

岩床河川における瀬と淵の再生に関する研究

STUDY ON RESTORATION OF RIFFLE AND POOL IN FLAT ROCK-BED RIVER

早川 博¹・宮本 大²

Hiroshi HAYAKAWA and Hiroshi MIYAMOTO

¹正会員 博(工) 北見工業大学准教授 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

²学生会員 北見工業大学大学院工学研究科 博士前期課程土木開発工学専攻
(〒090-8507 北見市公園町165番地)

For preserving a comfortable river ecosystem, it is important to protect and restore the riffle and pools within engineered channels, where should play a role in the habitat diversity and complexity. It will be no easy task to restore and preserve the pool-riffle in flat rock-bed river which is lightly covered with gravels, as contrasted with in the gravel river. In the Abashiri River, the improvement by channel deepening projects with rock-bed has been carried out, in which was introduced to construct artificial pools.

We investigate the restoration of the riffle and pools by constructing artificial pools. By field survey in the Abashiri River, the state of sediment on the improved channel is indicated. By distorted model experiment, we investigate the validity of artificial pools arrangement. As a result, it shows that the artificial constructed pools are corresponded to the location of generated ones in a mobile bed.

Key Words : *Riffle and pool, restoration, rock-bed river, river-bed variation, model similarity, distorted model experiment*

1. はじめに

河道計画上、河道の流下能力が不足している場合の河道改修として一般的なのは、河道幅の拡幅、堤防の嵩上げと河床の掘り下げが挙げられる。対象河道の自然条件、技術的および経済的諸条件を総合的に判断して改修方針は決定されるが、近年、特に動・植物の生態系に配慮した河川環境の保全が強く求められ、治水機能と環境機能を調和させた多自然型川づくりが進められている¹⁾。

河川の良好な生態系を保全していく上で、魚類や昆虫類の多様な生育環境を配慮するには河道内に瀬と淵が必要不可欠であり、瀬と淵の再生・保全が今後の河道改修において重要である。瀬と淵は礫床河川では比較的容易に回復させることができるが、本研究が対象とする網走川上流区間のように砂礫層が薄く岩盤河床を覆うような河川(写真-1)では、瀬と淵を再生・保全していくことは容易ではない。このような岩床河床に瀬と淵を再生するには、上流から流送されてくる砂礫を積極的に堆積させることが必要であり、例えば掘り下げた平坦な岩盤河床面を掘削して淵をつくり、そこをきっかけに瀬を創出・再生する手法が考えられる。しかしながら、その設計手



写真-1 河道の基岩露出部

法は技術者の経験によるところが大きく、その手法が瀬や淵の再生・保全にとって有効であるかの検討はほとんど行われていない。

本研究は岩盤河床の河川において多様な生態環境を保全していく上で不可欠な瀬と淵の再生・保全に取り組んだ網走川上流区間の河川改修工事(2008年3月完工)を対象に、2008年8月～9月に事後調査を実施して融雪出水後の河床の堆積状況を調べると共に、室内小型歪模型実験と河床変動シミュレーション等によって淵造成の最適な空間配置を検討するものである。

2. 対象河川と改修工事の概要

本研究の対象である網走川は、阿寒山系の阿幌岳(標高978m)に源を発し、津別町で津別川と合流し、中流部の美幌町で美幌川を合流して下流部の網走湖を経てオホーツク海に注ぐ流域面積1,380(km²)の一級河川である。網走川流域は大部分を丘陵地形が占めており、比較的緩勾配の河川の右岸は河岸段丘が発達している²⁾。

1992年9月の台風17号による洪水によって上流の津別地区の無堤防区間で外水氾濫が発生し、特に屈曲した河道の決壊氾濫によって畑地が冠水する被害を受けた。これを契機に上流区間では無堤防区間の流下能力不足区間の解消を図るべく河道改修が進められてきた。網走川の上流区間は左岸の山地と右岸の河岸段丘の間を縫う様に河道が流下し、河岸近くまで耕作地として利用されている。この区間の河床は基岩が比較的脆い泥岩や頁岩で構成され、砂礫層もそれほど厚く堆積しておらず、縦断的に河道の所々で基岩の露出がみられる(写真-1)。この区間の河川改修は、新たな河川用地の確保が難しいために不足する河積を河床掘削によって確保する河道改修が進められた。その際に良好な生態系の保全・再生を目指して、網走川環境保全技術検討会での議論を経て、平坦な一様な河床ではなく淵と瀬を再生し水制を配置した多様な河道断面をもつ河道改修工事に取り組み、2008年3月に改修工事は完了した。

