

## 15.1 蛇行復元等による多様性に富んだ河川環境の創出と維持の手法の開発

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：寒地河川チーム、寒地技術推進室

研究担当者：永多朋紀、吉川泰弘、唐澤圭、丸山政浩、稲垣達弘

### 【要旨】

当研究は、流下能力確保のための直線化された河道と、流れの多様性確保のための湾曲河道とを併せ持った『2way 河道』の自律的維持を実現するため、現在進められている標津川の蛇行復元事業を対象とした現地調査および水理模型実験を実施し、事業の本格実施に向けた課題の抽出とその対策の検討を行うことを目的としている。これまでの研究によって、蛇行復元試験地をフィールドとした過去 9 年にも亘る現地調査の結果から、大規模洪水や融雪出水等の非定常な流量変化と、人為的に改変された分流堰の高さが河道の形成に大きな影響を与えていたことが明らかになるとともに、それらの間には密接な応答関係があることがわかった。また、下流域において計画されている蛇行復元予定地をフィールドとした 1/25 スケールの水理模型実験では、現地調査によって観測された現象の再現性が確認され、今後行われる蛇行復元事業の実施に際して、より有効な河道設計手法の提案が可能であることがわかった。

キーワード：蛇行復元、2way 河道、標津川、現地調査、水理模型実験

### 1. はじめに

近年、河川環境に配慮した河川整備の必要性が高まる一方、集中豪雨等による河川の氾濫も頻発しており、治水安全度を維持した良好で多様性に富んだ河川環境の復元・増進が求められている。

河道を蛇行させ多様性に富んだ河川環境を創出しようとする場合、相対的に河道の縦断河床勾配が緩くなるとともに流水への抵抗が増すため、治水安全度確保のための対策が必要となる。また、河岸の浸食や局所洗掘等への配慮として護岸等の敷設など、河川環境に反する対策が必要となる場合も存在する。このような課題に対して、現在、河川環境と治水安全度の両立を図る河道の設計および維持手法の確立が急務となっている。

多様性に富んだ河川整備には、瀬や淵を創出することで河道内の水深・流速を変化させるなどの様々な手法・対策が考えられるが、本研究では治水安全度を低下させない観点から、これまでの直線河道を維持した上で、これに旧蛇行河道を接続した『2way 河道』を整備する手法について検討を行った。検討にあたっては、日本で最初の蛇行復元プロジェクトが実施された標津川をフィールドとし、現地調査や水理模型実験によって、蛇行河道に安定した流水の分岐を促す仕組みと、それが蛇行・直線両河道に及ぼす影響を明らかにし、このような河道を長期的に維持するために求められる河道設計手法を開発する。

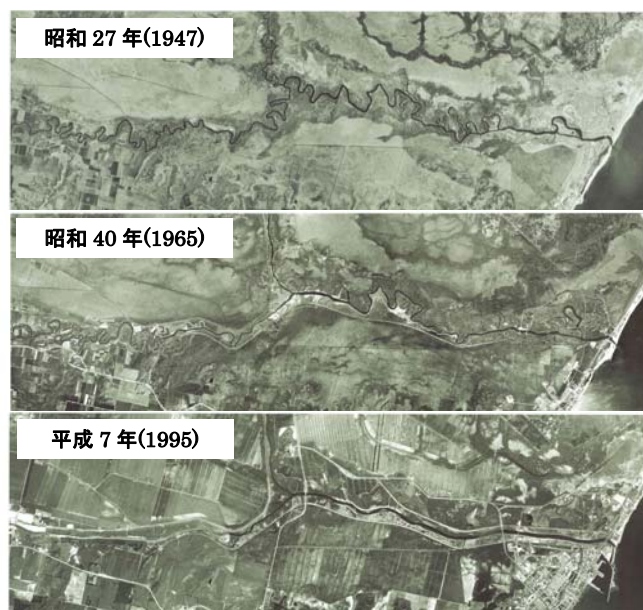


図 - 15.1.1 標津川流域の河道変遷

標津川は、標津岳にその源を發し支川の武佐川等を合わせオホーツク海へと注ぐ、流路延長 77.9km、流域面積 671km<sup>2</sup>の二級河川である。標津川の戦前までの姿は図 - 15.1.1 に示すように、幾多の蛇行を繰り返す原始河川の様相を呈しており、上流側の山地は自然林、下流側は未開の大規模な原野及び湿地帯が広がっていた。改修工事は 1932 年から開始され、1953 年には蛇行河道を直線化させるショートカ

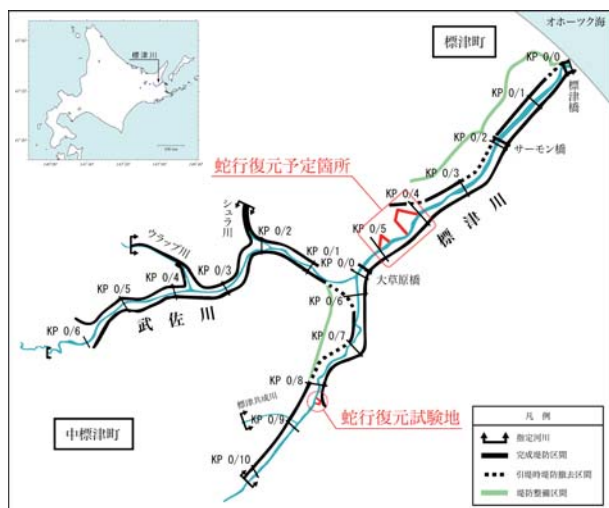


図 - 15.1.2 標津川流域図

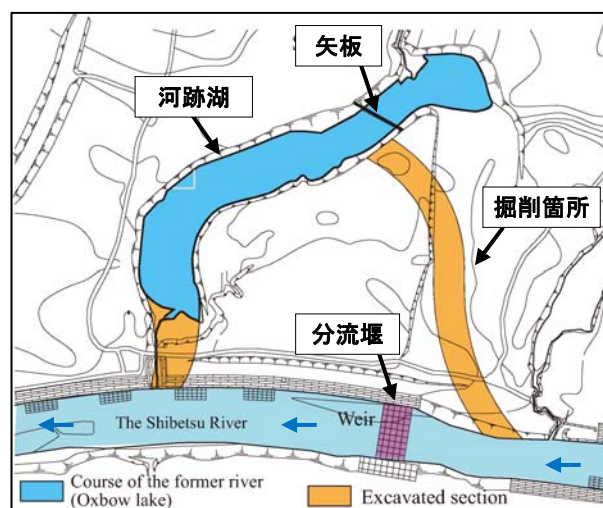


図 - 15.1.3 蛇行復元試験地（河跡湖と掘削箇所）

ット工事が本格化した。1980年代後半には下流域の湿地帯のほとんどが農地になるとともに、治水安全度も飛躍的に向上することとなる。しかし、時代の変化とともに標津川を取り巻く状況も変わり、地域の主力産業である漁業（サケ・マス）と農業を結ぶ自然に配慮した河川環境の創出が地域の要望として高まってきた。この様な社会的背景の中、1997年の河川法改正が契機となり、2000年から「自然復元型川づくり」がここ標津川で全国初のケースとして進められることとなった。

自然復元事業の実施にあたり、技術的な課題の把握とその解決に向け、標津川上流 KP8.5km 付近において実際の河跡湖（旧蛇行河道）を利用した 2way 河道が試験的に整備され、2002年3月18日に通水が開始された。本研究では、この試験施工箇所における通水後の追跡調査とそれから得られたデータの解析、さらに H23 年度以降に実施が計画されている標津川下流 KP3.8～5.2km の区間を模した水理模型実験を実施し、このような 2way 河道を自律的に維持してゆくために求められる河道設計手法の開発に向けた各種検討を行った。

## 2. 蛇行復元試験地の追跡調査～課題と対策～

### 2.1 蛇行復元試験地の施工概要

図 - 15.1.2 に蛇行復元試験地および蛇行復元予定箇所の位置を、図 - 15.1.3 に試験地の計画平面図を示す。当試験地は、蛇行復元工事が開始された時点で、右岸側に河跡湖として残されていた旧蛇行河道を、河川改修によって直線化された現在の河道へと接続することで整備が為された。このような 2way 河道では、直線河道が洪水期の治水安全性を担保し、

新たに整備された蛇行河道が、平常時の豊かな生物生息環境の創出を担うものとして期待されている。

両河道の接続に伴い、流量が分配される分岐点周辺では、掃流力が低下することによって土砂堆積が誘発され、いずれは蛇行河道が埋没してしまう可能性があることと危惧されていた。このため、実際の施工にあたっては、十分な掃流力を確保するため、平常時流量の多くを蛇行河道側へと分配できるよう、直線河道と蛇行河道の分岐点から約 30m 下流に越流型の分流堰が設置された。この分流堰は、自然環境との調和に配慮し、化学繊維製の網状の袋材に平均粒径 20cm の自然石を詰めたものを 2 段に積み重ねることで構成された透水性構造物である。堰天端の標高は豊水流量時に越流する高さで設定された。

蛇行河道の上流区間は、過去の直線化工事の際に埋め戻されていたため、通水に際し、河床幅 20m、法勾配 2 割の単断面で掘削された。この時、掘削面には砂質土が露出することとなったが、植生の自然回復を期待し、護岸や植生等による河岸保護は行わず裸岸のままとされた。なお、この区間は、蛇行河道の通水前の環境を一部保存することを目的として、図 - 15.1.3 に示す箇所矢板を設置し、河道法線は若干下流側へと移動させている。また、この区間より下流側は、旧河道の形状が概ね残されていたことから、必要最小限の掘削に留め、試験地周辺に自生するヤナギ・ハンノキ等の植生で覆われていた河岸はそのまま残すなど、工事の施工に際しては既存の河川環境を極力保存するよう配慮されている。

施工当時の蛇行区間の延長は約 470m で、河床勾配は約 1/2500、また、直線区間の延長は約 220m で、河床勾配は約 1/1200 であった。

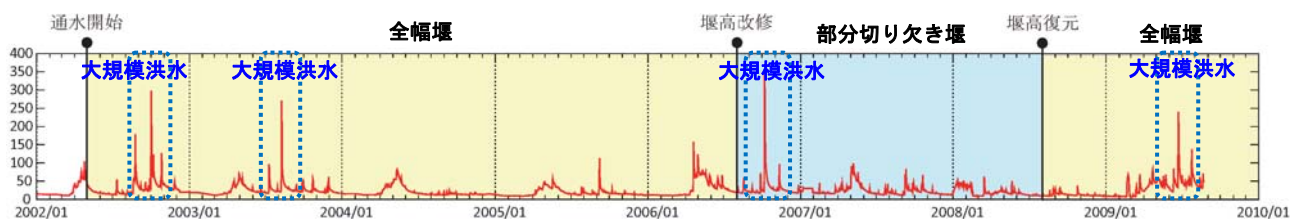


図 - 15.1.4 通水開始～現在（2009.10）までの標津川合流点観測所における観測流量

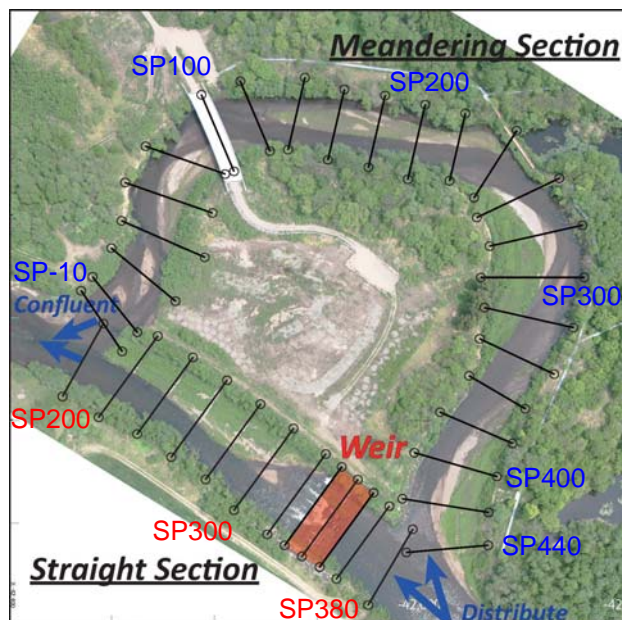


図 - 15.1.5 測量調査箇所

## 2.2 追跡調査の概要

当試験地では 2002 年の春から現在に至るまで、約 9 年という長期に亘る定期的な測量調査が行われてきた。その主な測量項目である河道横断形状と水位（同時水位観測）は図 15.1.5 に示すように、蛇行区間は SP-10～SP440 までの延長 450m、直線区間は SP200～SP380 までの延長 180m について、それぞれ 10～20m 間隔で計測されている（測量区間は実施年によって多少異なる）。以降、蛇行区間および直線区間とは概ねこれらの範囲を指すこととする。

標津川と武佐川の合流点下流 KP5.4km に位置する合流点水位流量観測所の流量変化を図-15.1.4 に示す。この図から、2002 年 3 月の通水開始後、2009 年 9 月までの 7 年半の間に、標津川では 250m<sup>3</sup>/s を超える大規模な洪水が計 4 回発生したことがわかる。当試験地では、これらのインパクトを受けて、河道形状に劇的な変化がもたらされることとなった。

なお、試験区間を流れる流量は、過去の流量観測の結果から、武佐川合流後の合流点観測所流量に対して、概ね 6～7 割程度となることがわかっている。

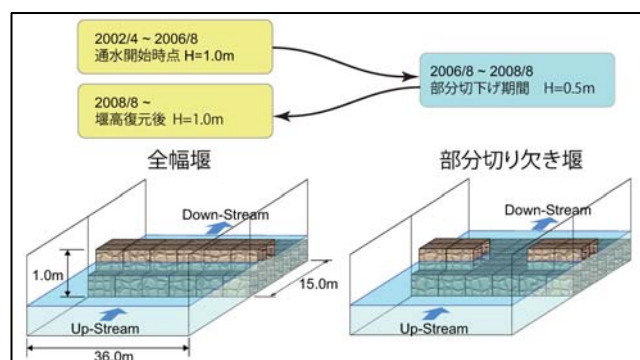


図 - 15.1.6 分流堰の形状変化

同図中の背景色の色分けは、分流堰の形状の違いを示している。この分流堰は蛇行区間への導水を促す目的で、直線区間の分岐点下流 SP330～SP350 に設置されており、これまで 2 度の人為的な形状変化が加えられた。当試験地は、2002 年の春に 2way 河道としての通水が開始され、それからの約 4 年間は、図 - 15.1.6 左に示すような高さ 1m の全幅堰となっていた。2006 年 8 月、蛇行区間の流速緩和と直線区間を遡上する魚類への配慮のため、図 - 15.1.6 の右に示すように、その中央部を高さ 0.5m、幅 10m で切り下げる人為的な操作が為されることとなった。しかし、その直後の 2006 年 10 月、戦後最大規模の大規模洪水が発生し、蛇行区間で急速な土砂堆積が進行しはじめ、やがて河道埋没の可能性が危惧されたことから、2008 年 8 月、堰の形状は再びもとの全幅堰の状態へと復元されることとなった。

このように、当試験地は 2002 年春の通水開始から現在まで、4 度の大規模洪水と 2 度の分流堰の形状変化を経験している。このような 2 つの外的インパクトが蛇行・直線両区間を流れる流況に大きな影響を与え、その結果として、河道形状に劇的な変化がもたらされたものと考えられる。

次に、このような流況変化と河道形状との応答関係を時系列で対比し、その影響および関係性について検証した。また、2way 河道の自律的維持を成す上での課題の抽出とその対策について検討を行った。

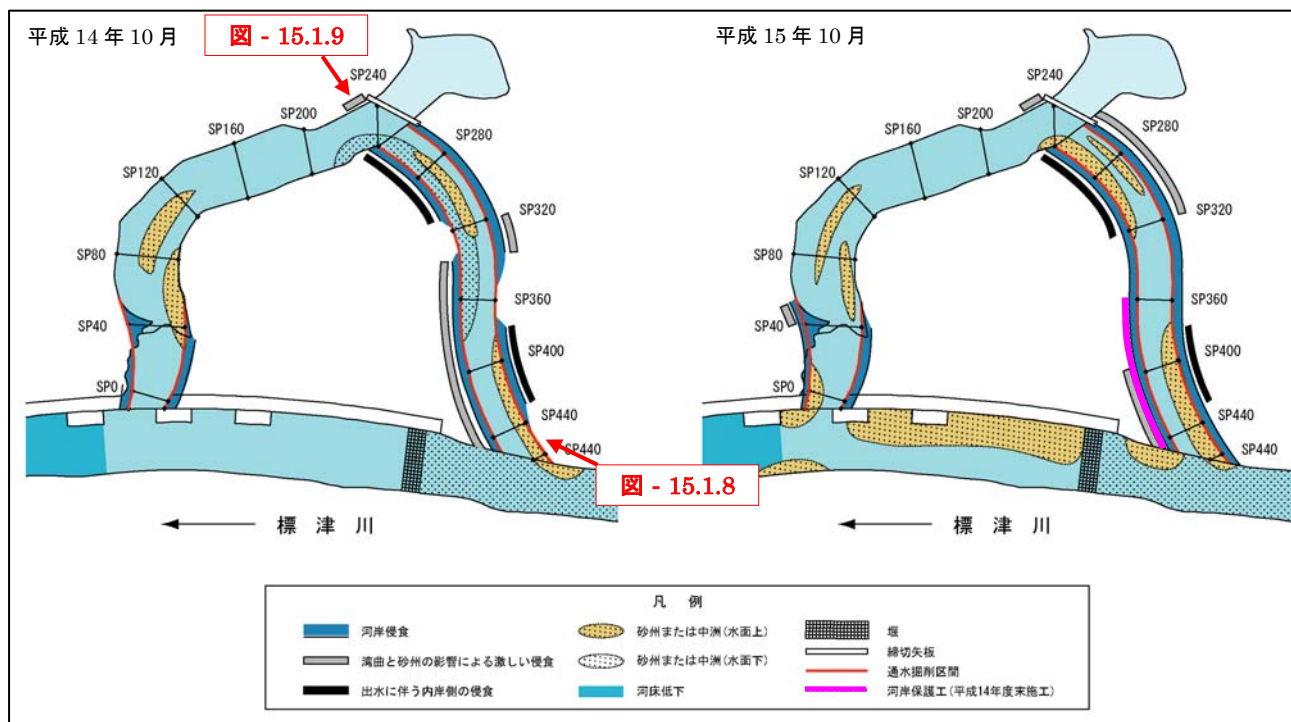


図 - 15.1.7 通水初期の蛇行区間における河岸浸食状況



図 - 15.1.8 分岐部：蛇行河道左岸側の河岸浸食状況（平成 14 年 7 月：大規模洪水前）



図 - 15.1.9 蛇行河道：局頂部内岸側および外岸側の河岸浸食状況（平成 14 年 7 月：大規模洪水前）

### 2.3 蛇行区間における河岸浸食の経緯

図 - 15.1.7 は、通水初期の段階で大規模な河岸浸食が発生した箇所を示しており、図 - 15.1.8、図 - 15.1.9 は通水開始から 4 ヶ月後（大規模洪水前）の現地状況である。これらの図が示すように、直線河道と旧川を接続するために新たに掘削された区間（SP260～SP440）では、平水および融雪出水時に水面下となる箇所が激しく浸食を受け、大規模洪水後、その状況はさらに進行することとなった。特に

分岐部周辺の蛇行区間左岸側では、この河岸浸食による影響は分岐点の崩壊が懸念される程の規模であった。これは、通水当初の掘削河道断面を裸岸としたことや、通水開始から大規模洪水を受けるまでの期間が非常に短かったことに起因すると考えられる。

ここで、年間の土砂収支の変遷について、蛇行区間の箇所毎の比較と、蛇行・直線両区間の総量の比較を、それぞれ図 - 15.1.10 および図 - 15.1.11 に示す。なお、図中のマイナス値は流出が堆積を上回っ

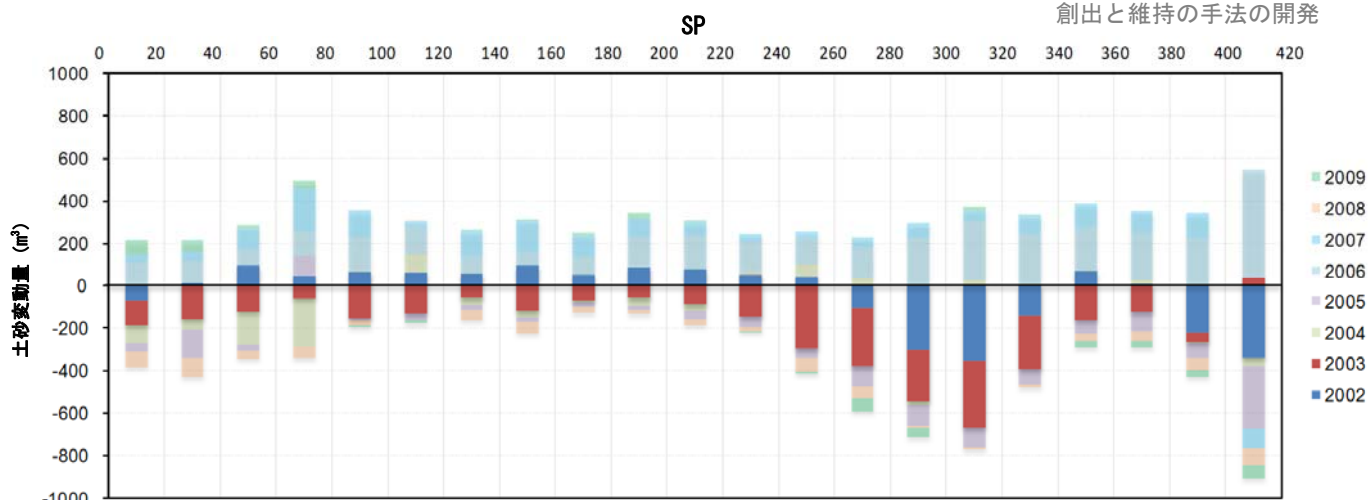


図 - 15.1.10 蛇行区間の土砂収支（各分割区間毎）変遷

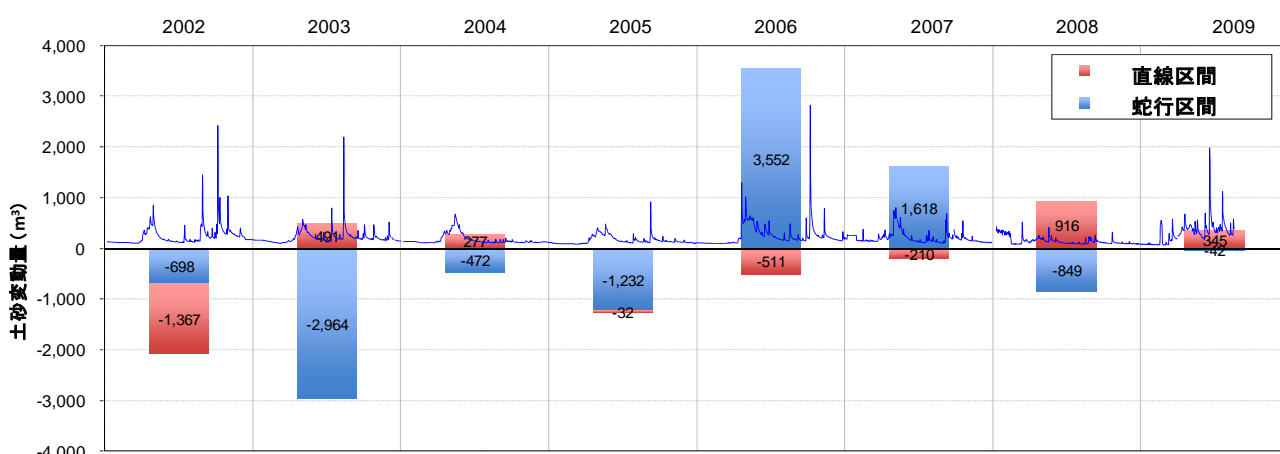


図 - 15.1.11 蛇行区間・直線区間全体の年間の土砂収支変遷

たことを意味する。通水初期（2002年～2003年）、蛇行区間上流域では約 $3,000\text{m}^3$ 程度の土砂流出があった。この期間は融雪出水に加えて2度の大規模洪水を受けており、河岸浸食の状況から、この期間の総流出量に占める河岸浸食由来の流出割合は非常に高かったものと考えられる。なお、標津川を下流する流砂量はKP5.4km付近で年間約 $60,000\text{m}^3$ 程度と推定されており、当試験地からの流出量は全体の0.3～5.0%程度であることから、これらの土砂流出が下流域へ与えた影響はかなり限定的であったといえる。

しかし、2way 河道を維持する上では、分岐点の保護は必要不可欠であるため、平成14年度末、分岐点の水衝部となる蛇行区間上流左岸側（SP440～SP360）に袋型根固め工を用いた護岸を敷設し、分岐部河岸を保護する措置がとられた。設置直後の状況を図-15.1.12に示す。これにより、分岐点は現在も安定した状態を維持している。

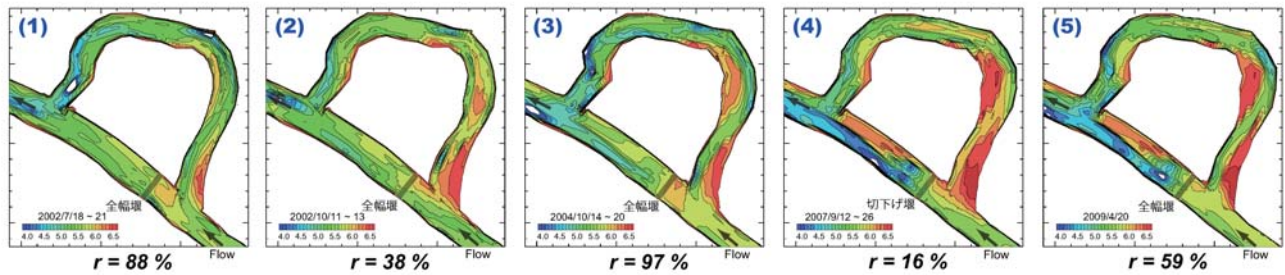
以上の河岸浸食や土砂収支にみられるようなダイナミックな河道形状の変化は、大規模洪水を伴う、



