砂州形成河床上の 流砂量と流砂動態の検討 CHARACTERISTICS OF SEDIMENT DISCHARGE AND SEDIMENT TRANSPORT ON BARS

溝口敦子¹・辻本哲郎² Atsuko MIZOGUCHI and Tetsuro TSUJIMOTO

 ¹正会員 博(工) 名城大学理工学部助教 建設システム工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1丁目501番地)
 ²正会員 工博 名古屋大学大学院工学研究科教授 社会基盤工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

Sediment control along river is very important for river management. These days, countermeasures to deal with rotational degradation, *e.g.* placing sand at the downstream of the dam, have been taken in some rivers in order to restore the continuity of sand interrupted by dam. To indicate significance of artificial sediment supply in river, we need know where supplied sediment deposit, how sediment supply let river morphology change, and so on. Therefore, we focus on the sediment transport on the bars which is typical landscape of river. We took the experiments to estimate sediment discharge on the bar and to indicate differences between sediment transport on the bars and on the flat bed. As results, characteristics of sediment discharge and sediment transport on the bars are shown.

Key Words : Sediment discharge, sediment transport, alternative bars, numerical simulation, flume experiments

1. はじめに

河川環境の変化の一つの要因として、流域の土砂生産、 水系の土砂輸送の人為的インパクトによる変質が挙げら れる.例えば、川を流れる土砂の連続性をダムが分断し ダムの下流へ流れる土砂の量や質が変化させたため、下 流河道で河床低下や様々な環境の変化が生じている.こ うした土砂の不連続によって引き起こされた全国の河川 や海岸の状況を受け、平成10年には、河川審議会によっ て総合土砂管理小委員会が設置され、「流砂系の総合土 砂管理に向けて」と題した小委員会報告が出された¹⁰. この中には、問題解決のための課題の一つとして、土砂 量の予測・予知手法の構築が挙げられている.

河川を流れる土砂の量や質の把握は河道管理の面から も重要であるが困難を極め、現在でも各河川でモニタリ ングなどが進められている。その一方で、ダム下流への 置き砂を行うなどダムで遮断された土砂を下流河道へ流 す事業が試行されつつあるが、実際にダム下流へ供給さ れた土砂が下流河道のどこへ堆積するのか、砂の質に よってそれがどう変化するのか、どのように下流環境改善へ寄与するかは現段階で明確になっていない.こうした事業を試行する際に人為的に供給した土砂の有用性を知るためにも、供給した土砂のその後の動態をおおよそでも予測する必要がある.

そこで、著者らは、現地での土砂動態を知るために砂 州形成河床上の基本的な砂の動きを把握することを目標 として、研究を行っている.本論文では、第一歩として、 一様粒径で構成された砂州が流下する条件下における流 砂動態を取り扱った.特に砂州の形成に伴う流砂量の変 化、および、砂州形成河床上の砂の動きについて平坦河 床との違いを把握する実験を行い、さらに数値解析を用 いて実験で見られた現象の理解を深めた.

砂州に関する研究はこれまで数多く行われてきた²が, 砂州上の砂の動きに関する研究で流砂系管理を意識した ものはない.砂州上の流砂量に関して,福岡ら³は,ビ デオ解析により砂州上の砂の動きを詳しく調べ,流砂量 ベクトルを算出している.しかし,表層の砂の動き,測 定線を通過する表層の砂の数と方向から流砂量ベクトル が算出されているため,流砂層厚を考えると実際の流砂 量分布と異なる可能性が残る.そのほかに、藤田ら⁴は、 砂州の発達過程に関する研究の一端として、形成過程に おける流砂量の変化を考察しているが、詳細については 調べられていない.また、竹林ら⁵は固定した交互砂州 上に混合粒径および一様粒径の土砂を流すことで砂州上 の流砂特性を調べ、混合粒径河床と一様粒径河床での波 高の違いが生じる理由について議論している.だが、こ れらの既往の研究は、砂州の流下に伴う全流砂量の変動 や平坦河床時との土砂流出特性の違いなどは言及してお らず、土砂管理に適用できる知見としては十分な成果を 得ているとは言えない.そこで、本研究では、土砂管理 を視野にいれ、砂州形成河床上における流砂特性を把握 するため、砂州進行条件で様々な検討を行った.

