

II-18

石狩川の輸送土砂量算出に関する考察

The Research On The Sediment Run Off Of The Ishikari River

渡邊清隆¹・清水康行²・山口甲³

Kiyotaka WATANABE, Yasuyuki SHIMIZU and Hiroshi YAMAGUTU

¹学生員 工修 北海道大学大学院工学研究科 環境資源工学専攻 水圏工学講座 応用水門分野 (〒060-8628 札幌市 北区 北13西8)²正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科 助教授 (〒060-8628 札幌市 北区 北13西8)³正会員 工博 北海学園大 工学部教授 (〒064 札幌市 中央区 南26条西11丁目)

1. 研究背景

わが国では、河川による侵食・堆積などによってできた国土面積の約20%の平野部に人口の大部分が集中しているため、環境・利水とともに治水のための河川管理の重要性は非常に大きい。

治水・利水・環境の3つの目的を同時に達成するためには河道の維持が必要不可欠であり、そのためには流域全体における土砂の移動を把握しなければならない。

特に、石狩川のような大河川の場合には海域に流出する量も非常に膨大な量となるため、海岸や沿岸の環境問題との関わりも大きく、輸送土砂量の妥当な算定法の確立が急務となっている。

著者^{1) 2)}らは石狩川を例に過去20年間の日平均流量を用いて長期間の河床変動計算と、約10日間の時間平均流量を用いて短期間の大出水時の河床変動計算を行い、長期間と短期間の数値計算結果が共に観測された浮遊砂濃度とよく一致していることを確認している。

これまでの研究で扱ってきたモデルの計算結果を簡単に説明する。

まず長期間の計算は、過去20年間の日平均流量データを用いて石狩川の河道約150kmの河床変動計算^{3) 4)}を実施して過去20年間の流砂量を求めた。次に河口より上流26kp地点に位置する石狩大橋地点に設置されている水質自動監視装置による濁度データ(流水の濁りを示す指標、以降TBと略)とSS(mg/l)と呼ばれる浮遊砂観測データと相関を取り、流水の濁り具合から1m³中の浮遊砂量SS(TD)を推定し、各時点の流量Q(m³/s)から次式を用いて流砂量の推定を行った。

$$Q_s = Q * SS(TD) / (W_s * 1000) \quad (1)$$

ただし、 $W_s = 2.65 \text{ (g/cm}^3)$: 浮遊粒子の単位体積重量

これに流量観測データを用いて石狩川河口から流出する年平均総物質輸送量の算定をおこなった。そして石狩川下流部で観測されたwash loadとbed material loadの

うちの、浮遊砂量との関係について検討を行った。この結果、河口からの流出土砂量の大部分は非常に微細なwash load成分であることや、河床変動計算中で発生する浮遊砂のうちの最も微細な成分の量とwash loadの量がほぼ同じオーダーであることなどの興味深い性質が明らかになった¹⁾。また河口から流出する年間総量のうち、大部分が融雪期や台風による大出水時に集中していることがわかった。

一方、短期間計算は1997年8月のピーク流量3,000 m³/secの10日間程度の出水を対象に時間平均流量を用いて短期間の河床変動計算^{3) 4)}をおこない浮遊砂濃度を求めた。使用したモデルは長期間の計算を行ったモデルと同一のものであるが、数値計算結果と一定時間毎に観測された浮遊砂濃度とほぼ一致すること示された²⁾。しかしながら、図1によると短期間数値計算結果の浮遊砂の粒度分布と、実際に観測された浮遊砂の粒度分布において大きなずれがあるという問題も明らかになった。これは、河床変動計算中で発生する浮遊砂の供給元は河床材料からのみであり、またその量はその時点の河床材料の構成内容に大きく依存するのに比べ、実際に河川上流部で生産される土砂は広い範囲に分布する粒度構成を持っているためである。さらに、計算対象区間内の河床材料中には無視できる程の量しか存在しない粒径の非常に細かい粒子が、大出水時において下流部で観測され、計算で求めることが出来る浮遊砂の粒径よりも細かい成分が卓越する結果となることがわかった。このように非常に微細な粒径の粒子の堆積は、石狩川のような沖積河川下流部やダム貯水池等において問題となるため、細粒子の移動も把握できるような数値計算モデルの構築を目指す必要がある。