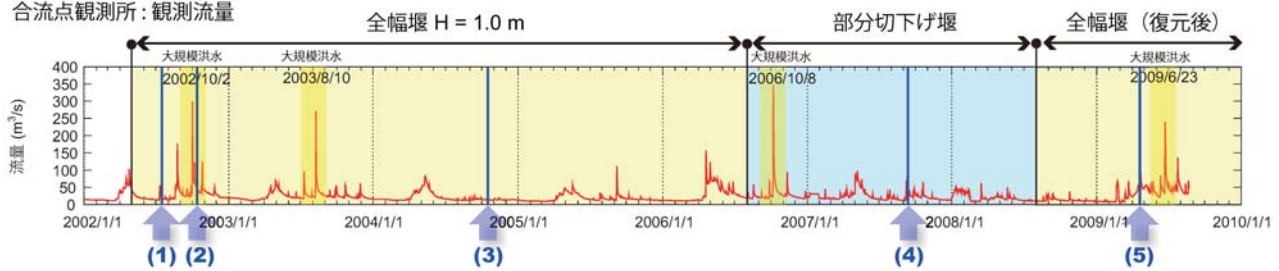
図 - 15.1.12 護岸設置状況（H14.11）

通水初期（H14～15）や堰高の切下げ直後（H18～H19）に限定され、経年的には時間経過とともに徐々に河道は安定した状態になることがわかった。なお、蛇行区間 SP260～SP300 の局頂部付近では、低水路内を蛇行する流路が外岸側に大きく振れ、現在も尚、河岸浸食が進行している状況にあるが、現状では河道維持上、特に憂慮すべき事態は生じていない。

河床高平面図



合流点観測所：観測流量



蛇行区間：河道変遷

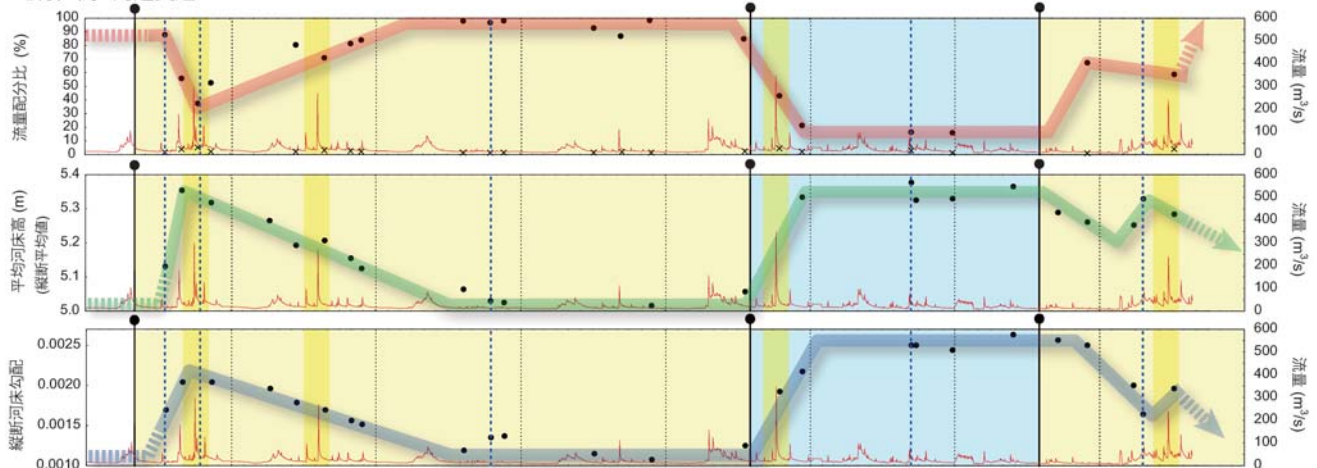


図 - 15.1.13 河道変遷（上段：河床高平面図、中段：観測流量、下段：蛇行区間の流量配分比・平均河床高・縦断河床勾配）

## 2.4 蛇行区間における土砂堆積の経緯

### 2.4.1 蛇行区間全体を総体的に検証

次に、蛇行区間を流れる流量と土砂堆積との関係について述べる。図 - 15.1.13 中段はすでに述べた合流点観測所流量で、図中の番号は上段の河床高平面図が計測された時期を示す。さらに、同図下段に示す3つのグラフは、上から、蛇行区間に分配された流量の本川総流量に対する割合（以降、流量配分比）と、蛇行区間の平均河床高の縦断平均値および平均河床勾配を示す。この3つのグラフ中の各点は、主に平水流量時（ $10\sim 30\text{m}^3/\text{s}$ ）において計測された測量データをもとに1次元解析によって求められた値であり、横断方向の変化は平均化されることとなるが、これらの点を結ぶ直線はそれぞれの変量の

時間的な遷移過程を端的に表現していると言える。これらの図から、大規模洪水に代表される流量変化と分流量の形状の違いが、蛇行区間の流量配分比および河道形状に与えた影響は以下に示すようなものであったと推測された。

- 大規模な洪水（ $250\text{m}^3/\text{s}$ 程度以上）を受けると、堰の形状に関わらず蛇行区間において大幅な土砂堆積が生じ、河床高は流入口から下流へ向かって逡減する形で大きく上昇する。さらに、これに起因して流量配分比は大きく低下する。
- 堰の形状が全幅堰である場合、平水流量が1年以上継続することで、蛇行区間に堆積した土砂は徐々に下流へと輸送され、やがて大規模洪水前の流量配分比および河道状況にまで回復する。

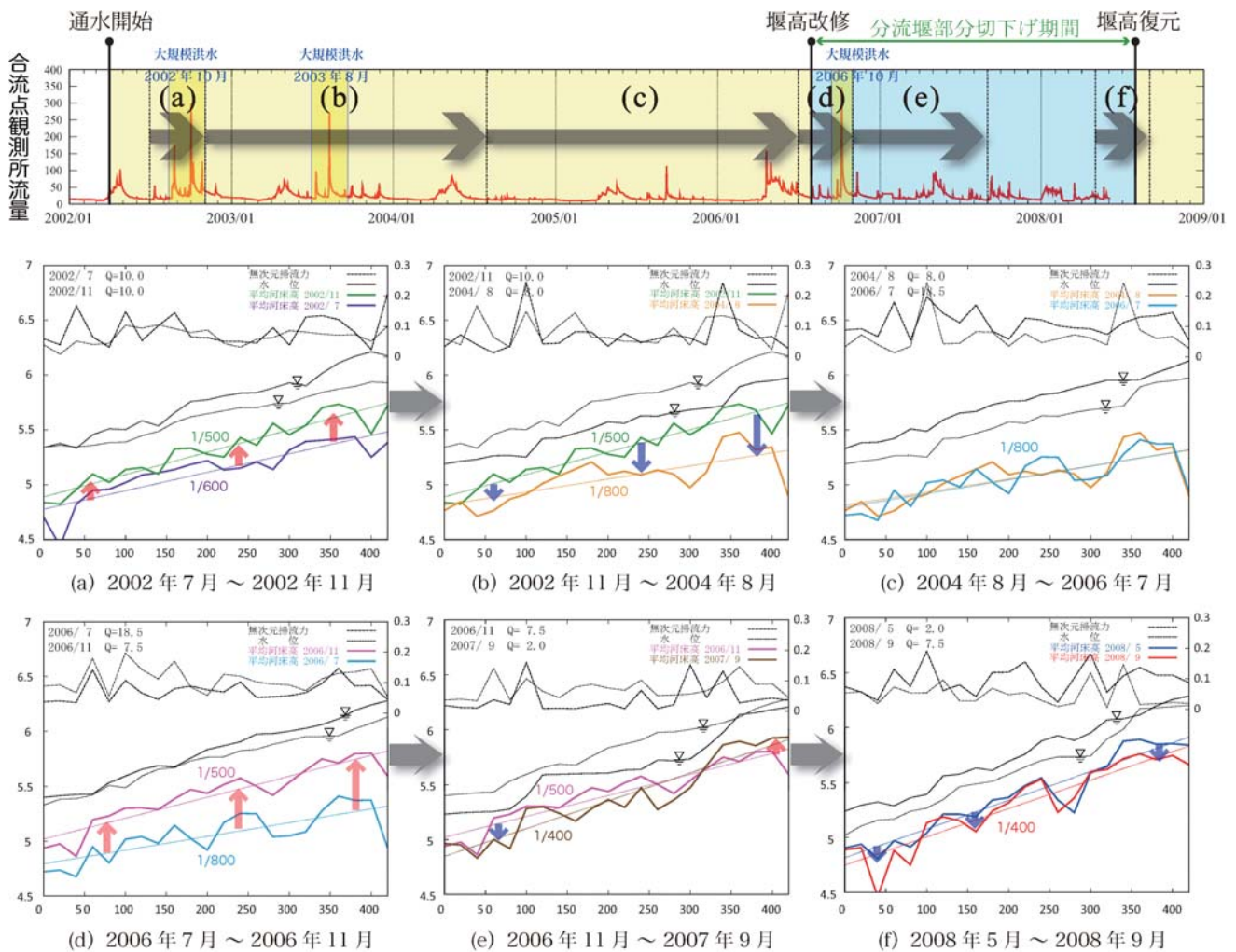


図 - 15.1.14 蛇行区間の平均河床高・河床勾配・水面形・無次元掃流力の時系列変遷

c) 一方、堰の高さが部分的に切り下げられた状態では、同じく大規模洪水後に堆積した土砂は、平水流量が1年以上継続した場合でも下流へ輸送されることはなく、河床高は高いまま維持され流量配分比も回復しない。

これらのことから、もし2006年10月の大規模洪水以降、堰の形状が全幅堰に復元されない状態のまま再度大規模な洪水を受けていた場合、蛇行区間は完全に埋没していた可能性があったと推測される。

また、図 - 15.1.13 下段の3つのグラフの変遷を対比した時、流量配分比と蛇行区間の河道形状は非常に良い逆相関の関係にあり、これは、蛇行区間の河道形状はその分配流量によって決定されることを示唆している。さらに、堰高の違いにより、大規模洪水後の河道形状の変化に大きな違いが生じたことは、堰高もしくは堰高を起因として形成された分岐部の河道形状が、流量配分比に対して大きな影響を持つことを意味している。

当試験地では、計画当初から、分配流量の低下とそれに伴う蛇行区間流入口付近の掃流力の低下が、分岐点周辺の土砂堆積を誘発し、最終的には河道の埋没を招く恐れがあると懸念されていた。先に述べたように、当試験地で実際に観測された現象も、堰高の切下げが分配流量の低下と土砂堆積を招き、逆に堰高の復元が分配流量の増加と堆積土砂の排出をもたらしたと類推されるものであった。

次は、この点について、図 - 15.1.13 下段に示した蛇行区間の平均河床高・縦断河床勾配に、無次元掃流力との関係性を加えた物理的な考察を行い、その変遷過程についてより詳細な検証を行うとともに、1次元河床変動計算を用いた土砂水理学的な検討も併せて行った。

#### 2.4.2 蛇行区間を縦断的に検証（掃流力検証）

図 - 15.1.14 の上段は流量の時系列変化、下段は上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。下段の図に示した土砂水理学的な諸量の時間的な前後関係は、それぞれの彩色および線幅で表わしている。図中に示す各値の算出方法は、まず実測の水位縦断形から不等流計算により推定した流量を上流端の境界条件とし、求められた水面形から各断面の平均河床高と平均水深を求め、さらにこれらをもとに無次元掃流力を算出した。この計算では剪断力の評価は Manning の式を用い、粗度係数は  $n=0.03$  としている。また、図中に示された河床勾配の値は、平均河床高を線形近似した際の傾きを用いて評価している。

次に、図 - 15-1.14 の下段に示す(a)～(f)のそれぞれの時点における各諸量の時間的な変遷過程とそれらの関係性について述べる。

#### a) 2002/7 ～ 2002/11

2002年4月に通水が開始された後、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ったことがわかる。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区間流入口付近では、無次元掃流力が洪水前に比べて上昇することとなり、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逡減するため、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、蛇行区間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区間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、そ

の直後の10月に発生した大規模な洪水によって、前述 a)2002/11 ～ 2004/8 の期間に起きた洪水と同様に、河道全体で非常に大規模な土砂堆積が発生し、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  $1/500$  へと再び急峻化する。この期間が他の大規模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域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、ここでは直線区間と蛇行区間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しない。

#### e) 2006/11 ～ 2007/9

その後約1年が経過し、河床高・河床勾配はともにほぼ平衡状態に達し、その状態は堰形状が再び全幅堰に復元されるまで維持される。流量条件の相違によって到達する河床高・河床勾配に違いはあるものの、前述 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が、さらなる土砂堆積をもたらしていたことは見逃せず、これが流入量の低下を一層助長し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に掃流力が減少し、蛇行区間は埋没傾向に向かっていっ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、分配される流量が回復したことで蛇行区間全体の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、徐々に上流区間の堆積傾向は解消され、平均河床勾配には大きな変化はないものの、全体的に河床高が低下していることがわかる。

以上のことから、蛇行区間における、洪水や堰高改変に伴う流量変化と、それに誘発された河道変遷過程は以下のようなものであったことがわかった。

まず、2002年や2006年に発生したような大規模洪水が、当試験地のような2Way河道を流下すると、蛇行区間全域で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関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大きく異なることから、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。

本研究で対象としている2Way河道では、すでに述べたように、分流堰の改変によって蛇行区間への分配流量が低下すると、蛇行区間全域で掃流力が低下し、流入口付近における土砂堆積が誘発される。一方で、分配流量が増加する直線区間では、相対的に河床低下する可能性があり、これは、蛇行区間への流入量の低下を一層助長することにもつながる。つまり、分流堰のわずかな改変によって、このような連鎖的かつ負の循環的な過程を招く恐れがあり、それは蛇行区間の埋没の可能性を次第に増大させていくことになると考えられる。

## 2.4.3 蛇行区間を土砂水理学的に検証

### 2.4.3-1 計算条件の設定

以上より、蛇行区間でみられた平均河床高の変動は、分配流量に応じた掃流力の大きさと密接に関係することがわかった。次に、1次元河床変動計算を用いた数値解析によって、土砂水理学的な見地から蛇行区間河床高の流量変動に対する応答特性について検証を行った。解析に用いた支配方程式を以下に記す。

水面形を求める不等流の基礎式は、

$$\frac{dH}{dx} + \frac{d}{dx} \left( \alpha \frac{V^2}{2g} \right) + i_e = 0 \quad (1)$$

流砂量の算出はMeyer-Peter & Mullerの式、

$$q_B = 8(\tau_* - \tau_{*c})^2 \sqrt{sgd^3} \quad (2)$$

河床変動量を求める流砂の連続式は、

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)B} \frac{\partial}{\partial x} (q_B B) = 0 \quad (3)$$

上式(1)、(3)についてそれぞれ差分計算を行う。

ここで、H：水位[m]、V：平均流速[m/s]、g：重力加速度[m/s<sup>2</sup>]、α：エネルギー補正係数、i<sub>e</sub>：エネルギー勾配、q<sub>B</sub>：単位幅当りの掃流砂量[m<sup>2</sup>/s]、τ\*：無次元掃流力、τ\*<sub>c</sub>：無次元限界掃流力、s：砂粒の水中比重[g/cm<sup>3</sup>](1.65)、d：砂粒の粒径[cm]、z：平均河床高[m]、t：時間[s]、λ：河床砂の空隙率(0.4)、B：川幅[m]とする。また限界摩擦速度には岩垣の式を用いた。

計算対象区間は蛇行区間の下流端から上流端までの総延長420mで、縦断方向の計算格子は20m間隔で設けられている横断測線と一致させた。また、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。図-15.1.14の(f)からもわかるように堰高復元前の河床高は概ね平衡状態に達していたと考えられることから、2008年5月の河床形状を同年8月に見立て、堰形状の復元が行われたこの8月から、その30日後の9月までを計算対象期間とした。

上流端の境界条件となる流量には以下の2つの条件を与える。(1)再現計算として、堰形状の復元に伴う蛇行区間への流入量増加を想定した条件ではQ=10.0m<sup>3</sup>/sを与え、(2)試行計算として、切欠きが維持され、流量が増加しなかった場合を想定した条件ではQ=3.0m<sup>3</sup>/sを与えた。なお、今回行った計算は単一粒径一様砂礫河床を前提とした掃流砂のみを対象としており、平均粒径には試行計算の結果、最も実測値に近い解析結果が得られたd=0.60cmを使用した。下流端水位は、2008年5月と9月に実施された水位・流量の観測値と、下流端の平均河床高を流量0における下流端水位とした値を、最小2乗法によって線形近似した直線から、流量10・3m<sup>3</sup>/sに対応する水位を求め、これを使用した。

以上の条件のもと、計算時間間隔10sで河床高の更新を行い、これを30日間(2,592,000s)繰り返した結果を次に示す。

### 2.4.3-2 計算結果

図-15.1.15左図の下段に示す青線は、堰高復元直後の8月を想定した計算開始時点の実測平均河床高で、赤線は復元後1ヶ月が経過した9月の実測平

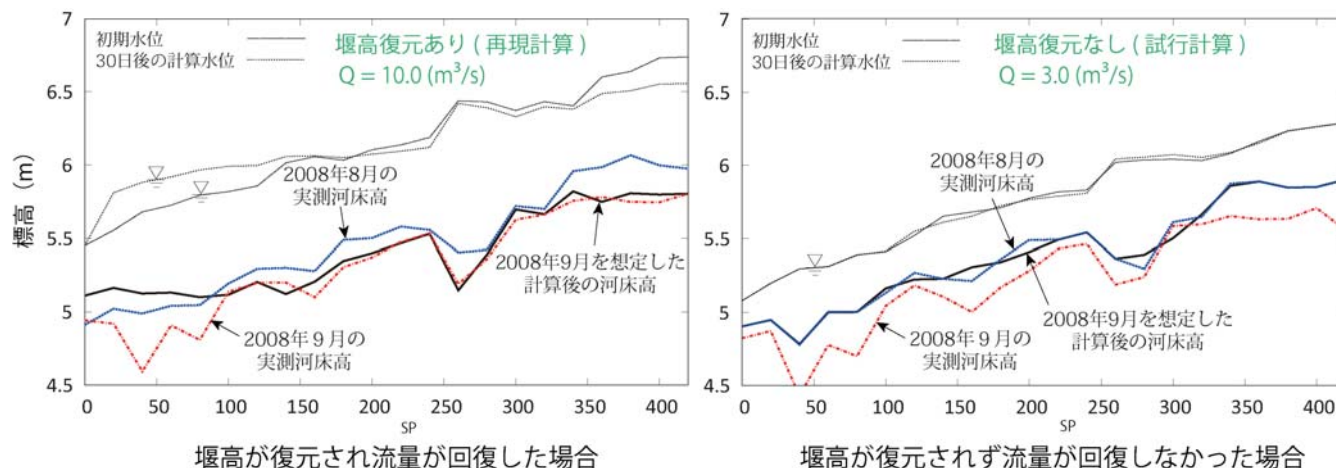


図 - 15.1.15 1次元河床変動計算結果 (再現計算 :  $Q=10.0\text{m}^3/\text{s}$ 、試行計算 :  $Q=3.0\text{m}^3/\text{s}$ )

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。下段黒線が流量  $10.0\text{m}^3/\text{s}$  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。特に蛇行区間上流域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ことがわかる。測量結果のみから推測した前節までの結論と同様に、堰高の復元に伴う蛇行区間への流入量の増加が掃流力を上昇させ、蛇行区間内に堆積した土砂を下流へと流掃したことが、この計算結果によっても示された。

一方で、流量のみを  $3.0\text{m}^3/\text{s}$  に変え、それ以外は同じ条件で計算を行った結果を図 - 15.1.15 右図に示す。図中の線種および彩色は  $10\text{m}^3/\text{s}$  と同様である。この図から、黒線で示す計算河床高と、青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かったことがわかる。

これらの結果から、2008年8月に分流堰の堰高復元が実施されなかった場合、蛇行区間への分配流量は回復せず、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下流へと掃流することができない状態のままとなることが示された。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、再び大規模洪水によるインパクトを受けたとき、蛇行区間が完全に閉塞してしまう可能性があることがこの計算結果によっても裏付けられた。

## 2.5 河道変遷履歴 (砂州形成・植生侵入)

### 2.5.1 直線区間

蛇行区間の埋没を避けるためには、平水流量時、全流量のうち8~9割程度を蛇行区間へと導水する

必要があるため、直線区間へ分配される流量は平水時で概ね全流量の1~2割程度となる。このため、2way 河道の施工に伴って流量が大幅に減少する直線区間では、川幅の狭小化に伴う砂州の発達とその固定化が顕著となることがわかった。

図 - 15.1.18、図 - 15.1.19 に、通水開始から現在までの垂直写真および河床高平面図を示す。図 - 15.1.18 に示す写真は、撮影時期によって流れる流量には多少の違いはあるが、概ね平水流量時に撮影されたものである。これらの写真と図の対比から、蛇行・直線両区間における砂州の形成過程と砂州上への植生侵入時期をある程度推定することができる。

まず、直線区間では、通水開始から1年程度が経過した2003年6月の段階で、分流堰下流右岸側の砂州の原型がすでに形成されていたことがわかる。その後約1~2年の間にヤナギが徐々にこの砂州へと侵入しはじめ、2006年8月の堰高切下げによる流量増加が大きな契機となって、右岸側の砂州と左岸側の流路との境界(標高差)が明瞭になり、流路および砂州が固定化されるとともに、やがて砂州上のヤナギの生長と定着も進行していったものと推察される。図 - 15.1.16、図 - 15.1.17 に示すように、陸地化した砂州上では、発芽したヤナギが現在も年間20~30cm程度の速度で生長を続け、樹林化の傾向を強めていることがわかっている。

このような砂州の固定化と砂州上におけるヤナギの樹林化は、流下断面積を縮小し、洪水流の流下を阻害することで水位上昇を招く危険性がある。特に、2way 河道においては、洪水期の流量の大部分が直線河道を流下することとなるため、分流堰下流右岸に形成された砂州上でのヤナギの樹林化傾向は、今後も、継続的にその動向を注視していく必要がある。

15.1 蛇行復元等による多様性に富んだ河川環境の創出と維持の手法の開発



図 - 15.1.16 砂州上で生長するヤナギ (2009.8)

