

数値シミュレーションによる閉鎖性湾の浄化対策の検討

——大船渡湾を対象として——

片岡真二*・田中昌宏**・小林英一***・小島 洋****

1. はじめに

我国の閉鎖性湾の多くは港や魚介養殖の場等として高度に利用されている一方、富栄養化が進行し、その水質改善対策が課題となっている。著者らはこうした社会的ニーズに応えるため、岩手県大船渡湾をケーススタディとして浄化対策に関する自主的な共同研究を進めている。昨年度は流れと水質の現状再現計算を実施し、底層の貧酸素化に養殖カキの排泄物の海底への堆積が深く関連していることを示した(片岡ら, 1998)。栗原(1998)は港湾の生態環境について解説し、イガイやカキなど岩礁やコンクリート壁に付着する生物は、摂食量の50~60%を糞や擬糞として排出し、港湾内の水質環境に大きな影響を及ぼしている事を指摘している。大船渡湾の水質環境に関しては、早川(1995)によって詳しく研究されており、有機物の沈降と底層の貧酸素化の関係や外洋との相互作用の重要性が指摘されている。日比野ら(1999)も大船渡湾の成層の形成・消滅に外洋の影響が大きい事を指摘した。さらに豊田ら(1999)は日比野らの研究をベースに、湾内底層に溜まった貧酸素・高栄養塩の水塊を湾外へ排出する浄化策を検討している。

このように閉鎖性湾の水質環境悪化の幾つかの原因が明らかにされきており、効果的な浄化策の具体化が急がれている。しかし、湾内の水質環境のメカニズムは相互に関連しており、一つの悪化要因に対する浄化策が、湾全体の水質改善にどの程度効くかが問題である。こうした問題を解決する道具として生態系モデルによる水質シミュレーションは有効と考えられる。つまり、浄化の具体策の検討に入る前に、個々の悪化要因に対する対策が湾全体の水質改善にどの程度効果を持ち、どの対策あるいは複数の組み合わせが最適であるかを事前に判断できるからである。

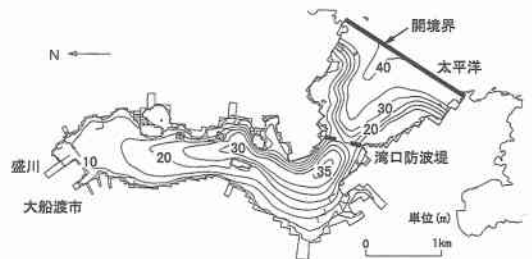
そこで本研究では、大船渡湾をケーススタディとして、原因別に考えられる浄化策について数値シミュレーションを行い、浄化対策の定量的な評価を試みた。ただし、

ここでいう浄化対策とは、水質悪化の個々の要因を軽減あるいは取り除く事を意味し、本研究では、浄化の指針を得る事をねらいとした。こうした検討を基に最も効果的な浄化対策の具体化が可能になるものと考えられる。

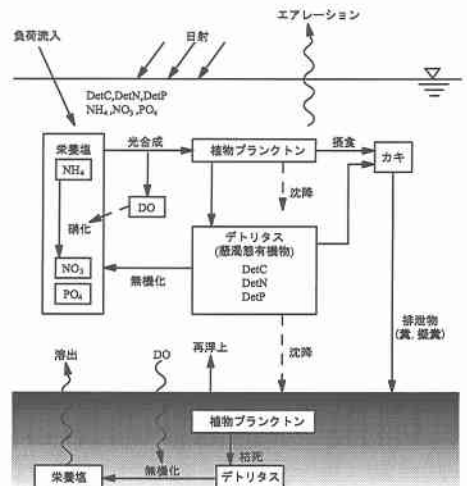
2. 大船渡湾の物質循環機構

水質悪化の要因を明らかにするためには、湾内の物質循環機構を知る必要がある。そこで、昨年度行った現状水質のシミュレーション結果から(片岡ら, 1998)、大船渡湾の物質循環を調べた。

