

# 侵食抵抗の小さい岩盤の露出した河川に 効果的な河床低下対策工の検討

STUDY ON EFFECTIVE SCOURING CONTROL MEASURES  
FOR A SOFT BEDROCK RIVER

(株) 開発工営社  
北見工業大学 社会環境系  
(株) 開発工営社  
国土交通省 北海道開発局 網走開発建設部

○清家 拓哉  
渡邊 康玄  
濱木 道大  
大島 省吾

## 背景

- 近年、河床低下に伴う砂礫の流失により、上流から流送される砂礫の衝突等に対して侵食抵抗の小さい火山灰や岩盤が露出し、急激な河床低下を招いている河川が増加
- 低水護岸の機能喪失や橋脚の不安定化（構造物への影響）、河床砂礫の喪失によるサケ科魚類等の産卵環境の劣化など（河川環境への悪影響）が顕在化
- 岩盤が露出する河川における効果的な河床低下対策工が求められている

## 既往研究では...

- 常呂川水系無加川においても、岩盤露出による問題が顕在化し、河床低下対策を検討
- 拡幅案や覆礫案等を比較検討し、帯工群＋巨礫配置による河床低下対策工を採用
- 現地での対策実施にあたり、岩盤侵食を考慮した水理模型実験を実施し、帯工下流の局所的な侵食防止に有効な構造を提案
- 現地での試験施工を実施し、融雪出水程度に対して土砂堆積を促す効果を確認するとともに、2016年8月出水での被災状況を踏まえて構造を改良

## 課題

- 試験施工は検討段階の暫定的な構造であり、試験施工及び水理模型実験の最終結果を反映した構造（最終構造）での効果検証は不十分な状態にある

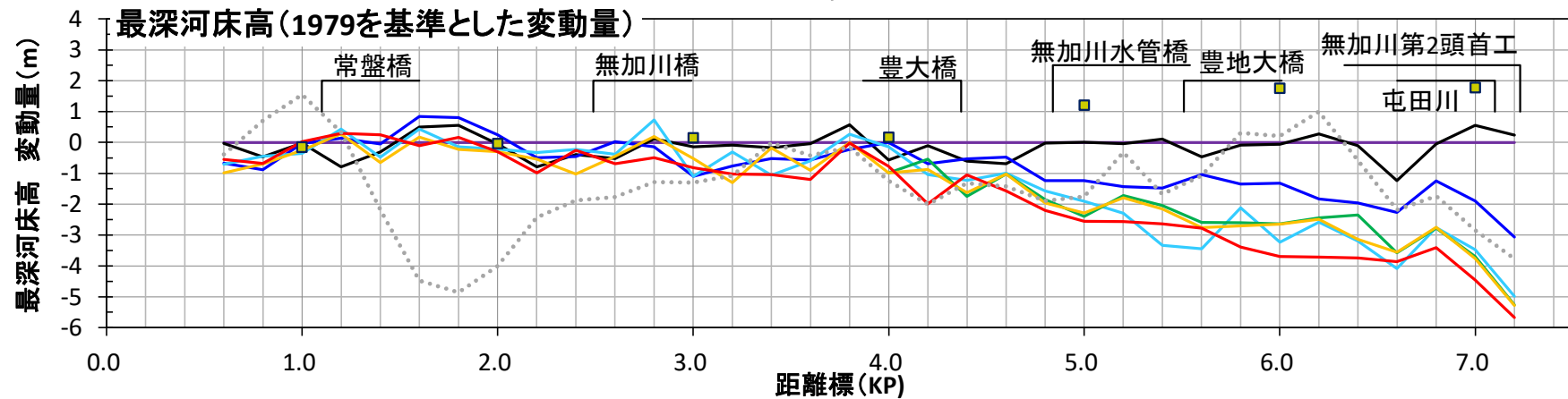
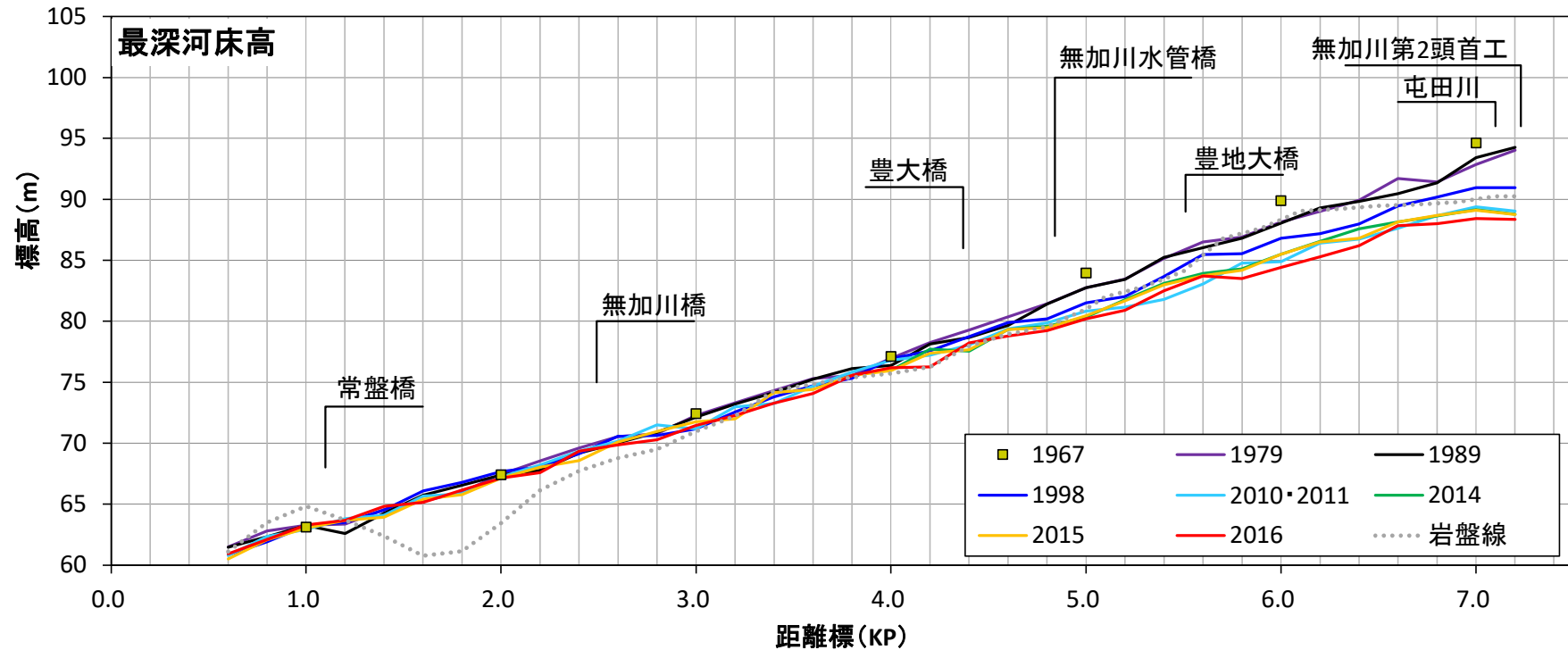
## 目的

- 最終構造による対策工は、モニタリングを実施しながら現在段階的に施工中である
- 本研究では、段階施工中に実施したモニタリング結果に基づき、最終構造の現地適用性および治水環境面への効果検証を目的とする



