水中の圧力変動を利用した洪水観測

Flood flow measurement using pressure on a river bed

椿 涼 太 Ryota Tsubaki

1. はじめに

河川で洪水が起きると、河床を構成する河床材料が移動して河床変動が起き、河川の地形が変化していく.礫河川では、河床を構成する材料は大きな石礫から細かい砂まで幅広い大きさをもつ.河床材料の構成は粒度分布と呼ばれるが、 粒度分布は河川の平面的な位置や深さにより大きく変化する.例えば洪水時に流れが集中する澪筋の河床材料は大きめ であることが多く、また、河岸植生の周辺では、植生によって洪水流の流速が低減して細かい砂の堆積が進みやすく、 それが植物の根により保持されることも多い^{1),2)}.

河床を構成する河床材料は,洪水中に水流により移動していく.また,流れが弱い場合には,河床材料は移動しない. 移動する条件は移動限界と呼ばれ,一般的には小さい河床材料の方が弱い流れで移動を開始する.移動限界は数値モデ ルにより河床変動を予測する際の重要な情報となる.ところで,大きな移動しない河床材料のまわりに堆積した小さな 河床材料は,その河床材料が一面に河床を覆っている場合よりもかなり強い流れでも移動しない.このような現象は, 大きな河床材料による遮蔽効果と呼ばれる.礫河川では,河床材料の粒度分布が広いため,礫の大きさの組み合わせ(粗 視的には粒度分布であるが細かく見ると各砂礫の三次元的な空間構成)により,それぞれの大きさの河床材料の動きや すさがきまる.逆に言えば,それぞれの大きさの河床材料の動きやすさは,河床の状態によって大きく変化して,場所 毎にも異なり,洪水中にも変化する.数値モデルで河床変動を予測する際に,河床表面の河床材料が全面的に移動する 大洪水の場合には,粒度や場所毎の移動限界の違いは,あまり大きな問題にならない.他方,中小洪水では,部分的・ 局所的な土砂移動が起きるため,適切な河床変動の予測には,場所毎に異なる粒度分布に応じて変わる移動限界を正確 に評価する必要があるが容易ではない.

河床変動の予測には、移動限界の他に、どれくらいの流れの強さでどれくらいの土砂が移動するかという点も重要で ある. 洪水中の礫河川では、さまざまな大きさの河床材料が移動して、河道内の河床材料の配置も不均一であり、どれ くらいの土砂が移動するかは、局所的な流れの強さだけでなく、どれくらいの河床材料がどのように配置されているか にも規定される.

礫河川にて数値モデルで中小洪水での河床変動を予測しようとすると、初期条件として地形の起伏と河床材料の粒度 分布の三次元分布を適切に与え、粒度分布ごとに変化する移動限界や土砂移動の非平衡性についても適切にモデル化す る必要がある.初期条件について、地形の起伏は航空レーザー測量、航空河床形状測量、UAV による写真測量などの技 術進歩と普及により、かなり精密なものを実用的な頻度で取得できるようになってきたが、裸地以外の河床材料の粒度 分布の取得は非常に手間がかかり、限られたデータしか得られていないのが現状である.適切なモデル化についても検 討が進んでいるが、どちらかというと、河床材料のデータの密度が十分でなく、あまり高度なモデルを活かせていない のが現状といえる.また、河床変動は、流れと河床変動がフィードバックする非線形性の強い現象であり、モデルの小 さな誤差が河床変動の大きな違いとなって現れることも、数値モデルによる河床変動予測を難しくしている本質的な要 因である. このような認識も踏まえ、本研究では、礫河川で中小洪水中に起きる土砂移動について現地計測を行う方法の開発を 進めている.河川の洪水中に計測を行う為には、洪水という特徴的な現象の影響をどう対処するかが重要である.洪水 中には、河川流量や水位が増え、流木等も流下して、細砂が河岸から巻き上がることで水が濁る.流量が増えると流速 も速くなり、流れを接触観測する場合の観測機器の固定が難しくなる.流木等の流下や堆積も観測機器の固定の障害と なる.水の濁りは光の減衰を起こすため、画像を用いた水中の観察の障害となる.このような状況で、河川の川底付近 で起きる流れや土砂移動について実測する方法は超音波を用いるものなど限定的である.著者らは、水中、特に河床面 に作用する圧力変動に着目した流れ・土砂移動の観測手法の開発を進めており、その研究概要を紹介する.河床面は流 れの通水抵抗が生じる場所であり、流れの乱れも強く、洪水流の特性を把握しようとする際に重要な空間領域であるが、 河床面を構成する河床材料が洪水中に流下することもあり、洪水流を観測する箇所としては注目されていなかった.と ころで、洪水中の河床近傍は、流れによる抵抗が大きく乱れも強いため、出水中の流木等の堆積による欠測が起きづら く、安定した計測が期待できる.本報告では、以上のような状況認識のもとに、著者が進めている水中の圧力変動を利 用した洪水観測の概要紹介を行う.

