

# 標津川の蛇行試験区間の 河道変遷とその維持機構の物理的な解釈

Meandering Channel Changing and Physically maintenance mechanics  
in re-meandering section of Shibetsu River

永多 朋紀<sup>1</sup>・安田 浩保<sup>2</sup>・渡邊 康玄<sup>3</sup>・長谷川 和義<sup>4</sup>

Tomonori NAGATA, Hiroyasu YASUDA, Yasuharu WATANABE and Kazuyoshi HASEGAWA

<sup>1</sup> 正会員 独立行政法人 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒 062-7602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

<sup>2</sup> 正会員 工博 新潟大学准教授 災害復興科学センター (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050)

<sup>3</sup> 正会員 工博 北見工業大学教授 社会環境工学科 (〒 090-8507 北見市公園町 165)

<sup>4</sup> 正会員 工博 北開水工コンサルタント 先端技術開発センター (〒 062-0052 札幌市豊平区月寒東 2 条 20-5-10)

The re-meandering project in the experimental section where straightened channel was connected to horseshoes laker as 2-way channel have been conducted in the Shibetsu river in the east-northern part of Hokkaido since 2002. A maintenance method of the 2-way channel with distributary weir have not been established because a process of channel change doesn't well understood. In this study, discharge-variations to responses of channel change were investigated with cross section profiles, orthogonalized aerial photographs and hydrological data such as water level and discharge. It was found from the results that, a dependence of the weir under summer flood discharge condition is smaller than usual discharge conditions. It is important to keep discharge to generate satisfying tractive force in order to maintain the re-meandering section.

**Key Words :** Shibetsu river, meandering, river, 2way-channel

## 1. はじめに

北海道東部に位置する標津川では我が国初の蛇行復元事業が 2002 年より開始され、図-1 に示すような旧川跡を直線化河道へと接続した 2Way 河道の試験区間が設けられ、様々な学術分野の立場から調査研究が進められている。この 2Way 河道はそれぞれ、直線区間は治水機能、蛇行区間は豊かな生物の生息環境の創出を担い、両区間分岐部の下流には蛇行区間の自律的な維持のための導水を目的とした越流堰が設置されている。

河川工学の課題としては、このような 2Way 河道の河道変遷の理解と維持手法の開発が掲げられている。これは、1) 直線区間と蛇行区間との分流点では流量が分配されて掃流力が低下するために蛇行区間の流入口周辺における土砂堆積とこれに誘発される蛇行区間への流入量の低下、2) その下流に位置する蛇行区間と直線区間の合流点では分配された流量が再び合算されて掃流力が上昇することによる洗掘の発生が懸念されているためである。前者は蛇行区間の埋没傾向を招きかねず、自律的な維持を考える上で非常に重大な問題である。通水が開始されて 7 年以上が経過した現在、両区間とも

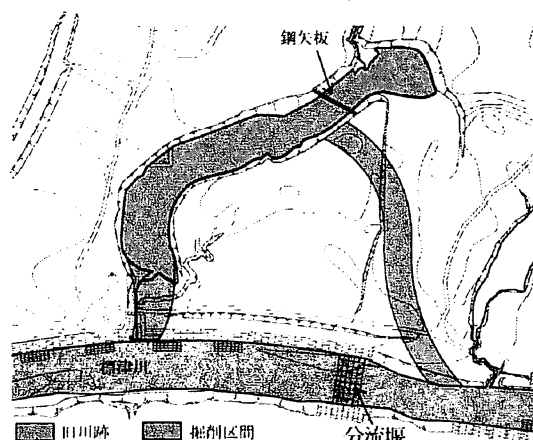


図-1 蛇行復元に利用された河跡湖と開削部分

通水当時の形状からは大きな変貌を遂げてはいるものの、両区間とも通水は維持されてきた。しかし、土砂水理学の見地からこの維持機構について説明されないままに現在に至っており、維持管理は試行錯誤の段階を脱していない。

本研究では、この試験区間において蓄積されてきた河道形状と流量などの水文に関する相当数のデータの体系化を図るとともに、一部数値解析を援用して、河道変遷と水理量を時系列で対比して両者の応答関係を

