

中小河川の維持管理に有効な自然石空積みによる横断構造物の設計手法

DESIGN METHODS OF CROSSING STRUCTURES
MADE OF NATURAL STONES EFFECTIVE FOR MAINTENANCE OF
SMALL AND MEDIUM-SIZED RIVERS

福留康智¹・藤田真二²・宮崎慈子²

Yasutomo FUKUDOME, Shinji FUJITA and Yoshiko MIYAZAKI

1 正会員 株式会社 西日本科学技術研究所 (〒114-0014 東京都北区田端1-17-3-201)

2 非会員 株式会社 西日本科学技術研究所 (〒781-0812 高知県高知市若松町9-30)

Improving the ability of river water to flow down in small and medium-sized rivers is a major issue. In river improvement for the purpose of solving this issue, little attention is paid to environmental and maintenance aspects of rivers, and there are few cases of the latter in particular. In this study, we introduce an example of using distributed drop works made of natural stones in construction work to expand the width of a small river flowing through a city. And the effects of this construction on the environment and maintenance of rivers were also verified.

As a result, it was confirmed that the construction of the distributed drop works reduced the sedimentation and vegetation on the sand bar, and the effect of the maintenance of rivers was confirmed. Furthermore, diversification of benthic fauna was observed after the construction, and a high effect was also confirmed on the restoration of river ecosystems.

Key Words : *crossing structure , distributed drop works, natural stones, maintenance of rivers, restoration of ecosystems*

1. はじめに

わが国では、近年、頻発する想定外の雨量に対し、様々な対策がとられており、中小河川においては流下能力の向上を目的とした河道拡幅等の河川整備が各地で実施されている。しかし、特に兩岸をコンクリート護岸で河道拡幅した河川では、みお筋が護岸に擦り付いて瀬・淵が消失しながら河床低下を起こす一方で、砂州に土砂が過剰堆積して、その砂州上に植生が繁茂して河積を阻害する、いわゆる河床の二極化が生じるなど、治水面、環境面、維持管理面の課題が発生している。これらのうち、河床低下対策としての治水面や瀬・淵の消失をはじめとする河床の単調化対策等の環境面においては、従来のコンクリート床止めを用いた対策を自然石空積みによる横断構造物（以後、分散型落差工）で対応して改善を図り、一定の効果が確認されている¹⁾。

一方、維持管理面の課題に関しては様々な観点から検討されつつある中、福留²⁾は砂州上に乗せた流水の掃流

力による効果を指摘している。ただし、当研究は蛇行の一波長区間についての課題解消が対象であり、蛇行が数波長以上に及ぶ長い区間における検討は十分ではない。

本研究では、河道拡幅が計画されている中小河川において、その対象河川の規則性と前述した分散型落差工の特性を活かした設計手法を提示するとともに、施工前後のモニタリングも含め、環境面と維持管理面の双方を改善するための対策工としての分散型落差工の有効性を考察した。

2. 小塩川の整備区間の概要

小塩川は淀川水系の4次支川で、京都市南西部の農地、住宅地の中を貫流する流程4.5km程度の小河川である（図-1）。整備前の河川環境は、流路幅が2~3m程度で、落差の大きい床止めが連続する平均河床勾配1/160の二面張りの水路状河川であった。河床は、自然な礫列が残存する区間もあったが、床止めが多いこともあり連続性



図-1 小塩川の整備区間



写真-1 施工前の小塩川の状況

はなく、直線部が長い区間では、水深が浅く平坦な河床で、環境面での課題が指摘されていた。一方、湾曲部から直線部に入る区間では、みお筋が護岸に擦りつく箇所も多く、その対岸の砂州は植生が密生するなど、維持管理面の課題も大きかった。また、河床材料として礫はみられるものの、床止め上流は湛水域で泥が堆積し、滞留・汚濁した河川水中には大量の大型糸状藻類が繁茂する等、生物の生息環境としても良好とはいえなかった(写真-1)。

