

石狩川から供給された粒子状無機態リンが 河口沿岸域の生物生産に果す役割

奥西 武*・木村栄里子**・山崎真一***・山下俊彦****

3次元の生態系モデルを2001年の夏季石狩湾沿岸域に適用した。このモデルを用いて、石狩川から供給された粒子状無機態リン ($P-PO_4$) が沿岸域の一次生産に果す役割について解析を行った。河川から流出した $P-PO_4$ の約5%が河口沿岸域において植物プランクトンが利用できる溶存態へと溶脱すると推定された。石狩川から供給される溶無機態リンの約45% (年平均) は $P-PO_4$ から溶脱していると考えられた。これは、石狩川から流出する $P-PO_4$ の量が沿岸域の生産量を決定する重要な要因の1つであることを示唆している。

1. はじめに

日本有数の大河川である石狩川は、日本海沿岸の石狩湾に流出している。石狩川から石狩湾に供給された栄養塩は、湾内の一次生産に大きな役割を果していると考えられる。石狩川の無機態リンは懸濁物質に吸着した粒子状として多く存在している。石狩川下流の溶存無機態リン ($D-PO_4$) の濃度は約 $0.6 \mu M-P$ (年平均) であるのに対し、粒子状無機態リンの濃度は約 $10 \mu M-P$ (年平均) と高濃度である。無機態リンは河口域において、水温、塩分、pH、酸化還元電位などの変化により、粒状物と吸着、脱着を行うことが知られている (Liss, 1976; Crosby ら, 1981; Carritt・Goodgal, 1954)。粒子状無機態リンの一部は海水との混合過程において、溶脱化して溶存無機態リンとなり、河口沿岸域の植物プランクトンの成長に利用されていることが予想される。しかしながら、河口沿岸域のリンの動態は、物理的、化学的、生物学的な過程のもとに非線形的な変化であるために、その動態を知ることを困難にしている。数値モデルの利用は、これらの複雑な過程の問題を解決に役立てることができる。河川から沿岸域への栄養塩供給によって起きる沿岸生態系への影響についての数値モデル研究はこれまでも多くある (Lenhart ら, 1997; Dippner, 1998; Savchuk・Wulff, 1999; Lancelot ら, 2002 など)。本研究では河川から供給された粒子状無機態リン ($P-PO_4$) の河口沿岸域での一次生産への役割を生態系モデルを用いて、定量的に把握することを目的とした。

2. 生態系モデル

3次元の物理モデルに結合した生態系モデルを石狩湾に適用し、2001年8月1日～2001年9月30日間の計算

を行った。9月12日に石狩川の最大流量約 $7000 m^3/s$ となる既往3位の洪水が発生しており、その前後期間において河口沿岸域 (図-1) と石狩川下流での観測結果を用いて生態系モデルを検証した。洪水時の流量の増加に伴い石狩川の $P-PO_4$ 濃度は増加しており、大量のリンが沿岸域に流出したことが予想できる (図-2)。また、溶存無機態リン ($D-PO_4$) は低い濃度レベル ($0.3-1.7 \mu M-P$) で濃度変化が小さかった (図-2)。

(1) 物理モデル

物理モデルは Princeton Ocean Model (Blumberg・Mellor, 1987) を利用した。水平格子は緯度および経度方向ともに30秒 (x 方向で約720 m, y 方向で約1100 m) とし、鉛直方向の σ レベルを14層に分割した。水深データは海洋情報研究センター (MIRC) の緯度経度30秒のメッシュデータをスプライン関数で平滑化して使用し、モデルの最小水深は10 m, 最大水深は860 m とした。また、北方向と西方向を開放境界とし、流速および水温・塩分値に放射条件を適用した。初期値の塩分・水温は夏季石狩湾沖で観測された鉛直プロファイルを用いた。流動の外力としてメソ客観解析による6時間間隔の風速空間分布 (気象庁)、石狩川の流量を用いた。

