

種々の形状を有する石礫粒子群からなる数値移動床水路の構築と  
これを活用した水流と石礫粒子群の運動機構に関する研究  
Three-Dimensional Flow and Gravel Motions  
Using Numerical Movable Bed Channel with Various Shape Particles

土木工学専攻 福田 朝生  
Civil Engineering, Tomoo Fukuda

【研究の背景と目的】

大きな河床材料で構成されている石礫河川では、洪水時の水流は激しく、土砂移動量も非常に大きい。そのため洪水時には河道全体で河床が大きく変動する。このような石礫河川は、我が国では一般に見られる河道であるにもかかわらず、実用上有効な石礫河川の土砂移動の予測手法が十分確立されていないのが現状である。石礫河川の河床材料は砂礫河川と比較し、大きい石から小さな砂まで広い粒度分布を有していることが特徴である。福岡ら (2006) は日本を代表する急流石礫河川である常願寺川の高水敷上に実験水路を掘削し、現地実験から石礫河川における土砂の移動機構について考察している。洪水時の石礫河川においては、水流に耐えきれない小粒径粒子が流送され、大粒径の河床材料が露出する。露出した大粒径粒子は主に水流に抵抗し、大洪水時でも容易には動かず長時間河床に静止し、間欠的に転動する移動形態となることが明らかとなっている。しかし、河床変動解析で重要な砂や小礫を対象に導かれた従来の流砂量式は、河床材料粒径の数倍程度の深さの土砂がほぼ一様に流下する移動形態を想定しており、石礫河川の河床変動とは現象が異なる場を想定していることになる。すなわち、従来の流砂量式を用いた河床変動解析では、洪水中に一時的に静止している大粒径粒子の小粒径粒子に対する遮蔽効果や、突出する大粒径粒子に加わる流体力などが適切に評価されておらず、石礫河川の河床変動に適用するには課題が多いことが指摘されている(長田・福岡 (2012))。また、石礫河川では、大粒径粒子が集団化(大礫集団と呼ぶ)し、これが河床の安定に寄与することが報告されている。Piedra (2012) らは、混合粒径を対象とした移動床の実験を行い、掃流力の増加にともなう大礫集団の大きさや表層の存在割合の変化について研究している。また、Hendrickら(2010)による現地観測による研究では、大礫集団の大きさ、分布および洪水前後の大礫集団の形成状況などが詳細に報告されている。このように石礫河川では、大礫集団の形成などの粒子スケールの特徴的な石の配置の空間分布が、粒子群の移動および、河床の形態や水流の変化に大きく影響を与えていることから、石礫河川の移動床現象の把握においては、粒子スケールで粒子群と水流との相互干渉を把握した上で、砂堆の形成など、より大きなスケールの河床変化について考察することが重要と考えられる。

石礫粒子群の移動機構を把握するため、福岡ら (2005) は、水路長 45m の実寸大のコンクリート製の大型水路を用い、水流中に粒径別に色を付けた実寸大の石礫粒子群を投入し水路中央部に設けたガラス壁の区間から画像解析により石礫粒子群の軌跡等を計測した。実験における石礫粒子の運動軌跡の観察より、石礫粒子自身が球と異なる多様な形状を有することで跳躍運動が複雑になり、水路横断方向に広がりながら流下することが明らかとなった(以降、大型水路実験と呼ぶ)。福岡らの大型水路実験は、実寸大の石礫粒子の移動軌跡を測定した貴重なものであるが、画像解析では集団における全ての石礫粒子群の軌跡を把握することは出来ず、石礫粒子の群としての運動を考察する上で課題が残されている。このように、種々の形状の幅広い粒度分布を有する石礫粒子群からなる河床に水流が及ぼす流体力によって、石礫粒子群がどのような配置をとりながら流れに抵抗し、移動するかについては、現地観測や水理実験から詳細を解明することは容易ではなく、実態解明が求められている。

近年、計算機能力の向上を背景に、個々の粒子を Lagrange 的に追う解析手法を用いて、数値解析により流砂現象の力学を解明する取り組みが行われている(後藤ら (2000))。しかし、このような研究の多くは、抗力係数を

