

2Way 河道の自律的な維持を可能にする 分流堰高に関する検討

A Study on Diversion Weir Height for Maintaining Two-way Channel

永多 朋紀¹・安田 浩保²・渡邊 康玄³

Tomonori NAGATA, Hiroyasu YASUDA and Yasuharu WATANABE

¹ 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)

² 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)

³ 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)

Attempts have been made to reconnect the current river channel (which was previously straightened in river improvement work) with previous meanders in channels remaining as oxbow lakes, on the Shibetsu River in the northeastern part of Japan. The purpose of this project is to restore the rich natural environment that had been lost in the straightening, while maintaining the channel's function of enabling floodwater to flow away safely. Such a channel is known as a "two-way channel" as it has two passages, and has a diversion weir installed downstream from the divergence point to facilitate the flow of water to the meandering side. This study presents a method of creating a computational grid for two-dimensional analysis of such a two-way channel. This method also enables detailed advance verification of the weir height required for long-term management of river channels with divergence and confluence points.

Key Words : Two-way channel, Two-dimensional analysis, Diversion weir, Flow Distribution Ratio

1. はじめに

北海道北東部に位置する標津川では、河川改修によって失われた豊かな河川環境を復元するため、直線化された現在の河道に河跡湖として残る旧蛇行河道を再び接続する試みが行われている。この試みでは、直線化河道と旧蛇行河道を共存させた『2way 河道方式』が採用され、洪水を安全に流下させる機能を残しつつ、直線化によって失われた過去の豊かな生物生息環境を復元できると期待されている。

2002 年、標津川の河口から 8.5km 上流において図-1 に示すような 2way 河道が試験的に整備され、これまで約 9 年にも亘る継続的な調査・研究が行われてきた。

著者らの研究¹⁾によって、この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。その後、蛇行河道に適切な流量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ている。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、

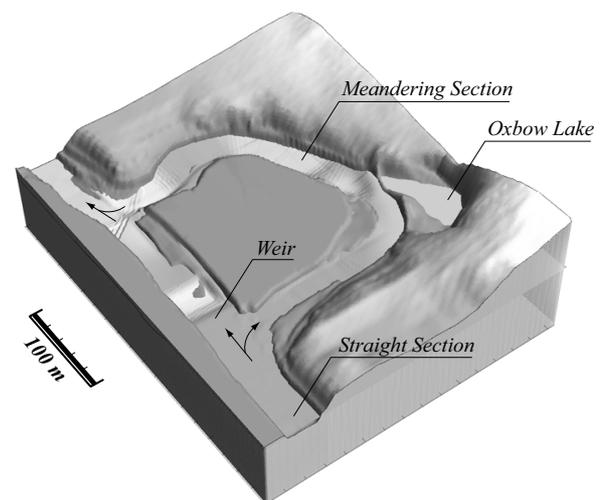


図-1 蛇行復元試験地 鳥瞰図

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、平常時、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理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

