

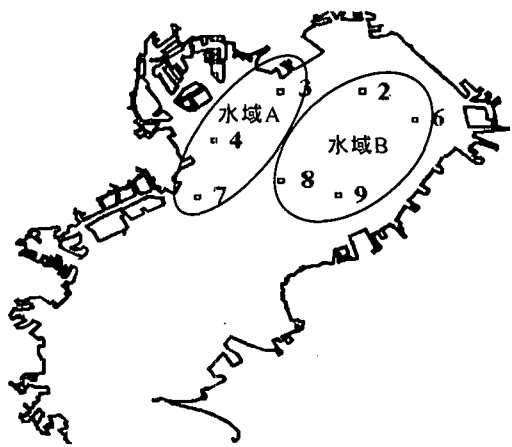
夏期の東京湾湾奥における表層の植物プランクトンに対する 底層栄養塩の影響

岡田 知也*・中山 恵介**・野村 宗弘***・古川 恵太****

1. はじめに

東京湾をはじめとする多くの内湾域は、光・水温等の環境条件が整えば赤潮が発生し得る程栄養塩が過剰に供給されている水域である。それぞれの湾によって寄与の大小の違いはあるものの、栄養塩の供給は、湾全域を考慮すると河川水・下水処理水等の淡水からの供給に加えて、底泥から溶出した栄養塩の寄与（内部負荷）も大きいことが既往の研究によって言われている。例えば、堀江（1987）は我が国の代表的な外部負荷と内部負荷を算定し、東京湾・大阪湾では底泥からの栄養塩の溶出量の大きさは周辺からの外部負荷の 30%~40%程度に相当するとしている。しかしながら、この値は湾を一つのボックスとして評価したものであり、表層の植物プランクトンに対する寄与としては示していない。特に夏期は成層が発達しているため、底層の貧酸素化により底泥からリンが多量に溶出しても底層中のリンが高濃度になるだけであって表層に対する寄与率は比較的小さいことが考えられる。上層に対する底層リンの評価として、湯浅ら（1993）は大阪湾湾奥において観測データに基づいたリンの収支計算を行い、大阪湾東部上層水への $PO_4\text{-P}$ の供給は、河川から 4.9 t/day と下層水から 10.8 t/day の計 15.7 t/day としている。

このように、赤潮等を引き起こす表層の植物プランクトンに対して淡水・底層からの栄養塩の供給バランスを把握すること、また、それを数値計算を用いて空間的に再現することは、水域の環境評価・保全を実施する上で非常に重要である。しかしながら、それらを観測結果から明確に示した観測事例や数値計算によって空間分布まで表現できているものは少ない。計算事例としては、例えば、佐々木ら（1996, 1998）、渡辺ら（1998）が青潮現象の再現という観点から東京湾湾奥における突発的な底



図一 東京湾の形状と観測地点。水域 A と水域 B は東京湾湾奥の領域分けを示す。

表一 1999 年東京湾観測日程

1 回目	7 月 6 日
2 回目	7 月 14 日
3 回目	7 月 22 日
4 回目	7 月 27 日
5 回目	8 月 4 日
6 回目	8 月 18 日
7 回目	8 月 27 日
8 回目	9 月 3 日
9 回目	9 月 8 日
10 回目	9 月 21 日

層水の湧昇現象を準 3 次元モデルを用いて再現している。

そこで本研究では、まず、観測結果を用いて夏期における表層のリン、窒素の値にはどのような特徴があるのかについて示す。次に、流れ場の計算モデルに非静水圧モデルを用いて湧昇を適切に表現し、東京湾湾奥として一つに括られている水域に対して、密度成層が強い夏期において、表層の植物プランクトンに淡水および底層栄養塩の影響は水平空間的にどの様に及んでいるのかについて検討する。

* 正会員 博(工) 国土交通省国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部 海洋環境研究室
** 正会員 博(工) 国土交通省国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部 海洋環境研究室 主任研究官
*** 正会員 博(工) (独)港湾空港研究所 海洋・水工部沿岸生態研究室
**** 正会員 工 修 国土交通省国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部 海洋環境研究室 室長

