

昭和56年8月洪水における石狩川下流部の河床変動について

Bed Variations during the 1981-August Flood in the Lower Ishikari River

北海道開発局土木試験所	正員	○清水	康行
北海道開発局土木試験所	正員	板倉	忠興
北海道大学工学部	正員	岸	力
北海道大学工学部	正員	黒木	幹男

1. はじめに

河川の改修計画の立案に当っては、その河川の実態を把握し、洪水時の流れと河床変動を予測することが必要となる。一般に、計画規模に近い洪水を経験した河川は少なく、また大出水のデーターは不十分な場合が多い。石狩川の下流部（河口～15km）は、河口を含めて、彎曲、急縮、急拡などが連続し河道計画に特に問題となる区間である。北海道開発局では、本区間の河川改修計画を検討中であり、模型実験と並行して、洪水時の現地観測を実施している。

昭和56年8月は、寒冷前線と台風12号によって流域平均282mmという降雨があり、基準点石狩大橋地点では、計画高水位8.75mを上回る9.23m（8月6日2時）を記録する戦後最大級の出水となった。

高木¹⁾らは、この昭和56年8月洪水前後に行われた同時水位観測、流量観測、縦断（河床波）測量、彎曲部の流向流速、流砂量観測および洪水前後に行われた横断測量等の概要について報告を行っており、また、星²⁾らは、この際の準備、観測体制、反省点などに関する考察を行っている。さらに、板倉³⁾らは、特に河床波と河床抵抗、流砂量等に着目した報告を行っている。本文では、これら一連の洪水観測資料の中で特に河床変動に着目し、その実態について報告を行うとともに、すでに報告されている「洪水時の河床抵抗の変化」を考慮した河床変動計算を試み、実測値との比較、考察を行うものである。

2. 洪水時の河床変動

図-1～図-4は、石狩川下流部で洪水前（昭和56年5月）と洪水直後（昭和56年8月11日）に行われた横断測量結果の一部である。ここで、洪水前（5月）のものは融雪出水直後のものであり、その後8月の洪水までの期間においては顕著な出水は無かったので、図-1～図-4に見られる河床変動は、8月4日から9日にかけての出水によるものと考えられる。また、図-2と図-3中に黒丸で示した点は、図-5に黒丸で示す時刻に行われたエコーサウンダーによる縦断測量結果をもとに、洪水時の河床高を算出し、プロットしたものである。ここで、KP（キロポスト）とは、河口からの距離（単位km）を示す。

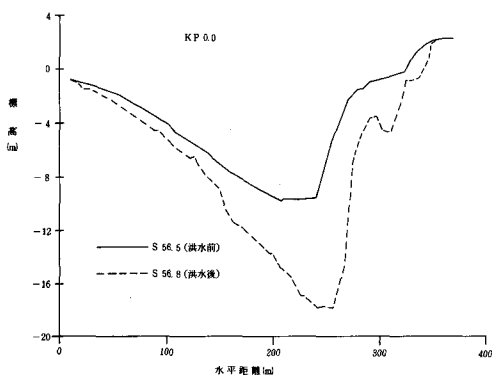


図-1 KP 0 (河口) 横断面図

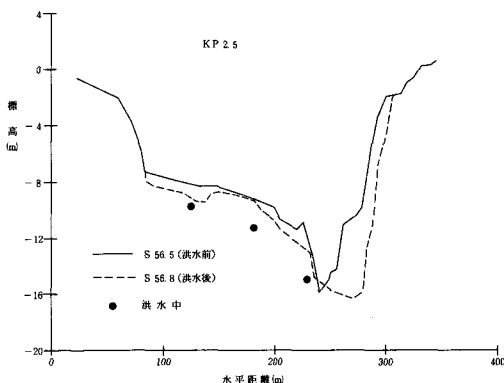


図-2 KP 2.5 横断面図

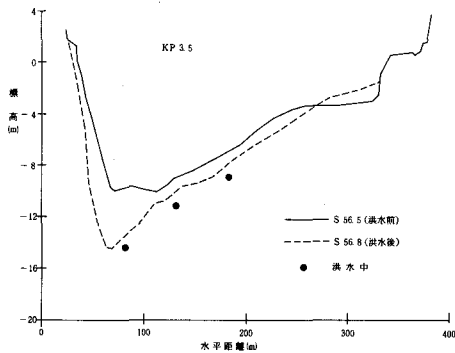


図-3 KP 3.5 横断面

図-1の河口部の河床変動によると、最深部で約8mの低下が生じており、これは河積にすると約1,000 m^3 の拡大に相当する。この様な現象は河口から上流部6~7kmの区間で生じており、いわゆる洪水によるフラッシュ現象が実際に石狩川で確認されたことになる。

