# （派遣先機関名（派遣国名））　研修報告書
# （研修テーマ）

先進理工系科学研究科　社会基盤環境工学プログラム　宋叡均

## 1. はじめに

本報告では 2025 年 9 月 6 日から 2025 年 10 月 16 日までの間，ダラム大学において共同研究した結果について報告する．

## 2. 研修/共同研究課題の決定

気候変動による豪雨の増加により，土砂洪水氾濫が頻繁に発生している．土砂洪水氾濫を適切に解析するためには，土砂の堆積構造および堆積箇所の把握が重要である．土砂洪水氾濫が発生しやすい場所は，岩床区間と砂礫堆積区間が混在した岩床河川である．さらに，土砂が生産される上流域では幅広い粒径分布を有することを踏まえると，混合粒径土砂の影響を考慮する必要があるが，既存の混合粒径土砂モデルは沖積河川を対象としており，岩床沖積混在区間での混合粒径土砂に関する研究はほとんど行われていない．そこで，本研究では岩床河川上の混合粒径土砂モデル開発に必要な基礎データを得るために，岩盤を模した水路で，流量と土砂供給量を変化させた実験を実施し，岩盤沖積区間を流れる混合粒径土砂の移動・堆積機構を観察するとともに，実験結果と既存の沖積河川の混合粒径土砂モデルを比較した．

## 3. 研修/共同研究スケジュール

9 月 6 日　出国
9 月 8 日～10 月 14 日　ダラム大学
10 月 15 日～10 月 16 日　帰国

## 4. 研修先/共同研究派遣先の概要

大学名：ダラム大学
所在地：イギリス　ダラム
指導教員：Rebecca Hodge 教授

## 5. 研修/共同研究の内容

### 5.1 研究背景

近年，豪雨の増加により，上流域で生産された土砂が下流へ流れ込むことで河床が上昇し，土砂を含んだ水が氾濫する，土砂・洪水氾濫が頻繁に発生している．土砂洪水氾濫を解析する上で，山地から供給される土砂の堆積箇所・構造の把握が重要である．特に，土砂・洪水氾濫が発生しやすい扇状地の扇頂部では，露岩箇所と砂礫堆積箇所が混在した状態にあり，土砂堆積箇所・構造を把握する上で，岩床上の砂礫被覆面積を考慮することは必要不可欠である．これらの研究は単一粒径を対象に行われているが，上流域は幅広い粒径分布を有することを踏まえると，混合粒径土砂の影響を考慮する必要がある．

岩床河川は大小様々な凹凸を有しており，Parker らは岩床の凹凸に堆積した砂礫の堆積厚さの関数で表した被覆率モデルを提案した．また，岩床粗度が大きい場合，被覆率は給砂量に比例するが，岩床粗度が小さい場合，ある閾値を超えるまで砂礫は堆積せず，閾値を超えると急激に砂礫が堆積する．

混合粒径土砂は，大きさの違う粒子が相互に作用するため，粒子の移動・停止の条件が複雑である．特に，小さな粒子が大きな粒子に遮られて動きづらくなる効果と，小さな粒子がコロの役割を果たし

大きな粒子が動きやすくなる二つの効果を考慮する必要がある．そのため，岩床沖積混在河川においては混合粒径土砂の考え方を複雑な凹凸を持つ岩床上で考慮する必要がある．しかし，混合粒径土砂のモデルは沖積河川を対象に発展を遂げており，岩床沖積混在河川を対象とした研究はほとんど行われていない． そこで，本研究では岩床沖積混在区間を模した水路で被覆率の変化および混合粒径土砂の移動・堆積機構を観察するとともに，実験から得られたデータと既存の沖積河川の混合粒径土砂モデルを比較することで，岩床沖積混在河川と沖積河川における混合粒径土砂の掃流形態の違いを明らかにすることを目的としている．

### 5.2 実験方法

実験水路は，水路長 5 m，水路幅 0.1 m，水路勾配は 1/300 である．30 mm の礫を河床に埋め込むことで粗度の大きい岩床を再現した. 河床材料は東北珪砂 4 号(0.77 mm, 緑), アサノ珪砂 3 号(1.42 mm, 水色)，鹿島珪砂 2 号(2.84 mm，ピンク)，ろ過砂利(5 mm，黒)の 4 種類を全て同じ割合で混合し使用した. また, 各粒径の違いを判別しやすくするために上述の通り蛍光塗料で着色した. 流量は, 4.57 L/s, 5.91 L/s，7.08 L/s，8.37 L/s の 4 段階である．給砂量$q_s$は平衡流砂量$q_c$に対して 0%，25%，50%，75%，100%の 5 段階である. 4 段階の流量に対し, 5 段階の給砂量を与えることで合計 20 ケースを実施した. 通水時間は 2 時間程度とし, 河床材料を 30 mm 礫の頭くらいの高さに敷き詰めた状態から通水を開始する．実験中は河床の垂直写真を撮影し，写真からピクセル数を求めることによって砂礫被覆率および粒径別の砂礫被覆率を算出した．また，流出する土砂量を計測し，既存の混合粒径土砂の掃流砂量モデルと比較した．本研究では，上下流端の影響を受けていない水路下流端から 2.0 m から 4.0 m の区間を分析対象とする．

