

土砂トレーサー追跡に関する実験と数値計算手法の検討

Experiment and numerical simulation of advection-dispersion bedload tracers transport

水工事業本部 水工第1部 濱木 道大

近年、河川横断構造物や土砂採取の影響により流域内における土砂の連続性が崩れ、全国的に河床低下傾向となっている河川が増加している。これを解決するため、総合土砂管理の考え方に基づくダム排砂や置き土等による土砂還元が行われているが、還元した土砂を追跡する有効な手法が確立されておらず、効果検証に課題が残っている。

本論文では、土砂還元による流砂追跡手法を開発することを目的とし、室内水路実験による着色流砂（トレーサー）の追跡実験を行い、トレーサー群の平均的な移動速度及び分散状況を把握した。更に、トレーサー濃度を考慮した平面2次元河床変動解析による再現検証を行い、平均的な流砂の移動分散現象を再現する解析モデルを構築した。

1 はじめに

高度成長期以降、治山・砂防事業、治水事業、水資源開発事業等による上流域からの土砂供給量の減少、河道掘削や砂利採取による直接的な改変、堤防・護岸整備に伴う掃流力上昇等により、全国的に河床低下傾向となっている河川が増加している。

河床低下には、流下能力の向上という利点はあるものの、治水安全度低下（低水護岸の機能喪失等）や河川環境への悪影響（産卵床の減少、魚類移動性阻害等）等が顕在化し、総合土砂管理の考え方に基づく流域一貫の対策が求められている。河床低下の要因の一つである土砂供給量減少を解消する方策として、ダム堆積土や河道掘削土砂を下流河川に置土し、洪水時にフラッシュさせる土砂還元が各所で実施されている。

しかし、還元した土砂がどのように流送され、どこに堆積するか等の流送課程については、河床高の測量や河床材料調査だけでは把握することが困難であり、トレーサーや発信機等の手法は調査に労力がかかることや粒径がある程度大きくないと使えない等、モニタリング手法に課題が残っている。

このため、置土の効果を把握する手法としては、数値解析による手法が有効と考えられるが、一般的な河床変動解析モデルでは、流出した土砂が移

動分散しながら流下・堆積する過程を直接的に追跡・表現しているわけではない。つまり、置土の有無による河床変動傾向の変化は比較することが可能であるが、ある地点の粒度構成に対する置土材料の寄与率やある地点までの置土材料の到達時間等を把握するには、流砂の移動過程、流下時間、影響範囲などをより直接的に表現出来るモデルを併用することが有効である。

本研究では、水理模型実験によるトレーサー群の追跡実験を行い、定常状態におけるトレーサー群の平均移動速度及び分散状況を把握した。更に、トレーサー濃度を考慮した平面2次元河床変動解析を構築し再現検証を試みた。

2 着色流砂水路実験¹⁾

2.1 実験条件

トレーサーに影響する複雑な流れ場を表現し、置土材料の移動分散状況を把握することを目的として、湾曲水路を用いた移動床水理模型実験(表 2.1)を行った。移動床は黒色に着色した流砂(3号珪砂)を河床高が安定するまで予備通水した動的平衡状態を初期条件とした。

実験は、平衡河床上に蛍光ピンクで着色した流砂(3号珪砂、以下、トレーサー)を投入し、ブラックライト下で垂直写真を連続撮影することにより、移動分散状況の時系列変化を確認した。

表 2.1 実験水路の水力諸量

項目	諸元	備考
河幅 B (m)	0.20	
水路延長 (m)	5.24	曲率半径 $R = 5.0\text{m}$
水路勾配 I	1/173	
粒径 d (mm)	1.05	3号珪砂、水中比重 $s = 1.59$
粗度係数 n	0.015	マンングストリクラー型、 $k_s = 2d$
流量 Q (m ³ /s)	0.00353	3.53 l/s
水深 h (m)	0.034	外岸側 0.045~0.050 程度、 内岸側 0.025~0.030 程度
流速 v (m/s)	0.53	等流計算による計算値
フルード数 F_r	0.92	等流計算による計算値
無次元掃流力 τ_*	0.116	等流計算による計算値
給砂量 Q_b (m ³ /s)	2.39×10^{-6}	空隙率 $\lambda = 0.488$ 、700ml/150sec を投入
単位幅給砂量 q_b (m ² /s)	1.19×10^{-5}	$q_b = (1 - \lambda) Q_b / B$
トレーサー投入量 V_t (ml)	150	横断 No.16 地点に投入
通水時間 (s)	1200	平衡状態になるまで 900s 程度通水後

