

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

山下俊彦* ・ 梅林 司** ・ 菅 沼 剛***
斎藤大作**** ・ 山崎 真 一*****

石狩川の下流域と沿岸域を対象とした年間を通じた現地観測を実施し、石狩川から供給される物質特性と沿岸域での水質変動特性及び河川流出物質の海域水質に及ぼす影響を把握した。河川水中の SS、窒素、リン等の栄養塩の周年の濃度特性や流出物質量を定量的に把握した。窒素は多くが溶解性、リンは大部分が粒子性である。沿岸域の栄養塩濃度は冬期～春期に高く、夏期洪水後も増加し、融雪出水や夏期洪水の河川由来の影響と冬期の海域深層からの湧昇による影響で周年変動している。栄養塩濃度の増加後 1～3 週間後に植物プランクトンが増殖していることがわかった。

1. はじめに

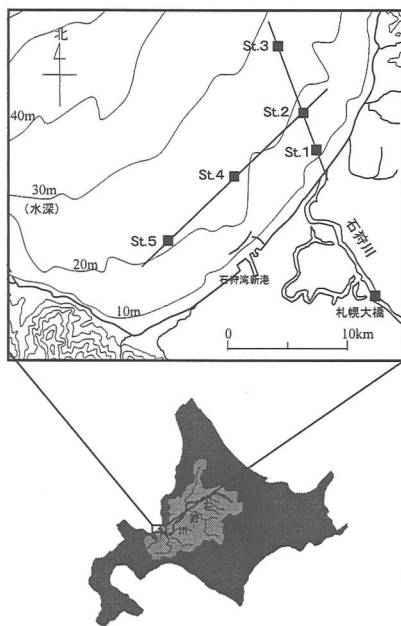
流域に降った雨や雪は地域の特性によって種々の物質を含有し、河川を通じて海域に流出する。これらの物質は、森林からの流出、農地からの流出、都市からの生活廃水や工業廃水等、我々の土地利用を含めた人間活動と密接に関係し、河川や沿岸域の水質・生態系に大きな影響を与えている。特に河口沿岸域は、植物プランクトンの成長に必要な陸域からの栄養塩供給が豊富で、活発な生物生産活動の場となっている。恵み豊かな水域環境の恩恵を持続的に享受していくためには、自然共生型流域圏の形成が重要な課題である。そのためにはまず、流域・沿岸域を含めた広域での水域環境の物質循環等の実態解明が必要である。特に、開放性沿岸域は流動の把握自体が困難なため、河口沿岸域への河川流出物質の影響等は不明な点が多い。

河川での物質輸送に関しては、橘(1993)、渡邊ら(1999)は、洪水時に栄養塩は主に懸濁物質に吸着して流下することを報告している。開放性沿岸域での河川流出物質の挙動については、山下ら(2000)は、北海道鶴川河口沿岸域で、河川洪水時にトラップを設置し、トラップ内沈降物量、物質特性を報告している。山下ら(2001)は、融雪期の石狩川の水質輸送特性と流出物質の河口沿岸域での挙動を報告している。

本研究では前報と同様、石狩川の下流域と沿岸域を対象として、年間を通じた長期観測を実施し、河川から海域に供給される物質特性と流出物質の沿岸域での挙動や水質変動特性を明らかにする。その結果を基に、河川流出物質が海域環境に及ぼす影響を考察する。

2. 調査方法

石狩川は河道長 268 km、流域面積 14330 km²の大河川



図一 観測地点

である。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。また、流域に形成された広大な石狩平野は北海道の稲作農業の中核地帯となっている。

2001 年 3 月から 1 年を通して図一に示す石狩川の下流域と河口沿岸域で現地観測を行った。主な観測項目は、河口より上流 14.5 km 地点にある札幌大橋での 86 回の河川表層採水、海域では船上から st. 1～5 における 25 回の採水、クロロテック計による水温塩分・クロロフィル a (chl-a) の鉛直分布測定を行った。固定点観測は、st. 2 における ADCP、水温塩分計 5 台、クロロテック計 2 台、水温計 4 台、st. 5 におけるクロロテック計、水温塩分計 5 台、水温計 5 台の 1 年連続観測である。分析項目は SS、各態の窒素、リン、クロロフィル a 等である。

