

## IV-18

## 海洋構造物建設による半閉塞湾における環境影響の分析に関する研究

北海道大学大学院地球環境科学研究科 喜多紀史  
北海道大学大学院地球環境科学研究科 正員 加賀屋 誠一

## 1. はじめに

昔から私たち日本人は水産物を食卓に乗せ、動物性タンパク質の40%を魚介類に依存してきた。ところがこうした漁業生物資源は人為的に増やすことは著しく困難であるが、漁業によって食い潰すことが可能なものが多い。漁業資源の評価と管理への要請は200海里体制が定着した今日の漁業情勢の中、沿岸水域での漁業の合理的展開のためにも一層強まっているといえる。こうした中、海洋構造物建設事業に起因する環境変化は、これら貴重な漁業資源に極めて大きな影響を与えるものであると考えられ、十分な検討が必要である。ここでは生態学的な視点から、湾をわたる長大水中トンネル建設の環境影響評価を行うことを目的とし、起こりうる環境インパクトを予測するための方法について検討を行った。

## 2. 海流のシミュレーションと海域における海流変化の影響

沿岸漁場の基礎生産力を増大させる一つの方法として、人工的に湧昇流を発生させる技術の開発が盛んになってきている。このような流れの中で開発されたマルチレベル密度流モデルとそのモデルの解析によって検討される湧昇流発生メカニズムをシミュレートする方法論を用いて、水中トンネルによる半閉塞海域での流送土砂行動と栄養塩分布状態の予測を行うものとする。これらの考え方は、水産工学研究所と五洋建設(株)での官民共同研究として得られた成果である数値解析プログラムに基づいている<sup>1)</sup>。

ここでの密度流とは、海域において一般的に低層水は表層水に比べて冷たく、夏期には表層がかなり加熱されるため海域によっては密度成層が発達し、上下方向の海流が変化する現象をいう。これに構造物が入るとその影響が複雑に現れることになるので、密度成層場での構造物の効果を検討する必要が出てくる。

上述の数値解析は湾や湖、さらに湾口での水理構造のシミュレーションに適した汎用性のあるものであり、我々は条件のパラメータをいくつか変えることによって、様々な結果を得ることができる。以下では、実際に噴火湾を対象として長大水中トンネルを建設したとの仮定にたって行われたシミュレーション結果を検討するものとする。

## 2.1 マルチレベル密度流モデル

マルチレベルタイプのモデルは、海域をいくつかの鉛直方向の直方体セルに分割して、各セルごとに基礎方程式を導入し、境界条件を与えて積分することによって解を求める方法である。従って解は各セルごとの平均値として求まる。ここでは、水平方向に $x$ と $y$ 、鉛直方向に高さ $h$ を持つ直方体の組み合わせで、それぞれのセルが基礎方程式を持ち、セル内で $z$ 方向に積分したものになる。それらの各方程式についての詳しい定式化と結果については省略する(水工研技報 水産土木 14 13-35 1992 藤原 他)。モデルに導入された基礎的な条件は表2.1に、海流モデルによるシミュレーション対象地域は図2.1示されている。なお、図中の点線はトンネルの位置、数字は改訂の深度、黒いブロックはホタテの養殖海域を表しており、大部分が20~30mの深さで養殖されているのがわかる。

An Anayrsis of the Environmental Impact of the Construction of an Ocean Structure on the Semi-closed Bay  
by Norifumi KITA and Seiichi KAGAYA

表2.1 シミュレーションにおける入力諸元

初期条件	初期水面レベル	+0.5m
	初期流体速度	0.0m/s
境界条件		
セルのレベル	0-5,5-10,10-20,20-30,30-50m	
トンネルの長さ	38.0km	トンネルの直径 20m
潮流レベルの大きさ	0.5m	
12時間サイクルの潮汐変化		

2.2 海流のシミュレーション結果のまとめ

噴火湾全域にわたって表2.1に示される深度別に各セルを計算した結果は省略し、ホタテが最も養殖されている深度である20~30mについての結果のみ示す。図2.2.1は沈殿物(S.S)濃度差分布の結果である。ただし、[濃度差=トンネル有り-トンネル無し]で計算している。図2.2.2は各深度における差を1日あたりとして累積した結果である。結果は以下のように要約される。

