

海藻の窒素吸収作用に着目した東京湾内の物質循環計算

細川 恭史*・古川 恵太**・岸 道 郎***

1. はじめに

浅瀬や干潟での物質収支の従来の研究成果によれば、底層付近で窒素/リン比が大きいこと、浅場では、大型生物への窒素の固定量が大きいことなどが示されている(例えば佐々木, 1989)。そして、沿岸域に位置する浅瀬や干潟における環境改善効果は、沿岸域の水質の保全に留まらず、湾内環境の改善にも影響を与えていることが推測される。このような浅瀬・干潟の湾内環境への影響を評価する手法を提案することができれば、持続可能な開発を現実化するための手がかりとなる。

浅瀬・干潟の環境改善効果のうち、海藻の窒素吸収効果に着目し、物質循環計算を行うことによって、沿岸部での水質改善が湾域全体でみたときの水質改善にどの様に影響を与えるかを検討する事が本論文の目的である。以後、浅瀬・干潟を総称して浅場と呼ぶことにする。

湾域全体での水質改善効果を検討するための手段として、①1ボックスモデルによる定常解の解析、②メッシュモデルによる定常解の解析、③メッシュモデルによる非定常解の解析を行った。

2. 物質循環モデルの概要

今回採用した物質循環モデルは、主に窒素の循環を再現できることを目指して、図-1に示すような、循環モデルを用いた。考慮したコンパートメントは、植物プランクトン (PHY)、動物プランクトン (ZOO)、懸濁態有機物 (POC)、溶存態有機物 (DOC)、リン酸塩 (DIP)、全無機態窒素 (DIN)、溶存酸素 (DO)、化学的酸素要求量 (COD)の8個である。流入負荷は、懸濁態有機物、溶存態有機物、全無機態窒素、リン酸塩として沿岸部より与え、植物プランクトンと動物プランクトンを媒介として循環

表-1 物質循環計算の反応項のパラメータ

パラメータ単位	設定値	
PHY に関して		
最大可能成長速度	1/day	$0.85\exp(0.063T)$
呼吸速度	1/day	$0.03\exp(0.052T)$
DIP 摂取の半飽和値	$\mu\text{g-at/l}$	0.15
DIN 摂取の半飽和値	$\mu\text{g-at/l}$	1.5
沈降速度	m/day	0.173
枯死速度	1/day	$0.0001\exp(0.069T)$
光速度の最適光強度	$\text{cal/cm}^2/\text{day}$	200
ZOO に関して		
最大摂取速度	1/day	$0.18\exp(0.069T)$
自然死亡速度	1/day	$0.0005\exp(0.069T)$
同化効率	%	70
総成長効率	%	50
POC に関して		
無機化速度	1/day	$0.1\exp(0.069T)$
DO の半飽和値	mg/l	1.0
分解余剰生成速度	1/day	$0.025\exp(0.069T)$
沈降速度	m/day	0.432
DOC に関して		
無機化速度	1/day	$0.02\exp(0.069T)$
DO の半飽和値	mg/l	1.0
DIN に関して		
海底への吸収(0-10m)	mg-at/day/m^2	$0.063(DIN/2)1.13$
海底への吸収(10m-)	mg-at/day/m^2	$0.021(DIN/2)1.13$
アマモへの吸収(0-5m)	mg-at/day/m^2	17.9
アラメへの吸収(5-10m)	mg-at/day/m^2	29.2
DO に関して		
海底での消費	$\mu\text{g/day/m}^2$	1.5
再ばつき係数	1/day	0.15
飽和濃度	mg/l	$9.3/(1+T/273)$

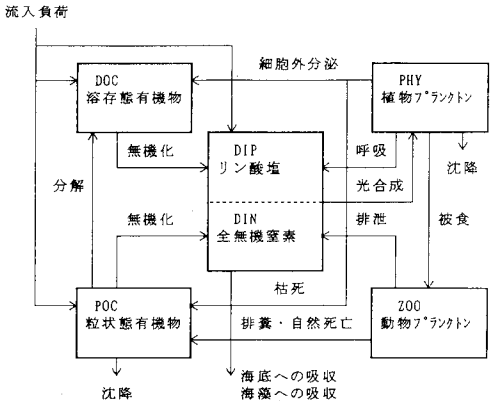


図-1 物質循環モデルの概要

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部海水浄化研究室長
** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部海水浄化研究室
*** 農博 東京大学助手海洋研究所資源環境部門