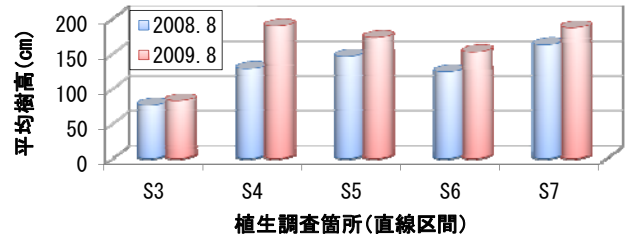


図 - 15.1.17 ヤナギの樹高比較

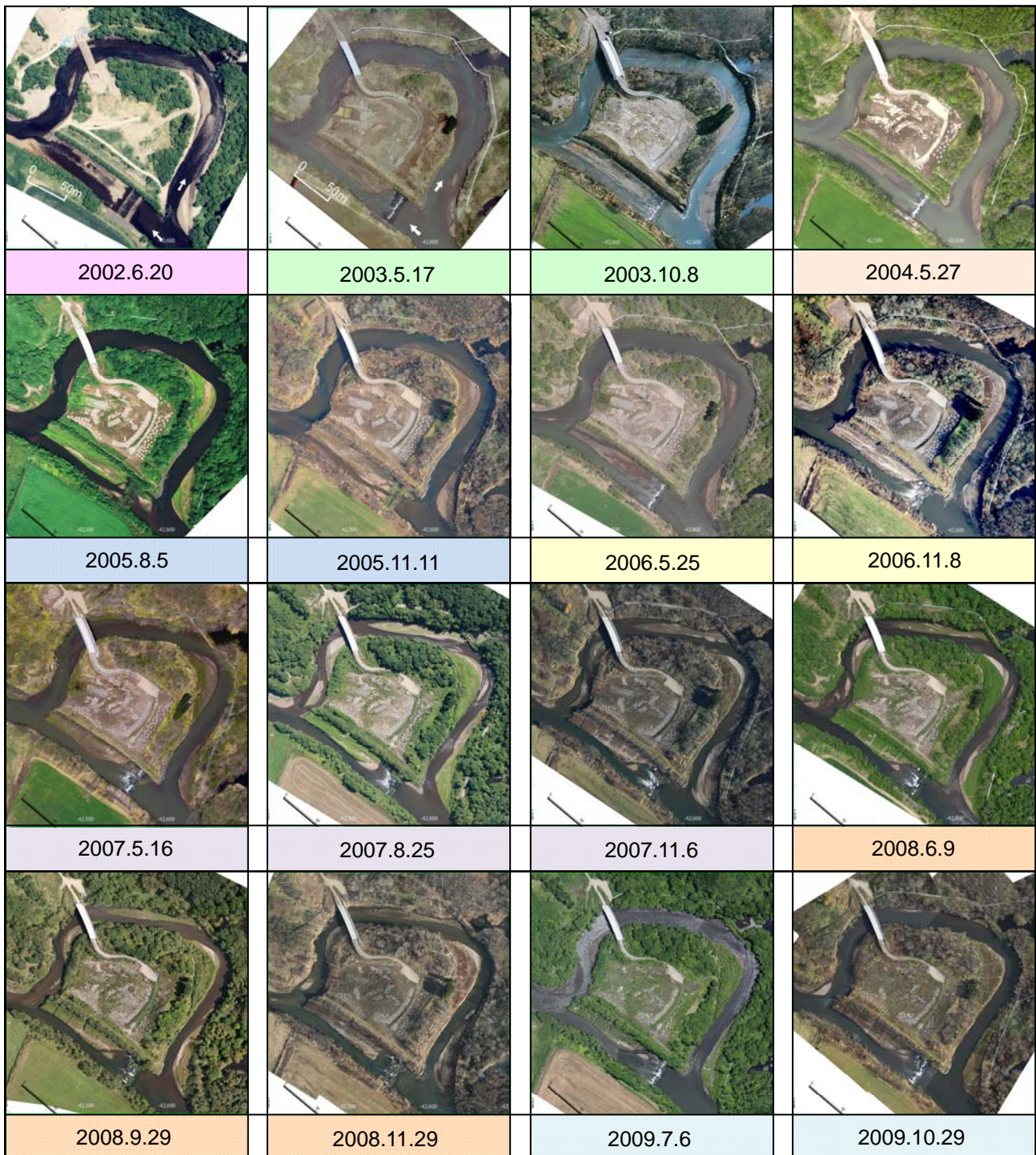


図 - 15.1.18 疑似垂直写真からみる河道変遷

15.1 蛇行復元等による多様性に富んだ河川環境の  
創出と維持の手法の開発

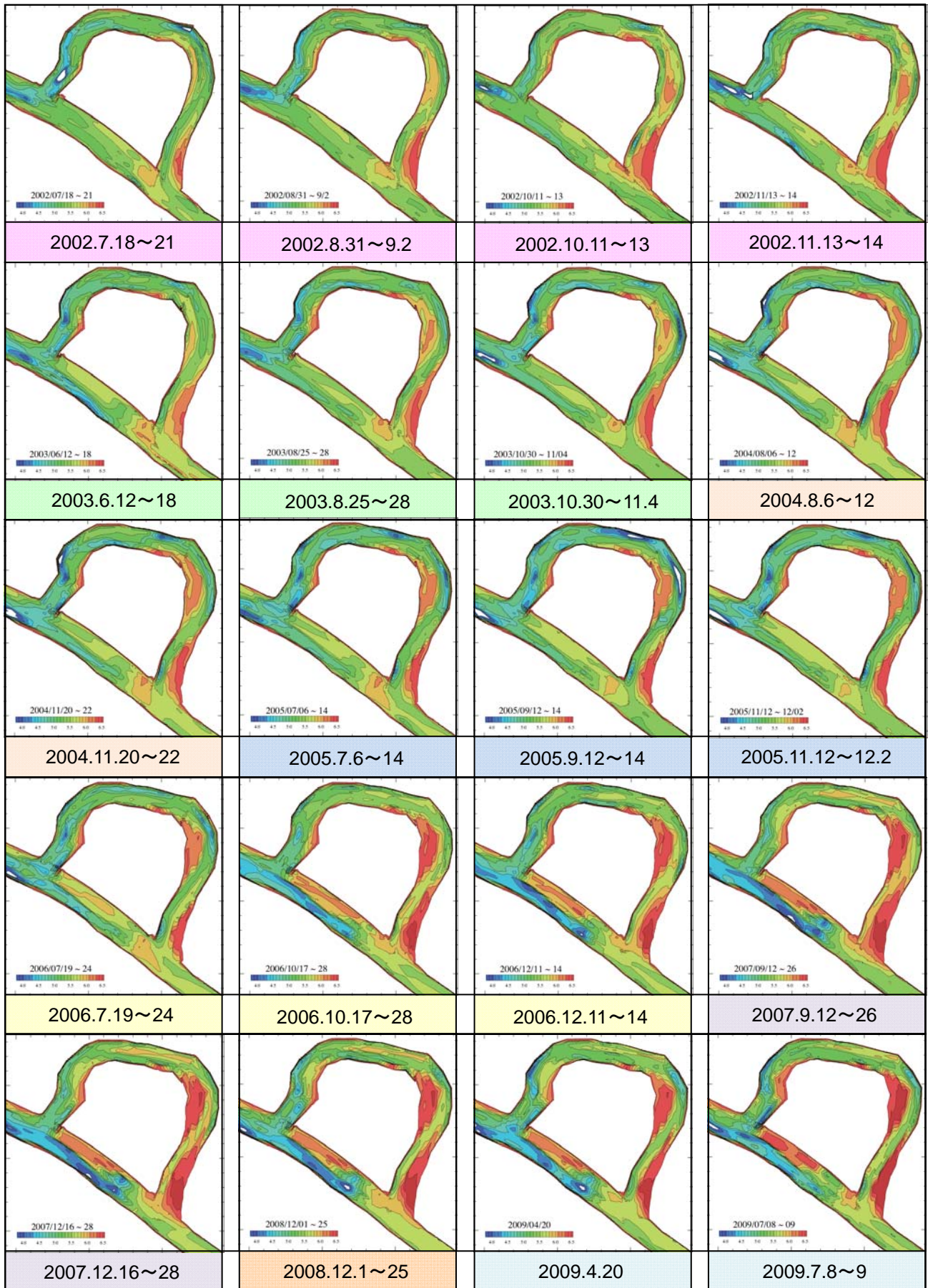


図 - 15.1.19 河床高平面図からみる河道変遷

## 2.5.2 蛇行区間

一方、蛇行区間では、通水開始から1年半が経過した2003年8~10月の段階で、現在最も発達している2つの砂州の原型がすでに形成されていたことがわかる。その後約1~2年の間にヤナギが徐々にこの砂州上に侵入しはじめ、2006年8月の堰高切下げによる流量減少が大きな契機となって、その生長と定着が急速に進行し、やがて固定化されていったことがわかる。

このように、蛇行区間においても直線区間同様に、近年、砂州上で生長するヤナギの樹林化が顕著となってきており、流下断面の縮小といった直接的な影響のほか、砂州の発達および固定化を助長するなどの間接的な影響を伴って、これが今後大きな流水の流下阻害要因となる可能性が危惧される。

ここで、平常時、蛇行河道へ十分な流水を導くに際して、その影響が最も懸念される蛇行河道流入口付近(分岐部右岸)に形成された砂州を対象として、過去の現地調査結果を検証し、植生侵入およびその生長が砂州形成過程に与えた影響について考察を行った。

### 2.5.2-1 植生侵入と砂州形成過程

#### 2.5.2-1-1 検証・考察手法

検証および考察は、図-15.1.20の赤枠で示す分岐部右岸の砂州(以降 Site1)を対象とし、当箇所においてこれまでに計測されてきた河道断面形状(SP420)と植生の生育状況を示す写真を、流量変化等の外的インパクトの生起時期と併せて時系列で対比し、植生侵入およびその生長過程に各因子がどのように作用していたかについて考察を行った。

また、同図赤丸および四角でプロットされた箇所における地質調査、植生調査の結果をそれぞれ整理し、植生の生長と土砂堆積厚およびその土質特性との因果関係についても併せて考察を行った。

#### 2.5.2-1-2 外的インパクトと植生侵入・生長過程

当試験地で確認された植生の樹種構成は、ほぼ全てヤナギ類で占められており、オノエヤナギとエゾノキヌヤナギが優先種であった。一般にヤナギ類は先駆性植物で非常に生長が速く、特に積雪寒冷地では、融雪出水期とヤナギ類の種子散布時期とが重なるため、攪乱を受けた直後の砂州など、比較的冠水頻度が高く水分の豊富な箇所に対して、風や流水によって運ばれた種子や実生の定着が起り易いといわれている。

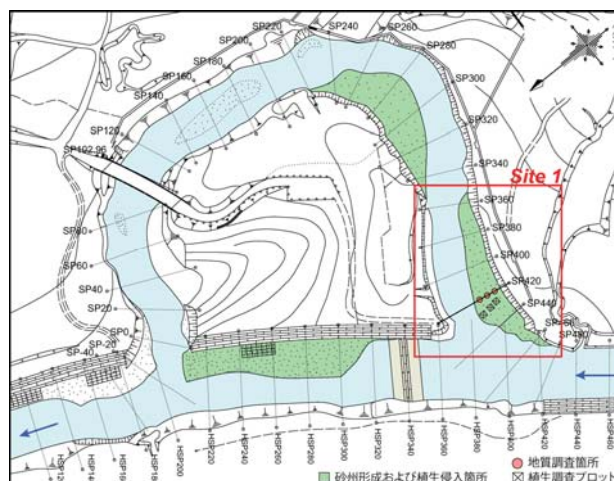


図 - 15.1.20 調査箇所 Site1

このようなヤナギ類の出芽特性も考慮し、流量変化等の外的インパクトの生起時期とそれに起因した砂州の形成と攪乱、および植生侵入とその生長過程を時系列で対比した結果を図-15.1.21に示す。

この図から推察されたことを以下にまとめる。

- 2002年の融雪出水によって現在の砂州の原型が形成され、その後、2度の大規模洪水を受けることで、砂州表層の浸食と出芽した稚樹の流失が繰り返された。
- 2004年の融雪出水によって堆積した土砂の上にヤナギの種子や実生が定着し、出芽・生長を開始した。
- 融雪出水を受けると、主流路で生じる河床低下とは逆に、砂州上では土砂堆積が生じることとなるが、Site1で観測された規模の土砂堆積では、ヤナギの生存に大きな影響を与えることはなかった。
- 2009年に大規模な洪水を受けるが、2002・2003年の大規模洪水後とは状況が全く異なり、砂州表層の浸食・攪乱がないばかりか、それとは逆に平均10cm程度の土砂堆積がもたらされた。このことは、植生の生長は、砂州表層の被覆効果を高め、浸食・攪乱作用を抑制するほか、洪水時には植生域内の流速を弱めて掃流力を低下させ、土砂堆積を誘発したものと推察された。

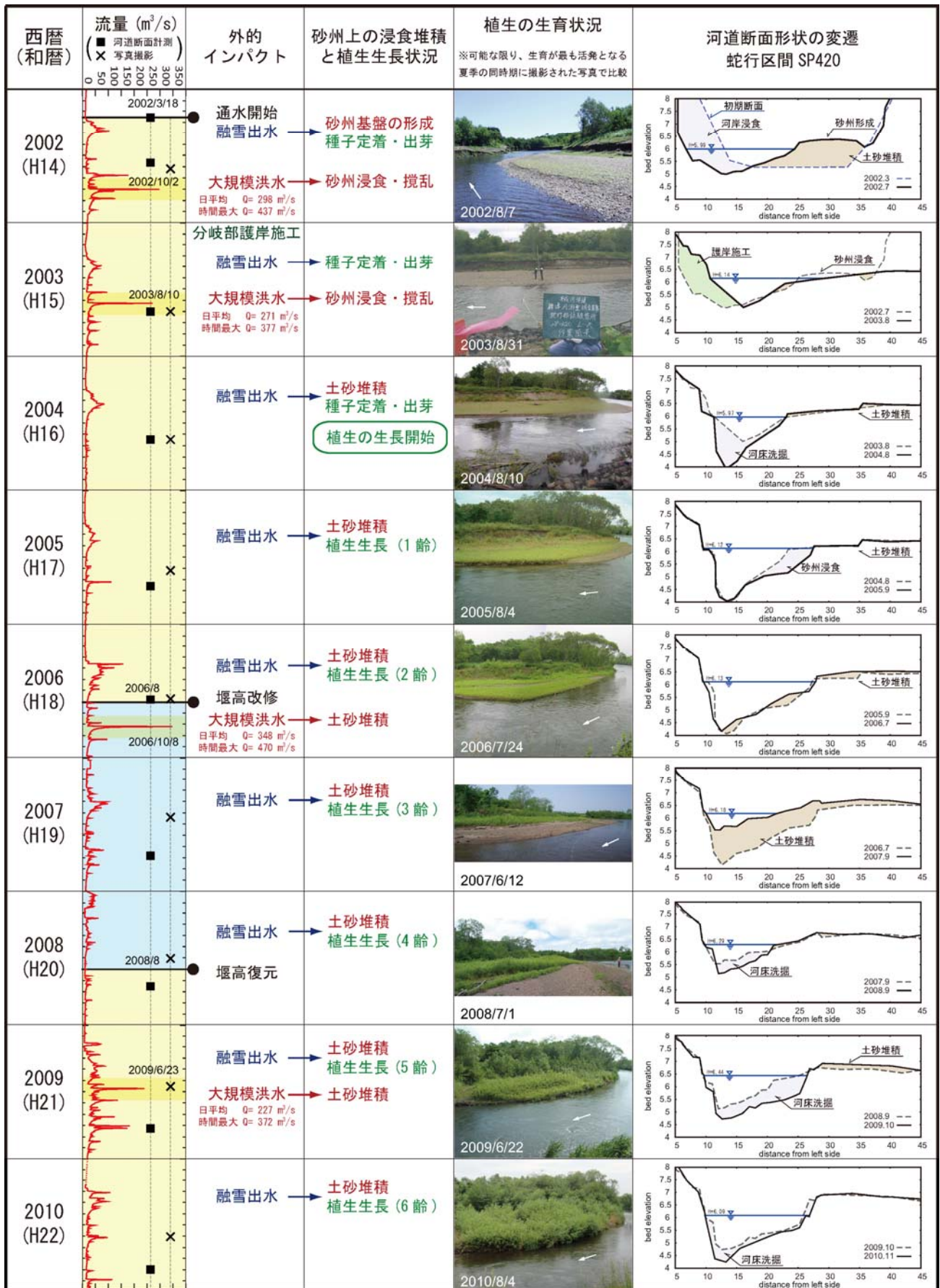


図 - 15.1.21 外的インパクトの生起時期と河道断面形状および植生侵入・生長過程の時系列比較

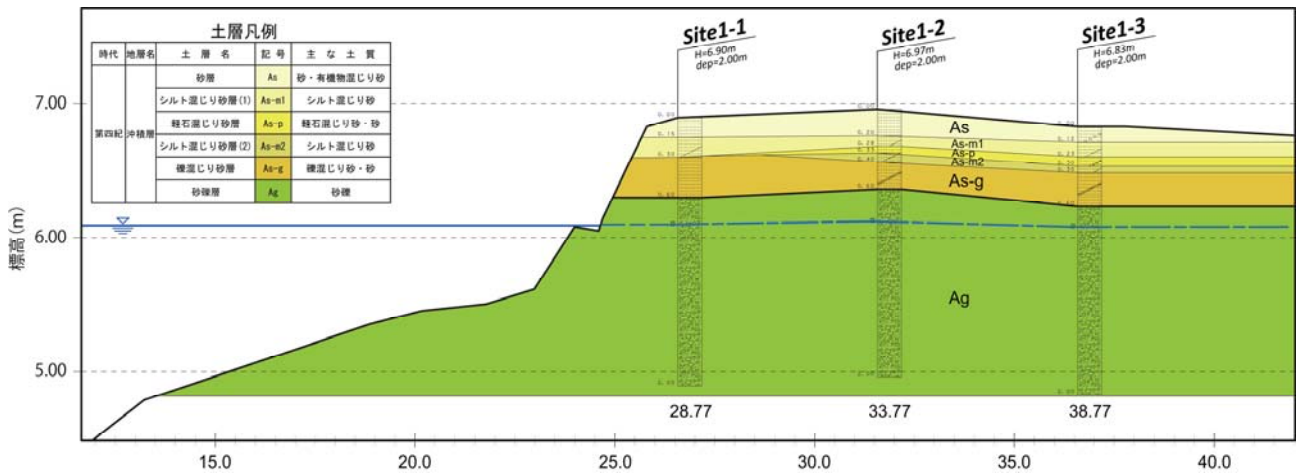


図 - 15.1.22 土層断面図 (砂州) ~ Site1 SP420 2010 年 11 月調査～

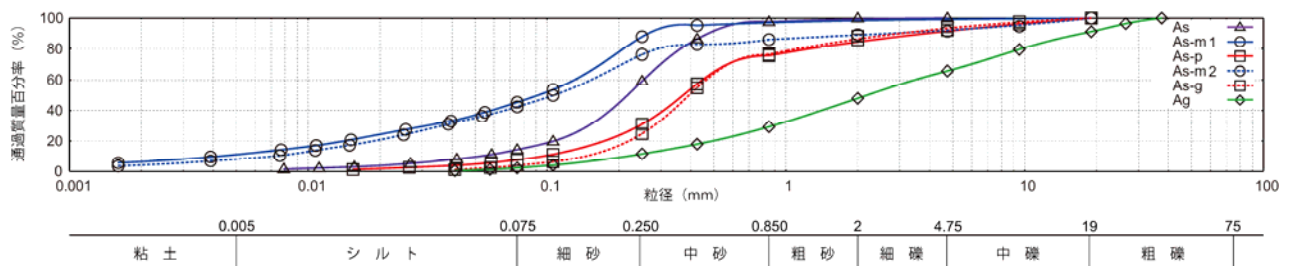


図 - 15.1.23 土壌サンプリングの粒度分析結果 (粒径加積曲線)

### 2.5.2-1-3 地質調査結果

次に、図 - 15.1.20 の赤丸で示した箇所におけるサンプリング調査の結果を図 - 15.1.22 に示す。また、この土層断面図に示される各層を対象に実施した粒度試験結果を図 - 15.1.23 に示す。

これらの図から、Site1 に形成された砂州は、最下層の砂礫層 (Ag) とその上に堆積した砂層 (As) の 2 種類に大別することができ、この図と過去の横断面図との重ね合わせから、この 2 つの土層の境界は 2004 年 8 月から 2005 年 9 月の時期に近いことがわかった。つまり、最下層の砂礫層は、通水直後の融雪出水やその後 2 度にわたる大規模洪水などによって砂州の浸食と攪乱を繰り返し、河床形状が大きく変化していた時期に形成されたものであるため、細流分が洗い流され砂礫質になったものと考えられる。また、この砂礫層の上に堆積した砂層についても同様にその形成時期を特定すると、As-g, As-p, As-m2 の下から 3 層は、2006 年の融雪出水および同年 10 月の大規模洪水によるもので、その上の As-m1 は 2007 年の融雪出水、さらに最上層の As 層は 2009 年の大規模洪水によるものとそれぞれ推定された。各砂層の粒度分布が生起時期によって変化する理由



図 - 15.1.24 土層断面写真 (2009.7.17)

は特定できなかったが、少なくとも砂礫層と砂層の境界は明確に存在し、形成された砂礫質の砂州上に砂質土の堆積が始まる時期は、植生が砂州上に侵入し生長を始めた時期 (2004 年 8 月) と概ね一致することがわかった。

図 - 15.1.24 に示す写真は、図 - 15.1.22 に示す砂層および砂礫層の断面を川側から撮影したものである。写真からもわかるように、各層は目視でも容易に判断できるほどの明確な違いを有していた。

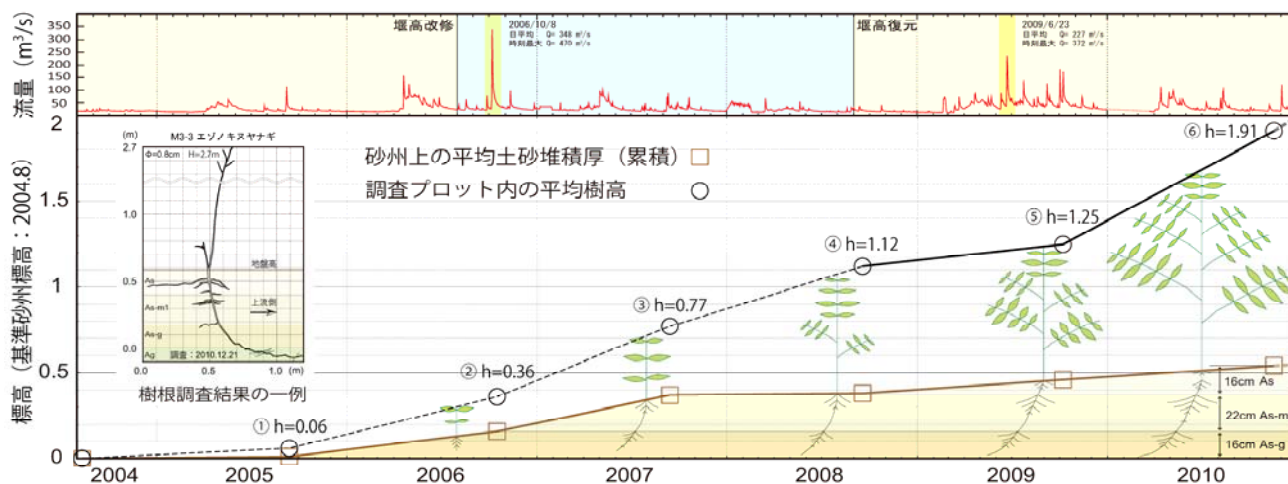


図 - 15.1.25 ヤナギの生長と土砂堆積



図 - 15.1.26 ヤナギの生長過程 (Site1)

#### 2.5.2-1-4 植生調査結果

次に、図 - 15.1.20 の四角で示した箇所における植生調査結果について述べる。図 - 15.1.25 の丸点は Site1 の調査プロット (2m×2m) 計 3 箇所で計測された全てのヤナギについて、その平均樹高を算出した結果である。なお、2004 年～2007 年の間は植生調査が行われていないため、この期間は図 - 15.1.26 に示す現地撮影写真と 2008 年～2010 年の値をもとに推定した。

先に述べたように Site1 において、ヤナギの本格的な生長が始まった時期は、砂州上に砂質土の堆積が始まった 2004 年 8 月頃であることから、この図はこの時期を起点とし、標高についても同様に、礫質層と砂層の境界にあたる 2004 年 8 月の砂州の平均標高を基準面として表示している。よって、図中の四角点は、各年の砂州の平均標高をもとにした、

基準面からの平均土砂堆積厚を表している。

また、図中のヤナギの模式図は同じく図中に示す樹根調査結果と、図 - 15.1.26 に示す、各年に撮影された Site1 の植生育状況の写真を参考に、ヤナギの生長過程をイメージしたものである。樹根調査の結果から、調査プロット内の平均的な樹高のヤナギは、図に示すように、砂礫層と砂層の境界付近に根の末端があり、下流側に倒れ込むような形で根が伸びている場合が多いことがわかった。これは、出水時、流れの影響によって倒伏したヤナギの上に土砂が堆積し、埋没して地下茎となった部分がやがて不定根となり、堆積した層の地表付近で新たな芽・根を伸ばすという一連の過程を、出水による土砂堆積を受けるごとに繰り返してきたためであると推察された。



以上、植生侵入が砂州形成過程に与える影響について、以下に結論をまとめる。

- 植生の生長が未熟である場合、大規模出水によって容易に砂州は浸食され植生は定着しない。
- 植生の生長は砂州表面の被覆効果を高めて浸食作用を抑制するとともに、出水時、植生域内の流速を弱めて掃流力を低下させ、土砂堆積（砂質土）を誘発している可能性が示唆された。
- 出水時、流れの影響によって倒伏し、その上に土砂が堆積した場合でも、埋没して地下茎となった部分はやがて不定根となり、堆積した層の地表付近で新たな芽・根を伸ばし生長を続ける。
- 植生の生長に伴って砂州表面の平均標高は年々増加傾向を示す。

以上、蛇行区間上流右岸側の砂州において確認された砂州形成および植生侵入状況は、直線区間右岸側の砂州についても、同様の現象が確認されている。

## 2.6 2Way 河道の実施における課題と対策

### 2.6.1 課題抽出

以上、蛇行復元試験地における追跡調査から得られた各種計測データおよびその解析結果をもとに、過去 9 年間の河道変遷履歴について河岸浸食、土砂堆積、砂州形成（植生侵入）の 3 つの観点から考察を行った。その結果、2way 河道の自律的維持を成す河道設計を行うためには、特に以下に記すことに留意する必要があるといえる。

- 河岸浸食の進行によって、分岐部が崩壊し 2way 河道自体の維持が困難となる可能性がある。
- 蛇行区間への土砂堆積の進行によって流入口が閉塞し、やがて河道が埋没してしまう可能性がある。
- 直線区間における砂州の発達・固定化によって、砂州上で樹林化したヤナギが流下能力を低下させる可能性がある。

当試験地において、その可能性が示唆されたこれら 3 つの現象に対し、以下に示す 4 つの課題を挙げてそれぞれの対策について検討を行う。

- |                                   |     |         |
|-----------------------------------|-----|---------|
| ① 分岐部における河岸浸食                     | ... | 2.6.2-1 |
| ② 新規掘削箇所における河岸浸食                  | ... | 2.6.2-2 |
| ③ 蛇行河道における土砂堆積                    | ... | 2.6.2-3 |
| ④ 直線河道における砂州の固定化<br>と砂州上でのヤナギの樹林化 | ... | 2.6.2-4 |

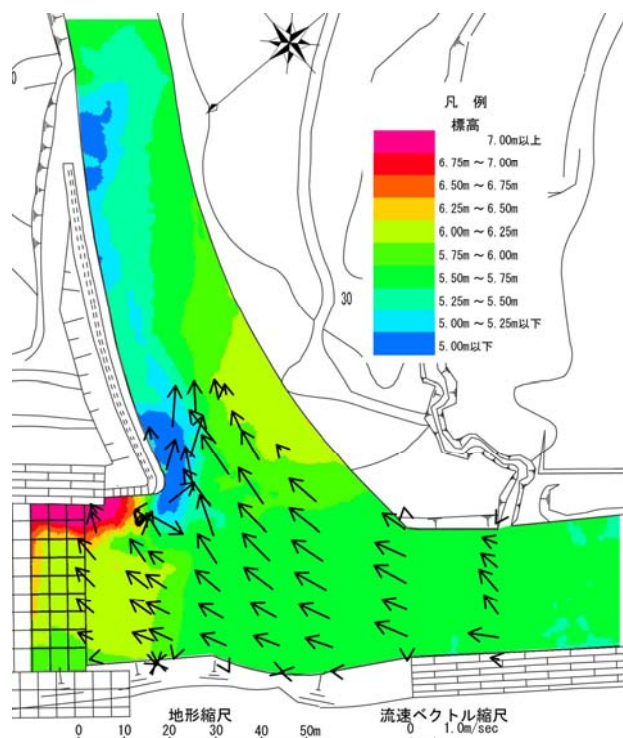


図 - 15.1.27 分流部の平面流速分布 (2003.5)

