

粒度幅が極端に広い材料からなる河床の
動的平衡状態と流砂現象の解明

Dynamic equilibrium state of riverbed composed of
extremely wide range of sediment grain sizes
and sediment transport

2016年10月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科
建設工学専攻 河川工学研究

平松 裕基

Yuki HIRAMATSU

目次

第1章 序論	1
1.1 研究目的と背景	3
1.2 本研究の着想	6
1.3 本論文の構成	8
参考文献	8
第2章 既往の研究と本研究の位置づけ	9
2.1 既往の研究	11
2.2 既往の研究の問題点と本研究の位置づけ	19
参考文献	21
第3章 実験の概要	23
3.1 実験に用いた装置と模擬河床材料	25
3.2 実験条件	27
3.3 計測項目と実験方法	35
参考文献	38
第4章 河床における遮蔽効果	39
4.1 水流によって移動しないほどの大粒子が与える遮蔽効果	41
4.2 中粒子群が小粒子に与える遮蔽効果	45
参考文献	54
第5章 動的平衡状態における河床の鉛直構造	55
5.1 中粒子と小粒子の供給量に伴う構造の変化	57

5.2 中粒子の供給量の違いが与える影響	70
5.3 河床に作用する平均のせん断力の違いが与える影響	72
5.4 初期状態が与える影響	76
参考文献	77
第 6 章 結論	79
謝辞	85
付録	87
変数リスト	97
図表リスト	99
研究業績一覧	101

第 1 章

序論

1.1 研究目的と背景

河川工学の分野では、水流によって移動する土砂のことを流砂と呼ぶ。この流砂に関わる研究には長い歴史がある。水流によって移動する土砂を見てみると、河床近傍を掃流形式で移動するものと、河床近傍だけでなく水面付近まで浮遊形式で移動するものに分けることができる。前者の移動形態を掃流砂、後者を浮遊砂と呼んで区別してきた。河床材料が均一粒径から構成される場合に関しては、これまでの流砂研究によって河床変動の予測計算が可能になっている。また、複数の粒径の土砂から構成される混合粒径河床に関しても、粒径の幅がある程度に限られていればその土砂移動機構が解明されている。しかしながら、未だ十分に解明されていない現象も取り残されている。それらの問題のうちの一つが、「粒度幅が極端に広い材料から構成される河床上で生じる流砂機構の解明」である。本研究では、この流砂現象の本質に迫ることを目的にしている。このような現象は、例えばダムの直下流域のように土砂移動の連続性が失われた場で見られる。すなわち、ダムを建設するとその上流側から下流側への土砂の移動が妨げられる。そのため、水流の作用によって輸送される中小の砂礫あるいはシルトが離脱すると河床低下が生じる。この状態が長期間にわたって続くと、河床に存在する洪水時でも移動しないほどの大粒径の礫（大礫）が河床表面に露出するようになり、これが河床の骨格を構成することになる。大礫群の間隙には中小の砂礫あるいはシルトが存在しており、これらの土砂の移動は均一粒径の場合と異なる。すなわち、中小の土砂は大礫群の遮蔽の影響を受けながら輸送されることになる。ここで、「遮蔽」とは、大礫群の露出の度合いが大きくなると、その間隙に存在する砂礫あるいはシルトに作用するせん断力が小さくなる現象のことを指す。この遮蔽効果に関する研究も行われているものの、十分な知見が得られたとは言い難い。中小の砂礫あるいはシルトが移動し続けると、河床の低下あるいは材料の粗粒化が生じることになる。なお、粗粒化とは、粒径の小さな材料が離脱するために大きな材料によって河床が構成される状態のことを指す。写真-1は、三保ダム直下流の河川区間の状態を示している。三保ダムは、神奈川県を流れる酒匂川水系の支流である河内川の中流



写真-1 ダムの下流側の河床状態¹⁾: (a) 竣工直後の昭和54年, (b) 竣工からしばらく経過した平成14年, (c) 置き砂実施前, (d) 置き砂実施後の河床状態を示している。

部に位置する。写真-1 (a) は、ダム竣工直後の昭和54年の河床状態を撮影したものである。このときからしばらく時間が経過した平成14年の河床状態を示したのが写真-1 (b) である。(b) の写真を見ると、砂礫の量が減少しており露岩が生じていることがわかる。さらに、河床も2～3m程度低下している。河床低下ならびに材料の粗粒化は、橋脚の露出など河川構造物への被害だけでなく、河川景観の悪化あるいは付着藻類・底生動物の生態系にも影響を与える。これらの河川環境を改善するため、ダムによっては排砂や置き砂などの対策が行われている。排砂とは、ダムの下部に設置されたゲートを通じて貯水池内に堆積した土砂を排出することである。一方、置き砂とは、浚渫された土砂などをダム下流の河道側岸部に設置し、これを洪水時の水流によって流下させることである。写真-1 (c) は置き砂を実施する前を、(d) は実施後の河床状態を示している。(c) ならびに (d) を比較すると、河川環境が改善していることがわかる。しかし、全区間にわたってこのように改善が見られるわけではない。既往

の研究により置き砂の効果を力学的に評価する手法が確立されているわけではない。そのため、河床の構造が時空間的にどのように変わるのか、あるいは生態系にどのような影響を与えるのかについて精確に予測することができず、長期にわたるモニタリングによって対策の効果を評価しているにすぎない。

1.2 本研究の着想

粒度幅が極端に広い河床上で生じる流砂現象を明らかにするための手法について説明する。河床材料は、三つの粒径集団に分けることができる。一つは、洪水時でも移動しないほどの大粒径の礫である。この礫が河床骨格を構成しており、これ以降ではL粒子と呼ぶことにする。L粒子群の間隙には水流の作用により移動する中小の砂礫あるいはシルトが充填されている。この土砂の移動形態を見てみると、掃流砂として移動する中粒子（M粒子）と浮遊砂として移動する小粒子（S粒子）とに分けることができる。すなわち、河床材料は、一般に、L-M-S粒子という三つの粒径集団から構成される。本研究では、この三つの粒径集団をそれぞれ一つの粒径で代表させるとした基礎的な実験を行った。これは流砂現象の本質をより明確にするためである。ただし、実河川ではそれぞれの粒径集団の材料も連続する粒度分布を有している。まず、このような条件下で実験を行い、基礎的な情報を積み上げることが必要である。その上で、より複雑な状況に当たる連続する粒度分布を有する河床への適用を考えていくべきである。なお、各粒径集団をさらに数粒径に分けることにより、連続する粒度分布を有する場に関しても本研究により得られた成果を適用することができるものと考えている。

流砂現象を明らかにするための第一段階として、粒子の遮蔽効果を明らかにするため河床の「静的平衡状態」に着目した検討を行った。まず、L粒子とM粒子、あるいはL粒子とS粒子の二粒径の材料からなる河床を対象にした実験を行うことにより、L粒子がその間隙に存在しているM粒子あるいはS粒子に与える遮蔽の効果を表す関係式を実験的に導いた。次に、三つの粒径の材料から構成される河床に着目することによって、M粒子群がS粒子に与える遮蔽効果について検討した。これらの結果に基づいて、河床全体に作用する掃流力のうち実際に、L粒子、M粒子、S粒子に作用する値を推定することができる。これを踏まえて、研究の第二段階として、上流側から中小の砂礫（M-S粒子）が供給されてくる条件下で到達する河床の「動的平衡状態」についての検討を行った。なお、ここではL粒子は水流によって移動する

ことはないため、上流からの供給もないとした。

1.3 本論文の構成

本論文は、以下の6章からなる。

第1章は「序論」であり、本研究の目的ならびに背景について説明するとともに、本論文の構成をまとめる。

第2章は「既往の研究と本研究の位置づけ」であり、本研究に関連する既往の研究について説明する。これにより、既往の研究の問題点を踏まえて、その中での本研究の位置づけを明確にする。

第3章は「実験の概要」であり、実験に用いた装置と模擬河床材料、実験条件、河床の平衡状態の鉛直構造についての計測項目と実験方法について述べる。

第4章ならびに第5章は粒度幅が極端に広い河床の平衡状態に着目した実験の結果である。第4章では大粒子の露出度に応じてその間隙に存在する中小の粒子に作用する掃流力は低下することになるが、この大粒子群が中小粒子に、また、中粒子群が小粒子に与える「遮蔽効果」について説明する。これによって、河床表面に位置する中粒子あるいは小粒子の上面に実際に作用する摩擦速度の値を推定することができる。第5章では「動的平衡状態に達した河床の鉛直構造について論じる。ここでは、次の3つの影響について検討した。(a) 中小粒子の供給量ならびにその混合比率が河床の鉛直構造に与える影響、(b) 河床に作用する流れの掃流力の影響、(c) 中粒子の供給量の違いが与える影響、(d) 初期河床状態の違いによる影響である。

第6章は「結論」であり、本研究により得られた結果を取りまとめるとともに、今後の課題について整理する。

参考文献

- 1) 「相模川川づくりのための土砂環境整備検討会」, 第2回検討会資料, 神奈川県, 国土交通省景品河川事務所, 2005, http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000046432.pdf, (アクセス日: 2016/3/1)

第2章

既往の研究と本研究の位置づけ

2.1 既往の研究

粒度幅の広い材料からなる河床を対象にした既往の研究についてまとめることによって、本研究の位置づけを明らかにする。芦田・藤田^{1), 2)}は、粗砂が細砂に与える遮蔽の効果と、それを考慮した細砂の巻き上げ速度の予測式を提案した。まず、粗面河床付近の流れについて検討した。実験では、幅 0.3 m、長さ 8 m、勾配 1/1000 の水路が用いられた。この水路の底面には平均粒径 4.8 mm の礫が一様に敷き詰められている。水素気泡法を用いて粗面河床付近の流れの特性について検討した。流量は 1.2 l/s、水深は 0.028 m、摩擦速度は 0.015 m/s の条件下で実験が行われた。その結果、バースティング現象として知られるエジェクションとスウィープが生じていることを観察した。また、上昇流速と乱れの寿命時間との関係を近似的に求めた。次に、粒子の浮遊現象について検討した。水路ならびに水理条件は前述と同様のものとした。粒径 1.4 mm、比重 1.05、沈降速度 0.0188 m/s のポリスチレン粒子を礫の間に充填し、染料としてローダミン B 溶液を用いることにより、ポリスチレン粒子の浮遊状況と流れを観察した。粒子に作用する外力を検討することによって、この実験での浮遊現象は揚圧力による影響が支配的であったことがわかった。さらに、粒子の浮遊限界を明らかにするため粗砂と細砂を用いた実験が行われた。水路の幅ならびに長さは前述のものと同じであるが、水路の勾配は任意の値に変えることができる。粗砂として 3 mm あるいは 4.8 mm の粒子を、細砂として 0.044 ~ 0.420 mm の範囲内を 6 つの粒径集団に分けられた A ~ F 砂が用いられた。3 mm の粗砂の頂部まで A ~ F 砂が充填された場合と、3 mm あるいは 4 mm の礫群の間隙の一部が 0.044 ~ 0.074 mm あるいは 0.149 ~ 0.177 mm の砂によって充填される場合という大きく分けて二つの条件下で実験が行われた。前者では掃流力を異なる値に設定することによって、粒子の移動状況や掃流砂量ならびに浮遊砂量に与える影響に着目した。一方、後者では掃流力の変化が粒子の移動状況に与える影響に着目した。その結果、粒径が 0.15 mm より大きい場合には、静止している状態から掃流砂として移動する状態、さらに浮遊砂として移動する状態へと徐々に移行する。一方、0.15 mm より小さい場合には、静止してい

る状態から掃流砂として移動する状態に移行すると急激に浮遊砂量が大きくなった。また、粗砂が露出している度合いに応じて浮遊限界となる河床に作用する摩擦速度の平均値が異なることがわかった。これが粗砂の遮蔽効果である。すなわち、粗砂の露出の度合いが大きくなると、浮遊限界の摩擦速度の平均値も大きくなる。これらの実験結果を踏まえて理論的な検討を行った。揚圧力によって粒子が浮遊することから揚圧力係数と粒子レイノルズ数の関係を推定した。この関係を用いることにより、粗砂の露出の度合いと遮蔽係数の間の関係を求めた。この関係によって、粗砂の間隙に充填されている細砂に作用する摩擦速度を求めることができる。さらに、浮遊粒子の運動をモデル化して確率過程論的な手法を用いることにより、細砂の巻き上げ速度予測式を提案した。従来、浮遊砂量を求めるときに多く用いられた芦田・道上の式³⁾ならびに板倉・岸の式⁴⁾と芦田・藤田の式を比較すると、概ね同じ傾向になった。ただし、芦田・藤田の式の方が浮遊限界付近での適合性が高く、摩擦速度の変化に伴う浮遊砂濃度の変化が小さい傾向にあることがわかった。

藤田・山原ら⁵⁾は、移動しない大粒子群の間隙に細砂が堆積する状況に関する実験的検討を行っている。実験では、長さ 30 m, 幅 1 m, 勾配 1/100 の開水路が用いられた。実験の条件は大粒子群の配置の違いによって大きく二つに分けることができる。一つは、粒径 96 mm のモルタル製の半球（半球擬礫）が互いに密に接するように千鳥状に配置された場合である。もう一つは、自然河川から採取した栗石（自然礫）が密な千鳥状に配置された場合である。なお、自然礫の粒径は 80 ~ 120 mm であり、平均粒径は約 100 mm である。自然礫は鉛直方向に二層設置されており、礫の天端高の誤差は 10 mm 以内、水路底面から天端までの鉛直距離は 133 mm とした。細砂として、粒径が 0.4 mm あるいは 0.8 mm の珪砂が用いられている。流量は 50, 100 l/s の二つの条件であり、摩擦速度 u^* と沈降速度 w_o の比 u^*/w_o は 1.2 ~ 2.2 の範囲内に設定されている。砂の供給量は $0 \sim 2.3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ とした。実験の結果、給砂量が大きくなると粗度係数が小さくなる傾向にあるものの、給砂量に応じた粗度係数の変化は彼らの実験の範囲内では小さいことがわかった。また、給砂量が大きくなるにつれて細砂

の上面の位置が高くなることがわかった。しかし、最大の給砂量の条件下であっても大粒子が埋没する状態に到ることはなかった。半球擬礫と自然礫を用いた実験の結果を比較すると、同一の水理条件、給砂条件であっても細砂の上面の位置が異なることがわかった。具体的には、給砂量が大きい条件下では自然礫の方が半球擬礫より細砂の上面が高い傾向にある。しかしながら、同じ位置での河床表面に占める細砂の面積比率は自然礫の方が大きくなっている。このことから、細砂の上面の高さが異なることは、大粒子の形状の違いによって生じる細砂の面積比率の変化が要因ではなく、大粒子の形状あるいはその配置が遮蔽効果に影響を与えていることを意味している。さらに、板倉・岸の式⁴⁾ならびに芦田・藤田の式²⁾から算出された浮遊砂量と実測値との比較も行っている。河床表面に占める細砂の面積比率は大粒子の露出の度合いに応じて変化する。しかし、この面積比率を考慮したのみでは板倉・岸の式により評価された浮遊砂量は実験値と比べると大きな値になることがわかった。これは、大粒子の遮蔽の効果を考慮していないためである。次に、遮蔽効果を考慮している芦田・藤田の式では、細砂の上面の位置が高くなると巻き上げ速度が大きくなる傾向は再現できている。しかし、細砂の上面の高さの変化に伴う巻き上げ速度の変化が小さく評価されている傾向にあった。これは、芦田・藤田の実験と比較すると、水深と粗度高の比が小さく、粒子レイノルズ数が大きいことによって生じたと考えられている。

次に、福島・櫻井・箱石⁶⁾は、河床の単位面積当たりの大粒子の個数を異なる条件に設定することによって、流砂量、粒径毎の流砂の移動速度、移動層厚に与える影響に関して考察している。実験に用いた装置は、長さ 30 m、幅 1 m、勾配 1/100 の開水路である。河床材料として、粒径が 100 mm の概ね均一な大礫と、平均粒径が 15 mm、最大粒径が 45 mm 程度の砂礫が用いられている。河床の単位面積当たりの大粒子の個数を 0 ~ 30.2 % の範囲内の 7 パターンとし、流量を 0.18 ~ 0.52 m³/s の範囲内の値にした。実験の結果、大粒子の比率が大きくなると流砂量が減少することがわかる。また、側壁の影響を除去した摩擦速度を芦田・道上の式⁷⁾に代入することにより掃流砂量を評価した。また、移動限界の値は芦田・道上による修正 Egiazaroff の式⁸⁾

が用いられている。その結果、大粒子の比率が大きくなることによる掃流砂量の減少を概ね評価できていることがわかる。ただし、大粒子が河床に存在しない砂礫のみからなる河床の掃流砂量の計算値が実験値と比べて最も適合性が低いことから、この研究のみによって従来の成果で十分であると判断するのは難しいと考えられる。彼らも、この実験の条件の範囲内では従来の式によって十分に評価できると述べるに留めている。次に、大粒子の比率が大きくなることによって、粒子の移動速度が低下する傾向が見られた。ただし、実験結果にはばらつきも認められ、単調に変化すると断言するのは難しい。また、移動層厚に関する検討もなされており、いずれの結果も最大粒径と最小粒径の範囲内の値になった。ただし、この移動速度と移動層厚の検討では粒子を供給してから約5分間通水した後の結果が示されている。この間に粒子の交換が十分になされたか否かの議論についてはなされていない。

長田・福岡ら⁹⁾は、モーメントの釣り合い式によって土砂粒子が離脱するか否かを判定するといった石礫河川の変動解析を行っている。しかし、更なる検証が必要なものも多く残されており、この研究成果のみに基づいて力学原理に則った数値計算手法を確立するのは難しい。

また、混合粒径河床の変動について考える際には、空隙率に関する情報が必要になる。そこで、堤・藤田・Sulaiman¹⁰⁾は、混合粒径材料の空隙率を計算する手法を新たに提案した。なお、空隙率とは河床全体の体積に占める空隙の比率のことである。粒子を充填する際、設置できる場所のうち最低の位置を選ぶという考え方に基づいて空隙率を計算した。この計算結果と実験から得られたものとを比較することによって、計算手法の妥当性を検証した。その結果、粒度分布の幅が大きくなるにつれて、空隙率が減少することがわかった。さらに、この手法を用いた計算結果と実験結果は十分な精度で一致することが確認できた。粒度の幅が大きくなると空隙率は0.2以下にもなるという結果が得られ、従来の河床変動計算で用いられてきた0.4よりもはるかに小さな値になった。これらの結果は球形の粒子を対象にしており、非球形の粒子の場合の検討も課題として挙げられているものの、空隙率を取り扱うに当たり非常に有用

な手法であると考えられる。ただし、この手法では最低位置を選択するため、土砂粒子が密な充填構造になっており、締固め度は考慮できない。すなわち、密に河床材料が充填されていない場には適用することができない。

芦田・藤田による研究では遮蔽係数を導入し、砂礫に実際に作用する摩擦速度を算出することによって流砂量を評価することを目指した。一方、Egiazaroff¹¹⁾は、粒径別の限界掃流力を均一粒径の場合と異なる値にすることによって粒径別の流砂量を評価することを目指した。これらは、大きな砂礫が小さな砂礫に与える遮蔽効果を考慮した研究である。Egiazaroffは、平均粒径 D_m に対する着目する土砂の粒径 D_i の比からその土砂の無次元限界掃流力 τ^*_{ci} を求める式を提案した。この式は芦田・道上⁸⁾によって修正され、多くの河床変動解析で用いられている。ただし、この式は粒度幅が極端に広い材料から構成される河床を対象にしたものではないことに注意を要する。また、Miwa and Parker¹²⁾は細砂が礫の間隙に充填されると礫の移動限界掃流力が均一粒径の場合と比較して小さくなる効果について検討している。実験に用いた装置は、長さ16 m、幅0.5 m、勾配は1/100あるいは1/50の開水路である。河床材料は、14.3 mmあるいは7.1 mmの礫と1.4 mmの砂が用いられた。これらの材料は掃流砂として移動する。砂と礫の総体積に占める砂の比率を0～0.8、流量を10～50 l/sの範囲内の値に設定した。実験の結果、砂の比率が0.4より小さい場合には、砂の比率が大きくなるにつれて礫の無次元限界掃流力が小さくなった。これは、礫の摩擦角が小さくなることによって生じると推察されている。一方、砂の比率が0.4より大きい場合には、砂の比率が大きくなるにつれて礫の無次元限界掃流力も大きくなる傾向にあった。これは、礫が骨格を構成する状態から砂が主として存在する状態に変わったためであると説明されている。砂の比率に伴う礫の無次元限界掃流力の変化は砂と礫の粒径比に依存し、必ずしもEgiazaroffの式によって十分な精度で評価されるわけではないことがわかった。彼らは下流端から流出した礫の個数によって移動限界の状態にあることを判断した。しかし、砂の比率が大きい場合には河床に存在する礫の個数が少ないため、流出する個数から移動限界の状態を判断することが砂の比率を異な

る値に設定したすべての条件を通じて同じ移動限界状態になっているかは検討の余地があると考えられる。

また、Blaschke *et al.*¹³⁾, Datry *et al.*¹⁴⁾, Gibson *et al.*¹⁵⁾ は礫群の間隙に砂が充填していく過程に着目した検討を行っている。この過程を Clogging process と呼んでいる。本研究では河床変動過程を力学的な観点から明らかにすることを目指しており、アプローチの方法は異なるものの同様の現象を対象にした研究が行われている。Blaschke *et al.*¹³⁾ の研究の目的は、次の4つである。(a) 時空間的な Clogging process を解析すること、(b) Clogging process が水の収支に与える影響を明らかにすること、(c) 砂によって充填された礫群の層の厚さを推定すること、(d) Clogging process に影響を与える生物学的な活動の存在を特定することである。Clogging process は clogging cycles と de-clogging episodes からなる。clogging cycle は洪水によって始まる。その後、洪水の流量が小さくなると、浸透係数が段階的に減少していく新しい clogging episode が始まる。この浸透係数の減少は、砂によって充填された礫群の表面上にさらに砂が堆積することによって生じる。浸透係数の減少は、堆積の過程が平衡状態に到るまで続く。それぞれの clogging cycle が疑似的な平衡状態に到るまでの期間は数週間であった。これは実験室内で行われた既往の研究の結果^{16), 17)} と一致するものである。しかし、大規模な現地観測^{18), 19)} では3年から4年を要する。Blaschke *et al.* の研究によって、前者は単一の clogging cycle を調べているのに対して、後者は複数のものの累積的な効果を対象にしているためであることがわかった。また、1996～2011年まで水収支の関係から浸透流量を求めた。その結果、1997年に貯水量が一杯になったため、浸透流量は急激に増加した。一方、1998～2001年にかけて clogging の効果により浸透流量は最大値と比較して50%程度にまで減少した。さらに、砂によって充填された礫群の層の厚さは、河床表面から2 cm程度であったことがわかった。ビデオモニタリングの結果、生物学的な活動が砂により充填された礫群の層の透水係数に影響を与えることがわかったものの、これを定量的に評価するのは難しい。

Datry *et al.*¹⁴⁾ の研究の主たる目的は、clogging が生じている河床であるか否かを透

水係数によって判断できるかどうかを明らかにすることである。フランスの 101 の河川区間を対象に、2 年間にわたって透水係数を計測した。その結果、clogging が生じている場合の方が 50 % 以上透水係数の値が小さくなった。また、夏と冬で計測を行うことによって、季節が透水係数に与える影響はないことがわかった。これらの結果は計測者によって変わることはない。

Gibson *et al.*¹⁰⁾ は、礫群の間隙に砂が充填される河床の鉛直方向の粒度分布を明らかにすることを目指した。実験に用いた装置は、長さ 26 m、幅 0.9 m、勾配 1/500 あるいは 3/1000 の開水路である。河床材料は、60 % 粒径が 8 mm 程度の礫と、0.1 ~ 0.5 mm 程度の 4 種類の砂が用いられている。砂の粒径を異なる値に設定しているのは、礫と砂の粒径の比によって現れる状態も異なるためである。実験条件としては、水量を概ね同じものとした上で、砂の粒径のみを異なる値に設定した 4 つを行った。さらに、砂の粒径が最も小さいものを除いた 3 つの砂の場合には掃流力がより大きな条件での実験も行われた。以上の 7 つの条件下で実験は行われた。前者では流量を 0.085 m³/s 程度、勾配を 1/500 に設定し、河床に作用する掃流力は 2.5 N/m² 程度であった。一方、後者では流量を 0.093 m³/s 程度、勾配を 3/1000 とし、掃流力は 3.5 N/m² であった。砂の供給量は 3.8 ~ 5.7 × 10⁻⁵ m³/s の範囲内の値に設定されている。この値は、既往の流砂量式から評価した水流によって輸送可能な量に等しいものとした。なお、いずれの実験でも水深は 0.14 m 程度であった。礫と砂の粒径の比が大きい場合には、供給された砂が礫群の間隙に入り込み、底面から徐々に充填されていく。これを "unimpeded static percolation" と呼んできた。一方、礫の粒径に対して砂が大きい場合には、砂が底面まで入り込むことはなく、河床表面の一部に礫と砂の層が生じる状態になる。この状態が "fine bridging" と呼ばれる。この二つの境界について検討した。その結果、砂の 85 % 粒径 d_{85sand} に対する礫の 15 % 粒径 $d_{15gravel}$ の比 $d_{15gravel} / d_{85sand}$ が 15.4 より大きい場合には unimpeded static percolation が見られた。一方、 $d_{15gravel} / d_{85sand}$ が 10.6 より小さい場合には fine bridging の状態になった。このことから、二つの境界は 10.6 ~ 15.4 の間にあることがわかった。礫群の間隙に充填された砂の粒度分布を

見てみると、河床表面から深くなるにつれて粒径が細かくなっていく。この傾向は **bridging process** あるいは **percolation process** のどちらが支配的であっても関係なく全ての実験を通じて現れる。 **unimpeded static percolation** では河床に作用する掃流力が砂の比率に与える影響はなかった。一方、 **bridging** の場合には掃流力を大きな値に設定すると、砂の比率が小さくなった。