図-1は本研究で調査している改修区間(KP.45~KP.48, SP5800~8400)の河道改修平面図であり、従来の河川改修のように直線化するのではなく、現況の大きく湾曲する河道区間2箇所を残した平面河道線形になっている。湾曲部外岸側の4箇所には淵の維持・保全を目的に計画

河床面よりさらに掘削した淵を作成し、淵の維持を目的に石組の水制工も併設されている。図-2は今回の改修で淵造成の考え方を示したもので、上流区間からの流れが直進して湾曲部にあたる水衝部までの瀬岸の接線長を L とすると、淵の造成区間は水衝部から下流に L 、上流に $L/2$ 設定している。また、淵と淵の間の区間には瀬・平瀬の再生・保全と流速等を多様化させ、生物の生育環境の改善を目指し、図-3に示すような流れの前面に巨礫ブロックを並べその後方をすり鉢状に掘削した分散型落差工を滞筋に沿って縦列配置して、その下流に砂礫を堆積させて将来的には鮭の産卵床となることを期待している。

3. 現地調査

本研究では、今春の融雪出水後に改修設定河床にどの程度砂礫が堆積したかを把握するために2008年8月7、8日と9月17日~19日にSP6400~SP7900の区間の河道横断測量を実施した。この調査区間における融雪出水は、直上流の津別流量観測地点の1977年~2005年の日流量データから、各年の融雪期最大日流量の平均値(以降、融雪期平均最大日流量とする)と最大流量は各々、47.8(m³/s)と84.7(m³/s)である。2008年の融雪期最大流量は4月9日の30(m³/s)(概算値)で平均を下回る融雪出水であり、5月21日に68(m³/s)(概算値)の降雨出水があったものの土砂移動はそれほど多くないと予想される。