# 無加川直轄区間の河床低下状況（最深河床高）

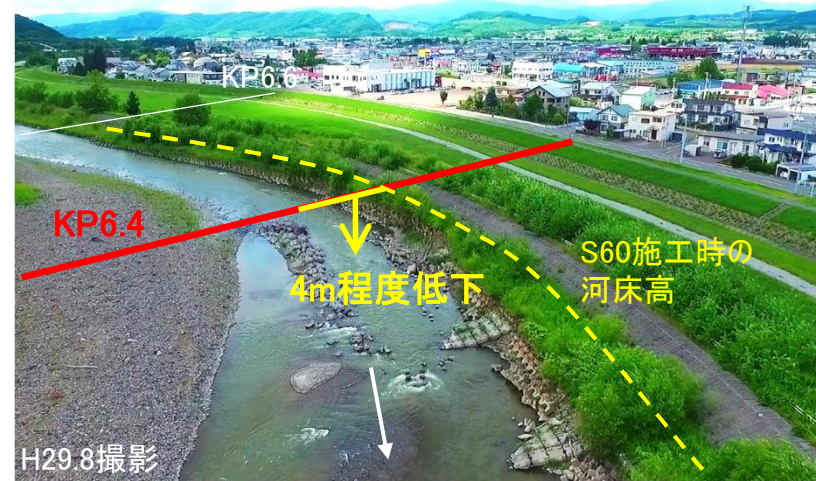
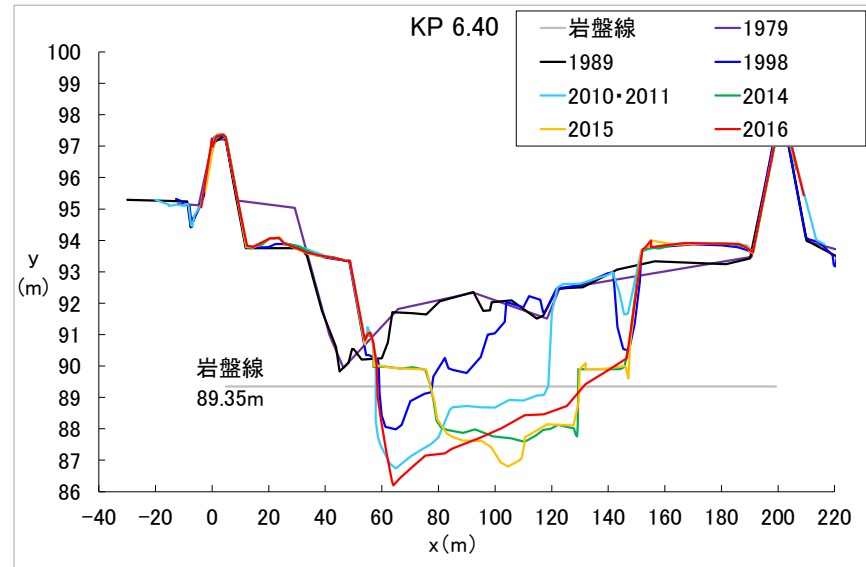
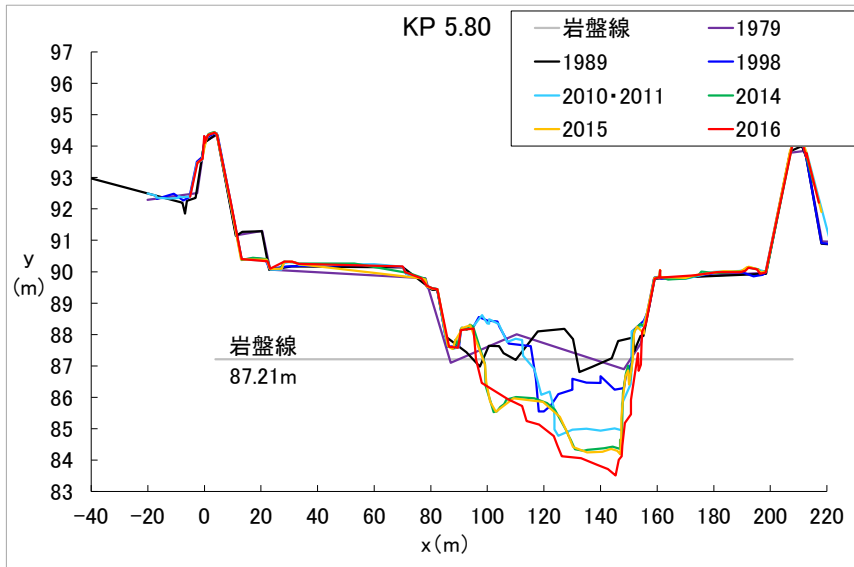
- 無加川ではKP4.0付近より上流側で河床低下が進行しており、1979年以降に最深河床高が最大で5.7m程度低下している。





# 無加川直轄区間の河床低下状況（横断変遷、現地状況）

- 河床低下により、低水護岸の機能喪失や橋脚の根入れ不足など、洪水に対する安全性が損なわれている。
- 高水敷幅が狭く低水路が堤防に接近している区間が多いため、堤防が被災する危険性がある。背後に北見市街地を抱えているため、早急な河床低下対策が求められている。

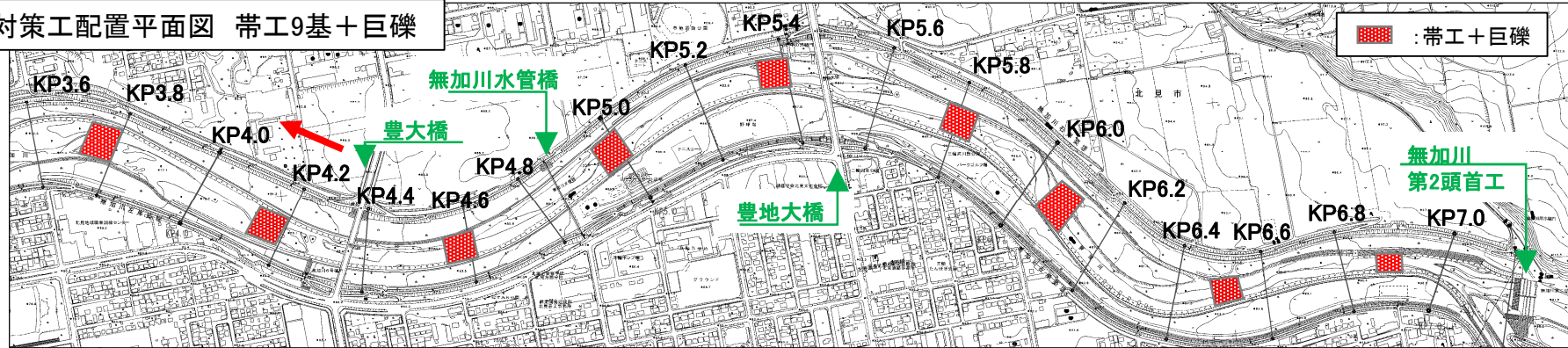




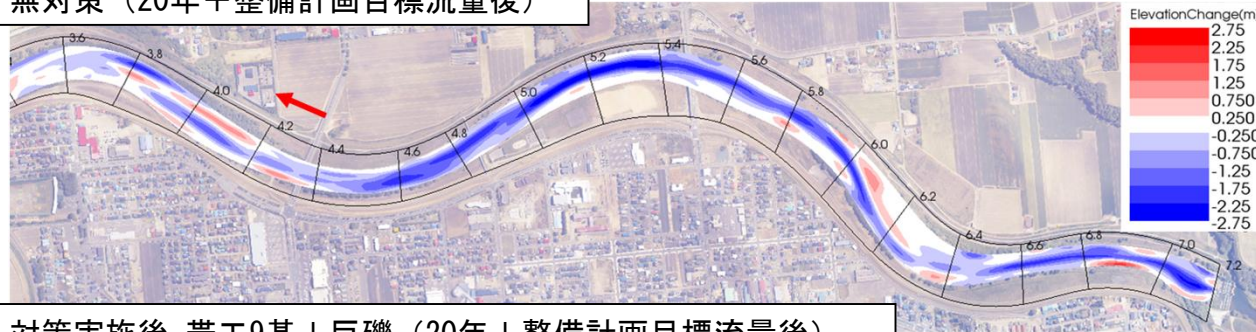
# 河床低下対策工の概要（対策工の配置）

- 無加川における河床低下対策工の配置検討は、岩盤侵食を考慮した平面2次元河床変動解析モデルを用いて行った。
- 現況河床高維持を目的に、岩盤侵食による河床低下が予測されたKP3.8から上流側に帯工を300～400m程度の間隔で合計9箇所設置する案を採用した。