2. 観測方法

本研究では、独自開発の洪水観測装置として、Sphera と名付けた圧力変動計測装置 ³⁾と、金属殻への土砂衝突により 生じる水圧変動を水中音として記録するハイドロフォン装置 ⁴⁾の二つを開発・使用している.図-1 に二つの装置を河川 への設置した様子を示す.それぞれの装置は、河床材料のうちで大きめの礫の大きさで作成されており、形状も礫を模 している.そのため、礫河床の流れや土砂移動を乱さす、塵芥の堆積なども防ぐことができる.また、人手で設置・回 収できるように設計している.以下にそれぞれの観測方法の概要を紹介する.

2. 1 Sphera (圧力変動計測装置)

圧力変動計測装置である Sphera は、コンクリートで形成した粗度の上流側、上面、下流側の3箇所の内部に、ピエゾ 抵抗式絶対圧計を埋め込んでおり、50 Hz で3箇所の圧力を同期して記録する機構を内蔵している³⁾. 絶対圧センサは直 径 20 mm の計測面があり、この計測面への土砂衝突を防ぐため、ワッシャーにて保護を行っている.また、ワッシャー と計測面の間の土砂堆積や乱流を防ぐため、計測時にはスポンジを入れて止水域になるようにしている.コンクリート で形成した粗度は、鉄製オモリ上に固定して流下を防ぐ.計測される絶対圧をトリガーとして、スリープ状態から 50 Hz で圧力を記録する計測状態に遷移することができる.この機能を利用して数ヶ月のスリープ状態を維持し、数日のデー タを記録することができる.

2. 2 ハイドロフォン装置

本研究で用いるハイドロフォン装置は河床材料と当程度の大きさで,比 較的小型でのものである.そのため,衝突を感知する面積が比較的小さく, ある程度の土砂移動量が少ない(粒径 5mm 以上のものが秒 5回程度以下) の場合は,衝突する土砂毎に粒径を一つずつ判別することができる⁴⁾.土 砂移動の時空間的な違いをとらえ,礫河川でみられる土砂移動の非定常性 を局所的に把握することができる.機器は,金属殻,ハイドロフォン,デ ジタルサウンドレコーダー,鉄製オモリで構成されている.

3. 結果

3. 1 Sphera (圧力変動計測装置)

図-2 に三つの Sphera を水没させて、それぞれのセンサの出力を確認する事前試験の様子を示す. 容器内に Sphera を水平に設置して、水位を上



図-1 本研究で利用する独自開発の土砂 移動と圧力変動の設置状況の例. 奥側が ハイドロフォン装置, 手前側が圧力変動計 測装置

昇・降下させて, 圧力を変化させている. 図-3 には, 二つの Sphera の事前試験結果を示す. それぞれのグラフの P1, P2, P3 は河床に設置する際の上流側,上面,下流側のセンサとなり,上流側と下流側のセンサは上面より若干低い位置に配置されている. 図-3 のグラフで左側の初期は大気圧でこれを 0 Pa としている. 16:15 ごろにセンサの水没が始まるが, 黒実線の P1 と, 黒破線の P3 の圧力上昇が,灰色実線の P3 より先行するが,これはセンサの高さの違いによるものである. その後は平行に圧力が変化して静水圧の変化を安定して捉えていることが確認できる.

図-4には、十勝川水系札内川でR5年6月20日に札内川ダムで実施さ れたフラッシュ放流 ⁵⁾ (人為的なダムからの放流)時にダム下流の二地点 で Sphera を用いて記録されたデータを示す. 上段には, 主流部で計測し た結果を示す.この計測位置では、フラッシュ放流中に河床の堆積が起 き,設置した機器は回収時には 0.6 m ほどの砂礫層に埋まり, 0.08 m 程度 装置の高さが低下していた.このことから,表層の土砂移動が起きて,機 器が若干埋まったのち、上流から供給された土砂が装置の上に堆積して いったと考えられる. 図-4 の左上に示す同地点での圧力の平均値は、装 置から水面までの高さに対応する. 初日の 12 時ごろから水深が深くな り、フラッシュ放流が終了する翌日の9時ごろまで、若干低下しつつほ ぼ一定の圧力を保っており、装置から水面までの高さはほぼ一定であっ たと判断できる.次に図-4の右上に示す,同地点での圧力の標準偏差か ら、初日の12時ごろから圧力変動が大きくなり、その変動幅も時刻によ り変動していくが、初日の23時ごろから標準偏差が小さくなっている. 変動幅の時間変化は、装置周辺の河床変動が起きたことを示すと解釈で きる. すなわち, 河床材料の配置が変わったり, 装置の姿勢が変わるこ とで、装置周辺、特にセンサ近傍の流れや乱れが変化して、圧力の変動 幅の時間変化が生じたと考えられる.また,23時ごろに標準偏差が小さ くなったことは、装置近傍の乱流が小さくなったことを示すが、ダムか らの放流は続いている時刻であること踏まえると、装置が土砂で覆われ ることで乱流となっている表層流と装置が隔離され、河床近傍の表層流 の大きな圧力変動が検出されずなくなったと考えられる. 図-4 の左下 には、2018年に人工的に掘削された小水路の中程で記録した圧力の平均 値を示す. 放流開始前(初日の12時前)には、小水路はほぼ干出してお り大気圧となっているが、12時を過ぎると水位が上昇し、15時頃にピー