一方、小塩川ではその河川管理者である京都市が流下能力の向上を目的とした河道拡幅工事(延長260m, 幅4.6m)を行うことになった。その際、これまで課題であった環境面および維持管理面の改善も目的として、下流220m区間の河床の設計を行った。その後、当設計に基づいた施工が2018年6月に実施され、現在に至る。

3. 設計方針

前述のとおり、福留ら¹⁾は河床低下や河床環境の単調化等の課題に対し、自然石を用いた分散型落差工の有効性を明らかにした。その構造は山間部の礫列・礫段部にあたる自然の形態を参考に開発され、石材を下流に向けた円弧状に組み合わせるものである。それによって、流れを下流に集中させ、落差工下流に深み(淵)を創出させるが、そこで流れを衝突させ流速も低減させる機能をもつことで、一定以上の河床低下が防止できる。このような効果、および小塩川の河床勾配が山間部河川と同等である等の特徴を勘案し、本設計では主に分散型落差工を用いることとした。

分散型落差工は一般的に対象流量から算出する波長理論³⁾に基づいた間隔で設置されることが多いが、近年、最大流量の更新が頻発し、出水時に起こる自然現象の波長と理論的に配置した礫列の波長があわず、出水後に乱れた河床を確認することが多くなった。一方で、何度か出水を経験した自然河川では、自ずと蛇行したみお筋と礫列が形成されていることも確認できる。このため、分散型落差工を河川全域に配置させて河床を安定させるのではなく、定めた基点にのみ配置して、その他の範囲では自然現象(出水)による地形形成を促す方針とした。

4. 設計手法

(1) 配置計画

分散型落差工を設置すべき基点は、深み(淵)が創出される箇所の上流側であり、かつ河床低下が懸念される(河床低下を抑えたい)箇所となる。このうち、河川において深み(淵)が創出される箇所は、淵の成因として整理されているが⁴⁾、この中で対象となる事象としては、M型淵(蛇行の外岸側に創出される)の形成があげられる。これは護岸形状の湾曲部の外岸側と、蛇行するみお筋の外岸側があたる。このような観点から、分散型落差工の配置にあたっては、蛇行するみお筋形態の適切な設定が重要となる。その手法として、はじめに不変的と考えられる要因を定める。つまり、湾曲する護岸線形の上流から流水の流れを想定し、水衝部とされる外岸側に深み(淵)の位置を想定する。次に、みお筋の蛇行波長を設定する。これに関しては、砂州の波長の観点から様々な研究がなされているが⁵⁾、波長の設定幅も大きく、現実的には、出水規模(川幅、水深等)の他、河床材料、河床勾配をはじめ、その河川区間に存在する様々な要因で規定されるため、計算による設定が困難である。このため、それらに近い条件を満たした蛇行形態、つまり、対象区間近辺に残存する自然な蛇行形態(概ね10m程度の波長)を参考とし(写真-2)、それを模倣することと

