

# 非静水圧準三次元解析 (Q3D-FEBS) と個別要素法を組み合わせた山地河川の巨石の始動の評価法に関する研究

EVALUATION OF THE INCIPIENT MOTION OF LARGE BOULDERS BY COMBINING NON-HYDROSTATIC QUASI-THREE-DIMENSIONAL ANALYSIS (Q3D-FEBS) AND DISTINCT ELEMENT METHOD

大野 純暉<sup>1</sup>・山下 篤志<sup>2</sup>・竹村 吉晴<sup>3</sup>・福岡 捷二<sup>4</sup>  
Jyunki OHNO, Atsushi YAMASHITA, Yoshiharu TAKEMURA and Shoji FUKUOKA

<sup>1</sup> 正会員 博士 (工学) 国土交通省中国地方整備局 岡山河川事務所 調査設計課  
(〒700-0914 岡山県岡山市北区鹿田町 2-4-36)

<sup>2</sup> 国土交通省中国地方整備局 太田川河川事務所 調査設計課 課長  
(〒730-0013 広島県広島市中区八丁堀 3-20)

<sup>3</sup> 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)

<sup>4</sup> フェロー 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構 (同上)

山地河川にある大きさ 1m 程度の巨石群が洪水で移動すると、周辺の土砂が大量に流出し、種々の問題を引き起こすことや、水棲生物の生息環境が変化すること等、巨石の始動・移動を評価することが必要となる。本研究では、詳細地形測量データと観測水面形に基づく非静水圧準三次元解析 (Q3D-FEBS) に加え、他の石群との接触力を考慮するために個別要素法を組み合わせた巨石の始動解析法を提案し、その有効性について考察した。さらに、検討結果を踏まえ、今後山地河川の河床変動機構の解明に必要な研究課題を示している。

**Key Words :** large boulders, observed water surface profiles, detailed riverbed elevation data, Q3D-FEBS, distinct element method (DEM)

## 1. 研究背景

これまで山地河川の石礫の移動がつくる河床構造として、国内外でシュート・プールの形成、破壊に関する研究が数多く行われ、有用な結果が得られてきた<sup>例えば 1)</sup>。しかし、これらの研究は局所的な河床構造に関する研究であり、巨岩や巨石の多い山地河川全体における洪水流・河床変動の解析法の研究は、その重要性にも関わらず、極めて少ない。これらは山地から河口域にわたる洪水流と土砂収支の把握、適切なダム操作等に資するダム下流河川の流下能力の評価や生物の住处等の環境評価のために重要となる<sup>2)</sup>。山地河川では、写真-1に示すように、巨岩や巨石を核として瀬・淵や州が形成されており、大洪水時に巨石が移動すると、巨石の周辺に貯まっていた土砂が流出し、下流域への土砂供給量を増大させるこ

とになる。このことから、治水・環境の両面から、巨石の始動を評価した上で、巨石から砂まで幅広い粒度分布から成る山地河川の河床変動を考えることが重要である。しかし、山地河川を対象に、洪水における巨石の移動状況やそれを評価した研究は国内外で極めて少なく、その実態はよく分かっていない。

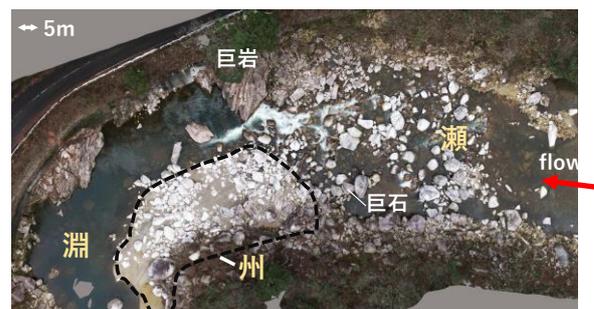


写真-1 本研究で対象とする山地河川滝山川の航空写真

代表的な研究例として Smith<sup>9)</sup>らの研究がある。Smithらは、洪水前後で山地河川の巨石の移動状況を調査し、川幅、水深、巨石の下流側に石があるかないかが移動の主な要因であること、洪水痕跡水位を用いて評価した無次元掃流力では巨石の移動状況を説明できないことを示した。