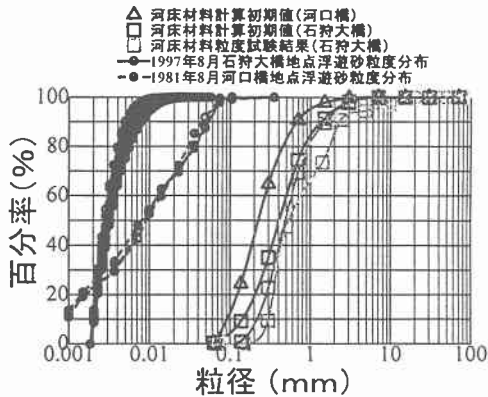


図1 石狩大橋地点の河床材料と観測された浮遊砂の粒径百分率の比較

2. はじめに

本研究では細粒子の移動も把握できるような数値計算モデルの構築を目指し、①細かい粒径の土砂の取り扱いについて検討と、②石狩川の細粒子土砂の供給源として支川からの土砂流入に注目して、一次元河床変動計算における支川の扱い方の検討を行う。考慮する支川は、豊平川、千歳川、夕張川、幾春別川、雨竜川、空知川、忠別川、美瑛川である。

細かい粒径の土砂の取り扱いについては、従来扱っていた混合粒径の範囲を細かいほうに広げてモデルに組み込み、計算するだけでは上手くいかないことが示される。今回は時間の不足により本論文に記載することは出来なかったが、発表までには結果を示す。

次に、石狩川で支川を考慮して河床変動計算をするときには、下流部のある地点の流量を流域面積比で各支線に配分し計算をおこなうより、各支川の観測流量を使ったほうが良いということと、支川合流地点について一次元河床変動計算でうまく処理するためには合流地点の河床全体が平均的に上昇または下降すると表現するのではなく、合流部分の低水路幅を変化させたほうが実際現象に近くなることを、実験的に明らかにする。

3. 微小粒子の取り扱い方

数値計算において0.074mm以下の粒径を取り扱わなければならない必要性は図1により明白である。すなわち大出水時に卓越して観測される微細粒子を再現するために、数値計算モデルにこの粒子クラスを取り込む必要がある。従来は混合粒径モデルとして、河床材料は0.051~100mmまでの全粒径を10のクラスに分割し、それぞれの範囲の粒径の粒子が単位体積当たり河床材料中に存在する割合を合計し、この値を代表粒径の存在割合として取り扱っていた。すなわち、代表粒径の0.0625mmは、0.051~0.074mmの粒子を代表し、この存在割合は0.051~0.074mmの粒子が河床材料の単位体積当たり占める割

合の合計となっている。また0.051mm以下の粒子は存在しないと仮定していた。本研究では、シルトや粘土、コロイドに分類される微小な粒子を取り扱うために、0.001~0.006mmまでの粒子を0.0026mmの粒径で代表させる事にした。図2に石狩大橋地点での河床材料中の代表粒径の存在割合曲線と加積曲線による違いを示すが、見た目ではほとんど違いは見られない。しかし、図3に示すように20年間計算した結果では微小粒子のクラスの扱い方による流砂量の違いがはっきりと生じる。d=0.0026mmを‘考慮しない’は従来の計算結果であるが、この微小粒径を浮遊流砂量を求める‘岸・板倉の式’で求めると、前者とは流砂量のオーダーが変わってしまうほど違う結果となっている。

一般に粒径0.001~0.074mmの粘土やシルトなどは、河川下流部において蜂の巣構造で堆積すると粘性の土構造となることや、粒径0.001mm以下のコロイドのような微細粒子は、河川河口部で海水などの影響で粒子間に粘性力が働き、フロクを形成し粘性をもつ綿毛構造で堆積することが知られており⁶⁾ (土砂水理学)、これら粘性を持つ堆積物は底泥とよばれ、馬場⁷⁾ (河川における底泥の流送と堆積に関する基礎的研究) や大坪⁸⁾ (底泥の再浮上機構に関する基礎的研究) によると底泥の流れに対する抵抗力は粘性がない河床材料とは異なるとしている。そこで非粘性土と同様に取り扱いえない可能性を考え、例としてd=0.0026mmの粒子の浮上量算出は岸・板倉式の代わりに、大坪の式⁸⁾ を用いて求めた結果を併記してある。大坪⁸⁾ がおこなった再現計算は霞ヶ浦を対象としているので、石狩川の底泥を同様に扱うことに問題はあるが、微小粒子に働く粘性を考慮することにより、結果が大きく変わることが分かる。

