

平坦な岩盤河床における瀬と淵の創出に関する実験的研究

Experimental Approach on Generating Riffle and Pool in Flat Rock-bed River

早川 博¹

Hiroshi HAYAKAWA

¹ 北見工業大学 工学部社会環境工学科 准教授

要 旨

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、砂礫層が薄く岩盤河床を覆うような河川で、瀬と淵を再生・保全していくことは容易ではない。本研究は平坦な岩盤河床の側岸に水制を設け、そこをきっかけに下流区間に河床変動を引き起こし、瀬や淵を創出させる手法の有効性を実験的に検証する。

本研究は、礫床河川の河床変動の予測に良好な再現性を示す歪模型実験を、砂礫層が薄い岩盤河床に形成される河床形態の再現に適用し、歪模型実験の適用性を検討した結果、黒木・岸の相似条件が河床形態の再現に良好であることが示された。また、水制を設置して低水路満杯流量相当を通水して河床変動を生起した後、流量を融雪期最大日流量相当に減じた結果、左右側岸近傍に淵が形成され、瀬と淵を再生・保全する可能性を示した。

《キーワード：瀬と淵；岩盤河床；河床変動；歪模型実験；相似則》

1. はじめに

河道計画は、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、今後、治水機能と環境機能を調和させた多自然川づくりが進められることとなる¹⁾。

河川の良い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砂礫層が薄く岩盤河床を覆うような河川で、瀬と淵を再生・保全していくことは容易ではない。岩盤河床に瀬と淵を再生するには、上流から供給される砂礫を積極的に堆積させることが必要であり、例えば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する手法が考えられる。しかしながら、そのような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。したがって、本研究は岩盤河床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を創出する手法を実験的に検討するものである。本研究は手始めとして、礫床河川における河床変動予測に実績がある内島ら^{2,3)}の移動床歪模型実験手法を、砂礫が薄く岩盤河床を覆う河川を想定した実験に適用し、その結果を報告する。

2. 対象河川の概要

本研究で対象とした網走川は、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⁴⁾。

平成4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⁴⁾。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)。したがって、この区間の河道改修は河川用地の確保が難しいこともあって、河道拡幅による河道改修ではなく、図-1に示すような河床を掘り下げる掘込み河道の改修河道が平成7年に行われた。また、KP43.7より上流の



写真-1 河道の基岩露出部



図-1 対象区間 (KP.42.5-KP.43.7)



写真-2 対象区間 (KP.42.5-KP.43.7)

未改修湾曲河道区間が平成13年9月の台風15号の洪水によって一部冠水したために、平成17年度までに写真-2のような分水路が作られ、下流の改修区間も多自然型改修が行われている。

3. 瀬と淵の創出

河道改修によって岩盤河床の基岩を掘削する掘り込み河道は、コンクリート水路のように河床底面が一様な平坦河床であり、流れも一様となって人工的な河川空間をもたらすことになる。このような岩盤河床に瀬と淵を再生するには、上流から供給される砂礫を積極的に堆積させることが必要で、一つの方法として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する手法が考えられる。これ以外にも瀬や淵の再生・保全には種々の手法が考えられるので、その有効性を予め検証することが必要であろう。本研究は岩盤河床において瀬や淵を創出する取り組みの手始めとして、礫床河川における河床変動の予測に良好な再現性を示している内島ら^{2,3)}の移動床歪模型実験手法を適用し、その有効性を検証する。

(1) 移動床歪模型実験の相似則

内島ら^{2,3)}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(図-2は鮭川の領域区分図)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、実験スペースを考慮して模型の水平縮尺と鉛直縮尺を変える歪模型にしたものである。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残るものの、河床変動の再現性は良好である。

鮭川の領域区分図の無次元パラメータを用いた相似条件は

$$\left(\frac{u_*^2}{u_{*c}^2}\right)_r = 1 \quad (1), \quad \left[\frac{u_*}{u_{*c}} \left(\frac{B \cdot I}{R}\right)^{1/2}\right]_r = 1 \quad (2)$$

