

水制工群を有する急流石礫河道札内川の流れ・土砂動態の解明と治水と環境の調和した安定な河道断面形状の決め方に関する研究

Estimation of Flood Flow and Bed Variation for Stable Cross-sectional Form in the Satsunai River

福岡 捷二¹
Shoji FUKUOKA

¹中央大学 理工学部特任教授 研究開発機構教授

要 旨

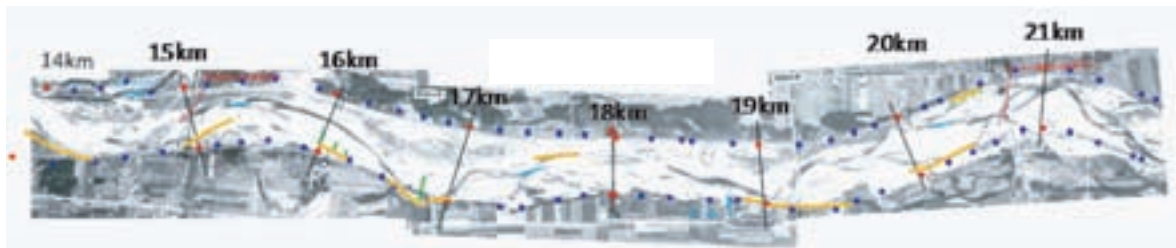
急流石礫河川である札内川は、滲筋変動が激しく河岸侵食による被災が課題であったため、水制工および低水路護岸工の設置により低水路の固定化による河道安定化策を実施してきた。それにより中小規模の洪水に対しては、河道は安定し、水制工による策は効果を挙げている。しかし、大出水が発生した場合、低水路沿いの水制周辺の洗掘、さらには高水敷および堤防の侵食が懸念されている。札内川の適切な河道管理ためには、大中小の流量規模における流れと縦横断的な土砂動態を把握し、治水と環境の調和した安定河道縦・横断面形状を明らかにすることが重要である。このためには、水制工群・低水路護岸工を有する急流河川札内川の流れ、及び巨礫を含む土砂移動を説明する洪水流・河床変動解析法の構築が必要となる。本研究では、水面形の時間変化を解とした二次元洪水流解析法と石礫河床変動解析法および現行の河床変動解析法を一体的に扱う方法を構築し、それを水制工群を有する札内川に適用し、洪水中の流れ・河床変動について検討を行った。

《キーワード：石礫河川；土砂動態；連続水制；河床粒度分布》

1. 序論

著者ら^{1),2),3),4)}は、石礫河川の河床変動機構の解明を目的として、日本有数の急流石礫河川である常願寺川において大規模現地実験を行った。現地実験は、巨石（300mm以上）を含む広い粒度分布で構成される常願寺川の砂州上に、単位幅流量が年最大流量規模に匹敵する流路を開削し通水することによって、洪水流の水面形の時間変化、断面形状および河床材料粒度分布の変化について詳細な観測を行った。その観測結果に基づいて石礫河川の河床変動と粒度分布の変化機構について検討した。常願寺川現地実験により明らかになったこととして、石礫河川は、石から砂までの広い粒度範囲の河床材料から構成されることから、洪水流により河床が洗掘されると、河床に埋もれている大きな石が出現し、河床表層の粒度分布が粗くなるとともに、河床表層の凹凸（空隙空間）が石礫の露出により大きくなる。河床表層に突出した大きな石が形状抵抗の形で洪水流に働き、大きな抵抗をもたらす。砂や礫は、大きな粒径集団が形成する河床の空隙空間や後流域に留まることで大きな流体力を回避している。石礫河川では、流体力に応じた河床形状、河床粒度分布を形成することにより、流量変化に対しても大きな河床変動が生じない安定な河床高を形成する⁹⁾。これらが石礫河川の河床変動過程における重要な機構であり、大きな粒径集団が各粒径集団の土砂移動や河床の安定に大きく貢献している。

急流石礫河川である札内川は、主に粗石（粒径7.5cm～30cm）、礫および砂の河床材料で構成されており、洪水時には河床が大きく変動し、滯筋や水衝部が洪水ごとに移動する特徴を有する。滯筋変動に起因する河岸侵食による被災が課題であったため、水制工および低水路護岸工の設置により低水路の固定化による河道安定化策を実施してきた。図-1に、札内川のS42年とH13年の航空写真を示す。図中には、低水路護岸工および水制工の位置を併せて示す。S42年当時は、低水路護岸工および水制工が少なく滯筋は堤防の中で大きく蛇行していた。H13年になると低水路護岸工および水制工が縦断的に整備され、低水路がほぼ固定化されている。その様子を示したのが、図-2である。図-2は、各年の河床高からS46年の平均河床高を差し引いたものを示したものである。高水敷は色を付けていない。これを見ると、低水路護岸工および水制工が経年的に整備され、徐々に低水路が狭く深くなってきていることが分かる。高水敷が整備された一方で、滯筋が固定化され、流量が集中することにより、深掘れが進行したと考えられる。図-3には、横断形状の経年変化を示す。15kmは、S46年では広く浅い低水路であったが、護岸工によって低水路が狭められた結果、近年の洪水では高水敷の変動は見られず、高水敷は安定しているが、低水路は徐々に深くなっていることがこれからも分かる。19.2kmは、左岸側に低水路が寄った箇所であり、特に護岸工が設置されてからは、護岸工際の深掘れが離れなくなっている。このように、札内



(a) S42年（黄色ライン：低水路護岸工，緑ライン：水制工）



(b) H13年（黄色ライン：低水路護岸工，青ライン：水制工）

図-1 札内川（14km～22km）の河道変遷

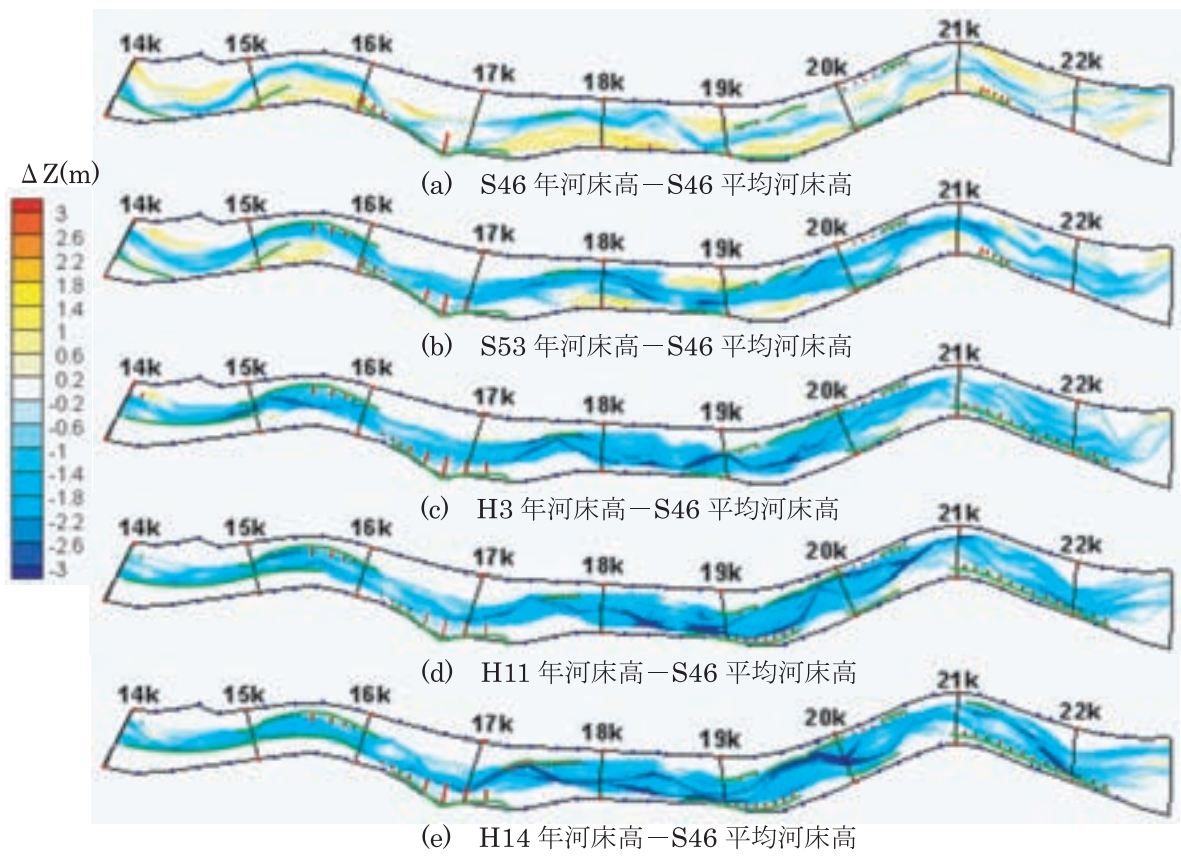


図-2 昭和46年を基準とした河床変化高（緑ライン：低水路護岸工，赤ライン：水制工）

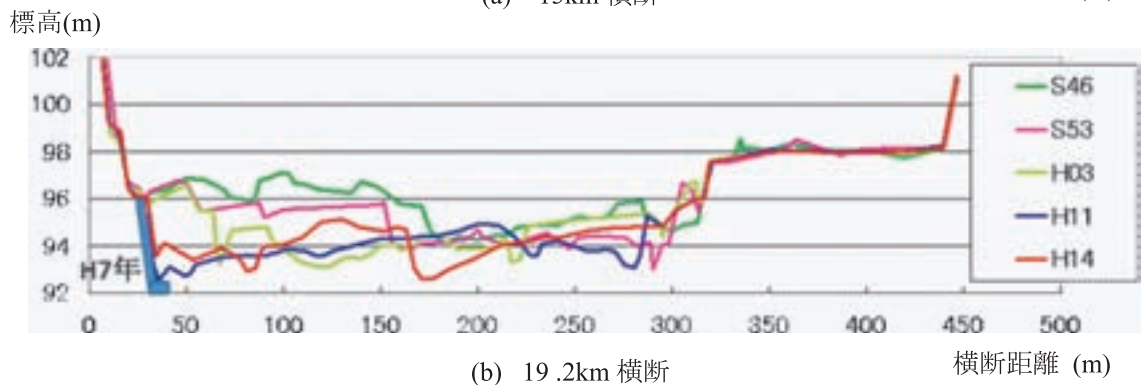
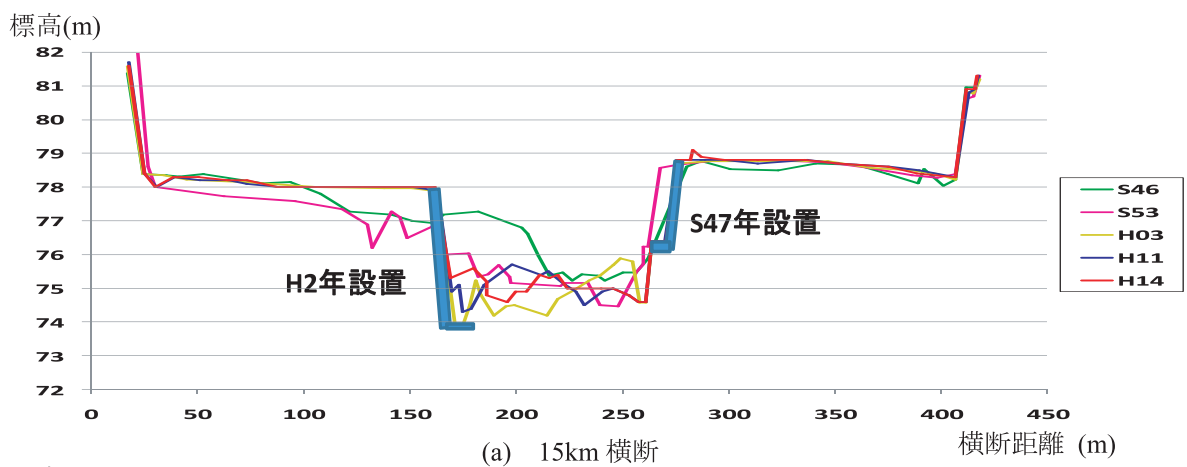


図-3 河道横断形状の経年変化

川の近年の洪水（中小規模の洪水）による河床変動は、構造物の影響を大きく受けていることが分かる。滲筋の固定化と高水敷の整備により中小規模の洪水に対しては、河道は安定し、水制工による策は効果を挙げている。しかし、大出水が発生した場合、低水路沿いの水制周辺の洗掘、さらには高水敷および堤防の侵食が懸念されている。札内川の適切な河道管理のためには、大中小の流量規模における流れと縦横断的な土砂動態を把握し、治水と環境の調和した安定河道縦・横断面形状を明らかにすることが重要である。このためには、水制工群・低水路護岸工を有する急流河川札内川の流れ、及び巨礫を含む土砂移動を説明する洪水流・河床変動解析法の構築が必要となる。

著者は、洪水時の流れと河床の時空間変化は、水面形の時間変化に現れるとの考えから、観測された水面形の時間変化を解とするような非定常二次元洪水流解析法と二次元河床変動解析法を一体的に扱う解析モデルを、石狩川、常呂川の洪水流に適用し^{6,7)}、概ね洪水時の河床変動を説明している。石礫河川の土砂移動・河床変動を説明する解析法として、常願寺川現地実験で明らかとなった河床変動機構を考慮した一次元、二次元の河床変動解析法^{8,9)}と水面形の時間変化を解とした非定常洪水流解析法との一体モデルを検討してきた。これらの解析において、石礫河川における大きな粒径集団の遮蔽効果（大きな石と小さな砂礫との高さ関係）や、河床表層の大きな空隙空間を解析に取り込むため、従来の解析法のように計算格子内で河床高を一定（空隙率を一定）として扱うのではなく、各粒径の高さを時々刻々計算する方法を構築し、河床表層の状態を表現できるようにした。また、従来のように流砂量式を用いるのではなく、石礫河川における大きな河床材料の効果を考慮した土砂の離脱・移動・堆積という各過程を表現するモデルを構築し、流砂量はそれらの各過程から評価する方法を構築した。これらの解析モデルを常願寺川現地実験へ適用した結果、石礫河川の土砂移動に関して従来モデルに比して説明力が広いことを示した。しかし、各粒径の高さは、各計算格子内における各粒径の平均高さを評価する方法を採用したため、表層石礫による凹凸分布（各粒径の高さ分布）を十分に表現できず、また、離脱や堆積のモデル化にいくつかの問題が含まれ、その改善が課題であった。具体的には、解析法の説明力を高めるために、石礫河川の広い粒径集団が形成する河床表層の凹凸分布の算定精度を高め、これを離脱および堆積の各過程に考慮することが必要であった。この改善策として石礫河川における現地調査を実施し河床表層の凹凸分布を明らかにした。そして凹凸形状を考慮した石礫河川の二次元河床変動解析法の構築を行った。