クを迎えると, 徐々に水位が 低下していき, また翌日の10 時頃の圧力低下は放流完了後 の水位低下をあらわしてい る.13時ごろには, 再び大気 圧にもどり水がはけたことが わかる.図-4 の右下にしめ す, 圧力変動は, 一部の局所 的な強い変動強度が確認で きる他は, 概ね圧力の増減に 対応して滑らかに増減して いる.このことから, 装置周 辺の河床変動は起きず, 機器 の姿勢や周辺の河床材料の



図-2 Sphera の事前計測試験







配置も維持されたまま,水深や流れが変化していったと判断できる. 以上のように, Sphera を用いた計測は,河床の堆積が起きた場合に,装 置が河床材料に覆われて,流れなどの分析がしにくくなるという計測原 理上の限界はあるが,洪水中の礫河川の主流や支川の,川底付近で起きる 流れや河床変動の様子とその変化を時々刻々と安定して計測できる事が 確認できる.つまり,河川で洪水中に起きる河床変動や,その変動をもた らす流れの状況とその時間変化を把握できる.



3.2 ハイドロフォン装置

図-5 に、ハイドロフォン装置で得られた掘削小水路内(図-4の下段と同じ計測地点)での粒径別土砂移動回数を示 す.図-4の左下の圧力変化からわかる水深変化とあわせて、図-5の土砂移動の時間変化を分析すると、12時から15時 にかけて水位が上昇して、底面せん断応力が増加した時期には、土砂移動は全く検出されておらず、徐々に水位が低下 している時刻に、土砂移動量も徐々に増えていき、バッテリー電圧低下により19:30に記録が終了する前には、土砂移 動量が再び検出されなくなっていることが確認できる。小水路の入り口から計測点までの距離が100m程度と短いこと も踏まえると、図-5で検出された土砂は、小水路内の土砂が流下したと言うよりは、主流部を通過した土砂の一部が、 主流部の河床変動の影響もうけつつ、小水路に流入したものと考えられる.なお、図-5に示す土砂移動量(10分間に10 個程度)は、かなり少ない(主流部などでは10分間で数百個程度となる).

以上のように、ハイドロフォン装置を用いた計測により、礫河川の中小洪水で生じる、部分的・局所的で非定常性の 強い土砂移動現象を把握できる.

4. おわりに

本報告では、著者が開発と現地適用を進めている水中の圧力変動を利用した洪水観測の概要紹介を行った.洪水観測 手法は、Sphera という圧力変動計測装置と、ハイドロフォン装置の二つである. Sphera により、河川の洪水中に川底付 近で起きる流れや河床変動の様子とその変化を把握できる.また、ハイドロフォン装置により、礫河川の中小洪水で生 じる、部分的・局所的で非定常性の強い土砂移動現象を把握できる.二つの観測を組み合わせ、またイベント前後の河 床形状の測量結果の比較なども考慮して分析することで、地形変化とそれをもたらした局所的な流れと土砂移動につい て、その非定常的な現象も含めて理解することができる. Sphera については機器の小型化が、ハイドロフォン装置につ いては計測期間の延長が、現在の課題である.

参考文献

- Zhu, R. and Tsubaki, R.: The Role of Riparian Vegetation Flexibility in a Bio-Hydro-Morphodynamic Simulation, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 47, pp. 3481-3496, doi: 10.1002/esp.5469, 2022.9.
- Zhu, R., Tsubaki, R. and Toda, Y.: Effects of vegetation distribution along river transects on the morphology of a gravel bed braided river, *Acta Geophysica*, doi: 10.1007/s11600-023-01075-8, 2023.4.
- Tsubaki, R., Fuentes-Pérez, J. F., Kawamura, S., Tuhtan, J. A., Sumitomo, K.: Bedload transport measurement in a Japanese gravel river using synchronized hydrodynamic and hydroacoustic pressure sensing, *Riverflow2020*, on-line (Delft, the Netherland), July 2020.
- 4) Tsubaki, R. and Miyamoto, M.: Measurement of pressure fluctuation on bed cobbles during small floods, *12th International Symposium on Ecohydraulics (ISE)*, Tokyo, Japan, August 19, 2018.
- Crabbe, E., Maniatis, G., and Tsubaki, R.: The beautiful River Satsunai: Quantifying the effect of artificial flushing flows on channel planform morphology, *EGU General Assembly 2022*, Vienna, Austria, 2022, EGU22-9236, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-9236, 23–27 May 2022.

著者

椿 涼太 研究員,博士(工学),水理学,河川工学