

土砂動態観測に基づいた交互砂州の形状・土砂移動特性と川幅水深比によるその違い

CHARACTERISTICS OF SEDIMENT LOAD AND SHAPE OF ALTERNATIVE BARS WITH DIFFERENT WIDTH-DEPTH RATIO BASED ON FIELD MEASUREMENT OF SEDIMENT LOAD

原田大輔¹・知花武佳²・日野将人³

Daisuke HARADA, Takeyoshi CHIBANA and Masato HINO

¹正会員 工博 東京大学大学院 工学系研究科 特任研究員 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²正会員 工博 東京大学大学院 工学系研究科 准教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

³学生会員 東京大学大学院 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

This study aims to clarify the relationships between the sediment load on the alternative bar and width-depth ratio of the bar. Four alternative bars in the Asa and Tone rivers were selected as field measurement sites. In each sites, several sticks and metal rings were installed to observe sediment load. In addition, 35 alternative bars from 7 rivers are investigated to check the relationships between bar morphology and width-depth ratio. As a result, at the area where dense vegetation are grown, the sediment load were less active. Thus, the width that determine the characteristics of alternative bar should be bare land and water surface areas. The width-depth ratio with bare land and water surface areas can represent the characteristics of sediment load on the bar and its shape, which was also confirmed by the two cases of experiments.

Key Words : *Alternative bars, gravel-bed river, width-depth ratio, flume experiment*

1. はじめに

交互砂州が形成されている河道では、その物理環境を決定づける最も重要な要素は出水時の川幅水深比であると考えられている¹⁾。川幅水深比に応じて砂州上の土砂移動特性が規定され、それが砂州の形状を決定づけ^{2),3)}、その形状に応じて早瀬、淵、河原などの生態系にとって重要な空間が創出される⁴⁾。すなわち、川幅水深比と砂州上の土砂移動特性、また砂州の形状とは本来一体的に議論されるべきであり、これらの関係について把握しておくことは、治水と環境の両面にとって重要である。

しかし実河川を対象にこれらの関係について調査した研究は少ない。また近年、各地の交互砂州の河原上で植生域が拡大しているが⁵⁾、植生域では冠水しても土砂が移動していない領域も多いため、そもそも砂州の特徴を決定づける川幅はどの範囲と考えるべきなのか、明確とはいえない。そこで本研究では、実河川の交互砂州を対象に行った土砂動態の観測結果を基に、水理実験の結果

を用いつつ、川幅水深比によって砂州上の土砂動態や砂州形状がどのように異なっているかについて明らかにする。

2. 交互砂州上の土砂動態の現地観測

(1) 現地調査の概要

現地観測の対象として、多摩川水系浅川の3地点(上流から順にA-1,A-2,A-3とする)と利根川水系利根川の1地点(T-1とする)を選定した(図-1参照)。浅川では過去の航空写真を閲覧すると1947年の時点で既に明瞭な交互砂州が形成されており、当時は滞筋の位置が頻繁に変化していたが、現在では比較的滞筋の位置が安定している。一方、利根川は浅川と比較して規模が大きい。調査対象とした八斗島観測所の周辺では少なくとも数十年の間砂州が移動せず安定して水位の観測が行われてきたにも関わらず、最近数年ほどで砂州が移動を開始したため、観測所が土砂で埋まるという問題が生じている。そのため

表-1 対象とした各地点の基本的な諸元（ピーク流量は水位から求めた暫定値を含む）

河川	地点名	平均年最大 流量(m ³ /s)	観測できた 杭の本数	出水日	出水ピーク 流量(m ³ /s)	代表粒径 D ₆₀ (mm)	D ₉₀ (mm)	勾配(1/)	B/H
浅川	A-1	422 (高幡橋、 37年間の 平均)	8	2014年10月6日(出水4)	266(浅川橋)	74	140	145	35
	A-2		9	2015年7月16日(出水5)	405	50	97	201	50
	A-3		6	2015年9月9日(出水6)	488				
			7	2013年9月15日(出水1)	232	45	92	226	60
			5	2013年10月6日(出水2)	232				
			8	2014年6月7日(出水3)	280				
			4	2014年10月6日(出水4)	387				
利根川	T-1	3000	5	2015年9月9日(出水6)	4206	49	93	462	134



