

屈折蛇曲する岩床河川における砂レキ堆の移動停止条件

Conditions for Preventing Downstream Movement of Bars in Meandering Rock-Bed Rivers

早川 博¹
Hiroshi HAYAKAWA

¹北見工業大学工学部社会環境工学科准教授

要 旨

近年の河川改修では、動・植物の生態系に配慮した河川環境の保全が強く求められ、治水機能と環境機能を調和させた多自然川づくりが押し進められている。特に瀬と淵は魚類や昆虫類の多様な生育環境となる他、河川景観上からも川らしさをイメージさせるのに不可欠である。一般に礫床河川では河川改修があっても、自然に交互砂州などの多様な河床形態が形成され、瀬と淵は比較的容易に回復される。それに対し、砂礫層が所々に薄く堆積するような岩床河川では、河川改修後に瀬や淵などを再生させることは容易でない。

そこで、本研究は木下・三輪(1974)の屈曲蛇曲する水路における砂レキ堆の移動停止条件を岩床河川に適用し、河道を蛇行させることで上流からの砂礫を河床に積極的に堆積させ、砂州を形成・固定化させる手法を実験的に検討した。その結果、蛇行する岩床河川において蛇行角が大きくなると内岸から外岸の河岸沿いに砂礫が堆積し始めることがわかり、その堆積する条件を明らかにした。また、実際の岩床河川でも同様の位置に砂州が形成されていることが示された。

《キーワード：岩床河川；屈折蛇曲；砂州；移動停止条件》

1. はじめに

近年の河川改修では、動・植物の生態系に配慮した河川環境の保全が強く求められ、治水機能と環境機能を調和させた多自然川づくりが押し進められている¹⁾。特に瀬と淵は魚類や昆虫類の多様な生育環境となる他、河川景観上からも川らしさをイメージさせるのに不可欠である。一般に礫床河川では河川改修があっても、自然に交互砂州などの多様な河床形態が形成され、瀬と淵は比較的容易に回復される。それに対し、砂礫層が所々に薄く堆積するような岩床河川では、河川改修後に瀬や淵などを再生させることは容易でない。網走川では1992年9月の洪水を契機に河積確保のため河床掘削による河川改修が行われた²⁾。河床面が基岩まで掘下げられたため、網走川の改修後の河床は写真-1に示すように、直線化された区間には砂州の形成がみられず、蛇行部に寄洲（写真の青線部分）が形成されているだけである。これまで直線区間では水制工や床止工などによって砂礫を堆砂させる工夫をしてきたが、目立った効果は得られていない。寄洲が形成されている蛇行部の蛇行角 θ を調べると、蛇行部が $\theta=61.4^\circ$ 、蛇行部が $\theta=14.8^\circ$ 、蛇行部が $\theta=35.6^\circ$ 、蛇行部が $\theta=36.2^\circ$ である。三輪³⁾は全国の礫床河川を対象に河道の蛇行角と砂州の移動の有無の関係を調査し、河川の規模、勾配の緩急等にかかわらず、砂州の移動・停止の限界蛇行角 θ_c がほとんど20数度であることを示しているが、岩床河川の蛇行水路区間でも礫床河川と同様に砂州の移動・停止の限界蛇行角 θ_c 付近で蛇行部に砂州が形成・停止することが推測される。

そこで、本研究は木下・三輪⁴⁾の砂レキ堆(交互砂州)の移動停止条件を岩床河川に適用し、河道を屈折蛇曲させることで上流からの砂礫を河床に積極的に堆積させ、形成された砂州の固定化を実験的に検討するものである。



写真-1 岩床河川の砂州（網走川KP40.8～KP43.4，H19年撮影）

2. 屈折蛇曲水路実験の概要

本研究は木下・三輪の礫床河川における交互砂州の移動・停止条件⁴⁾を調べた実験の手法を参考に、図-1に示す河道の蛇行半波長 L と水路幅 B の比 L/B と蛇行角 θ をパラメータとして、砂礫の堆積、砂州の形成、砂州の移動の条件を模型水路実験により調べる。実験水路は岩床河川における瀬と淵の再生に取組んだ網走川上流区間を原型とする歪模型水路実験⁵⁾を参考にし、黒木・岸の砂州形成領域区分図⁶⁾の両軸の無次元パラメータ(τ_* と $Bl^{0.2}/h$)を模型と原型で一致させる相似条件から実験水路幅 $B=20(\text{cm})$ 、水路勾配 $I=1/86$ 、河床砂径 $d=0.75(\text{mm})$ を決定し、図-1に示すように直線水路に蛇行半波長 $L=40\sim 100(\text{cm})$ ($L/B=2\sim 5$)と蛇行角 $\theta=10^\circ\sim 40^\circ$ を組合せた3波長分の蛇行水路を接続して実験を行う。ここで、 τ_* :無次元掃流力流量、 h :水深である。なお、蛇行部は曲線長40(cm)の単曲線と直線部を組合せ、所定の蛇行半波長 L になるように直線部の長さを調節している。水路側壁は厚さ100(mm)の建築用発泡断熱材を利用し、容易に曲線部を加工することができる。

