

学位請求論文要旨

数値移動床水路における石礫の運動と河床構造の変化過程 MOVEMENT OF GRAVEL AND PROCESSES OF CHANGE IN BED STRUCTURE IN A NUMERICAL MOVABLE BED CHANNEL

都市人間環境学専攻 熱海 孝寿

Civil, Human and Environmental Science and Engineering, Takatoshi Atsumi

研究背景と目的

洪水流と共に生じる土砂移動は、河川における流路・河床変動、水利用、生物の生息、生育、繁殖環境など、河川で生じるあらゆる現象に深く関わる重要な研究テーマである。河床との接触を頻繁に行いながら流送される土砂は、掃流砂と呼ばれ、転動、滑動、saltation（跳躍運動）の移動形態に分類される。古くから流れの掃流力と流砂量に関係づける研究が行なわれ、決定論的や確率論的に導かれた多数の流砂量式が提案されている。なかでも Einstein の掃流砂関数、M-P-M 式、芦田・道上式が代表的な流砂量式であり、粒度分布幅の狭い砂礫河川において適用されている（水理公式集 2018 年版）。しかし、河床変動計算における掃流砂量式の予測精度は、流れの算定精度と比べ低く、精度は 1 オーダー程度しかないことが指摘されている（例えば Ancey 2020）。精度が低い理由の一つは、掃流砂を伴う流れは、固液混相流れであり、流体-粒子間や粒子間の相互作用が強く働く現象であることが十分考慮出来ていないためである。さらに、流砂の予測を難しくする要因として、粒度分布の影響があげられる。河川を移動する土砂は、大小様々な粒径から構成される混合粒径であり、掃流力や上流からの土砂供給条件によって、河床表層粒子の分級、すなわち細粒化や粗粒化が生じる。流砂機構と河床構造（河床表層の粒度分布、粒子配置、空隙率、河床凹凸など）は、密接に関係し、河床構造の変化が、流れ場や各粒径階の粒子群の離脱、流送、堆積のそれぞれの機構で影響を及ぼし合うなど、要因が複雑に関係作用し、掃流砂の定量的な評価を難しくさせている。

本研究が対象とする、石礫河川は、河床材料粒径が、2~3 オーダーの幅を持つ広い粒度分布と多様な粒子形状を有している。これまでの多くの研究は、河床材料が 1 オーダーの幅にとどまっていたために、分級機構の研究として不十分であった。洪水時に石礫の移動が生じると、大粒径粒子が表層に露出し、この大粒径粒子が流れの主な抵抗となり、周囲の小粒径粒子群の流出を抑制する遮蔽効果が重要となる。この為、従来の砂礫河川で有用とされた河床変動計算を分級の大きい石礫河川に適用すると、細粒分の限界掃流力を過小に評価し、また、空隙率の変化を考慮できていないことが指摘されている（福岡 2008）。さらに、石礫河川では、個々の粒子が間欠的な saltation 形態をとることや、洪水後の河道に見られる石礫河川特有の覆瓦構造・クラスターの形成等によって礫同士のかみ合わせの程度を変化させるため、個々の粒子レベルの運動に及ぼす粒子形状の効果の理解が不可欠であると考えられる。しかし、流砂運動に及ぼす粒子形状の影響を検討した事例は、非常に少ないと言える。

洪水時の混合粒径河床の粗粒化の実測データが少ないために、分級による表層の粒度分布の流砂量や抵抗などに与える影響などは、マクロな検討に限定されていた。しかし、近年の画像解析技術を用いた実験的研究では、掃流層内の粒子速度や固相割合、大礫の間隙に存在する砂礫に作用する掃流力や粒子配置など、力学的な情報が集められつつある（Frey ら 2020, 関根ら 2018, Ferdowsi ら 2017）。また、解析技術や計算機性能の向上を背景に、個々の粒子運動を解析する計算力学的なアプローチを用いた。掃流砂の移動機構の理解が深められ（福田 2013, Frey ら 2017, Tazaki 2021 など）、その多くは個別要素法 (DEM) と流れの解析 (CFD) のカップリングモデルが適用されている。解析結果より掃流砂層内での粒子間接触が鉛直分級の機構が、重要であることが明らかにされつつある。