対策工配置平面図 帯工9基+巨礫

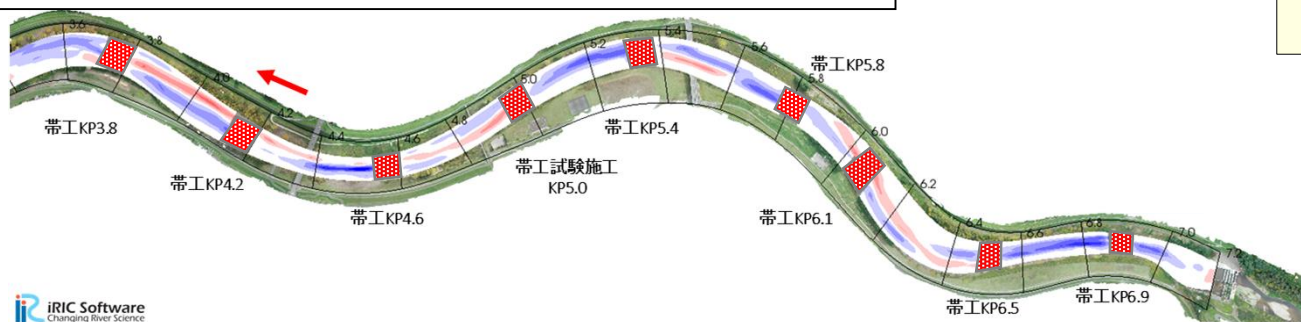


無対策（20年+整備計画目標流量後）



解析手法: 非定常平面2次元河床変動解析法  
 計算区間: 無加川KP0.2～7.2  
 河床形状: 2016.8出水後河道に無対策, 対策完成後(帯工9基+巨礫)を想定  
 流量: 北光社観測所時刻流量  
 20年(2005～2014年×2) + 整備計画流量  
 起算水位: 下流端で等流起算  
 岩盤: 全川で岩盤高, 侵食考慮  
 河床材料: 混合粒径(2013調査, 2016調査)  
 粗度係数: 低水路=マニング・ストリクラー式(河床変動中の平均粒径で変化)  
 高水敷=計画粗度係数 0.040

対策実施後 帯工9基+巨礫（20年+整備計画目標流量後）



河床低下対策を実施することで、対策区間全体の河床低下を抑制可能であることを確認

# 河床低下対策工の概要（対策工の構造）

- 河床低下対策工の構造は、岩盤侵食を考慮した水理模型実験結果に基づき設定した。
- 濱木らは、帯工下流側を斜路構造とし、下流側に緩衝帯として巨礫を厚く配置することで、構造物下流側の岩盤侵食を防止する構造を提案している。

## 水理模型実験

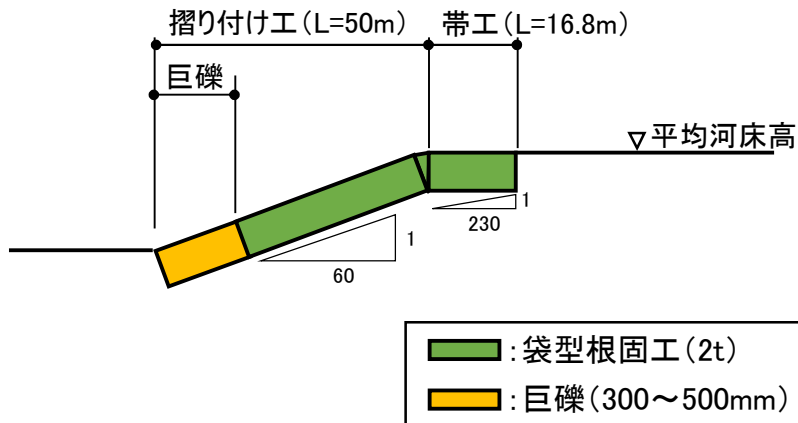
巨礫下流側で洗掘等が生じた場合、ある程度の巨礫流出が予想されるが、水理模型実験において、洗掘に追従して巨礫が流出することで落差ができにくいこと、岩盤が露出するような局所的な巨礫の流出は発生しないことが確認されている。

## 実験水路側面図



※濱木道大, 戸村翔, 渡邊康玄, 井上卓也, 安田裕一, 古清幸永: 水理模型実験と現地試験施工を踏まえた岩盤露出河川に対する河床低下対策工の検討, 河川技術論文集, 第23巻, pp477-482, 2017.6

## 縦断形状(実スケール)



■ : 袋型根固工 (2t)  
■ : 巨礫 (300~500mm)

工種	帯工	摺り付け工
縦断形状	1/230	1/60
備考	平均河床勾配程度	室内水路実験より

## 設置状況

設置状況

経済性に優れかつ屈撓性の高い袋型根固めを採用。  
2016年8月出水による試験施工の被災状況を踏まえ、高耐久性の港湾型製品を採用。

流下物の捕捉を抑制するため、袋同士の結合は縦連結のみ。

袋型根固工 (高耐久性 ※港湾型)

袋型根固工 (2t)

巨礫 (300~500mm)

巨礫 (300~500mm)

