

河幅及び断面形状を考慮した掃流砂量式を用いた 河床変動解析

—石狩川河口部昭和56年8月洪水を例として—

BED VARIATION ANALYSIS USING THE SEDIMENT TRANSPORT FORMULA
CONSIDERING THE EFFECT OF RIVER WIDTH AND CROSS-SECTIONAL FORM
- IN THE CASE OF 1981 FLOOD OF THE ISHIKARI RIVER MOUTH -

岡村誠司¹・岡部和憲²・福岡捷二³

Seiji OKAMURA, Kazunori OKABE and Shoji FUKUOKA

¹正会員 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²正会員 国土交通省北海道局 水政課長 (〒100-8918 東京都千代田区霞が関2-1-3)

³フェロー 工博 Ph.D. 中央大学理工学部特任教授 中央大学研究開発機構教授
(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

Many of the sediment transport formulas cannot estimate well the amount of sediment discharge rate in rivers. Fukuoka (2010) derived the sediment transport formula considering the effect of river width and cross-sectional form using field observed data by the dimensional analysis. In this study, we develop a bed variation analysis to 1981 flood of the Ishikari River mouth and we apply Fukuoka's sediment transport formula to the analysis. We compare the results of the analysis by the sediment transport formula of Fukuoka and the previous formulas. As a result, in the case of the Ishikari River mouth, Fukuoka's formula improves the accuracy of reproducibility of cross-sectional bed forms at meandering channel compared with the previous sediment transport formulas.

Key Words : fukuoka's sediment transport formula, bed variation analysis, fukuoka's equation, river mouth

1. 序論

河川における洪水時の土砂輸送量および河床変動を精度良く算定することは、治水上、環境上重要である。しかし、洪水時の流砂量と河床変動は断面形状の変化の影響を受けて時間的に変化すること、河床変動や流砂量を容易に観測できる測定器が少ないこと等から、これらを精度良く把握し、算定することは容易でない。河床の砂礫の運動は、河床面に作用する流れのせん断力により生じることから、これまで、流れのせん断力と流砂量を関係付ける多くの掃流砂量式が提案されてきた。しかし、現地河川において洪水時の掃流砂量を必ずしも精度良く推定できない課題がある。これは、河幅や河道断面形状、河床状態を単純化した水路実験の結果を基にした掃流砂量式を、河道形状や河床状態が多様な現地河川へ適用することが難しいためと考えられる¹⁾。

福岡ら^{2),3),4)}は、沖積地河川の安定した河道形状(河幅・水深)は、流域の特徴を表す河道形成流量、河道勾配、河床材料粒径に支配されると考え、次元解析による

検討を行い、安定した河道における無次元河幅・無次元水深が無次元流量によって表現できることを、国内外の河川の実測データを用いて示した(式(1),(2))。

さらにこの考えに基づき、福岡ら^{4),5)}は、河川における掃流砂量は河幅や河道断面形との関係の中で決まる力学現象であると考え、次元解析により導いた掃流砂量の関数関係式に現地河川で観測された掃流砂量データを適用して検討し、広い範囲の実測掃流砂量を説明する関係式(河幅全体にわたる福岡の掃流砂量式)を得た(図-1および式(3))。

本研究では、現地河川の洪水流—河床変動解析に福岡の掃流砂量式および他の掃流砂量式を適用した検討結果を示す。はじめに、平面二次元河床変動解析への適用に適した単位幅の福岡の掃流砂量式を示す。その上で、河口部で大きな河床洗掘の生じた石狩川昭和56年8月洪水を対象に、福岡の掃流砂量式および従来の掃流砂量式(芦田・道上の式、佐藤・吉川・芦田の式)を用いた洪水流—河床変動解析を行い、解析結果を比較することで掃流砂量式が河床変動解析の精度に与える影響を検討する。

