

石狩川上流における河床低下について

松本 勝治¹・田代 隆志²・根本 深³

¹北海道開発局 旭川開発建設部 治水課 (〒078-8513 北海道旭川市宮前通東4155-31)

²北海道開発局 建設部 河川管理課 (〒060-8511 北海道札幌市北区北8条西2丁目)

³北海道開発局 旭川開発建設部 治水課 (〒078-8513 北海道旭川市宮前通東4155-31)

石狩川上流は旭川市を貫流する急流河川で、河床低下が顕著となっており、洗掘による既設護岸の沈下や河川構造物の根入れが不足する等の影響がでている。急速な河床低下により砂礫河床から堆積岩が露出した河床へと変化してきているが、河床は安定する傾向にはなく、滯筋の固定化により局所洗掘や砂州の樹林化が見られ、河川環境の様相も大きく変化している。

本発表では、露岩区間に現地実験水路を設置し、岩河床の流れに対する洗掘強度について検討を行った結果について報告する。

キーワード：河床低下、露岩河床

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ている。

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

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、旭川市の発展に伴う河道整備により、川が以前の蛇行流路幅よりも狭い堤々間内に集約されたため、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。

また、河床低下により河床を覆っていた砂礫が一扫され、岩盤が露出している区間も多く、露岩した箇所では

滯筋が固定化し、河床が局所的に洗掘されている(図-1、図-2)。さらに砂礫の消失に伴い、魚類の産卵環境の減少、水生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の実施が急務となっている。

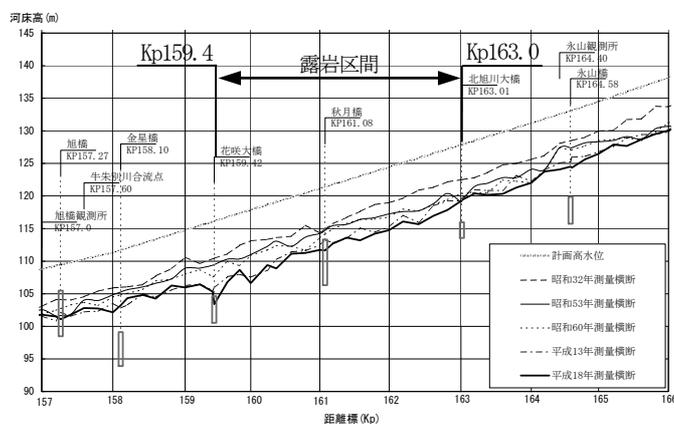


図-2 河床高経年変化図(最深河床高)



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. 河床低下の要因と現状

石狩川上流部において河床低下が顕著である石狩川本川 Kp157.0~Kp165.0 (牛朱別川合流~永山新川合流: L=約8km) の区間における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、ダムや砂防施設等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、河川管理上の問題となっている(写真-1)。

また、砂利採取が全面禁止(昭和56年)となつ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

岩盤の種類と分布状況を把握するために、河床低下区間において、ボーリング調査を実施した。

調査結果より、地質は固結度が低く脆い礫岩・砂岩と、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、いずれの層においても固結度が低いため、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る。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では、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(写真-3)。

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も取り扱いが課題となっている。将来の河床変動を把握するために河床変動解析を行うが、通常の河床変動解析では、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のメカニズムを把握するため、露岩区間に現地実験水路を設置し、岩盤の流水(流砂)に対する洗掘強度の調査を実施することとした。

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 左岸付近)の低水路内の露岩箇所、幅 1.0m、深さ 1.0m程度、河床勾配 1/30 の水路を掘削した(図-4)。

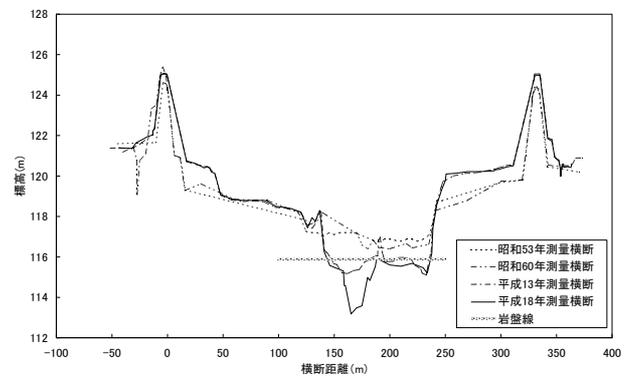


図-3 代表断面 (Kp161.6)



写真-2 露岩状況 (Kp162.8 付近)