2. 砂州形成に伴う流出土砂量把握実験



-	-		-	

表-1 流量	パタ	ーン
--------	----	----

流量パターン	1	0
流量(m ³ /s)	0.006	0.002
河床勾配	0.01	0.01
平均粒径(mm)	0.88	0.88
川幅(m)	0.60	0.60
水深(m)	0.019	0.010
B/H	32.212	59.299

(1) 実験装置概要

ここでは、砂州が形成されるに伴う、縦断、横断方向 の流下方向成分の流砂量分布の変化を把握するために、 実験を行った.実験は、図-1に示すように、勾配を 1/100に設定した幅60cm,長さ20mの可変勾配水路を用 い、平均粒径0.88mmの珪砂4号を6cm程度の厚さに敷き 詰めて行った.水路の上流部には、固定床区間と土砂供 給を行う給砂区間を、下流部には、土砂採取を行う採砂 区間と固定床区間を設置した. なお, 上下流部の固定床 区間には、移動床区間と同じ砂を貼り付け、粗度の急激 な変化を防いだ.また、採砂区間では、横断方向に6分 割した土砂採取箱を置いて定期的に土砂の採取を行った. 採砂区間上流には固定床台を設け、固定床高さを初期河 床高よりも低くして上に砂を載せておくことで最下流端 まで河床変動を可能とした(図-1の拡大図).このよう な工夫を行うことで、採砂区間の直上流が下流端河床と して受ける影響を軽減した.

(2) 実験条件

今回の実験は、本実験を行う前に土砂供給を行わずに 砂州を形成させる予備実験を数回行い、砂州の形成状況 および下流端から排出される土砂量を調べ、上流から給 砂するおおよその土砂量を決める実験を行った.予備実 験は砂州が形成される条件となる2パターンの流量を用 いて行い(表-1),そのとき比較的安定した交互砂州が 形成された流量パターン1を用いて流出土砂量の把握実 験を行った.ただし、流量パターン0の通水時に形成さ れる砂州は、長時間経過しても複列と単列砂州が混在し 複雑な形状を有し変動するため、4章の実験で平坦河床 上の砂の動きの参考値としてのみで結果を用いた.

(3) 流砂量特性の把握実験概要(CaseA)

予備実験の結果を受け、比較的安定した交互砂州の形 成が確認された流量パターン1を用いて、流砂量の分布 状況の詳細把握を行った.また、本実験においては、予 備実験で得られた流出土砂量の結果から1分間に465gの 土砂量を目安とし、上流土砂供給区間が平坦に保たれる ように土砂を供給した.

予備実験、本実験共に流下流砂量を把握するため、実 験水路下流端に設置した横断方向に6分割した採砂箱を 用いて、流下してくる土砂を採取した.土砂採取は、原 則5分間隔で行ったが、流出土砂量が多いときには、採 取間隔を短くして対応した.採取した土砂は、実験後、 炉乾燥機を用いて乾燥させ、乾燥重量を測定した.

実験中,水路内の砂州の発達状況を把握するため,上 空から10分毎に実験水路内の様子を写真撮影し,かつ, KEYENCE製のレーザ変位計を用いて下流部約5mの区間 の河床高を流下方向に25cm間隔で計測した.

(4) 砂州の形成に伴う流出土砂量

図-2に、予備実験と本実験における砂州波高と下流端 から流出される土砂量の時間変化を示す.なお、ここで の砂州波高は、各横断面における河床高低差のうち、計 測区間内の最大値とした.この図によると、砂州波高の 発達と共に流出土砂量は増加し、変動し始める.図中に 見られる流出土砂量のプロットごとの細かい振動は、採 取箱を出す時に下流端河床が崩れ落ちるなどの影響によ るものであるが、大きな周期の増減は、砂州の流下に伴 い起こっていると推察される.

そこで、砂州の流下状況と流出土砂量の時間変化を照 らし合わせてみる. 図-3に下流端河床の高低差と流出土 砂量の時間変化、図-4、5に右岸側Y=0.1m,左岸側 Y=0.5m,水路中心Y=0.3mにおける河床高と流出土砂量 を示す.これらの図に示すように、砂州の発達、つまり 河床の凹凸が発達すると共に、流出土砂量にも左右岸に 偏りが出てくる.また、左右岸への流砂量の集中と共に 断面総流出土砂量も縦断方向に振動し始める.特に、 図-4を詳しく見ると、流出土砂量の偏りが右岸から左岸、



time(min



-1

または、左岸から右岸へ移動する前に断面平均流砂量、 つまり総流出土砂量が減少することがわかる.