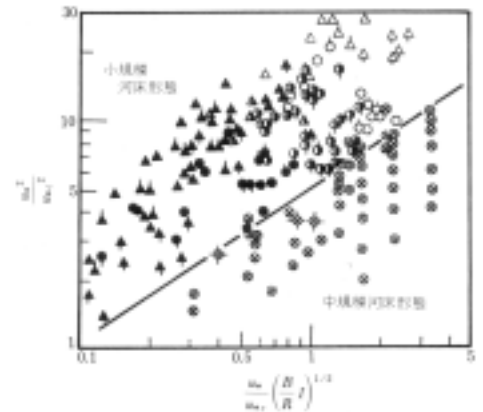


図-2 鮭川の領域区分図⁵⁾

である。ここで、 u_* ：摩擦速度、 u_{*c} ：限界摩擦速度、 B ：川幅、 R ：径深、 I ：水面勾配である。また、「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。さらに、無次元掃流力 τ_* と u_* の関係は $\tau_* = u_*^2 / (sgd)$ であるので、 $\tau_{*cr} = 1$ と仮定して式(1)を変形すると

$$\left(\frac{u_*^2}{u_{*c}^2}\right)_r = \frac{u_{*r}^2}{u_{*cr}^2} = \frac{\tau_{*r} \cdot s_r \cdot g_r \cdot d_r}{\tau_{*cr} \cdot s_r \cdot g_r \cdot d_r} = \frac{\tau_{*r}}{\tau_{*cr}} \quad \text{より} \quad \tau_{*r} = \frac{h_r \cdot I_r}{s_r \cdot d_r} = 1 \quad (3)$$

の相似条件式が得られる。ここで、 s ：砂礫の水中比重、 d ：砂礫径、 g ：重力加速度である。無次元限界掃流力 τ_{*c} は河床砂礫の粒径に左右され、一般に原型の砂礫の平均粒径は0.288cmより大きいので、岩垣の式から $\tau_{*cp} = 0.05$ としてよい。しかし、本研究で扱うような小縮尺の歪模型実験では模型砂の平均粒径は0.288cmより小さく、 τ_{*cm} は必ずしも $\tau_{*cm} = 0.05$ とならない。したがって、 $\tau_{*cr} = \tau_{*cp} / \tau_{*cm} = \beta$ とおくと、 $\beta \neq 1$ となる。よって、模型砂の無次元限界掃流力を考慮した相似則は

$$\tau_{*r} = \frac{h_r \cdot I_r}{s_r \cdot d_r} = \beta \quad (4)$$

となる。

一方、幅広の流れを仮定すると $R_r = h_r$ (水深) となり、式(2)の相似条件式は

$$\frac{B_r \cdot I_r}{h_r} = 1 \quad (5)$$

となる．次に砂州上の流れの抵抗則として，Manning-Strickler型の式

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

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

$$u_r = d_r^{-1/6} \cdot h_r^{2/3} \cdot I_r^{1/2} \quad (7)$$

となる．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 をあらかじめ決めると，他の縮尺比は相似条件式(3), (5), (7)を連立して解くことができ，以上の相似条件式と相似則を表-1にまとめて示す．

表-1 移動床歪模型の相似則 ($\beta \neq 1$ の場合)

相似条件式	相似則
$\left(\frac{u_*^2}{u_{*c}^2} \right)_r = 1$	$h_r = n^{-1} \cdot B_r$
$\left[\frac{u_*}{u_{*c}} \left(\frac{B \cdot I}{R} \right)^{1/2} \right]_r = 1$	$d_r = \beta^{-1} \cdot s_r^{-1} \cdot n^{-2} \cdot B_r$
	$u_r = \beta^{-1} \cdot s_r^{1/6} \cdot n^{-5/6} \cdot B_r^{1/2}$
$u_r = d_r^{-1/6} \cdot h_r^{2/3} \cdot I_r^{1/2}$	$Q_r = \beta^{1/6} \cdot s_r^{1/6} \cdot n^{-11/6} \cdot B_r^{5/2}$

(2) 実験方法

本研究における瀬と淵の創出の考え方として，網走川上流に低水路満杯程度の規模の出水が生じた場合に図-1に示す直線河道区間では河床波が形成される．その後，平水時の流量では掃流砂量が少ないため河床波の変動はほとんど生じないが，融雪期になり流量が増加すると，河床波の変動が生じる．したがって，実験ではまず，低水路満杯流量で10分間通水し，ある程度の規模の河床波を形成させる．その後，融雪期最大日流量と融雪期平均日流量の2通りについて，それぞれ3時間通水し，1時間毎に河床波がどのように変動するか観察する．