用いて流体力を評価しており、流体力の評価に曖昧さが残ることが課題として挙げられる。一方、粒子より小さなスケールで粒子の周りの三次元的な流れ場を解析し、流体力を直接算出する固液混相流れ場の解析手法が開発されてきている(梶島ら (2000), 牛島ら (2007) )。このような解析手法は、水流と石礫が混合する複雑な流れ場においても石礫に作用する流体力を適切に評価することにより課題解明の期待が大きい。原田ら (2011) は、乱流モデルとして Smagorinsky モデルを用い、漂砂を対象とした 3 粒径の球粒子による移動床場に適用し、振動流中の粒子の鉛直分級過程を検討している。このように固液混相場の解析手法は、近年移動床問題に対して適用され始めており、計算力学的アプローチが移動床問題解明の有効な手法であることが示されている。原田らは球で粒子をモデル化しているが、本研究が対象とする石礫粒子群による移動床問題では、大型水路実験で明らかとなったように石礫形状や粒径が石礫粒子の移動を評価する上では重要である。

本研究では、水流および石礫粒子群の運動機構の理解を目的とした基礎的研究として、水流と種々の形状を有する石礫粒子群の三次元運動を評価できる解析モデルを構築する。本解析では、石礫粒子より小さなセルを用いて詳細な流れ場を解析することで石礫粒子に作用する流体力を直接評価し、球を連結させた物体を石礫粒子のモデルとし、これを剛体として解析し、流体運動の解析と石礫粒子運動の解析を融合させている。この解析モデルを用い、種々の形状を有する石礫粒子群からなる混合粒径移動床数値水路を構築し、河床近傍の水流の運動、水流中の石礫粒子群の移動・停止機構および石礫粒子群が流体に与える力学作用について明らかにすることを目的としている。

## 【本論文の内容と成果】

本論文は 7 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「序論」では、既往研究の課題、本研究の目的および特徴を述べた。

第 2 章「石礫河川における移動床問題に対する実験、現地観測およびその解析」では、石礫河川の土砂移動を評価する上で重要となる掃流砂に着目し、既往の研究で得られた知見について整理し、石礫河川における水流と石礫粒子群の運動機構を評価する上での課題を整理した。

既往の研究より、石礫河川では、大礫集団の形成による分級などの粒子スケールの特徴的な石礫の配置が、粒子群の移動および、河床形態や水流の変化に大きく影響を与えていることが確認された。このことから石礫河川の移動床現象の把握においては、まず、水流と粒子群の粒子スケールの相互干渉の機構を明らかにするための新しい検討方法が必要である。また、水流による流体力が作用する際の石礫粒子群の配置や移動の軌跡、水流および石礫粒子群の間に作用する力などの力学機構の詳細を明らかにするためには、現地観測や水理実験から解明することは容易ではなく、計算力学的なアプローチが有効な手段となることを示した。

第 3 章「流れ場および固液混相場を対象とした解析手法の発展と移動床問題に対する計算力学的アプローチの発展」では、種々の形状を有する石礫粒子群からなる数値移動床水路を構築するにあたり、数値解析手法として関連する自由水面を有する流れ場の解析手法、固体の運動の解析手法、固液混相場の流れと固体の解析手法について既往の知見を整理し、これらの解析手法の開発により発展した移動床の問題に対し計算力学的にアプローチする研究の成果を取りまとめた。

第 4 章「種々の形状を有する石礫粒子群からなる数値移動床水路の構築」では、本研究で構築した種々の形状を有する石礫粒子群からなる数値移動床水路と粒子群の運動解析手法を示した。

本研究では、石礫河川における移動床現象を解析する手法として粒子の形状を評価できる石礫粒子のモデルであること、水流中の粒子群に作用する流体力を適切に評価できること、および多粒子の運動を対象とするため計

