

融雪期に石狩川から流出する懸濁物質が 沿岸海域の水質に及ぼす影響

EFFECTS OF SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORTED FROM THE ISHIKARI
RIVER ON WATER QUALITY IN COASTAL AREA IN THE SNOWMELT SEASON

山崎 真一¹・山下 俊彦²

Shin-ichi YAMAZAKI, Toshihiko YAMASHITA

¹正会員 工修 北海道開発土木研究所 河川研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 工博 北海道大学大学院助教授 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

Field observations were carried out to investigate the effects of suspended sediment from the Ishikari River and bottom material originating from the Ishikari River on water quality in the coastal area of Ishikari Bay during the snowmelt season in 2003. In particular, in terms of suspended sediment and bottom material, the forms of phosphorous were analyzed to determine the release of phosphorous into the seawater. Results showed that during the snowmelt season, adsorbed phosphate from the suspended sediment was released into the seawater near the surface and that the phosphate was not released into the seawater from the bed material according to the vertical distribution of dissolved phosphate in the pore water of the seabed.

Key Words : coastal sea near the river mouth , suspended material, bed material, pore water,
the forms of phosphorous

1. はじめに

石狩湾沿岸海域は6月から8月にかけての夏期には貧栄養で、植物プランクトンの成長に重要な栄養塩である溶存態オルトリン酸及び硝酸態窒素の濃度は低い値を示し、沿岸域の栄養塩濃度が上昇するのは海水面付近の水温が低下し混合層が発達する9月下旬から翌年3月にかけてである。一方貧栄養期において栄養塩濃度が上昇しているのは海水面付近及び海底面付近で、これらの栄養塩を供給しているのは主として河川から流出する溶存態及び懸濁物質に吸着し溶出した成分と考えられる。石狩川からは年間に平均170万 m^3 の土砂が海域に流出している¹⁾が、これらの殆どが粒径の細かな浮遊砂、ウオッシュロードである。これらの懸濁物質の流出量は流量の2乗にほぼ比例しており²⁾、海域においては海水と混合し粒径の細かな成分は凝集し海底に沈降し、もしくは外海に拡散する。懸濁物質は流域及び河道内に一時的に堆積していたものが洪水によって海域に輸送されたものであるが、その性質は流域の産業、土地利用、土質などによって大きく左右されている。石狩湾は日本でも有

数の河川である石狩川からの大量の土砂が毎年の融雪期、夏季の出水によって流出し、河口の東側には石狩川が由来と考えられる粒径の細かな懸濁物質が多く堆積しており、流出する懸濁物質の変化は漁業資源などに影響を及ぼす可能性がある。このような河口周辺の沿岸海域の環境を把握するためには河川の懸濁物質、海底に堆積した底質の持つ特性を調査することが必要である。このため、2003年の融雪期に石狩川及び石狩湾において懸濁物質、底質等の調査を実施しており、それらの結果について報告するものである。なお、これまでに、河川由来の懸濁物質に関しては、田中がリンの詳細な調査、特に結合形態別の分析を行っており³⁾、今回の調査では田中が行った分析方法を参考に栄養塩の分析を実施し、懸濁物質と海域における水質の関わりを考察した。