2.2 実験結果(トレーサー投入)

トレーサー投入実験は、予備通水(通水時間 900sec 程度)により河床形状がほぼ定常状態に達したことを確認し、No. 16 地点(上流端から 1.31m 地点)の表層に通水を中断することなく面的に投入した。投入量は 150ml(空隙率 $\lambda = 0.488$)、投入範囲面積はおよそ 0.052m^2 であり、極力均一な厚さ(0.003m)となるよう投入した。

図 2.1 は、垂直写真から識別したトレーサー分布の経時変化である。写真はブラックライト下で撮影した画像(図 2.1 右下)を、白黒 2 値化して識別度を向上させたものである。

また、図 2.2 は、各横断の表層濃度縦断分布の経時変化である。表層濃度は、図 2.1 の画像から横断毎に白黒ピクセル計測を行うことで算出した。

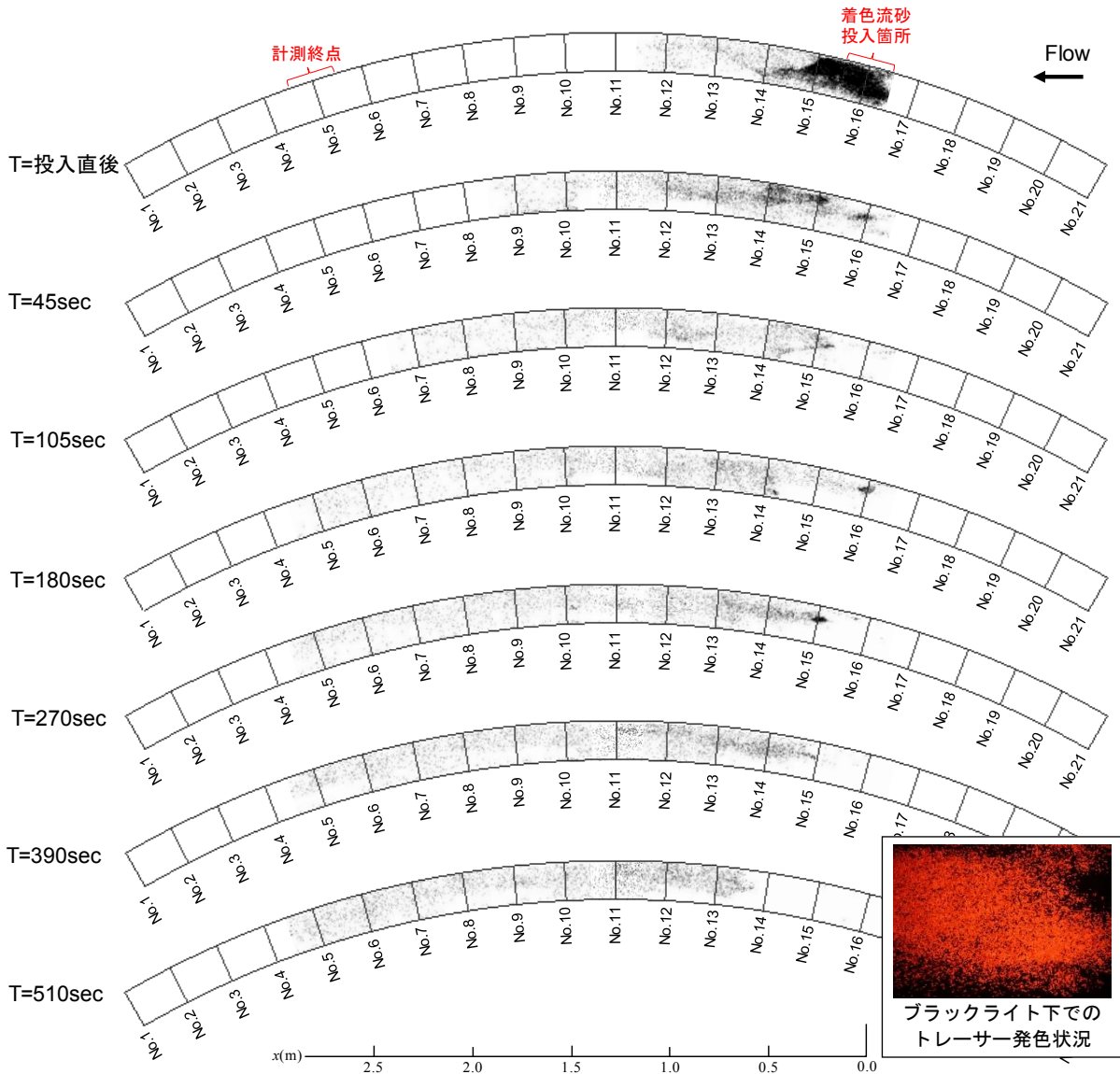


図 2.1 垂直写真から識別したトレーサーの分布

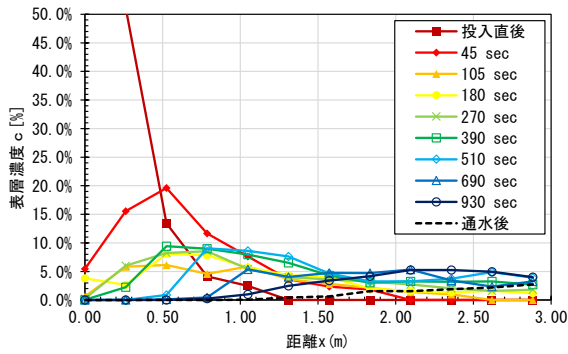


図 2.2 実験結果における表層濃度の縦断分布

これらによると、トレーサーが徐々に下流側に移動分散しており、通水後には、表層濃度は 5%以下となり、大部分が計測終点より下流に流下している。また、湾曲の影響で外岸側の移動速度がやや速い傾向にある。No.16 付近では、105sec 後には低下した表層濃度が、180sec 後には再度上昇しているが、これは上流からの流砂がトレーサーの表層を覆った後、再度トレーサーが露出したものである。今回の実験では、No.6～15 の範囲で河床波が形成されており、その河床波の堆積と洗掘の影響で、トレーサーが鉛直方向にも分散し、トレーサーの移動速度や分散に影響を与えているものと考えられる。