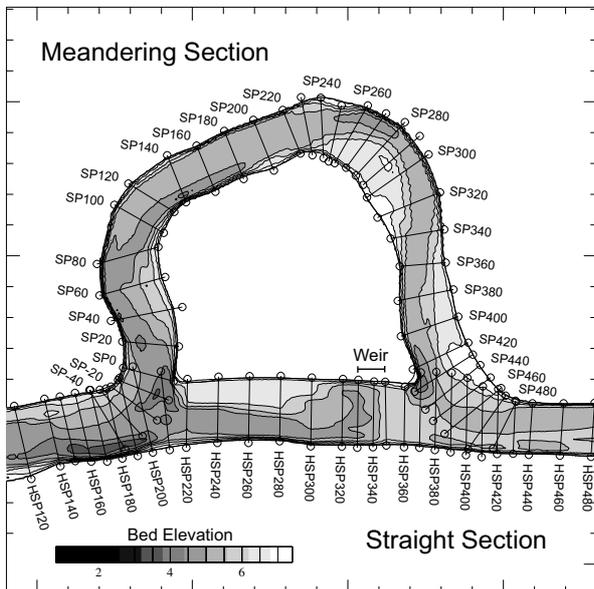


図-2 測線配置，河床高平面図（測量：2010.11）

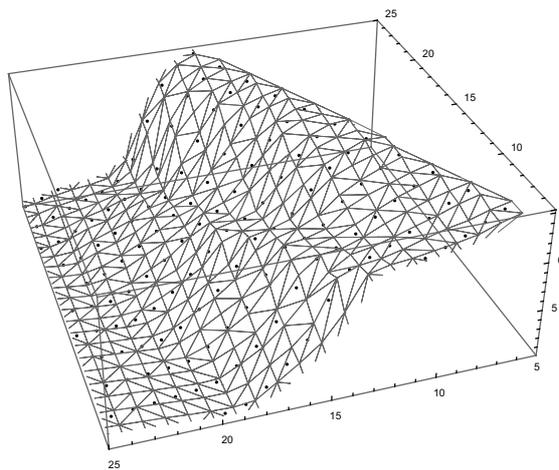


図-3 河床形状を三角平面でモデル化，一般座標格子点の投影

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。

本研究では、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した。そして、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。

2. 解析手法と計算条件

(1) 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-2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。

本研究では、このような河床データをもとにして、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。

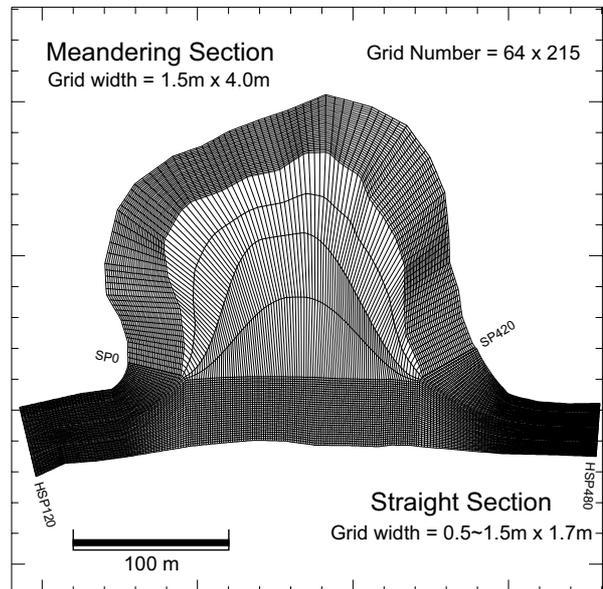


図-4 一般座標系計算格子 (X,Y)

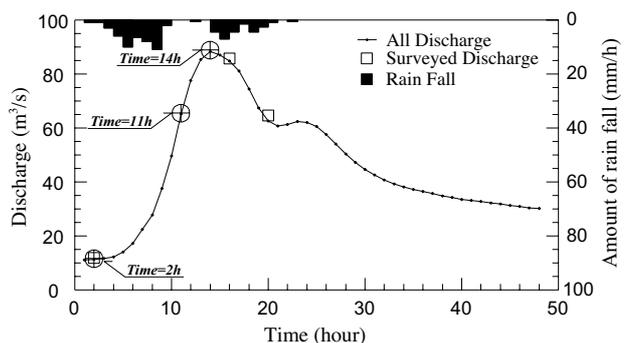


図-5 流量変化 (2010/12/3 12:00 ~ 12/5 12:00)

まず、等分割した横断測線間を線形補間し、河床データの分布密度を高める。次に、格子幅1mの直交座標系格子(X,Y)を作成し、各格子点近傍の河床データをそれぞれ4点抽出する。抽出した4点に対して、各格子点との距離の2乗に反比例した重み付けを行い、補間対象点の標高値を得る(逆距離加算法)。図-2は以上の補間によって得られた河床形状を平面図で示したものであるが、測量時に撮影された航空写真との比較から、分岐合流部における局所洗掘や砂州前縁線などを明瞭に表現し得ることがわかった。次に、この正方形格子状の河床データを図-3に示すような三角平面の集合体としてモデル化する。最後に、図-4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、先の三角平面上へと投影することで、図中の点で示すような各格子点(一般座標系)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、任意の一般座標系格子が作成可能となる。

