

覆礫厚が薄い条件における 露岩部の拡大特性に関する実験的研究

矢野 雅昭¹・渡邊 康玄²・井上 卓也³・山口 里実³・新目 竜一¹

¹正会員 寒地土木研究所 水環境保全チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号)

E-mail:98283@ceri.go.jp

²正会員 北見工業大学教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165)

³正会員 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号)

過去に著者らが確認した覆礫厚が薄く(砂州波高の半分の厚さ)、固定床が平滑な条件での露岩部の伸長現象をより詳細に把握するため、水理実験を行った。通水時間を著者らによる既往研究よりも長くしたケースでは、著者らによる既往研究と同様に、水路中・上流側で砂州前縁部の露岩部が伸長し、下流側においては短縮することを確認した。さらにその後の通水では、水路上流端で新たに発生した砂州の前縁部の露岩部が伸長し、直下流部の伸長していた露岩部(砂州)が短縮した。このことから、覆礫厚が薄く、固定床上が平滑な条件での露岩部(砂州)の挙動の特徴として、露岩部(砂州)の延長が安定しないことが明らかとなった。また、水路底板に粗度付したケースでは、水路底板が平滑なケースと比べ、露岩部の伸長が低減されたが、交互砂州状に発生した露岩部の総延長は変わらず、露出率の低減は少なかった。

Key Words: *bedrock exposure, bedrock cover thickness, bedrock roughness, alternate bar*

1. はじめに

河川の中・上流域において、河床低下による岩河床の露出が生じており¹⁾、礫床に依存する底生魚の生息環境や、サケ科魚類の産卵環境に悪影響を与えている。

給砂量の減少や掃流力の増加といった河床低下の原因を解決したとしても、露出した岩河床の粗度が低い場合、礫の限界掃流力が下がるため、再び礫床に復元することは非常に困難となる²⁾。そのため、露岩河床の対策として、覆礫による対策が行われている¹⁾。

著者らは過去に移動床水理実験により、岩盤上の河床材料の厚さ(以降、覆礫厚)が、砂州波高の半分程度で、その下の岩盤が平滑な場合、砂州形成後に水路上流側から徐々に砂州とその前縁部の露岩部が伸長して拡大し、水路下流側では短縮して縮小することを確認した³⁾。このように、覆礫厚が薄い条件での露岩拡大の現象は複雑であり、河川管理に資するためには、より詳細な現象解明が必要となっている。一方、Nelson and Seminara⁴⁾は固定床上の砂州状地形を対象とした線形安定解析により、固定床の粗度が砂州の波長に影響することを指摘している。しかし、水理実験などによる検証は行われていない。

本研究は、水理実験により覆礫厚が砂州波高の 1/2 程度と薄い条件において、砂州前縁部に形成される露岩部

の長時間にわたる変化特性を把握するとともに、さらに岩河床の粗度が露岩部の拡大に及ぼす影響を把握することを目的とするものである。

2. 方法

(1) 実験水路

実験水路は、延長 43m、幅 0.9m、勾配 1/200 のものを用いた。覆礫には粒径 0.77mm の河床材料を用いた。なお、この河床材料の粒径から算出されるマニング粗度は、Manning-Stricker 式⁵⁾の粗度 k_s に粒径の 2 倍を代入した場合、0.014 となる。

(2) 実験ケース

実験ケースを表-1 に示す。ケース 02-20h の覆礫厚は、あらかじめ実験により確認した同一の水理条件で形成される砂州波高の 1/2 程度であり、覆礫の下に岩盤床を想定した平滑な塩ビ製の水路底板を敷いた条件である。なお、この水路底板のマニング粗度は、0.01 であることを把握している³⁾。通水流量は $0.005\text{m}^3/\text{s}$ とし、通水時間は 20 時間とした。ケース 02-rough は、通水時間が 10 時間であり、水路底板に覆礫材料と同じ珪砂を張り付け、覆礫面に近い粗度としたものである。なお、この珪砂を張

