等価な粒度分布を有する球と石礫で構成される 二つの数値移動床上の粒子運動の比較検討 COMPARISON OF THE PARTICLE MOTIONS IN TWO NUMERICAL MOVABLE-BED CHANNELS COMPOSED OF SPHERES AND GRAVELS

田所弾¹・福田朝生²・福岡捷二³ Hazumu TADOKORO, Tomoo FUKUDA and Shoji FUKUOKA

1学生会員 中央大学理工学部 都市環境学科(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)
2正会員 博(工) 中央大学研究開発機構助教(同上)
3正会員 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構教授(同上)

Gravel bed rivers are composed of particles of various shapes and sizes. However, effects of particle shapes on sediment transportation and bed variation have not been clarified, because it is difficult to observe particle motion and sediment discharge rate in gravel-bed river during flood flows. This paper demonstrates the effects of particles shape by comparing particle motions between spheres and gravels which are simulated in a numerical movable-bed channel. The result is concluded that gravel particles of shape differing from spheres tend to make all size particles move together by the engagement with the neighboring particles and shapes of particles should be considered for predictor of sediment discharge rate and bed variations.

Key Words : numerical movable bed channel, gravel bed rivers, shape of particles, particle motion, sediment transport rate, fluid force

1. 序論

洪水時の石礫河川では水流が激しいために,石礫粒子 の河床近傍の水流と粒子の運動を現地観測することは難 しく,土砂の移動機構は不明確なことが多い.そのため 実用上有効な石礫河川での土砂流砂量や河床変化の予測 手法はいまだ確立されていない.石礫河川の河床は,大 粒径から小粒径までの広い粒度分布から構成されている. 洪水時には河床の小粒径粒子は大量に移動し,河床にあ る大粒径粒子が露出し,その大粒径粒子が核となって周 囲の河床を安定させることになる¹⁾.しかし石礫河川で の代表的な粒径別流砂量式として,例えば修正Egiazaroff 式が用いられていることが多いが,様々な粒径の粒子が 集団として流れに抵抗する機構は十分に考慮されていな い.

福岡ら²は、石礫粒子群の移動機構を把握するためコ ンクリート製の大型水路を用い、粒径別に色を付けた石 礫粒子群を水流中に投入し、粒径の大きな石礫粒子群の 移動の軌跡を計測している.これより石礫粒子が球とは 異なる多様な形状を有することで縦横断方向への移動が

複雑になることが示されている.水流中を運動する石礫 粒子群の運動や作用する力を直接計測することは困難で あり,石礫粒子群の粒子運動を解明するためには,計算 力学的アプローチが有効と考えられ、これまで粒子形状 を考慮した研究に、海浜断面に関する実験³⁾や土石流シ ミュレーション4がある.しかし石礫河川における石礫 移動問題では、河床材料が様々な形状を有しているうに も関わらず、粒子形状を球と仮定して計算しており、形 の効果は考慮されていない. 福田ら⁹は石礫粒子の形状 を考慮した数値移動床水路を構築し、それを用いて石礫 粒子群の粒子運動を解析している. 解析結果は大型水路 実験結果2)の石礫粒子の軌跡等を適切に説明することが 出来、石礫粒子の運動を把握するためには、粒子形状の 効果を考察することが重要であることが示された. さら に福田らりは種々の粒径の粒子を用いた混合粒径の数値 移動床実験を実施し、水流および石礫粒子群の運動機構 を明らかにしている(以降では、福田らが数値移動床実 験で用いた石礫粒子に近似させた粒子のモデルを石礫と 呼ぶ).しかし福田らの結果は、形の効果がどの程度あ るのか比較する基準となるものがないために定量的には 明らかにされていない.本研究では福田らが用いた石礫





図-2 実験に用いた粒子の粒度分布

<mark>)</mark> 球	V 1	2	3		4
shape No.	球	1	2	3	4
短径	1	0.88	0.81	0.76	0.78
中径	1	0.98	1.06	0.89	0.99
長径	1	1.26	1.29	1.49	1.36

図-4 実験に用いた粒子の形状



図-5 水中安息角

粒子群と等価な直径と粒度分布を持つ球粒子群を用い, 数値移動床水路を用いた実験を実施し,球群と石礫群の 粒子運動の結果を比較検討し,粒子運動に及ぼす形の効 果を明らかにする.

2. 数値移動床水路の概要

本研究の数値解法は、福田ら⁷と同様に、球群を密度 の異なる液体として全体を非圧縮性流れとして解く.流 れを Euler 的に、球粒子は形状を維持しながら移動する 剛体として Lagrange 的に解析する.粒子の運動解析で は、粒子の接触力を個別要素法、流れ場の解析から流体 力を評価し、剛体の並進と回転の運動方程式により個々 の球粒子の運動を解き、流れの解析の固相の位置と流速 を修正する.詳細は文献⁶⁷を参照されたい.

