

石狩川の土砂流出に関する研究

A STUDY ON SEDIMENT RUNOFF OF THE ISHIKARI RIVER

清水康行¹・嵯峨浩²・早川博³・品川守⁴

Yasuyuki SHIMIZU, Hiroshi SAGA, Hiroshi HAYAKAWA and Mamoru SHINAGAWA

¹ 正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科助教授 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

² 正会員 工博 北海学園大学教授 工学部土木工学科 (〒001 札幌市中央区南26条西11丁目)

³ 正会員 工博 北見工業大学助手 工学部木工学科 (〒090 北見市公園町165)

⁴ 正会員 工修 北海道開発局石狩川開発建設部次長 (〒064 札幌市中央区北2西19)

It is an important subject to evaluate sediment transport budget in river management works. In this paper sediment transport output from the Ishikari River is investigated as primitive example for this subject. Relationship between turbidity data and suspended sediment concentration data is investigated and a formula to evaluate wash load transport rate is proposed. Using the daily discharge data of the past 20 years, the annual sediment runoff from the Ishikari River mouth is calculated. The annual runoff of the bed material is also calculated by a numerical model for bed load and suspended load transport, bed deformation and grain size distribution of bed material. The results of wash load runoff and bed material load runoff are compared and it is found that wash load runoff can be explained as a part of bed material load.

Key words: wash load, bed material load, sediment budget.

1. はじめに

一般に河川は降雨や融雪による流出水を山地から海域へと輸送する機能を担っているが、この「水」とともに大量の「土砂」をも輸送している。「水」の輸送問題に関しては、今までに降雨から流出、流下、海域への拡散までの各過程における物理機構に関する研究が進められており、その結果は河川計画における計画流量の決定や治水施設の設計などに反映されている。一方、「土砂」の輸送問題に関しては、流砂量、河床形態、河床変動、河道変化などに関する基礎的な研究は活発に行われているが、実際の河川計画には十分に反映される迄には至っていない。単純な例で言えば、「石狩川から年間どの程度の土砂が海域に流れ出ているのか?」といった疑問にすらすらに答えられないのが現状である。河川の輸送する土砂量を定量的に把握し、「水」と同様に水系の「土砂」の実態を把握することは河川工学上重要な課題である。本研究においては、この第一歩として上記の最も基本的な疑問である石狩川の年間生産土砂量の推定を試みるものである。

河川流域で生産・輸送される土砂に関する研究は数多く行なわれており、最近の例では、杉本・真野¹⁾による細粒土砂の輸送に関する研究や、砂田・長谷川²⁾による河川水系全体での土砂輸送に関する研究などが挙げられる。しかしながら、前者の例では主として wash load を扱ったものであり、後者は bed material load の内の掃流土

砂のみを扱ったものである。そもそも河川の輸送する土砂を wash load(河床材料に存在しないような微細粒径の土砂)と bed material load(河床に存在する大きさの粒子で河床材料と交換されながら輸送される)に明確に区別されるものではないが³⁾、石狩川のような大河川の河口からの総流出土砂量を議論する場合、この両者の違いを念頭に置いた扱いが必要である。

本研究においては、現時点で入手可能なデータに基づき、上記の両者を含む石狩川の総流出土砂量の推定を行なおうとするものである。

2. 濁度データと流砂量

石狩川においては1975年から基準地点の石狩大橋において自動水質監視装置(K-82S型)により濁度の自動監視(積分球式濁度計)が1時間毎に連続的に行われている。石狩大橋地点は河口から約25kmに位置し、流域面積は石狩川の流域面積(14,330km²)に対して90%(12,697km²)を占めるため、石狩大橋地点の通過土砂量は、石狩川が生産土砂量の大部分を占めると考えられる。一方、この石狩大橋地点においては月2回、定期的にSS濃度の観測(バンドーン式採水器による表面から2割水深地点の採水)が行なわれているとともに、同地点およびその近傍の橋梁で1958年以来、出水中に約80回の浮遊砂観測(土研式浮遊砂採取器による断面内