実験流量 Q は移動床実験で交互砂州が形成された $Q=0.7(\text{l/s})$ とし、固定床(岩床河川)実験は河床に砂を貼り付け、移動床実験で計量した流砂量($q_B=65.3\text{g/min}$)の0.5倍、1倍、2倍の3通りを給砂して、

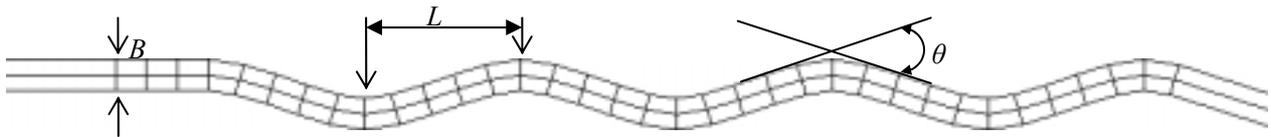


図-1 蛇行半波長 L と蛇行角 θ の定義

蛇行区間の砂礫の堆積状況，砂州の形成，移動，停止条件を明らかにする．ここで，実験流量 $Q=0.7(l/s)$ は網走川上流区間の低水路満杯相当流量 $Q=1.1(l/s)$ より少なく，融雪期最大日流量相当流量 $Q=0.27(l/s)$ の2倍以上の流量規模である．また，実験の通水時間を原型の通水時間に換算すると，実験の通水時間20分が原型河川では約24時間通水に相当する．

また，本研究では移動床実験結果の検討のために，2次元河床変動数値シミュレーション（河川シミュレーション支援ソフトRIC-Nays⁷⁾）の結果との比較・検討をする．なお，固定床上を流下・移動する流砂量式はまだ確立されていないので，固定床を対象とする砂州形成シミュレーションは行わず，流れの解析だけである．

また，数値シミュレーションで，砂の水中安息角は実測から 30° とし，河床の粗度係数は移動床，固定床ともに $n=0.015$ として計算している．

3. 実験結果

実験は，まず移動床実験により蛇行区間での砂州が移動・停止することを確認し，実験とシミュレーション結果から木下・三輪⁴⁾の砂州移動停止条件の妥当性を検証する．次に，同条件で河床を砂で固定した固定床での実験を行い，固定床を流下・移動してきた砂が停止・堆積し，砂州形成に至る条件を調べた．

(1) 移動床実験

実験流量 $Q=0.7(l/s)$ ，蛇行半波長 L と水路幅 B の比 $L/B=5$ ($L=100\text{cm}$ ， $B=20\text{cm}$)として，蛇行角 θ を変化させた実験結果を示す．

上流の直線区間で形成される交互砂州は通水20分後に砂州長 L_s は75～100(cm)の最頻値が85(cm)程

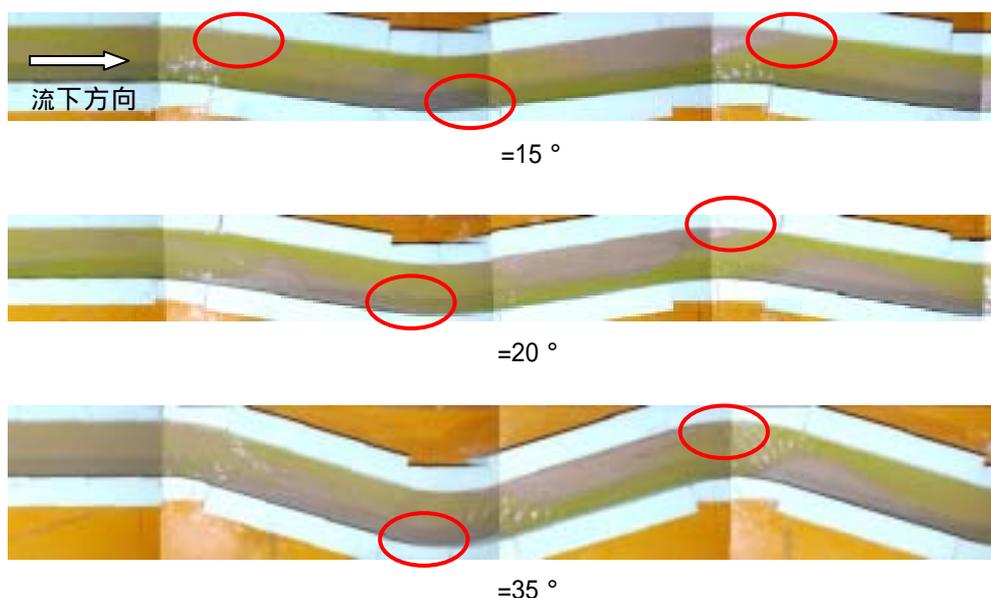


写真-2 移動床実験 ($L/B=5$ ， $L=100\text{cm}$ ， $B=20\text{cm}$)

