

水工学シリーズ 04-B-8

開放性の強い石狩湾での 水質変動と河川水・外洋の影響

北海道大学大学院工学研究科 助教授

山下 俊彦

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会
2004年7月

開放性の強い石狩湾での水質変動と河川水・外洋の影響

Characteristics of Water Quality Change and Influences of River Water and Outer Sea Water in Opened Ishikari Bay

山下 俊彦

Toshihiko YAMASHITA

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)、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)。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。

ここで対象とする石狩湾は比較的開放性の強い湾で、水深 120mまでは約 1/500 の緩勾配の広大な砂浜海域が広がり、その沖は約 1/30 の急勾配で水深 700mまで深くなっている(図-1)。石狩湾口では水深 150m以深に比較的高い栄養塩の水塊が存在し、石狩湾の砂浜海域への主な栄養塩供給の要因としては、石狩川流出水(洪水期)の他に深い水深帯の水塊の湧昇(夏期)と鉛直混合(冬期)がある。また、基礎生産等沿岸環境を検討する上では、流動による物質の海域滞留特性を把握することが重要であるが、開放性沿岸域の流動特性は不明な点が多いのが現状である。

河川での物質輸送に関しては、橘(1993)、渡邊ら(1999)は、洪水時に栄養塩は多量に流出し、リン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。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等がある。石狩湾沿岸海域への外洋流動の影響に関しては、内部波に着目した瀬戸ら(2000)の研究がある。

ここでは、大河川である石狩川が流入する開放性の強い石狩湾沿岸域を対象として、周年の水質変動特性、河川からの栄養塩供給特性、河川懸濁物質の海域での凝集沈降特性、底質の巻き上げと水質変動特性、石狩湾外部での水質特性、石狩湾広域の流動特性について述べ、石狩湾沿岸域での水質変動特性と河川水・外洋の影響について考察する。以下は主に、山下ら(2002a)、山下ら(2002b)、山下ら(2003)、山崎ら(2003)、山下ら(2004a)、山下ら(2004b)、山下ら(2004c)、王ら(2004)、山崎ら(2004)の調査結果を基に述べる。

2 調査概要

図-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 268km, 流域面積 14330km²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。海域の調査地点は 18 点である。水質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 14.5km 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。

流動観測については、St.14（水深 700m）と St.7（水深 44m）, St.13（水深 40m）の 3 地点において 2003 年の 6~8 月夏期に、ADCP と水温計による流速と水温の連続観測を実施した。

濁度と光減衰については、2003 年 3 月~6 月に St.15~18（水深 10m）で塩分（表層から 1.0m と 4.5m）, 濁度（表層から 4.0m）, 光量子（表層から 1.5m, 3.5m, 7.0m）の連続観測を実施した。

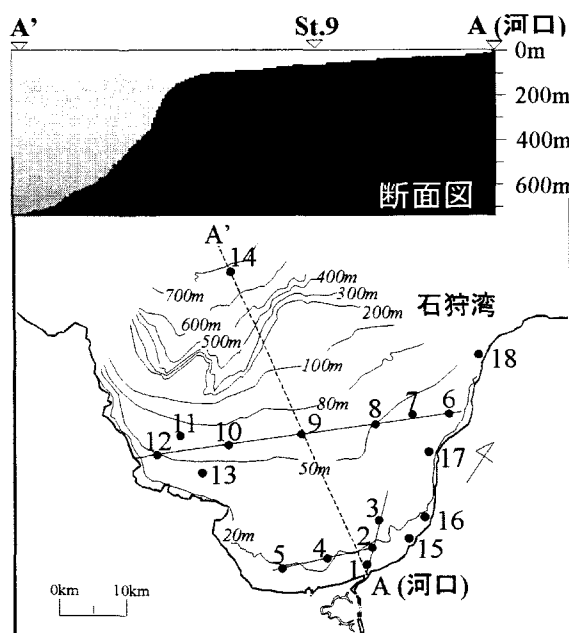


図-1 観測地点(下)と石狩湾海底断面図(上)

3 水質変動特性

3.1 石狩湾広域の水質特性

図-2に 1982 年 6 月における、石狩湾の水深 0m, 50m での硝酸態窒素, リン酸態リン, 塩分の各濃度の空間分布を示す。水深 0m の図から、湾奥部で低塩分, 高栄養塩であることがわかる。これは石狩川から流出した河川水によるものと考えられ、比較的低流量時である 6 月にもかかわらず、その影響が浜益沖にまで達している。またコリオリ力により河川水が汀線を北上するように流出していることもわかる。水深 50m の図から、st. A, B, C, D で栄養塩濃度が高くなっていることがわかる。この理由としてはこの海域は急深な海底面が存在し、地形性湧昇流が発生し深層の豊富な栄養塩が巻き上げられたものと推察される。このように同じ石狩湾でも水質の傾向が地点により異なるため、湾外部・湾奥部・湾口部に分けて考察する。

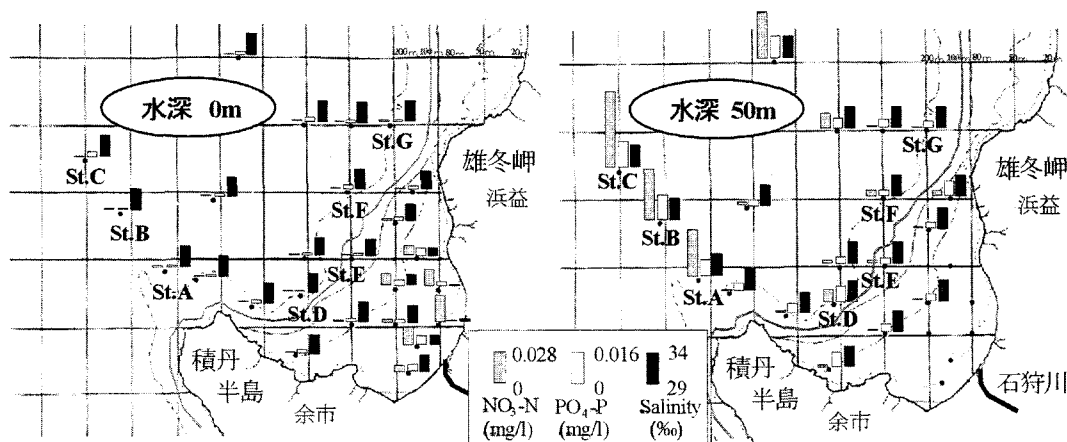


図-2 1982年6月の各水質の空間分布(左:水深0m 右:水深50m)

3.2 湾外部水質特性

図-3に1982年6月のst.A～Gの水温・硝酸態窒素濃度の鉛直分布を示す。どの地点でも30m以浅は貧栄養であるが、水深が深くなるにつれ水温は低下し、硝酸態窒素濃度は増加する。約水深300m以深では水温・硝酸態窒素濃度ともに安定することがわかる。低水温・高栄養塩水である深層水の存在が確認される。また、st.B, Cでは水深約300m以浅に低水温で高栄養塩の水塊が存在する特徴的な変化を示している。これは上述のように、この海域では神威海脚により、より深い海域からの湧昇流が発生しているものと考えられる。

図-4はst.Aの周年の水温・硝酸態窒素濃度の変化を表したものである。6月の水温は大気により温められて表層ほど高くなっていて水温躍層が発達している。その後冬期から春期までは水深約100mまで水温は一定となり、鉛直混合が起こっているものと考えられる。一方、硝酸態窒素濃度は3月の水深約100m以浅で高濃度である。鉛直混合により底層の豊富な栄養塩が表層にまで巻き上がったためと考えられる。水深約50m～100mでは6月の濃度が高いが、これは前述の湧昇流の影響がst.Aにまで及んでいるためと考えられる。水深約300m以深では水温・硝酸態窒素濃度ともに年間を通じてほぼ一定であることがわかる。