### 5.3 既存の混合粒径土砂モデルとの比較

ろ過砂利(5 mm)について実験中に観測した流砂量と既存の流砂量式から求めた流砂量を比較した結果を図 1(a)，(b)に示す．用いた混合粒径土砂モデルは芦田・道上式と Wilcock and Crowe 式である．横軸に観測した流砂量，縦軸に既存の流砂量式から求めた流砂量をプロットした．供給割合$q_s/q_c$ が 1 の時，実験結果と芦田・道上式および Wilcock and Crowe 式が概ね一致した(a)．この条件では，岩盤が完全に被覆されており，砂礫床とみなすことができるため，従来の混合粒径土砂の概念が適用できた．一方，供給割合$q_s/q_c$が 0.25 の場合には既存の流砂量式が実験結果を過大評価する傾向が確認された(b).

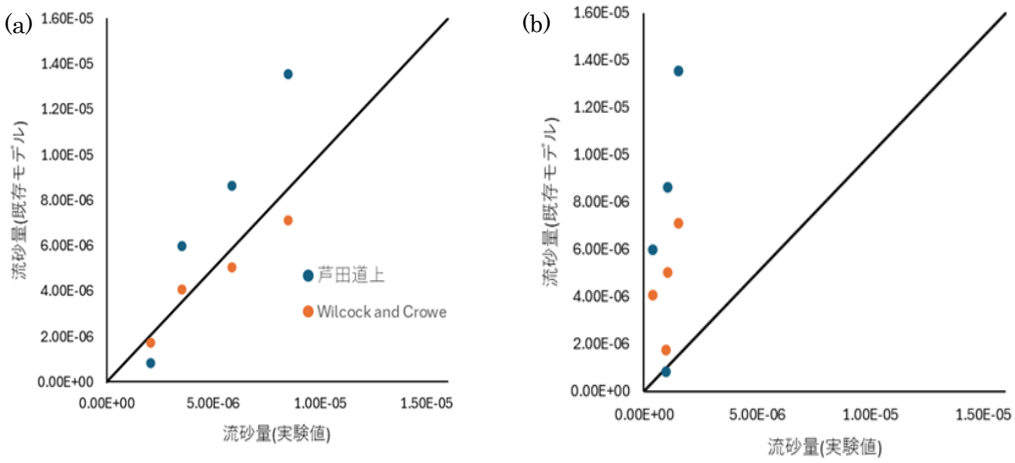



図 1 実験結果と既存の混合粒径土砂モデルとの比較

(a) $q_s/q_c = 1$, (b) $q_s/q_c = 0.25$

次に，既存の混合粒径土砂掃流砂量式をそのまま適用するのではなく，Sklar and Dietrichによって提案された線形モデルを用い，岩床上の被覆状態を考慮した補正を導入することを試みた．これは，岩盤上の砂礫被覆を表現するモデルとして，被覆率$P_c$を流砂量$q_b$と平衡流砂量$q_c$の比で定義し，流砂量が平衡流砂量に近づくにつれ岩盤が砂礫によって被覆されることを表現したモデルである．この考えに基づくと，岩盤河川における流砂量$q_b$は，被覆率$P_c$と沖積河川における平衡流砂量$q_c$の積として次式で表される．

$$q_b = P_c \cdot q_c$$

よって，この関係を芦田・道上式およびWilcock and Crowe式から求めた流砂量に対して被覆率$P_c$を乗じることで補正を行った．補正後の流砂量と実験結果の比較を図2(a)，(b)に示す．

補正後の結果を見ると，補正前に比べ実験結果との乖離が小さくなる傾向が確認された。これは，被覆率を考慮することで，岩床が露出する条件の流砂量の過大評価がある程度改善されたことを示している。しかし，補正後においてもなお完全な一致には至らず，依然として過大評価する傾向がみられた．これは，水路上方から撮影した写真をもとに算出した被覆率を用いた補正では，岩盤の凹凸高さに対してどの程度砂礫が堆積しているかを考慮できていないためである．

