

# 石狩川上流における河床低下について

旭川開発建設部治水課

○松本 勝治  
森田 共胤  
根本 深

石狩川上流は旭川市を貫流する急流河川で、近年河床低下が顕著となり様々な影響が生じている。急速な河床低下により砂礫河床から堆積岩が露出した岩河床へと変化し、露岩後も岩盤の洗掘により河床は低下し、滯筋の固定化や局所洗掘、砂州の樹林化等も見られ、河川環境の様相も大きく変化している。

本報告では、現地の露岩箇所を実験水路を設置し、岩河床の流れに対する洗掘強度について調査を行い、岩盤強度を考慮した河床変動計算について報告するものである。

キーワード：河床低下、河床変動、岩河床

## 1. まえがき

近年、全国的に源流から河口までの土砂動態の変化から河床低下が問題となっている河川が多く見られる。

石狩川の上流部は、支川も含めて河床勾配が 1/100～1/400 であり、河床材料は扇状地性の堆積物（砂礫）で構成された急流河川である。

旭川市街部を貫流する石狩川では、かつては振幅の大きな蛇行を伴う網状を呈していたが、市街部の発展に伴い河道整備が進み、川が以前の蛇行流路幅よりも狭い堤々間内に集約され、現在の低水路内では複列砂州形状を呈している。

近年、石狩川では河床低下が顕著となっており、急流河川特有の洪水時の激しい流れによって、河床の洗掘・浸食が著しく、様々な問題を引き起こしている。

河床低下により河床を覆っていた砂礫が一掃され、岩盤が露出するといった岩河床化している区間も多く、露岩した箇所では滯筋が固定化され、局所的な河床洗掘が顕著となっている（図-1、図-2）。

また、砂礫の消失に伴い、魚類の産卵環境の減少、水棲生物の生息環境の悪化など生物環境への影響も大きく、環境面も踏まえた対策を実施する必要があり、岩河床における河床変動の把握が急務となっている。

このような状況を踏まえ、当部では岩河床における洗掘メカニズムを把握するため、現地実験を行ない検討を進めており、本報告では前年の実験結果<sup>1)</sup>を考慮した河床変動解析の検証及び本年度の実験結果である給砂材料の粒径と岩盤洗掘速度の関係について報告する。

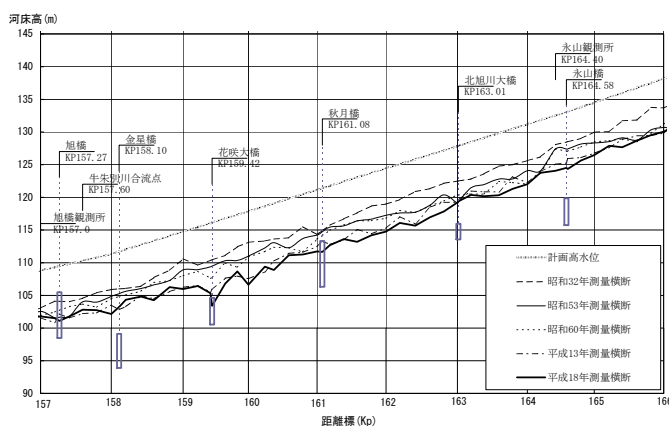


図-2 河床高経年変化図（最深河床高）



図-1 河床低下区間



写真-1 洗掘による護岸の浮き上がり

## 2. 河床低下の現状と要因

石狩川上流部では、石狩川本川Kp157.0～Kp165.0の間（牛朱別川合流～永山新川合流：L=約8km）において河床低下が顕著であり、河床低下の要因としては、昭和30～50年代に行われていた砂利採取による直接的な河道掘削の影響や、ダムや横断工作物による流入土砂量及び流況の変化、市街部付近の高水敷の造成、護岸による低水路の固定化、またこれらが引き起こす砂州の固定化とそれに伴う樹林化の影響等が考えられる。

現在の最深河床高では昭和32年測量時よりも5m以上下がっている箇所もあり、橋脚の根入れ不足、護岸脚部の浮き上がりなどが見られ、河川管理上も問題となっている（写真-1）。