算負荷が小さいこと等を考慮し、牛島ら (2007) に倣い固液混相流場の解析手法を用いて流体と固体の相互干渉を評価し、種々の形状を有する石礫粒子のモデルとして球を連結させた球体連結モデルを用い、これを固液混相場の解析法と融合させることにより、種々の形状を有する石礫粒子群からなる数値移動床水路を構築した。本研究の数値解法では、形状を維持しながら移動する石礫粒子群を Lagrange 的に、周囲の流体流れを Euler 的に直接解析することにより、両者の相互作用を考慮して一体的に解析する。Lagrange 的に解かれた石礫粒子群の運動の流れの解析において考慮するため、石礫粒子が占める固相部分を密度が異なる流体として与え、全体を非圧縮性流れとして解いている。石礫粒子群の運動解析では、流れの解析から流体力を評価し、剛体の運動方程式により個々の石礫粒子の運動を解き、流れの解析の固相の位置と流速を更新する。この手順を繰り返す、水流および石礫粒子群の運動の解析を行う。計算手法の基礎的検証として一様流中に球を固定した場を解析し、球に作用する流体力を求め、抗力係数が適切に評価できることを確認した。

第 5 章「固定床上を流下する種々の形状を有する石礫粒子群の運動」では、構築した種々の形状を有する石礫粒子群の水流による移動解析モデルを用い、福岡ら (2005) により実施された実寸大の石礫粒子を流下させた大型水路実験に適用し、解析モデルの適合性について検証した。

計算水路は、大型水路実験の諸元を基に長さ 38 m、水路勾配は 1/20 とし、球を隙間がないようにつなぎ合わせて作成した。上流端には、実験と同様に 0.5 m<sup>3</sup>/s の流量を与えた。石礫粒子は、8~9 個の球をつなぎ合わせて構成した実際の石礫形状を近似した 4 種類の形状を用いた。石礫粒子の径は、5 粒径 (25 mm, 35 mm, 50 mm, 75 mm, 105 mm) とし、 $D_{60}$  は約 50 mm である。解析における流体計算セルは 0.01 m、流体計算の  $\Delta t$  は  $1.0 \times 10^{-4}$  s、石礫粒子の計算における  $\Delta t$  は流体計算より小さく  $1.0 \times 10^{-6}$  s とした。大型水路実験では、群として移動する石礫粒子の軌跡の他、単一粒子を流下させた場合の軌跡も計測している。本研究ではまず、単一粒子の実験における石礫粒子の軌跡を検証材料とし、球とは異なる形状の石礫と球を投入した計算を行い、石礫粒子の運動における粒子の形状の影響を考察した。その後、球とは異なる形状の石礫粒子群を数値水路に投入し、解析と実験における粒子群の運動の比較から、解析モデルの適合性について確認した。

実験および解析による粒子軌跡の比較より、石礫粒子群の不規則な運動を説明するには、球とは異なる石礫形状を考慮して解析することが重要であることが明らかとなった。また、石礫粒子群を対象とした解析から、石礫粒子群の流下方向速度の鉛直分布、および粒子の鉛直方向の存在確率分布について実験結果と良好な再現結果が得られた。これにより水流および種々の形状を有する石礫粒子群の三次元運動を評価する解析力学モデルが構築された。

第 6 章「数値移動床水路を活用した水流と石礫粒子群の運動機構の考察」では、種々の形状を有する石礫粒子群の水流による移動を評価する解析モデルを用い、数値移動床水路を構築し、これを用いた石礫粒子群を対象とした数値実験を行い、流れと石礫粒子群の運動機構について考察した。

水路諸元は、石礫粒子が移動する水量、河床波の波長および計算負荷等を考慮し、水路長 15 m、水路幅 1 m および水路勾配を 1/20 とした。上流端には 0.5 m<sup>3</sup>/s の流量を与えた。水路床を構成する石礫粒子の形状は、大型水路実験と同様の 4 種類の形状とし、石礫粒子の径は、5 粒径 (40 mm, 50 mm, 70 mm, 90 mm, 120 mm)、 $D_{60}$  は約 70 mm である。移動床の数値実験は約 250 s 間実施した。解析における流体計算セルは 0.01 m、流体計算の  $\Delta t$  は  $5.0 \times 10^{-4}$  s、石礫粒子群の計算の  $\Delta t$  は  $5.0 \times 10^{-6}$  s である。解析結果の考察から以下の結論を得た。

- 石礫粒子群からなる混合粒径移動床数値水路を構築し、実験や現地観測では計測が困難であった河床付近の水流と石礫粒子群の運動を解析的に示し、可視化することで三次元的な現象を理解することを可能とした。
- 構築した移動床数値水路を活用することで、粒径毎の移動形態の特徴、種々の形状と大きさを有する石礫粒子群が水流に対して抵抗する機構および凹凸を有する河床上の水流の運動について明らかにした。
- 本実験では、水路下流端で計測した単位時間に流出する粒子の数は、最も小さい粒径の粒子が多く、小粒径粒子は活発に移動しているものの、流砂量としては、大粒径粒子の方が大きい。この理由として、大粒径粒

