

# 2001 年石狩川夏期大洪水時における流出物質 特性と海域水質変動

CHARACTERISTICS OF THE OUTFLOW MATTERS AND COASTAL WATERS  
IN THE PERIOD OF THE GREAT FLOOD IN THE ISHIKARI RIVER  
IN SUMMER, 2000

山下俊彦<sup>1</sup>・梅林司<sup>2</sup>・奥西 武<sup>3</sup>・山崎真一<sup>4</sup>

Toshihiko YAMASHITA, Tsukasa UMEBAYASHI, Takeshi OKUNISHI, Shirichi YAMAZAKI

<sup>1</sup> 正会員 工博 北海道大学大学院 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

<sup>2</sup> 工修 日本建設コンサルタント株式会社大阪支店 (〒553-0003 大阪市福島区福島 7-20-1)

<sup>3</sup> 水産科博 北海道大学大学院 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

<sup>4</sup> 正会員 独立行政法人北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号)

Characteristics of the outflow materials (suspended solids (SS), nutrients) from the Ishikari River and the water quality change in the Ishikari Bay are examined before and after the flood in September 2001. SS and particulate PO<sub>4</sub>-P are supplied from the sediment of riverbed and the river basin. NO<sub>3</sub>-N concentration is almost constant. SiO<sub>2</sub>-Si concentration decreases after the flood because this compartment is diluted by rise of stream rather than that are supplied from the sediment.

The bottom water in estuary region is low temperature and high salinity just after the flood. This shows that estuary circulation current is enhanced by the extensive discharge of river water. The coastal water is of low chl-a and high turbidity just after the flood, but they become of high chl-a and low turbidity a week later. This suggests that turbidity is one of the most important factors as growth condition of phytoplankton in the Ishikari Bay.

**Key Words:** Ishikari River, flood, nutrients, estuary circulation current, phytoplankton

## 1. はじめに

近年, 自然と共生した持続可能な社会の構築が求められている. 自然共生型流域圏形成のためには, 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. 河川水中の栄養塩濃度は海水中の栄養塩濃度より数桁高いのが一般的であり(Horne and Goldman, 1994)<sup>1)</sup>, 河川からの沿岸域への栄養塩供給は, 河口域および沿岸域に極めて高い生物生産をもたらしている. しかし, 河川からのアンバランスな栄養塩の供給が海水中の栄養塩の構成比を変化させ, その結果藻類の群集構造を変化させてしまうことが報告されている(Amo et al., 1997; McClelland and Valiela, 1998)<sup>2,3)</sup>. このように, 河川は沿岸域の低次生産に大きな影響を与えている.

北海道中部を流域に持つ石狩川は河道長 268km, 流域面積 14330km<sup>2</sup> の日本有数の大河川であり, 日本海沿岸の石狩湾に流出している. 夏季の石狩湾は貧栄養であり, 植物プランクトンの生産は制限を受

けているが, 洪水時に河川から供給される栄養塩により一時的に栄養塩濃度が高くなり, 高クロロフィル濃度が観測されている(山下ら, 2002)<sup>4)</sup>. 田中ら(2003)<sup>5)</sup>は知多湾に流入する矢作川において, 増水時に平水時の 3.3 年分に相当する大量の懸濁態リンが負荷され, それがリン循環に著しい影響を及ぼしていることを示している. しかしながら, 石狩川の洪水時における沿岸域への栄養塩の供給過程の構造, 栄養塩供給後に応答する植物プランクトン増殖の構造については詳細には明らかになっていない.

そこで, 本研究では夏期洪水時に石狩湾沿岸域で行われた観測結果より, 石狩川からの流出物質の特性や河口沿岸域での水質変動の特性を明らかにすることを目的とした.