本研究では、常願寺川で開発した石礫河川の二次元河床変動解析法と砂礫河川で検討された現行の河床変動解析法¹⁰⁾をそれぞれ水面形の時間変化を解とした二次元洪水流解析法との一体モデルとして構築し、札内川H13年9月（既往最大）洪水流に適用する。検討対象区間は、札内川14km～22kmとし、実測の水位、流量、河床変動量と解析結果との比較から、水制工群を有する札内川の流れと河床変動を説明する実用的な解析法を検討する。また、札内川に存在する粗石クラスの河床材料が、石礫河川における巨石クラスのような遮蔽効果等の役割を果たすのかなど、粗石・礫を中心とした河道における河床変動機構を検討する。

2. 石礫河川の二次元河床変動解析法

石礫河川の河床変動解析法および河床表層の凹凸分布の特徴を考慮した新しい石礫河床変動解析法について述べる。図-4に石礫河川の河床変動解析法の過程を示す。本解析モデルは、洪水流の水面形の時間変化を解とした非定常二次元洪水流解析法と石礫河川の二次元河床変動解析法を一体的に扱うものである。解析モデルは、河道の平面形状を適切に考慮できるように一般座標系（ ξ, η 座標）を用いて構築した。石礫河川の河床変動解析法は、流砂現象の各過程（離脱・流下・堆積）について、それぞれモデル化を行い、流砂量はそれらを総合して評価する。石礫河川の河床変動解析法では、図-4に示すように、まず、各粒径粒子の離脱量および堆積量の算定を行う。離脱量は、各粒径粒子に対して離脱判定を行った後、離脱すると判断された粒子に対して、大きな粒径の遮蔽効果を考慮した離脱量式にて離脱量の算定を行う。堆積量は、各粒径の堆積割合を河床の凹凸を考慮した跳躍解析から求め、堆積割合と流砂体積の積により評価する。その後、離脱量および堆積量を用いて、流砂体積、各粒径の平均高さおよび各粒径の表層割合を算出する。流砂量は、流砂体積と粒子速度の積にて評価する。以下に、各項目について詳細に説明する。

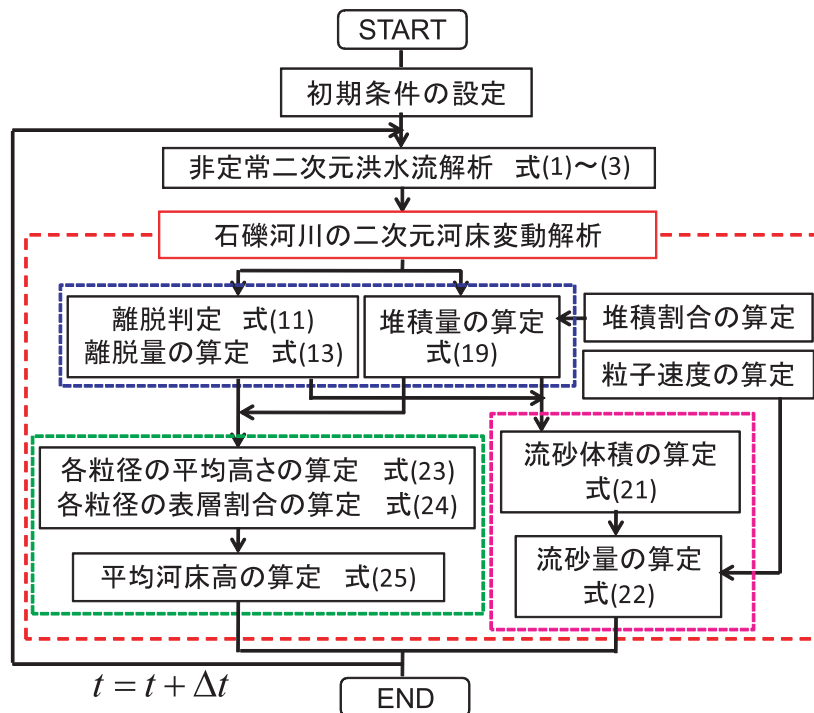


図-4 石礫河川の河床変動解析法の過程

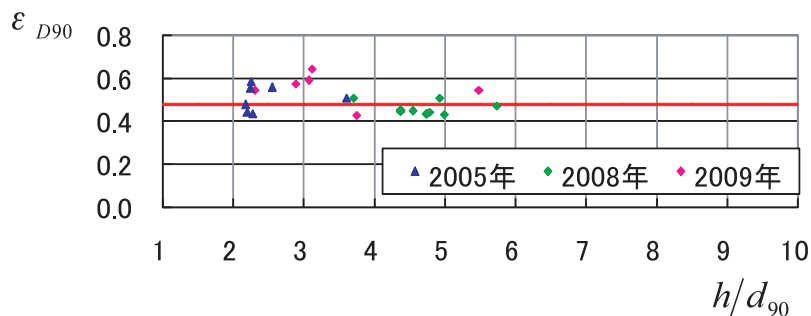


図-5 D90の遮蔽係数

(1) 非定常二次元洪水流解析

非定常二次元洪水流解析に用いる連続式と運動方程式を以下に示す.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{q^\eta}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{q^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^\xi q^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^\eta q^\xi}{J} \right) - \frac{q_x}{J} \left(u^\xi \frac{\partial \xi_x}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial \xi_x}{\partial \eta} \right) - \frac{q_y}{J} \left(u^\xi \frac{\partial \xi_y}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial \xi_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x^2 + \xi_y^2}{J} \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial H}{\partial \eta} \right) - \frac{F_{D90}^\xi}{\rho J} + D^\xi \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{q^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u^\xi q^\eta}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u^\eta q^\eta}{J} \right) - \frac{q_x}{J} \left(u^\xi \frac{\partial \eta_x}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial \eta_x}{\partial \eta} \right) - \frac{q_y}{J} \left(u^\xi \frac{\partial \eta_y}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial \eta_y}{\partial \eta} \right) \\ & = -gh \left(\frac{\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y}{J} \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\eta_x^2 + \eta_y^2}{J} \frac{\partial H}{\partial \eta} \right) - \frac{F_{D90}^\eta}{\rho J} + D^\eta \end{aligned} \quad (3)$$

ここに, h : 水深, q^ξ, q^η : 単位幅流量の反変成分, u^ξ, u^η : 流速の反変成分, H : 水位, J : ヤコビアン, $\xi_x, \xi_y, \eta_x, \eta_y$: 座標変換のメトリックス, D^ξ, D^η : レイノルズ応力項である. また, $F_{D90}^\xi, F_{D90}^\eta$ は, 河床表層に存在するD80以上の大きな河床材料からの形状抵抗を考慮したものであり, 抵抗に寄与する代表粒径をD90として式(8)~式(10)により評価する.

$$F_{D90}^\xi = \xi_x F_x + \xi_y F_y, \quad F_{D90}^\eta = \eta_x F_x + \eta_y F_y \quad (4)$$

$$F_x = N_{D90} \frac{\varepsilon_{D90}}{2} \rho C_D A_{D90} u_{D90}^2 \cdot \frac{u_x}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}} \quad (5)$$

$$F_y = N_{D90} \frac{\varepsilon_{D90}}{2} \rho C_D A_{D90} u_{D90}^2 \cdot \frac{u_y}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}}$$

$$N_{D90} = \frac{0.2}{\alpha_2 d_{90}^2}, \quad A_{D90} = \frac{\alpha_2 d_{90}^2}{2} \quad (6)$$

ここに, F_x, F_y : D90による形状抵抗のX, Y方向成分, N_{D90} : D90粒径の河床表層に存在する個数, ε_{D90} : D90粒径の遮蔽係数, ρ : 水の密度, C_D : 抗力係数(=1.0), A_{D90} : D90粒径の投影面積(河床上に半分露出している状態を想定), α_2 : 粒子の二次元形状係数(= $\pi/4$), u_{D90} : D90粒径に掛かる流速値であり, 流速の代表高さを半径の0.7倍の位置と仮定して対数分布則により求める. u_x, u_y : X, Y方向の水深平均流速値である. D90粒径の遮蔽係数 ε_{D90} は, 常願寺川での実験値から h/d_{90} と ε_{D90} の関係を整理した結果, 図-5に示す関係を得た. この図から, ε_{D90} は, h/d_{90} の変化に対してほぼ一定値と見なせることから, 平均値を採用して $\varepsilon_{D90}=0.48$ とした.

(2) 石礫河川の表層石礫凹凸分布

石礫河川における河床変動解析法^{8),9)}の精度向上のため、常願寺川現地実験水路を対象として河床表層の凹凸分布（各粒径の高さ分布）を調査した。これまでは、各粒径の高さについては、**図-6(a)**に示す各粒径の平均高さ $\overline{Z_{Bk}}$ を計算する手法をとってきた。しかし、**図-6(a)**のA, B粒子のように、同じ粒径においても高さの違いがあり、この高さの違いが河床の凹凸を形成し、離脱や堆積の各現象に影響している。本調査では、この各粒径の平均高さ $\overline{Z_{Bk}}$ を基準とし、**図-6(b)**に示すような各粒径ごとの高さの分布 f_k を得ることを目的とする。

調査は、2009-Case4終了後の実験水路において直線区間に位置するNo.0断面およびNo.16断面の低水路河床において、各箇所につき1.6m×1.6mの範囲で行った。**写真-1**のように、範囲内に存在する石礫にシールを付けて番号を振り、各石礫の頂点高 Z_{Bk} をトータルステーションで計測するとともに、粒径を写真撮影から計測した。また、平均河床高把握のため、0.2m×0.2mの範囲内で1点ずつ砂面高 Z_S を計測した。

図-7に、高さ分布の調査結果を示す。調査した粒径を3区分（40mm以下、40mm～75mm、75mm以上）に分けて整理した。縦軸は、砂面高 Z_S を基準とした高さ、横軸は、個数割合を示している。各分布は、乱れてはいるものの正規分布形状に近い形をとっていることから、各分布の平均高さを頂部とする正規分布と仮定して整理を行った。すなわち、式(7)で分布形状を表現し、**図-7**の各粒径階の高さ分布の標準偏差 σ_k について調べた。

$$f(z') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k} \exp\left(-\frac{z'^2}{2\sigma_k^2}\right) \quad (7)$$

$$z' = \frac{Z_{BSk} - \overline{Z_{BSk}}}{\overline{Z_{BSk}}} \quad (8)$$

$$Z_{BSk} = Z_{Bk} - Z_S, \quad \overline{Z_{BSk}} = \overline{Z_{Bk}} - Z_S \quad (9)$$

図-8に、調査結果による高さ分布とそれを近似する正規分布（凡例に標準偏差の値を表示）を示す。小さい粒径集団ほど標準偏差が大きく、大きな粒径集団ほど標準偏差が小さい傾向であることが分かる。これらの関係を**図-9**にまとめた。 d_m は各調査箇所の平均粒径を示す。標準偏差の分布は、式(10)で近似される。

$$\sigma_k = \min\left\{0.435 + \exp\left(-6\frac{d_k}{d_m}\right), 0.6\right\} \quad (10)$$

ここで、標準偏差値は大きな値はとらないと考え、その上限を0.6で打ち切った。この得られた関係を、石礫河川の河床変動解析法に組み込み、河床の凹凸を考慮した離脱・堆積のモデル化に反映する。