2. 調査概要

調査は、2003年4月～5月の融雪期に石狩川及び石狩湾において実施した。調査期間中の石狩大橋(石狩川河口から26.5km上流の地点)における流量を図・1に示す

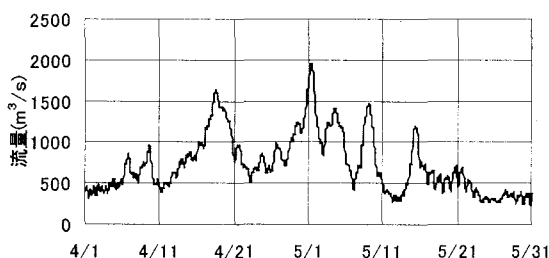


図-1 石狩大橋地点の流量

表-1 調査項目

	調査	分析項目	回数	調査日時	地点
海域	水質調査	塩分, DO, pH, T-P, T-N, TOC, PO ₄ -P, D-PO ₄ -P, D-T-P, D-NH ₄ -N, D-NO ₃ -N, D-NO ₂ -N, D-T-N, SS, DOC, chl-a, フェオフィチン, 電気伝導度	6回	4/11, 4/21, 4/29, 5/6, 5/16, 5/28	4地点
	底質調査	T-P, TOC, T-N, 強熱減量, 硫化物, Eh, chl-a, フェオフィチン, CDB-P, Al-P, Ca-P, Ads-P	3回	4/11, 5/6, 6/30	4地点
	間隙水	pH, D-T-P, D-PO ₄ -P, D-T-N, D-NO ₃ -N, D-NO ₂ -N, D-TOC, Eh	1回	5/6	St.2
	間隙水及び直上水調査	pH, D-PO ₄ -P	2回	4/11, 5/6	4地点
河川	水質調査	平水時	7回	4/3, 4/14, 4/18, 4/23, 5/7, 5/20, 6/7	札幌大橋
	水質調査	洪水時	7回	4/28~5/1	
	洪水時SS調査	海域の底質調査と同じ	2回	4/29, 5/1	

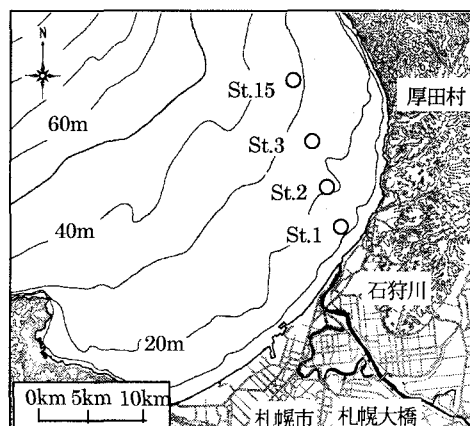


図-2 調査地点

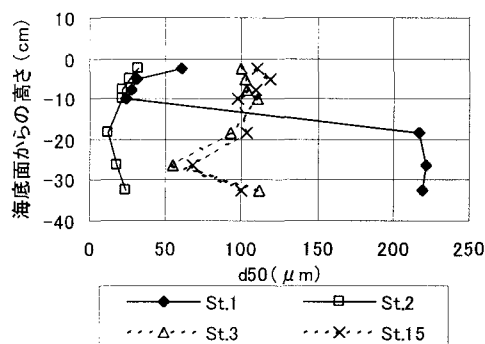


図-3 底質の代表粒径

が、石狩川では4月7日頃から融雪出水が発生しだし、5月1日には降雨を伴い石狩大橋地点で約2000m³/sの融雪出水が発生している。その後5月下旬には融雪出水は収束している。

石狩湾では図-2に示す調査地点で水質調査、底質調査を行っている。調査地点の水深はSt.1で約10m、St.2で約20m、St.3で約25m、St.15では約31mである。水質調査は海域の各調査地点で6回、石狩川の札幌大橋（河口から15km地点）で14回実施した。また札幌大橋では洪水前期の4月29日及びピーク流量付近の5月1日に表層付近の河川水を深井戸用のポンプを用い約1m³採取し、遠心分離により懸濁物質を分離し分析を行うと共に、5月1日に採取した試料については海水を用いた懸濁物質のPO₄-Pの溶出・吸着特性に関する試験を実施した。試験は0.45μmのフィルターでろ過した海水を用い、D-PO₄-Pの初期濃度を0mg/lから0.1mg/lまで調整した溶液中に底質を加え230rpmの攪拌強度で4時間攪拌した後にD-PO₄-Pを分析し懸濁物質の溶出・吸着量を算出した。海域の4地点では海底面から約40cmまでの底質を採取し、St.2、St.3では3層、その他の2地点では海底面付近の底質を分析した。また、4月11日及び5月6日には4地点で底質の間隙水及び海底面から10、30、60cmの直上水の水質調査を実施した。各調査地点の分析項目については表-1に示す。底質、石狩川のSS