図-1 浅川と利根川の対象地点の位置

出水中に様々な観測機器を用いて流況や土砂動態の観測が行われており、ここを対象地点とした。対象地点の基本的な諸元について表-1に示す。

対象とした各地点において、リング法によって出水時の砂州上の土砂動態を把握することとした⁶⁾。各砂州において、平面的に土砂動態の分布を得られるように、砂州上に満遍なく数本の杭（長さ1.2～1.5m）とリング（直径約6cm）を設置した。本研究におけるリング法概念図及び洗掘深と堆積深の定義について図-2に示す。また、杭の設置時には、設置した杭の付近で面積格子法により土砂の粒度分布についても調査した。各杭の付近に1.2m四方の方形枠を置き、その中で30cm間隔で25点の礫径を計測した。出水後には、各杭に設置したリングを探してその位置を記録した。なお、いくつかの杭は出水で流出したり、リングが紛失したりしたため、観測できた杭の本数は設置本数よりも少ない。観測できた杭の本数を表-1に示す。

(2) 裸地水面幅を基準とした川幅水深比について

各地点のリングを設置した場所、またリング法の結果について図-3に示す。冒頭で述べたように、砂州上では川幅水深比が土砂動態を規定しているため、図-3の結果

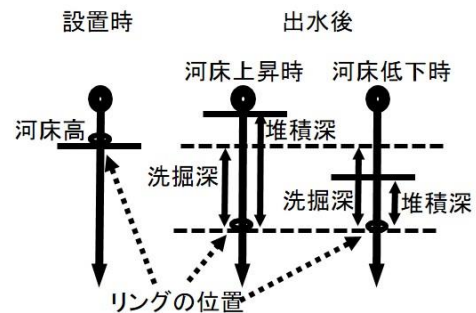


図-2 リング法の概念図

は川幅水深比と何らかの関係を持つと考えられる。ここで川幅について、A-1地点では植生が繁茂している部分に設置した杭③、⑦、⑧等ではわずかに細粒土砂の交換が生じているのみであった。またA-2、T-1においても、植生が繁茂している場所に設置した注意喚起や測量用の杭では、冠水はしても植生繁茂状況や地盤高がほとんど変化していなかった。

これらの結果から、平均年最大流量程度の規模の出水であれば、植生域では冠水しても土砂があまり移動していない。一方で、これまで砂州に関して行われてきた実験や解析は、川幅一杯に土砂が流れる状況を想定して行われてきた。そのため、土砂が移動して砂州の形状を決定づける意味での川幅として植生域を除外することで、川幅水深比と砂州上の土砂動態との関係について、実験や解析との関係がより明確になると考えた。そこで一旦、河原の植生域を除いた裸地と水面を合算した部分を川幅として検討を進めることにした。具体的には、砂州の半波長分の区間内において、裸地と水面を合わせた幅が最も狭い横断面と最も広い横断面を最新の航空写真から抽出し、2つの横断面の裸地水面幅の平均値をその地点の川幅 B とした。また、各地点の定期横断測量結果及び付近の観測所の平均年最大流量を調査し、その流量が作用した際の各地点の平均水深を等流計算から求め、これを水深 H とした。このようにして求めた各地点の B/H を表-1の最右列に示す。