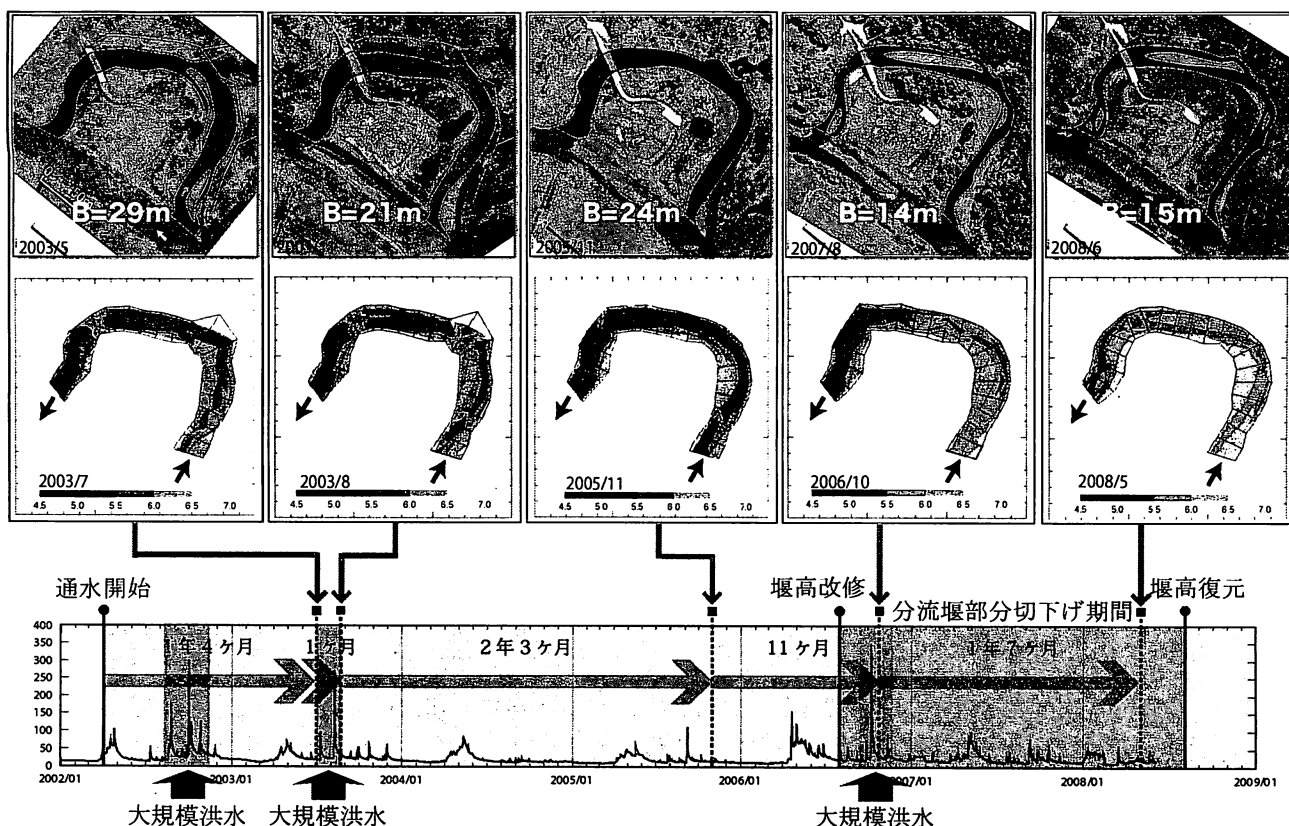


図-2 洪水履歴と垂直写真および河床高平面図の時系列変遷

明らかにする。さらに、得られた成果に基づきこのような2Way河道の自律的な維持機構について物理的な解釈を与える。

## 2. 蛇行区間の河道変遷

### (1) 平面形状

当試験地は標津川の河口から8.5km上流にあり、その3.0km下流に合流点水位流量観測所がある。図-2の最下段は2002年春の通水開始から堰高の復元が行われた2008年8月までの当該観測所における流量変化を示し、通水開始からおよそ6年間に3度の大規模な出水、つまり平常時に比べて大きな流量が対象区間を通水していたことがわかる。このほか蛇行区間への流入量の変化として、分流堰の形状変化によるものがある。図-1中に示した分流堰は袋型根固め工を用いた透過型の構造物で、図-3左図のように通水開始から4年半程度の間は高さ1mの全幅堰となっていたが、2006年8月から2008年8月までの2年間のみ蛇行区間の流速緩和を目的としてその一部が図-3右図のように50cm切下げられ、蛇行区間への流入量が大きく低下していた。この時期は、同区間への流入量を人為的に低下させた、いわば実スケールの実験期間とも言える。