2.2 既往の研究の問題点と本研究の位置づけ

前述のように混合粒径河床を対象にした研究は行われてきている。河床骨格を構成する L 粒子群の間隙に浮遊砂として移動する S 粒子が充填される河床を対象にした研究が、芦田・藤田^{1), 2)}、藤田・山原ら⁵⁾、Blaschke *et al.*¹³⁾、Datry *et al.*¹⁴⁾、Gibson *et al.*¹⁵⁾ によるものである。芦田・藤田の研究では、粗砂の粒径が本研究の M 粒子と同程度であるものの、水流によって移動しないことから L 粒子に相当する。また、L 粒子と掃流砂として移動する M 粒子とからなる河床を対象にしたのが福島・櫻井・箱石による研究である。このように河床が二粒径から構成される場を対象にした検討は行われてきているものの、河床が三つの粒径集団からなる場を対象にした検討は行われてきていない。また、堤・藤田・Sulaiman¹⁰⁾ は粒度分布に応じた空隙率の変化を明らかにした。ただし、締固めの影響を考慮することなく河床材料が密に充填された場合のみの検討であるという問題点もある。これらの結果を踏まえて、本研究では L-M-S 粒子という三つの粒径集団によって構成される河床上で生じる流砂現象を明らかにするよう努めた。

従来¹⁾の知見に基づいて混合粒径河床の変動解析を行う場合、次の式が基礎式となる。(a) 遮蔽効果を表す芦田・道上による修正 Egiazaroff の式⁸⁾、(b) M 粒子の移動量についての Meyer-Peyer and Müller の式²⁰⁾ あるいは芦田・道上の式⁷⁾、(c) S 粒子の移動量については芦田・藤田^{1), 2)} の S 粒子の巻き上げ速度式と、Rouse の濃度分布式から浮遊砂量を算出、(d) 空隙率を一定として河床変動量を計算する土砂の連続式、(e) 交換層の厚さを最大粒径程度²¹⁾ として粒径階層毎の連続式、などである。しかし、この方法では L 粒子群の間隙で生じる鉛直分級を考慮することができない。さらに、これらの式（例えば、修正 Egiazaroff の式、Meyer-Peyer and Müller の式、Rouse の濃度分布式）では、水深が河床材料の粒径の数十倍から数百倍程度の現象を対象にしている。一方、本研究で行われた実験での水深は、L 粒子の粒径の 1 から 2 倍程度であり、対象にしている条件が明らかに異なる。また、主として行われた実験での水深の値は、L 粒子の露出の度合いの 10 倍程度に相当している。この L 粒子の露出の度合いと比

較しても、従来の研究で対象とした水深の粒径に対する比よりもかなり小さな値になる。この違いが流砂機構に与える影響に関しては今後明らかにしていくべき課題であると位置づけている。また、修正 Egiazaroff の式は本研究で取り扱っているような粒度幅が極端に広い材料からなる河床を対象に導かれた関係ではない。そのため、L 粒子が与える遮蔽効果を十分に推定することはできない。例えば、L 粒子の間隙に M 粒子、あるいは S 粒子が充填されていくにつれて、L 粒子は移動し難くなると考えられる。これは、L 粒子に作用する流体力が小さくなるためである。Egiazaroff の関係は、式 (1) で表される。

$$\begin{aligned} \frac{D_m}{D_i} \leq 0.4 : \quad & \frac{\tau_{ci}^*}{\tau_{cm}^*} = 0.85 \times \frac{D_m}{D_i} \\ \frac{D_m}{D_i} > 0.4 : \quad & \frac{\tau_{ci}^*}{\tau_{cm}^*} = \left[\frac{\log_e 19}{\log_e (19 D_i / D_m)} \right]^2 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 D_i は着目している土砂の粒径、 D_m は平均粒径、 τ_{ci}^* は着目している土砂の無次元限界掃流力、 τ_{cm}^* は平均粒径の無次元限界掃流力を表している。L 粒子は平均粒径より大きいため、式 (1) の下段の関係で表される。L 粒子の間隙に小さな粒径の土砂が充填されるにつれて、平均粒径 D_m は小さくなる。そのため、式 (1) を用いると τ_{ci}^* は小さくなる。これは L 粒子が移動しやすくなるということを意味している。前述のように、L 粒子の間隙に小さな土砂が充填されると L 粒子が移動し難くなるという事実と矛盾が生じている。そのため、粒度幅が極端に広い材料からなる河床に Egiazaroff の式を適用することはできないと考えられる。従来の河床変動計算では、空隙率を 0.4 という一定の値として取り扱ってきた。しかし、混合粒径河床の場合には粒度分布に応じて空隙率も異なる値をとる。例えば、L 粒子のような移動しない材料を河床に含む場合を考えてみる。この粒子が密な格子状に配置されている条件下で、L 粒子の頂部まで M 粒子が充填されているときの空隙率は 0.2 である。一方、L 粒子が 1 個分露出しているときの空隙率は 0.5 である。このように空隙率の値は大きく変わることになり一定と見なすことはできない。土砂の輸送に伴う河床変動量は土砂の

連続式により評価される。この式中に現れる空隙率が 0.2 ~ 0.5 の範囲で変化するにもかかわらず、これを 0.4 として一定の値と仮定すると、河床変動量に無視し得ない誤差が生じることになる。また、L 粒子は移動しないためその頂部の高さは変わることはないが、土砂の浸食が生じる場合には計算上 L 粒子頂部の位置よりも低い値に評価されてしまう。粒度分布の計算では粒径別の土砂の連続式により評価される。この式中の交換層の厚さはこれまで最大粒径程度とされてきた²¹⁾。この最大粒径を河床構成材料の最大粒径と見なすと L 粒子、移動する砂礫に対するものとする M 粒子ということになる。これに対して、本論文中で後述するように交換層の厚さは M 粒子の粒径の 1.5 ~ 3.0 倍程度の値となり、上記の評価方法のいずれであっても明らかに過大あるいは過小評価となる。以上のように従来知見のみでは粒度幅が極端に広い河床の変動を十分な精度で予測することはできないと推察される。

参考文献

- 1) 芦田和男, 藤田正治: 河床粒子の浮遊機構とそのモデル化, 土木学会論文集, 第 275 号 /II-6, pp.79-88, 1986.
- 2) 芦田和男, 藤田正治: 平衡および非平衡浮遊砂量算定の確率モデル, 土木学会論文集, 第 375 号 /II-6, pp.107-116, 1986.
- 3) 芦田和男, 道上正規: 浮遊砂に関する研究 (1) - 底面付近の濃度 -, 京都大学防災研究所年報, 第 13 号 B, pp.233-242, 1970.
- 4) Itakura, T. and Kishi, T.: Open Channel Flow with Suspended Sediments, Proc. ASCE, HY8, August, pp. 1325- 1343, 1980.
- 5) 藤田光一, 山原康嗣, 富田陽子, 伊藤嘉奈子, 小路剛志: 大礫床表面における砂の堆積状況と浮遊砂量との関係についての実験的研究, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.547-552, 2008.
- 6) 福島雅紀, 櫻井寿之, 箱石憲昭: 大きな石による河床再生技術に関する実験的検討, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.763-768, 2010.
- 7) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 206 号, pp.59-69, 1972.

- 8) 芦田和男, 道上正規: 混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 14 号 B, pp.259-273, 1971.
- 9) 長田健吾, 福岡捷二, 岡田昌之: 石礫河川の二次元河床変動解析法を用いた安倍川網状流路の数値解析, 水工学論文集, 第 54 巻, pp. 769 - 774, 2010.
- 10) 堤大三, 藤田正治, Muhammad Sulaiman: 混合砂礫河床材料の空隙に関するシミュレーションモデル, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.1021-1026, 2006.
- 11) Egiazaroff, I.V. :Calculation of nonuniform sediment concentrations, Proc. of ASCE, Journal of the Hydraulics, 91, HY4, pp.225-247, 1965.
- 12) Miwa, H., Parker, G. : Effects of fine sand on incipient motion of coarse gravel in a gravel-bed river, Gravel Bed Rivers 8, 2015.
- 13) Blaschke, A.P., Steiner, K.H., Schmalfuss, R., Gutknecht, D. and Sengschmitt, D. : Clogging Processes in Hyporheic Interstices of an Impounded River, the Danube at Vienna, Austria, International Review of Hydrobiology, 88(3-4), pp.397-413, 2003.
- 14) Datry, T., Lamouroux, N., Thivin, G., Descoux, S. and Baudoin, J.M. : Estimation of sediment hydraulic conductivity in river reaches and its potential use to evaluate streambed clogging, River Research and Applications, 2014.
- 15) Gibson, S., Abraham, D., Heath, R. and Schoellhamer, D. : Vertical gradational variability of fines deposited in a gravel framework, Sedimentology, 56(3), pp.661-676, 2009.
- 16) Cunningham, A. B., Anderson, C. J. and Bouwer, H. : Effects of Sediment Laden Flow on Channel Bed Clogging. – J. of Irrigation and Drainage Eng., ASCE. Vol. 113, pp.106–118, 1987.
- 17) Schälchli, U. : Die Kolmation von Fließgewässersohlen: Prozesse und Berechnungsgrundlagen. – Technischen Hochschule Zürich (VAW). Nr. 124, 1993.
- 18) Ingerle, K. : Über die Flußbettdurchlässigkeit und die Sauerstoffzehrung des Uferfiltrates im Staubereich von Donaukraftwerken. – Wasserwirtschaft, 81. Jg. , pp.415–422, 1991.
- 19) Joppen, M., Sulser, P., Blaser, P. and Kohler, A. : Einfluß der Stauregelung auf Grundwasser. Wasserbau München–Oberrach, Mitteilung Nr. 73, pp.365–375, 1992.
- 20) Meyer-Peter, E., and Müller, R. : Formulas for bed-load transport, Proc., 2nd Meeting, IAHR, Stockholm, Sweden, pp. 39–64, 1948.
- 21) 平野宗夫: Armoring をともなう河床低下について, 土木学会論文報告集, 第 195 号, pp.55-65, 1971.

第 3 章 実験の概要

3.1 実験に用いた装置と模擬河床材料

本研究では、二つの水路を用いて実験が行われた。一つは、**図-1 (a)**に示すような長さ 5 m、幅 0.1 m、高さ 0.1 m の正方形断面を有するアクリル製の閉管路である。この水路を用いた一連の実験を Experimental Set 1 と呼ぶ。もう一つは、**図-1 (b)**に示すような長さ 16 m、幅 0.2 m、勾配 1/250 のアクリル製の開水路である。この実験を Experimental Set 2 と呼ぶ。閉管路の上流端から 2.5 ~ 3.5 m の区間、ならびに開水路の上流端から 8.5 ~ 14 m の区間には深さ 0.05 m の凹部があり、ここに後述する材料を敷き詰めて移動床区間とした。これらの区間の上下流側の底面ならびに閉管路の天井には M 粒子と同程度の粗度を有するゴム板が貼り付けられている。この粗度は、水の流れが移動床区間に到達するまでに境界層が十分に発達した状態となるようにするためのものである。閉管路では圧力差を計測するため、移動床区間の上流端ならびに下流端からそれぞれ 0.25 m 離れた位置の側壁に小さな孔が開けられている。

模擬河床材料としては、次のものが用いられた。L 粒子としては、**写真-2 (a)**中の右側に示された粒径 $D_L = 50$ (mm) のアルミナ製の球（比重 3.98）を用いた。これ以外にも、**写真-2 (a)**中の左側のような粒径 $D_L = 40$ (mm) のアルミナ製の球（比重 3.60）を用いた実験も行っている。L 粒子を密な千鳥状に配置した場合には $D_L = 40$ (mm) を、それ以外の配置の場合には $D_L = 50$ (mm) のものを L 粒子として用いている。なお、これらの L 粒子が通水中に移動することはなく、比重の違いが結果に与える影響もない。この L 粒子群の間隙を充填する材料としては、**写真-2 (b), (c)**に示すような粒径 $D_M = 5$ (mm) あるいは 2 (mm) のガラスビーズ（いずれも比重 2.5）を M 粒子、**写真-2 (d)**に示す粒径 $D_S = 0.21$ (mm) の珪砂（比重 2.65）を S 粒子とした。このように、L-M-S 粒子の三つの粒径の間にはそれぞれ 1 オーダー程度の差があるものとした。Experimental Set 1 では $D_M = 5$ (mm)、Experimental Set 2 では $D_M = 2$ (mm) の M 粒子を用いて実験が行われた。なお、無次元限界掃流力は前者の場合には $\tau_{MC}^* = 0.042$ 、後者の場合には $\tau_{MC}^* = 0.050$ であり、S 粒子の沈降速度は $w_{oS} = 0.025$ (m/s) である。また、M 粒子と S 粒子の比重の違いが結果に影響を与えないことを確認するため、M 粒子

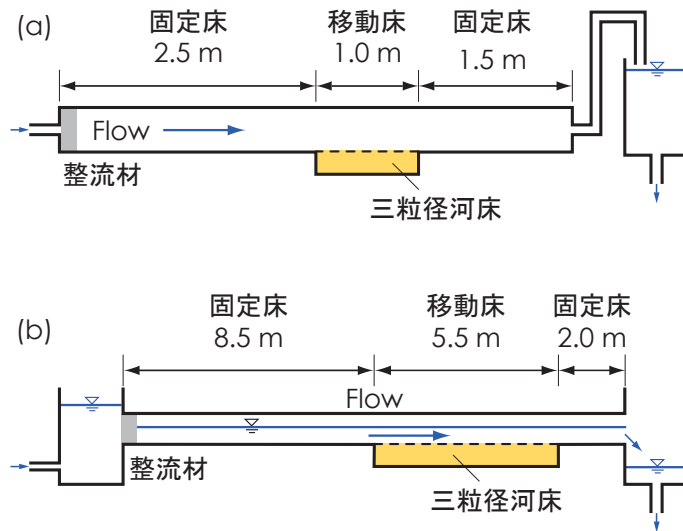


図-1 実験に用いた装置の概略図：(a) 開水路，(b) 閉管路

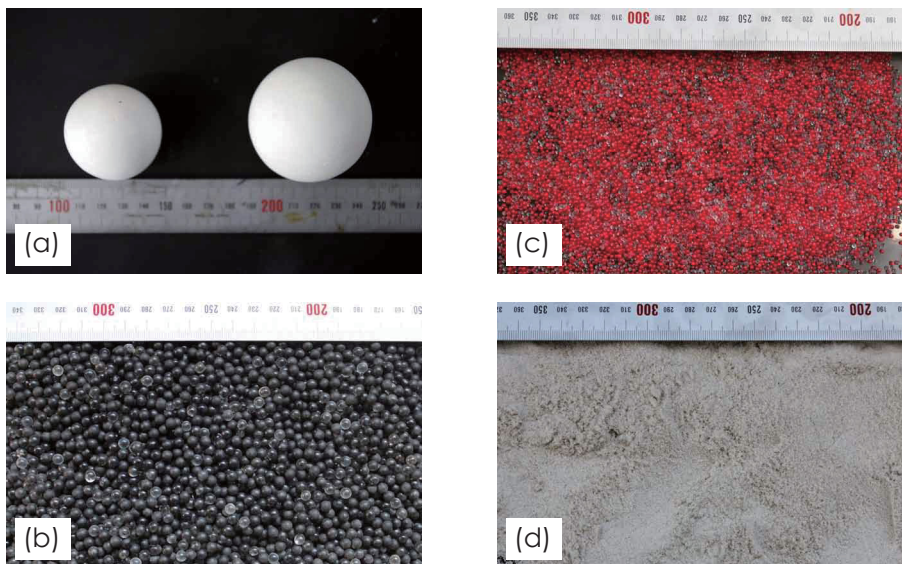


写真-2 実験に用いた河床材料：(a) L 粒子（左側の粒径が 40 mm，左側が 50 mm），(b) M 粒子（粒径 5 mm），(c) M 粒子（粒径 2 mm），(d) S 粒子（粒径 0.21 mm）

として 2 ～ 5 mm の間でふるい分けられた珪砂（比重 2.65）を用いた対照実験も行われた。その結果として、この程度の比重の違いであれば影響がないことを確かめている。

3.2 実験条件

まず、河床骨格を構成している L 粒子群の配置について考えてみると、実河川では規則的なものではない。そのため、L 粒子の配置の違いが河床の鉛直構造に与える影響についても調べた。具体的には、本研究では、L 粒子が相互に密に接するように格子状に配置された場合の検討を中心に行うことにした。写真-3 (a) がこの状態を表す。ただし、これ以外にも密な千鳥状に配置された場合 (写真-3 (b) 参照) や、流下方向に L 粒子が離れた状態で「粗」に配置された場合の検討もあわせて行われた。写真-3 (c) は、流下方向に L 粒子 1 個分だけ間隔を空けて配置した状態を示している。ここで、L 粒子同士を中心点間距離を ℓ と定義すると、この値は L 粒子の粒径 D_L の 2 倍、すなわち $\ell / D_L = 2$ となる。なお、写真-3 (a) の密な格子状配置の場合に

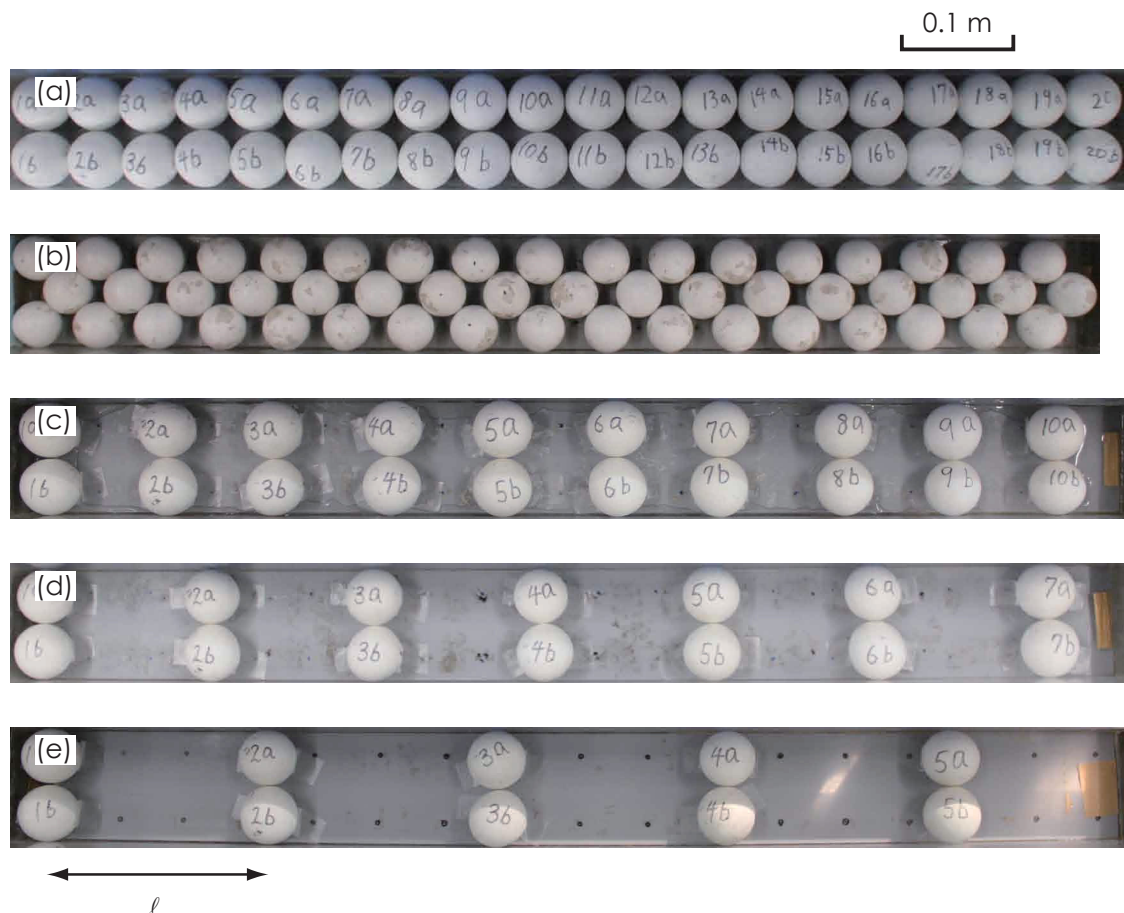


写真-3 L 粒子群の配置 (上方より撮影) : (a) 格子状に配置された場合, (b) 千鳥状に配置された場合, (c) 流下方向における L 粒子の中心点間距離 ℓ を L 粒子の粒径 D_L で除した値が $\ell / D_L = 2$, (d) $\ell / D_L = 3$, (e) $\ell / D_L = 4$ の場合 (Experimental Set 1)

は $l/D_L = 1$ である。また、**写真-3 (d), (e)** は、それぞれ $l/D_L = 3, 4$ の場合である。L 粒子の配置を**写真-3 (a) ~ (e)** とした検討は、主として Experimental Set 1 として行われ、その結果に基づいて、Experimental Set 2 では**写真-3 (a)** の場合を中心に検討した。Experimental Set 1 と 2 の本質的な差異は、ひとつには自由水面の有無にあり、もうひとつは Experimental Set 1 の場合には水路の横断方向に L 粒子が 2 個並んでいるのに対して、Experimental Set 2 では 4 個並んでいるという点のみである。

Experimental Set 1 では、上流側から土砂が供給されてくることのない条件下で到達する「河床の静的平衡状態」に着目した。一方、Experimental Set 2 では、これに加えて土砂が供給されてくることにより到達する「動的平衡状態」に関する検討を行った。なお、静的平衡状態は土砂の移動が生じていない条件下で到達する平衡状態であり、河床の鉛直構造にも変化が現れない。一方、動的平衡状態とは土砂の移動は生じているものの、流入量と流出量が釣り合っているためにもはや変化が生じない状態を指す。

L 粒子と M 粒子のみからなる河床を「L-M 河床」、L 粒子と S 粒子のみからなる河床を「L-S 河床」と定義する。また、L 粒子、M 粒子、S 粒子の三つの粒径集団の材料から河床が構成される場合を「L-M-S 河床」と呼ぶことにする。まず、実験では**写真-3** のように並べられた L 粒子群の頂部まで M-S 粒子を充填する。この様子を示したのが**写真-4** である。なお、この写真は Experimental Set 2 で撮影されている。(a) は水路側方から、(b) は上方から撮影された写真である。ここで、L 粒子群の間隙に充填されている M 粒子と S 粒子の総和に占める M 粒子の体積比率を R_M と定義する。**写真-4** は、 R_M の値が 0.5 の場合を示している。Experimental Set 1 における $R_M=0.6$ の場合の河床状態を示したのが**写真-5** である。この写真に示すように、 R_M の値が 0.6 以上になると、初期状態で河床表面に M 粒子のみからなる層が形成され、鉛直方向に一様な河床をつくることができない。そのため、0.5 以下の値を対象に実験を行った。具体的には、Experimental Set 1 の L-M-S 河床では R_M の値を 0.5 ~ 0.1 の範囲内に設定した。その結果を踏まえて、Experimental Set 2 では $R_M = 0.5$ の場合のみを対象にした。

表-1 には、静的平衡状態に関する実験条件をまとめて示した。閉管路を用いた

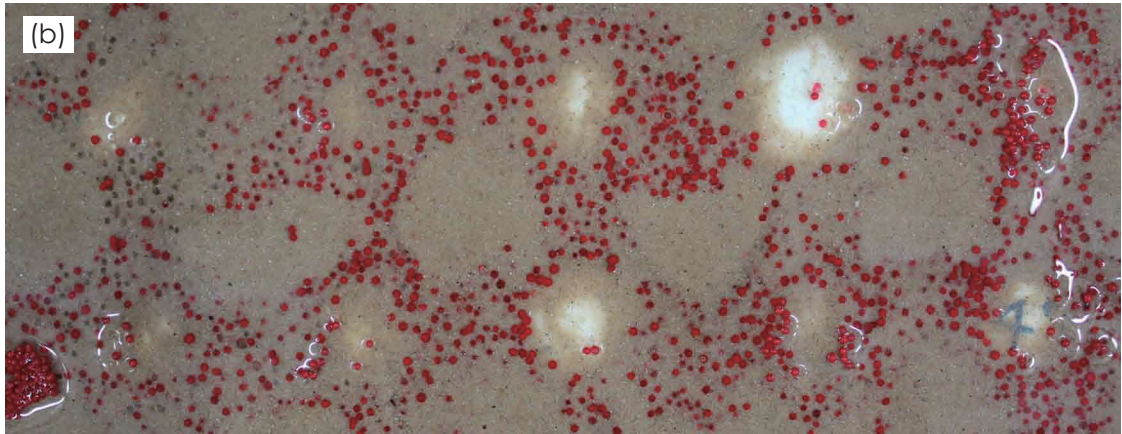
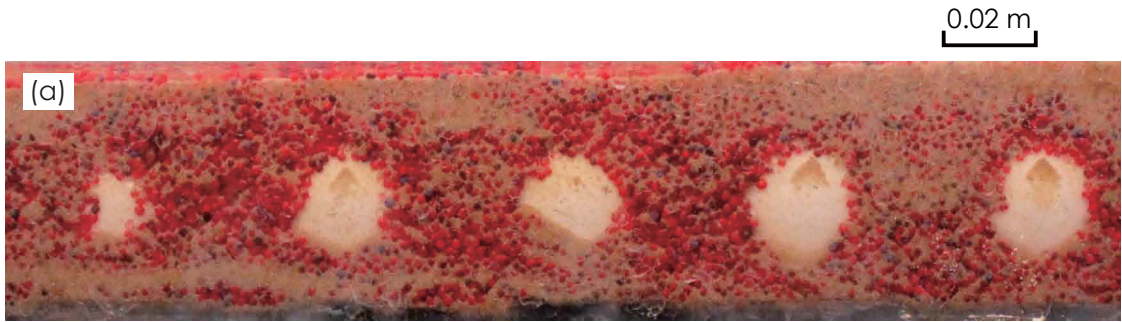


写真-4 初期状態の河床 (M 粒子の比率 $R_M = 0.5$ の場合) : (a) 側方, (b) 上方から撮影された写真を示している.