度まで、砂州波高 Z_s は $Z_s=1.0\sim 1.5(\text{cm})$ の最頻値が $1.2(\text{cm})$ 程度まで発達し、通水30分を過ぎると $100(\text{cm})$ 以上の砂州長 L_s の割合が高くなる。通水直後の蛇行区間は外岸やや下流部が水衝部となって洗掘が始まり、下流の水衝部とを砂州前縁で結ぶ砂州が交互に形成される。蛇行角が大きいほど水衝部の洗掘深が大きく、明瞭な砂州へと発達していく。写真-2は蛇行角 $\theta=15^\circ, 20^\circ, 35^\circ$ の通水1時間後の様子である。 $\theta=15^\circ$ の場合は砂州前縁先端(丸印部分)が蛇行水路頂部を通過して下流に位置している。それに対し、蛇行角が 20° より大きくなると、ほぼ蛇行頂部に先端が止まることが実験から観察された。ただし、砂州先端が常に止まるのではなく、前後に若干移動はするものの、大きく下流に移動していくことはなかった。このように、木下・三輪と同様に砂州の移動・停止を実験で再現することができた。

次に、数値シミュレーションによって砂州の移動・停止条件を検証する。図-2は実験と同じ水理条件を与えて計算した結果で、通水30分後から40分後の河床変動である。蛇行角 $\theta=10^\circ, 15^\circ$ までは、砂州先端が蛇行頂部を通過し、 $\theta=20^\circ$ 以上では砂州先端が頂部に止まる様子がわかる。この様に数値シミュレーションでも砂州の移動・停止を判断することができる。同様にして蛇行半波長 L と水路幅 B の比 L/B を変えて計算した結果を、木下・三輪の砂州の移動停止条件の図に加筆したのが図-3である。数値シミュレーションによる検討結果も実験結果をほぼ再現していることがわかる。

なお、実験結果とシミュレーションの比較のために、図-1の横断面 ~ について蛇行角 $\theta=15^\circ, 20^\circ, 35^\circ$ について通水1時間後の横断河床高を比較したのが図-4である。蛇行角 $\theta=15^\circ$ の場合は断面の蛇行部中間付近は砂州の移動が活発で、実験と計算では逆位相の河床高を示しているが、これ以外は概ね実験と計算の対応は良好である。

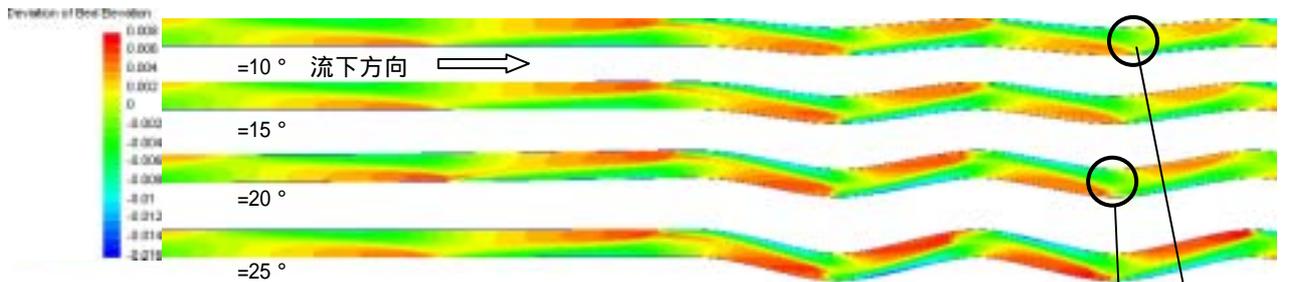


図-2a 移動床の河床変動計算 ($L/B=5, L=100\text{cm}, B=20\text{cm}$, 通水30分後)

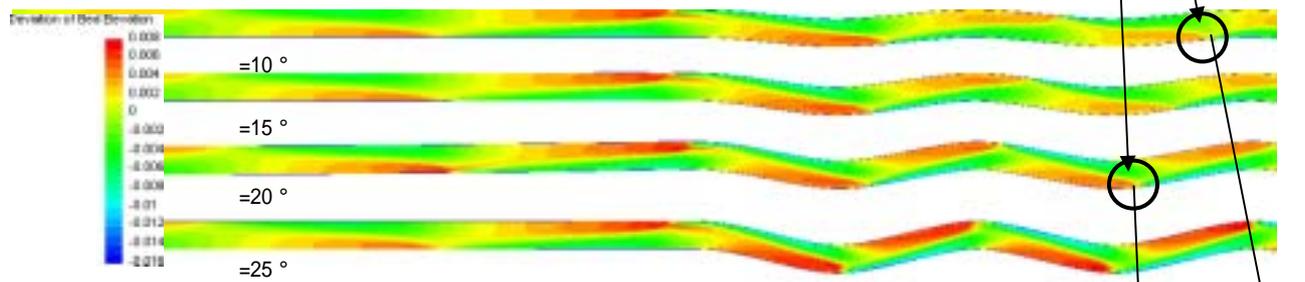


図-2b 移動床の河床変動計算 ($L/B=5, L=100\text{cm}, B=20\text{cm}$, 通水35分後)

