庭園を例とした日本古来の水環境の考察

Investigation on Traditional Japanese Water Environment Technology using the know how of garden

石野和男* 関文夫** 田辺 顕**

Kazuo Ishino* Fumio Seki** Akira Tanabe**

ABSTRACT: Recently, the public has become more and more concern of the recovery of a natural environment. Toward this goal, improvement of existing stream environments and the building of streams in parks have been going on increasing numbers. Traditional Japanese gardens have had man-made streams - or YARIMIZU, as they are called - for centuries. However, there is not much scientific literature dealing with YARIMIZU, and there are no studies that we know of evaluating YARIMIZU from a hydraulical viewpoint. The authors are interested in evaluating the stream environment of YARIMIZU to gain a better understanding of the ancient Japanese gardening methods in terms of up-dated hydraulical knowledge.

KEYWORDS: STREAM ENVIRONMENT, JAPANESE GARDEN, YARIMIZU, FIELD SURVEY

1. はじめに

土木工学の使命とは、環境と共生しながら人間の生存のために必要となる社会資本を建設維持することと理解している。江戸時代までのわが国の土木事業は、中国からの技術は取り入れたが、鎖国のためヨーロッパのルネッサンス、産業革命等の影響をほとんど受けない独自に近い環境と共生した文化を形成していた。(小堀遠州がフランス庭園の生け垣の技術を取り入れたらしいとの報告はあるが。)明治時代になると、欧米の大国の発展に乗り遅れまいと急激に欧米の土木技術を導入して産業重視の土木構造物を、また、第2次世界大戦後は、アメリカの機械力を導入して大規模な土木構造物を新設し発展してきた。ここで、河川工学を例に取ってみると、明治以降、治水重視の中で築造されてきたコンクリート構造物の見直し、すなわち、多自然型河川事業が最近展開されつつある。また、住宅地の開発に伴い築造されてきた、または今後築造される水路でも多自然型水路が要求されつつある。

一方、環境と共生を含め多様な観点からの総合力を駆使した江戸時代以前の河川事業を、現代の知識をもって研究評価した論文はわずかである。筆者は、この研究の必要性を感じ、河川事業の評価の前段階として規模も適当で、江戸時代以前の伝統(匠)が引き継がれた日本庭園を例にとりその中にある日本古来の水環境の評価を始めている。前報(第50回年次学術講演会¹⁾、第2回「河道の水理と河川環境」シンポジウム²⁾、土木計画学研究・講演集NO18³⁾⁴⁾、水工学論文集第40巻⁵⁾)では、全体研究方針、研究方法と横浜三溪園の水環境観測結果を示している。本文では、前報の後に実施した上賀茂神社、下鴨神社、紀州養翠園、金沢兼六園等の日本古来の伝統ある水環境を観察考察した結果を示す。また、流水環境の調査とその調査結果を適用して実施してきたプレゼを通じて考察した多自然型水路の設計法試案とその現状の問題点を示す。

