/m²)の1/5以下としなければならないことがわかった。

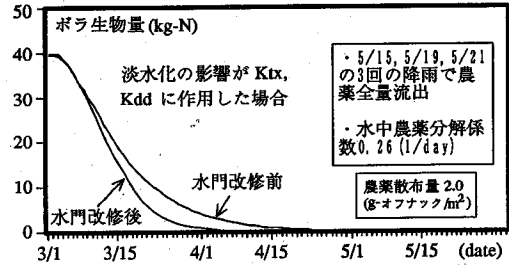


図-13 SSEMによる事故当時のボラの生物量日変化(淡水化の影響が K_{dd} , K_{tx} に共に影響するとした場合)

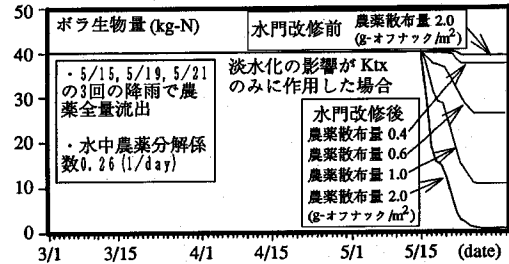


図-14 SSEMによる事故当時のボラの生物量日変化(淡水化の影響が K_{tx} にみに影響するとした場合)

12. おわりに

干拓地排水路で発生した魚大量へい死事故を調査し、生態系モデリングツールSSEMを用いてその原因を解析した。得られた結果を以下にまとめる。

- 現地調査ならびに水と底泥の酸素消費速度の測定より、貧酸素化が発生した可能性は小さいと推定された。
- 現場の水交換のモデルシミュレーションから、淡水化は発生するものの、塩素イオンの減少はゆるやかであり、魚が馴化できた可能性があることが示唆された。
- 現地で採取されたボラを用いて淡水化、貧酸素化および農薬に対する死亡速度を測定した結果、貧酸素化だけではボラは死亡しないが、急速な淡水化では死亡がみられること。また、農薬に貧酸素化、淡水化が加わることにより相乗効果が働いて、農業単独の場合より死亡速度が高まるということが判明した。
- 以上の知見を総合し、明らかにできなかった条件についてはいくつかのシナリオに基づいてSSEMによりへい死事故のシミュレーションを行い、へい死事故の原因が水門改修工事に伴う水量減少、淡水化および農薬散布である可能性が高いことを示した。また、農薬散布量を実際に散布された量の1/5程度に

すれば、へい死事故の可能性が減少することを指摘した。

本論文の解析では SSEM の大きな特徴である魚の嗜好による遊泳や、多種の生物の競合といった側面は積極的には利用していない。しかしながら、SSEM の柔軟な適用性は事故の解析に大いに役立った。SSEM はそのパラメータの多さと検証の難しさが利用上の困難として挙げられるが、ある生物種のパラメータが一旦決定されれば、それ以降どのモデルでも簡単にその生物が利用できるというデータベースとしての側面も合わせ持つ。例えば他の水域で農業の影響評価を行いたい場合、第一次近似として今回作成したボラの情報をそのまま利用することができるし、また、ボラと同様の農業に対する反応性を持ち、別の生理パラメータを持つ魚を定義することもたやすい。生理に関するパラメータは文献調査により多くの情報を得ることができるが、嗜好に関する既存の情報は定量化できるものは少ない。著者らは現在実験的に嗜好パラメータの決定を試みており、一部は既に報告¹⁰⁾した。嗜好による行動の情報が蓄積されれば、沿岸開発の影響評価にとどまらず、近年試みられている海洋牧場の効果の予測や、原油流出の環境影響評価等種々の応用が期待される。

