

山地河川における洪水観測水面形と詳細地形測量結果に基づく非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS)を用いた巨石群の移動解析

大野 純暉¹・山下 篤志²・竹村 吉晴³・福岡 捷二⁴

¹ 学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: a12.fd7b@g.chuo-u.ac.jp (Corresponding Author)

² 正会員 国土交通省中国地方整備局 太田川河川事務所 (〒770-0013 広島市中区八丁堀 3-20)

³ 正会員 博士(工学) 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

⁴ フェロー 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構 (同上)

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

山地河川の河床材料は幅広い粒径で構成され、大きさ 1m 程度の巨石群の移動は、流れの抵抗・土砂移動に大きく影響を及ぼす。また巨石の移動は、山地河川で形成されている瀬・淵等の安定を評価する際にも重要となる。本研究では、滝山川温井ダム上流河道における洪水前後の巨石、砂礫の存在状況を観測データに基づき分析し、洪水流による巨石の移動を検討している。さらに、この観測結果に対して、詳細地形測量データと観測水面形に基づく Q3D-FEBS による準三次元洪水流解析を用いて、移動した巨石に作用した流体力等の解析結果と現地データを比較し、巨石の移動の解析法について考察し、課題を示している。

Key Words: *observed water surface profiles, detailed riverbed observation data, Q3D-FEBS, entrainment of boulders*

1. 研究背景・目的

山地河川の河床材料は巨岩・巨石から砂まで粒度分布の幅が広く存在し、特に巨岩・巨石は流れ構造や土砂移動に大きな影響を及ぼす。このため、山地河川の洪水流と巨石の移動を含む土砂移動現象を説明する適切な評価法を開発する必要がある。

Smith¹⁾らは、洪水前後で山地河川の step-pool を構成する巨石の移動を調査し、川幅、水深、巨石の置かれている状況が移動の主な要因であること、無次元掃流力では巨石の移動を説明できないことを示した。Zhang and Wang²⁾は、山地河川の step 部の keystone に作用したモーメントを無次元化した指標 M^* を巨石に作用した抗力、摩擦力、重力を考慮した形で定義し、Recking ら³⁾による step 部の破壊状況と観測最大流量、keystone の大きさ等の調査結果に M^* を適用したところ、値の正・負で step-pool の安定性を概ね評価できることを示した。

竹村⁴⁾らは、大河津分水路第二床固め下流部の複雑な水面・底面境界となる洪水流について、非静水圧準三次元解析法(Q3D-FEBS)を開発し、この解析法を用いて第二

床固め下流のバップルピア群に働く流体力や水位・流速分布を求め、実測値をよく再現できることを示している。山地河川に点在する巨石に働く流体力の問題は、バップルピア群に働く流体力の問題と同様と考えられることから、著者ら⁵⁾は巨岩・巨石のある滝山川において、洪水観測水面形の時系列データに基づいた Q3D-FEBS による洪水流解析を行なった。著者らはさらに、平面二次元解析法との比較検討を行い、その適用性を調べた。Q3D-FEBS 法は、巨岩・巨石の形状を含む詳細な地形を取り込むことで、圧力抵抗が解析でき、粗度係数は時空間的に一定値で高精度に洪水流解析を可能とした。しかし、巨石の移動形態や移動の解析手法は未解明のままである。

本研究では、滝山川の瀬を構成する大きさ 1m 程度の巨石の洪水による移動に着目し、観測水面形に基づく Q3D-FEBS による洪水流解析から得られた無次元外力を用いた巨石の移動解析の可能性について論じ、その結果から今後の研究課題を示している。