また、砂利採取が全面禁止（昭和56年）となってからも河床低下は進行し、平成年代以降では河床が岩盤層にまで達し、特に露岩箇所（Kp159.4～Kp163.0）では低水路内の局所的な洗掘により低々水路が形成されている（図-3）。これは岩盤層特有の局所洗掘現象であると考えられ、河床低下を助長させている要因であると考えられる。

## 3. 露岩状況と課題解決に向けて

ボーリング調査結果から、河床の地質は、固結度が低く脆い礫岩・砂岩と、同様に固結度が低く軟質なシルト岩とが互層状態で形成されている岩盤層と、それを覆って分布する現河床堆積物である砂礫層より構成されていた。また、当該区間の露出している岩盤の表面には、「おう穴」や「みずみち」が確認された（写真-2）。

露出している岩盤層は固結度が低いため、スレーキングにより容易に土砂・細粒分に分解されやすいと考えられ、岩盤層を構成する礫岩・砂岩・シルト岩について乾湿繰り返し試験を実施した結果、礫岩においては2サイクル、砂岩・シルト岩では6サイクルで土砂・細粒化した。細粒化した岩盤の平均粒径はシルト岩 0.005mm、砂岩 0.13mm、礫岩 5.80mm であり、現地に堆積している砂礫（平均粒径 40mm～60mm 程度）に比べ非常に細かく、細粒化するとほとんど下流に流下し、露岩区間には堆積しないと推測される。

岩盤層における局所洗掘については、その原因やメカニズム、岩盤の流水（流砂）に対する強度など、未解明な部分も多く河床変動を考える上で取り扱いが課題となっている。一般に河床変動の予測にあたっては河床変動解析を行うが、通常河床変動解析では、岩盤の局所洗掘を適切に評価することが出来ない。そこで、岩河床における洗掘メカニズムを把握するため、現地に実験水路を設置し、岩盤の流水（流砂）に対する洗掘強度の調査

を平成20年と平成21年の2カ年で実施した。

## 4. 実験水路による岩盤強度試験

実験水路の設置にあたっては、実際の流況に近い状態を再現するため、本川の平均年最大流量時（ $Q \approx 600 \text{ m}^3/\text{s}$ ）の低水路平均摩擦速度と同程度の摩擦速度が得られること、実験に必要な流量が安定的に確保できることを条件に現地を選定し、石狩川（Kp160.2 付近左岸）の低水路内の露岩箇所に、幅 1.0m、深さ 1.0m程度、河床勾配 1/30 の水路を設置した（図-4）。

実験の実施にあたっては、既往の知見が少なく、有意な洗掘量が得られる条件がどの程度の流量・流砂量であるか不明であるため、本実験を始める前に図-5 に示すフローにより予備実験を行い、有意な洗掘量が得られる諸条件（流量・給砂量・粒径等）を絞り込み、本実験を行った。

### (1) 予備試験

#### a) 予備実験（給砂無し）

流水のみの実験を行ない、実験水路全体の流況の確認、観測方法及び観測位置の設定、水位・流速観測によるH-Q式の作成及び給砂が無い場合の岩盤の洗掘量の確認を行なった。

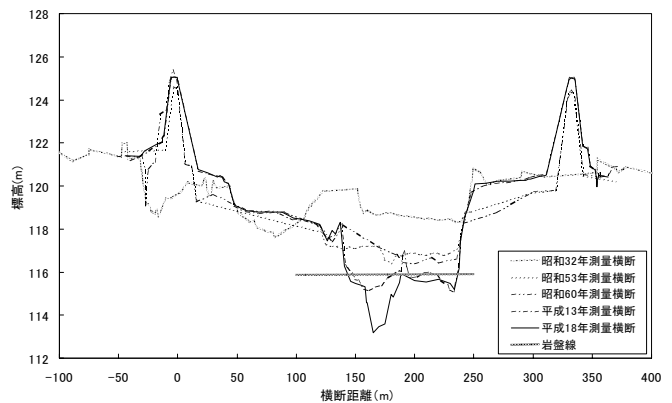


図-3 横断の経年変化の一例 (Kp161.6)



