

急流河川における瀬—淵構造の分布について —能生川を事例として—

岩 崎 敏*・丸 井 英 明**

Distribution of Riffle-Pool Structures in a Torrential River

— Case Study in Nou-river —

by

Satoshi IWASAKI and Hideaki MARUI

(Abstract)

This paper concerns the distribution of riffle-pool structures of river floors in a torrential river and the return period of the flood discharge which determines the formation and destruction of riffle-pool structures. Types and functions of riffle-pool structures are described and furthermore hydraulic aspects in relation to the formation of riffle-pool structures are reviewed on the basis of existing studies. Forms and dimensions of riffle-pool structures are investigated systematically from the mouth to the upper area part of Nou-river. A certain regularity can be observed in the longitudinal variations of the length of pools. Based on the examination of important factors which influence the length of pools, a formula which expresses the length of pools is introduced. Each length of pools is determined by catchment area and gradient of river floor, i. e., the length of pools is proportional to the catchment area and inverse proportional to the square root of the gradient of river floor.

The knowledge on the distribution of riffle-pool structures of river floor which is clarified in this paper should give a useful basis for river regulation works in harmonizing with natural river morphology.

Keywords : riffle-pool structure, Nou-river, catchment area, gradient of river floor,
river morphology

キーワード : 瀬—淵構造, 能生川, 集水面積, 河床勾配, 河川形態

I は じ め に

世論一般の環境に対する意識の高揚に伴い、1990年11月建設省河川局は「多自然型川づくりの推進」の通達を行った。それ以後、環境及び景観に配慮した河川事業が全国各地で実施され、今日に至っている。しかしそのような河川事業に際しても、これまで河川環境に対する認識において、人間活動にとって好ましい生活環境としての一面が重視され、生態系全体を見据えた自然環境としての一面が軽

*新潟大学大学院自然科学研究科博士課程前期
**新潟大学積雪地域災害研究センター

視されてきた感がある。また、河川景観についても景色や風景といった狭い意味で捉えられ、本来の語源であるLandschaft（独語）あるいはLandscape（英語）という用語に含まれる構造・機能・動態といった意味が認識されていないように思われる。

実際河川で行われた景観に配慮した事業の具体例として、河川を一部取り込んだ親水公園の造成や表面処理を施した河川工作物の建造事例が甚だ多く見られる。勿論これらも必要な河川事業の構成要素であろうが、設置場所によっては不自然な人為的環境を創出することにつながる。一方、生態系の保全をかねて行われた河川事業としては、例えば河道内に巨石を投入する方法（水野，1995）や常水路を蛇行させ固定する方法（井良沢ら，1995）などが試みられている。しかしこれらに関しても、多様性に富む河川環境を部分的に再生する方法を目指しながら、実際には砂礫分布等の点で自然の流路形態のあり方に反しているものが多い。

「多自然型川づくり」という言葉に集約される河川事業の基本理念は、河川生態系の保全や復元を重視するものであり、この理念自体は高く評価される（竹門，1992）。しかしこの理念に基づいた河川事業の結果実際に造成された新たな環境は、周囲の動植物の生生活動に必ずしも寄与しないばかりか施工後の河川環境の自然の遷移に悪影響を及ぼすことも多い（崎尾ら，1997）。目標とする理念と実現された事業結果の隔たりは、既に指摘されているように、現場における施設設計及び工事の大部分が十分な学問的裏付けを欠いて施工されている（丸井，1993,1997）ことに起因するものと考えられる。

環境と景観に配慮した河川事業の基本理念を確実に実現するには、河川環境に内包される物理的現象だけでなく生物的現象をも含めた全体的な把握が重要となってくる。事業を進める上で、不可欠な様々な学問分野に関する認識が欠落すれば、目標達成は困難となる。従来型の専ら防災面に主眼をおいた事業であれば、水や土砂礫の運動を扱う水理学の知見が不可欠であった。これに加えて河川環境の保全を重視する事業を推進するには、新たに河川生態学の知見が必要となる。

河川中の水生生物を研究対象に包含する河川生態学の分野では、主要課題として水生生物とその生息環境に関する研究が進められている。その中で、河道内に分布する瀬-淵構造が多くの水生生物に生息場所を提供する重要な環境構成要素であることが明らかにされてきた。最近では、さらに小さな空間スケールを対象とした微生息場所の研究も行われるようになり、水生生物の必要とする微環境が次第に明らかにされつつある。これら微環境の多くは、瀬-淵構造という河川構成単位内に分散しており、その発達・形成はそれを包含する瀬-淵構造の規定を受けているものと考えられる。従って瀬-淵構造は、河川環境の多様性を保障する存在として不可欠な機能を有している。