* 大成建設(株)技術研究所研究推進部研究推進室

Taisei Corporation Technology Research Center

**大成建設(株)土木本部土木設計第1部景観デザイン室

Taisei Corporation Landscape Design Section

2. 日本古来の伝統ある水環境の観察・考察結果

水環境を観察するにあたって着目した観点は、音環境、水面の表情、見え方、水質、底質、等である。

ここでは、各観点毎に観察・考察結果を示す。

2. 1 音環境

1) 上賀茂神社

上賀茂神社の境内の中央には、奈良の小川と呼ばれる幅数mの川が流れている。神社の最南端には、赤い高欄が奈良の小川を横切り、その直下には公道の橋がある。奈良の小川は、この橋をくぐるとほぼ直角に東進し、民家の前を流れるさわやかな小川となっている。赤い高欄の上流には、緩傾斜の落差工があり、そこでは跳水が発生し、それに伴いシャワシャワという流水音が聴こえている。次に示す下鴨神社でも同様の落差工があり、これらを勘案すると、京都の小川では、橋等の人が集まる所の近傍でこの流水音を意識して発生させて、これを人に聴かせているようである。なお、奈良の小川の川幅は4～5mあり、以前、水理量、音環境のデータを計測した横浜三溪園の流水路に比べ幅が広く流量も多いので、今後できれば水理量、音環境のデータを計測したい。水路の両岸には樹木が植えられ側岸は、高さ40cm程の自然石の石積みで河床は砂利で構成され、水路は自然河川に見られる程度の緩やかな曲線を描いている。また、参拝者等が水にふれられるように所々で階段が設けられている。葵祭の折に斎王代の人等は、この階段付近で身を清めるとのことである。ここで、実河川であるので規模はずっと大きくなるが、奈良の小川から伊勢神宮前を流れる五十鈴川の風景が連想される。上流に行くと、三ノ鳥居前の石橋、奈良社の前の木橋がある。この木橋の直上流左岸（東岸）には賀茂曲水宴開催の地である渉溪園の曲水宴水路の末端が合流している。渉溪園の曲水宴水路は両岸を玉石で固めた、幅40～50cm程度の水路で平成6年京都遷都1200年に復活している。木橋の上流には、写真－1に見られる数百kgの石で形成された落差1m程度の傾斜式落差工がある。この落差工から発生する流水音の音量が上賀茂神社の境内の中で最大で、サーサー、ザーザーという音を発生している。なお、落差工の上流で、先の渉溪園の曲水宴水路の上流端が分岐している。よって、落差工は曲水宴水路の勾配を保持するために設けられたのかも知れない。ただし、落差工によって、奈良の小川の勾配は緩くなり、また、幅も広げられ、その分、流水音も小さくなっていて、神事が催される舞殿で流水音が聞こえない様に配慮されているのかも知れない。舞殿の中央には奈良の小川がとうとうと流れているが、流水音はほとんど聞

写真－1 上賀茂神社の奈良の小川内の天然石で形成された落差1m程度の傾斜式落差工

こえていない。舞殿の付近で聞こえる水音は、御清めの水盆にピコピコと水が落ちる音だけである。舞殿の上流で、左岸から本殿の東側を流れる御物忌川が合流している。合流点から上流の奈良の小川の勾配は急に、また、幅も狭まり、ここからサーサーという溪流音が聞こえる。御物忌川の水量は奈良の小川の数分の1であるが、勾配も緩く、幅も広く取られているのでその上をまたぐ玉橋、片岡橋のところでは静かで、橋からつながる本殿でも静かである。なお、片岡橋の上流では、御物忌川の勾配は急になり奈良の小川程ではないが、さわやかな流水音が聞こえる。このように明らかに、流水音は神事が催される場所では聞こえないように演出されている。

上賀茂神社の西側には、賀茂川が流れ、写真-2に見られるような低落差工が設置されている。この落差工は落差に比べ幅が十分に長く、写真-1に示した天然石を使用した落差工に比べ、コンクリート製で天端の位置が一定のため、見た目はきれいであるが、落差が大きい上段ではザー、落差の小さい下段ではサーという連続したホワイトノイズに近い水音が聞こえている。

2) 下鴨神社と鴨川中流部

下鴨神社の境内の中央にも御手洗川の湧き口があり、また、その東側には泉川が流れている。御手洗川は、上賀茂神社の奈良の小川と比べ、幅は同等であるが、深さは御手洗川の方がはるかに深く、水がわずかししか流れていないせいか、また、川底、側壁とも石積みで造営されているためか、掘割の印象を受けた。一方、泉川の水量は、御手洗川に比べはるかに多く、また、御手洗川の東側の岸は石積みで造営され、また植生が刈られているのに対し、泉川の特に東岸は植生が生え放題であった。水がとうとうと流れているせいもあってか、泉川の方がすらぎを覚えた。下鴨神社の境内の中央東側にある泉川の橋の直下にも落差工があり流水音が聞こえていた。

河川では古くから、河床低下及び洗掘から橋の流出を防ぐため、橋の直下に落差工（床固め工）が設置されている所が多い。三溪園等で見られた橋の直下の流水音を発生する落差工は、この床固め工を模倣しているのかもしれない。なお、四条大橋から、上流右岸の夏には栈敷が設けられる引水を見て、写真-3を撮影した。これから、右側の本川には落差工がないのに対し、左側の引水には随所に落差工が設けられている。このことから、伝統を引き継ぐ京都人が、栈敷の客に清量感ある流水音を聞かせるためにこの落差工を利用していると確信された。