謝辞 調査、解析にあたっては当時の学生である兼広栄治、田中誠、矢野道、Abu Hanipah Muhamad Amin の各君に多大な協力を頂きました。また、本研究の一部は文部省科学研究費(奨励(A))の補助を受けました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Sekine, M., Nakanishi, H., Ukita, M. and Murakami, S.: A shallow-sea ecological model using an object-oriented programming language, *Ecological Modelling*, Vol.57, pp. 221-236, 1991.
- 2) Sekine, M., Nakanishi, H., Ukita, M. and Kanehiro, E.: A shallow sea ecological model to assess the impact of coastal development, *Extended abstracts of the 4th international conference on computing in civil and building engineering*, Tokyo, Japan, p. 189, 1991.
- 3) Sekine, M., Ukita, M. and Nakanishi, H.: Determination of nutrient transformation pathways in rivers using a mathematical programming method, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol.9, pp. 189-206, 1992.
- 4) 深見順一: 殺虫剤の作用機構概説, 農業: デザインと開発指針(山本出・深見順一(編)), ソフトサイエンス社, 1979.
- 5) 山根登(編): 生物濃縮 - 環境科学特論 -, 産業図書, 1978.
- 6) 金沢純・田中二良: 水生生物と農業, 水産科学シリーズ, サイエンス社, 1988.
- 7) 財団法人日本水産資源保護協会: 水生生物生態資料, 1981.
- 8) 松元文子: 調理のための食品成分表, 柴田書店, 1982.
- 9) 久保伊津男・吉原友吉(編): 水産資源学(改訂版), 共立出版, 1981.
- 10) 関根雅彦・戸村大・兼広栄治・中西弘: 水生植物帯の魚の生息場としての評価に関する基礎的研究, 第44回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集, pp. 130-131(II-18), 1992.

(1993. 1. 20 受付)

ANALYSIS OF A FISH DEATH ACCIDENT CAUSED BY A GATE REPAIRS BY USING SSEM

Masahiko SEKINE, Hiroshi NAKANISHI and Masao UKITA

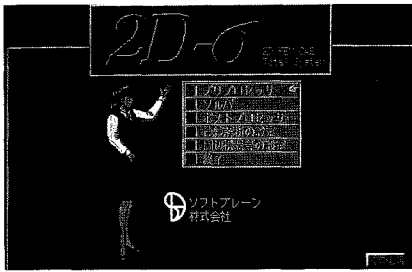
A fish death accident was occurred in a drainage canal from a reclaimed land. Decrease of salinity caused by a gate repairs and lack of oxygen caused by rapid increase of temperature were thought to be the cause of the accident. In addition, our investigation showed the possibility of pesticide inflow. The effects of these factors were estimated by experiments using mullet. The current simulation model of the canal was also constructed. Then SSEM, a Shallow Sea Ecological Model, was extended to simulate the pesticide inflow and salinity change. The extended SSEM revealed that the decrease of water quantity, the decrease of salinity and the pesticide inflow caused the accident. To decrease the pesticide amount down to one fifth, the accident might not be occurred.

パソコン用土木構造解析CAEシステム

ツーデーシグマ
2D-σ
 TOTAL SYSTEM

「噂は聞いているが、ここまでできると思わなかった!」
 「これなら私にも使える!」「もう他のソフトは使えない。」

—よく聞くユーザーの声



■システムマネージャー（動画、音声）

全く新しいコンセプトで開発されたこのシステムはいままでに考えられなかった高度な自動化を実現し、静かなブームを呼んでいます。

高性能CADを内蔵、全ての情報はCAD図面に直接指定。(境界・荷重条件、掘削、盛土、支保等)

システムはCAD図面から自動的に有限要素データを生成するのでユーザーは直感的な操作をするだけ。

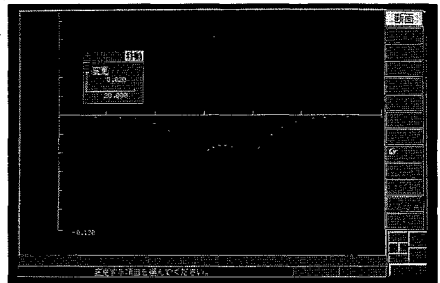
土木解析に必要な機能のほとんどに対応。(非線形、弾塑性、ジョイント、掘削、盛土、支保、熱応力など)

高度なステップ解析機能により、施工中の力学的変化をリアルに再現。(前ステップのデータは自動的に継承されユーザーは図面上で「施工」する感じ)

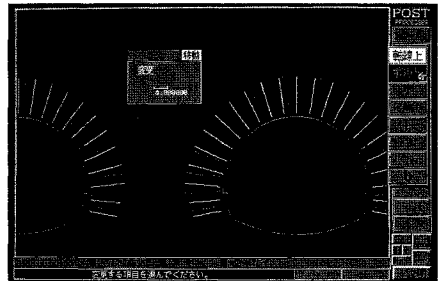
EWS並みの大規模解析能力と高速演算。(3000節点、拡張可、1400節点の演算はCPU486DXで約2分間)