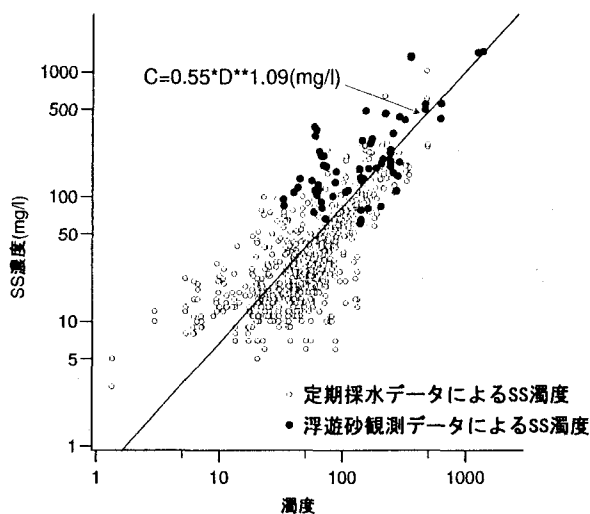


図-1 石狩大橋の濁度と土砂濃度の関係

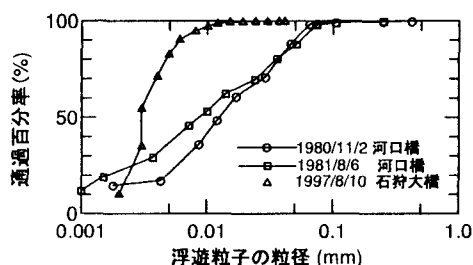


図-2 実測浮遊砂の粒径分布

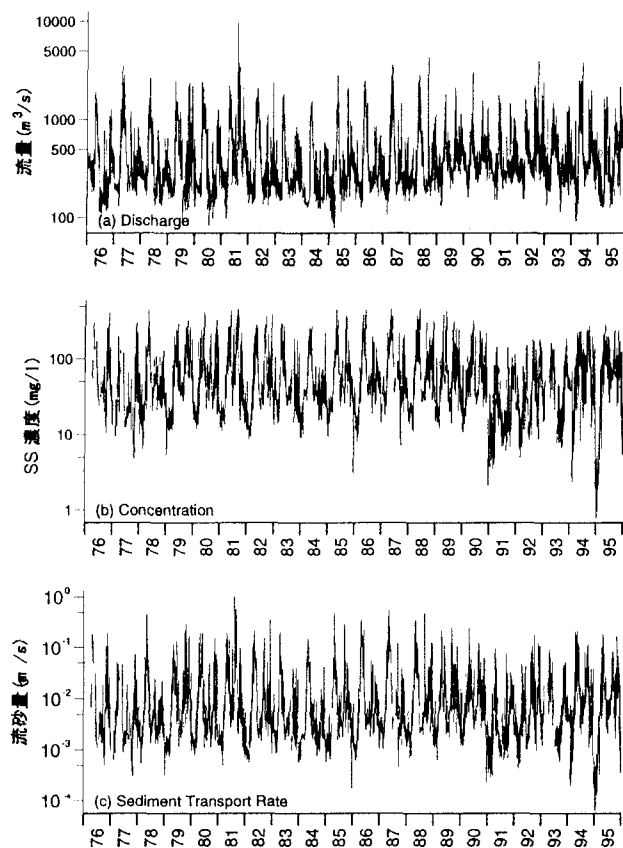


図-3 石狩大橋における 1976~1995 年の土砂濃度および流砂量

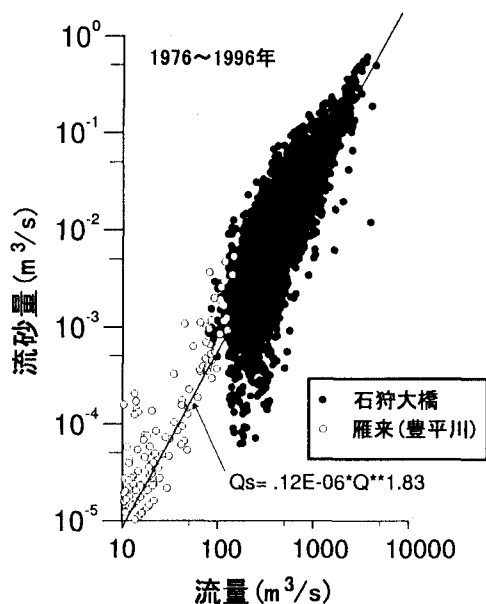


図-4 石狩大橋と雁来における 1976~1995 年の日流量と流砂量の相関関係

を分割して観測)が行われている。図-1は石狩大橋地点の過去20年間のSS濃度の観測値および浮遊砂の観測値から換算した浮遊砂濃度とそれぞれの観測日時における濁度データの相関関係を示したものである。ここで、白丸は採水によるSS濃度、黒丸は浮遊砂の観測値を濃度に換算したものである。