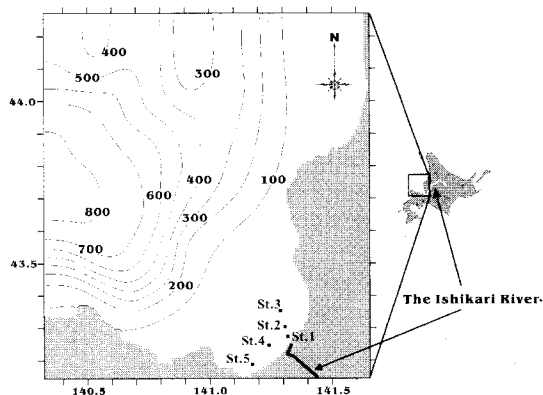


図-1 観測地点とモデル領域

* (博) 水産 北海道大学大学院工学研究科
** 大原情報簿記専門学校
*** 正会員 (独法) 北海道開発土木研究所
**** 正会員 工博 北海道大学教授大学院工学研究科

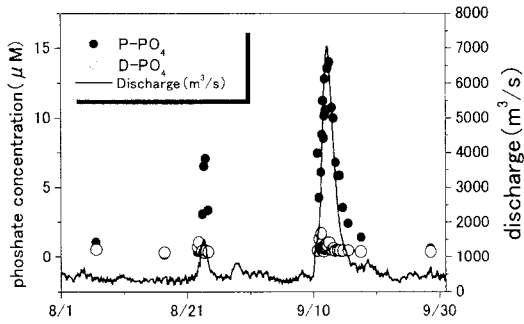


図-2 石狩川流量と石狩川の粒子状無機態リンと溶存無機態リンの濃度

(2) 生物モデル

生物モデルは Kawamiya ら (1995) のモデル (KKYS) を改良して7コンパートメントのリンおよび窒素の循環モデルを作成した。モデルの物質循環の概要を図-3に示す。各コンパートメントはのシンボルの定義は以下に示すとおりである。

Phy : 植物プランクトン

ZOO : 動物プランクトン

DIN : 溶存無機態窒素

POM : 粒状有機態物質

DOM : 溶存有機態物質

DIPr : 河川起源の溶存無機態リン

DIPo : 河川起源以外の溶存無機態リン

DIPr は河川水中の溶存無機態リン ($D-PO_4$) と $P-PO_4$ の一部が溶脱したものの合計量が海域に負荷されるとした。その溶脱率を α とすると、 $DIPr = D-PO_4 + \alpha \times P-PO_4$ と表せる。各コンパートメントの物理過程と生物過程を考慮した基礎式は式 (1) のように示される。

$$\frac{\partial CD}{\partial t} + \frac{\partial CUD}{\partial x} + \frac{\partial CVD}{\partial y} + \frac{\partial C\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right] + F_C + D \times B_C \dots (1)$$

ここで、 C は各コンパートメント濃度、 U と V はそれぞれ、 x 方向、 y 方向の水平流速成分、 $D=H+\eta$ で示され、 H は水深、 η は水位、 K_M は鉛直拡散係数、 F_C は水平拡散項を省略表記したもの、 ω は鉛直流成分である。詳しくは POM のユーザーマニュアルを参照されたい。また、 B_C は生物過程項を示し、例えば植物プランクトンであれば式 (2) のような生物過程を考慮している。

$$\begin{aligned} \frac{dPhy}{dt} = & (Photosynthesis) - (Extracellular Excretion) \\ & - (Mortality of Phytoplankton) - (Grazing) \dots (2) \end{aligned}$$