写真-2 露岩状況 (Kp162.0 付近)

## b) 予備実験（給砂有り）

次に給砂方法の確立、給砂がある場合の岩盤の洗掘量の概略を把握するため、流量・給砂量を変えて予備実験を行い、本実験での条件設定を行った。

給砂条件は、芦田・道上の掃流砂量式<sup>2)</sup>で求められる流砂量をもとに設定し、給砂材料として単一粒径の砂利を用意し、一定速度での連続給砂を行なった。

## (2) 観測方法

### a) 流量観測

給水施設を設けず自然取水で行なっているため、水路内の試験区間の上流で安定している断面を基準断面とし、流速・水位を計測してH-Q式を作成し、自記水位計により連続観測を行った。

### b) 水位観測

実験水路の計測区間（L=15m）を縦断方向0.5mピッチ 31 測線に分割し、土研式ポイントゲージを設置して計測した。通水中の河床変動により水位変動が考えられるため、計測は1時間間隔とした（写真-3）。

### c) 洗掘量計測

縦断方向は水位観測と同一の 31 測線とし、それぞれ横断方向 0.1mピッチ・11 測線を計測した。また岩盤表面がスレーキングを起こさないように、少量の通水により湿潤状態を維持しながら水路河床高を計測した。

## (3) 本実験

予備実験結果をもとに給砂量、通水継続時間等を決定し、流量・給砂量・粒径の組み合わせにより2カ年の実験で計 17 ケースの実験を行なった。ただし、実験の作業効率を考慮し、各実験毎に水路河床面の整形はせずに実験を行なった（写真-4）。

## 5. 岩盤の洗掘速度と水理量の関係

平成20年の実験の実験条件と実験結果（洗掘速度）は表-1 に示す通りであり、流砂の継続的な衝突により岩盤の洗掘が進行している状況が見られ、岩盤の洗掘は、流水の作用よりも、流砂による作用の影響が大きいことが分かった。

ここで、岩盤の洗掘速度 $D$ と各水理量との関係を明らかにするため、既往の文献<sup>3)</sup>を参考に、流砂による岩盤の洗掘メカニズムについて、以下のように仮定した。

- ・岩盤の洗掘は、主として水流中の砂礫の衝突による。
- ・岩盤の洗掘量は、岩盤面に衝突する砂礫の運動量に比例する。

上記の仮定により、洗掘深 $D_0$ は、

$$D_0 = \alpha_1 \cdot T \cdot N \cdot m \cdot V_0 \quad (1)$$

となる。ただし、

$D_0$  : 洗掘深 (m)

$\alpha_1$  : 比例定数

$T$  : 砂礫による衝撃の継続時間 (h)

$N$  : 単位時間・幅当たりの洗掘現象に關与する砂礫の数 (個/h/m)

$m$  : 流砂1個当たりの質量 (g/個)

$V_0$  : 流砂の速度 (m/h)

よって、洗掘速度 $D$  (m/h) は、

$$D = D_0 / T = \alpha_1 \cdot N \cdot m \cdot V_0 \quad (2)$$

と表される。

ここで、単位時間・幅当たりの洗掘現象に關与する砂礫の数 $N$ は、単位幅流砂量を $q_b$  (m<sup>2</sup>/h)、流砂1個当たりの体積 $v$  (m<sup>3</sup>)、流砂が衝突する確率を $p$ とすると、