(1) 調査結果

図-4は横断測量区間の河道低水路部分における土砂の堆積状況を示しており、河道掘削改修断面に10cm以上堆積した部分が薄いハッチング部分、次に濃い部分が

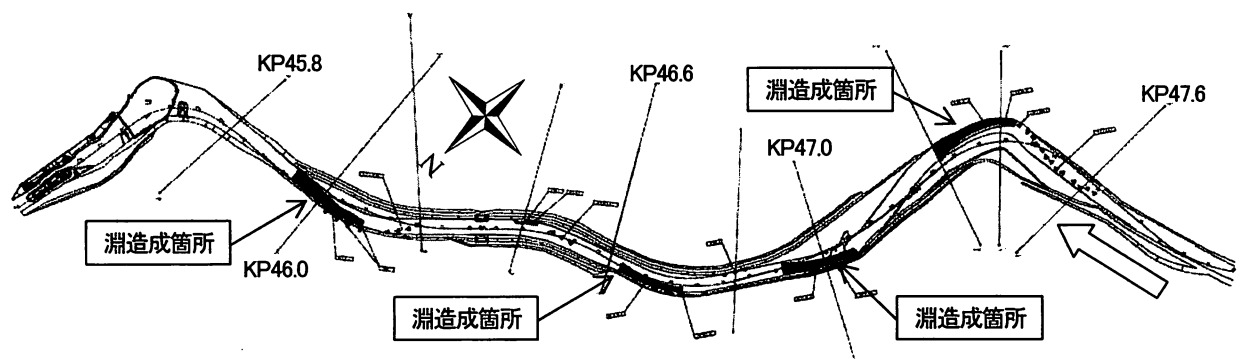


図-1 河道改修区間 (KP.45~KP.48, SP5800~8400) の平面図

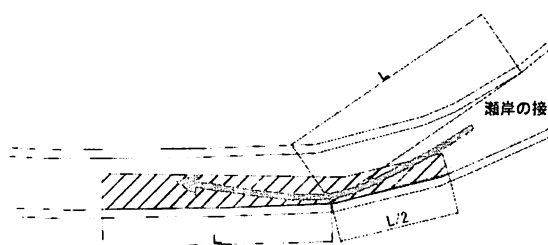


図-2 淵造成の考え方

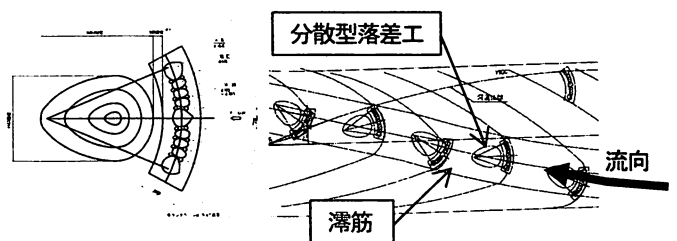


図-3 分散型落差工とその配置方法

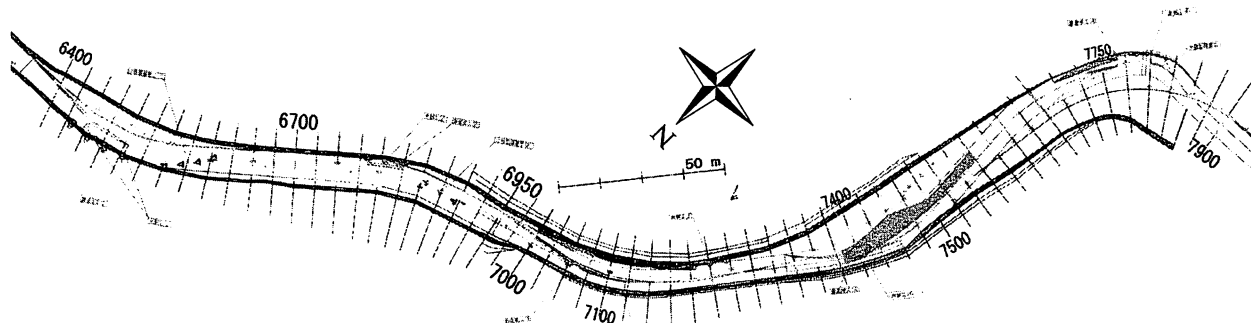


図-4 河道堆積状況の平面図 (SP6400~SP7900区間)

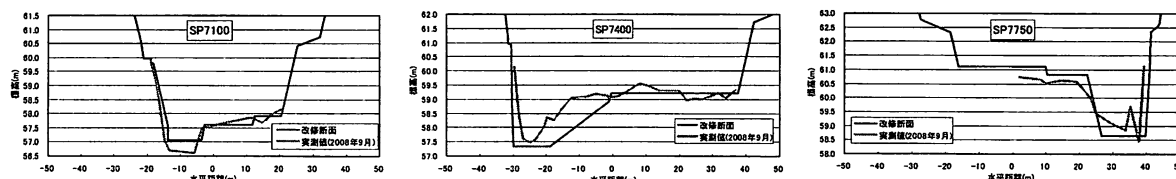


図-5 淵造成地点の河道横断面図

50cm以上、最も濃い部分が100cm以上の堆積部分である。湾曲部（SP7100～SP7900）の改修設定横断面と横断測量結果だけを表示した図である。SP7450からSP7600の区間は他の区間に比べて河道中央部に堆積しているが、これは現況の河道を掘削せずに残存させたものであり、融雪出水で堆積したものではない。図-5の横断面図からも上流の淵造成箇所（SP7400前後とSP7750前後）は両方とも淵に堆積が認められ、今後の出水によってどのような挙動を示すか注目すべき箇所である。一方、下流のSP7100とSP6500の淵造成箇所では淵にはほとんど堆積が見られず、淵から対岸にかけて堆積が見られた。また、淵と淵の間の瀬の区間は両岸付近がやや堆積傾向にあるものの、分散型落差工を敷設した滞筋中央部にはあまり堆積していない。

(2) 河床変動シミュレーションによる堆積状況の検討

今回の現地調査によって河道改修後の土砂堆積状況を把握できたが、今後の堆積状況を推定する必要がある。その検討の手始めとして1次元河床変動シミュレーションによって土砂堆積の挙動を調べる。