の分析項目のうちリンの形態別分析については田中の分析方法を用いた。PO₄-Pは、Ca、Al、Feと選択的に結合する性質を持ち、Ca、Alと結合したPO₄-Pは海水中では安定しておりそれぞれHCl、NaOHを用い定量しCa-P、Al-Pと記す。Feと結合したPO₄-P及び懸濁物質の表面に電氣的に吸着したPO₄-Pを還元剤を用い定量したものがCDB-Pである。また、海水を用い懸濁物質から溶出するPO₄-Pを10日間定量したものがAds-Pに相当する。Ads-Pは、主として懸濁物質に吸着しているPO₄-P及び、一部有機物の分解によるPO₄-Pが含まれていると考えられる。

3. 河川の懸濁物質及び海域の底質の分析結果

(1) 河川の懸濁物質の粒度

海底面付近の底質の代表粒径の鉛直分布を図-3に示す。洪水時の石狩川のSSはd₅₀が約20μmで、河口に近いSt.1、St.2もこれに近い値を示している。St.1のd₅₀は海底面から10cmの範囲では20~60μmであるが、それ以上深くなるとd₅₀は200μm以上となる。St.1は海岸に近く水深が10m程度と浅いことから、海底面付近に堆積した粒径の細かな底質は頻りに移動しているものと考えられる。St.2の粒径は鉛直方向に対しても均質

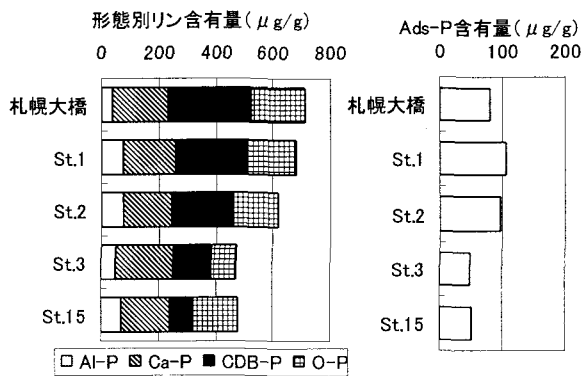


図-4 底質の形態別リン含有量分析結果（海底面～2.5cm）

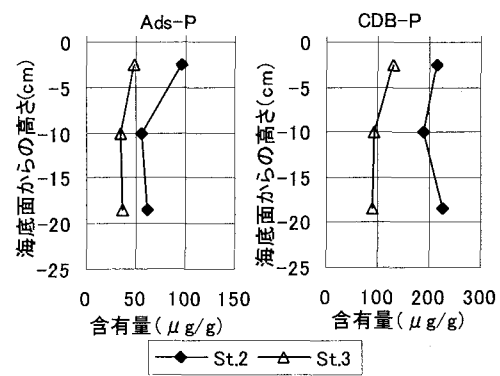


図-5 St.2 と St.3 の Ads-P, CDB-P 含有量

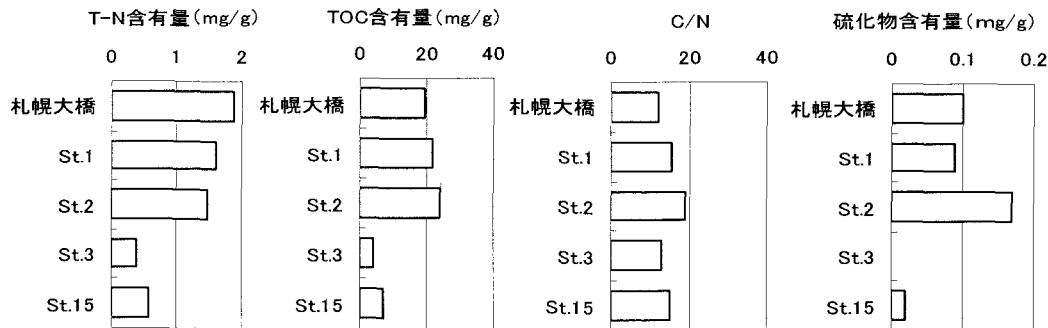


図-6 底質の分析結果（海底面～2.5cm）

で、この地点では河川からの SS が比較的厚く堆積していると考えられる。これより遠方に位置する St.3, St.15 の d_{50} は $100\mu\text{m}$ 程度の細砂が主体で河川の SS 由来の堆積物は少ないものと考えられる。