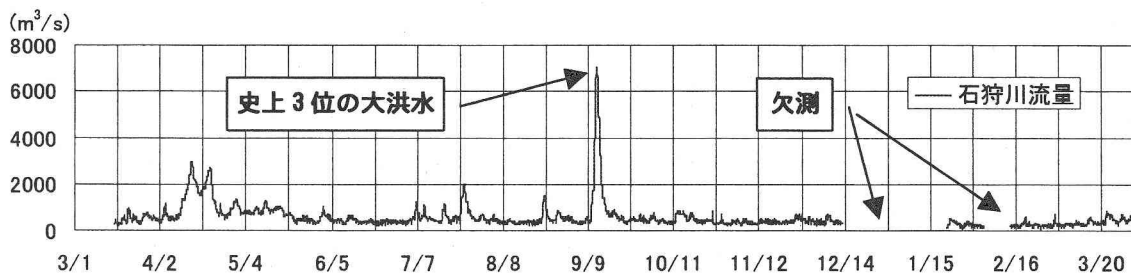


図-1 石狩川の河川流量

## 2. 観測資料

2001年9月に石狩川の観測史上3位の流量(約7000 m³/s)となる大洪水が発生した(図-1)。観測資料は洪水発生時を含む2001年9月10日から2001年9月27日の期間に図-2に示す海域5地点、河口の上流14.5km地点にある札幌大橋で観測されたものを用いた。水深19.5mのSt.2では、鉛直的に設置された水温計4台、水温塩分計5台による連続観測を実施されている。また、2001年9月13日、20日、27日にSt.1、St.2、St.3ではクロロテック計による水温、塩分、濁度、クロロフィルa(Chl-a)の鉛直分布測定、海域全5地点の水深1m、5m、海底上2mにおいて採水され、硝酸態窒素(NO<sub>3</sub>-N)、リン酸態リン(P-O<sub>4</sub>-P)の分析が行われている。また、札幌大橋において、2001年9月10日から2001年9月17日の期間に22回採水され、粒径別の懸濁物質(SS)、ケイ酸態ケイ素(SiO<sub>2</sub>-Si)、硝酸態窒素(NO<sub>3</sub>-N)、粒子性オルトリン酸態リン(P-P-O<sub>4</sub>)等の分析が行われている。

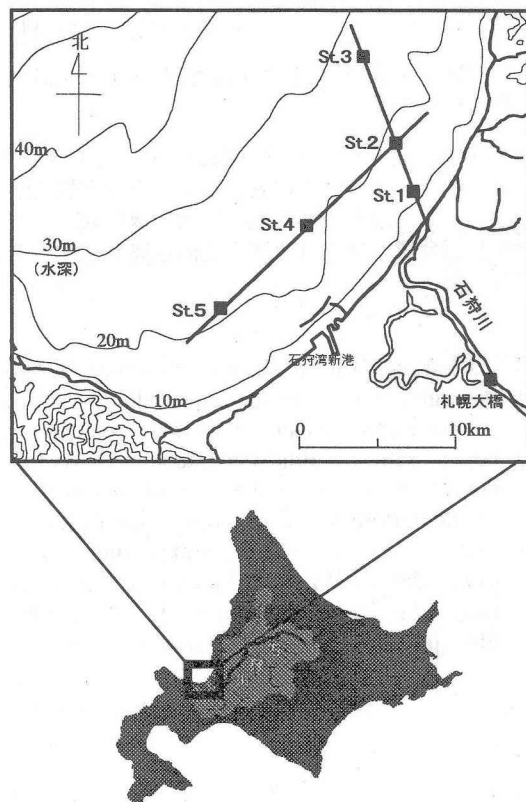


図-2 観測地点

## 3. 河川からの流出物質特性

図-3に夏期洪水時の河川流出したSS、ケイ酸態ケイ素(SiO<sub>2</sub>-Si)、硝酸態窒素(NO<sub>3</sub>-N)、粒子性オルトリン酸態リン(P-P-O<sub>4</sub>)の流量・輸送量の関係を示す。この結果より、流量 $Q$ をm³/sの単位とした場合の各水質成分の輸送量 $L$ (g/s)を次式の様に求めた。

$$\begin{aligned} L_{SS} &= 0.55 * Q^{1.86} \\ L_{Si} &= 68.8 * Q^{0.79} \\ L_{NO3-N} &= 0.82 * Q^{0.99} \\ L_{P-O4} &= 0.00030 * Q^{1.82} \end{aligned}$$