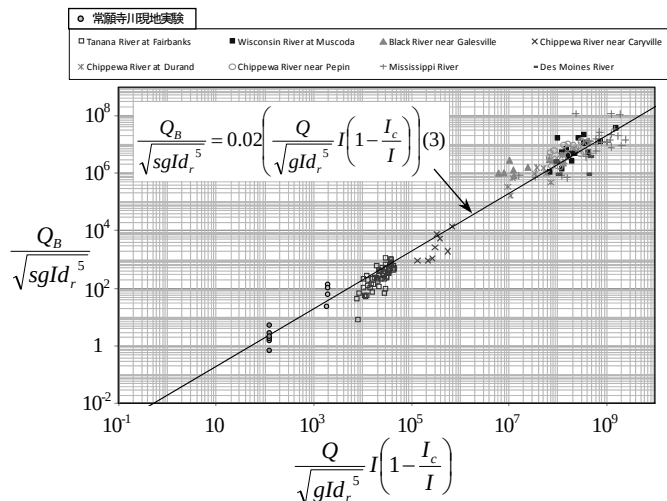


図-1 勾配を乗じた無次元流量と無次元掃流砂量の関係⁴⁾⁵⁾

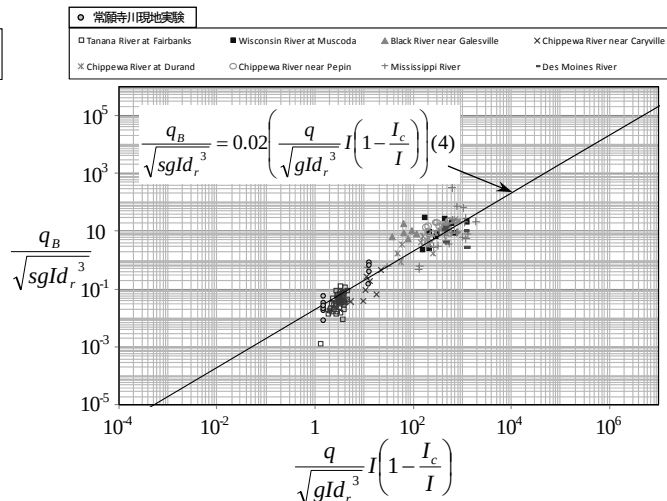


図-2 勾配を乗じた無次元単位幅流量と無次元単位幅掃流砂量の関係

2. 単位幅の福岡の掃流砂量式

福岡ら^{2),3),4)}は、沖積地河川における河道の安定形状は、流域の特徴を表す河道形成流量、河道勾配、河床材料粒径（粒度分布）により決定されると考え、安定河道を規定する独立な物理量から次元解析による検討を行った。自然河川の現地データ、河道拡幅実験の結果を用いて検討を行い、安定した河道における無次元水面幅、無次元水深は無次元河道形成流量によって規定され、式(1),(2)に示す関係（福岡の河幅の式、水深の式）が成立することを示した。

$$\frac{B}{d_r} = 4.25 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} I_d_r^5} \right)^{0.40} \quad (1)$$

$$\frac{h}{d_r} = 0.13 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} I_d_r^5} \right)^{0.38} \quad (2)$$

ここに、 B ：水面幅、 h ：断面平均水深、 Q ：河道形成流量、 g ：重力加速度、 I ：エネルギー勾配、 d_r ：代表粒径である。

福岡ら^{4),5)}はさらに、流域の支配的な物理量により形成された動的安定な河道の中で洪水時の流砂運動が生じていることから、掃流砂量は安定河道を形成する無次元流量と密接に関係すると考え、現地河川で測定された掃流砂量観測データを用いて検討を行った。その結果、図-1に示すように、無次元掃流砂量は無次元流量と勾配の積で表され、式(3)に示す関係（河幅全体にわたる福岡の掃流砂量式）が成立することを示した。なお、式(3)は文献4),5)で示された式をその後の検討で使いやすい形に修正したものである。

式(3)は断面全体の掃流砂量と流量の関係式であり、局所の掃流砂量の算定が必要な平面二次元河床変動解析への適用には適さない。そこで、式(4)に示すように単位幅の式として河床変動解析に用いる。図-2に示すように

式(4)についても現地河川データを良く説明できている。

$$\frac{Q_B}{\sqrt{s} g I_d_r^5} = 0.02 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} I_d_r^5} I \left(1 - \frac{I_c}{I} \right) \right) \quad (3)$$

$$\frac{q_B}{\sqrt{s} g I_d_r^3} = 0.02 \left(\frac{q}{\sqrt{g} I_d_r^3} I \left(1 - \frac{I_c}{I} \right) \right) \quad (4)$$

ここに、 Q_B ：断面掃流砂量、 q_B ：単位幅掃流砂量、 q ：単位幅流量、 s ：砂粒子の水中比重、 I_c ：河床材料の移動限界勾配である。

3. 石狩川河口部昭和56年8月洪水と既往研究

(1) 昭和56年8月洪水における観測および無次元流量と無次元河幅・無次元水深の関係

石狩川昭和56年8月洪水は、当時の計画を超える規模の洪水であり、石狩大橋地点でピーク流量11,300m³/sを記録した。洪水中には河口から約15kmの区間において北海道開発局により大規模な観測が行われた⁶⁾。特に、図-3に示す多数の地点において水位が測定され、詳細な縦断面水面形の時間変化が観測された。その他、洪水時の流量観測、縦断面河床形状調査、洪水直前・直後の河道横断測量等が行われ、多くの貴重なデータを得た⁶⁾。