また、図-2、図-3に示した洪水時の河床高は、洪水後の河床よりさらに1~2m低くなっており、洪水減水期に埋戻しが生じたものと推測される。

洪水前後の横断測量は河口からはば200m間隔にKP 8.5地点まで行われており、この資料から洪水後の河積の増加量を求めたものを図-6に示す。最も著しい河積の拡大が生じているのは、KP 5.4の河口橋地点であり河口橋のピアによる局所洗堀が原因と考えられる。ついで著しいのは河口付近であり、これは洪水流が海域へ流れ出す直前で水面勾配が最も急になり掃流力も最も大きくなるためと考えられる。図-6に示した区間での河積の拡大量からこの区間での流出土砂量を計算すると約280万 m^3 にも及ぶ。驚異的な河床変動量である。

一般に、河川の洪水時には、かなり大規模な河床変動が生ずると考えられるが、石狩川のような大河川で、それも昭和56年洪水のような大出水時において確められた例はほとんど無く、これらの資料は河川計画に極めて貴重なものと言えよう。

3. 海域への土砂流出の状況

図-7、図-8は洪水直前(昭和56年7月)と洪水直後(昭和56年8月)に行われた河口付近の海域の深淺測量をもとに作成した海床コンター図である。7月の状態では河川からの流送土砂の大半は沿岸方向に流送されたと見られ、等深線はほぼ汀線に平行な状態となっている。これに対して洪水後の状態は、河口から導流堤の先端付近までの洗堀と、海域への舌状の大規模な堆積が見られる。堆積した砂州の前縁線は河口から約2kmの沖合いにまで達している。図-7、図-8の範囲での海床変動量を算出すると、約330万 m^3 の堆積が生じたことになる。

