

網状砂州形成下における礫トレーサー粒子の移動分散に関する数値計算

Numerical simulation of advection and dispersion of bedload tracer particles in braided channel

北海道大学工学 環境社会工学科国土政策学コース
北海道大学大学院 工学研究院環境フィールド工学部門

○学生員 橋詰竜人 (Ryuto HASHIZUME)
正会員 岩崎理樹 (Toshiki IWASAKI)

1. はじめに

河川における土砂は、上流から下流へ流れていく過程で、河川流や地形などの影響を受けながら、移動・分散していく。そしてその土砂の輸送が、河川の浸食や堆積を起こし、河川地形を形成する。すなわち、河川においては、土砂輸送と河川地形が相互的に強く影響している。従って、河川の土砂の輸送の特性を明らかにすることは、河川地形の形成の解明に重要である。

河床変動の把握には、地点ごとの流砂量を求め、河床変動量を求めることが重要であるが、河床変動を引き起こす土砂動態は、通常流砂量としてとらえられる一方、土砂粒子の挙動までを追跡する研究は多くない。そのため、一つ一つの土砂粒子が輸送過程において、どのように移動・拡散し、河川地形の形成に影響を与えているかについては、十分には解明されていない。本研究では、マーキングしたトレーサー粒子の移動を計算する数値モデルを導入することで、土砂の輸送を可視化し、河川地形の形成との関係性を考察していく。

河床におけるトレーサー粒子の輸送に関する研究は、水理模型実験を行った濱木ら¹⁾の研究や、数値解析モデルを用いた岩崎ら²⁾の研究などがある。これらの研究では、トレーサー粒子は、下流へ向かうにつれて移動速度が低下することが報告されている。特に、岩崎らの研究では、交互砂州発生条件下において、トレーサーが砂州に捕捉されることにより、空間的な分散が広がることが明らかになっている。一方、より複雑な河川地形においてトレーサー粒子がどのように移動するかについてはより詳細な検討が必要である。本研究では、交互砂州と比べて、より流路が分岐する網状砂州において、トレーサー粒子がどのように移動・分散するかについて数値計算により検討する。

2. 数値計算モデル

2.1 土砂輸送のトレーサーモデルについて

本研究では、土砂移動をトレーサー粒子を用いることにより数値的に表現し、網状流路と土砂移動の関連性について考察する。ここで、トレーサー粒子とは、他の土砂と識別することができ、他の土砂と同様の挙動を示す土砂粒子のことである。本研究では、トレーサー粒子の移動・分散をトレーサーの濃度の時間推移を観察することによって追跡していく。

土砂の運動過程は、流砂量式と土砂保存式によって決まる。まず、トレーサー濃度の保存式の構築には、土砂の体積保存を考慮しなければならない。濃度変化を計算するために、平野による河床材料と流砂の交換が行われ

る交換層を定義し、この層において、どの程度のトレーサー粒子が含まれ、移動していくかを考える必要がある。ここで、河床の交換層厚を L_a 、トレーサー濃度（トレーサーの体積/土砂体積）を f_a 、河床の空隙率を λ とすると、交換層内の単位面積当たりのトレーサー量は、

$$(1 - \lambda)L_a f_a \quad (1)$$

と表される。流砂により輸送されるトレーサーの移動量は単位幅流砂量 q_b を用いて、

$$q_b f_a \quad (2)$$

となる。微小時間 Δt 間のトレーサーの濃度変化を Δf_a とすれば、交換層における体積保存は、

$$(1 - \lambda)L_a \Delta f_a \Delta x = [q_b(x)f_a(x) - q_b(x + \Delta x)f_a(x + \Delta x)]\Delta t \quad (3)$$

となり、微分方程式として以下が得られる。

$$(1 - \lambda)L_a \frac{\partial f_a}{\partial t} + \frac{\partial q_b f_a}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