図-4には、観測された水位・流量・河道横断面形状・河床材料粒径より算出した石狩川1k～15k区間の各地点における昭和56年8月洪水時の無次元流量に対する無次元水面幅、無次元水深の関係を示す。石狩川河口部の河道形状は、図-3に示すように9.0k上流は複断面の直線河道、4.0k～9.0k区間は堤間幅の広い複断面蛇行河道、3.0k下流は河幅の狭いほぼ単断面の河道となっており、河幅や河道平面形状が縦断的に変化する。それに関わらず、図-4に示す昭和56年8月洪水時の無次元流量に対する無次元水面幅、無次元水深の関係は、いずれの地点におい

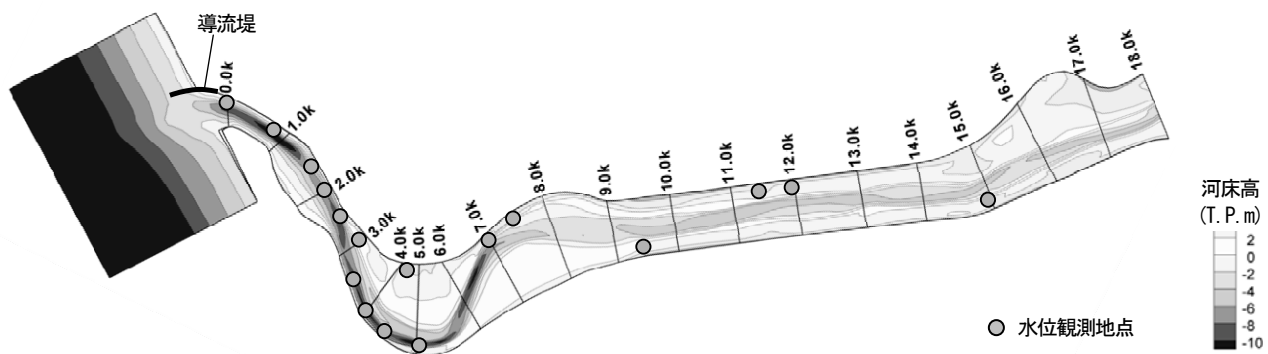


図-3 石狩川河口部の河道平面形状および昭和56年8月洪水における水位観測地点

でも式(1), 式(2)に示す福岡の河幅の式, 水深の式とよく対応している. このことから, 石狩川河口部において式(3), 式(4)に示す福岡の掃流砂量式を適用可能と考えられる.

(2) 昭和56年8月洪水の河床変動に関する既往研究

石狩川昭和56年8月洪水の河床変動に関して, これまで多くの精力的な研究が行われてきた.

森ら⁷⁾は石狩川の複断面蛇行流路において, 三次元洪水流解析と河床変動解析を一定流量の条件下で行い, 高水敷上の遅い流れが低水路に流入することにより「反転らせん流」が発生すること, それに伴い湾曲部の深掘れが低水路中央に寄ること等の重要な知見を見出した.

清水ら⁸⁾は浮遊砂が卓越する石狩川洪水の河床変動を説明するため, 鉛直分布を仮定した浮遊砂濃度の連続式と河床抵抗の変化を考慮した先駆的な一次元河床変動計算を行った. 井上ら⁹⁾は上記の解析を発展させ, 鉛直分布を仮定した浮遊砂濃度および水平方向流速から浮遊砂濃度フラックスを算定することで, 二次流による浮遊砂の移流が蛇行流路の河床変動に与える影響を検討した.

著者ら¹⁰⁾は, 洪水中の河床変動や河床抵抗の影響は水面形の時間変化に表れるという考えに基づき, 観測された縦断水面形の時間変化を解とする非定常洪水流・河床変動の一体解析を行った. また, 浮遊砂濃度の鉛直分布を仮定せず, 準三次元流解析から得られる流速分布を用いて浮遊砂濃度の三次元移流拡散を解析することにより, 洪水流の非平衡性の強い蛇行流路において洪水中の河床変動も含めた洪水現象をかなりの程度説明できることを示した. しかし, 湾曲部の横断河床勾配が急となり外岸での洗掘深が深くなる課題があった. その要因の一つに, 掃流砂量が適切に算定されていないことが考えられた.