本研究のモデルと KKYS との主な相違点として、本

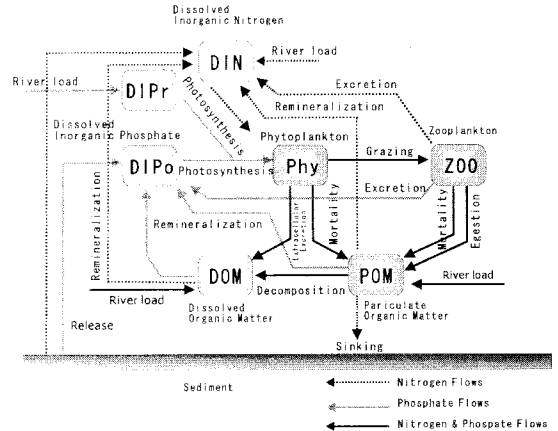


図-3 生物モデルにおける物質循環の概念

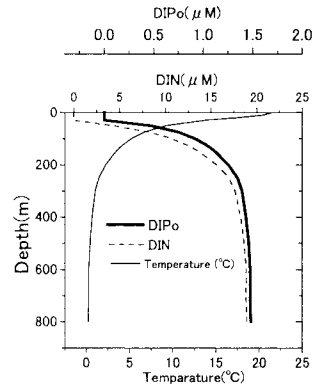


図-4 DIP_o , DIN および水温の初期値の鉛直分布

モデルは植物プランクトンの呼吸を考慮していないこと、溶存無機態窒素について硝酸とアンモニウムに分離していないこと、光合成における栄養塩制限を窒素とリンの両方を考慮していることである。各コンパートメントの初期値は、

$$Phy = 0.1 \text{ mg-Chl-a/m}^3$$

$$ZOO = 0.01 \text{ } \mu\text{M-P}$$

$$POM = DON = DIPr = 0 \text{ } \mu\text{M-P}$$

とした。また、 DIP_o と DIN は水温関数で与え、表層では枯渇状態、深度ともに高くなるように設定した (図-4)。

3. 結果および考察

(1) 河口付近の Chl-a および溶存態リンの動態

河川前面で河川水の影響を強く受けている St.2において洪水後2~3週間後に Chl-a が増加している様相が、生態系モデルで再現可能であった (図-5)。この洪水後の河口近くでの Chl-a の増加は、洪水後に供給され

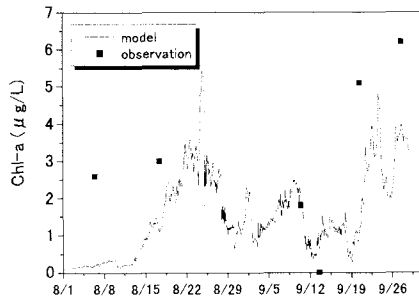


図-5 St. 2(水深1 m)における Chl-a の時系列変化

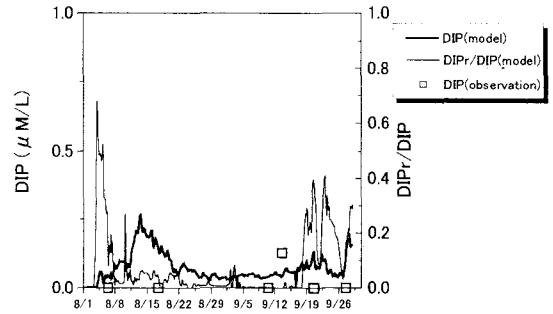


図-8 St. 4(水深5 m)における DIP の時系列変化

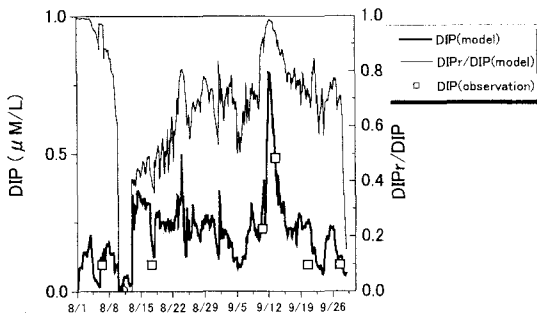


図-6 St. 2(水深1 m)における DIP の時系列変化

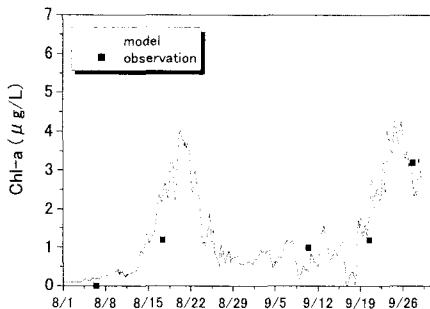


図-7 St. 4(水深5 m)における Chl-a の時系列変化

たリンを利用したものである。これは、洪水後の DIP 濃度 (= DIPr + DIPo) の減衰 (図-6) と、洪水後の DIPr 濃度の表層分布の変化 (図-9, 図-10) より理解できる。また、リンの供給源は計算期間の平均で、68%が河川起源とその寄与は大きいことが分かる (図-6)。