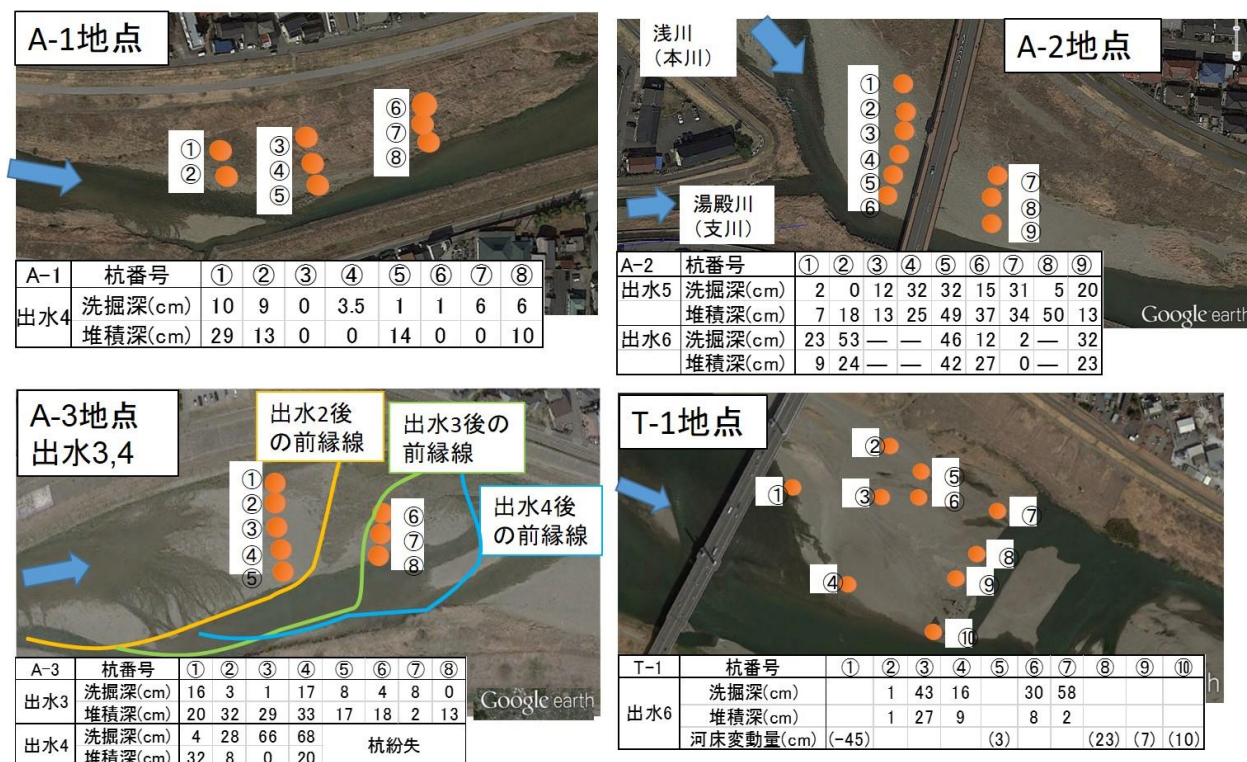


図-3 リング法の実施状況と各地点の結果

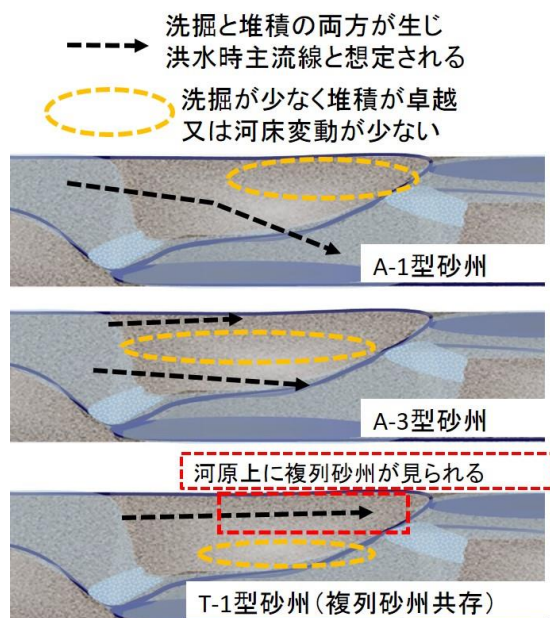


図-4 洗掘と堆積の傾向に関する模式図

(3) リング法の結果について

ここでは各砂州上の土砂動態について考察する。まずA-1地点はここ数年間砂州が移動しておらず、河原上の多くの部分で植生が繁茂している。洗掘と堆積が生じているのは杭①、②という河原の上流側で裸地となっている部分に集中しており、裸地と滞筋の部分のみで土砂が移動していることが分かる。

A-2地点は湾曲部に位置するため砂州の位置が固定されている。ここでは他の地点と比較してかなり深い部分まで土砂が交換されており、洪水時の主流線に相当する杭④、⑤付近で特に顕著である。ただし出水前後で河床高はあまり変化していない。