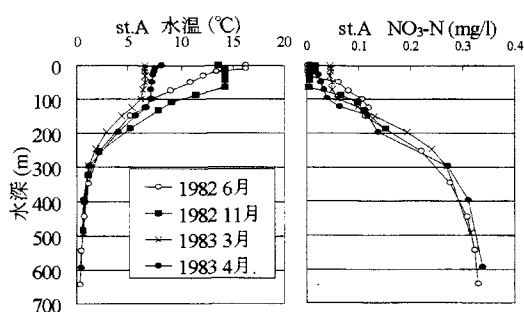


図-3 6月の湾外部の水温・NO₃-Nの鉛直分布

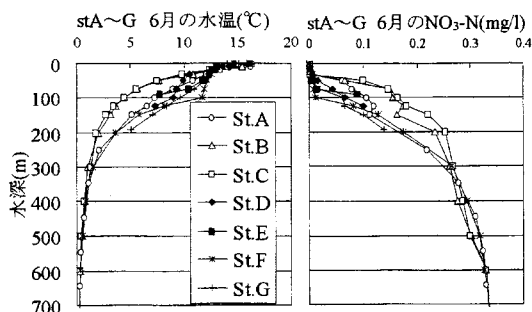


図-4 st.Aの周年の水温・NO₃-Nの鉛直分布

3.3 湾奥部水質特性

図-5は2001年3月から2003年3月における石狩川河口から5km地点にあるst.2での採水による硝酸態窒

素濃度の時系列変化と、同測点でのクロロテック計の定点連続観測によるクロロフィルa濃度の時系列変化を示している。これによると硝酸態窒素は2年ともほぼ同じような変動を示している。海域表層である水深1mの硝酸態窒素濃度の変動が極めて大きく、2001年4月・7月・9月、2002年の4月に石狩川で発生した出水とともに濃度が増加していて、2002年の1月、2003年の12月にも高濃度を記録している。水深5mの中層と水深17.5m付近の下層は2001年4月と2002年2月・12月、2003年の2月に極大値を示している。冬期の各層の濃度上昇はより深い海域での鉛直混合により供給された高栄養塩水に起因しているものと考えられる。

クロロフィルa濃度は、融雪期の2001年4月に約 $3\mu\text{g/l}$ で一度ピークがあり、その後しばらく低濃度が続く。7月の石狩川流量増大後に濃度が増加し、9月の大出水後、2～3週間は高濃度が続く。その後はしばらく低濃度で推移し、2002年1月下旬～2月上旬に $6\mu\text{g/l}$ の高濃度を示している。2002年度もほぼ同様な変化を示している。ここには示さないがリンの濃度変化も含めて、2001年の4月、7月、9月のクロロフィルa濃度の上昇は石狩川の出水により流出した多量の栄養塩によるもので、2002年2月の増加は外洋の鉛直混合による栄養塩増加による植物プランクトンの増殖と考えられる。また、2年とも12月～1月は高栄養塩であるにもかかわらず、クロロフィルaは低濃度である。これには、プランクトン種の交替や日射量が関係していると考えられる。

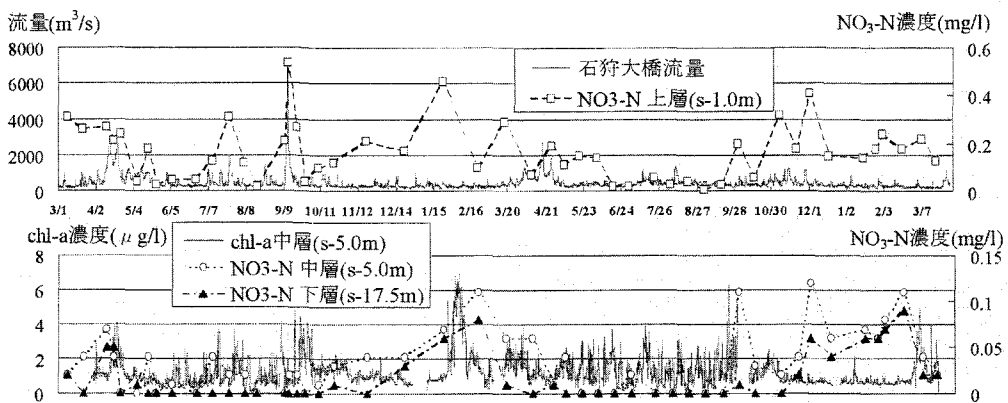


図-5 石狩川流量とst.2のNO₃-N・chl-a濃度の時系列変化

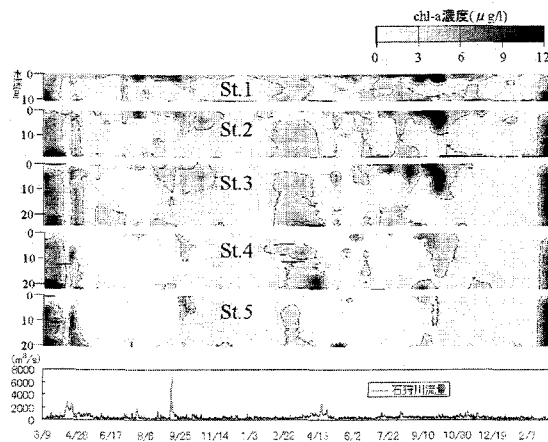


図-6 st.1～5のchl-a濃度の時系列変化

図-6にクロロテック計による、st.1～st.5までのクロロフィルa濃度の鉛直分布の時系列変化を示す。各地点はそれぞれ2年ともほぼ同様な変動を示している。河川水の流出する方向にあるst.1～3は融雪洪水や夏期洪水の影響を受け、その時期に上層でクロロフィルa濃度が上昇していることがわかる。一方、st.4、st.5は河川水の影響をあまり受けないのでst.1～3に比べて夏期にクロロフィルa濃度の低い領域が全層的に多い。全地点とも冬期から春期にかけて底層付近が最も濃度が高く、夏期から秋期にかけては表層の濃度が高い。つまりこの海域は、主に冬期から春期には外洋由来の栄養塩によって、また春期から秋期にかけては河川由来の栄養塩で植物プランクトンが増殖していると考えられる。

3.4 湾口部水質特性

河口よりほぼ同距離にあるst.7とst.11の水質変動特性について考察する。図-7は2地点のクロロテック計の計測によるクロロフィルa濃度と水温、塩分濃度及び採水による硝酸態窒素、リン酸態リン濃度の水深毎の時系列変化を示している。

水温は春期から夏期にかけて徐々に温まり、8月～9月に温度成層が最も顕著となる。10月頃になると成層は表層より徐々に壊れ、冬期は水深70mの海底まで水温が一定となる。一方、栄養塩濃度は観測開始時である4月下旬こそ上層・中層の栄養塩濃度は高いが、その後は両地点ともst.7の硝酸態窒素濃度を除き下層の濃度が高い。4月下旬の全層的な高濃度は、石狩川の融雪出水による栄養塩流出の影響や、冬期から春期にかけて起こる鉛直混合による、より深い海域の下層からの栄養塩の供給によるものであると推察される。その後植物プランクトンによる消費と、水温上昇に伴う成層化による深い海域からの栄養塩供給の遮断により上層・中層は貧栄養化が進む。一方植物プランクトンの活動がそれほど活発ではなく、より深い海域との海水交換も可能である下層は高濃度状態が続くものと考えられる。また水深約30m以深の水温を見ると、6月中旬～下旬のst.11と、8月～9月のst.7、11に低下領域が見られ、同時期の塩分濃度を見ると、約34‰の高濃度である。同じく