水質現状再現は図一に示すように大船渡湾の湾口防



図一 大船渡湾の計算範囲



図二 生態系モデルの概念図

* 正会員 工修 (財)港湾空間高度化センター 審議役
 ** 正会員 工博 鹿島技術研究所 主任研究員
 *** 非会員 工修 三菱重工長崎研究所 主務
 **** 正会員 東亜建設工業 課長

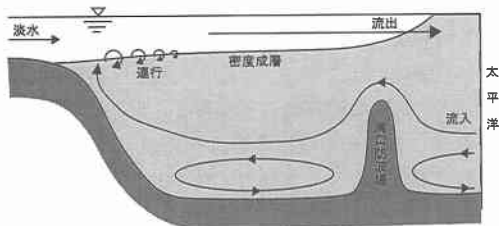


図-3 大船渡湾の流動パターン

波堤より沖合い 1.5 km 程度に開境界を設定し、夏場の平均的な水質を対象に行った。水質モデルはオランダ・デルフト水理研究所が開発した Delft 3 D-WAQ (1998) をベースに図-2 に示すように、新たにカキの排泄物を物質循環に組み込んだモデルを構築した(片岡ら, 1998)。

まず物質循環のベースとなる流動特性を、著者らのシミュレーション結果とその他の研究結果(日本水産資源保護協会, 1995 および横山, 1981)から総合すると図-3 のようになる。流動の基本は河川からの淡水と沖合いの塩分差による重力循環(エスチャリー循環)であり、表層流出, 中・底層流入であるが, 大船渡湾では三層構造となっている。この流動によって湾内表層で生産された有機物の多くは湾外へ排出され, 外洋水と混合した後再び中・底層の流れによって湾内へ流入する。エスチャリー循環は国内湾の多くに共通しているが, 大船渡湾の様に湾奥までの距離が数 km の小湾では外洋の影響を直接的に受け易くなっていると考えられる。

次に水質の現状再現シミュレーション結果から, 計算領域全体での物質収支(流入負荷, 開境界で流入・流出, 底泥との交換(堆積, 溶出, 消費)及び水域内部でのネットの生化学反応による増減)を, 各水質項目毎に表-1 に示す。まず, 植物プランクトンを見ると, カキによる消費が内部生産の 1/4 強となっており, 非常に大きいことがわかる。さらにカキが摂食したうちの半分以上が排泄物として底泥に堆積しており, 通常の沈降堆積量の 10 倍程度にまでなっていることがわかる。デトリタスも同様にカキによる底泥への輸送が大きい, それ以上に開境

界から流れ込む量が非常に大きくなっている。次に栄養塩についてみると, 窒素もリンも底泥からの溶出が非常に大きく, 陸からの負荷を上回っている。表にはカキを考慮しない場合の底泥からの溶出量も示されており, 窒素もリンもカキの排泄物の底泥への堆積により溶出量が約 4 倍になっている。さらにここで注目すべき事は, 窒素もリンもデトリタスと同様開境界からの流入量が多く, ネットの流入量がリンの場合は陸域からの負荷より多くなっている。次に大船渡湾の水質環境で最も重要な溶存酸素をみると, 底泥による消費が大きく, カキの排泄物がない場合の約 4 倍となっている。

以上のように, 大船渡湾の物質循環において, まずカキの排泄物が重要な役割を担っており, 特に表層の有機物を底泥に輸送し, 栄養塩の溶出や酸素消費を大きくしていることがわかる。次に, 開境界つまり太平洋からの物質輸送が湾内の水質変化に大きく影響していることがわかる。

3. 浄化策の評価シミュレーション

3.1 検討浄化策の選択

上記したように大船渡湾の水質はカキの排泄物と外洋からの物質輸送に大きく影響されている。そこで, 水質悪化のこれらの原因を計算上軽減あるいは削除した場合の評価を行う。

評価計算は以下の 3 項目について実施した。

- ① 流入負荷の削減
- ② カキの排泄物の除去
- ③ 流入外洋水の影響の低減

流入負荷は富栄養化の基本的な原因であり, まずその効果を把握する必要がある。ここでは下水の 3 次処理を想定し, 流入負荷の有機物及び栄養塩を一律 20% 及び 40% 削減した場合の計算を行った。カキの排泄物の除去を具体的にどのように行うかは大きな問題であるが, ここでは, 排泄物を半分及び完全除去した場合の評価を行った。流入外洋水の影響の低減も具体策は非常に難しいと考えられるが, ここでは浄化策というよりもむしろ

