

東京湾における窒素・リンに着目した物質循環機構

鯉 渕 幸 生*・佐々木 淳**・磯 部 雅 彦***

1. はじめに

東京湾をはじめとする内湾では長年にわたる富栄養化問題が深刻である。さらに環境影響評価法では開発行為の影響を事前に予測・評価することが法制度化され、栄養塩濃度を含む水質の予測・評価が強く求められている。従来より東京湾では、様々な現地観測が実施され膨大な調査結果が蓄積されつつあるが、調査頻度が月に1度程度であったり、調査項目・測点数が不十分なものが多く、さらに生物項目や物質フラックスについては測定困難なものも多いために、様々な要因が複雑に関与しつつ短い時間スケールで変動する現地の水質変動メカニズムを十分に捉えることは難しい。一方、内湾の水質予測や対策を講じるにあたっては、生態系モデルが有効であり、各所で様々な水質予測モデルが提案されてきているものの、現地データの不足は水質予測モデルの検証や信頼性向上の障壁にもなっている。

そこで本研究では、東京湾における窒素及びリンの物質循環を明らかにする目的で1999年から著者らが実施した東京湾内における長期連続観測結果(鯉渕ら, 2000a; 2000b)や公共機関による水質調査結果を分析し、モデルの備えるべき要件を提示する。次に3次元生態系モデルにより現地の水質変動現象を栄養塩も含め再現することを試みる。従来では植物プランクトンや栄養塩に関する生態系モデルの検証は皆無であるか、多くても月1回の観測結果との比較にとどまっていたが、上記の詳細な現地観測結果から詳細な再現性の検討を行った。さらに現地観測では不可能な栄養塩の物質収支をモデルを用いて定量化することで、窒素とリンに着目した物質循環について考察した。

2. 数値モデルの概要

水質モデルは、3次元流動モデルと窒素・リンを考慮

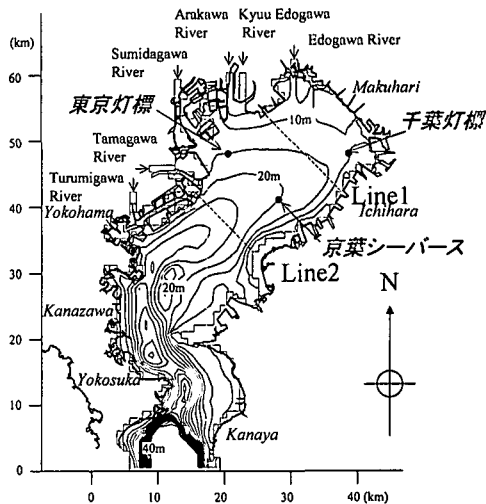


図-1 現地観測地点および計算領域

した生態系水質モデルより構成されている。

2.1 3次元流動モデル

流動・密度場の計算アルゴリズムは佐々木ら(1996)を参考に σ 座標による3次元のモデルを開発した。基礎式は静水圧近似とブシネス近似を仮定したNavier-Stokesの式、連続式、水温・塩分の拡散方程式および密度の状態方程式で構成される。

2.2 3次元生態系モデル

生態系モデルは、浮遊生態系モデルと底泥系モデルで構成され、窒素、リン、炭素、溶存酸素の生物・化学的な変化過程をモデル化し、これを3次元流動モデルと結合することで、水質のナウキャストシミュレーションを行った。その際、推定パラメーターを少なくすること、実現象をできる限り忠実にモデル化することを基本方針とした。以下にその特徴を示す。

a) 植物プランクトンのモデル化

東京湾においては従来より「公共用水域水質測定結果」が公表され、東京都や千葉県により、赤潮の発生期間や、種の同定調査が周年にわたり実施されている。1992年から2000年までの過去9年間の植物プランクトン細胞数の測定結果を収集参照した結果、*Skeletonema costatum*が最も多く出現し、特に春及び秋を中心に出現すること、

* 正 会 員 博(工) 東京大学大学院客員共同研究員 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