写真-5 M 粒子の比率 R_M が 0.6 の場合の初期状態 (側方より撮影)

表-1 静的平衡状態に関する実験条件（その1）：平均水深 h は、河床の平均の位置と水面の位置の差である。
また、摩擦速度ならびに無次元掃流力は河床全体に作用する平均の値を示している。

Experimental Set	河床	L粒子の配置	R_M	流量 Q_w (l/s)	平均水深 h (m)	摩擦速度 u^* (m/s)	無次元掃流力 τ^*		
1	L-M	格子状 ($\ell/D_L=1$)	1.0	5.5	0.11	0.071	0.068		
				6.0	0.11	0.079	0.084		
				7.0	0.11	0.104	0.152		
				7.5	0.11	0.106	0.152		
				8.0	0.11	0.126	0.218		
		千鳥状	1.0	5.5	0.11	0.073	0.073		
				6.0	0.11	0.096	0.127		
				7.0	0.12	0.134	0.243		
				8.0	0.12	0.147	0.296		
		$\ell/D_L=2$	1.0	5.6	0.11	0.072	0.071		
				6.5	0.11	0.097	0.129		
				7.0	0.12	0.111	0.168		
		$\ell/D_L=3$	1.0	5.7	0.11	0.081	0.089		
				6.0	0.11	0.088	0.106		
				6.5	0.12	0.102	0.142		
		$\ell/D_L=4$	1.0	5.7	0.11	0.072	0.071		
				6.0	0.11	0.072	0.071		
				6.3	0.12	0.094	0.120		
		1	L-S	格子状 ($\ell/D_L=1$)	0.0	2.5	0.11	0.041	-
						3.0	0.11	0.045	
3.5	0.11					0.053			
4.0	0.11					0.056			
4.2	0.11					0.062			
4.5	0.11					0.075			
千鳥状	0.0			2.5	0.12	0.048	-		
				3.0	0.12	0.058			
				3.5	0.12	0.061			
				4.0	0.12	0.073			
$\ell/D_L=2$	0.0			2.5	0.11	0.040	-		
				3.0	0.12	0.058			

Experimental Set 1 では流量 $Q_w = 2.5 \sim 8.0$ (l/s) の範囲内の値とし、河床に作用する摩擦速度の平均値は $u^* = 0.045 \sim 0.14$ (m/s) であった。一方、開水路を用いた Experimental Set 2 では、 $Q_w = 1.5 \sim 12$ (l/s), $u^* = 0.035 \sim 0.06$ (m/s) の範囲内の値にした。動的平衡状態を対象にした場合には、Case A ~ D の4つに大きく分けることができる。

表-1 静的平衡状態に関する実験条件（その2）：平均水深 h は、河床の平均の位置と水面の位置の差である。また、摩擦速度ならびに無次元掃流力は河床全体に作用する平均の値を示している。

Experimental Set	河床	L粒子の配置	R_M	流量 Q_w (l/s)	平均水深 h (m)	摩擦速度 u^* (m/s)	無次元掃流力 τ^*
1	L-M-S	格子状 ($l/D_L=1$)	0.5	5.5	0.11	0.063	0.055
				6.0	0.11	0.079	0.086
				6.5	0.11	0.084	0.097
				7.0	0.11	0.103	0.145
				8.0	0.11	0.118	0.189
			0.6	6.0	0.11	0.086	0.102
				7.0	0.11	0.107	0.157
				8.0	0.11	0.125	0.212
			0.7	5.5	0.11	0.065	0.057
				6.0	0.11	0.086	0.101
				6.5	0.11	0.089	0.107
				7.0	0.11	0.114	0.178
				7.5	0.11	0.125	0.212
			0.8	6.0	0.11	0.091	0.113
				7.0	0.11	0.107	0.156
				8.0	0.11	0.123	0.206
			0.9	5.0	0.11	0.074	0.074
				6.0	0.11	0.091	0.112
		7.0		0.11	0.110	0.163	
		千鳥状	0.5	5.0	0.11	0.068	0.063
				5.2	0.11	0.082	0.090
				5.5	0.11	0.090	0.110
				6.0	0.11	0.099	0.134
				7.0	0.12	0.116	0.181
				8.0	0.12	0.140	0.267
			0.7	5.0	0.11	0.074	0.074
				5.5	0.11	0.091	0.112
				6.0	0.12	0.100	0.135
				7.0	0.12	0.113	0.175
				7.5	0.12	0.125	0.212
8.0	0.12			0.138	0.257		

動的平衡状態に関する実験条件を表-2に整理してまとめた。Case A, B, Dでは $Q_w = 5$ (l/s), Case Cでは $Q_w = 9$ (l/s)にした。前者の流量の場合には $u^* = 0.038 \sim 0.047$ (m/s), 後者の場合には $u^* = 0.048 \sim 0.052$ (m/s)である。これらの実験を通じて、河床に作用する掃流力の違いが河床の動的平衡状態の鉛直構造に与える影響を明らかにすること

表-1 静的平衡状態に関する実験条件（その3）：平均水深 h は、河床の平均の位置と水面の位置の差である。
また、摩擦速度ならびに無次元掃流力は河床全体に作用する平均の値を示している。

Experimental Set	河床	L粒子の配置	R_M	流量 Q_w (l/s)	平均水深 h (m)	摩擦速度 u^* (m/s)	無次元掃流力 τ^*
1	L-M-S	$\ell/D_L=2$	0.5	5.5	0.11	0.068	0.062
				6.0	0.11	0.082	0.090
			0.7	5.5	0.11	0.069	0.064
				6.0	0.12	0.092	0.114
				6.2	0.12	0.092	0.116
				5.2	0.11	0.064	0.055
		$\ell/D_L=3$	0.5	5.7	0.12	0.081	0.088
				6.0	0.12	0.093	0.118
				5.2	0.11	0.071	0.068
			0.7	5.5	0.12	0.080	0.087
				5.7	0.12	0.088	0.106
				5.2	0.11	0.065	0.058
		$\ell/D_L=4$	0.5	5.5	0.11	0.066	0.058
				5.8	0.12	0.100	0.135
				5.2	0.12	0.079	0.085
			0.7	5.3	0.12	0.082	0.091
				5.5	0.12	0.089	0.107
				2.3	0.04	0.037	0.047
2	L-M	格子状 ($\ell/D_L=1$)	1.0	4.3	0.06	0.042	0.061
				5.8	0.07	0.047	0.075
				8.3	0.08	0.052	0.092
				11.9	0.10	0.059	0.118
				1.6	0.04	0.038	-
2.5	0.05	0.041					
3.9	0.06	0.047					
5.5	0.07	0.050					
8.3	0.09	0.053					
9.0	0.09	0.054					
11.8	0.10	0.059					
2	L-M-S	格子状 ($\ell/D_L=1$)	0.5	5.2	0.07	0.047	0.076
				9.2	0.09	0.053	0.096

を目指した。

M粒子ならびにS粒子の供給量をそれぞれ Q_M , Q_S と定義する。Case B では、 $Q_w = 5$ (l/s) の条件下でM粒子のみからなる均一粒径河床の平衡掃流砂量に等しい値 Q_M を供給した。この Q_M の値は、河床がM粒子のみにより構成された河床に作用する

表-2 動的平衡状態に関する実験条件 :M 粒子ならびに S 粒子の供給量をそれぞれ Q_M , Q_S と定義する. 平均水深 h は, 河床の平均の位置と水面の位置の差である. また, 摩擦速度ならびに無次元掃流力は河床全体に作用する平均の値を示している. また, 初期条件の a は静的平衡状態に到達した後の状態を, b は L 粒子頂部まで M 粒子ならびに S 粒子が充填された状態に設定した実験である.

Case	初期条件	流量 Q_w (l/s)	供給量 (cm^3/s)		平均水深 h (m)	摩擦速度 u^* (m/s)	無次元掃流力 τ^*
			Q_M	Q_S			
A1	a	5.0	0.4	0.0	0.059	0.046	0.073
A2		5.0		0.2	0.061	0.046	0.072
A3		5.2		0.4	0.063	0.046	0.073
A4		5.1		1.4	0.061	0.045	0.069
A5		5.2		2.5	0.059	0.045	0.068
A6		4.9		3.8	0.048	0.039	0.053
A7		5.0		4.5	0.048	0.038	0.050
B1	a	5.2	1.2	0.0	0.052	0.042	0.060
B2		5.2		0.4	0.054	0.043	0.063
B3		5.1		1.4	0.051	0.040	0.053
B4		5.2		2.8	0.052	0.041	0.056
B5		5.3		3.1	0.052	0.042	0.059
C1	a	9.1	0.4	0.0	0.082	0.051	0.087
C2		9.3		0.4	0.084	0.051	0.090
C3		9.0		1.4	0.083	0.052	0.090
C4		9.0		2.5	0.084	0.052	0.091
C5		9.1		3.4	0.085	0.052	0.093
C6		9.1		4.5	0.084	0.052	0.094
C7		8.8		5.0	0.075	0.048	0.079
C8		9.1		5.7	0.080	0.051	0.087
D1	b	5.3	0.4	0.2	0.061	0.046	0.072
D2		5.2		0.4	0.063	0.046	0.073
D3		5.0		1.4	0.062	0.047	0.075
D4		5.2		3.8	0.053	0.042	0.060

掃流力を平衡掃流砂量式 (ここでは, Meyer Peter and Müller の式¹⁾) に代入することにより, $Q_M = 1.2 (\text{cm}^3/\text{s})$ と求められた. さらに, 動的平衡状態に到達したとき河床表面に L 粒子が露出する状態を本研究の主たる対象とし, Case A, C, D では Case B より小さな値である $Q_M = 0.4 (\text{cm}^3/\text{s})$ に設定した. 表-1 に示すように, それぞれの Case の中では流量 Q_w と M 粒子の供給量 Q_M を一定の値にして, Q_S を異なる値に設定する

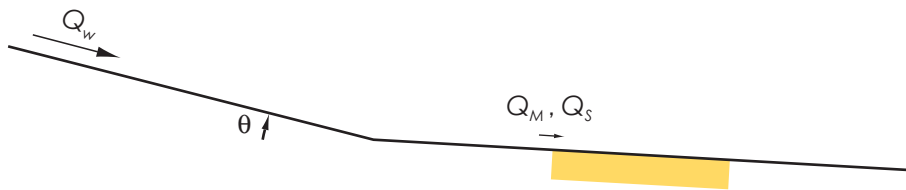


図-2 給砂量を任意の値に設定したことの想定状況

実験を行った。また、 Q_s の値は $0 \sim 5.7 \text{ cm}^3/\text{s}$ の範囲内の値にした。なお、L粒子頂部より上方にM粒子とS粒子が堆積することのない状態を本実験の条件としたため、S粒子の平衡浮遊砂量以下の値に Q_s を設定したことになる。流量 Q_w を一定として、給砂量を任意の値に設定したことは、図-2に示すような状況を想定したことになる。図中のオレンジ色で表された部分が本研究で対象とした区間とし、その上流側の勾配を $\tan \theta$ とおく。このような場を想定すると、同一の流量条件下であっても $\tan \theta$ ならびに粒度構成に応じて、上流側から輸送されてくるM粒子ならびにS粒子の量が異なる。このように輸送されてきたM粒子とS粒子がオレンジ色で示された区間に供給されるとした状況を本研究では設定したことになる。

さらに、初期条件の違いが河床の動的平衡状態の鉛直構造に与える影響を明らかにするため、次の2つの条件下で実験を行った。ひとつは、初期状態を静的平衡状態に到達した後の河床にした場合であり、この条件で行われた実験がCase A～Cである。もうひとつがCase Dとして行われた実験であり、初期状態を写真-4に示すようにL粒子頂部までM-S粒子が充填された河床に設定した。なお、このCase Dでは初期状態以外の条件をCase Aと同じに設定した。

3.3 計測項目と実験方法

河床に作用する摩擦速度を評価するために、Experimental Set 1 では水路側壁に開けられた二点の微小な孔の間の圧力勾配を、Experimental Set 2 では水面勾配を計測した。なお、水面勾配は水路上流端から 9.5 ～ 13 m の区間の水面の位置を 0.5 m おきに測ることによって求められた。摩擦速度の値は、従来の方法²⁾を参考に Experimental Set 1 では水路側壁ならびに天井、Experimental Set 2 では水路側壁に作用するせん断力を全せん断力から差し引くことにより算出された。このようにして河床に作用する摩擦速度の平均値を評価した。この方法の妥当性を確認するため、Experimental 1, 2 の両方で M 粒子の移動限界の掃流力を測定する実験を行った。その結果、いずれの場合でもシールズ図表から求められたものと変わらない値が得られた。

表 -1 に示した流量条件下で通水を行うと、M-S 粒子群は浸食を受けるためそれらの上面の位置は低くなる。一方、L 粒子は移動しないためその頂部の高さは変わらない。すなわち、平衡状態では L 粒子の頂部より低い位置に M-S 粒子群の上面の高さが現れる。この L 粒子群の頂部と、河床表面に露出する M-S 粒子群の上面の高さを計測した。それぞれの条件の計測区間を示したのが図 -3 である。(a) ～ (e) は Experimental Set 1, (f) は Experimental Set 2 の場合である。図 -3 (a) ～ (e) は、それぞれ写真 -3 (a) ～ (e) に示されている L 粒子群の配置に対応している。Experimental Set 1 では水路上流端から 2.875 ～ 3.075 m, Experimental Set 2 では 11.175 ～ 11.625 m の範囲内を計測区間にした。L 粒子群の間隙は側壁に接しているものを除くと、Experimental Set 1 では 1 個、Experimental Set 2 では 3 個である。図 -3 中のオレンジ色で示された範囲を計測対象の区間にし、結果の整理に当たってはそれらの平均値を用いた。なお、L 粒子群が互いに密に接している場合には、L 粒子群の間隙の面積が小さいため、M-S 粒子の上面の高さが間隙内で概ね一樣であることを確認している。そのため、間隙内中央の 1 点を計測している。一方、L 粒子群が粗に配置されている場合には間隙内で完全に一樣になっているわけではないため、1 つの間隙内で複数点の計測を行った。横断方向には両側壁から 2.5 cm, 4 cm と水路中央に当たる 5 cm の計 5 測線とした。

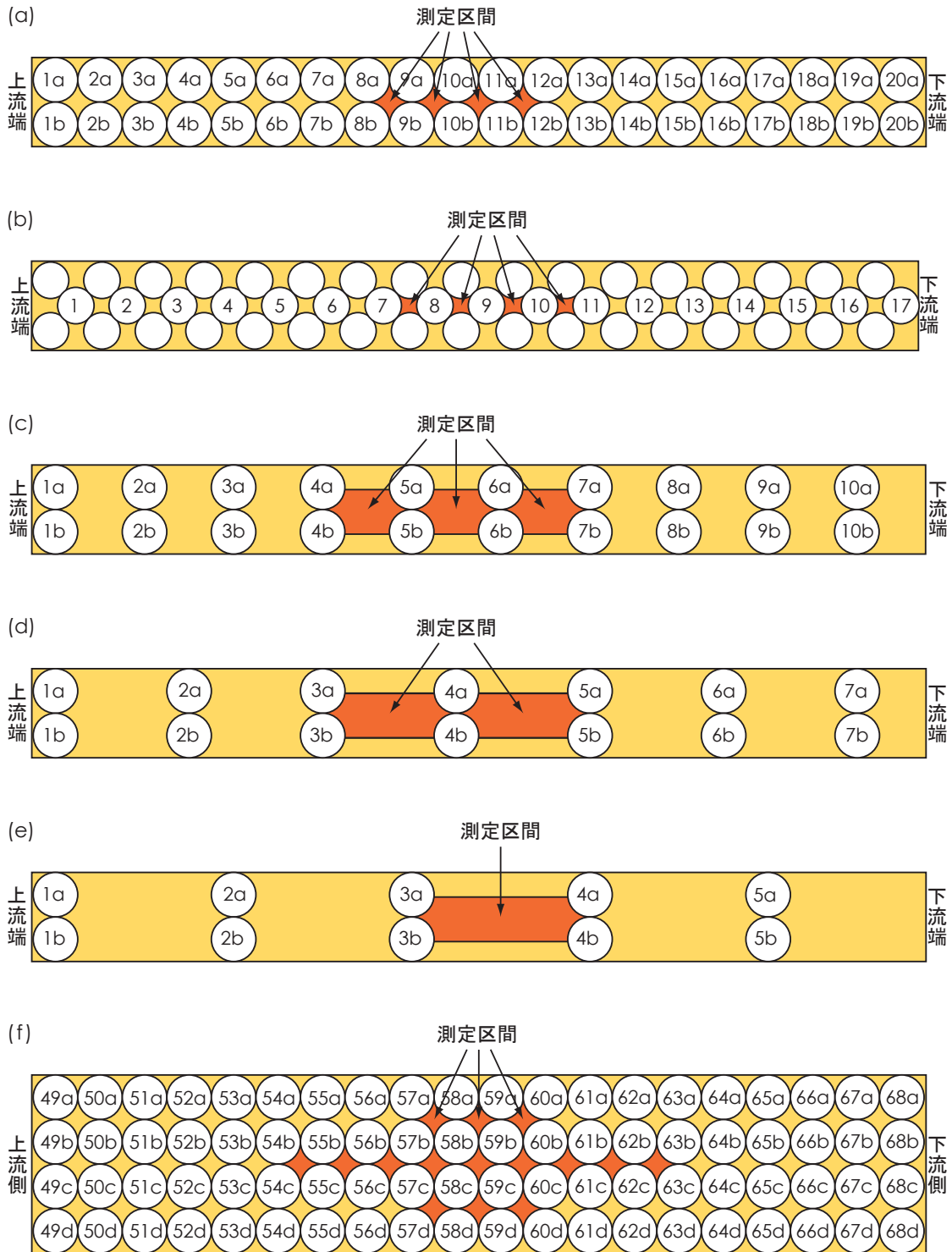


図-3 計測区間（上面図）：(a) L粒子が格子状に配置された場合、(b) 千鳥状に配置された場合、(c) 流下方向におけるL粒子の中心点間距離 l をL粒子の粒径 D_L で除した値が $l/D_L=2$ 、(d) $l/D_L=3$ 、(e) $l/D_L=4$ の場合を示している。これらの(a)～(e)は Experimental Set 1、(f)は Experimental Set 2である。(f)は(a)と同様にL粒子が格子状に配置されている。

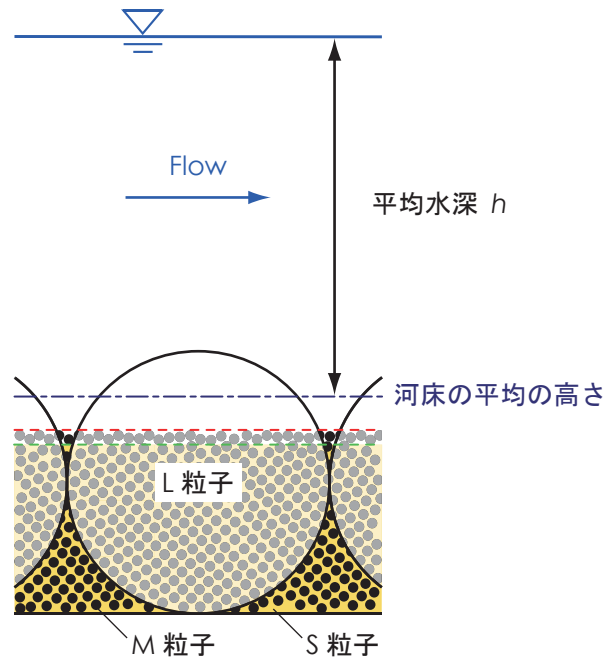


図-4 河床を側方から見たときの模式図：赤色，緑色の破線はそれぞれ M 粒子ならびに S 粒子上面の高さを示している．青色の一点鎖線は河床の平均の高さを表しており，その位置と水面の位置の差が平均水深である．

縦断方向には 2 cm おきに計測を行っており，図-3 (c)～(e) ではそれぞれ 9，13，9 測線となる．そのため，50 点程度の平均値をとって結果を整理している．

図-4 は，河床を側面から見たときの模式図である．青色の実線が水面，赤色ならびに緑色の破線がそれぞれ M 粒子ならびに S 粒子の上面の高さを表している．L 粒子の頂部の高さから赤色の破線までの鉛直距離が L 粒子が露出している度合いである．この値に基づいて，青色の一点鎖線で表されている河床の平均の高さを求め，水面の位置との差を平均水深 h と定義している．この値と動水勾配から算出された摩擦速度の平均値は，底面せん断力が L 粒子だけでなく，その間隙に存在している M-S 粒子にも一様に作用すると仮定した場合の値である．しかし，L 粒子の露出の度合いが大きくなるにつれて，その間隙に充填されている M 粒子ならびに S 粒子上面に実際に作用する摩擦速度 u^*_M ， u^*_S は小さくなる．この現象のことを「L 粒子による遮蔽効果」と呼ぶ．このように，河床に作用する摩擦速度の平均値 u^* と M-S 粒子に実際に作用する摩擦速度 u^*_M ， u^*_S の値に違いが生じることに注意を要する．

流出する M 粒子の量は 5 分毎に水路下流端で採取されている．また，S 粒子の量

は5分のうち1分あるいは30秒間水とともに採取することにより計測されている。この流砂量が数十分にわたって給砂量と同じ値であることと、河床表面の高さが変わらないことを確認することにより、動的平衡状態に到達したと判断した。

さらに、交換層の厚さ δ_E を計測する実験は以下のように行われた。ここで、交換層とは流砂と河床材料が絶えず交換を繰り返している層のことを指している³⁾。給砂を開始したときから動的平衡状態に到るまではM粒子として赤色に塗装されたものを供給し、動的平衡状態に到達したと判断した後、青色のものを供給した。やがて、下流端から流出するM粒子が青色のもののみとなったとき、完全に交換がなされたと判断し通水を終了する。その結果、河床表面には青色のM粒子とS粒子からなる層が形成され、この層の厚さを計測することにより交換層の厚さ δ_E を求めることができる。

参考文献

- 1) Meyer-Peter, E., and Müller, R.: Formulas for bed-load transport, Proc., 2nd Meeting, IAHR, Stockholm, Sweden, pp. 39–64, 1948.
- 2) Einstein, H.A.: Formulas for the transportation of bed load, Trans. ASCE, Vol.107, No. 2140, pp.561-577, 1942.
- 3) 平野宗夫: Armoring をともなう河床低下について, 土木学会論文報告集, 第195号, pp.55-65, 1971.

第4章 河床における遮蔽効果

4.1 水流によって移動しないほどの大粒子が与える遮蔽効果

まず、水流によって移動することのないL粒子群がその間に充填されているM粒子あるいはS粒子に与える遮蔽の効果について調べた。この関係を明らかにするため、L粒子ならびにM粒子からなる河床（L-M河床）とL粒子ならびにS粒子からなる河床（L-S河床）という二つの粒径集団の材料から構成される河床の静的平衡状態に着目した。まず、河床の静的平衡状態の鉛直構造について説明する。写真-6は、静的平衡状態の河床を水路の側方から撮影したものである。この写真の(a)、(b)は、それぞれL-M河床、L-S河床の場合を示している。なお、静的平衡状態時の河床に作用する平均の摩擦速度はそれぞれ $u^* = 0.11, 0.04$ (m/s)であった。図-5(a)、(b)は、

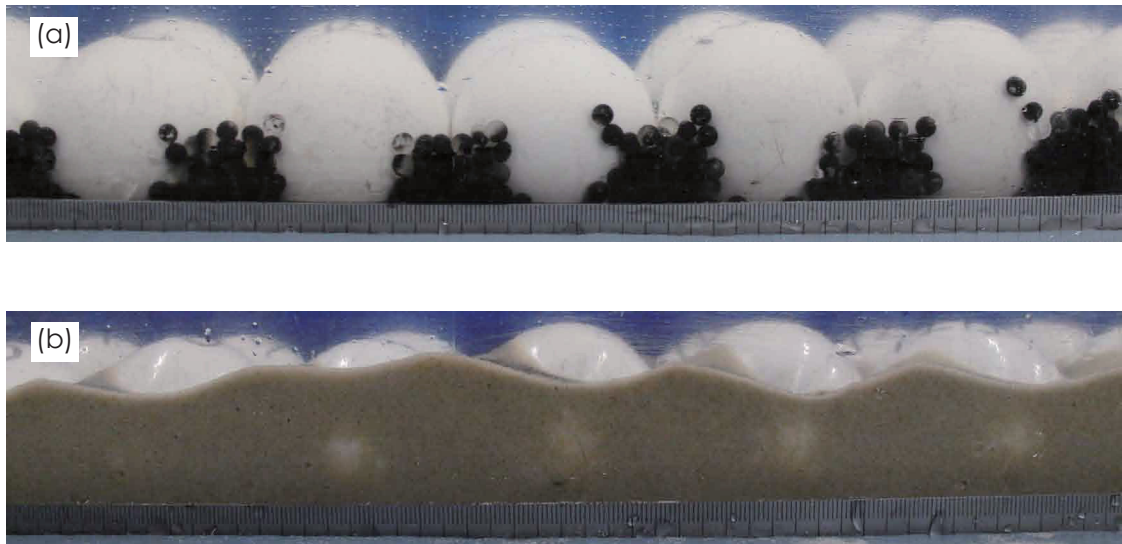


写真-6 二粒径河床の静的平衡状態（側方より撮影）：(a) L-M河床であり、平衡状態時の $u^* = 0.11$ (m/s)、(b) L-S河床の場合であり、平衡状態時の $u^* = 0.04$ (m/s)であった。