環境及び景観への配慮を指向した河川事業においては、瀬-淵構造を積極的に保全していくことが今後の重要課題となる。従来型の事業のように単に瀬や淵の形状を外形的に真似るに留まらず、水生生物にとって有用な環境要素として機能させるには、瀬-淵構造の動態を水理学的に明らかにしていく必要がある。瀬-淵構造の水理的特性の把握は、河床の安定度を認識することにもつながる。

本報告は、上述した考えに沿って、水生生物の生息環境を構成する瀬-淵構造に焦点を当て論述したものである。まず第二章では、瀬-淵構造について河川生態学の分野における従来の研究に基づき、その構造と機能について述べる。次に第三章では、河川水理学及び土砂水理学の分野における従来研究に基づき、瀬-淵構造の形成に関わる水と土砂礫の運動について触れる。最後に第四章では、淵の分布特性に関する調査結果に基づき、瀬-淵構造の形成・維持についての考察結果を示す。

II 瀬-淵構造について、その構造と機能

1. 瀬-淵構造

一般に、砂礫を河床材料とする自然の河川では、瀬と淵が組になった流路形態を観察することができる。これらは瀬-淵構造と呼ばれ、上流から下流にかけてその形態と規模を徐々に変化させながら連続的に分布する(図-1)。本章においては、瀬-淵構造に関する従来の研究を総括することとする。

可見(1944)は、地形学的な河川の区分(上流部・中流部・下流部)に対して、瀬と淵という構成単位あるいは早瀬・平瀬・淵といった構成要素によって河川を区分することを提唱している。可見によるこの河川形態区分は、瀬と淵の形態及びそれらの分布様式を組み合わせ、Aa・Bb・Bcの3型によって表現される。

これらの記号について、以下に説明する。頭文字のA, Bは、瀬と淵の分布様式を表す。すなわちAは、湾曲する流路の半波長に対していくつかの瀬と淵の組が連なっている状態を、Bは流路の半波長に対して一組の瀬と淵が並んでいる状態を示す(図-2左)。また、小文字のa, b, cはそれぞれ瀬から淵への流入形態によって、落ち込むもの・白く波立つもの・波立たないものに対応する(図-2右)。

さらに可見は、これらの記号によって表される3型に加え、典型的な河川形態としてAa-Bb推移型をあげている。可見のAa・Bb・Bc及びAa-Bbの4型からなる河川形態区分は、日本の河川生態学の分野において今なお利用されている(竹門ら, 1995)。

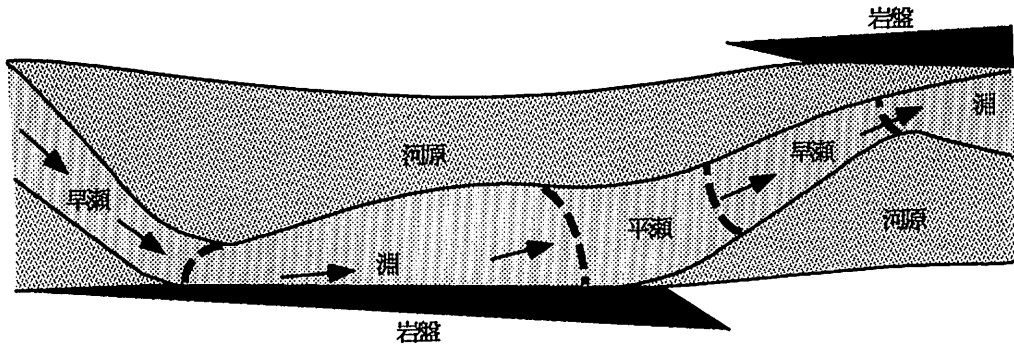


図-1 瀬-淵構造の模式図

(玉井ら, 1993: 河川生態環境工学, 東京大学出版会, p175を改変)

