

実測値に基づいた掃流砂量と無次元掃流力の対応関係に関する考察

新潟大学工学部建設学科 ○非会員 黛 由季
新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 石原 道秀
新潟大学災害・復興科学研究所 正会員 安田 浩保

1 はじめに

国内の河川において卓越する流砂は、河川ごとに割合は異なるものの8割から9割近くと、そのほとんどが掃流砂で構成されている。このことから、河道管理や土砂管理を適切に行う上では、掃流砂量の予測が重要となってくる。その掃流砂量の予測には、無次元掃流力(以下、 τ_*)を支配変数とする多様な流砂関数¹⁾²⁾³⁾が一般に用いられており、これらは実務において多くの成果を残してきた。しかし、その流砂関数で推算した掃流砂量(以下、 q_B)は、実測の q_B に対して対数スケールで異なっており、その推定精度が不明瞭なのが現状である。その要因としては、支配変数である τ_* を正確に算定できていないことが挙げられる。

τ_* の正確な算定は等流条件であれば難しくないが、河床波のような時空間で底面形状が変化する条件下での算定は困難となっている。それは上述のような条件下において、 τ_* の支配変数である水深と流速を、同時に計測できる技術が未確立であったためであると考えられる。そのため、これまで水深と流速を、モデルを用いた水理解析によって推算してきた。しかし、水理解析に必要な初期条件である底面形状もまた、満足に計測できていないため、正確な水深と流速および τ_* の算定には至っていない。

本研究室では模型実験においてのみだが移動床水理における水面位と底面位の同時かつ高解像度な計測法 Stream Tomography(以下、ST)を開発した⁴⁾。STは水面位と底面位の計測に留まるものの、これにより水理解析に必要な底面形状、および水理解析の精度評価のための、水深の実測値を用意することができている。

本研究ではまず、時空間で底面形状が変化する条件として交互砂州が発生・発達する水理条件で模型実験を行う。1)STで計測した底面形状、2)それを初期条件に計算した実現現象に近い無次元掃流力 τ_* 、3)下流端で計測した掃流砂量 q_B の三者の関係について考察した。

2 模型実験の概要

2.1 実験条件

模型実験に用いた水路は、全長12.0 m、流路幅0.45 m、水路勾配1/120の直線矩形断面水路である。上流端と下流

端に3 cm × 45 cm × 5 cm(縦×横×高さ)の堰を設置し、その区間8.0 mに平均粒径0.76 mmの4号珪砂を高さ5 cmで敷き詰め、これを初期底面とした。時空間で変化する q_B と τ_* との対応関係を把握するため、水理条件は交互砂州の発生を狙い、黒木・岸⁵⁾の中規模河床形態の領域区分を参考に、交互砂州の発生領域に設定した。この時の流量は1.7 L/s、無次元掃流力は0.079、 $BI_0^{0.2}/h_0$ は14.5、給砂条件は無給砂で行った。通水時間は交互砂州が発達し、伝播と形状変化が緩慢となることが確認された4時間まで行った。通水中は、STを用いて、5分間隔で水面と底面の形状を計測した。水面と底面の計測の空間解像度は縦横断方向ともに2 cm間隔とした。

2.2 掃流砂の計量方法と計測間隔

本研究では、STを用いて移動床水理における底面、および水面を非接触で計測している。そのため、人為的な外力による流れの影響はなく、底面を流れる掃流砂にも影響を及ぼすことがない。これにより、底面の水理現象やそれに伴って排出される q_B の実測値を正確に捉えることが可能である。

q_B の横断分布を把握するために、横断方向に一定幅に区切った箱を用意した。箱の寸法を決める際に注意した点と各寸法について、1)幅、2)高さ、3)長さの順に示すと以下の通りである。

- 1) 下流端の直上流側の地形と q_B の対応関係を見るため、STの計測の空間解像度に近づけた幅、約3.0 cmとし、
- 2) 下流端直下に箱を設置した際に、堰より上流側の流れに影響を及ぼすことがないと確認できた(堰の高さより0.5 cm低い)高さ、4.5 cmとし、
- 3) 下流端から排出される掃流砂が、箱へ流入した後、箱から流出することのない十分な流下方向の長さ、約13.0 cm