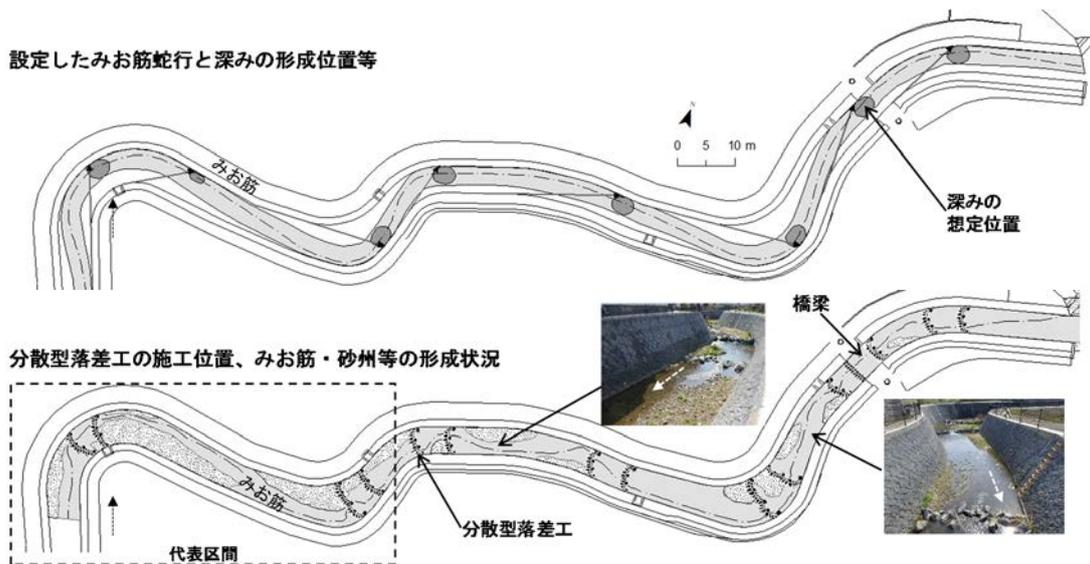


図-2 河道線形から設定したみお筋蛇行と深みの形成位置（上），
および施工後における分散型落差工の配置と砂州等の形成状況（下）



写真-2 施工前に確認された自然に近い蛇行形態

した。最後に想定した深み（淵）を設定した波長で繋ぐ。蛇行形態は深み（淵）とみお筋の外岸側を一致させた上で、流れを左右に蛇行させることを基本として設定した。小塩川では河道拡幅後においても、流量条件に変化がないため、環境面から良好と判断される適切な流路幅や水深は改修前と同じと考えてよい。このため、流路形態も前述の蛇行と同様、改修前に存在していた自然に近い形態を参考にし（平時の水路幅1~2m）、設定した蛇行形態に水路を重ねた。また、拡幅された河道内において、この水路幅以外は砂礫の堆積が想定される範囲となる。

以上の手法に基づき、設定した河床形態は図-2となり、上述した条件の箇所分散型落差工を配置した。なお、河床低下が懸念される箇所としては、整備区間下流の橋梁（ボックス形態）がそれに相当し、その上・下流に河床低下防止のために分散型落差工を配置した。

(2) 詳細構造

大河川では、船底型河道は、複断面河道に比べ、流量の増大に対して、流速や水深は安定的に増大し、掃流砂

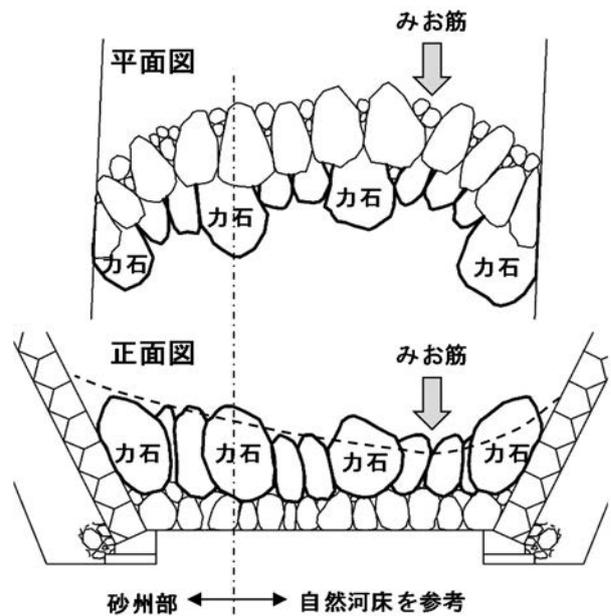


図-3 分散型落差工の構造図

量は縦断的に変化が小さくなり、河床変動量が小さく安定な河道となることが示されている⁶⁾。

中小河川では、小出水においても川幅一杯の流れが流下することが多いという差異はあるものの、二極化した河床では複断面河道と類似した現象が起こるといえる。一方、みお筋の蛇行が維持され、緩やかに河床形状が変化する自然河床（船底型河道）の形状であれば、流量の増大に対して、流速、水深、掃流力は安定的に増大し、さらに冠水頻度が高いことも加わり、砂州の標高、植生繁茂が安定的に抑えられることとなる。つまり、配置した分散型落差工によって、図-2に示した河床形態が創出、維持されれば、環境面だけでなく、維持管理面に対しても改善されると仮定した。