しかしながら、これらの研究では計測や計算の実行を容易にするため、河床材料は2粒径や3粒径程度に代表させた検討がほとんどあり、連続的な広い分布を持つ河床材料を用いた検討は見られない。一方において、従来型の河床変動解析法の改良も試みられている（例えば、長田ら 2012, 太田ら 2019）。しかし、実河川での、洪水中の流砂の計測が容易でないこと、加えて求められる精度がそこまで高くないこともあり、粒子運動の素過程を含めた検証は十分行えていない課題を有するが、複雑な力学現象の力学的なモデル化の進展が見られ、現象理解の有効な手段となっている。

また、粒子の跳躍運動中の既往の検討では、粒子形状の影響がそれほど支配的でない結果も見られる（Gomez 1994, 高嶽 2021）。しかし、石礫粒子の運動では、河床上での覆瓦構造や粒子配置等によって粒子同士のインターロッキングが生じる為、粒子の形が流砂の初期移動等に及ぼす影響は大きいと考えられる。また、流れの掃流力の大きさや粒子の体積によって粒子形状の効果が変化することが考えられ、どのような水理条件下で粒子形状が重要となるのか検討が必要である。

石礫河川の流砂の予測技術の進展の為には、計算力学的な手段でしか得られない情報（ex 流体力, 接触力など）が必要となるため、今後、計算力学的なアプローチの重要性が増すと思われる。また、計算力学的な検討で得られた情報を従来の河床変動解析法に導入することも重要である。そこで本研究では、粒子レベルのミクロな現象把握に有用なツールで、流れ場を詳細に解く解像モデル（resolved CFD-DEM, 流体力を直接評価可能なモデル）を用いて、数値移動床実験を実施し、石礫河川の掃流運動に及ぼす粒子形状および混合粒径の影響を明らかにし、石礫河川の評価法の精度向上を図る。

本論文の内容と成果

本論文は5章で構成され、各章の内容と成果の概要は以下の通りである。

第1章の「序論」では、研究背景、既往研究のレビュー、研究目的、本論文の構成を示している。

第2章の「数値解析法の概要」では、各種数値解析法の特徴を述べ、石礫河川の掃流砂解析における解像モデルの必要性および解像モデルの一種である Fukuoka らの数値解析法（Fukuoka 2014）の概要を論じている。

第3章「同一体積・非球形粒子群による掃流砂運動に及ぼす粒子形状の効果」では、石礫河川の河床材料特性の中でも、粒子形状の效果に焦点を当て検討を行っている。混合粒径の河床材料は、形と体積の両方が異なるため、形の影響のみを定量的に明らかにすることが難しい。そこで、著者らは、同一体積で異なる形状の粒子群を用いた数値移動床実験を行い、非球形粒子が流れの中で覆瓦構造の河床を形成し、河床の安定に寄与する機構を示し、特に移動開始時の運動に形の影響が現れやすいことを明らかにしている。このため、粒子の初期移動特性を表現する pick up rate に及ぼす粒子形状の效果について検討し、評価した。

さらに、粒子に作用する重力項や付加質量項、摩擦項などは、粒子の体積の関数で表されるのに対して、粒子に作用する流体力の内、抗力や揚力は粒子の投影面積の関数で表され、非球形の場合は粒子の姿勢によって投影面積は変化する。そのため、粒子の体積が変化すれば、粒子形状の持つ影響も異なると考えられる。通常用いられる同一体積の球の直径で評価される名目直径を代表の粒径にとると、投影面積の変化が考慮されないため、この点について検討し、評価している。

以上から本章では、粒子の移動開始と粒子体積の影響を調査するため、2種類の数値実験を系統的に実施した。1つ目の移動開始時の検討では、名目直径 70 mm の3種の粒子形状（扁平、棒状、球粒子）を用いて、掃流力の

変化（無次元掃流力 $\tau_* = u_*^2 / sgd \cong 0.03 \sim 0.09$ ）に対する粒子の pick up rate の変化量を調べた。数値実験水路は、長さ 10m、幅 1m、水路勾配は 1/20 である。粒子を水路にパッキングした後、非球形粒子については 20 秒間通水を行い表層の粒子を自然の状態にセットした後に、いずれも上流からの給砂なしで通水を行った。計算格子幅は、各粒径 d を 7 分割する値に設定した。2 つ目は、体積の影響を調査するため、上記と同様の 3 種の粒子形状を用いて、名目直径 $d=6, 20, 60$ mm の各河床材料について、掃流力の高い条件で（無次元掃流力 $\tau_* = u_*^2 / sgd \cong 0.18, 0.30$ ）数値移動床実験を実施した。数値実験水路は、長さ $100d$ 、幅 $25d$ で各粒径に応じて与え、水路勾配は 1/100 である。境界条件は、縦横断方向に周期境界条件を課した。格子幅は、各粒径 d を 4 分割する値に設定した。また、いずれも相対水深は、8.5 以上である。