3. 河川からの流出物質特性

図二に河川水の SS、窒素、リン濃度の時系列変化を

* 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

** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科

*** 正 会 員 工修 静岡県庁

**** 正 会 員 工修 北海道開発局石狩川開発建設部

***** 正 会 員 工修 (独法)北海道開発土木研究所

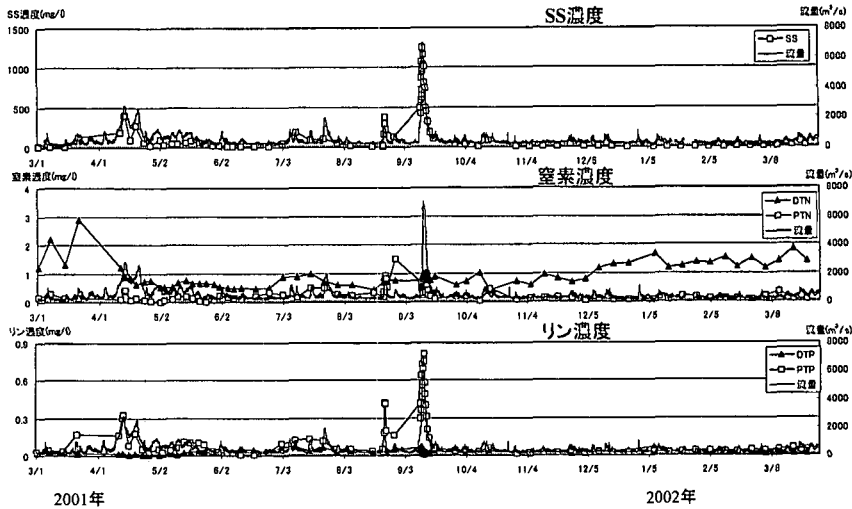


図-2 河川採水によるSS・窒素・リン濃度の周年変動

示す。2001年の石狩川流量は4月に融雪出水によるピークが2度あり、9月には $6600 \text{ m}^3/\text{s}$ に達する史上3位の夏期大洪水が発生した。流量増加に伴い、SS濃度が大きく増加していることがわかる。9月11日の出水時には約 1200 mg/l に達している。

総リンの大部分が粒子性で、SSとほぼ同様な濃度変化を示している。リンはSSに吸着あるいはSS自体として地表に蓄積され、出水とともに大量に流出することがわかる。

窒素はその大部分が溶解性で、融雪初期の3月に 3 mg/l 程度の最大値をとり、5月～11月までは 0.7 mg/l 程度でほぼ一定で、12月～3月までは 1.4 mg/l 程度に増加している。冬期に地表付近（特に農地）に蓄積された窒素は、融雪初期の3月に高濃度で流出することがわかる。冬期の12月～2月は流量が少ないため溶解性窒素濃度が高くなっている。

図-3に石狩川流量と各水質成分の輸送量の関係を示す。この結果より、流量 Q を m^3/s の単位とした場合の各水質成分の輸送量 $L(\text{g/s})$ を次式の様に求めた。

$$L_{\text{SS}} = 0.0033 \cdot Q^{2.48}$$

$$L_{\text{PTN}} = 0.013 \cdot Q^{1.40}$$

$$L_{\text{PTP}} = 0.0002 \cdot Q^{1.91}$$

$$L_{\text{DTN}} = 1.25 \cdot Q^{0.94}$$

$$L_{\text{DTP}} = 0.032 \cdot Q^{0.97}$$

どの水質成分に対しても相関係数は0.8以上と高く、2001年3月の溶解性窒素等、濃度が流量と相関が低いものもあるが、大略的には流量から各水質成分の輸送量がある程度予測可能と考えられる。べき数を見てみるとSSが2.48、粒子性のPTP、PTNは各々1.91、1.40で、流量増加に伴い各々粒子性物質の濃度が増加し、高流量時に強い洗い出し効果があることがわかる。一方、溶解性のDTN、DTPは各々0.94、0.97で、べき数は1.0に近い