本研究では, 掃流砂量の算定に福岡の式を用いた解析とともに, 従来の掃流砂量式(芦田・道上の式, 佐藤・吉川・芦田の式)を用いた解析を行う. そして, 掃流砂量式の違いによって掃流砂量の算定値および洪水後の縦横断河床形状の再現性がどのように異なるか比較し, 掃流砂量式が河床変動解析の精度に与える影響について検討する.

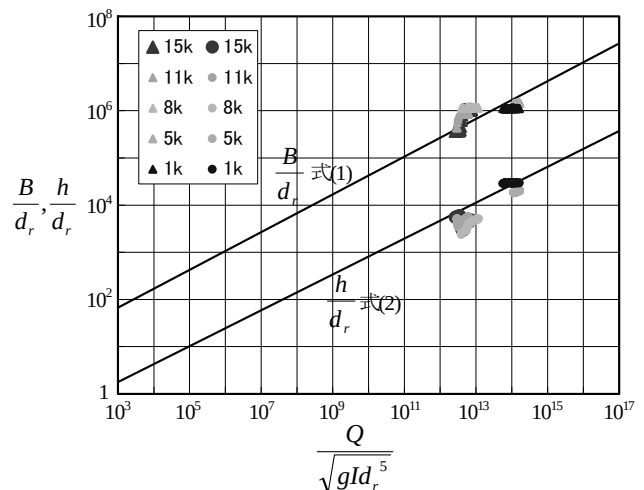


図-4 石狩川河口部における昭和56年8月洪水中の無次元流量と無次元水面幅, 無次元水深の関係

4. 石狩川河口部昭和56年8月洪水中の河床変動解析

(1) 解析手法と解析条件

本研究における解析方法および解析条件は, 掃流砂量式の他は, 著者らの解析¹⁰⁾と同様とし, 観測縦断水面形の時間変化を解として非定常洪水流解析と河床変動解析を一体的に行う.

流れの解析には, 蛇行流路における二次流と河床変動を解析するために準三次元流解析法を用いた. 河床変動は, 混合粒径を対象とした交換層モデルによる平面二次元河床変動解析を用いた. 浮遊砂濃度は, 準三次元流解析から得られる流速分布を用いて浮遊砂濃度の三次元移流拡散を解析し, 河床からの浮上量は板倉・岸の式¹¹⁾より計算した.

解析区間は, 上流端境界条件に15.0k地点の観測水位時系列を与え, 下流端境界条件として河口沖-3.0kに小樽港の潮位時系列を与えた. 河床抵抗にはマンニングの粗度係数を用い, 高水敷には河道計画における設定値 $n=0.050$ を用いた. 低水路粗度係数は, 解析における縦断水面形の時間変化が観測結果と一致するように値を変えて試行計算を繰り返した. 最終的に, 低水路粗度係数

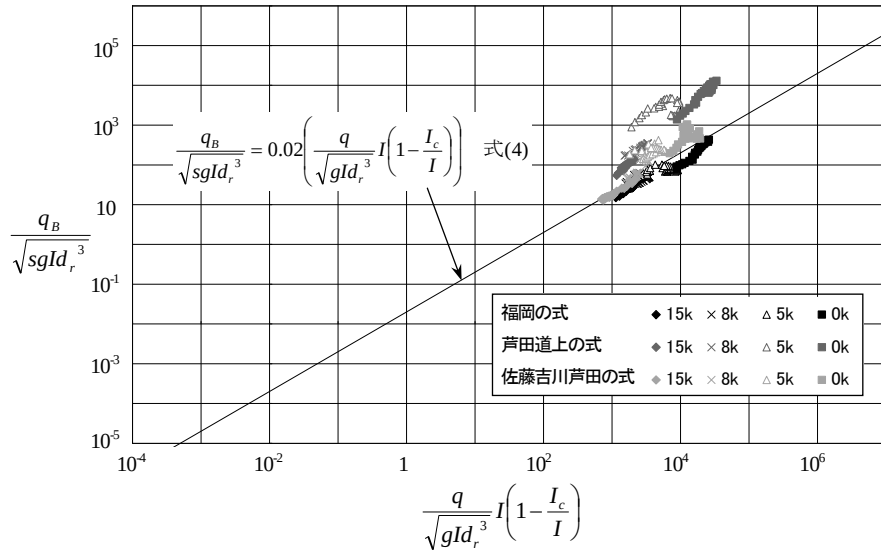


図-5 石狩川昭和56年8月洪水解析における勾配を乗じた無次元単位幅流量と無次元単位幅掃流砂量の関係

を8.0k下流で $n=0.013$ ，8.0k上流で $n=0.021$ とすることで観測縦断面水面形の時間変化が河床変動とともに再現された。初期の河床材料粒度分布は，S54.8，S56.8河床材料調査⁶⁾より設定した(5.0k地点における平均粒径0.26mm)。