(2) 河川の SS 及び海域の底質の分析結果

河川の SS 及び海底の底質の形態別リン含有量の分析結果を図-4, 図-5, その他の底質分析結果を図-6 に示す。TP は河川の SS, St.1, St.2 の海底面付近が多く、これに比べ St.3, St.15 が少なく石狩川の SS の影響は低いものと考えられる。海域においては、化学的に安定している Ca-P, Al-P の値は各地点であまり変化は見られず CDB-P に大きな変化が見られる結果となった。St.1, St.2 の CDB-P が河川の SS 中の値に比べ低いのは、懸濁物質の表面に吸着している $\text{PO}_4\text{-P}$ が溶出した結果と考えられる。Ads-P は、海域の有機物等の堆積などもあり海底面近くでは St.1, St.2 の底質が大きな値を示しているが、図-5 に示すとおり下層では河川の SS に比べて値が小さいことがわかる。有機物の分解の指標となる C/N は、札幌大橋地点に比べ St.1, St.2 で大きな値を示し海域において懸濁物質中の有機物の分解が進んでいるものと考えられる。硫化物の含有量の値は St.2 が大きく、硫酸イオンが嫌気性の硫酸還元菌によって還元された結果と考えられ底質は還元状態にあるものと考えられる。

4. 河川から海域に流出する懸濁物質と水質の関係

(1) 河川の SS の $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出・吸着特性

河川の SS が海域に流出したときの $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出・吸着特性を把握するために、ろ過した海水中に河川の SS を混合し、海水の $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度変化を求めた。実験条件は pH を 7.0, 7.5, 8.0, 初期の $\text{D-PO}_4\text{-P}$ を 0, 0.033, 0.066, 0.1mg/l とし、それぞれ約 $2,500\text{mg/l}$ の懸濁物質を混合し攪拌した後に採水し、 $\text{D-PO}_4\text{-P}$ を定量した。攪拌後の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度を図-7 に、初期濃度に対する溶出・吸着量を図-8 に示す。攪拌した後の濃度はほぼ pH 毎にほぼ一定値を示し平衡濃度は $0.008\text{mg/l} \sim 0.016\text{mg/l}$ であり、また図-8 に示すとおり殆どの $\text{PO}_4\text{-P}$ は懸濁物質中に吸着していることがわかる。今回の実験で得られた平衡濃度は、SS が十分に高く海水との平衡状態が達成されている条件と考えられる。これに対し、SS が低く $\text{D-PO}_4\text{-P}$ が平衡濃度以下であれば SS からの $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出が進むものと考えられる。海域ではないが、札幌大橋で 2001 年から 2003 年実施した融雪期の水質調査データについて SS と $\text{D-PO}_4\text{-P}$ の関係を図-9 に整理した。海域と塩分濃度、pH の値が異なるため平衡濃度は変化すると考えられるが、SS が高い場合には $\text{D-PO}_4\text{-P}$ は安定し融雪期には 0.008mg/l 程度の値を示しておりこの値が河川水における平衡濃度と考えられ、SS が低下すると $\text{PO}_4\text{-P}$ は変動していることがわかる。