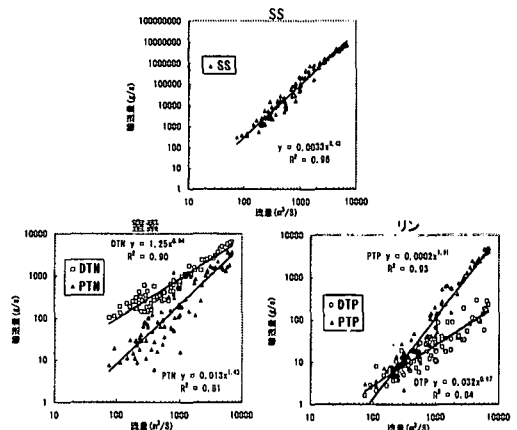


図-3 流量・輸送量相関

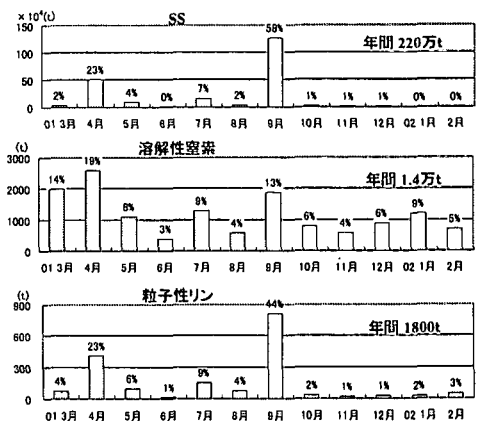
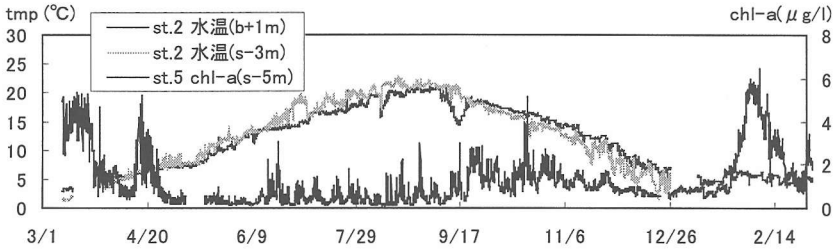
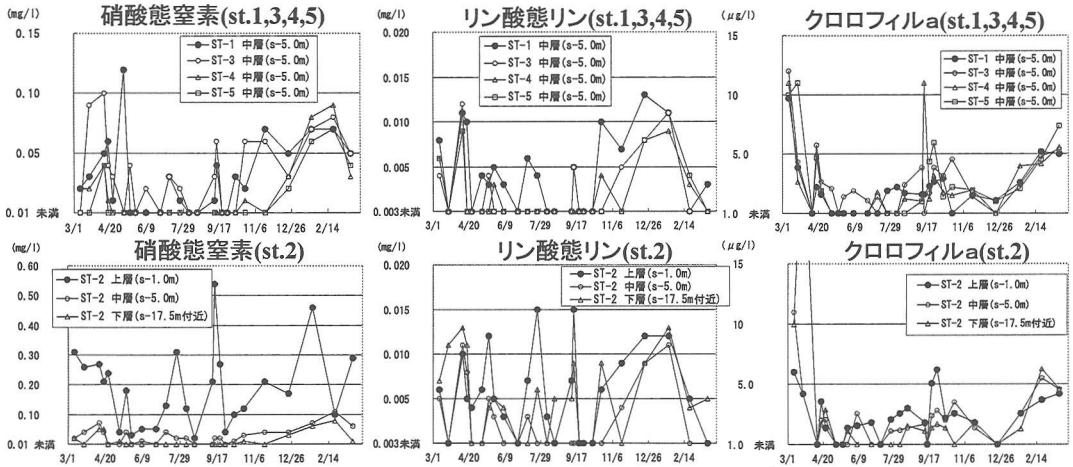