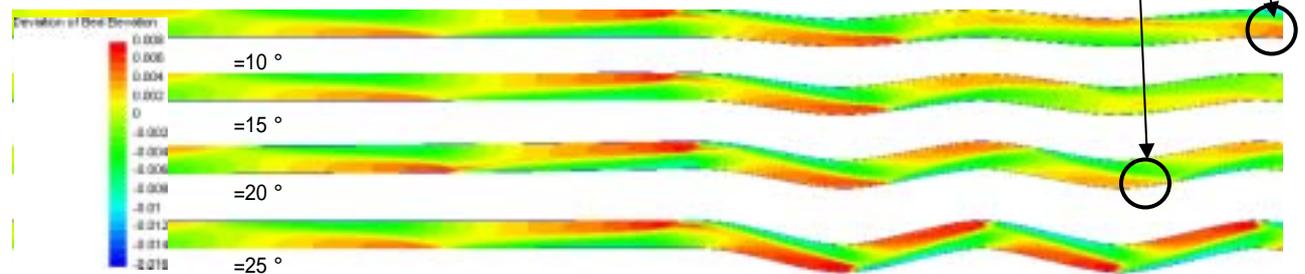


図-2c 移動床の河床変動計算 ($L/B=5, L=100\text{cm}, B=20\text{cm}$, 通水40分後)

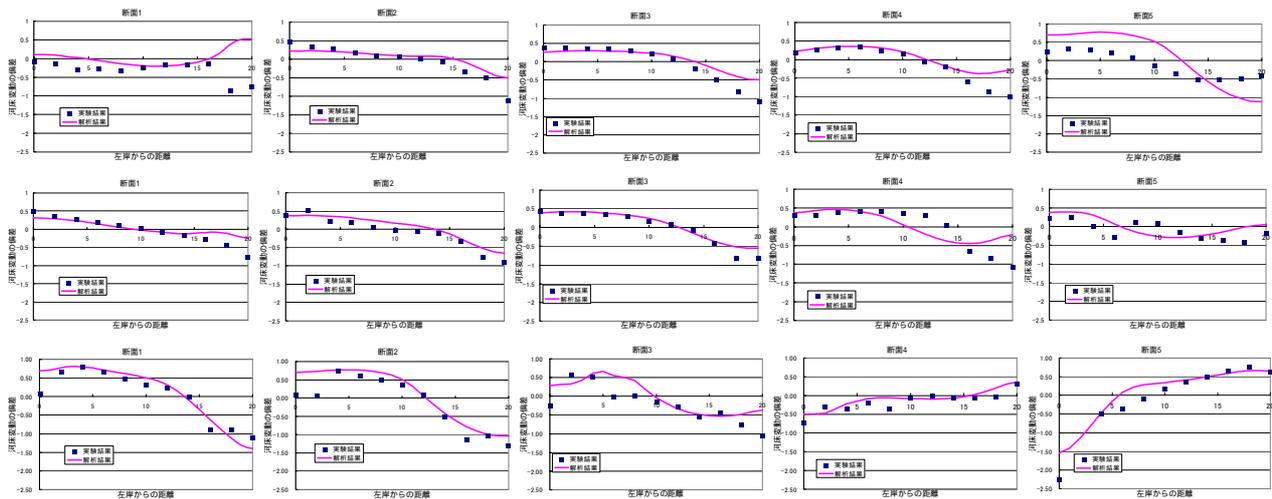


図-4 湾曲部の横断河床高の実験とシミュレーションの比較 ($L/B=5$, $L=100\text{cm}$, $B=20\text{cm}$)

(2) 固定床実験

固定床実験は岩床河川を想定した実験で、上流から供給される砂礫を岩床河川区間にどのようにして堆積させて、砂州を形成させるかを検討するものである。岩床河川といっても基岩が露出して滑らかな河床面の場合には、流れがある場合に砂礫は停止し難い。そこで、今回は河床面に供給砂礫と同じ砂礫を河床に貼り付けた固定河床を対象に実験を行った。改修工事による河床掘削では、河床面は滑らかに仕上げることはなく、ガタガタな掘削面に砂礫が入り込んだ状態が初期状態と考えたからである。この固定河床面の設定の仕方によって、砂礫の停止・堆積状況は影響されるので、今後の検討課題としたい。なお、今回の固定床は横断方向に一定な平坦な河床面である。

また、固定床実験では上流から供給する砂礫の量によって、固定床の堆積状況が変わってくる。移動床実験で流量 $Q=0.7(\text{l/s})$ を通水した時の流砂量($q_B=65.3\text{g/min}$)を基準に、0.5倍の場合、1倍の場合、2倍の場合の予備実験を行って砂礫の堆積状況を調べたところ、給砂量が少ない場合は堆積する砂の量が少なく、砂礫の停止・堆積状況が確認し難かったので、本実験では給砂量を流砂量の2倍与えた場合の堆積状況を観察した。