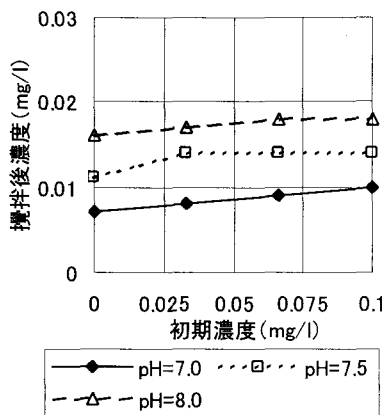


図-7 初期濃度と攪拌後の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度

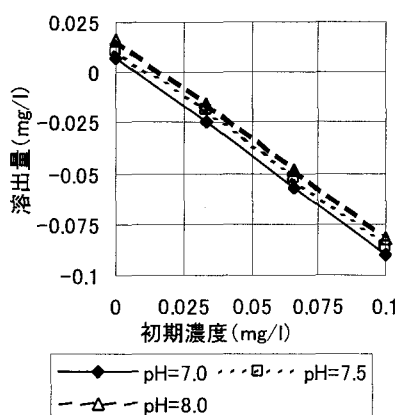


図-8 $\text{PO}_4\text{-P}$ の初期濃度と懸濁物質からの溶出量

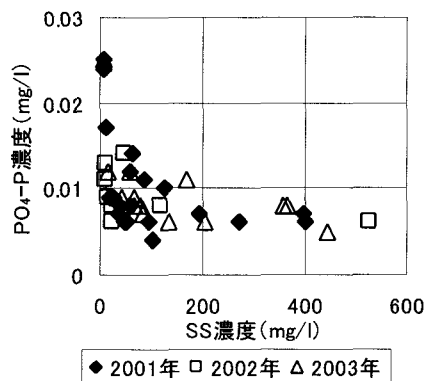


図-9 融雪期の札幌大橋地点のSS濃度と $\text{D-PO}_4\text{-P}$ 濃度の関係

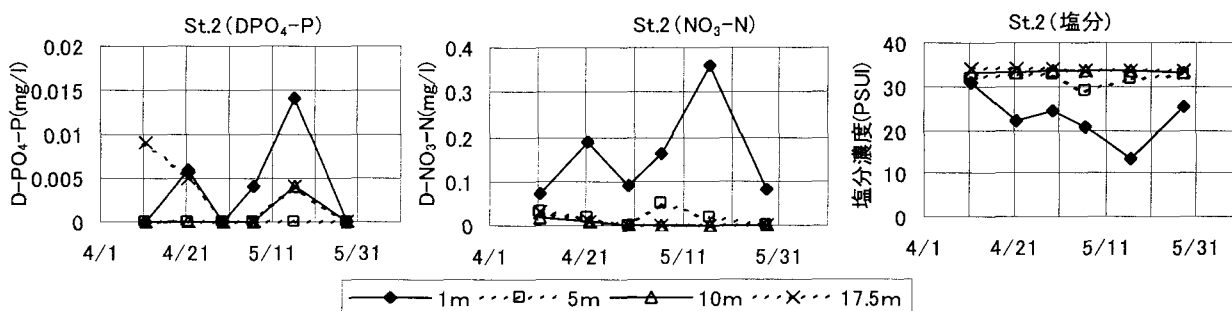


図-10 石狩湾 St.2 の水質調査結果

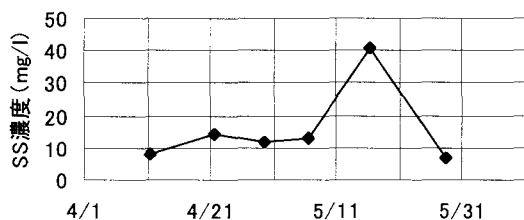


図-11 St.2 の水面下1m のSS濃度

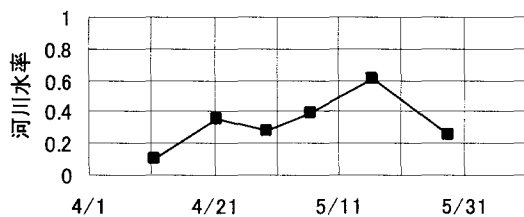


図-13 St.2 の水面下1m の河川水の混合比率

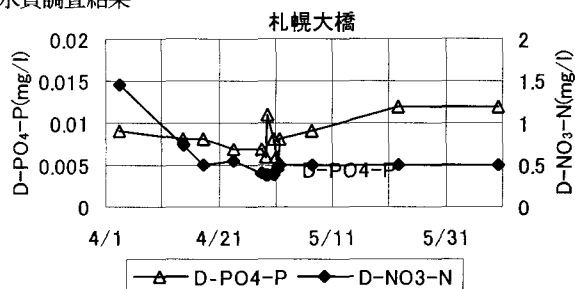


図-12 札幌大橋地点の水質調査結果

(2) 海域の水質変動と河川のSSの関連

河川水の流出が海域の水質に及ぼす影響を、 $\text{D-PO}_4\text{-P}$ 及び $\text{D-NO}_3\text{-N}$ について比較検討する。St.2の水深1m, 5m, 10m, 17.5mの $\text{D-PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{D-NO}_3\text{-N}$ 、塩分濃度を図-10に、水面下1mのSS濃度を図-11に、また札幌大橋の $\text{D-PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{D-NO}_3\text{-N}$ を図-12に示す。塩分濃度は水深1mの地点では低下しているが、それ以外の水深ではあまり変動がなく、海水面から深い層では河川水が殆ど

