

掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う準三次元洪水流・河床変動解析法の開発と昭和56年8月石狩川洪水への適用

長谷部 夏希¹・後藤 岳久²・福岡 捷二³・梶井 正将⁴

¹ 学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 都市人間環境学専攻 博士課程前期課程

(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: a17.3pkg@g.chuo-u.ac.jp (Corresponding Author)

² 正会員 博士(工) 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: goto510@tamacc.chuo-u.ac.jp

³ フェロー Ph.D. 工博 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp

⁴ 正会員 国土交通省 北海道開発局 建設部 河川計画課 河川企画官

(〒060-8511 北海道札幌市北区北8条西2丁目)

本研究では、浮遊砂を伴う洪水時の流砂現象を出来るだけ忠実に表現するため、掃流砂と浮遊砂それぞれの連続式と運動方程式を計算することで非平衡流砂運動を考慮し、掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う準三次元洪水流・河床変動解析法を開発し、昭和56年8月石狩川洪水に適用して既往の平衡流砂モデルと比較検討した。その結果、蛇行部では洪水ピーク水位をはさむ多くの時間帯で、洪水流が内岸側を走る複断面的蛇行流れとなり、それに伴い単断面の湾曲二次流とは逆回りの発達した二次流と流砂運動の非平衡輸送現象が生じ、水面付近の浮遊砂濃度が大きくなることを示した。しかし、大河川においては洪水減水期に単断面的蛇行流れが長時間継続するため外岸側で河床の洗掘が生じ、最終河床形状は既往の平衡流砂モデルでも工学的に十分説明できることを示した。

Key Words: *Quasi-3D flow and bed variation analysis, non-equilibrium sediment motions, suspended sediment, compound meandering channel flow, secondary flow*

1. はじめに

一般に、洪水流・河床変動解析では、掃流砂・浮遊砂から成る流砂運動が平衡状態であると考え、掃流砂については平衡流砂量式により評価し、浮遊砂については底面の境界条件に平衡状態の浮遊砂濃度¹⁾を用いた移流拡散方程式により評価されている。しかし、このような両者が独立して運動していると考える流砂モデルは、実現現象をかなり単純化したものであると言える。この問題に関して、辻本ら²⁾は、跳躍運動する掃流砂が乱れにより浮遊砂に遷移する割合について評価法を示し、太田ら³⁾は、辻本らの掃流砂から浮遊砂への遷移割合の評価法を用い、掃流砂と浮遊砂を一体的に解析する方法を提案している。しかし、用いた辻本らの評価法は、等流に近い状態を対象として定式化されており、実現現象との乖離が

大きい。

本研究では、浮遊砂を伴う洪水時の流砂現象を出来るだけ忠実に表現するために、掃流砂と浮遊砂のそれぞれについて連続式と運動方程式を解くことで流砂運動の非平衡性を考慮し、掃流砂と浮遊砂を一体的に扱うことができる準三次元洪水流・河床変動解析法を開発する。そして、浮遊砂の卓越する昭和56年8月石狩川洪水に適用し、本解析法の妥当性について検討するとともに、平衡流砂量モデルで昭和56年8月石狩川洪水の河口部の河床変動を説明した岡村ら⁴⁾の解析結果と比較している。石狩川河口部における洪水・流砂運動の両者の結果の比較から、非平衡流砂運動を考慮することの重要性について述べている。

2. 掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う準三次元洪水流・河床変動解析法

(1) 洪水流解析法

図-1は本解析における洪水流解析法の枠組みと、用いた流速と乱れエネルギーの鉛直分布を示す。本研究で対象とする石狩川では、洪水ピーク付近のかかなりの時間帯で洪水流が複断面的蛇行流れを呈し、この間二次流の向きが逆転すると考えられることから⁵⁾、水深積分モデルの枠組みで非静水圧の三次元流れを解析出来る準三次元解析法(Q3D-FEBS法)⁶⁾を用いる。さらに、浮遊砂の輸送が卓越する場の解析には乱流場の評価が重要であることから、水面と底面、水深積分の乱れエネルギーの輸送方程式を導入し、乱れエネルギーの鉛直分布を解析する。

(2) 河床変動解析法

図-2は本解析における河床変動解析法の枠組みを示す。本解析では、流砂運動をEuler的に扱い、掃流砂・浮遊砂ともに粒子に関する運動方程式と連続式を計算することで両者の非平衡運動を評価する。

