

(3) 河道の流水形態と環境水理特性

FORMS OF STREAM FLOW AND CHARACTERISTICS OF ENVIRONMENTAL HYDRAULICS

土屋十圀*・中村良夫**

Mitsukuni TSUCHIYA*, Yoshio NAKAMURA**

ABSTRACT: In the present report, we have studied current and deep water in the forms of stream flow. This report provides a comparative study among improvement rivers, shinsui river (artificial rivers) and natural rivers from the characteristics view point of river hydraulic. We report on the results of comparison of the data from the measured values of shinsui rivers with the data from natural rivers. The results may be summarized as follows: Ecological condition of stream flow could be explained using a Froude's number and Reynolds' number. It is proved that there is an interesting hydraulic similarity between natural rivers and shinsui rivers, various stream flow of forms are not always flow rate.

KEYWORDS: Forms of stream flow, Condition of stream flow, Environmental hydraulic, Artificial shinsui river, Ecology in river

1. はじめに

全国の親水河川・公園の実態調査によれば、親水河川の多くは人工的なデザインのため生態環境について十分考慮した河川は少ない。生態環境との共存を考えた親水河川は自然環境保全型の親水公園に限られていることが分かった¹⁾。そこで、環境水理の視点から親水河川をデザインしてゆく場合、生態環境としての河川形態について把握し、自然河道の形態から学ぶことの意味は大きいものと考えられる。流水形態と生物との関係は生物の棲息条件を規定する重要な要因の1つであるため水理学的考察を行うことは意義あるものと考えられる。

本研究では、最初に、瀬、淵に関する河川形態学的・水理学的考察を行い、特に河相及び局所的なスケールでの流相について考察する。また、生態学的に良好な環境は河川水理学視点からもその意味するところに共通した関係が存在するものと考え、溪谷の河川、改修河川及び人工親水河川について河相、流相の水理的特性を把握し、その類似性及び相違点を明らかにしようと試みた。著者らは、現在、各地で整備が進められている親水河川の設計、河川改修・河川整備への環境デザインについて寄与することをめざし基礎的調査をもとに環境水理の視点から考察した。

2. 流水形態の河川形態学的・水理学的特性

2.1 瀬、淵の河川形態

安芸皎一は河相論の前文で『河相とは河川のあるがままの状況をいい、改修、未改修を問わず、現在の河成り、河幅、水深、河床勾配及び河床砂礫の構成状態を言うのであって、これらの間には一貫した勢力関係が成り立っている』と述べている²⁾。このように、従来、河川工学、水理学の立場からは流水形態は流体の物理

* 東京都土木技術研究所河川研究室 Dep. of River., Inst. of Civil Eng., Tokyo Metro. Government

** 東京工業大学工学部社会工学科 Dep. of Social Eng., Faculty of Eng., Tokyo Inst. of Technology

的現象としてのみ扱い生態環境の側面から流水形態について論じられたことはなかった。

瀬、淵は河川工学から見ると、移動床の堆積とその局所流問題として扱われ湾曲蛇行河川の場合は洗掘される水衝部と土砂堆積を伴う水裏部としての2次流を伴う水理現象である。また、直線河道の場合なら交互砂州と浅い淵の形成及びその移動が見られる。このように河床変動、送土土砂移動の問題は流体の掃流力との関係から河床安定を図る視点から扱われてきた。

これに対して河川生態学では生物の生息環境を分類する立場から一つの蛇行区間に多くの瀬と淵が交互に出現するAタイプ、瀬と淵が一つずつしか出現しないBタイプに区分し、瀬から淵への流れ込み方でa、b、cの記号を組み合わせさせてAa、Bb、Bcの3つの河川形態型が使われてきた³⁾。図-1には3つの河川形態の形と可児(1944)が示した瀬と淵の分布様式を示した。瀬は部分的には河床勾配が比較的大きく、大小の礫による複雑な配列によって局所的に水位面が変動し、それらが干渉し合い、多様な水面形を形成している流れと見ることができる。