3. 球と石礫による数値移動床実験

(1) 実験条件

球粒子を用いた数値移動床実験の水路諸元は福田らと 同様で水路長 15m, 水路幅 1m, 水路勾配 1/20 である. 図-1に水路諸元,および実験結果の説明に用いる座標軸

を示した.数値実験における河床材料の粒度分布は図-2 と同様であり、用いた粒径は5粒径である(40 mm 青色, 50 mm 赤色, 70 mm 水色, 90 mm 緑色, 120 mm 黄 色). 本稿では D₈₀ 以上となる 90 mm 以上の粒子を 大粒径粒子,70 mm 以下の粒子を小粒径粒子と定義す る. 図-2に示す粒度分布にあった投入個数1セットをま ずランダムに投入し,投入し終わったらまた次のセット を投入するという操作を所定の量になるまで繰り返す. 投入する際は、空間的にもランダムな位置で粒子を自然 落下させて投入する. 球と石礫の河床内部の粒子構造を 確認するため、図-3に粒子の空間に占める体積割合の鉛 直分布を示す. これより球と石礫では体積割合の鉛直分 布については大きな差がないことがわかる.また、両者 の体積割合は、河床内部で0.7程度となっている. 竹林 ら⁸は現地河川の空隙率の分布を調査し、1つの砂州にお いても体積割合は0.6から0.83程度まで分布することを報 告している. これより、本研究の体積割合は、現地の状 況に近い結果であると判断される. 上流端には流量 0.5 m³/s の一定流量を与えた. 給砂方法は下流端を通過した 粒子を同時刻に上流 x = 1-2 mの範囲にランダムに投下 した. 通水から移動床解析を実施し、各断面での流量が 安定した20s後を実験開始時刻とした.

(2) 実験結果

a)水中安息角とかみ合わせ効果

粒子の集合体としての力学特性を把握するため、福田 ら⁷の石礫モデル実験で用いた石礫と同じ粒度分布(図-2参照)を有する球と、石礫粒子の水中安息角を計測し た. 石礫モデルは、小球を隙間が無いように重ね合わせ た福田らと同様のものを用いる. 石礫粒子の粒子径は, 同一体積の球の直径として定義した. 粒子径で無次元化 した短径、中径、長径を参考として図-4に示した. 石礫 粒子群は、福田ら⁷と同様に、5粒径の各粒径に対して4 種類の粒子形状が均等な数となるように設定した.計測 に用いた水路は、水路長5m、幅1mである.水路の端か ら1mの範囲に壁を立て、その間に高さ1mとなるように 粒子群敷き詰め、水深1.5mの条件の下、瞬時に壁を取り 除き粒子群を崩落させた. 図-5に水中安息角の算定結果 の水路中央部の断面で切った近景を示す. 球の水中安息 角φは22°(tanφ=0.4),石礫の水中安息角は31°(tanφ=0.6) となった. 粒子形状の効果により静水中を静止する石礫 は、球に対して1.5倍(0.6/0.4)も静止摩擦係数が大きく なることが確認された. 球と石礫の水中安息角に大きな 違いが生じた要因を図-5の近景から考察する. 図-5では、 石礫は球とは異なり、他の粒子と平らな面を共有するよ うに接触していることがわかる. 接触面を共有する一方

の粒子が転動しようとする場合,接触面においてもう一 方の粒子に対し,転動しようとする粒子と同様の回転を 与える力を及ぼす.このことから,接触面を共有する石 礫粒子が移動する際は,必然的に2つの粒子が接触面を 共有しながら一体的に回転する傾向を有することになる. この効果により,石礫粒子は,河床内部の粒子も一体的 に表層の粒子の転動に抵抗する.逆に球粒子は,隣接す る粒子とは点接触となるため,お互いが回転を拘束する 効果は石礫粒子と比較して小さい.このため表層の粒子 が容易に動く状況となることから,石礫粒子の方が安息 角が大きくなったと考えられる.以降ではこのような効 果をかみ合わせ効果と呼ぶ.

b)水位と河床高縦断の時間変化

表-1

総流砂量

0.21 m

Ŧ

時間

t = 50 s

図-6は各時刻の平均河床と水位を表したものである. 時間の経過とともに河床形状が徐々に発達していること がわかる.球と石礫粒子の実験最終段階の水路全体の平 均水深・流速から求めたFrは1.2である.河床と水面が同