具体的には、図-2に示すように、掃流砂については、粒子が河床底面付近を跳躍運動している状態と仮定し、跳躍運動に基づく粒子の運動方程式により掃流砂の平均移動速度を解析する。浮遊砂については、流れの乱れ成分が浮遊砂の運動に対して支配的であると、流れの乱れ成分による流体力を付加した粒子の運動方程式によりその平均移動速度を解析する。そして、河床付近で両者を共通の連続式で計算することにより、掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う。

a) 掃流砂の解析

河床の斜面に沿う方向の単位幅掃流砂量 \hat{q}_{bki} は、単位面積当たりの流砂体積 \bar{V}_{bk} と、河床に沿う方向の砂粒子の平均移動速度 \hat{u}_{pki} との積で表される(式(1))。ここで、 k は粒径階、 $i,j=1,2(x,y$ 方向)、“-”はレイノルズ平均値、“^”は斜面に沿う方向の座標系を表す。

$$\hat{q}_{bki} = \bar{V}_{bk} \hat{u}_{pki} \quad (1)$$

単位面積当たりの流砂体積は、式(2)に示す掃流砂の連続式により求める。この連続式には、河床からの粒子の離脱割合、河床への掃流砂からの堆積割合に加え、掃流砂から浮遊砂への遷移割合を考慮し、掃流砂と浮遊砂を一体的に解析する。

$$\frac{\partial \bar{V}_{bk}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{q}_{bki}}{\partial x_j} = (\bar{V}_{pk} - \bar{V}_{dk} - \bar{q}_{suk}) \quad (2)$$

ここに、 \bar{V}_{pk} ：単位面積当たりの河床からの離脱割合、 \bar{V}_{dk} ：単位面積当たりの河床への堆積割合、 \bar{q}_{suk} ：掃流砂から浮遊砂への遷移割合である。

砂粒子の斜面に沿う方向の平均速度 \hat{u}_{pki} については、準三次元解析の流れ場を外力条件として、粒子の跳躍運

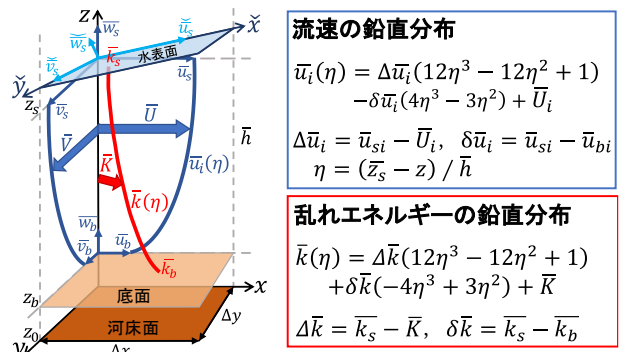


図-1 流速と乱れエネルギーの鉛直分布

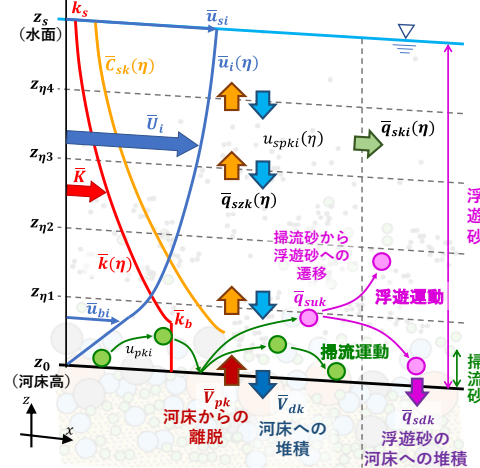


図-2 河床変動解析法の枠組み

動に関する三次元運動方程式(式(3))により求める。

$$A_3(\rho_s + \rho C_M) d_k^3 \frac{\partial \hat{u}_{pki}}{\partial t} = -A_3(\rho_s - \rho) g_i d_k^3 + 0.5 \rho C_D A_2 d_k^2 (\hat{u}_{bi} - \hat{u}_{pki}) |\hat{u}_b - \hat{u}_{pk}| \quad (3)$$

$$\hat{u}_{pki} = \frac{1}{T_{sal}} \int_t^{t+T_{sal}} \hat{u}_{pki} dt, \quad T_{sal} = 10.0(s)$$

ここに、 t ：時間、 $i=1,2,3(x,y,z$ 方向)、 ρ_s ：砂粒子の密度(=2650kg/m³)、 ρ ：水の密度(=1000kg/m³)、 d_k ：粒径、 g_z ：重力加速度、 A_2 ：2次元の形状係数(=π/4)、 A_3 ：3次元の形状係数(=π/6)、 \hat{u}_{pki} ：砂粒子の瞬間速度、 \mathbf{u}_p ：砂粒子の瞬間速度ベクトル、 \mathbf{u}_b ：底面における粒子周辺の流速ベクトル、 C_D ：抗力係数($C_D=0.4$)、 C_M ：付加質量係数($C_M=0.5$)である。また、 T_{sal} は砂粒子の平均速度を求める際に平均化する時間であり、本解析では10秒としている⁷⁾。