### 2.6.2 対策検討

#### 2.6.2-1 分岐部における河岸浸食

分岐部における河岸浸食が進行すると、分岐堰上流を右岸側から回り込む水みちが形成されることで、2way 河道の分流機能を著しく低下させ、2way 河道の維持自体を困難にする可能性がある。

図 - 15.1.27 に通水開始から約 1 年後（護岸施工後）の低水流量時における流速と河床高の状況を示す。分岐部の河岸浸食は、図中の流速ベクトルが示すように、蛇行河道へと導かれる流れ自体の湾曲と、内岸側に形成された砂州の影響によって、その外岸側で大きな強制渦型の偏倚流と局所的な 2 次流などが発生することに起因する。このため、分岐点の形状を長期的に維持していくためには、水衝部となる区間を護岸によって保護する必要がある。既に 2.3 で述べたように、現地では H14 年度末に水衝部となる区間（延長 80m）については護岸敷設による河岸保護が実施されており、施工から 9 年以上が経過した現在も河岸は設置当時のまま安定した状態を維持している。しかし、図 - 15.1.27 が示すように、護岸施工後、水衝部となる箇所ではより大きな 2 次流が発生することや、河岸崩落による土砂供給が無くなるため、さらに激しい洗掘を受ける可能性があり、護岸の敷設に際しては根入れ深さを十分に確保する必要がある。

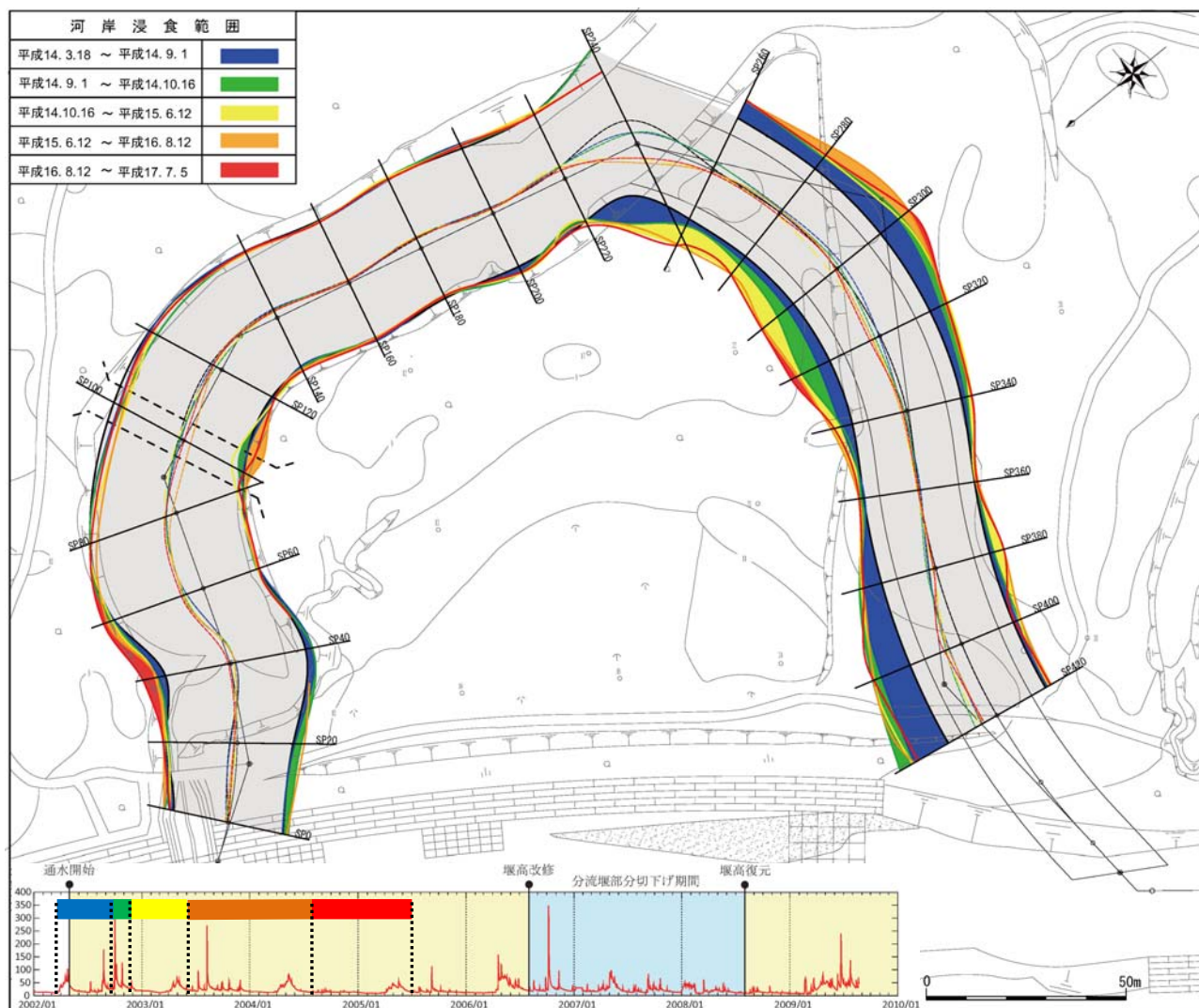


図 - 15.1.28 河岸浸食変遷 (H14.3~H17.7)

### 2.6.2-2 新規掘削箇所における河岸浸食

図 - 15.1.28 は、通水初期において、蛇行区間で大きな河岸浸食がみられた時期とその範囲、さらにそれぞれの時期に対応した流量の変遷を示す。この図から、大きな河岸浸食がみられた箇所は、旧川接続のために新たに掘削された区間に集中しており、旧川跡をそのまま利用した区間ではほとんど変化が起きなかったことがわかる。

また、全浸食量の大部分は、2.3 で述べた土砂収支の変遷からもわかるように、通水直後の融雪出水とその後の1度目の大規模洪水を含む約1年余りの期間に集中している。その後は、局頂部右岸側 (SP280~300) と下流域 (SP40, SP100) でわずかに浸食がみられる程度であり、この期間にも融雪出水や2度目の大規模洪水を受けていたことを鑑みれば、通水直後の大規模な変化は、掘削箇所の初期断面が試験地の河道状況や流況になじむまでの遷移過

程で起きたものと思われる。

通水直後にこれほど大規模な浸食が起きた理由は、標津川流域の中上流部は火山性の土砂で構成されており、一般的な土砂に比べ比重が軽い ( $1.44\text{g/cm}^3$ ) ことや、通水開始時点の掘削箇所の河岸は、法勾配2割の裸岸であったこと、さらに通水開始直後から比較的大きな規模の出水を受けたことなどが考えられる。現時点においても、SP360より下流の区間では、湾曲した流路の外岸側において蛇行の発達に伴う流れの偏倚とそれに起因した河岸浸食がみられるが、その規模は通水初期と比べて非常に緩やかであり、近年は土砂収支の面からも平衡状態に達しつつあることがわかっている。したがって、蛇行河道上流左岸側 (SP360~440) は分岐点維持のため、前節で述べた護岸による河岸保護が必要不可欠となるが、これよりも下流の区間については、現状では特段の対策を要しないと推察された。

### 2.6.2-3-1 蛇行河道の土砂堆積（1次元解析）

#### 1) 流量配分比の遷移過程

蛇行区間における土砂堆積の経緯およびその要因については既に 2.4 節で述べた通りであるが、これを以下に簡単にまとめる。まず、大規模洪水を受けると、蛇行区間では分流堰の形状に関わらず大幅な土砂堆積が生じ、一時的な河道埋没傾向がもたらされる。しかし、その後の融雪出水および平水規模の流量が、蛇行区間へ適切に分配される状態（分流堰が  $H=1\text{m}$  の全幅堰の状態）であれば、それらの堆積土砂は徐々に下流へと掃流され、一定期間（1～2 年程度）を経て、河道は元の河床高および河床勾配へと復元していく。一方、蛇行区間へ適切な流量が分配されない状態（分流堰が部分的に  $H=0.5\text{m}$  切下げられた状態）であった場合、蛇行区間の河道埋没傾向は改善されないばかりか、再び大規模洪水のインパクトを受けることで河道は完全に埋没してしまう可能性があることがわかった。したがって、土砂堆積の視点から蛇行河道の自律的維持を考える場合、適切な流量配分比（全流量の内、蛇行区間へ分配される流量の比率）とそれをもたらす適切な堰高・堰形状を明らかにする必要がある。

図 - 15.1.29 は、過去 7 年間の標津川本川を流れる流量と流量配分比との関係を示す。図中の丸点は流量観測結果をプロットしたもので、色の違いはそれぞれ全幅堰の期間と切下堰の期間との違いを示している。この点の配置からも分流堰の高さの違いによって流量配分比には明確な違いが生じていることがわかる。また、図中三角点で示すのは、実測水位をもとに不等流計算を用いて蛇行区間・直線区間の流量を推定し算出した流量配分比で、色の違いはそれぞれ、青と緑が全幅堰の期間を、赤が切下堰の期間を示す。ここで、青と緑の期間の違いは、全幅堰の期間のうち青が比較的河道が安定していた時期を抽出したもので、緑は大規模な洪水を受けた後や堰高の変更が行われた後などの河道形状が大きく変化していた期間を示す。図中の色分けされた点の配置から、これら 3 つの状態を堰高と大規模洪水の有無の違いに着目し、図 - 15.1.30 のように整理した。これら 2 つの図から、過去 7 年間の試験地における流量配分比の変遷は次のような過程を辿ったものと推察された。

- a) 通水開始直後の大規模洪水を受け、蛇行区間が埋没傾向を高めると流量配分比は(1)の領域から(2)の領域へと遷移する。
- b) その後、平水流量規模の通水が 1 年以上続くこ

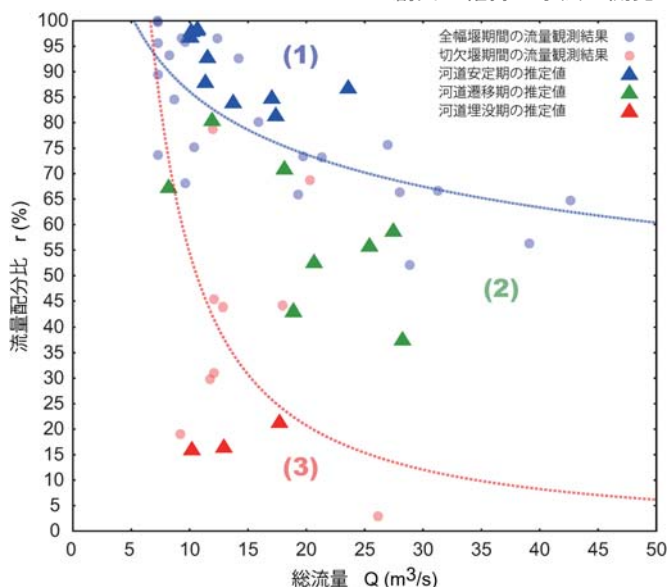


図 - 15.1.29 流量配分比の変遷

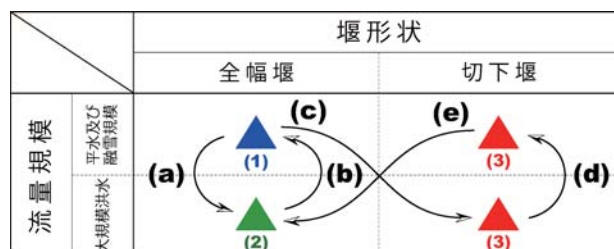


図 - 15.1.30 流量配分比の遷移過程

とで蛇行区間に堆積した土砂は徐々に排出され、(2)の領域から(1)の領域へと遷移する。

- c) 2006 年 8 月に堰高が切下げられ、さらにその直後に大規模な洪水を受けたことで再び蛇行区間は埋没傾向となり、領域(3)に遷移する。
- d) その後、平水流量規模の通水が 1 年以上続いたにもかかわらず蛇行区間に堆積した土砂は排出されることなく、領域(3)のまま遷移しない。
- e) 2008 年 8 月に堰高がもとの形状に復元され、蛇行区間に堆積した土砂が徐々に排出されることで再び流量配分比は回復し、領域(2)へと遷移した。

以上より、当試験地における河道の状態を、図 - 15.1.22 上で次のように判定することができる。

- 領域(1) : 河道安定期
- 領域(2) : 河道遷移期
- 領域(3) : 河道埋没期

もし河道の形状が変わらないと仮定したとき、流量配分比は本川流量の増加に伴って逡減していく 1 本の曲線となって表現されることが知られており、これは当試験地においても同様であると考えられる。

15.1 蛇行復元等による多様性に富んだ河川環境の  
創出と維持の手法の開発

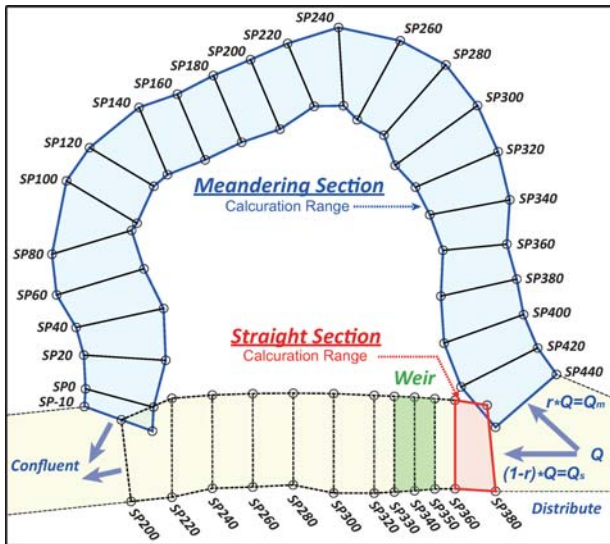


図 - 15.1.31 蛇行・直線両区間の計算範囲

以上の考察から 2way 河道の自立的維持を分流堰の視点から考えたとき、この流量配分比曲線が図 - 15.1.29 に示す(3)の領域とならないような形状および高さで設置されている必要があると推察される。

2) 2way 河道の一連不等流計算

堰高および河道形状の違いによって、平水流量規模における流量配分比曲線がどのような領域に現れるかが推定できれば、前節の考察から、その河道形状が安定状態にあるのか、遷移過程にあるのか、または埋没傾向にあるのかをある程度推定することができる。以下本節では、ある特定時期の河道および堰形状をもとに図 - 15.1.31 に示す蛇行・直線両区間について 1 次元不等流計算を行い、平水流量規模における流量配分比曲線を求める手法を提案する。

なお、計算の全体の流れについて述べる前に、計算条件として与える直線区間の境界条件と、両区間の計算結果の整合性を判定する際に用いる分岐点の条件についてまず触れる。

(I) 堰上下流での水面形の不連続性

当試験地に設置されている分流堰は、網目 25mm の再生ポリエステル無結節網を 2 重にした袋材に、平均粒径 20cm の玉石を詰め込んだもの (1m×1m×0.5m) を 1~2 段に積み上げることで形作られている。そのため一般的に用いられるコンクリートブロックなどを使用した越流堰とは異なり、流水に対する透過性や河床変動に対する屈撓性を持ち、河川環境との親和性が高いとされる。しかし、このような特性は、時間経過とともにその形状変化

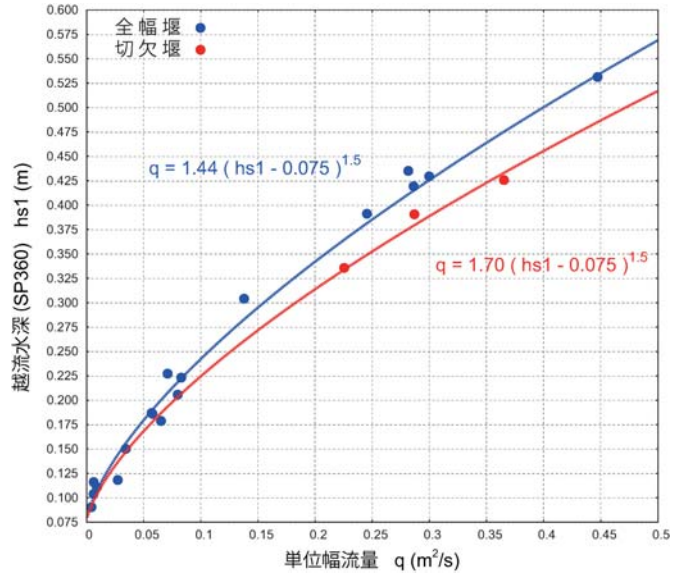


図 - 15.1.32 単位幅流量と越流水深の関係



図 - 15.1.33 堰上下流区間 (H22.3)

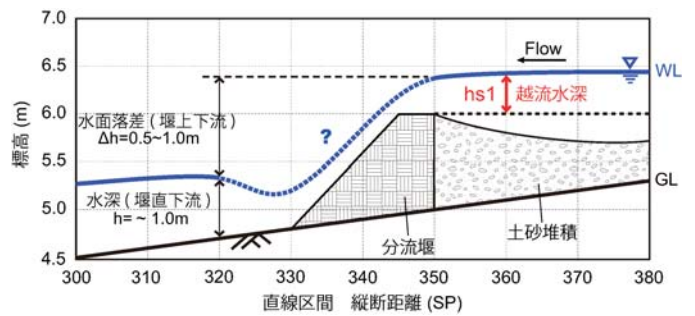


図 - 15.1.34 堰上下流区間の縦断イメージ

を許容することとなるため、図 - 15.1.33 に示すように堰表面を流れる流水の挙動は非常に複雑なものとなる。また図 - 15.1.34 に示すように、平水流量時における堰上下流の水面落差は、観測時期によっても異なるが、概ね 1.0m 未満の水深に対して、0.5~1.0m 程度にもなることがわかっている。

このように、流量 10~30(m³/s)の平水流量時には堰上下流は不連続な水面形となるが、少なくとも堰上流は常流で流れ、堰を流下する際は完全越

流しているものと推定することは可能である。以上の理由から直線区間の計算範囲を堰直上流の SP360 から分岐点の SP380 までとし、全幅堰と切下堰のそれぞれの期間における堰直上流の越流水深を図 - 15.1.32 のように求め、これを直線区間の下流端の境界条件とする。

### (II) 分岐点の整合条件

分岐点となる蛇行・直線両区間の上流端では図 - 15.1.36 に示すように、ほぼ全ての期間において直線区間の水位の方が高く、過去 7 年間の観測値の平均では 8cm 程度の差があった。またそれとは逆に、平均河床高は蛇行区間の方が高くなる傾向があり、特に大規模洪水後や堰高が切下げられた期間はその傾向が顕著にみられた。この 2 つの特徴は各々の時期において蛇行・直線両区間に配分される流量と深く関わりがあると推察される。

図 - 15.1.35 は、実測水位をもとにした両区間の上流端における流下断面積(蛇行区間:Am、直線区間:As)の差(dA=Am-As)とその時の流量配分比との関係を示す。ここで図中の配色は図 - 15.1.29 と同様とする。この図から、両区間の上流端における流積差(dA)と流量配分比(r)の間にはある程度の相関関係が認められ、それは堰形状の違いによって明確な違いが生じることがわかった。この結果をもとに、2.6.2-3-(1)で分類した 3 つの河道状況を代表する時期として、図 - 15.1.13 に示した(2)・(3)・(4)を選び、図 - 15.1.35 のプロット群から当該時期の点を通る線形近似直線を推定し、この直線をそれぞれの時期における分岐点の整合条件とする。

### (III) 計算手法と結果

計算は図 - 15.1.31 に示す範囲について以下の手順で行う。まず、本川流量(Q)を与え流量配分比(r)に任意の値を仮定し、得られた蛇行区間流量(Qm)と直線区間流量(Qs)を上流端の境界条件とする。蛇行区間の下流端の境界条件は、当試験地の 3km 下流に位置する水位流量観測所から合流点までの区間について不等流計算を行い算出した H-Q 式を用いる。また、直線区間については図 - 15.1.32 に示す関係式を用いることとする。

この条件のもと、蛇行・直線両区間についてそれぞれ不等流計算を行い上流端における各区間の流積差(dA)を求める。この過程を、流量配分比を 0.1% 間隔で変えながら繰り返すことで図 - 15.1.37 に示す 1 本の曲線を得る。さらにこれを平水流量規模に相当する 10~30(m<sup>3</sup>/s)の範囲について 5(m<sup>3</sup>/s)間隔で計算した結果が図中の曲線群となる。

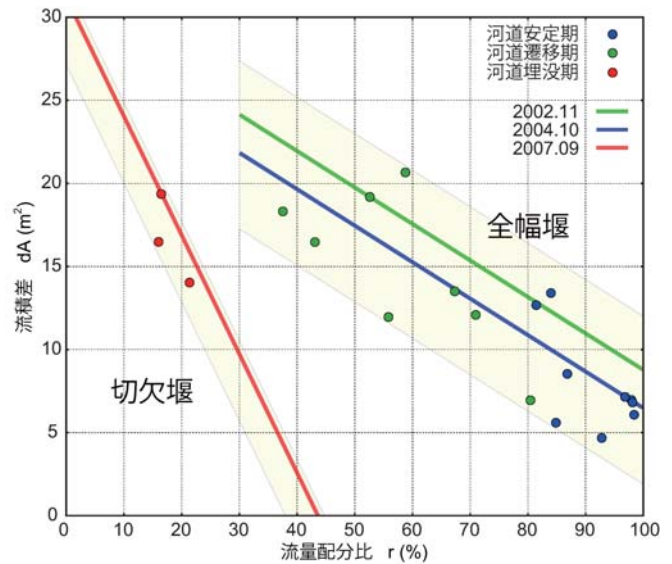


図 - 15.1.35 分岐点の整合条件

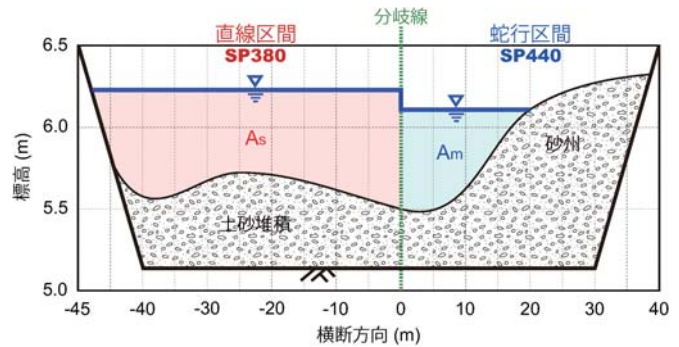


図 - 15.1.36 分岐部の横断イメージ

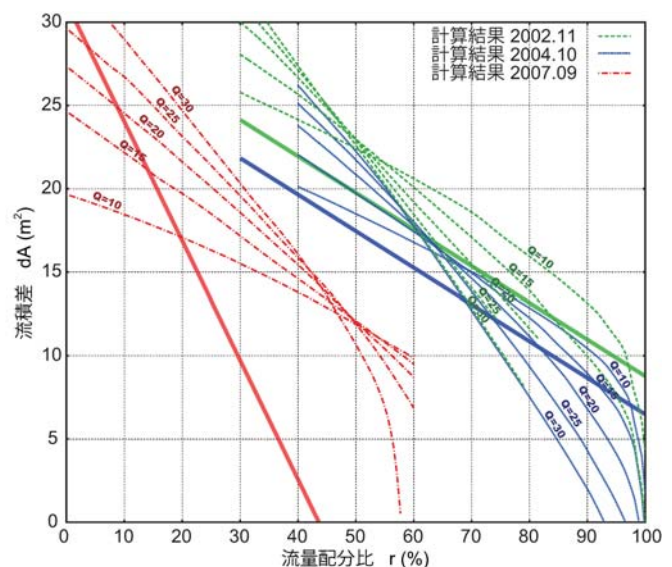


図 - 15.1.37 計算結果と実測値より推定した線形近似線との整合判定

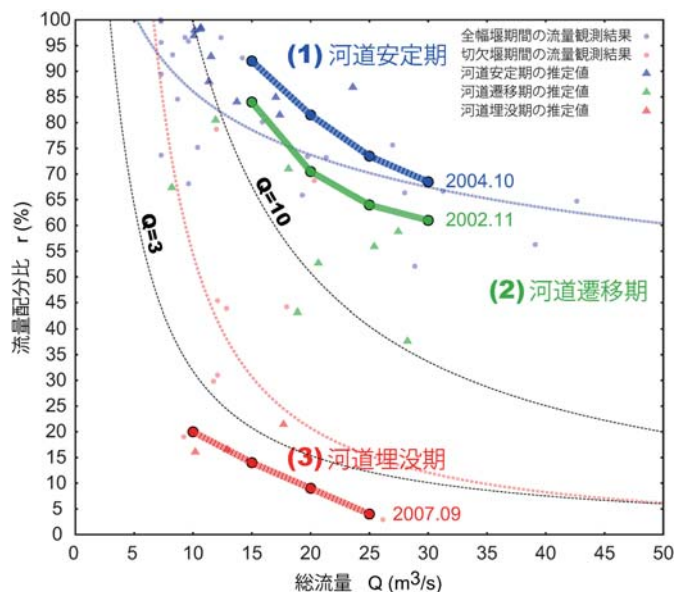


図 - 15.1.38 計算より推定された流量配分比

この図から、河道および分流堰の形状の違いがこれらの曲線群が現れる位置の違いとなって表現され、これらの曲線群と前節で示した分岐点の整合条件を表す直線との交点が、各時期の各流量における流量配分比を示すことになる。