$$N = q_b \cdot p / v \quad (3)$$

と表せ、また流砂1個当たりの質量 $m$ は砂の密度を $\rho_s$ とすると、

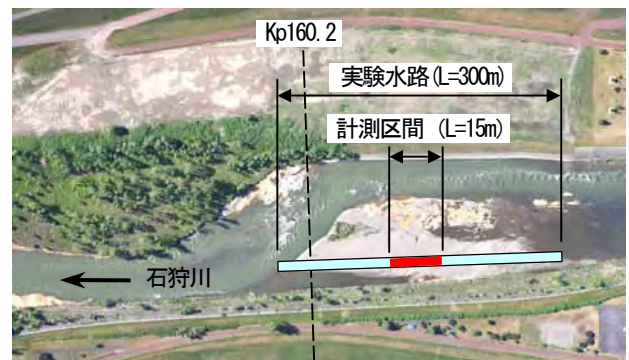


図-4 実験水路（位置図）

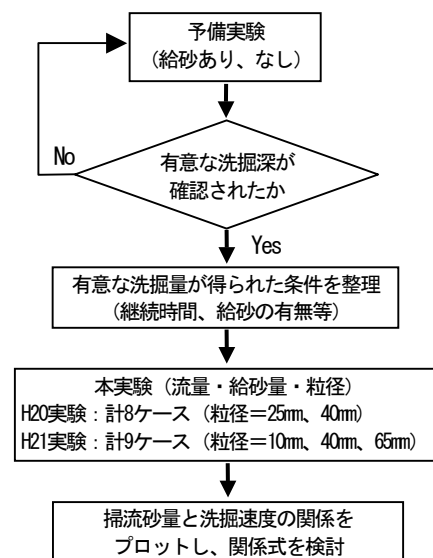


図-5 実験フロー

$$m = v \cdot \rho_s \quad (4)$$

となり、さらに流砂の速度  $V_0$  は流速  $V$  に比例すると仮定すると、

$$V_0 = \alpha_2 \cdot V \quad (5)$$

となる。ただし、 $\alpha_2$  : 比例定数  
以上より、(2)式に(3)~(5)式を代入すると、

$$D = \alpha_1 \cdot (q_b \cdot p/v) \cdot (v \cdot \rho_s) \cdot (\alpha_2 \cdot V) \quad (6)$$

となり、岩盤の洗掘速度  $D$  は、

$$D = \alpha \cdot q_b \cdot V \quad (7)$$

と表すことが出来る。ただし、 $\alpha = \alpha_1 \cdot p \cdot \rho_s \cdot \alpha_2$

ここで(7)式を用いて、実験で得られた岩盤の洗掘速度  $D$  と単位幅流砂量  $q_b \times$  流速  $V$  とをプロットすると、図-6 の通りとなり、洗掘速度  $D$  と  $q_b \cdot V$  との関係に近い直線で表すと、実験範囲内で以下の関係式を得た。

$$D = 5.0 \times 10^{-8} \cdot q_b \cdot V + 0.0006 \quad (8)$$

## 6. 岩盤の洗掘を考慮した河床変動解析

今回、平成20年の実験結果より得られた岩盤の洗掘速度と流砂量・流速との関係式(8)を平面2次元河床変動解析<sup>45)6)</sup>に導入し、現況河道の再現計算により妥当性の検証を行った。再現計算の期間は、河床に岩盤が露出してきた平成13年から平成18年までの5年間とし、計算結果と平成18年河床形状とを比較検証した。

### (1) 計算条件

#### a) 計算区間、計算メッシュ

計算区間は、露岩の顕著な石狩川本川(旭川市街部 KP160.0~KP163.0)とし、計算メッシュは縦断方向に61測線、横断方向については低水路間11測線、左右岸の高水敷に各5測線の合計21測線を設定した。

#### b) 初期河床、計算流量

初期河床は平成13年測量時の河床形状とした。また、計算流量は計算区間の下流に位置する旭橋流量観測所(KP157.0)における、平成13年から平成18年までの時刻流量のうち、計算区間の平均無次元掃流力が無次元限界掃流力を上回る  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  以上の流量とした。

#### c) 河床材料、樹木設定

河床材料は、混合粒径で与えるものとし、初期粒度分布は平成8年の河床材料調査結果を基に設定した。また、樹木群は透過とし、透過係数は平成13年調査結果を基に設定した。

Shouji Matsumoto, Tomotsugu Morita, Shin Nemoto



写真-3 実験水路 (計測状況)

表-1 本実験の条件と実験結果 (洗掘速度) (H20 実験結果)