ここで、河床変動がある場合、河床高さ η 、交換層と遷移層の間のトレーサー濃度を f_1 とすると、

$$(1 - \lambda) \left(L_a \frac{\partial f_a}{\partial t} + f_1 \frac{\partial \eta}{\partial t} \right) + \frac{\partial q_b f_a}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

二次元においても同様に考えると、 x 、 y 軸の流砂量をそれぞれ q_{bx} 、 q_{by} として、

$$(1 - \lambda) \left(L_a \frac{\partial f_a}{\partial t} + f_1 \frac{\partial \eta}{\partial t} \right) + \frac{\partial q_{bx} f_a}{\partial x} + \frac{\partial q_{by} f_a}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

となる。詳細については、文献³⁾に譲るものとする。

2.2 計算方法

流れ場は浅水流方程式を用い、河床底面の摩擦は、 Manning則により評価した。流砂モデルには平衡流砂式を用い、縦断方向は芦田・道上式、横断方向は長谷川の式より計算を行った。

2.3 計算条件

これまで述べてきたように、本研究では、網状砂州発生条件下におけるトレーサー粒子の移動・分散を考察すべく数値計算を行う。水路条件には、Bertoldi et al.⁴⁾の行った河床形態と流木の挙動・堆積に関する水理実験の条件を参考にした。同条件で数値計算を行った結果、おおむね実験結果を表現できる結果を得たものの、この条件では砂州の固定化が顕著であった。固定化された砂州にトレーサーが補足されると移動しないトレーサーとなってしまう、動的な河床変動により移動するトレーサーの移動・分散過程を検討するうえで問題となる。そこで試行錯誤の結果、流量を2倍にすることにより、砂州が固定化せず、ある程度流路が移動し続ける条件となるよう

にした。

数値計算に用いた水路は、水路長 40m、幅 1.7m、勾配 0.013 の直線水路とし、河床粒径 0.73 mm、2.52l/s の流量を与えた。マンニングの粗度係数は、0.0145 とした。計算格子幅は、縦断方向、横断方向共に 3cm の正方形格子を用いた。また、計算時間を短縮するために、河床変動加速係数を 5 に設定している。河床変動加速係数は、流砂量に対する河床変動量を変化させる定数であり、今回は 5 に設定しているため、5 倍の早さで河床変動が生じるような計算条件となっている。砂州の発生においては、きっかけとなる擾乱を予め与えておく必要がある。そこで、通水前に一部の河床を微小に高くした状態で、計算を開始した。

上記の計算条件を、黒木・岸⁵⁾の中規模河床形態の領域区分図にプロットしたものが図 1 である。なお、図 1 のグラフの縦軸 τ^* は無次元掃流力、横軸は $Bl_0^{0.2}/H_0$ (B : 川幅、 l_0 : 勾配、 H_0 : 水深) である。今回用いた条件においては、無次元掃流力が 0.062、川幅水深比が 122 となり、図の通り複列砂州形成条件領域に位置していることがわかる。

3. 計算結果と考察

3.1 計算モデルの精度検証

まず計算モデルの精度を検証すべく、Bertoldi et al.⁴⁾が行った実験と同条件で数値計算を行った。図 2 に示しているのが、Bertoldi et al.⁴⁾が行った実験で、通水から、12h、13h、14h 後に観察された網状砂州である。そして、数値計算の結果を示しているのが、図 3 である。河床変動加速係数は 5 に設定している。図より、通水から 10800s 後において、網状砂州が形成していることが確認できる。数値計算結果を、Bertoldi et al.の実験において観察された網状砂州と比較すると、近い結果となっていることが分かる。このことから、本研究での数値計算モデルは、実現象における網状砂州の形成を再現することができていると考えられる。

3.2 砂州の形成について

前節で述べたように今回用いた数値計算モデルは実現象における網状砂州を再現できていると考えられる。その上で、Bertoldi et al.の実験条件の流量を 2 倍にして計算した河床変動量の結果が図 4 である。通水して 0s、1200s、7200s、14400s、28800s 後の河床変動量を示している。計算を開始してすぐに縞状の模様が発生しており、網状砂州が形成されていることが分かる。これは計