図-4 月毎の総流出物質量



図一五 st. 2 の水温と st. 5 のクロロフィル a 濃度の時系列変化



図一六 海域採水による硝酸態窒素、リン酸態リン、クロロフィル a 濃度の周年変動

く、流量によらず濃度はほぼ一定であることがわかる。

年間の各水質成分の流出特性を把握するため、流量との相関が高く、流出量も多い SS, DTN, PTP について、各月別に水質成分輸送量と流量の相関式を求め、年間の各月流出量を求めた。その結果を図一四に示す。SS は年間に 220 万 t 流出し、出水のあった 4 月と 9 月に全体の約 8 割を流出している、特に 9 月の流出が年間流出の約 6 割を占めていた。粒子性リンは年流出量 1800 t で、SS とほぼ同様 4 月、9 月に全体の約 7 割を流出した。溶解性窒素は年流出量 1.4 万 t で、9 月の洪水での流出量も多いが、融雪前期の 3 月、4 月に全体の約 1/3 を流出していることがわかった。以上より融雪前期の 3 月、4 月と大洪水の発生した 9 月に河川から海域に大量の SS、窒素、リンが流出したことがわかる。

4. 海域水質変動特性

4.1 海域水質の時間変化

図一五に、st. 2 の海面下 3 m (s-3m) と海底上 1 m (b+1m) の水温と st. 5 の海面下 5 m (s-5 m) のクロロフィル a (chl-a) の連続観測結果を示す。chl-a は 3 月に $4 \mu\text{g/l}$ と高濃度で一度減少し、4 月 20 日ごろ 2 回目

のピークを取り、5 月～9 月初旬は低濃度で、9 月中旬～11 月まで $2 \mu\text{g/l}$ 程度の中濃度となり、12 月～1 月は低濃度で 2 月初めに $6 \mu\text{g/l}$ の高濃度に達していることがわかる。2 月から 3 月、4 月の植物プランクトンの増殖は 15～30 日程度の比較的短い周期で変動していることもわかる。図一五の河川流量と図一四の月毎の総流出物質質量から、4 月 20 日ごろと 9 月中旬～11 月の chl-a の増加は河川からの栄養塩等の影響で植物プランクトンが増殖したと推察される。2002 年の 2 月初めの植物プランクトンの増殖の要因は外洋影響で、2001 年 3 月の増殖の要因はどちらの影響かはっきりしない。

水温については、2001 年の 3 月は 2°C 程度と非常に低温で、鉛直混合による深い海域からの高栄養塩水の供給が起こり易い年であった。夏期には水温は 20°C 程度になり、9 月の大洪水時にはエスチュアリー循環により水温が下層で 8°C 程度低下している。

4.2 海域水質の周年変化

図一六に各地点の海域採水の硝酸態窒素、リン酸態リン、クロロフィル a の結果を示す。chl-a は st. 1～5 で地点によらずほぼ同じ様に変化している。この変化傾向は図一五とほぼ同様である。ただし、図一五で見られた chl-a

の2月初めのピークと2月20日にかけての減少は、chl-aの変化周期が冬期の海域採水間隔の1ヶ月より短いために採水結果には現象がとらえられていない。

硝酸態窒素、リン酸態リンを見てみると、st. 2の上層(s-1 m)を除いて各地点でほぼ同様の周年変動をしている。3月と4月に一度ずつ濃度が増加し、7月の出水で少し濃度が上昇し、9月の大出水で濃度が増加し10月10日ごろから1月20日ごろまで増加し、その後減少している。4月と9月の両者の増加は河川出水の影響と考えられる。chl-aと両者の変動を比較すると、chl-a濃度が上昇する1~3週間前に硝酸態窒素、リン酸態リン濃度が上昇していることがわかる。春季よりも秋季の方がchl-a濃度が上昇するまでに日数がかかっていることもわかる。河口近くのst. 2の上層(s-1 m)は、硝酸態窒素、リン酸態リンとともに他の地点よりも濃度が濃く、変動も激しいことがわかる。

4.3 海域水質と流動

図は示さないが、ADCPによる一年間の流動観測結果より、河口沿岸域の海面から5 mまでの海域表層では年間を通して汀線方向に北上するような流れが卓越しており、河川水はコリオリ力等により主に河口から北方向へ流出することが確かめられた。海面下5 m以深では流れは周年変動し、3~4月は南西方向、5~8月は北方向、9~12月は南西方向の流れが卓越することがわかった。