H20実験ケース		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8	
水理諸元	平均流量	Q=( $\text{m}^3/\text{s}$ )	0.15	0.30	0.15	0.30	0.40			
	平均水深	$H_w$ (m)	0.15	0.20	0.15	0.20	0.25			
	平均流速	V( $\text{m}/\text{s}$ )	1.20	1.40	1.20	1.40	1.60			
実験条件	粒径	d(mm)	40		25		40			
	給砂量	$Q_b$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	0.4	1.2	1.2	2.4	2.0	3.0	3.0	4.8
	継続時間	T(h)	6.0	4.0	4.0	4.0	4.0	3.0	3.0	3.0
各ケースの平均洗掘速度		D=(mm/h)	0.5	0.8	0.7	1.5	1.4	2.0	1.5	3.4



写真-4 実験終了後の水路 (おう穴、みずみちの形成)

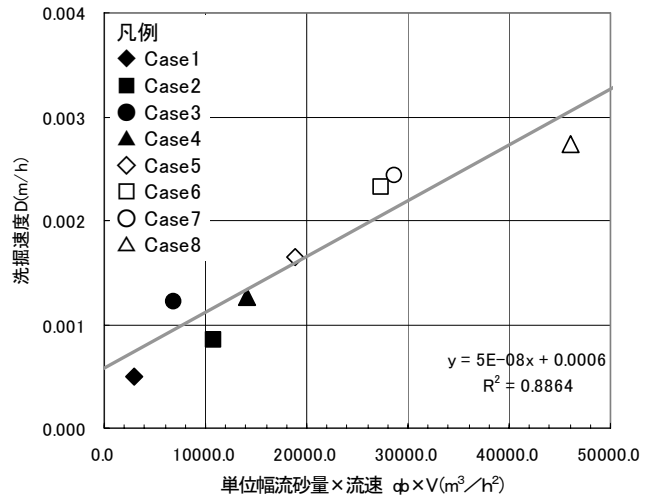


図-6 洗掘速度と(流砂量×流速)との関係

#### d) 起算水位、流入土砂量

起算水位は、助走区間を設定し下流端の KP157.0 において等流起算とした。また流入土砂量は、上流端 KP166.0 において動的平衡状態を仮定し流入土砂量を与えた。なお、上流端は露岩しておらず礫河床であり、比較的河床高は安定しており、岩盤面の高さも現河床高より 10m 以上低いため、今後も露岩する可能性は少ないと考えた。

#### (2) 再現計算の考察

再現計算の結果として平均河床高縦断面図、最深河床高縦断面図を図-7 に、横断面図の一例を図-8 に示す。

河床高の縦断面図を比較すると、岩盤の洗掘を考慮した場合のほうが、考慮しない場合に比べ最深河床高の再現性が向上する結果となった。

また、横断面図を見ると岩盤を考慮しない場合、初期河床である平成 13 年横断から河床の堆積、砂州の移動及びそれに伴う最深部の移動など河床の変化は見られるものの、岩盤特有の一度侵食を受けるとみずみちに流砂が集中し、局所的な深掘れが進行するといった現象を十分に再現出来ていないことがわかる。これに対し、岩盤の洗掘を考慮した場合は、局所洗掘の位置は若干ずれるものの、洗掘深は概ね一致する結果となり、再現性が向上している。

### 7. 岩盤の洗掘速度と給砂粒径の関係

平成20年の実験結果より得た実験式(8)を用いた再現計算では、岩河床における局所洗掘を表現し、再現性は向上しているが、局所洗掘の位置がずれているなどの課題がある。これは、H20実験式は主に粒径  $d=40\text{mm}$  (代表粒径相当) の流砂と岩盤の洗掘量との関係を示したものであり、混合粒径の河床変動解析において、粒径による洗掘量の違いが考慮されていないことが一因として考えられる。

そこで、粒径による岩盤の洗掘速度の違いを把握するため、平成20年と同様の試験方法で、現地にて岩盤強度試験を行なった。

今回実施した岩盤強度試験の実験条件と実験結果を表-2 に示す。前回の平成20年実験で把握しきれなかった大粒径・小粒径の給砂による岩盤の洗掘速度を把握するため、給砂粒径  $d=10\text{mm}$  と  $d=65\text{mm}$  を追加し実験を行なった。

