

砂州河道における河岸侵食と低水流路

Bank Erosion and Low-Waterway in a River with Bars

秋田大学鉱山学部	石井 千万太郎	Chimataro ISHII
北海道大学工学部	岸 力	Tsutomu KISHI
北海道大学工学部	黒木 幹男	Mikio KUROKI
復建技術コンサルタント(株)	沓沢 辰美	Tastumi KUTSUZAWA

In a river with bars, the banks are often subjected to erosion due to the convergent flow resulted from the bed geometry, even in a straight channel. The position of a flow converge point along the river banks moves depending on the river discharge. And it is known empirically that a bank erosion not always occurs during a high water and it rather occurs during a low water. In this study, flume experiments and field surveys were carried out to investigate the processes of bars deformation and low-waterway formation, and the mechanism of bank erosion in a river with alternating bars, especially during a low water.

Keywords : bank erosion, bars bed, low-waterway, deformation of bars, local scour

1. はじめに

砂州形成河道においては、直線部においても砂州が河岸沿いに、一般に水衝部と呼ばれる流れの収束部を産み出し、河岸侵食の原因となる。この水衝部の位置は流量によって移動し、また河岸侵食は、しばしば、大流量時よりもむしろ小流量時に発生することが経験的に知られている。本研究は特に砂州河道におけるこの小流量時の河岸侵食に注目し、その機構を検討するため、水路実験と実河川での調査を行なった。

2. 水路実験

実河川で観測される砂州は、出水時の特定の流量に対応して形成された砂州が、その後の流量の減少や低水流による変形を受け複雑な形状を持つ。その複雑な形状から基本となる砂州の形態(砂州前縁線、砂州高、砂州長)を判定するには、もとの砂州が流量の減少によりどのような変形を受けるかを知ることが必要とされる。また、実河川で見られる河岸侵食は、流れが比較的まっすぐ流れる洪水ピーク時よりも、むしろ流れの蛇行が強まる減水時やその後の中小洪水時に生じ、その位置も移動すると従来から言われてきている。これに対し、著者の一人による固定床実験¹⁾により、流量が低下してももとの砂州形状が変化しない場合、流れの蛇行は強まるものの流れのパターンはそれほど変化しないため河岸侵食力が減少し、水衝部位置も移動しないという結果が得られている。したがって、流量が低下しても河岸侵食力が保持されるかまたは増大するためには、砂州の変形による低水流路の形成、そして流れのパターンの変化、すなわち低水流路への流水の集中が必要と考えられた。以上のことから、単列砂州を対象として次に述べる砂州の変形実験を行い、流れと路床を計測して、砂州の変形過程と低水流路の形成過程、水衝部の路床洗掘機構を検討した。

a. 実験装置および実験方法

本実験は、まず、こう配 $i=1/50$ 、長さ 7m 、幅 $B=0.2\text{m}$ 、深さ 0.3m の長方形断面水路に粒径 $0.6\sim 1.2\text{mm}$ (平均粒径 $d_m=0.81\text{mm}$ 、これまでの著者らによる発表論文²⁾では概略値として 0.9mm としていたが、ここで修正する。)、水中比重 $s=1.65$ の砂を 10cm の厚さに敷き詰め、その水路に流量 $Q=0.650\text{ l/s}$ の水を流して単列の砂州を形成させた後、所定の低水流量を通水して砂州の変形実験を行っている。各RUNの低水流量と平坦床と仮定した場合の無次元せん断力 τ_* を表-1に示した。通水はほぼ安定流況に達したと判断された時点まで行われ、その時間を表-1に示している。そして、各RUNごとに、路床形状(砂州前縁線、低水流路形状、路床横断面形)測定実験と表面流況測定実験、路床砂の粒度測定実験、深掘れ部の流れと流砂の

三次元流況観測実験を行っている。路床形の測定はもとの砂州形成時と低水流量通水後で行い、路床形のうち路床横断面形はポイント・ゲージをスタッフとし、レベルを用いた水準測量で行った。表面流況の測定は、砂州形成流量時と、RUN 1,3,5 の低水流量通水時の初期と安定流況時で行った。流況の測定は、発泡スチロールの小粒子をマーカーとしたビデオ録画によるトレーサー実験により行っている。流れの境界部でのマーカーの滞流が砂州の変形に及ぼす影響が大きいと、測定は短時間に終え、また、測定ごとに砂州の形成実験からやり直している。

