

分岐合流水路における砂州の挙動

Influence of bars on bed configurations in cannels with division and murgence

佐藤 耕治* 渡邊 康玄** 中津川 誠***

Koji SATO, Yasuharu WATANABE and Makoto NAKATSUGAWA

近年の河川を取り巻く状況は大きく変化している。河川は洪水時に流水を安全に流す機能を有することだけでなく、人や自然にやさしい環境を創出する場としての重要な役割を担っていることが指摘されている。このため、かつて改修した河川を改修以前の自然河川に復元しようという試みが行われようとしている。本研究は、本来蛇行していた河川が直線化された区間において、蛇行復元時における流況や砂州の挙動を把握するための基礎資料を得ることを目的としている。

このため、蛇行水路と直線水路を連結させた分岐合流水路を用い、復元すべき蛇行水路と現存する直線水路の双方に通水した場合における砂州の挙動を把握した。実験結果から、分岐合流水路においては直線水路部の砂州の位相が、蛇行水路部の流れに大きな影響を及ぼすことが示唆された。また、長時間通水した場合に蛇行水路への流入量が減少し、蛇行水路が維持できなくなる状況が発生したことから、堰設置の有無による砂州の挙動に関して考察した。

《キーワード：砂州；蛇行水路；自然復元；河床形状》

In recent years circumstances surrounding river sciences have been greatly changing. It is noted that a river not only safely discharges water particularly during flood, but it plays an important role in creating an environment that is beneficial to people and a larger ecosystem. Therefore, new attempts to restore regulated rivers to their original, natural forms are underway. In this study, restoration of a river that had been straightened to its original meandering course was conducted in simulation. To obtain basic data for understanding the flow regime and behavior of sandbars at the completion of restoration works, a model experiment was carried out.

The hydraulic experiments were conducted for understanding the behavior of sand bars in the channel which has bifurcation and convergence. The channel consists of a straight channel and a meandering channel linked to the straight channel. The straight channel and meandering channel are imitated as the improved river and the meandering original river, respectively. The water flowed in the both channels. The experimental results suggest that the phase of a sandbar in a straight channel considerably affects the flow of a meandering channel in the case of work on a channel section with bifurcation and convergence. In the experiment it was observed that when a flow ran for an extended period, inflow into the meandering channel decreased. The behavior of the sandbar by having installed the weir is considered.

《**Key Words** : Sandbars, meandering channels, restoration and bed forms》

1. はじめに

開拓初期の北海道は至る所に湿地が広がり、定住するためには土地を乾燥化し、農地化するために河川の平水位を下げ、同時に洪水水位を低下させる必要があった。このため、道内各地で蛇行河川のショートカットが数多く行われてきた。しかし、近年の河川を取り巻く状況は大きく変化している。河川は、洪水時に流水を安全に流すだけの場ではなく、人や自然にやさしい環境を創出する場としての重要な役割を担っていることが指摘されている。このため、かつて改修した河川を治水安全度は維持しつつ改修以前の自然河川に復元し、蛇行水路を環境改善と生態系の多様化をはかる手段として利用する試みが行われようとしている。

本研究では、本来蛇行していた河川をショートカットした区間において、旧川を利用して蛇行を復元する場合を想定して、復元時における流況や砂州の挙動を把握するための基礎資料を得ることを目的としている。

蛇行河川を復元する場合の最重要課題としては、従前通りの治水安全度を確保することが可能かどうかということが挙げられる。通常、ショートカットを施工する場合、下流から順次施工していき、下流域の治水安全度を高めながら上流に向かって施工する。しかし、蛇行を復元する場合は必ずしも上流から施工されるわけではなく、社会的要因などから、一部のみを施工する場合がほとんどであると考えられる。だが、単純に河道の一部だけを旧河道に切り替えただけでは流下能力が不足する恐れがある。また、流下能力を確保するために、直線部を残しつつ蛇行を復元した場合においても、縦断勾配が蛇行部で緩くなるために掃流力が低くなり、蛇行水路区間で土砂堆積が発生して水路が維持できなくなる恐れも懸念される。

このようなことから、旧河道を復元する際に、現河道である直線河道も流下断面に含めた分岐合流水路で洪水を流



写真-1 実験水路全景（下流方向を望む）

下させることを想定して実験を行った。

2. 蛇行実験概要

2. 1. 実験水路の概要

本研究で使用した分岐合流を含む蛇行水路の全景を写真-1に示す。平面形状は、現河道を想定した直線水路と、旧河道を想定した蛇行水路の分岐合流水路で構成されている。また、移動床の実験であるため、分岐合流水路区間の前後には助走区間を設けている。実験水路の平面形状の1波長を図-1に示す。実験水路は、図-1の平面形状が縦断的に5波長連なった構造である。

水路の蛇行法線形は、石狩川中流域及び雨竜川の蛇行形状を基に算出した(1)式で表される渡邊¹⁾の Sine-generated curve を使用した。分岐合流水路部の直線水路は、図-1のように蛇行水路の蛇行変曲点を連結させた水路形状である。

$$\theta = 1.466 \cos \frac{2\pi}{L} (S - 1.39) + 0.2 \sin 3 \cdot \frac{2\pi}{L} (S - 1.39) \tag{1}$$