これに対し著者らは、山地河川では流れの三次元性が強く表れることから、詳細地形測量結果と観測水面形に基づいた非静水圧準三次元解析 (Q3D-FEBS)<sup>4)</sup>により、巨石周りの流速・圧力分布を求め、巨石に作用する流体力を評価した<sup>9)</sup>。さらに滝山川の現地調査で明らかとなった洪水で移動した巨石、移動しなかった巨石を対象に、算出した流体力を水中重量で除した無次元流体力について考察したが、両者に明確な差異は見られず、巨石の始動に関して課題を残していた<sup>9)</sup>。この主要な原因の1つとして、巨石に作用する周囲の石礫群から受ける接触力が考慮されていないことが考えられた。

本研究では、山地河川の流れの三次元性に基づく巨石に作用した流体力とともに、周囲の石群から受ける接触力を考慮した新しい巨石始動の解析法を提案しており、研究の特色は実用性の高いオイラー流の Q3D-FEBS 法と、ラグランジュ流の個別要素法を結合させて、巨石の始動を評価するところにある。さらに、提案した巨石の始動解析法を滝山川での現地調査結果に適用し、観測結果と解析結果を比較、検討することで、その適用性を明らかにする。さらに、山地河川における河床変動機構の解明に必要な今後の研究課題を示している。

## 2. R2 年 7 月洪水を対象とした滝山川における洪水観測体制と巨石の移動状況の把握

### (1) R2 年 7 月洪水時の観測体制

図-1(a)に本研究で対象とした滝山川温井ダム上流部における航空写真と、洪水前に計測した河床地形測量範囲、水位計の設置位置を示す。さらに、サイト I, II を対象に、巨石の配置状況等に関する現地調査を行っており、図-1(b)にその調査時期と洪水イベントの時系列を示している。河床地形測量は、ドローンを用いた写真測量によって実施し、0.3m 間隔で測量した。図-2(a)に河床地形測量結果、図-3(a)の実線 (茶色) で地形測量結果に基づく平均河床高を示している。また図-3(a)のプロットは、洪水時の観測された水位分布を示している。

### (2) R2 年 7 月洪水における巨石の移動状況の把握

現地調査の結果、サイト I では 2 つの洪水において、巨石の移動は見られなかった。サイト III においては、R1 年洪水では巨石の移動はほとんど見られなかった為、本研究では、R2 年洪水によるサイト II における巨石の移動状