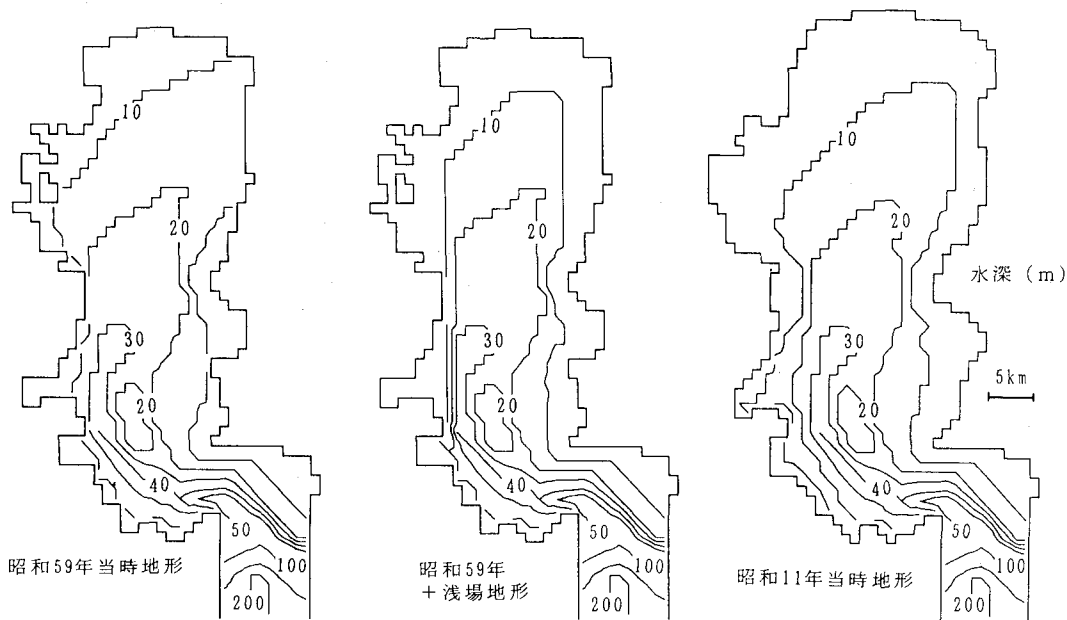


図-2 計算に用いた地形条件

が行われるものとした。ここに示したモデルは、いわゆる反応項と呼ばれる部分を示しており、実際には、移流・拡散の項が存在し、計算においては考慮されている。

また、各反応項は、表-1 に示すように、代表的と思われるパラメータを用いて計算した (例えば中田, 1993)。本計算は、同一のモデルによる比較計算であるので、各パラメータの詳細なチューニングは行っていない。しかし、後で記述するように1ボックスモデルにより、おおよその妥当性の検討は行っている。

海底境界での DIN のやりとりは、①海底への窒素の吸収、②海藻への窒素の吸収のみを考慮し、再溶出や巻き上がりは考慮していない。

3. 計算条件

計算に用いた地形は、東京湾を対象とした。浅場の大きさの変化による水質改善効果を比較するために、①昭和59年当時地形、②昭和59年当時の地形に浅場を増やした地形、③昭和11年当時の地形の3通りについて計算を行った。図-2 は、それぞれの地形を1km メッシュで再現し、等深線を記入したものである。河川水量、負荷量は、昭和62年夏期のデータを各ケース共通で用いた。ただし、負荷量は、COD・T-P・T-N のデータで与えられていたので、換算係数を用いて、DOC・POC・DIN・DIP の負荷量に変換した。海藻の繁茂する領域は、水深のみから決定し、①海藻が繁茂しない場合、②水深が0-10m の範囲の1/2 に繁茂する場合、③水深が0-10m の範囲

表-2 計算ケース一覧

ケース#	吸収 ¹⁾	吸収 ²⁾	内湾の 水体積 (km ³)	領域 ³⁾ (km ²)	備 考
1	な し	な し	13.6	0	昭和58年当時の地形
2				91	
3				181	
4	あ り	あ り	12.1	181	浅場を増やした地形
5				341	
6				447	
			14.6	447	昭和11年当時の地形

注：1) 海底への窒素吸収
2) 海藻への窒素吸収
3) 海藻の繁茂する領域の広さ

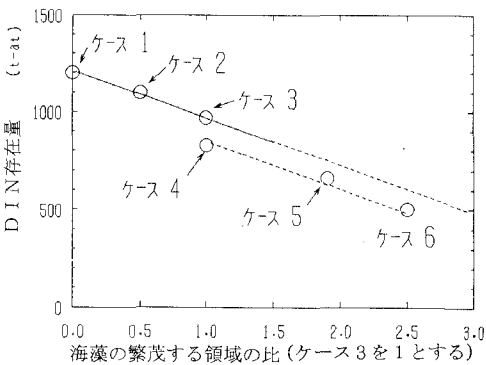


図-3 内湾域の DIN 存在量 (1ボックスモデル)

