

平成24年度

# ステップ・プール構造の落差工設計と 現場への適用について

## —良好な河川環境の回復と河床低下対策への可能性—

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地技術推進室 ○数馬田 貢  
(独) 土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム 林田 寿文

コンクリート構造の落差工は、様々な応力に耐えられるよう設計されるが、射流の発生や魚類の遡上障害など、河川環境に大きな影響を及ぼす。一方、十分な深さと長さのプールを数段持つステップ・プール構造の落差工は、このような課題を解消するとともに、良好な河川環境を創出する。本研究では、ステップ・プール構造の落差工の模型実験により、必要なプールの深さと長さを算出する式を導き出し、現場への適用について検討を行うものである。

キーワード：ステップ・プール、落差工設計、河床低下対策、河川環境

### 1. はじめに

落差工は、勾配が急な河川において洪水流のエネルギーを分散させて、河岸侵食や河床低下を防止することを目的に設置される横断構造物である<sup>1)</sup>が、一般に施工事例が多いコンクリート構造の落差工は、射流の発生による河床材料の流失、落差による魚類の遡上障害、広範囲に敷設される護床工による水生生物の生息環境の喪失など、河川環境に及ぼす影響は大きい。一方、福留らが提唱する石組みを用いた分散型落差工<sup>2)3)</sup>は、低落差でステップ・プールを繰り返す構造により流速が抑えられ、平水時における河川環境の改善効果が大きい<sup>4)</sup>が、出水時に石組みの一部が流失する事例も報告されており、流水の作用に対して安全な構造となっていないなど、落差工に関する課題は多い。

そこで、我々はこれらの問題に対し、洪水流の減勢や河川環境改善の観点から、コンクリート構造の落差工よりも有利とされるステップ・プール構造の落差工を選択し、流水のエネルギーを十分に減らすために必要なプールの「深さ」及び「長さ」を求めるための模型実験を行い、落差工の「落差」や「流速」から必要なプールの「深さ」と「長さ」を求める簡易な式を導き出した<sup>4)</sup>。本論文では、札幌市内を流れる豊平川に設置された5号床止と、その支川である真駒内川に設置された分散型落差工をとり上げ、平成23年9月に発生した洪水時の現象と、ステップ・プール構造の落差工の有効性（射流の抑制、河川環境改善効果、河床低下防止

など、様々な問題解消の可能性) について考察する。本研究で得られた成果は、ステップ・プール構造の落差工の基礎知見になることが期待される。

### 2. 洪水時における落差工の流況

豊平川流域では平成23年9月5日から6日にかけて大雨となり、10年ぶりに高水敷が一部冠水する出水があった<sup>5)</sup>。豊平川の直轄区間には6基の床止工（1号、3号、4号、5号、6・7号、8号、いずれもコンクリート構造）<sup>6)</sup>と、支川の真駒内川に石組みによる分散型落差工が設置されている<sup>7)</sup>が、これらの落差工の一部において、この出水により以下のような問題点が確認された。豊平川と真駒内川の位置は図-1に示す。

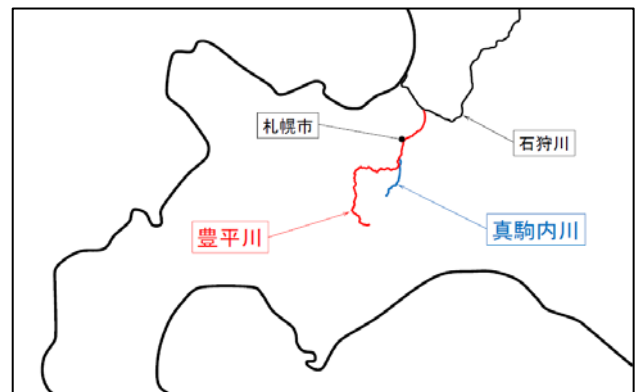


図-1 豊平川・真駒内川 位置図

### (1) 5号床止 (H19施工)

落差工の下流に三角波（跳水）が発生し（図-2）、出水後はその箇所に大量の土砂が堆積した（図-3）。三角波は、床止工本体を越流した流れが落差によって加速されて射流となり、流速が遅い常流にぶつかると発生する。また、洪水流と共に土砂も流下するが、土砂は流速が遅くなった箇所に堆積する。三角波が発生する所は、その「流速が遅くなった所」になるため、今回の出水でもそこに大量の土砂が堆積した。河道内に土砂が堆積すると、そこに樹木が繁茂し、洪水の安全な流下を阻害するため、早急に撤去する必要がある。