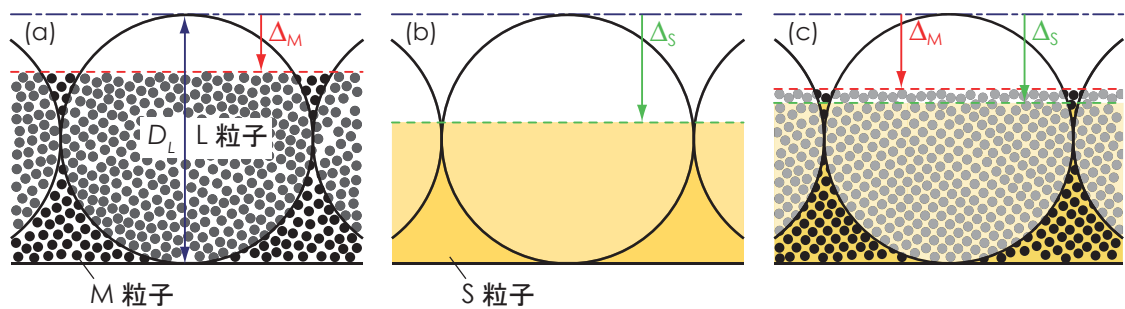


図-5 河床の平衡状態の模式図：(a) L-M河床、(b) L-S河床 (a) L-M-S河床の場合

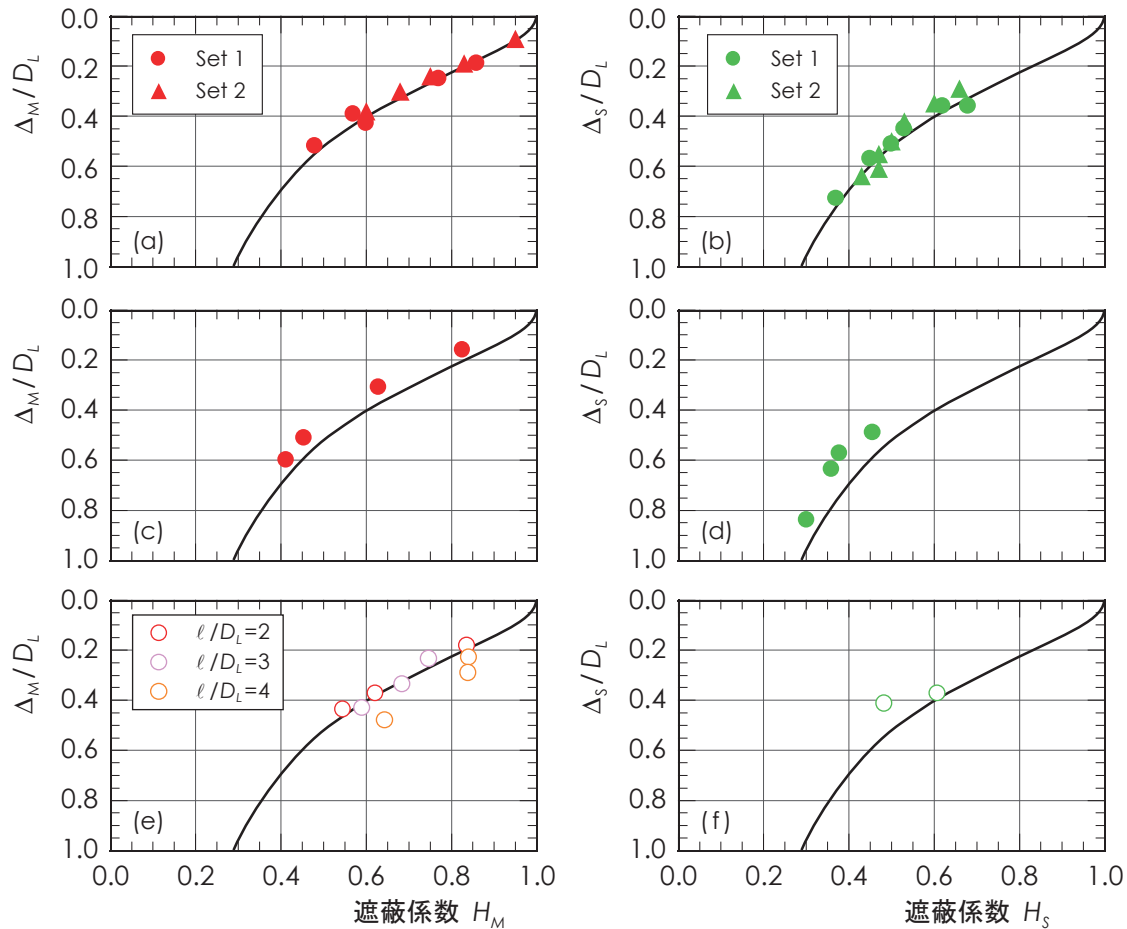


図-6 L粒子が与える遮蔽効果：(a), (c), (e)はL-M河床，(b), (d), (f)はL-S河床の結果を示している．(a), (b)はL粒子を密な格子状に配置した場合，(c), (d)は密な千鳥状に配置した場合，(e), (f)はL粒子を流下方向に離して配置した粗な場合である．また，丸印はExperimental Set 1を，三角印はExperimental Set 2の結果を表している．

これらの静的平衡状態の鉛直構造を模式的に描いたものである．図-5中に示すように，L粒子頂部から河床表面に露出しているM粒子あるいはS粒子上面までの鉛直距離を Δ_M ， Δ_S と定義する．二粒径河床のとき，河床表面に露出しているM粒子あるいはS粒子上面に作用する摩擦速度は移動限界の値に等しいと考えられる．ここで，M粒子の限界摩擦速度 u^*_{MC} はシールズ図表から算出される値に等しいとした．一方，S粒子の限界摩擦速度 u^*_{SC} は沈降速度 w_{oS} に等しいとした．これらは，L粒子の間隙に存在している土砂の限界摩擦速度はL粒子がないとした均一粒径の場合の値と変わらないと仮定したことになる．

河床全体に作用する平均の摩擦速度 u^* に対するM粒子あるいはS粒子上面に作

用する実際の摩擦速度 u_{MC}^* , u_{SC}^* の比 u_{MC}^*/u^* , u_{SC}^*/u^* を遮蔽係数 H_i ($= H_M, H_S$) と定義する. 図-6 は, Δ_M あるいは Δ_S を L 粒子の粒径 D_L で除した値と遮蔽係数 H_i との関係を示したものである. 図-6 (a), (b) は, L 粒子を「密」な格子状に配置したときの結果を示している. 一方, (c), (d) は「密」な千鳥状に, (e), (f) は L 粒子が流下方向に離れた状態で配置された「粗」な場合の結果である. ここで, (a), (c), (e) は L-M 河床, (b), (d), (f) は L-S 河床を対象にした場合である. また, ●, ● は Experimental Set 1 の結果を, ▲, ▲ は Experimental Set 2 の結果を表している. 粗に配置された場合では, 流下方向における L 粒子同士の中心点間距離を ℓ と定義する. なお, (a), (b) の場合のように L 粒子が密な格子状に配置された場合を考えると, ℓ を L 粒子の粒径 D_L で除した値は 1 になる. (e) 中の○, ○, ○ はそれぞれ $\ell/D_L = 2, 3, 4$ を, (f) 中の○ は $\ell/D_L = 2$ の結果を示している. 図-6 を見ると, 河床に作用する平均の摩擦速度 u^* が大きくなるにつれて, すなわち遮蔽係数 H_i が小さくなるにつれて, Δ_M ならびに Δ_S が大きくなることがわかる. 次に, (a), (b) を主に見ながらさらに説明を加えることにする. 図-6 (a)~(f) 中の黒色の実線はすべて同じ関係を示している. この関係は以下の式によって表される.

$$\Delta/D_L = \alpha \times (H_i^{-2} - 1)^{0.5} \quad (1)$$

ここで, α は比例定数であり, 0.3 とした. ここで, Δ は Δ_M あるいは Δ_S を表す. L-M 河床の場合を考えてみると, この式の右辺は $H_M = u_{MC}^*/u^*$ であることから, $(\tau_M^* - \tau_{MC}^*)^{0.5}$ に比例する以下の形にも書き換えることができる.

$$\Delta_M/D_L = \beta \times (\tau_M^* - \tau_{MC}^*)^{0.5} \quad (2)$$

$\beta = \alpha \times \tau_{MC}^{*-0.5}$ であることから, $D_M = 5$ (mm) を用いた Experimental Set 1 のとき $\beta = 1.3$, $D_M = 2$ (mm) を用いた Experimental Set 2 のとき $\beta = 1.5$ となる. この式 (2) の形は累乗の値こそ異なるものの, 平衡流砂量式 (例えば, Meyer-Peter and Müller の式) に似ていることがわかる. 図-6 (a), (b) を比較すると, L 粒子群の間隙に M 粒子が充填されているか, あるいは S 粒子が充填されているかによらず, L 粒子が与える遮蔽の効果は同じ関係式で表せることがわかる. これは, 図-6 に示すような縦軸ならびに横

軸の無次元化を行うことによって、L粒子がその間隙に存在する土砂に与える遮蔽効果が普遍的な関係になることを表している。この関係式を用いると、L粒子の露出の度合い Δ / D_L と平均の摩擦速度 u^* の値から河床表面に露出しているM粒子あるいはS粒子上面に作用している摩擦速度を求めることができる。また、(a)、(b)を見ると、Experimental Set 1 と 2 で用いているM粒子の粒径 D_M が異なるものの、結果に影響は現れないことがわかる。

図-6 (c)、(d)はL粒子が密な千鳥状に配置された場合、(e)、(f)は粗に配置された場合の結果である。これらの図を見ると、L粒子同士が互いに密に接している場合には、L粒子が与える遮蔽の関係は変わらないことがわかる。さらに、L粒子の中心点間距離 ℓ が D_L の3倍程度の範囲内であれば遮蔽の関係は変わらないものの、4倍程度になると遮蔽が弱まる傾向にあることがわかる。この ℓ の値が大きくなると、河床に占めるL粒子の割合が徐々に減少していき、やがて河床がM粒子とS粒子のみにより構成される状態になる。この場合には関根ら¹⁾が開発した「礫・シルト充填河床モデル」の考え方を用いることにより河床変動解析を行うことができるものと捉えている。

4.2 中粒子群が小粒子に与える遮蔽効果

ここでは、掃流砂として移動する M 粒子群が浮遊砂として移動する S 粒子に与える遮蔽の効果について説明する。まず、L-M-S 粒子の三つの粒径集団からなる河床の静的平衡状態の鉛直構造に注目する。写真-7 は、Experimental Set 1 で初期状態の R_M を 0.3 に設定した静的平衡状態を示している。なお、平衡時の河床に作用する平均の摩擦速度は $u^* = 0.070$ (m/s) であった。図-4 (c) は、L-M-S 河床の静的平衡状態の鉛直構造を模式化したものである。このように L 粒子群の間隙内では明らかな土砂の鉛直分級が生じている。具体的には、河床表面に L 粒子だけでなく M 粒子のみからなる層が形成される。この層を M 粒子層と定義する。後述するように、M 粒子層の下方には初期状態から変化していない層が存在する。この変化していない層の中で最上位にある S 粒子は、L 粒子だけでなく M 粒子群の遮蔽を受けている。まず静的平衡状態に関して明らかになったことを以下にまとめる。なお、図-7 はいずれも L 粒子を密な格子状に配置した場合の結果を示している。これ以外にも、密な千鳥状や粗に配置した場合の実験も行っており、その結果については後述する。

(a) L-M 河床のときと同様に、L 粒子頂部から M 粒子上面までの鉛直距離を Δ_M と定義する。図-7 (a) は、 Δ_M を L 粒子の粒径 D_L で除した値 Δ_M / D_L を縦軸に、M 粒子の無次元限界掃流力 τ^*_{MC} に対する河床に作用する平均の無次元掃流力 τ^* の比 τ^* / τ^*_{MC} を横軸にとって整理した結果を示している。Experimental Set 1 と 2 では、用いている M 粒子の粒径が異なる。そこで、 τ^*_{MC} に対して τ^* が何倍になっているかという値を横軸にとって整理すると、M 粒子の粒径による差が現れることはな

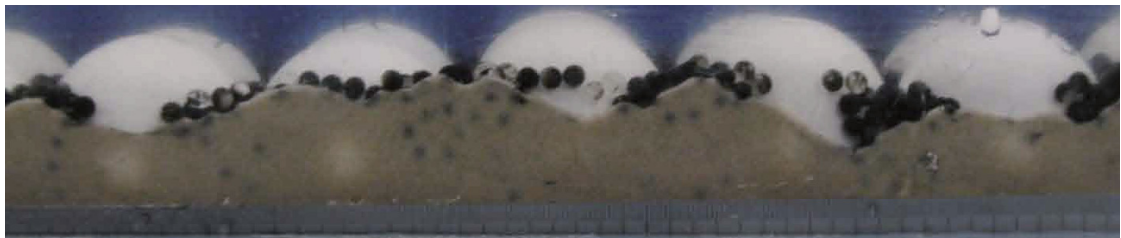


写真-7 L-M-S 河床の静的平衡状態（側方より撮影）：Experimental Set 1 で、初期状態の M 粒子の比率 $R_M = 0.3$ 、平衡状態時の摩擦速度 $u^* = 0.070$ (m/s) のものを示している。

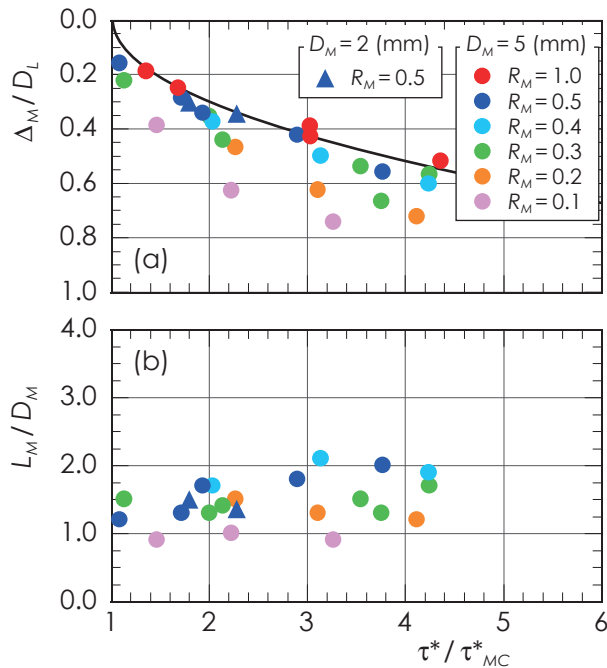


図-7 L-M-S 河床の静的平衡状態の鉛直構造のまとめ (その 1) : (a) Δ_M/D_L と τ^*/τ_{MC}^* , (b) L_M/D_M と τ^*/τ_{MC}^* の関係を表している. なお, これらは L 粒子を互いに密な格子状に接するように配置した場合の結果をまとめたものである.

い. また, 図中の黒色の実線は式 (2) の関係を表している. この関係は L-M 河床あるいは L-S 河床, すなわち $R_M=1.0, 0.0$ を対象にして導かれた式である. 図中の ▲, ▲, ▲, ▲, ▲ は, それぞれ Experimental Set 1 の $R_M=1.0, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1$ の結果を示している. 一方, ● は Experimental Set 2 の $R_M=0.5$ の結果である. 図-7 (a) を見ると, M 粒子の比率 R_M が小さくなるにつれて Δ_M の値が大きくなるのがわかる. この原因については後述する.

(b) 河床表面に露出している M 粒子層の厚さを L_M と定義する. 図-7 (b) は, L_M を M 粒子の粒径 D_M で除した値と τ^*/τ_{MC}^* の関係を示したものである. L_M/D_M は 1 ~ 2 程度の範囲内の値をとり, τ^*/τ_{MC}^* の値にはよらないことがわかる. R_M の値によって L_M/D_M の値が大きく変わることはないものの, R_M が小さくなるにつれて L_M もわずかに小さくなっている.

(c) 河床に作用する平均の掃流力 τ^* と Δ_M/D_L を式 (1) に代入することにより, M 粒子層上面に実際に作用する掃流力 τ_{M}^* を求める. この値を τ_{MC}^* で除したものと R_M

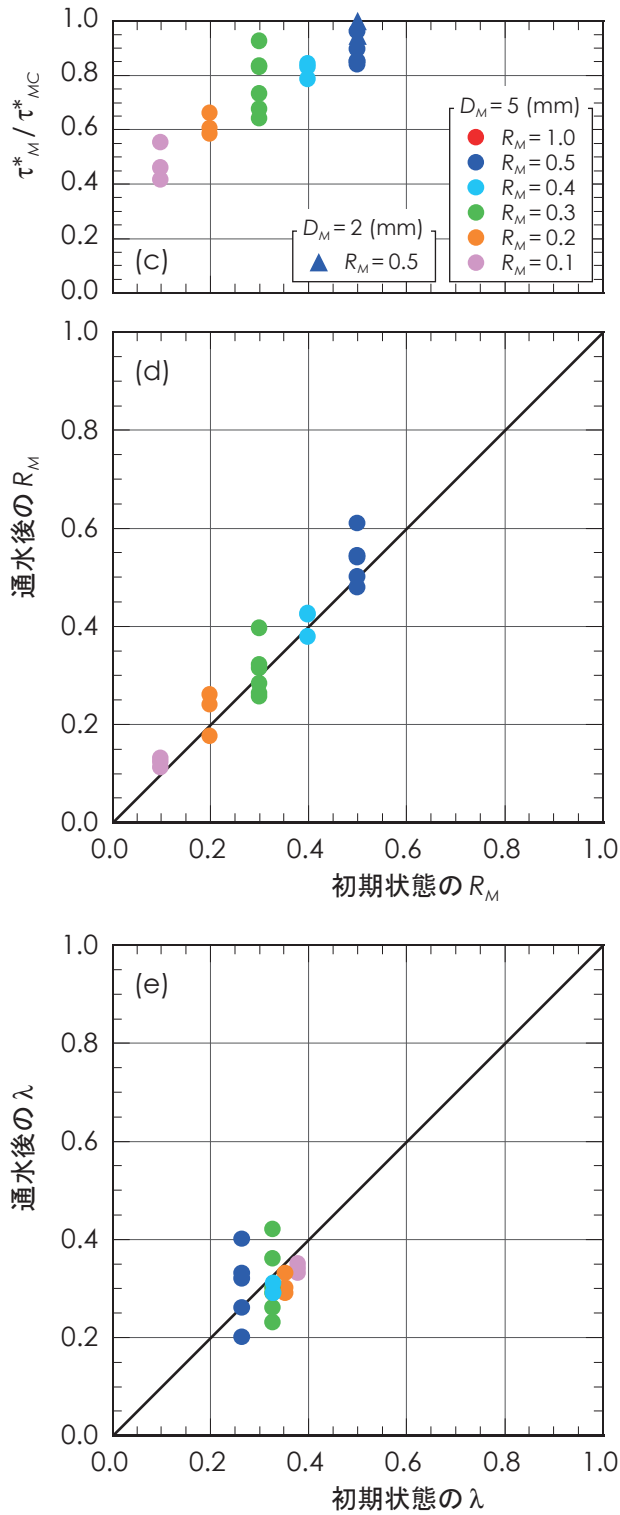


図-7 L-M-S 河床の静的平衡状態の鉛直構造のまとめ (その 2) : (c) τ_M^* / τ_{MC}^* と R_M , (d), (e) はそれぞれ通水後の M 粒子のみからなる層の下方に存在する材料の R_M , λ と初期状態の R_M , λ の関係を表している. なお, これらは L 粒子を互いに密な格子状に接するように配置した場合の結果をまとめたものである.

の関係を示したのが図-7 (c) である。 τ^*_M が τ^*_{MC} 以下にならないと M 粒子の移動は停止しないため、横軸の τ^*_M / τ^*_{MC} は 1 以下になっている。 図-7 (a) から、 R_M が小さくなるにつれて Δ_M が大きくなることがわかる。 これは、 R_M が小さい方が L 粒子の遮蔽を強く受けるということを意味している。 そのため、 τ^*_M / τ^*_{MC} は小さくなる。

(d) M 粒子層の下方には初期状態から変化していない層が取り残されている。 この層内の M-S 粒子を採取し、それらの体積から R_M を求めた。 なお、 R_M は M-S 粒子の総体積に対する M 粒子の体積比率である。 この値を縦軸に、初期状態の R_M を横軸にとって整理したのが図-7 (d) である。 さらに、空隙率 λ も算出し、M 粒子層の下方の層と初期状態の値を比較して示したのが図-7 (e) である。 河床の空隙率 λ は一般には L 粒子も河床材料に含めて算出しているが、本研究では L 粒子は境界として取り扱うことにした。 すなわち、空隙率 λ は、L 粒子群の間隙に充填されている M 粒子、S 粒子ならびに水（空隙）の総和に占める水の体積比率と定義した。 図-7 (d), (e) 中の黒色の実線は縦軸と横軸の値が完全に一致するときの関係を示したものであり、傾きが 45° の直線である。 いずれの結果も概ねこれらの直線上に位置することから、M 粒子層の下方に存在している層は初期状態から混合を受けていないことが推察される。

この静的平衡状態に到るまでの過程について簡単に述べる。 M 粒子と S 粒子の限界摩擦速度を比較すると $u^*_{MC} > u^*_{SC}$ であるため、通水を開始した後しばらくすると M 粒子の移動が先に停止する。 しかし、それ以降も S 粒子は M 粒子群の間隙から離脱し輸送される。 やがて S 粒子上面に作用する摩擦速度が移動限界（沈降速度）の値に等しくなると、S 粒子の移動も停止する。 前述した M 粒子群の間隙から S 粒子が抜け出すにつれて、M 粒子層上面の位置も徐々に低くなる。 この現象は、M 粒子層を形成していくときに M 粒子が初期状態より密に充填されることによって生じると考えられる。 初期河床の R_M が 0.5 以下の場合、M 粒子同士が互いに接していない粗な状態になっているためである。 その結果、図-7 (a) のように初期河床の R_M が小

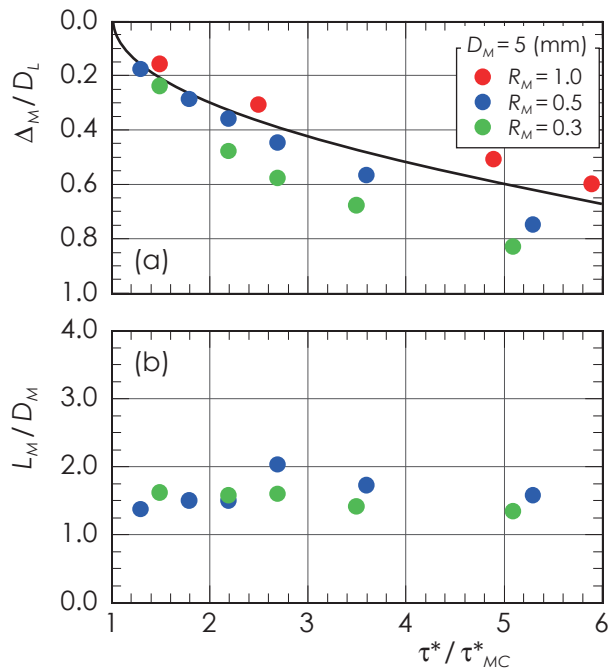


図-8 L-M-S 河床の静的平衡状態の鉛直構造のまとめ (その 1) : (a) Δ_M/D_L と τ^*/τ_{MC}^* , (b) L_M/D_M と τ^*/τ_{MC}^* の関係を表している. なお, これらは L 粒子を互いに密な千鳥状に接するように配置した場合の結果をまとめたものである.

さくなるほど Δ_M が大きくなる.

図-8 は L 粒子を密な千鳥状に, 図-9 は粗に配置した場合の結果を示している. (a) ~ (e) はそれぞれ図-7 に対応するものである. (a) は Δ_M/D_L と τ^*/τ_{MC}^* , (b) は L_M/D_M と τ^*/τ_{MC}^* , (c) は R_M と τ_M^*/τ_{MC}^* , (d), (e) はそれぞれ M 粒子層より下方の材料と初期状態の R_M ならびに λ の関係を示したものである. これらの図を見ると, L 粒子同士の間点間の距離 ℓ を L 粒子の粒径 D_L で除した値が 3 程度以内であれば, 河床の静的平衡状態の鉛直構造にほとんど影響を与えないことがわかる. ただし, ℓ を L 粒子の粒径 D_L で除した値が 4 程度になると遮蔽効果が弱まる傾向にある. これは前述の L 粒子群の間に M 粒子のみ, あるいは S 粒子のみが充填されている場合と同様の結果である. また, L 粒子が互いに密な格子状に配置された場合と同様に, M 粒子層の厚さ L_M は M 粒子の粒径 D_M の 1 ~ 2 倍程度であることがわかる.

次に, M 粒子層が S 粒子に与える遮蔽の効果について考察する. L-M-S 河床の静的平衡状態のときに形成される M 粒子層の上面に実際に作用する摩擦速度 u_{*M}^* を式

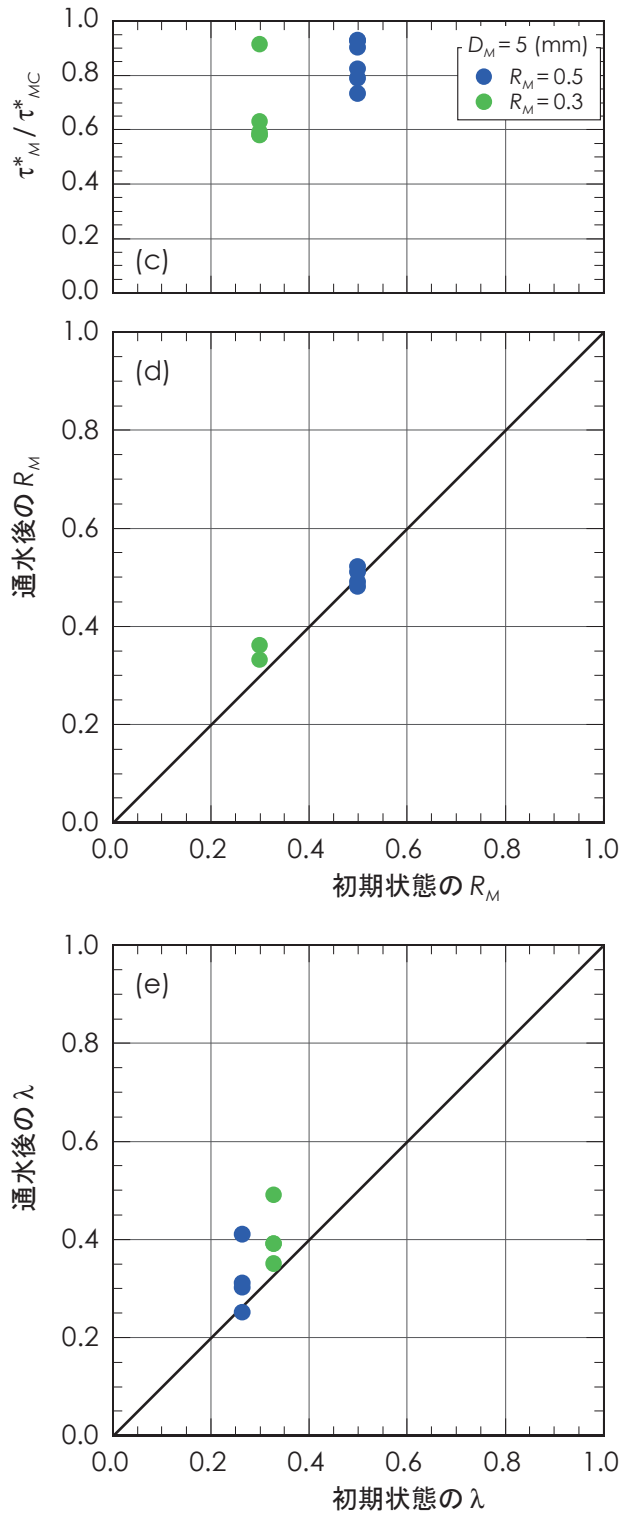


図-8 L-M-S 河床の静的平衡状態の鉛直構造のまとめ (その 2) : (c) τ_M^* / τ_{MC}^* と R_M , (d), (e) はそれぞれ通水後の M 粒子のみからなる層の下方に存在する材料の R_M, λ と初期状態の R_M, λ の関係を表している. なお, これらは L 粒子を互いに密な千鳥状に接するように配置した場合の結果をまとめたものである.