に繁茂する場合の3通りを仮定した。

計算条件は、地形条件・海藻の繁茂する領域の仮定により、表-2に示すように6ケースを設定した。ここに内湾域とは、観音崎から富津を結んだ線より内側と定義した。

4. 解析結果

(1) 1ボックスモデルによる定常解析

東京湾を1つの水塊とし、2.で示した物質循環計算を行った。この計算の目的は、メッシュモデルによる物質循環計算の予備計算として反応項のパラメータを確認する事と、海藻の繁茂する領域の大きさが内湾域全体のDINの存在量に与える影響の感度解析をする事にある。

計算では、負荷を連続的に投入し、反応項により水塊全体の反応をシミュレートし、仮定された海水交換率により順次外海水と交換していくものとした。

計算結果を図-3に示す。縦軸は、内湾域のDIN存在量であり、横軸は、各ケース毎に与えられている海藻の繁茂する領域の広さを、ケース3を用いて無次元化した値を取っている。ケース1, 2, 3は、海底への窒素吸収を考慮せず、海藻への窒素吸収の効果のみを考慮したケースである。海藻の繁茂する領域の広さに比例して、窒素吸収の効果が現れていることが判る。ケース3と4では、海底への窒素吸収の効果による存在量の変化が現れている。ケース3, 4, 5を比較すると、内湾水量の違いによりばらついているが、ほぼ、ケース1, 2, 3により得られた傾きと同じ傾きで変化していることが判る。

なお、計算で得られた存在量を与えた負荷量で割ると、見かけの滞留時間が判る。ケース4の場合、約58日となり、柳ら(1988)の2.5ヶ月という値と良く対応している。

(2) メッシュモデルによる定常解析

1ボックスモデルでは海藻の繁茂領域の広さとDIN存在量の、線形的な関係が示されたが、実際には空間的な分布を持つため、その関係は非線形であることが予想される。空間的な分布を考慮するために、メッシュモデルによる物質循環計算を実施した。

メッシュモデルは、鉛直方向に3層(0~5 m, 5~10 m, 10 m以深)、水平方向に1 km×1 kmの正方メッシュとし、あらかじめ潮流計算により、定常な1潮汐間の流速分布を求めた。そのデータを用いて、各メッシュ毎に移流・拡散・反応項の計算を行い、各コンパートメントの存在量の変化を追跡し、定常値に漸近した時点での値を計算結果として出力した。

潮流計算では、図-2に示した開口部で、片振幅36 cmの潮汐を外力条件として与えた。潮流計算は、密度勾配とコリオリ力を考慮したレベルモデルで、村上(1990)

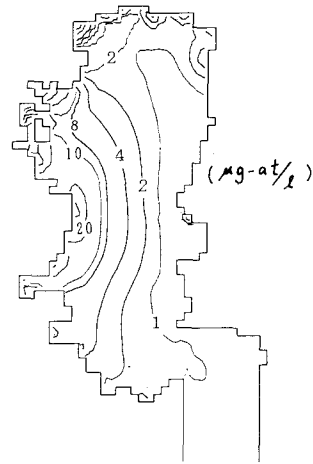


図-4 DINの空間分布(ケース4:第1層)

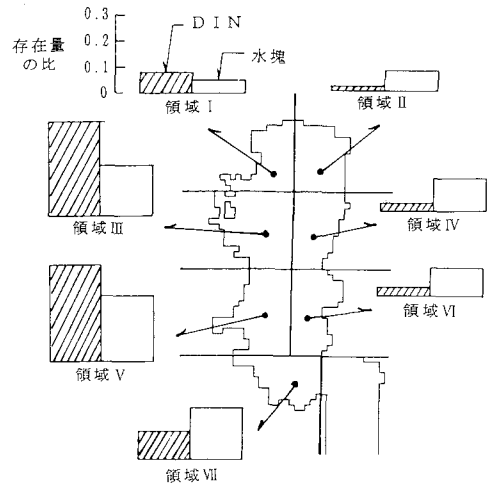


図-5 DINの空間分布(ケース4:領域積分値)