河口西側で河川水の影響を受けにくい、St.4においても洪水後2～3週間後に Chl-a が増加している。しかしながら、リンの供給源は計算期間の平均で、7.9%が河川起源とその影響は小さかった。また、DIPr を利用した一次生産量を見積もったところ、St.2は全体の20.2%であったに対し、St.4は全体の5.6%と河川起源のリンを利用した生産の占める割合は低かった。St.2の

リン濃度は河川起源のリンが多く寄与しているにもかかわらず、その場の生産寄与はさほど大きくはなかった。これは、河川水の負荷に伴う、植物プランクトンの希釈効果が大きいためと考えられる。

(2) 洪水後の一次生産量

洪水前後の表層の DIPr 濃度と一次生産量を見ると、洪水時に流出した DIPr は、河口より北部に広がり、河口より約70 km 離れた北部沿岸で2～3 g-C/m²/day の高い生産を引き起こしている (図-9, 図-10)。しかし、洪水時前後の表層の DIPo 濃度は DIPr 濃度より高く、石狩湾北部で海域で DIPo を利用した高い生産が見られる。洪水の前後の約3日間北東風が卓越し (図-11)、北部沿岸に沿う風応力となるため、エクマン輸送により、陸棚において湧昇流が生じ (図-12)、栄養塩が深層部から供給されることに起因している。しかしながら、このような現象が石狩湾周辺海域において、実際に起きていたかは、広域の現場観測および短期変動を捉えた衛星観測が存在しないため、現在のところ検証できていない。

(3) 粒子状溶存無機態窒素の溶脱率

P-PO₄の溶脱率 α の設定を5%, 15%, 30%として計算した時の、St.2における DIP (= DIPr + DIPo) の時系列変化を図-13に示す。溶脱率として5%を用いた時が、現場での DIP の観測値を最もよく再現しており、河川から流出した P-PO₄の約5%は河口沿岸域において植物プランクトンが利用できる溶存態へと溶脱していることが推定された。溶脱率 α を5%として石狩川から供給される栄養塩の窒素/リンのモル比の年平均を計算すると51.9となり、植物プランクトンの栄養塩取り込み比と考えているレッドフィールド比16 (Redfield ら, 1963) より高い値を示し、窒素過多の栄養塩が河口沿岸域に供給されていることが明らかになった。また、石狩川から供給される溶無機態リンの約45% (年平均) は P-PO₄から溶脱したものであり、これらのことは、石狩川から流出する P-PO₄の量が河口沿岸域の生産量を決

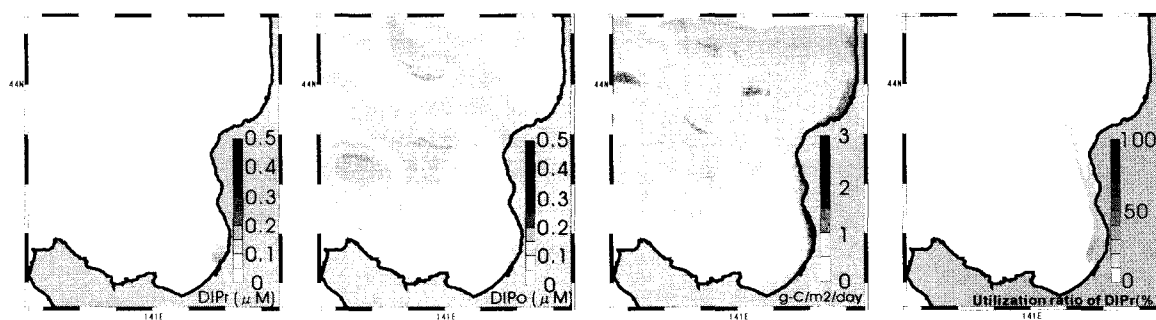


図-9 洪水前の表層 DIPr 濃度, 表層 DIPo 濃度, 一次生産量, DIPr を利用した生産量の割合 (9月10日)