この河川形態の問題は主に、可児藤吉、水野信彦ら河川生態学者から、特に、魚類、水生昆虫などの研究を通して生息環境としての重要性が論じられてきた⁴⁾。また、笹谷は釣り師による河川の地形・場所の認識から釣り場の地形環境を川相、溪相、流相などと呼んで区分し、流水形態について明らかにしている⁵⁾。川相は一般的な名称として、溪相は山地河川における名称、流相はスケールの小さい部分の名称であり、河床の環境総体を流相と定義づけている。釣り師によって認識されている水深、流速、底質、幅員比、水面の組み合わせなど物理的な認識区分として河川の地形環境の特徴を明らかにしている。

釣り師の認識区分は流水形態の微細な変化を経験的に、独特な発想で表現したものであり、水理的という常流、射流の区分に比べ極めて表現に多様性がある。

2.2 流水形態の水理

瀬、淵の流れは、自由水面を持つ流れであり、基本的には流れの慣性力と粘性力及び重力との相対的な効果に支配されている。一般的に、滑らかな開水路では慣性力に対して粘性の効果が大いときは層流となり、水の粒子は決まった流線経路を移動し、流れの薄い層がすぐ隣の層を滑るように流れる。平坦で滑らかな岩肌やガラス面をゆっくり流れる場合がこれに相当する。また、粘性力が慣性力に比べ小さいときは流れは乱流となり、この場合、水の粒子は滑らかでなく固定しない不規則な経路を通り移動する。乱流と層流の間には両者の混合した遷移状態が存在する。河川のほとんどの流れはこの乱流の状態にある。層流と乱流の区分はレイノルド数の次式によって求められる。

$R = V \cdot h / \nu \cdots \cdots (1)$ ここで、 V :流速、 h :水深、 ν :動粘性係数を示す。

更に、流相について小さなスケールで見ると突起物としての礫に衝突する流体現象は上流側の水位の位置によって図-2に示したように変化して流れる。一般的に、流れは常流と射流及びその中間の遷移流に区分している。常流と射流の区別は流れの状態の重力に対する慣性力の比によって表されるフルード数の次式によって示される。

$Fr = V / (g \cdot h)^{0.5} \cdots \cdots (2)$ ここで、 V :平均流速、 g :重力加速度、 h :水深

を表す。水深の変化は洪水及び河道内の攪乱や障害物によって引き起こされ、水面は上下に変位し、重力が作用して波が発生する。この波は常流では上流方向に伝わるが、射流では上流に遡らない。

一口に瀬といっても釣り師及び河川生態学から見ると、荒瀬、早瀬、平瀬、深瀬、浅瀬などと区分され水深、流速、底質の状態によって流相が異なる⁶⁾。大小の点状の浮き石や沈石の間を流れる瀬は小さなスケールで見ると常流、射流あるいは遷移流の状態が集まって形成されている。射流の流れが常流の流れに遷移する

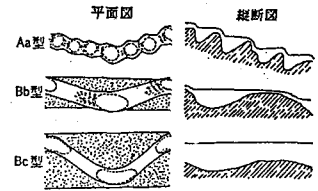


図-1 河川形態の3つの型(可児)

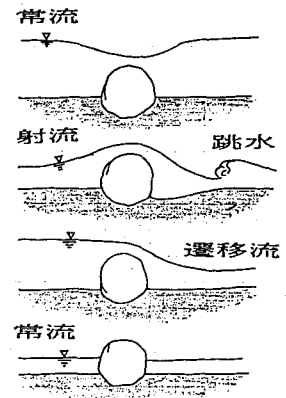


図-2 一般的な流れの水面形

場合に起こる現象を跳水と呼び、フルード数が1.7以下の場合は波状跳水と呼ばれ、表面には渦は形成されず水面は波状となって白濁は生じない。フルード数が1.7以上の場合は完全跳水となり、射流の流れが下流の流れに衝突し、そこで水面が急上昇し、この流れにそって空気混入により濁り、白い泡沫が発生する。跳水の先端では白濁し、景観的にも素晴らしい流体現象が見られる。水面の急激な上昇、渦、それに伴い白濁する流体現象は、泡沫が光りを全反射することにより、清涼感ある景観をつくりだしている。