#### (IV) 結論と対策

上記過程より得られた総流量と流量配分比の関係を図 - 15.1.29 に重ねたものが図 - 15.1.38 である。この図から、計算によって得られた流量配分比曲線は、それぞれ安定期・遷移期・埋没期の各領域に描かれることがわかった。

また、図中の黒線は、前述の1次元河床変動計算で河床高の低下が確認された  $Q=10\text{m}^3/\text{s}$  と、河床高にほとんど変化が起きなかった  $Q=3\text{m}^3/\text{s}$  を示したものである。この曲線と3つの流量配分比曲線との位置関係から、堰高切下げ時期の2007年9月は、蛇行区間への分配流量は平水流量時で常に  $3\text{m}^3/\text{s}$  以下となり、全幅堰であった2002年11月および2004年10月は常に  $10\text{m}^3/\text{s}$  以上の流量が分配されていたことがわかる。これら2つの計算結果（河床変動計算・流量配分比の計算）が示唆することは、試験地において実際に観測された蛇行区間の河道変遷状況とも良く整合がとれる。

以上のことから、今回用いた手法によって、ある特定時期の河道および分流堰の形状をもとに、任意の流量に対する流量配分比（流量配分比曲線）をある程度推定することが可能であることが示された。さらに、河道の埋没を回避するためには、算出された流量配分比曲線が平水流量規模（ $10\sim 30\text{m}^3/\text{s}$ ）に

において、 $10\text{m}^3/\text{s}$  程度の流量を継続的に蛇行区間へ導水できる状態（堰高・堰形状）にあることが望ましいと言える。当試験地においては、図 - 15.1.38 の青と緑の三角点が示すように、 $H=1.0\text{m}$  の全幅堰の状態であれば、洪水直後を含む全通水期間を通じて、概ね  $Q=10\text{m}^3/\text{s}$  以上の流量を蛇行区間に分配できる状態にあることから、この堰高・堰形状は蛇行河道の維持にとって非常に有効であると推察された。

#### (V) 課題

今回の流量配分比推定に用いた2つの計算条件（①越流水深と単位幅流量の関係、②流積差と流量配分比の関係）は時間的な河床変動量を内含しており、また、実際に現地で試された2つの特定の堰形状についてのみ適用可能な条件であるため、当試験地特有の関係性を示してはいるが、2way河道一般への適用性については不明な点が多い。これは、当節で用いた1次元解析では、分岐合流点の複雑な流況を再現し得ないことに起因している。よって、次節では、このような課題をクリアするため、分岐合流部を含む蛇行・直線両区間を包括的に解析可能な平面2次元解析モデルを開発し、2way河道の自律的維持を可能にする分流堰の高さおよび形状に関する各種検討を行う。

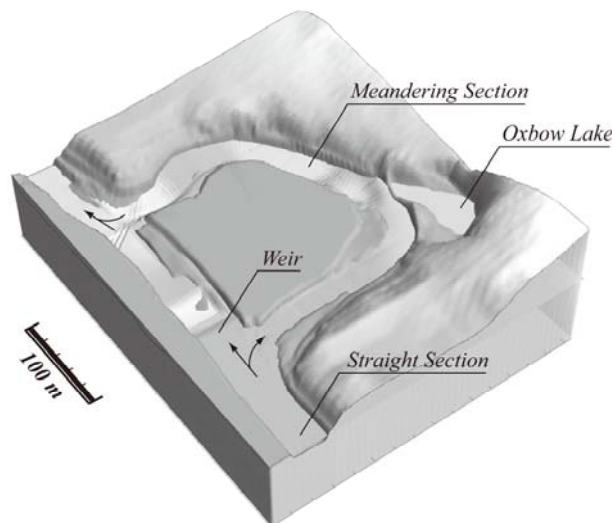


図 - 15.1.39 蛇行復元試験地 鳥瞰図

#### 2.6.2-3-2 蛇行河道の土砂堆積（2次元解析）

既に述べてきたように、図 - 15.1.39 に示すような二重流路の形態を持つ河道では、大規模洪水によって上流より運ばれてきた土砂は、掃流力が相対的に低下する分岐部を中心とした蛇行河道全域で捕捉され、河道に顕著な埋没傾向をもたらすことが明らかとなった。また、その後、蛇行河道に適切な流量

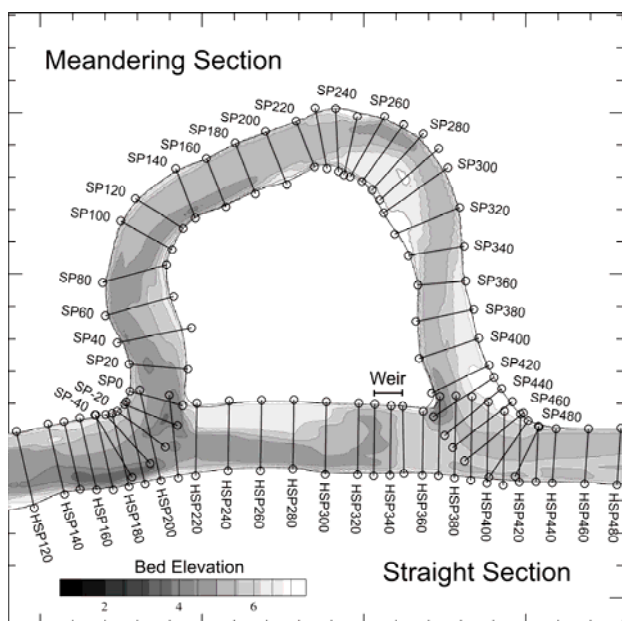


図 - 15.1.40 測線配置、河床高平面図

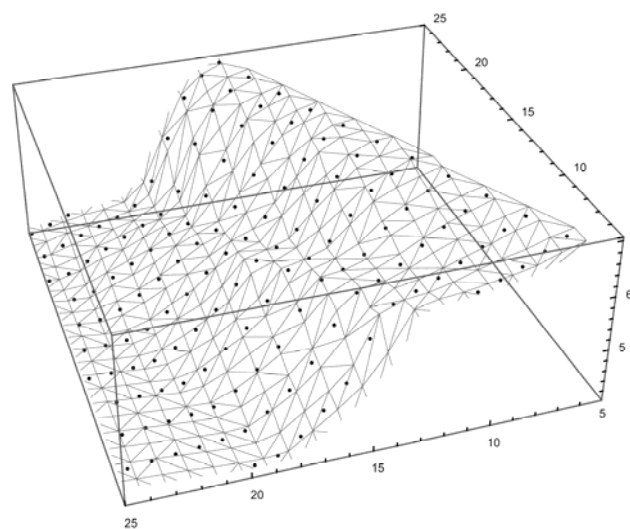


図 - 15.1.41 河床形状モデル化、一般座標格子点投影

が分配されない状態が長期に亘って続いた場合、堆積した土砂は一向に排出されないばかりか、新たな大規模洪水によってこの傾向はさらに進行し、やがて河道が完全に埋没する可能性があることが示唆された。その一方で、蛇行河道に適切な流量が分配される状態であれば、平水流量・融雪出水等の期間を経て、堆積した土砂は徐々に下流へと排出され、埋没傾向も緩やかに解消されていくことがわかった。

これらのことは、蛇行河道へ分配される流量とそれを規定する分流堰高が河道の自然復元力に大きな影響を持つことを意味している。つまり、この両者の応答関係を解明することで、十分な自然復元力を保持した河道の適正な維持管理が可能となる。

これまで、このような二重流路を包括的に解析し、非定常流量下における水量と分流堰高との関係を明らかにするための様々な試みが行われてきた。しかし、蛇行河道維持の鍵となる分流堰周辺および分岐合流部における複雑な流況の把握には、煩雑な計算格子構成作業が伴うため、実用に耐えうる解析は行われてこなかった。

当節では、まず、このような 2way 河道における平面二次元解析を可能にする計算格子構成手法を提案する。また、当手法を用いた水理解析を行い、現地観測データとの比較から解析結果の精度検証を行うとともに、この解析モデルを用いて 2way 河道の自律的維持を可能にする適切な分流堰高に関する検討を行った。

## 1) 解析手法と計算条件

### (I) 計算格子作成

2way 河道における河道断面の計測は、作業効率上、蛇行・直線両区間をそれぞれ別々に実施するため、図 - 15.1.40 に示すように、分岐合流部で各区間の測線が交差し合う形となる。これは、2way 河道を扱う上での大きな特徴であるとともに、解析を行う際の障害ともなっている。

ここでは、このように与えられた河床データをもとに、計算に供する任意の一般座標系格子を作成するため、次のような手順でデータの処理を行った。

まず最初に、データの分布密度を高めるため、等分割した横断測線間を線形補間する。次に、データの平面的な偏りを解消するため、直交座標系格子 (1mx1m) を作成し、最近傍法 (Nearest Neighbors) と逆距離加算法 (Inverse Distance Weighted) を用いた補間を行い、各格子点上の標高値を取得する。さらにこれらを三角平面状に分割することで、図 - 15.1.41 に示すような、三角平面の集合体としてモデル化された河床形状が得られる。図 - 15.1.40 に示す河床高平面図はこの結果を図化したものであるが、分岐合流部における局所洗掘状況や砂州前縁線などを明瞭に表現し得ることがわかる。

最後に、図 - 15.1.42 に示すような任意の一般座標系格子 (X,Y) を作成し、この各格子点を、先に作成した河床形状を構成する三角平面上へと投影することで、図 - 15.1.41 中の点で示すような、各点

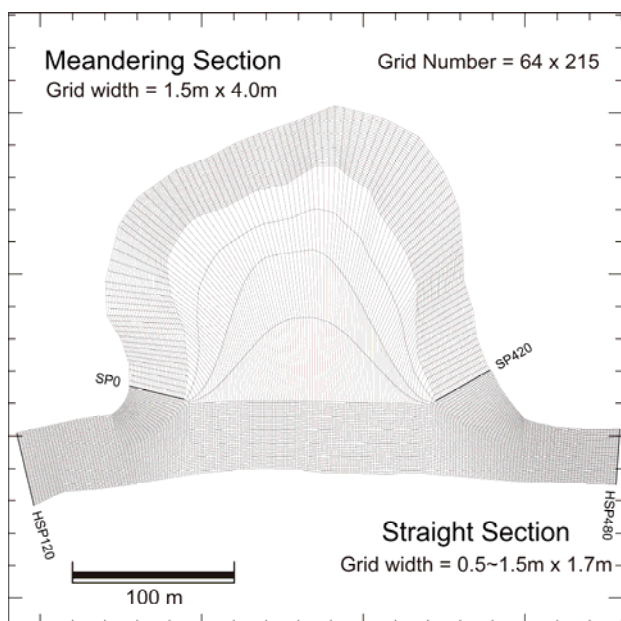


図 - 15.1.42 測線配置、河床高平面図

の標高値が得られる。以上より、平面的な偏在性を有する標高データを元にしながらも、任意の一般座標系計算格子が作成可能となる。

### (II) 現地観測流量・水位（計算対象期間）

ここで、解析結果の検証に用いる水位・流量の現地観測状況について述べる。図 - 15.1.43 は、昨年の年間最大流量を記録した 12 月 3 日 23:00 前後の試験地総流量（蛇行部・直線部の合計）の時刻変化と時間降雨量を示している。図中の□は、降雨開始時、流量ピーク時、流量低減時のそれぞれのタイミングで実施された高水流量観測の結果で、この値と水位計のデータから得られた H-Q 式をもとに、図に示す流量曲線を算出した。水位観測は、水圧式自記水位計を 80m 間隔で現地に据付け、10 分間隔の連続観測を行っている。設置箇所等の詳細は解析結果とともに次節で示す。以下、この 12 月 3 日 12:00 からの二日間を対象に水理解析を行い、観測水位・流量との比較検証を行う。

### (III) 計算モデル

水理解析に供する計算格子は、2010 年 11 月の横断測量データをもとに、前述 (I) の手法により作成した一般座標系格子（図 - 15.1.42）を用いる。水理量の解析は、北海道河川財団より無償配布されている「RIC-Nays」およびその解析プログラム「2d\_solver」を使用した。

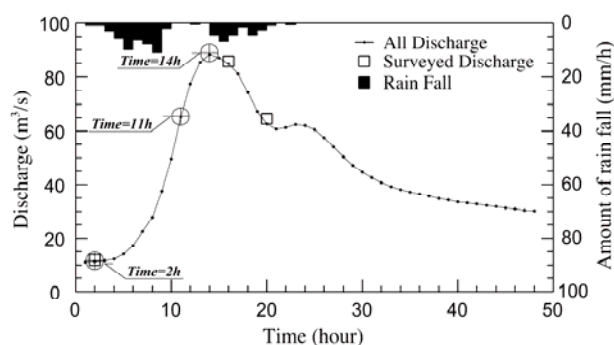


図 - 15.1.43 流量変化（12/3 12:00~12/5 12:00）

当プログラムが扱う流れの支配方程式は、以下に示す平面二次元の非定常浅水流方程式と連続の式である。実際の計算は、これらを一般座標系に変換し、移流項を CIP 法によって差分化した式が用いられるが、詳細についてはここでは省略する。また、本研究は短期間の非定常な流れのみを解析対象としており、河床変動や河岸浸食による河道の形状変化は考慮しない。

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -hg \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + D^x$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -hg \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + D^y$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

式中の各変数は、 $x, y$ : 直交座標系座標軸、 $u, v$ : 各座標軸方向流速、 $t$ : 時間、 $h$ : 水深、 $H$ : 水位、 $g$ : 重力加速度、 $\rho$ : 流体の密度、 $\tau$ : 剪断応力、 $D$ : 粘性力である。

$$\frac{\tau_x}{\rho} = C_d u \sqrt{u^2 + v^2}, \quad \frac{\tau_y}{\rho} = C_d v \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$D^x = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \nu_t \frac{\partial(uh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \nu_t \frac{\partial(uh)}{\partial y} \right]$$

$$D^y = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \nu_t \frac{\partial(vh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \nu_t \frac{\partial(vh)}{\partial y} \right]$$

式中各係数は  $C_d$ : 河床摩擦係数、 $\nu_t$ : 拡散係数である。

### (IV) 計算条件

計算領域は、図 - 15.1.42 に示すように、蛇行河道は SP0~SP420 までの延長 420m、直線河道は HSP120~HSP480 までの延長 360m とする。蛇行河道と直線河道に挟まれた中州部分は、比較的標高の高い箇所であり、今回解析を行うピーク流量



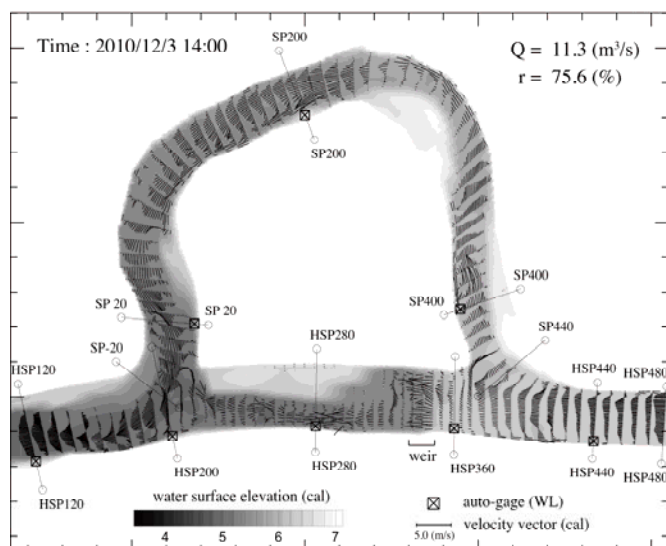
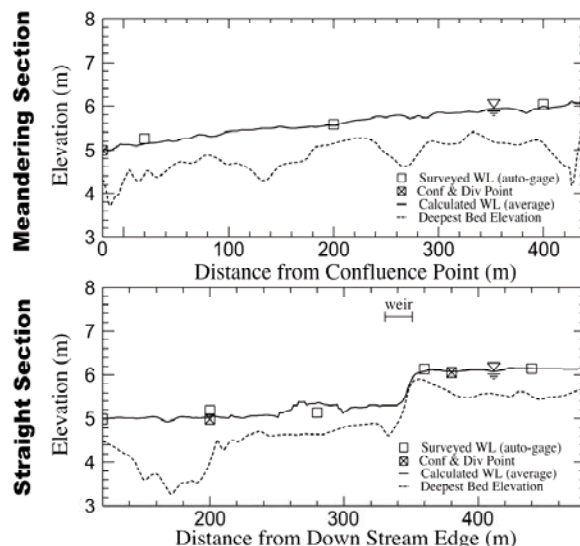


図 - 15.1.44 [Time=2h] 流速ベクトル・水位標高平面図 (左)、蛇行区間縦断面図 (右上)、直線区間縦断面図 (右下)



90m<sup>3</sup>/s 程度では、水の流れが生じることはないため、非計算領域として扱う。

境界条件は、図 - 15.1.43 に示す流量曲線を直線河道の上流端に与え、下流端水位は、直線河道の下流端にあたる HSP120 に設置した水位計の観測値を使用した。

粗度係数は、下式に示す Manning-Strickler による平坦河床の抵抗則を使用し、河床材料の粒径には、現地観測によって得られた  $d_{60}=0.48\text{mm}$  を用いた。

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{7.66\sqrt{g}} \quad , \quad k_s = 2d$$

ここで、 $n$ :粗度係数、 $k_s$ :相対粗度、 $d$ :河床材料粒径である。また、本解析では、簡単のため、河道内樹木による流水抵抗は無視することとした。

### (V) 分流堰の形状・透水性

蛇行河道へ流水の分岐を促す役割を担う分流堰は、直線河道側 SP330～SP350 の区間 (図 - 15.1.40) に設置されており、自然石を用いた越流型の透水性構造物である。堰天端の標高は、豊水流量時に越流する高さとして、基準河床面から最大 1m の高さで設定されていた。

しかし、設置から 9 年余りが経過した現在、分流堰の形状は、流水などの経年的な影響により、堰を構成する玉石 ( $\phi=20\text{cm}$ ) が部分的に崩落するなど、縦横断的に不均一な高さおよび形状へと変化している。また、堰の透水性については、堰上流側で堰天端に迫る高さの土砂堆積が見られることから、その

機能は大きく低下しているものと推察される。加えて、捨石堰に関する既往の研究では、透水性の捨石堰と不透水性の固定堰とを比較した結果、両者がもたらす堰上下流の水理量 (越流水深・越流量) に、大きな違いがないことが実験によって示されている。

以上のことから、本解析では、分流堰を不透水性構造物として扱い、その形状には、河床と同様に、横断測量によって得られた標高データを用いることとした。

## 2) 計算モデルの適合性検討

### (I) 解析結果の検証 (流速・水位)

図 - 15.1.44、図 - 15.1.45、図 - 15.1.47 はそれぞれ、図 - 15.1.43 の○で示した各時刻における流速・水位の計算結果と観測水位で、左平面図中の各測線は、蛇行・直線両区間の上下流端および水位計の設置箇所を示し、右縦断面図中の□は各測点の水位観測値、実線が計算水位の横断方向平均値、破線が最深河床高、■は分岐合流点における蛇行区間側の計算水位を示している。また図 - 15.1.46 は総流量に対する、両区間の平均流速の変化を示したものである。

#### a) 降雨開始時 : Time=2h

まず、図 - 15.1.44 は降雨開始時にあたる 12 月 3 日 14:00 の計算結果で、この時の総流量 11.3m<sup>3</sup>/s に対し、蛇行区間の流量配分比率は 75.6%であった。これは後ほど示す流量観測値と比べると若干低い値ではあるが、平常時は蛇行区間側を主流とした流れが形成されることを裏付ける結果である。また、左図からもわかるように、流速は蛇行区間側で相対的

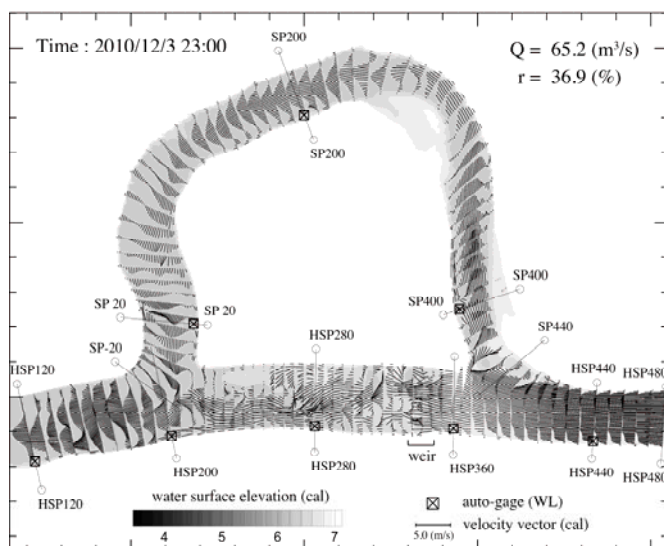
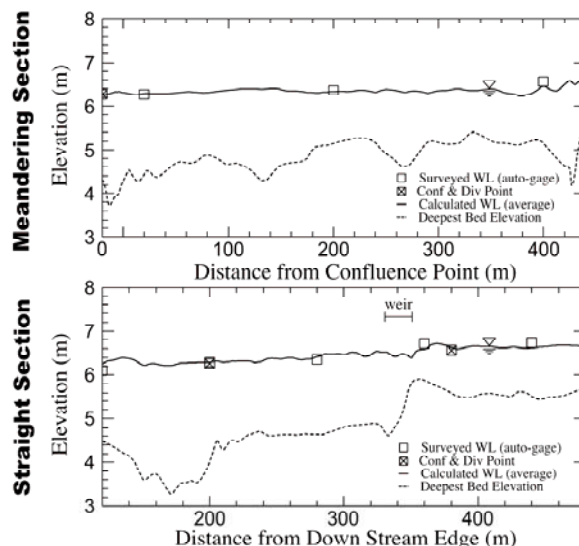


図 - 15.1.45 [Time=11h] 流速ベクトル・水位標高平面図 (左)、蛇行区間縦断面図 (右上)、直線区間縦断面図 (右下)



に高く、直線区間は堰直下から合流点の間で停滞した状態となる。図 - 15.1.46 に示す平均流速で比較すると、両区間には約 1.8 倍の開きがあった。

直線区間の縦断面図からは、分流堰の上下流は非常に緩やかな水面勾配を成し、堰を完全越流した流れはその上下流で堰相当 (1m 程度) の水位差をもたらすことがわかる。これにより、蛇行区間の流れは、右上図のように、分岐合流点を直線的に結ぶ水面形となり、堰上下流の水位差に応じた急峻な水面勾配を成すことがわかる。また、水位の実測値と計算値の整合性は高く、流量変化に対しても高い追従性が認められた。

#### b) 増水期 : Time=11h

次に、図 - 15.1.44 の 9 時間後にあたる増水期の流況を図 - 15.1.45 に示す。この時、総流量は  $65.2\text{m}^3/\text{s}$  に増加する一方で、蛇行区間の流量配分比率は 37%まで低下することがわかった。これは、水位の上昇に伴って、分流堰の影響が相対的に弱まることに起因しており、この時すでに、増水期のある流量を境として、直線区間側を主流とした流れに切り替わっていたことを意味している。

このことは、流速の変化にも如実に現れており、図 - 15.1.45 の左図から、直線区間の流速が卓越している状況が見てとれる。またこの時、増水過程の只中にありながら、蛇行区間の流量はすでにピークに達し、平均流速は、図 - 15.1.46 に示すように、ピークを越えてやや低下し始め、直線区間との差が徐々に広がりつつあることがわかる。

縦断面図を見ると、分流堰を越える流れは波状跳水

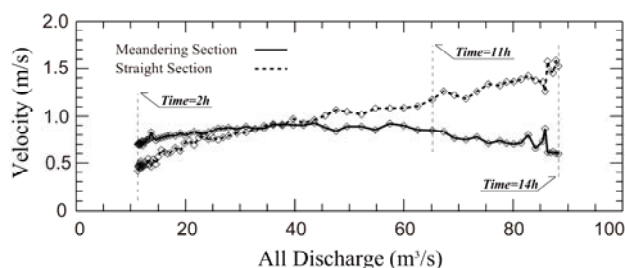


図 - 15.1.46 平均流速の変化

を伴う不完全越流状態となり、直線区間の水位差はほぼ解消されるとともに、分岐合流点を結ぶ蛇行区間の水面勾配は非常に緩やかなものへと変化したことがわかる。これは、増水期における水位上昇量が、堰の上下流で大きく異なることに起因している。

#### c) 出水ピーク時 : Time=14h

最後に、図 - 15.1.45 の 3 時間後にあたる出水ピーク時の流況を図 - 15.1.47 に示す。この時、総流量は  $88.3\text{m}^3/\text{s}$  に増加する一方、蛇行区間の流量配分比率は 18%まで低下することがわかった。左図からも明らかなように、主流は完全に直線区間側へと移っており、蛇行区間の平均流速は、図 - 15.1.46 に示すように、平常時の  $0.7\text{m/s}$  を下回る期間最低値 ( $0.6\text{m/s}$ ) を記録する。また、蛇行・直線両区間の流量および平均流速の差はこの時最大となる。

縦断面図からは、分流堰を越える流れが潜り越流状態にあることがわかる。このような越流状態では、分流堰の効果はほとんど失われ、平常時とは逆に、洪水流の多くが直線区間を流下するようになるため、蛇行区間の流れは著しく停滞した状態になったもの