ここで、 θ ：蛇行水路偏角、 L ：蛇行水路長(=4.322m)、 S ：蛇行水路の変曲点を原点とした蛇行水路法線の長さである。(1)式は、右辺第1項が Sine-generated curve であり、右辺第2項にはその3倍の波が加えられている。一般に、この形状は水路1波長に砂州が2対以上形成される迂

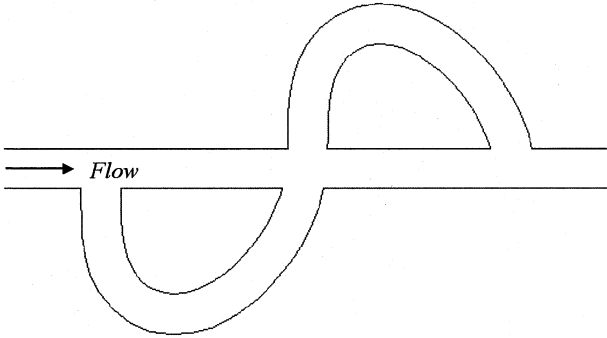


図-1 蛇行水路の平面形状模式図（1波長）

表-1 実験水路諸元

水路幅	22cm
水路総延長	29.3m
実験区間延長	11.4m
助走区間延長	12.0m（上流側）
	5.9m（下流側）

表－２ 実験条件

B－41	蛇行部のみの通水 (蛇行 1/381)
B－43	分岐合流水路で通水 (蛇行 1/381, 直線 1/200)
B－44	蛇行のみで通水後、 分岐合流水路で通水 (蛇行 1/381, 直線 1/200)
B－45 B－46	分岐合流水路で通水 <分岐部下流に堰を設置> (蛇行 1/381, 直線 1/200)

() 内は勾配を示す

曲形状となっており、十分発達した蛇行河川に見られる形状である。

実験水路の諸元は表－１に示すとおりである。なお、実験水路の壁面材料はアクリルであり、河床材料には４号珪砂 ($d_m = 0.76\text{mm}$) を使用している。

２．２．実験条件

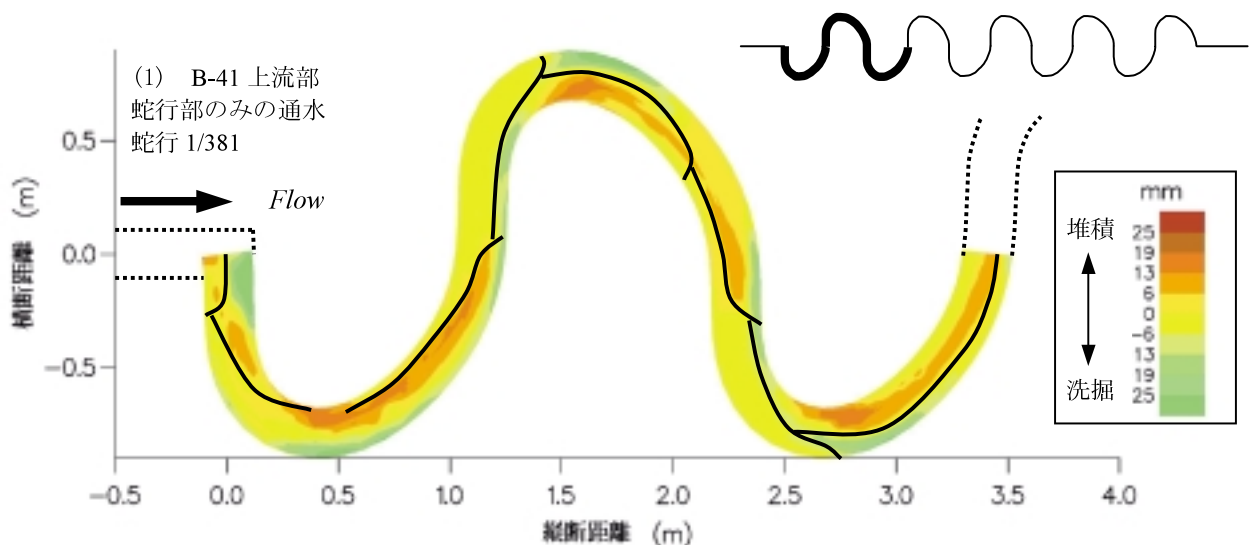
実験条件については、砂州による影響を考えていることから、砂州の形成パラメータ²⁾である $BI^{0.2}/h$ と無次元掃流力に基づき定めた。ここで、 B ：川幅、 I ：河床勾配、 h ：水深である。本論文では川幅20～30m、平均年最大流量が20～30m³/sec 程度の河川を想定し、模型縮尺は1/100程度とした。表－２に実験条件を示す。B－41、B－43、B－44、B－45における流量は、平均年最大流量規模を想定した847cm³/sec であり、B－46はその２倍の1694cm³/sec である。通水時間は各実験とも砂州の移動状況を把握するため、1,500分（約24時間）程度とした。給砂は下流端か