表-1 調査対象地点、区間及び護岸と河床の状況

	北秋川	多摩川	平井川	小松川・境川
地形的区分	山地	溪谷	丘陵地	低平地
改修 状況	未改修	未改修	改修	用水路
護岸の状況	自然河岸	自然河岸	コンクリートブロック 土羽、礫	コンクリート 一部礫積
河床の状況	砂・礫	岩・礫	砂・礫	コンクリート・礫敷

3. 溪谷河川、改修河川、人工親水河川の水利特性

3.1 調査対象河川の区分及び調査方法

調査対象河川は未改修で自然の溪谷河川である北秋川及び多摩川、改修河川として平井川、人工親水河川として小松川・境川である。調査対象地点の護岸と河床の状況は表-1に示す通りである。調査方法は各地点とも現地踏査を実施し、流水形態の変化に富んだ区間を設定し、延長距離で150m(北秋川)、200m(多摩川)、300m(平井川)、1000m(小松川・境川)について縦横断測量を

を行い、河道の横断形状、水面勾配、流速を詳細に求めた。

水面勾配は早瀬、瀬、瀬の流水形態が変化すると考えられる各区分ごとに、水面地点でのレベル測量によって測定した。また、横断の測定については、河床は変化点で抑え、流速の測定は河幅に応じて5-12測線程度でおこなった。なお、流速測定は各流水横断地点毎にCM-10S型流速計を用いて行なった。ここでは主に、特徴的な流相と考えられる水量の

表-2 水量観測結果

河川	平均流速 V(m/s)	最大水深 H(m)	平均水深 H _{av} (m)	水面幅 (m)	流量 Q(m ³ /s)	粗度係数 n	水面勾配 I	掃流力 τ(N/m ²)	Froude数
多摩川									
早瀬	1.23	0.80	0.46	20.6	9.95	0.031	0.0098	0.023	0.810
瀬	0.82	2.40	1.05	28.0	15.32	0.102	0.0175	0.086	0.370
瀬	0.36	3.10	2.05	9.5	8.29	0.334	0.0175	0.148	0.133
北秋川									
浅瀬	0.49	0.53	0.36	5.7	0.88	0.084	0.0180	0.027	0.399
瀬	1.20	0.33	0.23	5.0	1.23	0.033	0.0019	0.018	1.232
平井川									
跳水	0.97	0.55	0.26	6.9	0.82	0.017	0.0055	0.007	1.287
チャ瀬	0.55	0.15	0.10	13.1	0.69	0.011	0.0019	0.001	0.810
小松川									
落ち込	0.39	0.16	0.15	2.7	0.18	0.080	0.0260	0.017	0.476
さざ波	0.39	0.07	0.05	3.0	0.08	0.023	0.0060	0.002	0.700
荒瀬	0.31	0.15	0.12	2.4	0.09	0.193	0.0410	0.105	0.192

観測結果を表-2に示した。粗度係数はManningの式から、掃流力はエネルギー勾配を求める式から算定した⁷⁾。なお、径深は横断測量による実測値を用いた。

流相の区分は釣り師による名称を用いて笹谷がまとめた方法⁵⁾をもとに整理を行った。各流相の状況及び景観的な特徴は以下の通りである。一般的に、河床は瀬と瀬で構成されている。瀬は水深があり、流速は瀬より小さく、水面が平らで河底が砂や泥で石がない状態をいう。一方、瀬については河川生態学では瀬を2分し、水面がしわのような波で底質に沈み石のある平瀬と、水面が白波立ち、平瀬より流速が早く、底質に浮石がある早瀬に分類している。また、釣り師の村田満はアユの友釣りの立場から水面幅員(瀬幅との比)、流速、水面を基準に河床を瀬、トロ(場)、平瀬、チャ瀬、早瀬、荒瀬、白瀬の7つに分類している。⁶⁾

瀬は水深が浅い方からチャ瀬:水深20cm以下の小波の立つ浅瀬、トロ瀬:水深20-40cmの小波の立つ瀬、平瀬:小波や波立ちがなく水深が40cm以上になる流れ、早瀬:平瀬と水深はほぼ同じであるが流速が大きく河底は丸い中石の浮石があり、波立つが白濁がない状態、荒瀬:水深は早瀬と同じ程度であるが流速は更に大きく、河底の石は大きく角石で、水面は大波となり、白濁した状態、深瀬:水深は60cm-1mであり、底質は小石、砂の状態、流速は瀬・瀬に近く小さい流れ、瀬:水深が80cm以上、河底は小石・砂の状態であり、沈み石とな