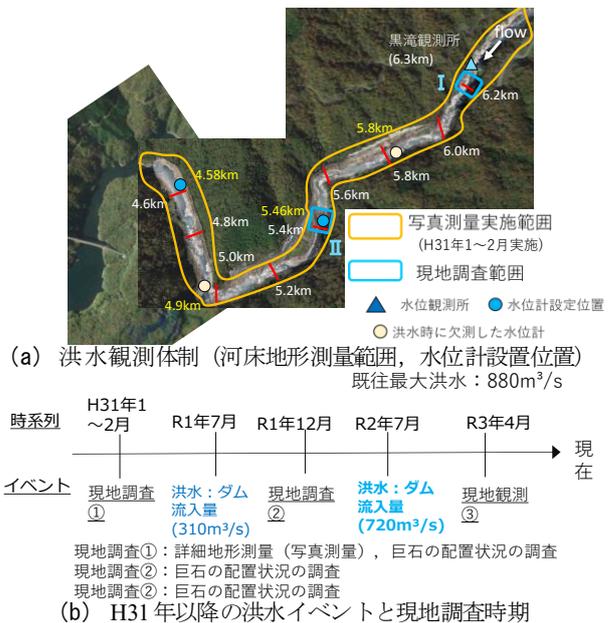


図-1 滝山川における洪水観測体制と現地調査実施時期

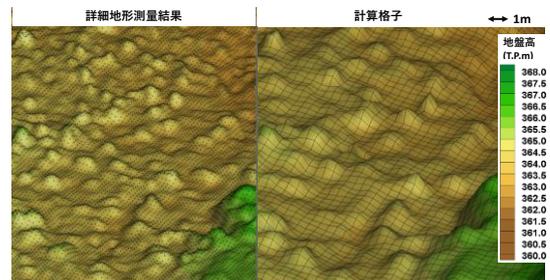


図-2 詳細地形測量結果と洪水流解析に使用した計算格子データに基づく地盤高コンター図の比較

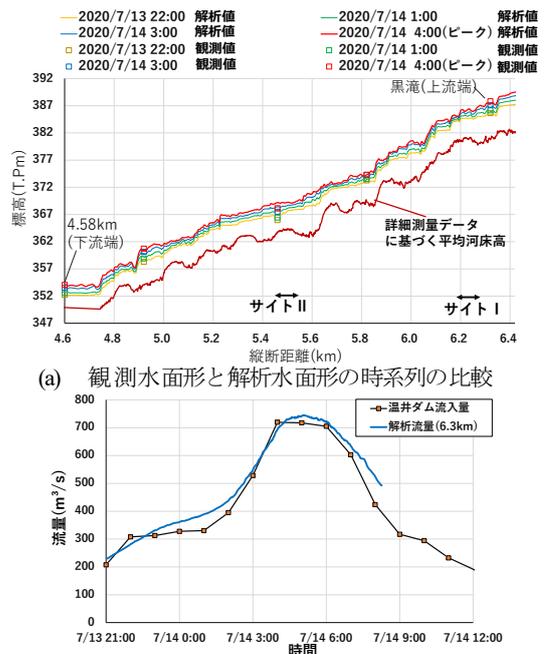


図-3 観測水面形, ダム流入量と解析結果の比較

況の分析を行う。

図-4(a), (b)はサイト II における R2 年洪水前後に撮影された航空写真を示す。流れの主流部に存在していた

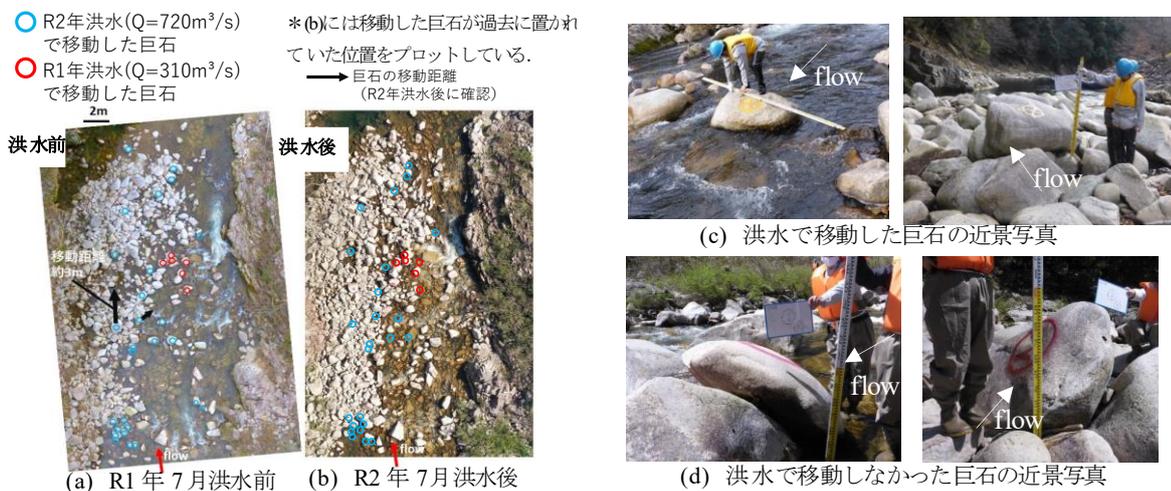


図-4 洪水前後における巨石の移動状況とその近景写真

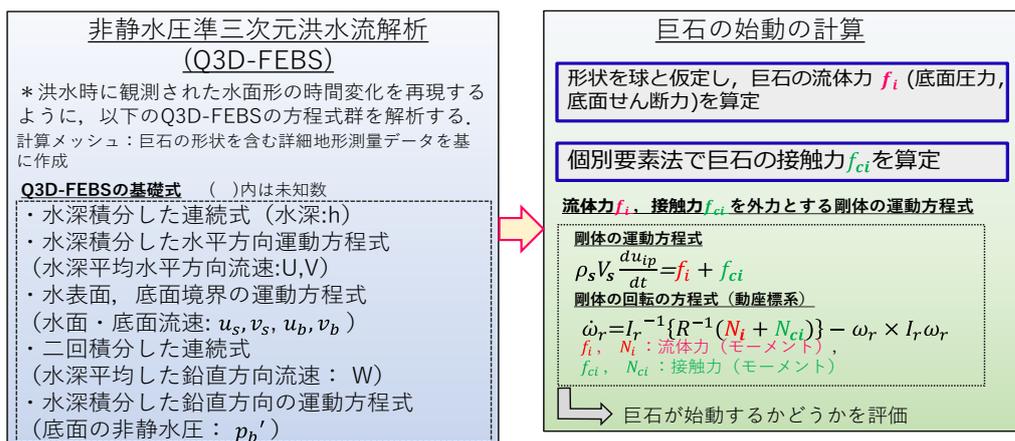


図-5 Q3D-FEBS+DEMモデルによる巨石の始動の評価法の枠組み

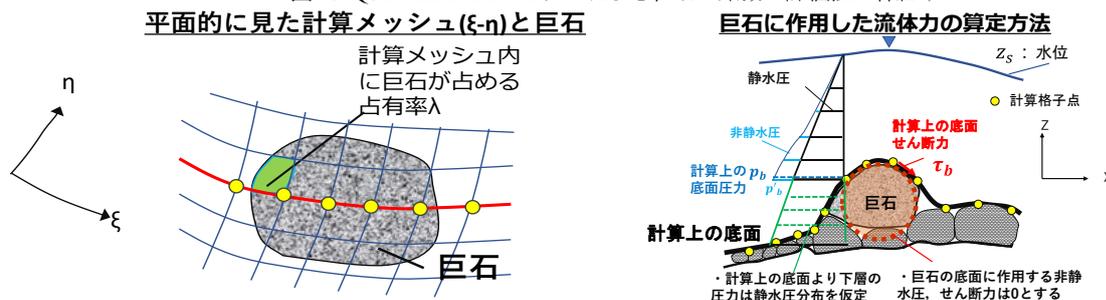


図-6 巨石に作用した流体力の評価の模式図

1m程度の大きさの巨石が26個流出し、移動先が確認できた巨石について移動距離を調べたところ、約3m程度であった。図-4(c), (d)は、洪水で移動した巨石、移動しなかった巨石の近景写真を示す。