(2) 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-5は、昨年(2010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。図中の口は、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章で示す。

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。

(3) 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(1)の手法により作成した一般座標系格子(図-4)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.solver²⁾」を使用した。

当プログラムが扱う流れの支配方程式²⁾は、以下に示す平面二次元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。

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = hg \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\tau_x}{\rho} + D^x \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

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、 ρ :流体の密度、 τ :剪断応力、 D :粘性力である。

式中の圧力項・粘性項は次式で与えられる。

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{gn^2u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{1/3}}, \quad \frac{\tau_y}{\rho} = \frac{gn^2v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{1/3}} \quad (4)$$

$$D^x = \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial(uh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial(uh)}{\partial y} \right] \quad (5)$$

$$D^y = \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial(vh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial(vh)}{\partial y} \right] \quad (6)$$

ここで、 n :マンニングの粗度係数、 ν_t :拡散係数である。

(4) 計算条件

計算領域は、図-4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、総流量が $300\text{m}^3/\text{s}$ を越すような場合に浸水する比較的標高の高い箇所であり、今回解析を行う流量($90\text{m}^3/\text{s}$ 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-5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、(7)式に示すManning-Stricklerによる平坦河床の抵抗則³⁾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。

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{7.66\sqrt{g}}, \quad k_s = 2d \quad (7)$$

ここで、 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。

(5) 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-2)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($\bar{r} = 20\text{cm}$)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⁴⁾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。

以上より、本解析では、分流堰を不透水性構造物として扱い、その形状には横断測量によって得られた標高値を与え、粗度係数は河床と同様($n = 0.041$)とした。

3. 計算モデルの適合性検討

(1) 解析結果の検証(流速・水位)

図-6, 7, 9はそれぞれ、図-5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、右縦断図中の口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、図-8は分岐合流点における蛇行区間の計算水位を示している。また、図-8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-6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 $11.3\text{m}^3/\text{s}$ 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

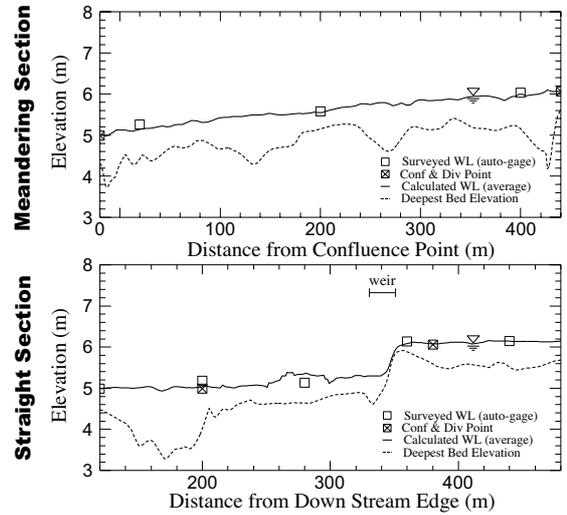
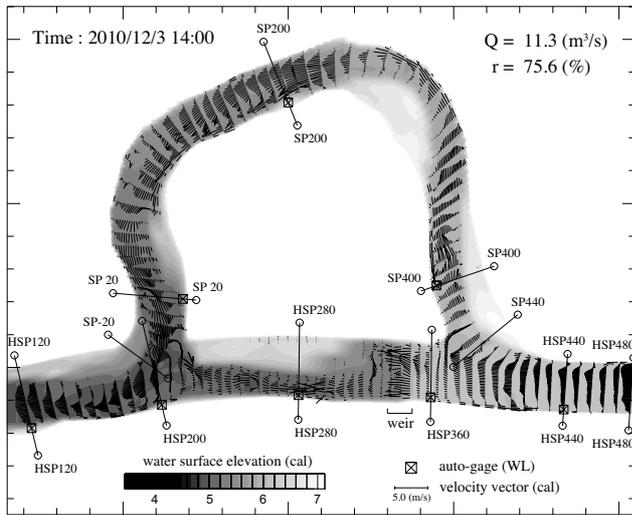


