

石礫河川の土砂移動機構を研究するための数値移動床水路の要件

中央大学研究開発機構 正会員 ○福田 朝生
中央大学研究開発機構 フェロー 福岡 捷二

1. 序論

移動床問題は、河川工学において最も重要な課題の一つである。水と粒子の相互干渉場の現象が、実用上十分に明らかにされていない要因として、水と粒子が混在する場の水と粒子の運動、水や粒子に作用する力を計測することが困難であることが挙げられる。計測することが困難な移動床現象に対し、水流中の個々の粒子の運動を Lagrange 的に解析することで移動床問題にアプローチする研究が行われている^{1),2),3),4),5),6),7)}。本稿では、流れを Euler 的に、粒子を Lagrange 的に解析し、計算力学的に移動床問題にアプローチする解析を数値移動床水路と呼ぶ。個々の粒子を Lagrange 的に解析する数値移動床水路は計算負荷が大きく、現状では実河川を対象とした解析は難しい。そのため、数値移動床水路内の水と個々の粒子の運動に基づき、より巨視的な視点からの水と粒子群の運動および河床構造の関係を理解していくことが数値移動床水路を活用する大きな目的となる。著者らは既報^{5),6),7)}において、水と種々の大きさや形状の粒子群の三次元運動を解析することが出来る数値移動床水路を構築し、石礫河川における水と石礫粒子群の運動および河床構造に及ぼす粒度分布と粒子形状の効果を検討してきた(図-1参照)。本稿では、数値移動床水路の既往の研究例と、著者らが実施してきた数値移動床実験の結果を踏まえ、石礫河川の土砂移動機構を研究するための数値移動床水路の要件について検討する。

2. 種々の数値移動床水路

2.1 抗力係数を用いた数値移動床水路

比較的初期の後藤ら¹⁾による数値移動床水路を用いた研究では、鉛直二次元の領域を対象に数値移動床水路で等流状態を解析し、移動床場の水の応力分布について検討している。後藤ら¹⁾の解析では、流れは Euler 的に解かれ、粒子に作用する流体力は抗力係数を用いて評価されている。Lagrange 的な粒子群の運動の解析には個別要素法⁸⁾が用いられている。多くの数値移動床水路において流体力の評価には抗力係数が用いられ、粒子のモデルとして接触判定の容易な球が用いられている。原田ら²⁾は、抗力係数を用いて流体力を評価し、混合粒径の三次元の個別要素法の解析により、シートフロー漂砂の分級過程を解析し、分級により空隙が発達した河床の漂砂の評価には、3次元シミュレーションが必要であることを示している。Calantoni ら³⁾は、三次元の個別要素法を用い、2粒径で構成される移動床について解析し、河床と流砂量それぞれにおける2粒径の割合を考察している。

2.2 流体力の直接計算法を用いた数値移動床水路

粒子群に作用する流体力は、流砂量と密接に関係する。しかし、水流中の任意の流れ場における粒子に作用する流体力を、抗力係数を用いて適切に説明することは難しい。計算機の演算能力の向上と共に、個体より小さな格子を用い、個体周りの流れを詳細に解き、流体力を直接評価する手法が開発されてきた。Hu⁹⁾らは、粒子に追従する非構造格子を用い、多数の粒子が沈降する場を対象に解析し、粒子レイノルズ数と粒子の沈降パターンについて検討している。しかし、河床を構成する多数の粒子群を有する数値移動床水路を対象に粒子に追従する非構造格子を用いたシミュレーションは、計算負荷が非常に高いと考えられる。一方、物体は Lagrange 的に解き、流体は物体より十分小さな直交格子を用い、固相を含む全体を非圧縮性流れとして Euler 的に解析する固液混相流場の直接計算法^{10),11)}が構築されている。固液混相流場の直接計算法は、種々の実験結果に適用され、高い説明力が示されてきている^{4),11)}。原田ら⁴⁾は、固液混相流場の直接計算法により、3粒径の球粒子(総計900個)を用い、最大粒径の5.64倍の長さの水路で、シートフロー漂砂の鉛直分級過程を計算し、顕著な鉛直分級の発生は強い流体シアが発生する加速位相と初期の減速位相区間であることを示した。固液混相流場の直接計算法は、種々の形状の物体に作用する流体力を評価することが出来るが、物体周りの流れを詳細に解析するため、計算規模が大きくなる。そのため、固液混相流場の直接

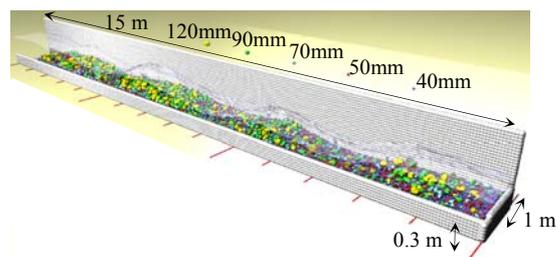


図-1 石礫の数値移動床実験の河床(実験時間 400 s)

キーワード 数値移動床水路, 石礫河川, 粒度分布, 粒子形状, 河床構造, 大規模計算

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27-31214 中央大学研究開発機構 TEL 03-3817-1615