っている。淵：水深は2m以上で河底は砂、泥の状態であり、流速は非常に小さい。水面の状態は静かな方から鏡・透かし、流れで波紋を描いている状態をしわ波・さざ波・白波・うねりなどのように表現している。

3.2 河道の流水形態と水理特性

(A) 渓谷河川

渓谷河川の多摩川は河川区間で約200mについて12側線(横断線)を観測した。そのうち早瀬と瀬が形成されている場所(写真-1,2)の流速分布の状態を図-3、図-4に示す。図中の数字は流速(m/s)である。早瀬は平均流速 $V:1.23\text{m/s}$ 、最大水深 $H:0.80\text{m}$ 、平均水深 $H_A:0.46\text{m}$ 、流量 $Q:9.95\text{m}^3/\text{s}$ 、粗度係数 $n:0.037$ 、水面勾配 $I:0.0098$ 、掃流利 $\tau:0.023\text{N/m}^2$ 及びフルード数 $Fr:0.810$ であった。これに対して、瀬はそれぞれ、 $V:0.82\text{m/s}$ 、 $H:2.40\text{m}$ 、 $H_A:1.05\text{m}$ 、 $Q:15.32\text{m}^3/\text{s}$ 、 $n:0.316$ 、 $I:0.0175$ 、 $\tau:0.086\text{N/m}^2$ 及びフルード数 $Fr:0.370$ となっていた。ここでは流水形態は早瀬であるがフルード数 Fr は1以下であり、射流の状態には至っていない。むしろ深瀬に近いものと考えられる。

一方、粗度係数は瀬では早瀬に比べ100倍も大きく、掃流利は同様に約4倍大きいことが分かる。もともと粗度係数は水面勾配の1/2乗、及び径深の2/3乗に比例し、流速に逆比例するため、平均流速が小さくなる淵、瀬では大きくなる。早瀬は瀬に比べ流下方向の流速は大きくかつ、流速 1m/s 以上の流心部で流速分布は密になっていることが分かる。同様に、渓谷河川ではあるが流量が多摩川の1/10である北秋川では河川区間約150mで、12側線の観測を行った。

この中で沈み石、浮き石などがあり、白濁しながら変化に富んだ景観を見せ

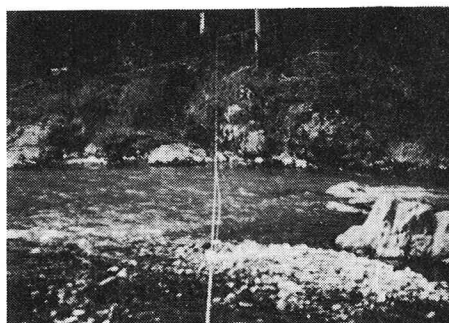


写真-1 早瀬(多摩川)

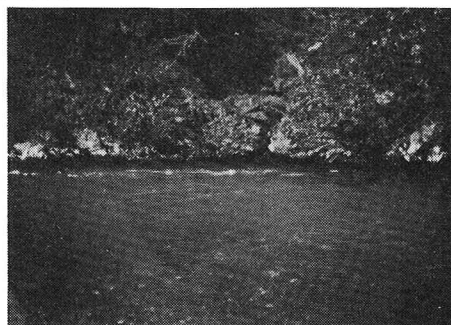


写真-2 瀬(多摩川)

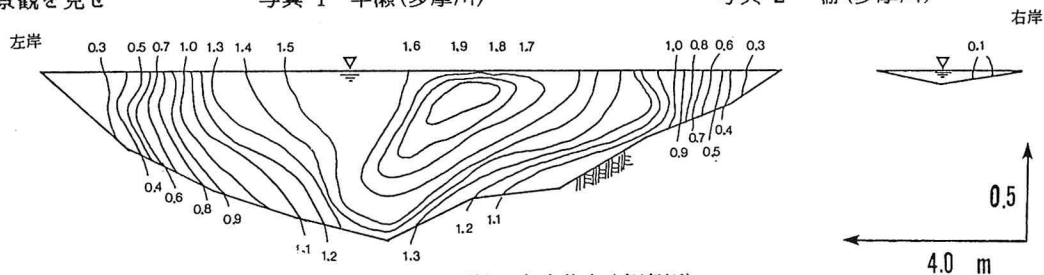


図-3 早瀬の流速分布(多摩川)