SSと浮遊砂データは観測方法や使用機器の違いから同レベルでの比較に多少の問題もあるが、両者ともに採取資料の大部分は図-2に示すように粒径が0.1mm以下の微細な成分であり、粒径から言えば大部分がwash load成分と考えられる。図-1によれば、濁度と土砂濃度には高い相関関係が見られ、図中に示す次式で近似可能である。

$$C = 0.55 D^{1.09} \quad (1)$$

ただし、 C はSSおよび浮遊砂の濃度(mg/l)、 D は水質自動監視装置による濁度である。(1)式を用いることにより、連続的に観測されている濁度データから連続的な流送土砂の濃度の推定が可能となり、さらに流量データを用いることにより、流砂量の推定が可能となる。なお、ここでの流砂量は濁度・SSと流量から推定した流砂量であり、wash loadか浮遊砂かあるいはこの両者を含むものかは明らかでない。したがって、ここでは単に流砂量と呼ぶこととする。図-3は上から順に1976~1995年の20年間の石狩大橋地点における日流量、日平均濁度から(1)式で勘算された土砂濃度および、これらから計算された流砂量である。さらに、流量と流砂量の関係を

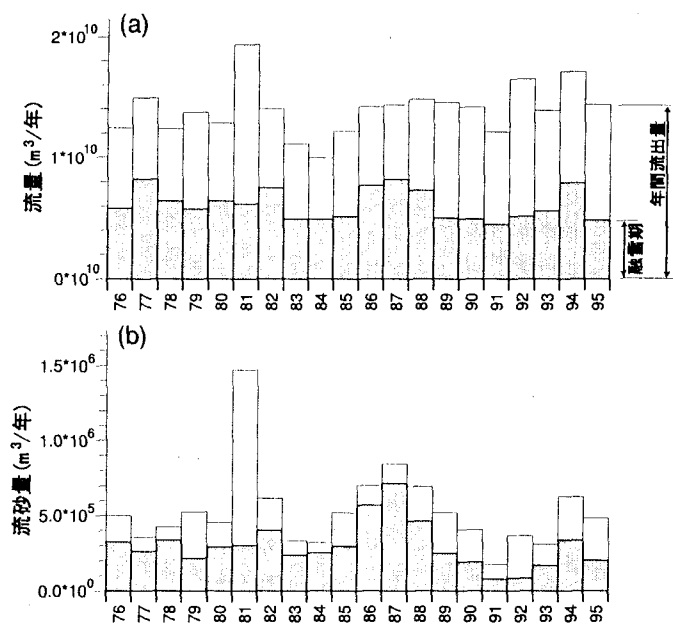


図-5 石狩大橋地点の (a) 年間流量と (b) 年間流砂量 (濁度データからの推定値)

調べるために、図-3 で示した流量と流砂量の関係を図示したのが図-4 である。なお、図-4 には、後に石狩川河口からの流砂量を推定する際に必要となる、豊平川の流量と豊平川の採水データより求めた流砂量の関係も合わせて示してある。図-4 の流量と流砂量の関係のうち石狩大橋のデータに関して、指数式で最小自乗近似を行なうと次式となる。

$$Q_s = 1.2 \times 10^{-7} Q^{1.83} \quad (2)$$

ただし、 Q は流量 (m^3/s) であり Q_s は流砂量 (m^3/s) である。(2) 式は全国の河川の浮遊砂観測結果による wash load の平均的な値⁴⁾ とほぼ一致する結果となっている。また、(2) 式は図-4 の白丸の豊平川のデータについてもほぼ適合した結果となっている。