河床からの粒子の離脱割合については、長田・福岡⁷⁾の解析法をさらに修正した方法⁸⁾と同様に離脱判定粒子に作用する流体力を準三次元解析から求め、これが固定粒子を乗り越えるまでの時間 \bar{T}_{pk} を計算し求める。河床への堆積割合については、準三次元解析の流れ場の条件下で砂粒子の跳躍解析を行い、粒子が停止するまでの時間 \bar{T}_{dk} を計算し求める⁷⁾。河床高の時間変化は、式(4)の河床の連続式より求める。

$$\frac{\partial z_0}{\partial t} = -\frac{A_2}{A_3} \sum_{k=1}^{kmax} (\bar{V}_{pk} - \bar{V}_{dk} + \bar{q}_{sak}) \quad (4)$$

ここに、 \bar{q}_{sdk} は単位面積当たりの浮遊砂から河床への堆積割合であり、これは粒子の沈降速度 w_{fk} と次節の三次元浮遊砂解析における最下層の浮遊砂濃度 $\bar{C}(\eta_1)$ との積で表す(式(5)).

$$\bar{q}_{sdk} = \bar{C}(\eta_1)w_{fk} \quad (5)$$

b) 掃流砂から浮遊砂への遷移割合

掃流砂から浮遊砂への遷移割合 \bar{q}_{suk} は、粒子の三次元運動方程式に流れの乱れ成分を考慮して跳躍解析を行い、その粒子の最大跳躍高さが式(3)のレイノルズ平均流場のみを考慮した跳躍解析の最大跳躍高さよりも、粒径の1.0倍以上高くなれば、その粒子は浮遊砂に遷移したと判定する。浮遊砂への遷移については、熱海らの数値実験結果⁹⁾を用いて検討し判定の基準とした。そして、試行回数のうち浮遊砂に遷移した個数を数えることで掃流砂から浮遊砂への遷移割合を求める(式(6)).

$$\bar{q}_{suk} = \frac{N_{suk}}{N_{max}\bar{T}_{suk}}\bar{V}_{bk} \quad (6)$$

ここで、 \bar{q}_{suk} : 単位時間・面積当たりの掃流砂から浮遊砂への遷移割合、 N_{suk} : 掃流砂から浮遊砂へ遷移した粒子の個数、 N_{max} : 試行回数($N_{max} = 100$)、 \bar{T}_{suk} : 粒子が浮遊砂に遷移するまでの時間である。式(7)は、流れの乱れ成分を考慮した粒子の運動方程式である。

$$A_3(\rho_s + \rho C_M)d_k^3 \frac{d\hat{u}_{ptki}}{dt} = -A_3(\rho_s - \rho)g_z d_k^3 + 0.5A_2C_D\rho d_k^2(\hat{u}_{bi} + \hat{u}'_{bi} - \hat{u}_{ptki})|\hat{\mathbf{u}}_b + \hat{\mathbf{u}}'_b - \hat{\mathbf{u}}_{ptk}| \quad (7)$$

ここで、流れの乱れ成分 \hat{u}'_{bi} は、正規分布($N(\sigma, \mu)$ 、 $\sigma^2 = \overline{u'_{bi}u'_{bi}}$ 、 $\mu = \hat{u}_{bi}$)に従うと仮定し、関根らの手法¹⁰⁾に倣いマルコフ連鎖の考えに基づき正規乱数を用いて与えた。各方向の乱れ強度 $\overline{u'_{bi}u'_{bi}}$ は、禰津の乱れエネルギーと乱れ強度の関係¹¹⁾から与えた。

c) 浮遊砂の三次元解析

浮遊砂の三次元運動については、まず、各高さで流れの乱れ成分を考慮した粒子の運動方程式を解くことで各瞬間の粒子速度と浮遊砂の輸送フラックスを算定する。そして、これを時間平均した浮遊砂の輸送フラックスにより、時間平均の浮遊砂の三次元連続式(式(8))を解く。これにより、通常用いられる拡散項を用いずに直接浮遊砂の輸送フラックスを計算する。

$$\frac{\partial \bar{C}_{sk}(\eta)}{\partial t} + \frac{\partial \bar{q}_{skj}(\eta)}{\partial x_j} = 0 \quad (8)$$

ここで、 $\bar{C}_{sk}(\eta)$ は各高さの浮遊砂濃度、 $\bar{q}_{skj}(\eta)$ は j 方向($j=1,2,3(x,y,z$ 方向))における単位面積当たりの浮遊砂の輸送フラックスである。浮遊砂の輸送フラックスの時間平均値 $\bar{q}_{skj}(\eta)$ は、各瞬間の粒子速度 $\hat{u}_{spkj}(\eta)$ を流れの乱れ成分を考慮した粒子の運動方程式により計算し、乱れスケールの時間 t_{mean} で平均化して評価する(式(9)).