このような流量変化に対する河道の応答について、図-2の最上段の疑似垂直化写真、同図中段の河床高平面図をもとに、水没部の規模を表す川幅や非水没部の

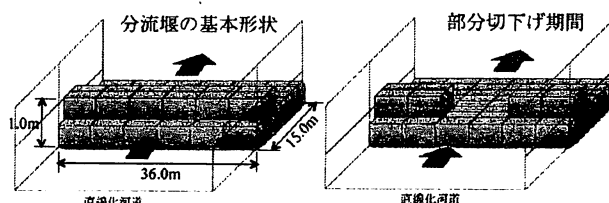


図-3 分流堰の部分切下げ

規模を表す砂州に着目して以下のとおり時系列で対比した。なお、河床高平面図は、毎年概ね3回づつ縦断方向に20m間隔で計測された横断測量の成果を平面展開したもので、20時点のデータの蓄積があるうち、洪水などのインパクトを受けて河道状況が大きく変化した時期などの特徴的な5時点のみを示した。

#### a) 通水開始から堰高改修までの期間の河道変遷

図-2の上段左に示すのは、2002年春に通水が開始されてから約1年4ヶ月が経過した時点の河道の平面形状を示し、当初台形断面として整備された上流側4割程度の区間において、2002年10月に発生した1度の大規模洪水を経て、現在最も発達する曲頂部内岸側の砂州の原型が形成され、そこでは初期河床に比べて50cm程度の堆積が生じていた。その後、再び2003年8月に大規模な洪水を受けた後の状況がその右の図で、その砂州はさらに成長を続け、その2年後を示す中央の図では、それが完全に固定化されていたことがわかる。

また、この間の川幅を垂直写真で比較すると、左の図

は出水後で若干流量が多いためやや広がっているが、平水流量時で概ね 25m 程度で推移していたと言える。

#### b) 堰高改修から堰高復元までの期間の河道変遷

分流堰の部分切下げが行われた期間の河道変遷は、**図-2** 中央に示す前述の堰高改修前の河道高平面図と、堰高改修後 1 年が経過したその右の図との比較から、堰高改修と直後の大規模出水によって蛇行部河床高が縦横断的に大きく上昇したことがわかる。また、その 8 ヶ月後を示す右の図からは、その河道状況がその後も維持されていたことがわかった。

川幅について垂直写真を用いて比較すると、堰高改修を境にして大幅な狭小化が見られ、それまで 25m 程度あったものが 15m 程度まで減少していたことがわかった。この川幅の減少は堰高改修による蛇行区間への流量配分の減少と良い相関関係にあり、いわゆるレジーム則に則った挙動を示していたことが分かる。

これらのことから、堰高の部分切下げが行われた後の期間における河道の変遷は、まず 2006 年 8 月の大規模洪水を受けて蛇行部流入口付近を中心とした土砂堆積が進行し、これが堰高改修による蛇行区間へ流入量の減少にますます拍車をかけ、川幅はこれに同調して大幅に減少していった過程を辿っていたものと考えられる。また、その後の状況から、部分切下げ期の蛇行部への配分流量では、大規模洪水によって堆積した流入口付近の土砂を下流に輸送できない状態が継続していたことが推測される。このことは、堰の形状が全幅堰に復元されないままに再度大規模な洪水を受けていた場合では蛇行区間の埋没の可能性があったことを示唆するものである。

## (2) 縦断形状

前節では、河道の平面的な形状のみから洪水等の流量変化に対する河道形状の応答について考察した。本節ではさらに一步踏み込み、無次元掃流力などの水理量の縦断分布を算出してそれぞれの時点における河道形状の応答に対して物理的な解釈を与える。