移動した巨石は、他の巨石に比べて周囲の石礫とのかみ合わせが弱い、河床から露出し流体力を受けやすい等の傾向にあることが分かった。このことから、巨石に作用した流体力の評価とともに、複雑な凹凸を有する河床に置かれた巨石の接触状態が、巨石の移動を評価する上では重要であることが分かる。

### 3. 新たに構築した巨石の始動解析法

#### (1) 巨石の始動解析法の概略

新たに構築した巨石の始動解析モデルの概念図を図-5に示す。まず、巨石に作用した流体力は、図-2(b)に示す詳細な地形データを基に作成した計算格子を用い、観測水面形の時系列を再現する様式Q3D-FEBSによる洪水流解析を実施し、その解析結果から算出する。図-3(a),(b)に洪水水面形時系列、流量ハイドログラフの計算結果と観測結果の比較を示しており、山地河川の洪水流を適切に説明できていることが分かる。洪水流解析結果の詳細は前報<sup>9)</sup>を参考されたい。また、巨石に作用する接触力は、周囲の石礫とのかみ合わせを考慮する為に、物体間の接平面とその法線方向の3方向の接触力を考える必要

がある。本研究では、個別要素法(DEM)を導入することで巨石の置かれている状況を考慮して接触力を評価し、得られた流体力、接触力を外力とした剛体の運動・回転の方程式を解き、巨石の始動を評価する。これにより、様々な配置条件下にある巨石に対して、巨石の始動を評価可能となる。