算条件設定の際に、中規模河床形態の領域区分図にて、予想された通りである。また、時間の経過に伴い、砂州は堆積したり、浸食されたりを繰り返し、その過程で流路が変化している。そして、流路変動とともに、砂州は下流側に少しずつ流れていることが観察できる。図から読み取れるように、時間の推移とともに、河床の変動や流路の形成が起きていることが分かる。砂州の形状に着目すると、砂州発生直後は、長さ 4m 程の短い波長の砂州が形成されていたが、3 時間後には約 6m、5 時間後は約 8m と変化し、時間を追うごとに砂州の波長が長くなっていることが分かる。また、流路数は時間の経過とともに減少していることが見て取れる。形成された砂州は、側岸浸食などの影響を受けて形状を変化させながら下流へ移動し、再び砂州を形成している。

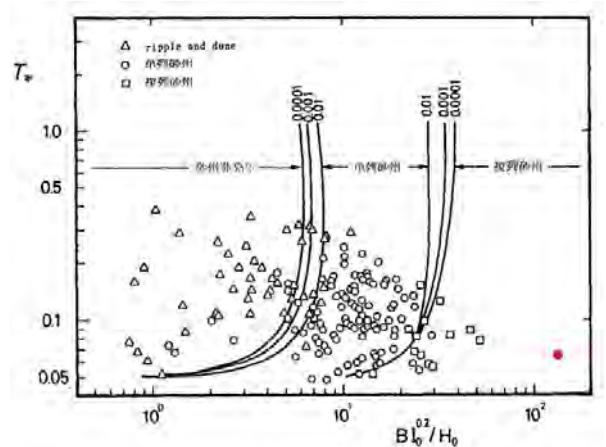


図-1 中規模河床形態の領域区分図⁵⁾

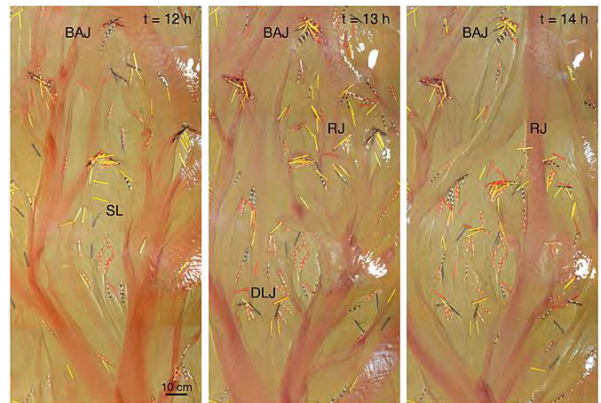


図-2 Bertoldi et al.⁴⁾の実験で見られた網状砂州

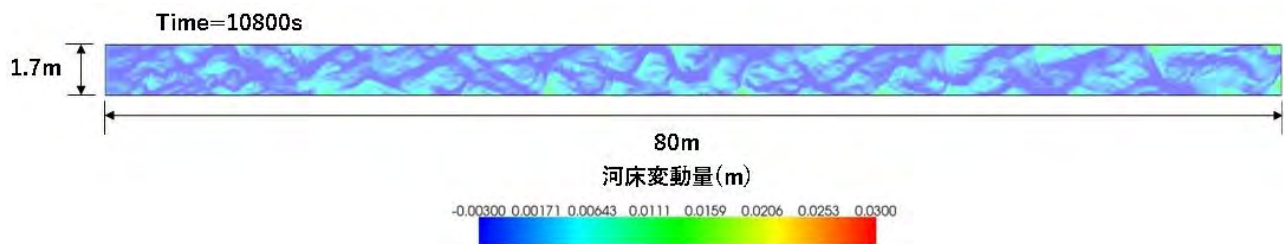


図-3 Bertoldi et al.の実験と同条件での数値計算結果

3.3 トレーサー粒子の移動分散について

次にトレーサー粒子の濃度について議論していく。

図5に、通水して0s、1200s、7200s、14400s、28800s後のトレーサー粒子の濃度の計算結果を示している。初期条件では、上流の長方形領域の交換層にトレーサーの体積濃度を100%で与えている。砂州形成領域に到達する1000s付近までは、トレーサー粒子群はほぼ同一の速度で下流へ移動している。その後、トレーサー粒子の移動速度は低下し、上流から下流全域に広く分散していることが分かる。