$$\bar{q}_{skj}(\eta) = \frac{1}{t_{mean}} \int_t^{t+t_{mean}} \hat{u}_{spkj}(\eta)\bar{C}_{sk,up}(\eta) dt \quad (9)$$

$$t_{mean} = l_d / \sqrt{k(\eta)}$$

ここで、 $\bar{C}_{sk,up}(\eta)$ の添え字の up は風上側の濃度を表わし、各瞬間の浮遊砂の輸送フラックスを求める際には各瞬間の粒子速度の正負より風上方向を求め、その浮遊砂濃度 $\bar{C}_{sk,up}(\eta)$ を計算に用いる。式(9)で用いる粒子の鉛直方向速度の瞬間値 $\hat{w}_{spk}(\eta)$ は、式(7)と同様に、流れの乱れ成分を考慮した粒子の運動方程式により計算し、 x,y 方向の粒子速度の瞬間値 $\hat{u}_{spk}(\eta)$ 、 $\hat{v}_{spk}(\eta)$ については瞬間流速と同程度であると仮定した。

また、底面($z = z_0$)における浮遊砂の境界条件である鉛直方向フラックスについては、b)節で求めた掃流砂から浮遊砂への遷移割合 \bar{q}_{suk} と、a)節で求めた浮遊砂から河床への堆積割合 \bar{q}_{sdk} を用いて表す。

3. 洪水観測体制・解析条件

図-3は本研究の解析検討区間を示し、検討区間は石狩川の15kmから河口沖2kmとした。対象とした昭和56年8月石狩川洪水は当時の計画を超える大洪水である。北海道開発局は河口部において、図-3に示すような洪水水面形時系列、流量、河床形状等の大規模な観測を行った。本研究では、この貴重な観測データを検証データとして用いる¹²⁾。

解析の上流端境界条件には篠路観測所(15km)の観測水位ハイドログラフを与え、欠測時のデータは太美排水機場(15.3km)の観測水位を用いて補完した。下流端境界条件には小樽港の観測潮位時系列データを与えた。図-4は実測の粒度分布と解析に用いた河床材料粒度分布を示し、解析では実測のように下流区間の河床材料が細くなるような粒度分布を与えた。また、河岸には締固度が高い泥炭が露出しており、泥炭性河岸は非侵食河岸とした。

4. 解析結果とその考察

図-5は篠路観測所における浮子観測より求めた流量と本解析による流量ハイドログラフの比較を示す。図-6は洪水増水期の観測水面形と解析水面形の比較、図-7は低水路平均河床高の縦断分布の観測結果と解析結果をそれぞれ示す。解析結果は、観測水面形を再現し、洪水後の

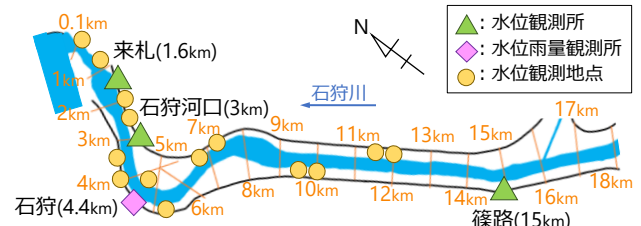


図-3 洪水観測体制と解析区間

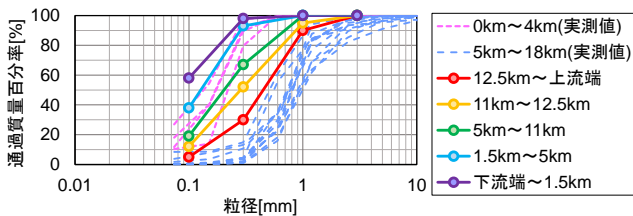


図4 実測の河床材料粒度分布(破線)と解析に用いた河床材料粒度分布(実線)