4. 支川の取り扱い方

従来の石狩川河床変動計算モデルはあらゆる支川の影響を考慮し、流域全体から流入地点と等しい土砂濃度をもつ流水の横流入があるとして計算をおこなってきた。この方法では、流水中に含まれる土砂の濃度や低水路平均河床高は再現できるが、図1に示すように、石狩大橋地点で観測された浮遊砂の粒度分布と一致しない。石狩川の場合、最下流部に位置する石狩大橋地点の流量観測所データから、上流各地点の流量を規定できる¹⁰⁾ が、土砂移動の量と質は河川の水量と密接な関係があり、流域内の土砂移動を正確に把握するためには、流量の与え方が非常に重要であると考え、本川における特徴的な流量の変化の位置、すなわち本川に流入する支川の位置を調べた。図4に石狩川と各支川位置及び河床高縦断面を示す。図5に示す石狩川を代表するいくつかの支川からの流入を考慮して流量が変化するモデルを構築した。

| クラス | 粒径範囲(mm) | 代表粒径(mm) | 存在割合(%) | 加積(%) | クラス | 粒径範囲(mm) | 代表粒径(mm) | 存在割合(%) | 加積(%) |
|-----|----------------|----------|---------|--------|-----|----------------|----------|---------|--------|
| 1 | 0.000—0.074 | 0.0640 | 0.372 | 0.372 | 1 | 0.000—0.051 | 0.026 | 0.077 | 0.077 |
| 2 | 0.074—0.200 | 0.1370 | 8.140 | 8.512 | 2 | 0.051—0.074 | 0.063 | 0.294 | 0.372 |
| 3 | 0.200—0.400 | 0.3000 | 23.736 | 32.248 | 3 | 0.074—0.200 | 0.137 | 8.140 | 8.512 |
| 4 | 0.400—1.000 | 0.7000 | 39.781 | 72.029 | 4 | 0.200—0.400 | 0.300 | 23.736 | 32.248 |
| 5 | 1.000—2.000 | 1.5000 | 18.278 | 90.307 | 5 | 0.400—1.000 | 0.700 | 39.781 | 72.029 |
| 6 | 2.000—4.000 | 3.0000 | 7.495 | 97.802 | 6 | 1.000—2.000 | 1.500 | 18.278 | 90.307 |
| 7 | 4.000—10.000 | 7.0000 | 2.044 | 99.846 | 7 | 2.000—4.000 | 3.000 | 7.495 | 97.802 |
| 8 | 10.000—20.000 | 15.0000 | 0.142 | 99.988 | 8 | 4.000—10.000 | 7.000 | 2.044 | 99.846 |
| 9 | 20.000—40.000 | 30.0000 | 0.011 | 99.999 | 9 | 10.000—20.000 | 15.000 | 0.142 | 99.988 |
| 10 | 40.000—100.000 | 70.0000 | 0.001 | ##### | 10 | 20.000—40.000 | 30.000 | 0.011 | 99.999 |
| 11 | 100.000— | >70.0000 | 0.000 | ##### | 11 | 40.000—100.000 | 70.000 | 0.001 | ##### |