(2) 混合粒径床における福岡の掃流砂量式

式(4)に示した単位幅の福岡の掃流砂量式は代表粒径 d_r に対して導かれた関係式である。これを混合粒径床の河床変動解析へ適用するにあたり，各粒径 d_k に対して式(5)が成り立つと仮定した。

$$\frac{q_{Bk}}{\sqrt{sgId_k^3}} = 0.02 P_k \left(\frac{q}{\sqrt{sgId_k^3}} I \left(1 - \frac{I_{ck}}{I} \right) \right) \quad (5)$$

ここに， q_{Bk} ：粒径 d_k の単位幅掃流砂量， P_k ：河床表層における粒径 d_k の存在割合である。粒径 d_k の移動限界勾配 I_{ck} は，無次元限界掃流力 $\tau_{*ck} = u_{*ck}^2 / sg d_k$ に相当する勾配であり，式(6)で表される。本研究では $\tau_{*ck}=0.05$ とした。

$$I_{ck} = \tau_{*ck} \frac{sd_k}{h} \quad (6)$$

石狩川河口部のように流路の蛇行により二次流が発達する場合において，単位幅掃流砂量 q_{Bk} の方向は単位幅流量 q の方向と一致しない。本研究では， q_{Bk} の絶対値を式(5)で求め， q_{Bk} の方向を準三次元流解析から求まる底面流速の方向と一致させることで二次流の影響を考慮した。ここに，河床勾配の影響は考慮していない。

なお，式(5)では河床の粒度分布が各粒径の流砂量に与える影響を無視しており，また，右辺の無次元流量の分母に含まれる粒径を d_k としているが，これらの仮定が適切であるか今後の課題である。

以上に示した福岡の掃流砂量式他，式(7)に示す芦田・道上の式¹²⁾，および式(8)に示す佐藤・吉川・芦田の式¹³⁾を用いて解析を行い，掃流砂量式が河床変動解析の精度に与える影響について検討する。

$$\frac{q_{bk}}{\sqrt{sgd_k^3}} = 17 P_k \tau_{*ek}^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}} \right) \left(1 - \frac{u_{*ck}}{u_*} \right) \quad (7)$$

ここに， τ_{*k}, τ_{*ek} ：粒径 d_k の無次元掃流力および有効掃流力， u_{*ck} ：粒径 d_k の限界摩擦速度である。

$$\frac{q_{bk}}{\sqrt{sgd_k^3}} = \varphi(n) P_k \tau_{*k}^{\frac{3}{2}} f\left(\frac{\tau_{ck}}{\tau_k}\right) \quad (8)$$

$$\begin{cases} n \geq 0.025: \varphi(n) = 0.623 \\ n < 0.025: \varphi(n) = 0.623(40n)^{-3.5} \end{cases} \quad (9)$$

$$f\left(\frac{\tau_{ck}}{\tau_k}\right) \approx 1 - \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}} \quad (10)$$

ここに， n ：マニングの粗度係数である。式(8)右辺の関数 $f(\tau_{ck}/\tau_k)$ は正規分布であるが，ここでは式(10)のように直線分布として近似した。

芦田・道上の式では掃流砂量が有効掃流力の3/2乗に比例し，比例係数を一定としているのに対して，佐藤・吉川・芦田式では掃流砂量は全掃流力の3/2乗に比例し，比例係数を河床の粗度の関数としている。

(3) 解析結果

図-5には，福岡の式，芦田・道上の式および佐藤・吉川・芦田の式を用いた解析による地点ごとの勾配を乗じた無次元単位幅流量と無次元単位幅掃流砂量の関係を示す。石狩川河口部では，福岡の式と佐藤・吉川・芦田の式で算定される掃流砂量が比較的近く，芦田・道上の式で算定される掃流砂量が多い。また，粒径別の福岡の式(5)より算定した掃流砂量の値は，代表粒径に対する福岡の式(4)と概ね一致している。