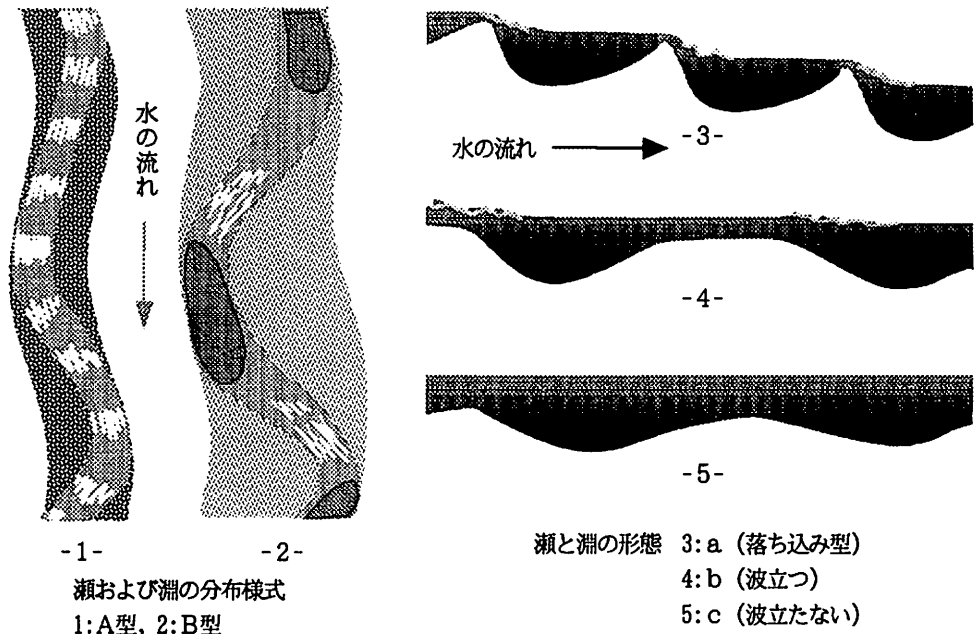


図-2 可児の河川形態区分, A, Bおよび a, b, c
 (可児, 1944: 溪流棲昆虫の生態, 可児藤吉全集(1970),
 全一卷, 思索社, pp10,13より作成)

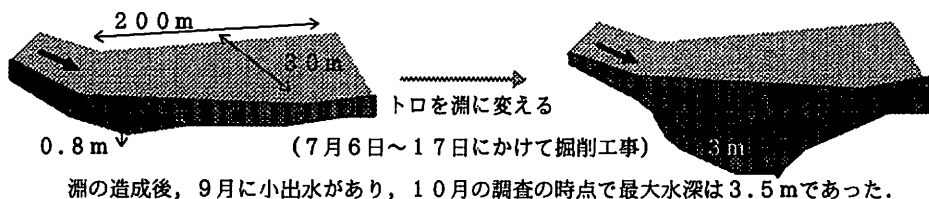
2. 瀬-淵構造の機能

ここでは、魚類と水生昆虫類に注目して、彼らの棲み場所という観点から瀬-淵構造の機能について述べる。この二種類の水生生物を比較してみると、瀬-淵内における彼らの利用場所・範囲に違いが見られる。大局的に判断すれば、瀬は淵に比べ水生昆虫の生息密度が高く、河床面に達する光量の多さから付着藻類の成長も早い。一方淵は、多くの魚類にとって摂餌や休息場所、平水時の隠れ場所や増水時の避難場所として機能している(例えば、玉井ら, 1993; 水野, 1995)。

魚類に関しては、水野が生息環境の改変と生息状態の変化について実験的調査をおこなっている。すなわち、淵に比べて水深の浅いトロを掘削して淵を造成し、その前後で魚類の生息状況がどのように変化したかを調べている。以下、水野の報告(1995)に基づきその概要を紹介する。

ここで紹介する事例は、1979年から1981年の3年間に渡って水野らによって行われた調査の一部である。魚類の生息状況に関する第1回目の調査は、淵の造成前の5月に行われた。その後7月に入って淵が造成され、8月には第2回目の調査が、10月には第3回目の調査が行われた。これを時間に沿って示すと以下ようになる。

5月	第1回目の生息調査(瀬)
7月	6~17日にかけて、最大水深約80cmのトロを最大水深3mの淵に改変(図-3)
8月	第2回目の生息調査(淵)
9月	小出水があり、淵の最大水深は3.5mとなった。
10月	第3回目の生息調査(淵)



淵の造成後、9月に小出水があり、10月の調査の時点で最大水深は3.5mであった。

図-3 人工淵造成のイメージ図

この調査では、調査対象となった魚類が全15種にのぼっている。しかし、ここでは一般的によく知られておりかつ季節的移動の少ない魚種としてオイカワ・ウグイ・フナの三種に関する水野の調査結果を取り上げ、その生息状況の時間的変化を示す。