** 正 会 員 博(工) 東京大学助教授 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

*** フェロー 工 博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

初夏にはラフィド藻類の *Heterosigma akashiwo* が、盛夏には *Thalassiosira* sp.が、冬季には夏季に比べ少数ながら多種の珪藻類が出現し、*Eucampia* sp.の出現頻度が比較的高いことなどが明らかになった。また植物プランクトン量と水温や塩分など水質項目との相関は見られず、それぞれの環境に適応した植物プランクトンが、頻繁に種遷移を起こしながら増減を繰り返していることが分かった。そこで植物プランクトンについては、5つの群集をモデル化することとした。この際、珪藻類については、主に *Skeletonema costatum* を念頭にモデル化した植物プランクトン群 (di_1)、比較的低温を好む珪藻類 (di_2)、比較的高温を好む群集 (di_3) の3つの群集をモデル化した。またラフィド藻類 (r) については *Heterosigma akashiwo* を主対象とし、渦鞭毛藻類 (f) についてもモデル化を行った。これら5つの植物プランクトン群は、最適光合成光量、最大増殖速度、好適水温、栄養塩吸収の半飽和定数などが異なる。また珪藻類は増殖に珪素を利用するため、珪素制限下では増殖が阻害される。植物プランクトンの時間変化は式 (1) のように定式化した。

$$\frac{dC_{phyx}}{dt} = P_x - G_x - BM_x \dots\dots\dots (1)$$

ここで C_{phyx} は植物プランクトン濃度、添字 $x = di_1, di_2, di_3, r, f$ を意味する。 P_x は光合成による増殖、 G_x は動物プランクトンによる捕食、 BM_x は基礎代謝で枯死を含む。光合成における栄養塩の制限については、Michaelis-Menten 型の式を、窒素に関してはアンモニウムの選択吸収性を考慮するため、Wroblewski (1977) による方法を用いた。

b) 水中光量のモデル化

東京湾は富栄養化が著しく、栄養塩の枯渇はほとんど見られないことや、湾内流動や日射量の変動がその増減に支配的であることがこれまでの観測から示されており(鯉渕ら, 2000b)、水中光量の再現性向上のために光消散係数と水質の関係について、1999年から2000年において実施した現地観測結果を再整理した。

光消散係数 k は一般には植物プランクトン濃度の関数として、Riley (1956) の関係を用いて与えられる場合が多いが、全ての水質項目との相関を見たところ、Chlorophyll- a との相関 ($r=0.4$) は塩分 ($r=0.5$) と同程度であった(図-2)。この低塩分時の光消散係数の増加は、河川起源の濁水の影響が強いことを現していると考え、光の消散係数を表層における Chlorophyll- a と塩分の重回帰式で、式 (2) のように与えた。

$$k = 0.25 - 0.02 \times \min(\text{Salinity}_{(psu)} - 25.0, 0.0) + 0.008 \times \text{Chlorophyll-}a(\mu\text{g/l}) \dots\dots\dots (2)$$

c) 栄養塩のモデル化

栄養塩ごとの循環経路を検討する上では、存在形態の

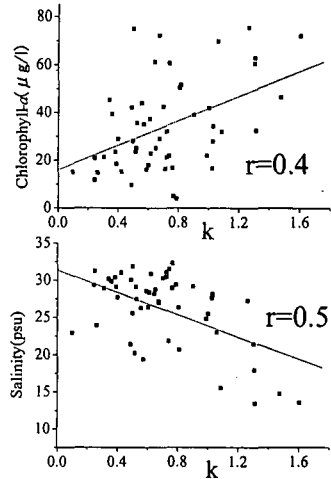


図-2 光消散係数 (k) と Chlorophyll- a ・塩分の関係

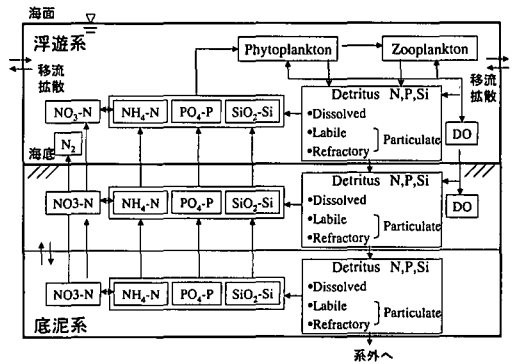


図-3 生態系モデル概念図

差異を考慮することが重要である。これらは、生物による取り込みや分解、沈降や拡散等に大きな影響を及ぼすと考えられるため、非生物体の懸濁態有機物について、分解速度の違いから易分解性 (Labile) と難分解性 (Refractory) の2つに分類し、これらの分解により溶存態栄養塩が生成されるものとした。植物プランクトンの基礎代謝、捕食、動物プランクトンの死亡に伴う各態への物質の配分率は Pett (1989) を参考に、表-1 のように与えた。