また、低水時の水衝部に生じる深掘れの局所洗掘機構を知るため、流れは油性塗料を注入して可視化して、砂の移動はそのままビデオ撮影している。実河川では、河床材料は広い範囲の粒径の砂れきからなる混合砂れきであり、河床砂れきの河道内粒度分布特性が上述の諸現象に関連することは明かである。本実験ではその影響を検討するため、RUN 0 の砂州形成時とRUN 1,3,5 の安定流況時の路床砂の粒度分布の測定を行った。

b. 実験結果と考察

(1) 砂州の変形と低水流路の形成過程

本実験の単列砂州は、各実験ごとの砂州長および砂州高にほとんど差がなく、その平均値は73cmと1.1cmであった。図-1は表-1に示した砂州の変形実験のうち、RUN 1,3,5 の結果を示している。図中の一点鎖線は変形前の砂州前縁線、点線は低水流量通水後の安定流況時の低水流路形状を示す。この低水流路形状は低水流量通水時の水際線ではなく、通水後の砂州上に残された流れの明らかな痕跡と、またそれらが不明確な所は上下流のつながりより求めたものである。したがって、点打たれている所は低水流量通水時にその全体が水面上に露出しているわけではない。流量の比較的大きいRUN 1,2 では、低水流路は水路を斜めに横断する流路と両側壁沿いの流路とが形成され、著者の一人によって指摘された¹⁾ 砂州形成時の流れの主流線とほぼ一致する。そして、水路を斜めに横断する流路は、低水流量の通水によって変形した砂州の前縁に沿って形成されている。通水低水流量を減少させると砂州の変形は小さくなり、その前縁位置はもとの砂州の前縁位置に近づいていく傾向が見られる。流量が比

表-1 実験条件と最大洗掘深

RUN	流量 Q (l/s)	無次元掃流力 τ	通水時間 T (min.)	最大洗掘深 H (cm)
0	0.650	0.131		0.9
1	0.130	0.050	15	1.4
2	0.110	0.045	20	1.3
3	0.098	0.042	25	1.6
4	0.094	0.041	30	1.5
5	0.090	0.040	35	2.1
6	0.086	0.039	115	1.6

