

海洋生物を指標とした海域浄化効果予測モデルについて

堀江 毅*・堀口孝男**

1. ま え が き

わが国の閉鎖性内湾の湾奥部海域では、陸域からの汚染流入負荷、および海底に堆積した汚泥からの溶出により、海水の汚濁が進行して、海域の有効利用に支障をきたしている。このため、流入負荷の削減を図るとともに、堆積汚泥の処理をして溶出を抑制し、海域の水質底質を浄化する必要がある。堆積汚泥の処理としては、浚渫、または汚染されていない海砂、山砂による汚泥層表面の被覆などが有効と考えられる。特に、流れの小さい水域では、比較的小規模な汚泥の処理によっても水質の改善効果が期待できる。しかしながら、海水の流動によって、処理泥上の海水は移流、拡散を受け、周囲水と混合されるため、水質指標に現れる改善効果は見かけ上小さくなる。ところが、現場での被覆試験結果では、処理泥上の底生生物や底魚などの増加が顕著である。すなわち、これらの海洋生物を指標として海域の浄化効果を評価することができれば、感度が高く、かつ効果の価値判断が一段と容易になる。

このような主旨から、本文においては、海域における物質循環に着目し、海洋生物を取り込んだ生態系物質循環の多ボックス多層モデルを構築し、実海域に応用してその適用性を明らかにする。

2. 沿岸生態数値モデルの構築

(1) モデルの目的

前回(堀江, 1988)において、沿岸域における海水、底質、生物間の物質循環に対し、1ボックス多層モデルによる解析を行った。本研究は、このモデルを多ボックス多層モデルに拡張して、海域の水質、底質、生物等の平面ならびに鉛直分布を計算するとともに、底質改善などの事業規模に見合ったボックスサイズの浄化効果を生物量より予測可能にすることを試みるものである。

本モデルはつぎのような前提条件のもとに構築した。

すなわち、①沿岸域における水質、底質、生物間の各

過程をリンを指標とする物質循環として捉える、②海水系と底泥系とを一体として取り扱う、③計算領域を多ボックス多層に分割して、ボックス間、層間の物質質量を取り扱う、④構成因子として、植物プランクトン、動物プランクトン、底生生物、デトリタス、溶存態有機リン、無機態リンとする、⑤物質循環過程は、内部生産、細胞内分泌、捕食、排泄、排糞、分解、呼吸、枯死、漁獲などの生物過程と、移流、拡散、沈降、外部負荷、溶出などの非生物過程などにより捉える、⑥底質の処理による水質の浄化効果は底質の全リンの減少に基づく溶出量の削減量、DO消費の減少量より捉える、⑦底質の処理による底生生物量の回復は、底質粒径の増大に伴う底生生物の死亡率の減少により捉える、などである。

(2) 計算式

上述の仮定のもとにつぎの計算式を構築する。

$$V_{k,l} \frac{dC_{k,l}}{dt} = \sum_j \left[D_{k,j,l} \cdot (C_{j,l} - C_{k,l}) - Q_{k,j,l} \cdot C_{*,l} \right] + \frac{1}{2} \left[W_{k,l+1/2} \cdot (C_{k,l} + C_{k,l+1}) - W_{k,l-1/2} \cdot (C_{k,l-1} + C_{k,l}) \right] - S_k \cdot K_z \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right)_{k,l-1/2} + S_k \cdot K_z \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right)_{k,l+1/2} + (\text{生物関連項目}) + F_{k,l} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $V_{k,l}$: ボックス k , 層 l の容積, $C_{k,l}$: ボックス k , 層 l の物質濃度, $D_{k,j,l}$: 層 l のボックス k , l 間の物質輸送係数, $Q_{k,j,l}$: 層 l のボックス k から j への移流量, $C_{*,l}$: $C_{k,l}$ ($Q_{k,j,l} > 0$ の場合) または $C_{j,l}$ ($Q_{k,j,l} < 0$ の場合), $W_{k,l-1/2}$: ボックス k の層 $l-1, l$ 間の鉛直移流量, S_k : ボックス k の面積, K_z : 鉛直拡散係数, $F_{k,l}$: ボックス k , 層 l への負荷量, である。