独自のウィンドウズシステム、音声サポート、オンラインヘルプ、豊富で高品質な出力など。

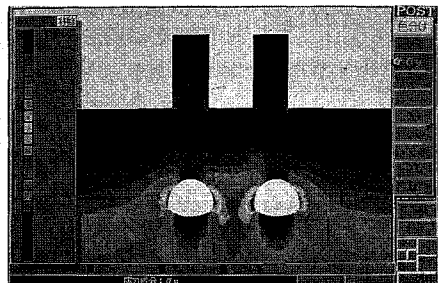
■任意断面の成分分布曲線



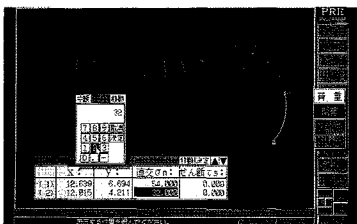
■ワンタッチでM・Q曲線



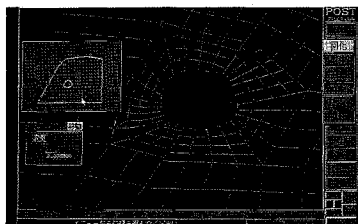
■応力/ひずみの分布状態



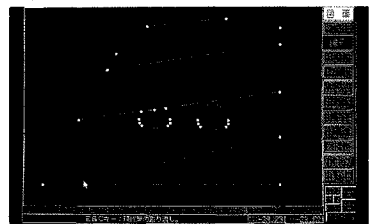
■全ての条件は図面上に直接指定



■断層・弱面の挙動はリアルに再現



■高性能CADで図面を素早く入力



土木業界で大好評

詳細資料提供

ソフトブレーション株式会社

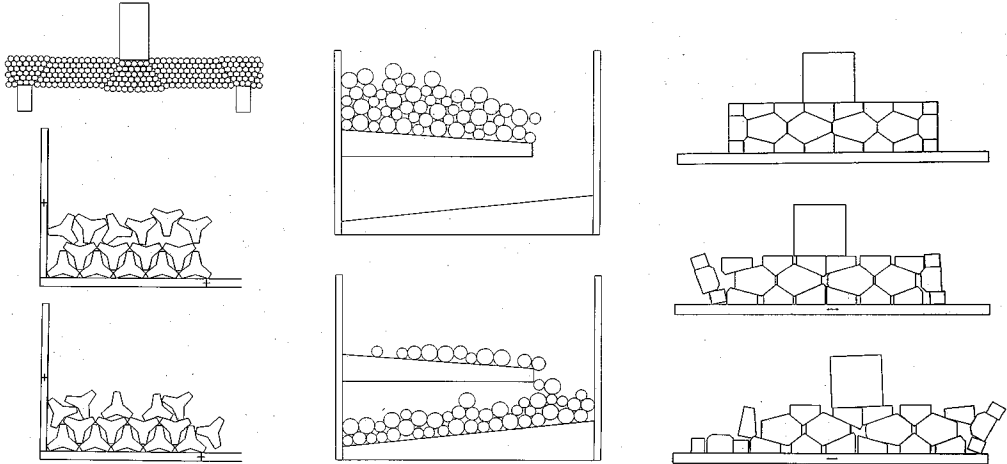
お問い合わせは 03-3592-7659

本社 〒001 札幌市北区北37条西4丁目王陽ビル

Tel 011-736-7009 Fax 011-736-7449

個別要素法プログラムシリーズ

■開発元 Dr.Cundall (ITASCA社)



UDEEC

個別要素、差分要素を基本とする汎用2次元コードです。

- ・転倒、滑落解析
- ・地震応答解析
- ・地盤、不連続性岩盤の安定解析
- ・岩盤の掘削解析
- ・コンクリートの亀裂進行解析
- ・流れ解析 (Coupled flow-mechanical analysis)
- ・熱解析 (Coupled thermal-mechanical analysis)