表-1 デトリタスへの配分率

分類	コンパートメント	基礎代謝	捕食	動物プランクトンの死亡
炭素	DOC: 溶存態有機炭素	1	0.1	0.1
	LPOC: 易分解性懸濁態有機炭素	0		0.45
	RPOC: 難分解性懸濁態有機炭素	0		0.35
窒素	DON: 溶存態有機窒素	1	0.1	0.1
	LPON: 易分解性懸濁態有機窒素	0		0.45
	RPON: 難分解性懸濁態有機窒素	0		0.35
リン	DOP: 溶存態有機リン	1	0.3	0.2
	LPOP: 易分解性懸濁態有機リン	0		0.35
	RPOP: 難分解性懸濁態有機リン	0		0.15

無機態窒素については、硝酸態とアンモニア態のみを考慮した。アンモニアは好気的環境においては硝化により硝酸態へと変化し、硝酸は嫌気条件において脱窒されるか異化的に還元される。

東京湾における無機態リン濃度は、植物プランクトンの急激な増減と比較すると安定しているが、一般に多くの珪藻類は、リン欠乏時にアルカリホスファターゼ活性が増大し、有機リン酸エステルを利用できる (Fitzgerald・Nelson, 1966)。そこでリン枯渇時には、珪藻類の濃度に比例して溶存態リンの分解速度が増加するものとして式 (3) の様に定式化した。

$$k_{DOP} = k_{DOP\min} + \frac{K_{pO_4}}{K_{pO_4} + C_{pO_4}} k_{DOPdi} \sum_{x=di_1, di_2, di_3} C_{phyx} \quad (3)$$

ここで、 k_{DOP} は DOP 分解速度、 $k_{DOP\min}$ は DOP の最小分解速度 (day^{-1})、 K_{pO_4} はリン吸収の半飽和定数、 C_{pO_4} は海水中のリン濃度、 k_{DOPdi} は珪藻濃度に対する分解速度の増加率 ($\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$) である。

d) 底泥モデル

底泥内における有機物は浮遊生態系モデルからの堆積速度、分解速度及び下層への堆積速度のバランスで変動し、生じた無機物については直上水への拡散過程をモデル化した。底泥内はさらに酸化層と還元層とに分割され、底泥内における酸素消費により酸化層厚が変化する。

2.3 計算条件

計算領域を図-1 に示す。水平方向は 1 km、鉛直方向は 20 層とし、1 時間おきの気象及び開境界潮位データを与えることで、現地観測と同様の 1999 年 4 月 1 日から 2000 年 3 月 31 日までの 1 年間にわたる流動・水質の再現を試みた。流量時系列データのある主要な河川 (荒川、江戸川、多摩川、鶴見川) については、河口に最も近い測点における流量を、それ以外の河川については主要な河川との流量の比から流量を推定して与えた。また開境界および河川水中の栄養塩濃度は、東京都および千葉県の公用水域水質測定結果から 1999 年度の年平均値を

与えた。この際、DON および DOP については、TN、TP の 3 割として与えた。

3. 数値モデルの検証

図-4 は 1999 年 4 月から 11 月の千葉灯標における σ_t の観測値と計算値の比較である。この図から σ_t が 4 月中旬から 7 月にかけて、河川流量と日射の増加による成層化と、強風の連吹に対応した一様化を繰り返しつつ減少し、上層では 8 月中旬に最低値を記録しており、10 月上旬以降再び混合し上下一様化していることが分かる。計算値は成層形成および崩壊のタイミング、強風の連水に伴う沿岸湧昇及び沈降など現地の変動傾向や値を概ね再現している。