全ての水質成分で相関係数( $r^2 > 0.95$ ,  $n=22$ )は高く、有意な相関が認められた。相関式のべき数を見ると、懸濁態であるSSおよび粒子性オルトリン酸態リンはそれぞれ1.86、1.82であった。一方、溶存態である硝酸態窒素のべき数はSSおよび粒子性オルトリン酸態リンより低い値で0.99とほぼ1で、濃度は流量によらずほぼ一定である。溶存態であるケイ酸態ケイ素のべき数は0.79とより低い値であった。

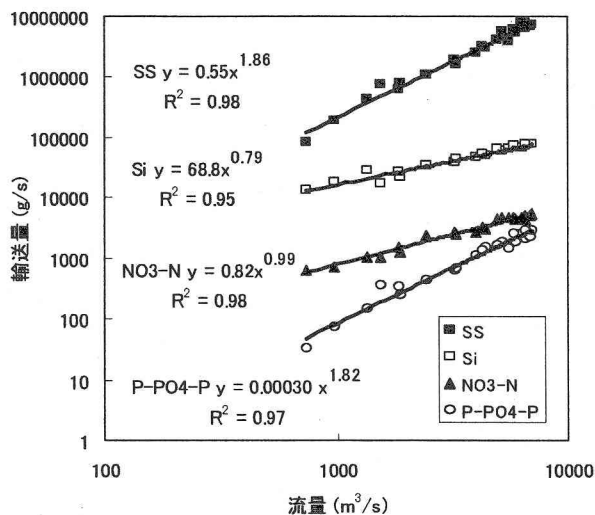


図-3 流量と物質輸送量の相関関係

山崎ら(2004)<sup>6)</sup>は2001年に石狩川から流出した無機態リンの83%が粒子性リン酸態リンであったことを示しており、石狩川から石狩湾に流入するリン負荷量を見積もるには、河川における粒子性オルトリン酸態リンの挙動を把握することが重要である。芳村と工藤(2003)<sup>7)</sup>は噴火湾に流入するリンの60%程度が粒状リンであることを示している。石狩川において、無機態リンの粒子性リン酸態リンが占める割合が高いことは特徴的である。河川水中の粒状リンは非アパタイト型リンが多く含まれており、これらは海洋環境で循環可能な無機態リンである(田中, 1993)<sup>8)</sup>。粒子性リン酸態リンは沿岸域の基礎生産者にとって潜在的に利用可能であると考えられる。田中(2003)<sup>9)</sup>が矢作川において、増水時に大量の懸濁態リンが負荷されることを示したと同様に、石狩川においても、増水に伴い粒子性オルトリン酸態リンが沿岸域に流出している。粒子性オルトリン酸態リンのべき数が1.82と高いのは、増水時に河床堆積物を懸濁させて洗い出しているためと考えられる。一方、ケイ酸態ケイ素は堆積物からの溶出効果よりも、流量が増加することによる希釈効果が大きいいため、べき数が小さくなっていると考えられる。

図-4に河川流量、中央粒径および粒径濃度推移を示す。河川流量は9月12日7時に最大流量7020  $\text{m}^3/\text{s}$ を記録した。中央粒径は最大流量の前にそのピークを迎えている。粒径濃度推移を見るとより大きな粒径の濃度から順次ピークを迎えており、68.97  $\mu\text{m}$ 以上の粒径の最大濃度時は中央粒径の最大時と一致する。この図には示していないが、より細かい粒径区分で見ると洪水ピーク時には5~30  $\mu\text{m}$ 程度の微粒径の成分が多く流下することがわかった。