BALL2D/3D

解析対象を円あるいは球でモデル化する手法のコードで、この手法は数多くの個別要素法プログラムに採用されています。

BALL2D -Polygon

BALL2Dに多角形ブロックを機能追加したバージョンです。任意剛体壁境界あるいは、飛翔体等を多角形ブロックとし、円ブロックとの相互作用解析が可能です。

BFLOW

解析対象を任意多角形でモデル化する手法のコードで、接触判定ロジック、特に凹型のブロックの接触判定の難点を解決したものです。

UDEECではやや困難な完全崩壊、流動解析に適します。

CASK-3D

キャスク等の3次元円筒構造物の地震時の転倒解析コードです。

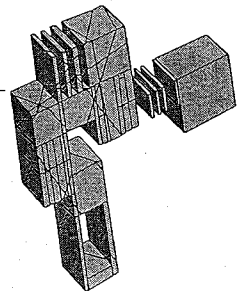
3DEC

UDEECの3次元バージョンです。充実した3次元グラフィック機能をもっています。

- ・転倒、滑落解析
- ・地震応答解析
- ・地盤、不連続性岩盤の安定解析
- ・岩盤の掘削解析
- ・コンクリートの亀裂進行解析

■価格

●UDEEC	SUN/IBM-PC	ソース・コード	260万円
	(Barton-Bandis Model等の機能追加も可能です。)		
●BALL2D/3D	SUN/IBM-PC/FACOM/HITAC	ソース・コード	各200万円
●BALL2D-Polygon	SUN/IBM-PC	ソース・コード	260万円
●BFLOW	SUN/IBM-PC	ソース・コード	260万円
●CASK-3D	SUN/IBM-PC	ソース・コード	200万円
●3DEC	SUN/IBM-PC	ロード・モジュール	680万円



プログラムはいずれも最新バージョンを提供いたします。また、問題に応じた個別要素法プログラムの開発も行っています。

* 当社は1988年7月からITASCA社の販売代理店をしています。

OKL株式会社 応用工学研究室

〒151 東京都渋谷区上原2-2-7 カマタビル201
TEL.(03)3485-9360 FAX.(03)3485-6955

地盤の非線形解析プログラム

■開発元 Dr.Cundall (ITASCA社)

FLAC-2D (Fast Lagrangian Analysis of Continue)

1950年代に有限要素法が出現し、コンピュータの発展と共に進歩をとげていったのと並行して、衝撃分野での解析を目的に始まった差分法に基づく、“Hydrocodes”もすくなくならぬ成功をおさめていました。応力波伝播を基本とする弾塑性固体の大変形、スライド・ライン手法による滑り・剝離挙動の解析には目覚ましいものがありました。しかし、これらを取り扱うプログラムの多くは公的機関での開発のため、公開されたものは余りありませんでした。FLAC-2Dはこの流れをくむ地盤非線形解析プログラムです。

プログラムの特徴

- ・幾何学的大変形及び材料非線形を取り扱うことができます。微小変形・歪解析も可能です。
- ・要素の大きなゆがみの発生からくる数値不安定を避けるため3角形差分要素を採用しています。
- ・要素間の滑りを考慮できるスライド・ライン機能(大変形)を備えています。

要素ライブラリー

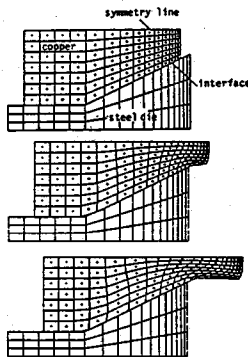
- ・2次元平面歪/応力要素
- ・ケーブル要素
- ・ビーム要素
- ・ロックボルト要素 (point anchor/grouted)

適用分野

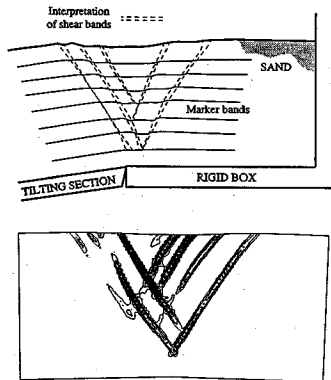
- ・斜面・盛土の設計及び安定解析
- ・浅/深基礎解析
- ・アースダム及びコンクリートダム解析
- ・トンネル、鉱山掘削解析
- ・圧密、流れ解析
- ・固体と流体の相互作用解析

構成則

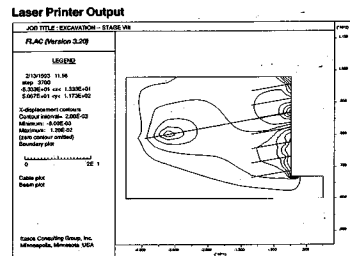
- ・等方性、非等方性弾性
 - ・弾塑性 (Mohr-Coulomb, Von Mises, Drucker-Prager 等)
 - ・偏在ジョイント・モデル (Ubiquitous joint)
 - ・歪一硬化/軟化
 - ・ヌル要素
 - ・体積歪依存の空隙水圧発生モデル 等
- その他の構成則の機能追加も可能です。