ら流出する流砂量を計測し、それと同量を上流助走区間において補給して行った。

実験は、最初に直線化される前の河道を想定した迂曲水路の河床形状の概略を把握する目的で、直線水路を閉め切って通水した（B－41）。次に、蛇行水路と直線水路の双方に通水する分岐合流水路で実験を行った。この実験は、旧川を河道整形した場合を想定して、蛇行水路勾配を1/381、直線水路勾配を1/200に整形して通水した場合（B－43）と旧川の地形をそのままにした場合を想定して、分岐合流水路に通水する前に蛇行水路のみに通水して、蛇行水路の河床に迂曲形状を形成させてから分岐合流水路で通水した場合（B－44）の２ケースを実施した。さらに、蛇行部へ流れを誘導するために、分岐合流部の直線部下流に前述の平均年最大流量規模程度で越流する高さの堰を設置した実験を行った。この実験は、堰を越流して現河道に流下する場合における河床への影響を把握するため、前述と同じ流量を通水した場合（B－45）と、大規模出水時として流量を２倍にした場合（B－46）の２ケースを実施した。なお、B－45及びB－46は堰により蛇行水路へ強制的に流れが向かうことから、事前に蛇行水路のみに通水して河床を形成することは行わず、B－43と同様に一定勾配で整形した河床から実験を開始している。

３．蛇行実験結果

実験結果について、各条件における通水終了後の河床コンター図を図－２(1)～(8)に示す。なお、コンター図の縦断位置は各コンター図右上の太線部分である。実験は蛇行復元による砂州の挙動を把握するため、最初の分岐部である上流端１波長目と最後の合流部である下流端５波長目の河床高を水路法線方向に9cm間隔、横断方向に0.5cm間隔で