図-6 [Time=2h] 流速ベクトル・水位面標高平面図 (左), 蛇行区間縦断面図 (右上), 直線区間縦断面図 (右下)

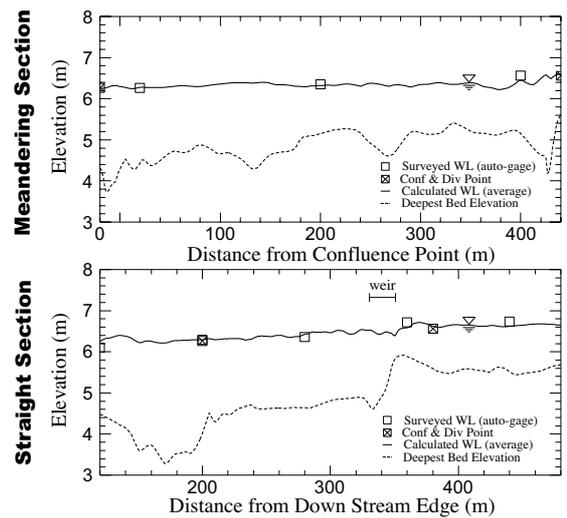
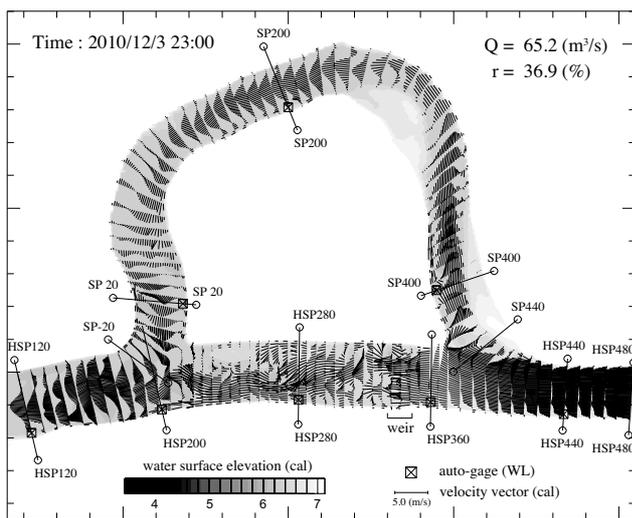


図-7 [Time=11h] 流速ベクトル・水位面標高平面図 (左), 蛇行区間縦断面図 (右上), 直線区間縦断面図 (右下)

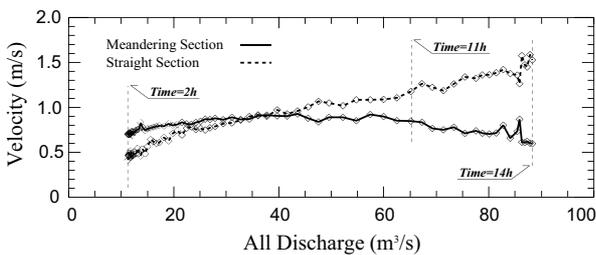


図-8 平均流速の変化 (蛇行:SP0~420, 直線:HSP210~360)

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-8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高相当(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との整合性は高く、流量変化とともに大きく変動する蛇行・直線両区間

の水面形を比較的良好に再現し得ることがわかった。

b) 増水期：Time=11h

次に、図-6の9時間後にあたる増水期の流況を図-7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-7の左図から、直線区間の流速が卓越している状況が見とれる。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-8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。