- 1) 海流の速度はトンネル建設によって変化する。すなわち、トンネルの頂部および底部の周辺ではトンネルがない場合に比べてより早くなる。逆に、トンネルの両側部においてはトンネルがない場合に比べて遅くなる。したがって、トンネルの両側部では沈殿物の量が多くなり、トンネルの頂部及び底部では少なくなる傾向にあると言える。プランクトンの増減もまた、沈殿物の量の変化に応じて変化していると考えられる。
- 2) 一般に沈殿物量の増加は、プランクトンと更にそれを食べるホタテにもいい条件をもたらすと考えられる。しかし溶解性の栄養物を得て育つ海藻類にとって海流速度の低下は、栄養塩に到達する機会が低減するため不利となると考えられる。

図2.1 シミュレーション対象地域

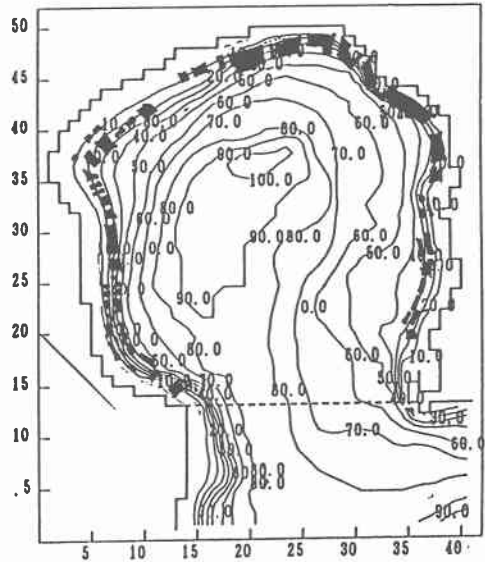


図2.2.1

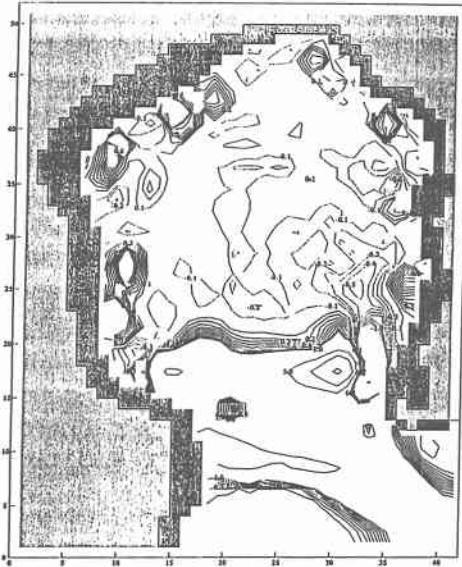
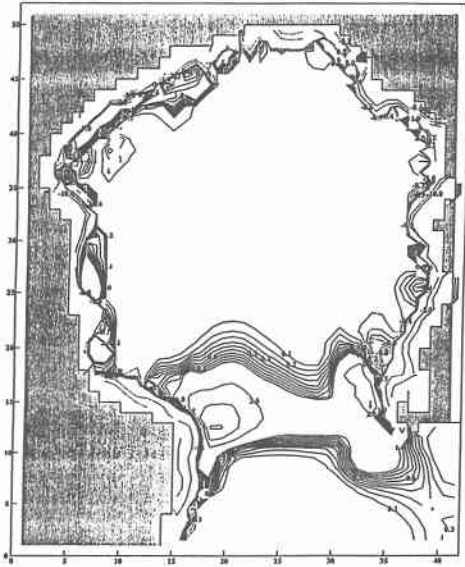


図2.2.2



### 3 生態学における数学モデル

生態学における数学モデルとは、生態系の構成要素がどのように関係しているかを公式として表現したものである。一般にモデルを使って生態学的系の振る舞いを記述したり予測したりする力は、すべてのシステムに成立する原理、すなわち階層的構造の原理に大いに依存している。しかしながら、あるシステムの振る舞いを予測するために、そのシステムの構成要素がより単純な下位の構成要素からどのように組織されているかを完全に理解する必要はない。入力と出力の関係さえわかればその動態予測は可能である。これは、モデルの開発における階層的区分の程度がそのモデルの開発目的に依存するからであり、重要な事柄に関する答えや予測の方が、取るに足らない細部の詳述よりも結局のところ大切であるからである。以上のような観点に立ってここでは捕食関係を記述した生態学的成長モデルを導入する。