計算に用いた河床変動モデルは米国陸軍工兵隊のHEC-RAS³⁾で、米国の標準的なモデルである。HEC-RASは1次元モデルではあるものの、河床変動計算は一般河道断面を対象に準非定常流れによる混合粒径河床の河床変動計算が可能である。今回の解析では流砂量式にMeyer-Peter Muller式、沈降速度式にRubey式を適用した。改修前の河床材料は図-6に示すように平均粒径30(mm)の幅広い粒径分布であり、これを初期条件として与えた。また、河道が岩床河川であるために初期河床条件の設定が難しいので、解析では改修断面の表層20(cm)が砂礫層で、その下は固定床という条件で計算を実施した。流れの境界条件は、上流端で流量、下流端で等流水深を与え、流砂の上流端境界条件は、水理条件に応じた流砂量を供給する。なお、低水路河床の粗度係数 n_M は低水路満杯流

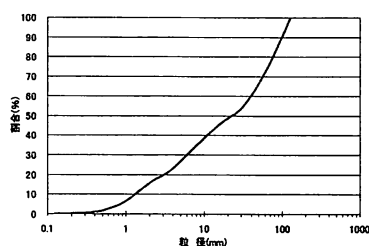


図-6 河床材料の粒径分布



図-7 津別流量観測地点の日流量ハイドログラフ

量として低水路を溢れないで流すことのできる流量 $350(\text{m}^3/\text{s})$ を算出した際に用いた $n_M=0.025$ とした。

計算流量は2008年度の観測流量を対象とすべきであるが、データ整理中であつたので公開されている最新の2006年の日流量データを用いた(図-7)。2006年は4月21日に $Q=96(\text{m}^3/\text{s})$ を記録し、前出の2005年までの融雪期最大日流量を更新しており、融雪期としては活発な土砂移動が予想される条件である。

図-8は最深河床部を連ねた河床縦断面図で、河床の低下している部分が淵造成箇所である。6月1日時点で淵の部分に堆積している状況がわかる。特に堆積が著しいのは図-9の変動量からも上流のSP7750と下流のSP6450の地点である。図-9にプロットした2008年の実測値と比較すると、定性的には概ね堆積箇所は対応している。しかし淵と淵の間の瀬に相当する区間は洗堀しており、岩床河川では礫床河川とは異なる流砂機構が考えられる。今後、今回の計算で無視した分散型落差工などの影響も併せて

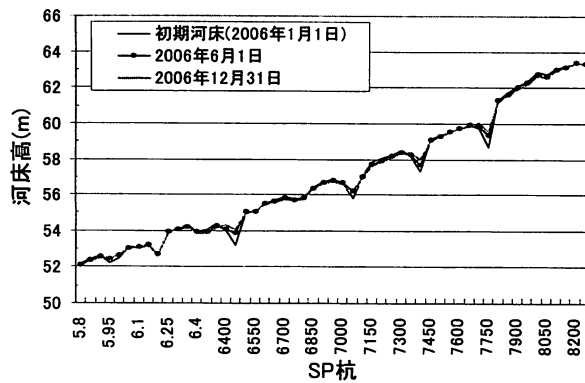


図-8 河床縦断面図(最深部)

検討する必要がある。

4. 歪模型実験による淵設置地点の検討

今回の網走川の改修工事では、淵の部分で低水路にどの位置に配置すると、そこに河床材料がどの程度堆積して、はたして淵は今後とも維持されるか、ということが河道の維持管理上、重要である。本研究では図-2に示す河道平面線形と淵の配置の関係、それに伴う河床の洗掘・堆積箇所の検討をするために、低水路を対象とする移動床実験を試みた。実河道は岩盤からなる固定床であっても、淵を造成する場所は移動床の場合に河道平面線形と流れの水理条件から淵が生成される箇所に淵を造成するのが最適であろう。

実河川の模型実験は一般にフルード相似が成り立つには縮尺を1/50程度とする大型模型にする必要がある⁴⁾。室内の実験スペースを考え、小縮尺の小型模型実験を行うには水平・鉛直の縮尺比を歪める歪模型にする必要がある。内島ら⁵⁾は交互砂州が発生する条件下での移動床歪模型実験手法を提案し、礫床河川における河床変動予測に成果を挙げている。本研究も内島らの歪模型実験手法に則して低水路の河床変動を予測する。