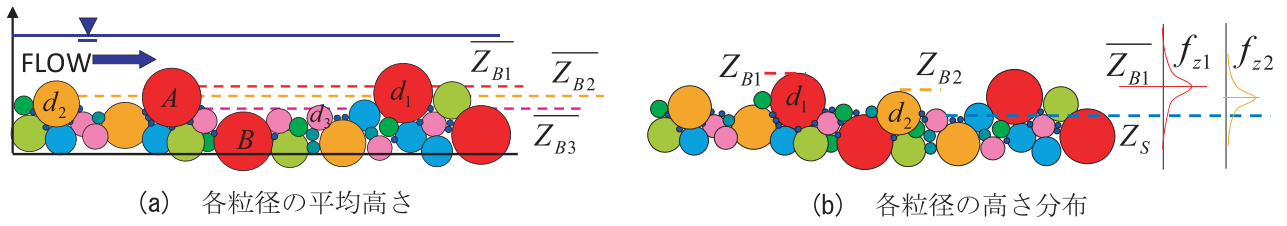


図-6 各粒径の平均高さ及各粒径の高さ分布の関係

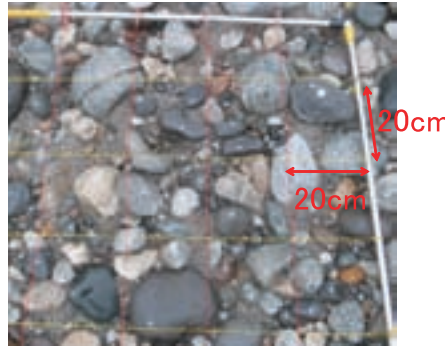


写真-1 石礫高さ分布調査箇所の河床の状況

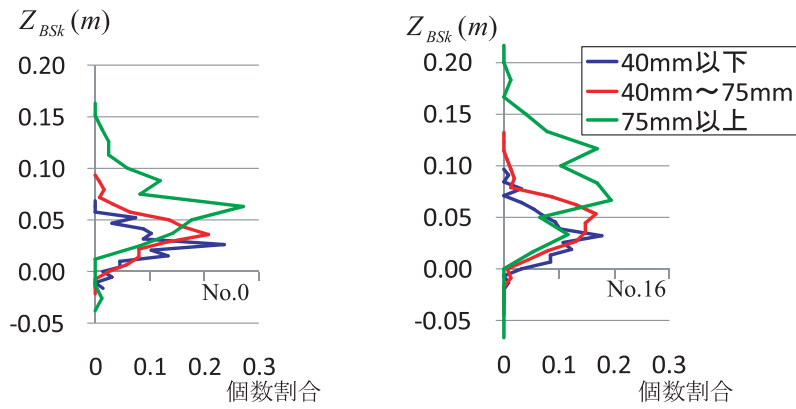


図-7 各粒径階の高さ分布

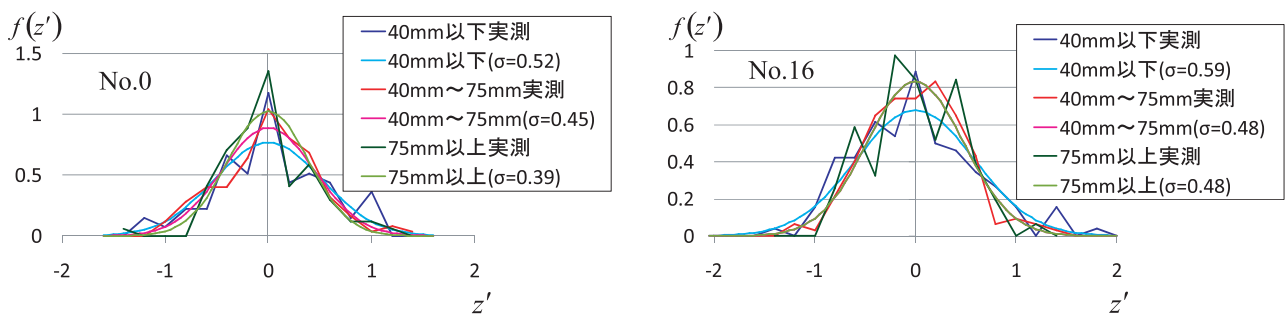


図-8 調査した高さ分布と正規分布

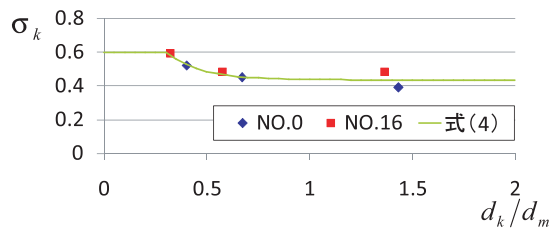


図-9 標準偏差と粒径の関係

(3) 離脱量の算定方法

上述のように、河床表層粒子は、各粒径ごとに高さ分布を持ち、**図-10**のA粒子のように各粒径の中で高い位置に存在するもの（露出度が高いもの）が離脱する可能性が高い。各粒径の離脱量の算定は、各粒径の中で高い位置に存在する粒子を対象として行う必要がある。しかし、**図-10**のB粒子やC粒子のように、それぞれの粒径の中で高い位置に存在する粒子の中でも、他の大きな粒径の前面および背後に位置し、大きな粒径に遮蔽され移動できない状態の粒子が存在する。石礫河川における離脱量算定には、このような大きな粒径集団による遮蔽効果を十分考慮する必要がある。

離脱量算定の過程では、まず、各粒径の高い位置に存在する粒子を対象とした離脱判定を行う。**図-11**に離脱判定の概要を示す。離脱判定に用いる各粒子の高さ Z'_{Bk} は、**図-12**に示すように、計算された各粒径の平均高さ \bar{Z}_B より各粒径の半径分高い位置とした。離脱判定を行う粒子に対して角度 θ_k 下方に固定粒子（平均粒径 d_m ：本解析では d_{60} 粒径とした）を配置し、その接点を支点として、モーメントの釣り合い式(11)により離脱判定を行う。

$$\beta_{i,j,k} = \frac{\frac{\alpha_{zk}}{2} \rho C_D \varepsilon_a \alpha_2 d_k^2 u_{fk}^2 + \frac{\alpha_{xk}}{2} \rho C_L \varepsilon_a \alpha_2 d_k^2 u_{fk}^2}{\alpha_{xk} \cdot (\rho_s - \rho) g \alpha_3 d_k^3} \quad (11)$$

$$\beta_k \geq 1.0 : \text{離脱する} \quad \beta_k < 1.0 : \text{離脱しない}, \quad \alpha_{xk} = \frac{d_k}{2} \sin \theta_k, \quad \alpha_{zk} = \frac{d_k}{2} \cos \theta_k$$

ここに、 i, j ：計算メッシュの流下方向および横断方向の番号、 ε_a ：流体力を受ける投影係数で、既往の研究¹¹⁾では0.4が一般的に用いられるが、離脱対象粒子が周辺の粒子に比べて高い位置に設定しているため、本解析では0.7とした。 C_L ：揚力係数で、Chepil^{12),13)}により測定された抗力・揚力比を参考に $C_L=0.85$ とした。 ρ_s ：粒子の密度、 α_3 ：粒子の3次元形状係数（ $\pi/6$ ）である。 u_k ：粒子に掛かる流速値で、対数分布則により求める。流速の代表高さの算定方法を**図-13**に示す。離脱判定粒子の底部が平均河床より低



図-10 離脱と河床凹凸の関係

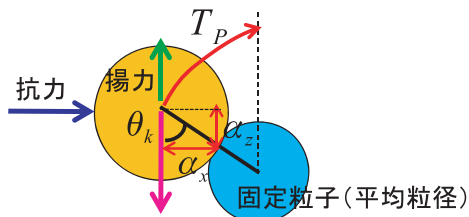


図-11 離脱計算の概要

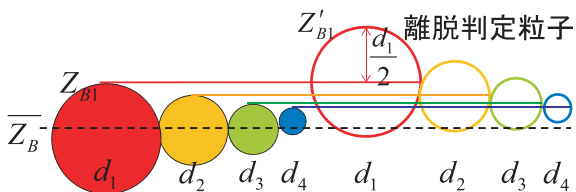
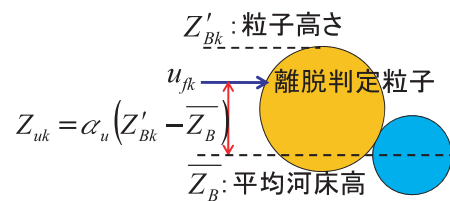
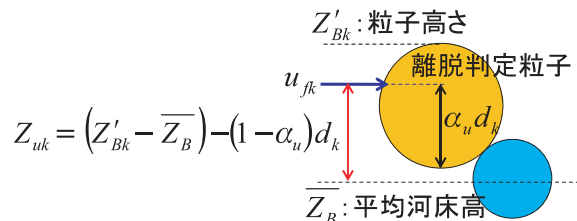


図-12 離脱判定粒子の高さ



(a) 離脱粒子の底部が平均河床より低い場合



(b) 離脱粒子の底部が平均河床より高い場合

図-13 離脱粒子に掛かる流速値の算定方法

い場合と高い場合に分け、 a_s を0.7として流速代表高さを求め、流速値を算定した。 θ_k :離脱角度で、式(12)により算定する。

$$\theta_{i,j,k} = \text{MAX} \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{d_k}{d_k + d_m} \right), 45.0 \right\} - \theta_{c,i,j} \quad (12)$$

式(12)の右辺第一項の部分は、図-14に示すように平均粒径 d_m と離脱判定粒子 d_k との大小関係を表した項である。大きな粒径ほど離脱角度が小さくなり離脱しやすい状態となり、逆に小さな粒径は離脱角度が大きくなり離脱しづらい状態となるように設定している。ただし、離脱角度が45度以下にはならないように制御した。河道縦横断勾配が離脱に影響することから^{11),14)}、離脱の算定には河床縦横断勾配を考慮する。 θ_c は、河床・河岸の縦横断勾配の離脱への影響を考慮するために設定したものであり、次のように算定する。離脱量 V_P は、図-15に示すように、メッシュの边上(U点、R点)でそれぞれ算定する。 θ_c の値は、U点では、流速ベクトルと同じ方向の勾配(縦断勾配)を用い、R点では、流速ベクトルに対して直交方向の勾配(横断勾配)を用いた。

式(11)の離脱判定において離脱すると判断された粒径を対象に式(13)にて離脱量の算定を行う。

$$V_{P,i,j,k} = \varepsilon_{P,i,j,k} \frac{N_{P,i,j,k} \alpha_3 d_k^3}{T_{P,i,j,k}} \quad (13)$$

ここに、 ε_P :各粒径の離脱割合、 N_P :各粒径の河床表層に存在する全個数(= $P_k/\alpha_2 d_k^2$)、 T_P :河床からの離脱時間であり、図-11に示すように固定粒子を乗り越えるまでの時間と定義し、粒子の運動方程式を用いて算定する。式(13)の形は、中川・辻ら¹¹⁾、村上ら¹⁵⁾のものと同様である。石礫河川における大きな粒径集団による特徴的な遮蔽効果は、各粒径の離脱割合 ε_{Pk} に反映する。各粒径の離脱割合 ε_{Pk} は、各粒径の高さ分布から算定される基本離脱割合 ε'_{Pk} と他の大きな粒径集団の遮蔽効果による離脱抑制を考慮した ε_{wsk} を用いて、以下の式により評価する。

$$\varepsilon_{P,i,j,k} = \varepsilon'_{P,i,j,k} \varepsilon_{ws,i,j,k} \quad (14)$$

各粒径の基本離脱割合 ε'_{Pk} は、離脱判定粒子が離脱可能な状態であれば、それよりも高い位置に存在する粒子は離脱する可能性が高いと考え、図-16に示すように、表層に存在する粒子の中で離脱判定粒子よりも高い位置に存在する粒子割合と定義し、各粒径の高さ分布を用いて以下の式により求める。

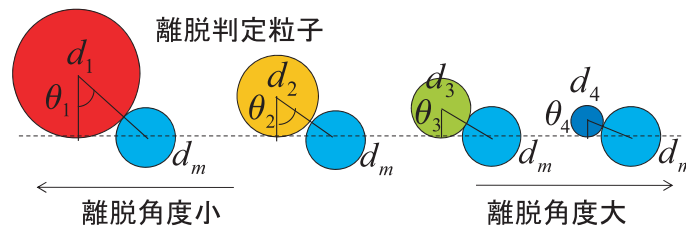


図-14 離脱角度設定の概要

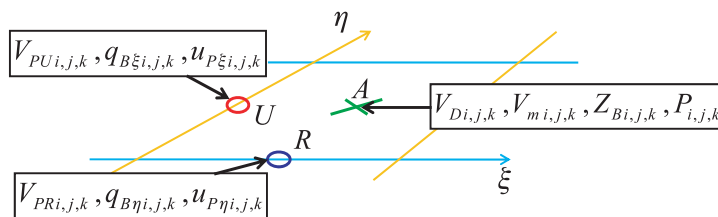


図-15 各変数の定義点

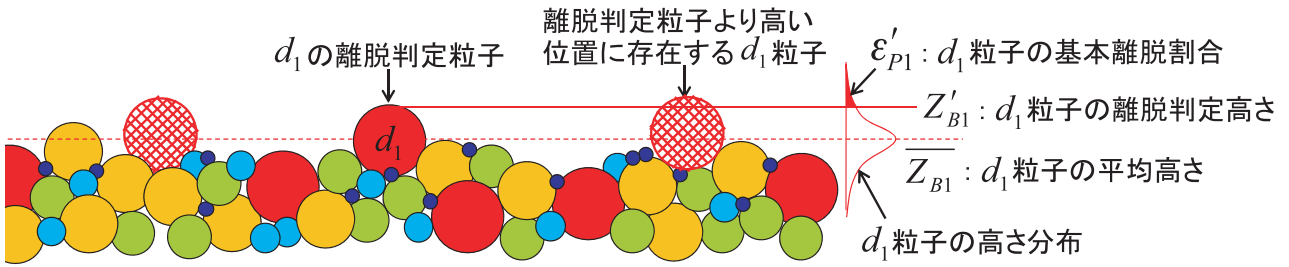
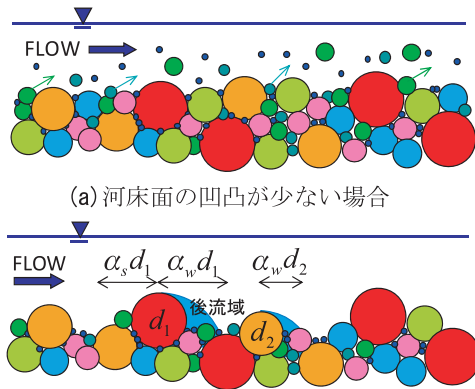


図-16 基本離脱割合



(b)河床面の凹凸が大きく後流域等の影響がある場合

図-17 大きな粒径による遮蔽効果

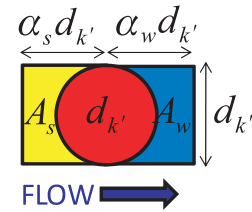


図-18 離脱抑制域の概要

$$\varepsilon'_{Pi,j,k} = \int_{z'_{Bk}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{i,j,k}} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_{i,j,k}^2}\right) dz \quad (15)$$

大きな粒径による遮蔽割合 ε_{wsk} の算定方法について説明する。図-17(a)のように大きな粒径と小さな粒径の高さが余り変わらない状態では、後流域などによる大きな粒径による離脱抑制効果は小さく、土砂は離脱しやすいと考えられる。しかし、図-17(b)のように大きな粒径集団と小さな粒径集団の高さに差が付いた状態では、小さな粒径集団の中で突出した大きな粒子の前面や背後（後流域）に位置するものは遮蔽効果により離脱しないと考えられる。大きな粒子による遮蔽割合 ε_{wsk} は、突出した大きな粒径の背後に存在する割合（後流域の影響） ε_{wk} と、突出した大きな粒子が下流側に存在する割合 ε_{sk} を考慮し、以下の式により評価する。

$$\varepsilon_{wsk} = 1 - (\varepsilon_{wk} + \varepsilon_{sk}) \quad (16)$$

それぞれの遮蔽割合は、面積割合により評価する。図-18に示すように大きな粒子の後流域の面積を A_w 、大きな粒子が離脱粒子の下流側に存在することにより離脱が抑制される面積（離脱抑制面積）を A_s とし、これらの面積に存在する小さな粒子は、離脱しないと定義する。大きな粒子 k' （粒径 d_k ）の各面積は、図-18のように流下方向に対して幅 d_k の長方形を設定し、流下方向の長さは粒径 d_k を基準として各長さを規定する α_w 、 α_s という係数を設定すると、各面積は式(17)により評価される。

$$A_{wk'} = \alpha_w d_k^2, \quad A_{sk'} = \alpha_s d_k^2 \quad (17)$$

ここで、大きな粒子 k' は、 $d_k \geq d_m$ かつ $d_k \geq d_k$ となる粒径とする。また、大きな粒子 k' の中でも、粒子高さが低いものは遮蔽効果を持たず、突出した高い位置に存在する粒子のみが遮蔽効果を持つと考えられる。そのため、小さな粒子 k に対して遮蔽効果を持つ高い位置に存在する大きな粒子 k' の割合を評価する必要

