

石狩湾沿岸域での河川水・外洋による栄養塩供給と水質変動

山下俊彦*・梅林 司**・本間志歩***・山崎真一****

石狩湾沿岸域と広域, 石狩川河川水の現地水質調査結果を基に, 石狩湾での水質変動特性の把握と, 沿岸域への河川からの栄養塩供給量, 外洋からの栄養塩供給量の推定を行った。河川からの栄養塩供給量については, 溶存態のものはほぼ積分流量に比例し, 懸濁態のものは洗い出し効果が大きく流量規模を考慮する必要がある。夏期の一回の湧昇による沿岸域への栄養塩供給量の推定値は, 同時期の河川供給量と比較して $\text{PO}_4\text{-P}$ は同程度, $\text{NO}_3\text{-N}$ は 1/10 程度である。冬期の鉛直混合による栄養塩供給量の推定値は年間の河川による栄養塩供給量とほぼ同じ程度である。

1. はじめに

流域や河川, 沿岸域の水質・生態系は, 水を媒介とした物質循環の中で, 相互に影響を及ぼしあい, 河口沿岸域は豊かな海域となっている。河口沿岸域では植物プランクトンの成長に必要な栄養塩が河川等の陸域から供給され, 外洋からも深層水の湧昇等により栄養塩が供給されている。本研究で対象とする石狩川河口沿岸域は, 開放性の強い石狩湾奥に位置する。開放性沿岸域では流動さえも不明な点が多く, 水・物質循環の実態は未解明な部分が多い。山下ら (2002) は石狩湾奥部の水質の周年変動と河川流出物質, 海域流動との関係を考察している。開放性沿岸域の水質への外洋の影響に関しては, 八木ら (2002) の黒潮流路変動に着目した鹿島灘の研究や, 山下ら (2003) の石狩湾の深層水の湧昇・鉛直混合についての研究等がある。

本研究では, 開放性の石狩湾沿岸域を対象として, 河川水だけでなく外洋の影響を把握するために長期観測を実施し, 石狩湾での水質変動特性を明らかにする。これらの結果と過去に実施された広域水質調査結果をもとに, 河川水と外洋水の沿岸域への影響を考察し, 河川水からの栄養塩の流入量と深層水の湧昇や鉛直混合による石狩湾沿岸域への栄養塩の流入量を推定することを目的とする。

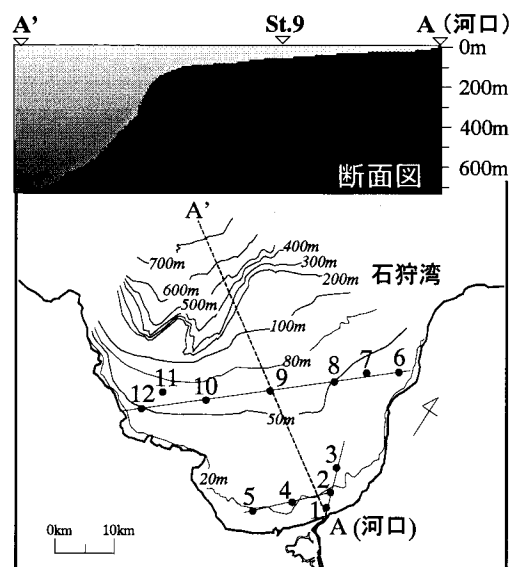
2. 調査方法

図一1 に観測地点及び石狩湾海底断面図を示す。石狩川は河道長 268 km, 流域面積 14330 km^2 の大河川で, 流域には全道人口の半分以上にあたる約 300 万人が生活する。石狩湾は水深 100 m までは海底勾配が約 1/500 で広大な砂浜域が広がり, その沖側は 1/30 程度の急勾配で水深数 100 m まで深くなっている。海域の調査地点は 12 点で, 調査期間は湾奥部の St. 1~5 は 2001 年 3 月から

2003 年 6 月まで, 湾口部の St. 6~12 では 2002 年 4 月から 2003 年 6 月まで実施した。観測項目は St. 2, 5, 7, 11 での平均月 2 回 1~5 層での採水, St. 1~12 の平均月 2 回のクロロテック計による水温, 塩分, 濁度, chl-a の鉛直分布測定, St. 2, 5, 7 での水温塩分計, クロロテック計による周年連続観測等である。また, 河口から上流 14.5 km 地点にある札幌大橋で河川表層水の採水を, 2001 年 3 月から 2003 年 6 月まで 107 回実施した。水質の分析項目は, 各態の N と P, chl-a, 水温, 塩分, SS 等である。広域の調査結果は北海道立中央水産試験場 (1976~1985) により実施されたものを用いた。