### (2) 分散型落差工 (H18施工)

平水時は穏やかに流れており、河川環境は良好である（図-4）<sup>7)</sup>が、出水時には荒れた流況を呈していた（図-5）。これは、洪水になると流速が上がるので、石組み部分を越流した洪水流はプールに落水せず、次の石組み部分まで到達して衝突するために発生する事象であると思われる。これにより、出水後は石組みの石の一部の流失も確認されている（図-6）。流量も流速も増加した流水により、大きく複雑な力が石に加わったものと考えられる。

路深さ 0.3m、流量 0.0042m<sup>3</sup>/s (4.2l/s)である（図-7）。落差工のパーツは取り替えられるようになっており、組み合わせにより図-8～11の4パターンの実験を行った。各パターンの諸元を表-1に示す。ステップ・プール構造の落差工のパーツについては、実物の「石組みによる分散型落差工」を疑似して円弧状とした（図-12）。これは、石組みで施工する場合に流水の水圧に対して構造的に安定する<sup>3)8)</sup>だけでなく、流水が円弧状の落差を越流する際、図-12の破線矢印のように河道の中心に集って衝突し、そこで洪水流を減勢する効果がある。



図-4 真駒内川分散型落差工(平常時)



図-5 真駒内川分散型落差工(H23年9月出水)  
(出水時の荒れた流況)

## 3. 実験方法

これらの落差工における出水時の流況の再現を行うため、また、コンクリート構造の落差工に見られる射流の発生を抑制して局所的な土砂堆積を防止すること、及びステップ・プール構造の落差工で発生する荒れた流況を抑制して石組みの石の流出を防止することを目的に、ステップ・プール構造の落差工のプールの深さや長さを変えて、模型実験を以下の条件で行った。模型は、水路勾配 1/500、水路幅 0.2m、水路延長 2.0m、水