第一の粒子の初期移動の検討では、球粒子は、非球形粒子と比較して、限界掃流力が低い値を取ることで、また、非球形の扁平、棒状粒子群を比較すると、無次元掃流力が $\tau_* = 0.07$ 程度の場合には pick up rate の値に違いが見られた。扁平粒子で離脱が生じなかった粒子は、複数の粒子集団がかみ合って形成されるクラスターを構成する粒子が含まれており、表層粒子の姿勢や配置の違いによる粒子間のかみ合わせの程度が異なるためである。第二の体積を変化させた $\tau_* = 0.18, 0.30$ と掃流力が大きい場合の数値移動床実験結果では、名目直径を用いて表される無次元の流砂量、流砂体積、粒子速度に与える粒子形状および体積の違いによる差異は小さいことが明らかとなった。掃流力が高くなると、移動粒子は、不規則な粒子間接触による運動量交換なども活発に行われ始めるため、粒子形状の差異が現れにくいと考えられる。また、 $\tau_* = 0.18, 0.30$ 間の掃流力の増大に伴って、無次元の流砂体積は、増大するのに対して、無次元の粒子速度は若干減少傾向となる結果が得られた。力学的な考察から、掃流力の増大に伴って粒子に作用する平均的な流体力や接触力の分布はほとんど変化していないが、接触割合は増加が生じており、粒子間衝突の影響が粒子の平均移動速度に重要であることが明らかになった。本章での検討により石礫粒子の形状は、必ずしも掃流砂運動のあらゆる過程に考慮する必要はなく、限界掃流力付近の移動開始時の過程を扱う時に重要となる。

第 4 章「混合粒径・球形状による鉛直分級機構に関する検討」では、石礫河川の河床材料の特徴である幅の広い粒径分布の効果について検討を行った。Fukuoka ら（2014）の既往の検討では、解析に用いられた最小粒径と最大粒径の比が 3 程度と狭かったため、混合粒径の効果は比較的小さかった。このため、粒径分布を出来るだけ広くとり 1 オーダーの幅を有する粒径集団を用いて数値移動床実験を実施し、鉛直分級形成機構と粒子の離脱・堆積機構について分析を行った。

数値移動床実験水路の諸元は、水路長 4.01 m、幅 1.02 m の直線水路である。数値解析に使用した粒径分布は、Talbot 型の粒径分布を参考に、粒径 $d=1.5 \sim 20$ cm の 1 オーダー程度の広がりのある連続した粒径分布を設定した。粒子形状は球形状を用いた。本解析では、粒子間接触の効率化のために、直交格子に粒子を格納するリンクリスト構造を用いており、粒径の大きい粒子は複数の球を連結することで、解析上の粒径比を小さくすることで計算時間の短縮を行った。数値実験は、合計 4 ケースを行い、Case1 は、粒子の重心位置に乱数を与えて投入位置を決定し、初期河床を形成した。Case2 は、河床表層を細粒化する目的で、Case1 の通水 20s 付近に最小粒径 $d=1.5$ cm の粒子群を 5 万個追加で投入した。Case3 は、初期河床を平坦にとするため、Case1 より粒子群を多めに投入した後、Case1 の初期の平均河床高以上の粒子を取り除き、平坦な初期河床を作成した。Case4 は、Case3 と同様の初期河床を用いた。Case1~3 は、水路勾配 1/30 で、最大粒径に対する無次元掃流力 $\tau_* \cong 0.17$ と全粒径が活発に移動する掃流力条件であり、Case4 は、水路勾配 1/80 で、最大粒径に対する無次元掃流力 $\tau_* \cong 0.06$ と掃流力の低い条件である。格子幅は、最小粒径 $d=1.5$ cm を 4 分割する値に設定した。

すべての実験ケースにおいて、100 秒程度で kinetic sieving による鉛直分級が形成され、初期河床の作成法の違いが鉛直分級に与える影響は小さいことを確認した。大粒径粒子が、表層で露出し離脱することで、鉛直上方に