図-6には，縦断面水面形の時間変化について解析結果と観測結果を比較して示す。掃流砂量式の違いによる水位の違いは10cm程度であり，いずれの掃流砂量式を用いた解析でも，解析結果は観測結果を精度良く再現できている。これは，水面形に大きく影響を与える解析区間全

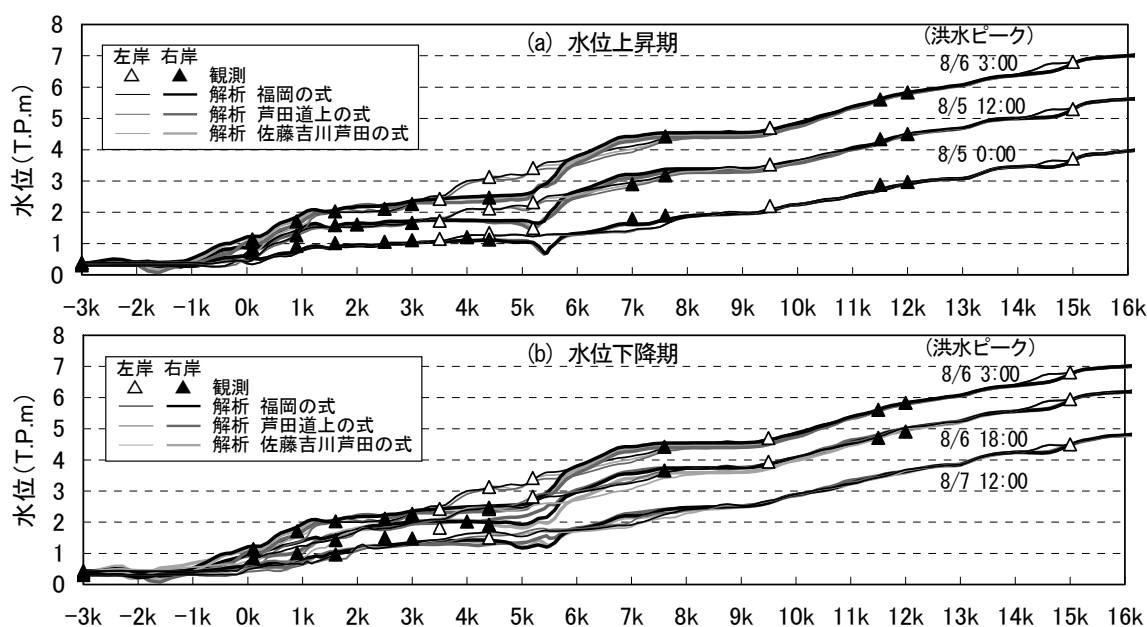


図-6 縦断水面形の時間変化の観測結果と解析結果の比較

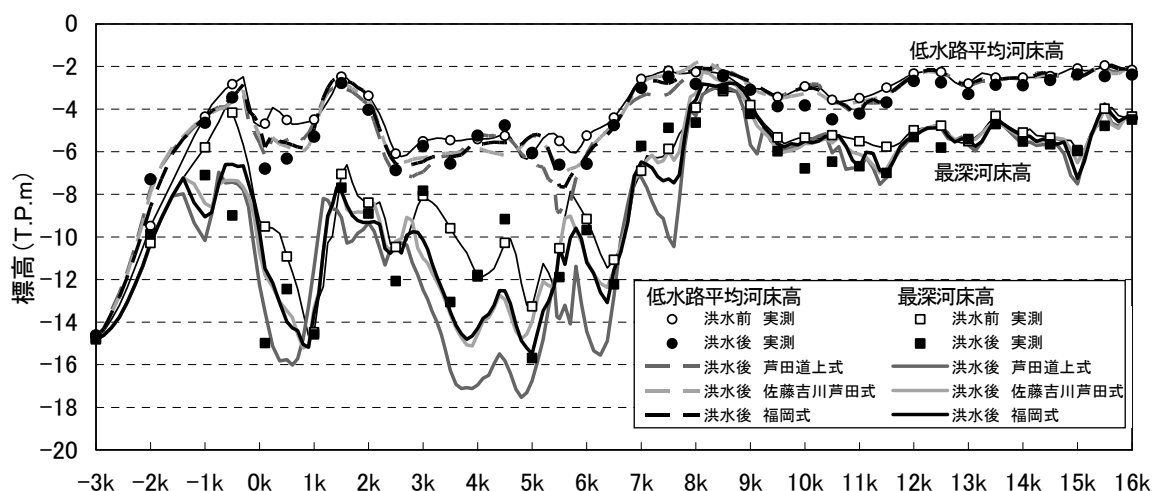


図-7 洪水前後の低水路平均河床高・最深河床高の縦断形の観測結果と解析結果の比較

体の河床低下は、浮遊砂が支配要因となって生じているために、掃流砂量の違いから生じる局所的な河床変動の違いが水面形に与える影響は小さいためと考えられる。これと同じ理由から、図-7に示す洪水後の低水路平均河床高の縦断形についても掃流砂量式による違いは小さく、いずれの解析結果も0k～8k区間における河床低下を良好に再現できている。それに対して、局所的な洗掘が表れる最深河床高の縦断形に着目すると、3k～8k付近の蛇行区間では、掃流砂量が多く算定される芦田・道上の式を用いた解析の洗掘深は、他の掃流砂量式を用いた解析や洪水後の実測値と比べて深くなっている。

