水工学論文集,第58巻,2014年2月

石礫粒子群の運動および河床構造に及ぼす粒子衝突の効果

EFFECT OF COLISIONS ON GRAVEL MOVEMENT AND BED STRUCTURE

福田朝生[1]・福岡捷二[2]
Tomoo FUKUDA and Shoji FUKUOKA

[1]正会員　博（工）　中央大学研究開発機構助教（〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27）
[2]フェロー　工博　Ph.D.　中央大学研究開発機構教授（同上）

Particles with large variety of sizes and shapes are seen in gravel-bed rivers. However the effect of collision between different size particles on motion of particles and bed structure are hardly clarified. This paper presents the result of the movable bed experiment with the numerical movable-bed channel which simulates three-dimensional motion of flow and particles of different sizes and shapes. The result of the numerical experiment revealed the characteristic difference in direction of contact forces of different size particles and the effect of particle volume concentration on the collisions. This paper shows that characteristics of collisions between different size particles strongly affect the motion of particles and bed structures.

Key Words : *gravel bed rivers, collisions of particles, numerical movable-bed channel, particle volume concentration, sorting on the bed surface, antidunes*

１．序論

洪水時の石礫河川では，河床に露出した大きな粒子が主に水流に抵抗し，小さな粒子の流出を抑制し，間欠的に転動する移動形態をとることが福岡ら[1)]，長田ら[2)]の現地実験結果から報告されている．また，Hendrikら[3)]の現地観測より，石礫河川の特徴的な河床構造である大きな石の集団（大礫集団）は勾配の急な個所に形成されており，この大礫集団が河床の安定に寄与し，河床形状と密接に関係することが報告されている．このように石礫河川の土砂移動は，ある深さの層の土砂がほぼ一様に移動する砂礫河川の土砂移動と比較して複雑である．しかし，石礫河川の洪水中の粒子と水流の運動を現地観測や水路実験で計測することは著しく困難であることから，土砂移動機構は十分に明らかにされていない．近年計算機能力の向上を背景に計算力学的アプローチにより個々の粒子を Lagrange 的に追い，土砂移動機構の解明を目指す研究が行われている[例えば4)]．これらの研究では，固相を密度の異なる液体として評価し，非圧縮流れとして固液混相流場の一流体モデルを用いEuler 的に液相の流れを解き，固相は液相から受けた流体力を基に，Lagrange 的に解析する手法[5)]を採っている．この手法は，個々の粒子の周りの流れ場を詳細に解析することで，群集の中の粒子に作用する流体力を直接評価することが可能となるため，土砂の移動機構を考察する上で有効な精度の高い手法と考えられる．しかし，これらの研究は，粒子を球でモデル化しているが，石礫河川では覆瓦構造の河床[6)]に代表されるように，粒子運動に及ぼす形状効果が重要となる．著者らは，小球を連結させて種々の形状の石礫粒子モデルをつくり[7)]，固液混相流場の解析手法と融合させることで，種々の形状の粒子群からなる運動を解析可能とする数値移動床水路を構築した[8),9)]．この数値移動床実験のアニメーションから，上流から流下する粒子との衝突で静止している粒子が動き出す場合が顕著に見られ，石礫河川の粒子運動および河床構造を説明する上で粒子間の衝突が重要な役割を担うことが明らかとなった．しかし，既報の粒子運動の考察では，粒子に作用する流体力と接触力の大きさに着目し，接触力の評価では，上流から移動してくる粒子との衝突による接触力と他の粒子から支持される接触力の合力で考察しており，これらそれぞれの力の考察は行っていず，衝突の効果を十分説明出来ていなかった．本論文では，まず，粒子の分級現象の結果として生じた大礫集団により形成される反砂堆[10)]の発達過程，および反砂堆の発達が流砂量や，流体力に及ぼす効果を示す．また，大きな粒子と小さな粒子