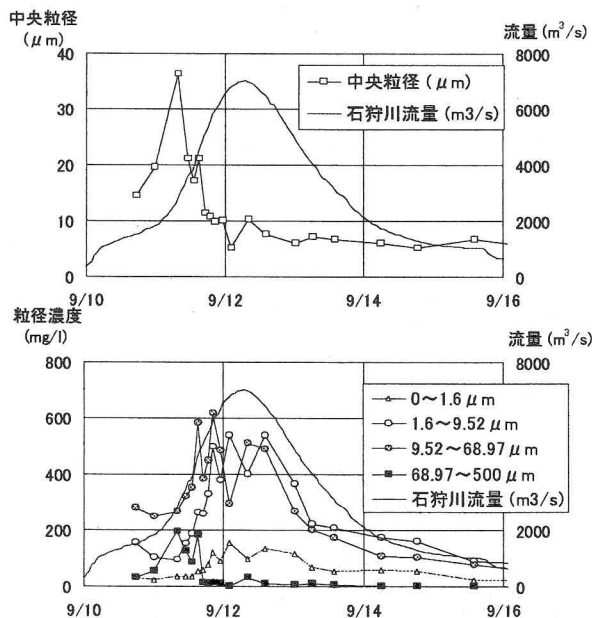


図-4 河川流量、中央粒径(上図)および粒径別濃度の推移(下図)

#### 4. 海域水質変動

図-5はSt.2における水温の鉛直分布の時系列である。洪水発生直後から終了時まで低温水の水塊が中層から底層に確認できる。河川による淡水流入は内湾の海水交換の基本となる鉛直循環を発達させる(宇野木, 2001)<sup>9)</sup>ことが知られている。石狩湾は開放性の強い湾であるが、河川水の大量流出に伴い、下層から河口に向かう河口循環流が発達したと考えられる。表層部は低温(15~18°C)の河川水の大量流入が続くため、上下の低温水水塊に高温水水塊(水深5m付近)が挟まれる状態となっている。

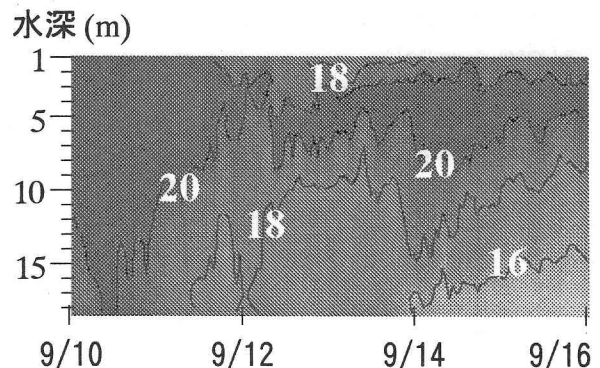


図-5 St.2における水温時系列変動(2001)

図-6に河口域のSt.1, 2, 3の水温・塩分・濁度についての断面分布を示す。左図が洪水時の9月13日、右図が洪水後2週間の27日である。13日を見ると図-5で示された高水温が低水温に挟まれる状態が河口海域の広範囲で見られる。塩分34‰の境界層が水深約10m付近にまで達しており、河川水と海水があまり混合せず成層化している。また、表層で50mg/lを超える濁度がSt.3まで達している。同図で9月27日を見ると水温はほぼ全層で一定となり塩分33‰の境界層が水深約10m付近にまで低下しており、13日に低層にみられた34‰以上の高塩分の水塊は見られない。濁度も低下しSt.1近傍に約50mg/lの濁水が停滞するのみである。

図-7に各観測地点における9月13日、20日、27日の硝酸態窒素、リン酸態リン、クロロフィルa濃度を示す。洪水時の13日は各地点の硝酸態窒素およびリン酸態リンが上層の水深1mで高濃度(最大値、 $\text{NO}_3\text{-N}$ : 0.45mg/l,  $\text{PO}_4\text{-P}$ : 0.018mg/l)を記録しているがクロロフィルa濃度は低濃度(最大値、Chl-a: 1.6  $\mu\text{g/l}$ )であった。この理由として洪水直後(13日)の海域表層は、植物プランクトンが増殖する時間があまりなかったことの他に、濁度が広範囲で高いため植物プランクトン増殖に必要な十分な光量を得られなかったこと、河口循環流などの発達により水塊が不安定であったことが考えられる。

洪水終了から1週間および2週間後の9月20日、27日の栄養塩は低濃度(表層,  $\text{NO}_3\text{-N}$ :  $0.01\text{mg/l}$  未満 $\sim 0.3\text{mg/l}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ :  $0.003\text{mg/l}$  未満)で、クロロフィルaは高濃度(表層,  $\text{Chl-a}$ :  $2.7\sim 8.5\mu\text{g/l}$ )であった。