2. R1 年 7 月, R2 年 7 月洪水における巨石の移動

状況の把握

(1) 対象とする洪水と調査の概要

本研究では、写真-1に示す滝山川温井ダム上流部における6.3km(黒滝観測所)~4.58km区間を検討対象とする。検討区間には、水位計が縦断的に設置されており、洪水中の水面形を知ることが出来る。写真-1中の黒丸に示す場所に瀬が形成され、各々の瀬には1mを超える巨石が多く見られる。本検討では、瀬にあたるサイトI, IIを対象に、R1年7月洪水(ピーク流量:390m³/s), R2年7月洪水(ピーク流量:710m³/s)の前と後の河床の状況を調査した。滝山川温井ダム上流部における既往最大洪水時の流量は880m³/sであり、R2年7月洪水はそれに匹敵する大きな洪水である。図-1は対象とする2つの洪水と、その前後で行った現地観測を時系列で示している。現地調査では巨石の大きさの計測、ドローン撮影を行い、巨石の位置の変化や瀬の形状の変化を分析した。

(2) 観測結果に基づく洪水前後における巨石の移動状況

研究対象とする巨石の大きさは1~1.4mであり、図-1に示す各現地調査時に撮影した洪水前後の写真と現地調査結果から、巨石の移動状況を調べた。図-2, 3(a)はサイトI, IIにおけるR1年7月洪水前(巨石が移動する前のH31年1~2月に撮影)、図-2, 3(b)はR2年7月洪水後(巨石が移動した後のR3年4月に撮影)にド



写真-1 滝山川温井ダム上流部の航空写真



図-1 対象とする洪水イベントと現地観測時期の時系列

表-1 サイトIで調査した移動した巨石の平均直径

巨石の大きさ	0.9-1	1-1.1	1.1-1.2	1.2-1.3	1.3-1.4	1.4-	計
R1洪水	2	2	2	0	0	0	6
R2洪水	3	7	6	2	5	3	26

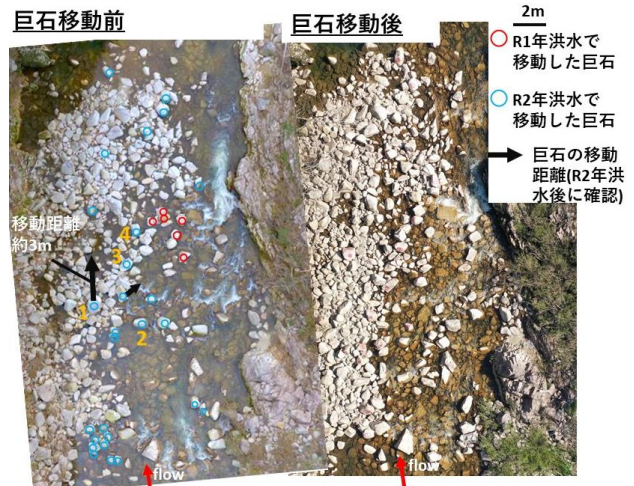
ローン撮影した写真を示している。図-2, 3(a)中の赤丸はR1年7月洪水、青丸はR2年7月洪水で移動した巨石を示している。

表-1はサイトIで移動した巨石の大きさ分布を示し、R1年7月洪水では河道中央部にある巨石群を含む計6個、R2年7月洪水では河道中央部から左岸寄りにある巨石が多くある箇所のうち計26個の巨石が流出した。各洪水で移動した巨石の大きさは平均1.2m程度であった。

サイトIIでは、図-3に示すように、R2年7月洪水後においても巨石は2個しか移動しなかったが、河床表層にあった砂礫の流出等によって表層の粗粒化が見られた。

図-2中の黒矢印は、R2年7月洪水で移動した巨石の移動先を示しており、その移動距離は最大3m程度であった。サイトI, IIともに洪水で移動した巨石はあったものの、比較的大きな規模の洪水を受けても巨石の移動は瀬の中に収まっており、瀬の構造はほとんど変化しなかった。