図-2 豊平川5号床止(H23年9月出水)  
：三角波



図-3 豊平川5号床止(出水後の土砂堆積)  
：土砂



図-6 真駒内川分散型落差工(出水後の石の流失)  
：石の流失部分





図-7 実験に用いた模型

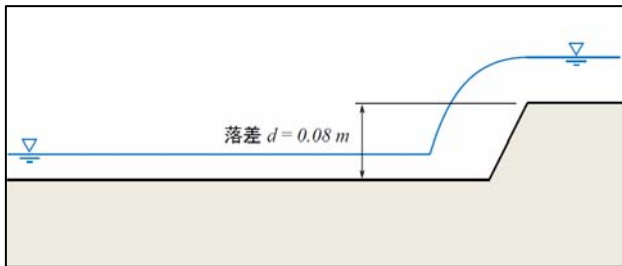


図-8 従来型（コンクリート構造）

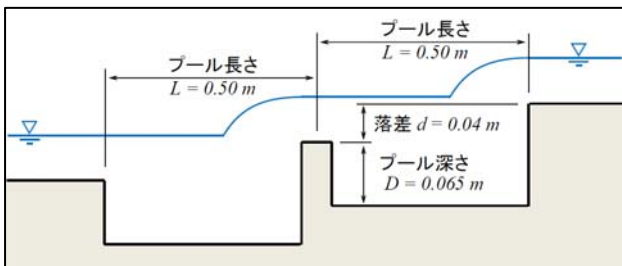


図-9 ステップ・プール型 Aタイプ

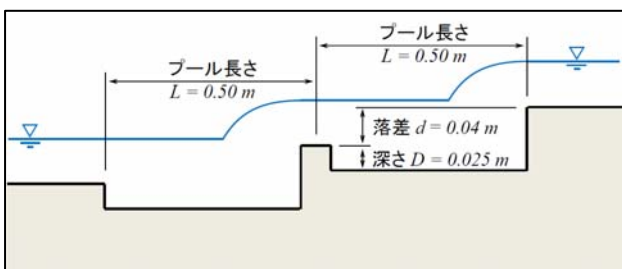


図-10 ステップ・プール型 Bタイプ

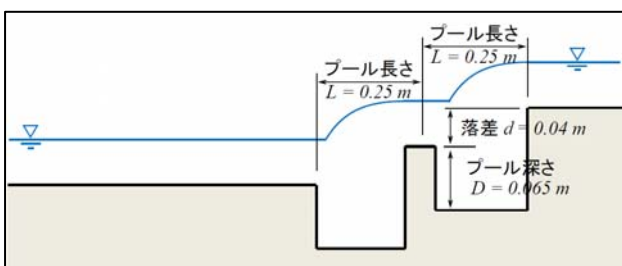


図-11 ステップ・プール型 Cタイプ

## 4. 結果

### (1) 模型による出水時の再現

#### a) コンクリート構造の落差工（従来型）

豊平川5号床止における平成23年9月出水の流況と同じ、落差工本体を越流して射流となり、その下流で跳水が発生し、そこに砂利が堆積する状況が再現されている（図-13）。

#### b) 石組みによる分散型落差工

##### （ステップ・プール型Cタイプ）

1段目の落差を越流した流水は、2段目の落差工に衝突し、荒れた流況が再現されている（図-14）。流量は前項の従来型の場合と同じである。

従来型、ステップ・プール型のどちらも、出水時の流況が再現されている。

表-1 模型諸元一覧表

項目	従来型	ステップ・プール型		
		Aタイプ	Bタイプ	Cタイプ
1段の落差	0.08 m	0.04 m	0.04 m	0.04 m
プール深さ	—	0.65 m	0.25 m	0.65 m
プール長さ	—	0.50 m	0.50 m	0.25 m

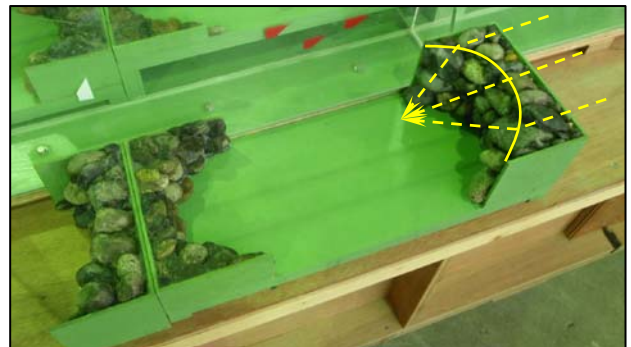


図-12 円弧状の越流部

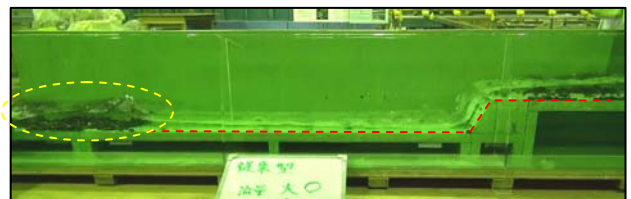


図-13 従来型（コンクリート構造）

○：三角波・砂利    - - - - : 図-8の河床ライン

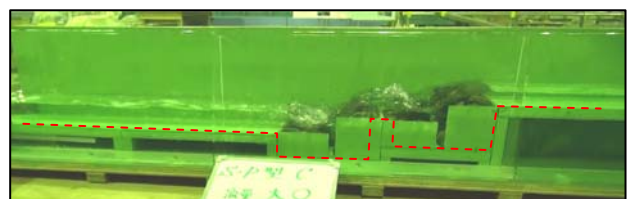


図-14 ステップ・プール型 Cタイプ

- - - - : 図-11の河床ライン

## (2) 模型による落差工の改良実験

次に、ステップ・プール構造の落差工のプールの深さや長さを変えて、実験を行った。パーツ以外の条件（勾配や流量など）は、前節の出水時の再現実験と変えていない。

### a) プール長さを長くした場合

（ステップ・プール型Aタイプ）

石組みによる分散型落差工の出水時を再現したパターン（前節のCタイプ）について、落差工の間隔を広げてプール長さを長くした。1段目の落差を越流した流れは、2段目の落差工のかなり手前に落ち、プール内で十分に減勢されるため、荒れた流況や射流及び跳水は認められない（図-15）。

### b) プール深さを浅くした場合

（ステップ・プール型Bタイプ）

前項のAタイプと落差と間隔は同じだが、プールを浅くしている。1段目の落差を越流した流れは、浅いプールでは減勢されずに2段目の落差まで一気に流下しており、Aタイプに較べて流速はかなり速い（図-16）。