スライド・インターアクション



断層解析



地盤安定解析

■価格

●FLAC-2D SUN/IBM-PC ロード・モジュール 標準バージョン……80万円

※追加オプションとして、動解析、クリープ解析及び熱解析があります。

追加オプションを含む一括購入の場合……150万円

プログラムはいずれも最新バージョンを提供いたします。また、問題に応じた地盤非線形プログラムの開発も行っています。

*当社は1988年7月からITASCA社の販売代理店をしています。

OKL 株式会社 応用工学研究室

〒151 東京都渋谷区上原2-2-7 カマタビル201

TEL.(03)3485-9360 FAX.(03)3485-6955

MATRAN EX

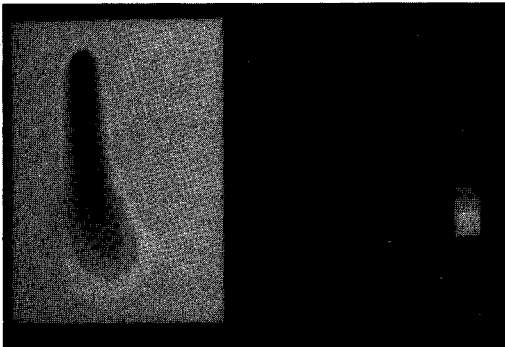
地下水汚染
の解析に!

塩水くさび
農薬汚染
廃棄物処理
その他

飽和・不飽和浸透解析に、移流分散・拡散を考慮。
EXTensiveな問題に適用可能なEXcellentなプログラム。

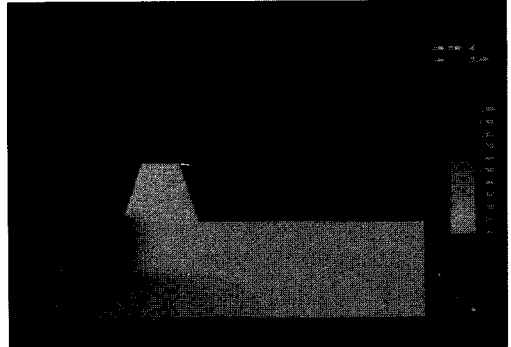
プログラムの特長

- 断面(EXV)および平面(EXH)の解析が可能
- 充実した解析機能
 - 定常・非定常解析 (断面、平面)
 - 軸対称解析 (断面)
 - 降雨 (断面、平面)
 - 揚水・注水 (断面、平面)
 - 浸出面 (断面)
 - 材質変更 (断面、平面)
 - 境界条件の変更 (断面、平面)
 - 水位・濃度の経時変化 (断面、平面)
- 豊富なグラフィック出力 (濃度コンター図、流速ベクトル図、濃度の時間推移グラフ 他)



濃度コンター図(平面解析例)

画面出力図



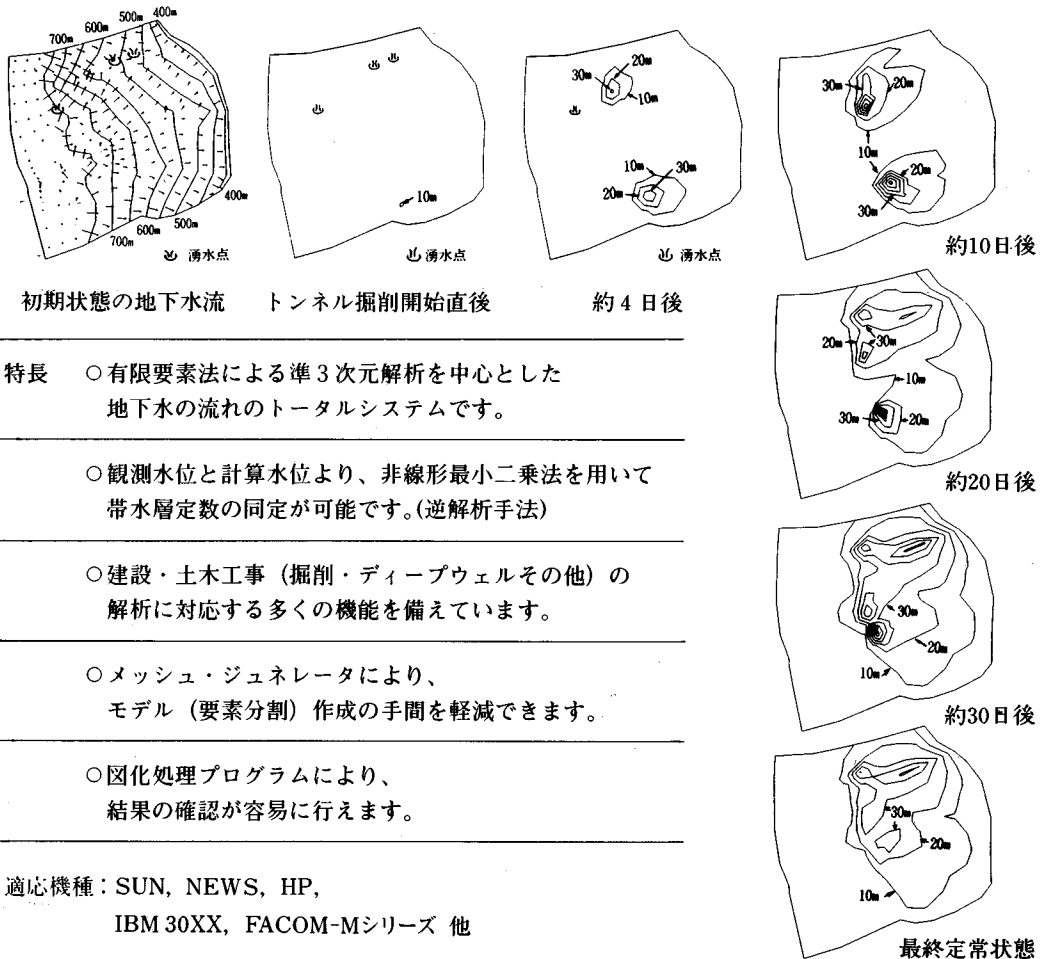
濃度コンター図(断面解析例)