次章では詳細な地形測量データと洪水観測水面形を用



(a) R1年7月洪水前 (b) R2年7月洪水後

図-2 R1年7月, R2年7月洪水後におけるサイトIの航空写真



(a) R1年7月洪水前 (b) R2年7月洪水後

図-3 R1年7月, R2年7月洪水後におけるサイトIIの航空写真と流出した巨石の大きさ

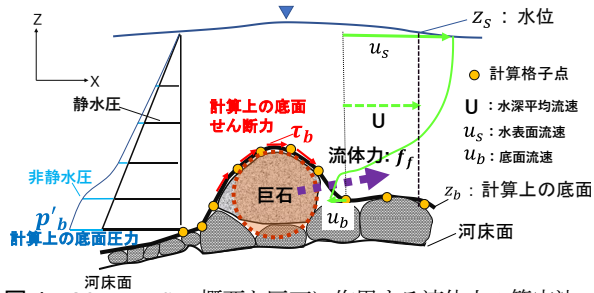


図-4 Q3D-FEBSの概要と巨石に作用する流体力の算定法

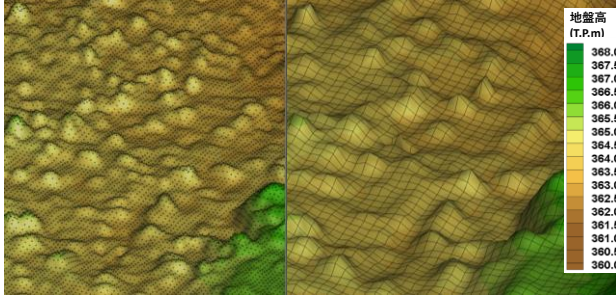


図-5 詳細地形測量結果，計算格子データに基づく三次元地盤高コンター図の比較

いた Q3D-FEBS による洪水流解析結果の分析と，移動した巨石に作用した流体力を検討する。

3. 洪水中に巨石に作用した流体力の算出

(1) Q3D-FEBS の基礎方程式の概要⁴⁾

両洪水ともに，観測水面形の時系列データを得ている(写真-1, 図-6)．本研究では，詳細地形測量データと観測水面形に基づき巨石・巨石周りの流速・圧力分布が解析可能な Q3D-FEBS⁴⁾を用いて洪水流解析を行った．下記に Q3D-FEBS の主要な式を示す．

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U_i h}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i h}{\partial t} + \frac{\partial U_j U_i h}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{1}{2} g h^2 + h \bar{p}' \right)$$

$$-\left(g h + \frac{p'_b}{\rho} \right) \frac{\partial z_b}{\partial x_i} - \frac{\partial h u'_i u'_j}{\partial x_j} + \frac{\partial h \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \hat{S} \frac{\hat{\tau}_{bi}}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_{si}}{\partial t} + u_{sj} \frac{\partial u_{si}}{\partial x_j} = -g \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial z} \Big|_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zi}}{\partial z} \Big|_s \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_{bi}}{\partial t} + u_{bj} \frac{\partial u_{bi}}{\partial x_j} = -g \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'_b}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial z} \Big|_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ijb}}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\hat{\tau}_{bi} - \rho c_b^2 u_{bi} |u_b|}{\delta z_b} \quad (4)$$

$$\frac{p'_b}{\rho} = U_i h \frac{\partial w}{\partial x_i} + \hat{S} \frac{\hat{\tau}_{bz}}{\rho} \quad (5)$$

$$\frac{\bar{p}'}{\rho} = \frac{1}{2} \frac{p'_b}{\rho} + \frac{1}{12} U_i h \frac{\partial (w_s - w_b)}{\partial x_i} \quad (6)$$

$$\hat{\tau}_{bi} = \rho \nu_{tb} \frac{\partial u_i}{\partial z} \quad (7)$$

$$c_b = \frac{C_0}{1 - 2C_0/\kappa} \sqrt{1 + c_{zb}}, \quad C_0 = \sqrt{gn^2/h^{1/3}} \quad (8)$$