(1) 歪模型の相似則

内島らの移動床歪模型実験は礫床河川を対象に砂州形成領域区分図の無次元パラメータを原型と模型で一致させる実験手法で、模型の水平・鉛直縮尺を歪ませる歪模型である。そのためフルード相似則を必ずしも満足しないため、流れの状態の再現性には課題はあるが、河床変動の再現性は良好である。砂州形成領域区分図は多くの研究者によって提案されているが、本研究では実河川の砂州形成判別によく用いられる黒木・岸⁶⁾の領域区分図を採用して歪相似則を導く。ここで、「原型値/模型値」を縮尺比と定義し、縮尺比、原型値及び模型値に対してそれぞれ添字 r, p, m を付す。水平方向縮尺比を $L_r (= B_r)$ 、鉛直方向縮尺比を $Y_r (= h_r)$ として、歪比を $n = L_r/Y_r$ と定義すると、勾配の縮尺比は $I_r = n^{-1}$ となる。

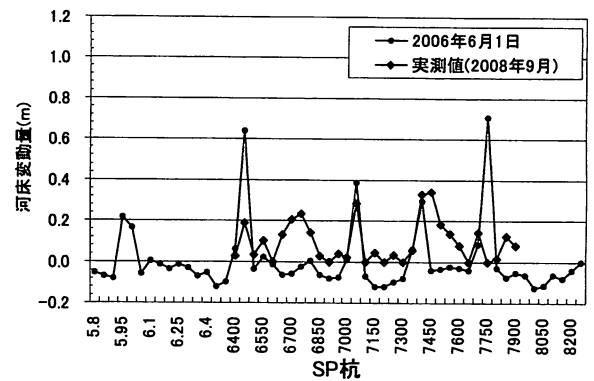


図-9 初期河床高からの変動量

岸・黒木の砂州形成領域区分図の両軸の無次元パラメータ ($\tau_* \sim B \cdot I^{0.2}/h$) を原型と模型で一致させる条件より、相似条件は

$$\tau_{*r} = 1 \quad (1), \quad \left(\frac{B \cdot I^{1/5}}{h} \right)_r = 1 \quad (2)$$

となる。ここで、 τ_* : 無次元掃流力、 B : 川幅、 h : 水深、 I : 水面勾配である。模型実験に用いる砂礫径が3(mm)以下になると移動限界無次元掃流力 τ_{*cm} は実河川の $\tau_{*cp} = 0.05$ より小さくなるので、式(1)を次式のように修正する。

$$\tau_{*r} = \beta \quad (1)'$$

ここで、 $\beta = \tau_{*cp}/\tau_{*cm}$ である。

次に砂州上の流れの抵抗則として、Manning-Strickler型の式

$$\frac{u_r}{u_{*r}} = 6.0 \left(\frac{h_r}{d_r} \right)^{1/6} \quad (3)$$

を用い、 $u_{*r} = \sqrt{g_r \cdot h_r \cdot I_r}$ を考慮すると流れの相似条件は次式となる。

$$u_r = d_r^{-1/6} \cdot h_r^{2/3} \cdot I_r^{1/2} \quad (4)$$

したがって、水平縮尺比 B_r と勾配比 I_r (即ち、歪比 n) 及び水中比重比 s_r をあらかじめ決め、式(1)', (2)と式(4)を連立して解くと表-1の相似則が得られる。

(2) 実験条件の設定

砂州形成の模型水路の水路幅は20(cm)以上必要⁷⁾なので、今回は水平縮尺比 $B_r = 200$ に設定する。実験に用いる砂を $d_m = 0.75(\text{mm})$ とすると、原型の平均砂礫径 $d_p = 30(\text{mm})$ から粒径比 $d_r = 40$ 、砂礫の水中比重比 $s_r = 1$ 、無次元限界掃流力比 $\beta = 1.471$ を表-1の相似則に代入して歪比 n を求めると $n = 2.772$ となる。模型の河床勾配 I_m は原型の河床勾配 $I_p = 1/238$ とすると、歪比から $I_m = 1/86$ となる。

次に、実験流量は原型の流量を低水路満杯流量 $Q_{lp} = 350(\text{m}^3/\text{s})$ 、融雪期最大日流量 $Q_{zp} = 84.7(\text{m}^3/\text{s})$ 、融雪期平均最大日流量 $Q_{sp} = 47.8(\text{m}^3/\text{s})$ と設定すると、 $Q_{lm} = 1.107(\ell/\text{s})$ 、融雪期最大日流量 $Q_{zm} = 0.268(\ell/\text{s})$ 、融雪期平

表-1 移動床歪模型の相似則(黒木・岸の場合)