図-6に示す河床高,流砂量横断分布を見ると,砂州が 右岸から左岸,左岸から右岸へ変化すると流砂量も遅れ 図-7に下流端の流出土砂量と河床高の全計測データ平均値,および,おおよそ砂州一波長分通過した時間帯の 平均値横断分布を示した.これによると,実験で計測さ れた砂州形状は,藤田らが見出したかまぼこ型形状を有 していることが分かる.また,流出土砂量は,河床のか まぼこ型形状とは逆に流路中心部において値が小さくな り水路壁付近に集まることが分かった.

3. 砂州形成河床上の流砂量特性

(1) 解析手法概要

流砂量特性を詳しく調べるため、実験と同一条件で数 値解析を行った.実験では実現象を見ることができるが、 実験水路のスケールや計測技術の問題から現象の詳細を 把握することが難しい.一方、数値解析は、詳細なデー タは得られるが実現象を再現するために必要なモデルが 組み込まれていない可能性が残る.そこで、ここでは、 補足的に数値解析を用いて詳細を検討することとした.

数値解析では著者らがこれまで砂州形成過程の再現性 を確認しているNHSED2Dモデル^{の, 7)}を用いる.また, 砂州の平衡状態について検討するため,実験の最終段階 で得られた砂州波長程度となる6mを計算領域として周 期境界条件で計算を行った.なお,砂州を形成させるた めの擾乱として,初期河床高に粒径程度の凹凸を与えた.

(2) 砂州形成に伴う流砂量の時間変化

図-8,9に示すように、実験結果と同様に数値解析結 果においても、断面総流砂量は、砂州の発達とともに増 加し、最終的に周期的に変動することが確認された.計 算開始時、つまり平坦河床上の流砂量と砂州形成後の流 砂量を比較すると、砂州形成時は、平坦河床よりも流砂 量の平均値は1割程度増加する.また、砂州流下に伴う 流砂量の変動の振幅は平均値の1割程度であった.

ここで、数値解析の再現性について考察する.実験で の通水開始時の流砂量は流れの安定性等の問題から平坦 河床上の流砂量として取り扱えるか疑問が残り、実験で は別途平坦河床上の流砂量の検討が行えなかったため、 平坦河床時と砂州形成河床時との流砂量に関する検討は できない.一方、砂州発達後の流砂量の変動は、実験で も確認されており、平均値の2~3割の振幅を持っていた. 数値解析結果はこの特性は再現しているが、振幅が過小 評価であった.この要因として、流れの局所的な湾曲に よって起こる平均流速と底面流速のずれの組み込みが十 分でないことや、平衡流砂量公式を用いているため砂州 前縁線付近に土砂が捕捉される非平衡性が卓越した砂州 特有の流砂機構が再現できていないことが考えられ、現 モデルは定性的な再現にとどまっていると言える.

(3) 砂州形成河床上の流砂量分布特性

ここで、砂州上の流砂量分布について検討する.

前述したように、砂州の流下に伴う流出土砂量は、時間的に平均値の1割ほどの振幅を持って振動する.つまり、平衡状態における流砂量分布も縦断的に断面総流砂量は変動していることになる.次に、横断的な特徴について検討する.図-10に砂州が十分安定したとき(計算時間4時間後)の砂州一波長分を縦断方向に平均した河床高、流量、流砂量流下方向成分についてそれぞれ水深、

平坦河床時の流量,平衡流砂量で除した無次元量の横断 分布を示す.この図から,本検討ケースで形成される砂 州は,藤田ら⁴が見出したかまぼこ型形状を有すること がわかる.また,流量の縦断方向平均値は河床とは逆に 河岸付近に集中しており,さらに,流砂量の流下方向成 分については,流量と集中の仕方が違うが,壁際付近で 比較的多くなっているのがわかる.図-7に示す実験結果 と比較すると,実験と同様に河床形状がかまぼこ型形状 を有すること,また,流砂量の流下方向成分の偏りに関 してはその特徴は同様だが実験の方が大きいことがわか る.これは,上述したような理由から現モデルでは砂州 特有の流砂量の偏りの再現性が定性的なものにとどまっ ているためと考えられる.