り付けた状態の水路底板のマニング粗度は、0.012であることを確認している。水路底板の色は、露岩部の判別が容易となるように両ケースとも緑色とした。これらのケースの単位幅給砂量は、過去の著者らによる実験時に確認した水路下流端の単位幅流砂量と概ね同量の平衡条件である $0.0247\text{cm}^2/\text{s}$ とした³⁾。本稿では、表-1に示す、過去に著者らが行った実験³⁾である覆礫厚を十分発達した砂州波高程度の4cmとしたケース04の結果と合わせて検討を行っていく。なお、このケース04では、砂州前縁部の露出部に伸長が生じてない³⁾。これらの実験に用いた水理条件は、交互砂州の発生区分⁹⁾によると、交互砂州と複列砂州の発生領域の境界付近となる。この条件は、覆礫による露岩河床対策とともに、低水路の拡幅が行われた石狩川上流⁹⁾を想定したものである。

(3) 計測

a) 露出率の把握

通水中に砂州形成による底板の露出箇所（以降、露出部）の変化を、高さ2mの架台にデジタルカメラを鉛直下向きに設置し、これを移動させながら、縦断間隔2m毎に水路全延長を30分間隔で撮影した。なお、水路全延長の1回あたりの撮影は10分以内で完了している。

水路下流端から1~39m上流の区間を対象に、撮影した写真から30分毎の露出部の面積を算出した。算出にあたっては、図-1に示すように、CADにより露出部の範囲をポリゴン化し、面積を計測した。各ケースの各時間における露出面積の合計値を、対象区間の面積で割った値を算出し、露出率とした。また、図-1に示すとおり、露出部の下流端と上流端を、それぞれ「露出先端」、

b) 露出先端・末端の移動速度および露出部延長の把握

通水中に撮影した写真から、各ケースの露出先端・末端の移動速度の平均値と標準偏差を算出した。また、各ケースにおいて、水路内に発生した個々の露出部の延長を求め、それらの各時間の平均値と標準偏差を算出した。なお、各時間に水路上下流端3m以内の範囲（水路幅の3倍程度）に入った砂州は除いている。これは、水路端部の流況の影響を受けていると考えられるためである。

c) PIV解析

PIV (Particle Image Velocimetry) 解析のため、通水中に水路下流端から12.5~17.5mの延長5mの範囲を、高さ2mの位置に鉛直下向きに設置した2台のビデオカメラにより撮影を行った。ビデオカメラは動画で614万画素のものをを用い、トレーサ散布は、撮影区間の直上流から30分間隔で行った。PIV解析は「イメージトラッカー (PIV)」(株式会社 デジモ)を用いた。流速ベクトルは5cm×5cmメッシュで算出し、解析時間は10秒、解析画像の時間差は1/30秒とし、300回の解析の平均値を

表-1 実験条件

ケース	河床材料厚	通水時間	底板粗度	単位幅給砂量
ケース02-20h	2cm	20:00	0.01	平衡給砂量 $0.0247\text{cm}^2/\text{s}$
ケース02-rough	2cm	10:00	0.012	平衡給砂量 $0.0247\text{cm}^2/\text{s}$
ケース04※	4cm	10:00	0.01	平衡給砂量 $0.0247\text{cm}^2/\text{s}$

※著者らが過去に行った実験³⁾

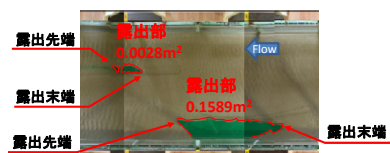


図-1 露出部ポリゴン化の例と露出部の先端、末端の名称

用いた。なお、このビデオカメラによる撮影区間は、前述したデジタルカメラ撮影が行えないため、ビデオカメラの静止画をカメラ撮影写真の代替えとした。

3. 結果

(1) 露出部の変化の様子

露出部の時間変化を把握するため、通水中に上空から撮影した写真の露出の有無を2色化したものを図-2に示す。白い部分は覆礫に水路底板が覆われている部分であり、黒い部分は水路底板が露出している部分である。なお、実験中における目視観察から、各ケースの露出部は、主に砂州前縁部に沿って形成される洗掘部分であった。ケース02-20hにおいては、通水開始12時間頃まで、水路中・上流部に位置する露出部4-1、5~7が上流側から伸長し、水路下流部の露出部12-1、13においては短縮し、消失している。また、露出部12-1は、その後、露出12-2として再度現れている。この露出部の変化の傾向は、著者らが過去に行った実験³⁾と同様の傾向である。一方で、本実験ではその後の通水により、水路上流端に新たな砂州が発生し、その砂州前縁部の露出部1~3が上流から徐々に伸長しながら流下した。そして、露出部1~3の直下流部の露出部4-1、5、6には短縮が生じた。また、露出部4-1は一度消失するが、その後、露出部4-2として再度現れている。なお、露出部4-1は通水開始5~10時間の時点で複数の露出部をまとめたものとする。これは、これらの露出部が同一の砂州前縁部に位置し、通水開始11時間から一つの露出部となっているためである。ケース02-roughでは、水路中・上流部に位置する露出部4、5が、やや伸長し、水路下流部の露出部8で短縮している。しかし、ケース02-20hの通水開始10時間までの状況と比べると露出部の伸長が小さい。ケース04においても、砂州前縁部に露出部が確認されるが、伸長せずに砂州とともに流下している。砂州前縁部の深掘れ部で生じている、これらのケースの露岩部の伸長・