表-1 数値シミュレーションによる大船渡湾の物質収支

単位: 全重量は t, その他は t/day	植物プランクトン (炭素量)	デトリタス (炭素量)	溶存態窒素 (NH ₄ +NO ₃)	溶存態リン (PO ₄)	溶存酸素
全重量	63.8	60.4	24.3	4.96	1570.00
陸からの流入負荷	0.00	0.68	0.31	0.013	2.73
開境界・流入	5.92	28.00	3.99	1.00	374.00
開境界・流出	15.10	19.10	3.80	0.95	376.00
開境界・(流入-流出)	-9.18	8.90	0.19	0.05	-2.00
底泥との交換(沈降, 溶出, 消費)	-0.18	-0.68	0.68	0.092	-11.60
カキ無しの場合の底泥との交換	-0.25	-0.79	0.16	0.024	-2.76
水中の生化学反応による増減	13.24	-7.03	-1.18	-0.16	10.87
カキによる摂食	3.87	1.19	-	-	-
カキの排泄物の底泥堆積	2.71	0.83	-	-	-

外洋水の湾内水質への影響がどの程度のかを把握するために検討を行う。そこで現状再現に用いた開境界の条件のうち、溶存酸素以外のすべての水質の値を、2割減とした計算を行った。

3.2 シミュレーションの結果

図-4に流入負荷を削減した場合の、表層の植物プランクトン濃度及び底層溶存酸素濃度を現状水質と共に示

す。3次処理による流入負荷の削減は予想されるように表層有機物量への直接的な影響が明らかであり、40%削減により植物プランクトンが約1割減少する結果となった。一方、底層の溶存酸素も改善はされるものの、生物の環境としての一つの基準である4 mg/lを下回る領域が湾奥に残っており、底層の貧酸素水の完全な解消までには至っていない。