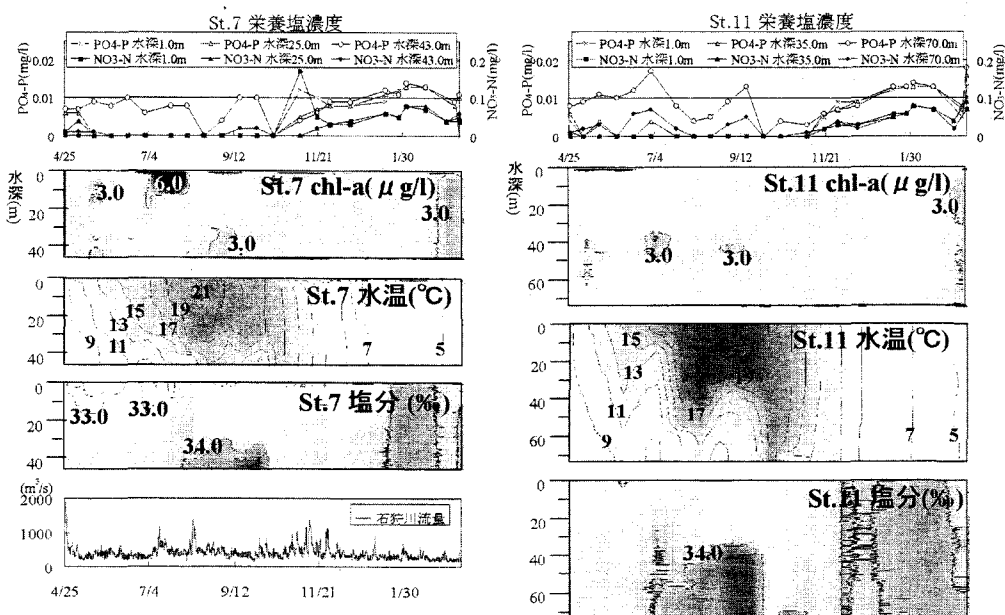


図-7 st.7, st.11の栄養塩濃度とchl-a濃度、水温、塩分濃度の時系列変化

同時期の栄養塩濃度をみると、下層で濃度上昇が確認されることから、外洋から栄養塩を豊富に含んだ深い水深帯の低水温水塊の上昇、つまり湧昇流がこの時期に発生しているものと考えられる。この時期にクロロフィル a 濃度の上昇が確認できることから、湧昇流がこの海域の植物プランクトンの増殖に寄与していることがわかる。またこの時期の st.11 は st.7 に比べ水温・栄養塩濃度ともに変動も激しいことがわかる。st.11 のように水深約 100m 以深に急深な海谷がある石狩湾の南西側ではこの湧昇流の影響を受け易いことも考えられる。栄養塩濃度はその後、11 月下旬から鉛直混合により 2 地点とも全層で同様な濃度上昇を示し、2 月上旬にピークを迎えている。その後クロロフィル a 濃度は 2 月～3 月に全層的に上昇している。この時期の植物プランクトンの増殖は前述した同時期の st.1～st.5 と同様のものであると考えられる。

図-8 は前述で湧昇流が発生していると推測された 2002 年 7 月 1 日、9 月 3 日、全層的なクロロフィル a 濃度の増加が見られた 2003 年 3 月 18 日の水温、塩分濃度、及びクロロフィル a 濃度の空間分布を表している。コリオリ力を受け、汀線を北上するように流れる石狩川の河川水により、7 月 1 日、9 月 3 日も st.6, 7, 8 の表層では塩分濃度が低下している。また同地点でクロロフィル a 濃度が上層で増加していることから、この増殖は河川由来の栄養塩によるものであると推察される。また湧昇流の影響を受けていると思われる 7 月 1 日の st.9～12、9 月 3 日の全地点では水深約 30m 以深で、低水温かつ高塩分濃度(34‰)である。またその上層の水深 30～50m でクロロフィル a 濃度が増加していることもわかる。ここに示した例では、浜益側である st.6, 7, 8 の海域は河川水が流入していて、表層で植物プランクトンの増殖が起これ、一方近くに急深な海谷のある st.9, 10, 11, 12 の海域では河川水の影響はあまり受けず、深い海域からの湧昇流によって、植物プランクトンが増殖していることが考えられる。9 月 2 日の例では浜益側でも湧昇流に伴う植物プランクトンの増殖が発生している。3 月 18 日は全地点・全層でほぼ水温が一定であり、鉛直混合が活発に起こっていることがわかる。またクロロフィル a 濃度の増加は他の日と異なり全層的に、特に st.6, 7, 12 で増加している。春期の植物プランクトンの増殖が、一様に水深 50m の海域にまで達していることがわかる。