がある。大きな粒子 k' の中で小さな粒子 k に対して後流域の影響を与える（高い位置に存在する）割合を $P_{wk,k'}$ 、大きな粒子 k' の中で小さな粒子 k に対して離脱抑制域 A_s を形成する割合を $P_{sk,k'}$ として、それぞれの算定方法を図-19に示す。 $P_{wk,k'}$ は、図-19(a)に示すように粒子 k の離脱判定粒子の高さ Z'_{Bk} よりも高い位置に存在する大きな粒子 k' の割合とした。また $P_{sk,k'}$ は、粒子 k の離脱判定粒子の高さ Z'_{Bk} と図-11に示す離脱判定に用いる固定粒子の高さ Z'_{BPk} を比較して低い方の高さを選定し、それより高い位置に存在する大きな粒子 k' の割合を $P_{sk,k'}$ とした。粒子 k に対する遮蔽効果 ε_{wk} 、 ε_{sk} は、大きな粒径集団（ $k'=1\sim nk'$ ）からの遮蔽効果を総合し、以下の式により求める。

$$\varepsilon_{wk} = \sum_{k'=1}^{nk'} \left(\frac{P_{wk,k'}}{\alpha_2 d_k^2} A_{wk'} \right), \quad \varepsilon_{sk} = \sum_{k'=1}^{nk'} \left(\frac{P_{sk,k'}}{\alpha_2 d_k^2} A_{sk'} \right) \quad (18)$$

式(17)に含まれる α_w, α_s は、各遮蔽効果の大きさを決める重要な係数であり、これらの係数値を設定する必要がある。図-20は、常願寺川現地実験の通水後のほぼ安定した（土砂移動がほとんどない）状態の河床表面層画像である。図には、河床表面層に存在する平均粒径以上の核となる大きな石に赤マークを付けた。この河床の状態です砂移動がほとんど生じていないことから、表面に見える小さな砂礫は、大きな粒径集団に遮蔽されていたと考えられる。そこで、図-20のように小さな砂礫集団がほぼ覆われるように、赤マークの石から下流側に青色枠（後流域 A_w を想定）、上流側に黄色枠（離脱抑制面積 A_s を想定）を設定したところ、 α_w, α_s を概ね1.0~1.5程度とした時に、砂礫集団の領域をほぼ覆うことが分かった。このように写真判定から α_w, α_s の概略数値を決めたのち、最終的な数値の決定は、室内流砂量実験や常願寺川現地実験へ本解析法を適用し、その結果から判断した。適用の結果、 α_w, α_s ともに1.0とした場合が、結果の再現性が高かったことから、両係数とも1.0を採用した。

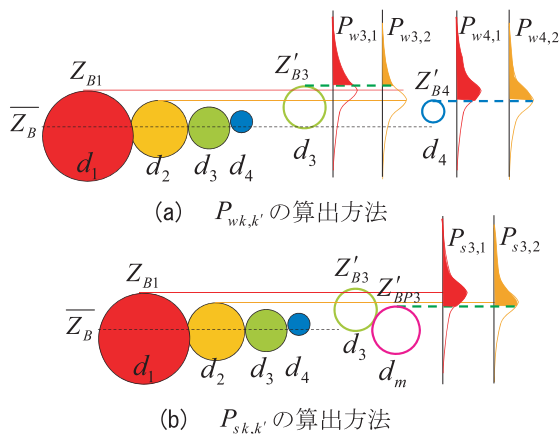


図-19 $P_{wk,k'}$ 、 $P_{sk,k'}$ の算出方法概要

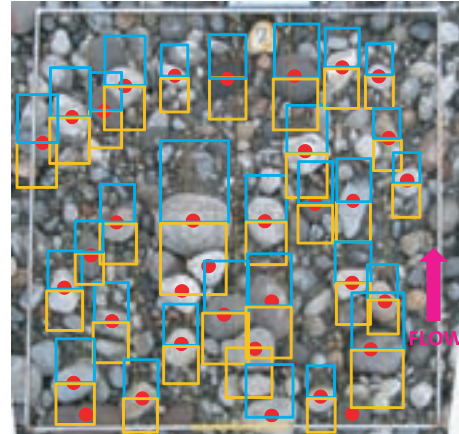


図-20 写真判読による後流域・離脱抑制面積の検討

(4) 堆積量の算定方法

著者らによる既報^{9),10)}の停止割合の評価法では、河床には平均粒径粒子を整列して並べた平面を想定し、その状態での各粒径の跳躍解析から河床との衝突割合を算出し、この衝突割合を停止割合として取り扱ってきた。しかし、上述のように石礫河川における土砂の停止機構には、河床表面の粒度分布と凹凸の大きさが大きく影響する。均一径を整列に並べた河床では、石礫河川の停止機構を扱うには不十分であった。本解析法では、河床粒度分布および各粒径の高さ分布から河床の凹凸分布を作成し、その凹凸のある河床上で跳躍解析を行うことにより、停止割合（土砂停止量）を算出する評価方法を構築した。以下にその方法を述べる。

単位時間、単位面積あたりの河床への堆積量 V_{Dk} の算定は、式(14)にて行う。

$$V_{Di,j,k} = P_{Ci,j,k} V_{mi,j,k} \quad (14)$$

ここに、 P_{Ck} :各粒径の単位時間あたりの停止割合、 V_{mk} :後述する各粒径の単位面積あたりの流砂体積である。 P_{Ck} は、各粒径の跳躍解析から求める。以下にその方法を示す。

関根ら¹⁰⁾は、一様粒径において河床面の凹凸を考慮した跳躍解析を行い、砂の停止機構について検討を行った。本解析では、この方法を混合粒径に拡張し、河床の粒度分布と凹凸分布を考慮した河床上での跳躍解析から、停止割合の算定を行う。図-21に跳躍解析に用いる河床面の作成例を示す。粒度分布と各粒径の高さ分布に対応するように河床面を形成し、この形成した河床面を用いて、各粒径の跳躍解析を河床面との衝突・反発を考慮した粒子の運動方程式により行う。河床面との衝突・反発は、反発係数を用いて制御する。反発係数は、移動距離および停止時間に影響を与える重要なパラメータである。反発係数の数値は、土屋ら¹¹⁾の一様砂礫の実験結果から移動床では0.5前後の値とされている。本研究では、5章の室内流砂量実験への適用から、現象をよく説明する値として反発係数0.65を採用した。各粒径につき20回の跳躍解析を行い、河床に停止するまでの平均時間 $\overline{t_{Sk}}$ を求める。停止時間の分布が指数関数¹⁰⁾に従うとし、平均停止時間 $\overline{t_{Sk}}$ を用いて以下の式により単位時間あたりの停止割合 P_{Ck} を求める。

$$P_{Ci,j,k} = \int_{\overline{t_{Si,j,k}}}^{\infty} \frac{1}{\overline{t_{Si,j,k}}} \exp\left(-\frac{t}{\overline{t_{Si,j,k}}}\right) dt \quad (15)$$

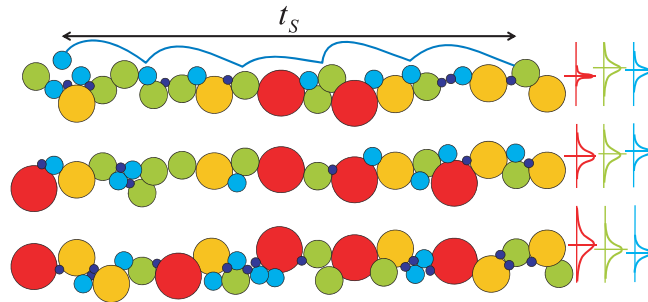


図-21 河床粒度分布および凹凸分布に対応した河床面の作成

(5) 流砂量の算定方法

単位面積あたりの流砂体積は、河床からの離脱量、河床への堆積量と、計算格子上で評価する ξ 方向単位幅流砂量 $q_{B\xi}$ および η 方向単位幅流砂量 $q_{B\eta}$ を用いて式(21)により評価する。

$$\frac{\partial V_{mi,j,k}}{\partial t} + \frac{\partial q_{B\xi i,j,k}}{\partial \xi} + \frac{\partial q_{B\eta i,j,k}}{\partial \eta} = V_{Pi,j,k} - V_{Di,j,k} \quad (21)$$

単位幅流砂量 $q_{B\xi}$ 、 $q_{B\eta}$ は、単位面積あたりの流砂体積と ξ 、 η 方向の粒子移動速度 $u_{p\xi}$ 、 $u_{p\eta}$ を用いて式(22)により評価する。

$$\begin{aligned} q_{B\xi i,j,k} &= u_{p\xi i,j,k} V_{mi,j,k} \\ q_{B\eta i,j,k} &= u_{p\eta i,j,k} V_{mi,j,k} \end{aligned} \quad (22)$$

ここで、式(22)の下付き $i0$ 、 $j0$ は、風上側を示し、粒子速度 $u_{p\xi}$ 、 $u_{p\eta}$ の正負により対象メッシュを判定する。各粒径の粒子移動速度ベクトルは、その場所の流体力、河床縦横断勾配に対して平均的な移動方向、移動速度を得る必要がある。上述の停止割合の見積もりには河床面の粒度分布および凹凸形状を考慮した跳躍解析を実施したが、ここでは平均的な粒子移動速度ベクトルを知りたいため、著者らによる既報^{8),9)}

の評価法と同様に、図-22に示すような平均粒径を整列に敷き並べた縦横断勾配を考慮した河床面を設定し、河床との衝突・反発を考慮した粒子の運動方程式¹⁶⁾を用いた跳躍解析から求めた。反発係数は、上述と同じ0.65を採用した。各粒径に関して5秒間の跳躍解析を行い、その移動距離・方向から粒子速度ベクトルを求め u_{P_i} 、 u_{D_i} を評価する。

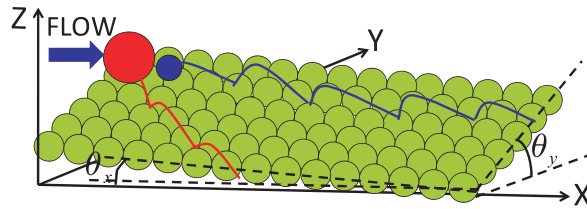


図-22 粒子速度ベクトルの解析概要

(6) 各粒径の平均高さおよび表層割合の算定方法

各粒径の平均高さ $\overline{Z_{Bk}}$ 、表層割合 P_k と平均河床高 $\overline{Z_B}$ の計算方法について説明する。各粒径の平均高さは、各粒径の河床からの離脱量、河床への堆積量と河床の表層割合を用いて式(23)により時々刻々の高さを計算する。

$$\frac{\partial \overline{Z_{Bi,j,k}}}{\partial t} = -\frac{\alpha_2}{\alpha_3} \frac{(V_{Pi,j,k} - V_{Di,j,k})}{P_{i,j,k}} \quad (23)$$

また、各粒径の表層割合も各粒径の離脱量、堆積量を用いて式(24)から計算する。

$$\frac{\partial P_{i,j,k}}{\partial t} = -\frac{\alpha_2}{\alpha_3} \frac{(V_{Pi,j,k} - V_{Di,j,k})}{d_k} + P_{0i,j,k} \sum_{k=1}^{nk} \frac{\alpha_2}{\alpha_3} \frac{(V_{Pi,j,k} - V_{Di,j,k})}{d_k} \quad (24)$$

ここに、 $P_{0i,j,k}$ ：表層下における各粒径の割合である。平均河床高 $\overline{Z_B}$ は、式(25)により算定する。

$$\overline{Z_{Bi,j}} = \frac{\sum_{k=1}^{nk} (P_{i,j,k} \cdot \overline{Z_{Bi,j,k}})}{\sum_{k=1}^{nk} P_{i,j,k}} - \frac{d_{mi,j}}{2} \quad (25)$$

式(25)の右辺第1項は、各粒径の平均高さ $\overline{Z_{Bk}}$ の計算格子内での平均高であり、右辺第2項は平均粒径の半径である。すなわち、平均河床高 $\overline{Z_B}$ は、平均的な粒子高さから平均粒径の半径を差し引いた高さとして定義した。

3. 札内川への適用と考察

(1) 解析手法と解析条件

2章で示した石礫河床変動解析法と現行の河床変動解析法（流砂量式：芦田・道上式，河床の連続式：平野の式）を，札内川に適用し，その検証を行う．解析の対象区間は，**図-23**に示す札内川14kmから22kmとした．この区間は，**図-24**に示すように，他の区間に比べて大きな洗掘が生じる恐れがある区間である．解析対象洪水は，ピーク流量が約1000m³/s規模のH13年9月洪水（既往最大洪水）とする．**図-25**に，平成11年横断測量と平成14年横断測量をもとに作成した河床変動量コンター（H13年洪水による河床変動量）を示す．高水敷を除くほとんどの個所で1m程度の変動が生じ，大きい個所で3m程度洗掘されている個所も見られた．この区間における水位情報として，15kmの南帯橋水位観測所と20.7kmの第2大川橋水位観測所において水位が測られている．しかし，上流に位置する第2大川橋水位観測所の観測水位は，河床変動の影響を大きく受けた値となっており，これを上流境界条件とすると，解析流量ハイドログラフの算定精度が十分得られなかった．従って，上下流端ともに南帯橋水位観測所の水位を境界条件として用い，第2大川橋水位観測所の観測水位は解析水位の検証として用いることとした．また，札内川17.2km左岸に売買川分水路が合流している．この合流量も下流側水位に影響を与えられられるが，H13年洪水では数十m³/s程度しか流入していないため，その影響が小さいと考え本解析では売買川分水路の合流は考慮していない．**図-26**に対象区間で測られた粒度分布を示す．この区間で測られている1kmごとの粒度分布は，全区間でほぼ一致した傾向となっている．調査された粒度分布は150mm以上を除いており，実際は**写真-2**に示すように最大で300mm程度の石が存在する．よって，解析には，**図-13**の黒線で示す，最大径が300mmの粒度分布を与えた．解析に用いた粒径は，250mm，120mm，50mm，10mm，2mmの5粒径とした．現行の河床変動解析法の，交換層厚は50mmとした．また，マニング粗度係数は0.034を与えた．