以下では、巨石に作用した流体力、接触力の具体的な計算方法を示す。

## (2) 巨石に作用した流体力の評価<sup>9)</sup>

巨石に作用する流体力は、詳細地形測量結果と観測水面形を用いた Q3D-FEBS により得られる巨石に作用した底面圧力( $p_b$ )・せん断力( $\tau_{bi}$ )を巨石周りで積分することで、抗力係数等のパラメータを用いず式(1)で評価した。尚、巨石形状は球を仮定し、その大きさは現地調査で計測した巨石の長径、中径、短径を用いて平均径を算出することで、体積や表面積を評価した。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には、せん断力、圧力の非静水圧成分は働かないものと仮定した。

$$f_i = \int_S (-p_b \cdot n_i + \tau_{bi}) dS$$

$$\equiv -\rho g V_s \frac{\sum_m \lambda_i \frac{\partial z_s}{\partial x_i}}{\sum_m \lambda_i} + \sum_m \tau_{bi} S_i \lambda_i \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_b}{\partial x_i}\right)^2}$$

$$+ \sum_m S_i \lambda_i p'_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \quad (1)$$

ここに、 $i=1\sim 3$  ( $x, y, z$ 方向)、 $z_s$ : 水面、 $z_b$ : 底面、 $S$ : 巨石の投影面積、 $p_b$ : 巨石表面に作用する圧力、 $p'_b$ : 巨石表面に作用する非静水圧、 $\tau_{bi}$ : 巨石表面に作用するせん断力、 $\lambda_i$ : 占有率、 $n_i$ :  $i$ 方向の単位法線ベクトルである。

## (3) 巨石に作用した接触力の評価<sup>9)</sup>

接触力は、2要素間にばね、ダッシュポット、摩擦スライダーを配置させた voigt モデルを用いて評価した。具体的には、巨石は平均径の球で表わし、その他の河床粒子は、0.3m 間隔で計測された測量データを基に、直径 0.3m の球を河床面に配置させた。これにより、巨石と河床の粒子間の接平面( $\xi, \eta'$ )とその法線方向( $\zeta$ )方向の3方向に作用する接触力の評価を行った。下記に示す式(2)は $\xi'$ 方向の接触力について示す。

$$F_{\xi'}(t) = k_{\xi'} \Delta \xi' + c_{\xi'} \frac{\Delta \xi'}{\Delta t} + F_{\xi'}(t - \Delta t) \quad (2)$$

$$F_{\xi'}(t) = \min(\mu F_{\xi}(t), F_{\xi}(t))$$

ここに、 $\Delta \xi'$ :  $\xi'$ 方向の粒子間の重なり量、 $k_{\xi'}$ :  $\xi'$ 方向のバネ定数、 $c_{\xi'}$ :  $\xi'$ 方向の粘性係数、 $\mu$ : 摩擦係数である。こ

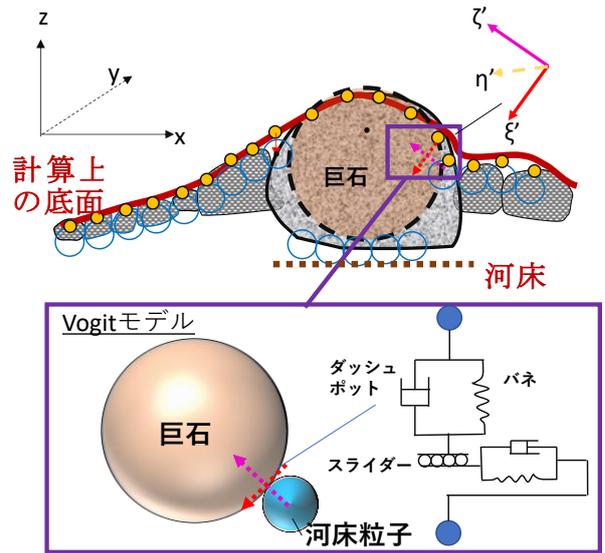


図-7 巨石に作用した接触力の算定法

の手法では、対象とする巨石について運動方程式と回転の方程式から、巨石の重心位置の変位を求め、粒子群の重なり量から接触力を評価する。バネ定数、粘性係数は Hertz の弾性理論に基づき得られる式(3)、(4)で評価する。

$$K = \frac{2}{3} \frac{E}{1 - \nu^2} \sqrt{\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}} \quad (3)$$

$$c = -2 \frac{\ln e_r}{\sqrt{\pi^2 + (\ln e_r)^2}} \sqrt{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} K} \quad (4)$$