#### 3.1 生態学的成長モデル

一般に、海洋における物質循環は非常に多くの生物種との関わりの中で行われるためその正確な把握は難しい。噴火湾についても例外ではないが、ここでは簡単化のために2つの生物種についてのロツカポルテラ型の式を適用を考察する。いまPを植物プランクトンの個体数、Sをホタテ貝の個体数とするとこれら2者の基本的な関係を次のように表すことができる。

$$\frac{dP}{dt} = aP \quad (3.1.1) \quad \text{ホタテナしで植物プランクトンを考える場合、植物プランクトンの成長率は一定であると考えられるので式3.1.1となる。出生率は死亡率より大きいので指数関数的成長となる。これは栄養塩に限界がないことを仮定している。一方、もし植物プランクトンの個体群成長がある大きさの個体群で止まるときにはロジスティック成長モデルを考えると式3.1.2になる。ゆえに植物プランクトンの個体群変化率 } \frac{dP}{dt} = g(P,S) \text{ は } g(P,0) \text{ が } g(P,0) = aP \text{ かまたは } g(P,0) = aP - bP^2 \text{ かのどちらかで与えられる。後者の式は前者を含んでいる。ホタテがないとき } b \neq 0 \text{ ならば植物プランクトンの平行個体群 } P = a/b \text{ が存在する。}$$

$$\frac{dP}{dt} = aP - bP^2 \quad (3.1.2)$$

$$\frac{dS}{dt} = -kS \quad (3.1.3)$$

$$\frac{dS}{dt} = S(-k + \lambda P) \quad (3.1.4)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= P(a - bP - cS) \\ \frac{dS}{dt} &= S(-k + \lambda P) \end{aligned} \right\} (3.1.5) \quad \text{ホタテの個体群の動向は全く異なっている。植物プランクトンがないならば、ホタテの食料源が存在しない。この場合ホタテの死亡率は出生率を越えるであろう。従って式3.1.3を仮定する。植物プランクトンなしではホタテは結局絶滅する危機に陥る。従って } \frac{dS}{dt} = h(P,S) \text{ において}$$

$h(0,S) = -kS$  である。次に植物プランクトンとホタテの相互作用をモデル化していくことにする。植物プランクトンの存在はホタテの成長率増加の原因になる。この過程に対して最も単純な数学的モデルとして、ホタテの成長率は植物プランクトンの個体数に比例して増加すると仮定する。ホタテの成長率は植物プランクトンがない場合  $-k$  であったが、植物プランクトンがいるとき  $-k + \lambda P$  であるとしてモデル化される。ここで  $\lambda$  は正の比例定数である。すなわち式3.1.4となる。植物プランクトンの成長をモデル化するときにも同様に考える。しかしこの場合ホタテの存在は植物プランクトンの成長率を減少させる。この相互作用が成長率に及ぼす効果もやはり個体群に比例すると仮定する。従って植物プランクトンの成長率はホタテがないとき  $a - bP$  であったが、ホタテがいるとき  $a - bP - cS$  になる。ここで  $c$  は正の比例定数である。かくして次のような微分方程式系(式3.1.5)が導かれることになる。定数  $a, b, c, \lambda, k$  はすべて正であり、これらの値に対していろいろな成長過程が対応する。このような考え方に基づいて基本的な定式化を進め、更に人間の活動であるホタテの漁獲や養殖、トンネル建設による海流変化の影響などを盛り込んで本研究のモデリングを完成させた。

#### 4 マルチレベル密度流モデルと生態的成長モデルの結合

マルチレベル密度流モデルによって得られた結果は海流によって移送された沈殿物（栄養塩を含む）の空間パターンと動的挙動を明らかにした。各セルでの沈殿物分布はホタテの成長に栄養を与えると考えることによって沈殿物の挙動を仲立ちとしたマルチレベル密度流モデルと生態的成長モデルの結合をはかることができる。実際的には海域の生態的挙動を評価する重大な入力として生態的成長モデルに用いる形を採る。

##### 4.1 結合に際して用いた数値と主な仮定

- 1) 沈殿物の量に比例して栄養塩量が決まると推定。
- 2) 漁獲率と自然死亡率は噴火湾において広く使われている経験値を用いた。
- 3) 養殖許容量は各水産試験場で算定したものをを用いた。
- 4) [摂餌量=生長量+呼吸量+排泄量]とし、これは炭素の量を基準にしてホタテ一個体が1日にどれだけ大きくなったか、酸素の消費によってどれだけ有機物が分解されたか、体内で利用されずにどれだけ排泄されたかを総合したもの。
- 5) 植物プランクトンの環境容量は植物プランクトンの単位面積当たりの個体数である。
- 6) 植物プランクトン（クロロフィルa）とホタテの摂餌量（炭素）の関係は単位的に不整合なので、ホタテが餌とする懸濁態有機物（POC）の量から植物プランクトン量を統計学的に推定した。