図－２ 各条件における通水終了後の河床コンター図

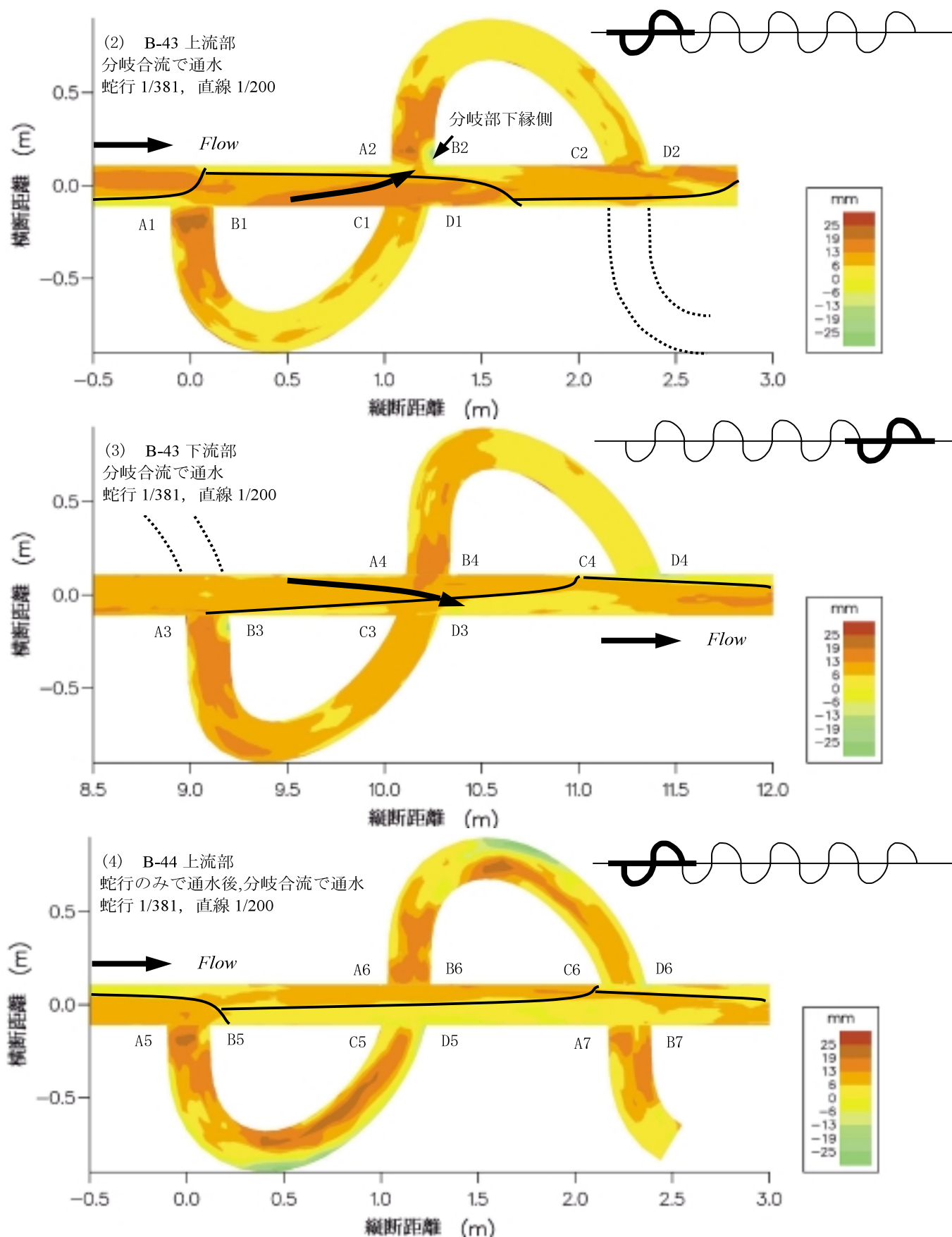


図-2 各条件における通水終了後の河床コンター図 (つづき)

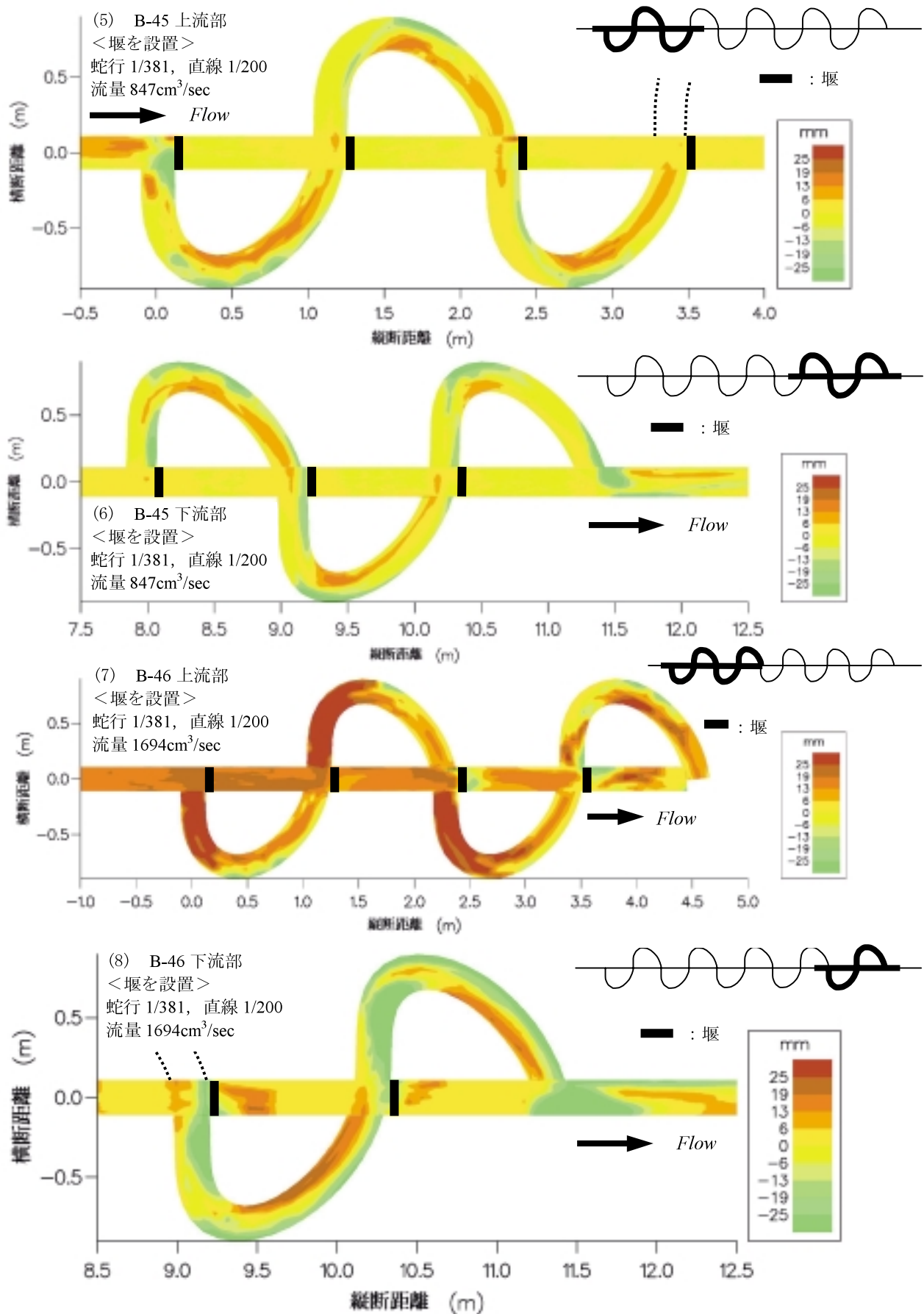


図-2 各条件における通水終了後の河床コンター図 (つづき)

計測した。なお、B-44についてのみ、現象が上流端と下流端で大きく異なっていなかったことから、上流端のみ計測を実施した。各図は初期河床高を基準に、茶色部分は河床が上昇していることを意味し、緑色部分は河床が低下していることを表している。また、図中に砂州の前縁線を加筆している。