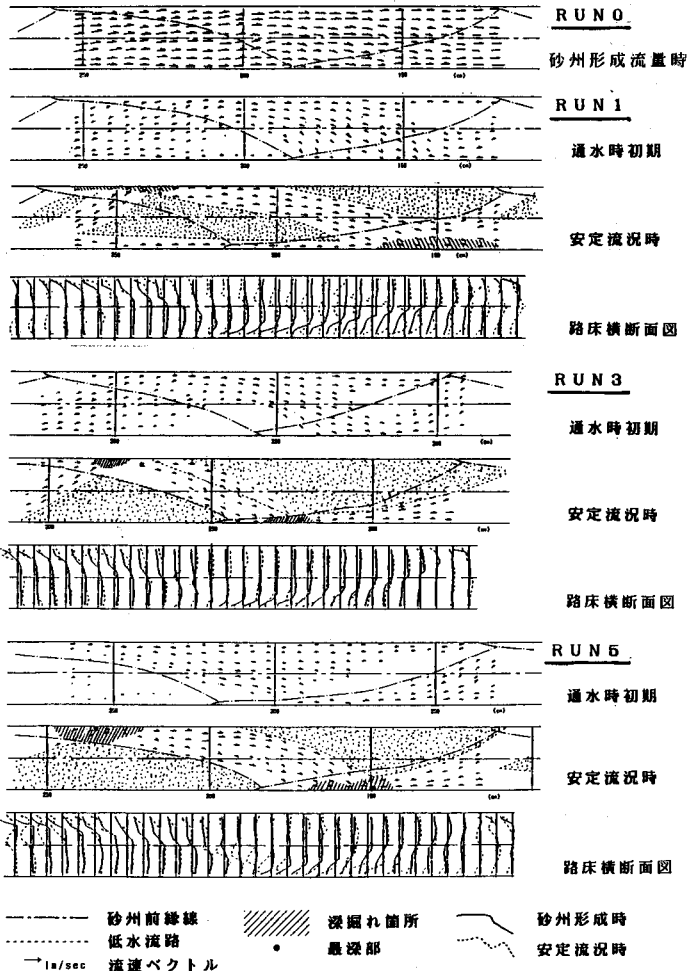


図-1 砂州の変形・低水流路の形成と流況変化

較的小きなRUN 3 から 6では砂州の背の側壁岸沿いの流路は見られなくなり、砂州の前縁に沿って水路内を蛇行する低水流路だけが形成されている。その流路幅は流量の減少につれて広がる傾向にある。さらに図-1は、砂州形成流量時と低水流量通水初期、安定流況時の表面流速ベクトルおよびその路床形状の横断面図を示している。低水流量通水初期の表面流速ベクトル図によると、砂州形状に従った流れには水路内を蛇行する流れと両側壁沿いを直進する流れが見られる。観察によると、通水当期は、流れが側壁沿いに直進する流れと蛇行する流れとに分岐するところでは流れが発散性のため流送砂の堆積が見られた。また、砂州先端部では側壁沿いの流れが砂州先端を崩す形で路床を洗掘し、側壁沿いの路床の低下が砂州先端から上流に進行していくこと、砂州先端部の洗掘砂はその下流の淵部に堆積することが観測された。図-1の通水初期と安定流時の流況図と路床横断面図の対比によって、流量が比較的大きなRUN 1,2 の場合は前者よりも後者の現象の進行が速く、両側壁沿いの流路が形成されること、それに対し、流量が比較的小きなRUN 3~6の場合は前者の現象の方が進行が速く、その現象による路床上昇は側壁沿いの流れを阻害し、遂には流れをせき止めてしまうこと、その結果、蛇行流は上流に押しやられて曲がり方を強めるとともに、流水が蛇行流一本に集中して砂州の前縁線沿いに明確な流路を形成するに至っていることを確認している。

(2) 水衝部の深掘れと流況 一方、低水流量時の最大洗掘は、水路内を蛇行する低水流路が側岸に当たる水衝部に生じており、表-1に示した通り、その最大洗掘深（洗掘深は砂州形成時の平均路床面からの深さ）は砂州形成流量時のものよりかなり大である。特に蛇行する単一の流路が形成されて最大洗掘深が大きいRUN 3~6の深掘れ部の形状は図-2に模式的に示したように孔状で、三次元流況のもと局所洗掘によるものと推定できる。図-2にはRUN 3の安定流況時の深掘れ孔に直接トレーサーを注入して流れを観測した結果を模式的に示しているが、図から、水面で側壁方向に向い、底面でその逆方向に向かう二次流が存在が認められる。また、図-3は深掘れ孔周辺の砂の移動の観測結果を表面流の測定結果とともに示している。深掘れ孔の最深部では砂の動きは見られず、上流から供給された砂は深掘れ孔の縁辺部を流下するが、図の一点鎖線で示した部分では、深掘れ孔の最深部へ崩落した砂は二次流によって巻き上げられて流下している。そして、深掘れ孔の上下流とも表面流と砂の移動方向のずれが見られないので、二次流が深掘れ孔だけに存在していると推定できる。