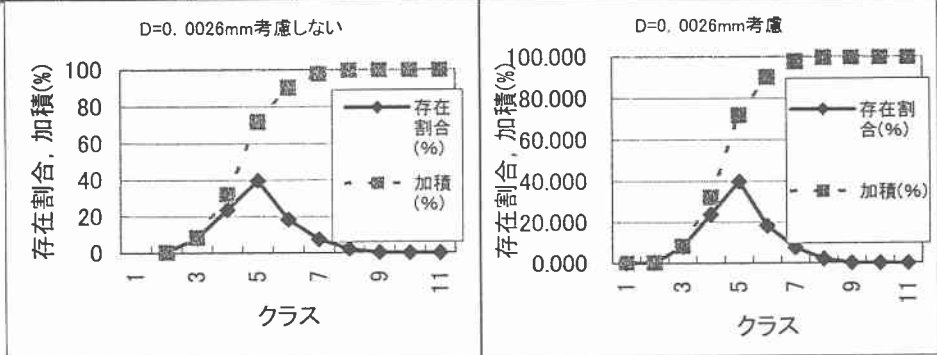


図2 河床材料の分割方法の違いによるグラフの比較

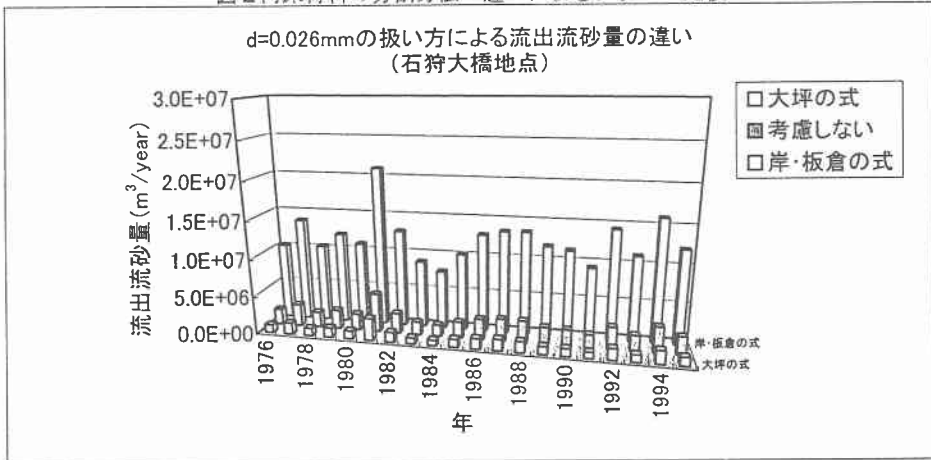


図3 石狩大橋地点の年間流出流砂量の時系列図及び河床材料分割方法が及ぼす影響

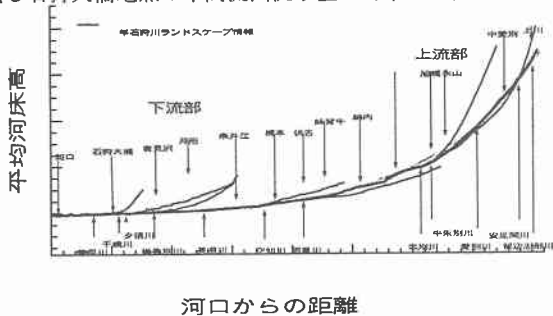


図4 石狩川と各支川河床高縦断面図

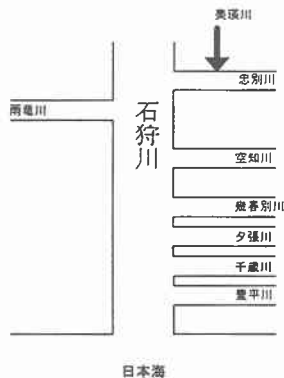


図5 石狩川と影響を考慮する支川

支川においても流量が段階的に変化するモデルを構築するにあたりレジーム理論を考慮した。すなわち、流量と低水路幅には密接な関係が存在することから実測値をもとに拡幅や収束など変化に富んだ低水路で計算した。図6に例として豊平川等の低水路幅実測値と計算で用いる幅を示す。