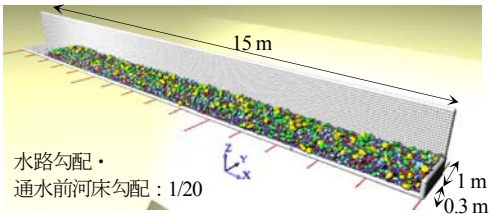

図-1　実験水路諸元

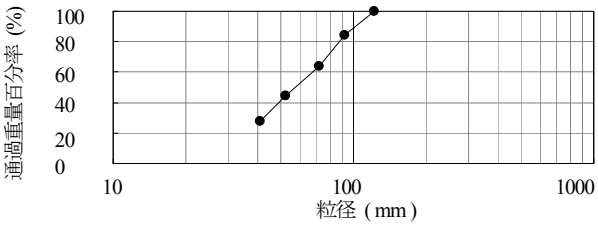

図-2　河床材料粒度分布

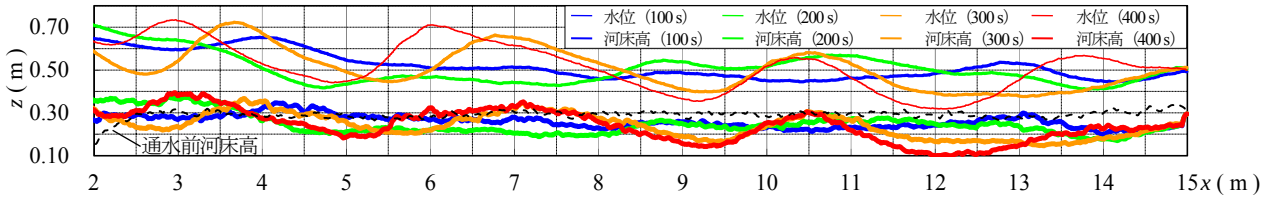

図-3　河床高および水位縦断の時間変化

の粒子間衝突の特徴を明らかにし，粒子間の衝突が粒子運動および安定した河床構造の形成に果たす役割を明らかにする．

石礫河川の河床変動予測法を確立する上では，数値移動床水路で明らかとなった Lagrange 的粒子運動を適切に説明する大規模領域の解析に適した Euler 的な粒子群運動の評価方法を検討する必要がある．これには，粒子衝突を応力として評価する必要がある．離散的に生じる粒子衝突から応力を求めるためには，粒子間の衝突を時空間平均化し，ある面に作用する平均的な力を求める必要がある．粒子衝突の応力を考察する研究の多くが，1粒径の粒子群を用い，水平方向の粒子運動が一様に近い条件となるように狭い領域を対象とし，周期境界条件を用いて解析する方法を採っている[例えば4)]．しかし，本研究では，分級や河床波等が生じる実際の石礫河川に近い河床変動の中で，粒径毎の粒子衝突の特徴と河床構造の関係を考察するため，解析領域は広く，河床波によりほぼ全ての場が加速または減速域となっている．このような条件で時空間平均の応力を求めることは容易ではなく，また，個々の粒径の粒子衝突の特徴が不明確な現状においては，求めた応力の妥当性も適切に議論できない．このような背景より，本研究では，粒子衝突による接触力を応力として考察するのではなく，個々の粒子に作用する力を直接考察対象とし，粒径毎の接触力の特徴を明らかにする．その上で，粒子衝突の特徴と個々の粒子の Lagrange 的運動および河床構造の関係を考察する．

２．数値解析の概要

数値移動床水路の数値解法では，移動する石礫粒子群を Lagrange 的に，石礫粒子に対し十分小さい流体計算セルを用い周囲の流体流れを Euler 的に直接解析する．Lagrange 的に解かれた石礫粒子群の運動を流れの解析において考慮するため，石礫粒子が存在する固相部分を

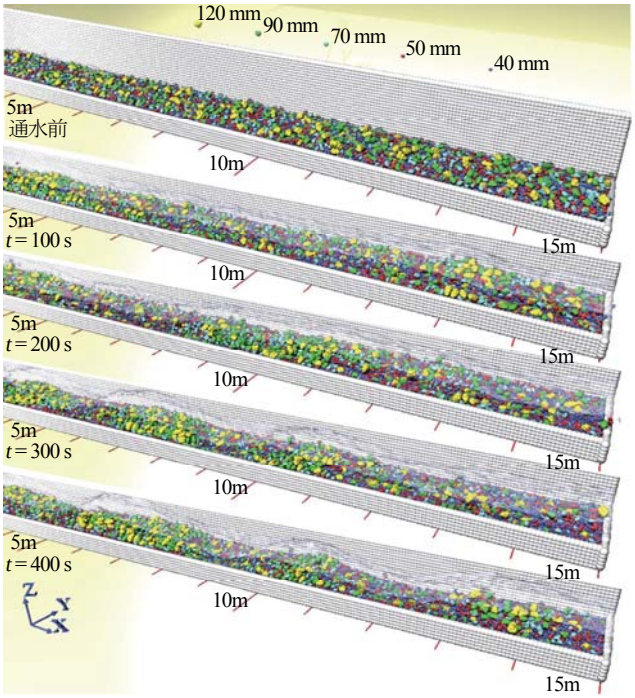

図-4　各時刻の河床の瞬間像

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修正する．数値移動床水路の解析手法は既報と同様であるので，詳細は文献[9)]を参照されたい．