3. 河川からの栄養塩供給量

2001 年と 2002 年に実施した 107 回の表層採水の分析結果を基に, 流量と代表的な各水質成分の関係を求めると次式となる。



図一1 観測地点(下)と石狩湾海底断面図(上)

* 正 会 員 工博 北海道大学助教授 大学院工学研究科環境資源工学専攻

** 正 会 員 工修 日本建設コンサルタント

*** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科

**** 正 会 員 工修 北海道開発土木研究所

$$\left. \begin{aligned} L_{SS} &= 0.0022 * Q^{2.53} \\ L_{Si} &= 43 * Q^{0.84} \\ L_{NO_3-N} &= 0.52 * Q^{1.04} \\ L_{D-PO_4-P} &= 0.0054 * Q^{1.13} \\ L_{P-PO_4-P} &= 0.000040 * Q^{2.05} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし流量 Q (m³/s), 各水質成分輸送量 L (g/s) である。どの水質成分に対しても相関係数は 0.8 以上と高く、流量から水質成分の流出量推定が可能である。べき数をみると、粒子性成分である SS, 粒子性オルトリン酸態リン (P-PO₄-P) はそれぞれ 2.53, 2.05 となっており、流量増大時に洗い出し効果により大量に流出していることがわかる。溶解成分の中でも硝酸態窒素 (NO₃-N) と溶解性オルトリン酸態リンはべき数が各々 1.04 と 1.12 で流量の増減に関わらず周年では濃度変動が少ないことがわかる。一方シリカ (Si) は、べき数が 0.84 と 1 より小さくなっており、高流量時に希釈効果により低濃度となっていることがわかる。

式 (1) の輸送量式から推定した各水質成分の 2001 年度と 2002 年度の年間の流出量を図-2(a)~(f) に示す。(a) の流量をみると、2001 年度は 9 月に約 7000 m³/s の大洪水が発生したこともあり年間の累積流量は 170×10^6 t で、2002 年度に比べ約 30×10^6 t 多く流出していた。(b) の SS は 2001 年度の流出量が 240 万 t で 2002 年度の約 3.4 倍多くなっていた。これは式 (1) を見てもわかるように、洪水時に SS 濃度が高くなり洪水時流出が卓越しているためである。SS の 2001 年度と 2002 年度の平均濃度は 141 ppm と 50 ppm であった。(c) の溶解性シリカは 2001 年度が 26 万 t で平均濃度 15 ppm, 2002 年度が 22 万 t で 16 ppm であった。(d) の溶解性である NO₃-N

は 2002 年度が 1.2 万 t, 2001 年度が 0.9 万 t で両年度とも平均濃度は 0.7 mg/l 程度である。(e) の溶解性オルトリン酸態リン D-PO₄-P は 2002 年度が 220 t, 2001 年度が 170 t である。(f) の粒子性オルトリン酸態リン P-PO₄-P は 2001 年度が 1100 t, 2002 年度が 500 t である。

4. 湧昇による栄養塩供給量

図-3, 4 に北海道立中央水産試験場が過去に実施した石狩湾広域水質調査データから作成した水温・栄養塩濃度の相関図を示す。石狩湾で水深が 200 m 以上の地点のデータが豊富にある 6 月中旬から 6 月下旬と 8 月下旬を選んだ。6 月, 8 月ともに NO₃-N, P-PO₄-P とともに水温に対して 3 つの水深範囲毎に別の相関を持つ。水深 200 m 以下の相関式は傾きが大きく両月であり変化がない。これは水深 200 m 以下では水温・栄養塩濃度が周年を通じほぼ変化がない (山下, 2003) ためである。水深 100 m から 200 m までは月により少し変化がみられ、8 月の方が勾配が少し緩やかで高水温でも栄養塩が高くなっている。これは、水温の上昇によるものである。この水深帯にも、深い水深ほど低水温で高栄養塩な水塊が比較的安定的に存在していることがわかる。水深 100 m 以浅 (高水温域) は植物プランクトンによる栄養塩の消費の影響があり、同じ栄養塩でも水温にはかなりのばらつきがある。水深 100 m 以浅は硝酸態窒素濃度は多くが 0 mg/l に近くなっており、植物プランクトンの増殖には窒素制限となっていることがわかる。