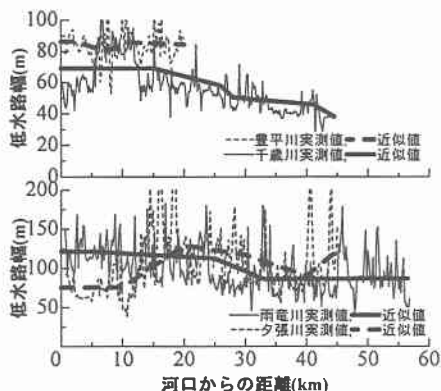


図6 豊平川等の低水路幅の縦断面

また、流れは常に常流と仮定して不等流計算を行い、石狩川及び各支川の各地点の水位を求めているが、流量が少ないときに初期条件で与えた低水路幅で水位を求めようとすると、単位幅当たりの流量が少なくなり常流を仮定しているにもかかわらず、限界水深以下の答えが求まるときがある。従来の手法ではこのような地点では強制的に次式で限界水深 H_c を与えてきた。

$$H_c = (Q^2 / g / B^2)^{1/3} \quad (2)$$

ただし、 Q は流量、 B は低水路幅、 g は重力加速度である。

しかしながら、自然の河川において流量が少ないとき、低水路一杯に広がって流れることは無く、その時の流量に見合った幅で流れている。すなわち本モデルでは不等流計算で限界水深以下の解が表れた場合、流量に見合う低水路幅を次式のレジーム理論で仮定し計算し直すこととした。

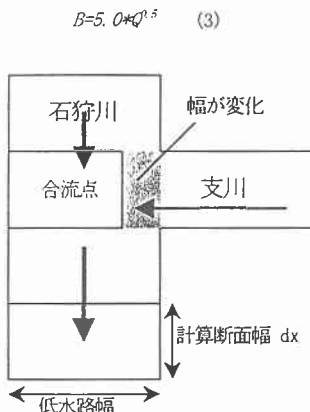


図7 合流点のモデル化

合流点における不等流計算や流砂の移動は図7に示すようにモデル化する。

box は計算を行う上での単位であり、矢印は流下方向を示す。まず本川の不等流計算を下流端水位を起算水位として行う。ABCDで囲まれた合流点で水位は等しいと仮定し、水位 $AB = \text{水位} BC = \text{水位} CD$ を下流端起算水位として上流側の本・支川の不等流計算を行う。流量、流砂、濃度等は、合流後の量 = 本川側流入量 + 支川側流入量として連続の式を満たす。

支川からの流入流砂量は合流点の影の部分のように本川側の低水路幅を減少するように堆積するものとする。

合流点の低水路幅が初期値より小さくかつ式(3)を満たさない場合、流水による洗掘は河床高には影響せず低水路幅を拡張するように働くものとする。このモデルは次章で記した実験結果に基づくものである。

5. 実験

本実験は支川から本川へ流入する流砂の堆積-流送の過程を把握するためにおこなった。図8に示すように、広矩形の複断面の本川に支川が合流している実験装置を使用した。本川は固定床とし、勾配は 1/100、流量は 1.2 l/s とした。支川は水平の亚克力板製の単断面水路に 1/50 の勾配になるように 0.1 mm 粒径の砂を敷き詰めた。流量は 0.4 l/s とした。本・支川とも給砂はしていない。

上記条件で通水したところ支川から大量の流砂が本川に流入し本川に最も流砂が堆積したのは約 1 時間後であった。その後支川の河床は流砂の流出によって緩勾配になり本川に流出する流砂量は時間と共に減少し、本川に堆積した土砂は徐々に流送されていった。

図9に本川に堆積した流砂が流送される様子を示す。上の写真①は流砂が最も堆積した様子を示したものである。②と③は時間の経過と共に本川に堆積した砂が流送され徐々に砂の面積が減少している様子を示している。

図中の矢印は支川から流入した流砂が堆積した範囲を示しており、最大でも低水路の中ほどまでしか堆積しないことが明らかになった。図9中の本川横断方向から見た堆積の様子を模式的に図10に示す。