ている浅瀬(写真-3)と落ち込みに近いザラ瀬の個所が見られた。浅瀬は平均流速 $V:0.49\text{m/s}$ 、最大水深 $H:0.53\text{m}$ 、平均水深 $H_A:0.36\text{m}$ 、流量 $Q:0.88\text{m}^3/\text{s}$ 、粗度係数 $n:0.084$ 、水面勾配 $I:0.0180$ 、掃流利 $\tau:0.027\text{N/m}^2$ 、フルード数 $Fr:0.399$ である。また、ザラ瀬は $V:1.20\text{m/s}$ 、 $H:0.33\text{m}$ 、 $H_A:0.23\text{m}$ 、 $Q:1.23\text{m}^3/\text{s}$ 、 $n:0.033$ 、 $I:0.0019$ 、 $\tau:0.018\text{N/m}^2$ 及びフルード数 $Fr:1.232$ となっている。ザラ瀬は浅瀬に比べ、掃流利、フルード数で4倍ほど大きく、特にフルード数は1以上で射流状態にあった。図-5、図-6にはそれぞれの流速分布を示した。

(B) 改修河川

平井川は複断面河道で低水路部は法面にコンクリートブロックを覆工した場所と土羽の状態が交互に施工されている。約1000mの河川区間を22側線の測定を行った。このうち、フルード数が大きく、波状跳水に近い流れと水深が浅いがさざ波が立ちチャラ瀬(写真-4)となっている流れが特徴的であった。前者は平均流速 $V:0.97\text{m/s}$ 、最大水深 $H:0.55\text{m}$ 、平均水深 $H_A:0.26\text{m}$ 、流量 $Q:0.82\text{m}^3/\text{s}$ 、粗度係数 $n:0.017$ 、水面勾配 $I:0.0055$ 、掃流利 $\tau:0.007\text{N/m}^2$ 及びフルード数 $Fr:1.287$ であり射流となっている。また、後者のチャラ瀬は $V:0.55\text{m/s}$ 、

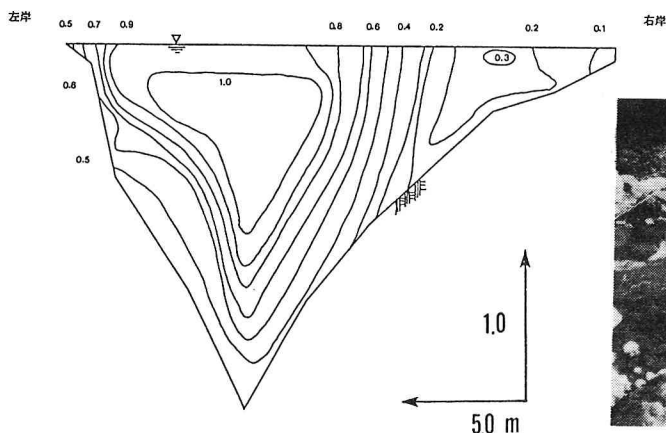


図-4 瀬の流速分布(多摩川)

H:0.15m、 H_A :0.10m、 Q :0.69m³/s、 n :0.011、 I :0.0019、 τ :0.001N/m²及びフルード数 Fr :0.810であった。ここでは、チャラ瀬となっている流速分布を図-7に示した。波状跳水に近い流れは見られるが、溪谷河川に比べ河床がフラットであり、変化の乏しいものとなっている。しかし、丘陵地の河川として蛇

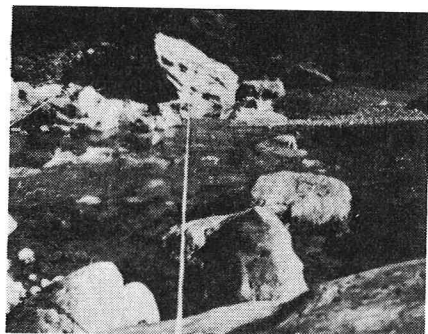


写真-3 浅瀬(北秋川)

