

閉鎖海域における水質汚濁モデルに関する研究

高 梨 和 光*・萩 原 運 弘**

1. はじめに

閉鎖性の強い内湾や流れの弱い海域に設けられた養殖場では、残餌や魚の排泄物から生じる窒素やリン等の無機栄養塩が赤潮プランクトンの異常増殖を引き起こし、これが多量のへい死魚被害をもたらす等の魚介類による自家汚染が重要な問題となっている。このような問題を解決するためには、湾全体の無機栄養塩の収支を説明できる水質汚濁モデルを構築し、これを基に海域の環境特性を明らかにする必要がある。しかしながら、現在までに提案されている水質汚濁モデルは、室内実験や現地観測によって決定されているために、潮汐等によって生じる海水交換量を把握することが難しい。このために、湾全体における水質汚濁のプロセスを十分に説明することができない。

そこで、本研究では閉鎖海域に設けられた養殖場を対象に、養殖給餌等の汚濁負荷の変化、湾内の物質循環や湾内外の海水交換等を考慮した湾全体の水質汚濁プロセスを説明できるモデルを提案し、モデルの有効性について現地データに基づいて検証を行なった。

2. モデルの構築と水質汚濁モデルの提案

これまでに、養殖場内での自家汚染の状況は、主に室内実験や現地観測によって調べられてきた¹⁾。室内実験では海水交換の現象を再現できず、現地観測でも長期観測を行なわなければ十分に潮汐等によって生じる海水交換量を把握することが難しいといわれている。

本研究では、室内実験や現地観測から得られる微視的な情報を基に潮流拡散シミュレーションを行ない、リモートセンシングから求まる巨視的な情報との整合性を計る図-1に示すようなモデル構築システムを考える。次に、このモデル構築システムに従い、図-2に示すような汚濁負荷の堆積、滞留、流出を考慮した新しい水質汚濁モデルを提案する。このとき、図-2の水質汚濁モデルにおける海水交換は、図-1に示されるように室内実

験や現地観測のような微視的情報とリモートセンシングのような巨視的な情報を考慮した潮流拡散シミュレーションから推算が行なわれる。

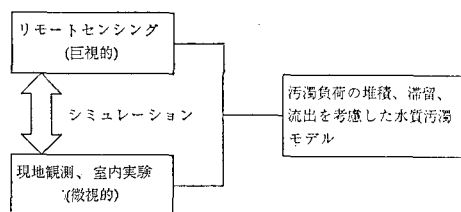


図-1 モデル構築システム

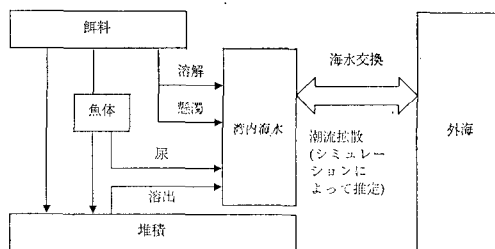


図-2 海水交換を考慮した水質汚濁モデル

3. モデル海域の環境と調査

提案した水質汚濁モデルの妥当性を検討するために、魚類養殖の盛んな三重県南東町方座浦湾をモデル海域として選んだ。モデル海域では、昭和58年から昭和60年の3年間にわたり、底質・水質調査、流況・気象観測等が行なわれた^{2),3)}。この章では、モデル海域の概況、底質・水質調査やリモートセンシングによる汚濁分布調査の概要について述べる。

(1) モデル海域の概況⁴⁾

図-3と図-4に示すようにモデル海域の方座浦湾は熊野灘に面している内湾性の高い湾で、湾の平面形状はV字形をしている。南北方向の一辺は3.4 km、東西方向の一辺は3 km、平均水深は25 mである。

この方座浦湾では、方座浦漁業組合によって養殖を中

* 正会員 清水建設(株) 大崎研究室 研究員

** 正会員 清水建設(株) 技術研究所 主任研究員

心として、一部定置網漁業が行なわれている。組合員は169人、養殖生簀の登録は77人で、区画漁業権の面積は約28万 m^2 である。年間生産量は1000トン、その生産高は約25億円である。北西に伸びている方座浦側では、はまち2年魚で500トン、それと一部地域で真珠母貝の養殖を行なっている。西に伸びている元方座浦では、はまち当年魚と雑魚（あじ、たい）を主体として500トンの養殖を行なっている。魚類養殖の魚種別内訳は、はまちが65万尾、あじが45万尾、たいが24万尾、総計134万尾である。なお、昭和59年6月に発生した熊野灘赤潮は、昭和50年代で最大の規模で三重県の被害額は15億6000万円で、南東町の被害額は2億8670万円であった。