ここで， $i=1,2$ ($x_1=x, x_2=y$)， U_i ： x_i 方向の水深平均流速， W ：鉛直方向の水深平均流速， u_{si} ： x_i 方向の水面流速， u_{bi} ： x_i 方向の底面流速， w_s ：鉛直方向の水面流速， w_b ：鉛直方向の底面流速， h ：水深， z_s ：水面， z_b ：底面， ρ ：水の密度， g ：重力加速度， κ ：カルマン定数(0.41)， u'_i ： x_i 方向流速成分， $\hat{\tau}_{bi}$ ： x_i 方向の底面せん断応力， $\hat{\tau}_{bz}$ ：鉛直方向の底面せん断応力， n ：粗度係数， $\hat{S} = [1 + (\partial z_b / \partial x_i)^2]^{0.5}$ ， $\delta z_b (= 0.03h)$ ：底面と河床面の距離である．下付きの添え字 s と b は水面と底面における値，上付き一は水深平均値を表す．Q3D-FEBS では，水平方向流速の鉛直分布を 3 次式で表現することで，(1)，(2) に示す水深積分の連続式と運動方程式，式(3)，(4)の水面および底面上の運動方程式から，非静水圧下での流速鉛直分布を求めることができる．水深平均した鉛直方向流速は連続式と水平方向の流速鉛直分布を用いて評価した．底面せん断応力は，図-4 に示すような斜面勾配を考慮して計算する．個々の巨石に作用した流体力は下記の式(9)で算出する．

$$f_i = \int_S (p_b \cdot n_i + \tau_{bi}) dS = \int_{V_s} -\frac{\partial \{ \rho g (z_s - z) \}}{\partial x_i} dV_s + \int_S (p'_b \cdot n_i + \tau_{bi}) dS \quad (9)$$

ここに， $i=1\sim 3$ (x, y, z 方向)， S ：巨石の投影面積， p'_b ：巨石表面(計算上の底面)に作用する非静水圧， τ_{bi} ：巨石表面(計算上の底面)に作用するせん断力， n_i ： i 方向の単位法線ベクトルである．巨石の体積 V_s は，地形測量結果からでは図-4 に示す計算上の底面より下層の巨石の形状は把握できない為，現地観測②，③で得られた巨石の長径，中径，短径を用いて評価し，巨石をこれと同体積の球に置き換えた．巨石表面に作用した圧力 p_b の分布は， $p_b = \rho g (z_s - z) + p'_b$ として，計算上の底面より下層は，せん断力，圧力の非静水圧成分は働かないものとした．

(2) R1 年 7 月，R2 年 7 月洪水の計算条件と再現計算

両洪水の境界条件には，上流端に黒滝観測所，下流端に 4.58km で観測された水位ハイドログラフを与えた．図-5 は，現地調査実施区間における詳細地形測量結果と本研究で用いた計算格子データによる地盤高を 3 次元表示したコンター図の比較を示す．大きさ 1~1.4m 程度の巨石の表面形状を図-5 に示す 0.5m 程度の計算

