

準3次元河床変動モデルによる石狩川河口付近 の昭和56年洪水再現計算

QUASI-THREE-DIMENSIONAL CALCULATION OF RIVERBED DEFORMATION
DURING 1981-YEAR FLOOD IN THE ISIKARI RIVER MOUTH

井上卓也¹・濱木道大²・荒井信行³・中田満洋⁴・高橋季承⁵・林田寿文⁶・渡邊康玄⁷

Takuya Inoue, Michihiro Hamaki, Nobuyuki Arai, Mitsuhiko Nakata,
Toshiaki Takahashi, Kazufumi Hayashida, Yasuharu Watanabe

¹正会員 修士(工) (株) 開発工営社 (〒060-0004 札幌市中央区北4条西5丁目1番地)

²学士(工) (株) 開発工営社 (〒060-0004 札幌市中央区北4条西5丁目1番地)

³修士(工) (株) 開発工営社 (〒060-0004 札幌市中央区北4条西5丁目1番地)

⁴国土交通省北海道開発局石狩川開発建設部 (〒060-8541 札幌市中央区北2条西19丁目)

⁵国土交通省北海道開発局石狩川開発建設部 (〒060-8541 札幌市中央区北2条西19丁目)

⁶正会員 国土交通省北海道開発局石狩川開発建設部 (〒060-8541 札幌市中央区北2条西19丁目)

⁷正会員 工博 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)

It is important for river planning and improvement to predict flows and riverbed deformation. Last year, a quasi-three-dimensional numerical model was developed to simulate riverbed deformation in the downstream of the Ishikari River. But, the availability of this model during a flood wasn't investigated. In this paper, this model is improved to consider variation of Manning's roughness coefficient which is caused by sand waves. And, the calculated results of water level and riverbed deformation are compared with the observations of 1981-year flood in the Isikari River.

Key Words: quasi-three-dimensional numerical model, riverbed deformation, The Ishikari River, bed load, suspended load distribution, roughness coefficient, curvature of streamline, secondary flow, meandering channel, river mouth

1. はじめに

河道計画策定を目的に河床変動の予測を行う場合、一次元河床変動モデルが一般的に用いられる。しかし、このモデルでは、横断方向の局所洗掘・堆積現象の把握は困難である。また、浮遊砂が卓越する区間では、浮遊砂の濃度分布を適切に考慮する必要があり、さらに洪水時には流量規模によって小規模河床形態が発生し粗度係数も大きく変化することが予想されるが、このような場合には粗度の変化も取り込む必要がある。

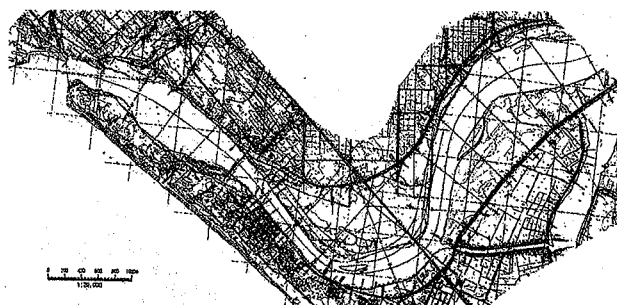


図-1 石狩川河口部平面図

このため、石狩川の河道計画を策定する上で、これらの実現象に関する課題の解決が急務であると

の考えから、局所洗掘・堆積現象の定量的な予測が可能で、かつ浮遊砂が卓越するような区間に適用可能な準三次元河床変動モデルを構築した。このモデルは清水らのモデル¹⁾に二次流を考慮した流線方向の浮遊砂濃度連続式を導入²⁾した混合粒径モデルである。

本モデルの妥当性は、既検討³⁾において石狩川下流の現況河道の安定河床形状を予測することにより検証しているが、洪水中における挙動の再現性は確認していない。

本論文では、再現対象として洪水中の十分な実測データを有する⁴⁾ 石狩川の昭和56年8月上旬洪水を対象に流れ及び河床変動の再現計算を行い、上記モデルの洪水中の適用性を検証した。

昭和56年8月洪水は寒冷前線の停滞と台風12号の襲来により石狩川流域で史上最大を記録する豪雨をもたらし、中下流河道区間では計画高水位を上回る水位を記録した大洪水である。