相似条件式	相似則
$\tau_{*r} = \left(\frac{h \cdot I}{s \cdot d} \right)_r = \beta$	$h_r = n^{-1/5} \cdot B_r$
$\left(\frac{B \cdot I^{1/5}}{h} \right)_r = 1$	$d_r = \beta^{-1} \cdot s_r^{-1} \cdot n^{-6/5} \cdot B_r$
$u_r = d_r^{-1/6} \cdot h_r^{2/3} \cdot I_r^{1/2}$	$u_r = \beta^{1/6} \cdot s_r^{1/6} \cdot n^{-13/30} \cdot B_r^{1/2}$
	$Q_r = \beta^{1/6} \cdot s_r^{1/6} \cdot n^{-19/30} \cdot B_r^{5/2}$

均最大日流量 $Q_{3m}=0.151(\ell/s)$ となる。

(3) 実験結果と考察

今回の実験は、初めに、低水路満杯流量を2分10秒間(実時間2時間40分)通水し、その後、融雪期平均最大日流量を20分間(実時間24時間30分)通水した結果だけを示す。このときの低水路河床は平面図(図-10)と横断面図(図-11)に示すように、SP7100からSP7250の左岸側及びSP7700からSP7750の右岸側が洗掘され、淵を形成している。その間のSP7300からSP7650の区間が瀬に相当し、平坦な河床面になっている。続いて低水路満杯流量で形成された河床に融雪期平均最大日流量を通水すると、図-11に示すように流れが集中する淵の部分の洗掘・埋め戻しを繰り返すだけで、上・下流に淵の部分が移動することはなく、淵以外の区間に大きな差異はみられない。次に、各設定流量において水深を測定(SP7050とSP7450)し、黒木・岸の領域区分図にプロットしたのが図-12である。低水路満杯流量ではSP7050とSP7450の

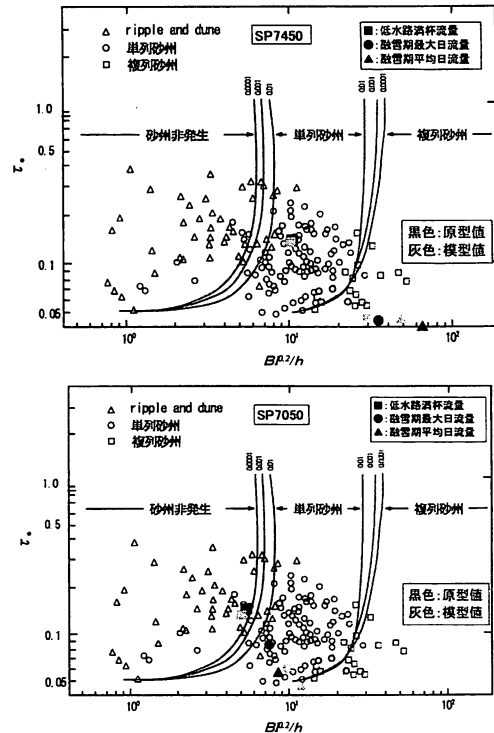


図-12 黒木・岸の領域区分図による検証

両方とも原型値と模型値はほぼ一致しているが、融雪期平均最大日流量と融雪期最大日流量では差異が認められる。これは、流量が少ない場合に水深が浅くなって相対的に水の粘性が無視できないことと、必ずしも低水路幅一杯を流れる訳ではないので、通水幅を用いることで一致すると考えられる。