図-3 は日単位で図示したものであるが、この内流量および流砂量を各年毎に合計して年間の総流量および総流砂量として示したのが図-5 である。図-5 で上は流量、下は流砂量であり、それぞれ全体量のうち、4 月と 5 月の融雪期の方は灰色にして示してある。流量、流砂量ともに過去 20 年間で最大の年は 1981 年の既往最大出水のあった年であり、この年は年間流砂量が 150 万 m^3 にも達している。出水年以外の年は平均的には年間約 50 万 m^3 の流砂量となっている。

融雪期に着目して見ると、1981 年以外の年は、融雪期の流量が、約半分であるのに対して、流砂量は大半が融雪期に集中していることがわかる。1986 年～1988 年の流砂量が多くなっているが、これらの年は融雪流量の多

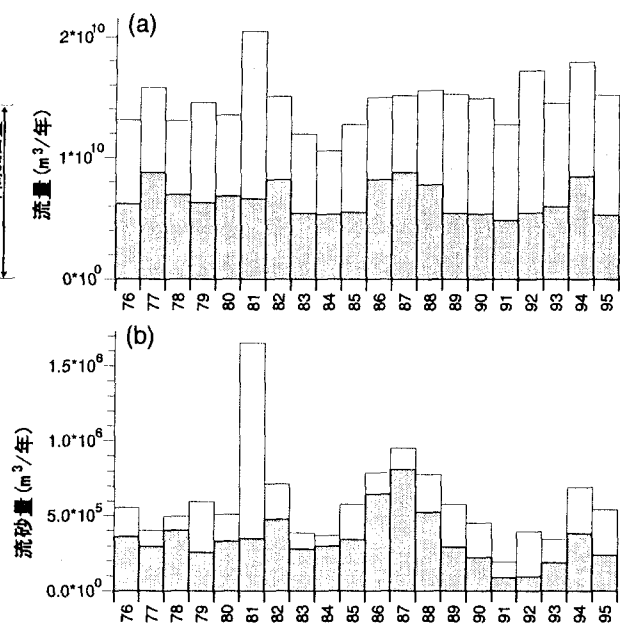


図-6 石狩川河口における (a) 年間流量流出量と (b) 年間流出流砂量 (濁度データからの推定値)

い年であり、即ち、降雪量の多い年が土砂流出の多い年となっている。

以上は石狩大橋地点の濁度データから推定した流砂量であるが、本研究の目的である石狩川河口からの流出土砂量を算定するためには石狩大橋より下流の残流域からの流出分を加算する必要がある。石狩大橋より下流の主要な支川は豊平川のみであり、豊平川の流域面積を石狩大橋の流域面積に加えることにより、石狩川の流域面積の 99% をカバーすることとなる。しかしながら、豊平川の連続的な濁度データは石狩大橋に比べごく最近のものしか得られないため、ここでは、豊平川の流量データに関しても (2) 式を用いて流砂量を推定し、この結果を図-6 に示す。ここで、図-6 の上の図は年間流出流量、下の図は年間流出流砂量を示し、いずれも 4 月と 5 月の融雪期の方は灰色で示してある。結果的には図-5 の石狩大橋地点の年間流量および流砂量とほとんど変わらないが、出水年の 1981 年では年間流砂量が約 160 万 m^3 となっている。

3. 河床変動計算による流砂の成分の検討

図-6 に示した年間流砂量で石狩川からの年間流砂量の特性がほぼ示されたことになるが、ここでの流砂量は、流量-濁度-土砂濃度といった関係より推定されたもの

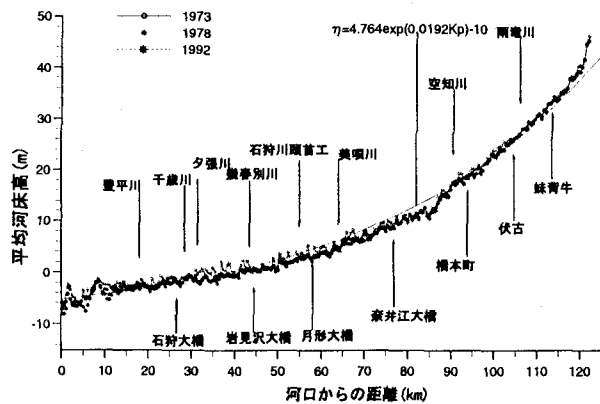


図-7 石狩川の平均河床縦断面図 (1973, 78, 92 年の実測値および計算の初期値)