写真-3は $L/B=5$ の蛇行水路に $Q=0.7(\text{l/s})$ を1時間通水したときの固定河床に堆積した砂礫の状況を示している。蛇行角 $\theta=15^\circ$ の場合は蛇行区間に砂礫の堆積は見られなかった。 $\theta=20^\circ$ の場合は蛇行部外岸側頂部のやや上流部(丸印部分)に堆積が見られる。このときの流れの主流は移動床と同じく蛇行頂部のやや下流の水衝部を交互に伝って流下しており、堆積部はその上流に位置している。さらに蛇行角が大きくなると内岸の下流部分にも堆積がみられ、内岸の下流部から外岸へ至る側壁近傍に堆積が広がっている。一般的な移動床の蛇行水路では砂礫が堆積するのは内岸側で、寄洲として知られている。今回の固定床実験は河床面が横断方向に一定な平坦河床であるので、外岸側の河床が低下する代わりに水深が深くなったことで、流速が低下して外岸側壁付近の掃流力が低下していることが考えられる。

そこで固定床を対象に2次元浅水流解析(RIC-Naysを利用)を行った結果が図-5である。蛇行角 $\theta=35^\circ$ の場合の流速分布、水深と無次元掃流力の空間分布から、流れの主流は内岸側の壁面に沿って流下し、

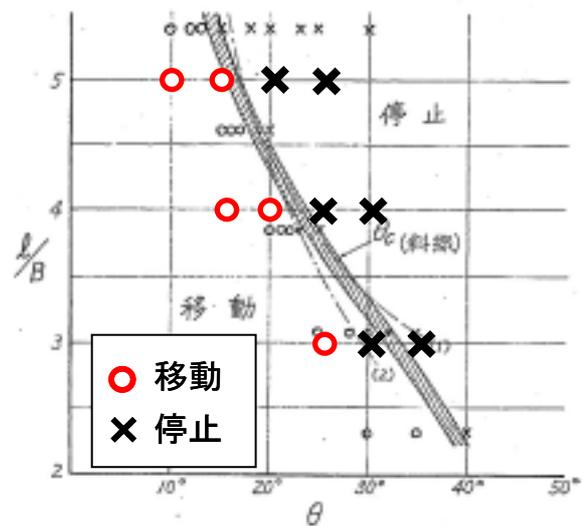


図-3 砂州の移動停止条件
(木下・三輪⁴⁾の図-4に加筆)

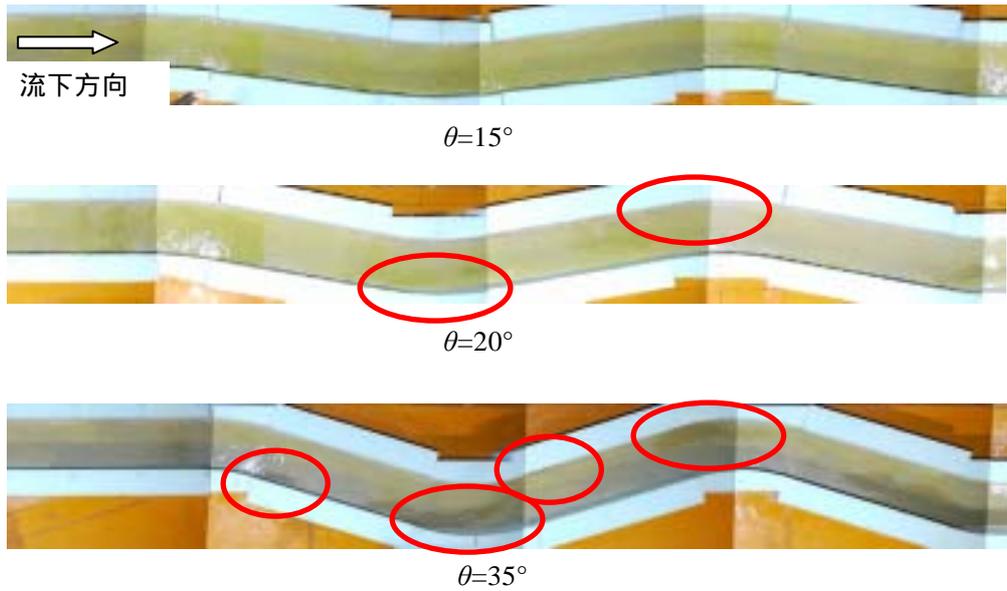


写真-3 固定床実験 ($L/B=5$, $L=100\text{cm}$, $B=20\text{cm}$)