9月13日と9月27日の水塊構造が異なっている(図-6)のは、淡水と海水の混合が生じたこと、または異なった水塊が移流したことのどちらかが考えられる。夏季の石狩湾は貧栄養状態であるので、9月20日、27日の高クロロフィルaは洪水によって供給された栄養塩を利用して植物プランクトンが増殖したものと考えられる。高クロロフィルa水塊は表層のみならず、中層および下層に滞留しているため、洪水終了後に大規模な移流が生じたとは考えにくい。つまり、洪水終了後の1週間および2週間後の水塊には淡水と海水の混合が生じたと考えるのが妥当である。洪水発生後、流量が低下すると、全ての粒径濃度は減少するため(図-4)、海域への濁水の供給は比較的短期間であると考えられる。河川から供給された懸濁粒子は海水との混合過程で凝集して沈殿するため、沿岸域の濁度は低下し、植物プランクトンの増殖に有利な環境が形成されたと考えられる。植物プランクトン増殖後の河口沿岸域の栄養塩は、窒素は存在するがリンが枯渇している。夏季の石狩川

河口沿岸域において、リンが植物プランクトン増殖の制限要因となっていると思われる。

図-8(a)に2001年9月の石狩川流量を、図-8(b)にSt.2水深1mのD- $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度変化を示す。石狩川流量が大きいときSt.2のD- $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度も高いことがわかる。ここではD- $\text{PO}_4\text{-P}$ について、溶存態成分の濃度は単純な混合現象であれば河川水と海水の混合比から計算できるので、河川水中のD- $\text{PO}_4\text{-P}$ と河川水の影響のないSt.2の水深5mでのD- $\text{PO}_4\text{-P}$ が混合したとして計算値を求め、実測値である水深1mでの濃度と比較した。また、河川からは粒状性オルトリン酸態リンの溶解によってリンが供給されるが、粒状性オルトリン酸態リンはSSに吸着しており、河川のSSにおけるリンの形態としてはAl-P, Ca-P, CDB-Pが挙げられる。Al-P, Ca-Pは安定しているがCDB-Pには反応性があり、CDB-PにはFe-PとAds-Pが存在するが、Fe-Pが嫌気条件で溶出するのに対し、Ads-Pは好気条件で溶出する。そこで河川の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し、懸濁態からのリンの溶出を考慮した。なお、Ads-PはSS1g中に $70\mu\text{g}$ 存在するとして計算している。計算結果を図-8中に示しているが、D- $\text{PO}_4\text{-P}$ の変化については概ね再現でき、懸濁態からの溶出を考慮することで実測値に近づくことがわかる。