詳しく観察すると、トレーサー粒子は、下流へ向かって移動している部分と、移動せず動きが止まっている部分が見受けられる。図4の河床変動高と見比べると、トレーサーが移動せず止まってしまっている領域と河床高が増加している領域が一致していることがわかる。つまり、河床が高くなる堆積部において、トレーサーが固定

化している。このことから、砂州がトレーサーを捕捉していることが理解できる。また、流路部において、トレーサーが下流へ流れ出していることが分かる。そして、堆積部である砂州が側岸浸食などにより再び流路となることでトレーサーも流路に沿って下流へ流れていると考えられる。すべての砂州が浸食されない限りは、トレーサー粒子の一部が堆積されたままになっている。

次に、トレーサーの空間的分散を定量化するために、流下方向軸に対してトレーサー量の標準偏差を求め、この時間変化を示しているのが、図6である。今回、トレーサーは1000s付近で砂州形成領域に侵入していることが観察されている。そのため、0sから1000sにかけては、トレーサーが分散せず、群をなして下流方向へ流れている。図6からは、700s付近までは、トレーサーの標準偏差は増加せずに、ほぼ横ばいになっていることが読み取れる。砂州領域に侵入した1000s以降の標準偏差を見て

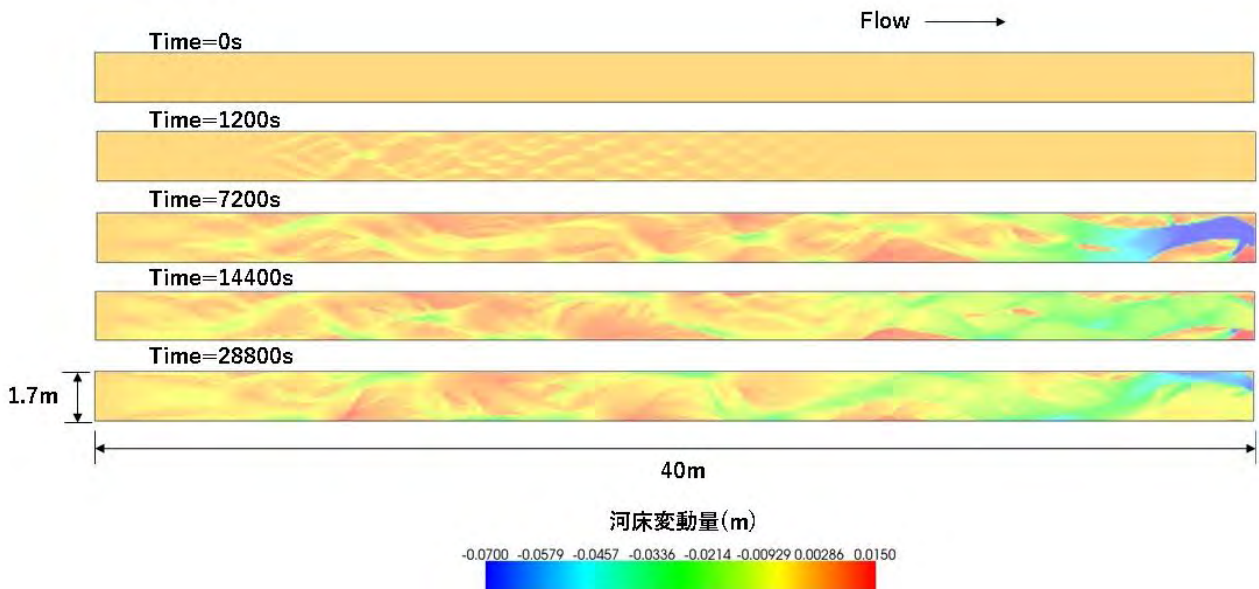


図-4 河床変動量の時間推移

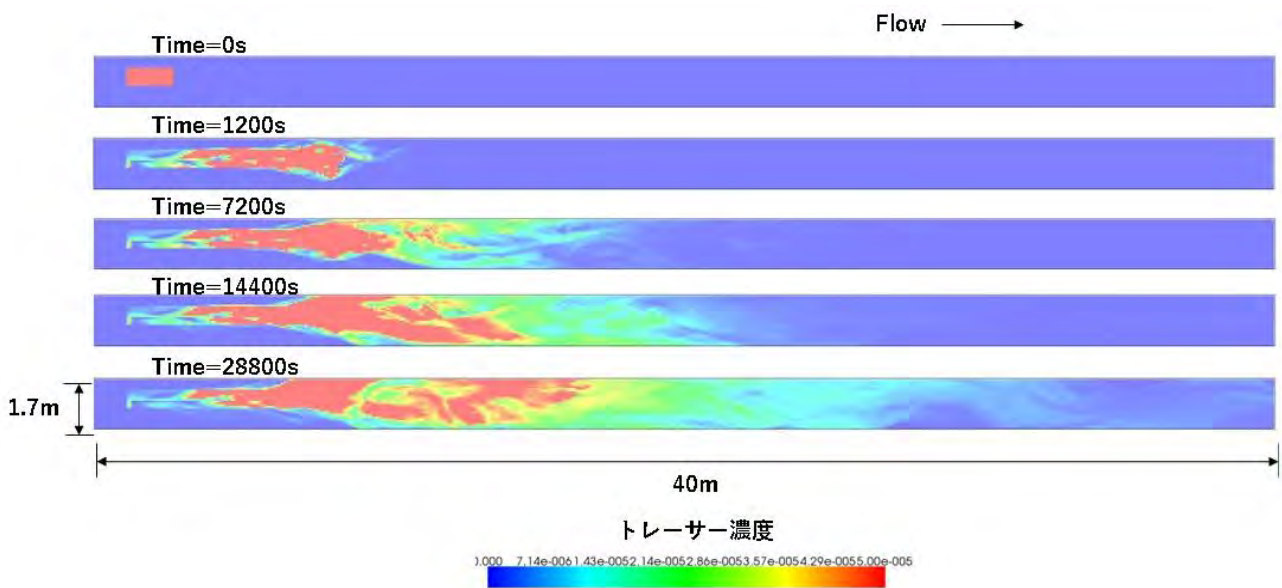


図-5 トレーサー粒子の時間推移

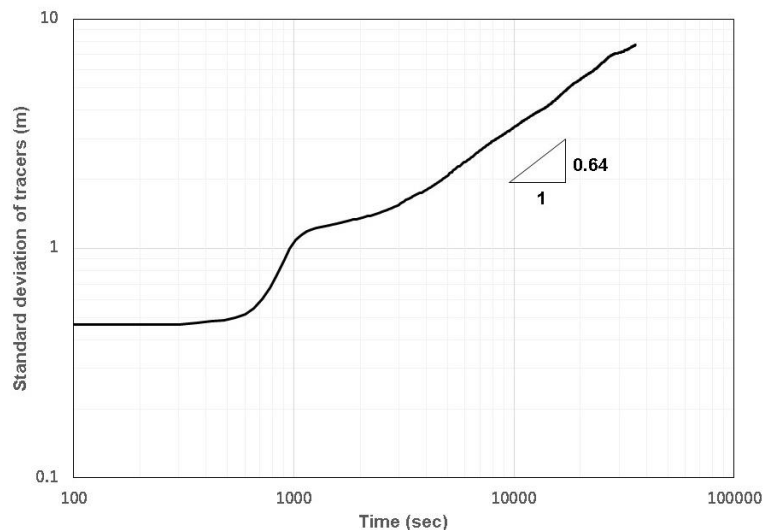


図-6 トレーサー粒子の標準偏差

いくと、トレーサーの時間変化に対する標準偏差が増加していることが分かる。つまり、トレーサーの標準偏差と時間推移の関係性からも、網状砂州の形成がトレーサーの分散の促進に大きく影響していることが理解できる。