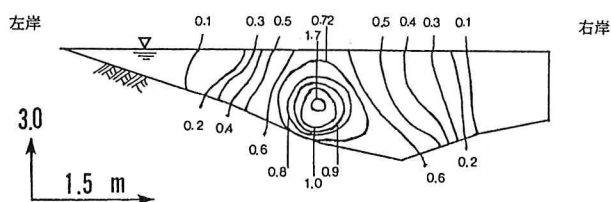


図-5 浅瀬の流速分布(北秋川)

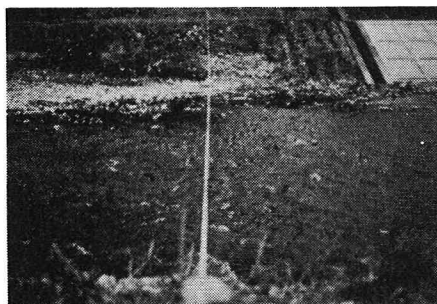


写真-4 チャラ瀬(平井川)

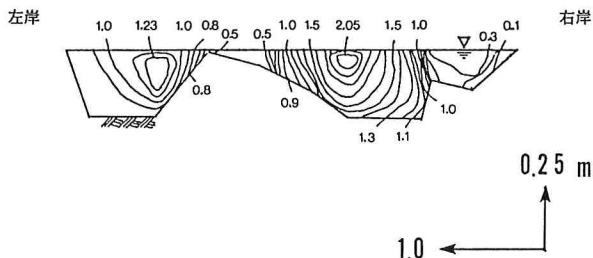


図-6 ザラ瀬の流速分布(北秋川)

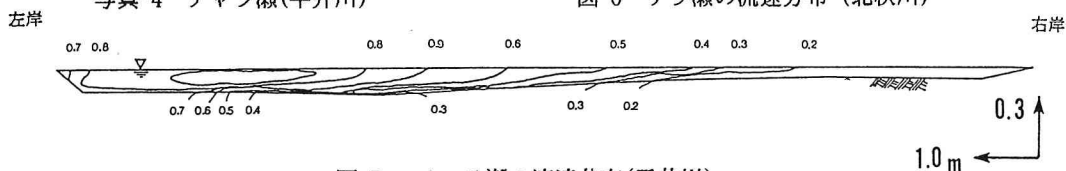


図-7 チャラ瀬の流速分布(平井川)

行区間の水衝部では洗掘による比較的浅い淵の形成が見られた。

(C) 人工親水河川

小松川・境川は河川区間のうち『せせらぎのゾーン』が16側線で320m、『水しぶきのゾーン(滝)』が7側線で52m、『たゆたゆのゾーン』が4側線で78m、『湧水のゾーン』が5側線で26mそれぞれ観測を行った。人工的な流れであっても変化に富んだ流相と考えられる流れを写真-5、6、7に示した。落差工から射流となってスロープに落ち込む流れを写真-5に、さざ波を演出している流れを写真-6に、荒瀬の景観を呈する流れを写真-7に示した。落ち込み流れは平均流速 V :0.39m/s、最大水深 H :0.16m、平均水深 H_A :0.15m、流量 Q :0.18m³/s、粗度係数 n :0.080、水面勾配 I :0.0260、掃流力 τ :0.017N/m²及びフルード数 Fr :0.476の流れであった。また、さざ波

は $V:0.39\text{m/s}$ 、 $H:0.07\text{m}$ 、 $H_A:0.05\text{m}$ 、 $Q:0.08\text{m}^3/\text{s}$ 、 $n:0.023$ 、 $I:0.0060$ 、 $\tau:0.002\text{N/m}^2$ 及びフルード数 $Fr:0.700$ となっている。更に、荒瀬は $V:0.31\text{m/s}$ 、 $H:0.15\text{m}$ 、 $H_A:0.12\text{m}$ 、 $Q:0.09\text{m}^3/\text{s}$ 、 $n:0.193$ 、 $I:0.0410$ 、 $\tau:0.105\text{N/m}^2$ 及びフルード数 $Fr:0.192$ であった。