(2) モデル海域の底質と水質調査

昭和58年から昭和60年まで調査によると、元方座浦の湾中央北側が汚れていることがわかった。例えば、昭和59年10月の調査では、底泥の硫化水素臭が強く、強熱減量が14.5%、全硫化物が0.58 mg/g であり、水産用水基準を越えている。一方、水質に関しては、方座浦の西側で溶存酸素量が4.5 mg/l と低い。浮遊懸濁物は26~31 mg/l と水産用水基準を大幅に越えている。さらに、無機窒素は0.2 mg/l 、無機リンは0.055 mg/l であり、ともに水産用水基準を越えている。

なお、方座浦湾での養殖生簀の配置と観測点の関係を図-4にあわせて示す。ここで、黒い矩形部分は養殖生簀、星印は観測点である。

(3) リモートセンシングによる汚濁分布調査

現地観測によって方座浦での水質環境がほぼ明らかに

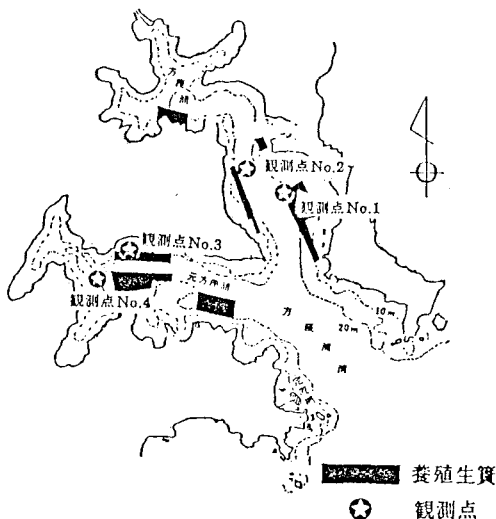


図-4 方座浦湾での養殖生簀観測点の配置

されてきている。しかしながら、現地観測は観測点での値を基に全体を外挿するために、汚濁分布等の広範囲に分布するものを正確に把握することが難しい。そこで、汚濁分布の様子を把握する方法のひとつとして、ランドサット衛星のTM（セマティックマップ）データによるリモートセンシングを試みた。

財団法人リモートセンシング技術センターよりTMデータをテープで入手し、そのTMデータを大型コンピュータで編集、フロッピーディスクに記録する。これをパーソナルコンピュータによって5段階の濃淡でグラフィックする。使用したシーンは、撮影時刻が昭和59年12月4日9時58分30秒の第4バンドである。第4バンドを用いたのは、このバンドがバイオマス調査や水上体描