生物関連項目については、図-1 に示す過程を各物質について組み立てる。図-1 中の各過程のパラメータは既往の文献値または1ボックスモデルによるキャリブレーションを経て表-1 に示すものを用いた。

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部長

** 正会員 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科

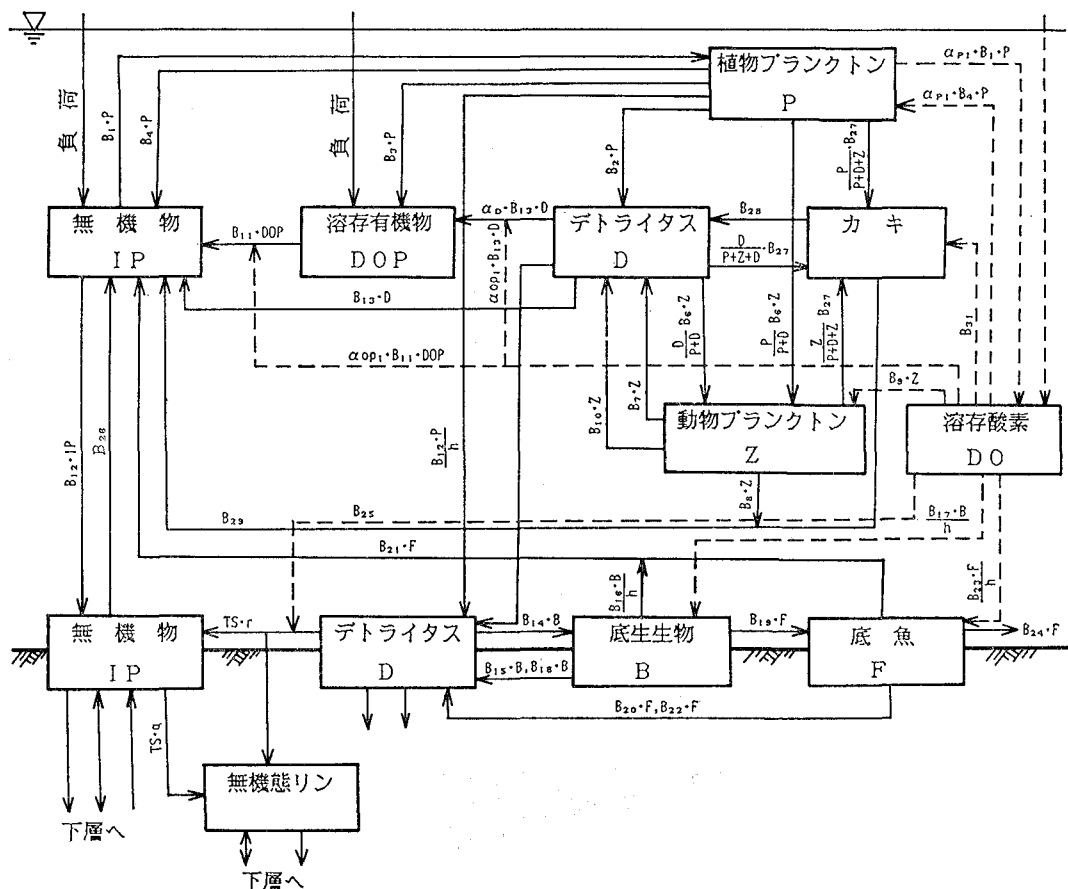


図-1 モデルの構成

3. 呉湾への適用

(1) 入力条件

呉湾海域を11層(各層2m厚)にて10ボックスに分割した。ボックス、層間の移流量は、別途3層500m格子にて求めた M_2 潮流計算結果(図-2に示す)より算出した。懸濁態有機リン、溶存態有機リン、溶存態無機リンの流入負荷などを合わせ同図に示す。さらに、生物関連項目に係わる海面日平均照度 I_0 、塩分、水温(例示は5m層のみ)、ならびに、カキの捕食(B_{27})、排糞(B_{28})、排泄(B_{29})、および漁獲(B_{30})の各季節変化の入力値を図-3に示す。