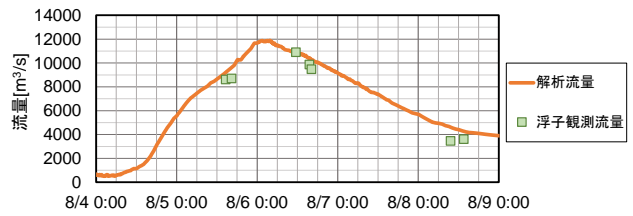


図5 篠路観測所(15km)における観測流量と解析流量の比較

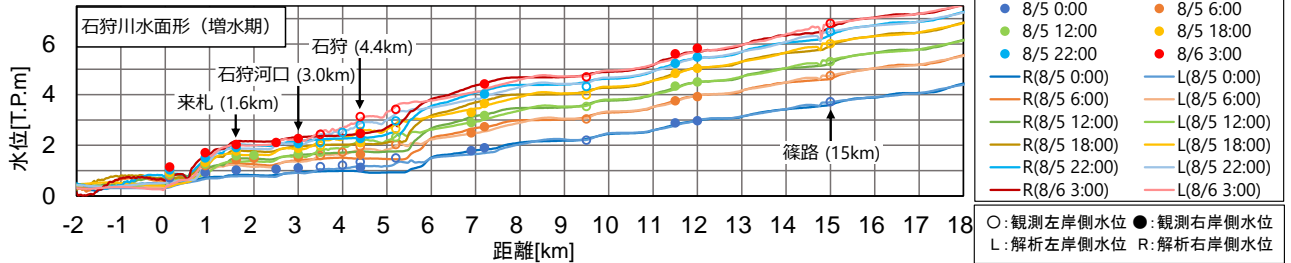


図6 観測水面形と解析水面形の時間変化の比較

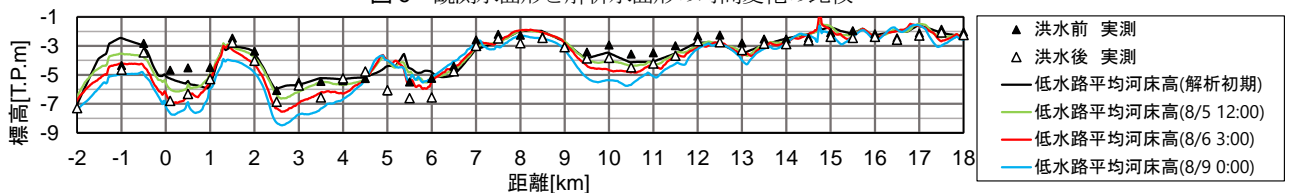


図7 洪水前後の実測と解析の低水路平均河床高の縦断分布の比較

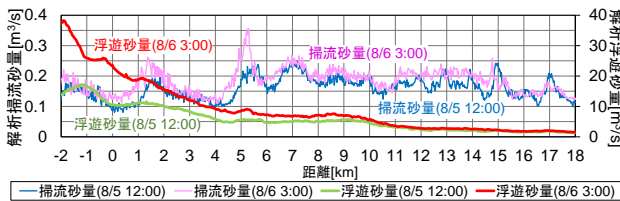


図8 解析掃流砂量と解析浮遊砂量の縦断分布の時間変化

実測平均河床高や観測流量をほぼ説明出来ている。図8は掃流砂量と浮遊砂量の縦断分布の解析結果を示す。図より、河床が細砂で構成された石狩川河口部では、洪水時の土砂移動は浮遊砂が卓越していることが分かる。5.0kmより下流では、水面形が急になること、河口に向かって河床材料が細くなることから、浮遊砂量が徐々に増加し、それに伴い河床の低下が進行している(図-7)。

図-9は洪水ピーク時の水深平均流速分布と流跡線を示す。また、図-10は5.0km地点の横断面形と主流速のコンター図、二次流の解析結果の時間変化を示す。図-10(a)より、水位が低く単断面的蛇行流れとなっている時間帯では、水面での横断方向流速は外岸向き、底面での横断方向流速は内岸向きとなる流れの遠心力による湾曲二次流が生じている。一方、洪水ピーク付近(相対水深 $Dr: 0.42$)では、図-9より、流速の遅い高水敷上の流れが、5.5km付近で外岸側の低水路の水面に流入している。これにより、5.5km付近の外岸側の水面流速が減速する一方で、内岸側の流速が速くなり、内岸側を主流が走る複断面的蛇行流れ³⁾となっており、横断面内では通常の湾曲二次流とは逆回りの二次流が発生していることが分かる(図-10(b))。そして、洪水減水期には再び単断面的蛇行流れとなり、湾曲二次流が生じている。