３．数値移動床実験の結果

(1) 実験条件

数値移動床水路の諸元および実験結果の説明に用いる座標の定義を**図-1**に示す．河床には5粒径（40 mm，50 mm，70 mm，90 mm，120 mm）について，それぞれ4種類の形状の異なる粒子を用い，計20種類の粒子を**図-2**に示す粒度分布に一致するように水路にランダムに敷

表-1　水理量の時間変化

時間	平均水深 (m)			平均流速 (m/s)			*Fr*		
	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大
t = 100 s	0.208	0.236	0.259	1.93	2.12	2.41	1.22	1.40	1.69
t = 200 s	0.219	0.258	0.307	1.63	1.95	2.29	0.94	1.24	1.56
t = 300 s	0.212	0.258	0.370	1.35	1.97	2.36	0.71	1.26	1.64
t = 400 s	0.200	0.268	0.414	1.21	1.93	2.50	0.60	1.22	1.78

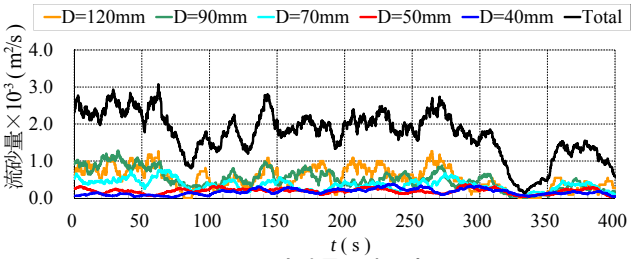

図-5　流砂量の時間変化

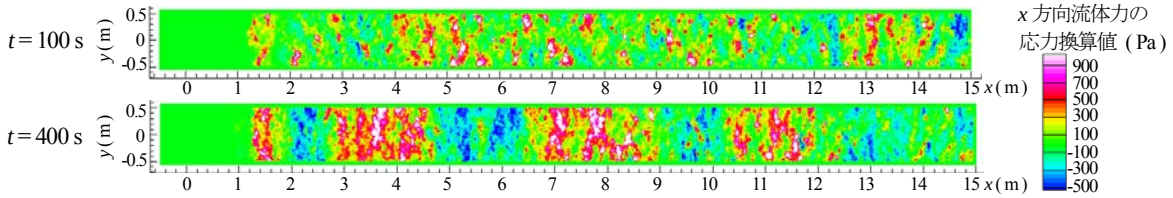

図-6　応力換算した河床に作用する x 方向流体力の平面分布

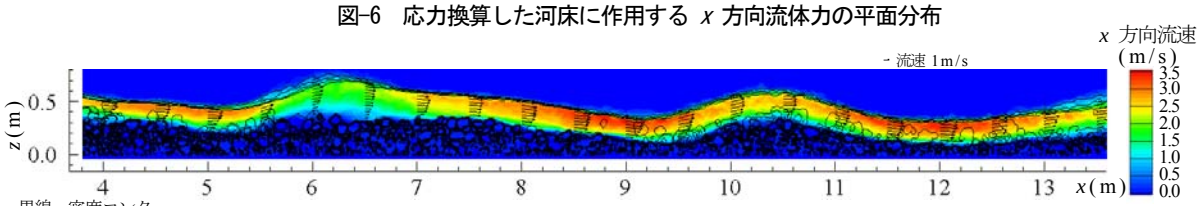

図-7　水路中央部の流れの状況　(t = 390s – 400s の平均値)

き詰めた．ここで粒径は同一体積の球の直径で換算した値である．本稿では，D_{80} 以上となる 90 mm 以上の石礫粒子を大粒径とし，70 mm 以下の粒子を小粒径と定義する．水路には，0.5 m³/sの一定流量を400 s 間通水した．給砂は，下流端を通過した粒子を同時刻に上流の x = 1-2 m の範囲のランダムな位置に落下させて行った．