本論文では砂州が河床形状に与える影響について、特に顕著であった現象に関して考察する。

3. 1. 蛇行水路のみの通水時における河床形状

図-2(1)は、直線水路を閉め切って通水した場合 (B-41) における河床形状を示している。図-2(1)から、砂州により水深の深い箇所、浅い箇所が明確に形成され、迂曲河道の特徴である蛇行水路1波長に砂州が2対以上形成されていることが明確に読み取れる。

3. 2. 分岐合流水路での通水時における河床形状

分岐合流水路の実験では、旧川を復元する場合において、通水される旧川がかつて通水されていた当時の河床高から変動していないことが想定される。一方で、閉鎖性水域となってから沈降した汚濁物を含む砂州を除去する必要がある場合や流下能力不足を解消するため等の理由により浚渫を実施し、河床整形を行う場合も考えられる。このため、表-2のB-43とB-44に示すように、蛇行水路の初期河床に関して、平坦河床から通水した場合 (B-43) と蛇行水路のみで通水した場合に形成される迂曲形状を初期河床として通水した場合 (B-44) の2パターンの実験を行った。

3. 2. 1. 蛇行水路の初期河床を平坦とした場合の河床形状の概要

蛇行水路の初期河床を平坦として、分岐合流水路で通水を行った場合 (B-43) においては、実験開始後まもなく助走区間において砂州が発生していることが確認できた。分岐合流水路区間の直線水路においても、通過する砂州の位相が時々刻々と変化している様子が確認できた。なお、形成された砂州は交互砂州であり、河床変動の振幅は0.5 cm程度であった。通水終了後の蛇行水路の河床形状を図-2(2)及び(3)に示す。分岐部近傍で堆積傾向が見られるものの、蛇行水路では、旧川のみで通水したB-41のような明確な河床の変化は見られず、平坦な河床が維持されていた。

3. 2. 2. 蛇行水路の初期河床を迂曲形状とした場合の河床形状の概要

蛇行水路の初期河床を迂曲水路のみで通水して形成して、分岐合流水路で通水を行った場合 (B-44) においても、B-43と同様に助走区間や分岐合流水路区間の直線水路に交互砂州が形成された。通水終了後の蛇行水路の河床形状は図-2(4)から、初期河床の凹凸がほぼそのままの状態に残されており、蛇行水路においては直線水路ほど砂州の動きが活発でないことがわかる。しかし、分岐部近傍ではB-43と同様に堆積傾向が見られ、蛇行部への流れが阻害される結果となった。

3. 2. 3. 河道平面形状の影響による分岐合流部近傍での河床変動の特徴

分岐合流水路区間の平面流況は、分岐合流する影響により極めて複雑となる。分岐合流部それぞれの上縁下縁に図-3のような記号を付し、河道平面形状によると思われる河床変動の特徴を述べる。

分岐部下縁側B地点は、直線水路に対して水制と同様の流況が発生し、局所的な洗掘が発生することが想定される。B2及びB3で洗掘が生じているが、他のB1、B4、B5、B6及びB7地点では洗掘が生じていない。また、合流部下縁側D地点も、下流側の川幅が直線水路の川幅に狭まるために掃流力が増加し、洗掘傾向を示すと考えられる。D1、D2、D4、D5及びD6で洗掘が生じているが、D3では洗掘が生じていない。

一方、分岐合流部下縁側B及びDの対岸に当たる分岐部上縁側Aと合流部上縁側Cでは、直線水路に対して水裏であることと川幅が広がることから掃流力が低下し、堆積傾向となることが想定される。全てのA地点において堆積傾向が見られるが、全てのC地点においては顕著な堆積は認められない。

このように同一の現象が生じると思われる箇所においても、堆積・洗掘の程度の差が生じていた。この理由について次節で述べる。

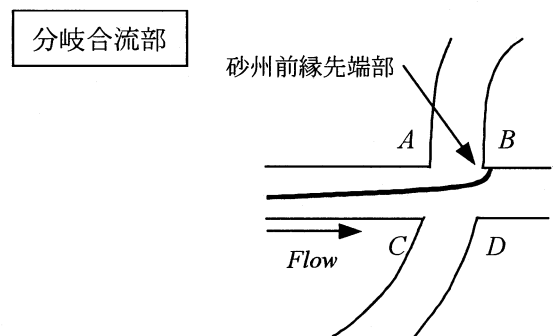


図-3 分岐合流部模式図

3. 2. 4. 直線水路を前進する砂州の影響による分岐合流部近傍での河床変動

分岐部での洗掘は前述のような平面形状に起因する特徴の他に、周期的に通過する砂州の位相によっても引き起こされる。図-2(2)は、直線水路に形成された砂州の前縁先端部が図中の曲線のように分岐部に差しかかった状態で通水を終了した後の河床測定結果を図化したものである。砂州上の流れは、矢印のように砂州の前縁線を横切る方向に流れるため、分岐部下縁側が大きく洗掘していることがわかる。一方、図-2(3)及び(4)では、交互砂州の前縁が図-2(2)と半波長ずれているため、流向は図-2(2)の場合と反対となり、分岐部が大きく洗掘していないことがわかる。このように砂州の位置により、前節で述べた平面形状に起因する河床形状が異なる結果となっている。