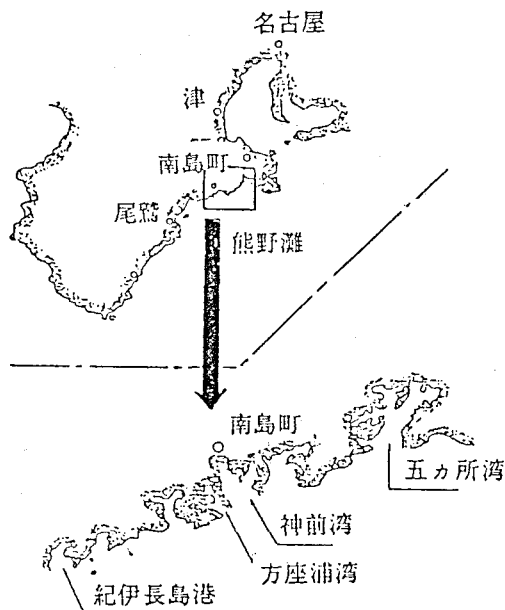


図-3 三重県南東町方座浦湾とその周辺

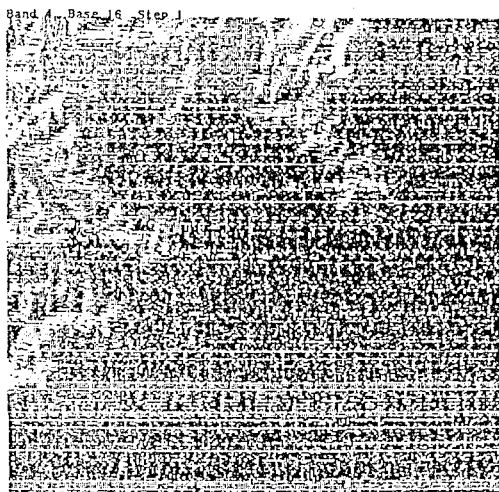


図-5 TMデータによる方座浦とその周辺

写に適しているからである^{5),6)}。図-5はTMデータの第4バンドにより方座浦とその周辺地方を表わしたものである。

陸地部分は白色、海の部分は黒色、そして汚濁領域は灰色で表わされている。ここで、汚濁領域とは外洋と比べて電磁波の反射・放射が大きく異なる部分とする。

図-5より、方座浦の中ほどと元方座浦が汚れているように見える。この汚濁領域と図-4に示した養殖生簀が置かれている場所には、ある程度の対応があることがわかる。このことから、養殖生簀から投入された汚濁負荷が海面上を広範囲に広がることが明らかとなった。一方、方座浦の湾奥部分が汚れているが、これは方座浦周辺の生活廃水によるものと思われる。

4. 潮流拡散シミュレーションの再現性

提案する水質汚濁モデルでは、海水交換量の推算が潮流拡散シミュレーションによって行なわれる。このために、この章ではモデル海域における潮流拡散シミュレーションの再現性の検討を行なうことにする。このとき、汚濁指標としては全窒素を採用し、現地観測データを基にシミュレーションした汚濁分布とリモートセンシングから得られた汚濁分布の比較を試みる。

潮流拡散シミュレーションにおいては、潮流解析には静水圧近似がなされている浅海長波方程式(1)、(2)と(3)、拡散解析には鉛直方向に平均化されている移流拡散方程式(4)を用いている。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{ (\eta + h)u \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ (\eta + h)v \} = 0 \quad \dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ - 2A \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) - A \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = 0 \\ \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ - A \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) - 2A \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \\ \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} \\ - D \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) - D \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right) - \alpha \theta = 0 \quad \dots (4) \end{aligned}$$

ここで、 η は水位上昇量、 u と v は断面平均流速、 θ は断面平均濃度、 h は水深、 g は重力加速度、 A は渦動粘性係数、 D は水平拡散係数、 α は表面フラックス係数である。

離散化には、空間方向へは有限要素法、時間方向には時間積分法が用い、図-6に示す昭和59年12月3日8時から昭和59年12月5日10時までの尾鷲での潮汐を

湾口に与え、養殖生簀から時間毎(10時と16時)に80 $\mu\text{g/l}$ のT-N(全窒素)が餌料として投入されるものとして餌料の広がり分布を求めた。このとき、渦動粘性係数 A が $0.5 \text{ m}^2/\text{sec}$ 、水平拡散係数 D が $1.0 \text{ m}^2/\text{sec}$ 、表面フラックス係数 α が $0.0001 (1/\text{sec})$ 、時間刻み Δt は2秒としている。また、シミュレーションに用いた海底地形を図-7に示す。図の下に示されている三角印は水深の深さを表わしている。

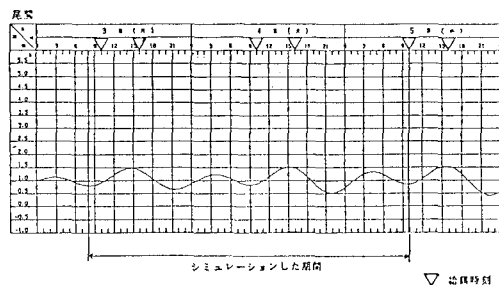


図-6 シミュレーションで用いた尾鷲での潮汐

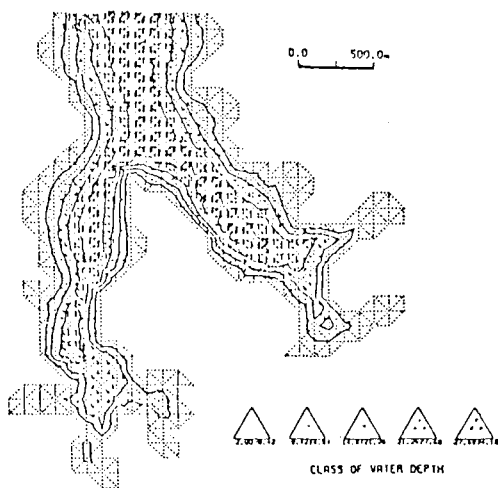


図-7 シミュレーションに用いた海底地形

図-8にシミュレーションで再現された12月4日9時の濃度分布を示す。図の下に示されている三角印は濃度の階級を示しており、左から $0 \sim 12 \mu\text{g/l}$ 、 $12 \sim 24 \mu\text{g/l}$ 、 $24 \sim 36 \mu\text{g/l}$ 、 $36 \sim 48 \mu\text{g/l}$ および $48 \mu\text{g/l}$ 以上を濃淡によって表現している。この濃度分布は、リモートセンシングから得られた汚濁分布と良く対応している。また、観測点での濃度を昭和59年10月16日から11月1日まで行なった冬期観測の実測値と比較したものが図-9である。白い棒はシミュレーションによる値、黒い棒は実測値を示しており、シミュレーションによる値と実測値とに良い対応があることがわかる。さらに、図-10はシミュレーションによる観測点での濃度の時刻歴を示