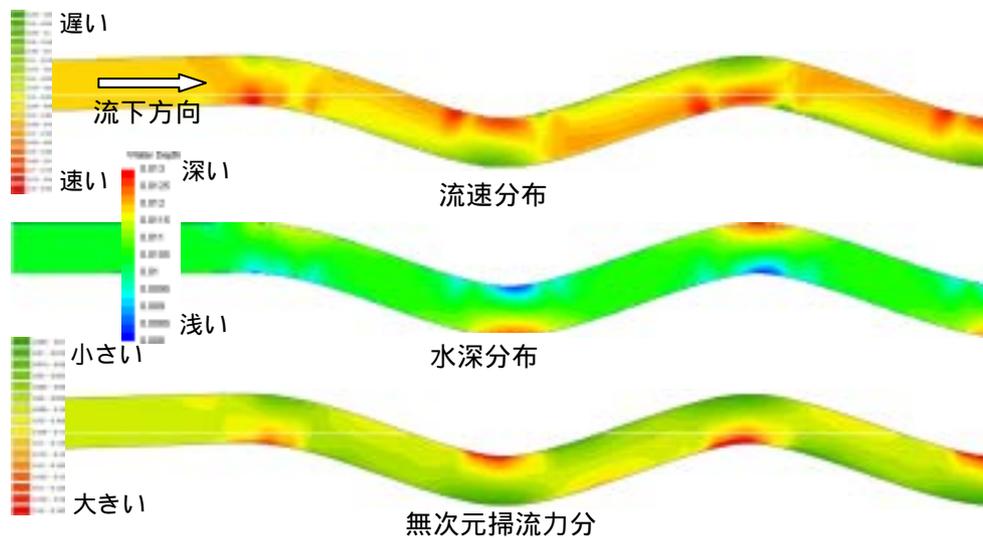


図-5 固定床の数値計算結果 ($L/B=5$, 蛇行角 $\theta=35$ 度の場合)

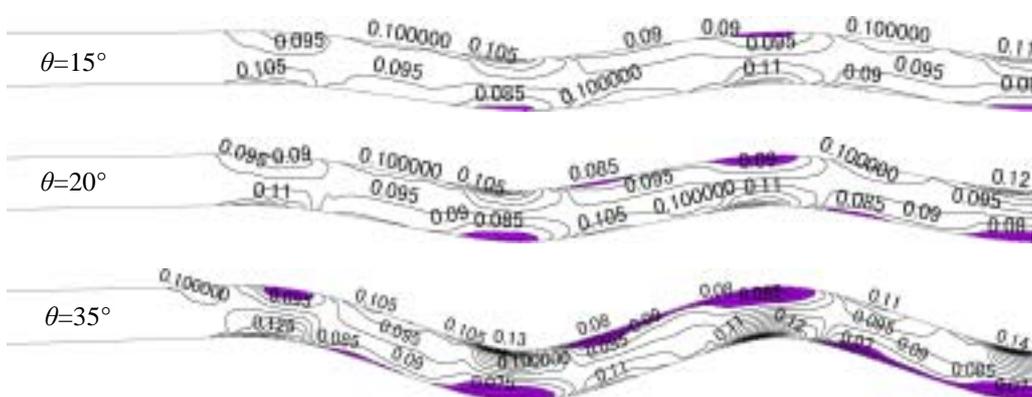


図-6 固定床における無次元掃流力の空間分布 ($L/B=5$)

対岸の頂部やや下流の水衝部を目がけて流れ、そこからまた内岸側の壁面に沿って流下している。対岸の頂部やや下流の水衝部を目がけて流れ、そこからまた内岸側の壁面に沿って流下している。水深

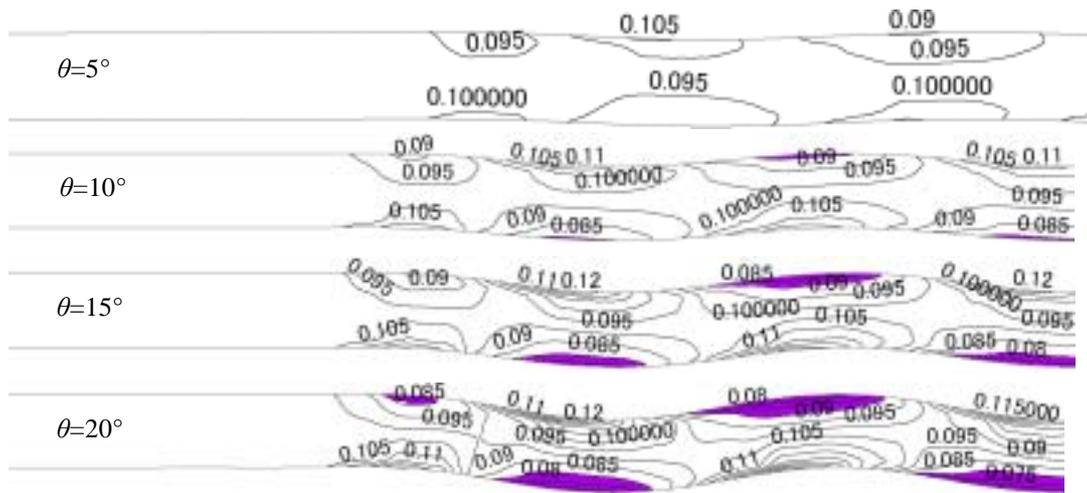


図-7a 固定床の砂礫堆積箇所 ($L/B=3, L=60\text{cm}$)