2. 2 水面の表情、見え方

1) 紀州養翠園

紀州養翠園は、海際にあり、敷地の約35%（養翠亭から東では50%強）を占める汐入の池を主体に構成されていて流水路は存在しない。特筆すべきことは、汐入の池のまわりの散策路には高低の抑揚があり、松林（樹齢300年以上と言われている）の中で様々な角度から池と借景となる山を觀賞できるようになっていることである（写真-4参照）。これは、海岸付近の高低差の少ない所で、敷地の約35%を占める汐入の池をいかに効果的に演出するかを考慮してこの散策路の高低差は選ばれたと推察される。この高低差（入口の最高所と水面に触れることができる最低所の）の最大値は2m程度のものである。この散策路のアンジュレーションにより水面という強烈な一基準面の見え方を様々に変化させてい

写真-2 賀茂川のコンクリート製落差工

真-3 鴨川大橋から上流を望む
（左側の水路には落差工が見られる）

る。築山式の庭園（例えば、兼六園）では流れにしたがい散策路の勾配が設定されているが、平地の中の庭園でこのようなアンジュレーションを駆使して演出しているものは見たことがなく驚きで、ただただ先人の匠に敬服するばかりであった。場内の案内板によると、「魚頭山等を背景とし、海辺にありながら、あたかも山中に在るかの様に人々に感じさせる意匠となっている。」とこの散策路のアンジュレーションの意図を表わしている。ところで、汐入の池を持つ庭園としては浜離宮が有名で、浜離宮では潮の干満により水面が上下しこれが一つの演出と言われているが、養翠園の池の水面は、外海水との入れ換え時には多少変化するが、ほぼ一定に保たれている。

2. 3 水質、底質

1) 紀州養翠園

ここで、随所の池を見る毎に興味深い項目が、池の平面積、水量と流入水路の断面積の関係、すなわち、池内の水をきれいに保つための池の水量と入れ換え水量の関係＝水交換率である。観察時の水底には泥が溜りきたなかったが、水自体は透明に近かった。このため、水中を覗き込まないかぎり不快感は受けなかった。保存協会の方に聞くと、特別の水質浄化施設はなく、夏でも水質悪化が見られないとのことであった。江戸時代の水質は計り知ることができないが、これらの関係がどのように決められたのか興味深い所である。また、この池では魚を養殖していないため残餌がない。このため、養殖残餌がある内湾の海水交換と水質の関係に、この池の関係をそのまま適用することはできないが調べてみたい項目である。

2) 金沢兼六園等

上賀茂神社、下鴨神社の境内を流れる川では、特に水質、水垢等で気になったことはなかった。それらより水量の少ない横浜三溪園では、その3本の水路の中で最も勾配の緩い内苑水路の下流側で水垢が見えた位である。次に、横浜三溪園より水量の多い金沢兼六園では、写真-5に見られるように水路床には玉石が敷かれ、夏に年1回玉石洗いが行われている。なお、写真-5の上側の植生が植えられている所では、流速が弱められ水路床に泥が溜っている。さらに、流速

写真-4 紀州養翠園の汐入の池での天神山を借景とした風景

写真-5 金沢兼六園内の水路

がおそく池に近くなっている所では、水藻が生え放題で除去作業が行われていた。このように、1つの水系でも、すなわち同じ水質でも、水路勾配、流速、水深、河床材料により、河床に水垢、水草が発生している所としていない所がある。また、自然河川でも、渇水期の河床には水垢、水草が発生している。

(7月の静岡安倍川では、大雨の後2週間程度で川垢が付くとの報告もある。この川垢は川魚の餌となるらしい。) このように筆者らは、一応のデータは保持しているが、化学的な量である水質および生物的な量である水垢、水草と物理量である水理量の関係を明確にしているわけではなく、これらの関係を自然から学ぶのが今後の重要な検討課題の1つと位置づけている。