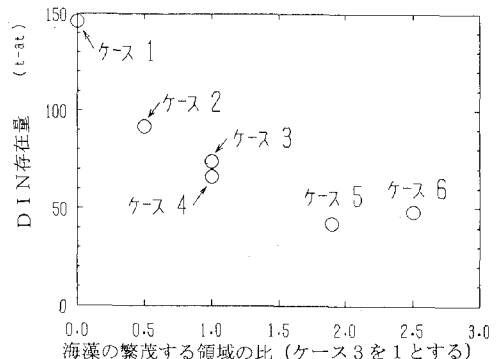


図-6 内湾域のDIN存在量(メッシュモデル)

を参考に3層に拡張されたモデルを用いている。

計算結果の一例として、ケース4の第1層(表層)におけるDINの空間分布を図-4に示す。

また、図-4より、内湾を7つの領域に分割し、各領域内でDINを積分し、領域毎の内湾全域に対する相対的な水体積とDIN存在量に直したものを図-5に示す。領域番号は、湾奥部よりI~VIIとする。領域I・IIIには、河川流入が多く、領域II・Vには、工場排水が集中している。

図-4, 5から、負荷量の多い領域III・Vで、高濃度の領域が存在することの他、河川からの流入負荷が多い領域I・II等で、高い負荷があるにも関わらず相対的な存在量が少ないことなどが判る。

各ケース毎にこのような分布を求めた後、内湾域での存在量を積分した結果を、各ケース毎に示すと図-6の様になる。

図-3と比較すると、DINの存在量そのものが極端に少ないことが判る。これは、図-4でも示されたように、沿岸からの負荷が沿岸近傍に存在する海藻の影響で急速に減少するため、見かけ上、負荷量が減少しているためであると考えられる。以下の議論は、相対的な存在量によって比較することにする。

ここで示された窒素の存在量の逆数が、内湾域での窒素の容量を表すと仮定すると、以下のことが言える。①ケース3と4の比較により、海藻の窒素吸収の効果による窒素容量の増加は、海底への窒素吸収の効果による窒素容量の増加により卓越することが判る。②ケース1~3を比較すると海藻の窒素吸収効果により、湾域全体での窒素の容量が増加することが判る。③海藻の繁茂する領域が広い程、窒素の容量は大きい、その応答は非線形である。④ケース6は、ケース5より海藻の繁茂する領域が広いにもかかわらず、同程度の窒素容量を持ち、その値はケース4の約1.3倍程度である。

(3) メッシュモデルによる非定常解析

定常解析により、存在量の比較が行われ、海藻の繁茂する領域と窒素容量との非線形関係が得られたが、この非線形関係は、存在量の空間的な分布のみならず、存在時間の分布による効果も含まれていると考えられる。そこで、残余関数を求める非定常解析により、存在時間の分布を求める試みをした。

残余関数とは、ある領域にある物質を瞬間投与して、その物質の存在量の時間変化をしめす関数であり、これを $r(t)$ で表すと、その物質の平均滞留時間 τ_r は、

$$\tau_r = \int_0^{\infty} r(t) dt \quad (1)$$

の様に分得られる(武岡, 1984)。

例として、ケース4の水塊とDINの残余関数を求めた

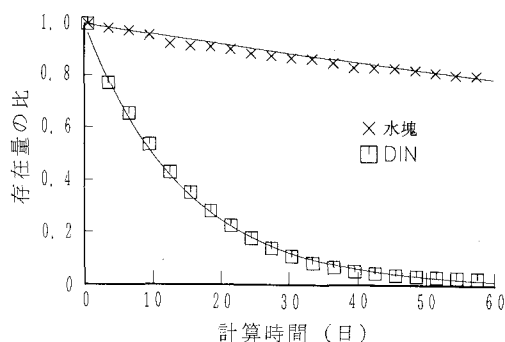


図-7 水塊とDINの残余関数(ケース4)

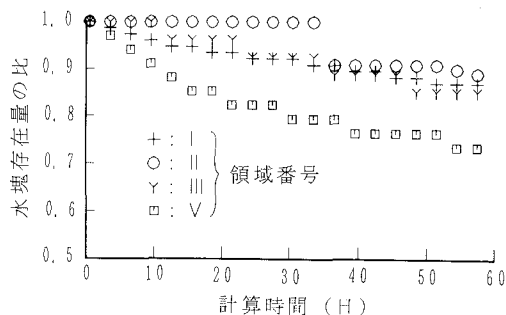


図-8 水塊の残余関数の空間分布(ケース4)