混合していないと考えられる。このことから、水深10mの海水を河川水と混合していないものと仮定し河川水と海水の混合比を計算した結果を図-13に示す。単純な溶存態成分の混合現象であれば、水質は河川水と海水の混合比で計算できると考えられることから、水深1mにおける $\text{D-PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{D-NO}_3\text{-N}$ を河川水及び海水の水質及び混合比により計算し実測値と比較した。図-14に示すとおり $\text{D-NO}_3\text{-N}$ については単純な混合で説明が可能である。一方、図-15に示すとおり $\text{D-PO}_4\text{-P}$ に関しては実際の海域の水質変動が溶存態成分の混合により計算した値に比べ大きいことがわかる。河川のSSの $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出・吸着の平衡濃度は海水のpHが約8.0であることから図-8より0.016mg/lであると考えられ、実際の海水の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度がこれより低いことから、河川のSSに含まれる Ads-P に相当する $\text{PO}_4\text{-P}$ が海水に溶出すると仮定

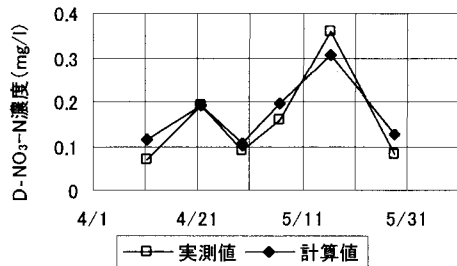


図-14 D-NO₃-N の計算結果

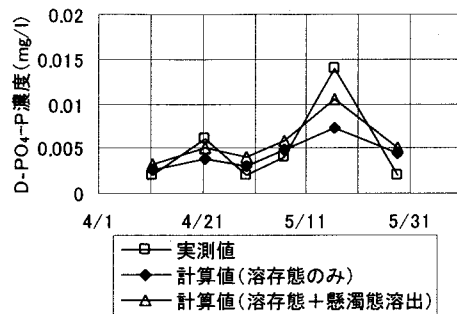


図-15 D-PO₄-P の計算結果

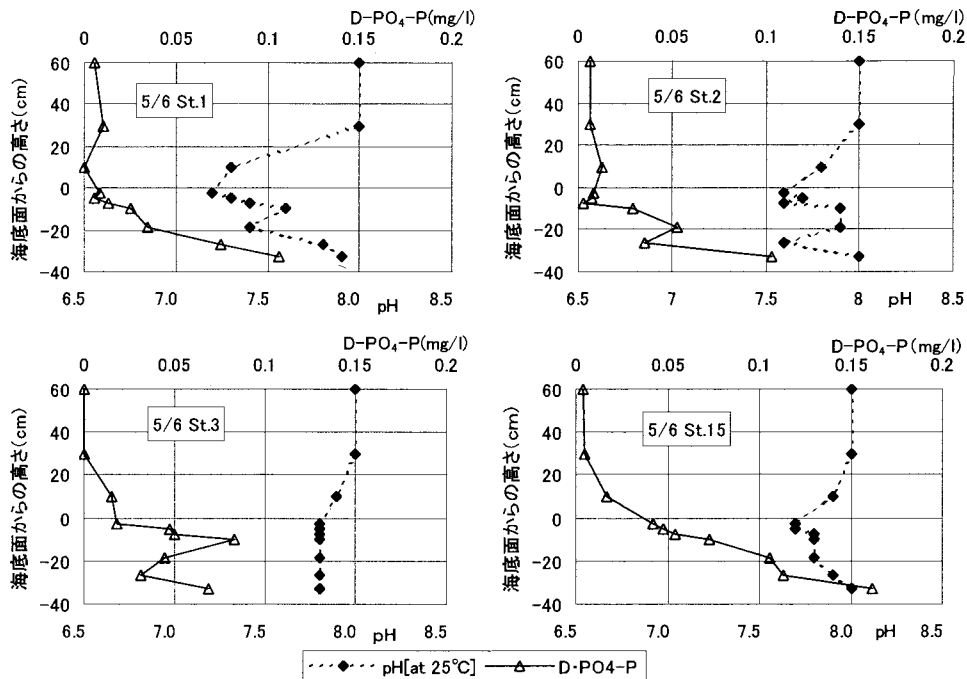


図-16 間隙水及び直上水の水質調査結果

し評価した。計算結果を図-15 中に示しているが、D-PO₄-P の変化については概ね再現できることがわかった。なお、Ads-P は 70 μ g/g として計算している。このように懸濁態からのリンの溶出量は SS 中の Ads-P で概ね評価できると考えられる。

