

小丸川における河床変動計算と 土砂収支に関する一考察

A RESEARCH ON RIVERBED VARIATION AND SEDIMENT BUDGET IN THE OMARU RIVER

宮崎 遼¹・橋本晴行²・原田民司郎³

Ryo MIYAZAKI, Haruyuki HASHIMOTO and Tamishirou HARADA

¹九州大学大学院工学府 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: river32@civil.kyushu-u.ac.jp

²九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: hasimoto@civil.kyushu-u.ac.jp

³㈱建設環境研究所 (〒812-0022 福岡市博多区神屋町 4-5)

E-mail: haradat@kensetsukankyo.co.jp

Key Words: *Omaru River, riverbed variation, erosion, deposition, sediment control*

1. はじめに

宮崎県中部を流れる小丸川では、上流域ではダム堆砂の進行、中・下流域では局所的な侵食による河床低下、海岸域では海岸侵食など土砂管理上の問題が発生している。これらの問題は、その要因や仕組みが複雑であり、個別領域による対応では限界がある。そのため、山地部から河口・海岸域を含めた総合的な土砂管理の視点からの取り組みが必要である。総合土砂管理を押し進めるためには、河道部における現状の土砂動態、特に「土砂の量と質」についての把握が重要である。従って、河道を混合砂れき河床として取り扱い、河床砂れきの粒度分布の変化と粒径別流砂量を知る必要がある。この種の代表的な問題に、ダム直下流の河床の Armoring 現象がある。ダム直下流の河床砂れきの粒度分布の変化について、平野は交換層モデルを提案し、その予測システムを構築している^{1), 2)}。

本研究は、このような土砂水理学の知見^{1), 2), 3)}をもとに、小丸川中・下流の河道について水位・河床高の観測情報から土砂動態を推測することを試みる。河床は混合砂れき河床とし、平野の交換層モデ

ルを用いて河床変動計算を行い、「土砂の量と質」について同時に考察する。まず、最近の大規模洪水を対象とし、河道の縦横断測量結果、観測地点での流量ハイドログラフの解析結果、河口での潮位の観測結果を用いて小丸川下流河道の1次元河床変動計算を行う。次いで、その結果をもとに下流河道における土砂収支について考察する。通常、緩勾配河道における流砂形態としては掃流砂、浮流砂、ウォッシュロードがあるが、ここでは、れき河床の変化に有意に作用していると考えられる掃流砂のみを取り扱うこととする。

2. 流域の概要

小丸川は流域面積 474km²、流路延長 75km の一級河川である。河床勾配は、上流部で約 1/100、中流部は約 1/600 と急勾配であり、平野部の下流部は約 1/2000 と比較的緩勾配となっているが、全体的には急流河川の様相を示している⁴⁾。ここに、上流部は源流から比木橋(河口から 10.2km 地点)までの区間、中流部は比木橋から切原川合流点付近(3.2km 地点)までの区間、下流部は切原川合流点付近から河口ま

での区間と定義している。図-1に小丸川中流域及び下流域の流域図を示す。国土交通省が管理している比木橋付近より下流区間では、水位、河床高、河床堆積土砂の粒度分布などが調べられている。横断方向平均河床高によると、次のことが分かっている。最近40年間の長期的な河床変動は、中・下流の全区間で河床低下が発生している。小丸大橋(河口から2.7km地点)では約2m、竹鳩橋(4.8km地点)で約1.7m、高城橋(7.6km地点)では約1.5mの河床低下がそれぞれ生じている。一方、2005年9月の台風14号による災害の前後においては、大略、竹鳩橋より下流では侵食を、上流では堆砂の傾向を示している。



図-1 小丸川中流域及び下流域の平面図

3. 計算対象の河道と洪水

計算対象区間は比木橋付近から河口までの長さ10.0kmの区間である。計算対象河道について最近の測量結果が得られている、2003年1月から2006年1月までの期間を計算対象期間とする。その期間内において発生したいくつかの洪水流の中から、規模のもっとも大きな2005年9月の台風14号による洪水流を対象に計算を行うこととする(表-1)。ここに、低水時は河床変動には貢献しないものと仮定し、高水時の流れを計算対象とした。従って、流量としては約1,000m³/s以上を計算対象とした。