図-23 検討対象区間

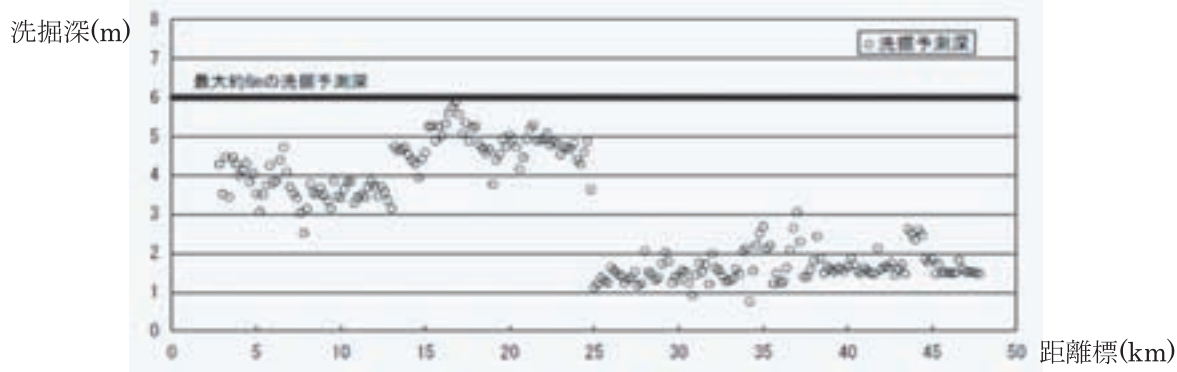


図-24 札内川における洗掘予測深（十勝川水系河川整備計画より）

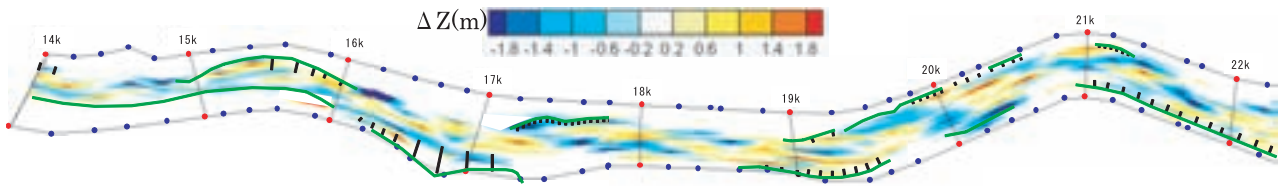


図-25 実測値による河床変動量コンター（H14年-H11年）

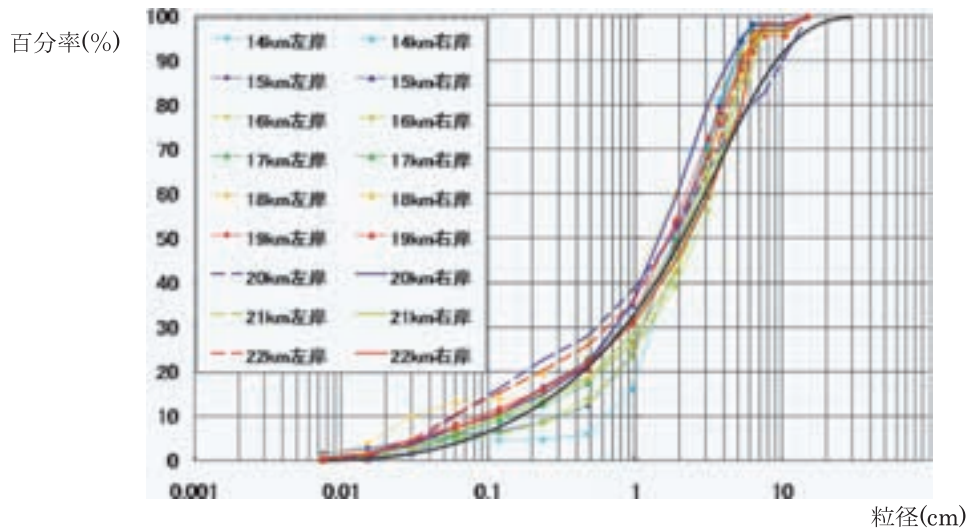


図-26 解析に与えた初期粒度分布



写真-2 札内川の河床表層の様子

(2) 解析結果と考察

1) 洪水の流れに関する結果と考察

図-27, 図-28には, 既往の解析法による水位ハイドログラフ (第2大川橋, 南帯橋) および流量ハイドログラフの解析結果と観測値との比較を示す. 図-29, 図-30には, 本解析法を用いた結果を示す. 南帯橋の水位ハイドログラフは, 上下流端の境界条件であることから解析水位は観測値を再現している. 第2大川橋は, 図-27, 図-29ともに水位下降期において解析結果が観測値を大きく上回っている. 観測水位は, 河床変動の影響で大きく変動している様子が見られるが, 解析では, そのような変動は捉えられていない. 流量ハイドログラフを見ると, 既往の解析法による解析流量は, 観測値 (南帯橋) を概ね再現している. 一方, 本解析法の解析流量は, 水位下降期において全体的に $200\text{m}^3/\text{s}$ 程度観測値より大きくなった. 既往の解析法では, 粗度係数の調節により流量の再現精度を高めることが可能であるが, 本解析法は, 抵抗値を大きな河床材料 (D90粒径) の形状抵抗で与えているため, 常願寺川のようにD90粒

径が大きい場合には有効であるが、札内川のようにD90粒径が小さい河川では、D90のみの抵抗では不十分で抵抗の与え方を修正する必要があると考えられる。

図-31には、本解析法の結果による各時刻の水深コンターと流速分布を示す。洪水流は、流量ピーク時を含むどの時間帯においても、ほとんどの区間で低水路を集中して流下していることが分かる。特に、21.6km付近（第2大川橋付近）や15km付近（南帯橋付近）では、狭い低水路に流量が集中し、水深が深く、流速が速くなっていることが分かる。また、連続して設置された水制先端部や、低水路護岸工沿いにおいて水深が深く流速の速い領域が縦断的に確認できる。

札内川のような急流石礫河川において流量ハイドログラフや河床変動の予測精度を向上させるためには、数kmピッチで水位観測が行われることが望ましい。今回対象とした洪水のように、河床が大きく変動し、数少ない水位観測値にその影響が大きく現れる場合、水位観測値を用いた流量推算を精度よく行うことが困難となる。数kmピッチで測られれば、水面形として水位観測の時間変化が得られるため、流量ハイドログラフの推算精度が向上し、河床変動もより精度良く算定することが可能となる。

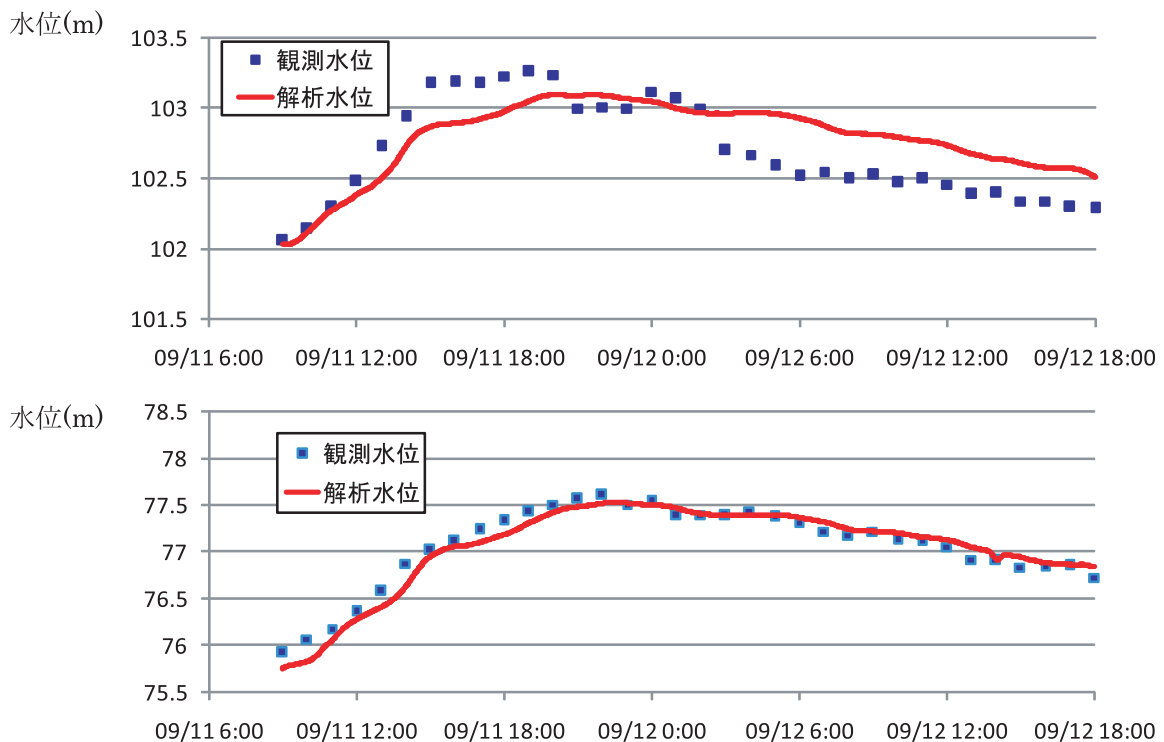


図-27 水位ハイドログラフの観測値と解析値（既往モデル）の比較
（上：第2大川橋，下：南帯橋）

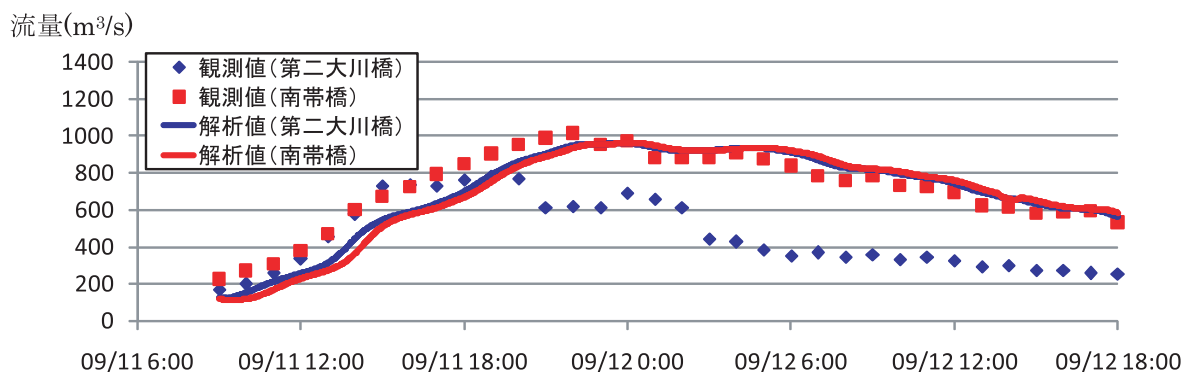


図-28 流量ハイドログラフの観測値と解析値（既往モデル）の比較

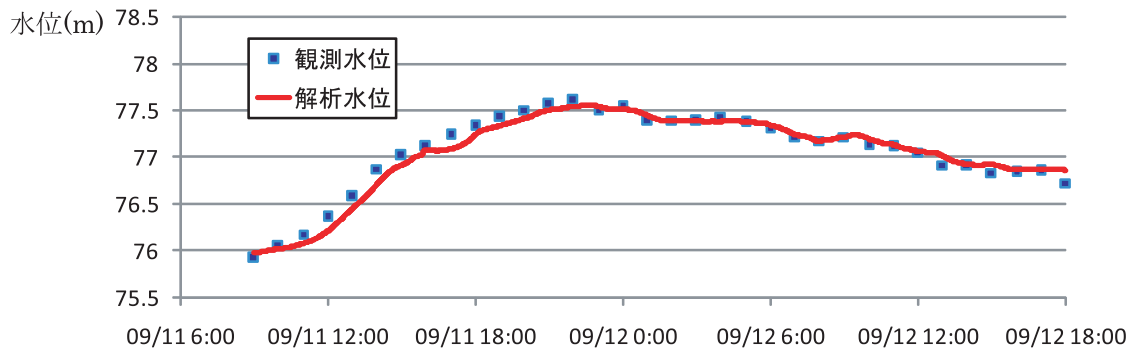
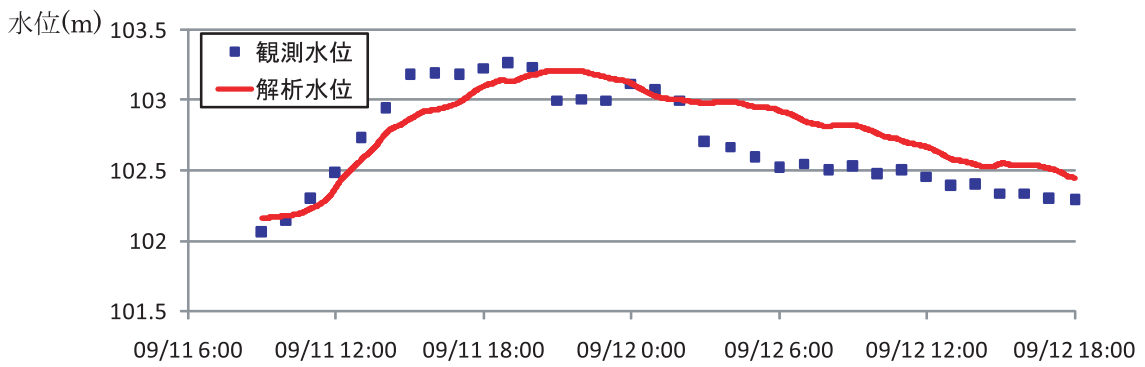