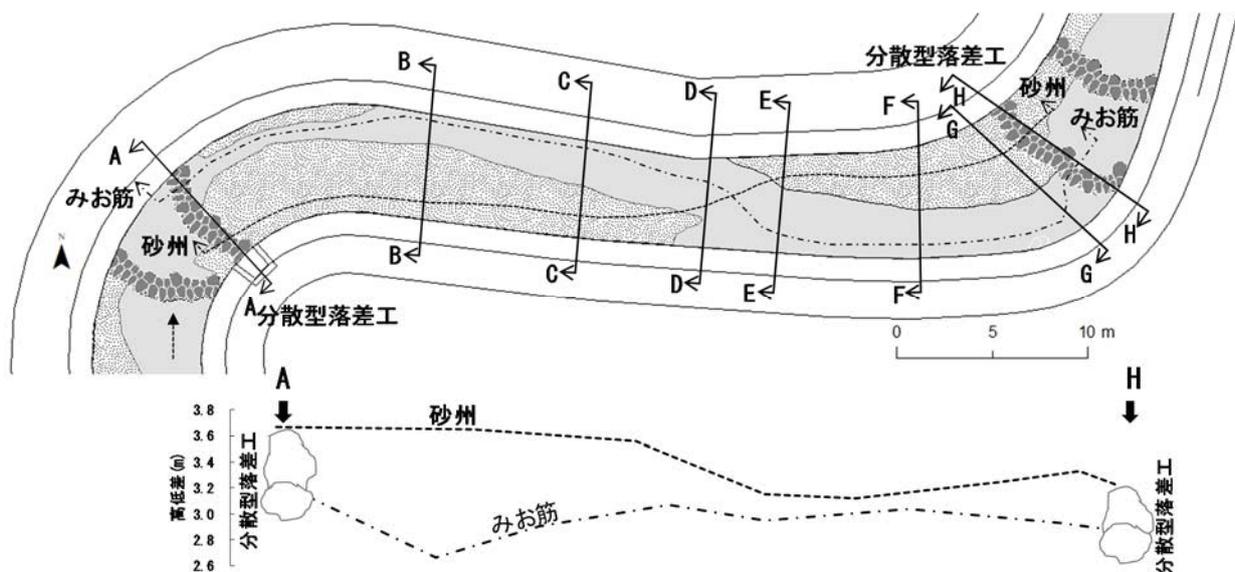


図-4 代表区間における河床の縦断変化

このような論拠に基づき、分散型落差工の横断面は、空石積みで標高を自在に設定できる利点を活かし、図-3に示したような形状とした。このうち、みお筋部から砂州部にかかる形状は、施工前に確認した自然な礫列河床の横断面を参考した。また、拡幅される両岸への接続は、緩勾配で滑らかに擦りつくよう設定した。また、石組構造は河川内の空石積み手法¹⁾に従うことで安定性を考慮し、標高の設定が重要なみお筋部に配置する石礫数を多くするようにした。これにより、環境面は勿論、変化点となる横断箇所断面形状が緩やかに連続しながら分散型落差工で安定していることから、設置した下流区間の河床では、出水時には、その河床高で安定して掃流力が発生して流下するため砂州の維持管理面が改善されると判断した。

(3) 小塩川特有の対策

施工前に確認された淵の最深値は、湾曲部外岸側に存した0.9mであった。一方、分散型落差工の下流の深みは、形成する条件値が下がりこれより浅くなると想定されるが、設計は安全上、これと同等の値を設定した。通常はこの値に対し、十分な大きさの石材を配するが、河川規模からも過度な大きさの石材を使用することは河積阻害の観点からも不適であると判断した。よって、エネルギーを分散するための対策として、分散型落差工を2基連続させて設置した。