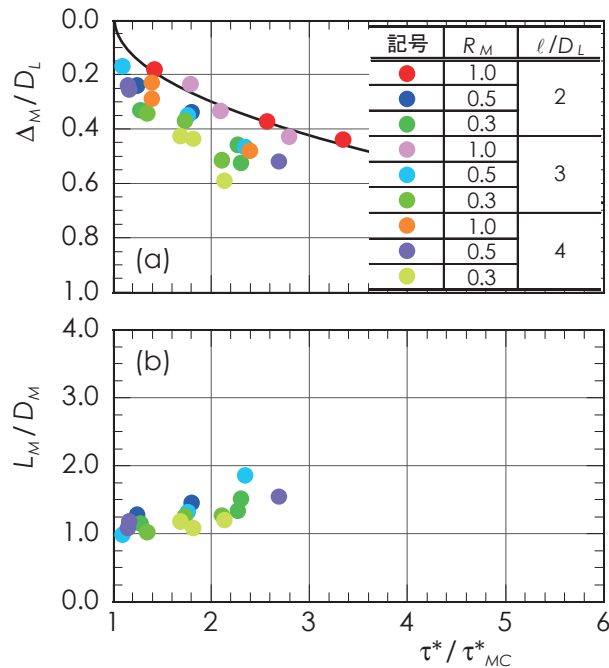


図-9 L-M-S 河床の静的平衡状態の鉛直構造のまとめ (その 1) : (a) Δ_M/D_L と τ^*/τ_{MC}^* , (b) L_M/D_M と τ^*/τ_{MC}^* の関係を表している. なお, これらは L 粒子を縦断方向に離れて配置した粗な場合の結果をまとめたものである.

(1) に示した遮蔽の関係をを用いて求める. S 粒子に作用する摩擦速度 u^*_s は沈降速度 w_{os} に等しいと考える. M 粒子層が S 粒子に与える遮蔽の場合には, u^*_M に対する u^*_s ($= w_{os}$) の比 u^*_s/u^*_M が遮蔽係数に相当する. この値を横軸に, M 粒子層の厚さ L_M をその粒径 D_M で除した値を縦軸にとって結果を整理したのが図-10 である. ここで, u^*_s/u^*_M は M 粒子層が与える遮蔽効果によって, S 粒子上面に作用する摩擦速度がどの程度小さくなるかを表す特性値である. u^*_s/u^*_M が 1 のとき, M 粒子と S 粒子の上面の高さが一致しており, M 粒子層の厚さが 0 であることを表している. また, M 粒子層の厚さが十分に大きくなると u^*_s/u^*_M の値は 0 に近づく傾向にある. 図中の ●, ▲ はそれぞれ Experimental Set 1, Set 2 の結果を示している. この結果を見ると, Experimental Set 2 の結果が Experimental Set 1 と比較して右方に位置していることがわかる. この差は, M 粒子の粒径 D_M が異なることに伴い, 限界摩擦速度 u^*_{MC} の値が異なることによって生じると考えている. 今後さらに考えていくべき点は少ないものの, この遮蔽の関係も式 (1) と同様の以下の式で表されると考える.

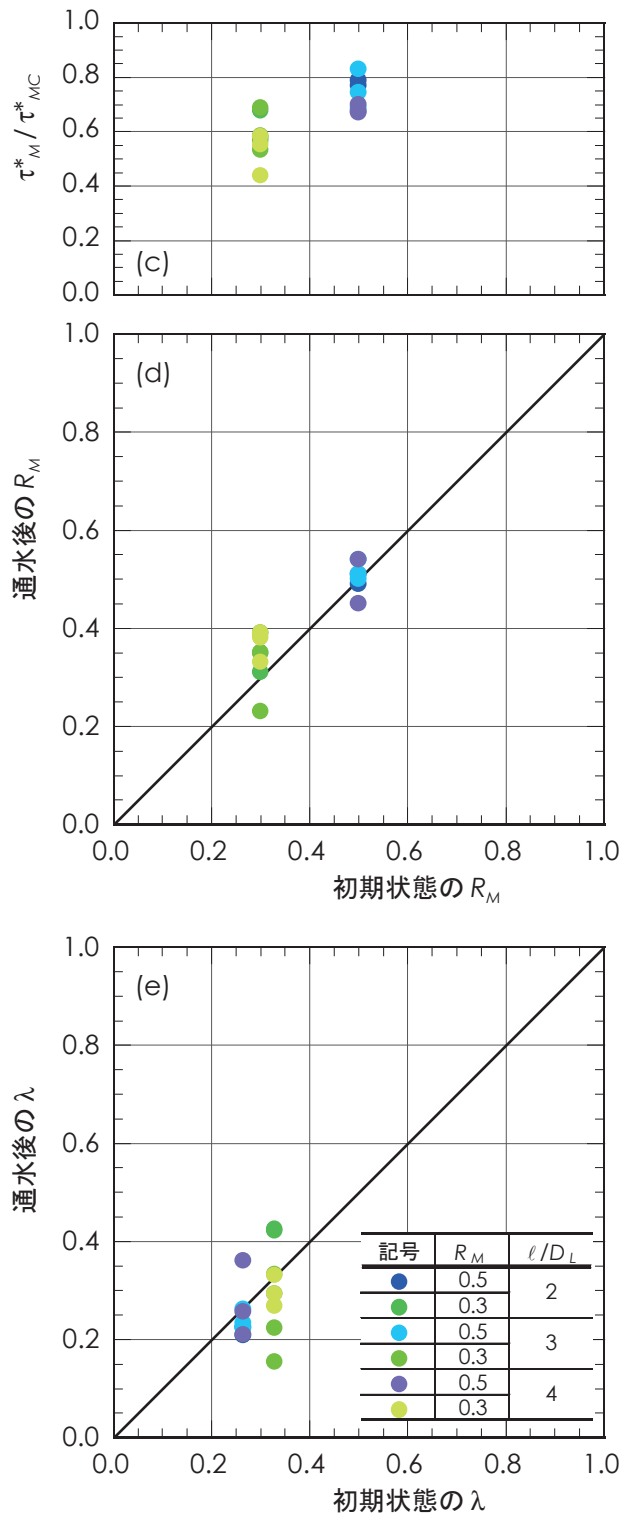


図-9 L-M-S 河床の静的平衡状態の鉛直構造のまとめ (その 2) : (c) τ_M^*/τ_{MC}^* と R_M , (d), (e) はそれぞれ通水後の M 粒子のみからなる層の下方に存在する材料の R_M, λ と初期状態の R_M, λ の関係を表している. なお, これらは L 粒子を縦断方向に離れて配置した粗な場合の結果をまとめたものである.

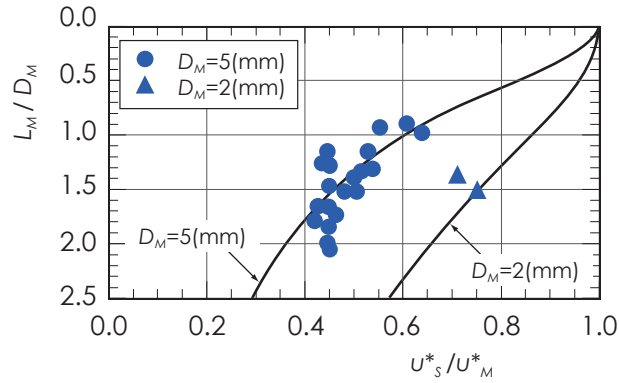


図-10 M粒子層の厚さ L_M をM粒子の粒径 D_M で除した値とM粒子上面に作用する摩擦速度 u_M^* に対するS粒子上面に作用する摩擦速度 u_s^* の比：図中の黒色の破線は5mmのM粒子を、黒色の実線は2mmのM粒子を用いた場合の式(5)を表した関係である。

$$L_M / D_M = \gamma \times ((u_s^* / u_M^*)^{-2} - 1)^{0.5} \quad (3)$$

ここで、 γ は比例定数である。また、静的平衡状態におけるM粒子上面に作用する実際の摩擦速度 u_M^* は限界の値 u_{MC}^* 以下であり、S粒子上面に作用する摩擦速度 u_s^* は沈降速度 w_{oS} に等しいと考えられるため、図の横軸の最小値は w_{oS} / u_{MC}^* になる。この横軸の値のときの縦軸の L_M / D_M を1.7とおく。芦田・藤田²⁾による実験でも粗砂の露出の度合いがその粒径の1.8倍程度になると細砂の浮遊が認められなくなるという結果が得られており、これと概ね等しい値と考えられる。式(3)で $u_s^* / u_M^* = w_{oS} / u_{MC}^*$ のとき $L_M / D_M = 1.7$ を代入すると以下の式になる。

$$1.7 = \gamma \times ((w_{oS} / u_{MC}^*)^{-2} - 1)^{0.5} \quad (4)$$

式(3)と(4)から γ を消去すると、

$$\frac{L_M}{D_M} = 1.7 \times \frac{((u_s^* / u_M^*)^{-2} - 1)^{0.5}}{((w_{oS} / u_{MC}^*)^{-2} - 1)^{0.5}} \quad (5)$$

になる。この式(5)がM粒子層がS粒子に与える遮蔽を表す関係である。なお、式(4)、(5)は、(4)を見てもわかるように、 $w_{oS} < u_{MC}^*$ の範囲内で定義された式である。これは、 w_{oS} が u_{MC}^* 以上になると、M粒子層が形成されなくなるためである。一般には、M粒子とS粒子の粒径は1オーダー程度の差があるため、 $w_{oS} < u_{MC}^*$ の条件を満たす。

図-10中の二つの黒色の実線が式(5)を表している。実線のうち左方に位置するものが $D_M = 5$ (mm), 右方に位置するものが $D_M = 2$ (mm) の場合である。この差は M 粒子の移動限界の摩擦速度が異なるために生じる。本実験の条件下では, この実線は結果と概ね一致していることがわかる。この考え方に基づいて計算すると, 河床表面に M 粒子のみからなる層が露出している場合の S 粒子上面に作用する摩擦速度を求めることができる。

参考文献

- 1) 関根正人, 矢島英明: 礫・シルト充填河床モデルを用いた植生を伴う流路の変動解析, 水工学論文集, 第 59 巻, pp.991-996, 2005.
- 2) 藤田正治, 道上正規, 北川豊広, 三村光太郎: 粗礫河床における浮遊砂の濃度分布, 土木学会第 47 回年次学術講演会, pp.168-169, 1992.

第 5 章

動的平衡状態における河床の鉛直構造

5.1 中粒子と小粒子の供給量に伴う構造の変化

動的平衡状態における河床の鉛直構造は、設定した条件により異なる状態に到る。この条件のうちの一つが供給された M 粒子と S 粒子の量ならびに比率である。もう一つが河床に作用する掃流力の平均値である。M 粒子の供給量 Q_M と S 粒子の供給量 Q_S をともに変化させると、それに伴って現れる動的平衡状態の鉛直構造の変化を系統的に捉えるのが難しくなってしまう。そのため、 Q_M を一定の値とし、 Q_S を異なる値に設定することが河床の鉛直構造に与える影響について検討した。ここでは、流量 $Q_w = 5$ (l/s), $Q_M = 0.4$ (cm³/s) の条件下で Q_S を異なる値に設定した Case A の結果について述べる。なお、初期条件を静的平衡状態に到達した後の河床とした。このときの河床を模式化したのが図-5 (c) である。動的平衡状態に到達したときの河床に作用する平均の摩擦速度は $u^* = 0.038 \sim 0.047$ (m/s) 程度である。動的平衡状態の鉛直構造を見てみると、4つの Stage に大きく分けることができる。これらを模式的に描いたのが図-11 である。図-11 (a) ~ (d) の順に S 粒子の供給量 Q_S が大きくなる。図中の赤色ならびに緑色の一点鎖線は、静的平衡状態のときの M 粒子と S 粒子上面の位置をそれぞれ表している。この静的平衡状態の河床を初期条件にすると、これらの一点

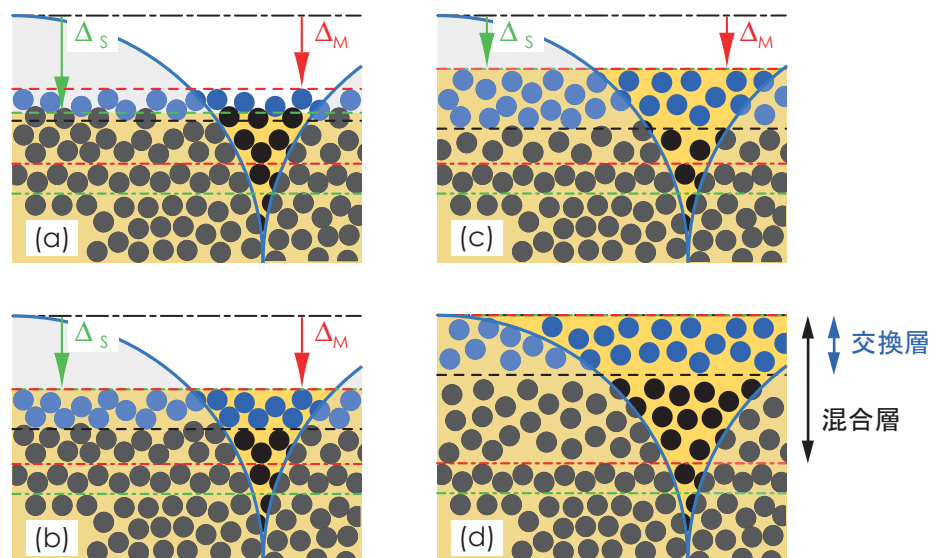


図-11 動的平衡状態における河床の鉛直構造の概念図：(a) ~ (d) に示した順に S 粒子の供給量 Q_S が大きくなる。また、図中の一点鎖線は静的平衡状態を、破線は動的平衡状態の高さを示している。●で示された M 粒子は、動的平衡状態に到達した後に供給されたものであり、この M 粒子による層が交換層に相当する。

鎖線の上方に供給されてきた M 粒子と S 粒子が堆積していく。L 粒子の遮蔽効果を考えると、M 粒子ならびに S 粒子の上面の位置が L 粒子頂部に近づくということは、M-S 粒子の上面に実際に作用する摩擦速度が大きくなることを意味する。通水開始直後には下流端から流出してくる M 粒子ならびに S 粒子の量は概ね 0 に等しい。その後、M-S 粒子の上面の位置が高くなると実際に作用する摩擦速度が大きくなるため、流出量は時間が経過するにつれて大きくなる。やがて、それぞれの粒子の供給量と流出量が釣り合うような位置まで M-S 粒子の上面の高さが達すると、それ以降は河床表面の高さが変わらない状態になる。これが河床の動的平衡状態である。

図 -11 (a) ~ (d) を参照しながら、動的平衡状態における河床表面の高さに注目しながら、河床の鉛直構造の変化の概要について以下にまとめる。図 -11 では、動的平衡状態における M 粒子、S 粒子上面の高さが赤色ならびに緑色の破線でそれぞれ示されている。また、緑色と赤色の一点鎖線で挟まれた層が静的平衡状態のときの M 粒子層であり、この M 粒子群の間隙に供給されてきた S 粒子が充填される。その上方に形成される赤色の一点鎖線と破線で挟まれた層を「混合層」と呼ぶことにする。なお、前章と同様に、L 粒子頂部から M 粒子ならびに S 粒子上面までの鉛直距離を Δ_M 、 Δ_S とそれぞれ定義する。

図 -11 (a) は、供給量 Q_S が相対的に小さい条件下で現れる動的平衡状態を模式的に示したものである。この場合には、静的平衡状態と同様に、河床表面下に M 粒子のみからなる層が残る状態になる。この状態を Stage 1 と呼ぶ。 Q_S を徐々に大きな値にすると M 粒子のみからなる層の厚さが小さくなり、やがて M 粒子と S 粒子の上面の高さが一致する状態になる。これを Stage 2 と呼び、図 -11 (b) に示されている。Stage 1 ならびに 2 では Δ_S の値は異なるものの、 Δ_M は一定のままである。さらに、 Q_S を大きくすると、Stage 2 と同様に M 粒子と S 粒子の上面が一致するとともに、 $\Delta_M (= \Delta_S)$ が Stage 2 と比較して小さな状態で動的平衡状態に到る。この状態が図 -11 (c) に示すような Stage 3 である。 Q_S がさらに大きくなると、図 -11 (d) のように L 粒子頂部まで M-S 粒子が充填される状態になる。これを Stage 4 と呼ぶ。

ここまで述べたことを確認するため、流量 $Q_w = 5$ (l/s) ならびに M 粒子の供給量 $Q_M = 0.4$ (cm^3/s) を一定として Q_S を異なる値に設定した実験を行った。これが Case A であり、その結果を表 -3 にまとめた。また、空隙率 λ 、M 粒子の比率 R_M にも注目しながらさらに詳しく説明する。

(a) $Q_S = 0$ (cm^3/s)、すなわち M 粒子のみを供給した場合に到達する動的平衡状態における Δ_M / D_L は 0.15 であった。この場合には混合層内に S 粒子は存在せず、 R_M は 1.0 であった。 Δ_S / D_L は 0.37 であり、静的平衡状態のときの値 0.36 と変わらないことが確認された。さらに、混合層の最下面の高さは、静的平衡状態における M 粒子層の上面の位置と変わらないことが確かめられた。ここで、静的平衡状態の M 粒子層に注目したとき、L 粒子群の間隙に占める M 粒子の体積比率は 0.4 であった。すなわち、L 粒子群の間隙に占める空隙の体積比率を空隙率と定義すると、M 粒子層内の空隙率は 0.6 である。図 -11 の赤色と緑色の一点鎖線で挟まれた層を通水後に採取し、空隙率を求めてみると 0.6 であり、静的平衡状態の M 粒子層の値と変わらなかった。なお、M 粒子のみを供給した場合には、緑色の一点鎖線より上方の層内に S 粒子が存在しないため、L 粒子群の間隙は M 粒子のみで充填されている。これらの結果から、静的平衡状態の M 粒子層の最上面より下方の構造は給砂を行っても変わらないままであるということがわかる。また、混合層内

表 -3 Case A の実験結果： Δ_M ならびに Δ_S は L 粒子の頂部から M 粒子あるいは S 粒子上面までの鉛直距離、 δ_E は交換層の厚さと定義している。また、M 粒子の比率 R_M ならびに空隙率 λ は混合層内の値が示されている。

Case	流量 Q_w (l/s)	供給量 (cm^3/s)		R_M	Δ_M / D_L	Δ_S / D_L	λ	δ_E / D_M
		Q_M	Q_S					
A1	5.0	0.4	0.0	1.00	0.15	0.37	0.66	1.3
A2	5.0		0.2	0.82	0.15	0.20	0.49	1.7
A3	5.2		0.4	0.72	0.15	0.15	0.49	1.9
A4	5.1		1.4	0.59	0.13	0.13	0.56	1.9
A5	5.2		2.5	0.24	0.11	0.11	0.51	3.1
A6	4.9		3.8	0.11	0.00	0.00	0.50	3.2
A7	5.0		4.5	0.08	0.00	0.00	0.57	2.7

の空隙率を求めてみると $\lambda = 0.6$ であり、静的平衡状態の M 粒子層と変わらない値になった。これにより、混合層内に M 粒子が充填される度合いと静的平衡状態の M 粒子層内の度合いが変わらないことがわかる。

(b) Q_S が相対的に小さい条件に相当する $0.2 \text{ cm}^3/\text{s}$ の場合には, Stage 1 の状態になった。

図-11 (a) のように、混合層内の M 粒子群の間隙の一部に S 粒子が充填されているため、空隙率の値は 0.6 より小さくなるとともに、M 粒子の比率 R_M は 1 より小さくなる。 Q_S が大きくなるにつれて、これらの空隙率 λ ならびに M 粒子の比率 R_M は小さくなる。河床表面の高さを見てみると、 $\Delta_M / D_L = 0.14$ であり、M 粒子のみを供給した場合と変わらない。また、このときの混合層に占める M 粒子の体積比率は 0.4 であり、静的平衡状態の M 粒子層の値と変わらない。最上位にある S 粒子は、L 粒子だけでなく M 粒子のみからなる層の遮蔽の効果を受けている。その結果として、 Q_S に見合った摩擦速度になる位置で動的平衡状態に到る。そのため、 Q_S が大きくなるにつれて Δ_S は小さくなる。

(c) Q_S を大きな値に設定するにつれて、S 粒子の輸送量が大きくなる必要があるため、S 粒子上面に作用する摩擦速度が大きくなる。すなわち、M 粒子のみからなる層から受ける遮蔽の効果を小さくするため、S 粒子上面の位置が高くなる。その結果、図-11 (a) に示された M 粒子のみからなる層の厚さが小さくなる。 Q_S が $0.4 \text{ cm}^3/\text{s}$ になると、河床表面に M 粒子のみからなる層がなくなり、M 粒子と S 粒子の上面の位置が一致する Stage 2 の状態になる。この Stage 2 でも $\Delta_M / D_L = 0.15$ であり、Stage 1 のときと変わらない。このとき水流の作用を受けながら堆積した M 粒子群の頂部まで S 粒子が充填されている。空隙率の値は 0.6 より小さな値である 0.4 になり、 R_M は 0.7 程度の値になる。

(d) Q_S を $0.4 \text{ cm}^3/\text{s}$ より大きくすると、M 粒子群の間隙を S 粒子が完全に充填する状態になるだけでなく、Stage 1, 2 と比較して Δ_M / D_L 、 Δ_S / D_L が小さな Stage 3 の状態になる。S 粒子に注目してみると、Stage 2 よりも供給量が大きいため、S 粒子上面に作用する摩擦速度も大きくなる必要がある。そのため、L 粒子の遮蔽効果を

考えると S 粒子上面が高い位置で動的平衡状態に到る。一方, M 粒子に注目してみると, Δ_M / D_L が小さくなることによって M 粒子上面に作用する摩擦速度が大きくなる。しかし, これは単に流出量が大きくなることを意味しているわけではない。混合層内に占める M 粒子の比率 R_M が小さくなることによって, 供給量に見合った位置で動的平衡状態に到る。M 粒子上面に作用する摩擦速度が同じであっても, R_M の値が小さければ M 粒子の流出量は小さくなる。以上のことから, Q_S が大きくなるにつれて混合層内の R_M が小さくならなければならない。その結果, M 粒子相互の間の距離が大きな状態で動的平衡状態に到る。

(e) Q_S がさらに大きくなると, Δ_M ならびに Δ_S が 0 になる Stage 4 の状態になる。これ以上の Q_S になると, 河床表面は M 粒子と S 粒子の二粒径で河床が構成されることになり, このような河床は関根ら¹⁾により開発された「礫・シルト充填河床モデル」の考え方で解析することができる。これは, 前述の L 粒子同士が十分に離れて設置された粗な場合と同様である。

以上の結果を整理したのが図-12 である。これらの図を見ながら Q_S に応じたそれぞれの縦軸の値の変化についてまとめる。(a) は, Δ_M / D_L , Δ_S / D_L と混合層内の M 粒子の比率 R_M の関係を示したものである。図中の●は Δ_M / D_L を, ▲は Δ_S / D_L を表している。なお, 図中の赤色と緑色の一点鎖線は図-11 のときと同様にそれぞれ静的平衡状態における M 粒子と S 粒子の上面の高さを表している。Stage 1 では Δ_M / D_L , Δ_S / D_L の二つの結果を確認することができるものの, Stage 2 ~ 4 では両者が完全に一致して重なっていることがわかる。Case A では, $Q_S = 0.4 \text{ (cm}^3/\text{s)}$ のとき Stage 2 になることが図-12 (a) から見て取れる。なお, この条件下では Q_M と Q_S が一致するときに Stage 2 になっているものの, 必ずしもこのような結果になるというわけではないことに注意を要する。M 粒子上面の位置で作用する摩擦速度が S 粒子の供給量に見合う値に等しくなったとき Stage 2 になる。M 粒子上面の位置で作用する摩擦速度が S 粒子の供給量に見合う値よりも大きな場合には Stage 1 に, 小さな場合には Stage 3 ~ 5 になる。

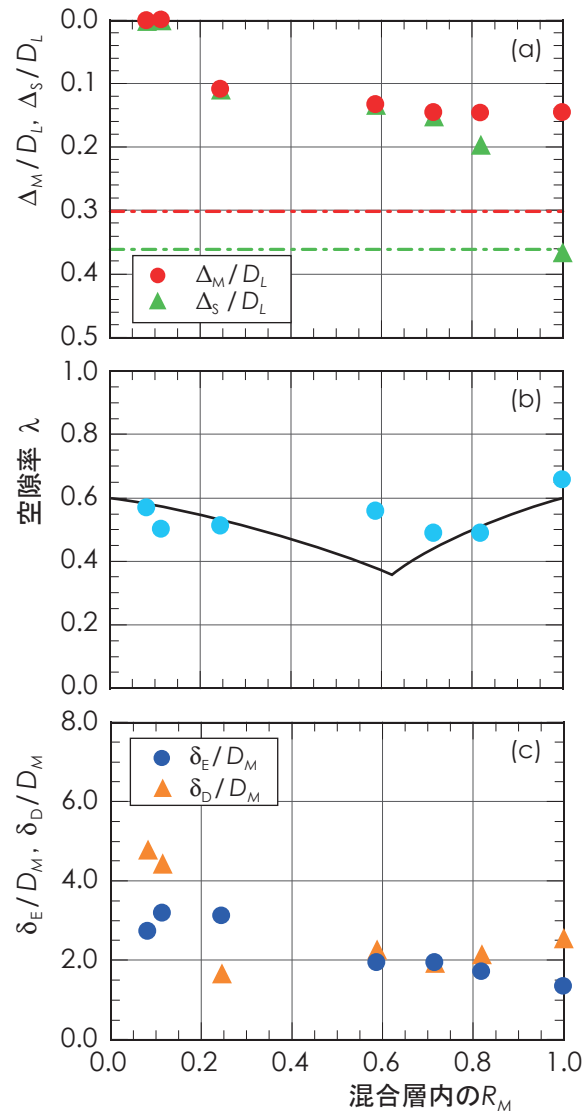


図-12 Case Aにおける動的平衡状態の鉛直構造のまとめ (その1): (a) Δ_M/D_L , Δ_S/D_L と混合層内の R_M , (b) 空隙率 λ と R_M , (c) δ_E/D_M , δ_D/D_M と R_M の関係を表している。

図-12 (b) は、空隙率 λ と R_M の関係を示している。M 粒子のみを供給した場合の混合層内の R_M は 1.0 であり、このときの λ は 0.6 程度であった。Stage 1 では河床表面に M 粒子のみからなる層が形成されており、 Q_S が大きくなるにつれてこの層の厚さは小さくなる。すなわち、M 粒子群の間隙に S 粒子がより充填される状態になるため、 λ は小さくなる。このときの混合層は M 粒子のみからなる層が形成されているため、鉛直方向に一様ではない。しかし、この状態を鉛直方向に一様な等価なものに置き換えるとした場合の R_M , λ の値で結果を整理している。そのため、Stage 1 と