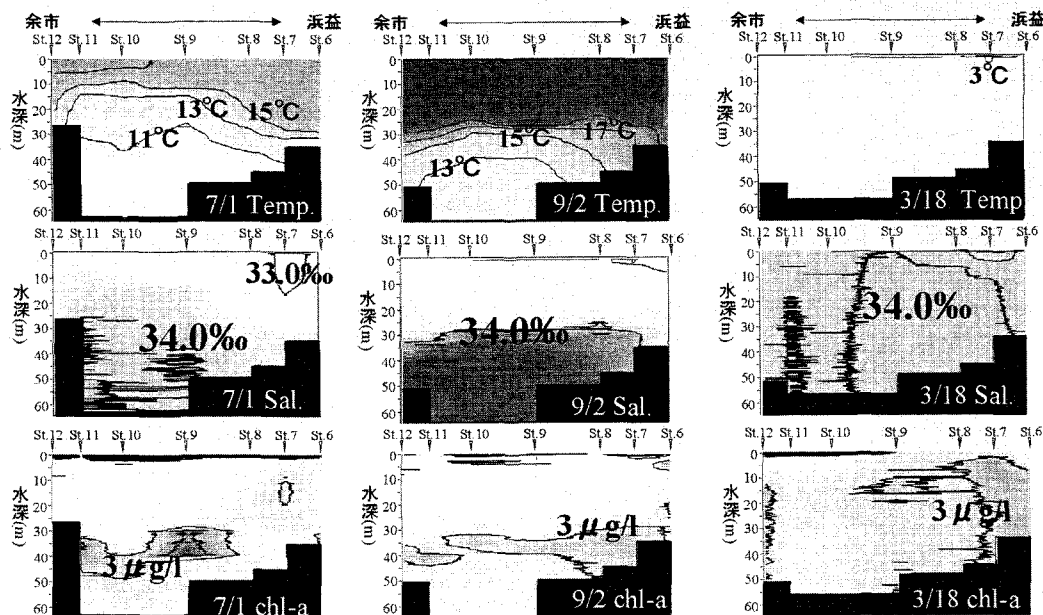


図-8 2002 年 7 月 1 日、9 月 2 日、2003 年 3 月 18 日の水温・塩分濃度・クロロフィル a 濃度の空間分布

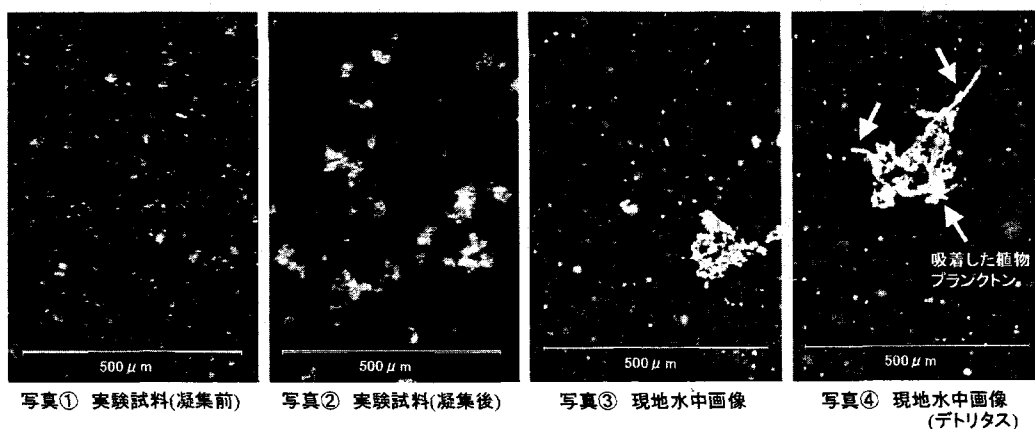
4 海域での河川懸濁物の挙動と水質

河川から海域へは粗粒土砂に加えて大量の微細土砂が懸濁粒子として流出する。この細粒成分は栄養塩類や人工の有害イオンを吸着・含有し、河口域で海水と混合するとフロックを形成し、海底に沈降しやすくなる。粒子性オルトリン酸態リン ($P-PO_4-P$) は反応性があり (田中, 1994), 海域に流出した場合に PO_4-P の溶出・吸着が発生する。また, 開放性水域では底質からの栄養塩の溶出は, 波により頻繁に発生する底質の巻き上げの影響が大きいと考えられる。さらに, 沿岸域の一次生産には光環境が重要であり, 河川流出した懸濁物, 底質の巻き上げの影響があると考えられる。

4.1 河川水中の懸濁粒子の海水混合による凝集・沈降特性

写真①②は各々凝集実験前と後の顕微鏡写真, 写真③④は現地の塩水楔海水中的水中顕微鏡写真である。写真①の洪水水中懸濁物質 (中央粒径 $d_{50}=17.5\mu m$: 画像解析による) には, 種々の粒径や物質が存在するが, 大きめの粒子は鉱物質の細粒土砂である。写真②は室内実験の場合であり, 微細粒子が減少し $45\mu m$ 程度のほぼ同じ大きさに凝集していることがわかる。写真③は日時は異なるが現地(kp6.5, 水深 8.5m)の凝集状態であり, 写真②とは異なり微細粒子もある程度存在する一方, 大きな凝集も存在し粒度分布が広がっている。これは, 現地の懸濁粒子は凝集・沈降・再浮上を繰り返したものであることが一つの要因と考えられる。

また, 実験とは異なり平水時の河川水中には多くの植物プランクトンなどの有機物が存在し, 凝集する際にはこれも共に凝集するため, 写真④(kp6.5, 水深 4.0m)のようにデトリタスを含んでフロックを形成していることが多く, 現地観測でもよく見られた形態のフロックである。



懸濁物の凝集には, 攪拌強度 G (1/s), 懸濁物質濃度 SS (mg/l), 塩分濃度 C (psu) と攪拌時間が関係する。最終フロック粒径 d_{∞} は塩水と海水による違いはあるものの塩分濃度 c による影響はほとんど受けず, 濁質濃度 SS と攪拌強度 g に反比例することがわかった。そこで, 図-9 に最終フロック粒径 d_{∞} を濁質濃度と攪拌強度の積で整理したものを示す。これを見ると, d_{∞} と d_0 (凝集前) の比は濁質濃度と攪拌強度の積が大きいほど小さく, 両者の積の値からある程度, 最終凝集粒径を推定できることがわかる。また, 実海水の場合の方が d_{∞}/d_0 が大きく凝集が活発であることもわかる。

フロックの沈降速度の結果を図-10 に示す。図中には抵抗係数 $C_D=Re/24$ で水中有効密度 $\rho_e=1.65g/cm^3$, 及び $\rho_e=1.65, 0.5, 0.1g/cm^3$ で $C_D=Re/45$ の場合の粒子径と沈降速度の関係を図中に示している。 $C_D=Re/24$ は球体を, $C_D=Re/45$ は丹保ら (1967) がフロックの粒子形状を正八面体を仮定して用いた値である。凝集径が大きくなる

に従い沈降速度が大きくなること、また、沈降速度にばらつきが大きくなり、比較的有效密度もしくは抵抗係数に幅があることがわかった。このことは、これらの懸濁物質の凝集特性がある程度の幅を持っていることを示している。なお、 $C_D=Re/24$ 、 $\rho_e=1.65\text{g/cm}^3$ 上にある粒子はフロックを形成していない可能性がある。有効密度 ρ_e は 0.1g/cm^3 程度より大きな値を示すことがわかる。沈降速度と凝集径の関係を最小二乗法により求めると、凝集径の約0.8乗に比例して増加する結果となった。この乗数は小田ら（1999）がベントナイトで実施し得た値0.26乗に比較すると大きな値となった。

図-11に各試料の有効密度と凝集径の関係を示す。有効密度は $C_D=Re/45$ の場合の値を用い算出した。石狩川の場合、粒径の-1.2乗に比例している。小田ら（1999）の得た有効密度（ $\rho_e=99.7d^{-1.74}$ 、 $\rho_e:\text{g/cm}^3$ 、 $d:\mu\text{m}$ ）を図中に示した。その結果、今回の実験で求めた有効密度は、小田らの実験に比べ値が大きく、また凝集径との乗数も小さく、いわゆるしまり工合の良いフロックであることがわかった。

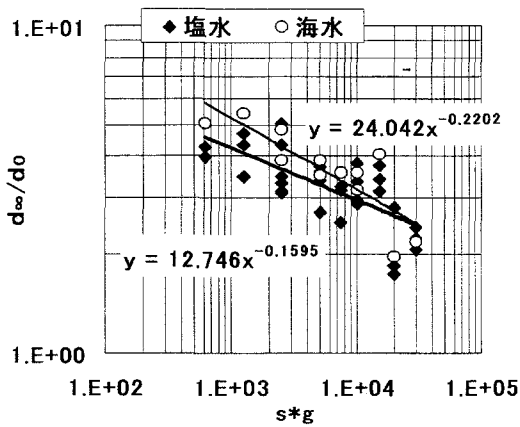


図-9 最終フロック粒径

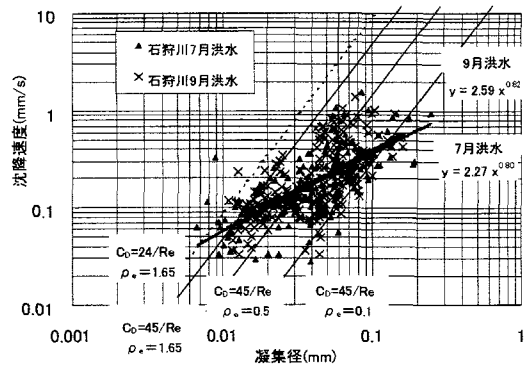


図-10 凝集径と沈降速度の関係

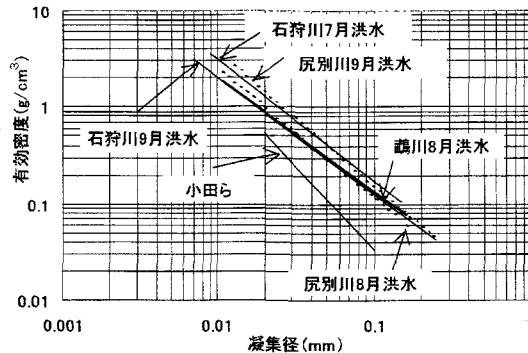


図-11 フロックの有効密度

4.2 懸濁態リンの海域での挙動

図-12(a)に2001年9月の石狩川流量を、図-12(b)にSt.2水深1mのD-P₀₄-Pの濃度変化を示す。石狩川流量が大きいときSt.2のD-P₀₄-Pの濃度も高いことがわかる。ここではD-P₀₄-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-P₀₄-Pと河川水の影響のないSt.2の水深5mでのD-P₀₄-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 PO_4 -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 $70\mu g$ 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- PO_4 -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。