(2) 流れ，河床高，流砂量の時間変化

数値移動床水路における流れ，河床の変化として**図-3**に横断平均の水位および河床高の縦断形状の時間変化を示す．データは，2秒間の平均値を示している．流れは射流であり，水面は河床面と同位相となっている．また，**図-4**には各時刻の瞬間像を示す．水の流し始めは平坦であった河床が t = 300 s 以降から周期的な反砂堆が見られる．また**図-3**より t = 300 s と t = 400 s の河床高を比較すると反砂堆は上流側に移動していることが確認できる．**表-1**には水理量の時間変化を示す． x = 6 m から x = 15 m の 断面平均水深，断面平均流速，および *Fr* を縦断的に求め，最小値，平均値，最大値を示した．時間が経過し，反砂堆が発達するにつれ，平均流速は減じ，平均水深は大きくなっている．また，水深，流速および *Fr* の各水理量で最大値と最小値の幅は時間の経過とともに大きくなっている．**図-5**には，水路下流端で計測した各粒径の流砂量とその合計を示す．この図より，全流砂量は，時間の経過とともに減少している様子がわかる．また，周期的な反砂堆が発達する t = 300 s 以前の時刻では，大粒径粒子の流砂量が流砂量の半分程度を占めていたが，周期的な反砂堆が形成された後は，大粒径粒子の流砂量が減少し，小粒径粒子と同程度の流砂量となっている．

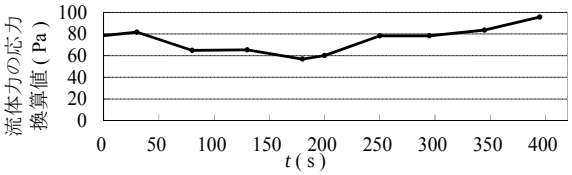

図-8　河床に作用する流体力の応力換算値の時間変化

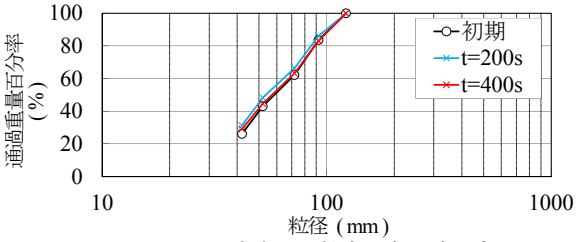

図-9　河床表層の粒度分布の時間変化

(3) 河床の表面構造が流れと粒子運動に及ぼす効果

周期的な反砂堆の形成に伴う流れ，河床構造および粒子運動の変化について，空間的な視点から詳細に調べる．**図-6**は水路底面の 0.01 m 四方の上部に位置する粒子に作用する流下方向の流体力を鉛直 z 方向に積分し 0.01 m × 0.01 m で除し，流体力を応力換算した値[9]の平面分布 を t = 100 s および t = 400 s について示している．この図より，砂堆が発達する以前の t = 100 s の河床では，大きな流体力が作用する地点はまばらに分布している．**図-4**に示す河床表層の構造と合わせて**図-6**を見ると大きな流体力が作用している地点には大きな粒子があることがわかる．一方，t = 400 s の大きな流体力の分布は，x = 3 – 4 m 付近，x = 7 – 8 m 付近および x = 11 – 12 m 付近に集中している．これらの地点には，反砂堆が形成されており，流体力が反砂堆に集中して作用するようになったことがわかる．**図-7**には t = 390 s から t = 400 s