落ち込みとさざ波は同じ平均流速であったが、落ち込みは粗度を大きくすることによって、さざ波はフルード数を大きくすることによって特徴ある流体の動きを創出している。また、荒瀬の流れはフルード数が小さく、平均流速がさざ波や落ち込み流れと同程度であるが石を配置し、粗度及び水面勾配を大きくすることによって渓谷河川の荒瀬のように演出されている。この流相は庭園設計の手法⁸⁾、即ち遣水の底石、水を左右に切って流す水切り石、波分石を置くことによって水理的な粗度の役割が景観の效果に寄与していることになる。この時の荒瀬、さざ波及び落ち込みの流速分布を図-8、9、10に示した。さざ波の単調な分布に比べ荒瀬は流速分布が多摩川の渓谷河川に近似している。

ここで、庭園の遣水様に設計されている荒瀬、さざ波の親水

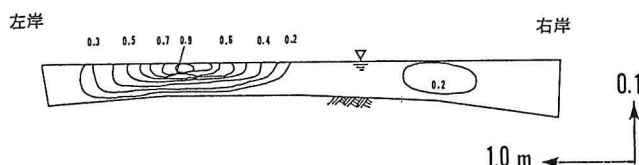


図-8 落ち込み流れの流速分布(小松川・境川)

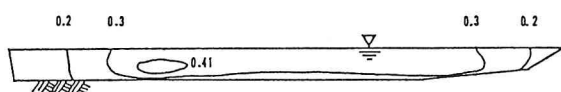


図-9 さざ波の流速分布(小松川・境川)

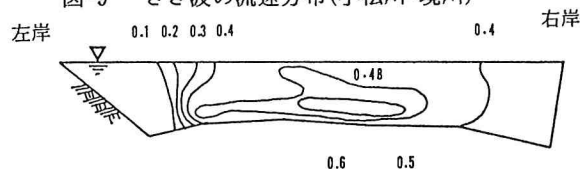


図-10 荒瀬の流速分布(小松川・境川)

河川を、実河川に拡張して考える。水の単位体積重量、密度などは同様として、相似則を適用すると、荒瀬では水路幅が小松川・境川の10倍の河川とすると流量は $27.5\text{m}^3/\text{s}$ 、平均流速が 0.98m/s となり、それぞれ親水河川の約316倍、3.16倍が必要となる。また、さざ波では同様に10倍のスケールでは流量が $24.0\text{m}^3/\text{s}$ 、平均流速は 1.24m/s が必要となる。この流量は多摩川における渓谷河川の約2倍の流量に相当することになる。

多摩川のような多様な変化をもつ自然河川の流れを造り出す場合、河川流量が少ない人工親水河川の場合でも、景観的スケール感は異なるが、流相の形態には必ずしも流量の多少だけが支配要因になるものではないと考えられる。

渓谷河川、改修河川及び人工親水河川の流相としての水理的特性を観測値から検討した。笹谷が整理した釣り師から見た流相の早瀬、平瀬、瀬、チャラ瀬、ザラ瀬などを水理学的流れとしての4つの様式、即ち、Robertson and Rouse⁹⁾による常流-射流、乱流-層流に関して水深と流速及びフルード数の関係を図示すると図

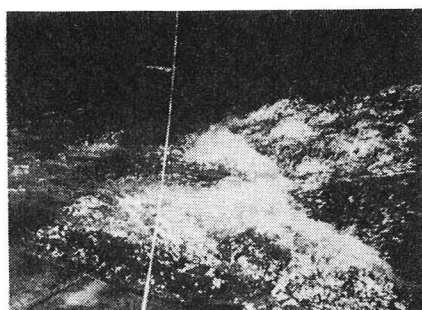


写真-5 落ち込み流れ(小松川・境川)



写真-6 さざ波(小松川・境川)



写真-7 荒瀬(小松川・境川)