5. 施工後の状況

(1) 河床地形と植生

施工後約1.5年を経た(出水期を2期経過)2019年11月に整備区間全域を踏査し、分散型落差工の施工状況、およびみお筋や砂州の形成位置等を確認した。その結果は、

図-2(下段)に示したとおりである。対策を行ったほぼ全域において、みお筋の蛇行の形成と砂州の堆積・植生繁茂が抑制されていることが確認された。その中で、同図に示した代表区間においてRTK-GNSS測量による河道地形計測を実施し、その計測値から砂州とみお筋の縦断変化を図-4に示した。なお、同図に示した高低差は小塩川下流端のみお筋における標高との差とした。

これによると、この間には明瞭な交互砂州が形成されており、砂州地形は上流の分散型落差工と下流のそれとの高低差(約0.4m)の範囲内で変化していた。また、砂州の最高点は上流の分散型落差工の高さと同等で、この現象は代表区間のみならず、施工範囲の全域において確認された。したがって、砂州の堆積高はその上流の分散型落差工の設置高と因果関係があることが考えられる。一方、みお筋の縦断変化をみると、B-Bライン付近の左岸側が最も深く、想定していた深み(淵)と一致している事がわかる。この付近以外の地形は概ね平坦で、特に瀬となっているD-Dライン付近から下流の分散型落差工までの地形は砂州との比高差も小さく、河床の二極化の進行が抑制されている様子が窺える。

次に、図-4中に示したA~Hの各断面形状を図-5に示した。これによると、上流の分散型落差工の断面(A)と下流のそれ(H)との間における各断面の最大標高(図中B~G)は、概ね上、下の分散型落差工の標高内にあり、当結果からも砂州の最高点が上流の分散型落差工より低く維持されている状況が確認できる。また、この間の横断形状は下流に向かって平坦となる傾向にあり(D~G)、下流端の分散型落差工の断面形状が上流の土砂堆積を規定していると判断できる。このように、分散型落差工はその上下流の土砂堆積を強く規定しており、その高さや形状によって土砂移動をコントロールできる重要な対策工となり得る。

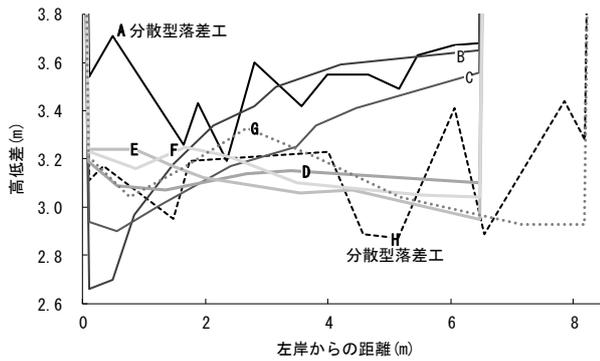


図-5 代表区間における河床の横断形状

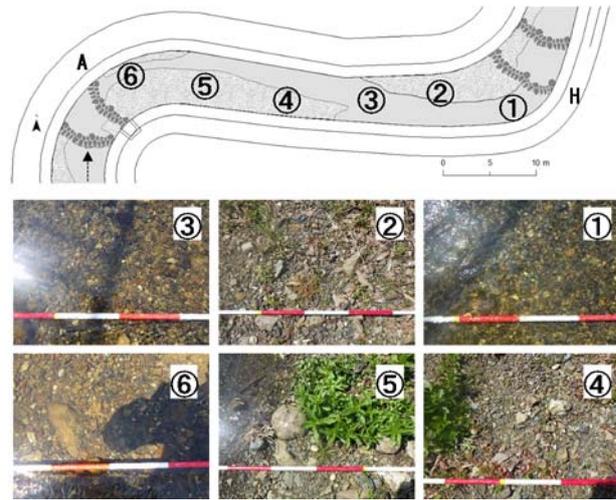


図-6 河床材料の状況



写真-3 代表区間内の交互砂州の状況



写真-4 施工前に広く堆積していた砂泥



写真-5 分散型落差工の未設置区間の状況

代表区間内における砂州上の植生の繁茂状況に着目すると、ほぼ全域に亘って生育する植物は疎らで(写真-3)、大半が礫河原となっていた。前述のとおり、観察時は施工後約1.5年を経過しており、1年生草本はもとより多年生草本も生育できる期間が経過している。さらに、上記したように砂州の堆積が制限されている点も勘案すれば、分散型落差工の設置によって、植生の繁茂も抑制されていると考えてよい。