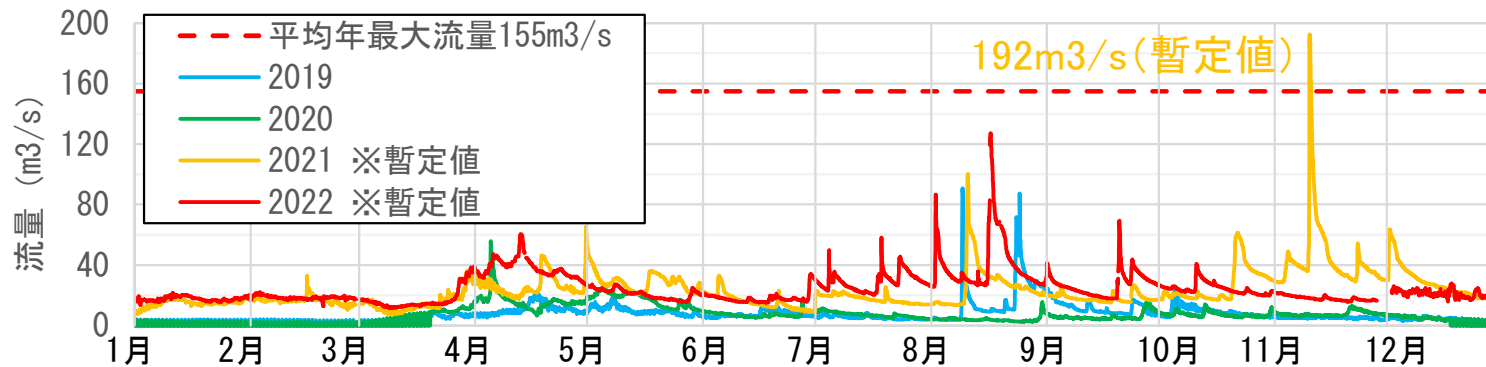
巨礫の粒径は、計画高水時の水理量を基に、移動限界以上の粒径に設定



# 現地モニタリングの実施

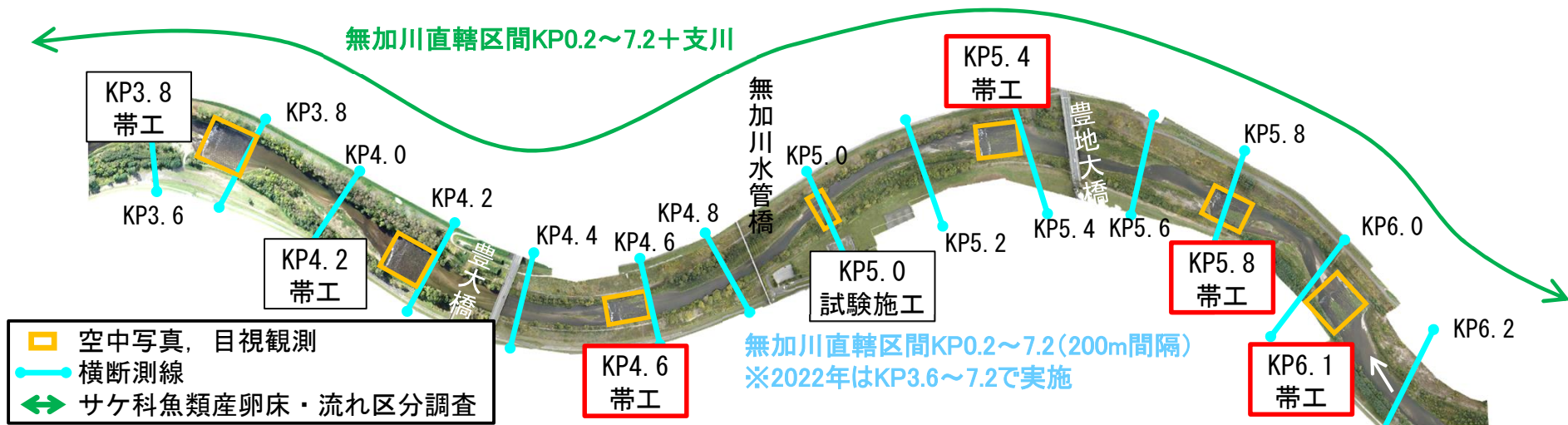
## 最終構造の対策工設置後における出水発生状況 (KP1.5北光社観測所 時刻流量)

- 最終構造の対策工は、水理模型実験結果を踏まえ、2019年度以降に設置が進められているが、**2021年11月に初めて平均年最大流量以上の出水が発生**。
- 本研究では、**2021年11月出水時に最終構造となっていた4箇所 (KP4.6・KP5.4・KP5.8・KP6.1) に着目した**。



## モニタリング項目

- 対策工の現地適応性検証 → 対策箇所周辺を対象とした空中写真撮影および目視調査
- 対策工の効果検証(治水面・環境面) → 横断測量、サケ科魚類産卵床・流れ区分調査





# 現地モニタリング結果（対策工の現地適応性検証） KP4.6帯工

KP4.6帯工

- 帯工上面には土砂が堆積していることから、**土砂が帯工を乗り越えて移動**していることを確認した。
- 帯工上面の土砂堆積箇所には植生が繁茂するが、草本が主体である。

- 帯工上流側は**緩やかな流れ**となっており、**粗礫(19~47mm)**が堆積している。

帯工  
(袋型根固)  
L=52.5m

巨礫  
L=21.3m

- 巨礫は河床変動に追従して移動しているが、巨礫工下流側を含め**岩盤等は露出しておらず、袋型根固めの破損や流出もみられない。**

帯工部分 ➡ 袋型根固めの破損や流出はない

巨礫部分 ➡ 極端な落差や岩盤露出が生じるような顕著な流出はない



# 現地モニタリング結果（対策工の現地適応性検証） KP5.4帯工

KP5.4帯工

- 帯工上面には土砂が堆積していることから、**土砂が帯工を乗り越えて移動していることを確認した。**
- 帯工上面の土砂堆積箇所には植生が繁茂するが、**草本が主体である。**

- 帯工上流側は**緩やかな流れ**となっており、**粗礫(19~47mm)が堆積している。**

帯工  
(袋型根固)  
L=52.5m

巨礫  
L=14.3m

- 巨礫は河床変動に追従して移動しており、**左岸側の巨礫直下流には火山灰層が露出している**が、**顕著な岩盤侵食や巨礫の流出は生じておらず、袋型根固めの破損や流出もみられない。**

2021

2022

露岩範囲は経年的に  
拡大傾向

帯工部分 ➡ 袋型根固めの破損や流出はない

巨礫部分 ➡ 極端な落差や岩盤露出が生じるような顕著な流出はない。また、巨礫下流側の露岩部では、顕著な侵食は生じていない。



# 現地モニタリング結果（対策工の現地適応性検証） KP5.8帯工

KP5.8帯工

- 帯工上流側は緩やかな流れとなっており、粗礫（19～47mm）が堆積している。

- 帯工上面には土砂が堆積していることから、土砂が帯工を乗り越えて移動していることを確認した。
- 帯工上面の植生繁茂は現在設置されている帯工の中では顕著となっているが、草本が主体である。

帯工  
（袋型根固）  
L=52.5m

巨礫  
L=20.3m

- 巨礫は河床変動に追従して移動しており、左岸側の巨礫直下流には火山灰層が露出しているが、顕著な岩盤侵食や巨礫の流出は生じておらず、袋型根固めの破損や流出もみられない。

露岩範囲は経年的に  
拡大傾向

帯工部分 ➡ 袋型根固めの破損や流出はない

巨礫部分 ➡ 極端な落差や岩盤露出が生じるような顕著な流出はない。また、巨礫下流側の露岩部では、顕著な侵食は生じていない。



# 現地モニタリング結果（対策工の現地適応性検証） KP6.1帯工

## KP6.1帯工

- 右岸法面の既設護岸との擦り付け部において、2020年に袋型根固めの滑落を確認。
- 2021年11月出水等により、袋型根固の滑落が進行。
- 既設護岸(連節ブロック)下部において火山灰層の侵食が進行しているが、現状では護岸機能は維持。

- 帯工上流側は緩やかな流れとなっており、粗礫(19~47mm)が堆積している。



- 帯工上面には土砂が堆積していることから、土砂が帯工を乗り越えて移動していることを確認した。
- 帯工上面の植生繁茂は現在設置されている帯工の中では顕著となっているが、草本が主体である。