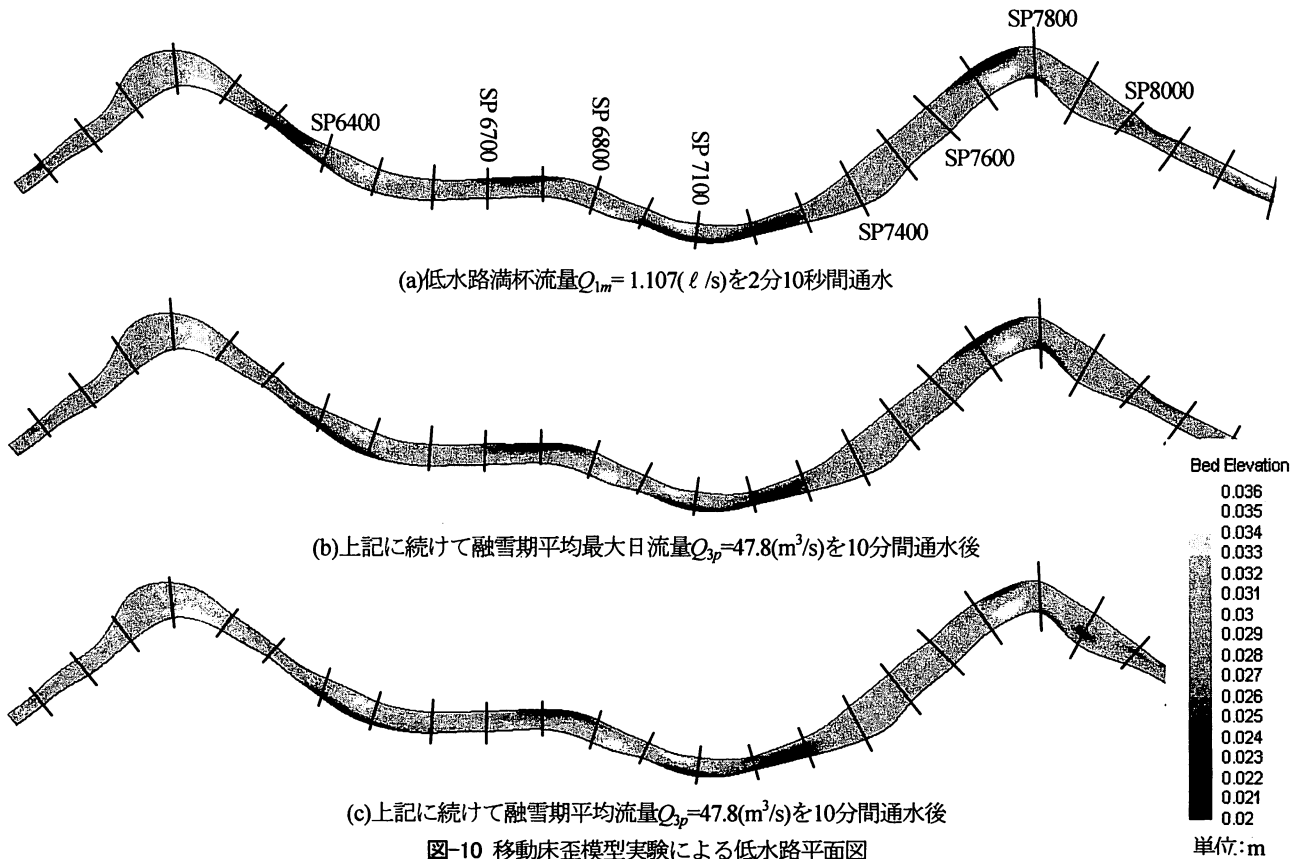


図-10 移動床歪模型実験による低水路平面図

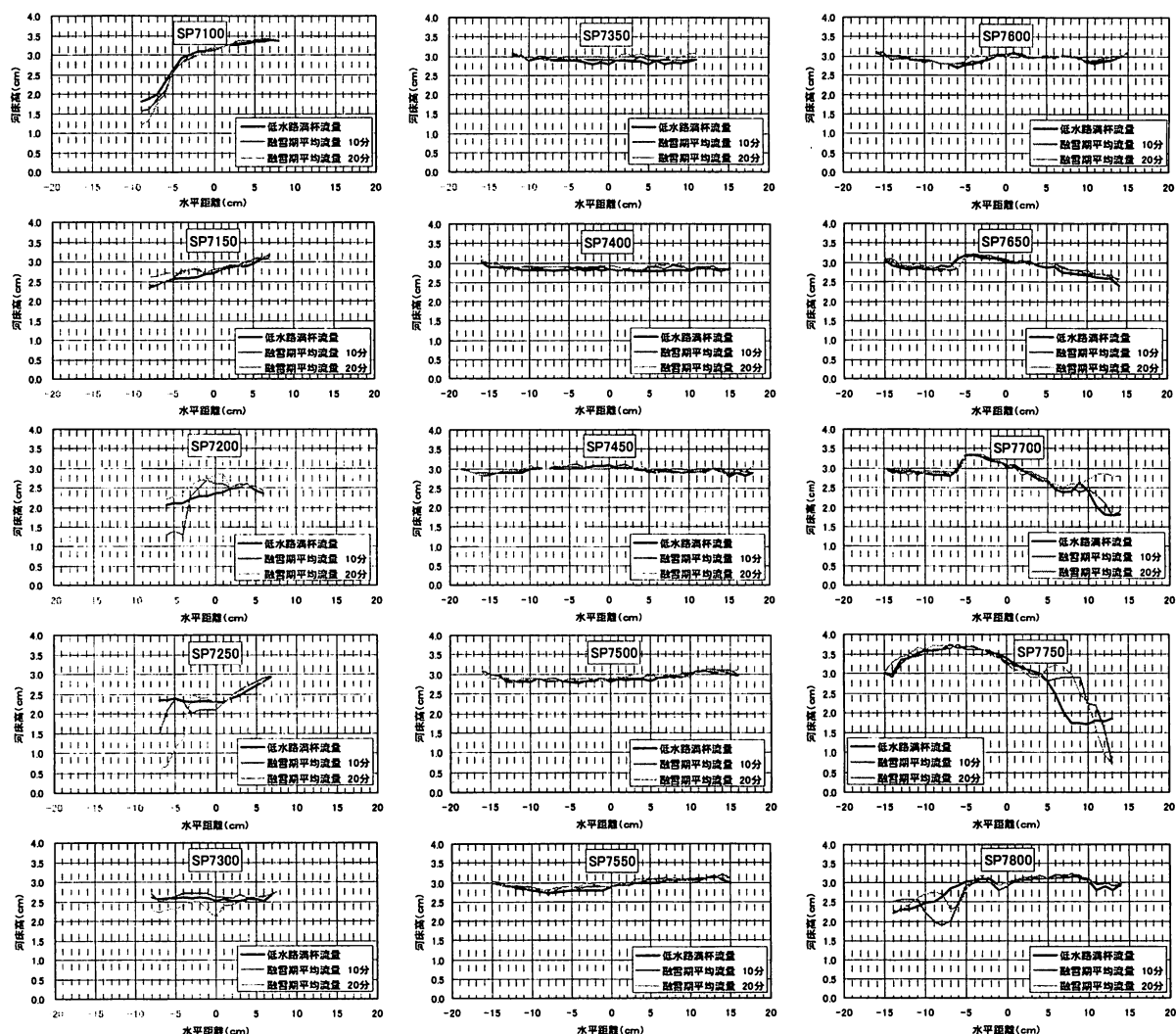


図-11 移動床歪模型実験による低水路の河床変動 (SP7100～SP7800の区間)
(低水路満杯流量→融雪期平均最大日流量を通水)

5. おわりに

今回の現地調査は改修工事完工直後の融雪出水による河道堆積状況であり、特にSP7100より下流の淵造成区間に目立った土砂の堆積は観測されず、瀬の再生も始まったばかりである。2008年は例年に比べ目立った降雨出水も生起していなかったもので、河床変動シミュレーションで対象とした2006年規模の出水を今後経験することによって、瀬の復元・再生が進むものと期待される。2009年以降も現地調査を継続して、河床変動の挙動に注視する必要がある。

また、淵の造成箇所は移動床歪模型実験による淵形成地点とほぼ一致することが確かめられた。

謝 辞： 本研究の一部は(財)北海道河川防災研究センター平成19年度研究助成（代表：早川博）の助成を受けた。また、北海道開発局網走開発建設部治水課と北見河川事務所の関係各位には網走川の現地調査及び改修工事

図面の資料提供など多大な支援を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省多自然型川づくりレビュー委員会：多自然型川づくりへの展開，2006。
- 2) 国土交通省：第19回河川分科会（平成18年3月31日）参考資料 5-1「網走川水系の流域および河川の概要(案)」，2006。
- 3) HEC-RAS Version4.0 Hydraulic Reference Manual, Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, 2008。
- 4) 須賀堯三：水理模型実験，山海堂，1990。
- 5) 内島邦秀・早川博：交互砂州河床河川の移動床歪模型の相似則に関する研究，土木学会論文集，No.479/II-25，pp.71～79，1993。
- 6) 黒木幹男・岸力：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。
- 7) 三輪弼・杜河清：砂礫堆相似による河川小型模型実験，農業土木学会論文集，No.233，pp.115-122，2004。（2009.4.9受付）