図-5 に 2003 年 7 月 20 日~10 月 10 日の St. 7 の底層の水温, chl-a 濃度の変化を示す。7 月 31 日等水温低下時に chl-a 濃度が上昇しており、湧昇に伴う栄養塩供給により植物プランクトンが増殖している可能性があること

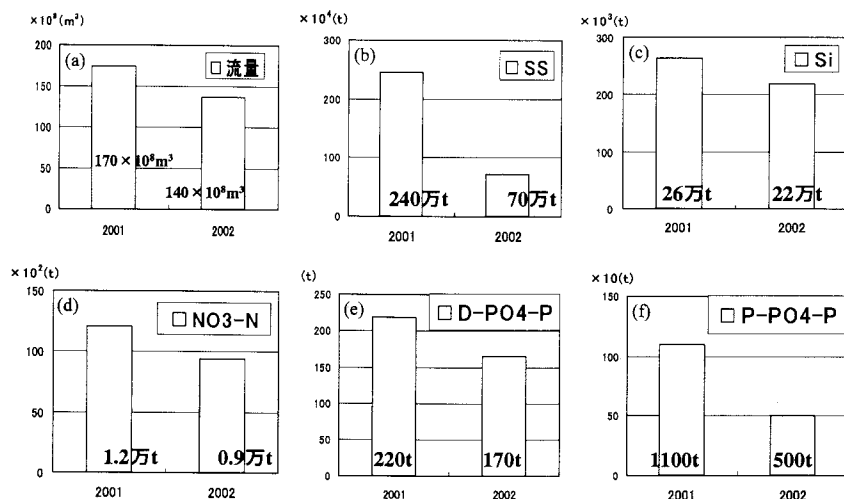


図-2 流量, SS, Si, NO₃-N, PO₄-P の河川流出量

がわかる。日本海の水深 100 m 以深には高栄養塩水が存在し、図-1 の断面図から水深 100 m 以浅の沿岸域に湧昇してくる深層水は水深 100 m~200 m 帯が中心と考えられるので、この水深帯の水温と栄養塩の相関式を用いて流入栄養塩の推定を試みる。

図-6, 図-7 に各々 $\text{PO}_4\text{-P}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ について、2002

年と 2003 年に St. 7, St. 11 で 6 月に採水により分析された栄養塩濃度の実測値と、水温から前述の相関式を代入した計算値との比較を示す。 $\text{NO}_3\text{-N}$ については少しばらつきがあるが、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ とも実測値と計算値は比較的良く一致し、St. 7, St. 11 の水温低下からその位置での栄養塩濃度の推定がある程度可能であることがわか