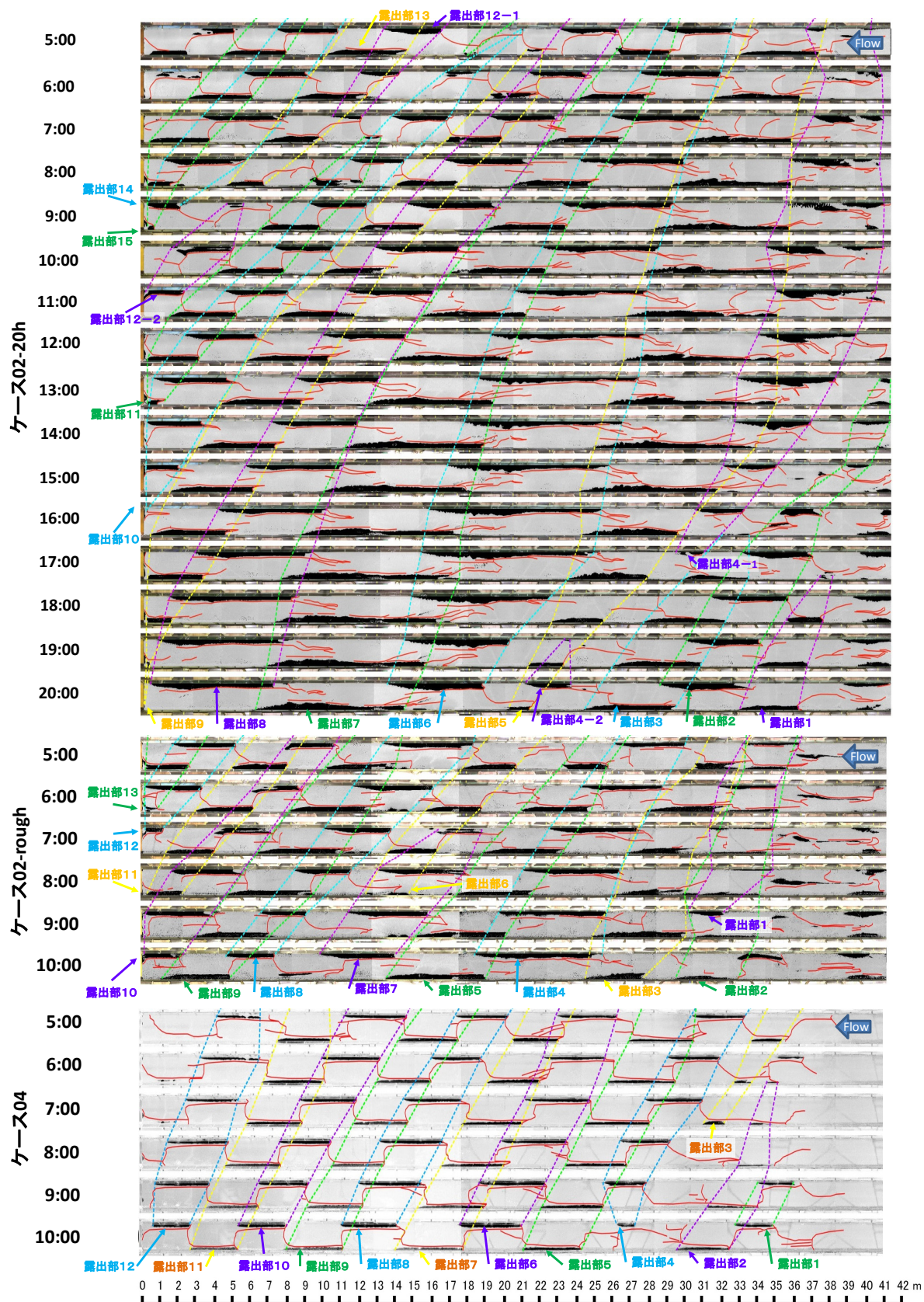


図-2 露出先端・末端の移動状況

※横断方向のスケールは 1.5 倍に拡大している。黒色部は露出部、赤線は写真で線状に判読できる河床の局所的な起伏を表している。点線の各色は個々の露出部の露出先端・末端を表している。