## (3) 模型による河床材料の流下実験

実際の出水時には水だけではなく、石ころや砂利も一緒に流下してくる。そこで、ステップ・プール型の3タイプについて、水を流しながら砂利（粒径約5～10mm）を供給して、その堆積・流失状況を観察した。なお、従来型については、前述している（4. (1) a）、図-13）ため省略する。

### a) プール長さを長くした場合

（ステップ・プール型Aタイプ）

水を流しながら砂利供給を行うと、砂利はプール内の中央よりやや上流側に落下するがそこに堆積せず、それより下流側と上流側に堆積した（図-17）。

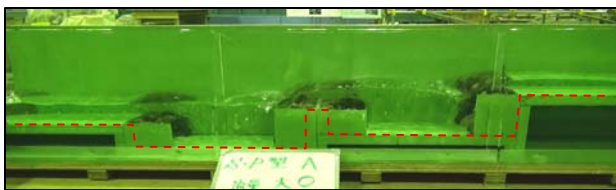


図-15 ステップ・プール型 A タイプ  
----- : 図-9の河床ライン

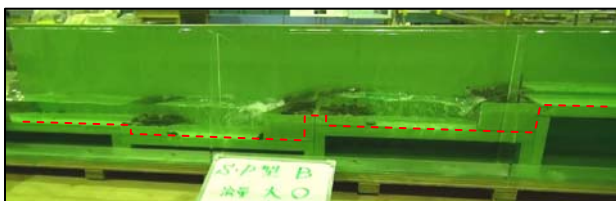


図-16 ステップ・プール型 B タイプ  
----- : 図-10の河床ライン

### b) プール深さを浅くした場合

（ステップ・プール型Bタイプ）

水を流しながら砂利供給を行うと、1段目の落差を越流した流れは、浅いプールでは減勢されずに2段目の落差まで一気に流下するため、砂利はプール内に堆積しなかった（図-18）。

### c) プール長さを短くした場合

（ステップ・プール型Cタイプ）

水を流しながら砂利供給を行うと、1段目の落差を越流した流れは、プール内ではなく、2段目の落差工本体に衝突し、プール内は全て死水域となるため、プール内はすぐに砂利で埋没した（図-19）。

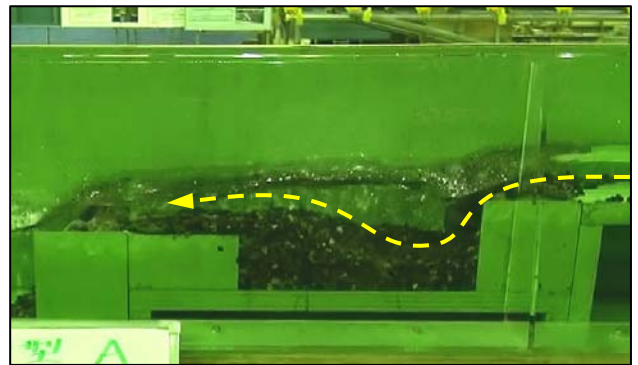


図-17 砂利堆積状況（Aタイプ）



図-18 砂利堆積状況（Bタイプ）



図-19 砂利堆積状況（Cタイプ）

## 5. 考察

### (1) 模型による出水時の再現

模型による出水時の再現により、プール長さを長くした場合、1段目の落差を越流した流れの主流線は、図-17の破線矢印の様に滑らかな曲線を描いて次の落差へ向かい、主流線から外れた部分は死水域になるため砂利が堆積すると考えられる。つまり、そこは現状の河床高を維持する、即ち、河床低下を防止することを意味する。なお、プール内に砂利が過剰に堆積しても、落差を越流した流れが落水した部分の砂利を洗掘するので、プールが埋没することはないことが示唆された。

次に、プールの深さを浅くした場合、水を流す前にプール内を砂利で埋め、粗度を確保した上で水を流しても、プール内の砂利は、短時間で全て流失してしまう。つまり、実河川において、出水時に上流から土砂の供給があっても、土砂が堆積しない。即ち、河床低下が急速に進行するということを意味する。プールには深さが必要であるということが示唆された。

最後にプール長さを短くした場合、砂利を捕捉する効果は有るが、魚類等の水生生物に対しては流れが荒れているため好ましい環境とは言えないと考えられる。また、2段目以降の落差工を直撃する流水による外力に耐えるためには、落差工本体を相当強固に設置する必要があり、実河川では工費が高額になってしまう。プールには適当な長さも必要であることが示唆された。