3 トレーサー濃度を考慮した河床変動計算²⁾

3.1 解析モデル

土砂トレーサーの移動を表現するモデルは、従来用いられている混合粒径の交換層モデルを改良³⁾、以下のように構築した。

$$(1-\lambda)\left(e_m \frac{\partial f_m}{\partial t} + f_l \frac{\partial \eta}{\partial t}\right) + \frac{\partial q_b f_m}{\partial x} + D \cdot f_m - E \cdot f_l = 0 \quad (1)$$

$$f_l = f_m : \frac{\partial \eta}{\partial t} > 0, \quad f_l = f_l : \frac{\partial \eta}{\partial t} < 0 \quad (2)$$

ここで、 λ :空隙率、 e_m :交換層厚、 f_m :交換層におけるトレーサー濃度、 f_l :交換層と遷移層の間のトレーサー濃度、 f_l :遷移層におけるトレーサー濃度、 η :河床高、 t :時間、 q_b :単位幅流砂量、 D :交換層から遷移層への堆積量、 E :遷移層から交換層への巻き上げ量である。

交換層と遷移層の土砂交換量である D 、 E は、図 3.1 のモデル概念図のように、交換層内を流砂が移動することによって生じる巻き上げ量 E と沈降量 D である。本研究では、Turowski and Hodge⁴⁾を参考に流砂量の関数としてモデル化した。