底泥層については、泥表面より60cm厚を7層に分割した。底泥内のリン堆積、生物擾乱、分解、吸脱着、溶出を計算し、上部の海水と連動させた。

(2) 現況再現計算

上述の条件により、式(1)に基づく水質、底質、生物量を時間ステップ1時間にて5年間相当分の積分を行った。このようにして得られた結果の中から、溶存酸素(DO)、動物プランクトン、ベントスの代表ボックスに

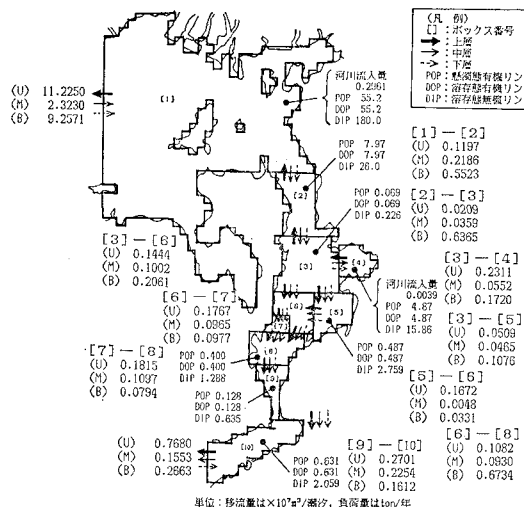


図-2 ブロック分割と移流量、淡水流入量、流入負荷量

おける表層と底層について実測値とともに示したものがそれぞれ図-4, 5, 6である。なお、実測値については、広島湾広域および詳細汚染実態調査(第三港湾建設局,

表-1 生物関連項目の各パラメータ入力値

植物プランクトン					
B_1	生産速度	$B_1 = 1.4 \times \frac{I}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{opt}}\right) \times 0.053 T^{-18} \times \frac{N}{0.015 + N}$ $I_{opt} = 1.7 \times 10^4 (\text{lux})$ $I = I_0 e^{-K D}$ $\log_{10} K = 1.439 \times \frac{I}{T_r} - 0.885$ $T_r = 0.764 (O - P)^{-0.473}$ $I_0: \text{海面照度 (lux)} \quad (\text{図-3 参照})$ $D: \text{水深 (m)}$ $O-P: \text{水中 } O-P \text{ 濃度 (mg/l)}$ ……計算値より	B_{13}	分解速度	有機態: $0.005 e^{0.07 T} \frac{DO}{0.1 + DO}$ [1/日] 無機態: $B_{13}' = 0.25 B_{13}$ [1/日]
B_2	枯死速度	0.04 [1/日]	底 生 生 物		
B_3	分泌速度	0.13 [1/日]	B_{14}	捕食速度	$2.5 \times \exp\{0.0785 (T - 25)\} \times \frac{OP - 0.55}{OP - 0.55 + 0.10}$ [1/日]
B_4	呼吸速度	$0.025 \exp(0.0524 T)$ [1/日]	B_{15}	排糞速度	$B_{14} (1 - 0.5)$ [1/日]
B_5		0.5 [m/日]	B_{16}	排泄速度	$B_{14} (0.5 - 0.20)$ [1/日]
動物プランクトン			B_{17}	呼吸速度	$3.55 \times \exp\{0.0693 (T - 20)\} \times \frac{DO - 0.5}{0.6 + DO - 0.5}$ [mgO ₂ /mg・P/日]
B_6	捕食速度	$1.4 \exp\{0.0693 (T - 10)\} \times [1 - \exp\{-8.2 (0.0020 - P - D)\}] \times \frac{DO - 1}{DO}$ $DO: \text{溶存酸素濃度}$ $P: \text{植物プランクトン濃度}$ $T: \text{水温 (°C)}$	B_{18}	死亡速度	式 (2)~(7) 参照
B_7	排糞速度	0.6 [1/日]	底 魚		
B_8	排泄速度	0.2 [1/日]	B_{19}	捕食速度	$0.195 \times \exp\{0.0693 (T - 27)\} \times f_2(B) \cdot f_3(DO)$ $f_2(B) = 1.0 (B/F \geq 10), 1/10 B/F (B/F < 10)$ $f_3(DO) = 1.0 (DO \geq 4.0), 0.25 \cdot DO (DO < 4)$
B_9	呼吸速度	$0.046 \exp\{0.0693 (T - 20)\}$ [mg・O ₂ /mg・P/日]	B_{20}	排糞速度	$B_{19} (1 - 0.882)$ [1/日]
B_{10}	死亡速度	$0.035 \times \frac{C_z}{0.003 + C_z}$ $C_z: \text{動物プランクトン濃度 (mgP/l)}$	B_{21}	排泄速度	$B_{19} (0.882 - 0.21)$ [1/日]
B_{11}	溶存有機物分解速度	$0.0032 \times \exp\{0.0693 T\} \times \frac{DO}{0.25 + DO}$ [1/日]	B_{22}	死亡速度	$1 - \exp(-0.343)$ $= 0.004$ [1/日]
B_{12}	沈降速度	有機態: 1[m/日] 無機態: 0.086 [m/日]	B_{23}	呼吸速度	$1.47 \exp\{0.0693 (T - 25)\}$ [g・O ₂ /g・P/日]
			B_{24}	漁獲速度	0.343 [1/年]
			B_{25}	底泥での DO 消費速度	$365 (T - P)^{0.299} \times e^{0.084 (T - 18)}$ [mg・O ₂ /m ² /日]
			B_{26}	リン溶出速度	
			カ キ		
			B_{27}	捕食速度	図-3 参照
			B_{28}	排糞速度	
			B_{29}	排泄速度	
			B_{30}	漁獲	
			B_{31}	呼吸速度	$14.6 \times \frac{TOD}{P} \times B_{29}$