A-3地点では出水の度に砂州の前縁線が下流側へ向かい移動している。河原の中央部に位置する杭②、③、④では出水3の際、洗掘がほとんど生じていない一方、30cm程度ずつ厚く土砂が堆積している。また、出水3後の前縁線は左岸側が下流に向かってせり出すような形状をしているが、これは、杭②、③、④といった河原の中央部分を避けて、右岸側の滞筋に加えて杭①のような左岸側を主に土砂が通過しているためである。一方で出水4のピーク流量は出水3よりやや規模が大ききBHが小さくなったためか、河原の中央部分が下流に向かいせり出している。

T-1地点では多くの杭が流失したため、杭が流失した箇所では杭設置時と出水後の河床高の差を併記した。水際に近い杭④で土砂交換が少ない一方、河原の中ほどに位置する杭③、⑥、⑦で大きな洗掘が観測されている。なお、杭⑤、⑥、⑦付近の河原上には複列砂州が形成されている。以上のリング法の結果について、それぞれの洗掘と堆積の傾向についての模式図を図-4に示す。

(4) リング法の結果と土砂粒度分布との関係

図-5にはA-3地点の出水1,2の際の観測結果と、出水2

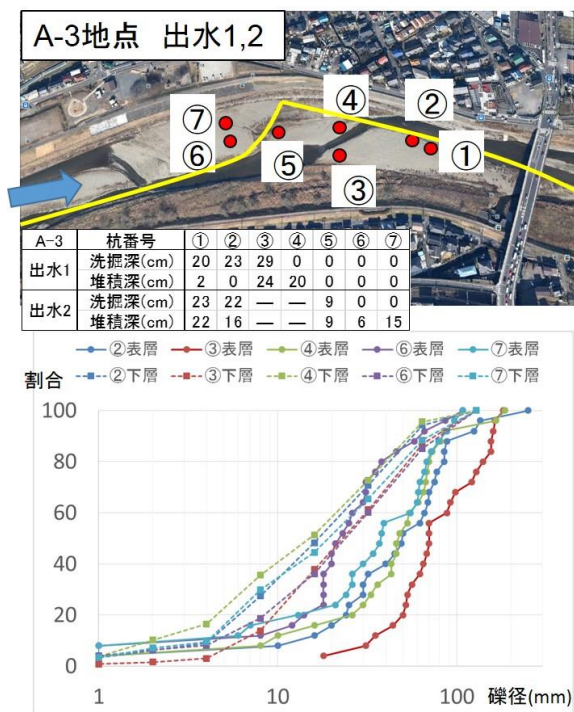


図-5 A-3地点の出水1, 2の観測（上段）
及び出水2後に計測した杭付近の粒度分布（下段）

の後に調査した各杭付近の粒度分布を併記する。粒度分布について、表層は既述した面積格子法により調査し、下層は30cm四方の方形枠の中で、表層一層の礫を除去した後に深さ20cmまでの土砂を採取し、これをふるいにかけた。

杭の観測結果について、出水中の各瞬間で見た掃流砂層厚は D_{90} 程度であると考えられている⁷⁾。 D_{90} よりもかなり大きい洗掘深と堆積深が観測されている杭があるが、これは増水期の河床低下と減水期の河床上昇によって生じている可能性がある。ここで土砂の粒度分布に着目すると、表層の粒度分布は、出水時に流線が集中する杭③の付近で粗く、一方杭⑥では細かい等、場所によって大きく異なる分級が生じている。しかし下層の粒度分布については、どの杭付近でもかなり類似している。このことから、出水中はどの場所でも掃流砂層の粒度分布が図-5中の「下層」の粒度分布であり、減水期に流れの強い場所で細粒分が流出する事によって表層の分級が生じると考えることができる。

その理由について、杭⑥に注目すると、出水2の際の堆積深は6cm程度と D_{90} と概ね一致し、また表層と下層の粒度分布が概ね一致している。これは表層の一層のみをこの粒度分布の土砂が流れ、減水期にはその一層がここに堆積したことを意味する。一方で杭③では、少なくとも出水1で下層部分の土砂は出水前後で入れ替わっているが、下層の粒度分布が他の地点とほぼ一致している。すなわち出水中は下層の粒度分布を持つ掃流砂が移動し、減水期に主な流砂の移動が終了し、その粒度分布のまま