千葉灯標における水面下 2 m での Chlorophyll-*a* の観測値と計算値の比較を図-5 に示す。計算値は全ての植物プランクトンの総和である。図中矢印の時期は、 $50 \mu\text{g}/\text{l}$ を越えるような赤潮状態を示しており、5 月の中旬に最も高濃度となっている。同様の傾向は計算においても再現され、5 月や 7 月のピークが概ね再現されていることが分かる。なお、単一の植物プランクトンのみでの計算を行ったところ、本モデルよりも 5 割ほど高い植物プランクトン量が計算され、栄養塩は実測より大幅に低くなった。この原因は理想化された植物プランクトンが過度に万能であるために、現実には種の選移が起きるような海象の急変時にも減少しないためである。一方、光減衰係数を Riley の式で計算したところ、河川水の通過する湾西部上層付近の Chlorophyll-*a* 濃度が著しく高く計算されるために、植物プランクトン量の積分量が大幅に大きく見積もられ、貧酸素水塊が湾中央の広い海域に長期間形成され、溶出量が増加するなど現実とは乖離した結果となった。

同様に千葉灯標における溶存酸素 (DO) の時系列を図-6 に示す。上層においては植物プランクトンの活発な光合成を反映して過飽和となる。下層においては、5 月中旬、6 月中旬、さらに 8 月から 9 月において観測さ

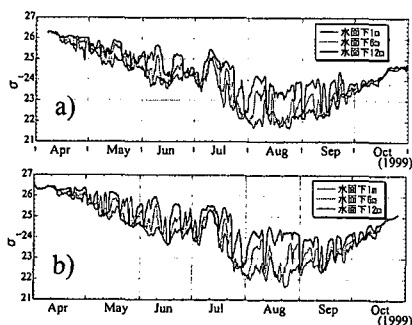


図-4 σ_t a) 観測値, b) 計算値

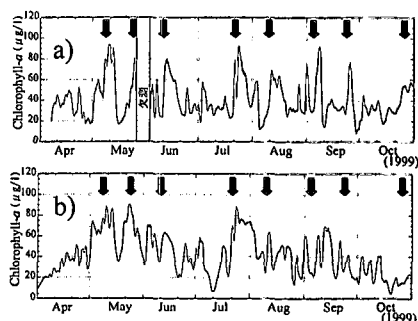


図-5 Chlorophyll-*a* a) 観測値, b) 計算値

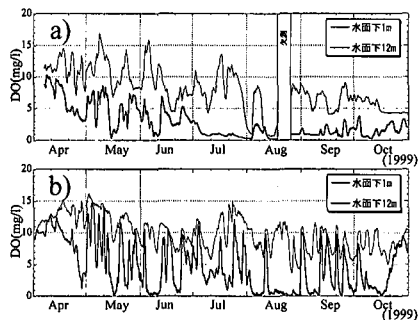
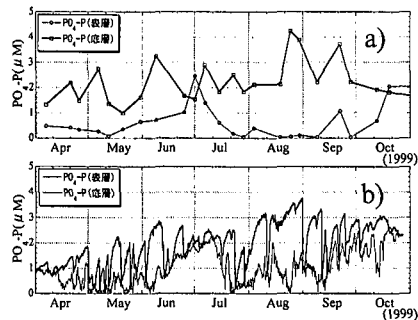
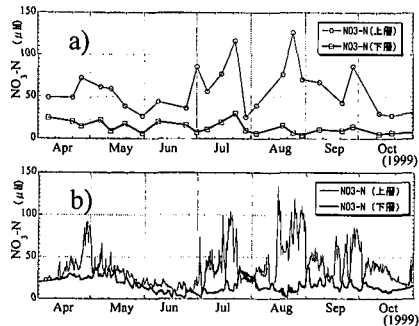


図-6 溶存酸素 (DO) a) 観測値, b) 計算値

図-7 $\text{PO}_4\text{-P}$ a) 観測値, b) 計算値図-8 $\text{NO}_3\text{-N}$ a) 観測値, b) 計算値

れた貧酸素化の傾向は再現されているものの、計算値の方が若干鉛直混合が大きく、特に9月において急激な溶存酸素の増加が見られる。

次に $\text{PO}_4\text{-P}$ 観測値と計算値の比較を図-7に示す。 $\text{PO}_4\text{-P}$ は上層では植物プランクトンの増殖に対応して減少し、5月中旬と8月に減少する。下層においては主に6月と9月の貧酸素時に高濃度化し、溶出の影響と考えられた。これら上下層における $\text{PO}_4\text{-P}$ の変動傾向についても概ね再現されていることが分かる。 $\text{PO}_4\text{-P}$ については大規模な赤潮時に枯渇する場合があったが、アルカリフォスファターゼ活性をモデル化しないで計算を実施した場合、頻繁に枯渇し、 $\text{PO}_4\text{-P}$ だけでなく植物プランクトンの再現性も著しく低下した。