**図-4** の下段は流量の時系列、上段は下段図に示された各時点における無次元掃流力、水面形、平均河床高および河床勾配である。これら上段の図中に示された土砂水理学的な諸量の時間的な前後関係は、それぞれ細線と太線で表している。図中の各水理諸量は、まず実測の水位縦断形より推定した流量を境界条件とした不等流計算により水面形を算出して各断面の平均河床高と平均水深を求め、これらに基づく無次元掃流力を求めた。この計算ではせん断力の評価は Manning の式を用い、粗度係数は  $n = 0.03$  とした。また、図中に示された河床勾配の値は、前述の方法で計算された平均河床高を縦断的に線形近似したものである。以下に**図-4**

の上段に示す a) から f) のそれぞれの時点における諸量の縦断的な特性について述べる。

#### a) 2002/7 ~ 2002/11

2002 年 4 月に通水が開始された後の同年 10 月に発生した大規模な洪水によって、蛇行区間全体で土砂堆積が生じ河床高が縦断的に上昇した。特に蛇行区間の流入口付近は下流区間と比べて相対的に河床高の上昇量が大きくなっていたことがわかる。上流区間ほど河床高の上昇量が大きいため、河床勾配は  $1/600$  から  $1/500$  へと急峻化する。また、縦断的に見て河床高が相対的に高くなった蛇行部流入口付近では無次元掃流力が洪水前に比べて上昇することとなるため、ここに堆積した土砂は流入口付近の閉塞傾向を招くことなく、徐々に下流へと輸送されたものと推測できる。

#### b) 2002/11 ~ 2004/8

2003 年 8 月に再び大規模な洪水を受けるものの、前項に述べた過程により堆積土砂の下流への流送は維持され、河床高は徐々に低下していた。その低下量は上流区間を中心に下流に向かって通減するため、この 2 年程度の間に河床勾配は  $1/500$  から  $1/800$  へと緩勾配化する。またこの時、蛇行部流入口付近における無次元掃流力の値は大きく低下していたことがわかる。

#### c) 2004/8 ~ 2006/7

その後約 2 年の間は大規模な洪水もなく、河床高・河床勾配ともに平衡状態に達していたものと推測される。この平衡状態は、全幅堰の条件下における蛇行部流量によってもたらされたもので、同条件が維持されることで当期間に見られた比較的安定した河床高および河床勾配 ( $1/800$ ) の状態を長期的に維持することが可能であることを示唆している。

#### d) 2006/7 ~ 2006/11

2006 年 8 月に堰形状が部分的に切り下げられた直後の 10 月に発生した大規模な洪水によって、a)2002/11 ~ 2004/8 の期間に起きた洪水と同様に、河道全体で土砂堆積が生じ、河床高を縦断的に大きく上昇させた。特に上流区間での堆積量が顕著となるため、河床勾配は  $1/800$  から  $1/500$  へと急峻化する。この期間が他の大規模な洪水後の状況と大きく異なる点として、全体的な河床高の上昇量に比べて上流端付近の上昇量が相対的に小さいことがあげられる。これは、堰の切り欠きによって直線区間の流量配分比が上昇し、直線側で十分な掃流力が確保されたため、直線区間と蛇行区間の分流点周辺では顕著な堆積傾向とはならなかったものと推測される。ただし、本文では直線区間と蛇行区間の両者の一括的な検討を行っていないため、これは推測の域を脱せず今後の課題のひとつである。