### (2) 必要なプールの「深さ」と「長さ」の算出式

本研究より、洪水流を十分に減勢し、洪水時に流下してくる河床材料を効果的に捕捉し、水生生物の生息環境も維持出来る落差工のプールの深さと長さを有するのは、3ケースの中では「Aタイプ」と結論づけた。そこで、筆者らは、この結果を実際の落差工の設計に生かすには、算出式にする必要があると考え、図-20に示すAタイプの「落差」や「流速」から、必要なプールの「深さ」と「長さ」を求める簡易な式、(1)式及び(2)式を導き出した<sup>4)</sup>。なお、式の導出に際しては、自由落下や運動エネルギーの公式を基にしているが、ここでは計算過程は省略する。

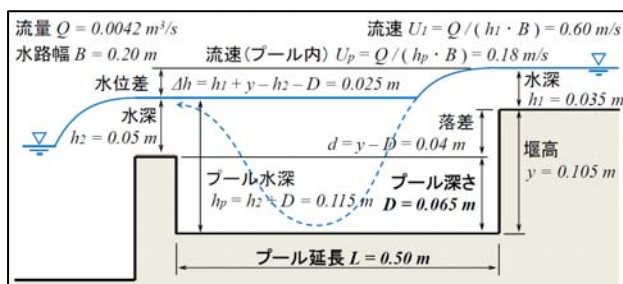


図-20 実験結果 (Aタイプ)

### a) 必要なプールの「深さ」を算出する式

$$D = 2d \quad (1)$$

### b) 必要なプールの「長さ」を算出する式

$$L = 1.5 U_1^2 \quad (2)$$

ここに、 $D$ : 必要なプール深さ(m)、 $L$ : 必要なプール長さ(m)、 $d$ : 落差(m)、 $U_1$ : 1段目の落差工を越流する前の流速(m/s) (洪水時の流速)

### (3) 現場へ適用する場合の留意点

ステップ・プール構造の落差工の設計及び施工に際し、留意すべき点を以下に列挙する。

- ステップ・プール構造の落差工の1段の落差は、魚類の遡上性やプールの施工性（落差を大きくすると深いプールが必要となる）を考慮すると、20～30cm程度が好ましい<sup>9)</sup>。この場合、必要なプール深さは(1)式より0.4～0.6mとなる。また、豊平川5号床止付近における洪水時の流速を6.0m/s程度と仮定すると、必要なプールの長さは(2)式より54mとなる（図-21）。これは、5号床止の全延長（107m）（図-22）の約半分である。
- ステップ・プール構造の落差工は、落差工の形状は円弧状にすべきである。これは、構造物として流水の水圧に対して安全になる、流水が河道の中心で衝突して流速が遅くなる、平水時でも流水が

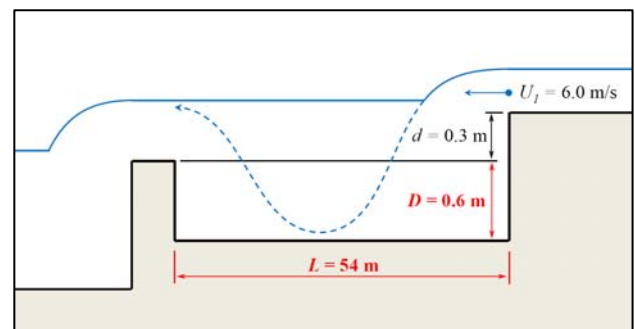


図-21 豊平川5号床止における必要なプール深さ・長さ (例)

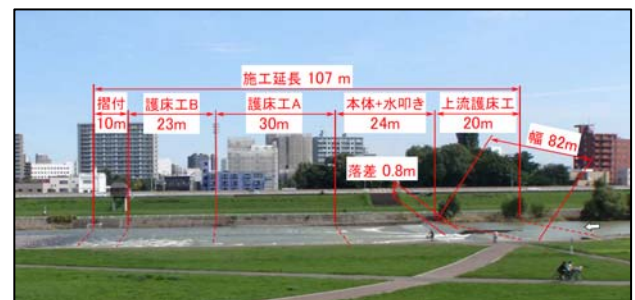


図-22 豊平川5号床止の諸元



集まって落水するため、落水地点の河床が洗掘されてプールの深さが維持されるなどの効果があるからである。なお、粗度の確保、伏流水の分断の防止、河川景観等の観点から、石組みの方が好ましい。