昨年度及び本年度の実験結果をプロットしたものを図-9 に示す。

実験結果より、岩盤の洗掘速度は大粒径の実験ケースでは大きく、小粒径の場合では小さくなる傾向が見られ、給砂粒径の違いにより岩盤の洗掘速度が異なることが分かった。

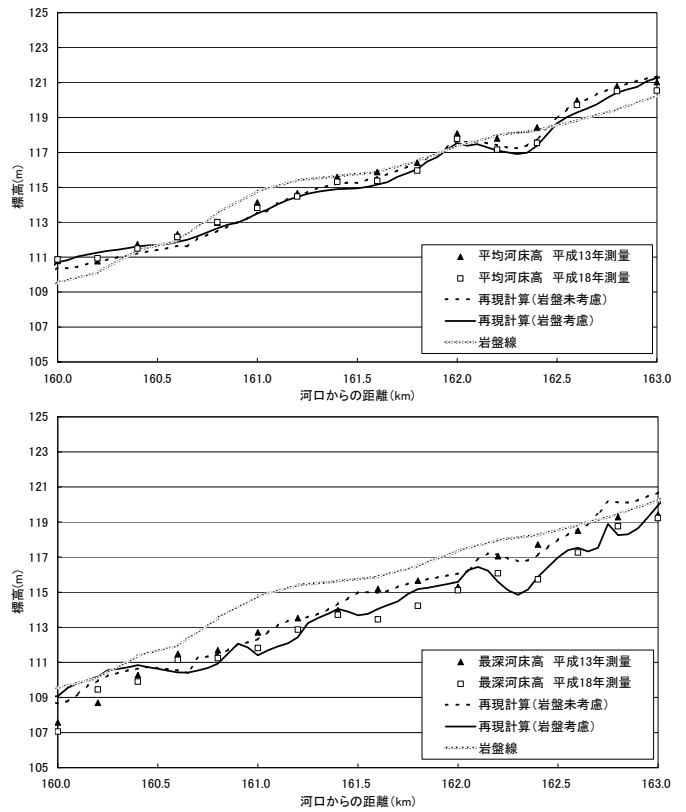


図-7 平均河床縦断面図 (上)、最深河床縦断面図 (下)

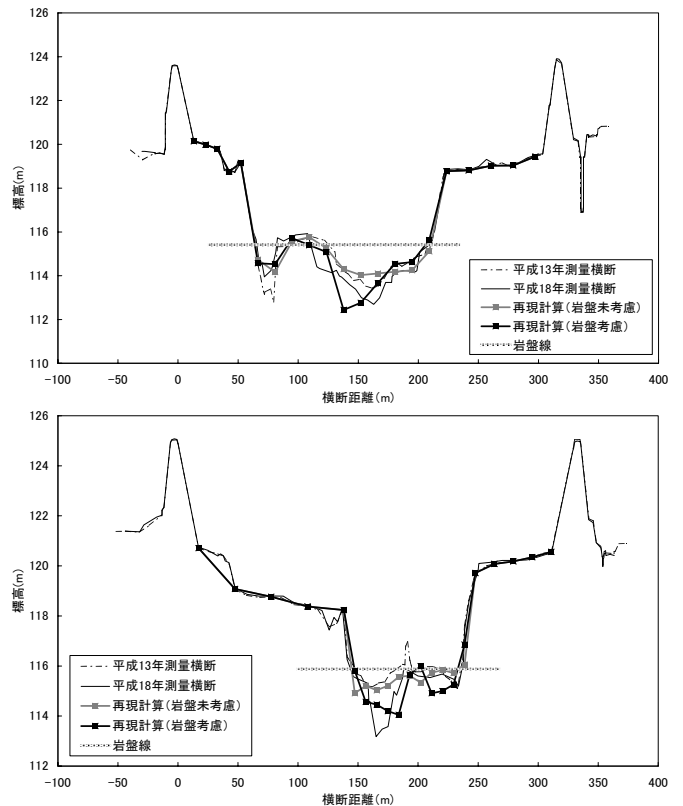


図-8 横断面図 Kp161.2 (上)、Kp161.6 (下)

表-2 本実験の条件と実験結果 (洗掘速度) (H21 実験結果)