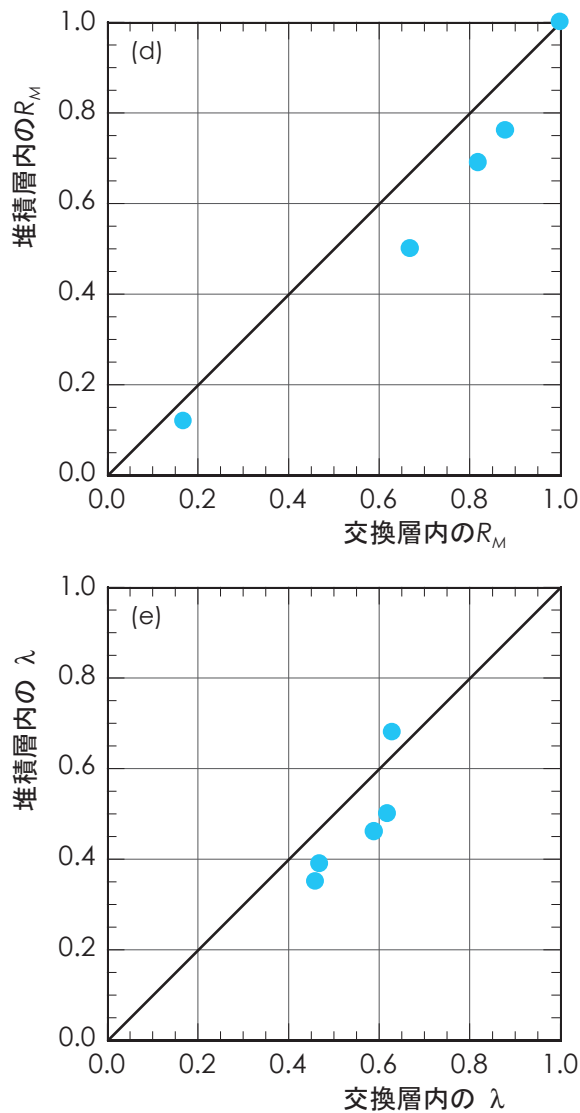


図-12 Case Aにおける動的平衡状態の鉛直構造のまとめ（その2）：(d), (e)はそれぞれ堆積層内と交換層内の R_M , λ の関係を表している。

2～5の R_M , λ の値がもつ意味は異なることに注意を要する。Stage 2ではM粒子とS粒子上面の高さが一致する状態になるため、鉛直方向に一樣な河床になる。このときの空隙率が最小値0.4をとる。Stage 3～5の混合層内ではM粒子同士の間隔が広い状態になる。この場合には、S粒子より粒径が大きなM粒子の占有率が小さくなるため、 R_M が小さくなるにつれて λ は大きくなる。やがて、S粒子のみからなる場合の充填率0.6に漸近していく。このように、空隙率 λ は0.4～0.6の範囲内の値であり、Stage 2のときに最小値0.4をとることがわかった。ここで、 λ と R_M の関係に

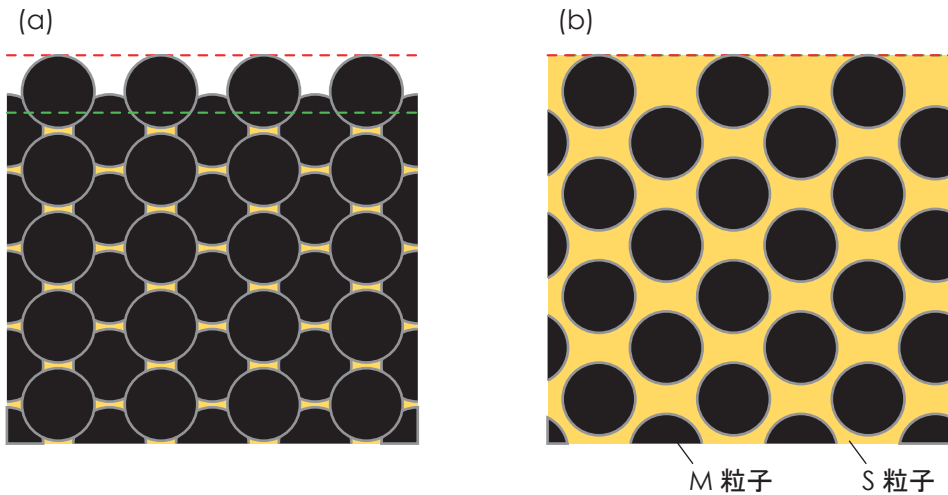


図-13 S粒子がM粒子群の間隙に充填される状況に関する模式図：(a)は R_M が大きな場合であり、骨格がM粒子により構成されている。一方、(b)は R_M が小さな場合であり、M粒子同士が離れた状態で存在している。

ついてさらに詳しく考えていくことにする。空隙率についてはこれまでも研究されてきており、堤・藤田・Sulaiman²⁾は、粒子を設置することができる最低位置を選択するという手法を用いて空隙率を計算する手法を提案した。また、関根・林³⁾は二粒径河床の空隙率を理論的に算出する手法を提案した。この手法では、次の2つに分けて空隙率を考える。この2つの場合を模式的に描いたものが図-13である。(a)はM粒子同士が接するように存在して河床骨格を構成し、その間隙にS粒子が充填される場合である。図中の赤色ならびに緑色の破線はそれぞれM粒子、S粒子の上面の高さを表している。一方、(b)はM粒子同士が離れた状態で存在し、主としてS粒子が存在する場合である。本研究では、前者がStage 1であり、後者がStage 3～5に相当する。この考え方では、M粒子あるいはS粒子のみからなる均一粒径の材料からなる河床の空隙率をそれぞれ λ_M 、 λ_S と定義している。Stage 1のとき、骨格を構成するM粒子の間隙の一部にS粒子が充填される。すなわち、図-13(a)のように、赤色の破線より下方に緑色の破線が現れる。この場合の空隙率は以下の式で表される。

$$\lambda = \lambda_M - (1 - R_M) / R_M \times (1 - \lambda_S) \quad (6)$$

(a)と(b)の境界に当たるStage 2のとき、 $R_M = R_M^*$ 、 $\lambda = \lambda^*$ とおくと、 R_M^* は以下のようになる。

$$R_M^* = (1 - \lambda_M) / (1 - \lambda^*) \quad (7)$$

$R_M > R_M^*$ のとき Stage 1, $R_M < R_M^*$ のとき Stage 3 ~ 5 になる. 後者の場合, M 粒子群の間隙のうち λ_S の比率で S 粒子が充填される部分と λ^* で充填される部分に分けて考えると空隙率 λ は以下の式になる.

$$\lambda = \frac{(1 - \lambda_L)\lambda_S - (\lambda_S - \lambda^*)R_M}{1 - \lambda_L - (\lambda_S - \lambda^*)R_M} \quad (8)$$

しかしながら, 均一粒径河床の空隙率が粒径によって異なるとは考えづらい. 粒子を充填する容器が粒径に比べて十分な大きさではない場合を除けば均一粒径の空隙率は一定と考えるべきである. そのため, この均一粒径の空隙率を λ_u と定義すると, 式 (6) ~ (8) はそれぞれ式 (9) ~ (11) のように書き換えることができる.

$$\lambda = \lambda_u - (1 - R_M) / R_M \times (1 - \lambda_u) \quad (9)$$

$$R_M^* = 1 / (1 + \lambda_u) \quad (10)$$

$$\lambda = (1 - R_M)\lambda_u / (1 - R_M\lambda_u) \quad (11)$$

なお, $R_M > R_M^*$ のとき式 (9), $R_M < R_M^*$ のとき式 (11) になる. この関係を図-12 (b) 中の黒色の実線で示した. なお, 実験結果から $\lambda_u = 0.6$ としており, この値を式 (10) に代入すると $R_M^* = 0.63$ になる. この図を見ると, 式 (9) ~ (11) によって河床材料の R_M と空隙率 λ の関係が概ね表現できていることがわかる. なお, Stage 2 で微分不可能な点が現れていることがわかる. これは, 前述のように Stage 1 の R_M , λ を鉛直方向に一様な等価なものに置き換えたためであると考えられる.

初期条件を静的平衡状態に到達した後の河床に設定した場合には, 堆積する一方の過程を経て動的平衡状態に到る. この場合には, 混合層をさらに詳しく見てみると, 二つの層に分けて考えることができる. 河床表面に位置するものを交換層, その下方に位置するものを堆積層と呼ぶ. 交換層内の粒子は動的平衡状態に到達した後も流砂と交換を常に繰り返している. 一方, 堆積層は動的平衡状態に到るまでに堆積して形成された層であり, 動的平衡状態に到達した後に流砂と交換が生じることはない. 交換層と堆積層の厚さをそれぞれ δ_E , δ_D と定義する. これらの層内の構造を明らかに

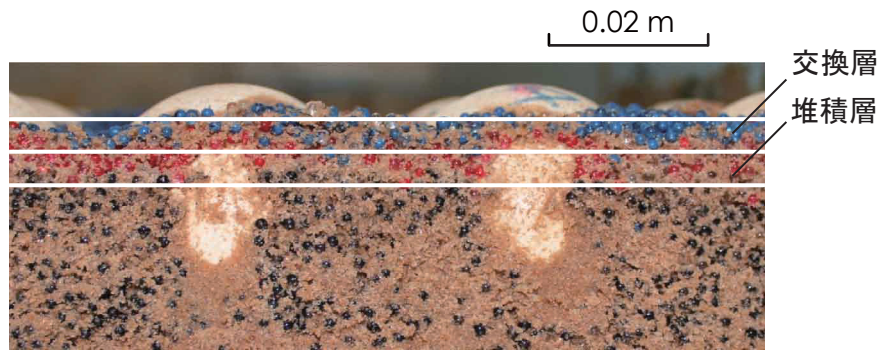


写真-8 Case A3における河床の動的平衡状態の鉛直構造：動的平衡状態に到達する前後でM粒子を赤色から青色に変更することにより，河床表面の交換層とその下方の堆積層の構造を調べた。

するため，前述のように動的平衡状態に到達する前後で供給するM粒子の色を赤から青に変えた実験を行った．写真-8は， $Q_w = 5$ (l/s)， $Q_M = 0.4$ (cm³/s)， $Q_S = 0.4$ (cm³/s)に設定したCase A3における模擬河床を水路横断方向に切断し，その鉛直構造を示したものである．なお，水路の下流側から上流側に向かって撮影されている．この写真のように，河床表面には動的平衡状態に到達した後に供給されたS粒子と青色のM粒子による層が形成されている．これを模式化したのが図-11であり，図中に●で示されたM粒子は，動的平衡状態に到達した後に供給されたもので，このM粒子による層が交換層に相当する．図-12(c)は， δ_E ， δ_D の値をM粒子の粒径 D_M で除した値を縦軸に，混合層内の R_M を横軸にとって整理した結果を示している．図中の●は交換層内の値を，●は堆積層内の値を表している．この図を見ると，M粒子のみを供給した場合に相当する $R_M = 1.0$ のときの δ_E / D_M は1.3であることがわかる． R_M が小さくなるにつれて， δ_E / D_M が大きくなる．ただし，この値は単調に大きくなるわけではなく，M粒子の粒径 D_M の3倍程度の値に漸近する傾向にある．礫床河川の場合に，交換層の厚さが90%粒径 D_{90} の1～3倍程度になることはこれまでも知られている．一般には，河床を構成しているすべての材料の粒度分布から D_{90} は求められる．しかしながら，本研究では水流によって移動しないL粒子が河床材料に含まれているため，これを除いた実際に移動する材料の粒径によって交換層の厚さは決まるものと考えられる．堆積層の厚さ δ_D に注目すると，Stage 1, 2では，交換層の上面の高さは変わ

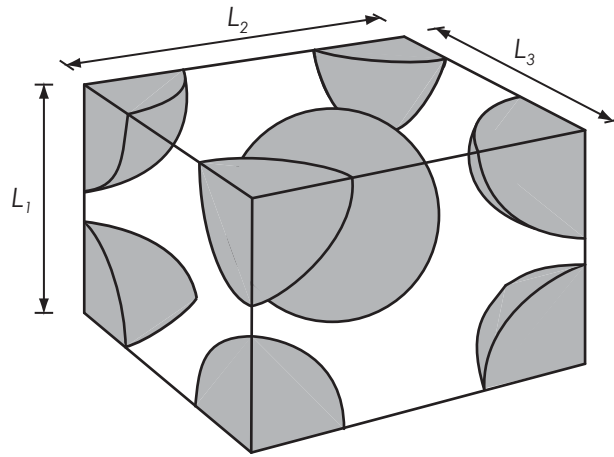


図-14 M粒子群の配置の模式図

らないため、 R_M が小さくなるにつれて δ_D も小さくなることわかる。Stage 3になると、徐々に $\delta_E / D_M = 3.0$ という一定の値になり、河床表面の高さに相当する交換層の上面が高い位置で動的平衡状態に到るため、 δ_D は大きくなる。

図-12 (d), (e)は、交換層内と堆積層内の R_M と λ の関係を示したものである。これらの図を見ると、交換層と堆積層内の構造に違いはないことがわかる。これは、交換層内の粒子が絶えず混合を受けることにより粒度構成が均一になるためと推察される。河床が変動する過程でも交換層内が混合を受け均一になる。その次の瞬間に河床表面の位置が高くなることによってそれまで交換層の一部に相当していた部分が堆積層になる。これを繰り返すことにより徐々に堆積層が厚くなる。このようにして堆積層が形成されていくため、交換層と堆積層の構造に違いが生じないものと推察している。

河床変動計算を行う際、M粒子同士の距離についても評価していく必要がある。今後考えていくべき点は少なくないが、M粒子群の基本的な構造は体心立方格子に似た直方体と仮定した。これを模式的に描いたものが図-14である。体心立方格子はすべての辺が等しい長さをもつ立方体である。しかし、M粒子が堆積する際、鉛直方向にはある程度密に充填されるのに対して、水路の縦横断方向には鉛直方向と比べると密には充填されないものと考えた。また、縦横断方向の距離は等しいものとした。

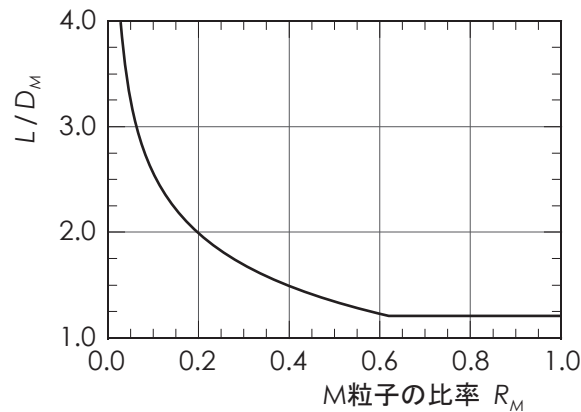


図-15 動的平衡状態の混合層内の M 粒子同士の中心点間の距離 L を M 粒子の粒径で除した値と M 粒子の比率 R_M の関係

すなわち，鉛直方向の辺の長さを L_1 ，縦断方向を L_2 ，横断方向を L_3 と定義すると， $L_1 < L_2 = L_3$ の関係が成り立つとする．動的平衡状態における M 粒子群の配置を評価するために，まず静的平衡状態における配置を考える．静的平衡状態の M 粒子層では，鉛直方向の距離 L_1 は均一粒径の材料からなる M 粒子同士が互いに接しているときの値と等しいと仮定する．そのため， $L_1 = 2 / 3^{1/2} D_M$ になる．ここで，直方体の体積を考えてみる．まず，直方体の中に M 粒子は 2 個存在し，この体積を M 粒子の比率 R_M で除すと直方体の中に存在する M-S 粒子の体積が求まる．さらに，これを $(1 - \lambda)$ で除すと M-S 粒子ならびに空隙（水）の総体積，すなわち直方体の体積を算出することができる．M 粒子層内の R_M は 1 であり，実験結果から空隙率 λ は 0.6 であるため，直方体の体積が求まる．この値を L_1 で除して，平方根を計算すると $L_2 (= L_3)$ がわかる．このようにして計算すると， $L_1 / D_M = 1.15$ ， $L_2 / D_M = 1.51$ になる．M 粒子同士の中心点間距離 L は， $L_1 \sim L_3$ のそれぞれを二乗し足し合わせたものの二乗根を計算することで求めることができる．このようにして求められた L / D_M は 1.21 である．次に，これらの値を基に動的平衡状態における M 粒子群の構造を考える．Stage 1, 2 のときの混合層内の空隙率は静的平衡状態における M 粒子層内の値と変わらないため，M 粒子同士の中心点間距離 L も変わらないと考えられる．一方，Stage 3 以降では R_M が小さくなるにつれて L の値が大きくなる．ここで，動的平衡状態におけ

る M 粒子群の構造は、静的平衡状態の M 粒子層内の $L_1 \sim L_3$ の比率を維持したまま L が大きくなると仮定する。

$$L_1 : L_2 : L_3 = 1.15 : 1.51 : 1.51 \quad (12)$$

$L_1 = 1.15 l$, $L_2 = L_3 = 1.51 l$ とおくと直方体の体積は次のように書き表すことができる。

$$1.51^2 \times 1.15 \times l^3 = 2 \times \frac{\pi}{6} D_M^3 \times \frac{1}{(1-\lambda) R_M} \quad (13)$$

そのため、 l を算出すると L/D_M は以下のような関係になることがわかる。

$$\frac{L}{D_M} = \frac{1}{2} \sqrt{1.51^2 \times 2 + 1.15^2} \times \sqrt[3]{\frac{1}{1.51^2 \times 1.15} \times \frac{\pi}{3} \times \frac{1}{(1-\lambda) R_M}} \quad (14)$$

式(9), (11)は R_M と λ の関係を表しており、これらの関係と式(14)を用いると、任意の R_M の値に対して L を求めることができる。図-15は、 L/D_M と R_M の関係を表している。このように、 $R_M > R_M^*$ のときには M 粒子同士を中心点間距離 L は一定の値である。一方、 $R_M < R_M^*$ のときには R_M が小さくなるにつれて L が大きくなる。この図を見ると、 $R_M = 0$ は L-S 河床の場合に相当するため L は無限大に発散する関係にあることがわかる。以上のように M 粒子の中心点間距離を推定してきたが、動的平衡状態に到達した後の河床に存在する M 粒子同士の間隔を精確に計測することは難しいため、この結果の妥当性については検討の余地があるものと捉えている。

ここで、初期条件についてふれておく。 $R_M = 0.5$ に設定した M 粒子と S 粒子を L 粒子群の間隙に充填した河床を対象として、静的平衡状態に到るまで通水を行った。この状態の河床を初期条件として、M 粒子ならびに S 粒子を供給した。前章で説明したように、 R_M の値に応じて静的平衡状態における M 粒子上面の高さは異なる。初期河床の Δ_M の値が変わると、結果として現れる堆積層の厚さも変わる。しかし、堆積層ならびに交換層内の空隙率、M 粒子の比率は変わらないと考えられる。さらに、交換層の上面の高さ、すなわち河床表面の高さも変わることはない。そのため、 R_M を異なる値に設定した実験を行う必要はないと考えている。

5.2 中粒子の供給量の違いが与える影響

前節では、M 粒子の供給量 Q_M をある値に固定し、S 粒子の供給量 Q_S を異なる値に設定したときに現れる動的平衡状態の変化について説明した。ここでは、掃流砂として移動する M 粒子の供給量 Q_M を Case A とは異なる値に設定することが動的平衡状態の河床の鉛直構造に与える影響に着目して考察を加える。Case B として、流量 $Q_w = 5$ (l/s), $Q_M = 1.2$ (cm³/s) の条件下で Q_S を異なる値に設定した実験を行った。Case A と比較すると、 Q_w は同じ値であり、 Q_M を異なる値に設定していることがわかる。この Case A と B の結果を比較することにより、M 粒子の供給量の違いが与える影響を調べた。河床の動的平衡状態の鉛直構造に関する Case B の結果を表 -5 にまとめて示した。これらの関係を整理したのが図 -17 である。図 -17 (a) は、 Δ_M / D_L , Δ_S / D_L と混合層内の M 粒子の比率 R_M の関係を表している。Case B における M 粒子の供給量 Q_M は、前述のように Meyer-Peter and Müller の平衡掃流砂量式を用いて算出されたものと等しい値に設定されている。そのため、(a) の図を見ると、 Δ_M / D_L が概ね 0 に等しくなっていることがわかる。これは、河床が M 粒子のみから構成されるときに、Meyer-Peter and Müller の式を用いて評価された平衡掃流砂量が本実験の平衡掃流砂量と概ね一致したことを意味している。 Q_S が小さい場合には、混合層内の R_M が大きな値であり、河床表面に M 粒子のみによる層が形成されていることがわかる。 Q_S を大きな値に設定すると、L 粒子の頂部と M 粒子、S 粒子の上面が一致する状態になる。

表 -5 Case B の実験結果 : Δ_M ならびに Δ_S は L 粒子の頂部から M 粒子あるいは S 粒子上面までの鉛直距離、 δ_E は交換層の厚さと定義している。また、M 粒子の比率 R_M ならびに空隙率 λ は混合層内の値が示されている。

Case	流量 Q_w (l/s)	供給量 (cm ³ /s)		R_M	Δ_M / D_L	Δ_S / D_L	λ	δ_E / D_M
		Q_M	Q_S					
B1	5.2	1.2	0.0	1.00	0.03	0.38	0.49	1.4
B2	5.2		0.4	0.80	0.03	0.07	0.57	2.1
B3	5.1		1.4	0.56	0.00	0.00	0.56	-
B4	5.2		2.8	0.37	0.02	0.02	0.50	-
B5	5.3		3.1	0.28	0.02	0.02	0.53	-

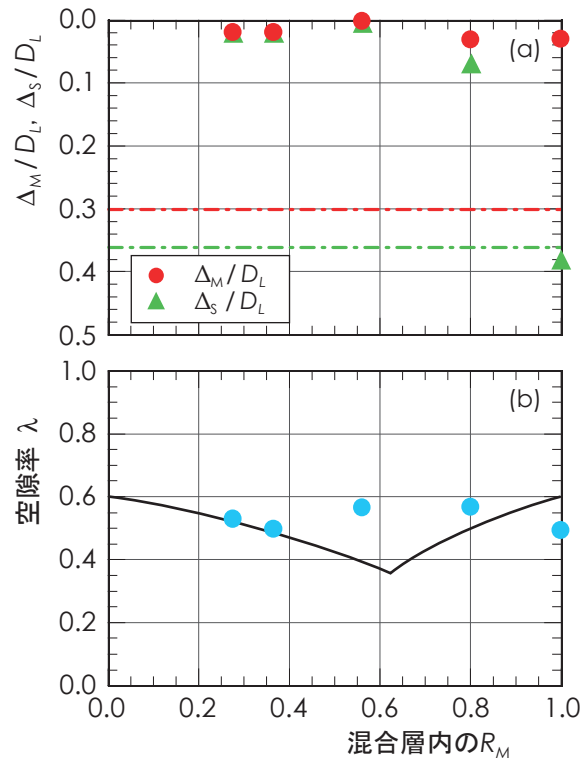


図-17 Case Bにおける動的平衡状態の鉛直構造のまとめ：(a) Δ_M/D_L , Δ_S/D_L と混合層内の R_M , (b) 空隙率 λ と R_M の関係を表している。

Q_S をさらに大きくすると、L 粒子頂部より M 粒子、S 粒子の上面が高い位置に現れることになる。この場合には、河床表面が M 粒子ならびに S 粒子の二粒径の材料により構成され、関根らにより開発された「礫・シルト充填河床モデル」¹⁾ によって河床変動解析を行うことが可能である。そのため、本研究では検討の対象外とした。(b) は空隙率 λ と R_M の関係を示しており、Case A と概ね同じ関係になることがわかる。この Case B では、交換層の厚さを調べる一連の実験を行っていない。ただし、M 粒子のみを供給したときの交換層の厚さを M 粒子の粒径で除した値 δ_E/D_M は 1.4 であり、Case A, B のときと変わらないことは確認されている。このように、供給量 Q_S に伴う動的平衡状態における河床の鉛直構造の変化には Case A と比較して定性的な違いはないことがわかった。

5.3 河床に作用する平均のせん断力の違いが与える影響

次に、流量 $Q_w = 9$ (l/s), $Q_M = 0.4$ (cm³/s) の条件下で Q_S を異なる値に設定した Case C の結果を見ながら、河床に作用する平均の掃流力の違いが動的平衡状態における河床の鉛直構造に与える影響について説明する。この条件を Case A と比較すると、M 粒子の供給量 Q_M は同じ値にして流量 Q_w を異なる値に設定していることがわかる。このときの河床に作用する平均の摩擦速度は $u^* = 0.048 \sim 0.052$ (m/s) 程度である。Case C の結果を示したのが表 -4 である。この表の結果をまとめて整理したのが図 -16 (a) ~ (e) である。これらの図は、Case A の場合の図 -12 に対応するものである。図 -16 (a) は、 Δ_M / D_L , Δ_S / D_L と R_M の関係を示したものである。この図を見ると、 $Q_S = 2.5$ (cm³/s) とした場合が Stage 2 に相当する状態になることがわかる。この Q_S より小さくした場合が Stage 1 に、大きくした場合が Stage 3 になる。本実験では、装置の制約上、Stage 4 の状態には到っていない。しかし、 Q_S をさらに大きな値に設定すると、Case A と同様に Stage 4 と定義された L 粒子が M 粒子と S 粒子によって完全に埋没する状態が現れると考えられる。河床に作用する平均の掃流力を大きな値に設定すると、供給量に見合った M 粒子ならびに S 粒子上面の位置は下方に現れる。そのため、図 -12 (a) と比較すると、結果が下方に移動していることがわかる。図 -16

表 -4 Case C の実験結果 : Δ_M ならびに Δ_S は L 粒子の頂部から M 粒子あるいは S 粒子上面までの鉛直距離、 δ_E は交換層の厚さと定義している。また、M 粒子の比率 R_M ならびに空隙率 λ は混合層内の値が示されている。

Case	流量 Q_w (l/s)	供給量 (cm ³ /s)		R_M	Δ_M / D_L	Δ_S / D_L	λ	δ_E / D_M
		Q_M	Q_S					
C1	9.1	0.4	0.0	1.00	0.20	0.42	0.57	1.4
C2	9.3		0.4	0.79	0.21	0.26	0.45	-
C3	9.0		1.4	0.63	0.20	0.21	0.44	1.7
C4	9.0		2.5	0.58	0.21	0.22	0.42	1.9
C5	9.1		3.4	0.34	0.20	0.21	0.45	-
C6	9.1		4.5	0.37	0.19	0.19	0.50	2.9
C7	8.8		5.0	0.23	0.17	0.17	0.54	2.9
C8	9.1		5.7	0.15	0.17	0.17	0.43	-

