

山地河川における洪水流解析法に関する研究

Study on flood flow analysis method in mountain rivers

23N3100030I 宅和 佑悟 (河川工学研究室)
Yugo TAKUWA / River Engineering Lab.

Key Words : Q3D-FEBS-2L, The Kurobe River, The Kurogane River, Flood flow and sediment dynamics

1. 序論

黒部川流域(図-1)は、上流山地流域に大崩壊地を抱え、土砂生産が非常に多い急流石礫河川であり、これら豊富な生産土砂により愛本地点下流の扇状地が形成されてきた。しかし近年では、海岸侵食や河道区間の河床低下、ダム貯水池内の堆砂に対する機能維持等の土砂に関する課題が生じていることから、上流域の宇奈月ダム・出し平ダムで連携排砂が実施されている。

平成29年7月には過去30年間で最大規模の洪水が発生し、本洪水は6波形の洪水ピークが発生し、継続時間が1週間にも亘る大洪水であった。このような大規模洪水により、出し平ダム上流で工事用機材が流出し、宇奈月ダム・出し平ダムでは連携排砂が中止となった(図-2)。宇奈月ダムでは、上流の出し平ダムからの排砂が中止されたにも関わらず、貯水池内に約70万m³の土砂が堆積しており(図-3)、これは主に支川黒薙川から流入した土

砂と考えられる。このため、この堆砂量を重要な土砂の検証材料として、黒部・黒薙川流域の洪水時の流れと土砂移動を高精度に解析することにより、黒部・黒薙川流域の洪水時の水と土砂の動態を明らかにし、流域で水・土砂収支を明らかにすることが重要である。これを具体的に解析するためには、黒部川上流域の山地河川において、洪水時の流れと土砂移動を高精度に解析可能な計算法が必要である。

本研究では、まずStep1として、既往の非静水圧準三次元洪水流(Q3D-FEBS)・河床変動解析法¹⁾²⁾を山地河川へ適用するために、石礫河道の流速鉛直分布を二相流的に解析する手法へと改良(Q3D-FEBS-2L)する。Step2では、黒部川流域の水・土砂収支図の作成に向けて、砂防河川であるため、データの比較的豊富な黒薙川流域を先行検討対象範囲として選び、H29年7月洪水時の黒薙川流域の水と土砂の挙動を、Step1で構築したQ3D-FEBS-2Lにより明らかにする。

2. 山地河川における洪水流・河床変動解析法の改良と2009年常願寺川現地実験への適用(Step1)

山地河川は粒度分布の幅が広く、複雑な河床凹凸が流れと土砂移動に大きな影響を与える。本研究では既往の非静水圧準三次元解析法(Q3D-FEBS)¹⁾における流速鉛直分布を河床近傍の下層とそれより上層に分割することで、流れと河床表層粒子の相互作用を考慮した解析法(Q3D-FEBS-2L)へと改良した。図-4に具体的な解析法の考え方を示している。石礫河道の流れの抵抗に支配的となるD90粒径の表面高さを底面とし、底面より上層と下層の流速鉛直分布を3次関数でそれぞれ仮定する。

$$u_i(\eta_1) = \Delta u_i(12\eta_1^3 - 12\eta_1^2 + 1) + \delta u_i(-4\eta_1^3 + 3\eta_1^2) + U_i \quad (1)$$

$$u_i(\eta_2) = -\left(u_{bi} + \frac{\delta z_b}{h} \frac{\partial u_i(\eta_1)}{\partial \eta_1} \Big|_{\eta_1=1}\right) \eta_2^3 + \frac{\delta z_b}{h} \frac{\partial u_i(\eta_1)}{\partial \eta_1} \Big|_{\eta_1=1} \eta_2 + u_{bi} \quad (2)$$

ここで、 $i = 1, 2$ (それぞれ x, y 方向)、 $\eta_1 = (z_s - z)/h$ 、 $\eta_2 = (z_b - z)/\delta z_b$ 、 $\Delta u_i = u_{si} - U_i$ 、 $\delta u_i = u_{si} - u_{bi}$ 、 δz_b : 砂面高からD90粒径の表面までの高さ、 d_{90} : D90粒径、 δz_{90} : D90粒径の高さである。