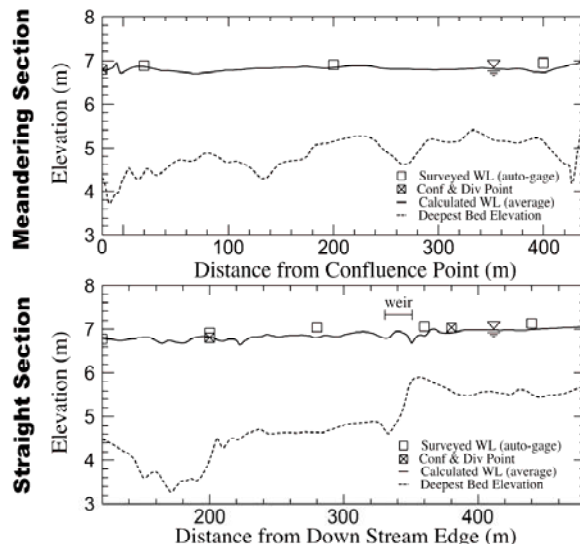
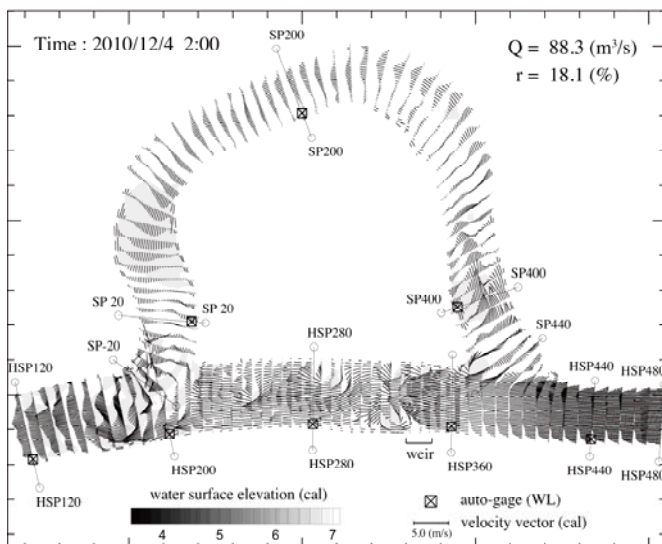


図 - 15.1.47 [Time=14h] 流速ベクトル・水位標高平面図 (左)、蛇行区間縦断面図 (右上)、直線区間縦断面図 (右下)

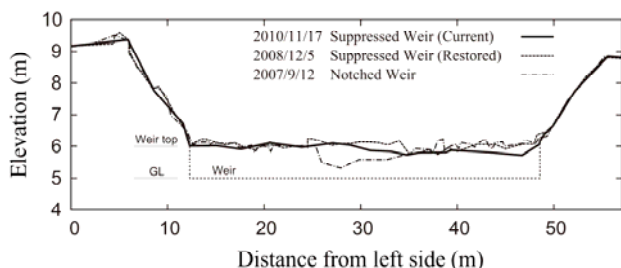


図 - 15.1.48 平均流速の変化

と推察される。これは、2009年6月の大規模洪水時、著者が現地で実際に観測した流況とも良く符合する結果である。

このように、流量の増加に伴って逆に流速が著しく低下する領域が、比較的広範囲に渡って創出されるという現象は、2way 河道特有のものであり、洪水時、この蛇行区間が水生生物にとっての貴重な回避・休息場となり得ることを示唆するものであった。

水位の再現精度に関しては、両区間とも計算値が実測値よりやや低い値を示す結果となった。これは、本解析では河道内樹木による流水抵抗を考慮していないことに起因すると考えられる。当試験地では、砂州上に平均樹高2m程度のヤナギが繁茂した状態にあり、砂州標高を越える流れでは、これらの影響によって最大20cm程度の水位上昇が生じていたものと推察される。

## (II) 解析結果の検証 (流量)

次に、図 - 15.1.43 の□で示した計3回の流量観測結果と、今回の計算結果との比較検証を行う。その前に、まず、計算結果を評価する上で重要となる、

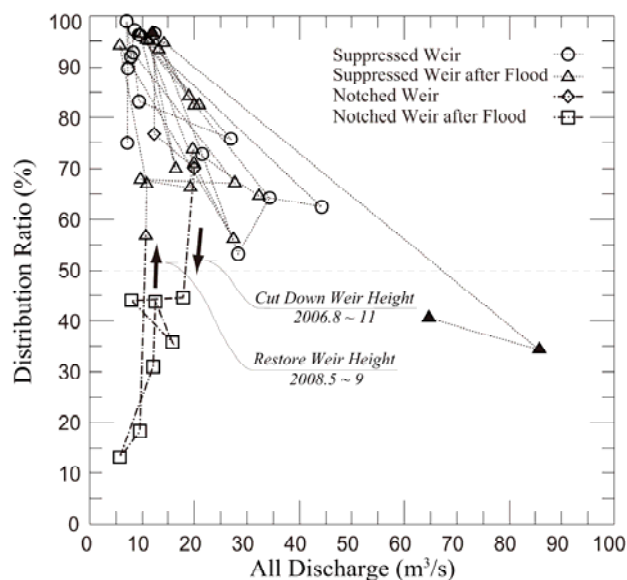


図 - 15.1.49 流量配分比の変遷過程 (実測値)

過去の分流堰の形状変化と流量配分比との関係について、繰り返しとなるが、再度簡単に述べる。

図 - 15.1.48 は、堰天端を含む直線区間 HSP349 の河道断面形状の変化を示している。当試験地では、2006年8月、蛇行区間の流速緩和を目的に、分流堰の中央部を人為的に切下げる操作が為された(切下堰)。しかし、その後の大規模洪水によって、蛇行区間で顕著な土砂堆積が進行したことを受け、2008年8月、堰形状は再び元の形(全幅堰)に復元されることとなった。

このような実験的期間を一部含んだ過去の流量観測値は、結果的に2way 河道の適切な堰高を検討するにあたって非常に有用な示唆を含むものとなった。

15.1 蛇行復元等による多様性に富んだ河川環境の  
創出と維持の手法の開発

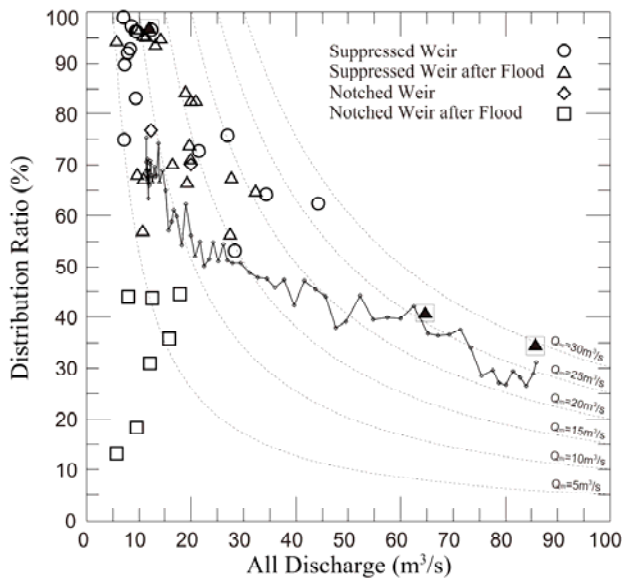


図 - 15.1.50 流量配分比の計算値・実測値

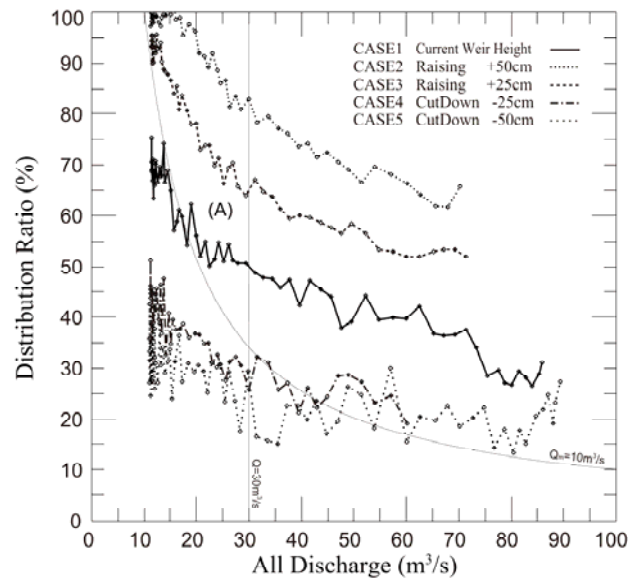


図 - 15.1.52 堰高の違いと流量配分比（計算値）

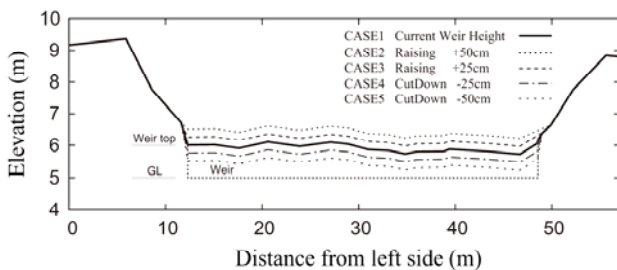


図 - 15.1.51 試行計算に用いた堰形状

図 - 15.1.49 に示す各点は、過去 9 年間の流量観測値で、堰形状と洪水による影響の程度から、これらを計 4 つに分類した。図中の○と△は全幅堰の期間、◇と□は切下堰の期間を示している。各点を結ぶ直線は、これらの時系列的な変遷過程を示しており、この軌跡から、堰高の切下げを契機として流量配分比が大きく低下し、徐々に河道が埋没傾向を高めていった様子が見てとれる。

これは、蛇行区間の土砂堆積が分配流量の低下を招き、分配流量の低下がさらなる土砂堆積を誘発するといった相互作用が、連鎖的に繰り返されたことによるものと考えられ、全幅堰の期間に見られるような自然復元力は完全に失われていたことを示している。

次に、過去の流量観測値と蛇行区間流量との関係を、解析結果と併せて図 - 15.1.50 に示す。図中の実線は、今回の解析によって得られた流量配分比の変化で、低流量時を除けば、▲で示す観測値とも概ね一致しており、本解析手法の適合性の高さを裏付ける結果であった。

図中の破線は、蛇行区間流量を  $5\text{m}^3/\text{s}$  間隔で示したもので、埋没傾向を高めた切下堰の期間は  $10\text{m}^3/\text{s}$  を大きく下回る流量であったことがわかる。

2.4.3 章で示した一次元河床変動計算の結果から、蛇行区間に  $10\text{m}^3/\text{s}$  の流量が常時分配される状態であれば、一カ月程度の期間を経て、河道に堆積した土砂は徐々に排出される一方で、 $3\text{m}^3/\text{s}$  の場合は、ほとんど河床に変化が見られないことがわかっている。すなわち、切下堰の期間に埋没傾向が一向に解消されなかった原因は、分配流量の減少に伴う掃流力の低下であったと推察される。

よって、本節では、蛇行区間の埋没を回避するために求められる条件は「蛇行区間へ分配される流量が  $10\text{m}^3/\text{s}$  程度確保され、且つ、その状態が年間を通して少なくとも一カ月程度維持されるような分流堰高となっていること」と定義した。

当該試験地の総流量は、年間日数の約 90% が  $30\text{m}^3/\text{s}$  以下の範囲にあることから、次節ではこの範囲内の流量を対象に検討を行った。

### (Ⅲ) 分流堰高の検討

以上の解析手法を用いて、堰高のみを変えた場合の試行計算を行い、その結果から、最適な分流堰高の検討を行った。試行計算に用いた堰形状は、図 - 15.1.51 に示すように、先の解析で使用した堰天端の高さを基準に、高さ方向  $\pm 50\text{cm}$  の範囲を  $25\text{cm}$  間隔で、横断方向に対して平行に増減させた 4 つのケースを想定し、それぞれ計算を行った。図 - 15.1.52 は、先の解析結果を含めた計 5 つ堰高条件

から求められた計算結果をまとめたものである。

前節の定義より、蛇行区間流量  $Q_m=10\text{m}^3/\text{s}$  と総流量  $Q=30\text{m}^3/\text{s}$  を示す線で囲まれた領域(図中 A)と、得られた計算結果との位置関係から、各堰高条件下の河道の自然復元力がある程度推定することができる。

図から、現在の堰高がもたらす流量配分は、自律復元の成否を分ける境界 ( $Q_m=10\text{m}^3/\text{s}$ ) 付近からこの領域内を通る線形を成しており、十分な自然復元力を有していると推察される。これより 25cm 以上低い堰高では、当領域から大きく外れ、河道埋没の可能性が急激に高まることわかる。一方、堰高を上げた場合は、上げ幅に応じた間隔で安全側へと遷移するが、これは同時に、直線区間への分配流量が大きく低下することを意味しており、水質の悪化や河道内植生の樹林化に伴う流下断面積の縮小といった懸念が高まることとなる。

以上より、2way 河道に求められる適切な流量配分は、河道の埋没を回避可能な最低限の流量を蛇行区間へ分配するような状態にあることが望ましく、現在の堰高・形状は、その意味で、非常に適切な状態にあるといえる。

### 3) 結論

本節では、2way 河道の平面二次元解析を可能にする計算格子構成手法を提案し、当解析モデルの現地適合性を検証した。その結果、非定常流量下における 2way 河道の水理量を十分な精度で再現可能であることが確認された。また、同モデルに基づく分流堰高の検討を行い、現在の堰高および形状が妥当であることを明示的に示した。

#### 2.6.2-4 直線河道におけるヤナギの樹林化

蛇行河道の埋没を回避するために設置された分流堰の分流効果によって、平水・融雪出水期、直線河道へ分配される流量は 2way 河道の施工前に比べて大幅に減少することとなる。流量の減少は、川幅の狭小化と砂州の発達および固定化を促進し、固定化された砂州上では、ヤナギの侵入と樹林化傾向がみられるようになった。樹林化したヤナギは、洪水期、主流となる直線河道において流下能力を低下させ水位上昇を引き起こす懸念がある。

先の水理解析の結果から、直線区間の砂州上に平均樹高 2m 程度のヤナギが繁茂した現在の植生状況では、流量  $90\text{m}^3/\text{s}$  程度の出水時(融雪出水規模)において、砂州上流域で最大 20cm 程度の水位上昇

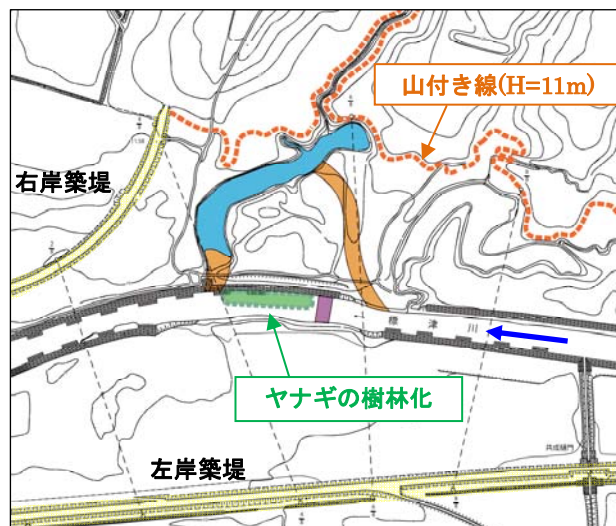


図 - 15.1.52 砂州の固定化とヤナギの樹林化

が発生する可能性があることが示唆された。

当試験地は図 - 15.1.52 に示すように、右岸側は山付きとなっており、堤々間も広く十分な河積を有した立地である。したがって、高水敷を流れるような大規模な洪水に対しては、当該砂州上におけるヤナギの樹林化がもたらす水位への影響は極めて限定的であると考えられる。しかし、今後このような 2way 河道を計画するにあたっては、当試験地で確認されたような現象が同様に起こりうることを想定した上で、河道内植生の流水抵抗を考慮した、流下能力等の検証を行う必要がある。

#### 2.7 蛇行復元試験地の追跡調査～まとめと今後～

以上が、蛇行復元試験地をフィールドとした追跡調査をもとに、2way 河道の持つ課題の抽出とその対策について検討を行った結果である。調査開始からこれまでに、4 度の大規模洪水と 2 度の分流堰の形状変化を経験し、これに対して鋭敏に応答する蛇行・直線両河道の変化を継続的に観測できたことは、いわば実スケールの模型実験とも言えるもので、今後予定されている 2way 河道の本格実施に向けて、非常に貴重且つ有益な知見が得られた。

当試験地では、2008 年 8 月に堰高が復元されて以降、2009 年 7 月に大規模な洪水を 1 度経験することとなるが、これが河道に埋没傾向をもたらすようなことはなく、現在も、緩やかではあるが徐々に堰高切下げ前の河道状況へと復元されつつあることが確認されており、現時点において、この 2way 河道は長期的にも自律維持されていくものと推測される。

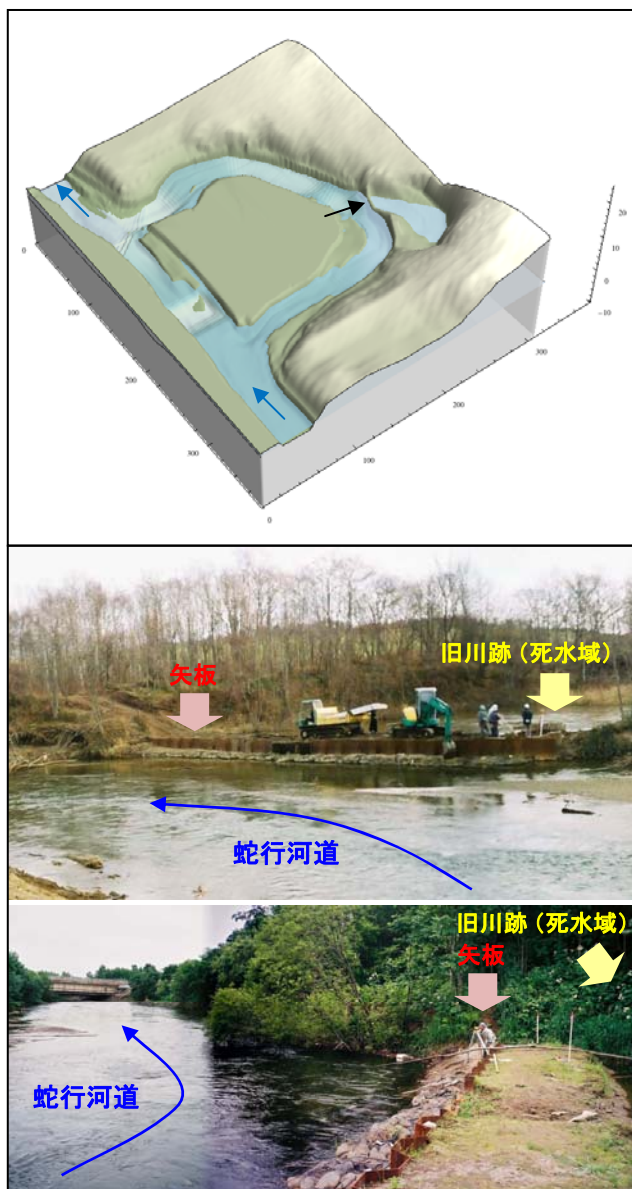


図 - 15.1.53 矢板設置時の状況

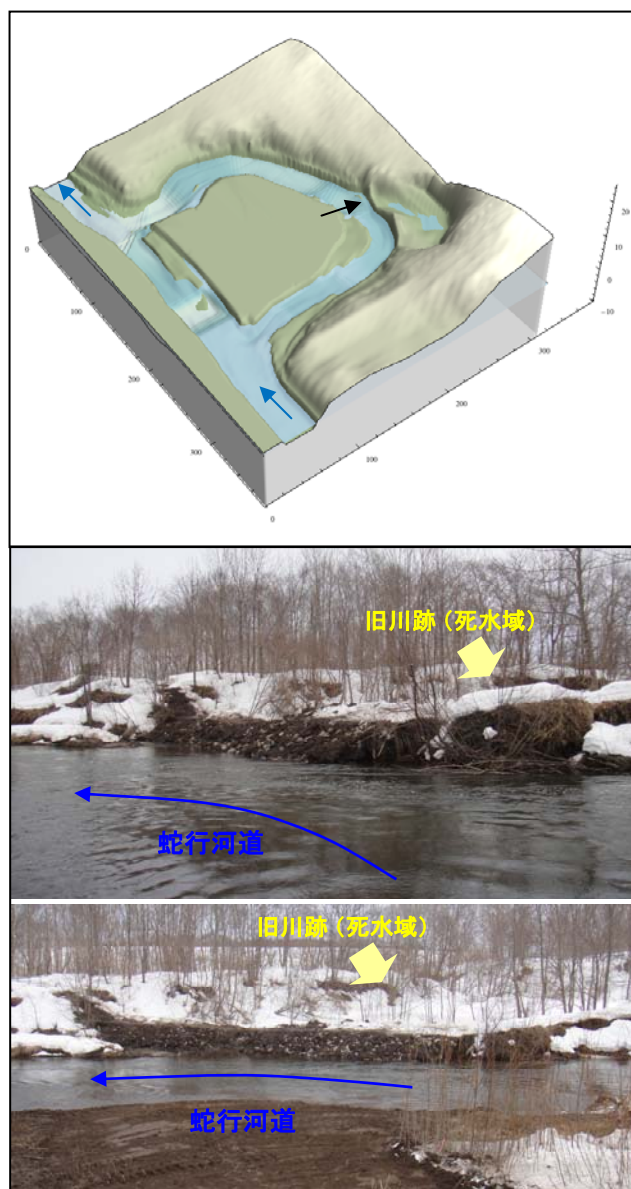


図 - 15.1.54 矢板撤去後の状況

旧川跡に創出されていた生態系を一部保存することを目的に、蛇行区間の SP240～SP260 の右岸側に、蛇行河道と旧川跡を仕切るように設置された矢板は、2010年3月に撤去されることとなった。この矢板が設置されていた区間は、現在も、蛇行の湾曲が外岸側へと発達を続けている箇所でもあるため、矢板引き抜きを契機に、蛇行河道が死水域となっていた旧川跡を取り込むといった大規模な変化が起きる可能性が懸念されていた。今年度行った横断測量の結果から、当箇所の最深河床は蛇行区間に比べ 2m 程度標高が高いことが確認され、懸念されるような急激な河道変化につながる可能性は非常に低いことがわかった。しかし、今後も、蛇行の発達状況や、それに伴う河岸浸食状況の継続的な観測が望まれる。



図 - 15.1.55 分流堰の構造が一部破損

当試験地の分流堰は材質特性上、経年劣化の影響を避けられず、これは流量配分比をも変化させることにも繋がるため、現在の堰形状が維持されているかどうかを今後とも注視していく必要がある。

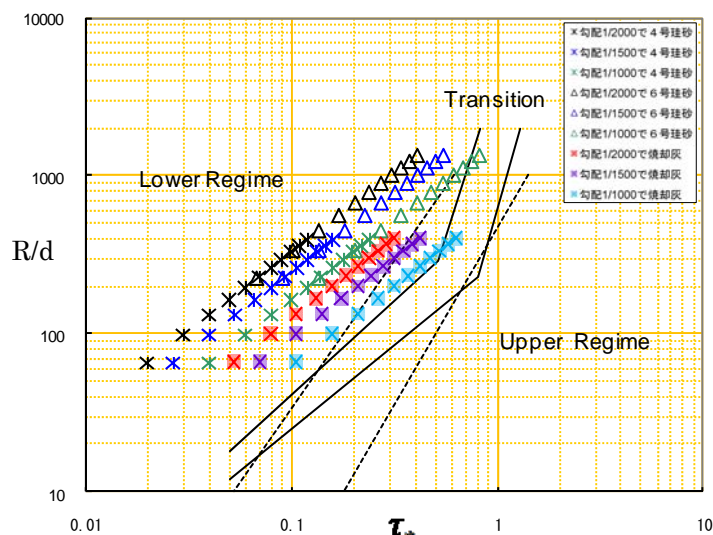


図 - 15.1.56 小規模河床形態区分図



図 - 15.1.57 1/25 試験地抽出模型（予備実験）

### 3 移動床水理模型実験

今後、蛇行復元事業が計画されている下流域では、試験地にみられるような 2way 河道が上下流に 2 つ連続した構造となるため、この区間を流れる流水の挙動はより複雑になると考えられる。このため、試験地で得られた知見がどこまで適用され得るかは不明な点も多く、また、現状では十分な精度をもった数値解析手法が確立されておらず、通水後、河道に起こり得る変化を十分に予測することができない。

以上のことから、標津川下流域の蛇行復元予定区間を模した水理模型実験を実施し、その実験結果をもとに、試験地で得られた知見の適用性を確認するとともに、当予定区間特有の課題とその対策について検討を行った。

#### 3.1 実験条件（縮尺率・河床材料）

標津川下流域において蛇行河道の復元が予定されている区間は KP3.6～5.2 の延長約 1.6km である。実験施設は、当研究所が所有する既存の標津川流域河道模型（固定床）を活用し、1/25 スケール（移動床区間 L=64m）の無歪み縮尺模型とした。また、現地の河道特性は中規模河床形態が支配的であると予想されることから、河床形態と河岸浸食を同時に再現できる水理模型とする。使用する河床材料は、水路実験で一般に広く使用されている珪砂よりも比重の軽いものを選定した。これは、模型縮尺に合わせて河床材料を縮小すると、粒子レイノルズ数  $Re_p$  が 20 以下となり、実験に大きな支障をきたす Ripple の形成が懸念されることや、粒径 0.2mm 以下の場合、材料の粘性が高くなり、河岸浸食状況を十分に再現できないことが考えられるためである。よって、粒径を小さくする代わりに、比重の軽い材料を用い

ることで上記の不都合な点を回避することとした。新たな河床材料の選定は以下の観点より行った。

- ▶ 実験に適合した比重（珪砂よりも軽い）
- ▶ 入手の容易さ（量的・價格的）
- ▶ 実験に関する性状（扱い易さ、経年変化が小さい）

以上の観点から珪砂・石炭粉・下水汚泥焼却灰の 3 つの材料について性状比較を行った結果、『入手の容易さ』と『比重の軽さ』に優れた下水汚泥焼却灰を使用することとした。しかし、この材料は下水汚泥処理過程で添加される石灰分が、水分を含むことで、時間経過とともに硬化する性質を持つため、事前にシルト分や固結分を十分に除去し、粒径を  $15.0\text{mm} \geq d_m \geq 0.25\text{mm}$  程度に調整することとした。