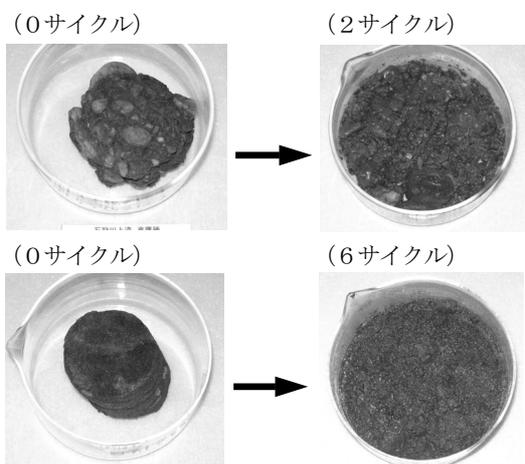


写真-3 乾湿繰り返し試験 (上: 礫岩、下: シルト岩)

実験水路底面に露出した岩盤と他の露岩箇所とを針貫入試験による換算一軸圧縮強度にて比較調査した結果、ほぼ同程度の強度であった(表-1)。このことから、実験水路における岩盤の洗掘強度は、当該区間の岩盤の強度を代表できるものであると判断した。

実験の実施にあたっては、既往の知見等が少なく、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)

まず、給砂無しでの河床洗掘量の把握と、合わせて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式の作成のために流水のみの実験を行った。

b) 予備実験(給砂有り)

次に、給砂方法の確立、継続時間と洗掘深の概略を把握するため、給砂量を変えたケースで予備実験を行い、本実験でのケース設定を行った。

給砂条件は、芦田・道上の掃流砂量式¹⁾で求められる流砂量をもとに設定した。給砂材料は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ったため、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式を作成した上で、自記水位計を設置して連続観測を行った。

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る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-4)。

c) 洗掘量計測

水位観測と同一断面(31測線)について横断方向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河床高の変化を計測した。

d) 粒度試験

水路内の流砂の粒度分布を把握するため、実験水路下流端で流砂を採取し、粒度試験を行った。

(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実験ケースを8ケース設定した。また作業性から、各実験ケース毎

に水路河床面の整形はせずに実験を行った。

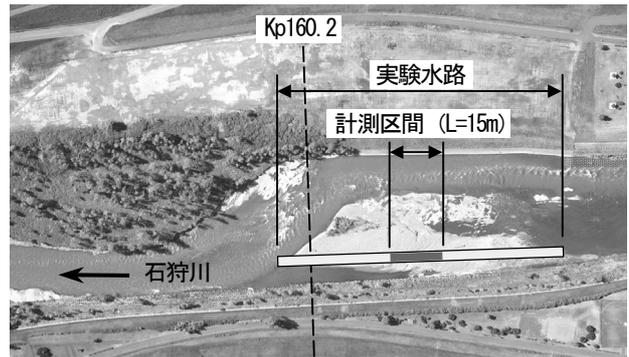


図-4 実験水路(位置図)

表-1 針貫入試験による換算一軸圧縮強度の比較

計測箇所	岩種	換算一軸圧縮強度(kN/m ²)	
		測定結果	平均値
実験水路内	シルト岩	0.6~1.7	1.0
	砂岩	0.4~0.6	0.6
石狩川上流(低水路内) (Kp160.3, Kp161.0, Kp162.5)	シルト岩	0.6~1.4	1.0
	砂岩	0.6	0.5

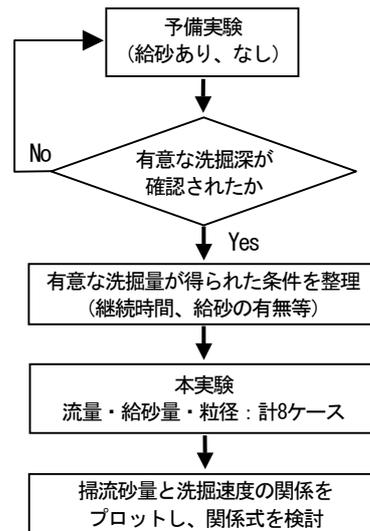


図-5 実験フロー



写真-4 実験水路(計測状況)

5. 実験結果

予備実験における洗掘速度と摩擦速度の関係を図-6に示す。予備実験の結果、給砂無し（流水のみ）ではほとんど岩盤の洗掘が見られなかったが、給砂有りの場合、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た。これにより岩盤の洗掘は、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。

本実験における各ケース毎の実験条件と実験結果（洗掘速度）を表-2に示す。表中の洗掘速度 D は、実験水路においても実河川と同様に「おう穴」や「みずみち」が形成され、局所的な深掘れ現象により流砂が滞筋に集中する傾向にあったため、砂礫堆積部分を除いた各測線での断面平均値として扱った（写真-5）。