式(1)に示す上層の流速鉛直分布は、水面流速と水面



図-1 黒部川流域

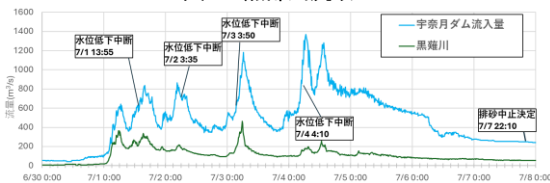


図-2 宇奈月ダムにおける H29 年 7 月洪水時の流入量

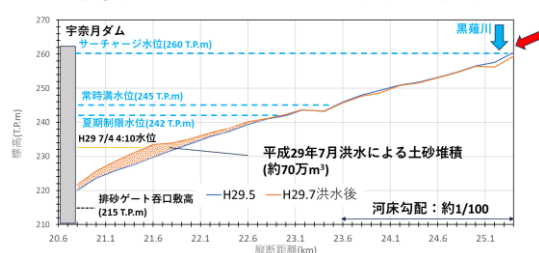


図-3 H29 年 7 月における宇奈月ダムの実測堆砂量

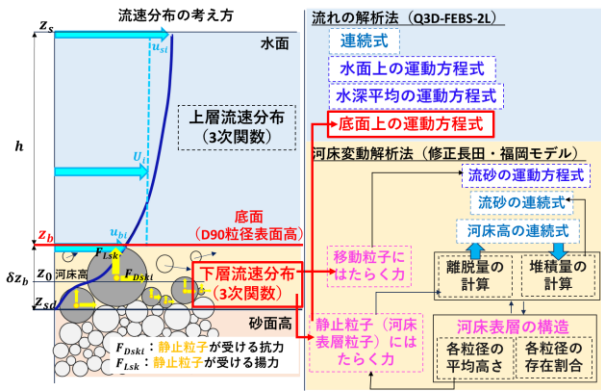


図4 洪水流・河床変動解析法の考え方

での流速鉛直勾配，水深平均流速と底面流速を与える。同様に，式(2)に示す下層の流速鉛直分布は底面流速と底面での流速鉛直勾配に加えて，底面において抵抗特性の変曲点となるように鉛直方向への流速の2階微分が0になることと砂面高で流速0を与えることで導かれる。

基礎方程式は，水深積分した連続式と運動方程式，水面・底面上の運動方程式である。式(3)に示す底面上の運動方程式において，右辺第5項で河床表層粒子から受ける抗力 F_{Dsi} が考慮される。 F_{Dsi} は，修正長田・福岡モデル²⁾より求められる各粒径の重心位置の高さでの流速を式(2)に示した下層の流速分布式から求め式(4)より算定される。

$$\frac{\partial u_{bi}}{\partial t} + u_{bj} \frac{\partial u_{bi}}{\partial x_j} = -g \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_{Db}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_D}{\partial z} \bigg|_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \bigg|_b + \frac{1}{\rho} \frac{\hat{S} \hat{\tau}_{bi} - F_{Dsi}}{\delta z_b} \quad (3)$$

$$F_{Dsi} = \sum_{kmax} \left(N_k \frac{1}{2} \rho C_D \varepsilon_p A_{dk} u_{ei} \sqrt{u_{ei}^2 + w_e^2} \right) \quad (4)$$

ここで， u_{bi} ：底面流速， P_{Db} ：底面における非静水圧成分， C_D ：抗力係数(=0.4)， ε_p ：遮蔽係数(=0.4)， A_{dk} ：各粒径の投影面積， u_{ei}, w_e ：各粒径の重心位置に