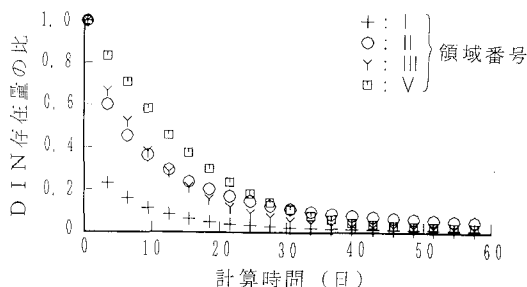


図-9 DINの残余関数の空間分布(ケース4)

結果を図-7に示す。水塊の減少が緩やかなのに比べて、DINは、速やかに減少している。これは、反応項による効果と見ることができる。

図中縦軸は、初期存在量 $\sum C_0$ で無次元化した相対存在量であり、横軸には、瞬間投入してから経過時間を表している。プロットは計算結果を示し、曲線は、残余関数を1次反応式の解で近似した

$$\sum C(t) = \sum C_0 \cdot \exp(-at) \quad (2)$$

の関数を示している。式(2)の関数は、式(1)によって積分すると、係数 a が、平均滞留時間の逆数となることが判る。図-7における平均滞留時間は、DINと水塊について、14日と250日である。

さらに、残余関数の空間的な分布を確認するため、領域Ⅰ・Ⅱ・Ⅲ・Ⅴの存在量の変化を水塊とDINに分けて図-8, 9に示す。

水塊の滞留時間は領域Ⅰ・Ⅱ・Ⅲで長く、領域Ⅴで短くなっている。一方、DINの滞留時間は、領域Ⅴでいちばん長く、Ⅱ・Ⅲがそれに続き、領域Ⅰで短くなっている。領域ⅠとⅡを比較すると、水塊の滞留時間がほぼ同じであるので、領域ⅠでDINが速やかに減少しているのは、負荷量そのものが多く元々多くのDINが存在することや、海藻の繁茂する領域が多いことが原因であることが、推測される。また、領域Ⅴでは、海藻の繁茂する領域と、水塊の滞留時間が共に少ないことが他に比べてDINの減少が緩やかに起こっている原因と考えられる。

ケース4, 5についても同様の解析をした結果、同じ傾向が見られ、海藻の繁茂する領域の大きさと滞留時間の分布によって、DINの減少の割合が説明できることが判った。つまり、ケース5の方が、海藻の繁茂する領域が広いにも関わらず、ケース4と同様の窒素容量を示したのは、水塊の滞留時間がケース4に比べて短かったためであると言える。

従って、効果的に浅場の効果を引き出すためには、①その物質が多く存在し、かつ②水塊の滞留時間の長い領域に浅場を作ることが有利であることが推定される。しかし、これまでの議論は、ある特定の条件についてのみの比較であるので、より一般的な傾向を確認するためには、さらなる検討が必要である。

5. おわりに

本論文で得られた主な結論を列挙する。

1) 本論文で提示した、物質循環モデルは、定性的に東京湾の物質循環を再現し、比較計算を行うことができ

た。

2) メッシュモデルによると、海藻の窒素吸収効果は、海底での窒素吸着の効果より卓越する。

3) 窒素の存在量で比較すると、浅場が増えた場合には、湾域全体におよぶ水質改善の効果が現れる。

4) 浅場の多い過去の地形において、東京湾の有する窒素の容量は、現在より1.3倍程度大きかったことが推測された。

5) 浅場を増やした将来地形の条件では、過去の地形の有する窒素の容量と同等の容量があることが示された。

6) 窒素の存在量の変化を説明するために、存在量の分布や滞留時間の分布を検討することは有効な手段となる。

なお、本論文で用いた昭和11年当時の地形条件は、海上保安庁水路部より提供された旧版海図を利用したことを付記すると共に、感謝いたします。また、堀江毅博士(港研海洋水理部長)、杉本隆成博士(東大海洋研教授)らには、計算を進めるにあたって有益な指導を受けたことを記して感謝いたします。

参考文献

- 佐々木克之(1989): 干潟の物質循環, 沿岸海洋研究ノート, 26巻, 2号, pp. 172-190.
- 武岡英隆(1984): 沿岸海域の海水交換, 沿岸海洋研究ノート, 20巻, 2号, pp. 169-182.
- 中田喜三郎(1993): 物理過程の変動と沿岸と外洋の物質フラックスの推定, 沿岸海洋研究ノート, 30巻, 2号, pp. 139-152.
- 村上和男(1990): 海水密度の分布を考慮した流れの数値計算法, 港湾技研資料, 665号, pp. 1-33.
- 柳哲雄・高橋暁(1988): 大阪湾の淡水応答特性, 海と空, 64巻, pp. 63-70.