ここに、 $\nu$ : ポアソン比、 $E$ : ヤング係数、 $e_r$ : 反発係数、 $m_i$ : 球とした巨石の質量である。以上より、巨石の材料特性から決まる反発係数、ポアソン比、ヤング係数によってバネ定数、粘性係数が表現され、それに応じた3方向に作用する接触力の評価が可能となる。

## 4. 巨石の始動解析結果

### (1) 計算条件

本研究では、図-8に示す現地調査結果によって大きさを把握できた巨石を解析対象とした。各巨石には、式(1)を用いて評価される R2 年洪水ピーク時の流体力を作用させた。

接触力の算定に用いたパラメータは、滝山川の対象区間が花崗岩質であったことから、花崗岩同士の衝突実験の検討結果を参考に、反発係数 0.4、ヤング係数 6.0Gpa、ポアソン比は 0.33 とした<sup>7)</sup>。

本研究では、河床粒子は移動しないものとして計算した。また、解析は 2 秒間行い、上流側で動き出した巨石が、下流側にある巨石に衝突し、移動することは考慮していない。

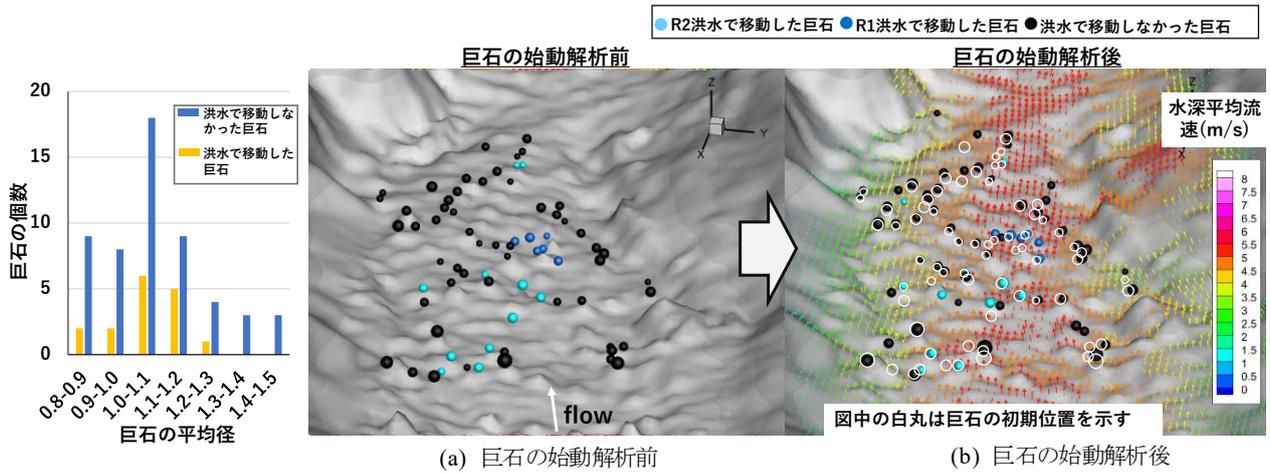


図-8 巨石の平均直径

図-9 巨石の移動解析結果と R2 年洪水時の水深平均流速ベクトルとコンター図の重ね図

表-1 観測・解析上移動した巨石と移動しなかった巨石の個数

	観測上移動した巨石	観測上移動しなかった巨石	計
解析上移動した巨石	7	19	26
解析上移動しなかった巨石	10	35	45
計	17	54	71

(2) 解析結果と考察

図-9(a),(b)は巨石の始動解析前と解析後の巨石の位置を示す。図-9(b)には、Q3D-FEBSで得られたR2年洪水ピーク時における水深平均流速のベクトルをコンター表示で示している。計算対象とする巨石は球で表示しており、黒、青、水色の球は、それぞれ観測上移動しなかった巨石、R1年洪水時に移動した巨石、R2年洪水時に移動した巨石を示している。また、図-8(b)の白丸は、巨石の移動解析前の初期位置を示している。