##### 4.2 生態学的成長モデルによるシミュレーション結果

シミュレーションは湾内の各任意の点で各定数をパラメトリックに変化させて遂行される。ここではシステムダイナミクス的手法を利用して、前述の微分方程式を差分型のシステムモデルに置換して行った。システムの概要は図4.2.1に示す。

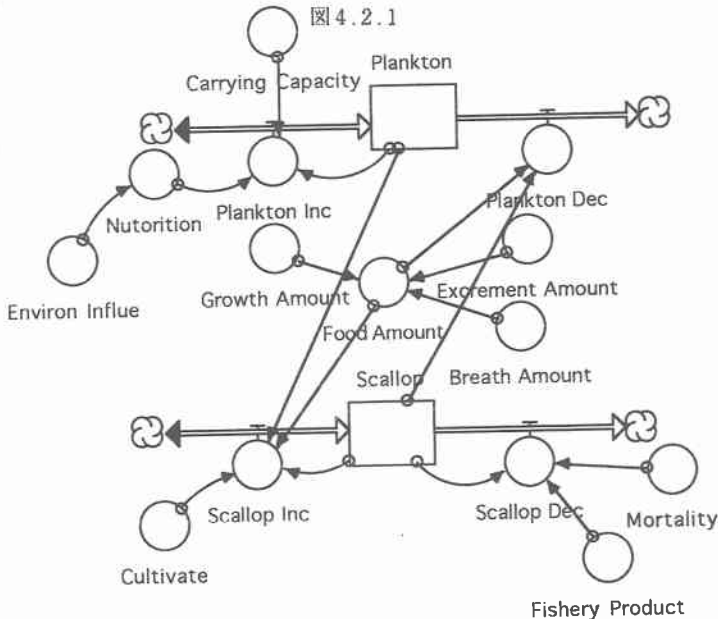


図4.2.1の各要素の説明

Plankton：植物プランクトン、Carrying Capacity：環境容量、Environ Influe：海流の影響、Nutortion：栄養塩、Food Amount：ホタテ一頭当たりの摂餌量、Growth Amount：同じく生長量、Excrement Amount：同じく排泄量、Breath Amount：同じく呼吸量、Scallop：ホタテの個体数、Cultivate：養殖数、Mortality：自然死亡率、Fishery Product：漁獲率

図4.2.2～図4.2.3は噴火湾の砂原町のホタテ養殖を例にシミュレートした結果を示したものである。ともに水深は20mから30mについてのものである。

図4.2.2

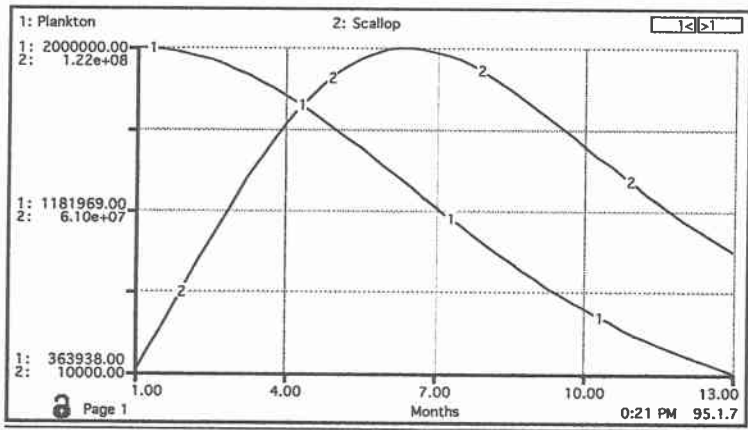
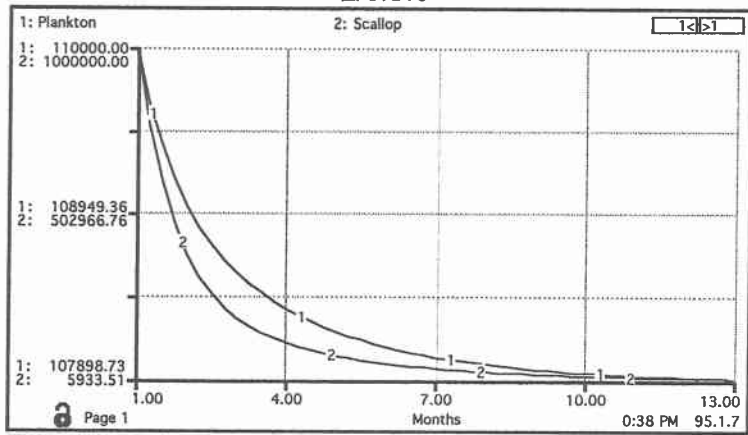