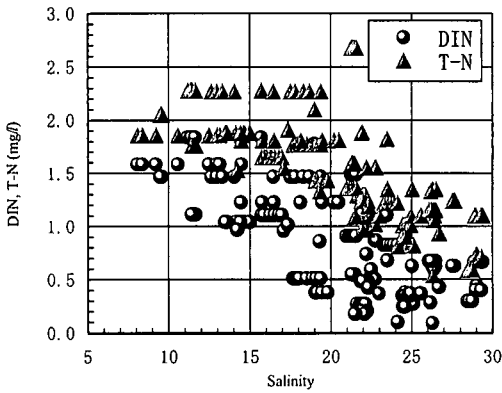
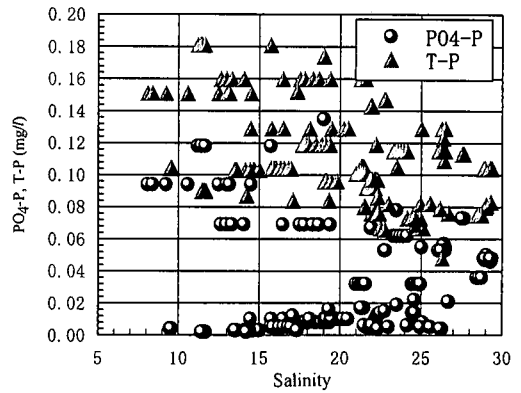


図-2 表層における DIN および T-N と塩分の関係

図-3 表層における PO₄-P および T-P と塩分の関係

2. 東京湾観測

2.1 観測地点および観測方法

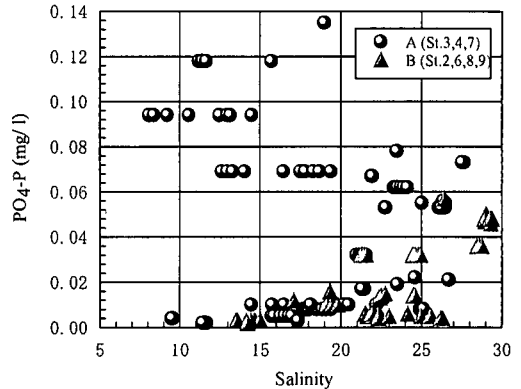
観測は1999年7月から1999年9月までの期間中におおむね週に一度の頻度で図-1中に示す地点(st. 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9)において行われた。表-1に観測日程を示す。観測船から多項目水質計(アレック電子, ACL1183-PDK)を用いた測定および採水が毎回実施された。多項目水質計によって鉛直方向の水温、塩分、クロロフィルa (Chl-a)、濁度、溶存酸素濃度および水中上向き光量子の分布が測定されている。採水は表層、中層および底層に対して行われた。ここで、表層は水深1m地点、底層は底泥直上1m地点、中層は水深の2分の1の水深地点とした。採水された試料から溶存態窒素(NH₄-N+NO₂-N+NO₃-N; DIN)、全窒素(T-N)、リン酸態リン(PO₄-P)および全リン(T-P)が分析されている。

2.2 観測結果

図-2に表層におけるDINおよびT-Nと塩分の関係を示す。図中のプロットは全地点、全期間のデータのうち表層データをまとめて示したものである(以下、図-3, 4同様)。DINおよびT-Nともに、塩分の増加に伴い両者同じ勾配で減少する。DINは塩分10で約1.5 mg/l、塩分30でほぼ0 mg/lである。T-Nは塩分10で約2.3 mg/l、塩分30で約0.8 mg/lである。

図-3はPO₄-PおよびT-Pと塩分の関係を示したものである。T-Pは塩分の増加に伴い減少する傾向を示している。それに対して、PO₄-Pは塩分の増加に対して減少傾向を示す群と増加傾向を示す群が現われている。

DINは塩分増加に対して減少傾向のみであるのに対して、PO₄-Pは減少・増加2通りの傾向を示すのは、東京湾がリン制限であること(例えば、佐々木(1991))および底層が還元状態となった際には底泥からリンが溶出し易いことが原因と考えられる。すなわち、PO₄-PはとDIN比較して、植物プランクトンによる取り込みや底層

図-4 表層における PO₄-P と塩分の関係

水の湧昇に影響を受けやすいことが原因と考えられる。

図-4は全観測地点の表層におけるPO₄-Pと塩分の関係を、図-1に示す水域A(st. 3, 4, 7)と水域B(st. 2, 6, 8, 9)に分けて示したものである。水域Aでは塩分の増加に伴いPO₄-Pは減少および増加の両方を示すのに対して、水域Bでは、塩分の増加に伴いPO₄-Pは増加する傾向を示す。