各時刻の総流砂量

時間

t = 100 s

石礫

総流砂量

 $0.20 \,\mathrm{m}^3$





位相で波打ち,顕著な反砂堆が形成されている. 安定な 反砂堆の形成には,球の場合は=100s~200s,石礫の場合 は =200s~400sとなっており,形の効果により石礫の方 が概ね 2倍程度の時間を要している.表-1には球と石礫 粒子の総流砂量の時間変化を示す.石礫は球と同程度の 総流砂量に達するのに約2倍程度の時間を要しているこ とがわかる.流量は定常条件であり,球も石礫も最終的 には反砂堆を形成するような土砂移動であることを考慮 すると,河床波の発達速度が球の方が速い要因は,球の 方が流砂量が多いためと考えられる.

c) 河床高コンター, 表層粒子径の分布の時間変化

図-7に各時刻の河床高コンター,表層粒子径を,図-8 に x = 6m, 12mの横断図を示す. 図-7, 図-8において周期 的な反砂堆が形成される前の球(t=50s)と石礫(t=100s)を 見ると、石礫は x = 5m~14 m にかけて澪筋が形成され ている(例えば, 図-8の x=6 mでは左岸, x=12 mでは 水路中央)のに対し、球は澪筋が明確には現れていない。 図-7のt=100sの石礫の河床では、澪筋には小粒径粒子が 多く、澪筋の周りの河床が高くなっている所は大粒径粒 子により形成されていることがわかる. 図-7の周期的な 反砂堆が形成された後の球(t=200s)と石礫(t=400s)を見 ると、両者共に反砂堆の形成範囲は明確に現れているも のの,石礫の方が横断方向の河床高変化は大きい.この ように石礫粒子の方が河床の凹凸が大きくなる要因を前 述のかみ合わせの効果を基に考察する. 乱れた流れ等が きっかけとなり、河床に凹凸が生じた場合、石礫粒子は 前述のかみ合わせ効果により,その凹凸は崩れにくく, 逆に球は、かみ合わせ効果が弱く凹凸は容易に崩れてし まう.また、凸部が維持されると流れは凹部に集中し、 凹部の洗掘が進行し凹凸がより顕著に生じるため、石礫 粒子の方が河床表層で凹凸が大きくなっていると考えら れる.

(3) 流砂量

図-9は水路下流端を通過した各粒径の流砂量を示した ものである.広い粒径集団をもつ常願寺川で実測された 石礫の移動では、小粒径粒子の流砂量が大きくなってい る⁹.しかし、本実験は、40 mmから120 mmの大きな粒 子を輸送集団としており、この条件では、球も石礫も大



粒径粒子の流砂量が大きくなり、本実験結果は、広い粒 径集団からなる河川の流砂状況とは異なる状況を呈して いると考えられる.これは、石礫河川において石礫の間 を満たしながら移動する砂などの小さな粒子を、本実験 では組み込んでおらず、これらが粒径別流砂量に影響を 及ぼしているためと考えられる.現状では、大規模並列 計算に対応した計算法とはなっておらず、小さな粒子を 組み込んだ大規模な数値実験を行うことは難しい.しか し実験結果は、球と石礫の形状は、適切に考慮されてお り、これまで十分に明らかにされていない粒子運動や河 床構造に及ぼす粒子形状の効果を理解する上で有益であ る.今後は、大規模並列計算に対応した計算法に改良し、 小さな粒子を組み込んだ数値移動床実験を実施し、小さ な粒子が粒子の運動機構、流砂量等に及ぼす効果につい て検討する必要がある.

本数値実験では、石礫群の流砂量は球群の0.57倍(球 群の t = 0~220 sの平均流砂量: 3.0×10³ m²/s、石礫群の t = 0~400 sの平均流砂量: 1.7×10³ m²/s)と小さな値を示 しており、粒子形状が流砂量に与える影響は非常に大き いことがわかる.図-10には水路下流端を通過した各粒 径の個数の時間変化を示している.図-9、図-10より、 石礫の場合は、球と比較し、大粒径粒子の流砂量は小さ く、小粒径粒子の流砂量は大きい.このことから、石礫 は、球と比較して全ての粒径の粒子がより一体的に移動 している様子がわかる.このように粒子形状の影響によ り粒径別の流砂量が変化する要因について考察する.石 礫の場合、前述のように河床表層の凸部が大粒径粒子の 集団(大礫集団)により形成されている.かみ合わせ効 果により大礫集団は容易には崩れず、その脇の水道に流 れが集中する.みず道は小粒径粒子で形成されているた



め、小粒径粒子にも大きな流体力が作用すると考えられ る.また、表層の大粒径粒子が離脱する際は、かみ合わ せ効果により、大粒径粒子下部の小さな粒子も一体的に 離脱する傾向を有する.このため、球と比較して大粒径 粒子は移動しづらく、小粒径粒子は活発に移動している と考えられる.一方、球はかみ合わせ効果が弱く、大粒 径粒子は凸部を保つことが出来ない.表層の大粒径粒子 は河床表層を容易に移動するため、みず道も形成しにく く、表層下部の小粒径粒子に作用する流体力は、石礫よ り小さいと考えられる.このような形の効果により、球 と石礫で粒径別の流砂量が異なったと考えられる.