図-29 水位ハイドログラフの観測値と解析値（本解析法）の比較
（上：第2大川橋，下：南帯橋）

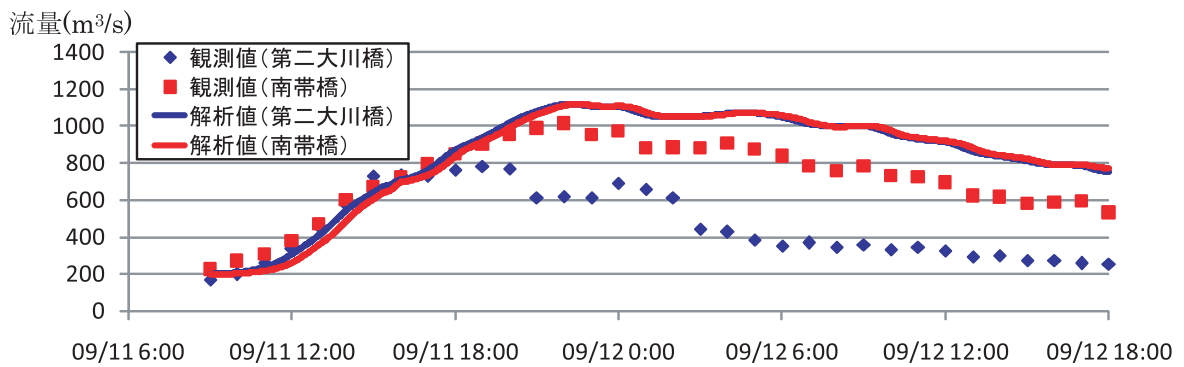


図-30 流量ハイドログラフの観測値と解析値（本解析法）の比較

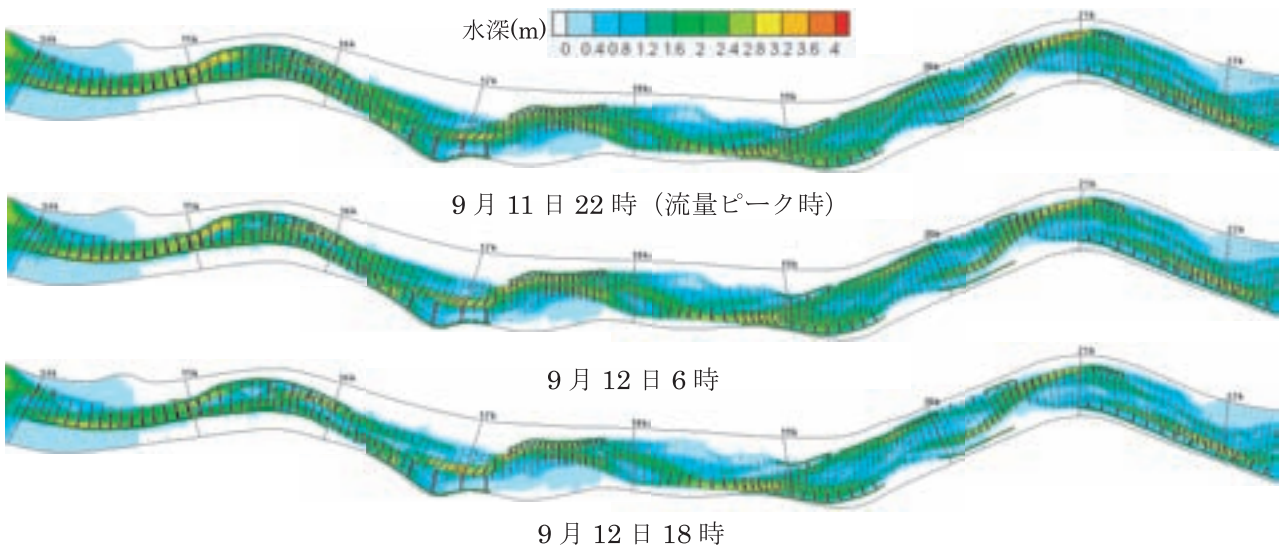


図-31 水深コンターと流速分布（本解析法）

2) 土砂移動・河床変動に関する結果と考察

図-32～図-34には、既往の解析法による各時刻の河床変動量分布、D60分布とD80分布を示す。また、図-35～図-37には、本解析法による同様の結果を示す。図-32と図-35に示す河床変動量の結果を見ると、両解析法の洗掘位置や堆積位置はほとんど違いがなく、水制先端部および河幅の狭い21.6km付近や15km付近の洗掘、水制背後の堆積が見られる。しかし、粒度分布（D60、D80分布）には両解析結果に大きな違いが見られる。既往の解析法は、大きく洗掘を受ける箇所においてもあまり粒度の変化は見られない。一方、本解析法では、洗掘箇所において粗粒化する傾向が顕著に現れている。図-38に、河床変動量の実測値と解析値の比較を示す。既往の解析法の結果では、実測値に比べて水制先端部やその周辺において大きく河床低下する箇所（17km～18km右岸、19km左岸、22km左岸）が見られる。既往の解析法は交換層を用いて表層の平均粒径を算定しているため、洗掘されてもその分小さい河床材料が表層下から供給されるため、表層の粒度分布が粗粒化しづらい。また、大きな粒径による遮蔽効果が十分に考えられていないため、図-39の流砂量分布に示すように小さな粒径集団が移動しやすく、結果として洗掘深が実際よりも大きく見積もられる。本解析法では、交換層のような層厚を考えず表層の粒度分布を各粒径の高さとともに算定（表層の空隙率の時間変化を算定）するため、洗掘による表層の粗粒化を捉えることができる。また、大きな粒径集団による遮蔽効果を評価していることから、粗粒化すれば、小さな粒径集団は河床から離脱しづらくなる。ただし、図-38を見ると、実測の変動量に比べ、本解析法の変動量は少なく評価されている箇所が見られ、特に河幅の広い箇所においてそのような傾向にある。図-40に示す本解析法の流砂量分布を見ると、120mmや50mmの粗石、粗礫クラスは活発に移動するものの、小さな粒径集団は遮蔽されほとんど移動していない。図-41に、22km断面における水制周辺洗掘箇所と河道中央部砂州上の各粒径の高さ分布（平均河床高を基準とする）を示す。砂州上では、解析に用いた最大径である250mmは低い位置に存在し、120mmが高い位置にあり抵抗に寄与していることが分かる。一方、水制周辺の洗掘箇所では250mmが最も高い位置に存在し、他の小さな集団を保護している。既往の解析法では、このような高さ関係について考えられていないため、小さな粒径集団は常に流体力を受け移動する。本解析法は、高さ関係を考慮し、各粒径集団の移動量を算定している点に特徴があるが、図-40の流砂量分布のように小さな粒径集団がほとんど移動していないことから、小粒径集団に対して遮蔽効果が過度に働いていることなどが考えられ、今後、細粒分の各過程（離脱、流下、堆積）のモデル化に関して検討が必要である。既往の解析法および本解析法ともに全区間において250mm粒径はほとんど移動していないことから、250mmクラスの石が札内川の対象区間における河床安定に寄与していると考えられる。図-42に、著者ら¹⁸⁾が提案した無次元流量と無次元流砂量の関係（無次元掃流砂量式）に既往の解析法と本解析法により得られた解析結果をプロットした。この無次元掃流砂量式は、従来流砂量式に用いられる掃流力を用いるのではなく、流量、勾配、河床材料といった断面の代表値から流砂量を推定できる点に特徴がある。既往の解析法（芦田・道上式）による流砂量は、無次元掃流砂量式に対して10倍程度大きな位置にプロットされる。一方、本解析法の流砂量は、ばらつきは大きいですが、無次元掃流砂量式に対して若干大きめの位置にプロットされた。札内川は、多くの滞筋（複雑な横断形状）を有し、その変動が激しいため、その影響により解析流砂量は無次元掃流砂量式に対して全体的に大きな値になったと考えられる。以上のように、札内川の洪水流・河床変動量データに本解析法および現行の河床変動解析法を適用した結果、水制周辺の洗掘等、粗粒化し大きな粒径集団が安定に寄与する箇所については本解析法が説明力を持つことが明らかとなった。一方、全体的な変動量が小さくなったことや細粒分の移動量が少なく見積もられたことなど、本解析法の各粒径の移動モデルに関して今後さらに検討が必要であることが明らかとなった。

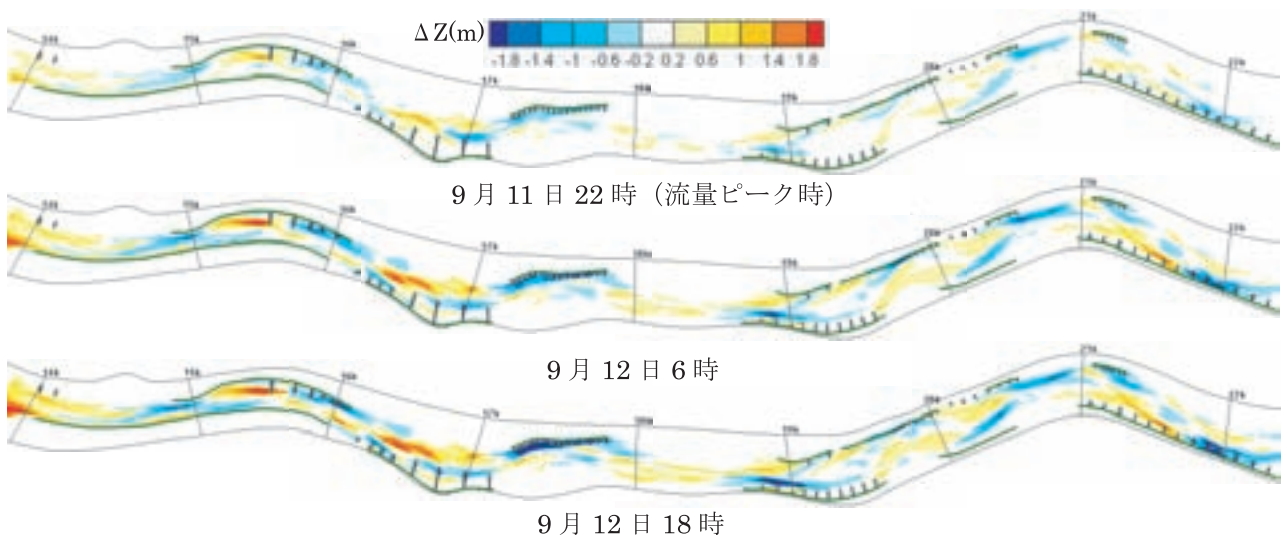


図-32 河床変動量 (既往モデル)

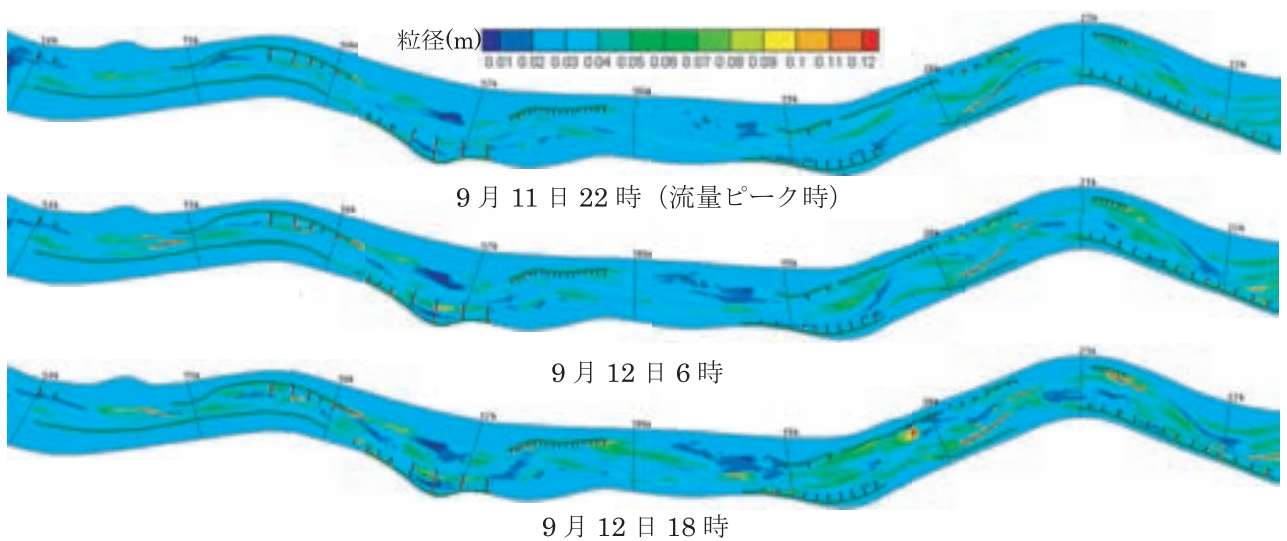


図-33 D60分布 (既往モデル)

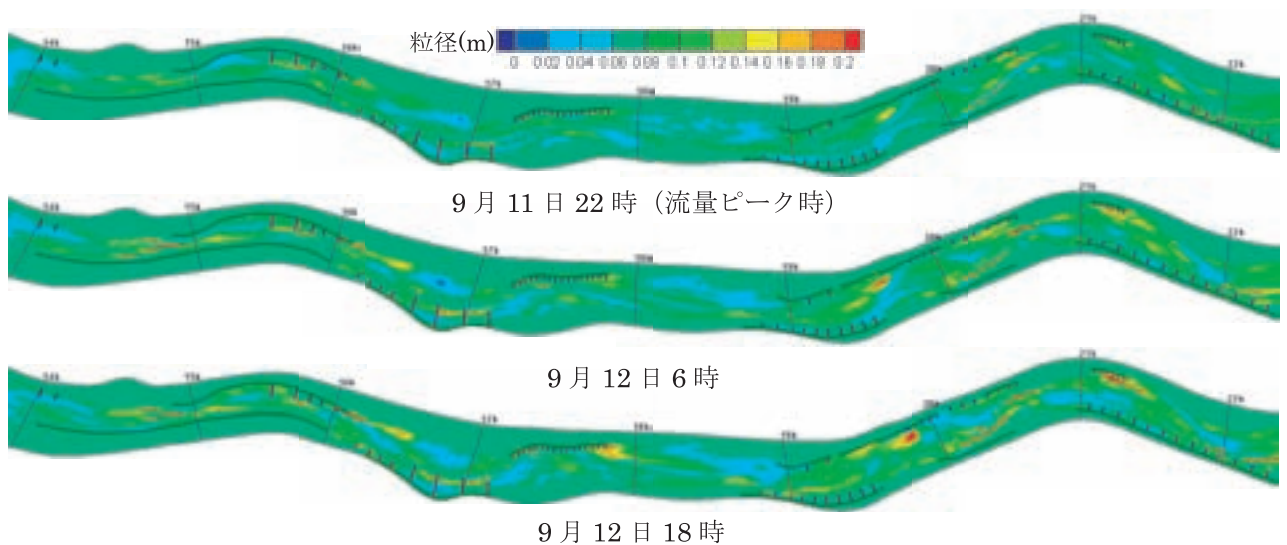


図-34 D80分布 (既往モデル)