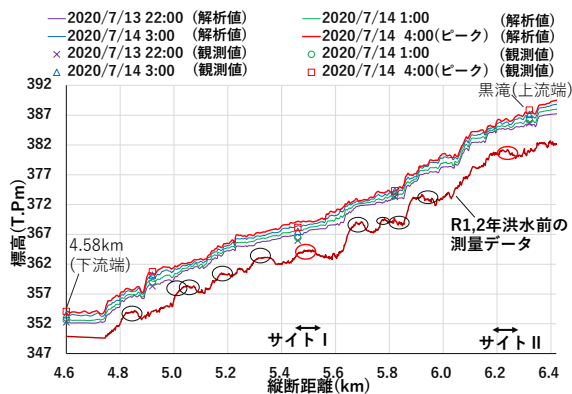


図-6 R2年洪水時における観測水面形と解析水面形の比較と写真測量結果(H31年観測)による河床高の縦断分布

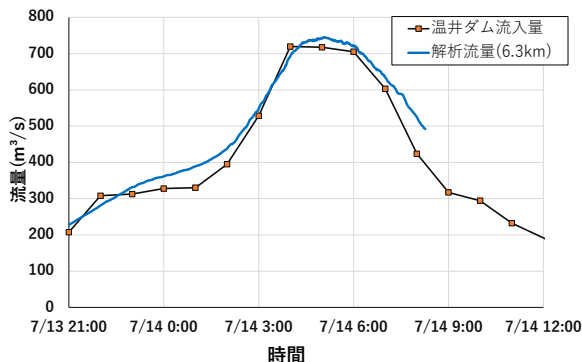


図-7 R2年洪水時におけるダム流入量ハイドログラフと解析流量ハイドログラフの比較

格子幅で再現し、剥離等の巨石まわりの流れ場の特徴をできる限り計算可能となるようにした。その他区間は1.0mの縦断幅の計算格子(横断幅は全区間0.5m)を用いて洪水流解析を行った。本研究で用いた計算格子幅は後述する解析結果から判断して、巨石の大きさに対して解像度が粗いと思われる。観測データと計算格子の精度向上は今後の課題である。また詳細な地形測量は、H31年1~2月(R1年7月洪水前)のみ実施されており、R2年7月洪水の再現計算では、図-2で明らかとなったR1年7月洪水で移動した巨石を取り除いた地形データを与え、解析を行った。

図-6はR2年7月洪水時における観測水面形と解析水面形時系列の比較を示しており、図-7は黒滝観測所における解析流量ハイドログラフとダム流入量ハイドログラフを示す。巨岩・巨石の形状を含む詳細な地形データを取り込み、観測水面形に基づくQ3D-FEBSによる洪水流解析を行うことで、時空間的に一定の粗度係数($n=0.032$)を用いて洪水水面形、流量ハイドログラフを説明できている。ここで粗度係数は、巨石等による圧力差に起因する抵抗を除く、本来の粗度の意味に近い底面の摩擦抵抗に起因する値として算出されている。

R1年7月洪水も同様に再現しており、図面は紙面の制約上省略する。

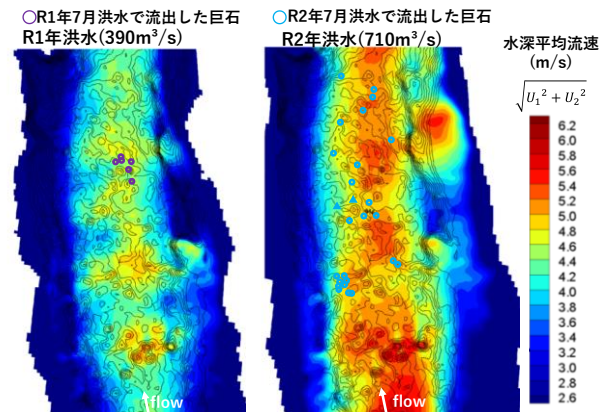


図-8 サイトIにおけるR1年7月、R2年7月洪水時における水深平均流速コンター図と移動した巨石の分布

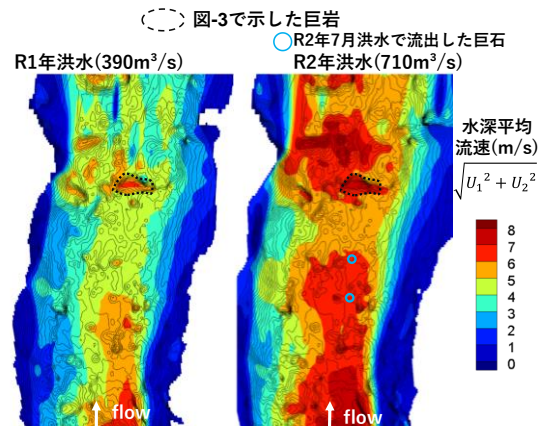


図-9 サイトIIにおけるR1年7月、R2年7月洪水時における水深平均流速ベクトルと移動した巨石の分布

(3) サイトI、IIで得られた巨石の移動に関する調査結果の考察

図-8はサイトIにおけるR1年7月、R2年7月洪水のピーク流量時における水深平均流速のコンター図を、プロットは洪水で移動した巨石の分布を示している。図-8より、R1年7月洪水、R2年7月洪水で移動した巨石の位置では、概ね水深平均流速が5.0m/s以上となっていた。また、R2年7月洪水で移動した巨石の位置では、R1年7月洪水時には5.0m/s以下の水深平均流速となっていた。