昭和56年8月上旬洪水では、実測データを基に小規模河床形態の変化を考慮した石狩川の河床抵抗則⁵⁾⁶⁾が求められており、これを本モデルへ適用させた。この河床抵抗則については、導入の効果を検証するため、洪水期間中に粗度係数が変化しない再現計算を同時に行い比較した。その他、河口付近における水位の再現性の向上を図るため、計算範囲を海域まで拡張し、塩淡水境界を考慮した計算とした。

2. 準3次元河床変動モデルの改良

(1) 流れの基礎式

流れの基礎方程式は、水深方向に積分した3次元の Reynolds 方程式及び連続式を用いる。

(2) 混合粒径による河床変動モデル¹⁾²⁾³⁾

粒径別の掃流砂量式には、粒径別に拡張された芦田・道上の式を用いる。横断方向の掃流砂量式には、長谷川の式を用いる。粒径別の浮遊砂の基準点濃度及び砂粒の浮上量式には、板倉の式を粒径別に拡張した式を用いる。なお、2次流の影響を考慮するため、流速と浮遊砂濃度の水深方向分布を考慮した流線方向の浮遊砂濃度連続式を導入する。

(3) マニング粗度係数の取扱い⁵⁾⁶⁾

一般に、浮遊砂が卓越するような（河床材料の粒径が水深に比して非常に小さい）河川区間では、小規模河床形態の発生が流量規模によって異なり、粗度も大きく変化していると考えられる。

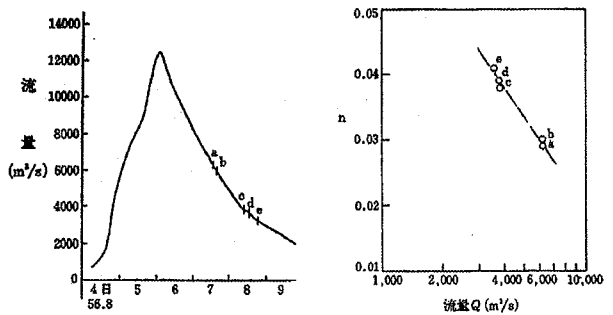


図-2 S56.8 上旬洪水ハイドログラフと粗度係数の関係

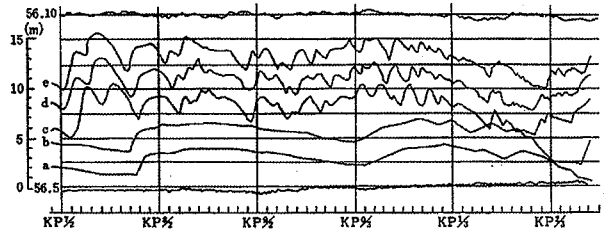


図-3 洪水中の河床波観測結果

図-2 は石狩川の河口付近における昭和56年8月上旬洪水時の流量ハイドログラフと洪水中に行われた同時水位観測結果に基づいて逆算したマンニングの粗度係数であり、図-3 は河床波の観測結果である。図3中のa～eの記号は図-2で示した時刻における値を示している。なお、図-3中の最下段には洪水前の5月、最上段には洪水後の10月の観測記録も合せて示している。

これらより、5月には平坦であった河床が洪水期間中にはDuneが発達し、洪水後の10月には再び平坦な河床にもどっていることがわかる。洪水時のDuneの形状もa、bでは波長約300m、c～eでは50～70mと時刻により大きく異なっている。河床波観測を行った地点では、流量の増加とともに粗度係数が減少する傾向にある。これは河床波の形状が流量規模によって異なるためと推定される。

このように、一洪水中においても流量規模の違いによる河床波の消長に伴って粗度係数が大きく変化することが予測されることから、粗度係数を一定値として取り扱った場合、水位計算結果も実現象とは大きく異なったものとなり、同時に河床せん断力、流砂量、河床変動の計算も正しく行なわれないことになる。

全ての河川区間において、洪水中に粗度が大きく変化するというわけではないが、石狩川下流部においては洪水時の観測結果より、粗度の変化が大きいことが確認されており、実現象を予測するためには河床波を考慮した河床抵抗の算定法が必要となる。