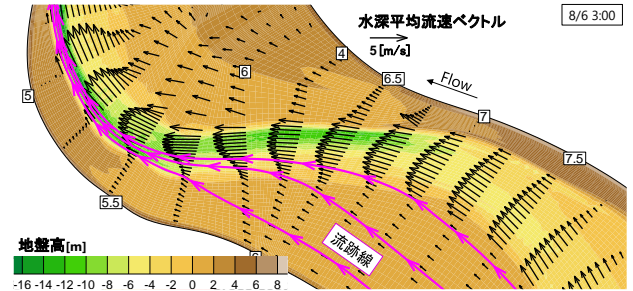
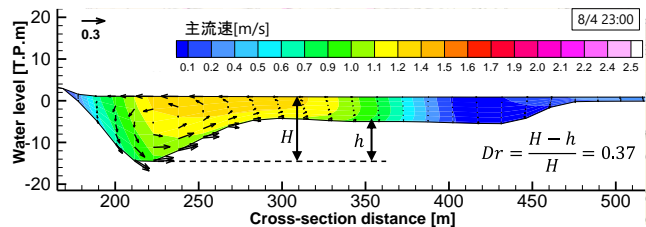
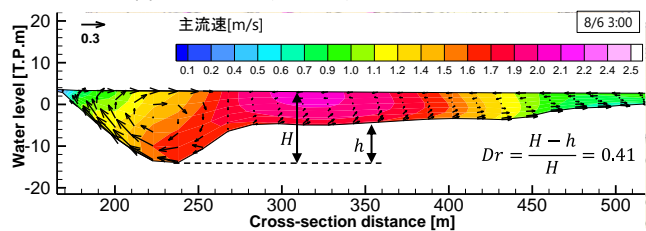


図-9 洪水ピーク時(8/6 3:00)の流速分布と流跡線



(a)洪水増水期(8/4 23:00) 単断面的蛇行流れ



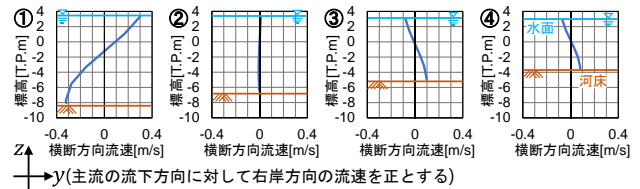
(b)洪水ピーク時(8/6 3:00) 複断面的蛇行流れ

図-10 主流速コンター図と二次流の解析結果の時間変化(5.0km地点)

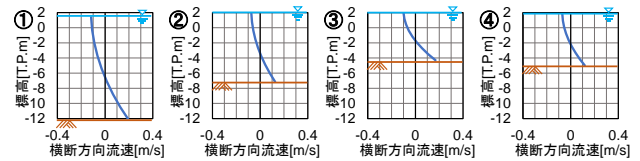
図-11は5.0kmにおける二次流流速と浮遊砂濃度の鉛直分布の解析結果を示す。ここで、図-11(a),(c),(e)が本解析法、図-11(b),(d),(f)が岡村らの解析結果⁴⁾であり、図-11(g)は本解析法と岡村らの解析掃流砂量と摩擦速度の横断分布を示す。鉛直分布の出力位置は図-11(g)と図-13に示す。本解析では、前述のように低水路で二次流の逆

転が生じ、それに伴い低水路の左岸側で大きな鉛直方向流速が生じている(図-11(a),(c)). 一方、岡村らの解析法は静水圧近似を仮定しているため逆向きの二次流は生じず、低水路の左岸側の鉛直方向流速は比較的小さい(図-11(b),(d)). また、浮遊砂の供給元である掃流砂の運動については、平衡流砂モデルを用いた岡村らの解析では、掃流砂量と浮遊砂濃度が摩擦速度の大きさに応じて右岸側で大きくなっているが(図-11(f),(g)), 本解析では上流(6.0km 付近)からの流砂運動の履歴を受け、低水路の左岸側の掃流砂量が多くなっている. 本解析では、低水路の左岸側を流れる掃流砂が浮遊砂へ遷移し、これが強い鉛直方向流速を伴う二次流により水面付近まで輸送されることで、発達した浮遊砂濃度分布を形成している(図-11(e),(g)). 図-12は5.5km地点の実測浮遊砂量¹²⁾と浮遊砂量の解析結果の比較を示す. 本解析の浮遊砂量は、実測値よりもやや多く計算されているが、実測値を概ね説明している.