画面出力図

あの地下水解析ソフトがさらに機能充実!

UNISSF_{ユニセフ}(V-2)

スピーディな同定・安価な解析



特長 ○有限要素法による準3次元解析を中心とした地下水の流れのトータルシステムです。

○観測水位と計算水位より、非線形最小二乗法を用いて帯水層定数の同定が可能です。(逆解析手法)

○建設・土木工事(掘削・ディープウェルその他)の解析に対応する多くの機能を備えています。

○メッシュ・ジュネレータにより、モデル(要素分割)作成の手間を軽減できます。

○図化処理プログラムにより、結果の確認が容易に行えます。

適応機種: SUN, NEWS, HP,
IBM 30XX, FACOM-Mシリーズ 他

この製品は、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発したものです。
通商産業省 特別認可法人

IPA 情報処理振興事業協会
株式会社 **CRC総合研究所** 西日本事業部

〒105 東京都港区芝公園三丁目1番38号
TEL. (03) 3437-2301

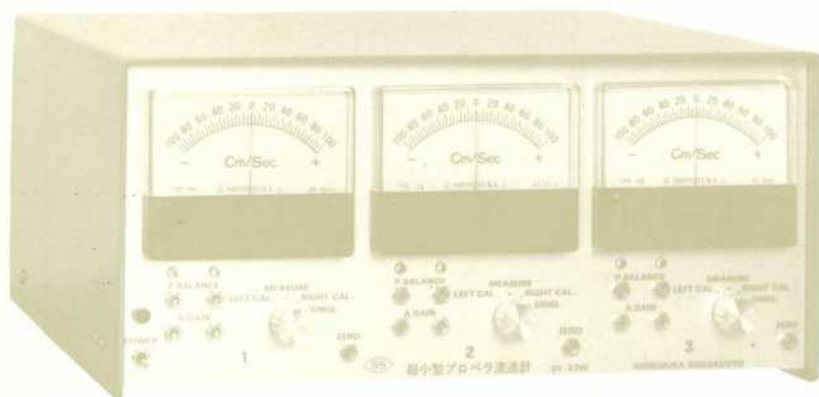
問合せ先

〒541 大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06) 241-4121 営業担当: 岩崎
(03) 3665-9741 本社窓口: 菅原

直径3ミリ

水理実験用に理想的

超小型プロペラ流速計 3チャンネル SV-33W型



米粒とプロペラ

- プロペラ検出器軸長
30~50cm, 軸の曲ったものも製作致します。

特 徴

- ◎ 赤外線回転検出で水温や水質に影響されません。
- ◎ 往復流の正逆判別は高感度で確実です。
- ◎ 正逆判別のないシングルのプロペラも使用出来ます。
- ◎ 独自の楕円軸に依り流れを乱すことが非常に小さくて済みます。
- ◎ プロペラが小さいので流速100cm/secで800~900パルスと高い分解能です。

水理実験用測定器専門



篠塚製作所

〒196 東京都昭島市玉川町2-8-21 電話 0425-44-1731