(4) 石狩川の河床抵抗則⁵⁾⁶⁾

以下に述べる河床抵抗の算定法は、石狩川下流の昭和 56 年 8 月上旬洪水時の観測結果に基づいたものであり、その適用はひとまず石狩川下流部に限定する。

図-4 は石狩川下流部 KP11.0 地点の流量観測資料より算出した全河床せん断力 τ_* と有効河床せん断力 τ'_* の関係である。 τ'_* は $\tau'_* = R'ie/Sd_m$ で与えられ、 R' は次式により定義される。

$$u = \sqrt{gR'ie} \{6 + 5.75 \log(R'/2d)\} \quad (1)$$

ただし、 u は平均流速、 R' は τ'_* に対する径深である。図-4には岸・黒木による τ_* と τ'_* の関係⁵⁾を実線で示してあるが、図中に破線で示すように石狩川下流部では、Transitionの理論線を下まわる傾向が見られる。これは、河床波が十分に発達(Dune I → Dune II)する前に崩壊が進行したためと考えられる。つまり、流量が増加するとともに τ_* が増加し、河床波の崩壊が進行するため粗度が減少するものと考えられる。これを図-3と比較すると、c～eの河床波はDuneであり、a～bは崩壊が進行した河床波と推定される。

以上の結果から、石狩川の河床抵抗則として次式を与える。

$$\tau'_* = 0.21\tau_*^{1/2} \quad (0.04 < \tau_* < 1.35) \quad \text{Dune I} \quad (2)$$

$$\tau'_* = 0.1\tau_*^3 \quad (1.35 < \tau_* < 3.16) \quad \text{図-4の破線} \quad (3)$$

$$\tau'_* = \tau_* \quad (3.16 < \tau_*) \quad \text{Flat} \quad (4)$$

(5) 境界条件

実際に河床変動計算を行うにあたり必要となる境界条件としては、種々の場合が考えられるが、ここでは河道上下流端条件、掃流砂、浮遊砂の取扱いについて以下のように設定する。

1) 河道上流端

河道上流端の河床は、昭和 56 年 8 月上旬洪水前後で大きく変動していないこと、また経年的な変動も少ないことから、動的平衡状態を仮定する。掃流砂量は、上流端断面の水力諸量に見合う流砂量が上流から流入するものと考え、浮遊砂は浮上量と沈降量を同等として与える。

2) 河道下流端

洪水時の河口付近の水位は時々刻々変化している、また、経時的な観測資料も無いため起算点とすることができない。そこで、計算範囲を海域まで拡張し、下流端で潮位を与える。

塩淡水界面については、対象流量が $1000\text{m}^3/\text{s}$ 以

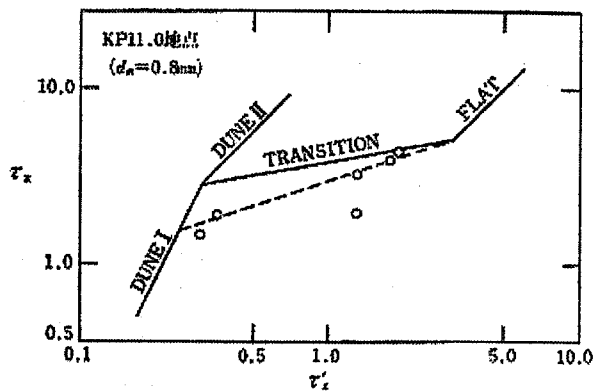


図-4 石狩川下流部 τ_* と τ'_* の関係

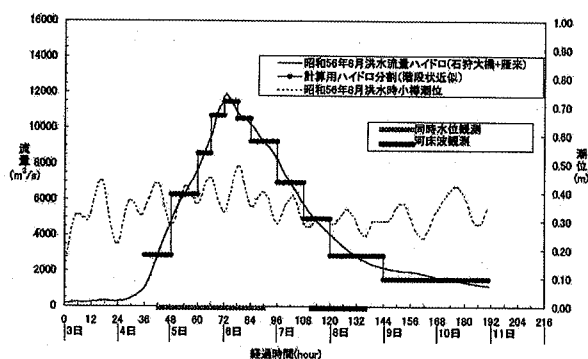


図-5 昭和 56 年 8 月洪水流量ハイドログラフ

上の流量であるため、河道内に塩水くさびの侵入はないと考えられるが、海域において設定が必要である。塩淡水界面は密度フルード数の河口条件⁷⁾(上下層の連行を無視し、限界水深の考えから導かれた条件)を用いて簡易的に設定する。