帯工部分 ➡ 帯工部分では袋型根固めの破損や流出はみられない。

巨礫部分 ➡ 巨礫はほとんど移動しておらず、巨礫工下流側を含め岩盤等は露出していない。

## 現地モニタリング結果（対策工の現地適応性）

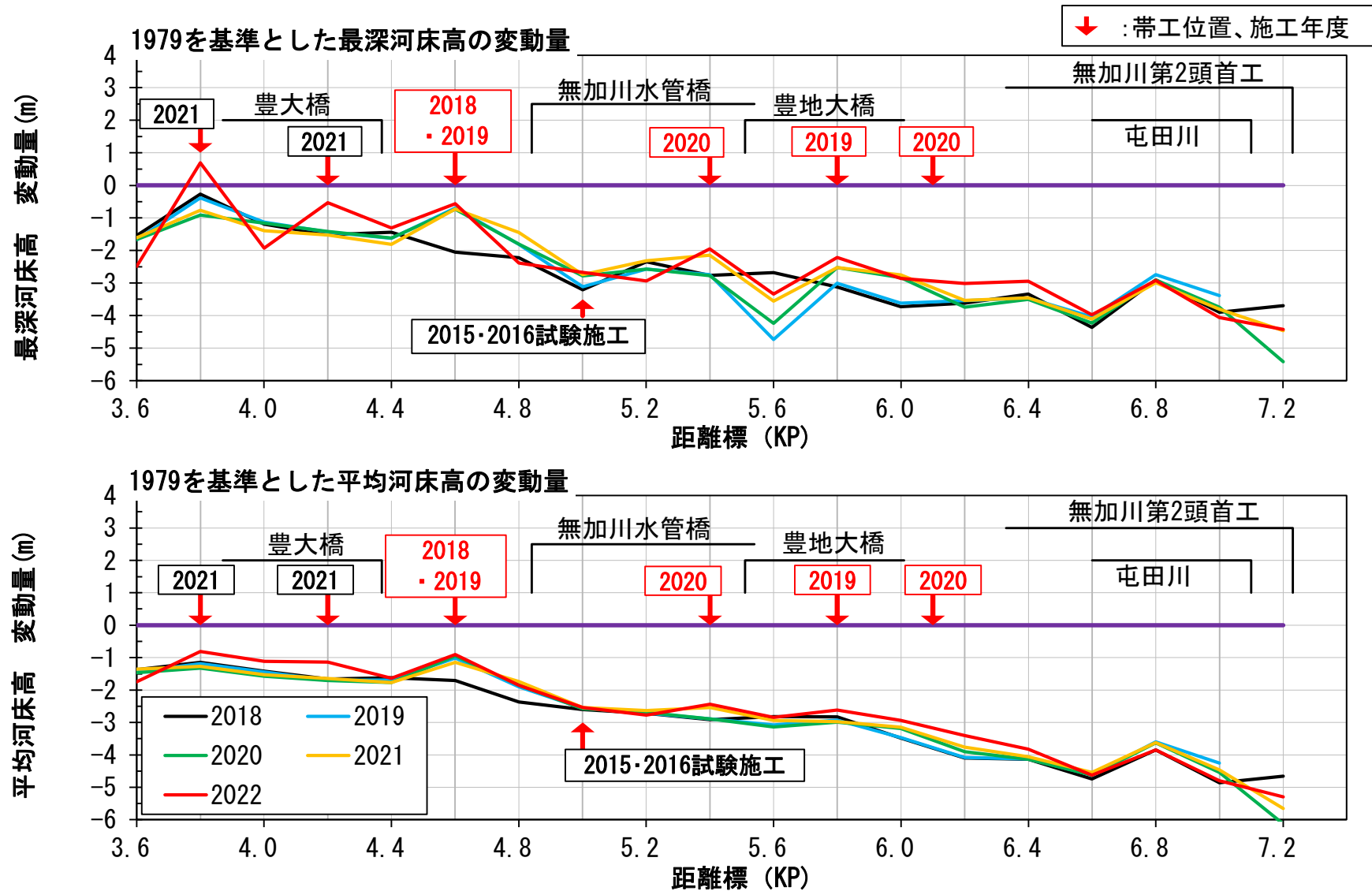
- 平均年最大流量を上回る2021年11月出水後においても、帯工部分では袋型根固めの破損や流出は生じていない。
- 巨礫部分では、KP6.1帯工を除き、下流側の河床変動に追従して巨礫が移動しているが、極端な落差や岩盤露出が生じるような顕著な流出は生じていない。
- KP5.4・KP5.8帯工の巨礫下流側では、岩盤が露出しているが、2021年11月出水前後の変化から顕著な岩盤侵食は生じていない。



- 水理模型実験結果を踏まえて当初想定していた軽微な影響にとどまっておき、**最終構造の妥当性が確認された。**
- 現時点では出水の経験回数が少ないため、今後は**巨礫流出や岩盤侵食の進行有無を検証する必要がある。**
- 帯工上面では、土砂の移動・堆積に伴い植生の繁茂が進行している。現状は草本が主体となっているが、今後は**樹林化の進行有無や対策工への影響を検証する必要がある。**

# 現地モニタリング結果（対策工の効果検証） 縦断変遷

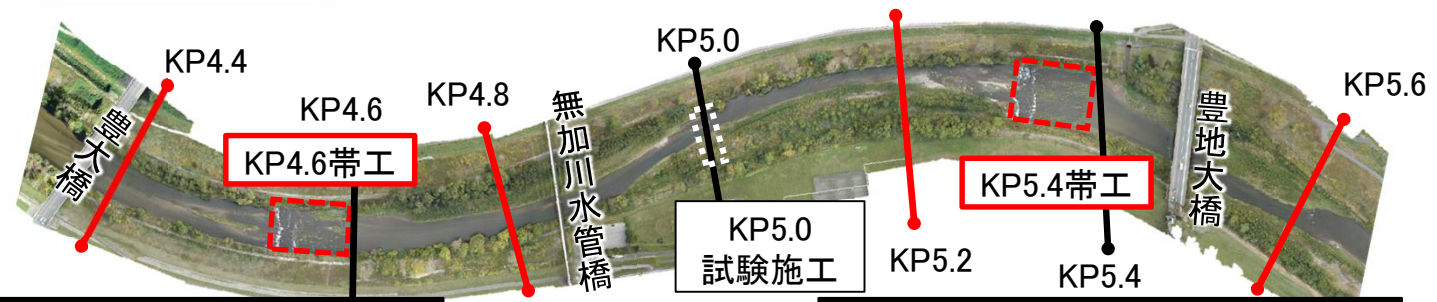
- KP4.6・KP5.4・KP5.8・KP6.1帯工周辺（上下流）に着目すると、帯工設置後は基本的には施工前の河床高を概ね維持または堆積傾向となった。
- 2021-2022年（2021年11月出水前後）では、KP4.8（KP4.6帯工上流側）、KP5.2（KP5.4帯工下流側）は若干低下傾向となった。