観測結果のみから推測すると2つのことが考えられる。①水域Bでは、塩分の増加に伴いPO₄-Pは増加することから、PO₄-Pは主に底泥から溶出した栄養塩を含んだ底層水の湧昇による。一方、水域Aでは、塩分の増加に伴いPO₄-Pは減少および増加の両方を示すことから、PO₄-Pは淡水および底層水の湧昇による供給である。②領域Aの表層部は栄養塩を豊富に含んだ荒川・江戸川の淡水流入量によって水域Aにおける滞留時間は左右される。淡水流入量が少ない場合には滞留時間は長く、植物プランクトンによってPO₄-Pは取り込まれ低塩分・低PO₄-P濃度を示し、淡水流入量が大きき場合には滞留時間は短く低塩分、高リン濃度を示す。一方、領域Bには大川が無いいため表層部の滞留時間が常に比較的長く、

表-2 計算ケース

	底泥からの栄養塩の溶出	
	ある場合	ない場合
非静水圧モデル	case A	case B
静水圧モデル	case C	

位を与えた。河川からの流入量に関しては、東京湾の主要河川である江戸川、荒川、多摩川、鶴見川の流量（各河川工事事務所より）の時間平均値を線形補間した値を各計算ステップ毎に与えた。

b) 生態系モデル

本計算の目的は、東京湾湾奥における表層の植物プランクトンに対して、淡水および底層からの栄養塩の供給が空間的にどのようなになっているかについて検討することである。そのため、生態系モデルの構造はそのことを明確にできるように努め、コンパートメント間の過程は主要過程のみをモデル化するに留めた。したがって、植物プランクトンに対する栄養塩の寄与として、水中における有機物分解の寄与も当然あると思われるが、ここでは栄養塩の主要な供給源は淡水および底泥からの溶出のみと仮定した。モデル概念図を図-5に示す。また図-6にモデル式とモデルパラメータを示す。

なお、成層化した夏期において、植物プランクトンの栄養塩取り込み形態として、渦鞭毛層の日周運動による取り込みがある（Amano *et al.*, 1998）。しかしながら、ほぼ周年特に春季から初夏5-7月に赤潮を形成する頻度が高い植物プランクトン種は *S. costatum* であること（野村, 1998）、また、栄養塩を含んだ底層水の湧昇の影響を明確にするため日周運動は取り入れていない。

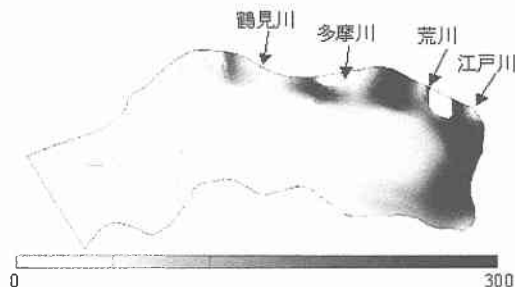
淡水からの栄養塩の供給は、本来、下水処理場からの流入および河川水の流入を考慮すべきである。しかしながら、本計算では、出水時（降雨時）における下水処理場からの栄養塩濃度が把握できなかったこと、および、村松（2000）によると、1997年、1998年の2年間のデータを用いて東京湾における淡水負荷の割合を28河川、23下水処理場、工場等を考慮したところ、窒素およびリンの河川からの寄与は平均で淡水負荷の60%であったことから、河川からの流入のみを考慮した。

c) 計算ケース

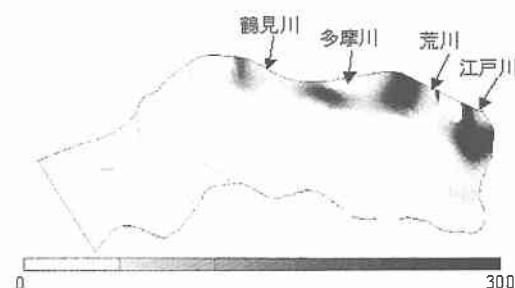
計算ケースは、非静水圧モデルを用いた底泥からの栄養塩がある場合（case A）とない場合（case B）の2ケース、および栄養塩の溶出はあるが静水圧モデルを用いるケース（case C）の組み合わせで合計3ケースを実施した（表-2参照）。計算は1999年7月26日0時から8月6日0時までの11日間を対象とした。

3.2 計算結果

図-7(a), (b)および図-8に、非静水圧モデルに対し



(a) 底泥からの溶出がある場合 (case A)



(b) 底泥からの溶出がない場合 (case B)