低水路満杯流量は網走川上流区間の1次元不等流計算から推定し，融雪期最大日流量は1977年～2005年の融雪期の日流量の最大値，融雪期平均日流量は1977年～2005年の融雪期の日流量の平均値とした．原型河川における低水路満杯流量，融雪期最大日流量及び融雪期平均日流量の流量 Q_p ，川幅 B_p 及び水深 h_p を表-2に示す．

次に，模型水路は水路幅30cmの直線水路を用い，水平縮尺 B_r は網走川上流（KP42.5～KP43.7）の低水路満杯時の平均幅（ $B_p=59.4\text{m}$ ）

表-2 原型河川の水理量

	流量	川幅	水深	平均粒径	河床勾配
低水路満杯流量	490.00	59.38	2.501	29.56	1/282
融雪期最大日流量	84.72	49.78	0.990	29.56	1/282
融雪期平均日流量	47.77	48.50	0.702	29.56	1/282

を用いると $B_r=1/198$ となる．模型の河床砂には砂漣などの小規模河床波を発生させないために $d_m=0.75\text{mm}$ の砂を用いることにすると，表-1の鮭川の相似条件から求めた実験条件は表-3となる．ここで，式(4)から $\tau_{*cr}=\beta$ を計算すると $\beta=1.471$ となる．なお，本研究では岩床掘込河道を対象としているので，実験では河床砂層の厚さを1cmとして実験を行う．

表-3 実験条件(鮭川の場合)

	川幅比 B_r	粒径比 d_r	歪比 n	実験条件	
				河床勾配 I_m	模型流量 $Q_m (\ell/s)$
低水路満杯流量	197.933	40	1.834	1/154	2.534
融雪期最大日流量	165.960	40	1.679	1/168	0.579
融雪期平均日流量	161.667	40	1.658	1/170	0.341

(3) 形成される河床波の推定

実験を行うにあたり，まず，原型河川でどのような河床波が形成されているかを黒木・岸の中規模

砂州形成領域区分図より推定する。図-3は岸・黒木の領域区分図に低水路満杯流量、融雪期最大日流量及び融雪期平均日流量に対する原型値をプロットしたもので、低水路満杯流量(■)では非砂州と単列砂州の境界、融雪期最大日流量(●)では単列砂州、融雪期平均日流量(▲)では複列砂州が発生するものと想定される。なお、図-3の鮭川の領域区分図は小規模と中規模河床形態の領域区分図であり、中規模河床形態の詳細な区分まではできない。

(4)原型河川と実験結果の比較

まず、鮭川の相似条件による実験条件で移動床歪模型実験を行い、低水路満杯流量、融雪期最大日流量及び融雪期平均日流量をそれぞれ30分間通水した後の河床の様子を写真-3～5に示す。なお、通水中、給砂は行わなかった。低水路満杯流量では水深は $h_m = 2.3\text{cm}$ となり、波長 $\lambda = 140\text{cm}$ 程度の単列交互砂州が確認された。次に、融雪期最大日流量では水深は $h_m = 0.86\text{cm}$ となり、砂の移動が少なく明瞭な砂州は形成されていない。融雪期平均日流量でも $h_m = 0.54\text{cm}$ と更に水深が浅くなって砂粒子の移動がほとんど見られなかった。測定した水理量を用い図-4の黒木・岸の領域区分図にプロット(青印)したところ、実験値は原型値に比べ左斜め下にプロットされて、掃流力が不足していることがわかる。また、図-4は鮭川の領域区分図に原型値と実験値をプロットした結果で、融雪期最大流量、融雪期平均流量の場合は原型値と実験値が一致していない。低水路満杯流量の場合はほぼ一致していることから、流量が少ない場合に河床面の粗度の影響が相対的に大きくなるためと考えられる。