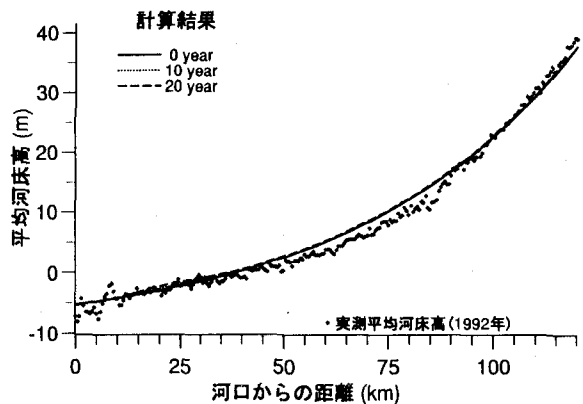


図-9 石狩川の平均河床高計算結果

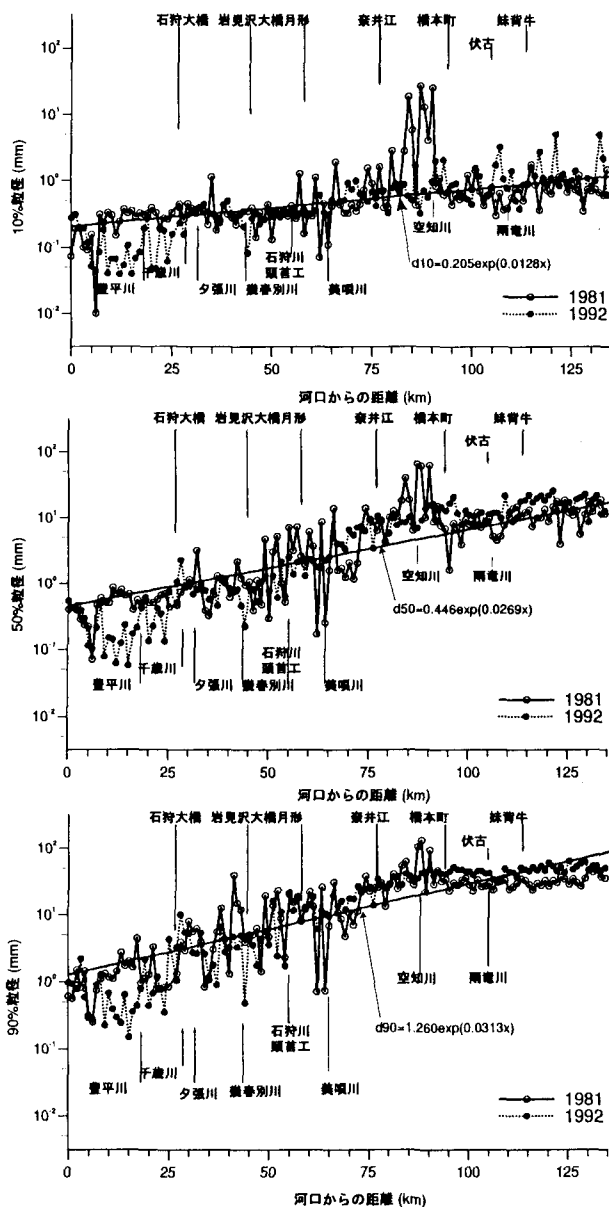


図-8 石狩川河床材料 d_{10} d_{50} d_{90} 縦断面図 (1981, 1992 年の実測値および計算の初期値)

表-1 計算に用いた土砂の粒径区分 (単位 mm)

番号	粒度範囲	代表粒径
1	~ 0.074	0.054
2	0.074 ~ 0.2	0.137
3	0.2 ~ 0.4	0.3
4	0.4 ~ 1.0	0.7
5	1.0 ~ 2.0	1.5
6	2.0 ~ 4.0	3.0
7	4.0 ~ 10.0	7.0
8	10.0 ~ 20.0	15.0
9	20.0 ~ 40.0	30.0
10	40.0 ~	50.0