1988) 結果のうち, DO, 動物プランクトンは 1983.4~1987.3 の 5 年, また, ベントスについては 1981~1987 の 7 年間に於いて測定されたデータを利用した。図-4~6 に見られるように, DO, 動物プランクトンについてはほぼ現況が再現されている。ベントスについては, 実測データが限定されそのバラツキも大きい, 一応の傾向は再現されていると判断できよう。なお, 上記 3 項目以外についても同様の傾向である。

(3) 底泥表層の砂層被覆による生物回復効果の予測
堆積汚泥の表面を有機物含量の少ない海砂で被覆して汚泥からの溶出, 底層水の酸素消費の抑制, DO 濃度の低下の防止, 底質の改善などを図れば, 底生生物や底魚にとって有利な条件とすることができる。

底生生物の死亡速度 B_{18} は, 底層水の DO 濃度およ

び底質の中央粒径の関数として次式のように表す。

$$B_{18} = \max\{f_1(DO), f_2(M)\} \cdots \cdots (2)$$

ここに, $f_1(DO)$: 底層水の DO 濃度に係わる死亡速度
 $f_2(M)$: 底泥の中央粒径に係わる死亡速度
 である。底生生物(ここでは多毛類ヨツバネスピオ)の死亡速度と DO の関係については室内試験(細川ら, 1989)により次の関係式が求められている。

$$f_1(DO) = 0.0038 \quad (DO > 2.46)$$

$$= -0.405 \cdot DO + 1.000 \quad (0 \leq DO \leq 2.46)$$

$$\cdots \cdots (3)$$

一方, 吳湾現地試験における底生生物の現存量 (BG) と底泥の中央粒径 M との間には

$$BG = 1.468 \cdot M^{0.697} \quad (\text{mg} \cdot \text{P}/\text{m}^2) \cdots \cdots (4)$$

M : 底泥の中央粒径(mm)