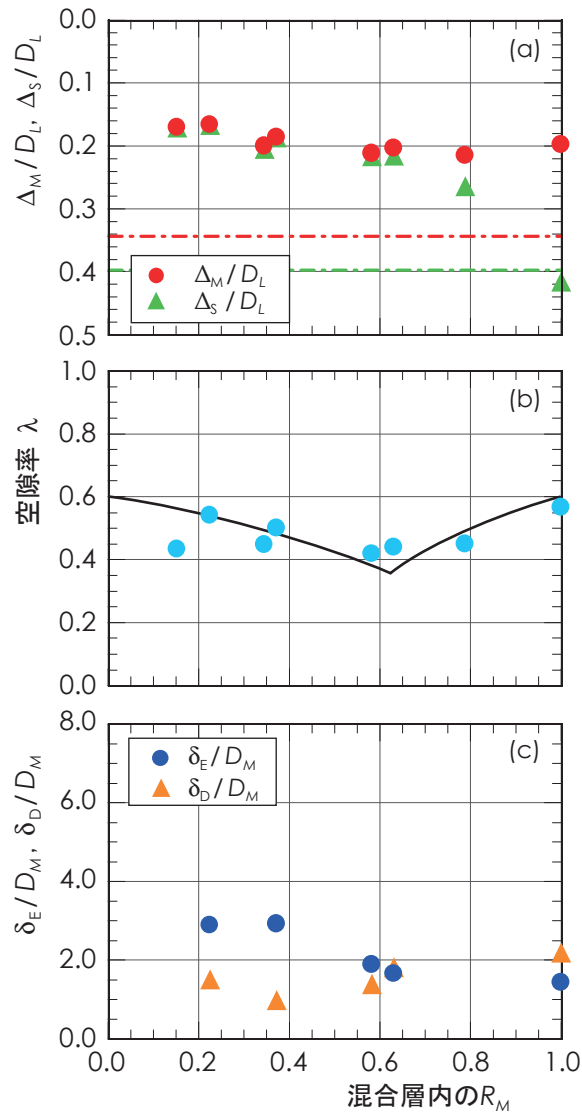


図-16 Case Cにおける動的平衡状態の鉛直構造のまとめ (その1): (a) Δ_M/D_L , Δ_S/D_L と混合層内の R_M , (b) 空隙率 λ と R_M , (c) δ_E/D_M , δ_D/D_M と R_M の関係を表している。

(b) は、空隙率 λ と R_M の関係を示している。Case A と同様に、 λ は 0.4 ~ 0.6 の範囲内の値になり、式 (9) ~ (11) を示した黒色の実線の関係を概ね満たしていることがわかる。図-16 (c) は、交換層の厚さ δ_E 、ならびに堆積層の厚さ δ_D を M 粒子の粒径 D_M で除した値を縦軸に、 R_M を横軸にとって整理した結果である。 R_M の値が 1 から小さくなるにつれて δ_E が大きくなり、やがて $\delta_E/D_M = 3.0$ に漸近していく関係になる。また、Stage 1, 2 のときには、 R_M の値が小さくなるにつれて δ_D は小さくなる。一方、Stage 3 になると Δ_M は小さくなるものの、 δ_E/D_M は 3 程度で一定のため、 R_M が小さくなる

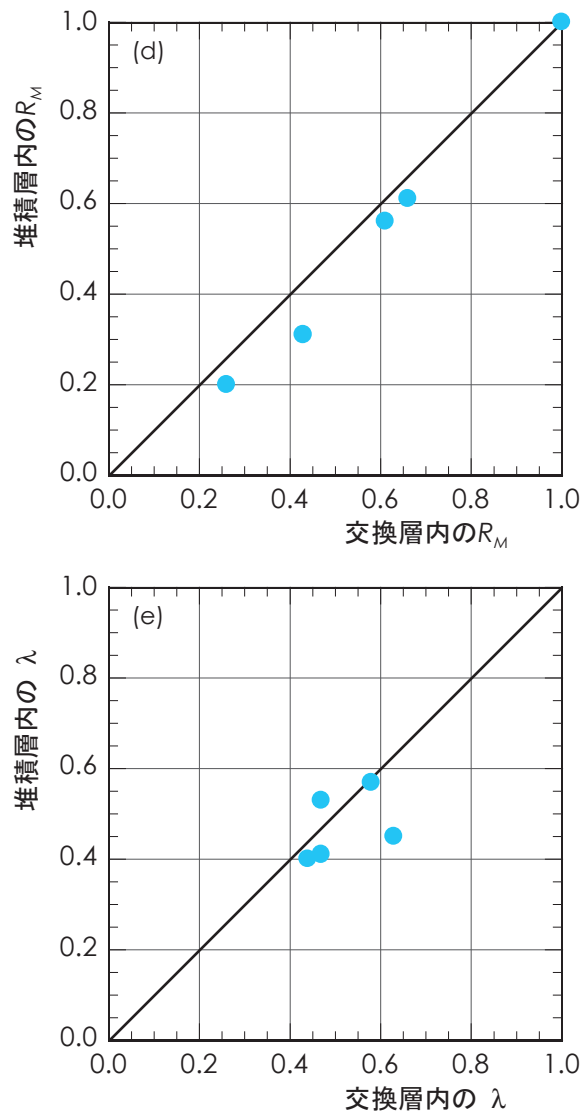


図-16 Case Cにおける動的平衡状態の鉛直構造のまとめ（その2）：(d), (e)はそれぞれ堆積層内と交換層内の R_M , λ の関係を表している。

につれて δ_D は小さくなる。図-16 (d), (e)は、それぞれ交換層と堆積層内の R_M と λ の関係を示している。黒色の実線で示された45°の直線上に結果があることから、交換層と堆積層の構造は変わらないことがわかる。以上のように、横軸を R_M にとって整理すると、Case AとCase Cでは Δ_M/D_L , Δ_S/D_L の値は異なるものの、Stage 2のときの R_M , λ , δ_E の値はほとんど変わらないことがわかる。また、 R_M に応じて λ ならびに δ_E の値が変化する傾向は同じになった。図-12ならびに16をまとめるに当たり、横軸に Q_S をとって結果を整理することも考えられる。このようにすると、横軸の値

に対する縦軸の値の変化の傾向は同じになるものの、定量的には一致せず結果が重なることはない。実河川に適用していく上で、 Q_s は一般性をもった指標ではない。そのため、結果を整理するに当たり、横軸を混合層内の R_M にすることにした。このように、河床に作用する掃流力の平均値を大きな値に設定すると、装置の制約上 Stage 4の状態に到ることはなかったものの、これを除けば動的平衡状態における河床の鉛直構造の変化には Case A と C の間に定性的な差異はないことがわかった。

5.4 初期状態が与える影響

ここでは、初期条件が河床の動的平衡状態の鉛直構造に与える影響について述べる。この初期条件として二つの場合で実験が行われている。一つが、ここまで説明してきた静的平衡状態に到達した後の河床である。もう一つが、M-S粒子の上面がL粒子の頂部と一致する河床である。この二つを比較するため、Case Aと初期状態以外の条件を同じに設定した実験を行っており、これがCase Dである。この場合の結果を表-6にまとめて示した。この表中の値の関係を整理してまとめたものが図-18である。(a)～(c)の図は、Case Aの結果をとりまとめた図-12(a)～(c)に対応するものである。Case Dの場合にも、動的平衡状態に到るまでは赤色のM粒子を、動的平衡状態に到達したと判断した後は青色のM粒子を供給した。写真-9は、動的平衡状態の河床を横断方向に切断し、水路の下流側から上流側に向かって撮影されたものである。なお、この写真は $Q_w = 5$ (l/s), $Q_M = 0.4$ (cm³/s), $Q_S = 0.4$ (cm³/s)という条件下で行われたCase D2のものであり、初期状態をM-S粒子の上面がL粒子の頂部と一致する河床にしたときに撮影されたものである。この写真からわかるように、動的平衡状態では赤色のM粒子による層が存在しない。これは、M-S粒子の上面がL粒子の頂部と一致する河床を初期条件にすると、堆積層が現れないことを意味している。すなわち、M-S粒子が浸食されることにより河床変動が生じ、供給量に見合った位置までM-S粒子の上面が低くなると動的平衡状態に到達する。そのため、交換層の下方には初期状態から変化していない層が存在している。このように堆積層がないため、

表-6 Case Dの実験結果： Δ_M ならびに Δ_S はL粒子の頂部からM粒子あるいはS粒子上面までの鉛直距離、 δ_E は交換層の厚さと定義している。また、M粒子の比率 R_M ならびに空隙率 λ は混合層内の値が示されている。

Case	流量 Q_w (l/s)	供給量 (cm ³ /s)		R_M	Δ_M/D_L	Δ_S/D_L	λ	δ_E/D_M
		Q_M	Q_S					
D1	5.3	0.4	0.2	0.80	0.15	0.18	0.57	2.1
D2	5.2		0.4	0.78	0.14	0.14	0.41	1.9
D3	5.0		1.4	0.65	0.15	0.15	0.61	1.7
D4	5.2		3.8	0.14	0.01	0.01	0.49	3.5

図-18 (c) では交換層の値のみを示している。図-12 と 18 の結果を比較すると、河床表面の高さ Δ_M / D_L , Δ_S / D_L ならびに、交換層の厚さ δ_E , 空隙率 λ の混合層内の R_M に応じた関係が変わらないことがわかる。両者の違いは、堆積層が生じるか否かということのみである。これは、初期条件に応じて河床変動の過程は異なるものの、河床表面に現れる交換層の構造は掃流力と給砂量によってのみ決まるものであることを表している。

参考文献

- 1) 関根正人, 矢島英明: 礫・シルト充填河床モデルを用いた植生を伴う流路の変動解析, 水工学論文集, 第 49 巻, pp.991-996, 2005.
- 2) 堤大三, 藤田正治, Muhammad Sulaiman: 混合砂礫材料の空隙に関するシミュレーションモデル, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.1021-1026, 2006.
- 3) 関根正人, 林将宏: 礫河床の空隙率に関する基礎的研究, 土木学会第 61 回年次学術講演会, pp.493-494, 2006.

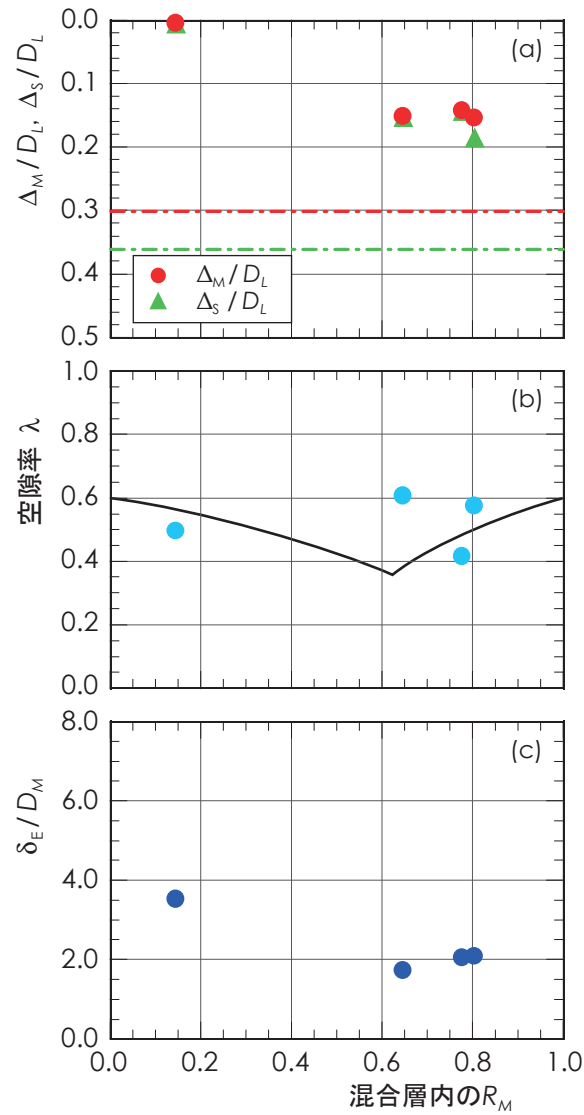


図-18 Case D における動的平衡状態の鉛直構造のまとめ：(a) Δ_M/D_L , Δ_S/D_L と混合層内の R_M , (b) 空隙率 λ と R_M , (c) δ_E/D_M , δ_D/D_M と R_M の関係を表している。

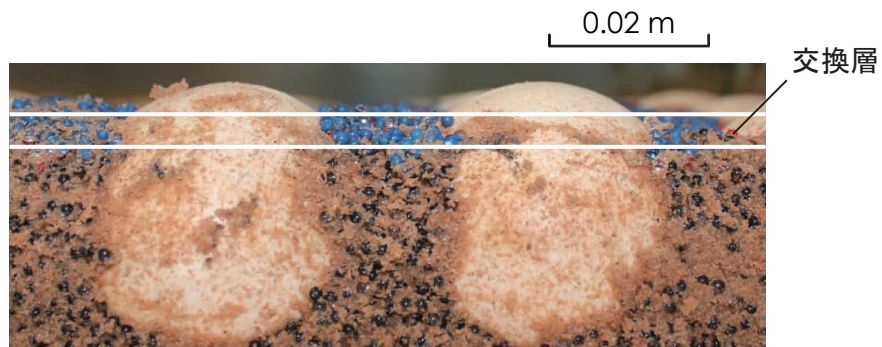


写真-9 初期条件としてL粒子の頂部までM-S粒子を充填した河床の動的平衡状態の鉛直構造 (Case D2)：動的平衡状態に到達する前後でM粒子を赤色から青色に変更することにより、河床表面の交換層の構造を調べた。また、赤色のM粒子が見られないことから堆積層が生じていないことがわかる。

第 6 章

結論

本研究では、粒度幅が極端に広い材料からなる河床上で生じる流砂現象を明らかにすることを旨とした。河床材料はL粒子、M粒子ならびにS粒子という三つの粒径集団により構成される。L粒子は、水流によって移動しないほどの大粒径の礫である。このL粒子の間隙にM粒子ならびにS粒子が充填されている。M粒子は掃流砂として移動する中粒径の砂礫、S粒子は浮遊砂として移動する小粒径の砂あるいはシルトである。流砂現象の本質を把握するため、それぞれの粒径集団をそれぞれ一つずつの粒径で代表させることにして基礎的な水路実験を行った。そして、このような河床が平衡状態に到達したときの鉛直構造を明らかにすることに努めた。河床に上流から土砂が供給されない状況で到達する平衡状態が静的平衡状態であり、供給される条件下で到る平衡状態が動的平衡状態である。河床の動的平衡状態に関する検討では、流量ならびにM粒子の供給量の値を固定してS粒子の供給量を異なる値に設定する一連の実験を行った。初期河床を主として静的平衡状態に到達した後の状態とした。本実験に得られた結果を以下にまとめて結論とする。

- (1) L粒子群が露出しているほどその間隙に存在するM-S粒子に作用する掃流力が低下する効果のことを「遮蔽効果」と呼ぶが、この遮蔽の関係が式(1)で表せることを明らかにした。また、L粒子群の間隙に充填されている粒子がM粒子であるか、あるいはS粒子であるかによらず式(1)が成り立つことがわかった。
- (2) L-M-S粒子という三つの粒径集団から構成される河床の静的平衡状態では、河床表面にL粒子群だけでなく、M粒子のみからなる層が露出することになる。このM粒子のみからなる層がその下方に位置するS粒子に与える遮蔽の効果については、式(5)で表すことができる。この式(1)ならびに(5)を用いると、M粒子あるいはS粒子に実際に作用する摩擦速度を算出することができる。
- (3) 流量ならびにM粒子の供給量の値を一定にしてS粒子の供給量を異なる値に設定すると、河床の動的平衡状態は大きく4つのStageに分けられる。S粒子の供給量が小さい場合には、静的平衡状態のときと同様に河床表面にM粒子のみからなる層が形成される。この状態をStage 1と呼ぶ。このとき、動的平衡状態における

M 粒子の上面の高さは S 粒子の供給量にはよらず、流量と M 粒子の供給量のみによって定まる。一方、S 粒子の供給量を大きくしてある値に設定すると、M 粒子と S 粒子の上面の高さが一致する状態になる。これを Stage 2 と呼ぶ。さらに S 粒子の供給量を大きくすると、M 粒子のみからなる層は現われなくなり、M-S 粒子が一様に混合された層が形成されるようになる。この層内では M 粒子同士を中心点間距離は Stage 1 に比べて大きくなる。これを Stage 3 と呼ぶ。なお、Stage 1 と 3 の境界に相当するのが Stage 2 ということができ、Stage 2 では層内の M 粒子同士を中心点間距離は Stage 1 と変わらない。Stage 3 よりも大きな量の S 粒子を供給すると、L 粒子群の頂部まで M-S 粒子が充填し、L 粒子頂部と M-S 粒子による層の上面が一致する状態となる。これを Stage 4 と呼ぶ。

- (4) M-S 粒子によって形成された層を「混合層」と呼ぶ。この「混合層」は、「交換層」と「堆積層」という二つの層に分けることができる。交換層内の粒子は動的平衡状態に到達した後も輸送されてきた粒子と絶えず交換を繰り返す。一方、堆積層内の粒子は動的平衡状態に到る途上に形成された層であり、平衡状態時に輸送されてきた粒子と入れ替わることはない。この交換層と堆積層の中の M 粒子の比率ならびに空隙率を計測したところ、両者の値は概ね等しくなった。また、交換層の厚さは M 粒子の粒径の 1～3 倍の値になった。
- (5) 河床に作用する平均の掃流力ならびに M 粒子の供給量を異なる値に設定した実験も行った。その結果、L 粒子が露出する度合いは変わるものの、混合層内の M 粒子の比率に対する空隙率や交換層の厚さの関係が示す傾向は変わらないことがわかった。
- (6) 土砂の供給を始める前の初期条件が動的平衡状態に与える影響を調べる実験を行った。初期条件を静的平衡状態に到達した後の状態にした場合以外にも、L 粒子群の頂部まで M-S 粒子が充填される状態に設定した。その結果、後者の場合には堆積層が生じることはなかったものの、河床表面の高さや交換層の構造は初期条件の違いによる影響を受けることはなかった。

(7) 実河川ではL粒子群の配置が規則的なものではない。本研究では主として、L粒子群を互いに密に接するような格子状に配置した実験を行っている。これ以外にもL粒子群を互いに密な千鳥状に配置した場合や、縦断方向に離れて配置するような粗に配置された場合の検討も行った。その結果、L粒子群同士を中心点間距離がL粒子の粒径の3倍程度までは遮蔽の関係はほとんど変わらないものの、4倍程度になると遮蔽効果が弱まる傾向にあることがわかった。

本研究によって得られた結果に基づいて数値計算を行うと、粒度幅が極端に広い河床の変動を説明することができる。本研究は河床変動予測を可能にするための基礎になるものであると考えている。今後の課題として、実河川のように連続する粒度分布を有する河床への適用を考えていく必要がある。本研究では、三つの粒径集団をそれぞれ一つの粒径で代表させるとした実験を行った。このような条件下で行われた実験の結果から得られた基礎的な情報を積み上げた上で、より複雑な状況に当たる実河川への適用を考えていくべきである。なお、各粒径集団をさらに複数の粒径に分けることにより、連続する粒度分布を有する場に関しても本研究により得られた成果を適用することができるものと考えている。

また、本研究ではM粒子ならびにS粒子の供給量が掃流力にはよらず任意の値に設定されている。実際には掃流力ならびに着目している区間の上流側の粒度構成に応じて供給量は決まるものの、どのような条件のときに本実験で設定された供給量となる状態が現れるのかはわかっていない。ただし、任意の値に設定された供給量に応じて河床の鉛直構造がどのように変わるのかを知ることが必要であると考えている。

さらに、初期状態でL粒子群の間隙に充填されるM粒子とS粒子の混合比率は、原則として1:1に設定されている。実河川では、形成された混合層がさらに浸食・堆積を繰り返しながら河床が変動する。すなわち、混合層内の混合比率がM粒子ならびにS粒子の上面の位置を決める因子である。そのため、混合比率を異なる値に設定した河床を初期条件として土砂の供給を行うと、堆積層の厚さが変わると考えられる。しかし、堆積層、交換層内の粒度構成あるいは交換層の厚さには影響を与える

ことはないと推察されるため、初期状態の混合比率の違いが定性的な差異を生じさせることはないと考えている.

謝辞：本研究の遂行に当たり，指導教員である早稲田大学教授 関根正人先生には学部四年生から博士課程までの6年間とその途中から務めた助手としての3年間の合計7年間というとても長い期間にわたって，非常に多岐にわたるご指導を賜りました．また，本論文をまとめるに当たり，懇切丁寧なご助言をいただきました．記して心より謝意を表します．

また，副査を務めていただいた早稲田大学教授 榎原豊先生，早稲田大学教授 柴山知也先生にはお忙しい中，貴重なご助言とご指導を賜りました．心より御礼申し上げます．

本実験の実施ならびに結果の整理に当たり，研究当時早稲田大学大学院創造理工学研究科関根研究室の三國寛正氏，門井勇樹君，剣持尚樹君，関根研究室学生の鎌田遼君，鈴木昌宏君，中川裕貴君，研究当時早稲田大学創造理工学部学生孫沢慎一君の協力を得た．ここに記して謝意を表します．

2016年9月 平松 裕基

付録

付録 1 実験の条件ならびに結果の一覧

表-7 静的平衡状態に関する実験条件ならびに結果の一覧(その1): 平均水深 h は、河床の平均の位置と水面の位置の差である。また、摩擦速度ならびに無次元掃流力は河床全体に作用する平均の値を示している。Experimental Set 1, 2 はそれぞれ閉管路、開水路を用いた実験を表している。 ℓ は L 粒子同士の中心点間の距離である。

Experimental Set	河床	L 粒子の配置	R_M	流量 Q_w [l/s]	平均水深 h [m]	摩擦速度 u^* [m/s]	無次元掃流力		Δ_S / D_L	L_M / D_M	混合層		
							τ^*	Λ_M / D_L			R_M	λ	
1	L-M	格子状 ($\ell / D_L = 1$)	1.0	5.5	0.11	0.071	0.068	0.19					
				6.0	0.11	0.079	0.084	0.25					
				7.0	0.11	0.104	0.152	0.43					
		7.5	0.11	0.106	0.152	0.39							
		8.0	0.11	0.126	0.218	0.52							
		5.5	0.11	0.073	0.073	0.16							
	千鳥状	1.0	6.0	0.11	0.096	0.127	0.31						
			7.0	0.12	0.134	0.243	0.51						
			8.0	0.12	0.147	0.296	0.60						
	L-S	$\ell / D_L = 2$	1.0	5.6	0.11	0.072	0.071	0.18					
				6.5	0.11	0.097	0.129	0.38					
				7.0	0.12	0.111	0.168	0.44					
$\ell / D_L = 3$		1.0	5.7	0.11	0.081	0.089	0.24						
			6.0	0.11	0.088	0.106	0.34						
			6.5	0.12	0.102	0.142	0.43						
$\ell / D_L = 4$	1.0	5.7	0.11	0.072	0.071	0.23							
		6.0	0.11	0.072	0.071	0.29							
		6.3	0.12	0.094	0.120	0.48							
1	L-S	格子状 ($\ell / D_L = 1$)	0.0	2.5	0.11	0.041		0.36					
				3.0	0.11	0.045		0.36					
				3.5	0.11	0.053		0.45					
		4.0	0.11	0.056	-	0.51							
		4.2	0.11	0.062		0.57							
		4.5	0.11	0.075		0.73							
	千鳥状	0.0	2.5	0.12	0.048		0.49						
			3.0	0.12	0.058		0.57						
			3.5	0.12	0.061	-	0.64						
	$\ell / D_L = 2$	0.0	4.0	0.12	0.073		0.84						
			2.5	0.11	0.040	-	0.37						
			3.0	0.12	0.058		0.41						

表-7 静的平衡状態に関する実験条件ならびに結果の一覧(その2): 平均水深 h は、河床の平均の位置と水面の位置の差である。また、摩擦速度ならびに無次元掃流力は河床全体に作用する平均の値を示している。 Experimental Set 1, 2 はそれぞれ閉管路、開水路を用いた実験を表している。 ℓ は L 粒子同士の中心点間の距離である。

Experimental Set	河床	L粒子の配置	R_M	流量 Q_w [l/s]	平均水深 h [m]	摩擦速度 u^* [m/s]	無次元掃流力 τ^*	Δ_M/D_L	Δ_S/D_L	L_M/D_M	混合層	
											R_M	λ
1	L-M-S	格子状 ($\ell/D_L=1$)	0.5	5.5	0.11	0.063	0.055	0.16	0.28	1.2	0.50	0.26
				6.0	0.11	0.079	0.086	0.29	0.41	1.3	0.46	0.32
				6.5	0.11	0.084	0.097	0.34	0.51	1.7	0.39	0.40
				7.0	0.11	0.103	0.145	0.43	0.60	1.8	0.52	0.20
				8.0	0.11	0.118	0.189	0.56	0.76	2.0	0.46	0.33
				6.0	0.11	0.086	0.102	0.38	0.55	1.7	0.57	0.29
			0.6	7.0	0.11	0.107	0.157	0.50	0.71	2.1	0.58	0.31
				8.0	0.11	0.125	0.212	0.60	0.79	1.9	0.62	0.29
				5.5	0.11	0.065	0.057	0.22	0.38	1.5	0.72	0.26
				6.0	0.11	0.086	0.101	0.36	0.48	1.3	0.74	0.36
				6.5	0.11	0.089	0.107	0.44	0.58	1.4	0.69	0.23
				7.0	0.11	0.114	0.178	0.54	0.69	1.5	0.68	0.30
		0.7	7.5	0.11	0.125	0.212	0.57	0.73	1.7	0.74	0.42	
			8.0	0.11	0.118	0.188	0.67	0.80	1.3	0.60	0.29	
			6.0	0.11	0.091	0.113	0.47	0.62	1.5	0.74	0.29	
			7.0	0.11	0.107	0.156	0.63	0.76	1.3	0.76	0.33	
			8.0	0.11	0.123	0.206	0.72	0.84	1.2	0.82	0.30	
			5.0	0.11	0.074	0.074	0.39	0.48	0.9	0.87	0.34	
		0.8	6.0	0.11	0.091	0.112	0.63	0.73	1.0	0.88	0.35	
			7.0	0.11	0.110	0.163	0.74	0.83	0.9	0.89	0.33	
			5.0	0.11	0.068	0.063	0.18	0.35	1.4	0.52	0.31	
			5.2	0.11	0.082	0.090	0.29	0.48	1.5	0.51	0.25	
			5.5	0.11	0.090	0.110	0.36	0.55	1.5	0.48	0.41	
			6.0	0.11	0.099	0.134	0.45	0.70	2.0	0.49	0.30	
0.5	7.0	0.12	0.116	0.181	0.57	0.79	1.7	-	-			
	8.0	0.12	0.140	0.267	0.75	0.95	1.6	-	-			
	5.0	0.11	0.074	0.074	0.24	0.44	1.6	0.64	0.39			
	5.5	0.11	0.091	0.112	0.48	0.68	1.6	0.64	0.49			
	6.0	0.12	0.100	0.135	0.58	0.77	1.6	0.67	0.35			
	7.0	0.12	0.113	0.175	0.68	0.85	1.4	0.67	0.39			
8.0	0.12	0.138	0.257	0.83	1.00	1.3	-	-				