$\text{NO}_3\text{-N}$ は総じて上層で高く、特に河口部において出水

に起因した高濃度化が見られた。図-8は東京灯標における $\text{NO}_3\text{-N}$ の観測値および計算値である。この図から、出水に起因した上層における高濃度化や、下層における貧酸素化と対応した濃度低下が再現されていることが分かる。この下層における濃度低下は脱窒に起因していることが計算から確かめられた。

以上のように本研究で開発したモデルにより、窒素やリンなどの栄養塩の変動過程を概ね再現することが可能となった。その際、植物プランクトンの再現性は、溶存酸素、栄養塩など多くの物質に影響を及ぼすため、生態系モデルの再現性を確保する上で重要であることが再確認された。

4. 窒素およびリン収支

近年の観測機器の進歩により様々な項目が比較的容易に連続測定できるようになって来てはいるものの、ストックに対してフローを測定することは非常に難しく、わずかに佐々木 (1991) が年数回の限られた情報から湾内の栄養塩収支を算出しているにすぎない。そこでこれまでに構築したモデルを用いて、窒素とリンの動態を追跡することで、観測では難しい東京湾内における窒素・リンの収支について検討を行う。物質収支は3次元で計算した物質量に対し図-1に示すLine1とLine2の2つの断面において、海面から深度10 mまでを上層、それ以下から海底までを下層とし、1999年4月から2000年3月までの年間の窒素・リン収支を算出した。

図-9に窒素およびリンの収支を示す。窒素(上段)では、河川から表層に供給される無機態の総量が著しく多く、特にLine1と2で囲まれる海域では、著しく多い。下層においては河川流入負荷の約4割が沈降しているが、約2割が脱窒により系外に移出し、アンモニア態によって溶出する分も2割あるので、湾外への流出は流入負荷のおよそ6割である。このように窒素は著しく余っており、そのほとんどが無機態のまま湾外に移出している。

一方、リン(下段)では下層から上層に移流・拡散で供給される負荷量が窒素と比べて大きく、河川流入負荷と同程度となった。これらのリンは下層からの溶出が起源と考えられ、それらが上層における光合成で、懸濁態へと変換され再び下層へと沈降供給されるなど、半閉鎖的な循環が見られる。またリンでは非生物態のフラックスが占める割合が窒素よりも高いが、これら非生物体のリンは特に下層においてDOPの比率が大きく、さらに湾奥から湾口に向けて割合が増加する傾向が見られた。このようなDOPは下層からの流入で湾奥に運ばれ、物質循環に回帰するリンの割合を増加させている。なお松梨 (1996) はセジメントトラップや溶出実験により、東京港付近における窒素溶出量が、沈降量の30~40%、リ