砂州の前縁先端部が到達して分岐部が大きく洗掘している様子を示す顕著な例として、図-3の分岐部 B における洗掘に伴う水深の時間変化と直線水路における砂州前縁先端部移動の時間変化の関係を図-4に示す。図-4の右図において、点線は B 地点の縦断位置を表し、実線は砂州前縁先端部が縦断方向に移動している様子をダイアグラムで表している。左図は同時刻における分岐部 B の水深（黒点）と実験区間平均水深（白点）の変化を表している。なお、経過時間450分から1110分については夜間のため通水のみ行い、給砂及び河床形状の測定は行っていない。図-4から、実験区間の平均水深は1 cm程度であるが、分岐部 B は水路形状に起因する水衝部であるために河床が低下して、砂州前縁先端部が分岐部 B に近づくに連れて水深が最大で5.8 cmと大きく洗掘し、砂州前縁が通過すると、水深が4 cm程度となる。この現象は通水時間中周期的に繰り返され、水衝部と砂州の影響で河床が大きく変動していることがわかる。

このように、直線水路を前進する砂州が分岐合流部の河床形状に大きな影響を与えることがわかった。

また、すべての実験を通して特徴的に現れたこととして、通水開始から時間が経つに連れ、直線水路の流れが卓越し、分岐部附近において自然堤防のような砂州が発達したことである。図-2(2)～(4)の各分岐部より下流の蛇行水路内部において、直線水路よりも河床高が上昇している様子がわかる。このことにより、分岐部附近では蛇行水路の河床高が直線水路の河床高よりも高くなる現象が発生した。この結果、蛇行水路への流入量が次第に減少し、蛇行水路内においては、一部で浮州化する現象も見られた。このような現象は、蛇行水路が直線水路より流路長として長く、河床勾配が緩やかなことから蛇行水路内の掃流力が低いことと、蛇行水路が直線水路に対して垂直に接合されて

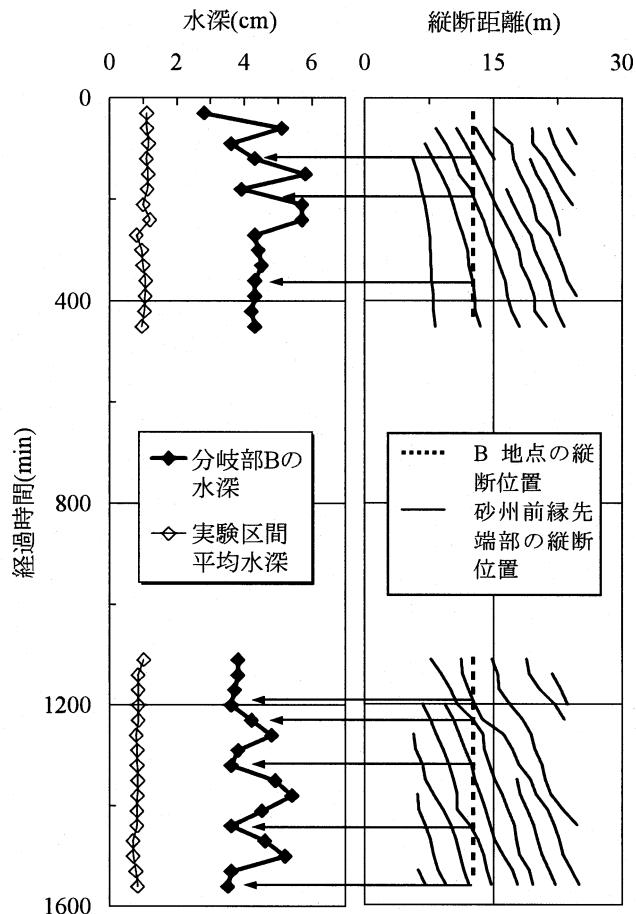


図-4 分岐部 B の水深と砂州前縁先端部移動の時間変化

いることによって、流向が直線水路に卓越することに起因している。

3. 3. 分岐合流水路での通水時に堰を設置した場合における河床形状

通水開始から時間が経つに連れ、蛇行水路への分岐部近傍に自然堤防が形成され、蛇行水路の維持が困難になることが想定された。このことから、蛇行水路の維持のため、安定した河床形状が得られるような流れを創出する実験を行った。各分岐合流部直下流の直線水路に、流れに対して堰を垂直に設置し、蛇行水路への流れの誘導を行うこととした。ただし、堰の設置に関しては洪水時の流下能力に支障を来さない程度の堰高とした。なお堰高は、前述の平均年最大流量規模に相当する通水を行った B-43における実験区間の平均水深程度の高さとした。