底質の巻き上げに伴う水質変動を調べるため、自動採水器を用いて波高3.8mの高波浪が発生した場合の波高ピーク前後の採水を実施し、その結果を図-13に示す。SS濃度は18日の18時の波高ピーク時に最大となり、その後急激に低下し、20日には波高は減少しているが平均流が強くSS濃度は少し上昇している。D- PO_4 -Pは、波高、SSのピーク付近で最大 $0.017mg/l$ まで上昇し、その後徐々に値が低下するが、SSが少し上昇する20日にはD- PO_4 -Pの上昇が見られる。これは、底質の巻き上げに伴い、底質に吸着している PO_4 -Pが溶出した影響があると考えられる。

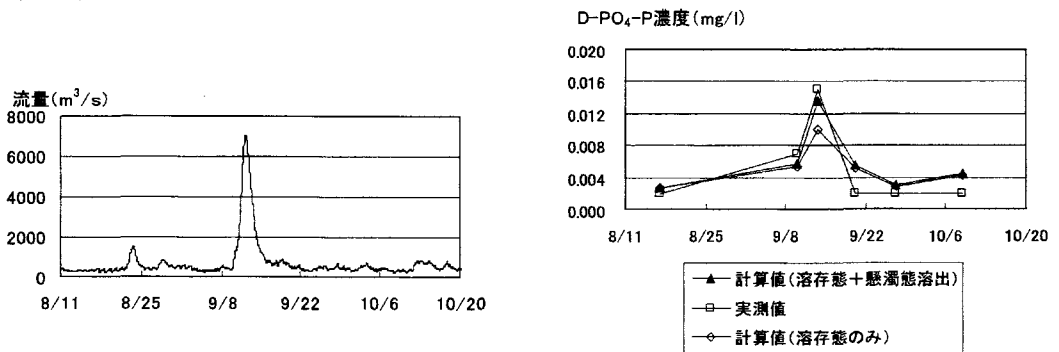


図-12(a) 石狩川の流量

図-12(b) D- PO_4 -Pの濃度変化

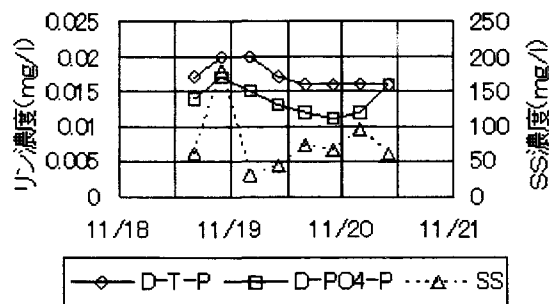


図-13 巻き上げ時の水質

4.3 河口沿岸域での光減衰・濁度特性

図-14にSt.15における2003年3月から2003年6月までの光の減衰率と濁度との関係を示す。光の減衰と濁度の相関は0.77という比較的高い値を示している。このことより、この海域では中層の濁度の値がわかればある程度の光の減衰率を知ることができる。また、St.15において観測された濁度の範囲は0から35ppmで、洪水時や高波浪時の濁度データも含まれている。

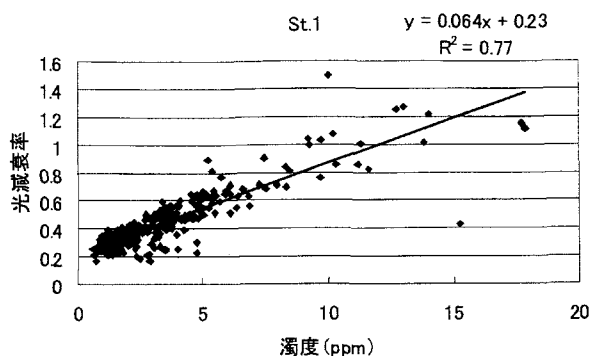


図-14 濁度と光減衰(St.15)

図-15と図-16にSt.15における3月と5月の濁度(中層), 塩分(上層と中層)と石狩湾新港沖の管理用データによる波高を示す。3月上旬の濁度の上昇は波による影響が強いと考えられる。また, 3月の下旬に上層と中層の塩分が大きく下がっていることとこの時期に1000(m³/s)をこえる融雪期の出水があったことから河川水によって濁度が影響をうけていることが考えられる。5月は濁度の上昇のほとんどが河川水の影響を受けていると考えられる。塩分は中層での変化は少ないが, 表層で大きく, St.15は河口から近いこともあり, 波浪等による混合が少なく比較的薄い表層に河川水と海水の混合水が存在することが多いことがわかる。以上より3から6月においては, 融雪前あるいは初期の3月では濁度は波浪による底質の巻き上げの影響が強く, 4から5月の融雪期は石狩川河川水の濁度の影響が大きいことが推察される。

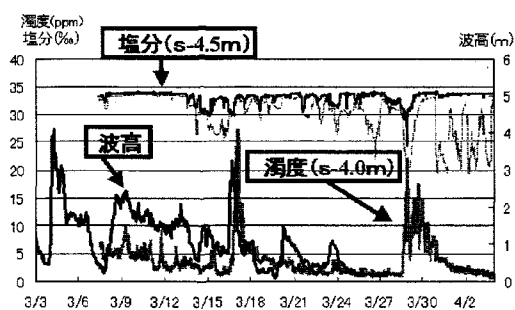


図-15 濁度と塩分、波高(St.15)

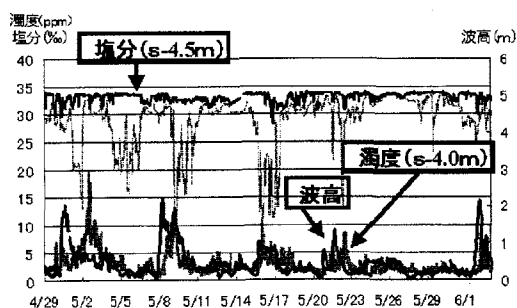


図-16 濁度と塩分、波高(St.15)

図-17と図-18に濁度と塩分の空間分布を比較するため4月下旬の全地点における濁度(中層), 塩分(中層)と石狩大橋における流量を示す。図-17よりSt.15において濁度が他の地点と比べて大きな値を示している。St.15以外は河口からの距離によらず各地点ともに大きな値の差はなかった。図-18よりSt.15と比べてSt.16やSt.17の方が塩分の低下量が多いことがわかる。表層から4.5mの中層では, St.16とSt.17の方が河川水の影響を受けやすい地点となっている。これは, 河口より流出した河川水がコリオリ力を受けて右に曲がり移動してくる地点がSt.16とSt.17の方向であることと, ある程度距離が離れた方が波浪等により河川水が海水と混合し中層まで塩分低下が発生しやすいことが重要な要因と考えられる。塩分低下が大きいSt.16やSt.17よりSt.15の濁度が高いこととSt.16, St.17とSt.18は濁度の値がほぼ同じであることより河川から流出した懸濁物質は海水と混合することにより凝集沈降する粒子とほとんど凝集や沈降をしない微細粒子があることと凝集沈降はSt.15とSt.16の間程度の比較的河口近くで終了することが推察される。