-11のように区分することができる。更に、各名称ごとの流相について横断方向に測定した実測値を挿入すると、例えば平井川のチャラ瀬の場合、水深0.04~1.2m、流速0.15~1.30m/s、 $Fr=0.25\sim1.3$ の幅の中にある。しかし、チャラ瀬は水際から流心方向に向かって、厳密には一様にチャラ瀬の流れではなく、局所的な流水部の総称を表現するものと考えられる。また、早瀬は水深0.4~0.9m、流速0.6~3.0m/s、 $Fr=0.25\sim1.3$ の幅の中にあった。

このように、チャラ瀬の上に、ザラ瀬、浅瀬、早瀬が続き、流速が小さくかつ、水深が大きい方向に向かって深瀬、瀬、深瀬、淵と変化している状況を表すことができる。荒瀬は水深があり、波状跳水に近い方に分布している。

4. まとめ

本研究では、瀬、淵に関する流相について河川形態学的・水理学的考察を行い、渓谷の河川、改修河川及び人工親水河川について環境水理の視点から河相、流相の水理的特性を把握し、その相違点を明らかにした。

渓谷河川における早瀬、深瀬、淵、チャラ瀬など釣り師及び河川生態学からの呼称を水理的な特性として水深、流速及びフルード数・レイノルズ数によって区分をし、説明することができた。改修河川と渓谷河川の比較では前者が河床の平坦化によって流速分布の密な状態は見られず流相の単純化が起こっているところも見られた。

人工親水河川との比較では石を配置して粗度及び水面勾配を大きく、フルード数を小さくすることによって渓谷河川の荒瀬を演出することができるものと考えられる。この場合、相似則から推定すると流相の多様な変化を造り出すためには必ずしも流量が支配要因ではないものと考えられる。

(参考文献)

- 1) 土屋十圓：都市における親水河川・公園の実態について、東京都土木技術研究所年報、pp139-152、1991
- 2) 安芸蛟一：河相論、岩波書店、pp1-2、1966
- 3) 可児藤吉：溪流性昆虫の生態、研究社、東京、1944
- 4) 水野信彦、御勢久右衛門共著：河川の生態学、築地書館、pp184-191、1980
- 5) 笹谷康之：地形の意味に関する研究(東京工業大学博士論文)、pp131-143、1990
- 6) 村田満：最新アユ釣り全科、広済堂出版、pp146-172、1991
- 7) (社)土木学会水理委員会：水理公式集、pp220、1985
- 8) 斉藤勝雄：図解作庭記、技法堂出版、pp63-77、1984
- 9) VEN TE CHOW：開水路の水理学、丸善、pp11-15、1962

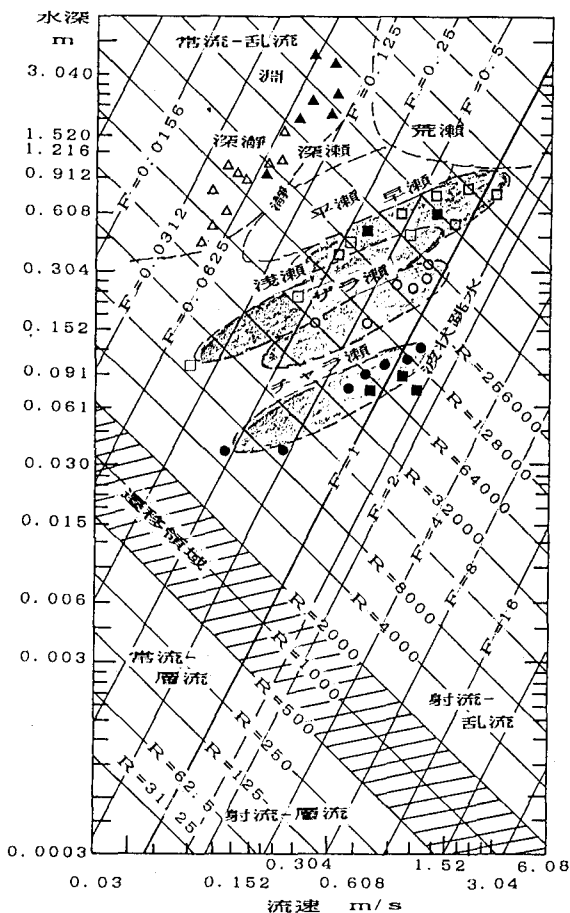


図-11 水理的流れの4つの様式と流相の区分⁹⁾