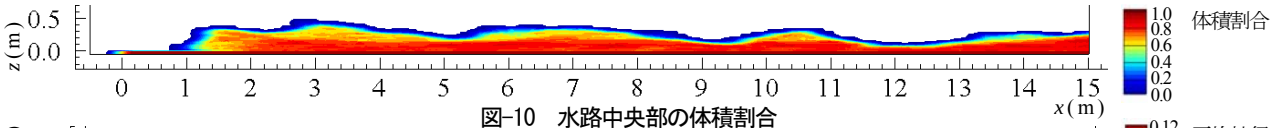

図-10　水路中央部の体積割合

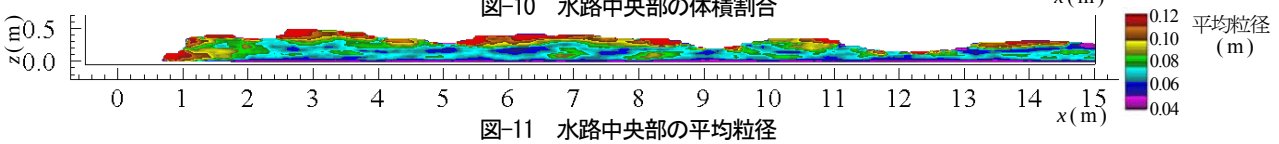

図-11　水路中央部の平均粒径

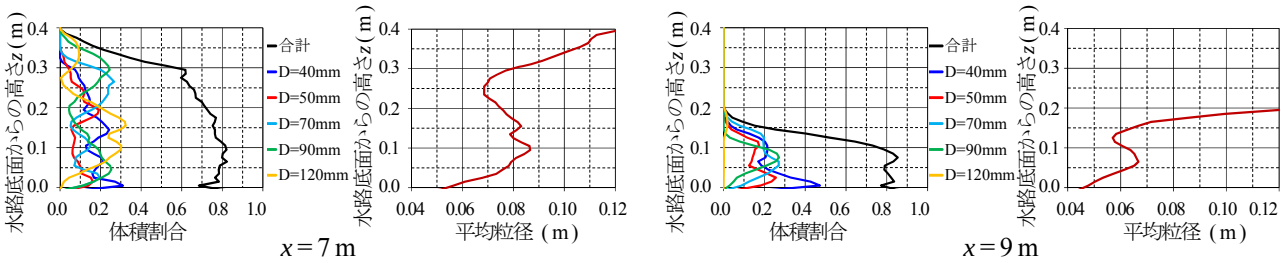

図-12　体積割合の鉛直分布と表層の粒度分布と平均粒径

の水路中央部の時間平均の流れを示す．下流と比較し上流側で流速がやや小さい理由は，流入部に近く流れの発達がやや弱いためである．河床近傍で高速流が発生しているのは，反砂堆下流の谷部に近い個所である．一方，反砂堆の谷部から下流方向に砂堆の頂部に向かって流速は減じていることがわかる．**図-6**に示す河床で流体力が集中する地点は，反砂堆の下流部で河床近傍の流れが加速する地点である．**図-8**には，**図-6**に示す流体力の応力換算値を $x = 6 - 15$ m の範囲で平均化した値の時間変化を示している．この図より，反砂堆が形成され，周期的に発達するにつれ河床に作用する流体力は増加していることがわかる．**図-5**に示す流砂量と**図-8**の河床に作用する流体力の関係を見ると，河床に作用する流体力は増加しているが，流砂量は減少している．このことは，流砂量の評価において河床に作用する流体力だけでなく，河床構造を適切に評価することが重要であることを示している．**図-9**には河床表層の粒度分布の時間変化を示す．**図-8**に示す流体力が最も小さくなる時刻の t = 200 s では初期と比較し，表層の粒径は若干小さくなっているもののほぼ同程度の大きさである．また，周期的な反砂堆が発達した後の t = 400 s では，初期と比較し，必ずしも表層で大きな粒子の占める割合が増加しているわけではないことが確認できる．このことから，鉛直方向の分級により，大きな粒子の割合が河床表面で顕著に増加したため，流体力が増加したのではなく，同じ粒径の粒子が河床表層で平面的に集団化していることが流れに対する抵抗力を高め，流砂量を減じている要因であると推定される．

(4) 河床の鉛直構造

河床の鉛直構造の詳細について考察する．**図-10**は t = 400 s について x - y 方向に 0.4 m 四方，鉛直方向に 0.01 m の範囲の中の粒子の体積割合を求め，水路中央部の x - z 平面について体積割合の分布を示したものである．また，**図-11**には**図-10**と同様の調査範囲に入る粒子の平均粒径を示したものである．**図-12**には河床内部の構造をより詳細に示すため，表層に大粒径粒子が集団化している $x = 7$ m 地点および大粒径粒子が集団化していない反砂堆の谷部の $x = 9$ m 地点の体積割合，平均粒径の鉛直分布を示す．**図-10**，**図-11**および**図-12**より河床の底部では，粒子の体積割合はいずれの地点も概ね 0.8 程度となっていることがわかる．また，**図-12**を見ると反砂堆上部の大粒径粒子が集団化している x = 7 m では，河床底面から上方に向かい 0.15 m 程度の範囲で緩やかに体積割合が減少している．これらの地点の河床表層では，空隙が非常に大きいことがわかる．一方，反砂堆の谷部となっている $x = 9$ m などでは河床底部から上方に向かい 0.1 m 弱の範囲で体積割合が急激に減少しており，空隙の少ない河床表層となっていることがわかる．すなわち大粒径粒子が集団化していない反砂堆の谷部では，河床の体積割合が高くなっており，この谷部の表層の粒子が移動する際は，体積割合が高い空間を移動することとなる．粒子運動における体積割合の効果については次節で説明する．