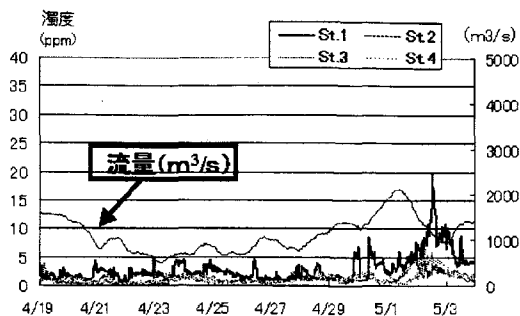


図-17 濁度の空間特性

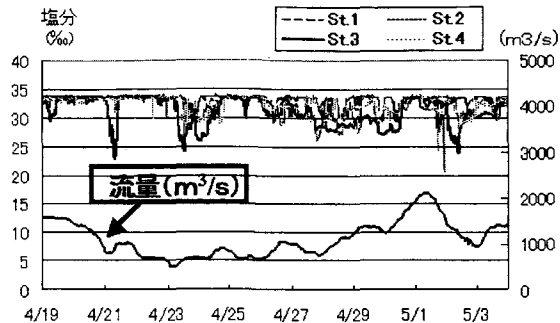


図-18 塩分の空間特性

5. 石狩湾での夏期の流動・水温変動特性

5.1 流速の時間変動特性

図-19 に湾口 St.14 における各水深の流速データを示す。St.14 での流れは上層では 15 日～20 日周期の海流成分（対馬暖流）が卓越していることがわかる。下層（水深 300m）では、図-20 に示す南北方向流速スペクトルを見てもわかるように約 16 時間の慣性周期流が卓越している。上層（水深 100m）の流速スペクトルからこの流れは上層にも存在し、流速振幅は上層の方が大きいことがわかる。海流成分は南北流が卓越し、これは対馬暖流が積丹半島で剥離して時計回りの渦ができる時には北流、暖流が積丹半島の東側に沿って南下する時には南流になるためと考察する。図-21 に St.14 の海流成分の強い 6 月 20 日における水温・流速の鉛直分布を示す。これを見ると水温も流速も水深 200m 以深ではほぼ一定となっており、海流の影響はおおよそ水深 200m までであることがわかった。

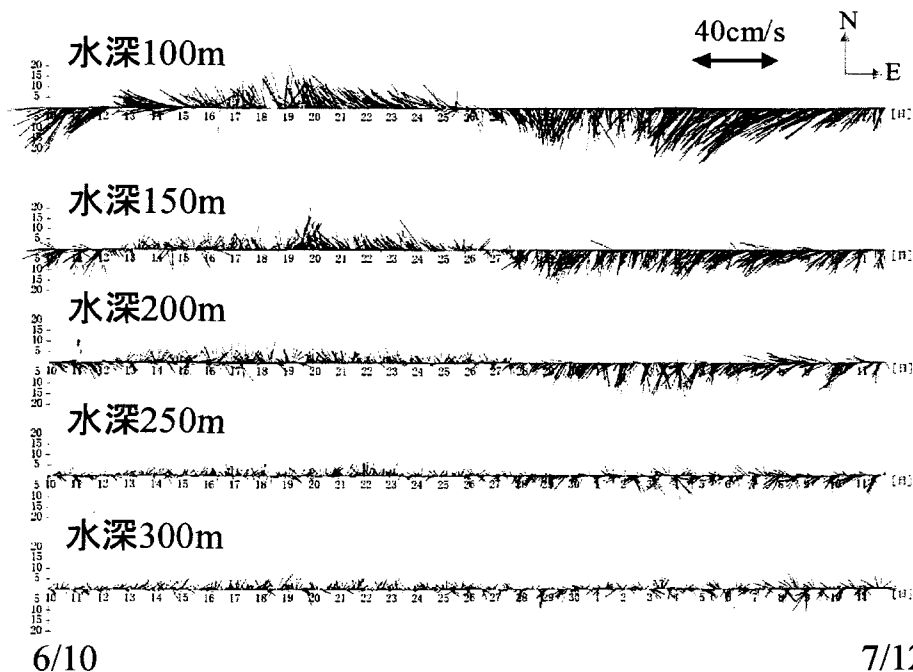


図-19 St.14 ADCP流速データ

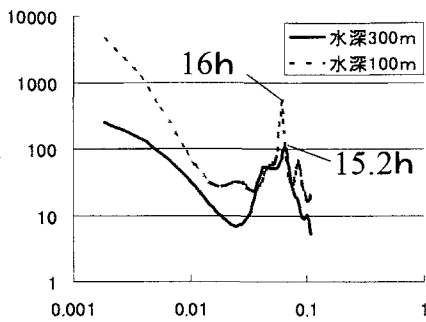


図-20 St.14 流速スペクトル(南北方向)

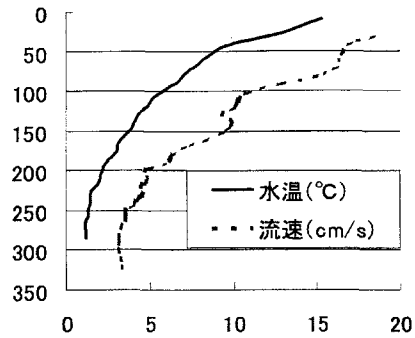


図-21 St.14 水温・流速鉛直分布

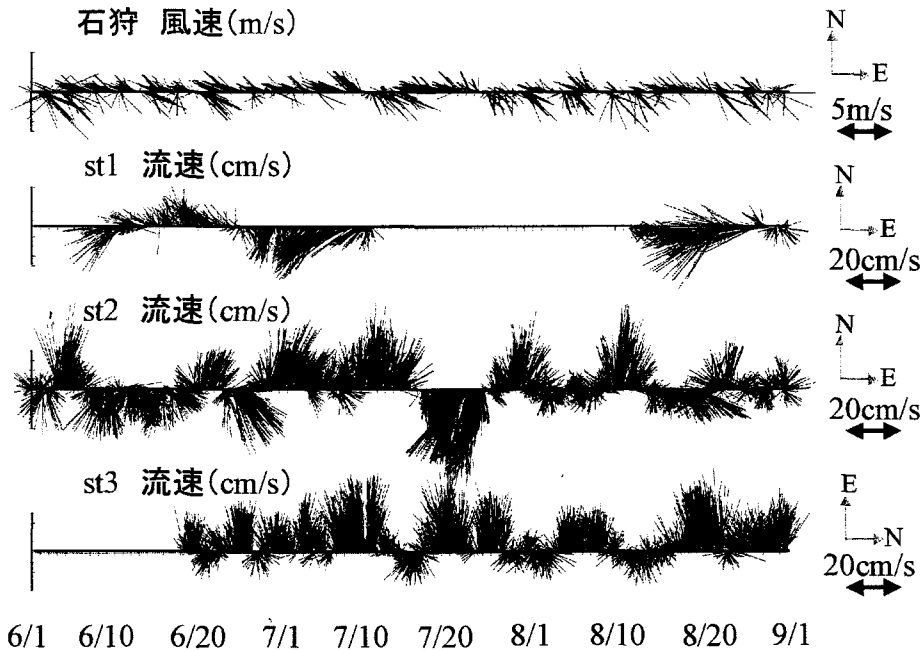
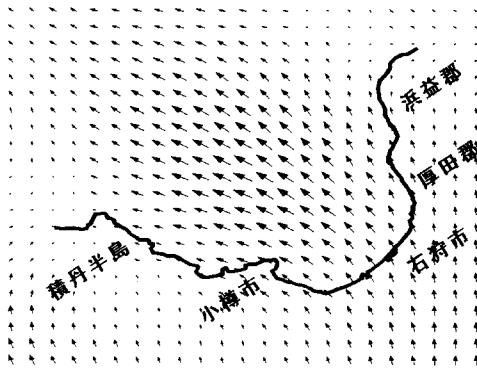