3. 多自然型水路を築造する上で考慮する必要がある項目

多自然型水路を築造する業務のフローとしては、大別して、事前調査～解析・分析～計画～設計～施工～維持管理があげられるが、ここで取り扱う設計とは、多自然型水路の築造業務を遂行する上で必要となる広義の設計とする。

まず、水の流れとそれに接する万象との関連性の観点から、多自然型水路を築造する上で考慮する必要がある項目を以下に示す。

3. 1 人と水の流れ

- ・自由にアクセスできる。～道路と水路の間、通路と水辺の間には柵、垣根を作らないことを前提とする。
～子供は、水の状態から安全か危険かを学習できる。
- ・水に触れる、安全に入る事が出来る。～垂直、急勾配護岸をさける。
高水時への配慮も必要。
- ・見てきれい。～画一的な形状、護岸材料をさける。
曲線部、瀬と淵(側岸に岩)を設ける。
水質保全を考慮する。水垢の発生を防ぐ。
- ・においがしない。～従来河床をリフレッシュする。
流入水のゴミをトラップする。浄化装置(礫、炭等)を設置する。
- ・適度な水音が聴こえる。～流速の強弱、落差工(横断方向に石をならべる; 沈み石、水切り石: 沈み石より大きな石)等を配置する。
- ・市民の川に対する要求を明確にする。

3. 2 河床、側岸と水の流れ

- ・河床勾配、流量に則した川幅、水深、側岸勾配
- ・河床勾配、流量に則した河床、側岸の材料粒径、植生、生態

3. 3 生態(魚、昆虫、鳥)と水の流れ

- ・生態が棲みやすい流速、水深、幅、延長、河床材料粒径の確保
- ・出水時の配慮が必要。～生態の逃避場所の設置。

3. 4 植生と水の流れ

- ・周辺の植生、周辺構造物にマッチした植生を目指す。
- ・護岸のり面の植生は、植えてから根が生える時期と出水時期をずらす必要あり。
- ・出水時の配慮が必要。
- ・維持管理の配慮が必要。

3. 5 周辺構造物、交通と川と水の流れ

- ・周辺構造物からの川の見え方を考慮する。
- ・車道、歩道と川の関係性を考慮する。(歩道を川に取り込む場合もあり)
- ・歩道の目的を明確に～河道内の歩道は子供に踏み荒して創らせことも一考。

4. 多自然型水路の設計法試案および個別の要素技術とその現状の問題点

多自然型水路を設計するためには、3. で示した項目を考慮しながら、以下に示す設計作業を行う必要

がある。

4. 1 多自然型水路の設計フロー

本研究およびその結果を用いて実施してきたプレゼを通じてまとめた多自然型水路の設計フローを示す。

- 1) 検討条件の設定
- 2) 水路の標準断面形状、河床、側岸の材料の設定
- 3) 水理計算
- 4) 水路の標準断面形状、河床、側岸の材料の決定
- 5) 水路の平面、縦断、横断断面形状の決定
- 6) 生態、植生配置
- 7) 水路の保守管理方法の設定

4. 2 設計に必要な個々の要素技術とその現状の問題点

多自然型水路は、4.1に示した設計フローにしたがい、つぎに示す個々の要素技術を用いて現状の問題点はあるが、まがりなりにも設計することができる。

1) 検討条件の設定

検討条件は、3.1～3.5に示した項目から設定される条件の他に以下の条件が必要である。

地形条件～上下流水路および現況水路の形状、始点および終点の河床高

水理条件～高水流量、通常流量、渇水流量

ここで、始点および終点の河床高により、標高差すなわち水路全体の勾配が決定され、これらは、つぎに示す水音、水面形状、水質および水垢、水草に直接関係していることに注意しなければならない。

・水音、水面形状との関係；

標高差から、水音が発生可能な急勾配区間および落差工の設定可能箇所がきめられる。なお、水理量と水音、水面形状との関係は、筆者らが横浜三溪園^{2) 3) 4) 5)}、や京都上賀茂神社、金沢兼六園等で求めたデータを用いることができる。なお、水音、水面形状と人間の感性との関係に関しては、多くの今後の検討課題が残されている⁹⁾。