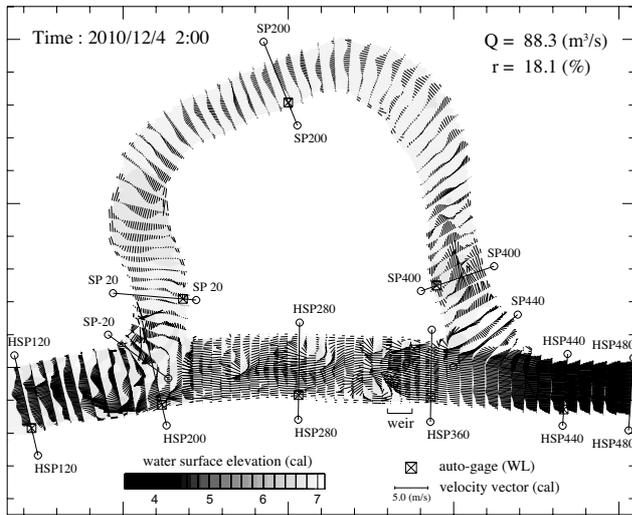


図-9 [Time=14h] 流速ベクトル・水位面標高平面図 (左), 蛇行区間縦断面図 (右上), 直線区間縦断面図 (右下)

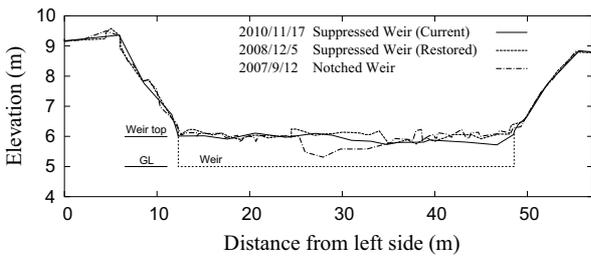


図-10 堰天端の形状変化 (堰高復元前後)

c) 出水ピーク時：Time=14h

最後に、図-7の3時間後にあたる出水ピーク時の流況を図-9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。図-9左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-8に示すように、平常時の $0.7\text{m}/\text{s}$ を下回る期間最低値($0.6\text{m}/\text{s}$)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退避・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。

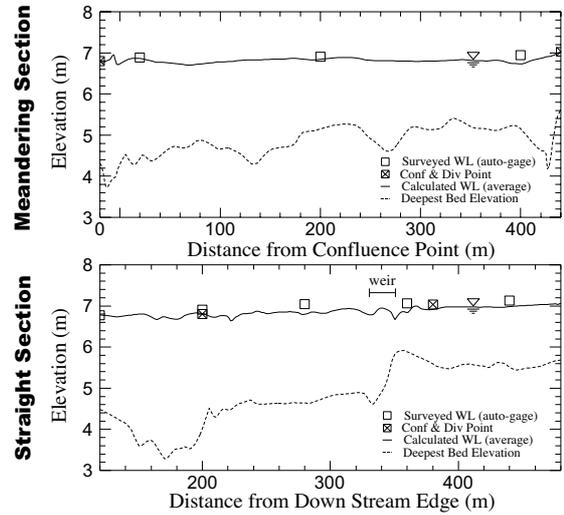


図-11 流量配分比の変遷過程 (実測値)

(2) 解析結果の検証 (流量)

ここで、流量解析の検証結果を示す前に、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述べる。

図-10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、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、河道埋没の可能性が危惧されたことから、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む過去の流量観測値は、2way河道の適切な堰高を検討するに際し、非常に有用な示唆を含むものとなった。

図-11に過去9年間の流量観測結果を示す。図中の○と△は全幅堰の期間、◇と□は切下堰の期間に相当し、各点を結ぶ直線はその変遷過程を示している。この図から、全幅堰の期間は、洪水後の土砂堆積に起因した流量配分比の低下と、その後の自律的な回復を繰り返しており、河道は十分な自然復元力を有していたことがわかる。一方、切下堰の期間は、堰高の切下げ以降も流量配分比は徐々に低下しており、河道は埋没傾向を高めていたものと推察される。これは、堰高