本来、海域における流砂の取扱いは、沿岸流や波浪の影響、塩分接触によるwash loadの沈降等を適切に考慮する必要があるが、これら海域の挙動を正確に表現することは現時点では難しいため、本検討では下記の仮定条件により河床変動計算を行うものとする。

- (a) 塩淡水界面上では、掃流砂は発生しない。
- (b) 塩淡水界面上では、浮遊砂は沈降のみで、浮上しない。
- (c) 塩淡水界面が河床高より低い場合には、通常どおりの土砂収支計算を行う。

3. 石狩川河口付近の昭和56年8月上旬洪水再現計算

前述の準3次元河床変動計算モデルを用いて、石狩川河口付近を対象に、昭和56年8月上旬洪水の再現計算を行い、本モデルの有効性を検証した。

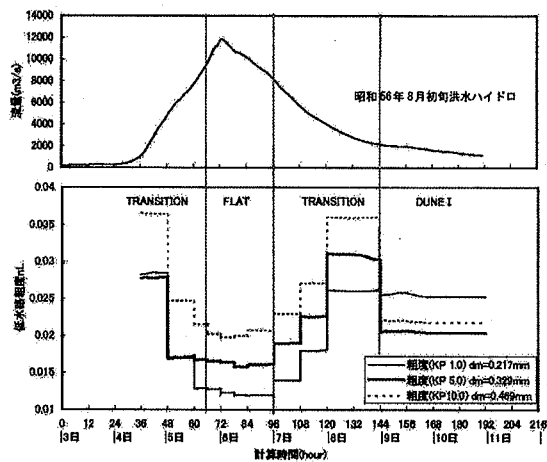


図-6 河床形態と粗度係数の経時変化図

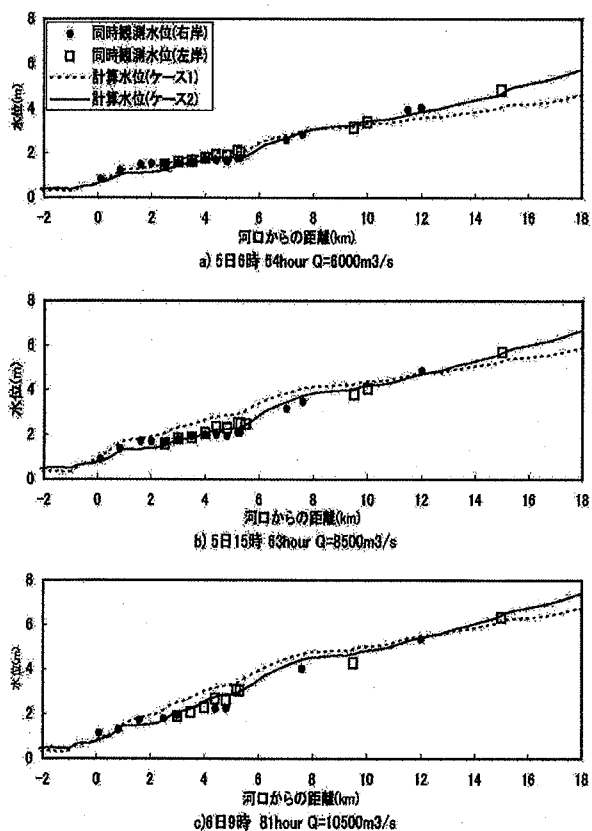


図-7 計算水位と同時観測水位の比較縦断面図

(1) 計算条件の設定

1) 計算メッシュ