5. 海域の底質と海底面付近の水質

(1) 石狩湾の底質及び間隙水の水質

融雪出水の発生直後の 5 月 6 日に底質の間隙水と海底面上 10cm, 30cm, 60cm の海水の D-PO₄-P 及び pH を測定した結果を図-16 に示す。St.1, St.2, St.15 の間隙水は海底面から 10cm までの層で D-PO₄-P が低下し、特に St.2 の D-PO₄-P は直上水の方が間隙水に比べ高い値を示しており PO₄-P は St.2 の間隙水からは直上水に溶出ししないものと考えられる。pH は St.1, St.2, St.15 では海底面から約 10cm の範囲の間隙水で低下しているが、St.3 では低下していない。図-17 に 4 月 11 日の調査も加

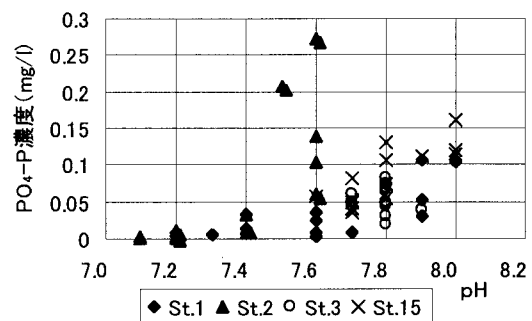


図-17 pH と D-PO₄-P の関係

えた 4 地点の間隙水中の D-PO₄-P と pH の関係を示すが St.2 の底質は pH が 7.4 前後以上に上昇すると急激に PO₄-P が上昇している。St.1, St.3, St.15 についてはやや傾向が異なり、pH の変化に伴い緩やかに D-PO₄-P が上昇する傾向がみられる。St.2 は他の地点と異なり下層まで石狩川の SS の沈降物で構成されており、D-PO₄-P と pH の関係に違いが生じたものと考えられる。河川の SS の PO₄-P の吸着量は pH に依存しており³⁾、海底に

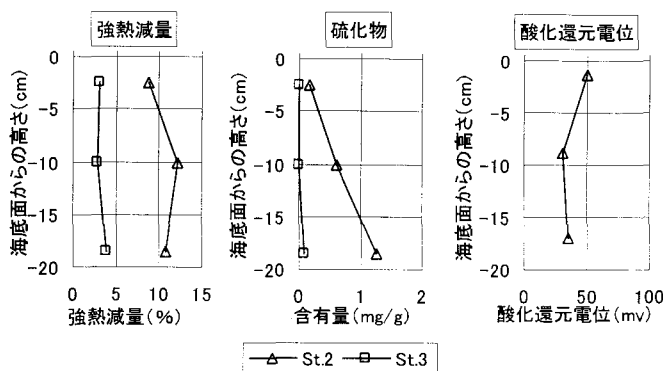


図-18 St.2, St.3の底質分析結果

堆積した底質においても同様の性質が間隙水に現れているものと考えられる。pH が海底面から-10cm までの範囲で低下する原因として有機物の分解による有機酸の生成が考えられる。また、JØRGENSEN⁴⁾は、底質の海底面から-10cm までの範囲の約50%の酸素消費が硫化物の酸化に用いられることを指摘しており、その結果硫酸が生成され pH が低下することも考えられる。St.2, St.3 の底質の分析結果を図-18 に示すが、強熱減量は St.2 が St.3 に比較して倍以上大きく有機物が多いことがわかる。一方、St.2 の底質は硫化物の含有量が多いが海底面に近づくほど含有量が低下し、酸化還元電位も海底面に付近でやや高い値を示していることから、海底面に近づくほど硫化物の酸化が進んでいると考えられる。このように、間隙水の pH が低下する原因は有機物の分解、硫化物の酸化が原因と考えられる。