であり、その成分 (粒径) に関する情報が含まれていない。その大部分は微細粒子の wash load と推定されるが、bed material load としての浮遊砂との関係も曖昧である。そこで、著者の 1 人による石狩川の河床変動計算モデル⁵⁾を用いて、長期の河床変動計算を通して計算される bed material load の流出量を求め、比較検討を行なうこととする。

モデルの詳細に関する説明は省略するが、その概略は以下のとおりである。

計算区間 石狩川の河口から 125km の区間

基礎式 1 次元不等流、粒径別掃流砂・浮遊砂量式、粒径別濃度連続式、粒径別流砂連続式および全流砂の連続式

境界条件 上流端で流砂の動的平衡状態 (その場の掃流力から計算される流砂量を与える)、支川からの流入土砂も動的平衡条件、下流端水位は河口水位の実測値、下流端の流砂量は自由流出条件

計算は、図-3(a) に示した 1976 年~1995 年の 20 年間の流量を用いて行なうこととし、初期河床縦断面形状は図-7 に示すように、この 20 年間で特に顕著な変動傾向は見られないため、実測データ (図中の記号) を基に、図中の実線で与えた。また河床材料の初期粒径分布は図-8 に示すように、過去の実測資料より d_{10} 、 d_{50} および d_{90} を図中の実線で与え、各地点の粒度分布が対数正規

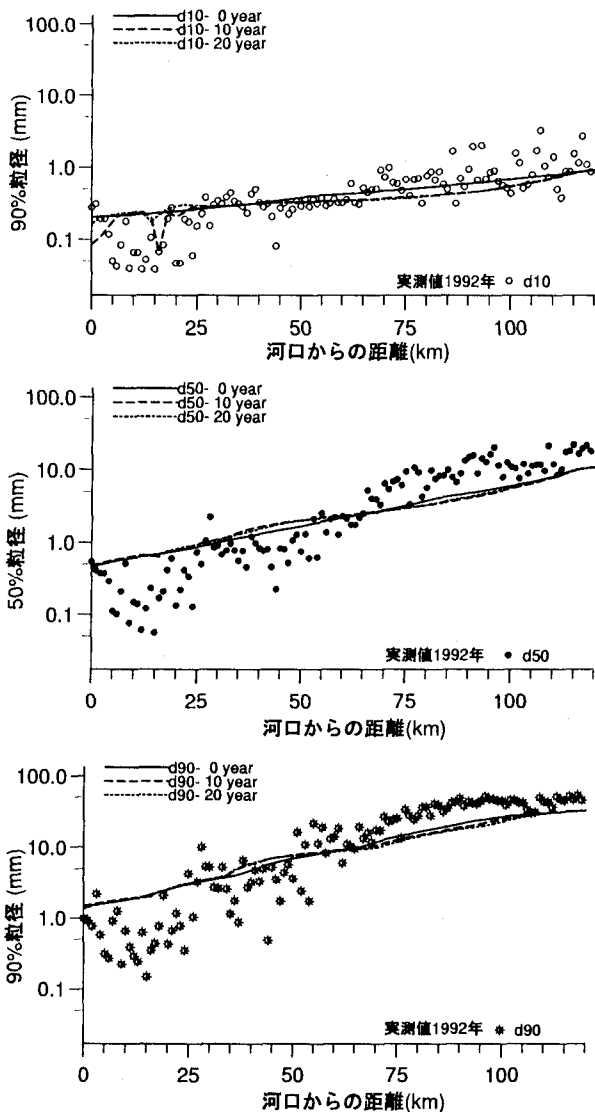


図-10 石狩川河床材料 d_{10} d_{50} d_{90} 計算結果縦断面図

分布に従うとして、初期粒度分布を与えた。計算に用いた河床材料は表-1に示すように10の範囲に分割し、それぞれの代表粒径を表に示すように与えた。

ここでの計算は河床材料から流砂量を計算するものであり、流砂の扱いは bed material load となる。初期条件として与えた河床材料の粒度分布および河床高を用いて、図-3に示した20年分の日流量を逐次与えて計算を行なった結果の河床高の計算結果を図-9に示す。ここで、図中の黒丸は1981年の実測値に基づく平均河床高である。河床高に関しては特に際立った変化は見られず、現実にも大きな河床変動は見られないことから妥当な結果と考えられる。計算された河床材料の粒度分布より10%、50%および90%粒径を求め、その縦断面分布の経年変化を1992年の実測値と共に示したのが図-9である。粒度分布の計算結果に関しても、特に大きな変化は見られないが10%粒径に関しては、河口付近