図5 2009年常願寺川現地実験第3回通水

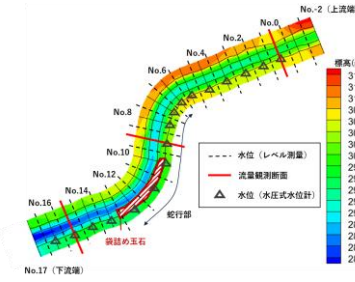


図6 実験の観測体制

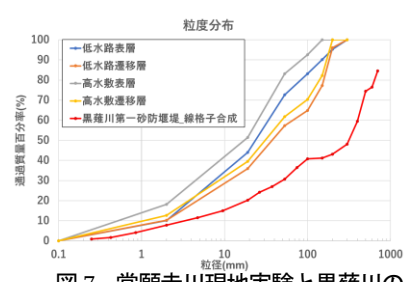


図7 常願寺川現地実験と黒薙川の実測粒度分布の比較

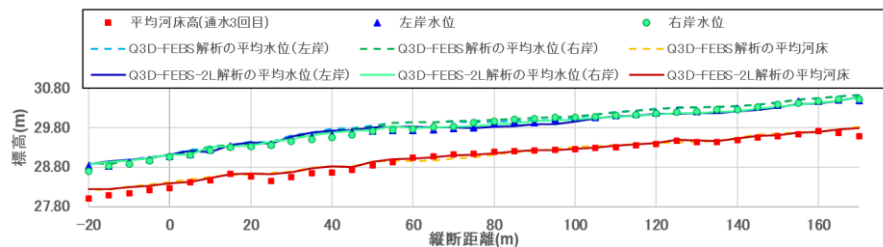


図8 縦断水面形の解析結果

おける水平方向流速と鉛直方向流速である。

(2) 2009年常願寺川現地実験への適用

a) 常願寺川現地実験の概要

2009年の常願寺川現地実験³⁾は，砂州上に複断面流路を作成し，流量規模を変化させた合計4回の通水実験が行われた(図-5)。本研究では，第2回通水実験後(低水路満杯規模，約50分通水)の地形を初期河床とし，高水敷高を上回る流量(約 $8\text{m}^3/\text{s}$)を2時間30分通水し，第3回通水実験の再現計算を実施した。

b) 解析結果と考察

図-6に実験の観測体制を示す。計算メッシュは縦断方向に約0.8m，横断方向に約0.4m間隔で作成した。上流端はNo.0断面の実測の流量ハイドログラフ，下流端にはNo.17断面の実測の水位ハイドログラフを与えている。粒度分布は，ふるい分け試験の結果を参考とし，図-7に示すように与えた。

図-8は，縦断水面形の観測結果と解析結果の比較である。Q3D-FEBSの解析結果(破線)，Q3D-FEBS-2Lの解析結果(実線)ともに，プロットで示す実測の縦断水面形をおおむね再現できている。図-9は，No.7，9断面の実測と解析における，通水前後の横断面形状の比較を示す。また，実験ではNo.9断面内の5地点で水面から10cmごとに流速鉛直分布が計測されている。図-10は，このうち，3地点での実測と解析の流速鉛直分布の比較を示す。図-9の横断面形状を比較すると，Q3D-FEBS-2Lの解析より，蛇行部外岸での洗掘と内岸側での土砂堆積を従来のQ3D-FEBSよりも説明できていることが分かる(No.7, No.9)。図-9(b)に示すように，No.9の右岸側にあたる地点3は洗掘傾向にある。図-10(c)に示すように，地点3は，河床が粗粒化することでD90粒径の表面高さが高くなっており，大粒径粒子が流速鉛直分布に影響を及ぼしていることが分かる。Q3D-FEBS-2Lは，D90粒径より下層の流速鉛

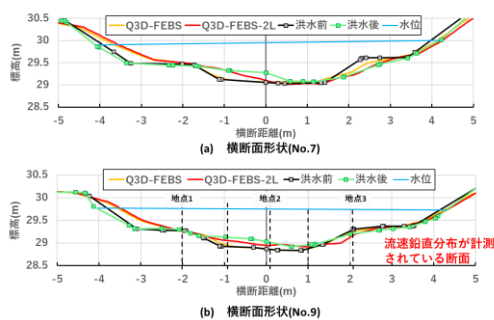


図-9 通水前後の横断形状の比較(No.7, No.9)

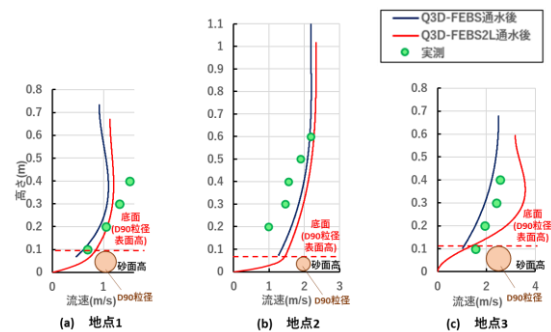


図-10 流速鉛直分布(No.9)の比較

直分布を用いて、河床表層の粒子や移動粒子に作用する力を計算し、流れと土砂移動を二相流的に扱うことができ、山地河川の河床変動を従来よりも精度よく解析できる可能性が高い。

3. 黒部川支川黒薙川における流域水収支、土砂収支図作成に向けた検討 (Step2)

本研究では、黒部川流域における水・土砂収支図の作成に向けて、前述のように、LPデータ等の流域のデータが比較的豊富でかつ合流点下流の宇奈月ダムの堆砂量経年変化のデータ等による検証材料の比較的揃っている黒部川支川黒薙川流域を対象とし、洪水時の水と土砂の挙動をStep1で構築した解析法(Q3D-FEBS-2L)を用いて明らかにする。対象洪水は過去30年間の中で最も流量規模の大きいH29年7月洪水とする。