また、平面的な流砂量、流量ベクトルを図-11、12に 示す.これによると、各横断面において流量の集中して いる場所と流砂量の集中している場所は、必ずしも一致 していない.しかし、流量と流砂量がそれぞれ集中する 砂州前縁線の下流端より下流、図-11中のX=2.5mの右岸 側およびX=5.5mの左岸側において流砂量が大きくなっ ていることが分かる.結果として、流砂量のピーク発生 場所は、実験結果と同様な傾向を示し、前縁線下流端の 下流付近の次の砂州が現れる岸側であることがわかった.

4. 砂州流下条件下での流砂動態把握の試み

(1) 砂の流下特性の把握実験概要

ここでは、供給土砂を通水中に着色土砂に切り替えた 後止水し、着色土砂の分布状況を調べることによって、 土砂の移動特性の把握を試みる.流量は表-1のパターン 1を用いて平坦河床(CaseB01)、砂州形成河床(CaseB11)上 の流砂動態を調べたが、参考として平坦河床に流量パ ターン0の通水した実験(CaseB00)結果も示す.

着色土砂の投入時間は、実験状況など様々な要因から 以下のようにした.今回は、平坦河床上の土砂動態の検 討も砂州形成実験と同じ水路を用いたため、長時間通水 すると砂州が形成し始める.そこで、CaseBO1では、通 水開始から数分後に着色土砂投入を開始し10分後に止水 した.砂州形成河床上での検討CaseB11は、砂州が安定 して形成された通水開始約4時間後から供給土砂を着色 土砂に切り替え、約16分後に止水した.なお、着色土砂 供給時間の決定は、全てのケースで同一にする、または、 到達距離をそろえるなど様々な方法がある.今回は、平 坦河床での投入時間が制限されるため、供給時間をおお よそ10分程度と決めて実験を行ったが、CaseB11では砂 の流下が遅かったためCaseB01と同様に着色土砂が上流 から5mに達するまで供給時間を延長した.ただし、参 考実験のCaseB00では12分間供給土砂を投入している.

着色土砂の分布状況は、実験後にデジタルカメラで撮影した写真からAdobe社製PhotoShopを用いて画像解析を

行うことにより、5cmの正方形で切り出した領域に対す る着色土砂の占有割合を算出し把握した.また,着色土 砂の存在深さは、実験終了後の河床に直径5cmのアクリ ル製円筒を突き刺し周りの土砂をよけ、図-13の例に示 すような写真を横方向から撮影し、実験終了後デジタル 画像からおおよその値を読み取った. なお, 平面分布状 況、存在深さともに、右岸側壁面からの横断方向距離 (Y) が10cm, 30cm, 50cmとなる場所で, 移動床区間 上流端からの流下方向距離(X)が0.5mとなる位置から

0.5mごとに計測を行った.

(2)砂の伝播速度 図-14にCaseB01, CaseB11における実験後の着色土砂 占有率の縦断変化を示す.平坦河床(CaseB01)におけ る占有率縦断変化は、砂州形成河床上の占有率の変化と は異なり、広範囲で占有率が低い領域が広域にわたって いることがわかる.また、着色土砂占有率が20%以上と なる最下流端の位置を着色土砂到達位置として、上流端 からの長さを着色土砂供給時間で除し、おおよその土砂 運搬速度をそれぞれのケースで算出すると、表-2の結果 となった. 表-2から本実験においては、平坦河床上の着 色土砂伝播速度は流量によって読み取れるような変化を しないものの、同じ流量でも砂州が形成、進行している 河床上は、平坦河床に比べ遅くなっていたことがわかる.

(3) 実験で見られた流砂伝播特性

次に、着色土砂存在深さの結果と伝播速度とあわせて 砂州形成河床上の流砂伝播特性について検討する.

n.

0

止水後計測した着色土砂の存在深さは、平坦河床にお いては、今回の大まかな計測方法では読み取るのが難し いほど浅く、最も厚いところで3mm程度までで、表面に 着色土砂が確認されてもほとんどが1mm弱から2mm程 度の深さまでしか存在が確認されなかった. それに対し, 砂州形成河床では、最大で6mm程度の深さまで着色土砂 が存在しており、図-15のような分布状況となった.た だし、CaseB11においては安定した交互砂州形成区間ま で着色土砂が伝播しておらず、上流部の複列砂州と交互 砂州が混在している区間の特性把握となっている.