表-2 調査対象地点の状況
（*距離は河口からまたは合流点からの距離）

河川名	*距離 (km)	D_{60} (mm)	1/I	B(m)	B/H	砂州の 状況
多摩川 水系 浅川	1.6	45	242	37	26	裸地なし
	2.8	32	226	79	61	A-3
	4.2	24	288	34	27	裸地なし
	6.8	50	201	56	49	A-2
荒川水系 入間川	11.8	74	145	34	34	A-1
	9.1	30	593	65	34	その他
	10.0	47	363	67	47	A-3型
	10.4	42	363	110	78	A-3型
荒川水系 高麗川	11.2	54	363	70	49	A-3型
	12.3	100	300	45	25	A-1型
	4.0	36	501	20	15	A-1型*
	4.6	36	501	24	18	A-1型
相模川 水系 相模川	5.6	44	216	33	19	A-1型
	15.6	53	500	145	73	A-1型
	16.8	50	500	214	116	T-1型
	18.5	63	500	164	81	裸地なし
利根川	19.9	52	1000	174	63	A-2型
	181.8	49	462	360	134	T-1
相模川 水系 中津川	3.2	34	251	38	34	A-1型*
	3.4	34	241	37	34	A-1型*
	3.9	94	199	28	24	A-1型
	4.3	82	178	27	23	A-1型
利根川 水系 渡良瀬川	36.6	51	345	99	46	A-2型
	37.2	102	355	176	85	T-1型
	38.2	90	420	128	74	A-1型
	39.6	83	256	58	33	A-1型
	40	110	322	54	30	A-1型
	40.4	93	263	81	65	裸地なし
	41	110	272	68	48	A-1型
	41.4	110	264	73	47	A-1型
	41.6	135	310	56	27	A-1型
	42	120	237	75	39	A-1型
	42.8	145	180	92	79	A-1型
	45.7	185	158	48	23	裸地なし
	48.8	174	130	98	55	その他

河床が上昇した。その後に、流れの強いこの地点では細粒分が流出したために、表層の粒度分布はかなり粗くなっていると考えられる。

3. 川幅水深比と土砂動態との関係

(1) 調査の概要

ここでは関東地方の多数の砂州の観測結果から、平均年最大流量規模の出水では裸地と水面の部分のみを土砂が移動しているという考えに基づいて、平均年最大流量時の水深 H と裸地水面幅を川幅 B とした B/H と、砂州上の土砂動態及び砂州形状との関係について検討する。

調査対象として、表-2に示す7河川35地点の砂州を選定した。前章で述べたのと同様の方法によって各地点の平均年最大流量が作用した際の B/H を算出し、また対象地点に赴き、線格子法により付近の礫径を調査した。