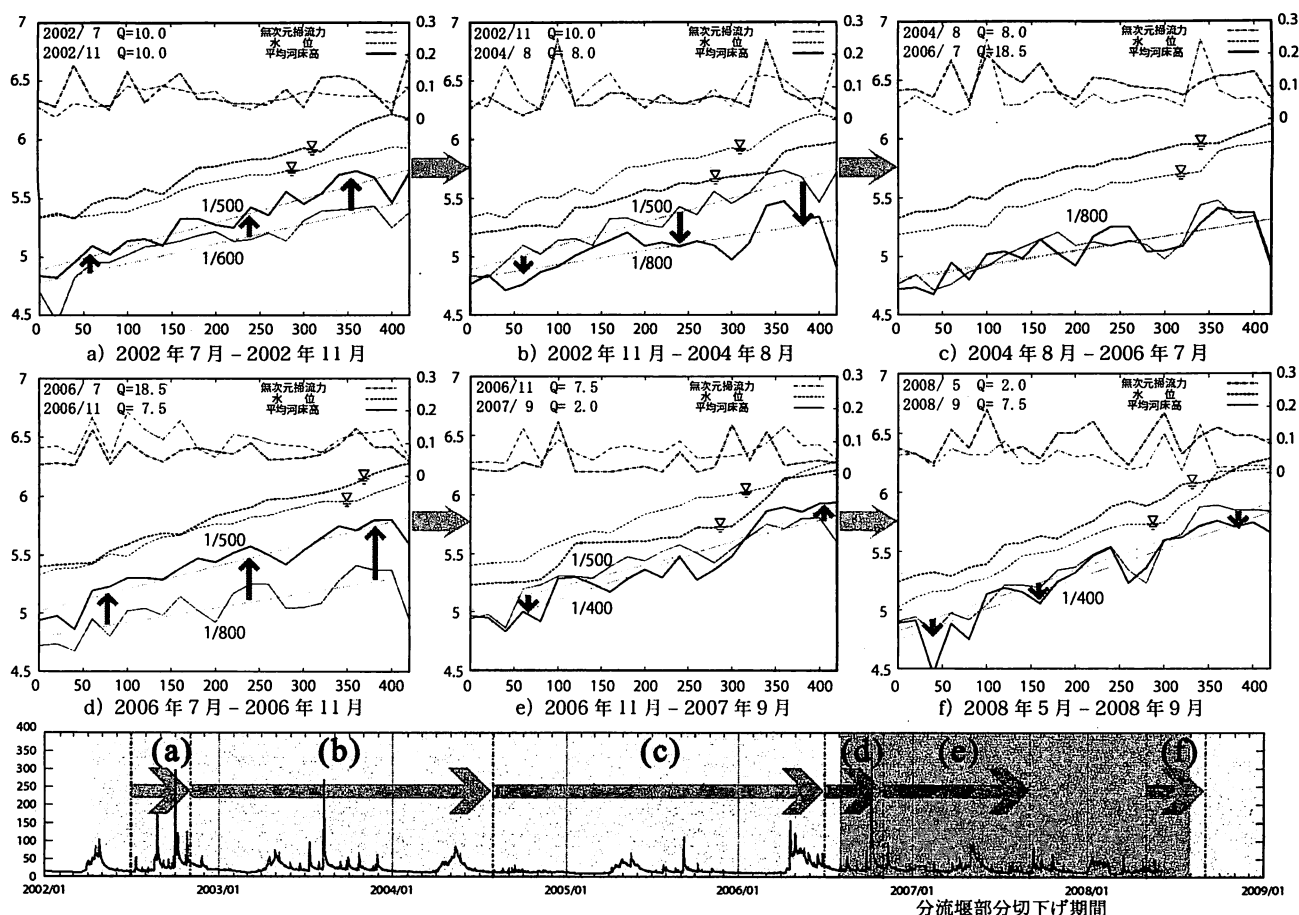


図-4 平均河床高・河床勾配 [下段]、水位面 [中段]、無次元掃流力 [上段] の時系列変遷

#### e) 2006/11 ~ 2007/9

その後約1年が経過し、河床高・河床勾配ともにほぼ平衡状態に達し、その状態は堰形状が全幅堰に再び復元されるまで継続される。流量条件の相違によって到達する河床高・河床勾配に違いがあるものの、c) 2004/8 ~ 2006/7の期間が平衡状態に達していたのと同様に、この期間でもその流入量に見合った平衡状態に達していたものと考えられる。ただし、上流区間では堰の部分切り下げを起因とする流入量の低下に伴う堆積傾向にあったことは見逃せず、これが堰改修に加えてさらなる流入量の低下を招いていたものと推測される。これら二つのことを要因として全体的な掃流力が減少し、蛇行区間は埋没傾向に向かっていたものと考えられる。

#### f) 2008/5 ~ 2008/9

2008年8月に堰の形状が全幅堰に復元され、配分される流量が回復したことで蛇行区間全体で無次元掃流力が大幅に上昇し、特に蛇行区間の流入口付近における上昇量が大きくなっていることがわかる。このことにより、前項で指摘した上流区間の堆積傾向は解消され、平均河床勾配は同程度なものの、全体的に河床高が低下していることがわかる。