図-9(b)より、始動解析を2秒間行なうと、水深平均流速が5(m/s)以上となる主流部に存在する巨石は、その巨石の粒径以上移動しており、左岸側の低流速域ではその巨石の粒径以下移動を示した。左・右岸側に多く位置している移動しなかった巨石については、解析においても概ね移動しないことを再現している。表-1は、観測と解析で移動した巨石、移動しなかった巨石の個数について示したものである。本解析では観測上移動した巨石、移動しなかった巨石の状況を約半数程度、説明していることが分かる。

図-10(a),(b)は、式(1)から得られる個々の巨石に作用したx,y,z方向の流体力の合力を水中重量で除した無次元流体力と洪水時の水深を粒径で除した相対水深の関係を、観測上移動した巨石/移動しなかった巨石、解析上移動した巨石/移動しなかった巨石毎にプロットしたものである。

現地観測結果を示す図-9(a)は、大きさ0.7~1.5m程度の巨石については、全体的に相対水深4~6、無次元流体力が0.3以上となると動きだす巨石が多い。一方、図-

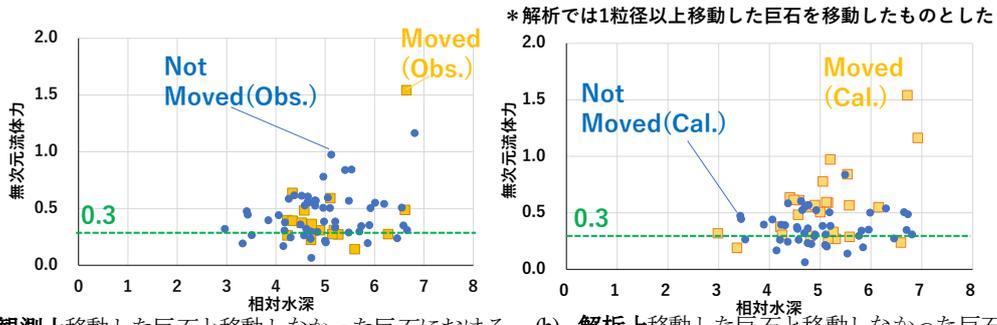
10(b)に示す本解析結果では、多くの巨石が相対水深によらず動いており、無次元流体力が0.3より小さくても移動している巨石が多くある。

これらの観測と解析結果の差異は、本解析では巨石や河床を構成する粒子形状を球と仮定しているため、粒子間のかみ合わせが十分反映されていないことや、実際に河床に埋まってる巨石は更に動きにくくなること等を表現できていないことが原因と考えられる。

さらに、巨石に対して下流側にある石の存在が巨石の始動に及ぼす影響を解析により分析した。図-11は無次元流体力と、巨石より下流側に石があるか否かを局所河床勾配で表現し、その関係を示している。局所勾配は、巨石の解析初期位置から下流方向に巨石の大きさの半分の範囲で評価した。図-10より、下流側に石があり局所勾配が負となる場合は、無次元流体力が0.5程度以上でないと動かない傾向にあり、無次元流体力0.5程度以上となると下流側の置かれている状況には関係なく、巨石は移動することが分かる。この傾向は、観測上移動した巨石と移動しなかった巨石についても同様であった。このことから、下流側に石がある場合の巨石の始動は、無次元流体力は0.5程度以上となることが分かった。

5. 山地河川の河床変動機構の解明に向けた今後の課題

本研究では、山地河川で起こる巨石周辺の河床洗掘によって生じる巨石の移動や、巨石の移動に伴う巨石まわりに堆積していた石礫群の移動の評価には至っていない。今後は、洪水観測水面形に基づくQ3D-FEBSとDEMを組み合わせた巨石の始動解析の精度向上と、巨石の移動、停止までを解析可能とさせるとともに、本モデルに石礫河川の河床変動モデルを組み合わせることで、巨石と石礫群の移動を算定可能にする洪水流・河床変動計算法の