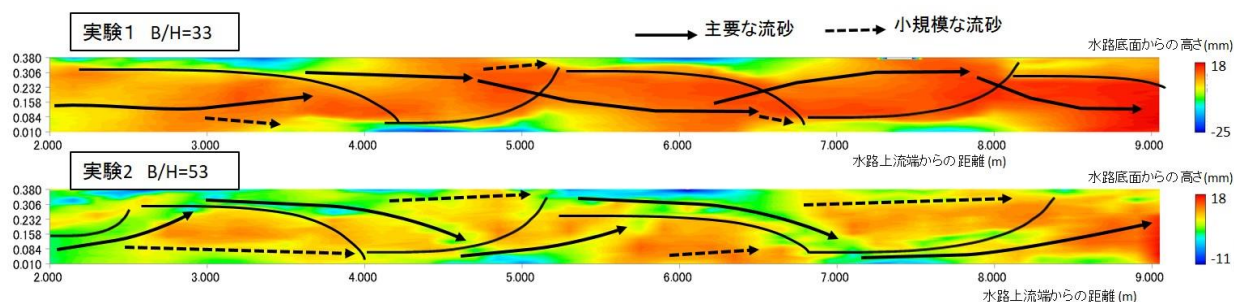


図-7 実験1, 2各々の通水終了後の河床コンター図（前縁線と流砂の状況を通水終了直前のスケッチに基づいて加筆）



図-6 対象地点のB/Hと τ_* の関係

(2) 調査結果

実際に現地を訪れると、調査した35地点の河原のほとんどは、形状、移動の有無、植生の観点からA-1、A-2、A-3、T-1のいずれかと同様だった。すなわちA-1型の砂州は砂州前縁線がほぼ移動しておらず、河原上に植生に覆われていて裸地の部分が狭く、 B/H が小さいという特徴を持つ。また砂州の横断形状はどの横断面でも片方の岸からもう一方の岸に向かい傾斜している。A-2型の砂州は湾曲部に位置し、砂州の位置が固定されており、比較的広い裸地を有する。A-3型の砂州は、河原の中央部分が平坦である。滞筋の反対側の河原上に深くなっている部分を有し、ここを土砂が移動しているためか、砂州前縁線が下流に向かい移動している。土砂の移動特性はA-3地点のようにやや二列の砂州に近い状況である。T-1型の砂州は滞筋と反対側の河原上に複列砂州が見られ、砂州全体としては下流に向かい移動している。

以上の各状況について、過去10年間分程度にわたり数枚の航空写真を閲覧し、また現地調査と定期横断測量結果等を比較した。そのうち過去10年間で状況が大きく変化した地点は調査対象から除外した上で、形状、移動、植生の観点から上記の条件を全て満たす砂州を、それぞれA-1型、A-2型、A-3型、T-1型として、調査対象地点の砂州がどのタイプに該当するかを表-2の最右列に示した。ただしA-1型は前縁線がほぼ移動していないが、「A-1型*」としたものは、前縁線の移動が見られるものである。

表-2から、ほとんどの砂州が上記4タイプのいずれかに分類された。中でもA-1型となっている砂州が多いことは、多くの砂州が移動しにくく、河原上に植生が繁茂

表-3 実験1, 2それぞれの条件

	流量(Q /min)	1/1	D_R (mm)	τ_*	B/H
実験1	70	100	0.75	0.094	33
実験2	38	70	0.75	0.084	53

していることを意味する。また、各分類と B/H 及び τ_* との関係について図-6に示す。図-6には黒木ら⁹⁾が安定解析により求めた領域区分線を併記した。横軸に B/H を採用したため勾配によって異なる区分線を表記すべきだが、対象地点の勾配の範囲ではさほど違わないため、代表として勾配が1/200の場合の区分線を示した。

各分類と B/H とは概ね対応し、A-1型は概ね $20 < B/H < 50$ 程度、A-3型は概ね $50 < B/H < 80$ 程度、T-1型はそれ以上である。特にT-1型は黒木ら⁹⁾の区分でも複列砂州領域であり、A-3型は複列砂州と交互砂州の遷移領域に相当する。以上から、裸地水面幅を川幅 B とした B/H を用いる事で、より安定解析や実験結果と実際の砂州を対応させる事ができると言える。

4. 水理実験

(1) 実験の概要

B/H と砂州上の土砂動態との関係について、水理実験によって確認した。実験には長さ10m、幅38cmの可変勾配水路を用い、ここに4号珪砂を平らに敷き詰め、一定の流量を通水した。勾配の異なる2ケースを設定し、実験1ではA-1型の砂州を想定して $B/H=33$ とし、実験2ではA-3型の砂州を想定して図-5中で交互砂州と複列砂州の遷移領域に相当する $B/H=53$ として、両者の違いについて考察した。2つの実験の条件について表-3に示す。なお、両実験共に通水時間は砂州波長と移動特性の観点から平衡状態に達したと判断できる60分とし、また、上流端から土砂は供給していない。

(2) 実験の結果及び考察

各実験終了後に測量した河床高のコンター図に、実験終了直前にスケッチした流砂の状況と砂州前縁線を加筆

したものを図-7に示す。

実験1で形成されたものは一般的な交互砂州であり、砂州の比高が高い場所を主に土砂が通過している。その土砂が前縁線沿いに堆積することによって徐々に前縁線が下流に向かい移動していた。洪水減水期には比高が低い部分を流れが通過し、ここが平水時の滞筋となる。一方で実験2では比高が低い部分を主要な流砂が移動しており、またその主要な流砂とは反対側でも土砂が移動して、土砂の流れに分岐が生じていた。一方で中央部分はやや高くなっておりあまり土砂が移動せず、この部分には上流から流下した土砂が徐々に堆積しており、この状況はA-3地点の杭の観測結果と対応している。