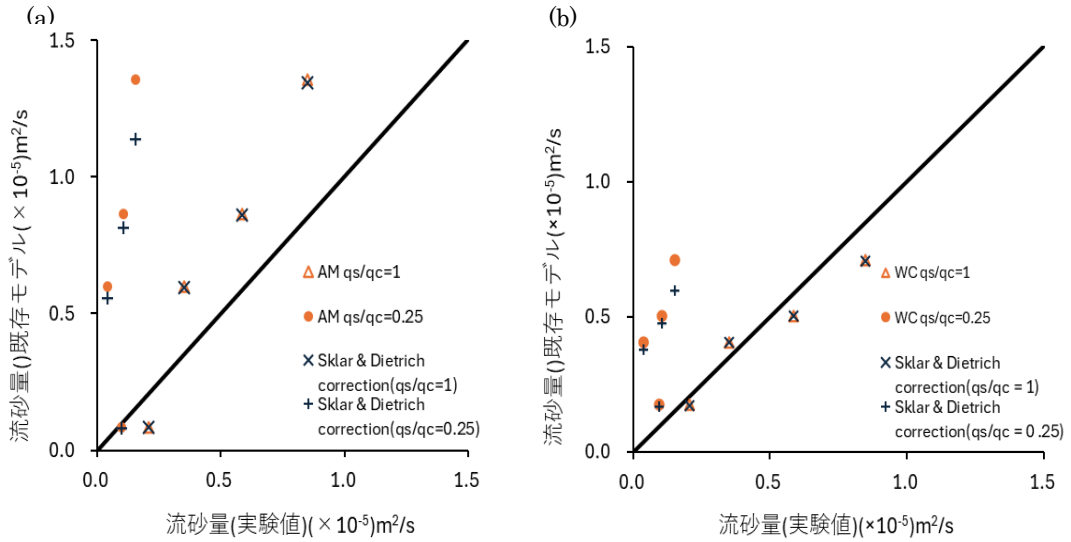



**図 2 実験結果と補正後の流砂量との比較**

**(a)芦田・道上式，(b)Wilcock and Crowe 式**

### 5. 4 補正係数による流砂量の補正

これまでの検討から，被覆率$P_c$のみを用いた補正では，岩盤が露出する条件において流砂量を過大評価する傾向が残ることが明らかとなった．そこで次に，芦田・道上式および Wilcock and Crowe 式における粒径別の限界掃流力の項に補正係数αを乗じた形に修正し，岩盤の凹凸による遮蔽効果によって土砂の移動開始条件が増加することを表現した．実験で観測された粒径別流砂量に既存モデルの計算結果が一致

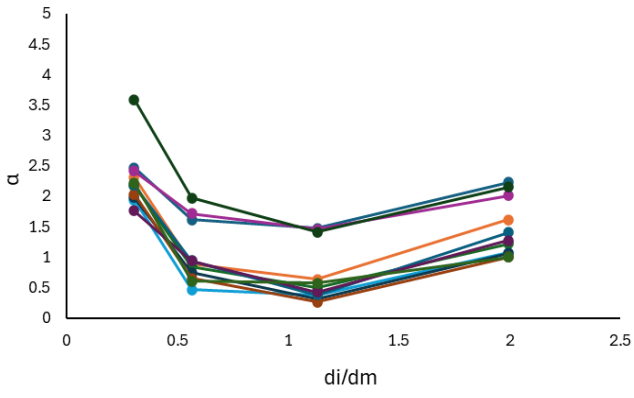



**図 3 補正係数 $\alpha$ と平均粒径に対する粒径比 $d_i/d_m$ の関係**

するように補正係数αを逆算して求めた．図3に，Wilcock and Crowe式に対して求めた補正係数αと平均粒径に対する各粒径比$d_i/d_m$の関係を示す。図3より，一番小さい粒径の場合，α の値が相対的に大きくなる傾向が確認された．一方，平均粒径付近では，αが比較的小さな値を示した．平均粒径より大きい粒径では，再びαが増加する傾向がみられた．以上の結果は，岩盤による遮蔽効果の大きさが粒径によって異なることを示しており，粒径別に補正が必要であることを示唆している．

## 6. まとめ

今回の海外共同研究を通じて、初めての海外生活および英語での共同研究に取り組む貴重な機会を得た．研究活動においては，不明点があれば積極的に質問し，理解が不十分な場合には繰り返し確認を行った．また，自身の意見が十分に伝わらない場合には，図や翻訳ツールを活用しながら丁寧に説明することで、相互理解を図った．本研究滞在を通じて，異なる研究分野や背景をもつ研究者との議論が研究の質を高める上で極めて重要であることを実感した．今後は，本経験を活かし，より質の高い研究成果が得られるよう，主体的に研究に取り組んでいきたい．

## 7. 謝辞

留学期間中，本研究についてご指導してくださったダラム大学の Rebecca Hodge 先生，井上先生をはじめ，同じゼミに参加させていただいた他研究室の先生方，学生のみなさんに 厚くお礼申し上げます．さらに，このような貴重な経験のためにサポートいただいた海外共同研究 プログラムの先生方及び国際事業担当の皆様にも心から御礼申し上げます．