次に代表的な流砂量式である芦田・道上式について数 値移動床実験の結果を用い検討する. 球では t=180s~200s,石礫ではt=380s~400sの河床波が発達した 時刻の平均的な水理諸元を用い検討する. 芦田・道上式 では,粒径別限界掃流力に Egiazaroff 式を用い,粒度 分布は初期に敷き詰めた河床の粒度分布(図-2参照)を 用いた.図-11に両者の比較を示す.全流砂量は数値実 験結果に対し0.5~2倍程度の範囲にある.粒径別の流砂 量について実験結果と芦田・道上式を比較すると芦田道 上式では,小さな粒子の流砂量が大きくなって いる.また,球粒子の方がより大きな粒子の流砂量が大 きいことから,粒径別流砂量は,流砂量式から求まる値 からはずれる傾向にあることが確認された.

(4)移動・停止時における粒子に作用する流体力および 接触力

図-12は河床が十分発達した後(球:t=200s,石礫:t = 360 s)の移動・停止時の粒子に着目し、小粒径粒子、 大粒径粒子それぞれについてアンサンブル平均をとった 粒子運動と作用する力を示したものである.左軸は移動 粒子のx方向速度、右軸は水中重量の流下方向成分で 無次元化したx方向の流体力および接触力を表してい る.移動開始時の石礫は球に比べ大きな流体力が作用し ないと動き出せないことがわかる.これは不規則な形状 のかみ合わせにより、石礫粒子は流体力に抵抗し、移動 を開始できないためである.また、石礫は球に比べ急激



に加速している.この理由は、体勢が崩れて動き出すと 球に比べ表面積が大きいので、大きな流体力を受けやす いためである.停止時には、石礫は球に比べ速い速度か ら停止できることがわかる.これは形の効果により他の 粒子により支持され停止しやすいためである.どちらの 粒子でも停止時より動き出しの方が作用する流体力が大 きい.これは石礫河床上のt = 400 sの水位縦断図x =12 m (図-6参照)に見られるような水面勾配の大きな堆 積下流部から大きな流体力を受け多くの粒子が動き出し、 堆積上流部の流れが緩やかな地点で多くの粒子が停止す るためである.なお、河床波の発達前の時刻においても 石礫の方が加速・減速が急となり、また、移動時に作用 する流体力が大きくなることは確認している.

(5) 移動中における粒子速度,作用する流体力および接 触力

運動中の粒子に及ぼす形の効果は、運動中の粒子に作用する力、Step Lengthを求め、これらの平均値を形状毎に比較することにより検討した.河床波発達前(球 t=50s,石礫t=150s),河床波発達後(球t=150s,石礫 t=300s)のそれぞれについて比較検討する. 図-13の縦軸は各粒径の水中重量の流下方向成分で無 次元化した移動粒子の流下方向接触力および流体力を表 している.流体力,接触力は,球と石礫のどちらも河床 形状発達前後で大きな違いは見られない.また球と石礫 では石礫の方が表面積が大きいため,移動中も大きな流 体力が作用し,河床に及ぼす接触力も大きいことがわか る.河床に及ぼす接触力が石礫の方が大きくなることも, 石礫の方が全粒径の粒子が混合して移動しやすくなる要 因になると考えられる.

図-14は各粒径で無次元化したStep Lengthを示している. 球は河床の発達前後で無次元Step Lengthに大きな変化は見られないのに対し,石礫は大きく減少している. 発達後の河床波の振幅は,石礫の方が大きい(図-6参照).このため,石礫は河床波の発達にともない移動距離が河床波に制限されたと考えられる.河床波が発達した後の石礫の大粒径粒子の結果は,移動距離が河床波に制限されていると考えると,河床波が顕著に発達しない条件では,石礫の方が移動時に大きな流体力を受けることから(図-13参照),球と比較して,Step Lengthは大きくなる傾向を有すると考えられる.