(2) 石狩湾の海底面付近の水質

図-16 に示したとおり、St.2 の海底面付近では $\text{PO}_4\text{-P}$ が底質からの供給がないにもかかわらず間隙水に比べ高い値を示している。また、図-10 中の $\text{D-PO}_4\text{-P}$ 濃度は水面から 17.5m (海底面から 2.5m 程度の高さ) の値が 5m 及び 10m に比べ高い傾向が見られる。このように、海底面付近で $\text{D-PO}_4\text{-P}$ が上層の海水、間隙水に比べ高くなるのは海底面付近に浮遊する浮泥が原因と考えられる。海域で採取した柱状採泥試料の表層には薄く色が異なる浮泥が存在しており、また St.2 では海底では海底面付近が静穏時においても海水が懸濁していることが確認されている。浮泥、海底面～2.5cm の底質、河川の SS について Ads-P、フェオフィチンの値を整理した結果を図-19 に示す。河口に近い St.1, St.2 の浮泥は底質、河川の SS とほぼ同程度の Ads-P を含有しており海底面付近で $\text{PO}_4\text{-P}$ が溶出し得ることがわかる。また、フェオフィチンは底質、河川の SS に比べて大きな値を示しており、海域で生産された植物プランクトンが沈降し分解しているものと考えられ、有機態のリンの分解によって $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度が上昇していることも考えられる。

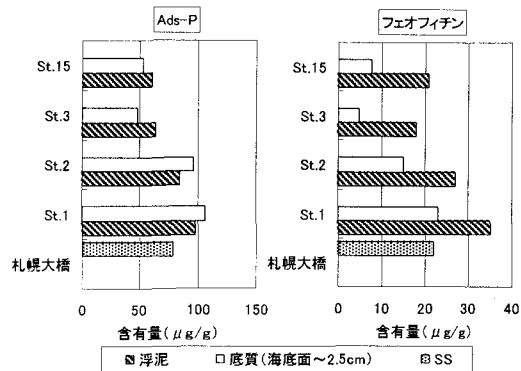


図-19 浮泥・底質・SS の Ads-P 及びフェオフィチン

6. まとめ

河川から流出する SS が海域の水質に及ぼす影響は、次のように整理することができる。河川の SS は、塩分濃度、pH 等の条件により $\text{PO}_4\text{-P}$ を吸着する平衡状態が変化する。海域の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は平衡濃度に比べ低いことから、海域に流出した河川水中の SS から $\text{PO}_4\text{-P}$ が溶出し沿岸域の水面付近の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度を高めると考えられる。一方で凝集作用により SS は沿岸域の海底に沈降するが、底質の $\text{PO}_4\text{-P}$ の平衡濃度は pH に依存しており、有機酸、硫酸の生成などによって底質の海底面付近の pH が低下し間隙水の $\text{PO}_4\text{-P}$ は低下し海底面からは $\text{PO}_4\text{-P}$ が溶出しないと考えられる。一方で、河川の SS が多く沈降していない海域では、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は間隙水から徐々に流出するものと考えられる。また、海底面付近の海水の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が中間水深付近の値に比べ高いのは海底面付近に存在する浮泥が原因と考えられる。

今回の調査は比較的海域が静穏な状況における調査であったが、石狩湾は秋季から融雪までの期間は季節風などによって波高が高く、底質の巻き上げが頻繁に生じていると考えられる。海底面に近い底質には多くの Ads-P が含まれており、底質の巻き上げによる $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出について今後調査が必要と考えられる。

参考文献

- 清水康行, 嵯峨浩, 早川博, 品川守: 石狩川の土砂流出に関する研究, 水工学論文集, 第42巻, p.1039-1044, 1998.
- 山下俊彦, 新山雅紀, 菅沼剛, 早川哲也: 石狩川から供給された粒径別土砂の河口沿岸域での堆積特性と土砂収支の試み, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.676-680, 2000.
- 田中勝久: 沿岸・河口域のリン循環過程に及ぼす土壌物質の影響, 南西海区水研技報, No.28, pp.73-119, 1994.
- JØRGENSEN, B.B: The sulfur cycle of a coastal marine sediment (Limfjorden, Denmark), Limnol. Oceanogr., 22, pp. 813-831, 1977.

(2003. 9. 30 受付)