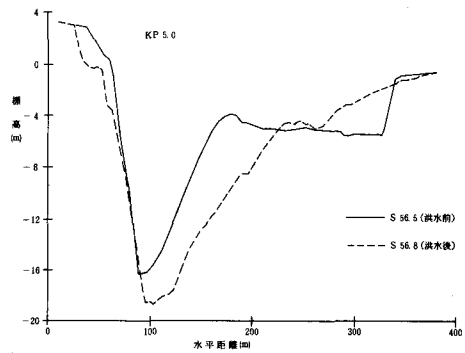


図-4 KP 5.0 横断面

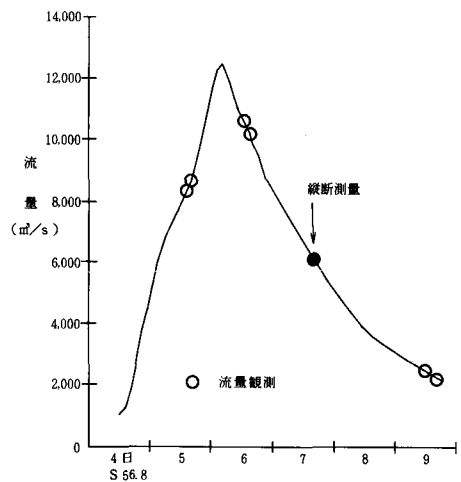


図-5 石狩川下流部ハイドログラフ

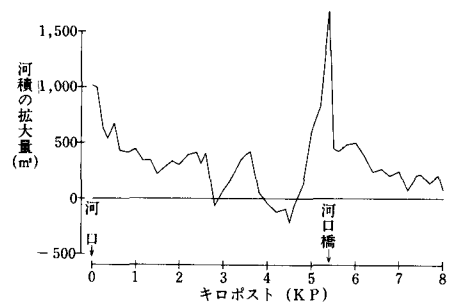


図-6 洪水による河積の拡大量

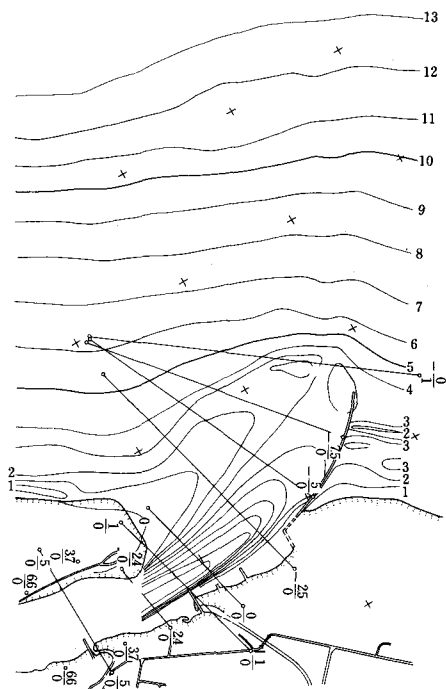


図-7 河口付近海床コンター図（洪水直前）

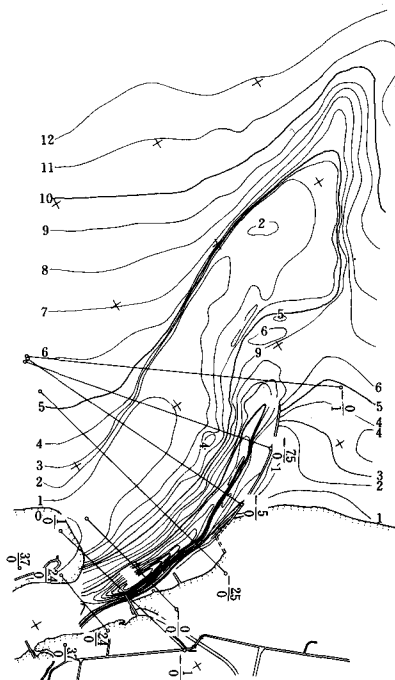


図-8 河口付近海床コンター図（洪水直後）

以上の観測結果により、石狩川下流部における洪水時の河床変動および、海域への土砂流出状況が把握された。このうち、河道部分の河床変動については、河道の合理的な設計や維持及び管理上の観点から河川計画に極めて重要な現象でもあり、より定量的にそのメカニズムを把握する目的で以下に洪水時の河床変動計算を行い、計算結果をもとに考察を加える。

4. 河床変動の基本式

これまでの河床変動計算は、ほとんど掃流砂のみを対象として行われてきたが、石狩川下流部で行われた流砂量の観測結果によると、洪水時には流砂の大部分が浮遊砂であることが確認されているため、ここでは掃流砂だけでなく浮遊砂も考慮した計算を行う。計算モデルは流下方向の一次元モデルとし、基本式は以下に示すとうりである。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(H + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} \right) + i_e = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \left\{ \frac{1}{B} \frac{\partial (q_{BT} \cdot B)}{\partial x} + \sum (q_{sui} - W_i C_i) \right\} = 0 \quad (2)$$

$$\delta \frac{\partial P_i}{\partial t} + P_i \cdot \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \left\{ \frac{1}{B} \frac{\partial (q_{BT} \cdot B)}{\partial x} + q_{sui} - W_i C_i \right\} = 0, \quad P_i^* = \begin{cases} P_i & ; \partial Z / \partial t \geq 0 \\ P_{i0} & ; \partial Z / \partial t \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{\partial (C_i h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{QC_i}{B} \right) = q_{sui} - W_i C_i \quad (4)$$

式(1)は不等流の式、式(2)は流砂の連続式、式(3)は粒径別の流砂の連続式、式(4)は浮遊砂濃度の連続式である。ただし、浮遊砂については、水深方向の平均値を用いている。式中、 H は水位、 Q は流量、 A は断面積、 α はエネルギー補正係数、 g は重力加速度、 i_e はエネルギー勾配、 Z は河床高、 q_{BT} は単位巾単位時間当りの粒径別掃流砂量、 $q_{BT} = \sum q_{Bi}$ は全掃流砂量、 C_i 、 $\bar{C} = \sum C_i$ はそれぞれ粒径別および平均の浮遊砂濃度、 δ は

交換層の厚さ、 P_i 、 P_{io} は粒径 d の砂れきが交換層および交換層下に示める割合、 q_{sui} は河床の単位表面積当りの粒径別浮上量、 W_i は粒径別の砂れきの沈降速度、 B は河巾（低水路巾）、 λ は河床砂れきの空げき率、 x は縦断方向距離、 t は時間である。

(3) 式中の粒径別掃流砂量の式は、土研式を粒径別に表示した平野⁴⁾の式(5)を用いる。

$$q_{si}/\sqrt{sgdi^3} = P_i \phi f(U_{*ci}^2/U_*^2) \tau_{*i}^{3/2} \quad (5)$$

ただし、 $\phi = 4$ 、 $f(U_{*ci}^2/U_*^2)$ は土研式中の関数、 $\tau_{*i} = U_{*i}^2/sgdi$ は粒径別無次元掃流力、 U_* は摩擦速度、 s は砂れきの中比重、 U_{*ci} は混合砂における粒径別限界摩擦速度であり、Egiazaroff・浅田⁵⁾の式(6)を用いる。

$$U_{*ci}^2/U_{*cm}^2 = [\log 23 / \log (21 d_i / d_m + 2)]^2 d_i / d_m \quad (6)$$