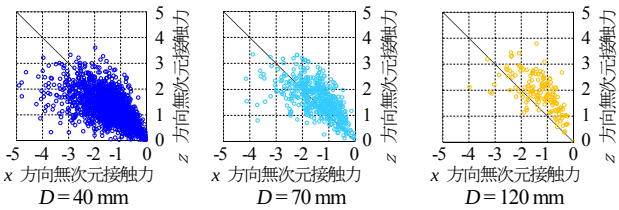

図-13　衝突により作用する接触力の値と向き

4．粒子運動及び河床構造に及ぼす粒子衝突の効果

(1) 粒径毎の粒子衝突の特性が河床構造に及ぼす効果

広い粒径集団からなる石礫河床が，表層で分級が生じることで河床が安定し易くなる．この要因について，粒径毎の粒子の衝突の特性から検討する．各粒径の衝突時に作用する粒子間の接触力の向きを確認するため，**図-**

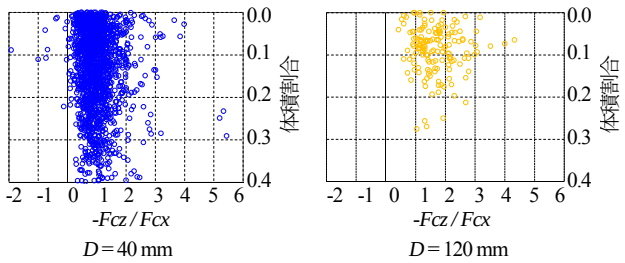

図-14　衝突により作用する接触力の値と向き

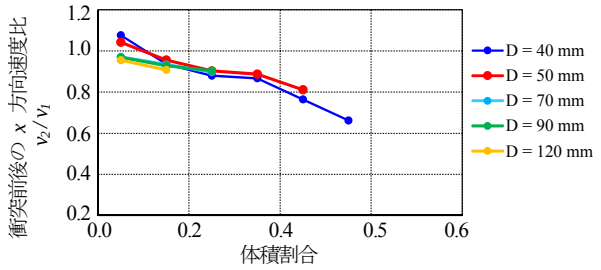

図-15　体積割合と衝突前後の速度比

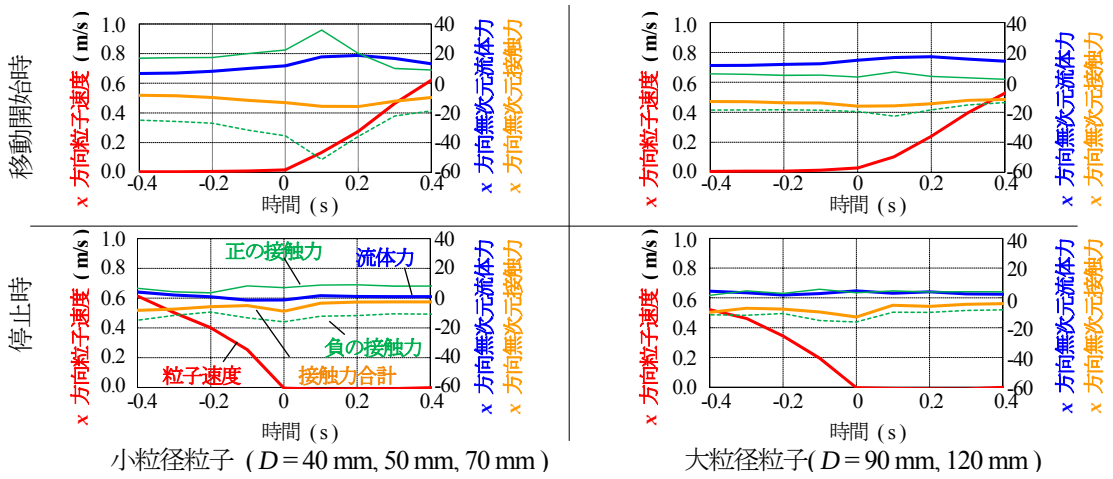

図-16　粒子の移動停止における粒子間衝突の効果

13に衝突時の x 方向および z 方向の接触力の関係を示す．標本は衝突前の速度が 0.1 m/s 以上の粒子としており，接触力は粒子の水中重量で無次元化して示している．これより，大きな粒子と小さな粒子の接触力の向きを比較すると，大きな粒子ほど鉛直上向きの力の割合が高くなっている．これは，次の様に説明される．移動する粒子群の中の大きい粒子と小さい粒子の間に隙間が生じた場合，大きい粒子は多くの地点で他の粒子に支持される傾向が強いため，小さい粒子の方が重力の影響で隙間に落ちやすくなる．結果として大きい粒子の下には小さい粒子が溜まりやすく，大きい粒子は小さい粒子を乗り越えざるを得なくなる．このため，大きい粒子ほど接触力において上向き成分の割合が大きくなると考えられる．この力の向きの差により移動する粒子は，大きな粒子ほど河床表層の高い位置に移動しやすくなる．これが河床表層の鉛直方向の分級の主要因であると考えられる．次に，河床の鉛直位置と衝突の向きの特徴について把握するため，**図-14**に最大粒径の D = 120 mm と最小粒径の D = 40 mm の粒子の衝突についてそれぞれの体積割合と x 方向の衝突力 Fcx に対する z 方向の衝突力 Fcz の比 $-Fcz/Fcx$ の関係を示した．$-Fcz/Fcx$は大きくばらつくため，図には主要な部分のみを拡大して示した．この図より大きな粒子のプロットは体積割合 0 から 0.2 に向かうにつれて$-Fcz/Fcx$ が大きくなる方向にずれている．この理由について考察する．**図-12**より河床の表層の底部では，体積割合は高く，平均粒径は小さくなっている．このため，大きな粒子が体積割合の高い位置で衝突する場合は，相対的に小さな粒子との衝突が多くなるため，衝突力において相対的に上向き成分が大きくなっていると考えられる．

運動する粒子の周囲の体積割合が粒子の衝突および粒子の運動に及ぼす効果を確認するため，衝突前後の粒子速度の比 v_2/v_1（ v_1 : x 方向の衝突直前の速度，v_2 : x 方向の衝突直後の速度 ）を求め，体積割合毎に**図-15**に示す．これより，体積割合が増加するにつれて衝突前後の速度比は大きく減少していく様子がわかる．このことは，体積割合の高い地点では，多少移動しても衝突によりすぐに減速してしまうことを示している．これは，体積割合が高い空間では，衝突を受けた粒子は周囲の粒子から支持され易く，衝突した粒子に強い反力を返すことができるためである．また，衝突を受けた粒子の背後では多くの衝突が生じ，衝撃力が分散し減衰するため，減衰した衝撃力を受けた粒子は容易には動かない．このような衝撃力の分散は，粒子衝突だけでなく，乱れた流れにより大きな流体力が作用する場合にも生じることから，体積割合が高いと粒子衝突や，流れに対して，河床が安定化すると考えられる．