4. 河床変動計算

2003年1月測量の横断方向平均河床高の縦断図を初期条件とし、2006年1月測量の横断方向平均河床高の縦断変化を再現する河床変動計算を行う。その期間内に発生した洪水流の中から最大規模の洪水に

ついて計算を行う。表-1には洪水流の計算対象時間と河道条件を示す。

表-1 計算条件

計算対象時間	2005年9月5日12時～9月6日24時
初期河床	2003年1月測量の河床高
時間刻み幅	$\Delta t = 0.5 \text{ sec}$
空間刻み幅	$\Delta x = 50 \text{ m}$
Manning 粗度係数	$n = 0.035$
交換層厚さ	$a_* = 0.1 \text{ m}$
交換層濃度	$C_a = 0.5$

(1) 基礎式

流れを、長方形断面の非定常1次元漸変流とすると、河床変動の基礎式は以下ようになる。ここに、流砂形態は掃流砂のみを想定し、流砂量式はマイヤー・ピーター・ミュラーの式を用いた。また、粒度分布の連続式は平野の式を用いた。

運動方程式：

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Qv}{\partial x} = gBh \left[-\frac{\partial(h+z)}{\partial x} \right] - (B+2h) \frac{v^2}{\phi^2} \quad (1)$$

全相連続方程式：

$$B \frac{\partial(h+z)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

固相連続方程式：

$$BC_a \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(Bq_s)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

抵抗則：

$$\phi = \frac{v}{u_*} = \frac{1}{n\sqrt{g}} R^{1/6} \quad (4)$$

掃流砂量式：

$$\frac{q_{sj}}{\sqrt{sgd_j^3}} = P_j \cdot 8(\tau_{*j} - \tau_{*cj})^{3/2} \quad (5)$$

粒度分布の連続式：

(i) 河床上昇の場合

$$Ba_*C_a \frac{\partial P_j}{\partial t} + BC_a P_j \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(Bq_{sj})}{\partial x} = 0 \quad (6a)$$

(ii) 河床低下の場合

$$Ba_*C_a \frac{\partial P_j}{\partial t} + BC_a P_{0j} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(Bq_{sj})}{\partial x} = 0 \quad (6b)$$

ここに

$$0 \leq P_j \leq 1, \quad 0 \leq P_{0j} \leq 1 \quad (7)$$

および

$$\sum_{j=1}^N P_j = 1, \quad \sum_{j=1}^N P_{0j} = 1 \quad (8)$$

$$a_* = const, \quad C_a = const \quad (9)$$

である。

ここに t : 時間, x : 河床に沿って取られた流れ方向の座標, Q : 流量, h : 水深, z : 河口を基準にして垂直上向きに取られた河床の高さ, B : 河道幅, v : 断面平均流速, φ : 流速係数, n : Manning の粗度係数, $R=(Bh)/(B+2h)$: 径深, a_* : 交換層の厚さ, C_a : 交換層内の土砂濃度, q_s : 全粒径の単位幅当たりの掃流砂量, d_j : j 粒子の粒径, q_{sj} : j 粒子の単位幅当たりの掃流砂量, P_j : 河床表層 (交換層) において j 粒子の占める割合, P_{0j} : 元河床において j 粒子の占める割合, τ_{sj} : j 粒子の無次元掃流力, τ_{*cj} : 粒径別の無次元限界掃流力, s : 水中比重, I_f : 摩擦勾配である。