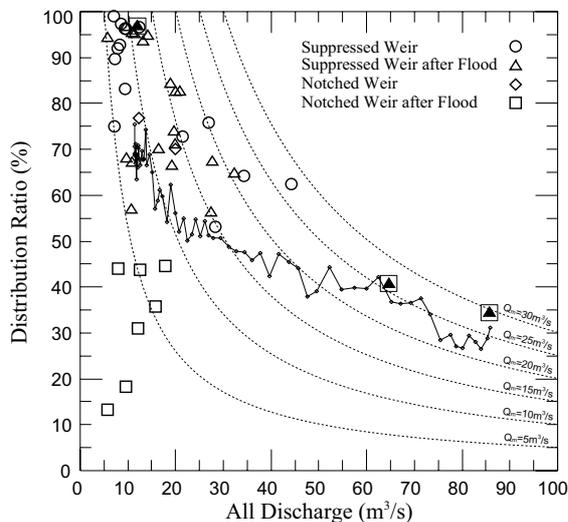


図-12 流量配分比の計算値・実測値

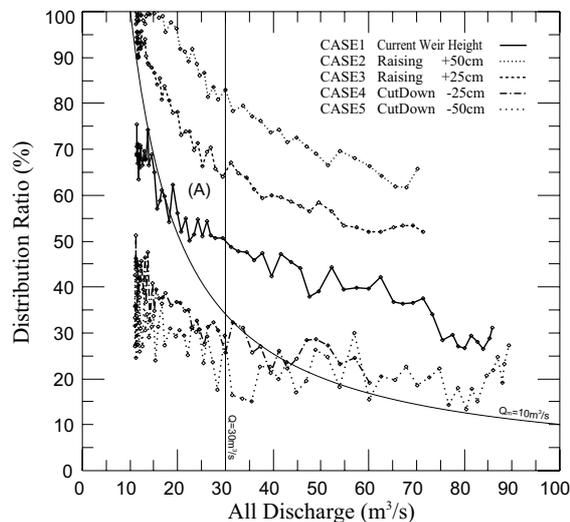


図-13 堰高の違いによる流量配分比の変化 (計算値)

の切下げを契機とした分配流量（掃流力）の低下が蛇行区間への土砂堆積を誘発し、堆積した土砂がさらなる分配流量の低下を招く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る。

ここで、図-11の流量配分比と実際の蛇行区間流量との関係を、解析結果と併せて図-12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。ただし、3.(1)cで述べたように、当解析では砂州上に繁茂する植生の流水抵抗を考慮しておらず、計算精度の向上には今後の改善が必要と思われる。

図中の破線は蛇行区間流量を $5m^3/s$ 間隔で示したもので、切下堰の期間は $10m^3/s$ を大きく下回っていたことがわかる。一次元河床変動計算を用いた過去の研究¹⁾から、蛇行区間に $10m^3/s$ 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、 $3m^3/s$ 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。

以上より、本研究では、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 $10m^3/s$ 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。当試験地の総流量は、年間日数の約90%が $30m^3/s$ 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。

(3) 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、先の解析で使用した堰天端の高さを基準に、高さ方向 $\pm 50cm$ の範囲を $25cm$ 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-13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 $Q_m=10m^3/s$ と総流量 $Q=30m^3/s$ 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の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 ($Q_m=10m^3/s$) 付近からこの領域内を通る線形を成しており、十分な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がわかる。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。

4. おわりに

本研究では、2way 河道の平面二次元解析を可能にする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。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 2d_solver: 一般財団法人 北海道河川財団, http://i-ric.org/nays/ja/images/kinou/2dsolver/gen_ow_e.pdf
- 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), 北大工学部研究報告 第67号, pp.1-23, 1973.
- 4) 前野詩朗ほか: 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.

(2011.5.19 受付)