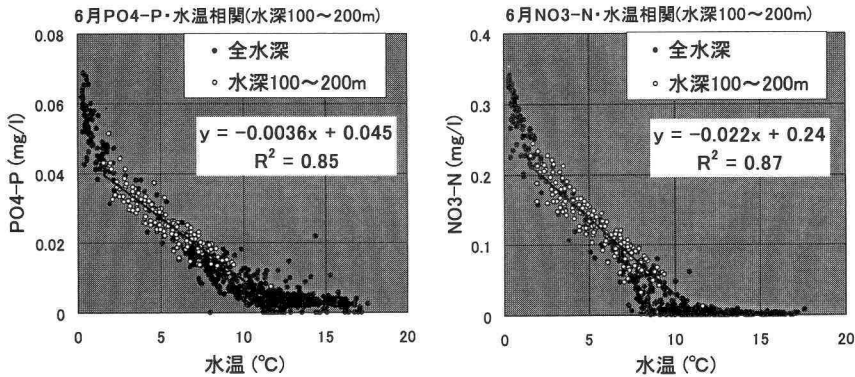


図-3 湾外域水温・栄養塩濃度相関（6月中旬から6月下旬）

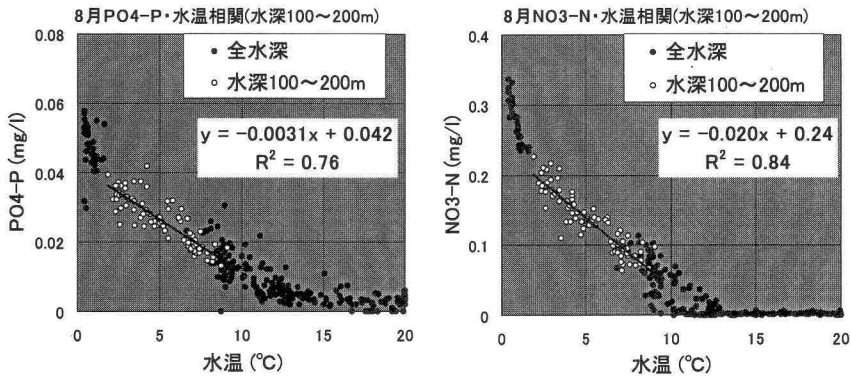


図-4 湾外域水温・栄養塩濃度相関（8月下旬）

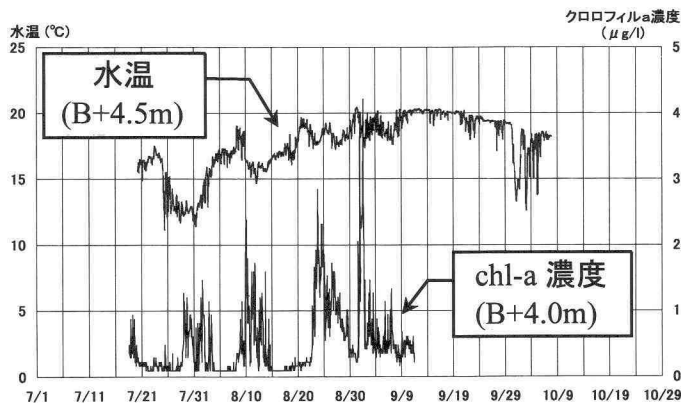


図-5 St. 7 の夏期の水温, chl-a 濃度推移

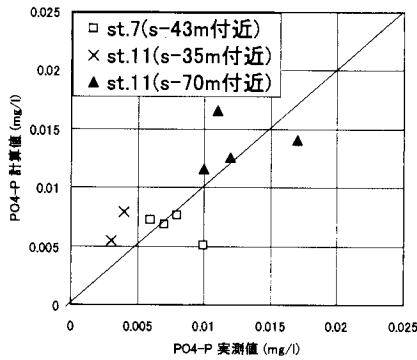
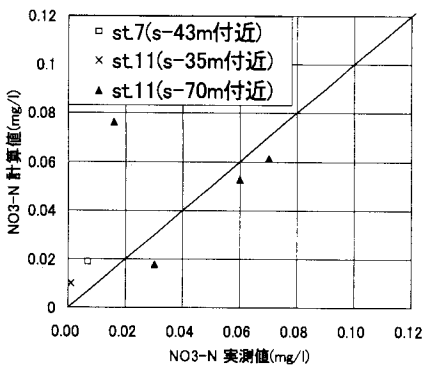
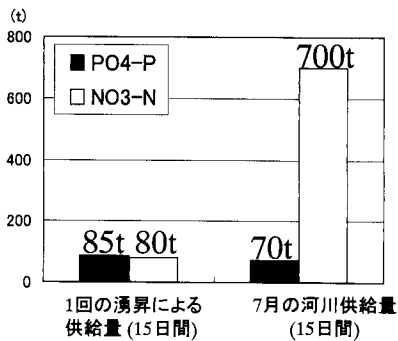
図-6 PO₄-P 濃度の実測値と計算値の比較図-7 NO₃-N 濃度の実測値と計算値の比較

図-8 湧昇, 河川による栄養塩流入量比較

る。

図-5の様に, 2003年7月20日から15日間, St. 7で観測された湧昇(水温低下)を沿岸域(以下, 図-1で測線6-12以浅の海域と定義)東側半分の水域で発生したと仮定し, 前述の相関式を用いて求めた沿岸域への流入栄養塩量を図-8に示す。湧昇が発生する範囲を特定するのは難しいので, 山下ら(2004)の研究を参考にして, 陸風の場合は石狩湾の西側, 海風の場合は湾東側に湧昇が発生しやすいことを考えて, ここでは湧昇範囲は沿岸