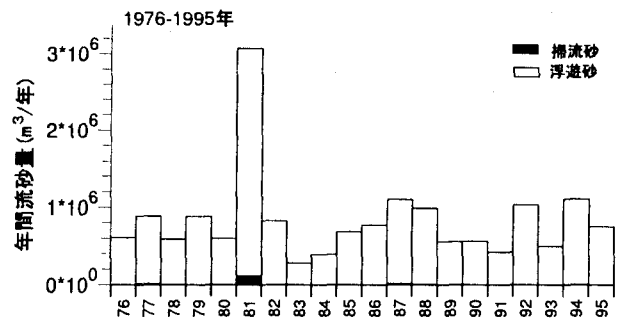


図-11 石狩川河口の年間流砂量の計算結果(白は浮遊砂、黒は掃流砂)

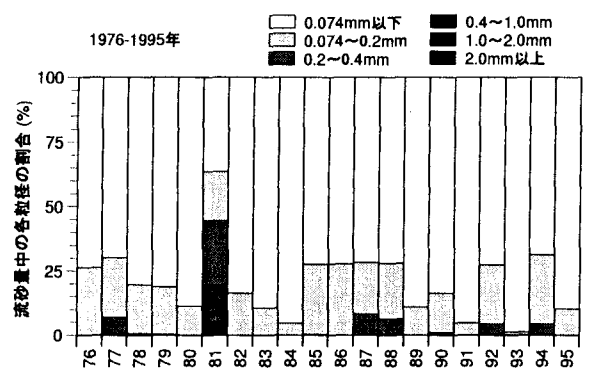


図-12 石狩川河口の浮遊砂の計算結果に占める各粒径の割合

で細粒化する傾向が見られる。これは、この期間の計算においては下流部に細粒分が堆積する傾向にあるためと考えられる(図-9のスケールでは判読困難ではあるが、計算結果は河口付近で堆積傾向にある)。

20年分の河床変動計算を通じて河口から流出する流砂量を各年毎に合計して、掃流砂と浮遊砂で分けて図-11に示す。ここで黒色の部分が掃流砂で、白抜きの部分は浮遊砂である。1981年の出水年以外は河口からの流出成分の大部分が浮遊砂として計算されており、その量は、洪水年の1981年で最大年間300万 m^3 程度、平均