次に石礫河床では分級が生じることで河床が安定する機構について考察する．河床表層で移動する大粒径粒子は，衝突時に小粒径粒子より鉛直上向きに力を受けやすく河床表層の上部を移動する．上部に移動した大粒径粒子は少なく，その体積割合が小さいため，単独では流れに耐えられず流送され，河床に静止する大粒径粒子との衝突等によって静止し，周囲の体積割合を高める．このような現象により，表層に位置するいずれの大きさの粒子も比較的体積割合が高い状況となる．体積割合が高く

なると水流や粒子衝突による衝撃に耐えやすい構造となるため，群として安定化し易くなると考えられる．

(2) 粒子の移動・停止における粒子衝突の効果

粒子の動き出し，停止における粒子間の衝突の効果について分析する．**図-16**には粒子の移動開始および停止時における x 方向の速度，粒子間の接触力および流体力を水中重量の x 方向成分で無次元化した値を示す．また，接触力については，粒子に作用する x 方向の正の値と負の成分に分離した値も合わせて示している．正の接触力は，衝突などにより上流の粒子から受ける力であり，負の接触力は，下流で支える粒子から受ける力である．この図より，小粒径粒子と大粒径粒子の正の方向の接触力を見ると，小粒径粒子は，流体力より大きな接触力を受けており，大粒径粒子は流体力が接触力より大きいことがわかる．これは，小粒径粒子が静止している河床の底部では，粒子の体積割合が高く，他の粒子に挟まれながら，静止していることが要因と考えられる．また，小粒径粒子と大粒径粒子の動き出しの正の接触力の値を見ると，小粒径粒子は大粒径粒子と比較し，大きな正の接触力をきっかけに移動し始めていることがわかる．この正の接触力が小粒径粒子の方が大きい要因は，小粒径粒子は，相対的に移動する大きな粒子からの衝突を受け易いためと考えられる．このことから，小粒径粒子は大粒径粒子との衝突による大きな接触力が移動開始の要因となっている．一方，大粒径粒子は，自身の粒径より相対的に大きな粒子と接触することは少ない．大粒径粒子は相対的に高い位置にいるため大きな流体力が作用するため，衝突による接触力と比較し，流体力の作用により動き出す．一方，停止時の図を見ると小粒径粒子も大粒径粒子も共に流体力は移動時に比べてはるかに小さいことがわかる．これは，**図-7**に示す流れからもわかるように，反砂堆の上流面の河床近傍の流れは，下流方向に減速しており，多くの粒子が砂堆上流面で停止しているためである．また，小粒径粒子は，停止時においても正の接触力を受けている．これは，河床表層の低い位置で群として移動する傾向を持ち，群として停止しているためと考えられる．これらの結果より混合粒径の粒子の運動の推定においては，粒径毎に異なる粒子間の衝突を考慮し，衝突による粒子間の運動量交換を適切に評価する必要があると考えられる．