とした。以上の示した寸法で、1つの箱を作り、それを水路幅0.45 mに収まる14個分の箱を繋げて、下流端堰直下に配置し、各時刻ごとに掃流砂量を計測した。

この手法で、全時刻分の q_B を測るのは現実的でないため、 q_B の計測間隔と、1 回に掃流砂をトラップする時間間隔を、砂州の発達段階に着目して決定した。具体的には、本研究室の実験水路において、今回と同様の水理条件で行われた過去の実験⁶⁾によって得られている砂州先端の移動速度、砂州波長の長さから決定した。過去の実験による砂州の伝播速度は、最速 6.0×10^{-4} m/s で、砂州先端に着目すると、20 分間で砂州の半波長分の距離を移動している。このことから、砂州の発達状況と q_B の対応関係を見るためには、 q_B の計測間隔を 20 分間とすることが適切であると判断した。また、1 回に掃流砂をトラップする時間間隔については、砂州の移動量が、砂州波長の 5 %程度にとどまる 2 分間とした。上述の条件で量り取った掃流砂の計量方法は、4 号珪砂一粒単位の計量が可能な 1/10000 の精密機器で行った。

3 掃流砂量と無次元掃流力の対応関係

既存の数ある流砂関数は、 q_B の支配物理量が無次元掃流力 τ_* であると考えられ、構築されてきた。本章では、この既往の考え方が正しいものかを、1) ST で計測した底面形状、2) それを既知として数理解析を行って得られた τ_* 、3) 実際に計量した q_B の実測値、の 3 つを比較し、検証を行った。ST での底面形状の計測は、実験時間 240 分に対して時間解像度は 5 分、計 48 ケース分行っている。本論文では、紙面の都合上、本章で議論する上で考察に必要な時刻を選択し、3 時刻分について考察を行った。

3.1 交互砂州の発生・発達の過程における無次元掃流力の推算

前章の模型実験で用いた ST は、水面と底面の幾何学形状の計測に留まる。このため、ST で計測した底面形状ごとに平面二次元水理解析を行い、水深と流速を推算し、それらから無次元掃流力を推算した。この水理解析のソルバーには、iRIC⁷⁾ に同梱される、浅水流方程式を支配方程式とした Nays2D を用いて、平面二次元の固定床水理解析を行なった。計算の空間解像度は、ST の空間解像度と同じ 2 cm で行った。また、推算した無次元掃流力の精度については、計算の水深と実測の水深を比較して評価しており、両者の差分値が実測の水深に対して 10 %程度であることを確認している。

3.2 各時刻における q_B の横断分布と τ_* の相関

無次元掃流力 τ_* を無次元限界掃流力 τ_{*c} で除した値を τ_*/τ_{*c} は、掃流砂の有無がわかる指標となる。理論的には、算出した τ_*/τ_{*c} が 1.0 を超えると q_B が発生し、1.0 を下

回ると q_B は発生しない。本節以降で、 q_B と τ_* の対応関係を各時刻ごとに、既往の理論と対比させながら検証していく。

図-1 に、ST で計測した底面形状の各時刻のコンター図、およびそこでの τ_*/τ_{*c} の大きさと向きを、矢印で示した図を示す。同図中の青、赤、緑色の線は、それぞれ下流端から 0.0 m、0.2 m、0.4 m 地点における横断線を表し、次項にて説明する図-2 の横断面図と対応している。図-2 では、上から a) q_B の実測値、b) τ_*/τ_{*c} 、c) 底面高を表している。また同図は、左側を右岸、右側を左岸とし、図-1 に対応するように横軸を調整している。

3.2.1 通水開始から 100 分後

図-2 a) の 100 分の時刻を見ると、 q_B が水路幅中央より右岸側で多く排出されている。そこで、同時刻の図-2 b) を見ると、全ての測定点で $\tau_*/\tau_{*c} > 1.0$ となり、右岸側では q_B と τ_* が対応していることがわかる。その一方で、左岸側では $\tau_*/\tau_{*c} > 1.0$ であるにも関わらず、 q_B は排出されていない。これは、既往の理論が成り立っていない点である。

3.2.2 通水開始から 120 分後

図-2 a) の 120 分の時刻を見ると、水路幅中央より右岸側で、平均して約 20 g の q_B が排出され、左岸側では 0.01 g 程度しか排出されていないことが確認された。この時刻における同図 b) の左岸側に着目すると、青線で示した堰の直上 0.0 m での τ_*/τ_{*c} は 1.0 をわずかに超えているが、 q_B は非常に少ない量しか得られなかった。そこで上流側の断面の算定値である赤線に着目すると、右岸側から 0.3 ~ 0.4 m の区間で τ_*/τ_{*c} が 1.0 を下回っていることから、 q_B は直上の 0.0 m よりさらに上流側の水理量の影響を受けている可能性が示唆された。