(1) 観測体制、降雨・流出、土砂生産・流出の実態把握

黒部川の支川黒薙川流域は、図-11に示すように流域面積 117km^2 であり、北又堰堤より上流は北又谷流域(流域面積 55.2km^2)、柳又谷流域(流域面積 47.6km^2)で構成される。特に、柳又谷流域の河床勾配は約1/10と非常に急勾配であり、巨石や露岩による複雑な河床凹凸を有する砂防河川である。

流域内の降雨データについては、気象庁により1km間隔で整備されたレーダー解析雨量を使用する。各小支川から河道への流出量を推定する上で重要な河道内の水面形(水位)データについては、黒部川との合流点より約1km上流の黒薙水位観測所、北又谷と柳又谷が合流する北又堰堤、北又谷に設置されている北又ダム(発電ダム)で観測が行われている。



図-11 黒部川支川黒薙川流域

流域内の土砂生産の推定については、洪水前後で計測されたLPデータを用いる。流域内では洪水前のH21年と洪水後のR1年にLP測量が行われ、それぞれ1m間隔の空間解像度で計測されている。これらの洪水前後の差分を取ることで、流域内の土砂生産量について推定する。図-12は黒薙川流域におけるH21年とR1年のLPデータを用いて整理した土砂崩落箇所を示す。黒薙川流域東部の山地部においては、広範囲で概ね2~3m程度の侵食が発生している。一方で、局所的には、6~10m程度の崩落が発生している箇所があり、こうした2パターンの侵食形態が存在していると推察できる。このうち、航空写真から判別可能な崩落地を選定し、侵食深とその面積により、表-1に示す各小流域のおおよその土砂生産量を推算した。結果より、山頂部にあたる北又谷の小流域No.1, No.8, No.12, 柳又谷の小流域No.8は、対象期間における土砂崩落による生産土砂量が多い。黒薙川流域の合計生産土砂量は、航空写真から判別の難しい崩落地を含め、およそ $180\text{万m}^3 \sim 220\text{万m}^3$ と推定した。ここで、上記推定では侵食された土砂の堆積量を考慮しておらず、これについては今後の課題とする。

(2) 黒薙川流域の洪水時の水と土砂の動態解析

河道の洪水流・河床変動解析には、Step1で構築したQ3D-FEBS-2Lを用いる。まず、既往の水収支解析と同様に⁴⁾、降雨・流出過程の計算にはタンクモデルを用い、河道内の洪水流解析を可能な限り上流まで実施し、これによりタンクモデルの範囲をできる限り小流域に分割する。具体的には、黒薙川に流入する支川や残留域は合計42個の小流域に分割した。そして、図-13に示すように、観測水面形時系列データを再現するようにタンクモデルの各パラメータを黒薙観測所の水位・流量を再現するように設定した。河床変動解析については、(1)で推定した各小流域の生産土砂量を用いて、図-14に示すように、各粒径の流砂量ハイドログラフを流量ハイドログラフと同一波形に設定し、これを流入土砂量の境界条件として与えた。図-7は河床材料粒度分布を示しており、D90粒径は70cm以上であるため、常願寺川現地実験(D90粒径：10cm程度)と比較してかなり粗い。

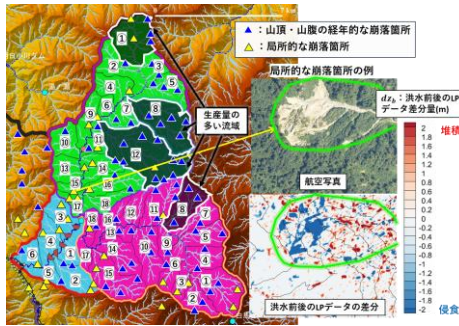


図-12 黒薙川流域における土砂崩落状況

表-1 各小流域における土砂生産量

No.	生産土砂量 (万m ³)	No.	生産土砂量 (万m ³)	No.	生産土砂量 (万m ³)	No.	生産土砂量 (万m ³)	No.	生産土砂量 (万m ³)
1	16.5	10	2.6	4	3.6	10	4.7	1	9.3
2	2.2	11	3.2	2	1.6	11	5.6	2	1.1
3	5.0	12	19.3	3	1.9	12	0.8	3	1.6
4	3.0	13	0.0	4	6.2	13	0.8	4	1.1
5	4.8	14	1.9	5	4.4	14	5.1	5	1.0
6	1.8	15	2.3	6	4.7	15	3.3	6	0.8
7	3.9	16	7.5	7	5.9	16	0.8		
8	8.0	17	2.3	8	10.6	17	0.9		
9	5.0	18	7.5	9	2.8	18	2.5		