・水質、水垢、水草との関係；

前述したように1つの水系でも、すなわち同じ水質でも、水路勾配、流速、水深、河床材料により、河床に水垢、水草が発生している所としていない所がある。また、自然河川でも、渇水期の河床には水垢、水草が発生している。化学的な量である水質および生物的な量である水垢、水草と物理量である水理量の関係を明確にしてこれらの関係を設計に反映させる必要がある。なお、これらの関係を満足する通常流量、渇水流量を選定することも重要である。また、金沢兼六園で、夏に年1回行われている河床の玉石洗いのような維持管理努力も必要である。

2) 水路の標準断面形状、河床、側岸の材料の設定

水路の標準断面形状に求められる条件としては、高水流量を流すことが可能な断面積を保持すること、および、子供までが安心して水に触れることができる側岸勾配を有することである。また、河床、側岸の材料に求められる条件としては、高水流量下で水路形状を保持すること、生態、植生の配置条件に即することである。

3) 水理計算

水理計算は大別して2種類に別けられる。第1の計算は、河床、側岸の材料の種類から決まる粗度係数とマンニングの平均流速公式を用いた等流水深の算定である。この計算により、各河床勾配毎の水路の標準断面形状が決定される。第2の計算は、河床、側岸の材料の安定を判定する計算である。この計算で、限界掃流力公式⁶⁾を用いることがあるが、限界掃流状態とは、河床材料のいくつかが移動しはじめの状態であることを考慮しなければならない。高水流量下で水路形状を保持できる河床材料を選定する

ためには、(1), (2) 式に示す移動限界流速公式⁷⁾を用いる必要がある。なお、(1), (2) 式を用いれば、随所に見られるような極端に大きな石が河床、側岸に必要でないことが判る。また、高水流量下での植生の安定に関しては、ガイドライン(案)⁸⁾はあるが、研究途上の段階⁹⁾であり今後の成果に期待することが多い。

$$\frac{h_0}{d_g} > 5 \dots \frac{u_{*cg}^2}{\Delta g d_g} = 0.0275 \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{h_0}{d_g} \leq 5 \dots u_{cg} = 1.2 \sqrt{g \cdot \Delta \cdot d_g} \dots (2)$$

ここで u_{*cg} : 河床材料の移動限界摩擦速度, u_{cg} : 河床材料の移動限界平均流速,

$$d_g: \text{河床材料中央粒径}, \Delta = \frac{\rho_g - \rho_w}{\rho_w},$$

h_0 : 水深, ρ_g : 河床材料の密度, ρ_w : 流体の密度, g : 重力加速度

なお、(1)式から求まる u_{*cg} と比較する流れの摩擦速度 u_* を求めるためには、河床材料上の流れの抵抗則(3)式を用いる必要がある。

$$\frac{u_0}{u_*} = 7.44 \left(\frac{h_0}{d_g} \right)^{\frac{1}{6}} \dots \dots \dots (3)$$

ここで u_0 : 流れの平均流速, u_* : 流れの摩擦速度

$u_{cg} > u_0$, $u_{*cg} > u_*$ により河床材料の安定が保たれる。

4) 水路の標準断面形状、河床、側岸の材料の決定

3) に示した水利計算により標準断面形状、河床、側岸の材料の最大粒径が決定される。なお、自然の溪流や礫床河川に見習い、河床、側岸の材料には、均一の粒径ではなく、粒度分布の広い材料を用いる必要がある。ここで、ほたるの生息には、小石混じりの砂 9～7, 泥 1～3 の河床が適すると言う研究例もある¹⁰⁾。これらを参照して、広い粒度分布の材料を用いることにより、水質浄化および多様な生態環境が期待される。

また、高水流量に対しての安全性を高めるためには、根固め工(蛇籠, そだ沈床, ブロック, 水制)の使用も検討することもある。河床勾配の設定により、おのずと決められることであるが、上流は荒めの砂主体、中流は土主体、下流は床固めのために荒めの砂を用いるのが通例である。なお、水路を新設する場合の河床、側岸の材料としては、不透水層、砂利(フィルター材として; 4層の厚さ)石(高水時に流されない; 1～2層)+砂利(目潰し、アーモアコート)の順に設置する必要がある。植栽を植える場合には、その上に植栽の生育に必要な厚さの土を施す。