堰を設置した場合における実験は、B-43と同一の流量で通水した場合 (B-45) と、大規模な出水を想定して、2 倍の流量で通水した場合 (B-46) の 2 ケースを行った。

3. 3. 1. 水深が堰高と同程度の場合における河床形状

図-2(5)及び(6)において、実験区間の平均水深と堰の高

さが同程度の高さであるため、流れの大半が堰によって蛇行水路に誘導されており、蛇行水路のコンター図に図-2(1)と同様な砂州が発達している。しかし、図-2(5)の最上流端においては、堰によって分流される影響で堰上流の河床が激しく洗掘されている。また、図-2(6)の最下流端においては、流れが合流することに伴い、掃流力が増大し、合流部の水衝部及び水裏で大きく洗掘されている。

3. 3. 2. 流れが堰を越流する場合における河床形状

図-2(7)及び(8)は、前項の流量を2倍に設定して通水した場合(B-46)における通水終了後の河床コンター図である。図-2(7)が上流端1波長目、図-2(8)が下流端5波長目である。実験開始当初は上流下流ともに、図-2(8)のようなコンターを示しており、流量が2倍になったことで、堰によって蛇行水路へ誘導される流れも堰を越流する直線水路への流れも共に増加した。このため、図-2(8)のように直線水路の堰附近や蛇行水路で洗掘量が大きくなっていることがわかる。しかし、通水時間が経過するに連れ、図-2(7)に示すように分岐合流水路の上流端において、河床が堰に擦り付くように上昇した。また、直線水路の河床高が堰高と同程度となったことから、蛇行水路への流れの誘導効果が薄れ、蛇行水路の流入部に前節と同様な堆積傾向が見られた。この河床の上昇は平衡状態に達すると、順次下流へ伝播する結果となった。なお、通水はこの河床の上昇の現象が下流端に到達する前に停止している。

図-2(8)の直線水路における砂州の移動状況を見るため、堰を設置しなかった場合(B-43)と設置した場合(B-46)の砂州前縁先端部移動の時間変化を図-5に示す。

図-5の上図から、堰を設置しなかった場合については直線水路の流れが卓越しているため、砂州の発達する条件2)が整い、砂州前縁先端部が時間の経過とともに移動している様子がわかる。一方、図-5の下図は直線水路に堰を設置した場合のものであるが、堰の設置による堰上げの影響が示されている。すなわち、直線水路における砂州の形成パラメータ²⁾が、図-6に示すように、砂州発生領域から砂州非発生領域との遷移領域に移行した。このため、砂州の発生に時間を要し、また発生してもほとんど移動しない状況が確認された。

また、B-46においては、堰の上下流で著しい洗掘が発生した。このうち、各堰上下流附近の左右岸において、最も洗掘した箇所の洗掘深の時間平均を図-7に示す。図-7において、堰に付した数字は図-8のように上流側から何番目の堰であるかを示している。なお、堰4から堰10までは左右岸のうち、分岐部下流側に相当する側岸の洗掘が著しかったことから、分岐部下流側に相当する側岸のみ