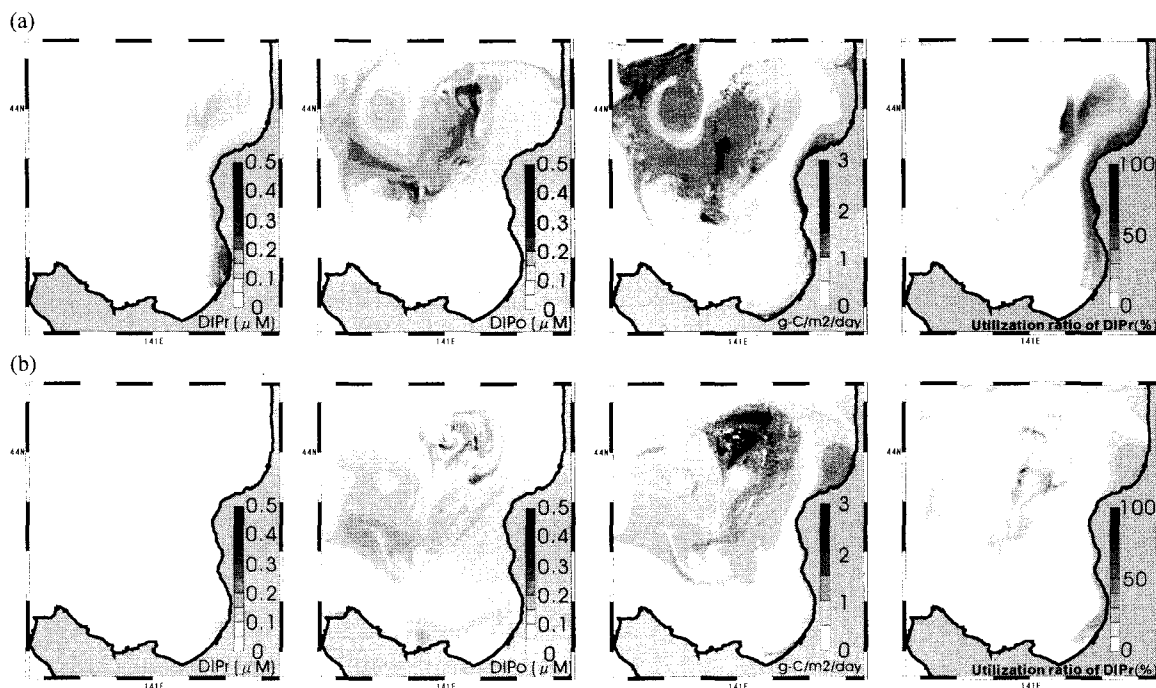


図-10 洪水後の表層 DIPr 濃度, 表層 DIPo 濃度, 一次生産量, DIPr を利用した生産量の割合, (a):9月14日 (b):9月18日

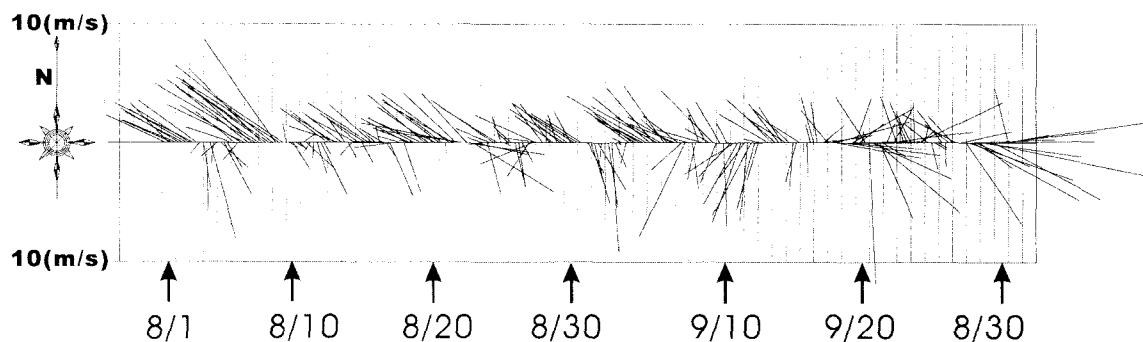


図-11 湾中央部における風向・風速ベクトル

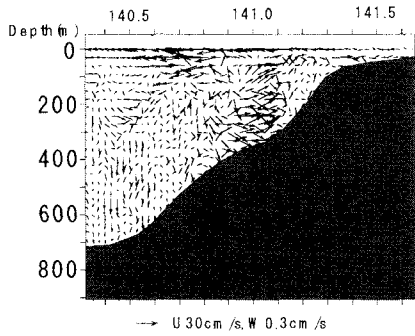


図-12 北緯44度ラインにおける日平均流 (9月12日)

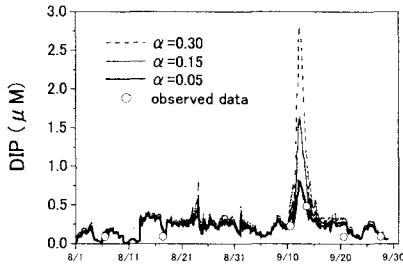


図-13 St. 2(水深1 m)における DIP 濃度の計算結果

定する重要な要因の1つであることを示唆している。

参 考 文 献

- Bijker, E. W., J. P. Th. Kalkwijk and T. Pieters (1974) : Mass transport in gravity waves on a sloping bottom. Proc. 14th ICCE, pp. 447-465.
- Blumberg, A. F. and G. L. Mellor (1987) A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: Heaps, N.S.,

- Editor, Three-dimensional Coastal Ocean Models Coastal and Estuarine Sciences vol. 4, AGU, Washington, pp. 1-16.
- Carritt, D. E. and S. Goodgal (1954) Sorption reactions and some ecological implications. Deep-Sea Res. 1, pp. 224-243.
- Crosby, S. A., E. I. Butler, D. R. Turner, M. Whitfield, D. R. Glasson and G. E. Millward (1981) Phosphate adsorption onto iron oxyhydroxides at natural concentrations. Environ. Technol. Letters, 2, pp. 371-378.
- Dippner, J.W. (1998) Competition between different groups of phytoplankton for nutrients in the southern North Sea. J. Mar. Syst. 14, pp. 181-198.
- Kawamiya M., M.J. Kishi, Y. Yamanaka and N. Sugimotohara, An ecological-physical coupled model applied to Station Papa. J. Oceanogr. 51 (1995), pp. 635-664.