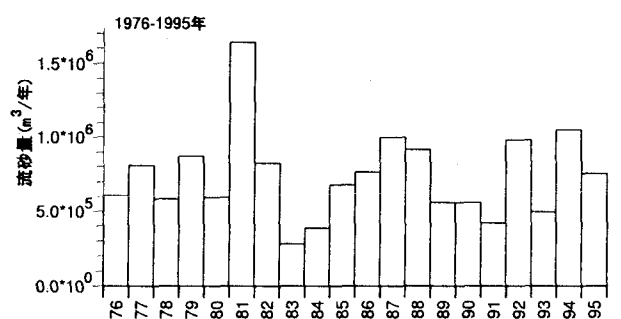


図-13 石狩川河口の年間浮遊砂量の内0.2mm以下の成分の量

的な年で60~70万 m^3 となっている。本計算は流砂量を粒径別で扱っているため、流砂量中の各粒径の構成割合を求めることが可能である。図-12は計算の過程において算定される河口からの流出土砂の大部分である浮遊砂中の各粒径の構成割合を年毎に示したものである。これによれば、洪水年の1981年を除いては、浮遊砂の大部分が粒径0.2mm以下の微細粒子であり、1981年でも50%以上が0.2mm以下の粒径となっている。言い換えれば、1981年のような大出水時にはwash loadの量に匹敵するbed material loadの流出があるものと推定される。本計算における流砂の扱いは全てbed material load(もともと河床材料に存在する粒径を用いての計算)ではあるが、流砂量として計算されている粒径を見ると、その殆どがwash loadのような微細な粒径であることが分かる。これらの粒径は計算上ではもともと河床材料中には極僅かな割合でしか含まれていないものとして扱っているが、計算を通して河口から流出しているのは大部分がこれらの微細粒子となっている。ちなみに、図-12で示した流出流砂量のうちで粒径0.2mm以下の成分のみを年間流砂量で示してみると、図-13のようになり、洪水年の1981年で約160万 m^3 、その他の年では30~80万 m^3 となり前章で示した濁度-流量の関係から求めた年間流砂量[図-6(b)]とほぼ一致する結果が得られる。ここでの計算は1次元モデルの比較的単純なものであり、河床材料の初期分布形や他の条件の与え方も非常に単純なものである。さらに、計算された流砂量(bed material load)の中で、閾値を単純に0.2mmとしてそれ以下の粒径の成分をwash loadと比較することの是非に関しても議論の余地は十分に残されている。しかしながら、bed material loadとして扱っているものの一部がwash loadの推定値と一致するということは、敢えてwash loadとbed material loadという区分を行なわなくてもどちらも、bed material loadの計算方法でも表現できる可能であることを示唆するものであり、極めて興味深い。

4. おわりに

本研究は、河川工学上重要な課題である河川の生産土砂量という課題の中でもっとも基本的な例題としての「はたして石狩川から年間どれくらいの土砂が海に出ているのか?」という疑問に答えるべく、2通りの方法で流出土砂量の算定を行なった。一方は濁度と流量の関係から算定されるwash load的な流砂量であり、他方は河床材料から1次元の河床変動計算を通してbed material loadとして計算される量である。この結果、後者のbed material loadとして計算したものの内の細粒成分が、前

者のwash loadとして扱ったものと量的にほぼ一致することが示された。従来、wash loadとは河床材料にほとんど存在しない微細粒径の成分で、河床材料とはコンタクトを持たずに輸送される成分と考えるのが常識であったが、本研究で示されたように、ごく僅かでも河床材料に含まれていれば、bed material loadとして取り扱っても流砂の大部分を占めるwash loadを表現可能であるのかも知れない。

石狩川のような規模の大河川においては河口から流出する成分の大部分は、粒径から言えばwash loadというべき細粒成分であることに間違いはないようであるが、本研究で行なった計算によれば、大規模な出水時にはwash loadの量に匹敵するようなbed material loadも流出しているものと考えられる。

本研究の結果を、石狩川の年間生産土砂量という観点で整理すると以下のとおりである。

- 石狩川の通常の年間生産土砂量は50~80万 m^3 である。
- 生産土砂の90%以上は微細粒子のwash loadである。
- 通常の年は年間流出土砂の80%以上が融雪期に生産されている。
- 既往最大洪水の発生した1981年においては300万 m^3 以上の土砂流出があったと推定される。
- 洪水時にはwash load以外の成分も卓越し、1981年の例ではwash loadの量に匹敵する量のbed material loadが流出している。

謝辞: 本研究で用いた全てのデータは北海道開発局より提供を受けたものである。また、本研究は(財)北海道河川防災研究センターの助成を受けて行われたものである。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 杉本基泰, 真野明: 阿武隈川における細粒土砂の観測と空間分布, 水工学論文集, 第41巻, pp.783-788, 1997.
- 2) 砂田憲吾, 長谷川登: 国土数値情報に基づく山地河川水系全体における土砂動態のモデル化の試み, 土木学会論文集, No.385/II-26, pp.37-44, 1994.
- 3) 吉川秀夫編著: 流砂の水理学, 第4章 流砂の算定法, 丸善株式会社, pp.113-149, 1985.
- 4) 建設省河川局: 改訂河川砂防技術基準(案), 調査編, 第12章, pp.303-324, 1978.
- 5) 清水康行: 沖積河川の縦断形と河床材料分布の形成について, 土木学会論文集, No.521/II-32, pp.69-78, 1995.

(1997. 9. 30 受付)