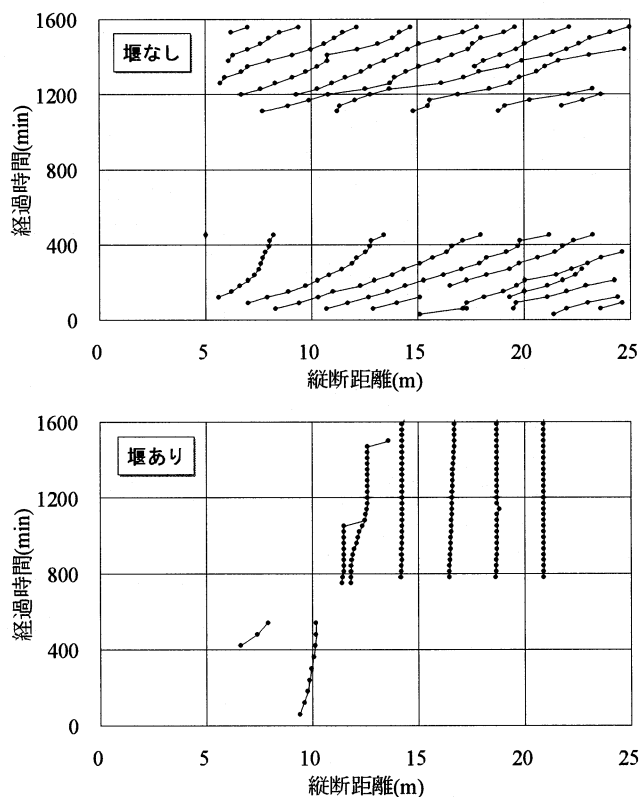


図-5 砂州前縁先端部移動の時間変化

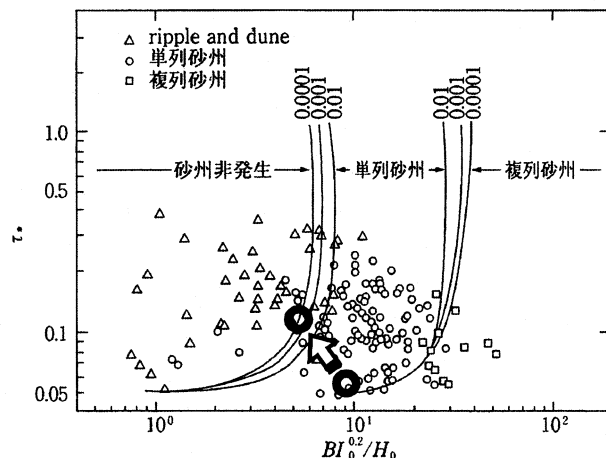


図-6 交互砂州の形成領域区分²⁾

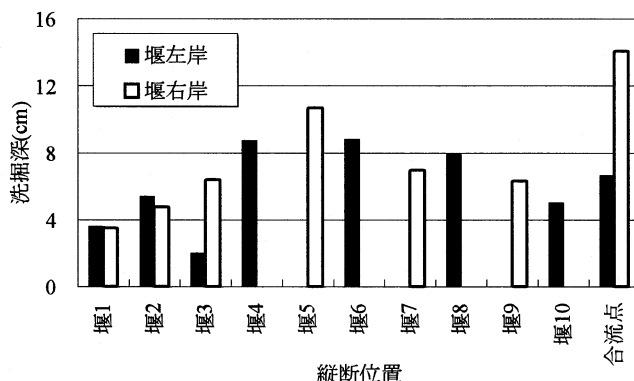
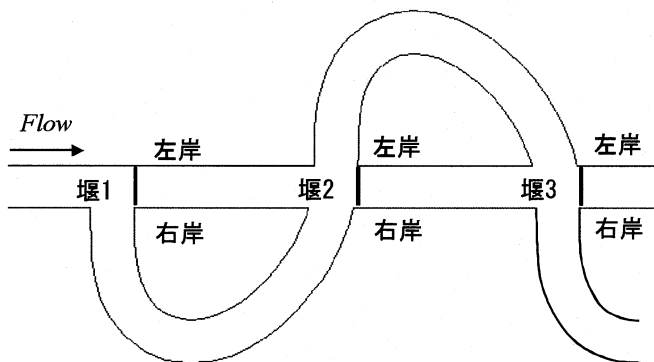


図-7 堰附近における洗掘深



図－8 各堰左右岸の平面位置

を計測している。また、最下流端の合流点については左岸側が氷裏、右岸側が氷衝部に相当する。図－7において、直線水路に設置した各堰附近の左右岸は、前述したB、Dの直下流側に相当するため、堰上流側では流れが分岐・合流する影響で、堰下流側では堰が存在することの影響から、それぞれ河床が著しく洗掘されている状況が発生した。特に最下流の合流点の水衝部において、最も激しく洗掘されていることがわかる。全ての堰の平均洗掘深は7cm程度であり、砂州による洗掘よりも大きな洗掘となった。これらの現象から、堰の設置に関して流れの状況に加え、局所的な洗掘に対しても十分な検討を行う必要がある。

また、図－2(8)からさらに時間が経過すると、図－2(7)に示すように、直線水路の河床高が堰高に擦り付く状況が発生した。これにより、蛇行水路の分岐部近傍で堰を設置しなかった場合（B-43、B-44）と同様の自然堤防が達した。

4. おわりに

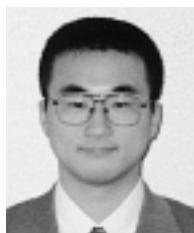
分岐合流水路での実験において、直線水路を移動する砂州の位相によっては、分岐部の洗掘深に大きな影響を及ぼす結果が得られた。このことは洪水期間中に移動する砂州の影響によって、分岐部が洗掘して被災する可能性があることを示唆している。また、長時間通水した場合に蛇行水路への流入量が減少し、蛇行水路が維持できなくなる状況が発生した。対策として、分岐部下流の直線水路に堰を設置することで、蛇行水路へ流れを誘導することが出来た。しかし、堰附近や最下流の合流点では、局所的に大きく洗掘することも示され、堰の形状に関する検討が急務であることがわかった。

今後は、分岐合流部の平面形状や直線水路に設置する堰の諸課題についてさらに検討する必要がある。

謝辞：本研究を行うに当たり、北海道開発局標津川技術検討委員会における資料を活用した。また、本研究は国土交通省北海道開発局の受託業務による補助を受けて行ったものである。併せて記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 渡邊康玄：蛇行流路における流れ・底面形状および横断面内2次流に関する研究，北海道大学修士論文，1983.
- 2) 岸力，黒木幹男：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，土木学会 pp.87～96，1984.



佐藤 耕治*

旭川開発建設部
サンルダム建設事業所
前北海道開発土木研究所
環境水工部
環境研究室
研究員



渡邊 康玄**

北海道開発土木研究所
環境水工部
河川研究室
室長
博士（工学）



中津川 誠***

北海道開発土木研究所
環境水工部
環境研究室
室長
博士（工学）