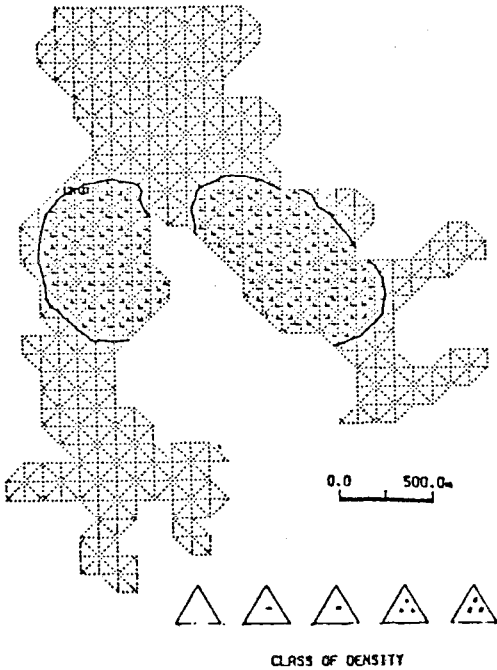


図-8 シミュレーションの汚濁分布

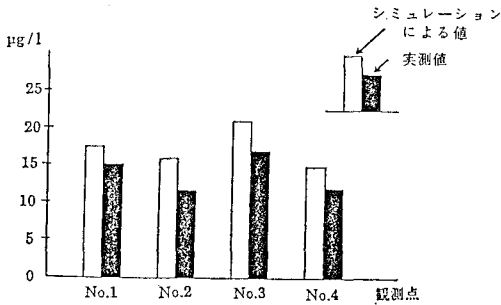


図-9 シミュレーションによる観測点での濃度

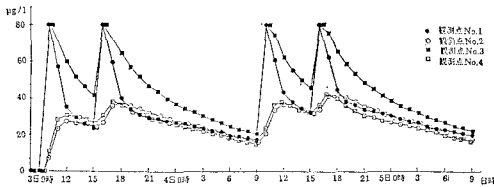


図-10 シミュレーションによる濃度の時刻歴

したものであり、餌料の沈降によって除々に希釈されていくことがわかる。

5. 水質汚濁モデルの検証

図-3 に示した水質汚濁モデルの検証を行なうために、シミュレーションを基にして海水交換量を求めた。次に、この海水交換量と給餌に伴う各項目の量の季節

的な変動を考え、物質収支を求め現地観測結果と比較した。

(1) 年間の海水交換量の推定

内湾の海水交換に寄与するものとしては、潮汐による流れ、風の応力によって生じる流れ、湾口の外を流れる外洋の海流に起因する循環流等が考えられるが、ここでは循環流の寄与が少ないものと考えて潮汐と風による交換量を求めた。

潮汐による海水の通過量は、シミュレーションで得られた潮位差による流れの湾口部における平均値に湾口部の断面積を乗じた量とした。このとき、通過量は $2.94 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{時}$ となった。これは、昭和60年度の夏季に湾口部で15日間測定して求めた通過量 $5.7 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{時}$ と比べて、オーダー的にほぼ同程度であることから、シミュレーションから得られたものがほぼ妥当であると考えられる。

次に、風の応力によって生じる流れの湾口部における海水の通過量を求めた。モデル海域では年間の風のデータが無いので、便宜的に潮岬の累年月平均の風の統計を基に、冬期12～2月の平均応力指数が1.0となるようにモデル海域の風の応力指数を求めた。そして、前年度で得られている冬期の平均通過量 $13.9 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{時}$ より各月の通過量を算定した。

最後に、潮汐による通過量と風の応力による通過量を加えて、各月の平均通過量とした。そして、海水の交換率を0.15とし、この交換率に各月の強風出現率を考慮したものを通過量に乗じて、各月の海水交換量を試算し、その結果を表-1に示す。

表-1 各月の海水交換量 $\times 10^5 \text{ m}^3/\text{時間}$

3月	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
2.37	1.87	1.29	0.68	0.43	0.51	1.24	1.55	2.16	3.28	4.38	3.55