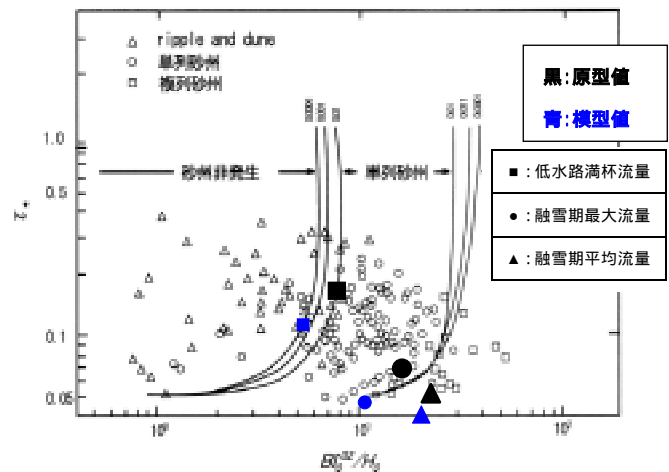


図-3 黒木・岸の領域区分図⁶⁾

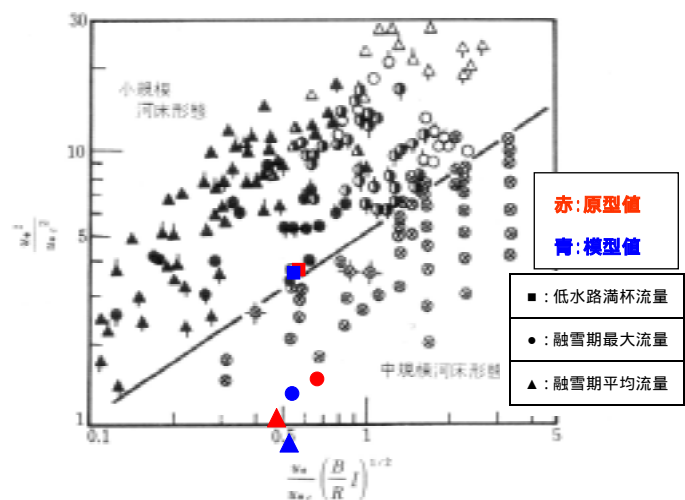


図-4 鮭川の領域区分図⁵⁾



写真-3 低水路満杯流量



写真-4 融雪期最大日流量



写真-5 融雪期平均日流量

(5)瀬と淵の形成実験

本研究は砂州を引き金とする瀬と淵の創出である．前節の鮭川の砂州形成領域区分図より導いた歪模型の相似則による実験条件では，融雪期最大日流量でも融雪期平均日流量でも砂州は形成されなかった．そこで，砂州が形成されるように模型水路の上流部に水制を設置し，強制的に流れを乱す歪模型実験を行った．

水制の設置間隔は，低水路満杯流量を30分間通水したときに形成された交互砂州の半波長 $\lambda/2=70\text{cm}$ とし，模型水路の下流から8.3mの左岸側と9.0mの右岸側の2ヶ所に設置した．通水条件は，まず，低水路満杯流量で10分間通水し，ある程度の河床波を形成させ，その後，融雪期最大日流量と融雪期平均日流量の2通りについて，それぞれ3時間通水し，1時間毎に河床波がどのように変動するか観察した．なお，低水路満杯流量で通水後，融雪期最大日流量で通水をCase-1，融雪期平均日流量で



(a) 低水路満杯流量通水10分後



(b) 融雪期最大日流量通水 1 時間後



(c) 融雪期最大日流量通水2時間後



(d) 融雪期最大日流量通水3時間後

写真-6 瀬と淵の形成実験

通水をCase-2とする．また，実験では前節と同様に砂層厚さは1cmとし，給砂は行っていない．

まず，Case-1は低水路満杯流量で10分間通水したところ，河床は写真-6(a)のように水制の下流部に砂州が形成された．その後，融雪期最大日流量で1時間通水したところ，河床は写真-6(b)のように模型水路の下流部まで砂州が形成され，流れはその間を蛇行しながら流下している．さらに，2時間後には河床状態は写真-6(c)のように，河床が洗掘されて固定床（岩床）が現れているところが見え始めえた．そして，3時間後には河床状態は写真-6(d)のように洗掘された固定床が左右両岸に明瞭になり，淵の様相を呈していることがわかる．また，この淵への落ち込み部が瀬に相当する．Case-1の条件では淵（固定床の露出部）の移動は少なく，ほぼ固定化していた．

次に，Case-2では低水路満杯流量で10分間通水した後に融雪期平均日流量を通水したが，前節の写真-5のように砂粒子の移動がほとんどなく，3時間通水しても河床はほとんど変動せず，固定床の露出も生じなかった．

このように鮭川の相似条件による歪模型実験では，当初想定した融雪期平均日流量程度では河床の変動を引き起こすことができず，淵を形成するまでには至らなかった．しかしながら，淵や瀬を再生したい区間に水制を設けることで，その下流区間に淵と瀬を形成できる可能性は示された．