ただし、 d_m は平均粒径、 U_{*cm} は平均粒径に対する限界摩擦速度であり、岩垣⁴⁾の式で求めるものとする。

(5) 式を用いた河床変動の計算は、実験水路や実河川⁶⁾の例でその適合性が確められており、掃流砂を対象とする場合(5)式を用いることに問題は無いと考えられる。

(2) 式および(3)式中の河床からの浮上量 q_{sui} には、板倉・岸⁷⁾の式(7)を用いる。

$$q_{sui} = \frac{1}{\tau_*} \int_0^{\tau_*^*} \int_{0z}^{\tau_*^*} C_{bi} W_i d\lambda dz_* \quad (7)$$

なお、(7) 式中の諸量の説明および、(7) 式を用いた石狩川での浮遊砂量の計算結果と実測値の比較は文献(3)で行われており、ここでは説明を省略する。

5. 河床抵抗の算定と水位の算出法

従来の不等流計算では、(1) 式中のエネルギー勾配 i_e は、 Manning 則等を用いて行われているが、石狩川下流部の場合、洪水中に河床形態の変化により粗度が大きく変化するため、従来のように Manning 則をそのまま適用するのは不適當と考えられる。

図-9 は、図-5 に白丸で示した時刻に行われた流量観測資料より算出した全せん断力 τ_* と粒子せん断力 τ'_* の関係である。ここに $\tau'_* = R i_e / s d_m$ であり、 R' は次式により定義される。

$$U = \sqrt{g R i_e} \{ 6.0 + 5.75 \log (R' / 2 d_m) \} \quad (8)$$

ここに、 U ；平均流速、 R ；径深である。

図-9 には、岸・黒木による τ_* と τ'_* の関係式を実線で示してあるが、石狩川下流部の場合図中に破線で示すように、DUNE II の理論式と TRANSITION の理論式の

間にはいつている。これは、河床波が十分に発達する (DUNE II) 前に、崩壊が進行 (TRANSITION) するものと考えられ、このことは板倉らによる河床波の観測資料からも推定できる。また、近傍地点の同様な観測資料によると、DUNE I の領域では τ_* と τ'_* の関係はほぼ理論式に適合することが確められているため、以下の計算では次式⁸⁾の関係を用いることにする。

$$\tau'_* = 0.21 \tau_*^{1/2} \quad (\tau_* < 3.2) \quad \cdots \cdots \text{DUNE I} \quad (9)$$

$$\tau'_* = 0.03 \tau_*^{2.16} \quad (\tau_* > 3.2) \quad \cdots \cdots \text{図-9 中の破線} \quad (10)$$

(9)、(10) 式を不等流計算に直接使用できるように、(8) 式の指数近似式(11)を用い、平均流速公式に直すと、(12)、(13) 式ようになる。また、高水敷については従来どうり Manning 型の平均流速公式(14)を用いる。

$$U / \sqrt{g R i_e} = 7.66 (R / 2 d_m)^{1/6} (\tau'_* / \tau_*)^{2/3} \quad (11)$$

$$U = 2.41 \sqrt{g} s^{1/3} d_m^{1/6} R^{1/3} i_e^{1/6} \quad (\tau_* < 3.2) \quad (12)$$

$$U = 0.66 \sqrt{g} s^{-0.77} d_m^{-0.94} R^{1.44} i_e^{-0.94} \quad (\tau_* > 3.2) \quad (13)$$

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} i_e^{1/2} \quad (\text{高水敷}) \quad (14)$$