6. 岩盤の洗掘速度と水理量の関係

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²⁾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)
- α_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関与する砂礫の数 (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、

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

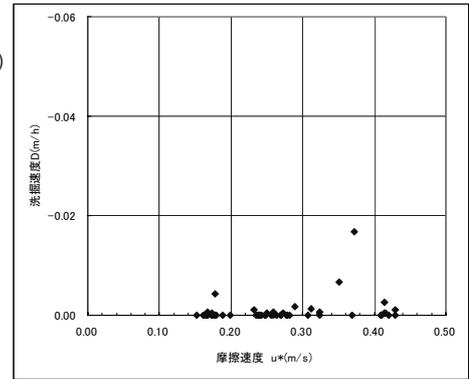
と表される。

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

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

(給砂無し

: 流水のみ)



(給砂有り)

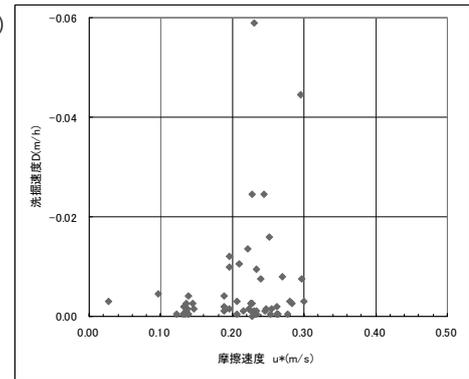


図-6 洗掘速度と摩擦速度の関係（予備実験）

表-2 本実験の条件と結果（洗掘速度）

ケース		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8	
実験条件	平均流量	$Q = (m^3/s)$	0.15	0.24	0.15	0.14	0.30	0.30	0.40	0.42
	平均水深	$H_s = (m)$	0.13	0.15	0.13	0.13	0.18	0.18	0.25	0.25
	平均流速	$V = (m/s)$	1.10	1.62	1.10	1.06	1.65	1.69	1.62	1.66
	粒径	$\phi = (mm)$	40		25		40			
給砂条件	給砂量	$Q_b = (m^2/h)$	0.4 (100%)	1.2 (40%)	1.2 (20%)	2.4 (40%)	2.0 (65%)	3.0 (100%)	3.0 (40%)	4.8 (65%)
	継続時間	$T = (h)$	6	4	4	4	4	3	3	3
	実験結果	測線 0m	$D = (mm/h)$	礫堆積	礫堆積	0.5	礫堆積	礫堆積	礫堆積	礫堆積
測線 2m		$D = (mm/h)$	0.3	0.9	0.4	0.5	1.8	2.9	0.7	2.6
測線 4m		$D = (mm/h)$	0.2	1.1	1.0	1.8	2.2	1.3	1.1	礫堆積
測線 6m		$D = (mm/h)$	0.3	礫堆積	0.3	礫堆積	礫堆積	礫堆積	礫堆積	礫堆積
測線 8m		$D = (mm/h)$	0.6	礫堆積	0.9	2.2	0.5	1.3	1.3	3.3
測線 10m		$D = (mm/h)$	1.0	0.5	1.0	1.6	1.1	2.7	2.9	4.2
測線 12m		$D = (mm/h)$	-	-	0.5	0.8	3.5	1.0	1.3	1.3
測線 14m		$D = (mm/h)$	-	-	1.3	0.8	0.5	3.0	2.7	1.3
平均値		$D = (mm/h)$	0.5	0.8	0.7	1.3	1.6	2.0	1.7	2.6
備考			6測線(2mL)付			31測線(0.5mL)付				



写真-5 実験終了後の水路（おう穴、みずみちの形成）

と表せ、また流砂 1 個当たりの質量 m は砂の密度を ρ_s とすると、

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

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、 α_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-7 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。なお、岩盤の洗掘速度は各実験ケースでの平均値として扱った。

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

7. 岩盤を考慮した河床変動解析

今回の実験より得られた、岩盤の洗掘速度と流砂量、流速の関係式を、平面 2 次元河床変動解析³⁾⁴⁾⁵⁾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することとした。

(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。

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 以上低いと、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図、最深河床高縦断図を図-8 に、横断図の一例を図-9 に示す。