図-15に点線で書き込んだ砂州前縁線と存在深さの分 布について見てみると、着色土砂の存在深さは、砂州前 縁線付近より上流側か否かで、つまり砂州形成領域のう ち, 堆積域か洗掘域かで深さが変化している. 砂州前縁 線の上流側、つまり土砂の堆積域では着色土砂は比較的 深くまで存在し、下流側、つまり洗掘域では、着色土砂 は比較的浅くまでしか存在していない.

このような結果から、平坦河床上では、流砂は河床表 面のみを通過し、より速く下流へ伝播するのに対し、砂 州形成河床では、洗掘、堆積を繰り返すことにより、上 流から供給された土砂のほとんどは一度砂州河床内に捕 捉されているため下流への伝播が遅れることが分かった.







区「1 川町脉に加りた内体を到里, 内体同, 川沙里の多

(4) 数値解析結果からの流砂伝播特性の考察

上記の実験結果を、前章の数値解析結果を用いて考察 する.安定した砂州が形成された図-11に示す河床コン ター時の単位時間あたりの河床変動量と流砂量の流跡線 を図-16に示す.また、図-16における灰色の流跡線に そった河床高,河床変動量,流砂量を図-17に示すと, 砂州の前縁線付近で堆積域(図中に黄色帯で示す)が存 在することがわかる.また、平衡状態の砂州について調 べたことから当然の結果だが、洗掘域におけるマイナス の河床変動量の合計と堆積域における砂の河床変動量は、 一波長の砂州域で等しくなっている.図-16によると、 砂は図中の流跡線に沿って進むとかならず砂州の堆積部 に当たる、数値解析では、堆積部の流砂量は0でないた め、若干の土砂は下流部へ運ばれるかと思われるが、実 験では、砂州の前縁線に砂が捕捉されており、ほとんど の砂が下流の砂州へと運ばれることがなった. 非平衡モ デルを組み込んでいないため数値解析結果のみでは議論 できないが、両者の結果を踏まえると、上流部の洗掘域 から運ばれた砂はほとんど前縁線付近にとどまる形で砂 州が進行していくと言える. そのため, 砂州が形成され ている場合は上流から供給された土砂は、砂州の進行速 度とほぼ同程度の速度で流下する結果となる. 福岡ら³⁾ は、砂州の伝播速度は、最低洗掘深より上に堆積してい る土砂量を平均流砂量で序した速度に等しいとしている

下するのに時間を要する. 今回の検討では、1ケースのみでの試み的な検討であ るが、特異な形状特性を持つケースではないため、今回 の方法で砂州河床上のおおよその砂の動きはつかめたと 考える. 今後、さらに検討を進め、砂州形成河道でも砂 州が流下しない条件下などの土砂の動きを調べ、実際の

河道管理に生かせる知見を得る予定である.

参考文献

- 河川審議会総合政策委員会総合土砂管理小委員会報告:流 砂系の総合土砂管理に向けて,1998.
- 例えば、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. 池田駿介:単列砂州の波長と波高、第27回水理講演会 論文集、pp.689~695,1983.
- 3) 福岡捷二, 内島邦秀, 山坂昌成, 早川博: 交互砂州の流砂量 分布, 第27回水理講演会論文集, pp. 697-702, 1983.
- 4)藤田裕一郎,村本嘉雄,堀池周二:交互砂州の発達に過程に 関する研究,京都防災研年報,第24号B-2,pp.411-431,1971.
- 5) 竹林洋史, 江頭進治, 金海生, 小山慎一郎: 交互砂州上の流 れと流砂量分布(2), 土木学会第52回学術講演会, pp.428-429, 1997.
- A. Pornprommin, A. Teramoto, N. Izumi, T. Kitamura, T. Tsujimoto : Numerical simulation of bar formation in straight channels by the NHSED2D model, J. Applied Mech., JSCE, pp.629-938, 2002.
- 7) 寺本敦子, 辻本哲郎:砂州の形成過程に関する数値計算手法,応用力学論文集,第7巻,pp1145-1150, 土木学会,2003.
 (2007.9.30受付)