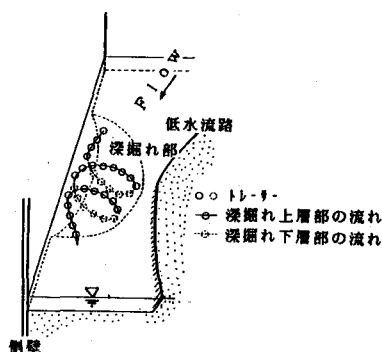


図-2 低水時深掘れ部の二次流

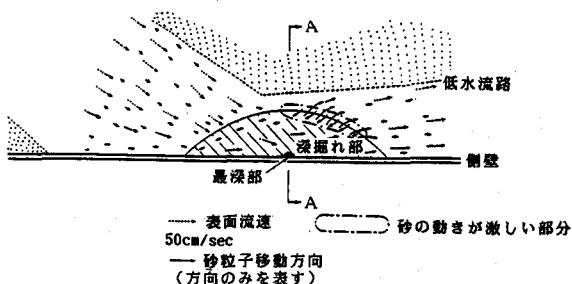


図-3 深掘れ部周辺の流況と砂の移動

(3) 路床砂粒度の水路内分布 齊藤ら³⁾や内島ら⁴⁾は路床砂粒度の水路内分布特性が上述の諸

現象に関連することを指摘している。本実験の使用砂は 0.6~1.2mm の狭い範囲の粒径（平均粒径 $d_m = 0.81\text{mm}$ ）を持つ砂ではあるが、砂州形成時と低水流量通水後の安定流況時における路床砂のふるい分け試験を行い、路床砂平均粒径の水路内分布として図-4を得ている。図から砂州形成時の分布の特徴として、粗粒部は砂州先端部とその対岸、砂州中央部の前縁下部で、細粒部は砂州の背の中央部に見られることが上げられる。この砂州上にRUN 1,3,5の低水流量を通水して安定流況に達した時点の図-4の路床砂平均粒径の分布と路床横断面形、そして図-1に示されている流況の検討から、次のことが言えるであろう。：形成時砂州の先端部の対岸の粗粒化が進行している。ここは、(1)で述べた通水初期の流れが側壁沿いに直進する流れと蛇行する流れとに分岐するところで、直進性の強い粗砂が堆積したためである。この粗砂の堆積は比較流量

が小さいRUN 3,5 の場合、路床上昇を速めて側壁沿いの流れをせき止め、砂州先端部の粗粒部を保つが、比較的流量が大きいRUN 1 の場合は側壁沿いの流路を形成して細砂も流下および堆積し、粗粒化はそれほど進行せず、砂州先端部は下流に移動して細粒化している。また、砂州の背の中央部の粗粒化と砂州中央部の前縁下部の細粒化は、この部分の通水初期の流れによる細砂の輸送と堆積によるものである。

3. 実河川における河岸侵食位置の調査
水路実験の結果から、流量の減少と河岸の洗掘位置の移動に関して次の性質が推定される(図-5)：

1) 砂州形成流量から流量が急速に減少する場合、砂州の変形は小さく、初期の砂州前縁線に沿って低水流路が形成され、最大洗掘深は砂州の先端近くに生ずる。この間、河岸沿いの深掘れの位置は、砂州形成時の位置から、上流側に移動する。

2) 砂州形成流量から流量がゆるやかに減少する場合、砂州の変形は小さくなく、低水流路は初期の砂州前縁線より下流に形成される。最大洗掘の位置は、砂州先端の下流への移動と洗掘位置の上流への移動が重なるため、流量が変化しても、結果的に、ほとんど変化しない。

これらを考慮して、次の実河川における河岸侵食位置の調査を行ない、その結果を考察している。

a. 調査河川と調査方法

調査河川は表-2に示す雄物川水系の河川と北海道内諸河川である。災害資料は、雄物川については、表-3に示す通り昭和54年から59年にかけての 8出水における資料を用い、北海道の河川については、