図-7 表層植物プランクトン量の非静水圧モデルの計算結果（単位：mgC/m³）（8月5日22:00）

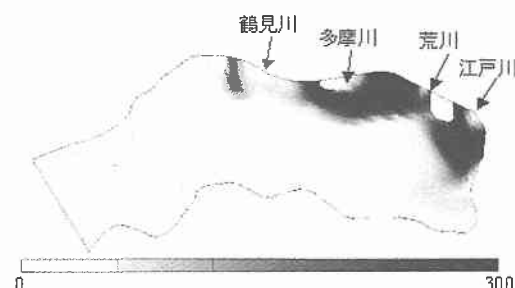


図-8 表層植物プランクトン量の静水圧モデルの計算結果（単位：mgC/m³）（8月5日22:00）。底泥からの栄養塩の溶出はある。（case C）

て底泥からの溶出がある場合、無い場合および静水圧モデルに対して底泥から栄養塩の溶出がある場合の8月5日22時に相当する表層植物プランクトン量の計算結果を示す。

非静水圧モデルに対して底泥からの溶出が無い場合は、千葉側に高植物プランクトン量領域は現われないが、底泥からの栄養塩の溶出がある場合には高植物プランクトン量の領域が現われている。また、荒川河口前面付近においては、底泥からの栄養塩の溶出がある場合の方が大きな値を示している。

これらのことは、①東京・横浜側の水域の植物プランクトンは淡水からの栄養塩の供給によって主に増殖するが、千葉側の植物プランクトンは底泥からの溶出した栄

養塩の湧昇によって主に増殖していること、②東京・横浜側の水域の植物プランクトンは淡水だけでなく底泥からの溶出した栄養塩によっても増殖していることを示していると考えられる。

一方、静水圧モデルを用いたケースでは千葉側の湧昇を的確に表現しておらず、底泥からの栄養塩溶出があるにもかかわらず、千葉側には高植物プランクトン量の領域は現われなかった。

本計算で用いた静水圧モデルにおいて千葉側の湧昇が生じなかった原因として、本計算で用いた静水圧モデルでは成層が形成されると鉛直混合が過小評価される傾向があること、および鉛直流速が約半分程度に過小評価される傾向があることが考えられる。そのため、本計算に用いた非静水圧モデルと静水圧モデルにおいて鉛直拡散係数に関して一般に流れ場を解く際に用いられる同じモデル常数を用いた場合には、静水圧モデルの方が鉛直流速が小さい上に鉛直混合が小さく見積もられ、静水圧モデルを用いた場合には底層水が表層に及ばなかったものと考えられる。

4. ま と め

東京湾湾奥表層の $\text{PO}_4\text{-P}$ を塩分に対して整理することによって、東京湾湾奥として一つに括られている水域に対して、東京・横浜側の栄養塩は淡水および底層水から供給されており、千葉側の栄養塩は底層水から主に供給されていることが示された。また、非静水圧モデルを用いた数値実験によってもこのことは支持され、底層栄

養塩が湧昇によって表層の植物プランクトンの増殖に影響を及ぼす水平的空間分布が示された。

参 考 文 献

- 岡田知也・中山恵介・日比野忠志・細川恭史 (2000): 大船渡湾における湾外水の密度変動が湾内水環境に及ぼす影響, 港湾技術研究所報告, 第39巻, 第2号, pp. 73-98.
- 佐々木克之 (1991): プランクトン生態系と窒素・リン循環, 沿岸研究ノート, 第28巻, 第2号, pp. 129-139.
- 佐々木 淳・磯部雅彦・渡辺 晃・五明英智男 (1996): 東京湾における湾潮の発生規模に関する考察, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 113-117.
- 佐々木 淳・石川雅樹・磯部雅彦 (1998): 内湾における高解像流動モデルの開発と東京湾における長期再現計算, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 406-410.
- 中山恵介 (2000): 成層場における固液混相流 LES モデルの開発, 水工学論文集, 第44巻, pp. 879-884.
- 堀江 毅 (1987): 海域の物質循環過程のモデル化と浄化対策効果の予測手法について, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第4号, pp. 57-123.
- 村松 剛 (2000): 東京湾における栄養塩の収支に関する研究, 東京水産大学学位論文.
- 野村英明 (1998): 1900年代における東京湾の赤潮と植物プランクトン群集の変遷, 海の研究, Vol. 7, No. 3, pp. 159-178.
- 湯浅一郎・上島英機・橋本英資・山崎宗弘 (1993): 大阪湾奥部の循環流とリンの循環, 沿岸海洋研究ノート, 第31巻, 第1号, pp. 93-107.
- 渡辺正孝・天野邦彦・石川裕二・木幡邦男 (1998): 秋期の東京湾奥部における風による成層破壊と底層の無酸素水塊の湧昇過程, 土木学会論文集, No. 608/VII-9, pp. 13-29.
- Amano, K., Watanabe, M., Kohata, K. and Harada, S. (1998): Condition necessary for *Chattonella antiqua* red tide outbreaks, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 43 (1), pp. 117-128.