式(1)~(3), (6)では全流量 Q , 水深 h , 河床高 z , 粒度分布 P_j の 4 個が未知数となる。

(2) 境界条件

計算対象区間の上流端 ($x=0$) での流量ハイドログラフを上流端での境界条件とする。

$$\text{上流端:} \quad Q=Q_{in} \quad (10a)$$

一方, 下流端 ($x=x_e$) での境界条件は河口での潮位とした。

$$\text{下流端(河口):} \quad H=H_e=h_e+z_e \quad (\text{潮位}) \quad (10b)$$

また, 上流端および下流端の粒度分布については, それぞれ 1step 隣接の値を境界条件とした。

$$P_j \Big|_{x=0} = P_j \Big|_{x=\Delta x}, \quad P_j \Big|_{x=x_e} = P_j \Big|_{x=x_e-\Delta x} \quad (10c)$$

(3) 初期条件

計算対象の洪水期間は, 2005年9月5日12時から6日24時までの36時間である。したがって, 初期条件は, 2005年9月5日12時における高城での流量 $Q=1,151 \text{ m}^3/\text{s}$ と河口潮位 $H_e=-0.23\text{m}$ および不等流計算より求められた水位とした。

河床は, 2003年1月と2006年1月に平均河床高

の縦断図が求められている。したがって, 2003年1月測量の平均河床高の縦断図を初期条件とした。

河床土砂の粒度分布は, 1999年に河口から8kmまでの区間を, 2006年には河口から10kmまでの区間を, それぞれ2km毎に調査が実施された。計算時の底質モデルは, これらの調査結果に基づき, 6種類の異なった粒径粒子から構成されるものとした。それらは $d_j=0.00085, 0.00475, 0.019, 0.053, 0.075, 0.1(\text{m})$ とし, それらの割合 P_j は調査結果より決定した。粒度分布の初期条件は1999年の底質モデルを用いた。

(4) 計算条件

基礎式の差分化にはMacCormack法を用いた^{5),6)}。

表-1に計算条件を示す。

(5) 計算結果と考察

a) 交換層厚さの検討

交換層厚さ a_* を $a_*=0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0(\text{m})$ と種々変化させて水位・河床高と粒度分布の変動計算を行い, 交換層厚さの最適値について調べた。当然, 計算された洪水後の河床縦断形はいずれも同じであった。また, 粒度分布の縦断変化は, いずれも大体の傾向は同じとなったが, $a_*=0.1\text{m}$ の場合がもっとも観測結果に近くなった。底質モデルの最大粒径は $d_j=0.1(\text{m})$ である。従って, 最適な交換層厚さは底質の最大粒径に等しくなった。一方, 平野^{1), 2)} は交換層厚さを最大粒径程度としている。したがって, 本論文では交換層厚さ $a_*=0.1\text{m}$ とする。

b) 水位ハイドログラフ

図-2は高城(7.6km), 小丸大橋(2.7km), 御屋敷観測所(1.2km)の水位ハイドログラフの計算値と観測値の比較を示している。計算値は観測値よりも若干低い値となった。特に, 支川の切原川の合流点より下流の小丸大橋, 御屋敷でそれが著しい。これは, 支川の切原川から合流する流量を考慮していないため, 流量が過小となったためと考えられる。

c) 河床変動

図-3は水位観測点における計算河床高の時間変化を, 図-4は河床砂れきの平均粒径の時間変化をそれぞれ示している。図-4についての考察は本節d)において後述する。

また図-5は河床高の縦断変化を示している。ここに, 同図中の点線は洪水前の初期河床高を, 実線は洪水後の計算河床高である。また1点鎖線は洪水後の実測河床高を示す。