図8 実験装置

右上：実験装置全体写真
 右下：支川合流点斜めより
 下：支川合流点真上より

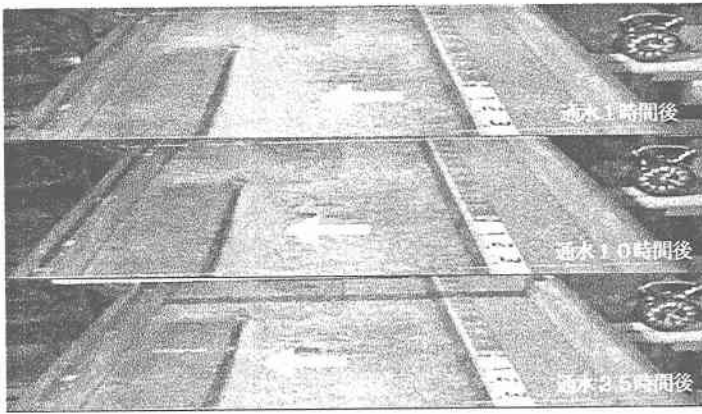
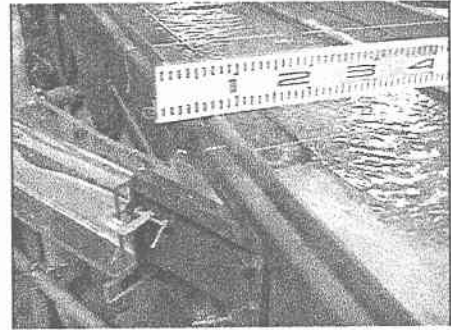
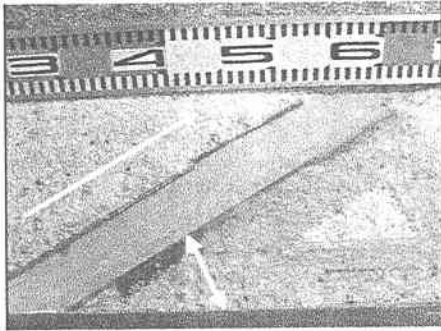
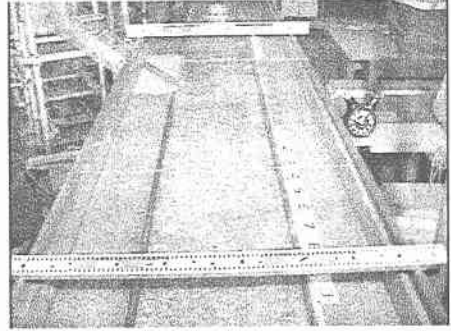


図9 本川に堆積した流砂が流送される様子

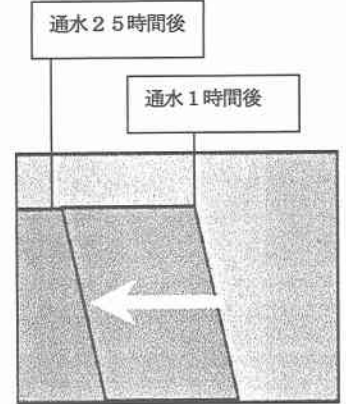


図10 横断方向から見た堆積砂の現象の様子

6. 計算結果及び考察

石狩川河口から流出する土砂の量を求めるために、浮遊流砂・掃流砂を含む混合粒径モデルに支川からの流入流量および土砂量を考慮し本研究の合流点モデルを組み込み1次元の河床変動計算を行った。今回は0.74mm以下の微小粒径は考慮していない。

図11に、上から順番に石狩川河口水位と、石狩川河口地点の流量、豊平川・千歳川・夕張川・幾春別川・空知川・雨竜川から石狩川に流入する流量の、過去20年間(1975

～1994年)の日変化図を示す。他の支川はスペースの都合で割愛する。日流量を用いて計算した結果を図12に示す。図12中の上図は年間合計流量の年変化図で、下図は年間合計流砂量の年変化図である。各年ごと2本ある棒グラフのうちの、太い方が石狩川河口からの流出量を、細い方が各支線からの流入量を示している(ただし石狩川上流端からの流入流砂量は除く)。支川より流入する量の内訳は図中の凡例に記してある。計算によると河口からの最大流出流砂量は既往最大の洪水があった年の約12億立米よりも多い、1992年の約22億立米で、次いで

89年の約19億立米であった。これは、支川から流入する流砂量が多い次の年に河口から流出する流砂量が多くなるということを示す結果となった。しかし支川からの流入流砂量が最も多い年は河口からの流出量よりも多い1988年であるが、92年の方が河口より流出する量が多い理由は、総流量が92年の方が大きいためと考えられる。