計算法による数値移動床水路は、広い領域の解析が課題となる。しかし、混合粒径の河床では、小さな領域を対象とした場合、表層に大きな粒子が現れ、表層は大きな粒子のみで構成される様である^{3),4)}。石礫河川の河床表層では、大粒径粒子が集団化している箇所はばらついており、鉛直方向だけではなく、粒子は水平方向にも河床表層で分級が生じている。著者ら⁹⁾は、石礫河川の土砂移動を対象に、水路長が15mと最大粒径(120mm)の100倍以上の大きな数値移動床水路で固液混相流場の直接計算法による数値移動床実験を実施した(図-1参照)。この数値実験では、64core(8CPU)の共有メモリシステムの計算機を用いて400sの実験を約3ヶ月かけて計算することで、水平面上の分級が発達する過程を考察することが出来た。数値実験結果の河床表層の分級は、粒子運動や流れに大きく影響を与えることが明かとなった。これより、数値移動床水路は、水平方向の河床構造の変化を考察できる程度の大きな領域を解析出来ることが重要と考えられる。また、移動床問題には、水面計音変化が大きく関係していることから¹²⁾、水面の変化を評価できなければ石礫河川の水と粒子の運動および河床構造の関係は正しく理解できないと言える。

2.3 種々の形状の粒子のモデル

任意形状の物体の接触を評価するモデルとして牛島ら¹¹⁾は、四面体を連結させて任意形状の物体を表し、物体の接触の判定には、物体表面に接する四面体の内部に配置した球により接触判定を行う物体のモデルを用いている。この物体のモデルは、複雑な形状を表すことが出来る一方で、扁平な粒子形状を表す場合にも複数の球を用いる必要がある。しかし、数値移動床水路は、多数の粒子を解析する必要があるため、少ない球要素で粒子形状を評価できる粒子のモデルが計算負荷の面で有利である。著者ら^{5),6)}は、大きさの異なる8~10個の比較的少ない小球を隙間が無いように重ね合わせた球体連結モデルを不規則形状の石礫粒子のモデルとし、33,470個(石礫粒子を構成する小球301,231個)の石礫形状の粒子による数値移動床実験を実施した。著者ら⁷⁾が実施した球と石礫の両者の数値移動床実験より、球と石礫は、水流による粒子運動が大きく異なることが明かとなり、石礫河川の土砂移動を適切に考察するためには、異なる粒子形状を考慮出来る数値移動床水路が用いられることが望ましい。

3. 数値移動床水路の今後の展開

3.1 大規模計算に向けた高速化の必要性

固液混相流場の直接計算法による数値移動床水路は、計算規模が大きく、大領域の解析が難しい。著者らが行った既報の実験^{5),6),7)}では、64coreの計算機では、常流の計算は難しく、射流の数値実験を実施した。また、粒子に対し流体計算セルを十分小さくする必要性があるため、用いる粒子径には限界があり、最小粒径が40mmと比較的大きな粒度分布の条件で計算を行った。流れや河床材料について、実際の石礫河川に近い条件で数値実験を行うため、計算の高速化が必要となる。丸山ら¹³⁾は、津波漂流物の解析を想定し、漂流物の分布の空間的な偏りを考慮し、各計算プロセスの計算負荷が均質となるように計算領域を動的に最適化させる分散メモリシステム上の並列計算法を構築した¹⁴⁾。数値移動床水路で常流や小さな粒子を考慮した大規模な数値移動床実験を行うためには、解析領域を動的または静的に分割し、分散メモリシステムを用いた大規模並列計算を行う必要がある。

3.2 衝突力の評価

バネ、ダッシュポット、摩擦スライダーを用いて接触力を評価する個別要素法⁸⁾は、運動量の小さな静的な粒子群の力学を対象に構築されたが、著者らの数値移動床水路を含む多くの数値移動床水路など、動的な場へと幅広く適用されている。ダッシュポットは反発係数と関連づけられる値であるが、球粒子の詳細な衝突現象の研究では、衝突速度に応じて、反発係数も変化することが明かになっている¹⁴⁾。粒子運動を詳細に議論していく上では、接触力の評価法についても確認していくことが重要と考えられる。

4. 結論

石礫河川の土砂移動を考察するための数値移動床水路は、石礫形状を評価できる粒子のモデルを用い、固液混相流場の直接計算法により粒子に作用する流体力を適切に評価し、三次元的な水と粒子の運動を解析することが重要である。固液混相流場の直接計算法は計算の負荷が非常に大きく計算対象が限られてしまう。今後は、実河川に近い流れや河床材料を対象とした数値実験を実施するため、分散メモリシステムの計算機を用いた大規模並列計算が必要である。

参考文献

- 1) 後藤ら, 土木学会論文集 No.649/II-51, pp.17-26, 2000.
- 2) 原田英治, 後藤仁志, 土木学会論文集 B Vol.62 No.1, pp.128-138, 2006.
- 3) J. Calantoni et al., J. Geophys. Res. 113 C03003, 2008.
- 4) 原田ら, 土木学会論文集(海岸工学) Vol. 67, No.2, I 471-I 475, 2011.
- 5) 福田ら, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, pp.I 10151-I 1056, 2013.
- 6) 福田ら, 土木学会論文集 B1(水工学)Vol.70, No.4, I 967-I 972, 2014.
- 7) 田所ら, 土木学会論文集 B1(水工学)Vol.70, No.4, I 961-I 966, 2014.
- 8) Cundall,P.A., Strack,O.D.L., Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 9) Hu, H.H., Vol.22, pp.335-352, 1996.
- 10) 梶島ら, 日本機械学会論文集(B編), 第66巻, pp.120-127, 2000.
- 11) 牛島ら, 土木学会論文集 B, Vol No.2, pp.128-138, 2008.
- 12) 福岡捷二, 河川技術論文集, 第17巻, pp.83-88.
- 13) 丸山ら, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.70, No.4, pp.I 835-I 840, 2014.
- 14) O.R. Walton, Numerical simulation of inelastic, frictional particle-particle interactions, in Particulate Two-Phase Flow (M.C.Roco,Ed.) CChap 25, pp.884-991, Butterworth-Heinemann, Stoneham, MA, 1993.