短縮は、砂州自体の伸長・短縮をともない生じていることが特徴的である。砂州前縁部の露出部の幅については、ケース 02-20h およびケース 02-rough が同程度であるのに

対し、ケース 04 ではそれよりも狭くなっている。

図-3 左に各ケースの砂州が形成された通水開始 5 時間以降の露出先端・末端の移動速度の平均値と標準偏差

を示す。なお、ケース 02-20h は、通水開始 12 時間までと、それ以降で変化の傾向が異なるため、これらを分けて算出している。ケース 02-20h (5-12h) の露出先端・末端の移動速度は、それぞれ 1.8m/h, 1.3m/h であり、露出先端の移動速度が露出末端よりも速いことにより、露出部が伸長している。ケース 02-20h (13-20h) の露出先端・末端の移動速度は、それぞれ 1.1m/h, 1.2m/h であり、ほぼ同程度の速度となっている。これは、新たな露出部 1~3 が伸長し、露出部 4,1,5,6 で短縮したため、相殺されたものである。図-3 右にケース 02-20h を伸長と短縮で細分化し集計したものを示す。なお、通水開始 5~12 時間の露出部 14 については、水路下流端から 3m の範囲に移動するまでの時間において、伸長・短縮が明確ではないため、除いている。また、通水開始 13~20h の伸長している露出部については、上流で新たに発生した露出部 1~3 と、通水開始から伸長している露出部 7, 8 とを分けている。伸長している露出部に着目すると、通水開始 5~12 時間の露出部 4-1~11 および通水開始 13~20 時間の露出部 1~3 は、先端と末端の移動速度の差が大きいのに対し、通水開始 13~20h の露出部 7, 8 ではその差が小さい。また、露出部 1~3 の先端の移動速度 1.7m/h は、水路下流部に位置する露出 7, 8 の末端の移動速度 0.8m/h の約倍となっている。通水開始 5~12 時間の露出部 12-1, 13 および通水開始 13~20 時間の露出部 4-1, 5, 6 の短縮している露出部は、末端の移動速度が先端よりも速いことで短縮している。図-3 左に示すケース 02-rough の露出先端・末端の移動速度は、それぞれ 1.5m/h, 1.3m/h であり、露出先端は末端よりも移動速度が速く、露出部は伸長するが、これらの差はケース 02-20h よりも小さい。また、ケース 02-rough の露出末端の移動速度はケース 02-20h と同程度なのに対し、露出先端では遅くなっている。

図-4 に各ケースの露出部延長の時間変化を示す。ケース 02-20h では、通水開始 5 時間から露出部の平均延長が伸長し、14 時間で 6.8m と最大になったが、その後短縮し、通水終了時には 4.6m となった。ケース 02-rough は通水開始 5~10 時間にかけて、露出部の平均延長が緩やかに伸長し、通水終了時には 4.3m となった。ケース 02-rough の方がケース 02-20h よりも、露出部の平均延長の増加が緩やかとなっている。ケース 04 は、通水開始 5 時間から露出部の平均延長が 2.8m 付近で安定して推移している。

(2) 露出率の変化

通水中の水路底板の露出率の変化を図-5 に示す。ケース 02-20h では、通水開始 7 時間頃から 15% 付近で推移し、通水終了時では 14.5% であった。ケース 02-rough では、通水開始 6 時間から 14% 付近でほぼ横ばいの変化と

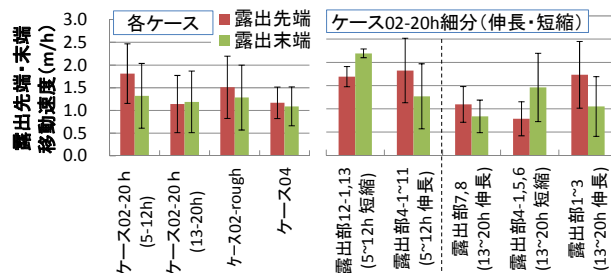


図-3 砂州および露出部先端・末端の砂州移動速度
(左：各ケース、右：ケース 02-20h の細分(伸長・短縮))