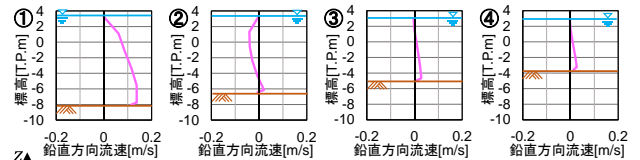
図-13は5.0kmと5.5kmの横断面形状の洪水前後の実測と、本解析と岡村らの解析結果の比較を示す. 図より、本解析では、8月5日6時以降複断面的蛇行流れになっており、8月7日6時頃から単断面的蛇行流れに遷移し始めている. この間主流が内岸側を走るため、5.0kmの中水敷の前面肩付近や5.5kmの内岸河床が洗掘され、7日6時以降で単断面的蛇行流れに戻ると、外岸側の洗掘が進行する. 洪水後の解析結果は、5.0kmの内岸側の洗掘がやや小さいものの実測の外岸側の深掘れを説明している. 5.5kmについては、両者の外岸側の洗掘深が浅くなっているが、内岸側の河床については、5.0kmと同様に複断面的蛇行流れにより洗掘が進行している. この結果、最終河床形状については、岡村らの平衡流砂モデルに基づく解析結果と有意な差はみられず、従来の平衡流砂モデルに基づく河床変動解析法でも石狩川河口部の大規模河床変動を説明可能となっている. これは、最終河床形状の外岸側の深掘れは、洪水減水期の単断面的蛇行流れの時間帯に進行しており、単断面的蛇行流れの継続時間が長い大河川では、平衡流砂モデルによる解析は工学的に成立すると言えることが分かる. しかし、洪水ピーク付近では、複断面的蛇行流れが内岸河床や河岸を侵食し、この河道断面形の変化は流下能力にも影響する. 石狩川河口部の対象洪水では大きな問題にはならなかったが、上記のような流れと流砂運動が生じる河川においては、複断面的蛇行流れとそれに伴う土砂移動を考慮した河道設計が必要であり、その際には、圧力の非静水圧成分と流砂の非平衡運動を考慮した準三次元洪水流・河床変動解析法の適用が重要で、これについては今後検討されるべき大きな課題である.



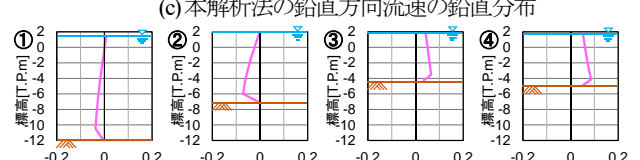
(a) 本解析法の横断方向流速の鉛直分布



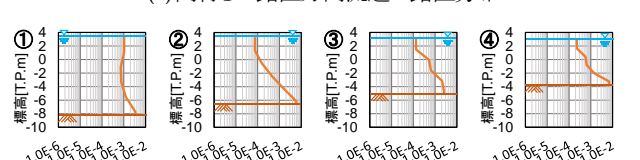
(b) 岡村らの横断方向流速の鉛直分布



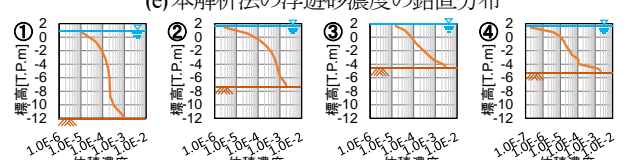
(c) 本解析法の鉛直方向流速の鉛直分布



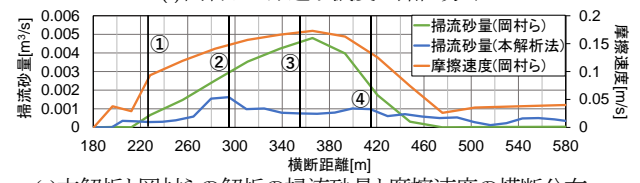
(d) 岡村らの鉛直方向流速の鉛直分布



(e) 本解析法の浮遊砂濃度の鉛直分布



(f) 岡村らの浮遊砂濃度の鉛直分布



(g) 本解析と岡村らの解析の掃流砂量と摩擦速度の横断分布

図-11 8/6 3:00 時点の 5.0km 地点における本解析及び岡村らの二次流流速と浮遊砂濃度の鉛直分布の解析結果の比較

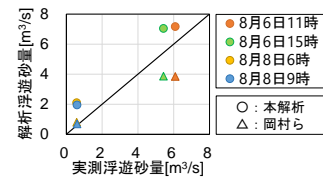


図-12 5.5km 地点の浮遊砂量の実測値と解析結果の比較

5. まとめ

本研究では、掃流砂と浮遊砂のそれぞれについて連続式と運動方程式を解くことで流砂の非平衡運動を考慮して掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う準三次元洪水流・河床変動解析法を開発した. そして、浮遊砂の卓越する昭和