図-7に石狩湾新港における4月と10月の風のデータを、図-8にst. 2での4月と10月のADCPによる流速測定結果を示す。流速は汀線に平行方向(北東-南西)と汀線に直角方向(北西-南東)の成分毎に示す。4月の風は南東と北西の風が交互に変化するが全体的には陸風である南東風である。10月の風は、前半の3日の強い北西風以外は弱い南東風であり、後半は強い北西の季節風と南東の風が5日周期程度で変動している。

4月の流動は融雪洪水の発生した4月13日と21日は全層的に北東方向の流れとなっているが、それ以外の日は20日までは海面下5 m以深では南西方向の流れとなっている。図-6を見ると、4月初めから20日までは硝酸態窒素、リン酸態リン共に濃度が高くなっている。これは石狩川から流出した栄養塩を多く含有する河川水は海域表層を北東方向に流れていくが、その過程で海水と混合し、混合水が下層の南西方向の流れによって引き戻され、栄養塩を多く含む混合水が石狩湾奥に比較的長く滞留したことがchl-aの増加に寄与したのではないかと推察される。4月20日以降、下層は北東方向の流れでchl-aの増加は見られない。

10月の流動は、海面から5 m以深の下層は強い南西流で、これは9月の大洪水後から続いている流動である。図-6よりこの時期もchl-aが増加しており、石狩川の混

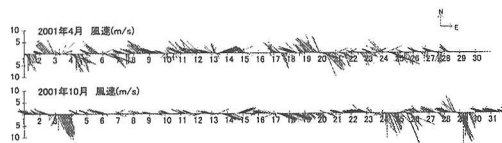


図-7 石狩湾新港での4月と10月の風向と風速

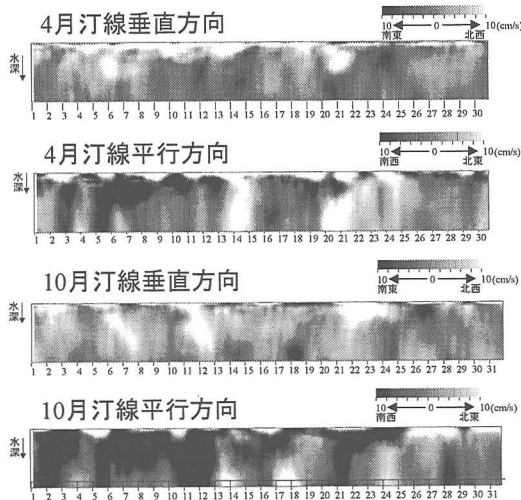


図-8 st. 2の4月と10月の流速変化の鉛直分布

合水が石狩湾奥に比較的長く滞留する流れであったことが関係していると考えられる。図-7の風との対応を見ても、10月3日の強い北西風に対しては全層的に西向きの流れとなり、吹送流の流れが卓越している。流動を見ると10月12日に強い全層的な西向きの流れとなっているが、風は弱い陸風でありこの流れは吹送流ではなく外洋影響の流れと考えられる。

図-9、図-10に各地点での塩分濃度とchl-a濃度の鉛直分布の周年変化を示す。塩分については全地点、全層において融雪期、夏期の洪水後に濃度が低下しており、この時期は前述の下層の西向きの流れの発生時と一致している。河口から流出した河川水が徐々に海水と混合し、北東方向へ石狩湾外へと流れ出ようとするが、その補償流、対馬暖流、吹送流等の影響による下層の南西方向の流れによって引き戻され、混合水が石狩湾奥に長く滞留すると考えられる。2002年1月以降も塩分濃度の低下が見られるが、これには降雪の影響があるのではないかと考えられるが今後検討する必要がある。

chl-aについては2001年の春期に2回のピークがあり、特に1回目は海底面付近の濃度が高く、7月と9月の洪水後は上層で濃度が高くなっている。洪水の影響によると考えられる塩分濃度低下領域とchl-a濃度の増加領域はほぼ一致する。2001年は前述のように洪水流出混