(6)黒木・岸の無次元パラメータによる移動床歪模型実験

前節で示したように鮭川の砂州形成領域区分図より導いた歪模型の相似則では原型値と模型値があまり一致していない．そこで，本節では岸・黒木の砂州形成領域区分図から移動床歪模型の相似則を導いて歪模型実験を行った．

表-4 移動床歪模型の相似則（黒木・岸の場合）

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

$$\tau_{*r} = 1 \quad (8), \quad \left(\frac{B \cdot I^{1/5}}{h} \right)_r = 1 \quad (9)$$

となる．砂州上の流れの抵抗則に鮭川の相似条件と同じくManning -Strickler型の式(7)を適用し，式(8), (9)と連立して解いた相似則が表-4である．

次に実験条件は表-2の

原型河川の水理量にこの相似条件を適用して算出し，表-5に整理した．

表-5の黒木・岸の相似条件で同様に実験を行い，低水路満杯流量，融雪期最大日流量及び融雪期平均日流量を通水

した後の河床の様子を写真-7～9に示す．低水路満杯流量は通水17分後の状況で，単列交互砂州が確認される．水深は $h_m = 1.56\text{cm}$ であった．次に，融雪期最大日流量は通水16分後の状況で，水深は $h_m = 0.72\text{cm}$ であり，単列交互砂州が形成された．融雪期平均日流量では $h_m = 0.52\text{cm}$ と水深が浅く砂粒子の移動も少なく，30分間通水しても明瞭な河床波は形成されなかったものの，流路が入り組んだ複列砂州に近い様相を呈した．測定した水理量を用い図-5の黒木・岸の領域区分図にプロット(青印)したところ，実験値は原型値とほぼ等しくなり，鮭川の相似条件より良好に再現された．したがって，瀬と淵の形成実験も黒木・岸の相似条件で再検討する必要がある．

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

表-5 実験条件（黒木・岸の場合）

	川幅比 B_r	粒径比 d_r	歪比 n	実験条件	
				河床勾配 I_m	模型流量 $Q_m (\ell/s)$
低水路満杯流量	197.933	40	3.719	1/74	2.067
融雪期最大日流量	165.960	40	3.273	1/86	0.506
融雪期平均日流量	161.667	40	3.202	1/88	0.300

4. おわりに

本研究は河川の良い生態系を保全していく上で必要となる瀬と淵を岩盤河床に再生する実験的検討を行い，水制を設けることで淵を形成することができることを示した．しかし，歪模型実験に適用した相似条件の課題の他に，岩床上の流砂量式も今後の課題である．

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：多自然川づくりへの展開，2006．
- 2) 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/ -25，pp. 71～79，1993．
- 3) 魏炳乾・内島邦秀・早川博・井出康郎：河川の移動床歪模型相似則とその有効性，水工学論文集，第45巻，pp.685～690，2001．
- 4) 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．
- 5) 鮭川登：実験水路における交互砂洲（砂れき堆）の形成条件，土木学会論文報告集，第207号，pp.47～50，1972．
- 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．

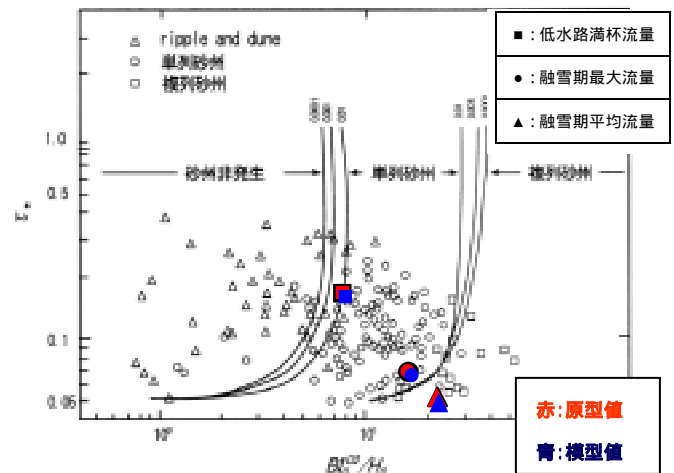


図-5 黒木・岸の領域区分図⁶⁾



写真-7 低水路満杯流量（黒木・岸の場合）



写真-8 融雪期最大日流量（黒木・岸の場合）



写真-9 融雪期平均日流量（黒木・岸の場合）