計算メッシュは、縦断方向の測線数 93 測線、横断方向については低水路法尻間 9 点、左右岸高水数は各 6 点の合計 21 点を設定した。

2) 初期河床

初期河床は、洪水前の昭和 56 年 5 月測量時の河床形状とした。

3) 流量

流量は、図-5 のように昭和 56 年 8 月上旬洪水流

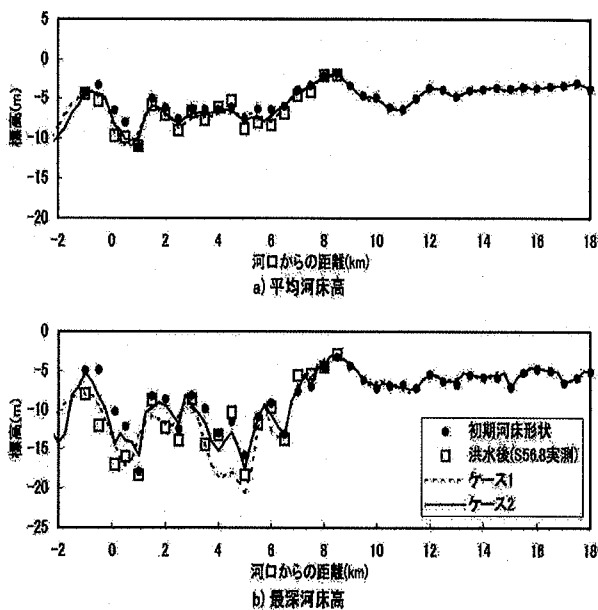


図-8 計算河床高と実測河床高の比較縦断面図

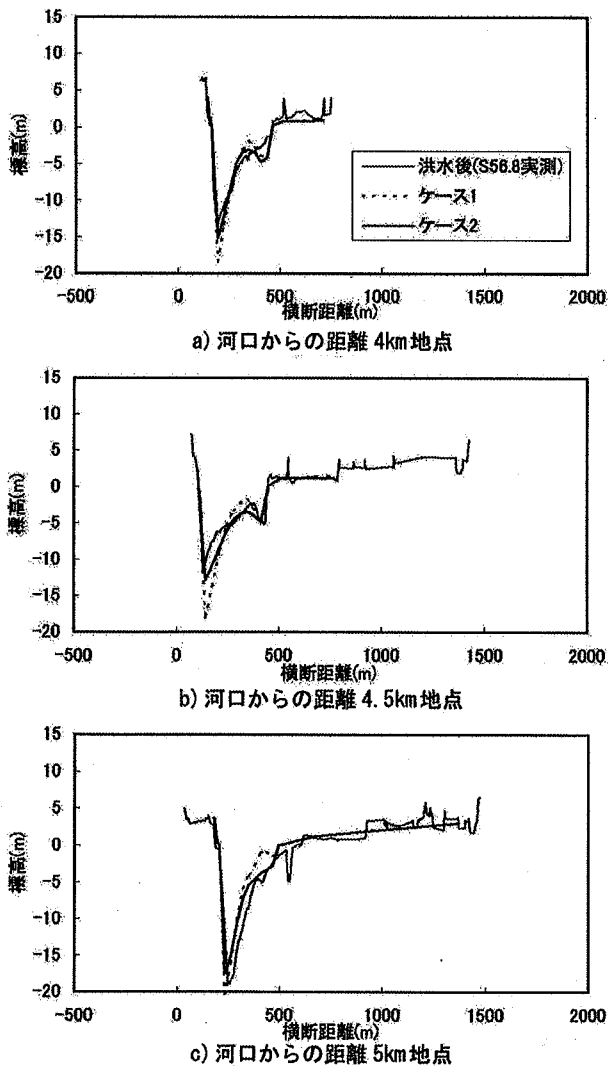


図-9 比較横断面図

量ハイドロを分割し、その分割時間内の平均値により時系列データを作成し設定した。

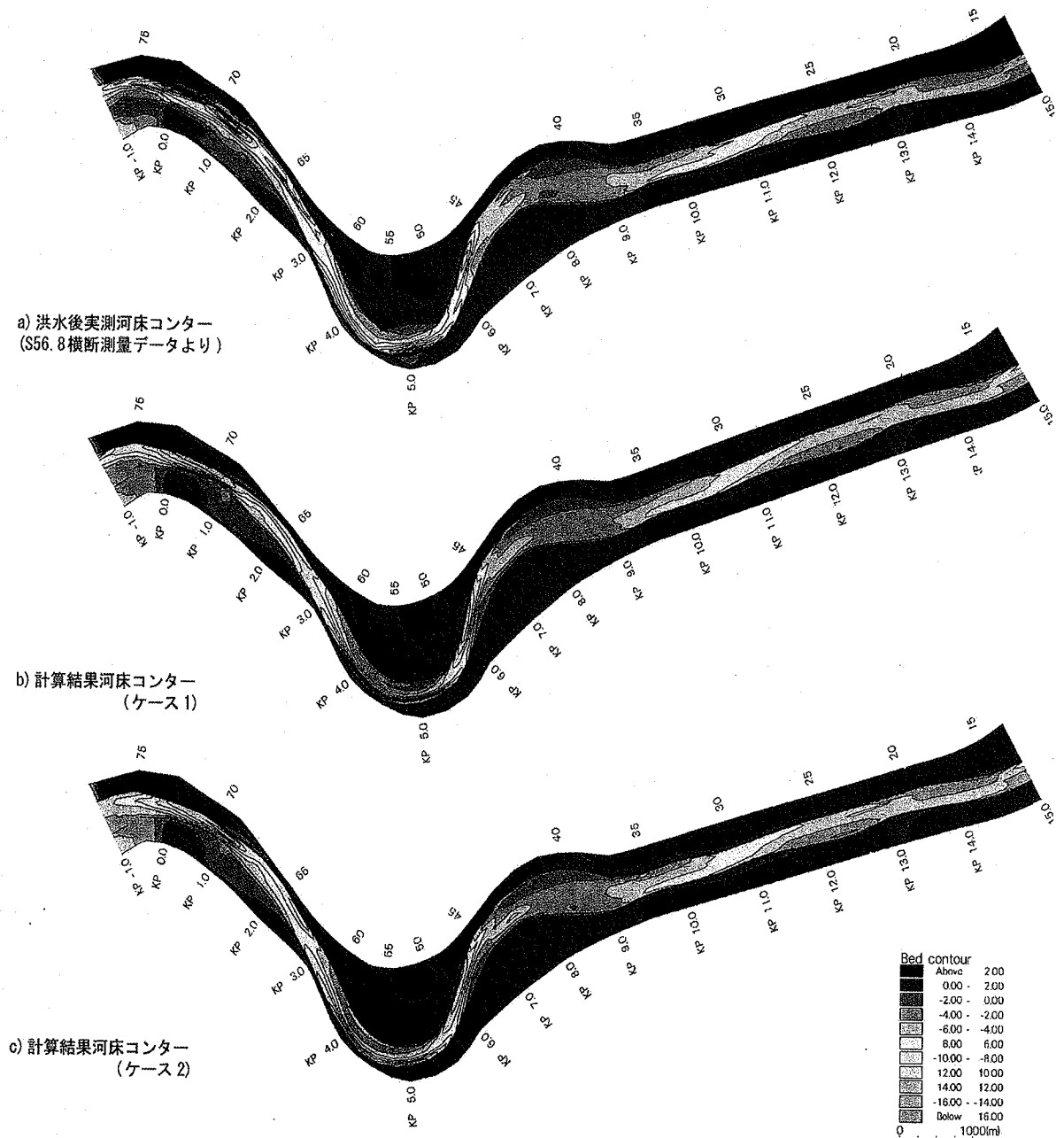


図-10 河床コンター図

4) 粗度係数

低水路の粗度係数は、計画粗度係数を用いた場合（ケース1）と前述の石狩川の河床抵抗則から算出した粗度係数を用いた場合（ケース2）の2通りを設定した。なお、ケース1で用いた粗度係数は固定値であるが、ケース2で用いた粗度係数は水位、流速、粒径などにより経時的に変化する。

高水敷の粗度係数は両ケースともに計画粗度係数0.050を用いた。

(2) 計算結果

1) 河床形態の経時変化

図-6にケース2の場合における河床形態及び粗度係数の変化を示す。河床波の領域の変遷を見ると、約8500m³/s以上（8月5日18時頃の経過時間74hour～7日0時頃の経過時間96hour）の流量時にTransition領域からFlat領域に移行し、流量が減少すると再びTransition領域に戻り、さらに流量が減少し、約1500m³/s以下（6日1時頃の経過時間144hour以降）になるとDune I領域に移行したことがわかる。

2) 粗度係数の経時変化

図-6より粗度係数の変化を見ると、流量の増加と

共に小さくなり、流量の減少と共に大きくなる傾向がわかる。なお、6日1時頃（経過時間144hour）以降に流量が減少しているにも関わらず粗度係数が大きくなった理由は、既述のようにTransition領域からDune I 領域に移行したためと考えられる。また、粗度係数は下流側が上流側より小さくなる傾向が見られるが、これは、石狩川の河床抵抗則が河床材料粒径が大きくなると、粗度係数が増加する傾向を持つためである。