図-8には、3.5k～6.5kの蛇行区間における洪水前後の横断河床形状について観測結果と解析結果を比較して示す。芦田・道上の式を用いた解析による洪水後の横断河床勾配は、実測値と比べて急勾配となり、外岸での洗掘深が深くなっている。これは、流路の蛇行に伴い発生する二次流による横断方向の掃流砂輸送量が過大に見積もられたためと考えられる。それに対して、福岡の式と佐

藤・吉川・芦田の式を用いた解析結果は実測と良く一致していることから、石狩川河口部においては、掃流砂量が適切に算定されたと考えられる。ただし、5.0k断面については、それ以外の断面と河床変動の傾向が異なる。この原因として、複断面蛇行流路における複雑な三次元流れ⁷⁾を十分に表現できていないことや、5.0k断面上下流の測量断面間の局所的な河道形状を考慮できていないこと等が考えられ、今後の課題である。

なお、図-2に示したように現地河川の掃流砂量は、同じ無次元流量に対しても最大10倍程度のばらつきがある。福岡の掃流砂量式はその中間をとっているため、必ずしも全ての場において掃流砂量を適切に算定できるとは限らない。ここで示したように、河床変動を適切に説明する掃流砂量式を多くの河川で検討することによって河川の特性和掃流砂量の関係を調べる必要がある。その上で、それぞれの河道で河床変動を適切に説明できる掃流砂量式を用いるべきと考える。また、流砂の上流端境界条件として与えられる掃流砂量を見積もるためにも河床変動