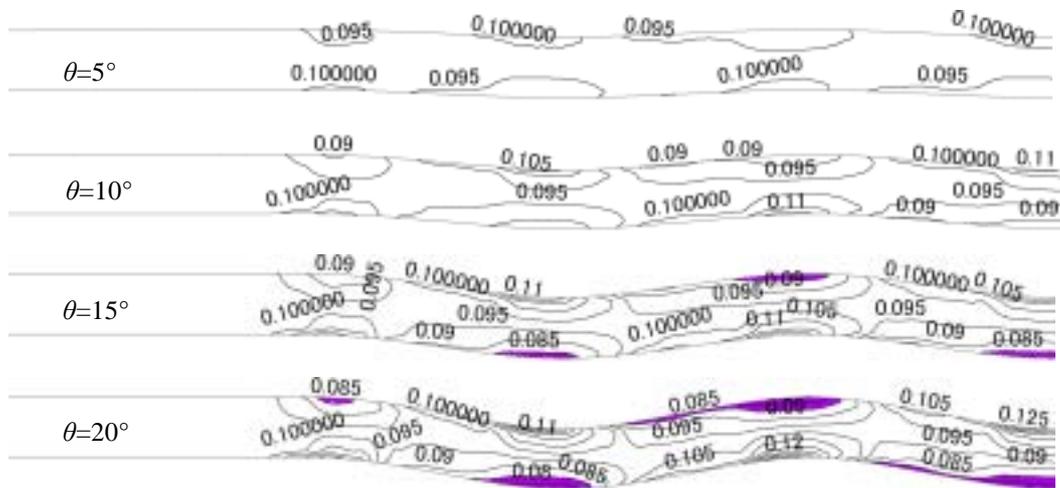


図-7b 固定床の砂礫堆積箇所 ($L/B=4, L=80\text{cm}$)

は外岸側が深く内岸は浅くなり、その結果、無次元掃流力は外岸側やや上流が最も小さくなっている。この無次元掃流力の空間分布は、前述の実験で砂礫が堆積した場所（写真-3）とほぼ一致している。この堆積するときの無次元掃流力の値は実験結果（写真-3）との比較から、 $\tau_* = 0.085$ 以下の部分を塗潰した無次元掃流力の空間分布図が図-6である。塗潰した場所が写真-3の堆積箇所と良く一致しているのがわかる。

したがって、上記の結果から砂が堆積する条件を $\tau_* = 0.085$ 以下と仮定し、他の L/B と θ の条件についても数値計算を行った結果が図-7である。蛇行半波長 L と水路幅 B の比 L/B が小さくなると、同じ蛇行角 θ でも堆積箇所（ $\tau_* = 0.085$ 以下の部分）は徐々に大きくなるようである。

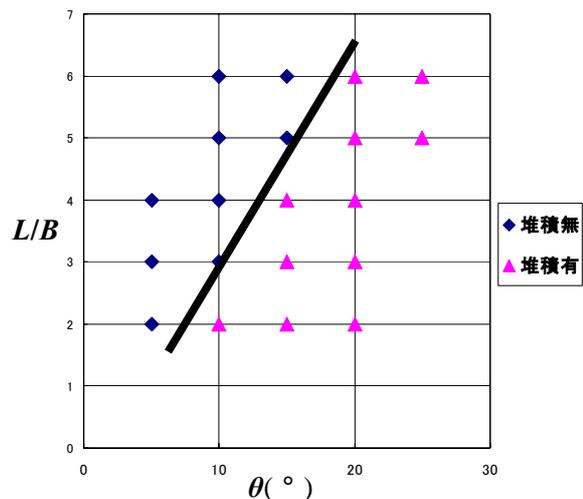


図-8 固定床蛇行水路における砂礫の停止・堆積条件

以上、砂が堆積する条件を L/B と θ で整理すると図-8の関係が得られた。この図から蛇行角 θ が一定とした場合は、蛇行半波長 L を長くするに従い砂礫は堆積し難くなり、 L/B を一定とした場合は、蛇行角 θ が大きい程堆積しやすくなることがわかる。しかしながら、この砂礫の堆積条件は数値計算から得られた無次元掃流力 τ_* を指標として判別されたものであり、その妥当性は実験結果と比較する必要があるが、現在実験結果の整理中であり、別の機会に発表する予定である。

4. 実際河川への適用

本研究は、岩床河川において瀬と淵を再生するために必要な砂州をどのように形成させるかをテーマに取り組んだもので、河道を蛇行させることで流下してきた砂礫を蛇行部に堆積させる試みである。上述したように、限られた条件の中ではあるが、水路蛇行区間に砂礫を堆積させることができ、流量が減水・低下することによって、さらに砂礫が堆積しやすくなることが想定できる。

今回の結果は、写真-1に示す網走川上流区間の河川改修による岩床河川の蛇行部において、実験結果と同じく内岸から外岸の側岸に沿って砂礫が堆積した場所に砂州が形成され易いことを裏付けている。この区間の河道掘削による河道改修も河道横断方向に一定の平坦な河床面であった。この様に河床が平坦であると、直線河道区間では砂礫の堆積が生じ難く、河床の部分的な掘削や水制工の工夫がされているものの、砂州形成、その結果の瀬や淵の再生は容易でない。したがって、河道改修による河道の直線化は砂州形成の観点から岩床河川にとってあまり好ましいとは言えず、できるだけ長い直線区間を作らずに、交互砂州の砂州長（水路幅 B の10倍前後）程度で曲線部を挿入するなどの工夫が必要である。