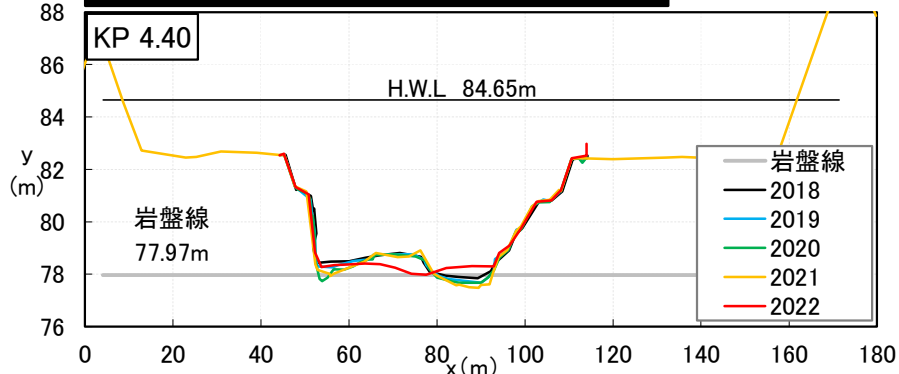


# 現地モニタリング結果（対策工の効果検証）横断変遷①

2022年  
10月撮影

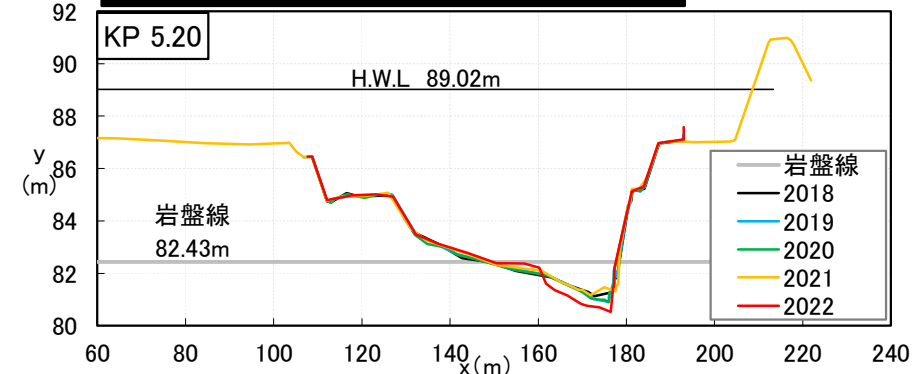


**KP4.6帯工上下流【2019年度完成】**



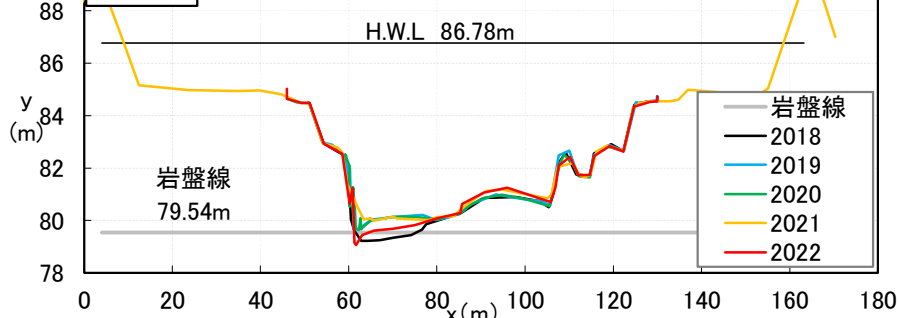
2019-2020年は概ね維持。2020-2021年は右岸側が若干低下。2021-2022年（2021年11月出水前後）は右岸側が堆積。

**KP5.4帯工上下流【2020年度完成】**



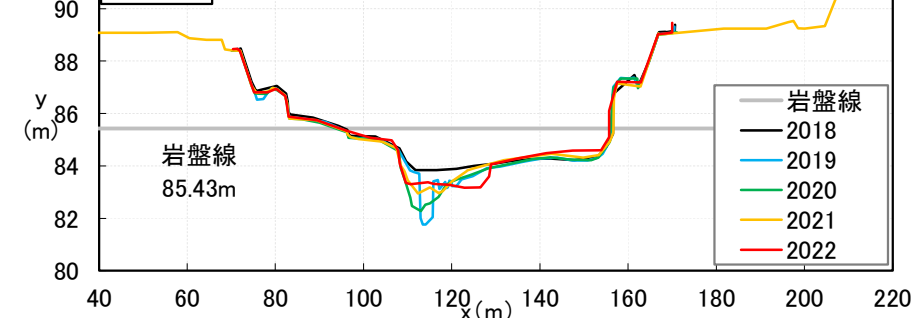
2020-2021年は右岸側が若干堆積。2021-2022年は右岸側が0.6m程度低下。KP5.2では左岸側砂州が固定化。

**KP 4.80**



2019-2021年は概ね維持。2021-2022年は左岸側が0.9m程度低下。KP4.8では右岸側砂州が固定化。

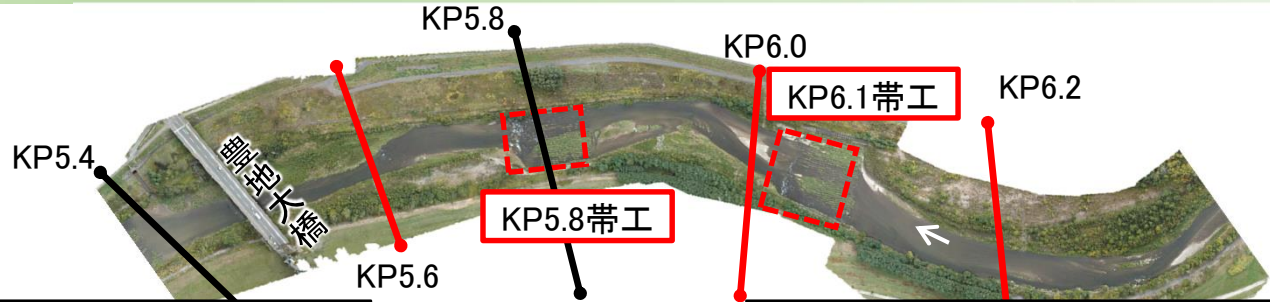
**KP 5.60**



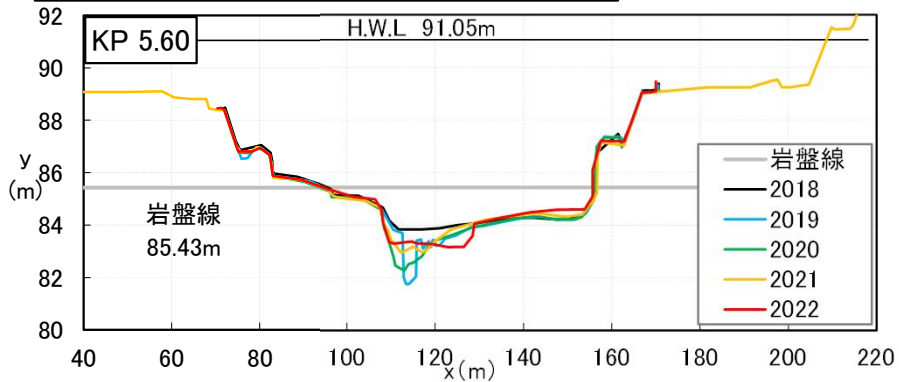
2020-2021年は中央部が0.7m程度堆積。2021-2022は更に0.2m程度堆積。