子は、相対的に高い位置で、高流速を受けるのに対し、小粒径粒子は、表層で静止する大粒径粒子底部の流速の小さい位置に存在し、移動時においても、移動する大粒径粒子と同程度の高い位置までは跳躍せず、高流速を受けないためと考えられる。

- ・ 転動する大粒径粒子は、高い位置を移動するため、高速流を受け平坦箇所では容易には止まらず、河床に静止している大粒径粒子との衝突によって停止することで大礫集団を形成する。一方、小粒径粒子は、大礫集団の脇の水みちを中心に流下する。このような機構により、河床を構成する粒径の分級現象が生じることが明らかとなった。
- ・ 大粒径粒子が移動する際は、長軸を横断方向に向け、停止する際は、長軸を流下方向に傾けるとともに、平らな面を上に向けて他の大粒径粒子に支えられて停止する。小粒径粒子が停止する際も同様の傾向を示すが、小粒径粒子は、大粒径粒子により形成される不規則な窪地の形状の影響を受けることや、周囲の大粒径粒子の影響により流向が定まらないことから、移動や停止時における特徴的な向きの変化は、大粒径粒子ほど顕著には示さない。このことから、石礫河川で一般に見られる覆瓦構造は、主に大粒径粒子により形成される構造であることが明らかとなった。
- ・ 水流に抵抗する力は主に大礫集団を形成することにより担われることが明らかとなった。また、河床近傍の流速分布は、特に大礫集団が形成されている地点において鉛直方向に大粒径のスケール程度の区間で上向きに凸となり、対数則から大きくずれる分布形となることを示した。

第7章「結論」では、本研究で得られた結果を総括し、石礫河川の水流と粒子群の運動機構を把握する上での今後の課題を示した。

- ・ 本研究では、石礫河川の水流と石礫粒子群の運動機構について計算力学的アプローチにより解明するため、種々の形状を有する石礫粒子群からなる数値移動床水路を構築した。
- ・ 実寸大の石礫粒子群の運動を測定した大型水路実験結果を用い、構築した固定床数値水路での解析結果に適用、比較検討した。両者の比較より、数値水路を流下する石礫粒子群の運動は、実験により得られた石礫粒子群の運動を適切に説明することを示した。
- ・ 石礫粒子群の複雑な運動は、礫形状が球形では表現出来ず、球とは異なる形状を適切に考慮することが重要であることを明らかにした。
- ・ 構築した種々の形状を有する石礫粒子群からなる数値移動床水路を用い、混合粒径移動床の数値実験を実施し、これまで計測が困難であった水流と石礫粒子群の三次元運動および石礫粒子群と水流に作用する力を解析的に示すことにより、水流および石礫粒子群の運動機構を明らかにした。
- ・ 数値実験の結果より、石礫粒子群の粒径別の移動軌跡の特徴、石礫粒子の向きの粒径別の移動・停止時における挙動の特徴、大きな礫が集団を形成する機構、および大礫集団が水流に及ぼす力等を明らかにした。
- ・ これらの検討結果より、構築した種々の形状を有する石礫粒子群からなる数値移動床水路を用い、石礫粒子群の運動および水流との相互干渉の機構、特徴的な河床構造を明らかにすることは、石礫河川の移動床水理を理解する上できわめて重要な研究手法であることが示された。

今後の課題を以下に示す。

- ・ 本研究では、計算コストの制約から、数値実験における水理条件および河床材料の条件が限定されている。今後は、水理条件および河床材料の条件を広く変化させた検討が必要である。
- ・ 小さな河床材料粒径の果たす役割は大きい。小粒径粒子群の運動を解像するためには流体計算セルのサイズをより小さくする必要があるため、さらに大規模な計算を実施できる計算機の活用や大規模並列計算に対応したプログラミングが必要である。
- ・ 洪水流の非定常性が粒子群の運動や河床構造に及ぼす影響の検討が必要である。