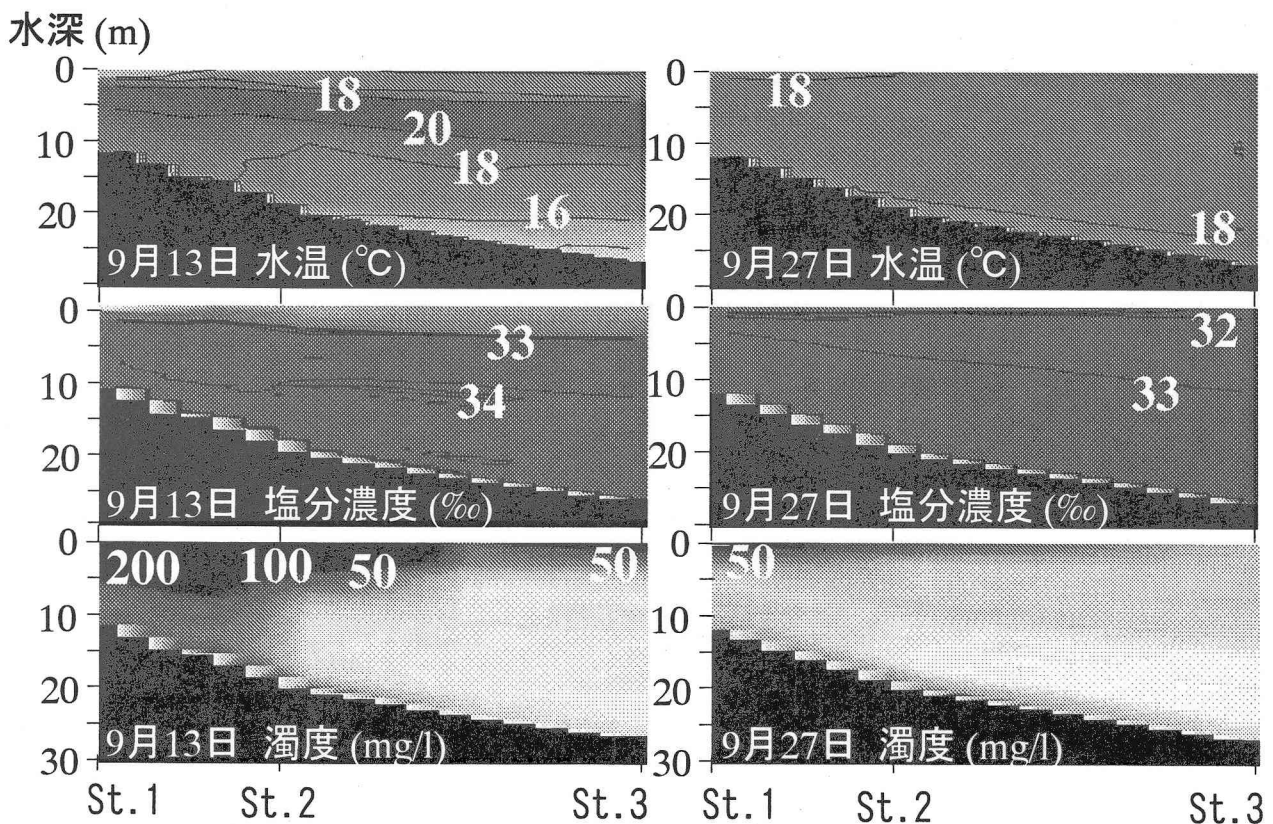


図-6 河口断面部における水温、塩分、濁度、左図：2001年9月13日、右図：2001年9月27日

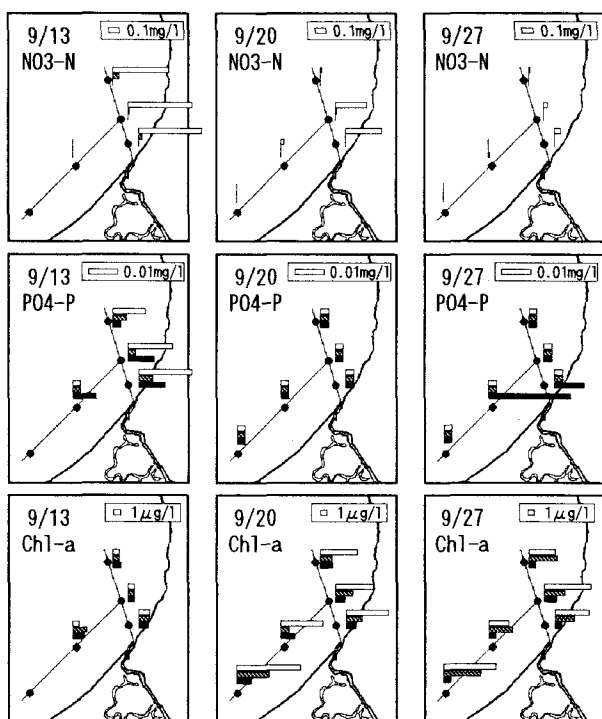


図-7 2001年9月13日(左) 20日(中) 27日(右)における  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{Chl-a}$  (白棒: 水深 1m, 灰棒: 水深 5m, 黒棒: 水深 20m 付近)