3) 同時観測水位との比較

図-7 に計算水位と同時観測水位の比較縦断面図を示す。

これによると、両ケースとも概ね同時観測水位を再現しているが、石狩川の河床抵抗則を用いたケース2の方がより高精度の再現性を有していることがわかる。また、下流起算点を海域に拡張し、塩淡水境界面を考慮したことにより、洪水流量によって変化する河口付近の水位を再現することができた。

4) 実測河床高との比較

図-8 に計算河床高と洪水後実測河床高の比較縦断面図、図-9 に計算河床高と洪水後実測河床高の比較横断面図、図-10 に実測河床コンター図と計算河床コンター図を比較して示す。

これらによると、両ケースとも洪水直後の実測河床高を概ね再現しているが、湾曲部（河口からの距離4km～5km 地点）において、ケース2がケース1より深掘れの再現性が向上している。

これは、粗度係数が流量規模により時々刻々変化するケース2の方が、増水期に洗掘され、減水期に若干埋め戻されるという洪水時の河床変動のメカニズムをより精度良く再現していることによると考えられる。

4. 考察

(1) まとめ

本検討で得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

(a) 本モデルにより、石狩川河口付近のように浮遊砂が卓越し、局所洗掘・堆積現象の定量的な予測が必要な蛇行部において、洪水時の流れ及び河床変動を十分な精度で表現可能であることが確認された。

(b) 特に、石狩川の河床抵抗則を用いることにより、粗度係数を固定した場合と比較して、同時観測水位や湾曲部の河床変動の再現性が向上していることが立証された。

(c) 本検討により、石狩川下流部における土砂移動のメカニズム、河床抵抗（粗度係数）の変化過程、河口付近における浮遊砂の挙動や塩水の侵入等の複雑な実現象を実用レベルで再現することができ、河道計画に資する基礎資料とすることができた。

(2) 今後の課題

本検討で昭和56年8月上旬洪水の再現計算を行うにあたっては、同洪水の実測値より求められた河床抵抗則⁶⁾を用いている。しかし、石狩川下流部において、どのような条件にも適用できる河床抵抗則が求められたわけではない。過去の実績洪水の再現計算や計画流量規模の予測計算を行う場合に、河床抵抗則をどのように適切に見積るかが今後の課題である。

また、本モデルは広い河川区間において適用可能な実用モデルとして構築しているため、今後は中流部における適用事例等を蓄積することにより、より汎用性の高いモデルとしたい。

それらの課題を克服できれば、本モデルが河道計画策定にあたりより有効な手法になると考えられる。

最後に、論文作成にあたってご助言をいただいた関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 清水康行, Marco Tubino, 渡邊康玄: 自由砂州と交互砂州の共鳴条件における河床変動計算, 水工学論文集第36巻, 1992
- 2) 伊東祐一郎, 清水康行: 浮遊砂混在平面2次元一般座標モデルと石狩川模型実験の再現計算によるその検証, 水工学論文集, 2003
- 3) 濱木道大, 井上卓也, 川村嘉勝, 荒井信行, 江崎國夫, 大山孝, 清水康行: 浮遊砂濃度分布を考慮した河口付近の準3次元河床変動計算, 河川技術論文集 vol. 9, 2003. 6
- 4) 竹本成行, 高木譲治, 牧野成雄, 森田康志: 石狩川下流部における洪水観測について(第2報), 河川に関する調査・試験・研究報告書, 北海道開発局土木試験所河川研究室, 1982. 3
- 5) 岸力, 黒木幹男: 移動床流における河床形状と流体抵抗(I), 工学部研究報告第67号, 北海道大学, 1973. 6
- 6) 清水康行, 板倉忠興: 浮遊砂を考慮した河床変動計算手法, 土木試験所月報No. 396, 北海道開発局土木試験所河川研究室, 1986. 5.
- 7) 水理公式集(平成11年版), (社)土木学会, 平成11年11月, pp557.
- 8) 昭和63年度石狩川下流部水理模型実験報告書 pp636.

(2004. 4. 7受付)