# 現地モニタリング結果（対策工の効果検証）横断変遷②

2022年  
10月撮影

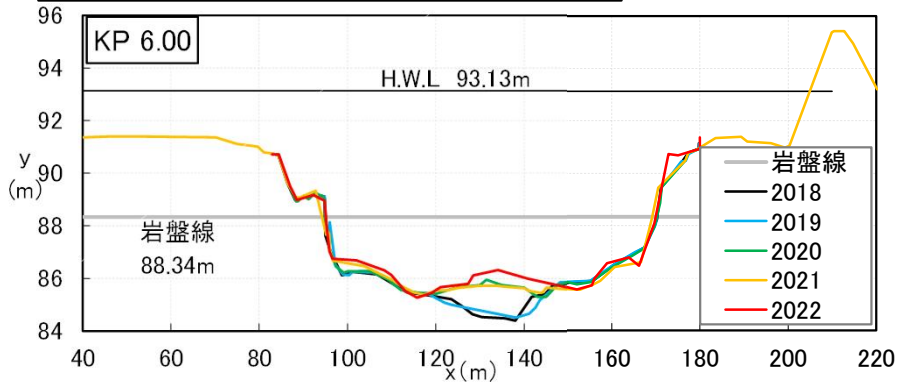


**KP5.8帯工上下流【2019年度完成】**

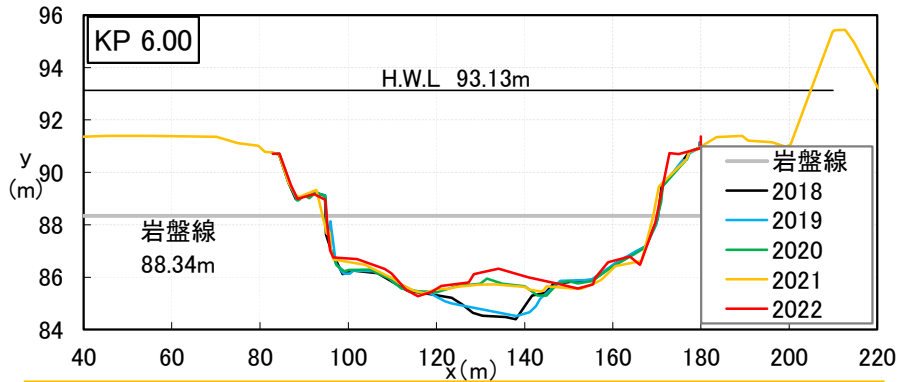


2019-2020年は中央部が0.5m程度堆積。2020-2021年（KP5.4帯工設置後）は更に0.7m程度堆積。2021-2022年も若干堆積。

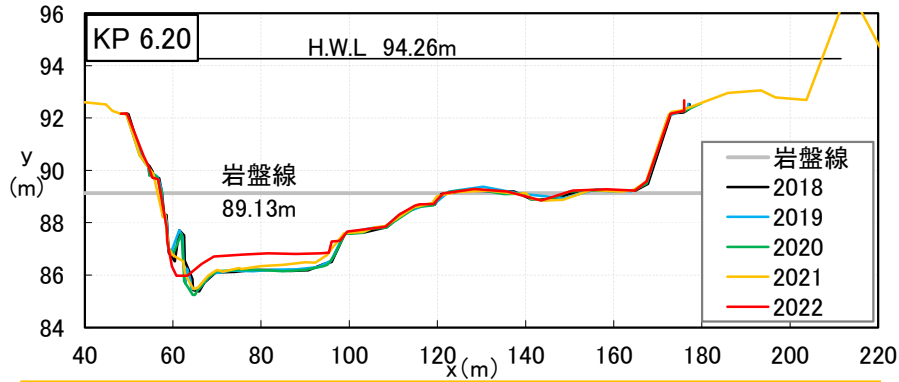
**KP6.1帯工上下流【2020年度完成】**



下流側のKP5.8帯工が既に施工済みであり、2020-2022年は堆積傾向。



2019-2020年は中央部が0.8m程度堆積。2020-2021年は概ね維持。2021-2022年は堆積傾向。



2020-2021年は左岸側が0.2m程度堆積。2021-2022年は更に0.5m程度堆積。



# 現地モニタリング結果（対策工の効果検証）産卵床・流れ区分

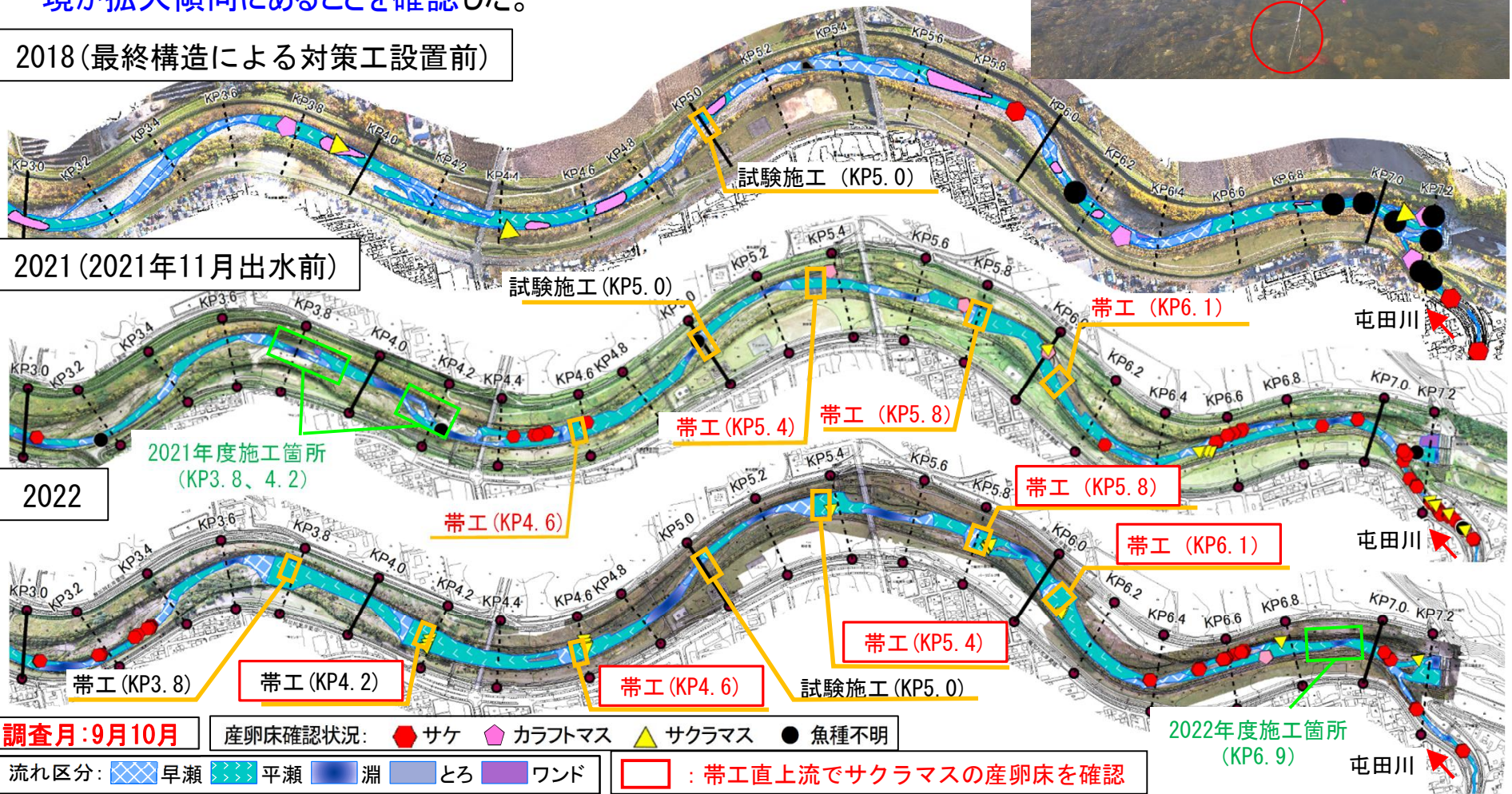
- 産卵床の分布は広範囲で確認でき、帯工(KP4.6・KP5.4・KP5.8・KP6.1)周辺においてもサケ・カラフトマスの産卵床を確認できた。
- サクラマスの産卵床は、2021年以前は河岸際の植生カバー下で部分的に確認していたが、2022年調査では、初めて最終構造の帯工直上流の袋型根固め近傍において産卵床を確認した。
- 産卵床は主に平瀬に集中して分布するとともに、帯工設置後は平瀬環境が拡大傾向にあることを確認した。



2018(最終構造による対策工設置前)

2021(2021年11月出水前)

2022



調査月: 9月10日 産卵床確認状況: ● サケ ▲ サクラマス ● 魚種不明

流れ区分: 早瀬 平瀬 淵 とろ ワンド

□ : 帯工直上流でサクラマスの産卵床を確認

2022年度施工箇所 (KP6.9) 屯田川



## 現地モニタリング結果（対策工の効果検証）

- 河床高の変化より、最終構造による対策工施工後は、上流側において比較的早く土砂の堆積が生じている。
- 平均年最大流量を上回る2021年11月出水後においては、基本的には最深河床高・平均河床高ともに概ね維持または堆積傾向となった。
- サケ科魚類産卵床の分布状況および流れ区分より、帯工設置後は産卵床が集中して分布する平瀬環境が増加傾向となり、広範囲かつ帯工周辺でサケ・カラフトマスの産卵床を確認できた。2022年調査では帯工直上流でサクラマスの産卵床を確認できた。