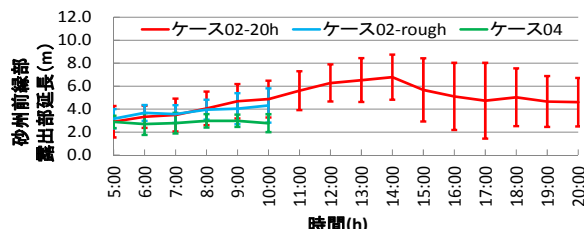


図-4 露出部の平均延長の時間変化

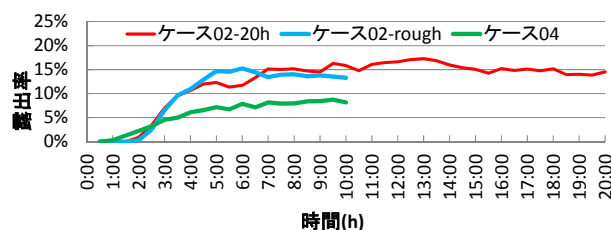


図-5 露出率の時間変化

なり、通水終了時には 13.3% となった。ケース 02-rough の露出率は、ケース 02-20h より露出部の伸長が小さかったにもかかわらず、ケース 02-20h と同程度となっている。ケース 04 では、通水開始 5 時間で 7% であり、その後、緩やかに上昇し、通水終了時には 8% であり、ケース 02-20h およびケース 02-rough より小さな値である。

(3) PIV解析結果

図-6 にケース 02-20h およびケース 02-rough の PIV 解析による表面流速分布を示す。ケース 02-rough については、通水開始 8~10 時間の様子を示している。ケース 02-20h については、通水開始 8~10 時間と、さらに露出部の延長が最大となった通水開始 14 時間(図-4) および通水開始 20 時間の結果も示している。なお、PIV 解析範囲内の露出部の位置を黒線で示している。両ケースとも、露出先端付近から対岸下流の露出部に主流部が流れ込んでいるが、その位置は、露出末端から離れ、その下流の露出先端か、露出部の中間付近である。これは過去に著者らが確認した実験結果³⁾と同様の傾向である。また、対岸上流の露出部から主流部が流れ込んだ露出部の位置で、0.5m/s 以上の流速が確認できる。ケース 02-20h では通水開始 14 時間や通水開始 20 時間などで、流速 0.6m/s 以上の個所がやや纏まって確認できるが、2 つのケースに顕著な流速差はない。

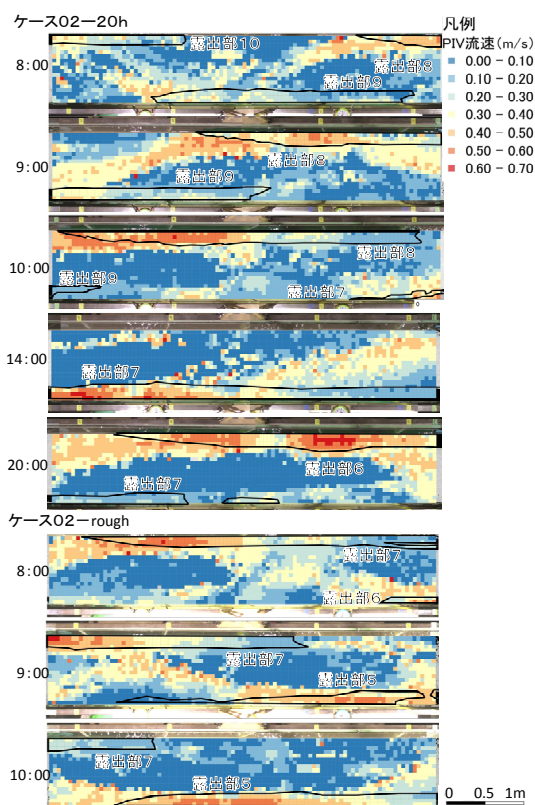


図-6 PIV解析結果(上: ケース02-20h, 下: ケース02-rough)