ところで実河川では、A-1型の交互砂州では河原の高くなっている部分は土砂が移動せず植生が繁茂しており、比高が低い部分のみを土砂が移動している。これらの砂州は過去の航空写真を見る限り、規模が大きい出水で波長が決定づけられており、その際の砂州の状況は実験2と同様のものが多いようである。その後の航空写真の変遷を追うと、砂州の比高が高い部分を土砂が移動しなくなり、ここで植生が繁茂しており、土砂が移動する範囲の B/H が概ね50以下となればA-1型の交互砂州となり比高が低い部分をまとめて土砂が流れる。この状況は流砂が分岐することなくまとめて流下するという点において実験1と同様である。また、植生が繁茂する部分があってもA-3地点のように B/H が大きければ、土砂の流れが河原の中央部分を避けるようにして分岐し、土砂が移動している部分については実験2と同様の状況になっているといえる。

なお、平均年最大流量程度で土砂が移動している範囲が裸地水面幅だとすれば、各地点の広域の土砂動態に応じてその地点の B/H が規定され、 B/H が小さければA-1型の砂州となり、河原上に植生に覆われており滞筋のみを土砂が移動する形態となる。ただし「A-1型*」としたものは実験1と同様に比高が高い部分を土砂が移動し、砂州が移動している。一方で、 B/H が比較的大きければA-3型の砂州となり、主要な流砂が分岐して流れる形態となる。さらに B/H が大きい場合には河原上に複列砂州を持つT-1型の状況となる。

5. 結論

川幅水深比と砂州上の土砂動態及びそれに規定される砂州形状との関係について、現地観測と水理実験によって検討し、以下の結論を得た。

・リング法の結果と土砂の粒度分布調査結果から、少なくともA-3地点では、砂州上で表層の土砂は分級しているものの、下層の土砂はどの地点でもほぼ一致しており、出水中の掃流砂の粒度分布は一定と考えられる。

・裸地水面幅を川幅 B として算出した平均年最大流量時の B/H について、この値が概ね50以下であれば流砂が比高の低い部分まとまって流れ、移動していない砂州が多い。 B/H が概ね50以上の場所では出水時に土砂の移動する部分が分岐するため、河原上の滞筋と反対側に比高の低い部分が形成でき、河原の中央部分は土砂の流れが不活発で土砂が徐々に堆積していく領域となる。また、 B/H が80を超える交互砂州では河原上に複列砂州が混在している。

・すなわち砂州上の土砂動態や砂州の形状特性は、低水路幅を用いるよりもむしろ、裸地水面幅を川幅 B として算出した平均年最大流量時の B/H を用いることで、これまで行われてきた安定解析や砂州形成実験の結果とより良く対応させることができる。

謝辞：本研究はグリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス（GRENE-ei）及び国土交通省河川砂防技術研究開発公募 地域課題分野（河川）「利根川八斗島観測所近傍における計測技術と数値解析の融合による土砂動態の把握」の補助を受けて実施した。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 山本晃一：沖積河川－構造と動態－，技報堂出版，2010。
- 2) 藤田裕一郎，村本嘉雄，堀池周二，小池剛：交互砂州の発達機構，水理講演会論文集，第 26 巻，pp.25-30，1982。
- 3) 寺本敦子，辻本哲郎：砂州形状の特性と平水時の流路構造，水工学論文集，第 50 巻，pp961-966，2006。
- 4) 山下貴美子，知花武佳，原田大輔：砂州形成区間における瀬・淵構造の形態的特徴とその規定要因，河川技術に関する論文集 vol.18，pp.143-148，2012 年 6 月。
- 5) 清水義彦，岩見収二：礫床河川の植生化による砂州・みお筋の形態変化について，水工学論文集，第 56 巻，pp973-978，2012。
- 6) 原田大輔，知花武佳：土砂交換厚に着目した二河川間の土砂動態の比較，水工学論文集，第 60 巻，pp961-966，2016。
- 7) Wilcock, Peter R., et al.: Observations of flow and sediment entrainment on a large gravel - bed river., Water Resources Research 32.9 pp.2897-2909, 1996。
- 8) 河村三郎：土砂水理学 1，森北出版，1982。
- 9) 黒木幹雄，岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，土木学会論文集，第 342 号，pp.87-96，1984。

(2016. 4. 4受付)