5) 水路の平面、縦断、横断面形状の決定

3.1～3.5に示した項目に則するように、また、以下の項目を遵守して水路の平面、縦断、横断面形状すなわち全体像を決定しなければならない。

- ・水制は、護岸、低水敷の安定化のために用いることが基本である。
- ・緩勾配部では、曲線部の水衝部に岩を設置することによりおのずと、瀬と淵が形成される。
- ・既設水路との平面すり付けには、急縮は用いない。等

なお、側岸形状に関しては、横断方向には、人が安全に水にふれることができることと、縦断方向には、適度な抑揚(アンジュレーション)をつけることも大事である。この適度な抑揚に関しては、横浜三溪園、紀州養翠園等の水辺の散策路が手本となる。

6) 植生，生態の配置

植生、生態の配置には、周辺植生、生態の調査結果を十分に考慮することが重要である。また、水生生物のためには、陰影効果を保持するために柳等の利用も考慮する必要がある。さらに、水生植生には、水質浄化も期待される。

7) 保守管理方法の設定

水路を健全に保つためには、上流でのゴミのトラップ装置、水質浄化装置（礫、炭等）、下流での砂トラップ装置等を、橋の下等の人目に付かない場所に設置ことが求められる。また、高水後の水路の整備、植生、生態の整備、場合によっては、河床のリフレッシュも必要となる。

これらの設計に必要となる個別の要素技術を念頭にして描かれた多自然型水路の概念図が図-1である。

図-1 多自然型水路の概念図<石野和男、石野さおり（小学4年生）の合作、7月7日の第1回川の日に作成>

5. まとめ

土木工学は、総合工学，経験工学であることを考慮して、自然河川および伝統（匠）が引き継がれた日本庭園の水路から自然の法則，伝統技術を学び取ることにより、日本古来の伝統を受け継ぎ、真に市民に理解される、また、市民に感動される多自然型水路の建設を目指している。本文では、この理念の下に実施している流水環境の調査と、その調査結果を適用してきたプレゼを通じて考察した多自然型水路の設計法試案とその現状の問題点を示した。

近年は、多自然型河川の研究が盛んに行われているため、あまたある研究の中で本文では取り込まなか

った参考文献も多いと推測されご容赦願いたい。また、本研究は多くの方と討論しながら進めている。これらの討論に参加していただいた方に感謝します。なお、本研究は研究途上であり、今後、本文を基に大いに議論を進めることにより、また現場での水路作成には、水工学、景観工学、環境工学だけでなく土木工学全体の知識が必要である事を念頭に置き、より良い多自然型水路の設計法、施工法を作成して行きたいと考えている。

【参考文献】

- 1) 石野和男他：明治大正期自然式総合園の流水環境調査，土木学会，第50回年次学術講演会第IV部門，1995.9
- 2) 石野和男他：明治大正期自然式総合園の河川環境調査～外苑水路の水理環境調査結果～，土木学会河道の水理と河川環境シンポジウム論文集，pp167～174，1995.6
- 3) 石野和男他：明治大正期自然式総合園の河川環境調査～内苑水路の水理環境調査結果～，第18回土木計画学研究発表会，pp473～476，1995.12
- 4) 田中瑞穂他：明治大正期自然式総合園の河川環境調査～流水形態と流水音に関する考察～，第18回土木計画学研究発表会，pp477～480，1995.12
- 5) 石野和男他：庭園の遣水を例とした日本古来の河川環境評価に関する研究，水工論文集，第40巻，pp163～168，1996.2
- 6) 土木学会水理委員会：水理公式集昭和46年版，pp200～202，1971.11
- 7) 石野和男他：急潮流下における橋脚周辺の捨石洗掘防止工に関する研究，日本大学学位論文，pp32～49，1993.9
- 8) 建設省河川局治水課：河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン（案），1994.2
- 9) 建設省河川局治水課等：河岸防御の設計手法にに関する研究，土木技術資料38-4，pp44～49，1996.4
- 10) 南：復刻 ホタルの研究，(株)サイエティスト社，1983.5