図-9はサイトIIにおけるR1年7月、R2年7月洪水のピーク流量時における水深平均流速のコンター図、プロットはR2年7月洪水で移動した巨石の分布を示している。サイトIIでは水深平均流速が6.0m/s以上となる箇所、巨石2つが流出していたことが分かった。以上より、水深平均流速が5~6m/s以上となる箇所では、1~1.4m程度の大きさの巨石が移動することが分かった。

(4) 粗粒化が見られた箇所における底面流速分布の考察

図-10はR1年7月、R2年7月洪水ピーク時におけるサイトIIの底面流速ベクトルとそのコンター図を示している。

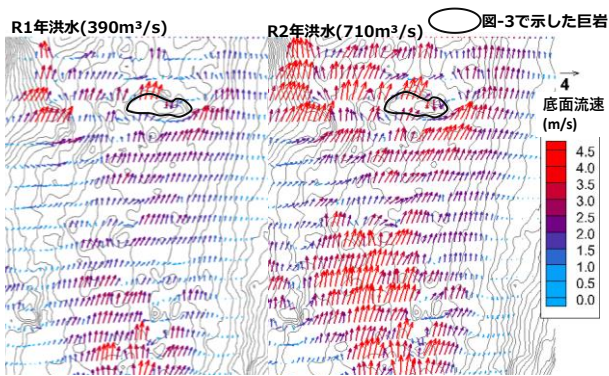


図-10 サイトIIにおけるR1年7月, R2年7月洪水時における底面流速ベクトル

R1年7月洪水時は, 黒丸で示す巨岩の影響を強く受け, 巨岩前面では底面流速が減速し, その背後に形成される後流域も大きくなっている. 一方, R2年7月洪水時は, 巨岩を乗り越える, または回り込む流れが卓越することで, 巨岩前面でも高流速域が形成されている. また巨岩背後の後流域も小さくなっている. このことが, 図-3で示した巨岩前面の河床の粗粒化, 巨岩背後に貯まっていた砂の流出につながったものと考えられる. このように, 本解析法では巨岩・巨石周辺の3次元流れの特徴を表現可能である.

(5) 巨石に作用した流体力の考察

図-11は, R2年洪水時におけるサイトIでの移動した巨石, 移動しなかった巨石に作用した流体力ベクトルを示す. 黒矢印で全流体力, 赤, 青, 紫色の矢印で静水圧, 非静水圧, 底面せん断力成分による流体力ベクトルを示し, コンターは底面の非静水圧成分の水頭換算値を示す. 流体力は式(9)に基づき, 抗力, 揚力を含む形で算出した. 移動した巨石, 移動しなかった巨石ともに, 巨石の前後では非静水圧の増減が顕著となっており, 巨石に作用した全流体力は非静水圧成分が大きい. また各巨石に作用したせん断力は, どの巨石も極めて小さい. このことは, 巨石の移動を底面せん断力で評価することには無理があり, Q3D-FEBS法のように三次元流れを解析し, 流体力を評価する必要があることを示している. 静水圧成分による力が負の向きとなっている巨石は, 下流側にある巨石によって圧力が高まっている為と考えられる.

本章での知見をより一般化するため, 次章では巨石の移動を説明する無次元パラメータについて考察する.