このような処理を経て得られた河床材料は、平均粒径  $D_{50}=1.0\text{mm}$  程度となり、芦田らの方法による小規模河床形態区分では、概ね Lower Regime に属する珪砂に対して、Ripple の発生しにくい Transition 領域に近いことが確認された。（図 - 15.1.56 参照）

この河床材料を用いて、1/25 の試験地抽出模型を作製し予備実験を行った結果、試験地で実際に観測された河岸浸食状況や河道変化状況を比較的良好に再現できることがわかった。よって、当河床材料は下流域の蛇行復元予定区間を対象とした移動床水理模型実験に対しても有効であると推察された。ここで、1/25 スケールの模型実験における流量および時間の縮尺率は、それぞれ、流量縮率はフルード則に基づき  $Q_r=(1/25)^{5/2}$ 、時間縮率は、模型実験と現地との流砂量の比から  $t_r^{-1}=40.77$  と算定された。この時間縮率は、低水路満杯程度の流量を定流で 1 時間通水した場合、実河川では約 41 時間分（洪水ピークなどを含む不定流）に相当することを意味している。

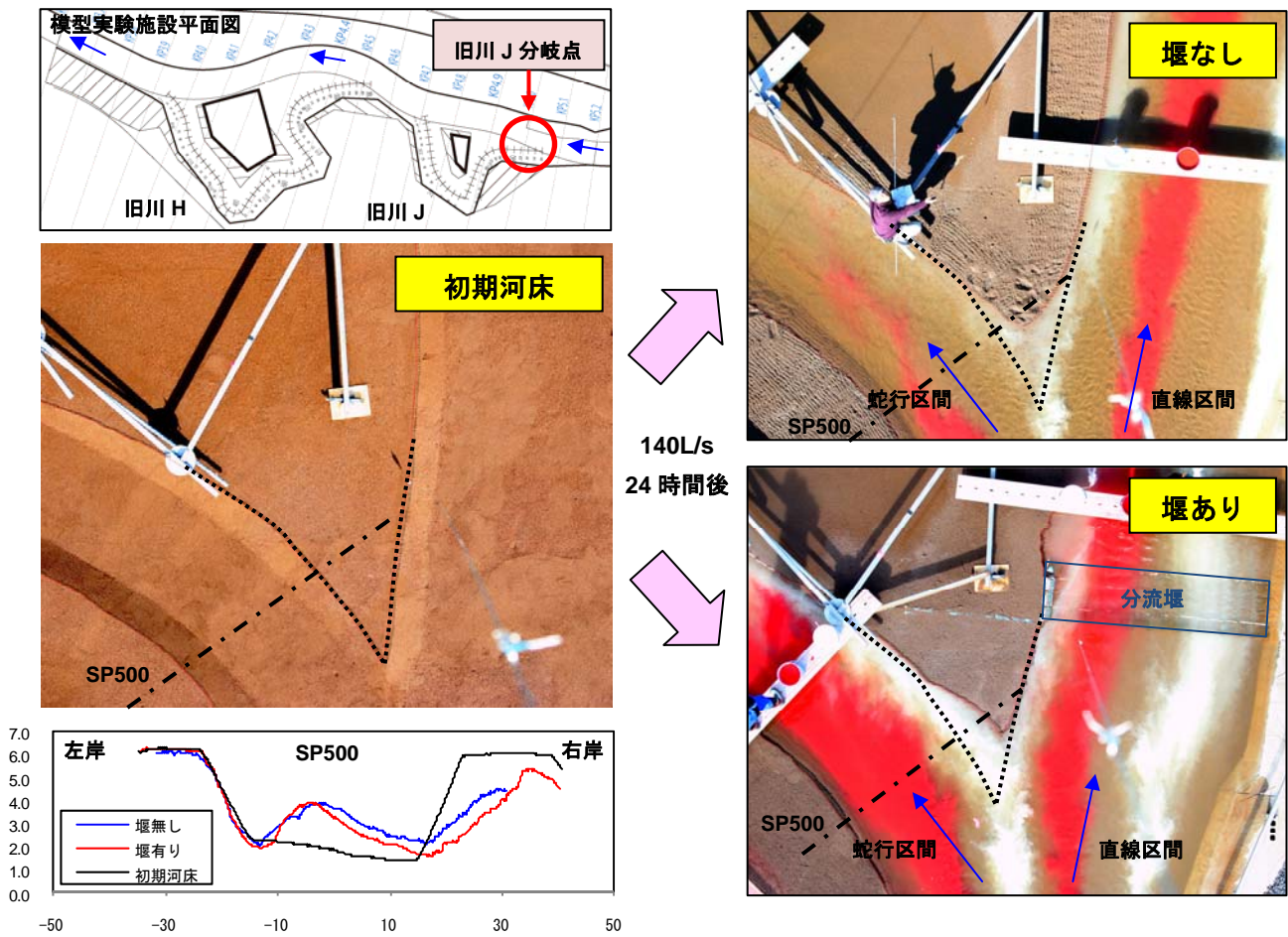


図 - 15.1.58 旧川 J 分岐部における河岸浸食状況 (140L/s を 24h 通水後)

### 13.2 実験 (分流堰の有無による河岸線の比較)

以上の予備実験等の結果を踏まえ、標津川下流域において旧蛇行河道 H・J を接続した場合を想定した移動床水理模型実験を行った。

蛇行区間の河道線形は、旧川跡と現直線河道を滑らかに接続する河道法線を設定した。蛇行区間は可能な限り現存する旧川河岸を残すこととし、掘削箇所は現地測量に基づき、川幅 50m (現地尺)、法勾配 2 割の単断面とした。初期河床形状は、平成 14 年度の測量結果をもとに整形を行い、護岸が敷設されていない状態での河岸浸食状況を検証するため、河岸を含め全ての河道形状は同一材料で構成することとした。よって、当実験では護岸や植生などによる河岸等の被覆効果は考慮されていない。

流量条件は、ほぼ低水路満杯状態となった平成 14 年 10 月の洪水 (合流点観測所ピーク流量  $436\text{m}^3/\text{s}$  = 模型換算  $140\text{L/s}$ ) を 24 時間 (模型尺) 連続通水し、流況の変化を観察しつつ 6 時間ごとに河床形状を測定する。この共通条件の下、分流堰を設置した場合と設置しなかった場合の 2 ケースに分けて実験を行

った。なお、分流堰の高さは、試験地に倣い、設置断面における平均河床高から 1m (現地尺) の高さとし、分流部直下流の直線河道内に設置した。

図-15.1.58 は、分流堰の有無による旧川 J 分岐部の流況と河岸線の位置の変化を比較したものである。今回設定した流量では、堰有りの場合、旧川への流入量が増加していることがわかる。またそれに伴い、分岐部蛇行河道右岸側の河岸浸食が、堰無しに比べ、より大きく発達したことがわかる。

試験地で得られた知見から、蛇行区間の埋没を回避するためには分流堰の設置は欠かせないが、この実験結果が示すように、分流堰の設置によって流量が増加する蛇行区間では、その上流域右岸側の河岸浸食が顕著となることがわかった。

以上のことから、試験地と同様に、当予定区間の旧川 H・J 蛇行河道上流右岸側 (分岐点周辺の直線河道左岸側を含む) は、分岐部保護の観点から、護岸敷設によって河岸を保護する必要があるといえ、またその際、分流堰設置による流量の増加も考慮した十分な根入れを確保する必要があるといえる。



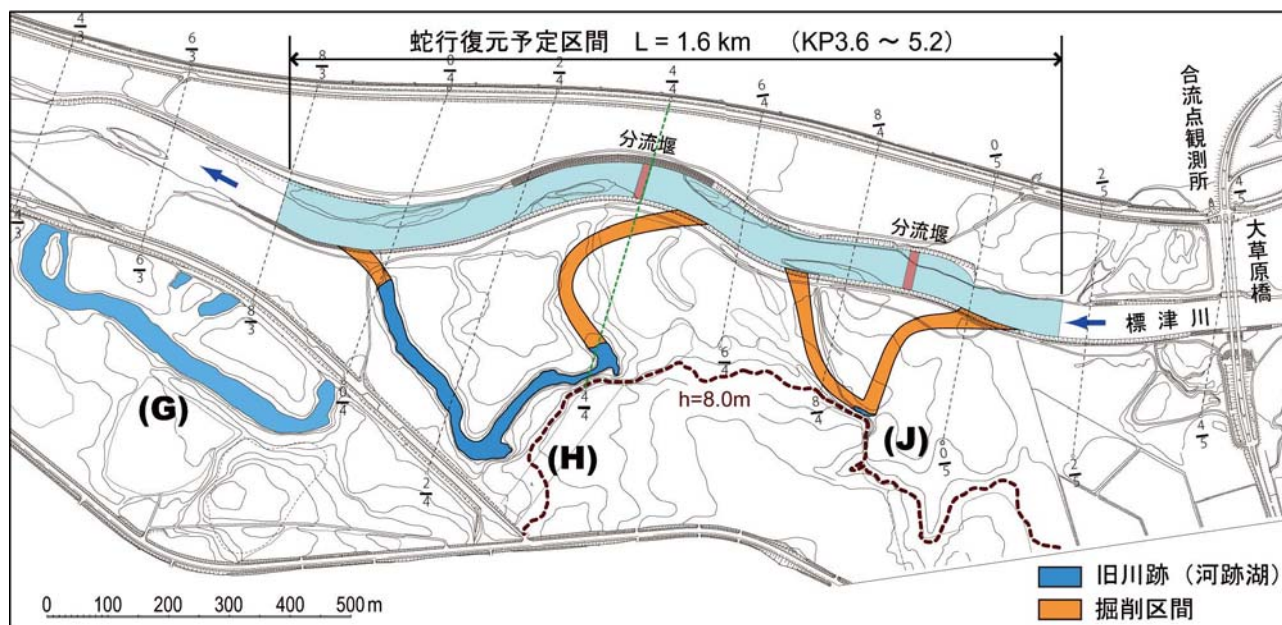


図 - 15.1.59 蛇行復元予定区間：旧川 H・J の河跡湖と掘削予定箇所(標津川下流 KP3.6~5.2)

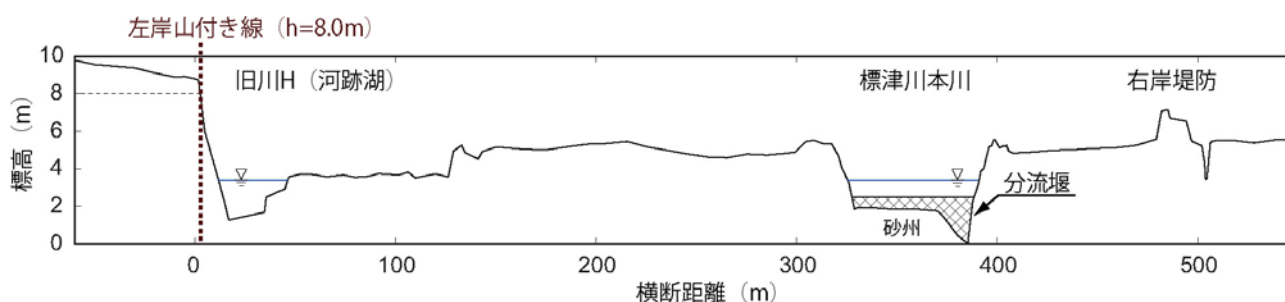


図 - 15.1.60 横断形状 (KP4.4)

### 3.3 実験 (分流堰高の違いによる土砂堆積の比較)

#### 3.3.1 実験目的

次に、設置される分流堰の高さの違いが、当区間における土砂の堆積・浸食作用に対して、どのような影響を及ぼすかについて検証を行った。すでに述べたように、蛇行復元試験地において観測されてきた様々な現象から、このような 2way 河道が持つ技術的課題がいくつか明らかとなっているが、その中でも特に以下に示す課題は、2Way 河道の維持のみならず治水安全性をも損なう可能性があるため、今後予定されている蛇行復元計画を実施する上では特に留意してその対策を検討する必要がある。

- 1) 大規模な洪水が蛇行区間の土砂堆積を誘発し、やがて河道が埋没してしまう可能性がある。
- 2) 直線区間の砂州上で生長するヤナギが樹林化し、流下能力を低下させる可能性がある。

図 - 15.1.59 は、平成 22 年度以降に実施が計画されている旧川 H・J を含む延長 1.6km の区間を示す。図中の色塗り箇所は、各旧川の河跡湖と掘削予定箇所

所を表し、それぞれの分岐点下流には蛇行区間への導水を促す分流堰が設置される予定となっている。ここで上記 2) の課題について、当区間特有の河道状況を述べる。

図 - 15.1.59 に示す茶点線は 8.0m の標高線を示す。また、図 - 15.1.60 に示すように周辺の堤防高は 7.0m 程度であるため、この標高線に沿う形で左岸は山付きになっていると考えることができる。このため KP4.4~4.9 の区間では、河道幅が狭まり河道断面面積も縮小していると推察される。また当区間の 3km 上流に位置する蛇行復元試験地では、分流によって流量が減少する直線区間において、砂州の発達とその固定化が観測されており、このことは旧川 J の分流堰下流の砂州についても同様にいえるものと考えられる。このような砂州の発達・固定化は、やがてその砂州上で生長するヤナギの樹林化を誘発し、流下能力を著しく低下させる可能性がある。

これら 2 つの課題に対して、治水安全度を低下さ



図 - 15.1.61 大型水理模型実験施設 移動床区間 (KP3.6~5.2)

せることなく、このような連続した 2Way 河道を自律的に維持するための対策について以下検討を行った。検討方法は前節同様に、図 - 15.1.59 に示す区間を模した 1/25 スケールの無歪み模型を、図 - 15.1.61 に示すように製作し、同じ移動床条件の下、各堰高とハイドロパターンを変えて実験を行った。

### 3.3.2 実験条件

実験は、図 - 15.1.62 に示す流量条件の下、旧川 H・J の分岐点下流に設置する分流堰（これ以降、H 堰および J 堰と表記する）の高さを変え、計 2 パターンを実施した。各 CASE の堰高は過去に行われてきた実験結果を踏まえ、次のように設定した。

**CASE1)** H 堰： $h_1=0.7\text{m}$ 、J 堰： $h_2=0.9\text{m}$

**CASE2)** H 堰： $h_1=1.0\text{m}$ 、J 堰： $h_2=1.0\text{m}$

ここでいう堰高とは、堰頂部と分流堰を設置する断面における低水路内の平均河床高との標高差を指し、試験地で実際に設置されている堰高の基準に倣い、概ね豊水流量で越流する高さを目安としている。各 CASE 間の堰高の違いは、前節で述べた 2 つの課題に対して、それぞれ次のような効果を期待したものである。

**CASE1)** 堰高を低めに設定し、直線区間に配分される流量を増加させることで砂州の発達・固定化を抑制する。

**CASE2)** 堰高を高めに設定し、蛇行区間に配分される流量を増加させることで蛇行区間における土砂堆積を抑制する。

	平水	低水路満杯	融雪出水	融雪出水	平水
通水区分	CASE 1-1	CASE 1-2	CASE 1-3	CASE 1-4	CASE 1-5
	CASE 2-1	CASE 2-2	CASE 2-3	CASE 2-4	CASE 2-5
通水時間 (h)	6	6	9	9	9
実験流量 (L/s)	5.4	140.0	16.0	16.0	5.4
実流量 (m <sup>3</sup> /s)	17	438	50	50	17

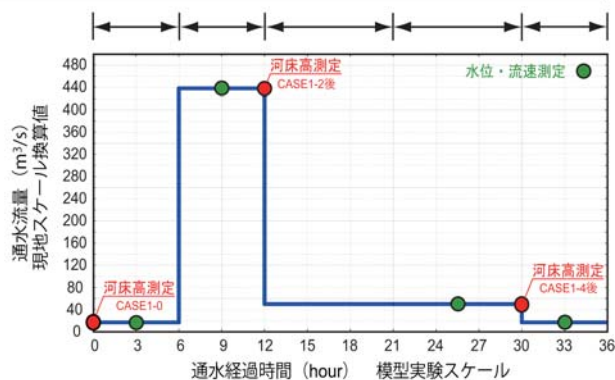


図 - 15.1.62 流量条件と河床高計測時期

また、各 CASE 共通で設定した流量条件の内、低水路満杯流量とは過去 50 年間で最大の流量を観測した平成 14 年 10 月の大規模洪水を想定したものであり、平水および融雪出水流量とは当該時期にこの区間を流れる平均的な流量をそれぞれ想定している。

### 3.3.3 河床高平面図から実験結果を考察

当実験では図 - 15.1.61 に示す各測線上において、河床高・水位・流速の測定を行っている。各測定はそれぞれレーザー砂面計・ポイントゲージ・電磁流速計を用いて行われたもので、以下これらの計測デ

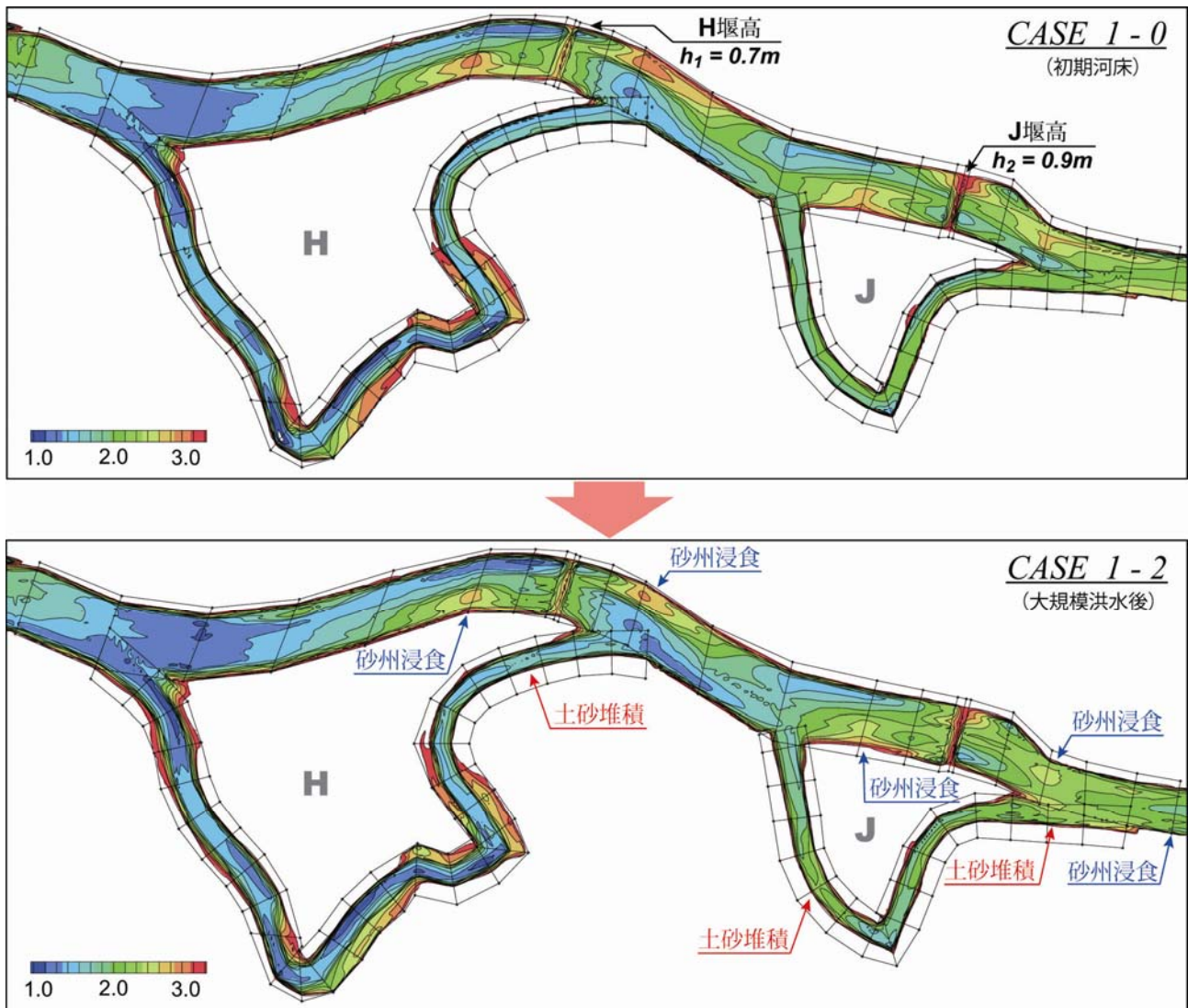


図 - 15.1.63 CASE1の初期河床とCASE1-1(平水: 17m<sup>3</sup>/s)、CASE1-2(低水路満杯: 438m<sup>3</sup>/s)を各6時間通水後

ータをもとに実験結果の考察を行った。なお、各計測のタイミングは図 - 15.1.62 に示す通りである。以降、実験結果の考察は、模型実験で計測された値を実スケールに換算したもので議論する。

### 3.3.3-1 CASE1: 大規模洪水後の変化

図 - 15.1.63 に示す河床高平面図は、上段がCASE1の初期河床の状態を、下段が大規模洪水を想定したCASE1-2の通水後の状態をそれぞれ示す。

(図 - 15.1.64 はCASE1-2の通水状況) ここで示すコンター図は標高0.15~2.95mまでを28cm間隔で10色に彩色したものである。これらの図の比較から、CASE1で設定した堰高条件の下で大規模な洪水を受けた後、直線区間において全ての砂州が30cm程度の浸食を受けたことがわかった。また、CASE1-2の後の融雪出水(CASE1-3およびCASE1-4)通水

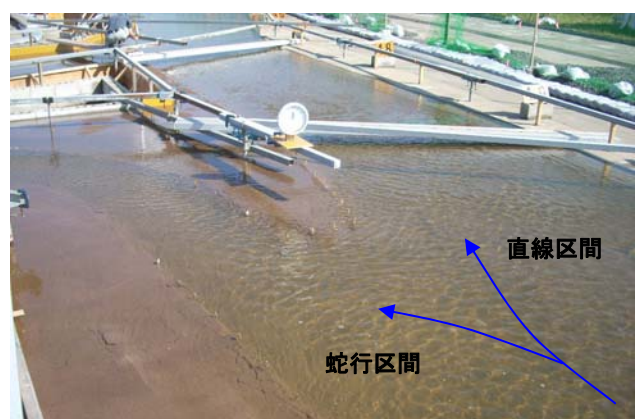


図 - 15.1.64 CASE1-2 通水状況 (旧川J分岐部)

後では、これらの砂州にほとんど変化が起きなかったためここでは示さない。一方、蛇行区間では旧川H・Jともに流入口周辺を中心に土砂が堆積したことが見てとれるが、その詳細は次節で示す。

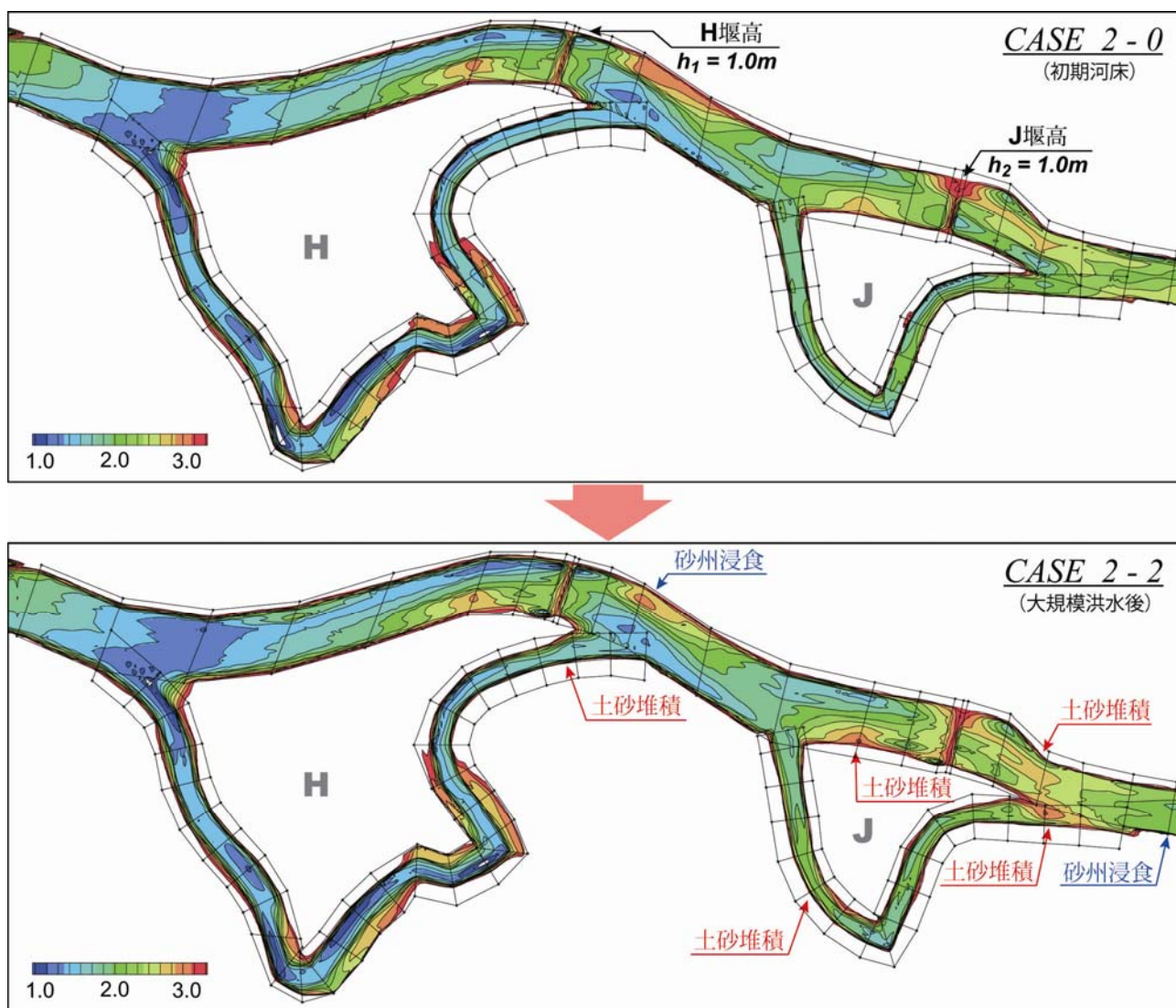


図 - 15.1.65 CASE2の初期河床とCASE2-1(平水：17m<sup>3</sup>/s)、CASE2-2(低水路満杯：438m<sup>3</sup>/s)を各6時間通水後