遷移し、一方、小粒径粒子群は、大粒径や中粒径間の離脱した空隙を埋め鉛直下方に移動することを明らかにした。中粒径粒子群は、初期に埋没していた粒子が離脱し上方に遷移していくこと、また初期に高い位置に配置していた粒子が鉛直下方に遷移する。また、鉛直分級の発達過程での河床の粒子数密度および離脱・堆積粒子数密度の鉛直分布を調べた。通水初期の段階では、各高さで粒子の離脱・堆積粒子数密度の相違が生じ、平衡状態に至ると離脱・堆積粒子数密度の鉛直分布はいずれの粒径も分布形が正規分布に近いことが得られた。さらに、各粒径の pick-up rate および deposition rate の鉛直分布を抽出し、それぞれ、指数関数 $\text{Exp}(z)$ と正規分布で表現できることを明らかにした。これにより、離脱量や堆積量の鉛直分布を仮定することなく、粒子運動の素過程に基づき、混合粒径河床の分級と土砂移動の解析が可能となることを示した。

第5章「石礫河川の掃流層内の粒子運動と流れ構造」では、第4章で実施した掃流力の異なる実験ケース (Case3, Case4) について、鉛直分級が発達した動的平衡状態の掃流層内の流れ構造と粒子運動との関係を調べた。掃流力が高く流砂量が大きくなると掃流層内の流速勾配が減少すること、掃流層上端から水面変動の影響が小さい ($(z - z_b)/h = 0.70$ までは、両ケースの流速勾配は概ね一致しており、移動粒子群による流速勾配の変化は掃流層内部に限られていることが分かった。粒子群の平均流速分布から小粒径と中粒径粒子群の流速分布は、流れの流速分布とほぼ同様の速度で流れに追随している。一方、大粒径粒子群の速度は、平均流速と同様の分布形を有しながら $2u_*$ [m/s] 程度遅く、粒子-流体間の運動量交換に、特に大粒径粒子が寄与していると考えられる。さらに、流砂量の増大に伴い、掃流層内のレイノルズ応力分布に変化が生じ、レイノルズ応力のピーク位置が鉛直上方に遷移すること、ピーク位置から掃流層上部までは、レイノルズ応力が増加することが明らかとなった。平均流および乱れ成分に及ぼす流体-粒子相互作用項の分析から、流体-粒子相互作用力項は、乱れ成分よりも平均流により強く影響を及ぼし、平均河床高の近傍で重力加速の流下方向成分と同等の大きさを有することが分かった。さらに、粒子運動が周囲の流体に及ぼす影響について明らかにするため、瞬時レイノルズ応力の空間分布を分析した。これにより、跳躍運動する粒子周りの瞬時レイノルズ応力は、粒子運動の影響を受けて、ejection ($u' < 0, w' > 0$), inward interaction ($u' < 0, w' < 0$), sweep ($u' > 0, w' < 0$) となることが確認できた。平均粒子速度が遅い大粒径粒子の周囲の流体は、 $u' < 0$ となる為、跳躍運動に合わせて ejection, inward interaction を取る。このため、掃流層上部で、掃流力の増大に伴いレイノルズ応力が増加傾向にあることは、大粒径粒子群の運動に伴う流体混合作用の中でも特に ejection の寄与が大きい。石礫粒子運動と掃流層内の平均流や乱れ構造の変化の関係は、未解明な領域であり、本研究によって掃流層内の流れの基礎的な知見を得ることが出来た。

第6章「結論」では、本論文で得られた成果を総括し、今後の課題を示している。

本研究では、石礫河川の掃流砂の力学の理解を深めるために、Fukuoka らの数値解析法に基づき数値移動床実験を行い、従来の河床変動解析法では十分取り扱うことが出来ない。掃流砂に及ぼす粒子形状の効果、混合粒径で構成される河床構造の変化過程および掃流層内の流れ構造と粒子運動の相互作用について明らかにした。

以下に今後の課題を示す。

- 混合粒径の検討においては、縦横断方向に周期境界条件を用いた平衡状態の検討に限られており、実際の現象は、非定常、非平衡な状況での河床変動である。非定常・非平衡条件下での鉛直分級過程や各粒径の跳躍運動などがどのように変化するかを明らかにする必要がある。
- 石礫河川の粒度分布は2~3オーダー程度であるのに対して、本検討では、1オーダー程度の粒度幅しか有していない。解像モデルを用いて、更に粒径幅を広げることは計算負荷が高く、コードや解法の改良による高速化のみでは対応できないと考えられる。そこで、解像モデルと非解像モデルを組み合わせたハイブリッドモデルの開発・適用を図ることが現象把握のために必要であると考えられる。