図-22 風速・流動データ

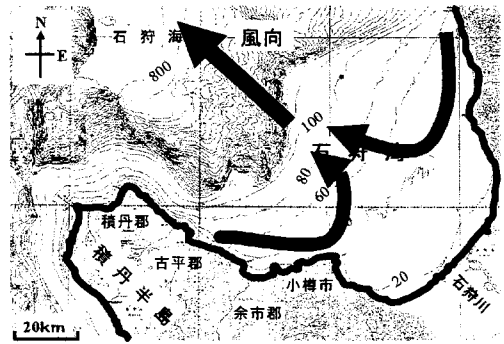
5.2 流動の空間変動特性

図-22に上から6月～8月の石狩で風速，St.1の水深100m層，St.2の中層，St.3の中層(E軸とN軸を入れ替え)での流速を示す。St.2，St.3の流速変動は風による影響が強く，数日程度の変動周期が卓越し，St.2とSt.3ではほぼ同時期に流れが変化することがわかる。

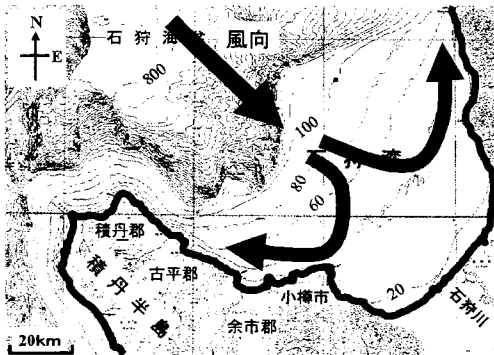
よく見られる流動パターンは次の様である。6/24，7/20，8/19等南東風が強い時期では，図-23(b)に示す吹送流の流動パターンが発生することが多い。南東風は石狩平野を吹き抜けるように吹いてくるため，図-23(a)に示す様に湾央の風速が強く，山地の風下の風速は弱く，図-23(b)のパターンの流れが発生しやすい。6/21，7/29，8/11等強い北西風時には，図-23(c)に示す流動パターンが発生することが多い。6/29～7/10の様にSt.14で流れが南西方向に強い時は，図-23(d)に示す流動パターンが発生している。これはSt.14での強い海流が湾内に流入して，石狩湾全体に反時計回りの流れを発生させるためである。



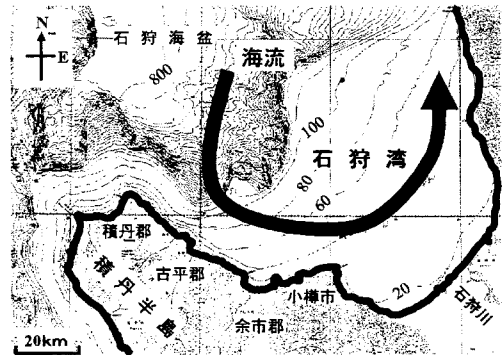
(a)南東風ベクトル



(b)流動パターン



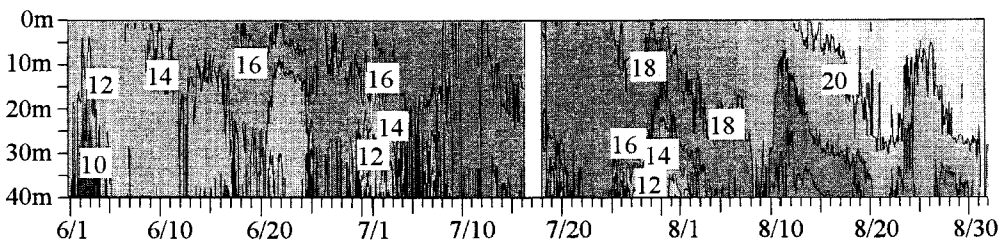
(c)流動パターン



(d)流動パターン

図-23 風分布と流動パターン

St.7



St.13

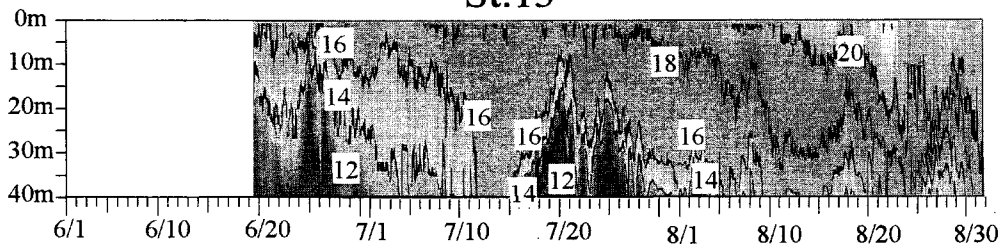


図-24 St.7, St.13における等温線図(下から2℃毎)

5.3 水温変動特性

図-24 に St.7, St.13 の 6 月～8 月の水温の等温線図を示す。図-24 を見ると、St.7, St.13 とも水温は短い周期（16 あるいは 24 時間）の変動をしている以外に時々大きな水温低下を起こし、最大 30m 程度もの湧昇が発生している。St.7 の水温低下時期は 6/21, 7/29, 8/11 等であるが、これらはすべて図-23(c)に示した流動パターンの時である。コリオリ力によるエクマン輸送により、北西風に対しては湾東側で湧昇が発生する事がわかる。St.13 での水温低下時期の 6/24, 7/16, 8/17 等では、図-23(b)パターンの時であり、エクマン輸送により、南東風に対しては湾西側で湧昇が発生することがわかる。St.7 と St.13 の低水温水塊の湧昇は St.13 の方が強かった。これは St.13 の方が水深 100m 以深の急勾配な海底地形に近いことと、St.7 では石狩側河川水が流出・拡散・滞留しやすく、密度の小さい水塊が表層をふたをするような効果があるためと考えられる。図-9(d)の流動パターンでは、St.14, St.7, St.13 の水温は対馬海流の流入により上昇することもわかった。また St.7 と St.13 共に 16 ～24 時間程度の周期の水温変動が見られ、St.14 の慣性周期流の影響と考えられる。

6. 河川水・外洋による栄養塩流入と水質変動

6.1 河川からの栄養塩供給量

図-25 に二年間で 107 回実施した河川採水と流量から求めた輸送量式を基に作成した 2001 年、2002 年の石狩川物質流出量の比較の一例を示す。2001 年は 9 月に約 $7000 \text{ m}^3/\text{s}$ の大洪水が発生したこともあり、2002 年に比べ流量は約 $30 \times 10^8 \text{ t}$ 多く流出していた。SS は 2001 年の流出量が約 3.4 倍多くなっており洪水時流出が卓越しているためである。溶解性である $\text{NO}_3\text{-N}$ は年毎の流出量の割合が流量のそれとほぼ等しく、濃度が流量によらずほぼ一定であるためである。