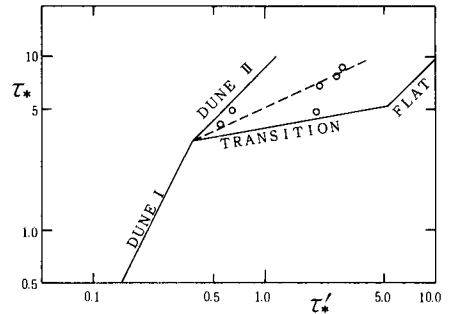


図-9 石狩川下流部 τ_* と τ'_* の関係

実際の水位の計算は、(1)式を差分化した(15)式および、流量の連続式(16)を用いて行う。

$$\left(\frac{\alpha Q^2}{2gA^2} + H - \frac{\Delta x}{2} i_s\right)_U = \left(\frac{\alpha Q^2}{2gA^2} + H + \frac{\Delta x}{2} i_s\right)_D \tag{15}$$

$$Q = \sum_{i=1}^N U_i A_i \tag{16}$$

ただし、添字 U、D はそれぞれ上流側および下流側の値、N は横断方向の分割数、i は横断方向 i 番目の値であることを示す。(16)式中の U_i は高水敷の場合には(14)式を、低水路の場合には τ_* の領域別に(12)式または、(13)式を用いる。また(15)式中の α は(17)式により計算する。

$$\alpha = \frac{\int U^3 dA}{\int [(Q/A)^3 A]} = \frac{\sum_{i=1}^N U_i^3 A_i}{(Q^3/A^2)} \tag{17}$$

6. 計算結果

計算対象区間は、洪水中に最も著しい河床低下の生じている KP 0.0～8.0 とし、計算期間は図-5 に示す 8 月 4 日～9 日とした。

水位の計算は、河道を左右岸の高水敷および低水路の 3 部分に分割し、図-5 の流量を用いて行った。また、下流端の水位は、洪水中の同時水位観測の実測値を与えた。

流砂量の計算および河床変動の計算は低水路部分のみで行い、河床高の初期値は昭和 56 年 5 月測量の横断面図より高水敷と低水路の平均河床高を算出し与えた。

河床材料は、図-10 に示すように下流から上流に向かって若干粗粒化する傾向が見られるため、図-11 に示す上下流端の粒度分布をもとに、計算断面毎に内挿したものを与えた。

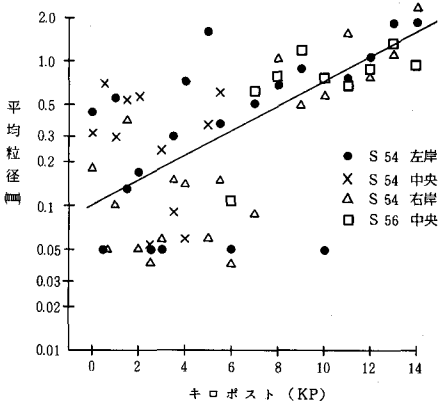


図-10 河床材料の平均粒径

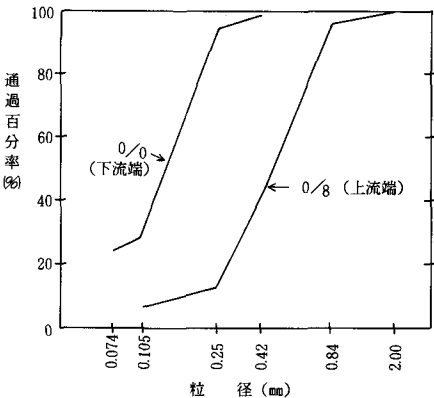


図-11 計算に用いた河床材料

河床変動の計算結果を、洪水直後(8月10日～11日)の横断測量結果を用いて算出した平均河床高と比較したのが図-12、また、KP 3.5 地点の河床高の時間変化を示したのが図-13である。また、計算中に行う水位の計算結果と洪水中に行われた同時水位観測結果とを比較したのが、図-14～図-16である。いずれも計算結果は実測値を良く説明しており、計算に用いたモデル、流砂量式および河床抵抗の算定法が適当であったと考えられる。なお、図-13中の白丸は、前述の洪水中の縦断測量結果(図-3中の黒丸)から推定したものであり、必ずしも正確なものではない。

図-13と図-5の流量ハイドログラフを比較してみると、著しい河床低下は流量 7,000 m³/sec を越えた付近で始まり、減水期の 7,000 m³/sec 付近まで続き、その後少しずつ回復しているものと推測される。この 7,000 m³/sec という流量がどういう意味を持つのかは興味深く、今後の検討課題としたい。