このように、分散型落差工設置区間では、砂州の肥大化や河床の二極化の進行が防止されているとともに、砂州上の植生繁茂も抑制されており、維持管理面で効果を確認できる。

(2) 河床材料

代表区間内の河床材料の状況を図-6に示した。これを見ると、河床には施工前に広い範囲で確認されていた砂泥(写真-4)の堆積はほとんどみられず、施工後にはほぼ全域に亘って礫底に変化したと判断される。また、礫径の縦断変化をみると、上流に向かって徐々に大型化する傾向があり、⑤、⑥地点付近では、径20cm前後の大礫を多く含む礫底となっていた。これには、上、下流の分散型落差工による分級作用が関与しており、当落差工の設置は河床環境の多様化にも寄与するといえよう。

表-1 改修区間において確認された底生動物

| No. | 目 | 科 | 和名 | 2017年(施工前) | | 2019年(施工後) | | |
|-------|-------|--------|-----------------|--------------|-----|------------|-----|---|
| | | | | 上流端 | 下流端 | 上流端 | 下流端 | |
| 1 | 原始紐舌 | リンゴガイ | スクミリンゴガイ | | | ● | ● | |
| 2 | 盤足 | カワニナ | カワニナ | ● | ● | ● | ● | |
| 3 | 基眼 | サカマキガイ | サカマキガイ | ● | ● | | ● | |
| 4 | — | — | ヒル綱 | | ● | | | |
| 5 | ワラジムシ | ワラジムシ | ミズムシ | ● | ● | | | |
| 6 | エビ | ヌマエビ | カワヌマエビ属 | ● | | ● | ● | |
| 7 | カゲロウ | コカゲロウ | シロハラコカゲロウ | | | ● | ● | |
| 8 | | | フタバカゲロウ | ● | | | | |
| 9 | | | タマリフタバカゲロウ | ● | ● | | | |
| 10 | | | トビイロカゲロウ | ヒメトビイロカゲロウ | | ● | | |
| 11 | | | モンカゲロウ | | | ● | ● | |
| 12 | | | シロタネガワカゲロウ | | | ● | ● | |
| 13 | | | カワトンボ | | | ● | | |
| 14 | トンボ | サナエトンボ | Davidius属 | | | ● | ● | |
| 15 | | | コオニヤンマ | | | ● | | |
| 16 | | | オニヤンマ | オニヤンマ | | | ● | |
| 17 | カワゲラ | | フタツメカワゲラ属 | | | ● | ● | |
| 18 | トビケラ | シマトビケラ | Cheumatopsyche属 | | | ● | ● | |
| 19 | | | ニンギョウトビケラ | ニンギョウトビケラ | | | | ● |
| 20 | | | カクツツトビケラ | Lepidostoma属 | | | ● | |
| 21 | | | アオセゲナガトビケラ | | ● | | | |
| 22 | | | アオセゲナガトビケラ属 | | | | | ● |
| 23 | | | クサツミトビケラ属 | | | ● | | |
| 24 | | | グマガトビケラ属 | | | ● | ● | |
| 25 | ハエ | ガガンボ | Tipula属 | | ● | ● | ● | |
| 26 | | | ユスリカ | ユスリカ科 | ● | ● | ● | ● |
| 27 | | | ヒメドロムシ | ● | ● | ● | ● | |
| 28 | コウチュウ | | ヒラタドロムシ | | | | ● | |
| 29 | | | マルヒラタドロムシ属 | | | | ● | |
| | | | ホタル | | | | ● | |
| | | | ゲンジボタル | | | | ● | |
| 合計種類数 | | | | 8 | 10 | 18 | 16 | |