4. 考察

(1) 長時間の通水による砂州とその露出部の変化

本実験においては、露出部が砂州前縁部に生じていることが確認され、露出部と砂州の挙動が密接に関係していることが明らかとなったため、これらを合わせて考察することとする。ケース 02-20h では、砂州前縁部の露出部延長が通水開始 14 時間まで伸長し、平均延長が 6.8m となったが、その後短縮に転じ、通水開始 20 時間では 4.6m となった(図-4)。この時に露出部の短縮が顕著であったのは、露出部 4-1, 5, 6 であるが、この直上流部には、新たに発生し、伸長していた露出部 1-3 が位置していた(図-2)。高畑・泉⁷⁾は給砂量が過剰な状態になると、砂州波長が減少することを指摘している。露出部をとめない一連で伸長する複数の砂州の直下流では、給砂量が過剰な状態になると考えられ、このことが砂州とその露出部の短縮に影響したと考えられる。

露出部 4-1, 5, 6 の短縮に影響した、新たな砂州の露出部 1-3 の先端の移動速度は、通水開始から伸長していた砂州の露出部 7, 8 の末端の約倍であった(図-3)。そのため、上流から新たに伸長する砂州とその露出部は、下流の砂州に追いつき、砂州とその露出部に短縮を生じさせる。そのため、覆礫厚が十分ではなく、固定床の粗度が小さい条件での砂州とその露出部の伸長現象の特徴として、伸長した砂州とその露岩部であっても、上流での新たな砂州とその露岩部の発生・伸長が影響し、短縮が

生じるため、砂州とその露出部の延長が定常状態にならない、もしくは、なりにくいことが挙げられる。なお、短縮した砂州とその露出部の、その後の挙動については、本実験では明確ではない。しかし、ケース 02-20h の露出部 12-1 や露出部 4-1 が一度消失し、その後再度、露出部 12-2 や露出部 4-2 として現れたことから、短縮の原因となった直上流の砂州とその露出部の伸長が収まった時点で、短縮・消失したものでも再度現れて、砂州とその露出部が伸長する可能性も考えられる。

この砂州とその露出部の延長の変化は、露出先端・末端の移動速度の非平衡により生じているが(図-2, 3)、砂州の移動速度は流砂量の影響を受ける⁸⁾ことから、水路内で局所的に流砂量が非平衡になっていたことが考えられる。著者ら³⁾は、低粗度の露出部の影響により、交互砂州地形にともなう蛇行流の主流部の直進性が増し、対岸下流の砂州前縁部に流れ込む主流部の位置が下流側に移り、対岸下流の露出末端へ流砂が供給されずなることを考察した。本実験においても、PIV 解析により、露出先端から対岸下流の砂州に流れ込む主流部の位置は、露出末端ではなく、その下流の露出先端か、露出部の中間付近であることを確認しており(図-6)、同様の現象が起きていたと考えられる。流砂量が局所的に非平衡になる原因として、この露出部の影響による主流部の直進性の増大や、前述した砂州とその露出部の伸長による下流砂州への給砂量の過多が影響したと考えられる。

ケース 02-20h では、砂州とその露出部の延長が定常状態にならなかったにも関わらず、通水開始 7 時間以降、露出率が一定値であった。これは、例えば交互砂州の波長が短縮すると、波数が増加するため、砂州前縁部の露出部の総延長が変化しないためである。

(2) 岩河床粗度が露出部拡大に及ぼす影響

水路底板の粗度を増したケース 02-rough では、露出先端と末端の移動速度の差がケース 02-20h よりも小さく(図-3 左)、砂州とその露出部の伸長がケース 02-20h よりも顕著ではなかった(図-2, 4)。Nelson and Seminara⁴⁾は、線形安定解析により、固定床上の粗度 k_s が低い条件程、砂州波長が長くなることを指摘している。本実験においても、水路底板に粗度付されたケース 02-roughの方がケース 02-20h よりも砂州とその露出部の伸長が顕著ではなく、Nelson and Seminara⁴⁾の解析結果の傾向と一致した。この水路底板の粗度の増加が、砂州とその露出部の伸長を低減した原因として、ケース 02-rough ではケース 02-20h よりも、露出先端の移動速度が低減していることが挙げられる(図-3 左)。PIV 解析結果では、これらの 2 つのケースに表面流速の顕著な差は確認できない(図-6)。そのため、露出先端の移動速度が低減した原因として、粗度が大きくなり、限界掃流力が増した