図-15は移動時の平均速度を示している. 球は河床波 発達前後でほとんど変化は見られないのに対し,石礫は 河床波発達後で粒径毎の速度が一様化している傾向がみ られる. これは石礫の河床形状が球の河床形状よりも発 達し,反砂堆下流面での流れが加速するため,大粒径粒 子も小粒径粒子も混合して流送されるためと考えられる.

4. 結論

本文では、等価な粒度分布を有する球群と石礫群から なる二つの数値移動床水路を用いて数値実験を実施し、 粒子形状の効果により粒子の運動機構に大きな違いが出 ることを定量的に議論した.数値水路実験の結果の考察 から以下の主要な結論を得た.

1)用いた粒子群の粒度分布における水中安息角 tanφ は, 球粒子群は 0.4, 石礫群は 0.6 となり, その比は 1.5 となった.静的な場において, かみ合わせの違いによる形の効果に大きな差が見られた.

2) 石礫の流砂量は球の約 0.57 倍となり、水流による粒 子運動においても、形の効果が大きく現れることが明 らかになった。石礫の方が移動時に大きな流体力を受 け、河床に大きな接触力を与えるため河床構成材料に 及ぼす力が大きく、これより全粒径の粒子がかなり混 合して移動するのに対し、球群は粒子運動において上 下方向の混合は弱く、流れの速い河床表層上部を移動 する大きな粒子の流砂量が特に大きく、小さな粒子の 流砂量は石礫よりも小さい。球と異なる形を有する粒 子群の方が、全粒子群が混合して移動することが明ら かとなった。

- 3) 球群の流砂量が大きいことから、粒子が球形に近い ほど河床形状の発達速度が大きいことが明らかとなっ た.また球群では横断方向の河床高の変化は小さいが、 石礫群は横断方向にも河床高の変化が大きくなる.こ れより球群とは異なる石礫形状の方が河床の凹凸が大 きくなり、河床では澪筋が形成されやすくなる.
- 4) 球群は始動時,移動,停止時を通じて加速,減速は 緩やかであるのに対し,石礫群は始動時には不規則な 粒子形状のかみ合わせにより,流体力に抵抗し,大き な流体力を受け動き出し,表面積が大きいため急激に 加速し,移動中も球群よりも大きな流体力を受けて移 動する.このため河床に及ぼす力が大きく,形の効果 により他の粒子群により支えられ易く,急激に減速し 停止する.このように粒子形状の違いで粒子の運動機 構が大きく異なる.

今後は、大規模並列計算に対応した計算法に改良し、 砂などの小さな粒子を組み込んだ大規模な数値移動床実 験から、粒子形状や粒度分布が、粒子の運動機構・流砂 量に及ぼす効果を検討する必要がある.

参考文献

- 福岡捷二:石礫河川の移動床水理の諸問題と解決への道筋, 水工学に関する夏期研修会,Aコース,Vol.44, pp.A-1-A25, 2008.
- 2) 福岡捷二,渡邊明英,篠原康寛,山下翔,斉藤一正:高速で 多量に流下する礫群の運動機構と床面摩耗量の推算,河川技 術論文集,第11巻, pp.291-296, 2005.
- 本田隆英,藤原弘和,佐藤愼司,磯部雅彦:粒子形状による海浜 断面変形の差異に関する実験的研究,海岸工学論文集,第52 巻,pp.516-520,2005.
- 4) 玉置秀行,青木尊之,森口周二:複雑形状の岩石を含んだ土石 流シミュレーション,理論応用力学講演会講演論文集,第56 巻,pp.195-196,2007.
- Milan, David, J. J., Heritage, G.L., Large, Andres. R. G. and Brunsdon, C. F. : Influence of particle shape and sorting upon sample size estimates for a coarse-grained upland stream, *Sedmentary Geology*, No. 129, pp.85-100, 1999.
- 6)福田朝生,福岡捷二,内田龍彦:水流による石礫粒子群の移 動機構とそのモデル化,土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, pp.L_937-1_942, 2012.
- 7)福田朝生,福岡捷二,内田龍彦:移動床数値実験水路を流下 する石礫粒子群の三次元運動,土木学会論文集B1(水工学), Vol.69, No.4, pp.I_1051-I_1056, 2013.
- 8) 竹林洋史,藤田正治,上戸亮典,佐本佳昭:砂州における河 床強度の空間分布特性と土砂の物理特性との関係,河川技術 論文集,第18巻, pp.119-124, 2012.
- 9) 曽山和宏,大熊義史,畠中泰彦,浅野文典,福岡捷二:河川の掃流砂量の測定と掃流砂量観測技術・評価技術に関する研究,河川技術論文集,第17巻, pp.5-10, 2011.

(2013.9.30受付)