(a) 観測上移動した巨石と移動しなかった巨石における無次元流体力と粒径の関係図 (b) 解析上移動した巨石と移動しなかった巨石における無次元流体力と粒径の関係図

図-10 無次元流体力と相対水深の関係図

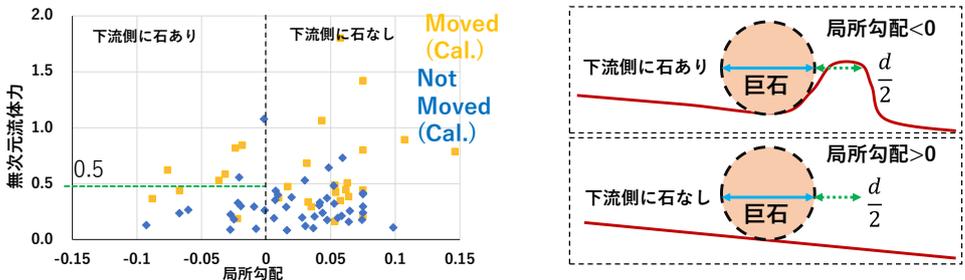


図-11 下流側の局所河床勾配と無次元流体力の関係

構築が次の課題となる。様々な形状を有する石礫の移動をラグランジュ的に扱う APM 法による固液二相流解析結果<sup>8)</sup>は、河床面付近の石礫の移動に対する他の粒子群の影響の評価を可能としており、この結果を用いることで、Q3D-FEBSとDEMを組み合わせた洪水流・河床変動解析法の精度向上に役立つものと考えられる。

さらに、山地河川における洪水流・河床変動の実態把握、解析の検証データが不足していることを鑑みると、洪水観測水面形の計測と共に、洪水前後でドローン等を用いた詳細地形測量を長期的に行い、巨石や砂礫の移動に関する知見を深め、洪水流・河床変動解析法の実用性を高めていくことが必要とされる。

## 6. 結論

本研究では、観測水面形に基づくQ3D-FEBSから算出される巨石に作用した流体力と個別要素法(DEM)に基づく接触力を外力とする巨石の始動の評価法を新たに構築し、滝山川の洪水前後における巨石の移動状況を調べた現地調査結果に適用した。さらに、解析結果と巨石の移動状況を調べた結果を比較、検討することで、提案した解析法の有効性や今後の課題を示した。

本研究で新たに構築した巨石の始動解析法は、巨石形状やその周辺の河床粒子形状を球と仮定しており、巨石の形状の効果、他の巨石とのかみ合わせがあまり影響しない約1m大の大きさの巨石は、流体力を水中重量で無次元化した値が0.3以上となると動く可能性があることを示した。さらに、下流側に石がある場合は無次元流体力が0.5以上とならないと、巨石が移動しないことが分

かった。

## 参考文献

- 1) 長谷川和義：河川上流域の河道地形，ながれ，Vol.24, pp.15-26,2005.
- 2) 福岡捷二：洪水水面形観測情報の広域的・統合的活用による流域治水の考え方の構築に向けて，河川技術論文集，第23巻，pp.251-256, 2017.
- 3) 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.
- 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) 大野純暉，山下篤志，竹村吉晴，福岡捷二：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，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.77, No.2, pp.631-636, 2021.
- 6) P.A Cundall and O.D.L. Strack: A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, Vol.29, pp.47-65, 1979.
- 7) 岡田康彦，内田一平，落合博貴，松浦純生：岩塊群崩落実験における岩塊個数と流下距離の関係について，日本地すべり学会誌，Vol.46, No.1, pp.9-18, 2009.
- 8) 熱海孝寿，福岡捷二：流体中の石礫粒子の移動開始時と跳躍時の運動に及ぼす形状の効果，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.76, No.2, 1-1135-1-1140, 2020.

(2022.3.25 受付)