また、今回の網状砂州形成下において、トレーサーの標準偏差は、漸近的に時間の 0.64 乗に比例することが分かった。この累乗により分散度合いは異なり、ランダムな運動を示すトレーサーの移動距離と停止時間が指数関数型のように有限な平均と分散を持つ場合は、空間的なトレーサーの分布系は正規分布に漸近し、その分散は通常拡散となって時間の 0.5 乗に比例する。一方、移動距離や停止時間をきわめて長くするような要素がある場合、この分散は異常拡散(anomalous diffusion)となり、0.5 乗より大きい場合、Superdiffusion、小さい場合 Subdiffusion となる⁶⁾。Iwasaki et al.⁷⁾の研究によると、非砂州形成下においては、標準偏差が時間の 0.5 乗に比例し、交互砂州形成下では、時間の 0.68 乗に比例することが報告されている。そのため、網状砂州形成下におけるトレーサー粒子の分散の時間変化は交互砂州形成下にかなり近いと考察することができる。これは、非砂州形成下では、トレーサーが一樣に下流方向へ流れていくのに対して、交互砂州や網状砂州の形成下においては、トレーサー粒子が砂州に捕捉され、より分散が広がるからだと考えられる。網状流路の場合、砂州上に堆積したトレーサーが輸送されるには再び浸食を受ける必要があり、この流路変動の時間スケールに依存する。これらは、移動し続ける交互砂州の場合よりも長い停止時間に寄与することになり、分散の時間変化に対して影響している可能性があるが、今後ケース数を増やすなどしてより詳細な検討が必要である。

4.おわりに

本論文では、網状砂州形成条件下におけるトレーサー粒子の移動分散について数値解析を用いて検証した。その結果、網状砂州形成時に、砂州の堆積とともに、トレーサー粒子が捕捉されることが観察され、空間的な分散

を促進していることが示された。そして、網状砂州形成下におけるトレーサー粒子の挙動は、交互砂州形成下に近いことが分かった。

参考文献

- 1) 濱木道大、岩崎理樹、井上卓也、佐藤大介、サムナー圭希、清水康行：着色流砂実験によるトレーサー粒子の移動分散現象に関する実験と数値計算、土木学会論文集 B1、(水工学)、Vol.74、No.4、pp.I_1033-I_1038、2018。
- 2) 岩崎理樹、Gary Parker、清水康行：自由砂州の影響を受けるトレーサーの移動分散に関する数値計算、土木学会論文集 B1、(水工学)、Vol.71、No.4、I_877-I_882、2015。
- 3) 岩崎理樹、川村里実、矢部浩規：土砂トレーサー移動・分散のモデル化について、寒地土木研究所月報、No.774、2017。
- 4) Bertoldi, W., Welber, M., Mao, L., Zanella, S. and Comiti, F.: A flume experiment on wood storage and remobilization in braided river systems, *Earth Surf. Proc. and Land.*, Vol. 39, pp. 804-813, 2014.
- 5) 黒木幹男・岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究、土木学会論文報告集、第 342 号、pp.87-96、1984。
- 6) Nikora, V., H. Habersack, T. Huber, and I. Ewan: On bed particle diffusion in gravel bed flows under weak bed load transport, *Water Resour. Res.*, 38(6), 2002.
- 7) Iwasaki, T., J. Nelson, Y. Shimizu, and G. Parker: Numerical simulation of large-scale bed load particle tracer advection-dispersion in rivers with free bars, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol.122, No.4, pp. 847-874, 2017.