(3) 分散型落差工未設置区間との対比

河道整備(拡幅)が実施された範囲の上流約40m区間には分散型落差工が未設置であるため、その効果が現れていないと想定される区間である。その状況は、写真-5をみると明らかなように、左岸砂州の標高が高く、砂州上にはオランダガラシを主体とした多年生草本が密生していた。また、設置区間に比べてみお筋の蛇行が不明瞭で、右岸護岸に沿った直線的な水路形状となっている。さらに、河床には露岩した範囲が広く認められ、河床低下の進行が懸念される状態にあった。

このように、設置区間との対比からも、分散型落差工設置による環境改善および維持管理効果が確認できる。

(4) 底生動物相の変化

施工前の2017年6月19日と施工後約1年を経た2019年10月29日に整備区間の上流端と下流端において、底生動物を定性的に採集した。その確認種を表-1に示した。これによると、施工前では8~10種であった確認種数が施工後には16~18種まで増加し、改修区間内の底生動物相は施工後において明らかに多様化した。特に、トンボ目、カワゲラ目、トビケラ目等の水生昆虫類の種数の増加が顕著であった。このうち、トンボ目は相対的に緩流域を好む一方、カワゲラ目やトビケラ目のシマトビケラ科等は瀬を好む種が多く、瀬・淵等の明瞭化による流況の多様化が河床環境にも変化をもたらし、そこに生息する底生動物相を豊かにしたと判断してよい。

さらに、底生動物種から求めた水質環境の指標となるEPT指数は、工事前が2~3であったのに対し、工事後

には8にまで大きく上昇し、水質環境も良好となったと判断できる。流況の多様化による曝気作用や底生動物群集による有機物の分解作用の活発化等が河川の自浄作用を高めた可能性が高い。

水生昆虫を主体とする底生動物は、河川生態系における各生物間(藻類から魚類等)の物質の移行やエネルギーの流転に果たす役割が極めて大きいとされており⁷⁾、分散型落差工による改修が河川生態系の活性化に大きく寄与したと評価してよい。

6. 結論

自然石空積みは施工が難しく、図面での表現も困難である。しかし、適切に活用できれば、微細な表現が可能となり、当河道で確認できるように、施工前や未施工区間に比べ砂州に堆積・植生繁茂がなく、豊富な生物が生息し、維持管理面、環境面を向上できる。中小河川では、対象河川の自然の特性を十分に把握し、自然石空積みによる分散型落差工の特徴を活かして適所に配置することにより、効率的かつ効果的に治水、環境面、維持管理面が持続できる川づくりができる可能性があり、今後、他河川でのさらなる研究、数値解析等による裏付け検証が望まれる。

謝辞：本研究には、京都市西京土木事務所並びにサンスイコンサルタント株式会社・河崎昇司氏に多大なるご理解とご協力を頂いた。ここに記して謝辞を申し上げる。

参考文献

- 1) 福留脩文, 有川崇, 西山穩, 福岡捷二: 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, 66(4), pp.490-503, 2010.
- 2) 福留脩文: 治水と環境の両立を目指した川づくりの技術的考え方とその適用性に関する研究, 中央大学博士論文, 2011.
- 3) 長谷川和義, 鈴木俊行, 張祐平: 溪流のステップ・プール構造とそのハビタット特性, (財)河川環境管理財団, 河川環境総合研究所報告, No.13, pp.113-127, 2007.
- 4) 川那部浩哉, 宮地伝三郎, 森主一, 原田英司, 水原洋城, 大申竜一: 遡上アユの生態 とくに淵におけるアユの生活様式について, 京大生理生態業績, 79, pp.1-37, 1956.
- 5) 山本晃一: 沖積河川一構造と動態一, 技報堂出版, 2010.
- 6) 笹木拓真, 宮原幸嗣, 福岡捷二: 複断面から船底形河道への改修による洪水流況及び低水路河床高の変化, 河川技術論文集, 第20巻, pp.277-282, 2014.
- 7) 水野信彦, 御勢久右衛門: 河川の生態学, 築地書館, 1972.

(2020.4.2 受付)