3.2.3 通水開始から 180 分後

図-2 a) の 180 分の時刻を見ると、掃流砂が中央付近で多く排出されており、その点における τ_*/τ_{*c} を見ても 1.0 を超えているため、 q_B と τ_*/τ_{*c} との対応関係が既存の考え方と一致している。続いて、右岸から約 0.3 m の区間に着目してみる。その区間における τ_*/τ_{*c} を図-2 b) より読み取ると、下流端直上流 0.2 m までの断面では τ_*/τ_{*c} が 1.0 を下回っているのにも関わらず、左岸端で q_B が特出している。この場合、 q_B と τ_* との対応関係が適切に示されていない結果となった。

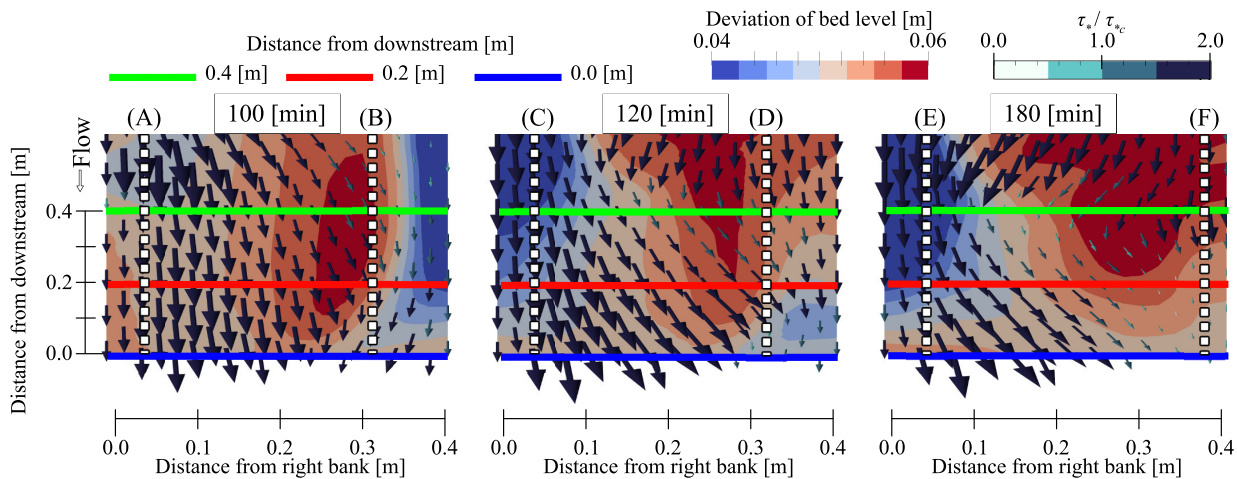


図-1 河床高の平面図 (左から実験開始 100 分後, 120 分後, 180 分後の結果)