4. 巨石の移動解析に関する考察

前章で示したように, 移動した巨石の多くは洪水流の主流部に位置していた. このことから, Q3D-FEBS法に

$$f_i = \int_{V_s} -\frac{\partial(\rho g(z_s - z))}{\partial x_i} dV_s + \int_S (p_b' \cdot n_i + \tau_{bi}) dS \quad \text{式(9)}$$

* 図中の番号は図-2(a)で示した移動した巨石の番号と対応

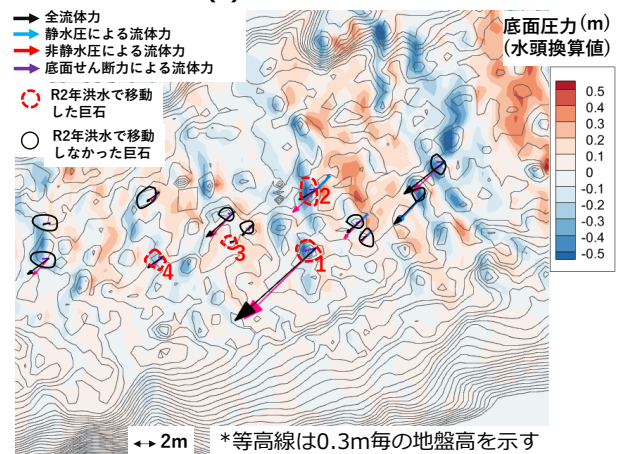


図-11 サイトIにおけるR2年7月洪水時に巨石に作用した流体力ベクトル

より得られた流速場に基づき, 洪水時の巨石に作用した主流方向と横断方向流速を合成した水深平均流速を用い計算した運動量と, 式(9)に基づいて流体力を算出し, 巨石の移動解析の可能性について考察する.

図-12はサイトI, IIIにおいてR1年7月洪水, R2年7月洪水で移動した巨石, 移動しなかった巨石について巨石前面に作用する流れの運動量と水中重量の比と巨石上の水深に対する巨石の大きさの比(h/d)の関係を示している. 図-13はサイトI, IIIにおいてR1年7月洪水, R2年7月洪水で移動した巨石, 移動しなかった巨石に対して式(9)を用いて流体力を求め, 巨石に作用した流体力と水中重量の比とh/dの関係を示している. 尚, 図-13は現地観測②, ③で巨石の長径・中径・短径が得られている巨石のみプロットしている. 図-12, 図-13より, 洪水によって移動した巨石はh/dが4.0以上, 運動量と水中重量の比が1.0以上, 無次元流体力は0.1以上となっている. これらの条件を超えると1m程度の大きさの巨石が移動する可能性があることを示しているが, データは大きくばらついている. 本判定法では, 実際の巨石の置かれている状況を正しく表現した巨石の移動解析にはなっていないために, 巨石に作用した流体力に対する抵抗力について議論出来ていない. 今後は, 調査法の改善, 観測データの充実と共に, 巨石と他の石礫との接触力を評価可能な個別要素法とQ3D-FEBS法をカップリングして検討し, 巨石の移動メカニズムや移動判定法を明らかにすることが必要である.