図-5から, 計算河床高は7km~8.5kmの区間にお

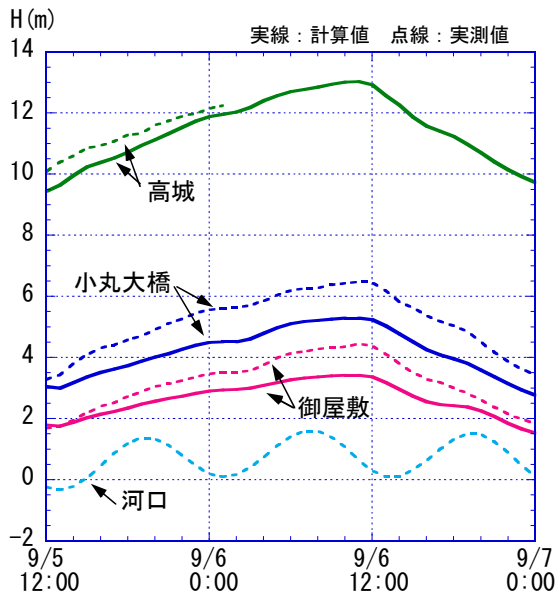


図-2 観測点における水位の時間変化

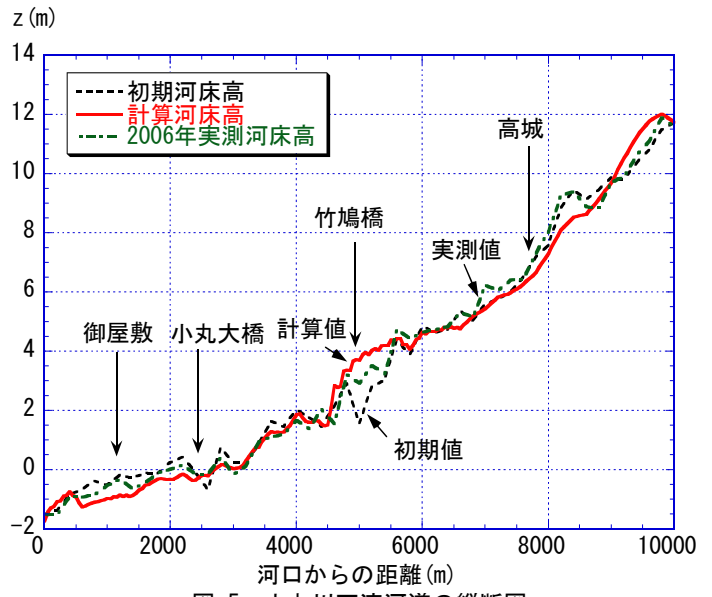


図-5 小丸川下流河道の縦断面図

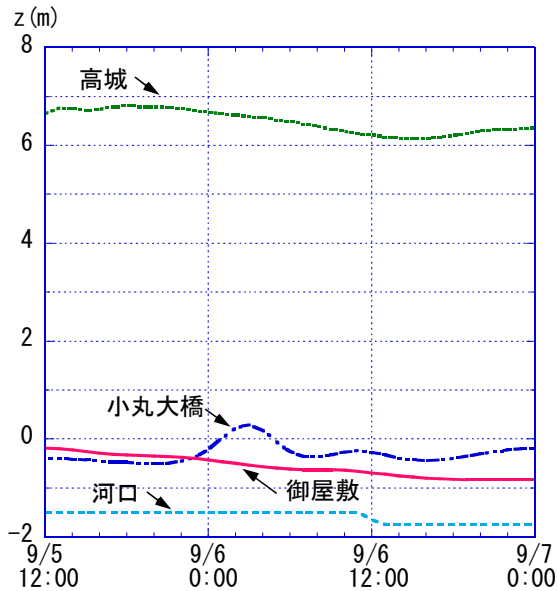


図-3 計算河床高の時間変化

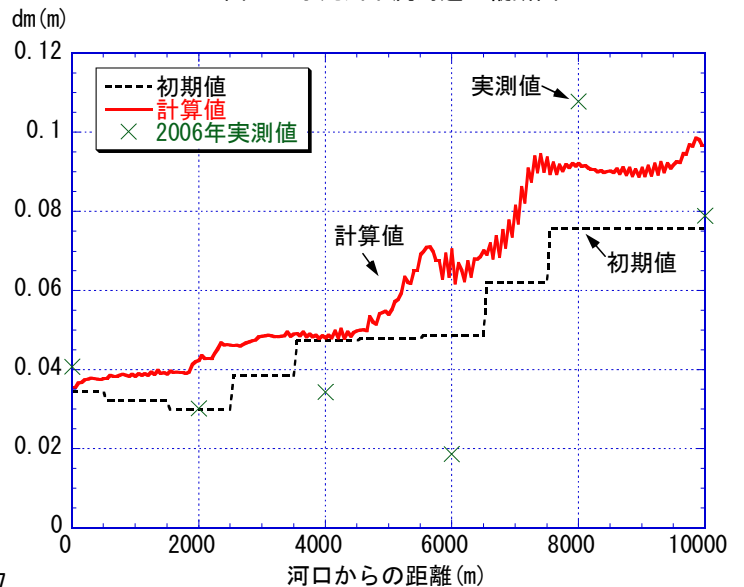


図-6 小丸川下流における河床砂れきの平均粒径

いて実測値と大きく異なるが、他の区間では概ね実測結果を説明していることが分かる。また、洪水中の河床変動については測定が不可能なため不明な点があるが、図-3の計算結果は、御屋敷では単調に河床低下が生じ、小丸大橋、高城では若干変動していることを示している。

d) 河床砂れき（交換層）の平均粒径

図-6は河床砂れきの平均粒径の縦断面方向変化を示している。同図中の点線は洪水前の平均粒径、実線は洪水後の計算平均粒径、×印は洪水後の実測平均粒径である。計算結果は、下流の0～5km区間では初期粒度に近い値を示すが、上流の5kmから10kmの区間では明らかに粗粒化の傾向を示している。今回の計算は、初期条件として河口から8kmまでの区間の2km毎の粒度分布を用いたため、局所的な粒度の変化の再現は難しいと考えられる。より厳密な評