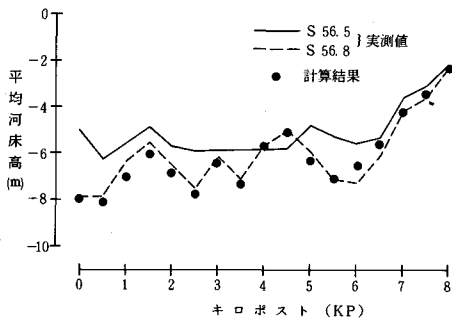


図-12 河床変動の計算結果

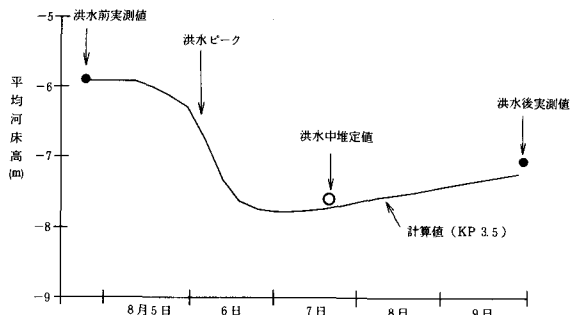


図-13 KP 3.5 平均河床高の時間変化

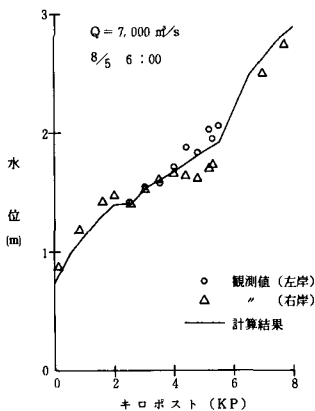


図-14

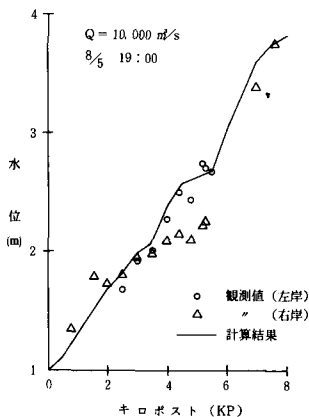


図-15

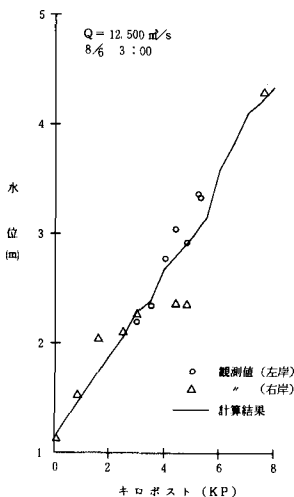


図-16

7. 考察

著者らは本文において石狩川の洪水観測資料をもとに、河床抵抗の変化を考慮した河床変動の計算を行い、洪水時の河床変動と水位の変化の再現を行った。最終的に本文において説明した手法に至る前に、従来のようにマンギングの粗度係数を一定とした計算を幾通りか実施したが、水位・河床変動共にうまく再現することは出来なかった。これは、計算中に水位の計算を通して行う河床せん断力の算定が適切でなかったために、結果的に流砂量も適切に計算出来なかったためと考えられる。すなわち、河床抵抗の変化と河床変動は常に表裏一体となっており、河床抵抗を適切に表現することにより初めて河床変動も適切に表現できると考えられる。その意味においても本文において行った計算手法は、極めて有効な手法と言え、今後の河川計画への応用も十分可能であると考えられる。

最後に、本成果はすべて、未曾有の大洪水中に幾昼夜にも及ぶ洪水観測の結果によるものであり、当時の担当者の努力に心から敬意を表するものである。

参考文献

- 1) 高木謙治, 牧野成雄, 竹本成行, 森田康志; 石狩川下流部における洪水流と河床変動の観測, 第26回水理講演会論文集, 1982。
- 2) 星清, 竹本成行, 瀬川明久; 石狩川下流部における昭和56年8月洪水観測体制について, 第30回水理講演会論文集, 1985。
- 3) 板倉忠興, 山口甲, 岸力, 黒木幹男; 昭和56年8月洪水における石狩川下流部での河床波観測について, 第30回水理講演会論文集, 1985。
- 4) 平野宗夫; Armoring をともなう河床低下について, 土木学会論文報告集第195号, 1971。
- 5) 浅田宏; 山地河川の流砂量と貯水池の堆砂過程に関する研究, 電力中央研究所報告総合報告No.2, 1976。
- 6) 北海道開発局; 河川の機能に関する基礎的研究, 「ダム下流の河床低下について」, 1980。
- 7) 岸力, 黒木幹男; 移動床における河床形状と流体抵抗(1), 北工学部研究報告第67号, 1973。
- 8) 代表研究者 岸力; 昭和56年8月北海道豪雨災害に関する調査研究, 「3.2 流れの抵抗特性」, 1982。