図4.2.3



ここに示した生態学的モデルでのシミュレーション結果は、システムの妥当性をチェックするための実験的なものである。マルチレベル密度流モデルでの結果が示すとおり、構造物（トンネル）の建設が沈殿物の量に大きな変化をもたらし、特に構造物の周辺での変化が大きいと考えられる。また、海岸付近でも多少の変化が起きると考えられる。これらはトンネルのない場合に比べて0.8～1.2倍程度の範囲になると示されている。これらの変動といくつかの条件を組み合わせることによってシミュレーションを行った。その結果をまとめると以下のようなになる。

- 1) 植物プランクトンの単位面積当たりの個体数が、十数万（砂原町の例では120000前後）を割るとホタテ・植物プランクトンともに減少し、ある値に落ちつく傾向が見られる。
- 2) 植物プランクトンの単位面積当たりの個体数が十分な場合は、植物プランクトンの個体数は緩やかに減少し、ホタテの個体数はある程度まで増えてから減少する釣り鐘型の変動を描く傾向が見られる。
- 3) 一般的に2)の場合におけるホタテの個体数の変動幅が大きい傾向が見られる。
- 4) 各個体数が負数になったときの条件を規定していないので、極端に少ない個体数の時には現実的でない結果が出る。

これらの結果から次のようなことがいえる。

1. このシミュレーションは噴火湾内におけるプランクトンとホタテの相互作用を表すことができた。
2. もしプランクトンの挙動が活性化するとホタテの個体数も増加すると考えられる。
3. プランクトンに関する建設の影響はあまり大きくはならないと想定される。しかしホタテに対する影響は比較的大きいと考えられる。たとえば構造物の影響が栄養塩に120%の増加を起こすと考えられる海域では、1.16倍のホタテの増加が予想される。

## 5 まとめ

海洋構造物、ここでは水中トンネルの建設が引き金となって起こりうる環境影響について議論を展開してきた。その中で2つのモデルが提案された。すなわち、海流モデルと生態学的成長モデルである。今回はこれらのモデルの実際の検討対象地域への適用を試みた。

それらの結果についてまとめる。

- 1) トンネルの建設による海域環境に対する影響は基本的にあまり大きくないと予想される。これはトンネルが海域に与える影響の範囲に比べて、噴火湾地域の方が非常に広大なことによると考えられる。
- 2) 一方トンネルにごく近い海域では大きな影響が予想される。海流のシミュレーションによって、トンネルの頂部と底部では海流が早く流れ、逆に両側部では現状よりも遅くなることが明らかにされた。このことにより、トンネルの両側面において栄養塩の蓄積が起り、それがプランクトン増加に結びついて漁業による影響を与えると考えられる。
- 3) プランクトン個体量とホタテ個体量の間の関係について、いくつかの動的特性が明らかになった。たとえば、プランクトンの生産量が増大するとホタテの個体数も増大する。ホタテの自然死亡率が高いときにはホタテの個体数が減少し、ホタテの個体数が小さければプランクトン個体数の低減も緩やかになる。
- 4) トンネル建設によるプランクトンへの影響は小さいものと考えられるが、プランクトンを餌としているホタテに出る影響は無視できないものと考えられる。
- 5) 今後の課題と方針は、よりリアルなモデルの構築と、実際の環境における有効性の検証であると考えている。

## 参考文献

- 1) Fujihira, Akeda, Takeuchi: Tech. Rept. N.R.I.F.E. Aquacul. & Fish. Port 14 13-35 1992
- 2) R.ハーバーマン: 生態系の微分方程式 現代数学社 1994
- 3) Kagaya: Analysis of the environmental impact of the construction of a submerged floating tunnel across the semi-closed bay STRAIT CROSSING 94 June 1994 page 509-517
- 4) 噴火湾ホタテガイの養殖許容量調査報告書 北海道水産資源技術開発協会 1978
- 5) 西浜雄二: オホーツクのホタテ漁業 北海道大学図書刊行会 p.155-168 1994
- 6) 鈴木輝明: 内湾における低次生産系の数値解析 資源評価のための数値解析 恒星社厚生閣刊 p.64-87 1987