5. 結論と今後の課題

本研究では滝山川温井ダム上流部の山地河川において,

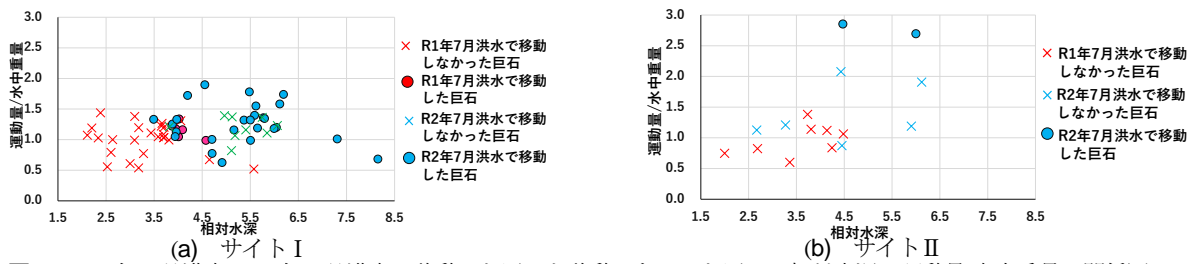


図-12 R1年7月洪水, R2年7月洪水で移動した巨石と移動しなかった巨石の相対水深, 運動量/水中重量の関係図

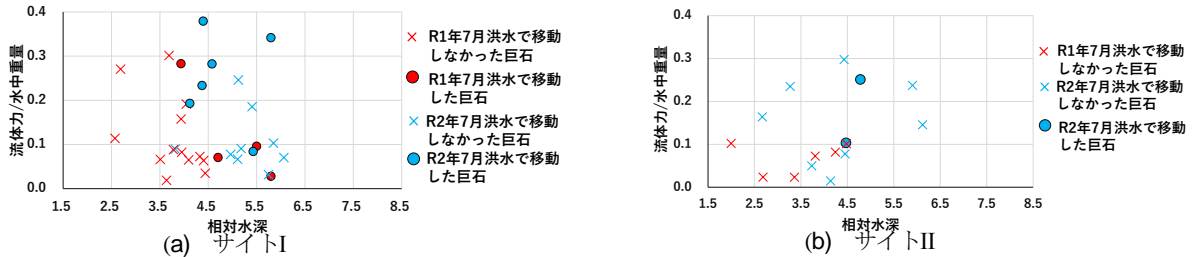


図-13 R1年7月洪水, R2年7月洪水で移動した巨石と移動しなかった巨石の相対水深, 流体力/水中重量の関係図

洪水時における大きさ1~1.4m程度の巨石の移動状況を調べ, その挙動を分析した. Q3D-FEBS で求めた水理データを用いて, 洪水で移動した巨石, 移動しなかった巨石の相対水深と巨石に作用した運動量, 流体力と水中重量の比の関係を整理した. その結果, 滝山川のサイトI, IIでは, 相対水深や運動量, 流体力と水中重量の比がある一定以上となると, 1m程度の巨石が移動する可能性を示唆したが, 今なおデータはばらついており, 精度向上が必要であることが明らかとなった. 本判定法における今後の課題は, 移動巨石の観測データと巨石に作用した流体力の精度向上と共に, 巨石の流体力に対する抵抗力の評価が重要である. このため, Q3D-FEBS法と個別要素法を用いた巨石の移動判定の評価法を検討し, 山地河川における河床変動解析法の構築を目指す.

参考文献

1) Smith, D. P., Kortman, S. R., Caudillo, A. M., Kwan-Davis, R. L., Wandke, J. J., Klein, J. W. and Gennaro, M.C.: Controls on large boulder mobility in an 'auto-naturalized' constructed step-

pool river: San Clemente Reroute and Dam Removal Project, Carmel River, California, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020.

2) Zhang, C.D. and Wang, Z.L.: A physically-based model of individual step-pool stability in a mountain streams, *13th International Symposium on River Sedimentation*, 2016.

3) Recking, A., Leduc, P., Liébault, F. and Church, M.: A field investigation of the influence of sediment supply on step-pool morphology and stability, *Geomorphology*, Vol.139-140, pp.53-66, 2012.

4) 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.

5) 竹村吉晴, 兒子真也, 大野純暉, 福岡捷二: 巨岩・巨石が点在する山地河川に対する平面二次元解析法の課題と新しい解析法の提案, 河川技術論文集, 第25巻, pp.267-272, 2019.

(Received June 30, 2021)
(Accepted September 3, 2021)

CONSIDERATION OF MOVEMENT OF BOULDERS USING QUASI-THREE-DIMENSIONAL ANALYSIS BASED ON FLOOD WATER SURFACE PLOFILES AND DETAILED RIVERBED OBSERVATION DATA

Jyunki OHNO, Atsushi YAMASHITA, Yoshiharu TAKEMURA and Shoji FUKUOKA

Mountain rivers are composed of a wide range of particle sizes. In particular, the movement of boulders with a size of about 1.0m has an effect on flow resistance and sediment transport. In this study, we surveyed the existence and loss of boulders and gravels, and investigated the judgement method of boulder movement due to the flood flow in the Takiyama River. Using quasi-three-dimensional flood flow analysis by Q3D-FEBS based on the observed water surface profiles and detailed topographic survey data, we attempted to evaluate the movement of boulders by flood flows. The future issues on this matter are discussed.