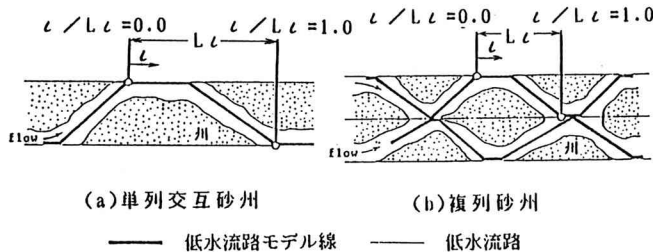


図-6 低水流路モデル

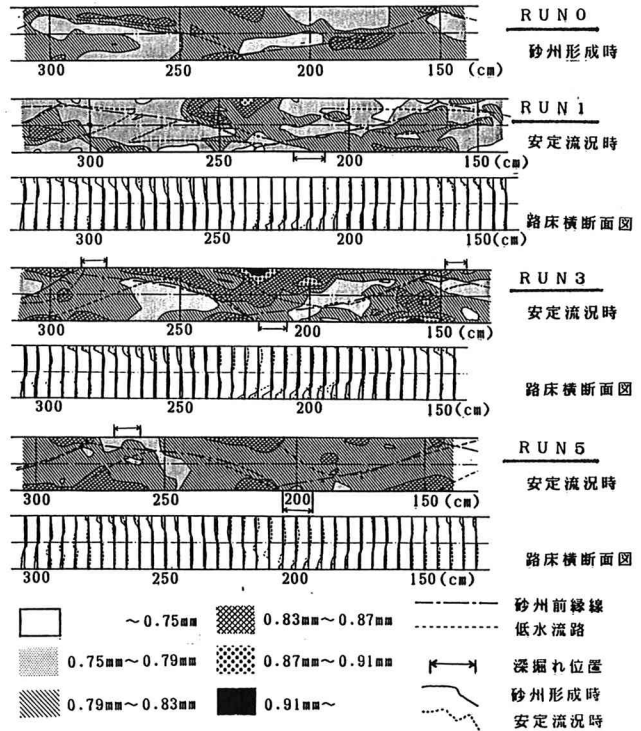


図-4 砂州の変形・低水流路の形成と路床砂平均粒径分布

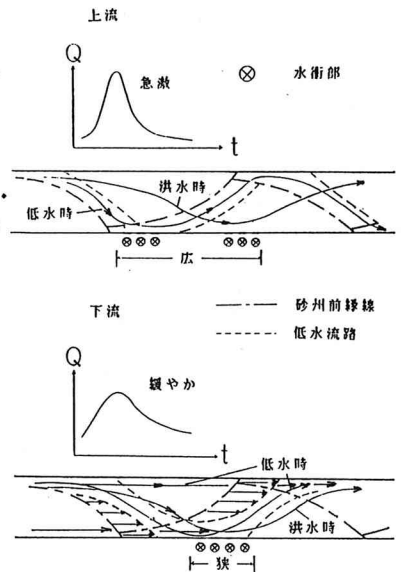


図-5 河岸侵食箇所模式図

表-2 河岸侵食箇所調査河川

河 道 名	河床こう配	河 道 名	河床こう配
(北海道)		石狩川下流	
天塩川上流		空知川	1/430
鳳凰別川	~1/780	徳富川	1/275
天塩川	1/340	石狩川	1/930~1/1360
天塩川下流		十勝川他	
間瀬別川	1/668	利別川	1/1027
石狩川上流		音更川	1/218
オホラッパ川	1/705	芽室川	1/294
辺別川	1/148~1/168	札内川	1/112~1/225
美瑛川	1/123	十勝川	1/210~1/1500
忠別川	1/120	(東北)	
石狩川	1/223	雄物川水系	
		雄物川上流	1/1100
		皆瀬川	1/250

表-3 雄物川・皆瀬川洪水ピーク流量

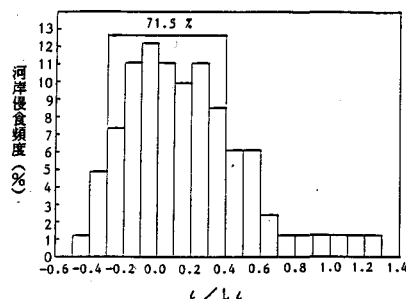
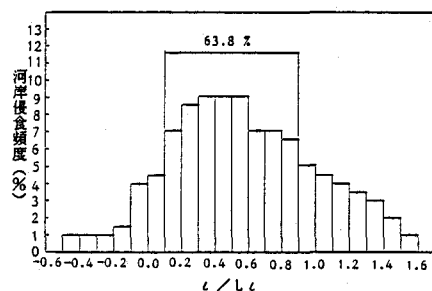
(流量: m^3/sec)			
河川名	雄物川上流		皆瀬川
観測所名	大上橋(91K)	大曲橋(77K)	岩崎(6.2K)
既往最大流量	1755	2227	2065
洪水発生年月日			
S54.8.6	1085	2052	1195
S55.4.6	1191	2343	—
S56.4.20	1394	1347	907
S56.8.23	1307	1357	1511
S57.4.16	945	1105	1066
S57.9.12	1233	—	—
S58.5.2	737	539	782
S59.9.2	736	—	—

昭和56年 8月出水の資料を用いた。河岸侵食位置と砂州形との関係を調べるため、図-6に示したように出水後に形成された低水流路の中心線と河岸との交点を原点にとり、原点から河岸侵食点までの距離を l 、蛇行する低水流路の半波長を l_c とし、 l/l_c の頻度分布を調べた。 l は下流方向を正、上流方向を負とした。