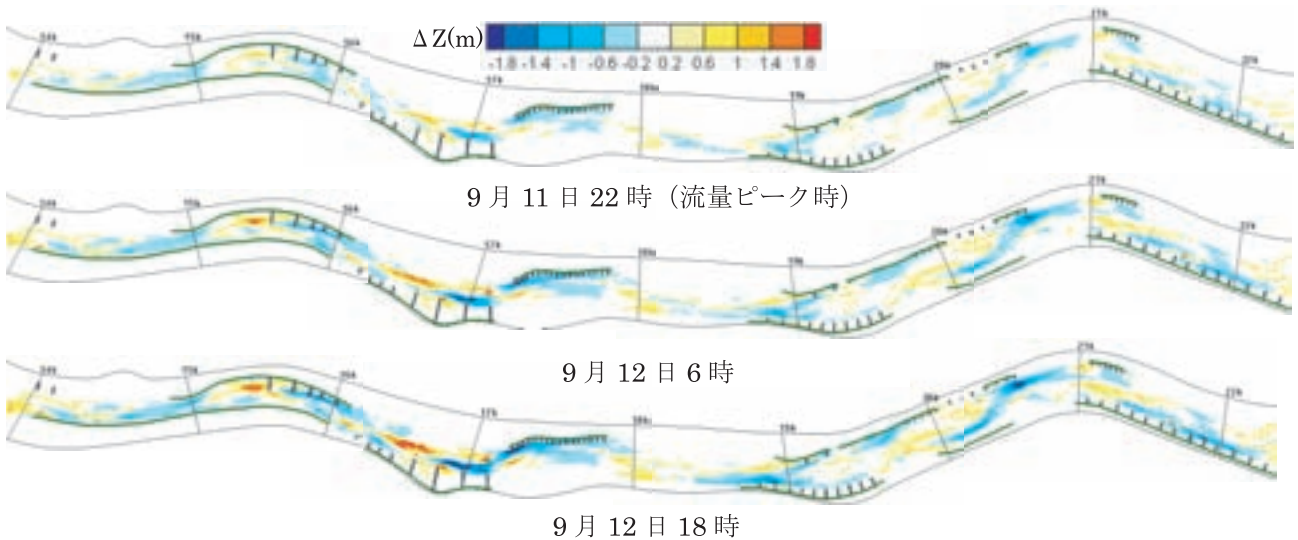


図-35 河床変動量 (本解析法)

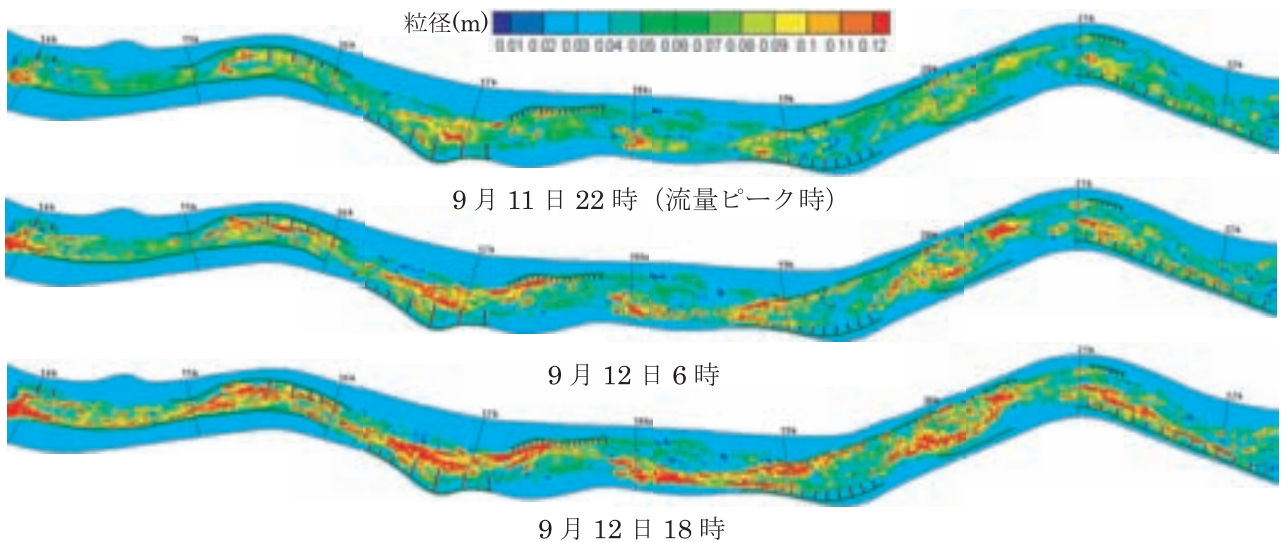


図-36 D60分布 (本解析法)

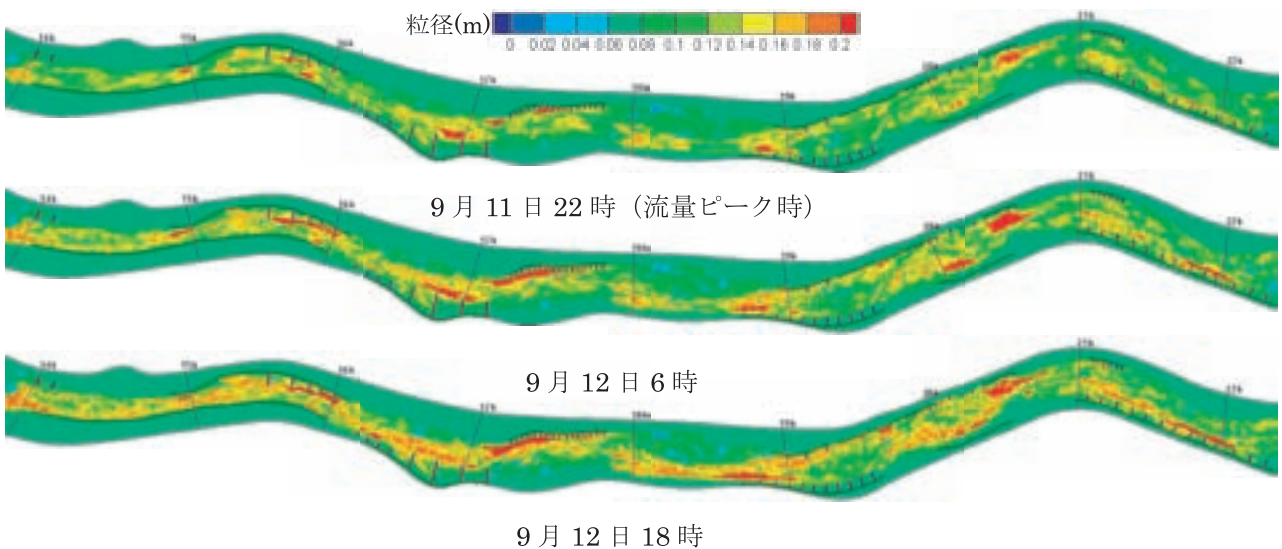


図-37 D80分布 (本解析法)

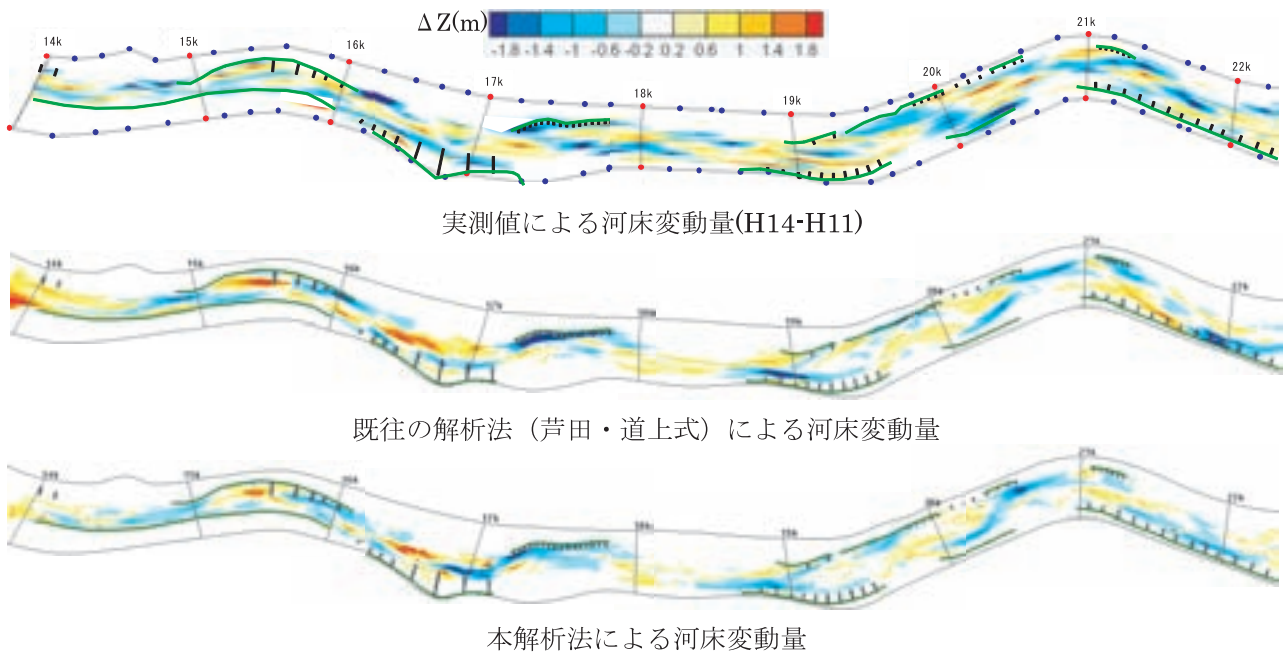


図-38 河床変動量コンターの実測値と解析値の比較

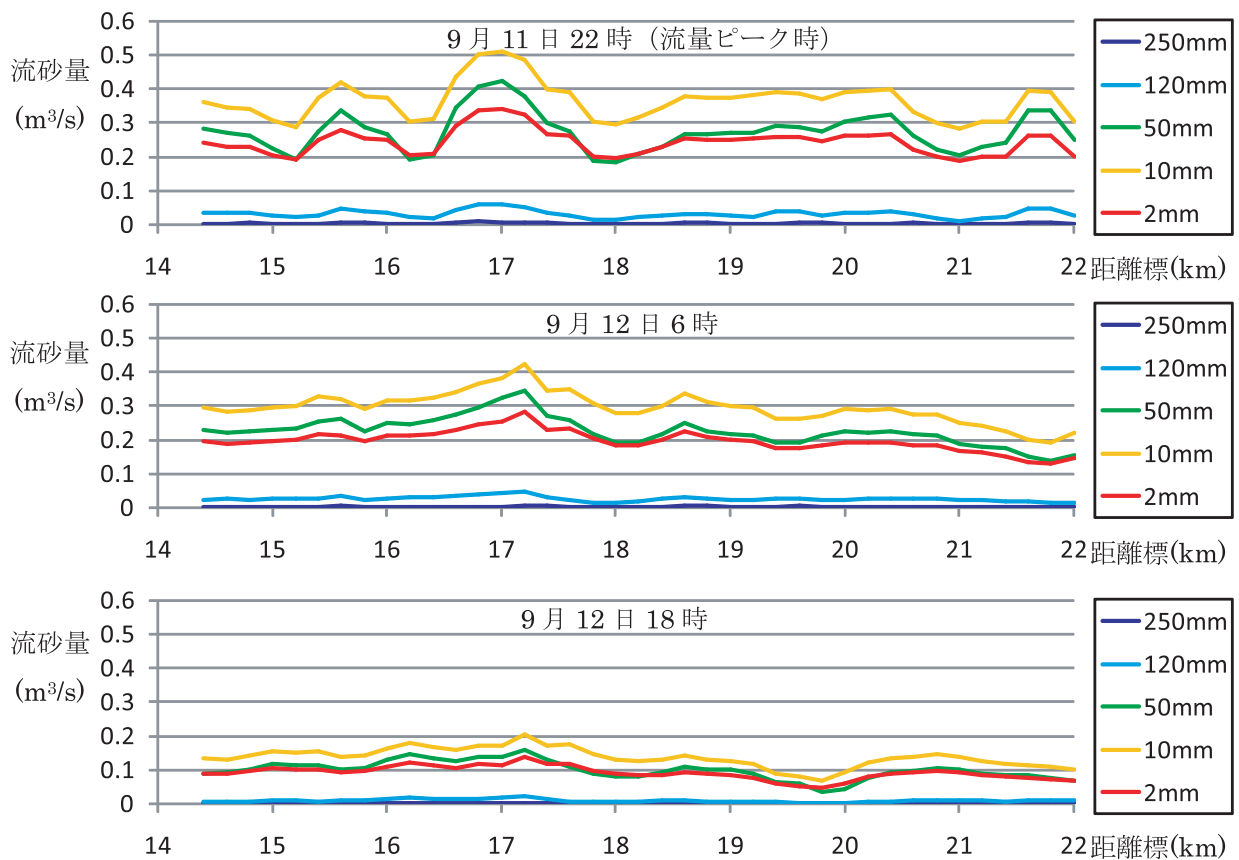


図-39 各粒径の流砂量分布 (既往モデル)