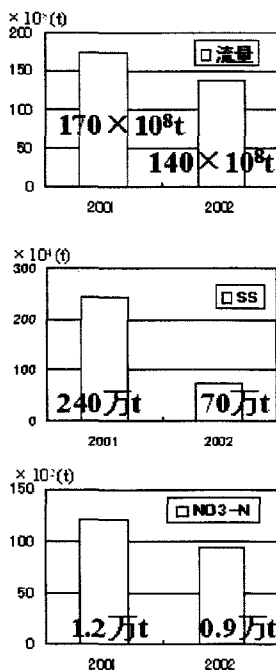


図-25 流量,SS,NO₃-Nの河川流出量比較

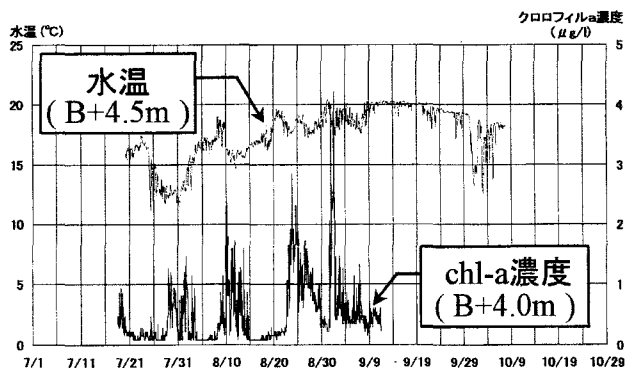


図-26 St.7の夏期の水温,chl-a濃度推移

6.2 湧昇による栄養塩供給量

図-26 に 2003 年の St.7 の底層の水温、chl-a 濃度の推移を示す。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ことがわかる。日本海には水深 100m 以深に高栄養塩深層水が存在し、図-1 の断面図から水深 100m 以浅の沿岸域に湧昇してくる深層水は水深 100m~200m 帯が中心と考えられる。図-27 に過去の広域水質調査データ（石狩湾新港海域生態調査報告書昭和 51~60 年）に基づく 8 月 1 ヶ月間の水深 100m~200m の水温、栄養塩の相関式を示す。水温と栄養塩濃度はある程度相関があり、深い水深ほど低水温で高栄養塩な深層水が時間的に安定して存在することがわかる。図-28 に一例として 2002, 2003 年の湾口域での PO4-P 実測値と、水温から図-27 の相関式で求めた計算値を示す。両者はほぼ一致していることから、水温低下から栄養塩濃度推定がある程度可能であることがわかる。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)東側半分が発生したと仮定し、相関式を用いて求めた沿岸域への流入栄養塩量と同時期の河川供給量の比較を図-29 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かを知る必要がある。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。

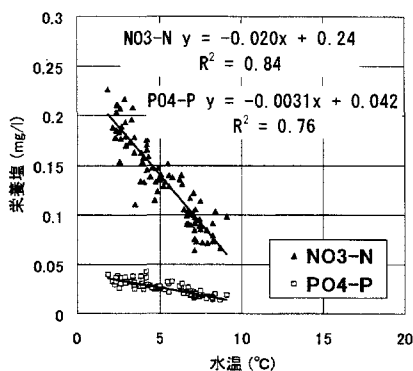


図-27 水温、栄養塩濃度相関
(水深100m~200m)

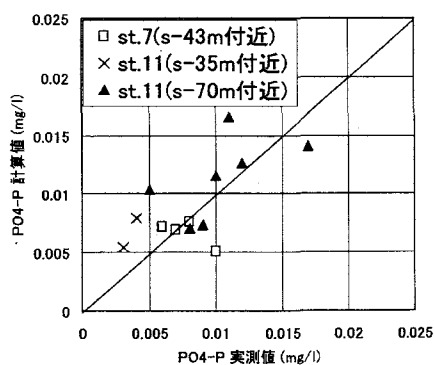


図-28 PO4-P濃度の実測値と計算値比較

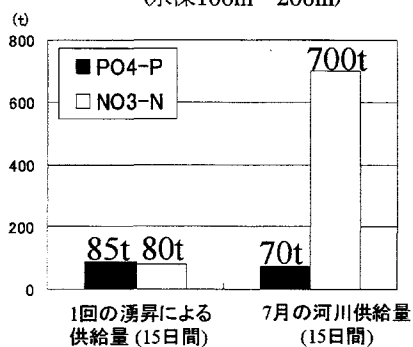


図-29 湧昇、河川による栄養塩流入量比較

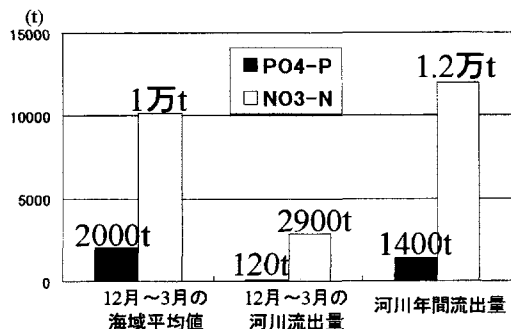


図-30 冬の海域平均値と同時期の河川流出量、年間河川流出量比較

6.3 鉛直混合による栄養塩供給量

図-7 の St.7,11 の一年間の PO₄-P 濃度推移をみると、11 月以降、両地点ともに全層的に濃度上昇している。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。冬期の湾口域での平均栄養塩濃度を求め、沿岸域全域で積分をして求めた鉛直混合による石狩湾への栄養塩流入量を図-30 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海域平均値は PO₄-P が約 17 倍、NO₃-N は約 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 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。

7. おわりに

石狩川が流入する開放性の強い石狩湾沿岸域の水質変動特性及び河川水・外洋水の水質特性と沿岸水質への影響について、今までに調べた結果を述べた。開放性海域では、流動特性の把握自体が難しく、また内湾に比べて波浪が高く、底質の巻上げ等の水質への影響という問題も重要と考えられ、現象の実態把握がまだ十分にはなされていないのが現状である。今後は、さらに現象把握を行うとともに、生態系モデルを用いた数値解析を実施し、現況再現を試みていく予定である。

引用文献

- Amo, Y. D., O. L. Pape, P. Tregure, B. Queguiner, A. Menesguen, and A. Aminot (1997) : 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.
- Horne, A. J. and C. R. Goldman (1994) : *Limnology*, McGraw-Hill, Inc., New York.
- McClelland, J. W. and I. Valiela (1998) : Changes in food web structure under the influence of increased anthropogenic nitrogen inputs to estuaries. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 168, pp.259-271.
- 瀬戸雅文, 大竹臣哉, 奥野充一, 中村充 (2000) : 石狩湾周辺海域における内部波の形成と湧昇流の発生機構, 海洋開発論文集, 第 16 巻, pp.285-289.
- 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
- 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.
- 山崎真一, 森田真郷, 山下俊彦 (2003) : 河川水中の懸濁粒子の海水混合による凝集・沈降特性, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.961-965.
- 山崎真一, 本間志歩, 山下俊彦 (2004) : 石狩川河口沿岸域における底質の巻上げと水質変動, 海岸工学論文集, 第 51 巻 (印刷中) .
- 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.
- 山下俊彦, 梅林司, 菅沼剛, 斎藤大作, 山崎真一 (2002a) : 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, 森田真郷, 杉原幸樹, 斎藤大作, 山崎真一 (2002b) : 石狩川河川水中の懸濁粒子の海水混合による凝集過程に関する研究, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp1016-1020.

- 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.
- 山下俊彦, 梅林司, 奥西 武, 山崎真一 (2004a) : 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, 海洋開発論文集, 第 20 巻, pp.953-958.
- 山下俊彦, 金子彰雄, 足立久美子 (2004b) : 石狩川河口沿岸域における光減衰・濁度特性に関する一考察, 日本水産工学会講演論文集, pp.201-202.
- 山下俊彦, 梅林司, 本間志歩, 山崎真一 (2004c) : 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, 海岸工学論文集, 第 51 巻 (印刷中)
- 渡邊康玄, 新目竜一, 斎藤大作, 玉川尊(1999) : 鹉川 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
- 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 (印刷中)