H21実験ケース		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8	Case9
水理諸元	平均流量 $Q=$ ( $m^3/s$ )	0.10		0.30		0.50				
	平均水深 $H_s=$ (m)	0.10		0.20		0.30				
	平均流速 $V=$ (m/s)	1.00		1.40		1.70				
実験条件	粒径 $d=$ (mm)	10			65			10	40	
	給砂量 $Q_s=$ ( $m^3/h$ )	1.8	3.6	4.5	0.6	1.0	1.5	5.0	5.0	6.0
	継続時間 $T=$ (h)	4.0	3.0	3.0	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	各ケースの平均洗掘速度 $D=$ (mm/h)	0.8	1.2	1.9	1.9	1.2	2.7	1.3	3.3	4.3

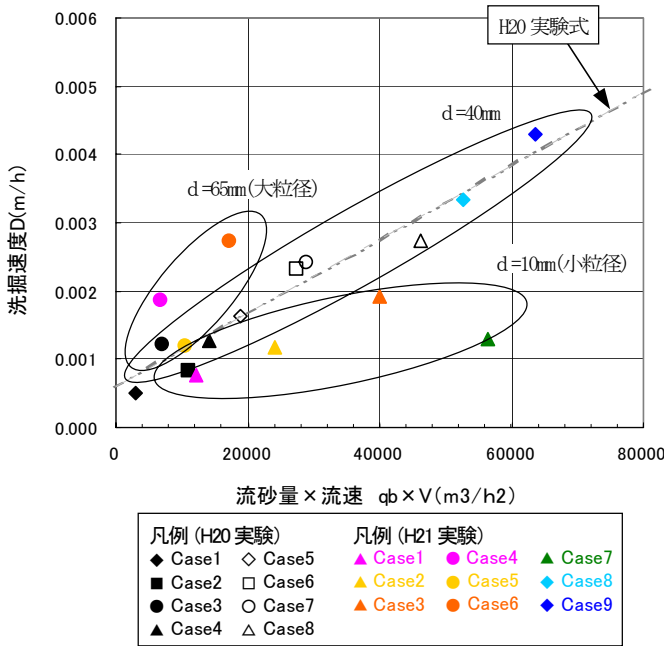


図-9 洗掘速度と(流砂量×流速)との関係

## 8. まとめ

本研究では、河床低下の要因分析や対策工を検討する際に課題となっている、岩河床における洗掘メカニズムの把握のため現地実験を実施し、以下の結果を得た。

- ・岩河床における河床低下の要因として、流砂による影響が大きいことを確認し、岩盤の洗掘速度と流砂量との関係を整理した。
- ・岩盤の洗掘を考慮した河床変動解析を行なった結果、考慮しない場合と比べて、再現性が向上することを確認した。
- ・流砂の粒径により岩盤の洗掘速度は異なる傾向にあることを確認した。

今後は、実験結果の検証をさらに行い、より汎用性のある解析モデルとするため、粒径による洗掘速度の違いや、岩盤上の砂礫の移動形態などを考慮した河床変動解析の手法を検討し、これらの検討を基に、河床低下の将来予測の精度向上及び対策工の設計に活用していきたい。

謝辞：本実験を行うにあたり、北海道大学黒木幹男先生（現(財)河川環境管理財団）、北海道大学泉典洋先生、北見工業大学渡邊康玄先生に有益な御助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 松本勝治, 田代隆志, 根本深：石狩川上流における河床低下対策について, 第52回北海道開発技術研究発表会資料, 2008.
- 2) 芦田道夫, 道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第206号, 1972.
- 3) 大野善雄, 林 栄港：コンクリート河川構造物の摩耗予測の一手法, 電力土木, No211, 1987.
- 4) 清水康行, Marco Tubino, 渡邊康玄：自由砂州と交互砂州の共鳴条件における河床変動計算, 水工学論文集第36巻, 1992.
- 5) 清水康行：沖積河川における流れと河床変動の予測手法に関する研究, 北海道開発局土木研究所（現寒地土木研究所）河川研究室編, 1991.
- 6) 渡邊康玄, 清水康行：樹木の存在する河道の流況計算, 第34回北海道開発技術研究発表会資料, 1991.