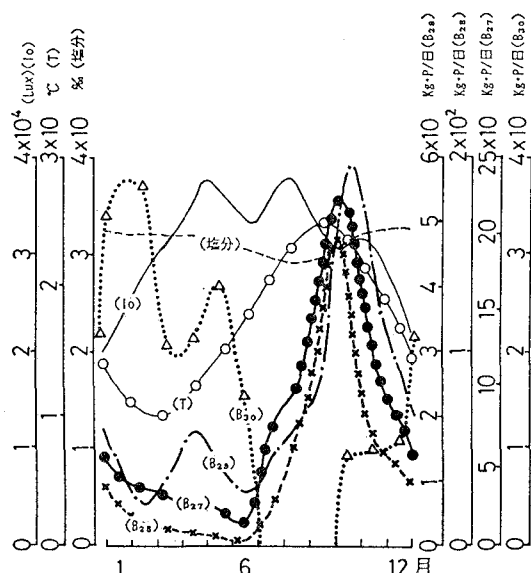


図-3 季節変化を伴う主なパラメータの入力値

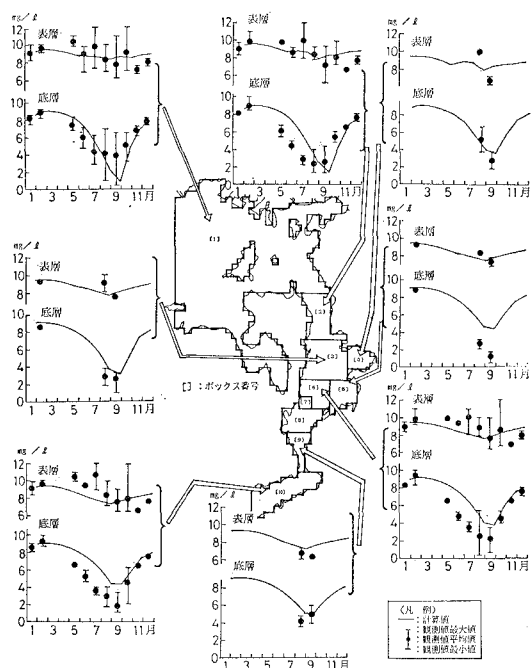


図-4 溶存酸素の現況再現結果

の関係が得られている。さらに、底泥の中央粒径と底泥の T-P 含有量との間についても、

$$T-P = -0.310 \log_{10} M + 0.222 (\text{mg} \cdot \text{P/g} \cdot \text{dry}) \quad (5)$$

の関係が得られている。式 (4) より、被覆時において $M=1.7 \text{ mm}$ とすると、 BG_0 は $2.215 \text{ mg} \cdot \text{P/m}^2$ となる。また、現況の T-P 含有量 $0.7 \text{ mg} \cdot \text{P/g} \cdot \text{dry}$ より

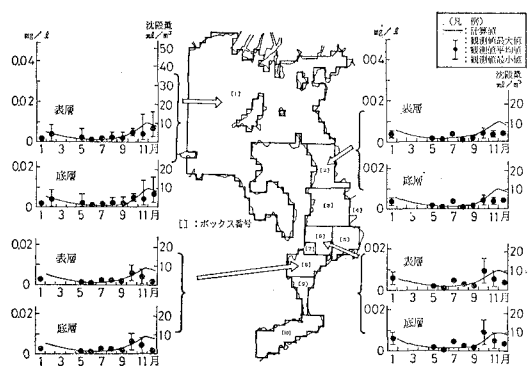


図-5 動物プランクトンの現況再現結果

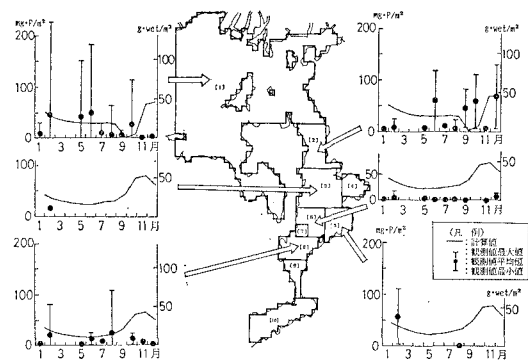


図-6 底生生物の現況再現結果

式 (4), (5) を用いると現況の底生生物現存量は $BG_1 = 0.124 \text{ mg} \cdot \text{P/m}^2$ となる。いま、被覆時の底泥が現況の底泥に変化したことにより、3 か月を経て底生生物の現存量が BG_0 から BG_1 に変化しと仮定すると、底生生物の死亡速度 D_e (1/日) は次式で与えられる。