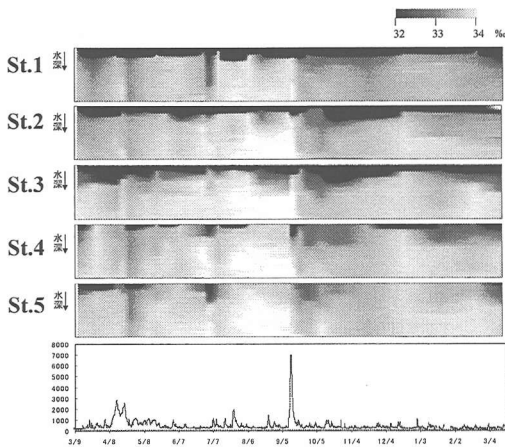


図-9 海域5地点の塩分濃度の鉛直分布

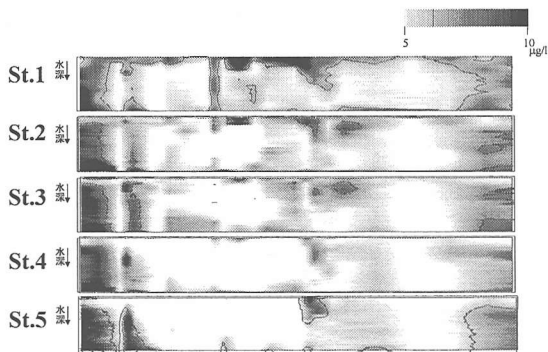


図-10 海域5地点のクロロフィル a 濃度の鉛直分布

合水が湾奥に滞留し易かったこともあって、河川から流出した栄養塩によって広い海域で植物プランクトンの増殖が発生したと考えられる。2002年の2月に全地点で見られる chl-a 濃度の顕著な増加は深い海域に存在する高栄養塩水との鉛直混合により発生しているのではないかと考えられる。

以上より、海域での植物プランクトンの増殖には、河

川由来の栄養塩と外洋からの栄養塩が関与しており、特に洪水時には河川由来の栄養塩の影響が大きいことがわかった。

5. 結 論

本研究により、一年間に石狩川から供給される物質特性と沿岸域での水質変動特性及び河川流出物質の沿岸域の水質に及ぼす影響を明らかにした。本研究で得られた主な結果は以下の通りである。

(1) 河川水中の SS、窒素、リンの周年の濃度特性を $6600 \text{ m}^3/\text{s}$ の史上3位の夏期洪水のデータを含めて定量的に把握した。窒素は多くが溶解性、リンは大部分が粒子性である。SS、粒子性リン、溶解性窒素について各月の流出量を算出し、年間の各物質の総流出量を推定した。

(2) 沿岸域の栄養塩濃度は冬期～春期に高く、夏期洪水後も増加し、河川流出水や外洋の深層の高栄養塩水の影響を受け変動し、その1～3週間後に植物プランクトンが増殖することがわかった。2001年は河川水は洪水時に汀線を北上するように流出して海水と混合し、下層に発達していた西向きの流れによって引き戻され、混合水が石狩湾奥に比較的長く滞留したため、河川由来の栄養塩による植物プランクトンの増殖が活発であったと考えられる。

参 考 文 献

- 橘 治国 (1993): 森林河川における栄養塩の流出と懸濁物質の役割, 水環境学会誌 Vol. 16, No. 7, pp. 2-8.
- 山下俊彦, 菅沼 剛, 橘 治国, 斎藤大作, 山崎真一 (2001): 融雪期の石狩川の物質輸送特性と流出物質の河口沿岸域での挙動, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1266-1270.
- 山下俊彦, 宮下将典, 山崎真一, 渡邊康玄 (2000): 河川から供給された物質の河口沿岸域での挙動, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1026-1030.
- 渡邊康玄, 新目竜一, 斎藤大作, 玉川 尊 (1999): 鶴川 1999 年融雪出水時の物質輸送に関する現地調査, 水工学論文集, 第43巻, pp. 587-592.