上記のモデルを、河川の流れ・河床変動解析ソフトウェア iRIC の Nays2DH に組み込んで使用した。

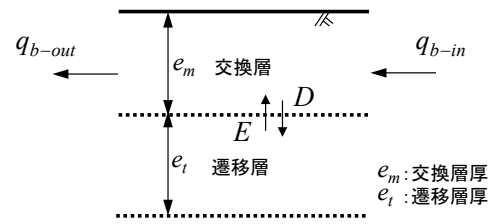


図 3.1 鉛直分散モデルの概念図

3.2 計算結果

計算条件は、実験条件を参考に予備通水後の河岸勾配を再現できるように設定し、鉛直分散を考慮しない場合と鉛直分散を考慮する場合について、実験結果と比較した。図 3.2 に表層濃度コンター図の経時変化を、図 3.3 に各横断の表層濃度縦断分布の経時変化を示す。

これらによると、どちらのケースも時間経過とともにトレーサーが徐々に下流側に移動分散する状況を表現しているが、図 3.3a (鉛直分散なし)の方が濃度波形の移動速度が速く、流下方向の分散も小さい傾向にある。例えば、実験結果(図 2.2)を見ると 270sec の濃度分布のピークは、0.5 m 付近にあるが、計算では 200sec ですでに 2.5m 付近まで移動した。

一方、図 3.3b (鉛直分散あり)ではその移動分散過程の中で、移動速度が速い成分(300sec 後には水路終点に到達)と、鉛直分散により投入地点付近に残る成分が表現されており、実験結果(図 2.2)の傾向と概略一致する。これは鉛直方向への分散効果を考慮したことにより、河床の中に潜り込むトレーサーの成分を表現できたためと思われる。ただし、200sec 以降では実験結果よりも濃度減少が大きくなっており、計算では移動速度が速い成分の影響で濃度変化も速くなっているものと考えられる。

これらの移動分散現象を定量的に評価するために、この表層濃度に対して平均濃度位置の移動速度と標準偏差 σ を算出し、実験結果と比較した。

図 3.4a の移動速度の時間変化によると、鉛直分散なしでは実験値に対して移動速度が速すぎるのに対し、鉛直分散ありでは実験結果をよく再現している。図 3.4b の標準偏差の経時変化を見ても、鉛直分散ありの方が、分散が強く再現性が高い。また、500sec 後には表層濃度の大半が計測範囲下流に流下し濃度分布差が小さくなるため、どのケースも同様の移動速度・標準偏差となっている。