- c) 河床勾配が急であったり流速が速い河川で、必要なプール長さを保てない場合は、落差を大きくすることも考えられるが、凸型の根固ブロックを上流に設置して粗度を上げ、流速 $U_1$ を下げる方法や、流水の流下方向を左右に振る方法もある。
- d) 自然河川では、淵と淵の間は瀬になっている。ステップ・プール構造の落差工を配置する際は、瀬の区間を考慮して、プールとプールの間を少し空けても良い。
- e) ステップ・プール構造の落差工における護床工の施工範囲については、プール内には不要である。なぜなら、プール内には土砂が堆積するからであり、土砂が堆積するということは洗掘されないからである。
- f) 急流とされる河川においては、落差工に限らず、護岸工や根固工（護床工）を施工する際には、凹凸の大きい物を用い、できるだけ粗度を確保して、射流の発生を抑制したい。また、工事の際に発生する礫は搬出せず、河道内に埋め戻すと、それだけで粗度を確保することになる。一度露岩化した河床が礫河床に回復しないのは、粗度が低くなり、河川全体の流速が速くなるためだと考えられる。
- g) 河川構造物を石組みで施工する場合は、力石と環石のかみ合わせも大切だが、胴込めや裏込めが重要である<sup>8)10)</sup>。これらは、歪みや震動に対して応力を吸収し、水抜けの防止や背後地山の吸い出し防止にもなる。

## 6. おわりに

従来、洪水を安全に流下させるために、河道を直線化して粗度の小さい護岸を張って流速を上げる治水を行ってきた。そして、流速が増した洪水流を制御する方法として、落差工やコンクリートブロックが用いられてきた。そうすると、射流が発生し、跳水を誘発し、そこに多量の土砂が堆積し、そこが樹林化して大きな河積阻害となる。

それより、河道内にある水を利用して流水のエネルギーを制御する方が望ましいのではないだろうか。例えば、円弧状の落差工を越流させて流水同士を衝突させ流速を抑える、プールに水を溜めてその中で流水の勢いを抑える、などの方法である。また、河床材料を捕捉する方法として、河道内に強固な障害物を設置し

て土砂をせき止めるより、プールや水制工により流速が遅くなる部分を創出し、流水の作用によって土砂を堆積させる方が安全であると考ええる。

本論文は、実施した実験ケースが少なく得られたデータは少ないが、今後、実験ケースを増やすことでステップ・プール構造の落差工設計の基礎知見になるものと考えられる。本研究がきっかけとなって、流水の作用を利用した美しい河川構造物の設計が今後発展することを期待する。

**謝辞：**西日本科学技術研究所の福留脩文氏、北海道技術コンサルタントの手代木隆二氏より、近自然河川工法に関する考え方や技術の指導を数年にわたり頂いた。長年にわたり近自然工法に取り組んでこられ、技術の蓄積と普及に尽力された実績に対し、尊敬と感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 財団法人国土開発技術研究センター編集・社団法人日本河川協会発行（2000）『改定解説・河川管理施設等構造令』山海堂
- 2) 福留脩文・有川崇・山路千冬・藤田真二・福岡捷二（2010）「魚類の定住利用と河床の安定化を目指した溪床復元型全断面魚道の建設とその効果」河川技術論文集第16巻
- 3) 福留脩文・有川崇・石山穂・福岡捷二（2010）「石礫河川に組む自然に近い石積み落差工の設計」土木学会論文集F Vol.66 No.4,490-503
- 4) 数馬田貢・林田寿文（2013）「ステップ・プール構造の落差工設計に向けた模型による実験的検討」土木学会北海道支部論文報告集第69号
- 5) 北海道開発局札幌開発建設部（2011.09.08）「平成23年9月2日からの停滞前線による大雨に伴う石狩川流域での出水【速報版】」
- 6) 北海道開発局札幌開発建設部（2006.09）『豊平川河川整備計画』
- 7) 手代木隆二・金子司（2007）「真駒内川下流の河道改良について」第50回北海道開発局技術研究発表会
- 8) 福留脩文監修・近自然工法研究会編集・西日本科学技術研究所発行（2002）『近自然工法の石組み技術』
- 9) 眞山紘（2004）「さけ・ます類の河川遡上生態と魚道」さけ・ます資源管理センターニュース No.13
- 10) 国土交通省河川局河川環境課（2006）『石組み構造物の整備に関する資料』