５．結論

数値移動床水路を用い，種々の形状と大きさを有する粒子群から成る移動床の数値実験を実施した．数値移動床水路内の大きな粒子と小さな粒子の衝突特性の差を明らかにし，これが粒子運動，河床構造に及ぼす効果を考察した．得られた主な結論を以下に示す．

1) 流砂量に関する既往の多くの研究は，粒子の動き出しの要因を抗力と揚力という流体力と関係付けている．しかし，数値移動床水路における粒子に作用する流体力と衝突力の見積もりから，粒子の動き出しには，粒子間の衝突の影響が大きいことが明らかとなった．特に，小粒径粒子ほど相対的に大きな粒子と衝突することにより，大粒径粒子と比較し動き出しの力は，流体力に比べ衝突力による接触力の割合が大きくなる．
2) 河床表層では，粒子が平面的に分級することにより，いずれの粒径の粒子も河床表層で高い体積割合の場所で静止し，流れに抵抗しやすくなることを示した．また，分級により抵抗が増した河床では，流砂量が減じることから，流砂量の評価において分級による河床構造の変化を適切に考慮することが重要であることを示した．

本研究の粒子運動の考察では，混合粒径場の個々の粒子の Lagrange 的運動を正しく理解するため，個々の粒子に作用する力を明らかにした．今後は，石礫河川の土砂移動の評価方法の確立に向け，粒子の群としての運動を Euler 的な枠組みで説明していくことが重要であり，粒子衝突による応力を考察する必要がある．

参考文献

1) 福岡捷二，寺沢直樹，山崎憲人，塚本洋祐：巨石を有する礫床河川の水理，河川技術論文集，第 13 巻，pp.339-344，2007.
2) 長田健吾，福岡捷二：石礫河川の河床変動機構と表層石礫の凹凸分布に着目した二次元河床変動解析法，土木学会論文集 B1（水工学）, Vol.68, No.1, pp.1-20，2012.
3) Hendrick, R. R., Ely, L. L. and Papanicolaou, A. N. : The role of hydrologic processes and geomorphology on the morphology and evolution of sediment clusters in gravel-bed rivers, Geomorphology, Vol.114, pp.483-496, 2010.
4) 原田英治，後藤仁志，鶴田修己 ：粒子流 LES による振動流下シートフロー層のレオロジーの位相特性の検討，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.68, No.2, pp.I_501-I_505, 2012.
5) 牛島省，福谷彰，藤岡奨，禰津家久 ：3 次元流体中を移動する任意形状物体の数値解法，水工学論文集，第 51 巻，pp.847-852，2007.
6) Millane, R. P., Weir, M. I. and Smart, G. M. : Automated analysis of imbrication and flow direction in alluvial sediments using laser-scan data, Journal of Sedimentary Research, Vol.76, pp.1049-1055, 2006.
7) Matsushima, T., Katagiri, J., Uesugi, K., Tsuchiyama, A. and Nakano, T. : 3D shape characterization and image-based DEM simulation of the lunar soil simulant FJS-1 J.Aerospace Engineering, Vol. 22, No. 1, pp.15-23, 2009.
8) 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, No.4, pp.I_937- I_942, 2012.
9) 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_10151- I_1056, 2013.
10) 福岡捷二，奥津一夫，山坂昌成 ：急勾配移動床流れにおける河床波の形状，伝播特性，土木学会論文報告集 第 323 号，pp.77-89, 1982.

(2013. 9. 30受付)