上記から、鉛直分散のモデル化及びモデル係数の設定に課題は残るものの、鉛直分散を考慮することにより、土砂トレーサーの移動分散をある程度表現できることを確認した。

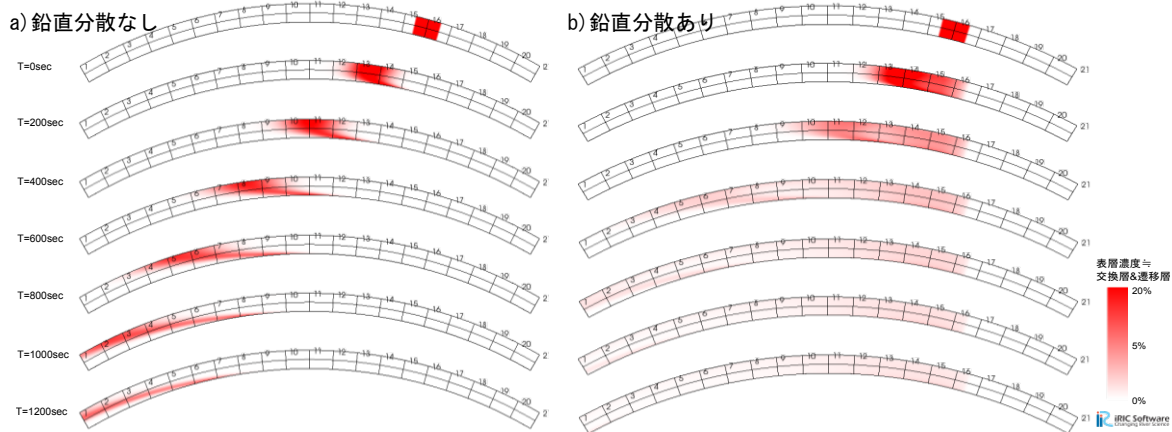


図 3.2 表層濃度コンター図 a) 鉛直分散なし b) 鉛直分散あり

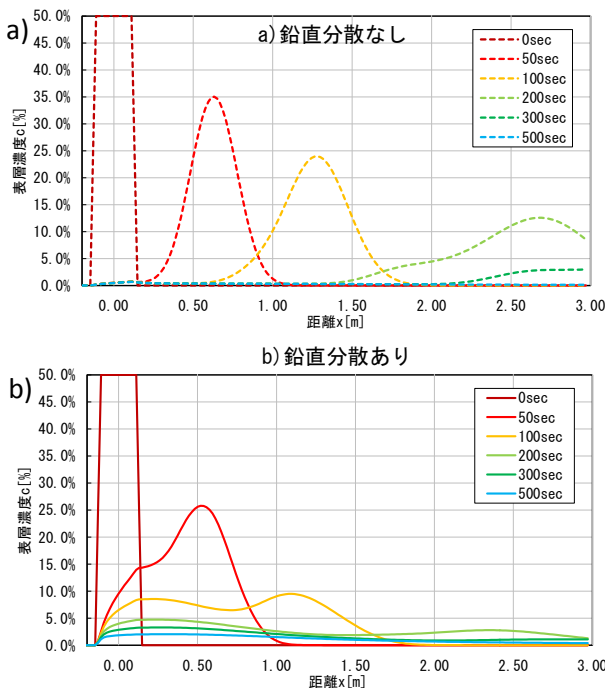


図 3.3 数値計算における表層濃度の縦断分布

4 まとめ

本研究の結果と今後の課題を以下に示す。

- 水理模型実験により流砂の移動分散状況を把握するとともに、一般的な交換層モデルを改良した土砂トレーサーモデルを構築した。
- 鉛直分散を考慮することで、土砂トレーサーの実験結果を概ね再現可能なことを確認した。
- 鉛直分散のモデル定数について、現地モニタリング結果による検証及び精度向上を図り、土砂還元による流砂追跡に活用していきたい。

[謝辞]

本論文は、第 62・63 回水工学講演会への投稿内容を再編集したものである。検討にあたり、寒地土木研究所の岩崎研究員、井上研究員らから多大なご支援・ご指導を頂いた。心から謝意を表します。

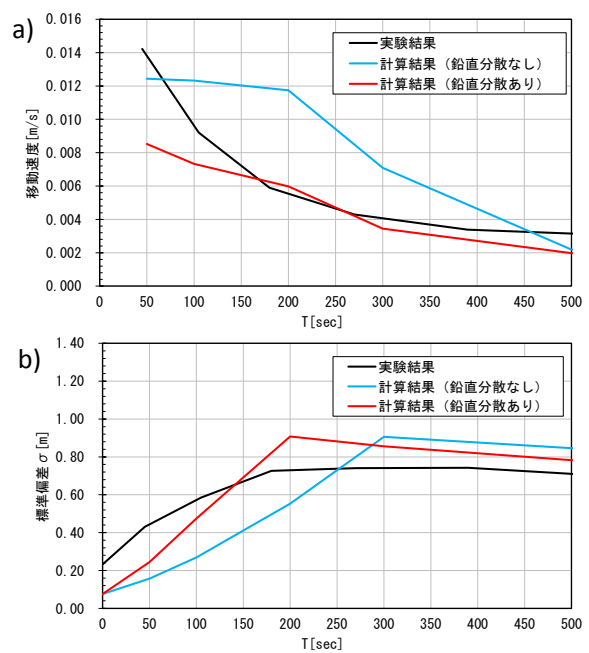


図 3.4 移動速度 a) と標準偏差 b) の時間変化

[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, 2018.
- 2) 濱木道大, 岩崎理樹, 井上卓也, 清水康行: 土砂トレーサーの鉛直方向の分散を考慮した数値計算, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.75, 2019.
- 3) 岩崎理樹, G. 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, 2015.
- 4) Turowski, J.M. and Hodge, R.: A probabilistic framework for the cover effect in bedrock erosion, *Earth Surf. Dynam.*, Vol.5, pp.311-330, 2017.