北又谷流域

柳又谷流域

北又堤～黒部川合流点



図-15 柳又谷流域の屈曲部
(林野庁撮影)

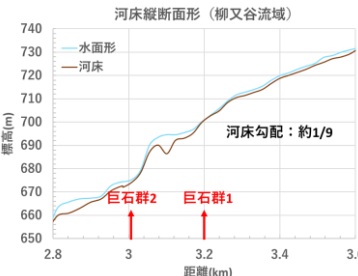


図-16 柳又谷流域の屈曲部における水面形、河床高縦断分布

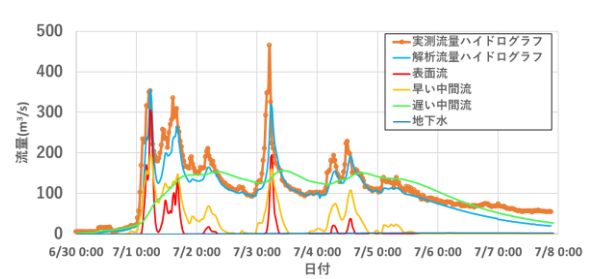


図-13 流量ハイドログラフの比較(黒薙水位観測所)

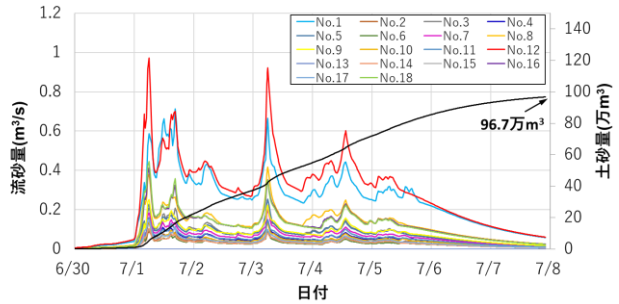


図-14 北又谷小流域の流砂量ハイドログラフと土砂量

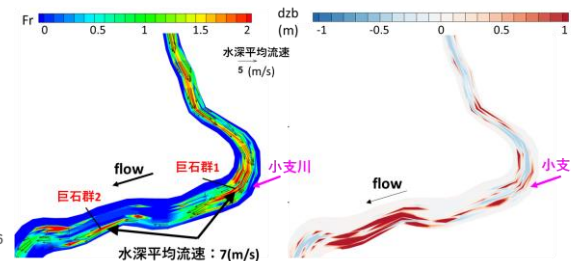


図-17 屈曲部の流れと河床変動の解析結果(Fr数と水深平均流速ベクトル、河床変動高)

解析は途中で発散し、第一ピークの直前までの結果が得られている。図-15に示すように、本論文では、柳又谷流域の屈曲部周辺に着目する。図-16に着目区間の縦断面水面形の解析結果を示し、図-17には、着目区間周辺の流れと河床変動の解析結果を示している。着目区間は、河床勾配が約1/9と非常に急勾配である。特に巨石群の存在する箇所では、流速が7(m/s)以上であり、Frが3を超える複雑な流れである。このような流れ場に、支川から土砂を流入させたことにより土砂が堆積しており、計算が発散している。これらを解決するための課題を次章で示す。

4. 今後の課題

- 山地河川の水面変動の激しい場を対象とするにあたり、従来の沖積地河川等を対象とした観測水面形を再現する洪水流・河床変動解析を行うには限界があり、新しく頑健性がある手法の検討を行う必要がある。
- 河床凹凸の激しい山地河川では、Q3D-FEBS-2Lの流速鉛直分布における下層の境界条件の見直しが必要であり、特にD90粒径の表面高さより下層の流れと土砂移動の評価方法に関して更なる改良が必要である。

要である。

- 実測の土砂生産量の見積もり方や、それに基づく土砂流入境界条件の与え方について検討が必要である。
- 今後は、上記の課題の改善に取り組み、黒部・黒薙川流域の水と土砂の動態の解析を行うことで、水収支、土砂収支図の作成を行い、水と土砂の貯留・流出特性と流域の地形・地質・土壌特性等の関係について検討する。

参考文献

- 竹村ら：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.
- 竹村ら：洪水流による物部川河口礫洲の開口と変形機構に関する研究, 河川技術論文集, 第26巻, pp.669-674, 2020.
- 長田ら：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, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.1, pp.1-20, 2012.
- 福岡捷二：流域管理と地域計画の連携に向けて-流域水収支図と流域土砂収支図の作成と活用-, 第11回流域管理と地域計画の連携方策に関するシンポジウム基調講演, 土木学会, 2024.