#### (3) 河道変遷のまとめ

以上のことから、蛇行区間における洪水や堰高改変による流量変動に誘発される河道変遷は以下のようなものであったことがわかる。

まず、2002年や2006年に発生したような大規模洪水が当該試験地に見られるような2Way河道を流下すると、蛇行区間全体にわたり河床高が大きく上昇する。さらに2002年と2006年の洪水では、その発生時期における分流堰の形状がそれぞれ異なっていたにもかかわらず同様の挙動を示していたことから、大規模洪水が蛇行区間の河床高に与える影響は堰形状にはほとんど依存しないことがわかった。これは、長谷川らにより提示された流量配分比の理論解が示すように、本川流量の増加に伴って蛇行区間への流量配分比が急激に低下していく特性から合理的に説明される。

次に平常時の流量に対する応答は、堰の形状が全幅堰となっている場合と、部分切り下げが行われていた場合のどちらについても、約2年程度の間でその河道形状が平衡状態に達していたことがわかった。ただし前項までに述べたとおり、河床高および河床勾配は蛇行区間へ配分される流量によってその維持される状態が異なることから、平常時の通水が河道形状へ与える影響は堰形状に大きく依存するといえる。このことから、

堰形状が全幅堰に復元され蛇行区間への流量配分比が回復した現在、河床高および河床勾配は分流堰の部分切下げ前の状態へと漸近していくものと推測される。

本研究で対象とした2Way河道では、分流堰の改変によって蛇行区間への流量配分が低下すると、まず蛇行区間内の全体で掃流力の低下が生じる。これにより蛇行区間の流入口付近において土砂堆積が誘発されるとともに、直線区間は相対的に河床低下する可能性があり、蛇行区間への流入量の低下にますます拍車がかかって一層の流入量の減少を生む。つまり、分流堰のわずかな改変でさえこのような連鎖的かつ負の循環的な過程を招きかねず、それは蛇行区間の埋没の可能性を次第に増大させる傾向をもたらすと言える。

### 3. 河床変動計算に基づく埋没可能性の検証

前章までの議論はある時点における計測結果を時系列的に並べ、これらに対して考察を行うことにより導かれた結論である。これを補うために、本章では分流堰が部分的に切り下げされた形状から全幅堰に再び復元された2008年8月前後の期間に着目して1次元河床変動計算を行い、蛇行区間の河床高の流量変動に対する応答特性について知見を深める。

#### (1) 河床変動計算の方法と設定した計算条件

河床変動計算は、水面形の算出には不等流の式、流砂量の算出にはMeyer-Peter&Mullerの流砂量の式、河床変動量は流砂の連続式をそれぞれ差分計算した。

計算対象としたのは蛇行区間の下流端から上流端までの総延長420mで、縦断方向の計算断面の間隔は20m間隔で設けられている横断測線と一致させた。初期条件として与えた河道形状は、2008年5月に計測された堰高復元前の直近の横断測量データから算出した平均河床高を使用した。

上流端の境界条件となる流量には以下の二つの条件を考え、堰形状の復元に伴う蛇行区間への流入量増加に応答する河床高の把握を試みた。1) 全幅堰への復元に伴う流入量の増加を模した条件では $10.0 \text{ m}^3/\text{s}$ を与え、2) 切欠きが維持されたことを想定した条件では $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$ をそれぞれ与えた。図-4のf)から分かるように堰の形状の復元前はおおむね平衡状態に達していたと考えられる。また、2008年5月の次の時点の横断計測は同年9月に行われていることから、同年8月の堰形状の復元からこの横断計測が行われた30日間を計算期間とした。