支川を考慮すると河口からの流出流砂量が変わることが、図3に示す昨年までの結果と比較してわかる。流量の与え方がかなり重要であり、その河川の流出流砂量を大きく変えてしまうことを示している。

7. 終わりに

本研究では、石狩川の輸送土砂量算出に関して以下のことをおこなった。

1. 微細粒子の取り扱いについての検討をし、微細粒子を考慮すると、河口からの流出量が変わることを示した。
2. おもな支川を考慮し、流量の与え方をえると河口からの流出流砂量が変わることを示した。
3. 合流点の取り扱い方と不等流計算の2つの工夫を従来のモデルに組み込んだ。

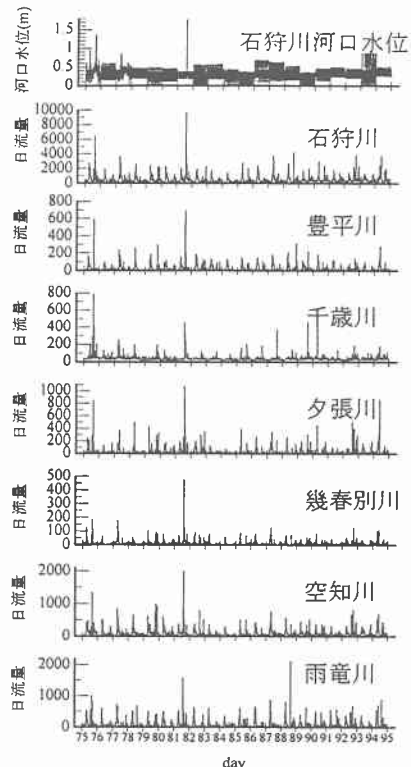


図1 1 河口地点水位と流量及び支川からの流入流量

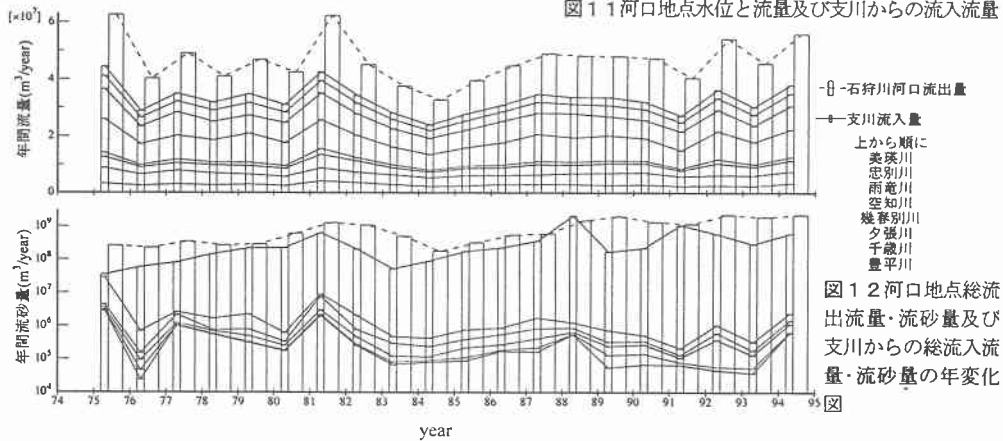


図2 河口地点総流出流量・流砂量及び支川からの総流入流量・流砂量の年変化

参考文献

- 1) 清水康之, 蛭峨浩, 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. 1039-1043, 1998
- 2) 渡邊清隆, 清水康之: 石狩川の土砂流出に関する研究, 土木学会第53回年次学術講演会, p502-503, 1998
- 3) 清水康之: 沖積河川の縦断形と河床材料分布形の形成について, 土木学会論文集No. 521/II-32, 69-78, 1995. 8
- 4) 清水康之, 板倉忠興, 岸力, 黒木幹男, : 昭和56年8月洪水における石狩川の下流部の河床変動川について, 第30

回水理講演会論文集, p. 487-492, 1986

- 6) 土砂水理学
- 7) 馬場洋二: 河川における底泥の流送と堆積に関する基礎的研究
- 8) 大坪国順: 底泥の再浮上機構に関する基礎的研究