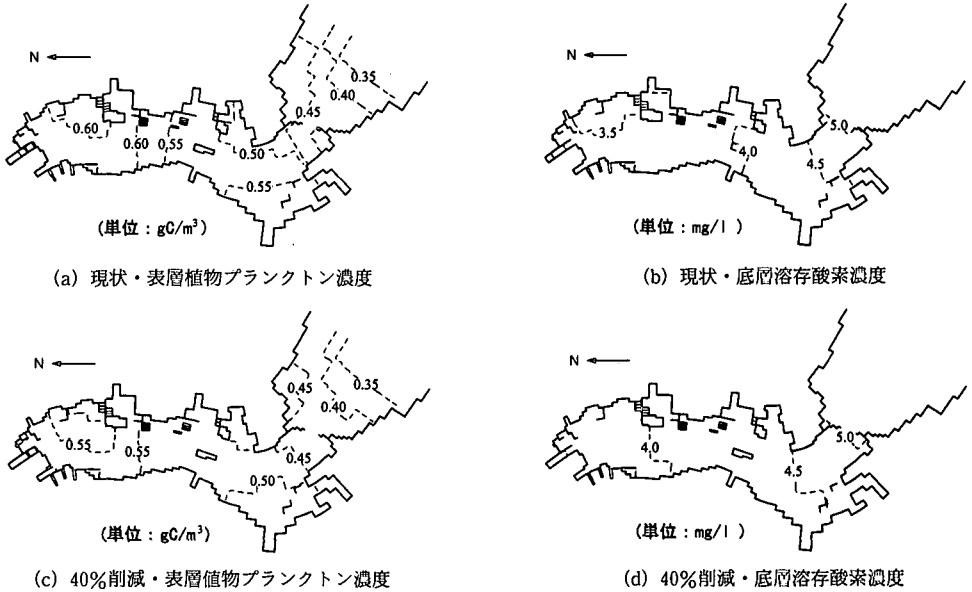


図-4 流入負荷削減の計算結果

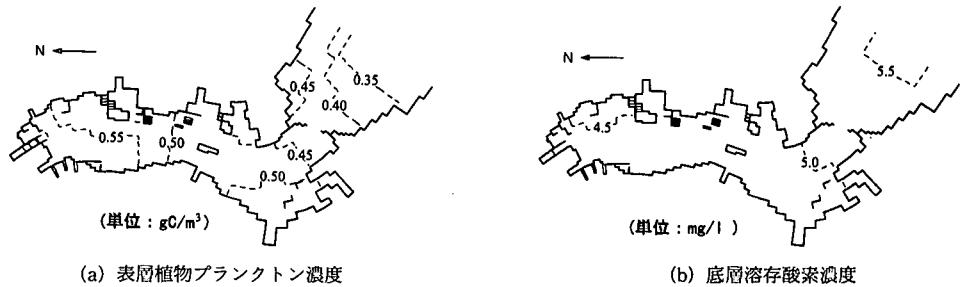


図-5 カキ排泄物の半分除去分の計算結果

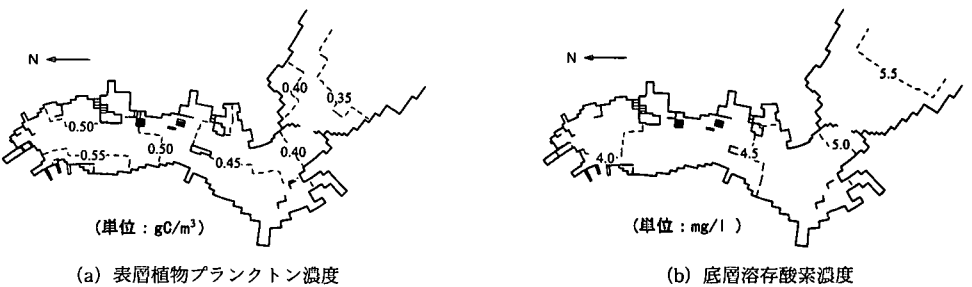


図-6 外洋水の水質を2割減とした場合の計算結果

次に、図—5にカキの排泄物を半分除去した場合の表層の植物プランクトン及び底層の溶存酸素の分布を示す。カキの排泄物を半分除去する事により底層の溶存酸素は湾奥まで、4 mg/l 以上まで改善されており、非常に有効である事がわかる。さらに表層の植物プランクトンも湾奥で1割程度減少していることが注目される。これは、カキの排泄物の海底への堆積が減少した事により、栄養塩の底泥からの溶出が減少し、エスチャリー循環によって底層水が湾奥で表層へ回帰する栄養塩も減少したためと考えられる。

図—6は開境界の水質値を2割減とした結果を示している。この結果も底層の溶存酸素がかなり回復し、さらに湾奥表層の植物プランクトン濃度が1割程度減少し、かなり水質が改善されている。このことは湾内の浄化策の一つとして外洋との海水交換を促進、あるいは外洋水を湾内に導入する策を考える場合に、慎重な検討が必要である事を意味している。つまり外洋水を利用して浄化を行う場合には、量的な問題だけではなく質的な検討を十分行う必要がある。しかし、この結果はあくまで計算領域を図—1の様に設定した場合の結果であり、数値的な境界条件の影響が大きい可能性がある。そこでこの点については次章で詳しく検討する。

4. 外洋水質の影響の検討

4.1 外洋水質

大船渡湾の沖合いの外洋水は、津軽海峡を通過して南下する対馬暖流と親潮の影響を受けている。Hayakawa (1990)は大船渡湾の水質と外洋水との関係を調べるた

め、図—7に示す点で長期観測(1979~1989年)データを解析している。これによると、栄養塩は100 m以深では年間を通してほとんど変動せず高い値を保ち、100 m以浅では春から秋にかけて植物プランクトンの増殖により減少することが示されている。またこうした変動は湾口防波堤のすぐ沖である測点 OF 15 と他の沖合いの測点とほぼ同じ変動を示している。表—2にはすべての点にデータがある溶存態リンと硝酸態窒素の平均値を示す。これより、湾口防波堤沖の測点 OF 15 の水質は対馬暖流や親潮の影響を受ける沖合いの測点の水質とほぼ同じである事がわかる。