#### (2) 解析結果

図-5の下段に示す破線が堰高復元直後の8月を想定

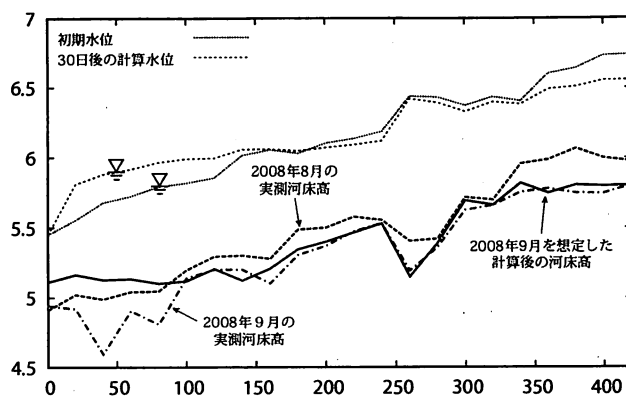


図-5  $Q = 10.0 \text{ m}^3/\text{s}$  計算河床高および水面形

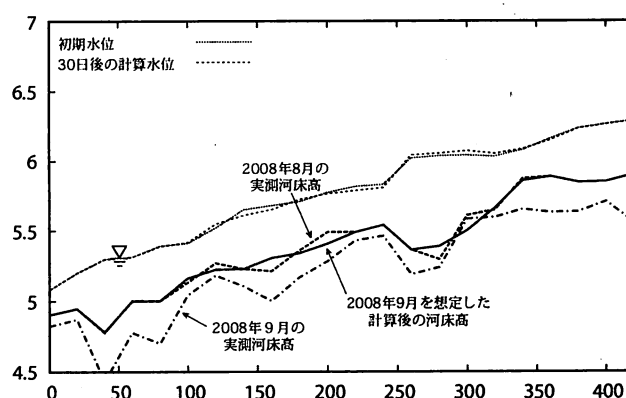


図-6  $Q = 3.0 \text{ m}^3/\text{s}$  計算河床高および水面形

した計算開始時点の実測平均河床高を、一点鎖線が復元後1ヶ月が経過した9月の実測平均河床高を示し、上段の太破線と細破線がそれぞれの計算水位を示している。下段実線が流量 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ を30日間通水させることで得られた計算河床高で、堰高復元後の9月の実測河床高を非常によく再現していることがわかる。特に上流端付近に堆積した土砂が流失している様子がよく再現されている。計測結果のみから推測した前章までの結論と同様に、堰の復元に伴う蛇行区間への流入量の上昇が掃流力を増大させることで蛇行区間内の堆積傾向が解消されることがこの計算によっても示された。

一方で、流量のみを $3 \text{ m}^3/\text{s}$ に変え、それ以外は同じ条件で計算を行った結果を図-6に示す。図中の線種は $10 \text{ m}^3/\text{s}$ と同様である。実線で示す計算河床高と、破線で示す初期河床高が縦断的にほぼ一致しており、河床高にはほとんど変化が起きないことがわかる。

これらの結果から、2008年8月に分流堰の堰高復元が行われなかった場合、蛇行区間への流入流量が回復せずに十分な掃流力が確保されないため、流入口付近に堆積した土砂を排出することができないことが示された。つまり、蛇行区間の流量配分比の減少とそれに伴う流入口付近での土砂堆積が連鎖的に繰り返されることが予見され、やがて蛇行区間が閉塞する可能性があることが本章で行った河床変動計算によっても裏付けられた。

#### 4. 洪水と堰高改変による流量配分比の遷移

これまで述べてきた蛇行区間の河道形状の変遷と密接に関係する蛇行区間への流入量、つまり本川流量に対する流量配分比の変化を実測データ等に基づいて整理した。ここで、蛇行区間の流量には、実測された流量と、垂直写真から水際線を判定し得た水位や実測水位を不等流計算により再現することで推定した流量を用いた。本川の流量には、合流点観測所における流量から武佐川などの支川流入量を控除したものをを用いた。

##### (1) 流量配分比の期間別分類

上記により得られた本川流量とその時の蛇行部流量配分比の関係を図-7に示す。ここで、蛇行区間へ配分される流量はその時の堰形状および蛇行区間の河道形状によって大きく異なると考えられることから、得られた流量配分比のデータを次のように期間別に分類した。

まず堰形状が全幅堰であった時期のうち、比較的河道が安定していた時期のデータ群をCASE1とし、通水初期の大規模洪水によって河道が一時的に閉塞傾向にあった状態から再び河道安定状態に遷移する時期のデータ群をCASE2とした。ここでCASE1とCASE2を分けるのは、CASE2は蛇行区間流入口付近に堆積した土砂によりその配分流量が一時的に減少していたと考えられるためである。さらに堰高の部分切下げと直後の大規模洪水によって蛇行部流量が大幅に減少した時期のデータ群をCASE3とし、これら3期間の比較により、堰形状と蛇行区間河道形状が流量配分比に与えた影響について考察を行った。