また、今回の検討では岩床河川の河床面を礫床河川の河床面のように左右岸に洗掘箇所を造成させたり、横断方向にも勾配を付けたりする効果については検証していないが、早川・宮本⁵⁾が調査している網走川上流区間の2008年河道改修工事では、蛇行区間の水衝部前面を淵として岩床河床面を掘下げる工夫が行われている。図-9は改修区間の平面図であり、5か所の蛇行部の蛇行角 θ は蛇行部 $\theta = 39.7^\circ$ 、 $\theta = 24.6^\circ$ 、 $\theta = 46.3^\circ$ 、 $\theta = 25.7^\circ$ 、 $\theta = 81.1^\circ$ といずれも 20° 以上である。蛇行部には左岸前面に淵が造成されており、流れの集中を写真-4に示す石組み



写真-4 蛇行部 左岸の石組み水制群

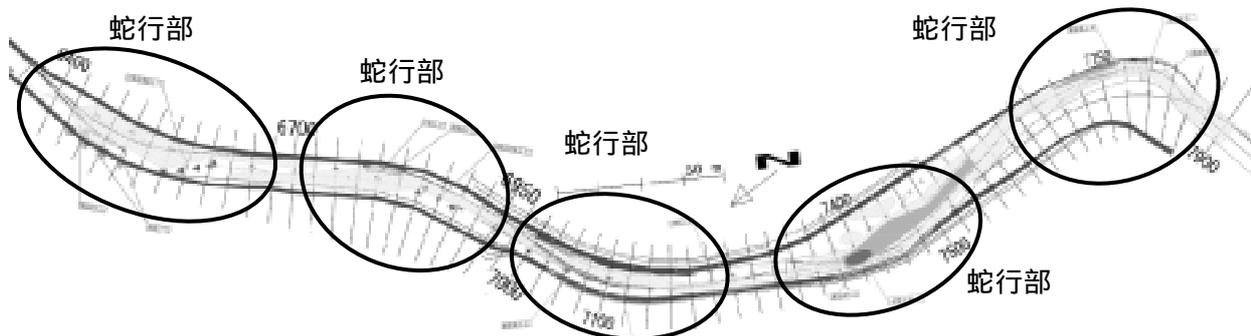


図-9 河道堆積状況の平面図⁵⁾ (SP6400~SP7900区間)

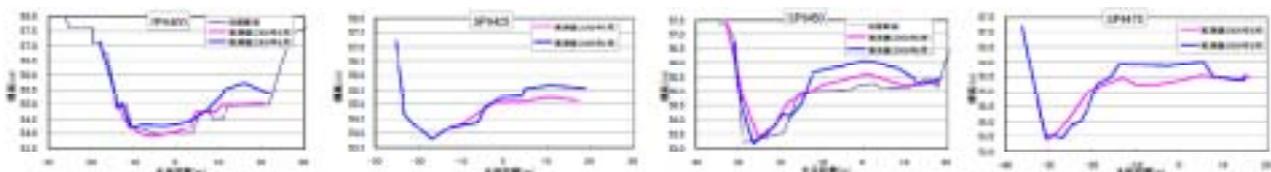


図-10 蛇行部 (左岸に淵造成)の河道横断図

水制で分散させる構造になっている。この区間の横断面図が図-10であり、淵が造成された2007年から2008年、2009年の経年変化を示している。淵部分への砂礫の堆積はそれほど顕著ではないが、淵と右岸との間の砂州部分は年々堆積傾向にあり、1年間で約50(cm)も堆積している部分もみられる。

この様に岩床河川の河道線形に合わせて河床面に淵相当の深掘れ部を造成することで、対岸の砂州の堆積を促す効果が確認できた。この区間の堆積速度は礫床河川と比べるとやや過大傾向にあるが、河床掘削の際に横断方向に平坦な河床にするのではなく、部分的な深掘れや河床に横勾配を与えることによって、それらを契機として形成される砂州は礫床河川と同様に発達するものと推察される。

参考文献

- 1) 国土交通省多自然型川づくりレビュー委員会：多自然型川づくりへの展開，2006。
- 2) 国土交通省：第19回河川分科会（平成18年3月31日）参考資料5-1「網走川水系の流域および河川の概要(案)」，2006。
- 3) 三輪式：実際河川における砂レキ堆の移動と安定の限界角度，昭和49年農業土木学会講演会前刷，1974。
- 4) 木下良作・三輪式：砂レキ堆の位置が安定する流路形状，新砂防，vol.94，pp.12-17，1974。
- 5) 早川博・宮本大：岩床河川における瀬と淵の再生に関する研究，河川技術論文集，第15巻，pp.219-224，2009。
- 6) 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。
- 7) RIC-Nays：(財)北海道河川防災研究センター，<http://www.i-ric.org/nays/ja/index.html>，2010。
- 8) 清家拓哉・渡邊康玄・井上卓也：軟岸河床の洗掘機構の解明，土木学会北海道支部論文報告集，第66号，B-6，2010。