本研究の境界条件は OF 15 における 1991~1995 年の公共用水域測定データと日本水産保護協会 (1995) の水質モデルに用いられた境界条件を参考に決めており、その値を表—3に示す。このように本計算の計算条件は、実測値よりも少し小さ目であるが、OF 15 の実測水質に則して与えている。また、上記したように OF 15 は海流の影響を直接受ける沖合いの水質とほぼ一致している事から、本計算は、外洋水質の平均的な影響を考慮したものであると言える。

4.2 開境界を沖合いに広げた計算

上記したように本水質シミュレーション結果は、開境界の境界条件としてかなり広い領域の外洋水質を代表した値を用いた結果である。しかし実際には湾内から表層流出水に乗った物質が沖合いで外洋水と混合し、再び中・底層から湾内で流入していると考えられる。図—1に示す計算の開境界はこうした外洋水の混合が生じていると予想される場所に設定されており、計算結果にはモデル境界によって数値計算上生じる影響が含まれている可能性がある。そこで、計算領域を図—8に示す様に沖合いに大きく広げた計算を行い、数値的な境界の影響をできるだけ軽減し、外洋水質の影響を検討した。

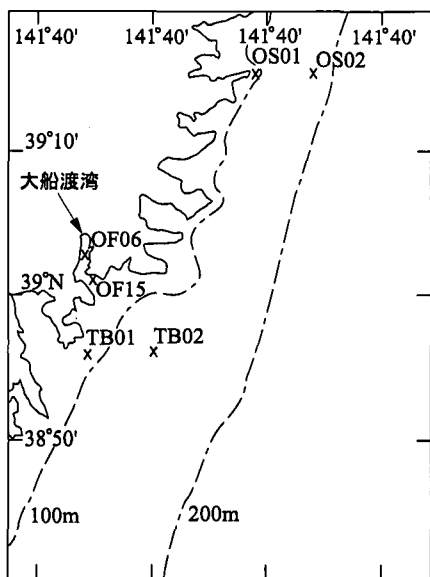
図—8示す計算格子により、著者ら (1998) が現状再現

表—2 大船渡沿岸外洋の水質 (Hayakawa, 1990)

測定点名	溶存態リン (μM)	硝酸態窒素 (μM)
OF 06	0.6	4.5
OF 15	0.4	3.4
TB 01	0.4	3.6
TB 02	0.3	3.5
OS 01	0.4	3.8
OS 02	0.4	4.3

表—3 湾口防波堤沖の水質

	実測値	境界条件	
デトリクス	COD (g/m ³)	0.93	
	DetC (g/m ³) = COD/1.54	0.60	0.45
窒素	T-N (g/m ³)	0.42	0.20
リン	T-P (g/m ³)	0.027	0.025
植物プランクトン	Chl-a (mg/m ³)	1.2	—
	炭素 (g/m ³) = Chl-a × 0.05	0.06	0.095



図—7 Hayakawa (1990) の水質観測点

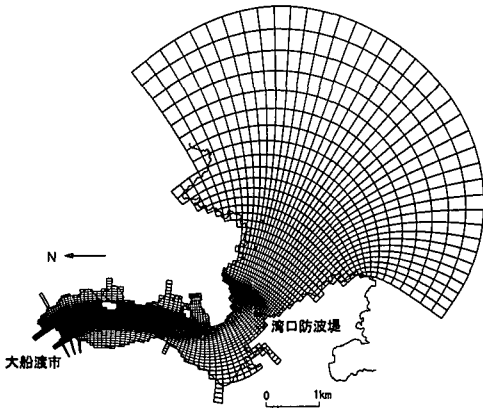
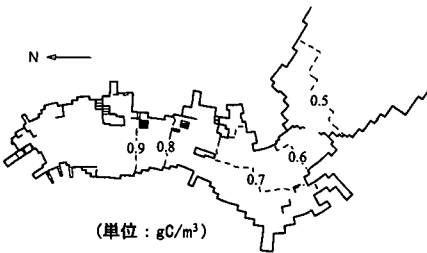
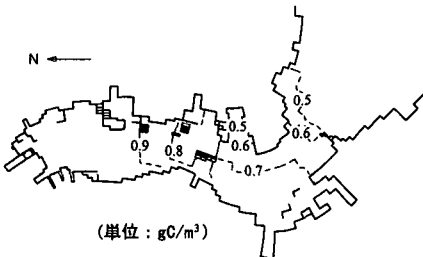