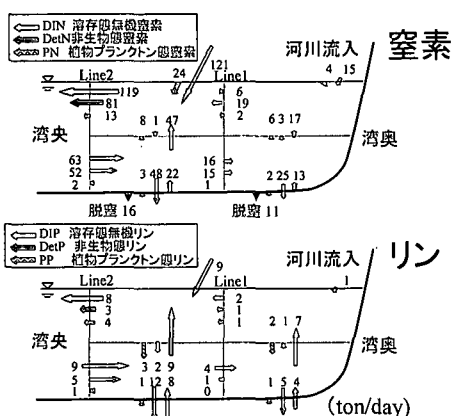


図-9 東京湾における形態別窒素・リン収支

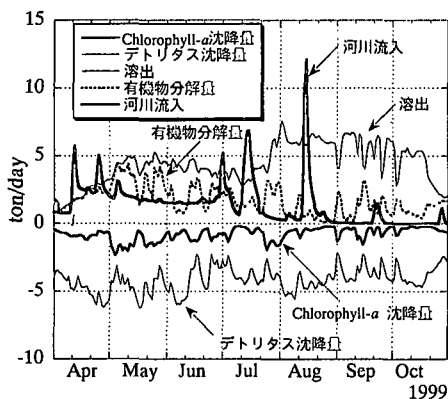


図-10 リンフラックス時系列

ンは65~70%としており本計算結果と概ね一致している。

次にリン収支の時間変化について検討するため、主に海底境界におけるリンフラックスの時系列を図-10に示す。Line 1で囲まれる湾最奥部の海域に流入するリンを正、流出するリンを負として算出した。沈降フラックスは、4月上旬、5月中旬、6月上旬、8月上旬に多く、これに対応する時期に植物プランクトン濃度(図-5)が低いことから、植物プランクトン濃度の変動に対し沈降量が大きく影響していることが分かる。また下層からの溶出は5月中旬に一旦増加し、その後8月上旬から10月中旬の夏季に大きいことが分かる。図中の有機物分解量は、底泥表層における溶存酸素の減少と溶出量の一次回帰式から算出したもので、海底表層において、比較的短期間に分解される有機物を起源とする溶出量である。有機物分解量は5月中旬に最も多く沈降量の増加に対応している。一方夏季に見られる溶出は、溶存酸素減少時に著しく高く、リンの脱着に対応したものと考えられ、春季と夏季のピークでは溶出量の増加要因が異なることが

分かる。このように、植物プランクトンやデトリタスの沈降により底泥に供給されたリンは、下層における溶存酸素の豊富な春季には主に有機物分解で、夏季には溶出で循環に回帰された後、再び植物プランクトンに利用され、それらがさらに沈降するかまたは溶存態有機リンとなることで湾内に保持されているものと考えられた。

5. まとめ

実現象を忠実にモデル化した3次元生態系モデルを開発し、これを用いて東京湾における窒素・リンの収支を算定した。その際、詳細な現地観測結果をもとにモデルに必要な要件を提示した。窒素は流入負荷が著しく大きく、その多くは利用されないまま湾外に流出している。一方リンは陸起源負荷と同量が底泥から溶出し、湾内で半閉鎖的に循環するため、ややもすれば不足しがちな分が補われている。

謝辞：本研究を進めるにあたり、千葉県シーバースには係留地点を提供いただくと同時に、通船を利用させて頂いた。また観測にあたって、千葉県調査船「きやすみ」および東亜建設工業(株)「しおつる」の乗組員の方々に大変お世話になった。建設省関東地方建設局江戸川工事事務所には河川流量データを提供して頂いた。本研究はRITE/NEDO研究費の補助を得て行われたことをここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 千葉県環境部(2000): 平成11年度公共用水域水質測定結果及び地下水の測定結果, 571 p.
- 東京都環境保全局(2000): 平成11年度公共用水域水質測定結果及び地下水の測定結果, 438 p.
- 鯉淵幸生・小倉久子・安藤晴夫・五明美智男・佐々木淳・磯部雅彦(2000a): 東京湾湾奥部における栄養塩の周年変動に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1066-1070.
- 鯉淵幸生・五明美智男・佐々木淳・磯部雅彦(2000b): 現地観測に基づく春季の東京湾における赤潮発生機構, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1071-1075.
- 佐々木克之(1991): プランクトン生態系と窒素・リン循環, 沿岸海洋研究ノート, 第28巻, 第2号, pp. 129-139.
- 佐々木淳・磯部雅彦・渡辺 晃・五明美智男(1996): 東京湾における青潮の発生規模に関する考察, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1111-1115.
- 松梨史郎(1996): 東京湾の夏季における窒素リンの水-底泥間のフラックス, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1116-1119.
- Fitzgerald, G. P. and T. C. Nelson (1966): Extractive and enzymatic analysis for limiting or surplus phosphorus in algae. J. Phycol., Vol 2, pp. 32-37.
- Pett, R. (1989): Kinetics of microbial mineralization of organic carbon from detrital *Skeletonema costatum* cells, Marine Ecology Progress Series, Vol. 52, pp. 123-128.
- Riley, G. A. (1956): Oceanography of Long Island Sound. 1952-1954. II. Physical oceanography, Bull. Bingham Oceanogr. Collection, Vol. 15, pp. 15-46.
- Wroblewski, J. S. (1977): A Model of Phytoplankton Plume formation during Oregon Upwelling. Journal of Marine Research, Vol. 35, pp. 357-394.