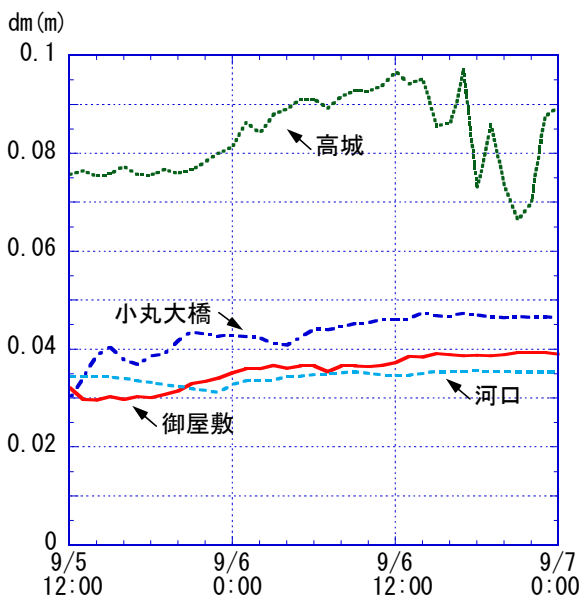


図-4 河床砂れきの粒度の時間変化

価を行うためには、河床土砂の粒度分布のより詳細なデータが必要である。

河床砂れきの平均粒径の時間変化は、既に、図-4に示している。洪水時の河床変動と同様に、測定が不可能なため不明な点があるが、計算結果によると次のことが分かる。まず、御屋敷では単調に粒度が増加している。小丸大橋では初期に粒度が増大し、その後、わずかに変動しながら粗粒化している。また、高城では、増水期に粒度が比較的単調に増加し、減水期には大きく変動している。

5. 土砂収支

河床変動計算の結果を用いて対象区間の土砂収支について考察する。図-7に土砂収支の模式図を示す。洪水時に、上流から対象区間には $642,000\text{m}^3$ の土砂が流入し、下流の河口から海岸域には $618,000\text{m}^3$ の土砂が流出したと推測された。一方、河床高の観測結果によると、 $27,000\text{m}^3$ の土砂が堆積したものと評価された。この評価は横断方向の平均河床高に基づくものであり、実際の河床変動量とは異なることが考えられる。より厳密な評価を行うには、2次元河床変動解析を行う必要がある。