図-8 領域を広げた計算格子



(a) オリジナルの計算領域の結果



(b) 領域を広げた結果

図-9 開境界の影響の検討
(表層植物プランクトン濃度)

を行った図-1の計算領域と同条件で計算を行った。まず流動場について残差流、水温・塩分を比較し、ほぼ同じ結果であることを確認した。次にこの流れ場を用いて水質の計算を行ったが、ここでは開境界の影響のみをみるため、湾内のカキは考慮しない計算を行った。

図-9に結果の一例として湾内表層の植物プランクトンの結果を示す。ほぼ同じ結果が得られており、これより、3章で示された外洋水の水質の内湾水への影響は、モデル境界の数値的な影響ではなく、実際に重要である事が示されたと考えられる。なお、計算領域を広げた計算でも境界条件の感度解析を行ったが、オリジナルの計算領域の結果と同様の傾向が確認された。

本来は外洋の内湾への影響の検討は、日比野ら(1999)が指摘するように、海流や気圧の変動などを考慮してダイナミックに行う必要がある。しかし現在のところ、そうした検討に足るデータセットの取得が困難であるため、本格的な検討は今後の課題としたい。

5. おわりに

本研究では、大船渡湾を対象に、数値シミュレーションによる海域浄化策の検討を行った。本研究から得られた主な知見を以下にまとめる。

- (1) 流入負荷の削減は表層の有機物量の減少に直接的に効果があり、底層貧酸素水塊の解消にもある程度効果が認められた。
- (2) カキの排泄物は半分の除去で底層の貧酸素化が解消され、表層の有機物の減少にも大きな効果が見られた。
- (3) 外洋水質の湾内水質へ与える影響は大きく、外洋水を利用した浄化策を行う場合には十分な質的検討が必要である。同時に今後外洋水の内湾生態系に及ぼす影響の検討が重要と考えられる。

今後は本研究の成果を基に具体的な浄化策を提案していきたいと考えている。なお、本研究では大船渡湾を対象に検討を行ったが、得られた知見は我国の閉鎖性湾に共通して有効であると考えられる。

謝辞：本研究を進めるに当たり、第二港湾建設局釜石港湾工事事務所より大船渡湾の水質データを提供して頂いた。また大船渡市より貴重なコメントを頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

片岡真二・田中昌宏・小林英一・小島 洋 (1999)：大船渡湾における流況・水質の現状再現と養殖カキの役割について、海岸工学論文集，第45巻，pp. 1006-1010。
 栗原 康(1998)：海岸と港湾における環境保全のための生態学，土木学会誌，Vol. 83，pp. 26-28。
 豊田政文・日比野忠史・西守男雄(1999)：大船渡湾での海水交換機構と自然力を利用した水質管理手法の検討，水工学論文集，第43巻，pp. 1079-1084。
 日本水産保護協会 (1995)：底質環境保全調査報告書，平成6年度，p. 407。
 早川康博(1995)：大船渡湾の水質及び底質環境，三陸総合研究，第8号，pp. 37-46。
 日比野忠史・豊田政文・深和岳人 (1999)：大船渡湾での貧酸素水塊の形成と消滅機構，水工学論文集，第43巻，pp. 1073-1078。
 横山隆三 (1981)：リモートセンシングによる大船渡湾の海水交換機構の解明，日本リモートセンシング学会誌，Vol. 1，pp. 15-33。
 Delft Hydraulics (1998)：DELFT 3 D-WAQ, Delft water quality model, Technical ref. and User's manual, release 4. 30。
 Hayakawa, Y (1990)：Mean seasonal changes of dissolved inorganic nutrients in the Ofunato estuary, Nippon Suisan Gakkaishi, Vol. 56, pp. 1717-1729。