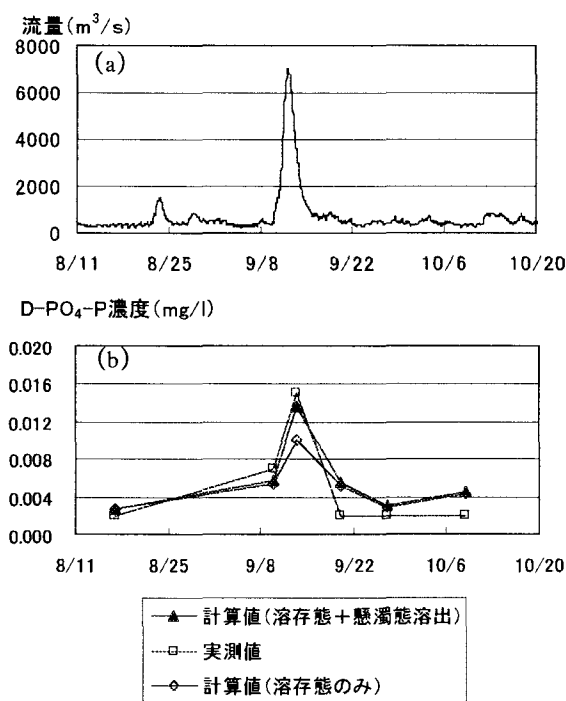


図-8 石狩川流量と  $\text{D-PO}_4\text{-P}$  の濃度変化 (2001)

## 5. まとめ

洪水時の流量と物質濃度の関係より、懸濁物質および粒子性リン酸態リンは河床堆積物や流域から多く供給されていると考えられる。また、硝酸態窒素

およびケイ酸態ケイ素は洪水により低濃度になる。これは堆積物からの供給よりも、増水にともなう希釈効果が強いためである。

洪水直後の河口域の底層水は低水温、高塩分であった。これは、河川水の大量流出によって、強い河口循環流が形成されているためと考えられる。洪水直後の沿岸水は低クロロフィル濃度で高濁度であったが、1週間後は高クロロフィル濃度、低濁度となった。1週間後に高クロロフィル濃度となったのは、洪水により河川から栄養塩が供給されたためである。植物プランクトンの増殖応答に約1週間を要したのは、洪水直後は高濁度で光合成における光条件が悪かったためと考えられる。洪水後の石狩湾において、プランクトンの増殖条件として、濁度は重要な要因の1つである。

石狩湾は開放性の強い湾であるため、河川流出物質の海域滞留特性には湾全体の流動特性が重要である。今後、現地観測による流動特性の把握と低次生産を対象とした生態系モデルによる数値解析を実施し比較検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) Horne, A. J. and C. R. Goldman: Limnology, McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.
- 2) Amo, Y. D., O. L. Pape, P. Tregure, B. Queguiner, A. Menesguen, and A. Aminot: Impacts of high-nitrate fresh water input on macrotidal ecosystems. I. Seasonal evolution of nutrient limitation for the diatom-dominated phytoplankton of the Bay of Brest (France). Mar. Ecol. Prog. Ser., 161, pp.213-224, 1997.
- 3) McClelland, J. W. and I. Valiela: Changes in food web structure under the influence of increased anthropogenic nitrogen inputs to estuaries. Mar. Ecol. Prog. Ser., 168, pp.259-271, 1998
- 4) 山下俊彦, 梅林 司, 菅沼 剛, 齊藤大作, 山崎真一: 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, 2002
- 5) 田中勝久, 豊川雅哉, 澤田知希, 柳沢豊重, 黒田伸郎: 土砂流出によるリン負荷の沿岸環境への影響, 沿岸海洋研究, 40, pp.131-139, 2003.
- 6) 山崎真一, 山下俊彦: 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, 土木学会水工学論文集, 第 48 巻, pp.1231-1236, 2004.
- 7) 芳村 毅, 工藤 勲: 噴火湾における河川からの栄養塩負荷量, 海の研究, 12(2), pp.185-193, 2003.
- 8) 田中勝久: 沿岸海域底泥の形態別リン組成とリン循環におよぼす河川負荷懸濁物の影響, 水産海洋研究, 57, pp.345-352, 1993.
- 9) 宇野木 早苗: 川と海の関係—物理的観点から—, 沿岸海洋研究, 39, pp.69-81, 2001.