$$2.215 \times (1 - D_e)^{91 \cdot 25} = 0.124 \quad (6)$$

すなわち、 $D_e = 0.03116$ (1/日) が求められる。したがって、 $f_2(M)$ は、 $M=1.7 \text{ mm}$ (被覆砂) のとき自然死亡速度、 $M=0.0287 \text{ mm}$ (現況 T-P 含有量に相当する中央粒径) の時に 0.03116 (1/日) となるとすると、

$$f_2(M) = -0.01610 \cdot M + 0.03116 (1/\text{日}) \quad (7)$$

となる。

底魚については、上述の砂層被覆による底生生物増加が底魚の捕食速度を高め、現存量を増大させることから砂層の被覆効果を検討する。

上述の中央粒径 $M=1.7 \text{ mm}$ の海砂を図-2 に示すボックス7全域の底泥上に 30 cm 厚さで被覆した場合を想定し、式 (1) によるシミュレーションを行った。初期条件として、前述の現況再現計算最終時点 (5 か年) の値を用い、時間ステップ1時間にて35年間相当分の積分を行った。このようにして得られた結果から、砂層被覆

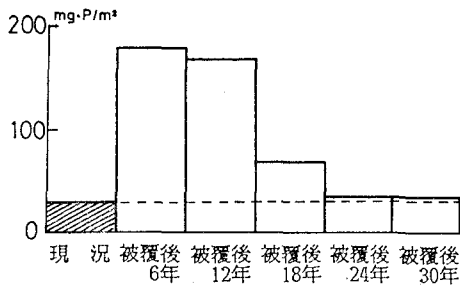


図-7 底生生物の回復効果

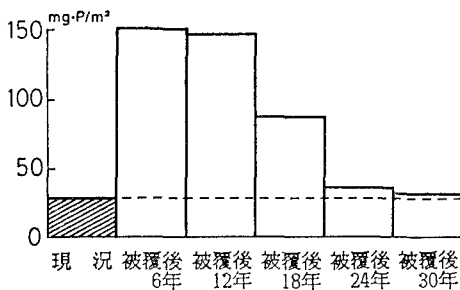


図-8 底魚の回復効果

を行ったボックスにおける底生生物と底魚の年平均の現存量を被覆後 6, 12, 18, 24, および30年について現況値とともに示したものが図-7, 8である。底生生物、底魚とも、被覆直後それらの数倍以上の現存量となる。以後、底泥の T-P の増加とともに底泥の中央粒径が減少して、式 (7), (2) により底生生物の死亡率が増大しその現存量が減少する。底魚についても底生生物と全く同様の傾向を示し、砂層被覆の効果は20~30年とみなすことができる。なお、水質項目については、ボックス7を含め顕著な効果はみとめられない。

4. ま と め

以上、内湾における物質循環に対して、動物プランクトン、底生生物、底魚などの海洋生物をとりいれた多ボックス多層モデルを開発し、呉湾に適用してその再現性を確認するとともに、底泥被覆効果の予測を行った。これらの結果を要約するとつぎのとおりである。

- 1) 海域における物理過程、生物化学過程をとりいれた物質循環モデルにより、溶存酸素、溶存態リン濃度、植物プランクトン、動物プランクトン、底生生物の面的、層的、時間的な分布を妥当な精度で再現することができる。
- 2) 本モデルを用いたボックス7での海砂による底泥被覆効果によると、被覆砂周辺の水質はほとんど変化しないけれども、底生生物、底魚の現存量は現況条件に比べ5~6倍となり、この効果は約20~25年間持続することが予測される。

最後に、本研究は、運輸省港湾局、同港湾建設局による底質浄化調査の一環として実施したものである。モデルの開発およびシミュレーションにおいては、沿岸生態調査委員会委員長塚原博九州大学名誉教授以下各委員より懇切な指導と助言を頂いた。また、図面の整理には当研究室三好英一研究官の協力を得た。ここに、これらの皆様に対して厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- たとえば、運輸省第三港湾建設局 (1988): 広島湾広域汚染実態調査
 細川恭史ら (1989): ヨネバネスピオの貧酸素耐性と内湾海底における夏期無生物域の発生条件, 港湾技研資料 No. 643, 39 p.
 堀江 毅 (1988): 堆積汚泥の処理による水質底質と生物相の回復効果の予測手法, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 817~821.