ことで、露出部から排出される流砂量が減少したと考えられる。

水路底板に粗度付した条件のケース 02-rough において、砂州とその露出部の伸長が減少した一方で、露出率については大きな低減はなかった（図-5）。この原因は、ケース 02-rough では、個々の砂州とその露出部延長がケース 02-20h よりも短い（図-4）、砂州の波数が増加するため、交互砂州の前縁部に発生する露出部の総延長は大きく変わらないためである（図-2）。そのため、露出率を低減するには、覆礫厚を厚くし、ケース 04 の様に露出部の幅を狭くすることが有効と考えられる。

5. まとめ

本研究では、自由砂州条件下で、平滑な岩盤上の覆礫厚が砂州波高に対し薄い条件（砂州波高の 1/2）を想定した移動床水理実験を行い、以下の結果を得た。

①覆礫厚が十分ではなく、固定床の粗度が小さい場合、砂州とその前縁部の露出部が伸長する。ただし、上流で新たな砂州とその露出部の発生・伸長が生じた場合、一度伸長した砂州であっても短縮するため、砂州とその露出部の延長は定常状態とならない、もしくは、なりづらい。露出率は、交互砂州の前縁部の総延長が変化しないため、砂州とその露出部の伸長に関わらず一定であった。

②水路底板に粗度付した条件の実験では、水路底板が平滑な条件よりも砂州とその露出部の伸長が顕著では無く、既往研究による線形安定解析での指摘⁴⁾と一致した。水路底板の粗度が大きい条件では、露出先端の移動速度および砂州とその露出部の伸長が低減された。一方で、水

路底板の露出率については、露出部の総延長が大きく変化しないため、粗度の大小で顕著な差はなかった。そのため、露出率を低減するには、露出部の幅が狭くなるよう、覆礫厚を厚くすることが有効と考えられる。

謝辞：水理実験を実施して戴いた、パシフィックコンサルタンツ（株）および（株）水工リサーチに謝意を表す。

参考文献

- 1) 北海道開発局旭川開発建設部，河道管理ワーキング議 事 概 要 資 料 ，
http://www.as.hkd.mlit.go.jp/chisui04/ishikari_taisaku/index.html.
- 2) Inoue, T., Izumi, N., Shimizu, Y., and G. Parker : Interaction among alluvial cover, bed roughness and incision rate in purely bedrock and alluvial-bedrock channel, J. Geophys. Res., 2014.
- 3) 矢野雅昭，渡邊康玄，井上卓也，山口里実，平井康幸：岩床河川における覆礫厚が自由砂州形状に及ぼす影響，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.71, No.4, I_1003-I_1008, 2015,2.
- 4) Nelson, P. A., and Seminara, G.: A theoretical framework for the morphodynamics of bedrock channels, Geophys. Res. Lett., 2012.
- 5) 河村三郎：土砂水理学 1，森北出版，1982.
- 6) 土木学会 水理公式集. 社団法人 土木学会,1999.
- 7) 高畑知明・泉典洋：河床上昇・低下を伴う砂州の線形安定解析，水工学論文集，Vol.55, ppS865-870, 2011,2.
- 8) 芦田和男：洪水流の三次元流況と流路形態に関する研究，土木学会水理委員会「洪水流の三次元流況と流路形態」研究小委員会，1982.

(2016. 9. 30 受付)

THE EXPERIMENTAL STUDY ON THE BEDROCK EXPOSER EXPANSION UNDER THIN ALLUVIAL COVER THICKNESS CONDITION

Masaaki YANO, Yasuharu WATANABE, Takuya INOUE, Satomi YAMAGUCHI and Ryuichi SHINME

To understand more detailed phenomena from our previous study on bedrock exposers expansion under condition that bedrock is smooth and alluvial cover thickness is about half of bar height, flume experiments were conducted. In the case that bedrock was smooth and flow was maintained for longer hours than our previous study, the result showed that bedrock exposures along bar front were expanded to downstream on mid and upper side of flume and bedrock exposers along bar front were reduced on lower side of flume. This phenomenon was also confirmed by our previous study. Thereafter, new bars were developed on the upper end of flume and this new bars development caused exposing bedrock along bar front and these new bedrock exposers expanded to downstream. As this new bedrock exposers expanded to downstream side, expanded bedrock exposers on the immediate downstream of new bedrock exposers reduced. Thereby, as characteristics of bar wave lengths under condition that alluvial thickness is thin and bedrock is smooth, bar wave length is not stable. In another case that bedrock was as rough as alluvial cover materials, the results showed that bedrock expansion was reduced in comparison of the previous case. However, bedrock exposers rates were not notably different because total length of alternate bar is almost same between each case.