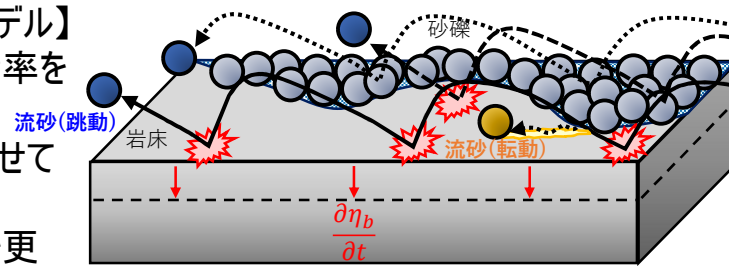
- 区間の最下流端を含め、帯工間の砂州が固定する箇所やや侵食が進んでいるものの、本対策工が治水環境面で効果的であることが確認された。
- 帯工直上流のサクラマス産卵床は、帯工直上流に砂礫が堆積したこと、帯工を袋型根固めとしたことで伏流環境を分断せず浸透が卓越したこと、帯工上面に定着した植生がカバーとなったことが好適環境を創出した要因と考えられる。
  - ➡岩盤が露出する河川においてサケ科魚類の産卵環境を創出する手法として効果的であると考えられる。
- 帯工間で砂州が固定化するKP4.8・KP5.2では、湾曲部外岸側において最深河床高の低下が生じたが、これが継続的なものか否かを今後検証する必要がある。

# 予測計算結果と横断測量結果の比較（対策工の効果検証）

- 岩盤侵食を考慮した平面2次元河床変動解析モデルを用い、河床低下対策工の配置検討時（帯工9基）における予測計算結果との比較を行った。
- 2019～2022年（最終構造による対策工設置後）の変動は、概ね当初の予測通りの結果となっており、河床低下前の1979年測量との差は大きいものの、**無対策予測に対して河床低下を抑制していることを確認した。**

## 【岩盤侵食を考慮した平面2次元河床変動解析モデル】

- Nays2DHに岩盤の侵食速度、砂礫層被覆面積率を考慮した。
- 岩盤上の流砂の移動形態（跳動、転動）に合わせて侵食量を算定する。
- 砂礫床と岩盤床の変動量を合計して、河床高を更新する。



**転動**  

$$\frac{\partial \eta_b}{\partial t} = -\beta_c \cdot \sigma^{-2} \cdot d^{0.5} \cdot q_b \cdot (1 - P_c)$$

**跳動**  

$$\frac{\partial \eta_b}{\partial t} = -C_2 \cdot \mu_s \cdot \rho_s \cdot q_b \cdot (1 - P_c)$$

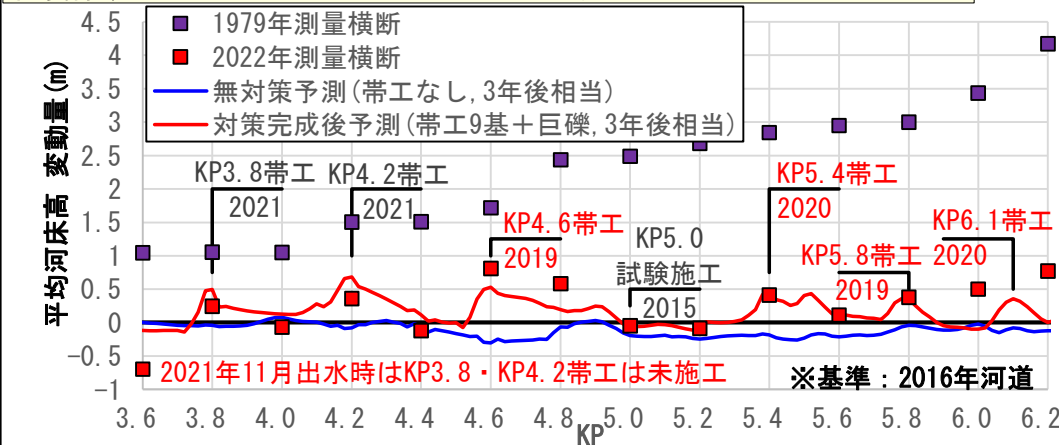
※跳動と転動は、跳動距離  $L_s$  (土屋らの式) を基に判断

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \eta_a}{\partial t} + \frac{\partial \eta_b}{\partial t}$$

河床高更新    砂礫    岩盤

※ $\eta_b$ は岩床の標高、 $\beta_c, C_2$ は係数（石狩川現地岩盤侵食実験により設定）、 $\sigma$ は岩盤床の一軸圧縮強度(MPa),  $d$ は砂礫の粒径(m),  $q_b$ は単位幅流砂量(m<sup>2</sup>/s),  $P_c$ は岩床の被覆面積率,  $\rho_s$ は砂礫密度,  $\mu_s$ は動摩擦係数(≒0.6)  
 ※岩盤床の一軸圧縮強度は、現地の針貫入試験結果を基に設定。  
 ※北見工業大学との共同研究による表面波探査、ボーリング調査結果を踏まえた土層縦横断の把握結果を反映  
 ※濱木道大、清家拓哉、木下誠一、渡邊康玄、井上卓也：常呂川水系無加川における岩盤侵食を考慮した河床変動計算, 土木学会第70回年次学術講演会, CS6-005, p9-10, 2014.9

解析手法: 非定常平面2次元河床変動解析法    計算区間: 無加川KP0.2～7.2  
 河床形状: 2016.8出水後河道に無対策, 対策完成後(帯工9基+巨礫)を想定  
 流量: 北光社観測所時刻流量    20年(2005～2014年×2)    3年後相当を描画  
 起算水位: 下流端で等流起算    岩盤: 全川で岩盤高, 侵食考慮  
 河床材料: 混合粒径(2013調査, 2016調査)  
 粗度係数: 低水路= Manning・ストリクラ式、高水敷= 計画粗度係数 0.040



**KP5.8より上流側では予測よりも堆積が大きい**  
 →直轄区間上流端の無加川第2頭首工が2018年7月出水により被災した際に、上流から土砂が多く供給されたことが要因と想定



**KP3.6では予測よりも低下が大きい**  
 →2021年11月出水時において、配置検討時に比べてKP3.6左岸側砂州の固定化(樹林化)が進行





## おわりに（得られた知見）

- 段階施工中に実施したモニタリング結果に基づき、水理模型実験で提案された対策工構造(最終構造)の現地適用性、治水環境面への効果を明らかにした。
  - ① 平均年最大流量を上回る出水に対しても、対策工周辺で顕著な変状は生じておらず、水理模型実験結果より想定された軽微な影響にとどまった。
  - ② 現時点では出水の経験回数が少ないため、巨礫流出や岩盤侵食の進行有無を検証する必要がある。また、帯工上面の樹林化の進行有無や対策工への影響についても検証する必要がある。
  - ③ 最終構造の対策工上流側では設置後比較的早く堆積が生じ、平均年最大流量を上回る出水に対して、基本的には河床低下は抑制された。
  - ④ 帯工間の砂州固定化箇所では、湾曲部外岸側において最深河床高が低下。この低下が継続的なものか否かを検証する必要がある。
  - ⑤ 最終構造の対策工を設置することで、対策工配置検討時に予測した効果が得られることが分かった。
  - ⑥ 帯工設置後は産卵床が集中して分布する平瀬環境が増加傾向となる。帯工直上流は帯工を袋型根固めとしたことで浸透が卓越し、帯工上面の植生がカバールとなることでサクラマス産卵床の好適環境が創出された。