図-8は、上流端、河口においてそれぞれ流入、流出する粒径別流砂量を示している。上流からは、粒



図-7 小丸川下流河道における土砂収支

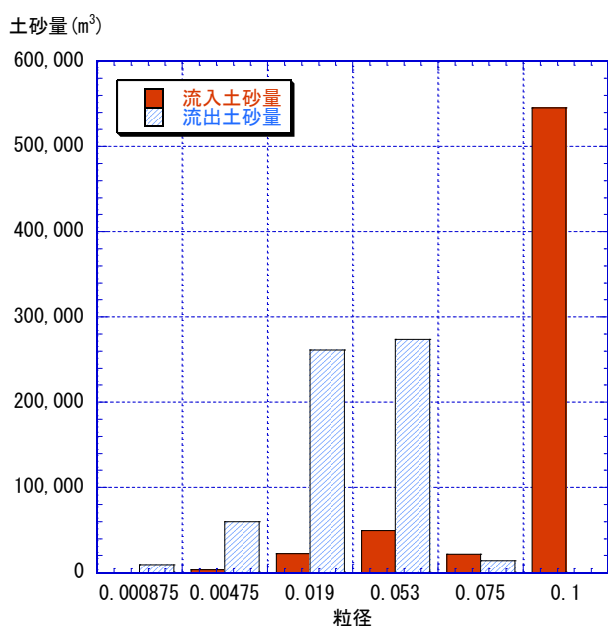


図-8 小丸川下流河道における流入・流出の粒径別土砂量

径 $d_f=0.1$ (m) の粗粒土砂が主として流入し、下流の河口から海岸域には、主に、粒径 $d_f=0.019, 0.053$ (m) の比較的小さな土砂が流出したことが推測される。

6. おわりに

本研究は、小丸川下流河道を混合砂礫河床として、水位・河床高の観測情報から1次元河床変動の再現計算を行い、洪水時の土砂動態を推測した。その結果、河床変動の傾向は概ね観測結果と同様になった。本計算では、河道を直線の長方形断面とし、洪水流を1次元非定常流れとして解析した。また、流砂の形態としては掃流砂のみを想定し、浮流砂、ウォッシュロードは無視した。従って、計算の精度は自ずと限界がある。特に、1次元解析のため、観測河床高は横断方向に平均化された値を用いている。本研究は、研究の第一段階として、マクロな視点から「土砂の量と質」について小丸川の土砂動態を評価することをめざしている。従って、本研究の計算もそのような観点からの考察には一助になるものと考えられる。今後は、1次元解析の精度向上を図るとともに、より厳密な評価を行うため、平面2次元混合砂れき河床の変動計算を行い、ミクロな局所的河床変動も考察できる精度の高い計算を行う予定である。

謝辞：本研究に際して、小丸川の水位、河床高など種々の資料を国土交通省宮崎河川国道事務所より提供いただいた。また、河床変動計算に際しては、当時、九州大学大学院博士課程の高岡広樹氏（現：八千代エンジニアリング株）に助力を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 平野宗夫：Armoringを伴う河床低下について、土木学会論文報告集，第195号，1971年11月。
- 2) 平野宗夫：混合砂れき河床の変動と平衡河床に関する研究，土木学会論文報告集，第207号，1972年11月。
- 3) 椿東一郎：水理学 II，森北出版株，1974。
- 4) 国土交通省河川局：小丸川水系河川整備基本方針，2008年3月
- 5) Kichan Park, 橋本晴行：雲仙水無川において発生した土石流による河床変動の数値計算，九州大学工学集報，第73巻，第6号，2000。
- 6) 高岡広樹，橋本晴行，池松伸也，下大迫博志：河道内樹木群による混合砂礫河床の変動と表層土砂の粒度変化に関する研究，第4回土砂災害に関するシンポジウム論文集，2008年8月。

(2008.5.16 受付)