- Lancelot, C., Rousseau, V., Billen, G., Van Eeckhout, D., (1997) Coastal eutrophication of the Southern Bight of the North Sea : assessment and modelling. In: Sensitivity of North Sea, Baltic Sea and Black Sea to anthropogenic and climatic changes. NATO-ASI Series, 2 : Environment, vol. 27. Springer, Berlin pp. 439-453.
- Lancelot, C., Staneva, J., Van Eeckhout, D., Beckers, J.-M., Stanev, E. (2002) Modelling the Danube-influenced northwestern continental shelf of the Black Sea. II: Ecosystem response to changes in nutrient delivery by the Danube river after its damming IN 1972. Estuar. Coast. Shelf Sci. 54, pp. 473-499.
- Liss, P. S. (1976) Conservative and non-conservative behavior of dissolved constituents during estuarine mixing. In Estuarine Chemistry ed. By Burton D. and P. S. Liss, Academic Press, London, pp. 93-130.
- Redfield, B.H. Ketchum and F.A. Richards, The influence of organisms on the composition of seawater. In: M.N. Hill, Editor, The sea, ideas and observations on progress in the study of the seas vol. 2, Interscience, New York (1963), pp. 26-77.
- Savchuk, O., Wulff, F. (1999) Modelling regional and large-scale response of Baltic Sea ecosystems to nutrient load reductions. Hydrobiologia 393, pp. 35-43.