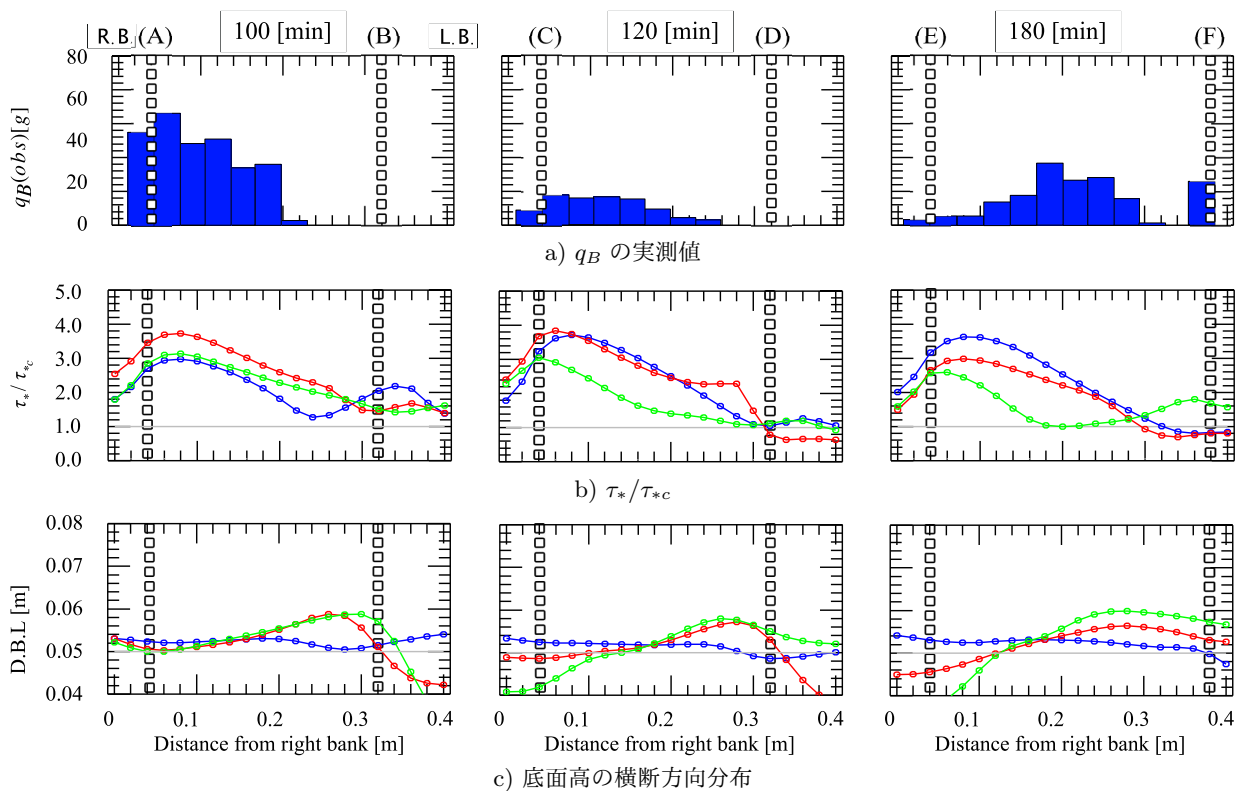


図-2 模型実験における計測値および計算値の横断図 (左から実験開始 100 分後, 120 分後, 180 分後の結果)

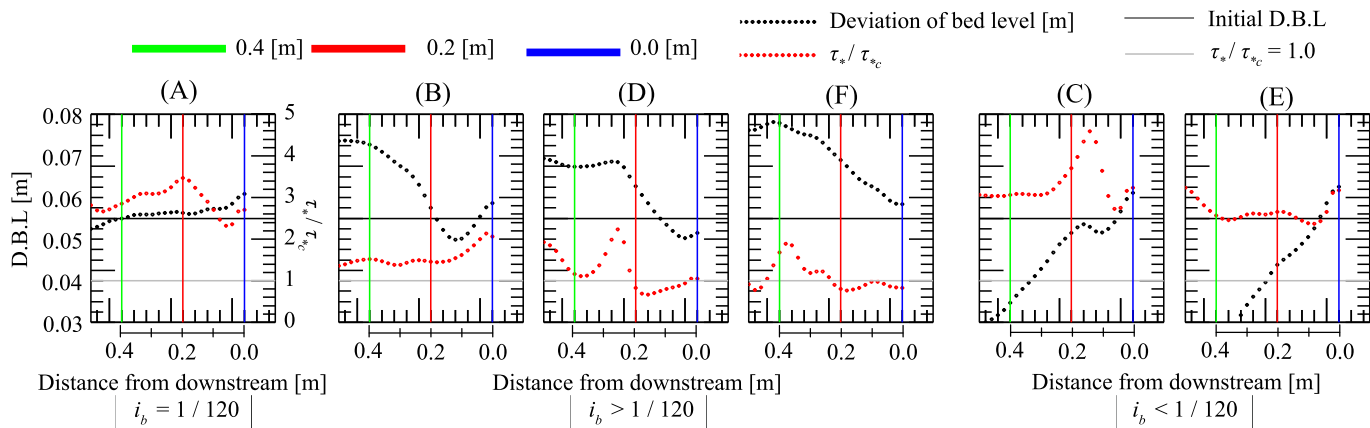


図-3 河床高と τ_* / τ_{*c} の縦断図 (左から実験開始 100 分後, 120 分後, 180 分後の結果)

4 掃流砂量と無次元掃流力が対応しない理由

前節で q_B と τ_*/τ_{*c} の対応関係を見てきたが、対応している箇所としていない箇所が混在することがわかった。特に、下流端直上の点から算出した τ_*/τ_{*c} が、 q_B と対応していないことから、 q_B が上流側のどの地点の水理量の影響を受けているのか検証すべく、底面の縦断形状と τ_*/τ_{*c} のそれぞれの縦断分布を比較して、 q_B と対応する物理量の把握を試みた。