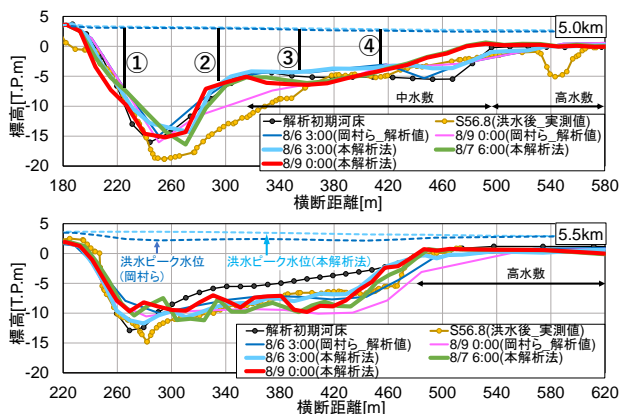


図-13 5.0kmと5.5kmの横断面形状の実測結果と解析結果の比較

56年8月石狩川洪水に適用し、既往の平衡流砂モデル⁴⁾と比較し、非平衡流砂運動の重要性について述べた。

本解析より、洪水ピーク付近で複断面的蛇行流れが生じ、主流が走る低水路内岸河床や中水敷の前面肩付近が洗掘を受けると共に、強い鉛直方向流速を伴う逆回りの二次流が低水路で生じ、これが掃流砂から遷移した浮遊砂を水面付近まで輸送し発達した浮遊砂濃度分布を形成することを示した。しかし、洪水減水期には再び単断面的蛇行流れに戻ることで、外岸側の河床が洗掘を受け、最終河床形状の解析結果は既往の平衡流砂モデルの結果⁴⁾とほぼ同様となった。大河川においては、洪水減水期に単断面的蛇行流れが長時間継続し最終的な河床形状は従来の平衡流砂モデルに基づく河床変動解析でも工学的に十分説明出来ることを示した。

参考文献

- 1) Itakura T. and Kishi T. : Open Channel Flow with Suspended Sediments, *Journal of the Hydraulic Division*, ASCE, HY8, pp.1325-1343, 1980.
- 2) 辻本 哲郎, 中川 博次:掃流から浮遊への遷移機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 369号, II-5, pp.43-50, 1986.

- 3) 太田一行, 佐藤隆宏, 中川一:掃流から浮遊への遷移を考慮した三次元河床変動, 解析手法-河川横断構造物上流の局所洗掘現象への適用-, 土木学会論文集 B1(水工学), vol.71, No.4, pp.1883-1888, 2015.
- 4) 岡村誠司, 岡部和憲, 福岡捷二:洪水流の縦断面形状変化と準三次元洪水流解析法を用いた石狩川河口部の洪水時の河床変動解析, 河川技術論文集, 第16巻, pp.125-130, 2010.
- 5) 福岡捷二:洪水の水理と河道の設計法 治水と環境の調和した川づくり, 森北出版, 2005.
- 6) 竹村吉晴, 福岡捷二:波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面(水面・底面)上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS), 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.75, No.1, pp.61-80, 2019.
- 7) 長田健吾, 福岡捷二:石礫河川の河床変動機構と表層石礫の凹凸分布に着目した二次元河床変動解析法, 土木学会論文集 B1, Vol.68, No.1, pp.1-20, 2012.
- 8) 竹村吉晴, 久保宜之, 岡田将治, 福岡捷二:洪水流による物部川河口礫州の開口と変形機構に関する研究, 河川技術論文集, 26巻, pp.669-674, 2020.
- 9) 熱海孝寿, 福田朝生, 福岡捷二:混合粒径数値移動床水路実験による粒子群の跳躍と鉛直分級に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.77, No.2, pp.1619-1624, 2021.
- 10) 関根正人, 小川田大吉, 佐竹宣憲: Bed Material Load の流送機構に関する研究, 土木学会論文集, No.545, II-36, pp.23-32, 1996.
- 11) 瀬津家久:開水路乱流の乱れ強度に関する研究, 土木学会論文集, 261号, pp.67-76, 1977.
- 12) 岸力(代表研究者):昭和56年8月北海道豪雨災害に関する調査研究, 昭和56年度科学研究費補助金(自然災害特別研究(1))研究成果報告書, 1982.

(Received May 31, 2022)
(Accepted September 1, 2022)

DEVELOPMENT OF QUASI-THREE-DIMENSIONAL FLOOD FLOW AND RIVERBED VARIATION ANALYSIS METHOD THAT CAN CALCULATE BED LOAD AND SUSPENDED LOAD INTEGRALLY

Natsuki HASEBE, Takahisa GOTOH, Shoji FUKUOKA and Masayuki MASUI

In this study, we developed the Quasi-3D flow and bed variation analysis method that can calculate bed load and suspended load integrally by calculating the continuous equations and the equation of motion of bed load and suspended load, respectively. And the developed method was applied to the Ishikari River flood in August 1981 and compared with the conventional equilibrium model. As a result, in the meandering reaches, the flood flows became the compound meandering channel flow which was a maximum velocity filament passed the inner bank side around the peak discharge. The calculation results demonstrated the secondary flows opposite to the normal secondary flows in curved channels occurred and the secondary flows transported the suspended sediments toward near the water surface. Finally, our study indicated the conventional model was effective for explaining the riverbed profiles after the flood.