### 3.3.3-2 CASE2：大規模洪水後の変化

図 - 15.1.65 に示す河床高平面図は、上段がCASE2の初期河床の状態を、下段が大規模洪水を想定したCASE2-2の通水後の状態をそれぞれ示し、前項で示した3.3.3-1との実験条件の違いはH・J堰の堰高のみである。これらの図の比較から、CASE2で設定した堰高条件の下で大規模な洪水を受けた後、CASE1同様、直線区間における一部の砂州で30cm程度の浸食が確認されるが、J堰上下流および旧川Jの分岐点では大幅な土砂堆積が生じたことがわかる。また、CASE1と同様にCASE2-2～2-4通水後においても直線区間の状況にはほとんど変化が起きなかったため、ここでは示さない。一方、蛇行区間では、CASE1同様、旧川H・Jともに流入口周辺を中心に大幅な土砂堆積が生じたことが見てとれるが、その詳細は次節で示す。

### 3.3.3-3 直線区間の砂州について考察

以上、大規模洪水前後において直線区間の砂州に起きた変化をCASE1とCASE2で比較すると、堰高を低めに設定したCASE1の条件では、大規模洪水時に直線区間を流れる流量はCASE2に比べて相対的に多くなるため、直線区間の既存の砂州を概ね30cm程度浸食する効果があったといえる。このことは、3.3.1の2)で特に留意すべき課題として挙げたJ堰下流左岸側に形成される砂州に対しても、浸食・攪乱による植生の樹林化抑制効果が見込めることを示唆している。一方、CASE2の条件ではこのような効果がほとんど見込めないと推察することができる。ただし、当実験では砂州上で生長する植生(ヤナギを主体とする)による被覆効果は考慮されていないため、実際に起きる浸食の規模はこれよりも少なくなるものと考えられる。

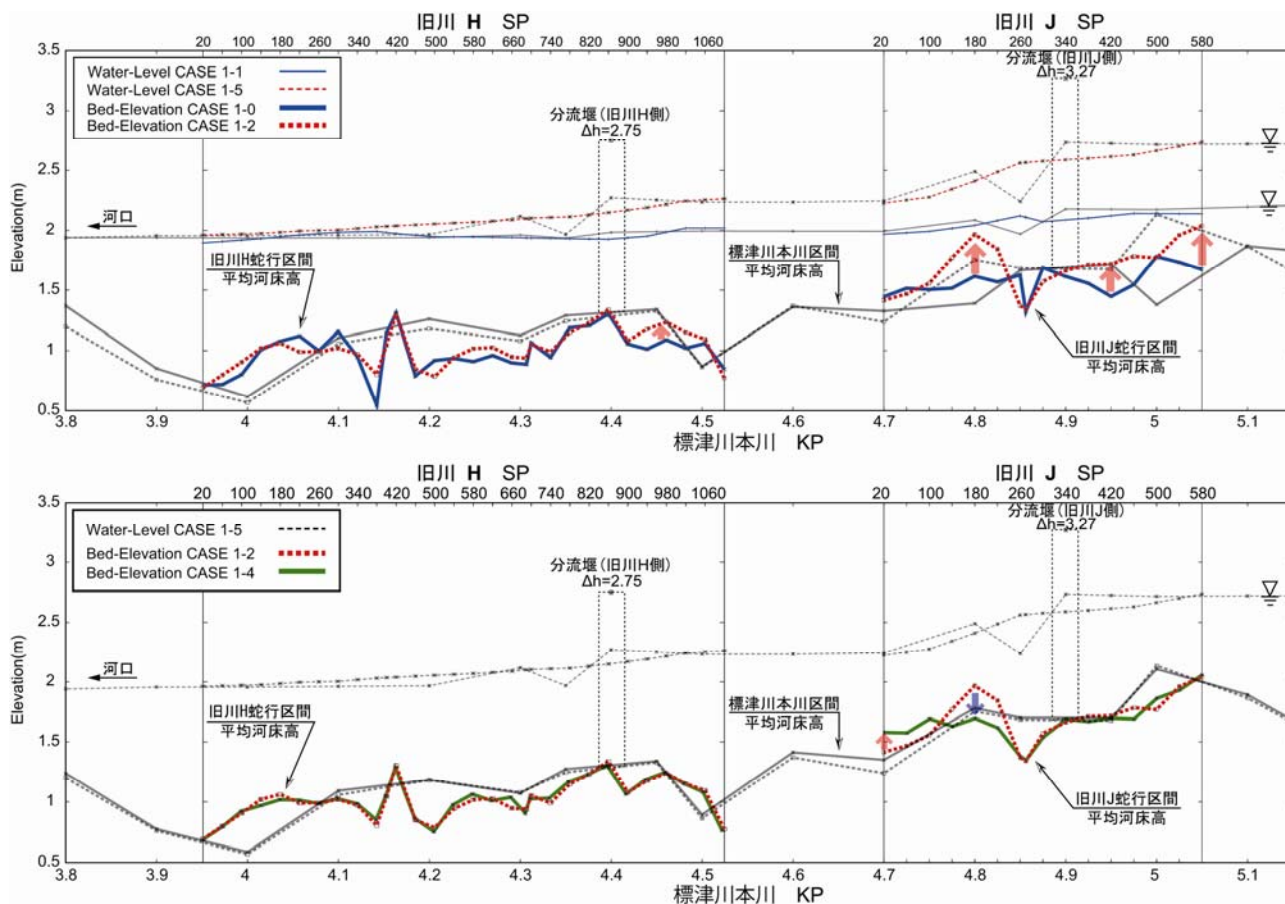


図 - 15.1.66 初期河床 (CASE1-0)、大規模洪水 (CASE1-2)、融雪出水後 (CASE1-4) の平均河床縦断線形の比較

### 3.3.4 河床高縦断図から実験結果を考察

次に河床高平面図では明確な比較が困難であった J・H 蛇行区間の変化について、河床高縦断図を用いた検証を行った。なお、以降で比較する河床高は平水流量規模  $Q=17\text{m}^3/\text{s}$  において計測された水位データをもとに、各断面の平均河床高を求めたものであるため、直線区間にみられる砂州など、その標高が平水位以上となる箇所は含まれない。

#### 3.3.4-1 CASE1 : 大規模洪水後の変化

図 - 15.1.66 上段に示すグラフは、CASE1 の初期河床と CASE1-2 通水後の平均河床縦断線形、および平水流量時 (CASE1-1、CASE1-5) において計測された水面形を比較したものである。ここで、色の違いは蛇行区間と直線区間の違いを、線種の違いは河床高の計測時期の違いを示しており、初期河床形状を実線で、大規模洪水後の河床形状を破線で示している。ここで注目するのは、図中の太線で示された蛇行区間の平均河床縦断線形の変化についてである。図中矢印で示すように、大規模洪水通水後、旧

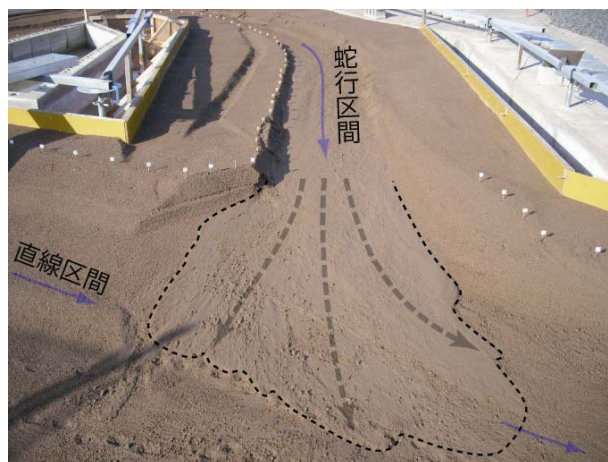


図 - 15.1.67 CASE1-4 通水後の旧川 J 合流点における土砂流出

川 J の蛇行区間全体で最大 30cm 程度の土砂堆積があったことがわかる。また旧川 H についても、その流入口付近において 10cm 程度の堆積がみられた。しかし、これらの土砂堆積によって蛇行区間への流量配分比が著しく低下するような影響は観測されなかった。

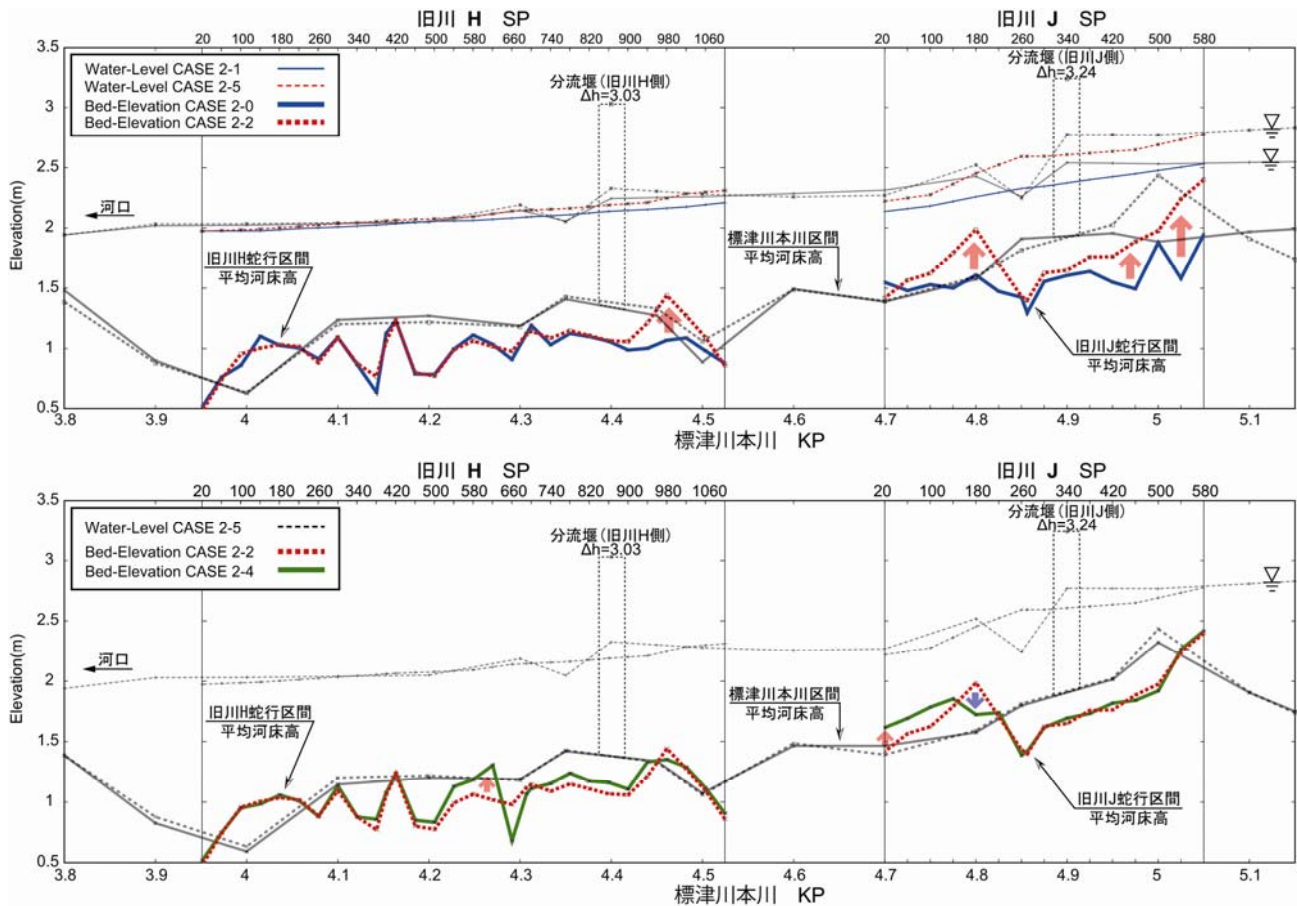


図 - 15.1.68 初期河床 (CASE2-0)、大規模洪水 (CASE2-2)、融雪出水後 (CASE2-4) の平均河床縦断線形の比較

### 3.3.4-2 CASE1 : 融雪出水後の変化

図 - 15.1.66 下段に示すグラフは、CASE1-2 通水後と CASE1-4 通水後の平均河床縦断線形を比較したものであり、水面形は平水流量時 (CASE1-5) において計測されたものを示す。前項同様に、色の違いは蛇行区間と直線区間の違いを、線種の違いは河床高の計測時期の違いを示しており、大規模洪水後の河床形状を破線で、融雪出水後は実線で示している。図中の太線で示す蛇行区間の平均河床縦断線形の変化についてみると、融雪出水通水後、旧川 J の蛇行区間下流域に堆積した土砂が下流へと輸送されたことがわかる。図 - 15.1.67 に示すのはこの時の旧川 J 合流点の河道状況で、蛇行区間から輸送された土砂が扇状に流出している様子がわかる。



図 - 15.1.69 CASE2-2 通水後の旧川 J  
分岐点における土砂堆積

### 3.3.4-3 CASE2 : 大規模洪水後の変化

次に CASE2 の大規模洪水後の変化について図 - 15.1.68 上段にその結果を示す。図中の配色および線種の分けは CASE1 と同様である。図中の太線で示す蛇行区間の平均河床縦断線形の変化についてみ

ると、大規模洪水通水後、旧川 J の蛇行区間全体で最大 50cm 程度の土砂堆積があったことがわかる。この時の分岐点の河道状況を図 - 15.1.69 に示す。また旧川 H についても、その流入口付近において 25cm 程度の堆積がみられた。しかし、ここでも CASE1 同様に、これらの土砂堆積によって蛇行区間



図 - 15.1.70 固結した河床材料（ふるい分け時）

への流量配分比が著しく低下するような影響は観測されなかった。

#### 3.3.4-4 CASE2：融雪出水後の変化

図 - 15.1.68 下段に示すグラフはCASE2の融雪出水後の河床高の変化を示す。CASE1 同様に旧川 J 蛇行区間の下流域に堆積していた土砂が下流へと輸送されたことがわかる。また、CASE1 ではほぼ動きがなかった旧川 H の蛇行区間の上流域においてやや堆積傾向がみられた。

#### 3.3.4-5 蛇行区間の土砂堆積について考察

大規模洪水前後と融雪出水前後の H・J 蛇行区間における河床縦断形状の変化を CASE1 と CASE2 で比較すると、堰高を低めに設定した CASE1 の条件では堰高を高めに設定した CASE2 に比べ、大規模洪水時に蛇行区間を流れる流量は相対的に少なくなるため、掃流されて蛇行区間へと運ばれる土砂量も少なくなっていたものと考えられる。これが旧川 H・J 蛇行区間の流入付近でみられた土砂堆積量の差異となって現れたものと推察される。また、融雪出水後の変化は各 CASE 間で顕著な差異はみられなかったが、蛇行区間下流域に堆積した土砂は、両 CASE ともに、非常に緩やかではあるが徐々に下流へと輸送されることがわかった。

以上のことから、大規模洪水による土砂堆積という観点からは、CASE1 に比べ CASE2 の堰高条件は蛇行区間流入付近での土砂堆積傾向が強く現れるため、蛇行区間を埋没の危険から少しでも回避させるためには堰高を低めに設定した CASE1 の条件がより適切であるといえる。また、融雪出水による堆積土砂の排出という観点からは、両 CASE に大きな差異はないものの、若干ではあるが CASE1 の方が優位であると推察された。

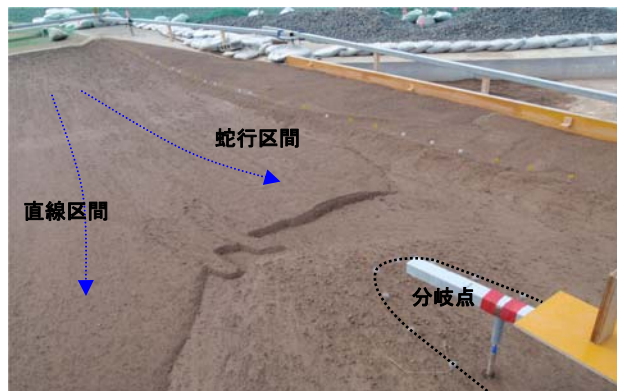


図 - 15.1.71 土砂堆積箇所の段差（旧川 J 分岐部）

#### 3.3.5 結論（移動床水理模型実験）

標津川下流域で予定されている蛇行復元箇所では、事業の実施に際して次のことが懸念されている。

- 1) 大規模な洪水が蛇行区間の土砂堆積を誘発し、やがて河道が埋没してしまう可能性がある。
- 2) 直線区間の砂州上で生長するヤナギが樹林化し、流下能力を低下させる可能性がある。

このような課題に対して、当区間を対象とした移動床水理模型実験を行い、CASE1、CASE2 の 2 つの堰高条件について検討を行った。その結果、上記 1) の課題に対しては、CASE1 で設定した堰高条件では、蛇行区間における大規模洪水後の土砂堆積量は比較的強く抑えられること、さらに堆積した土砂は融雪出水により徐々に排出される傾向が、比較的緩やかではあるが確認された。また、上記 2) の課題に対しても、CASE1 で設定した堰高条件の場合、大規模洪水後、直線区間において 30cm 程度の砂州の浸食が確認され、これは J 堰下流の砂州上における樹林化抑制の効果を示唆する結果であった。

これらの結果から、この蛇行復元予定地における連続した 2Way 河道を自律的に維持し、かつ治水安全度を低下させないためには、分岐点下流に設置される分流堰の高さを CASE1 の条件 (H 堰:  $h_1=0.7\text{m}$ 、J 堰:  $h_2=0.9\text{m}$ ) とすることが有効であると思われる。

#### 3.3.6 補足（実験結果の再現性について）

当実験は、以上で述べたように、使用する河床材料や実験条件の設定にあたっては、十分な検討を重ねた上で実施されたものであるが、通算の実験期間が非常に長期に亘ることや（平成 18～21 年度の冬季を除く 4 年間）、降雨や低温などの気象変化の影響を大きく受ける屋外実験であったため、河床材料として用いた下水汚泥焼却灰が経年的に変質していた可能性がある。図 - 15.1.70 に示すのは、平成 21



図 - 15.1.52 標津川下流域 (H21.7)



図 - 15.1.53 水理模型実験施設 (石狩実験場)

年度、実験開始前に行った河床材料の粒度調整時に採取された固結物である。このように、当河床材料はわずかに含有した石灰分によって徐々に固結する性質を有しており、実験中においてもその影響が少なからず及んでいた可能性がある。図 - 15.1.71 は、土砂の堆積が最も顕著であった旧川 J 分岐点付近の状況であるが、上流から流掃されてきた土砂は横断方向に大きな段差を形成した状態で堆積していたことがわかる。このような現象と実河川で起こる現象との整合性を考えた時、H21 年度の河床材料は実験開始当初に比べて高い粘性を有していたものと推察される。このことは、実験上、時間縮率にも大きな影響を与えるため、当初実験条件として設定した通水継続時間内では本来想定される十分な河床変動が起きなかった可能性もある。

### 3. まとめ (追跡調査・水理模型実験)

蛇行復元試験地における追跡調査と、標津川下流域の蛇行復元予定区間を模した水理模型実験から得られた主な知見と今後の課題を以下に示す。

- 1) 通水初期、旧蛇行河道を接続するために新たに掘削を行う区間では、大規模な河岸浸食が発生することとなるが、分岐点の水衝部となる箇所に護岸を敷設することで 2way 河道の分流機能は十分維持されるとともに、通水後 2～3 年程度の期間を経て徐々に河道は安定状態となり、河岸浸食の速度も時間経過とともに緩やかになることがわかった。
- 2) 蛇行河道と直線河道の分岐点下流 (直線河道側) に分流堰を設置することで、蛇行河道へ分配する流量を適切にコントロールすることができることがわかった。

- 3) 大規模な洪水を受けると、分流堰の高さに関わらず、蛇行区間では大幅な土砂堆積が生じ、一時的な河道埋没傾向を示すこととなるが、分流堰の高さが適切であれば、その後、平水・融雪出水等の通水が 1 年以上継続することで、堆積した土砂は徐々に蛇行区間から排出され、やがて元の河道状態へと復元されることがわかった。
- 4) 分流堰の分流効果によって、平水流量時、直線河道を流れる流量が大幅に減少することで、堰下流の蛇行河道側において大規模な砂州が形成されることとなる。この砂州上ではやがてヤナギが侵入しはじめ、毎年 20cm 程度の成長速度で樹林化傾向を強める。樹林化したヤナギは、洪水期、主流となる直線河道の河積を阻害し水位上昇を招く可能性があるため、河道の設計に際しては、この点を十分に考慮した流下能力の検証が求められる。
- 5) 蛇行河道へ分配される流量と河床高との応答関係を明らかにし、蛇行河道の埋没は、分配流量 (流量配分比) を適切に設定することで回避可能であることがわかった。また、非定常流量下における、2way 河道の水理量を平面 2 次的に解析可能な計算モデルを開発し、当モデルを用いた解析によって、蛇行河道に適切な流量配分をもたらす分流堰高の設計・管理基準 (工法) を明示的に示すことが可能となった。
- 6) 洪水時、2way 河道の蛇行区間では、総流量が 40～60m<sup>3</sup>/s (当試験地の場合) を超えた時点を超境に、流量・流速はともに急速に低下し始め、出水ピーク時には非常に緩やかな流れが形成されることがわかった。これは、2way 河道の蛇行区間が、洪水時、水生生物にとっての貴重な退



避・休息場となり得ることを示唆するものであり、同時に、当河道方式が豊かな生物生息環境の創出に適した河道設計手法であることを示す特徴の一つであると考えられる。

- 7) 標津川下流域の蛇行復元予定区間を対象とした水理模型実験においては、蛇行復元試験地で観測された現象がある程度良好に再現され、上記1)～6)の知見が当箇所においても十分適用されることが示された。また、これまで計画されていた堰高(H堰:0.8m、J堰:1.0m)を10cm下げることによって、分流堰下流に形成された砂州の攪乱を促進し、砂州上におけるヤナギの樹林化を抑制する効果があることが示唆された。さらに、この堰高であっても蛇行区間の埋没を回避するために必要な掃流力が十分確保されることがわかった。

#### 4. 謝辞

本研究では、国土交通省北海道開発局釧路開発建設部から数々の貴重なデータを提供していただきました。ここに記して謝意を表します。

#### 5. 参考文献

- 1) 永多朋紀, 安田浩保, 渡邊康玄: 2Way 河道の自律的な維持を可能にする適切な流量配分比の推定手法の提案, 河川技術論文集 第 16 巻, pp.143-148, 2010.
- 2) 永多朋紀, 安田浩保, 渡邊康玄, 長谷川和義: 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, 河川技術論文集 第 15 巻, pp.255-260, 2009.
- 3) 岸力, 黒木幹男: 移動床流れにおける河床形状と流体抵抗(I), 北海道大学工学部研究報告 第 67 号, pp.1-23, 1973.
- 4) 前野詩朗, 道奥康治, 森永智, 大西利典: 自然石を用いた堰の水理特性, 水工学論文集 第 46 巻, pp.493-498, 2002.
- 5) 本間仁: 低越流堰堤の流量係数, 土木学会誌 第 26 巻, 6 号: pp.635-645, 9 号: pp.849-862, 1940.
- 6) 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もな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.
- 7) 阿部修也, 渡邊康玄: 砂州が卓越する河道の河岸浸食実験に用いる河床材料に関する検討, 河川技術論文集 第 12 巻, pp.61-66, 2006.
- 8) 安田浩保, 清水康行: 座標軸非依存の部分境界適合法による蛇行流路の数値解析, 水工学論文集 第 52 巻, pp.1003-1008, 2008.
- 9) 横山洋, 渡邊康玄, 鈴木優一: 分岐・合流流れを有する河川における河床変動計算に関する研究, 寒地土木研究所月報, No.615 号, pp.2-9, 2004.
- 10) 横山洋, 渡邊康玄, 鈴木優一: 2 ウェイ低水路を有する河川における河床変動計算に関する研究, 水工学論文集, Vol.48, pp.201-206, 2003.
- 11) 高橋一浩, 永多朋紀, 池田共実: 標津川自然復元地における河道維持に関する実験について, 2008 年度北海道開発局技術研究発表会, 2008.
- 12) 鈴木優一ら: 標津川蛇行復元における 2way 河道の通水直後の変化, 水工学論文集, Vol.47, pp.703-708, 2003.
- 13) 山本昌慧, 渡邊康玄, 安田浩保: 標津川蛇行復元試験地における砂州の形成と樹木の生育特性, 土木学会北海道支部論文集 2008, 第 65 号, 2009.
- 14) 星清, 清水康行ら: 現場のための水理学, 北海道開発局土木試験所 河川研究室, 1988.
- 15) 標津川技術検討委員会資料, 北海道開発局釧路開発建設部, 2008.
- 16) 標津川技術検討委員会資料, 北海道開発局釧路開発建設部, 2004.
- 17) RIC-Nays: 一般財団法人 北海道河川財団, <http://i-ric.org/nays/ja/index.html>, 2011.