域の東側半分とした。比較のため同時期の河川供給量も同図に示す。河川供給量に比べ, 一回の湧昇により PO₄-P は同程度, NO₃-N は約 1/10 倍流入している。湧昇によって流入した栄養塩を植物プランクトンが利用し増殖するためには, 光量と日数が必要であり, 栄養塩を含んだ水塊がどの水深でどの程度滞留するのかわかる必要がある。また, 河川から流入した栄養塩を, 沿岸域で植物プランクトンがどの程度利用できるかを推定する際にも, 河川流出水の沿岸域での滞留特性が重要となる。今後, 流動と一次生産の数値解析を進め, 一次生産への湧昇により供給された栄養塩と河川供給の栄養塩の寄与を調べる必要がある。

5. 鉛直混合による栄養塩供給量

図-9に一例として, St. 7, St. 11の2002年度1年間の PO₄-P 濃度の変化を示す。11月以降, 両地点とも全層的に PO₄-P 濃度が上昇している。冬の鉛直混合が石狩湾でほぼ均一に発生していると考えられる。St. 7, St. 11の冬の平均栄養塩濃度を求め, 沿岸域全水深で積分して求めた鉛直混合による石狩湾沿岸域への栄養塩流入量を図-10に示す。同時期である12月から3月までに流入した河川供給量と比較すると, 鉛直混合による量は PO₄-P が約 17 倍, NO₃-N が約 3.5 倍であり, 河川の年間供給量と比較すると PO₄-P は約 1.4 倍, NO₃-N は約 0.8

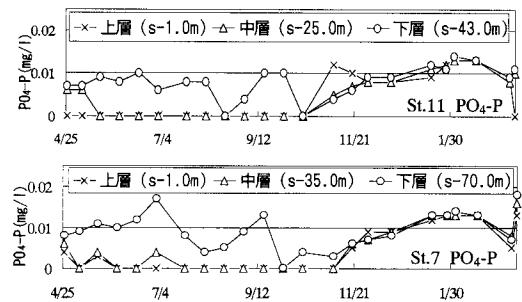
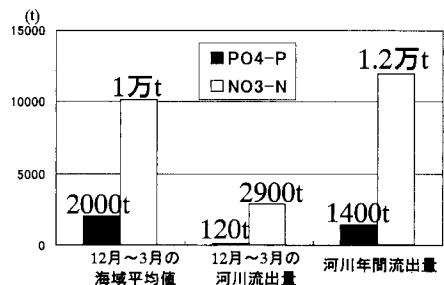
図-9 St. 7, St. 11 の PO₄-P 時系列

図-10 冬の海域平均値と同時期の河川流出量, 年間河川流出量比較

倍で、河川からの年間供給量と同程度の栄養塩が冬期の鉛直混合により石狩湾沿岸域に供給され、かなりのものが春期ブルームにより消費されるものと考えられる。今後、生態系モデルを用いた解析を進め、石狩湾沿岸域での一次生産への鉛直混合と河川により供給される栄養塩の寄与度を検討する必要がある。

6. おわりに

石狩湾沿岸域と広域、石狩川河川水の現地水質調査結果を基に、沿岸域への河川からの栄養塩供給量、夏期の一回の湧昇により供給される栄養塩量、冬期の鉛直混合による栄養塩供給量の推定を行った。今後、生態系モデルを用いた数値解析を実施し、供給栄養塩量の検証と、沿岸域での一次生産への各栄養塩量の寄与を明らかにす

る必要がある。

参考文献

- 北海道立中央水産試験場(1976-1985): 石狩湾新港海域生態調査報告書。
- 八木 宏・足立久美子・二平 章・高橋正和 (2002): 黒潮流路変動に伴う沿岸域への栄養塩流入現象, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1216-1220.
- 山下俊彦・梅林 司・菅沼 剛・斎藤大作・山崎真一 (2002): 石狩川の物質輸送特性と河口沿岸域での水質の周年変動, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1011-1015.
- 山下俊彦・梅林 司・隅江純也・柏谷和久・山崎真一 (2003): 石狩湾沿岸海域の水質変動特性と河川水・外洋の影響, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1181-1185.
- 王 毅・隅江純也・山崎真一・足立久美子・山下俊彦 (2004): 石狩湾海域における広域の流動・水温変動特性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 1136-1140.