b. 結果の考察

(1) 単列砂州河道 単列砂州河道における調査結果を図-7と 8に示す。雄物川上流部では河岸侵食の位置は、 $l/l_c = -0.3 \sim 0.4$ の範囲にある場合が大部分で、特に $l/l_c = 0$ の近傍に集中している。北海道の河川では、 $l/l_c = 0.1 \sim 0.9$ の範囲内にある場合が大部分で、特に $l/l_c = 0.5$ の近傍に集中している。前述の水路実験の結果を参照すれば、図-7と 8の結果は次のように説明される：図-7の雄物川の場合は、河床勾配 $i = 1/1,100$ であり、図-8の北海道河川の場合には、小数例を除き大部分の河川において $i > 1/1,100$ である。河床勾配とハイドログラフの減水速度との間の一般的な傾向を考えると、図-7は減水が緩やかな場合を示し、図-8は減水が急な場合を示すであろう。河岸侵食の位置はしたがって、図-7では、 $l/l_c = 0.0$ を中心に分布し、図-8では、 $l/l_c = 0.5$ を中心に分布することになる。

(2) 複列砂州河道 複列砂州河川における調査結果を図-9と10に示す。皆瀬川では、侵食位置の頻度分布は双峰的であり、 $l/l_c = 0.0$ と 0.6 に分布の極値がある。北海道の河川では、侵食位置は $l/l_c = 0.0 \sim 0.8$ の範囲内にある場合が大部分で、特に $l/l_c = 0.4$ の近傍に集中している。図-9と10の例は、河床勾配から考えるといずれも、減水が急な場合である。図-10で河岸侵食が $l/l_c = 0.4$ を中心に生じているのは、上述の図-8と同様の理由による。河岸侵食位置の分布が双峰型になったのは、流量の異なる複数の出水の効果と思われる。比較的大きな出水の場合は、減水が緩やかであるから、河岸侵食が $l/l_c = 0.0$ の近傍に現われ、比較的小きな出水の場合は、減水が急であるから、河岸侵食が $l/l_c = 0.6$ の近傍に現われたのであろう。また、図-7~10において、 $l/l_c = 0.0$ の近傍において、相当数の河岸侵食がみられることは、河岸侵食が砂州形成時の流量より小さな流量においても発生することを示している。

図-7 雄物川上流河川河岸侵食箇所分布図
(単列砂州河道)図-8 北海道内河川河岸侵食箇所分布図
(単列砂州河道)

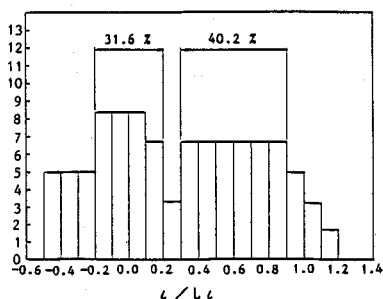


図-9 皆瀬川河岸侵食箇所分布図
(複列砂州河道)

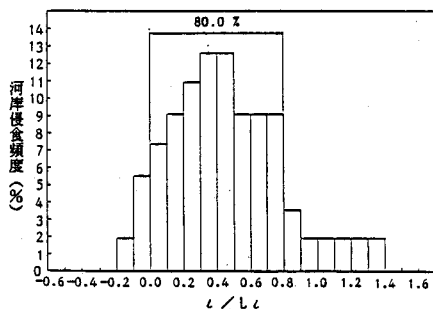


図-10 北海道内河川河岸侵食箇所分布図
(複列砂州河道)

4. おわりに

本実験の水利条件および水路の幾何学的な条件、使用砂の特性などは、実河川とはかなりかけ離れたものではあるが、前述した実験結果は、実河川で生じる複雑な現象を理解する上で、十分に役立つものと思われる。なお、著者らは、本研究遂行中に河床砂れきの粒度の重要性を再認識している。今後、本研究で行なった実験を使用砂の粒度を変えて行い、その影響を詳細に検討したい。

<謝辞>

本研究の河道災害資料は建設省東北地建湯沢工事事務所と北海道開発局から提供頂いた。また、昭和60、61年度科研費「比較河川学の研究」より費用の補助を受けている。共に付記し、謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 石井・星：単列交互砂州上の流れ、秋田大学鉱山学部研究報告、第7号、pp.91-8、1986。
- 2) 石井・黒木・岸：低水流による単列交互砂州の変形実験、土木学会第41回年次学術講演会講演概要集Ⅱ、pp.431-2、1986。
- 3) 斉藤・砂田・山本：交互砂州における粒度の分布について、土木学会第41回年次学術講演会講演概要集Ⅱ、pp.433-4、1986。
- 4) 内島・早川：流量が減少した場合の交互砂州の変形特性、第31回水理講演会論文集、pp.683-8、1987。