図-1 に示した白の点線 (A)~(F) は、各時刻において、掃流砂が多く排出された地点 ((A),(C),(F)) とそうでない地点 ((B),(D),(E)) の縦断線を表している。図-3 では、初期条件の底面勾配 $1/120$ と平行 ($i_b = 1/120$)、急勾配 ($i_b > 1/120$)、逆勾配 ($i_b < 1/120$) の3種類に分別し、各断面の底面高と τ_* の縦断分布を示した。本章で説明する際に、各図の左側を上流、右側を下流、同図の青線を下流端と呼ぶ。

4.1 初期の底面勾配に対して平行 ($i_b = 1/120$, 断面 (A))

図-2 a) より、断面 (A) の下流端で計測した q_B は時刻 100 分で最大値となった。図-3 の断面 (A) での底面高と τ_* を比較すると、底面高が初期条件のものと同等であることから、底面勾配も同等である。また、 τ_*/τ_{*c} の値が、考察区間すべてにおいて 1.0 を超えており、 τ_* と q_B の対応関係が見られ、既存の考え方と合致する。

4.2 初期の底面勾配に対して急勾配 ($i_b > 1/120$, 断面 (B),(D),(F))

図-3 の断面 (B),(D),(F) では、底面高が空間的に変化し、下流端に向かって急勾配になっている様子がわかる。この3つの断面のうち、まず断面 (F) について考察する。

図-2 より断面 (F) では掃流砂が排出されているが、図-3 の断面 (F) の赤点を見ると、下流端から 0.0 m, 0.2 m の点で $\tau_*/\tau_{*c} < 1.0$ という結果になり、 τ_* と q_B が対応していない。下流端から約 0.4 m の地点で、 τ_*/τ_{*c} が最大値となっており、また、この縦断における底面勾配が初期底面高に対して急になっている。上記の状態を整理すると、 τ_*/τ_{*c} が最大となった点の掃流力が、慣性力を伴って掃流砂に加わり、下流端へと伝わったことで、 q_B が多く得られたのではないかと考えられる。

続いて、図-2 の断面 (B) と (D) をみると、掃流砂が排出されていない。図-3 の断面 (B) では下流端の τ_*/τ_{*c} は 1.0 を超えていて、底面も急勾配であるにも関わらず、 q_B がない。地点 (D) についても同様であり、地点 (B)(D) ともに断面 (F) の考察と矛盾する。その理由として、図-1 の点線 (B), (D) 上の底面形状を見ると、交互砂州の先端部

分で底面勾配が急に切り立っているために、浅水方程式を用いている iRIC の Nays2D では、現象を正確に解けていない可能性が考えられる。

4.3 初期の底面勾配に対して逆勾配 ($i_b < 1/120$, 断面 (C), (E))

図-3 の断面 (C), (E) では、どちらも τ_*/τ_{*c} は 1.0 をはるかに超えているのにも関わらず、排出された q_B は少ない。この原因として考えられることは、河床が初期河床に対して、逆勾配となっていることから、慣性力により、砂が下流端へと排出しにくい状態になっているから、と考察した。

5 結論

本研究では、ST で計測した底面形状と実測値から計算した無次元掃流力と、実際に計量した掃流砂量との対応関係の把握と考察を行った。

本研究の成果として、 q_B の収支に密接に関係すると考えられている τ_* が、模型実験から得られた実測値の q_B との対応関係を見た際に、既往の考え方と一致しないことが明らかになった。

今後の課題としては、 q_B と τ_* の関係が対応していない要因が何であるかを検証し、解明していく。

参考文献

- 1) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と q_B に関する基礎的研究, 土木学会論文報告書, 第 206 号, pp.59-69, 1972.
- 2) 佐藤清一, 吉川秀夫, 芦田和男: 河床砂礫の掃流運搬に関する研究 (I), 建設省土木研究所報告第 98 号, 1958.
- 3) Meyer Peter, E. and R. Muller: Formulas for bed-Load Transport, Proc. of the 2nd Cong. of the IAHR, Stockholm, 1948.
- 4) 星野剛, 安田浩保, 倉橋将幸, 交互砂州の形成機構の解明に向けた水面と底面の同時計測手法の開発, 土木学会論文集 A2(応用力学), 74 巻 1 号, pp.63-pp.74, 2018.
- 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, No. 342, pp.87-96, 1984.
- 6) 石原道秀, 安田浩保, 五十嵐拓実, 交互砂州の流下速度の低下要因について, 土木学会論文集 B2(水工学), Vol.74, No.4, I.1111-I.1116, 2018.
- 7) 北海道河川財団, <http://i-ric.org>.