河床高の縦断図を比較すると、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。

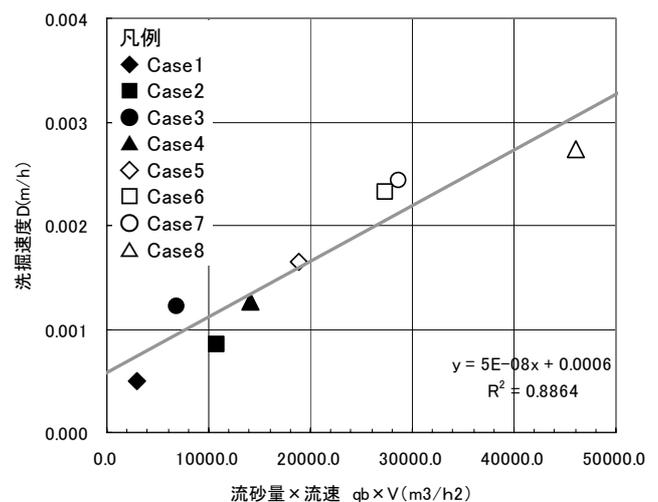


図-7 洗掘速度と(流砂量×流速)との関係

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、露岩区間において現地実験を実施し、以下の結果を得た。

- ・現地実験水路において、岩盤の流水・流砂に対する洗掘強度を調査し、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た。
- ・実験結果より、流砂に対する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計算を行った結果、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。

今後は、実験結果の検証をさらに行うとともに、粒径や岩質の違いによる洗掘速度の違いや、岩盤上の砂礫の移動について調査し、河床変動解析へ反映していく必要があり、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。

9. 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) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.

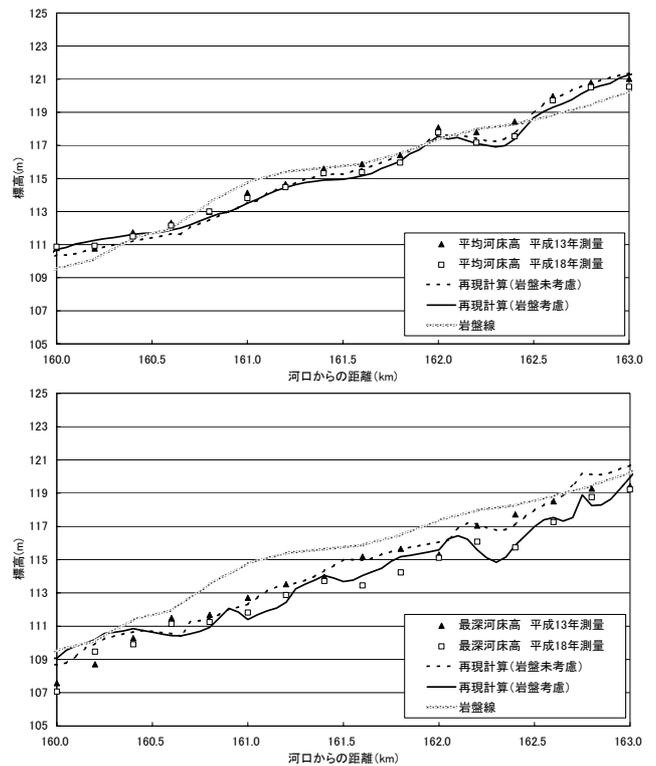


図-8 平均河床縦断面図（上）、最深河床縦断面図（下）

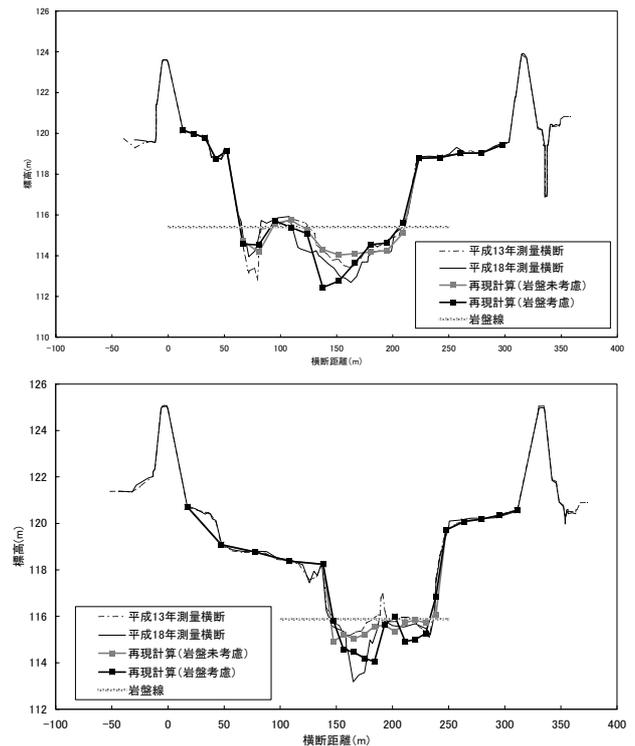


図-9 横断面図 Kp161.2（上）、Kp161.6（下）