##### (2) 流量配分比曲線の時系列的な遷移過程

図-7に示す近似曲線は、分類した期間別にそれぞれ累乗近似を行ったもので、この曲線から各期間の時系列的な遷移過程は次のようなものであったと推測された。

まずCASE1の平常期から1度目の大規模洪水を経て、蛇行区間の流入口付近では土砂堆積が進行し、その結果、配分流量が減少することでCASE2へと遷移する。その後、融雪出水と平水流量の通水によって、堆積した土砂は下流へと流送され徐々に流量も回復し元のCASE1へと遷移する。このようにCASE1とCASE2を往復することが、この蛇行区間における流量配分比の一般的な性質であると考えられる。ただし、その後一時的に堰形状が部分的に切り下げられたCASE3の期間だけは例外となる。この期間は融雪出水および平水流量の通水によっても堆積土砂を排出できない状態にあり配分流量も低く維持されていたが、現在は堰高が復元されたことによって再びCASE1の状態へと遷移しつつあるものと推測される。

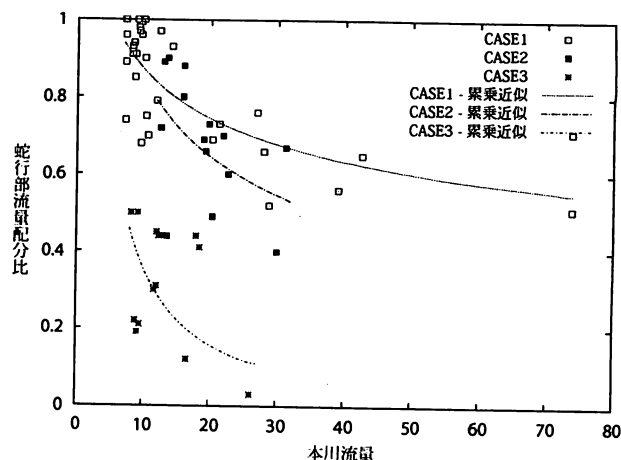


図-7 本川流量と蛇行部流量配分比（期間別分類）

#### 5. おわりに

本研究で対象とした蛇行区間では、大規模洪水による流量が蛇行区間を通水すると蛇行区間の全体にわたり河床高が上昇するものの、この時の河道変遷への分流堰の形状の依存性は小さいことが明らかになった。一方で、平常時の流量に対する応答については、堰の形状にかかわらず2年程度で平衡状態に達していたことが分かった。ただし、堰の形状により河床勾配などは異なり、しかも河道変遷への堰形状に対する依存性は大きい。蛇行区間への流量配分が回復した現在、この河床高や河床勾配は分流堰の形状の改修前の状況へと漸近していくものと推測される。

本研究で対象とした2Way河道では、分流堰の改変によって蛇行区間へ配分される流量が減少すると、まず蛇行区間全体で掃流力の低下が生じる。これによって、大規模洪水期においては蛇行区間の流入口付近を中心とした土砂堆積が誘発され、逆に直線区間では相対的な河床低下が生じる可能性があるため、その後、この堆積土砂は融雪出水や平常時の通水によって排出されることはなく、それが一層の流入量の低下を生む連鎖的かつ循環的な機構があることが明らかとなった。分流堰のわずかな改変でさえこのような負の循環的な機構を招きかねず、それは蛇行区間の埋没の可能性を次第に増大させる傾向にあり、今後の維持管理においては堰の形状に十分な配慮をしなければならないと言える。

**謝辞** 本研究を行うにあたり、北海道開発局釧路開発建設部には資料提供等の御尽力を頂きました。また、科研費(基盤(B):渡邊康玄、若手(B):安田浩保)の補助を得て行われた。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 長谷川和義, 藤田将輝, 渡邊康玄, 桑村貴志: 標津川旧蛇行通水時の堰をとまう分岐流量配分比に関する研究, 水工学論文集 第47巻, pp.529-534, 2003.

(2009. 4. 9 受付)