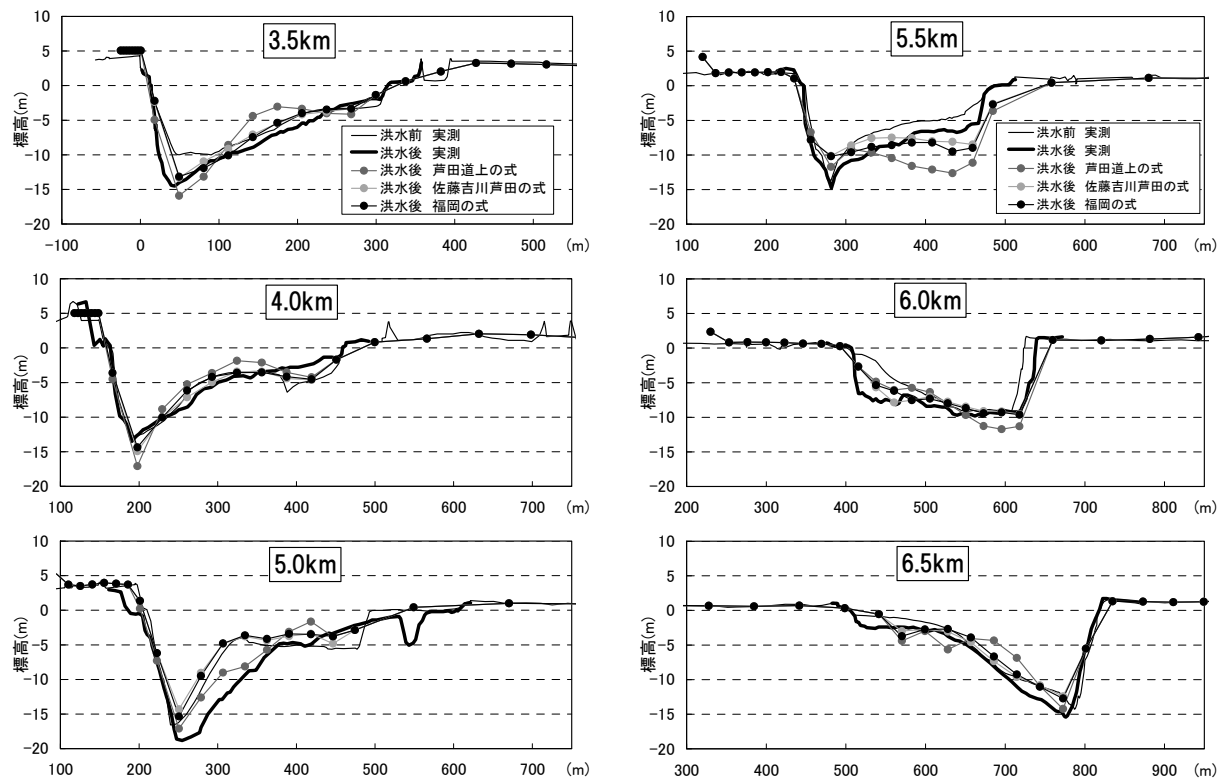


図-8 洪水前後の横断河床形状の観測結果と解析結果の比較

と掃流砂量の算定が重要である。

5. 結論

本研究では、河幅と断面形状の影響が考慮された福岡の掃流砂量式について、石狩川昭和56年8月洪水を対象とした洪水流－河床変動解析に適用した検討結果を示した。また、他の掃流砂量式を用いた場合の解析結果と比較し、掃流砂量式が河床変動解析の精度に与える影響について検討した。

石狩川河口部においては、福岡の式と佐藤・吉川・芦田の式を用いた場合と比べ、芦田・道上の式を用いた場合に掃流砂量が多く算定される。洪水による河床変動については、福岡の式と佐藤・吉川・芦田の式を用いた場合に精度良く説明できたことから、掃流砂量が適切に算定されたと考えられる。特に、蛇行区間における横断河床形状の再現性が向上した。

今後、河道特性に応じてどのような掃流砂量式を用いれば適切に河床変動を説明できるか、多くの河川や洪水を対象に検討を行い、その上で、それぞれの河道で河床変動を適切に説明できる掃流砂量式を用いることが必要と考える。

参考文献

- 1) 福岡捷二：土砂環境の変化に対応した洪水流と河床変動予測技術－実務上の課題と調査・研究の方向性，河川技術論文集，第14巻，pp.1-6，2008。
- 2) 浅野文典，福岡捷二：沖積地河川における安定な川幅・水深

－治水と環境の調和を目指した河道断面の決め方，水工学論文集，第54巻，pp.1021-1026，2010。

- 3) 福岡捷二：治水と環境の調和した治水適応策としての河幅，断面形の検討方法，河川技術論文集，第16巻，pp.5-10，2010。
- 4) 福岡捷二：温暖化に対する河川の適応技術のあり方－治水と環境の調和した多自然川づくりの普遍化に向けて，土木学会論文集F，Vol.66，No.4，pp.471-489，2010。
- 5) 浅野文典，福岡捷二：河幅及び断面形状を考慮した掃流砂量式の導出とその適用性に関する研究，水工学論文集，第55巻，pp.793-798，2011。
- 6) 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，水理講演会論文集，第26巻，pp.57-62，1982。
- 7) 森明巨，岸力：蛇行河道三次元流の数値解析と河床変動の計算，水理講演会論文集，第29巻，pp.691-696，1985。
- 8) 清水康行，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下流部の河床変動について，水理講演会論文集，第30巻，pp.487-492，1986。
- 9) 井上卓也，濱木道大，荒井信行，中田満洋，高橋季承，林田寿文，渡辺康玄：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，河川技術論文集，第10巻，pp.101-106，2004。
- 10) 岡村誠司，岡部和憲，福岡捷二：洪水流の縦断面水面形変化と準三次元流解析法を用いた石狩川河口部の洪水中の河床変動解析，河川技術論文集，第16巻，pp.125-130，2010。
- 11) Itakura, T. and Kishi, T. : Open channel flow with suspended sediments, *J. of Hydraulics Div. Proc. ASCE*, Vol.106, HY.8, pp.1325-1343, 1980。
- 12) 芦田和男，道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文集，第206号，pp.59-69，1972。
- 13) 佐藤清一，吉川秀夫，芦田和男：河床砂礫の掃流運搬に関する研究(1)，土木研究所報告，第98号，pp.13-30，1958。
(2011. 5. 19受付)