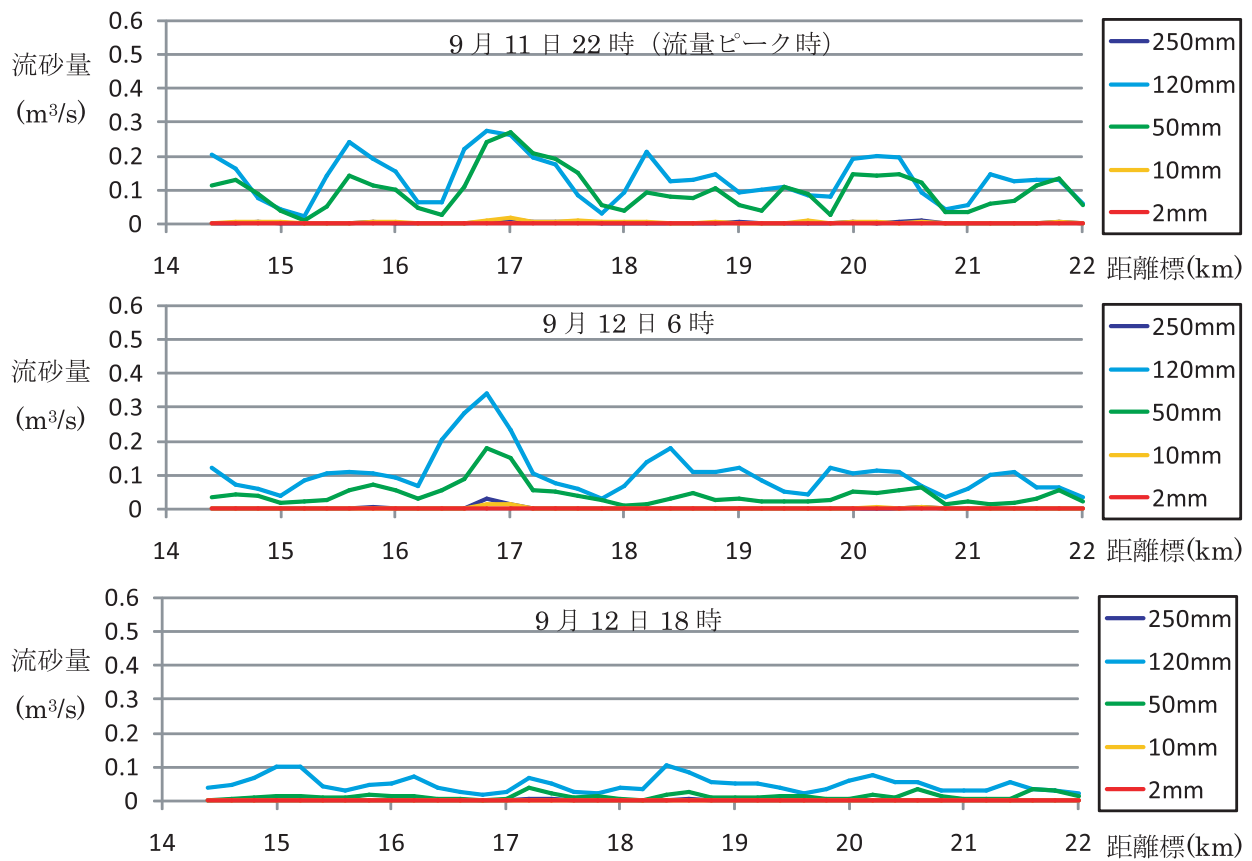


図-40 各粒径の流砂量分布（本解析法）

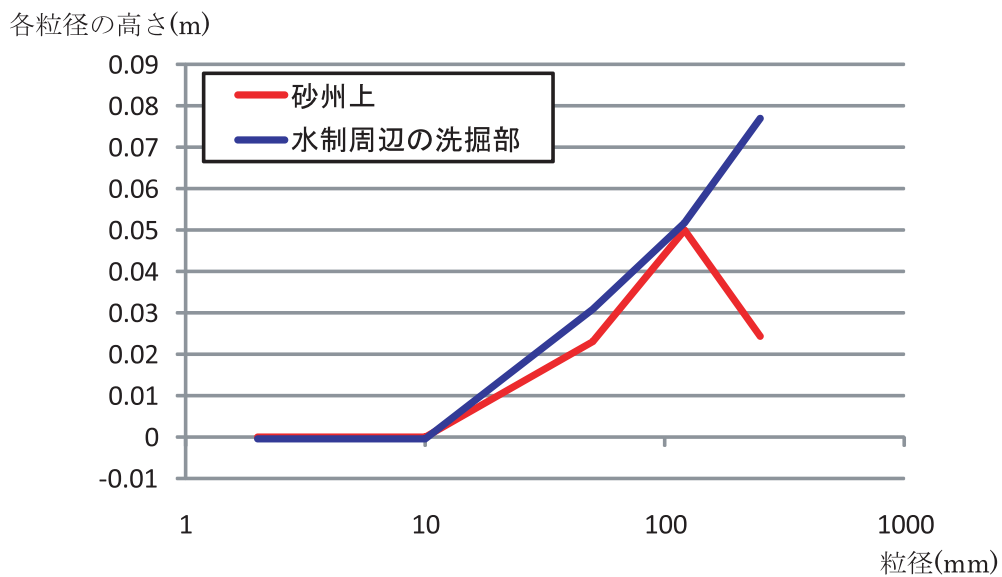


図-41 22km断面の水制周辺と砂州上（河道中央部）の各粒径の高さ分布（12日6時）

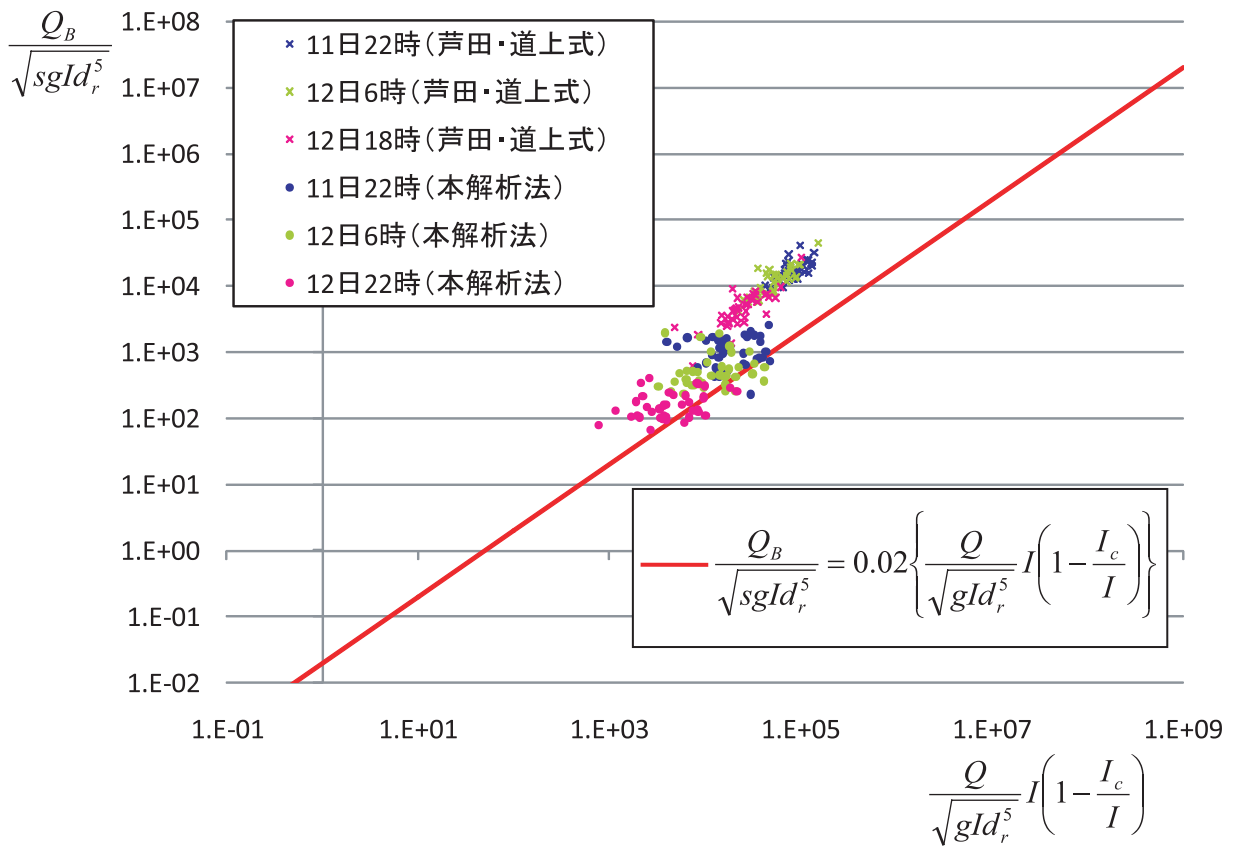


図-42 無次元流量と無次元掃流砂量の関係

4. 結論

以下に本研究の結論を示す。

- ① 水面形の時間変化を解とした二次元洪水解析法と石礫河床変動解析法および既往の河床変動解析法を、水制工群を有する札内川に適用し、H13年（既往最大）洪水を対象に洪水中の流れ・河床変動について検討を行った。
- ② 水位観測値、流量ハイドログラフと解析結果との比較から、解析値は観測結果を十分には説明できなかった。河床変動の激しい急流石礫河川において流量ハイドログラフおよび河床変動量を精度よく推測するためには、数kmピッチで水位観測が行われることが望ましいと考える。
- ③ 石礫河川河床変動解析法および既往の河床変動解析法による河床変動解析の結果は、両解析法の洗掘位置や堆積位置はほとんど違いがなかった。しかし、既往の河床変動解析法は河床表層の粒度の粗粒化を捉えられないため、水制先端等において局所的に実測よりも大きく深掘れする箇所が現れた。一方、石礫河川河床変動解析法では、実測に比べ若干河床変動が少ない箇所が見られたが、水制周辺の洗掘箇所は粗粒化することで洗掘に耐える大きな材料が出現し、河床を安定させる様子が再現された。
- ④ 本解析法における細粒分の移動量が少なく、全体的な変動量も実測に比べ少なく見積もられた。細粒分の移動モデルに関して、今後、十分に検討する必要がある。
- ⑤ 無次元掃流砂量式と解析流砂量との比較から、滯筋変動の激しい札内川の洪水中の土砂移動量は、無次元掃流砂量式に対して若干多くなることが明らかとなった。

今後の課題

札内川は、中小規模の洪水のたびに滯筋変動・河岸侵食が生じてきた経緯を持ち、現状の河道断面形状は、水制工および低水路護岸工の整備により形成されてきたものである。縦断的に水制工が整備されている現状の札内川河道において大出水が生じた場合、低水路沿いの水制周辺の洗掘、さらには高水敷および堤防の侵食が懸念される。今後は、河道の安定性の視点から札内川の現状河道断面および船底形河道も含む断面形状について計画規模を含む大中小様々な洪水の流れ・河床変動を検討し、治水上、環境上望ましい河道縦横断面形状への改善について検討する必要がある。このことは、同時に従前船底形に近い断面であった河道を今日の水制工によってコントロールする河道に改修していった理由を調べ、洪水流に対して安定な河道について検討する。洪水流に対して安定な河道になるかについては自然河川のデータより導かれた無次元流量と無次元河幅・無次元水深の関係式（福岡式）19)と洪水流・河床変動解析を用いた検討が必要となる。

参考文献

- 1) 黒田勇一，福岡捷二，山本輝，吉田和弘，井内拓馬：礫床河川の滯筋形成機構と河床粒度分布特性，河川技術論文集，第11巻，pp.363-368，2005.
- 2) 福岡捷二，山崎憲人，黒田勇一，井内拓馬，渡邊明英：急流河川の河床変動機構と破堤による氾濫流量算定法の調査研究，河川技術論文集，第12巻，pp.55-60，2006.
- 3) 福岡捷二，寺沢直樹，山崎憲人，塚本洋祐：巨石を有する礫床河川の水理，河川技術論文集，第13巻，pp.339-344，2007.
- 4) 塚本洋祐，福岡捷二，須賀正志，澤原和哉，長田健吾：石礫河川の粒度分布特性と安定河道形状，河川技術論文集，第14巻，pp.7-12，2008.
- 5) 福岡捷二，長田健吾，安部友則：石礫河川の河床安定に果たす石の役割，水工学論文集，第52巻，pp.643-648，2008.

- 6) 岡村誠司, 岡部和憲, 福岡捷二: 洪水流の縦断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流中の河床変動解析, 河川技術論文集, 第16巻, pp.125-130, 2010.
- 7) 飯島直己, 福岡捷二, 岡部博一: 堤外地に耕作地と樹木群を有する蛇行河川における洪水流と河床変動, 水工学論文集, 第54巻, pp.745-760, 2010.
- 8) 長田健吾, 福岡捷二: 石礫河川の土砂移動機構に着目した1次元河床変動解析法の開発, 水工学論文集, 第52巻, pp.625-630, 2008.
- 9) 長田健吾, 福岡捷二: 石礫蛇行河川の二次元河床変動解析法に関する研究, 河川技術論文集, 第15巻, pp.327-332, 2009.
- 10) 芦田和男, 道上正之: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第206号, pp.59-69, 1972.
- 11) 中川博次, 辻本哲郎, 村上正吾: 側岸における非平衡流砂過程, 第29回水理講演会論文集, pp.561-566, 1985.
- 12) Chepil, W. S. : The use of evenly spaced hemispheres to evaluate aerodynamic forces on a soil surface, Transactions of American Geophysical Union, Vol.39, No.3, pp.397-404, 1958.
- 13) Chepil, W. S. : The use of spheres to measure lift and drag on wind-eroded soil grains¹, Soil science society proceedings, Vol.25, pp.343-345, 1961.
- 14) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義: 蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析, 水工学論文集, 第35巻, pp.383-390, 1991.
- 15) 村上正吾, 辻本哲郎, 中川博次: 河床砂礫のpick-up rate 推定式について, 土木学会論文集, No.443, II-18, pp.9-16, 1992.
- 16) 関根正人, 吉川秀夫: 掃流砂の停止機構に関する研究, 土木学会論文集, 第399号, II-10, pp.105-112, 1988.
- 17) 土屋義人, 青山俊樹: 水流による砂れきSaltationの機構(2), 京都大学防災研究所年報, 第13号B, pp.199-216, 1970.
- 18) 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.
- 19) 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.

論文リスト

- 1) 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.
- 2) 前嶋達也, 岩佐将之, 長田健吾, 福岡捷二: 石礫複断面直線-蛇行河道の河床変動および河床材料分布に関する研究, 水工学論文集, 第55巻, pp.769-774, 2011.
- 3) 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.
- 4) 浅野文典, 福岡捷二: 安定断面形状を有する流路の掃流砂量に関する研究, 土木学会第65回年次学術講演会概要集, 2010.
- 5) 長田健吾, 福岡捷二: 石礫河川における河床変動解析法の改善—離脱・堆積について, 土木学会第65回年次学術講演会概要集, 2010.
- 6) Kengo Osada, Shoji Fukuoka : Analysis of Two-Dimensional Riverbed Variation in Channels with Stony Beds, 11th International Symposium on River Sedimentation, South Africa, 2010.