(2) モデル海域の物質循環

図-11 は昭和59年度と昭和60年度に観測によって得られた物質の季節的变化をまとめたものである。この図から、モデル海域では底質の強熱減量が最も早く最大になり、COD, SS, 底質の全硫化物、水質中のリンや窒素類がそれぞれ多少の時間差をもって最大となる時期を迎える。また、最小となる時期も水温の最低期よりも遅く、5～6月頃に最小の値を示し、前後4か月の時間差を生じている。

図-11 に示される物質の季節的变化が、給餌量の季節的变化と海水交換の変動による関数と考え、水質汚濁モデルに基づきモデル海域の物質循環を求めた。このとき、物質量は湾内総量とし、各ステップの給餌量およびこれから導き出せる量等に対する比率は既往の文献を参

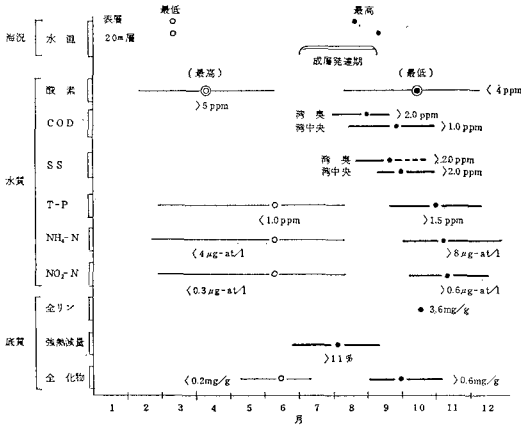


図-11 環境各項目値の年変化

考としている¹⁾。例えば、溶解は5%, 懸濁は5%, 尿は18%, そして、糞は4%とし、残餌は2~31%の範囲内で給餌量と非同化負荷との関係曲線に合わせて推算している。そして、底泥からの溶出は残餌や糞等の新しい沈殿物からの溶出量を17%, 堆積物の溶出を30日当たり40%, 優乱による無い上がり分は海底からの舞い上がりを強風の出現率に比例するものとして、これに堆積量の95%を乗じて舞い上がり量と考え、外洋との海水交換によって湾外に排出する物質量は湾口での平均海水交換量から求めた。

このようにして構築した水質汚濁モデルの検証を行なうために、モデル海域において計測されたSSを対象とし、計算結果と比較したものを図-12に示す。これから、冬季では良い対応があるものの夏季では3倍程度の開きがある。これは、夏季の風による海水交換量を大きく評価しすぎたためと思われる。今後、風による海水交換量の合理的な評価方法を確立が待たれる。

次に、実測データと良く対応している3月での海水交換による物質輸送を求めたところ、全給餌量は56.3トン、湾外に滞留するのは物質量41.0トンであった。したがって全給餌量の約30%が湾外に流出していることが確認された。

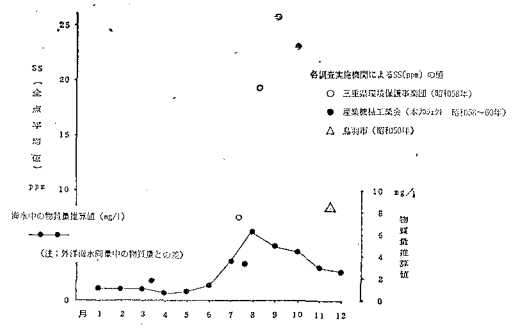


図-12 海水中の物質量の変化

6. おわりに

潮流拡散シミュレーションによって、室内実験および現地観測とリモートセンシングを有機的に結び付け、湾全体の水質汚濁プロセスを説明できるモデルを提案し、SSの実測データと比較したところ、冬季では良い対応があるものの夏季では風による海水交換量を大きく評価しすぎたために3倍程度開きがあることがわかった。次に、実測データと良く対応している3月での海水交換による物質輸送を求めたところ、全給餌量の約30%が湾外に流出していることが確認された。

謝 辞

本研究は、日本小型自動車振興会の補助を受けて(社)日本産業機械工業会が実施した「三重プロジェクト」の調査研究の一部であり、関係各位に記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 日本水産学会編：浅海養殖と自家汚染，恒星社厚生閣，1977。
- 2) 日本産業機械工場会：海底堆積物の拡散による漁場環境改善システムの調査研究報告書，1984~85。
- 3) 日本産業機械工業会：漁場環境保全対策の調査研究報告書，1986。
- 4) 方座浦漁業組合：区画漁業権の設定図，1985。
- 5) リモートセンシング協会：リモートセンシングノート—原理と応用—，技報堂，1980。
- 6) 星 仰：リモートセンシング工学の基礎，森北出版，1984。