表-7 静的平衡状態に関する実験条件ならびに結果の一覧(その3): 平均水深 h は、河床の平均の位置と水面の位置の差である。また、摩擦速度ならびに無次元掃流力は河床全体に作用する平均の値を示している。Experimental Set 1, 2はそれぞれ閉管路、開水路を用いた実験を表している。 ℓ はL粒子同士の中心点間の距離である。

Experimental Set	河床	L粒子の配置	R_M	流量 Q_w [l/s]	平均水深 h [m]	摩擦速度 u^* [m/s]	無次元掃流力 τ^*	Δ_M/D_L	Δ_S/D_L	L_M/D_M	混合層	
											R_M	λ
1	L-M-S	$\ell/D_L=2$	0.5	5.5	0.11	0.068	0.062	0.24	0.37	1.3	0.51	0.22
				6.0	0.11	0.082	0.090	0.34	0.49	1.4	0.49	0.21
				5.5	0.11	0.069	0.064	0.33	0.45	1.1	0.69	0.42
		6.0	0.12	0.092	0.114	0.46	0.59	1.3	0.65	0.42		
		6.2	0.12	0.092	0.116	0.53	0.68	1.5	0.61	0.29		
		5.2	0.11	0.064	0.055	0.17	0.27	1.0	0.50	0.23		
	L-M-S	$\ell/D_L=3$	0.5	5.7	0.12	0.081	0.088	0.35	0.48	1.3	0.46	0.22
				6.0	0.12	0.093	0.118	0.47	0.65	1.8	0.49	0.26
				5.2	0.11	0.071	0.068	0.35	0.45	1.0	0.65	0.33
		5.5	0.12	0.080	0.087	0.37	0.50	1.2	0.65	0.22		
		5.7	0.12	0.088	0.106	0.52	0.64	1.3	0.77	0.15		
		5.2	0.11	0.065	0.058	0.24	0.35	1.1	0.46	0.21		
2	L-M	$\ell/D_L=4$	0.5	5.5	0.11	0.066	0.058	0.26	0.37	1.2	0.46	0.26
				5.8	0.12	0.100	0.135	0.52	0.68	1.5	0.55	0.36
				5.2	0.12	0.079	0.085	0.43	0.55	1.2	0.62	0.29
	L-S	格子状 ($\ell/D_L=1$)	0.7	5.3	0.12	0.082	0.091	0.44	0.55	1.1	0.67	0.33
				5.5	0.12	0.089	0.107	0.59	0.71	1.2	0.61	0.27
				2.3	0.04	0.037	0.047	0.09				
2	L-M	格子状 ($\ell/D_L=1$)	1.0	4.3	0.06	0.042	0.061	0.19				
				5.8	0.07	0.047	0.075	0.24				
				8.3	0.08	0.052	0.092	0.30				
	L-S	格子状 ($\ell/D_L=1$)	0.0	11.9	0.10	0.059	0.118	0.38				
				1.6	0.04	0.038		0.29				
				2.5	0.05	0.041		0.35				
2	L-M-S	格子状 ($\ell/D_L=1$)	0.5	3.9	0.06	0.047						
				5.5	0.07	0.050						
				8.3	0.09	0.053						
	L-M-S	格子状 ($\ell/D_L=1$)	0.5	9.0	0.09	0.054						
				11.8	0.10	0.059						
				5.2	0.07	0.047	0.076	0.30	0.36	1.5		
			9.2	0.09	0.053	0.096	0.34	0.40	1.4			

表-8 動的平衡状態に関する実験条件ならびに結果の一覧：M粒子ならびにS粒子の供給量をそれぞれ Q_M 、 Q_S と定義する。平均水深 h は、河床の平均の位置と水面の位置の差である。また、摩擦速度ならびに無次元掃流力は河床全体に作用する平均の値を示している。また、初期条件のaは静的平衡状態に到達した後の状態を、bはL粒子頂部までM粒子ならびにS粒子が充填された状態に設定した実験である。

Case	初期条件	流量 Q_w (l/s)	供給量 (cm ³ /s)		平均水深 h (m)	摩擦速度 U^* (m/s)	無次元掃流力 τ^*	R_M	Δ_M/D_L	Δ_S/D_L	λ	$\delta E/D_M$	$\delta D/D_M$	交換層 R_M	堆積層 R_M	交換層 λ	堆積層 λ
			Q_M	Q_S													
A1	a	5.0	0.0	0.0	0.059	0.046	0.073	1.00	0.15	0.37	0.66	1.3	2.6	1.00	1.00	0.63	0.68
A2		5.0	0.2	0.061	0.046	0.072	0.82	0.15	0.20	0.49	1.7	2.2	0.88	0.76	0.59	0.46	
A3		5.2	0.4	0.063	0.046	0.073	0.72	0.15	0.15	0.49	1.9	1.9	0.82	0.69	0.47	0.39	
A4		5.1	1.4	0.061	0.045	0.069	0.59	0.13	0.13	0.56	1.9	2.3	0.67	0.50	0.62	0.50	
A5		5.2	2.5	0.059	0.045	0.068	0.24	0.11	0.11	0.51	3.1	1.7	-	-	-	-	
A6		4.9	3.8	0.048	0.039	0.053	0.11	0.00	0.00	0.50	3.2	4.4	0.17	0.12	0.46	0.35	
A7		5.0	4.5	0.048	0.038	0.050	0.08	0.00	0.00	0.57	2.7	4.8	-	-	-	-	
B1	a	5.2	0.0	0.052	0.042	0.040	1.00	0.03	0.38	0.49	1.4	5.3	1.00	1.00	-	-	
B2		5.2	0.4	0.054	0.043	0.063	0.80	0.03	0.07	0.57	2.1	4.6	0.78	0.77	0.65	0.50	
B3		5.1	1.4	0.051	0.040	0.053	0.56	0.00	0.00	0.56	-	-	-	-	-	-	
B4		5.2	2.8	0.052	0.041	0.056	0.37	0.02	0.02	0.50	-	-	-	-	-	-	
B5		5.3	3.1	0.052	0.042	0.059	0.28	0.02	0.02	0.53	-	-	-	-	-	-	
C1	a	9.1	0.0	0.082	0.051	0.087	1.00	0.20	0.42	0.57	1.4	2.2	1.00	1.00	0.58	0.57	
C2		9.3	0.4	0.084	0.051	0.090	0.79	0.21	0.26	0.45	-	-	-	-	-	-	
C3		9.0	1.4	0.083	0.052	0.090	0.63	0.20	0.21	0.44	1.7	1.8	0.66	0.61	0.47	0.41	
C4		9.0	2.5	0.084	0.052	0.091	0.58	0.21	0.22	0.42	1.9	1.4	0.61	0.56	0.44	0.40	
C5		9.1	3.4	0.085	0.052	0.093	0.34	0.20	0.21	0.45	-	-	-	-	-	-	
C6		9.1	4.5	0.084	0.052	0.094	0.37	0.19	0.19	0.50	2.9	1.0	0.43	0.31	0.47	0.53	
C7		8.8	5.0	0.075	0.048	0.079	0.23	0.17	0.17	0.54	2.9	1.5	0.26	0.20	0.63	0.45	
C8		9.1	5.7	0.080	0.051	0.087	0.15	0.17	0.17	0.43	-	-	-	-	-	-	
D1	b	5.3	0.2	0.061	0.046	0.072	0.80	0.15	0.18	0.57	2.1	-	0.80	-	0.57	-	
D2		5.2	0.4	0.063	0.046	0.073	0.78	0.14	0.14	0.41	1.9	-	0.78	-	0.41	-	
D3		5.0	1.4	0.062	0.047	0.075	0.65	0.15	0.15	0.61	1.7	-	0.65	-	0.61	-	
D4		5.2	3.8	0.053	0.042	0.060	0.14	0.01	0.01	0.49	3.5	-	0.14	-	0.49	-	

付録2 S粒子のみが供給されてくる場合

ここでは、L-M-S河床にS粒子のみが供給されてくる条件下で到達する河床の動的平衡状態の鉛直構造に着目した検討を行う。図-22は、流量を $Q_w = 5$ (l/s)にした条件下で、S粒子の供給量 Q_s を異なる値に設定した実験の結果を示している。 Q_s の値は、(a) 0 cm^3/s , (b) 0.3 cm^3/s , (c) 0.5 cm^3/s , (d) 0.9 cm^3/s , (e) 2.5 cm^3/s , (f) 2.8 cm^3/s , (g) 4.5 cm^3/s に設定されている。(a)は静的平衡状態であり、この図について簡単に説明を加えておく。河床表面に露出するM粒子のみからなる層(M粒子層)の厚さ L_M はM粒子の粒径 D_M の1.5倍であった。また、L粒子頂部からM粒子層上面までの鉛直距離 Δ_M をL粒子の粒径 D_L で除した値は0.30になった。(a)の状態からS粒子のみを供給した実験の結果が(b)～(g)である。(b)、(c)の図は、 $Q_s = 0.3, 0.5$ (cm^3/s)にした実験の結果を示している。これらの図を見るとわかるように、 Q_s を大きく設定するとS粒子上面の位置は徐々に高くなるものの、未だM粒子のみからなる層が取り残されている。ここで、供給されたS粒子が堆積することによって形成された層の厚さを l_M と定義する。この l_M を D_M で除した値は、(b) 0.2, (c) 0.4であった。(d)の図に示すように $Q_s = 0.9$ (cm^3/s)になると、M粒子層の上面までS粒子によって充填される状態になる。 Q_s を 0.9 cm^3/s より大きな値に設定すると、(e)～(g)に示すように河床表面にS粒子のみからなる層が形成される。このS粒子上面は、 Q_s が大きくなるにつれて徐々に高い位置で動的平衡状態に到る。これはL粒子の遮蔽の効果を考えると、S粒子上面に作用する摩擦速度が大きくなることを意味する。次に、いずれの実験でも Δ_M / D_L が0.30で変わらないことから、S粒子を供給してもM粒子上面の位置は一定であることがわかる。これは、供給されたS粒子が静的平衡状態のときに形成されたM粒子層の間に徐々に充填されていくため、M粒子の構造が変わらないためと考えられる。(b)～(g)の状態それぞれM粒子層の下面の位置を計測してみると、 L_M / D_M が1.5からほとんど変わらないことがわかった。本実験での最大の Q_s は 4.5 cm^3/s であり、このときでもL粒子群の頂部までS粒子により充填されることはなかった。しかし、 Q_s を極端に大きな値に設定すると、やがてL粒子群が完全に埋没する

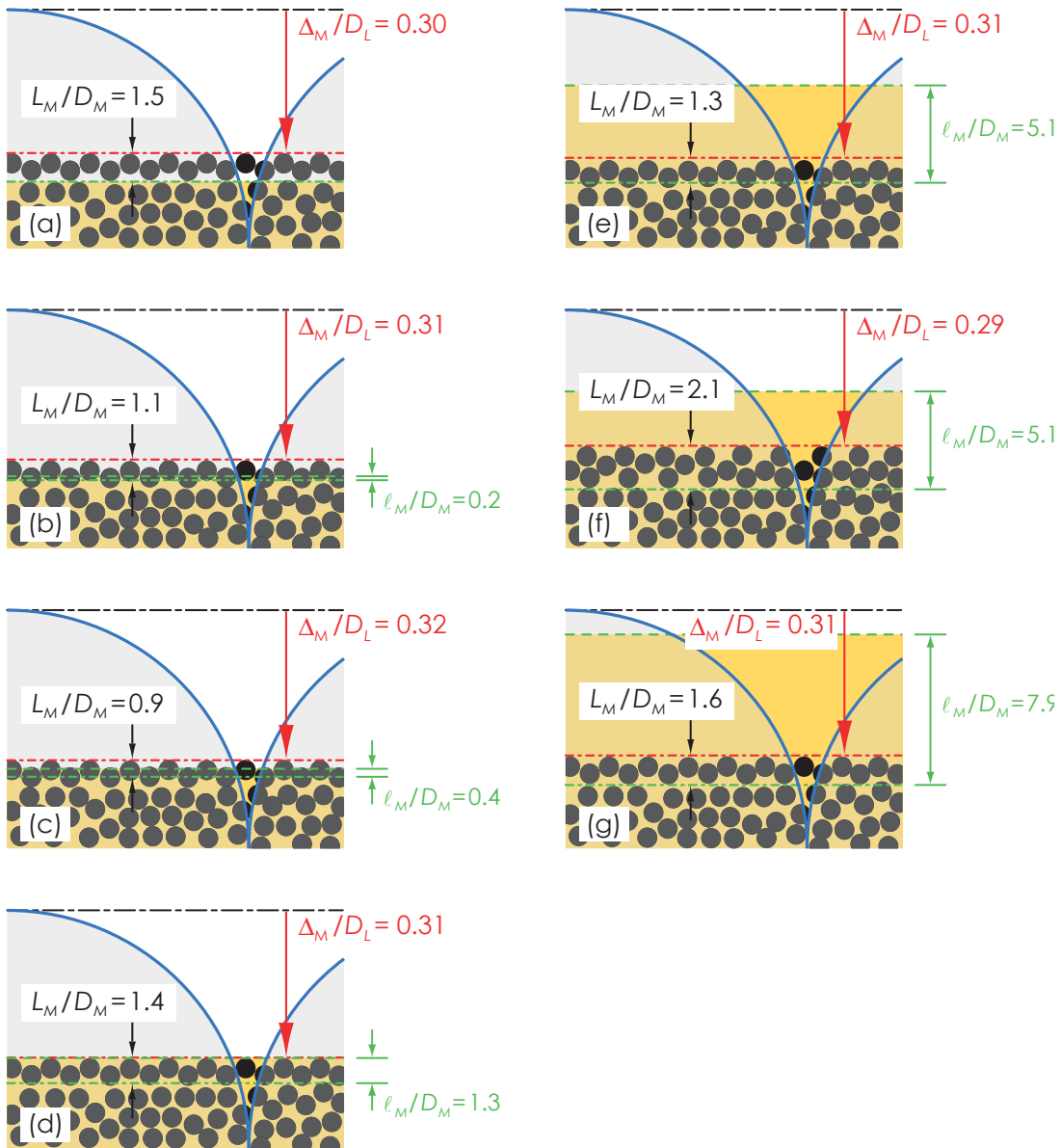


図-19 S粒子のみが供給されてくる条件下で現れる動的平衡状態の鉛直構造

状態が現れると考えられる。

付録3 中粒子群が小粒子に与える遮蔽効果

4.2 では, M 粒子群が S 粒子に与える遮蔽効果について説明した. 前述の図-10 は, M 粒子層の厚さを M 粒子の粒径で除した値 L_M/D_M と u^*_s/u^*_M の関係をまとめて整理したものである. 図中の●は 2 mm のガラスビーズを用いた Experimental Set 1, ▲は 5 mm のガラスビーズを用いた Experimental Set 2 の結果を示している. しかし, 厳密には初期状態の R_M を小さな値に設定すると, 図-7 (a) のように Δ_M が大きくなる. そのため, L 粒子の遮蔽効果を考えると, M 粒子上面に実際に作用する摩擦速度 u^*_M は小さくなる. すなわち, 横軸の値 u^*_s/u^*_M が大きくなることを意味している. そこで, 初期状態の R_M に応じて異なる記号で結果を表したものを図-20 として示す. 図中の●, ●, ●, ●, ● はそれぞれ Experimental Set 1 の $R_M = 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1$ の結果を, ▲は Experimental Set 2 の $R_M = 0.5$ の結果を示している. なお, 図中の黒色の実線ならびに破線は図-10 と同様の関係を表している. この図を見ると, R_M が大きくなるにつれて, 結果が右上の方に現れる傾向にあることがわかる. すなわち, L 粒子の遮蔽効果によって u^*_s/u^*_M が大きくなるため, M 粒子層の厚さが小さくなる. これは R_M の値が小さい場合の方が L 粒子の遮蔽を強く受けるため, M 粒子層の遮蔽が弱い状態でも静的平衡状態に到ることを意味している.

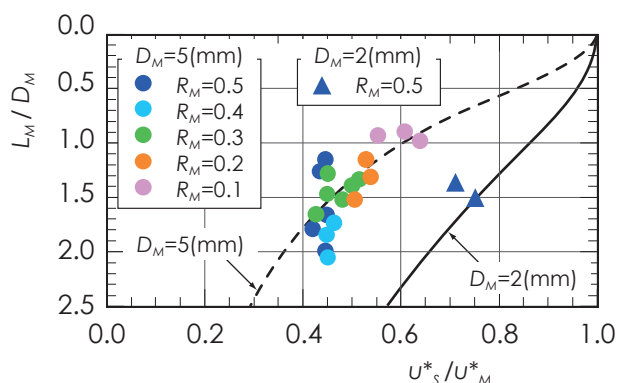


図-20 M 粒子層の厚さを M 粒子の粒径で除した値 L_M/D_M と M 粒子上面に作用する摩擦速度に対する S 粒子上面に作用する摩擦速度の比 u^*_s/u^*_M の関係: 図中の黒色の破線は 5 mm の M 粒子を, 黒色の実線は 2 mm の M 粒子を用いた場合の式 (5) を表した関係である.

変数リスト

A_M	: L 粒子 1 個分を上方から見たときに M 粒子が占める面積
B	: 幅
c	: 揚圧力係数
C_a	: 基準面濃度
D_L, D_M, D_S	: L 粒子, M 粒子あるいは S 粒子の粒径
D_{90}	: 90 % 粒径
E_S	: S 粒子の浸食速度
F_S	: 河床表層に占める S 粒子の比率
h	: 平均水深
H_i	: H_M あるいは H_S
H_M, H_S	: 河床に作用する平均の摩擦速度 u^* に対する M 粒子あるいは S 粒子の上面に実際に作用する摩擦速度 u^*_M, u^*_S の比であり, L 粒子の遮蔽の効果を表す.
k_S	: 相当粗度高
ℓ	: L 粒子同士の縦断方向の中心点間距離
L_M	: 静的平衡状態のときに形成された M 粒子層の厚さ
L_1, L_2, L_3	: 鉛直方向ならびに水路縦横断方向の M 粒子同士の中心点間距離
Q_B, Q_{Bcal}	: M 粒子の流出量の実測値と計算値
Q_M, Q_S	: M 粒子あるいは S 粒子の供給量
Q_{SUS}, Q_{SUScal}	: S 粒子の流出量の実測値と計算値
Q_w	: 流量
R	: M 粒子の水中比重
R_M	: M-S 粒子の総和に占める M 粒子の体積比率
R_M^*	: Stage 2 のときの R_M

u^*	: 河床に作用する平均の摩擦速度
u^*_M, u^*_S	: M 粒子あるいは S 粒子の上面に実際に作用する摩擦速度
u^*_{MC}, u^*_{SC}	: M 粒子あるいは S 粒子の限界摩擦速度
w_{oS}	: S 粒子の沈降速度
Z	: ラウス数
z_a	: 基準面高さ
Δ	: Δ_M あるいは Δ_S
δ_D	: 堆積層の厚さ
δ_E	: 交換層の厚さ
Δ_M, Δ_S	: L 粒子頂部から河床表面に露出する M 粒子あるいは S 粒子上面までの鉛直距離
θ	: L 粒子頂部から M 粒子上面までの回転角
κ	: カルマン定数
λ	: 空隙率であり, 本研究では L 粒子群の間隙の総体積に占める空隙の比率を表す.
λ_M, λ_S	: M 粒子あるいは S 粒子のみからなる均一粒径の材料から構成される河床の空隙率
λ_u	: 均一粒径河床の空隙率
λ^*	: Stage 2 のときの λ
ν	: 動粘性係数
σ_S	: S 粒子の密度
τ^*	: 河床に作用する無次元掃流力
τ^*_{MC}	: M 粒子の無次元限界掃流力

図表リスト

- 図-1 実験に用いた装置の概略図
- 図-2 給砂量を任意の値に設定したことの想定状況
- 図-3 計測区間
- 図-4 河床を側方から見たときの模式図
- 図-5 河床の平衡状態の模式図
- 図-6 L粒子が与える遮蔽効果
- 図-7 L-M-S河床の静的平衡状態の鉛直構造のまとめ：L粒子を互いに密な格子状に接するように配置した場合
- 図-8 L-M-S河床の静的平衡状態の鉛直構造のまとめ：L粒子を互いに密な千鳥状に接するように配置した場合
- 図-9 L-M-S河床の静的平衡状態の鉛直構造のまとめ：L粒子を縦断方向に離れて配置した粗な場合
- 図-10 M粒子層の厚さ L_M を M粒子の粒径 D_M で除した値と M粒子上面に作用する摩擦速度 u^*_M に対する S粒子上面に作用する摩擦速度 u^*_S の比
- 図-11 動的平衡状態における河床の鉛直構造の概念図
- 図-12 Case Aにおける動的平衡状態の鉛直構造のまとめ
- 図-13 S粒子がM粒子群の間隙に充填される状況に関する模式図
- 図-14 M粒子群の配置の模式図
- 図-15 動的平衡状態の混合層内のM粒子間の鉛直方向の距離 L_1 をM粒子の粒径で除した値とM粒子の比率 R_M の関係
- 図-16 Case Bにおける動的平衡状態の鉛直構造のまとめ
- 図-17 Case Cにおける動的平衡状態の鉛直構造のまとめ
- 図-18 Case Dにおける動的平衡状態の鉛直構造のまとめ
- 図-19 S粒子のみが供給されてくる条件下で現れる動的平衡状態の鉛直構造

- 表-1 静的平衡状態に関する実験条件
- 表-2 動的平衡状態に関する実験条件
- 表-3 Case A の実験結果
- 表-4 Case B の実験結果
- 表-5 Case C の実験結果
- 表-6 Case D の実験結果
- 表-7 静的平衡状態に関する実験条件ならびに結果の一覧
- 表-8 動的平衡状態に関する実験条件ならびに結果の一覧

- 写真-1 ダムの下流側の河床状態
- 写真-2 実験に用いた河床材料
- 写真-3 L粒子群の配置
- 写真-4 初期状態の河床
- 写真-5 M粒子の比率 R_M が 0.6 の場合の初期状態
- 写真-6 二粒径河床の静的平衡状態
- 写真-7 L-M-S 河床の静的平衡状態
- 写真-8 Case A3 における河床の動的平衡状態の鉛直構造
- 写真-9 初期条件として L 粒子の頂部まで M-S 粒子を充填した河床の動的平衡状態の鉛直構造

研究業績一覧

(1) 論文

- 1) Gravel sorting and variation of riverbeds containing gravel, sand, silt and clay, Gravel Bed Rivers 8, 2015.9, Masato Sekine and Yuki Hiramatsu.
- 2) 骨格となる大礫を伴う河床の動的平衡状態の鉛直構造, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.71, No.4, pp.I_865-I_870, 2015年3月, 平松裕基, 関根正人, 劔持尚樹.
- 3) 大礫により骨格が構成された河床の動的平衡状態に関する実験的研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.70, No.4, pp.I_955-I_960, 2014年3月, 平松裕基, 関根正人, 門井勇樹, 劔持尚樹.
- 4) EQUILIBRIUM STATE OF RIVER BED WITH THREE GRAIN SIZE GROUPS OF SEDIMENT, Proceedings of 12th International Symposium on River Sedimentation, 2013.9, Masato Sekine, Yuki Hiramatsu and Yuki Kadoi.
- 5) STATIC EQUILIBRIUM STATE OF RIVER BED COMPOSED OF THREE GRAIN SIZE GROUPS OF SEDIMENT, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, Vol.30, No.2, pp.65-75, 2012.11, Masato Sekine, Yuki Hiramatsu and Hiromasa Mikuni.
- 6) 三つの粒径集団からなる河床の静的安定状態と遮蔽効果, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.68, No.4, pp.I_931-I_936, 2012年3月, 関根正人, 平松裕基, 三國寛正, 門井勇樹.
- 7) 三つの粒径集団からなる河床の静的安定状態に関する実験的研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.67, No.4, pp.I_733-I_738, 2011年3月, 関根正人, 三國寛正, 平松裕基.

(2) 講演

- 1) 初期条件の違いが粒度幅の極端に広い河床の鉛直構造に与える影響, 土木学会第71回年次学術講演会, II-052, 2016年9月, 関根正人, 中川裕貴, 平松裕基, 鎌田遼,

孫沢慎一.

- 2) 供給される砂礫の混合比率が粒度幅の広い河床の鉛直構造に及ぼす影響, 平成 28 年度砂防学会研究発表会概要集 B, pp.B-80-B-81, 2016 年 5 月, 関根正人, 平松裕基, 鎌田遼, 中川裕貴, 孫沢慎一.
- 3) 粒度幅の極端に広い材料により構成された河床の動的平衡状態の鉛直構造, 土木学会第 70 回年次学術講演会, pp.161-162, 2015 年 9 月, 関根正人, 平松裕基, 鎌田遼, 劔持尚樹, 鈴木昌宏.
- 4) 骨格が大礫により構成された河床の動的平衡状態, 土木学会第 69 回年次学術講演会, pp.397-398, 2014 年 9 月, 平松裕基, 関根正人, 劔持尚樹, 門井勇樹.
- 5) 大礫を骨格とする河床の動的平衡状態に関する研究, 土木学会第 68 回年次学術講演会, pp.155-156, 2013 年 9 月, 関根正人, 平松裕基, 門井勇樹, 劔持尚樹.
- 6) 三つの粒径集団の砂礫からなる河床の静的安定状態, 土木学会第 67 回年次学術講演会, pp.59-60, 2012 年 9 月, 関根正人, 平松裕基, 門井勇樹.
- 7) 骨格となる大礫の配置が河床の静的安定状態に与える影響, 平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.82-83, 2012 年 5 月, 関根正人, 平松裕基, 三國寛正.
- 8) 三つの粒径集団の砂礫により構成された河床の静的安定状態, 土木学会第 66 回年次学術講演会, pp.119-120, 2011 年 9 月, 関根正人, 平松裕基, 三國寛正.
- 9) 三つの粒径集団の土砂により構成された河床の静的安定状態に関する研究, 平成 23 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.70-71, 2011 年 5 月, 関根正人, 平松裕基, 三國寛正.