図-4はこの三種の生息密度を、場所別・時間別に表したものである。人工的にトロを淵に変えた結果、魚類の生息密度が高まっていることがわかる。淵に隣接する瀬においても生息密度が高まるのは、夜や増水時に休息場所や避難場所として淵を利用するためと報告されている。

次の図-5は、オイカワの現存量(g)の変化を同じく場所別・時間別に表したものである。これより、人工淵造成後は、個体数だけでなく重量も増加傾向にあることが窺える。重量の増加は、生息密度のみならず体長の大型化を意味する。この調査によって水野は、魚類の良好な生息環境として淵の水深が必要であることを指摘し、淵と瀬が組になって存在していることの重要性を述べている。

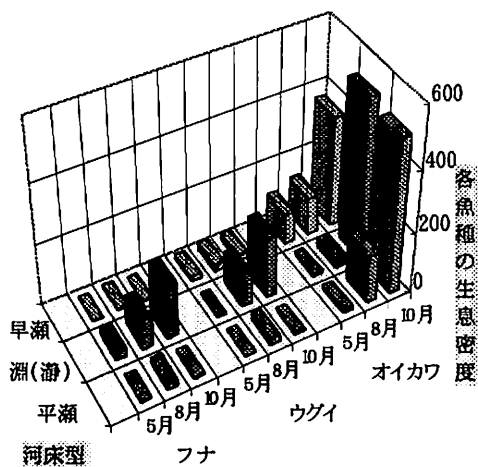


図-4 人工淵造成前後の生息密度 (尾/100m²)

(水野, 1995; 魚にやさしい川のかたち, 信山社, p46の表より作成)

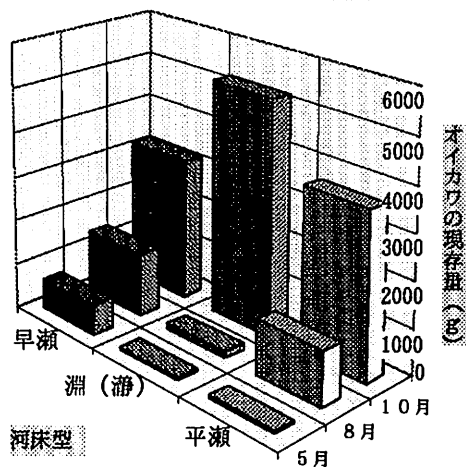


図-5 人工淵造成前後の現存量 (g/100m²)

(水野, 1995; 魚にやさしい川のかたち, 信山社, p46の表より作成)

魚類に関しては、この他にも井上ら（1994）によって、自然区間と改修区間の双方に対して流路内の微環境要素と魚類の微生物場所に関する研究が行われている。この研究結果からは、河川性魚類の生息環境には好適な微生物場所の広がりのみならずそれらの配置様式が大きく関与していること、魚類の生息場所の物理的條件として瀬・淵の連続構造に規定された流路内の微環境構造が極めて重要であること、などが明確に示されている。

また、丸山（1981）によって行われたイワナとヤマメの比較生態学的研究では、両者の産卵床の場所選定から瀬・淵構造の重要な機能を窺い知ることができる。双方の産卵行動にはやや異なる行動様式が認められるものの、産卵場所を選ぶ際の重要な条件として、瀬・淵内で局所的に存在する流速・流向の変化や河床面の起伏、砂礫の分布状況などがあげられている。これら微生物環境は、主として水と土砂礫の複雑な運動によって形成されると考えられ、このような報告は、河川環境が動的に維持されていることの重要性を示すものと思われる。

次に水生昆虫について、瀬・淵構造との関連でその生息環境を見ていくことにする。この生息環境を瀬・淵の河川単位との関連で明確に示しているのは、可児（1944）の種数-面積曲線である（図-6）。これは、早瀬から上流に向かって種数を累計していったとき、各場所に応じて累計された種数がどのように増加してゆくかを示している。ここではA、B二つの瀬・淵に対して調査が行われている。図の横軸は下流端の早瀬から累計された面積であり、そこに調査場所が数字で示されている。縦軸は種数で、グラフ上には調査開始点から種数を累計していったときの値がプロットされている。この曲線によれば、種数は調査開始点の早瀬で急増するものの、その後平瀬を経て淵に至るとそれ以上新たにカウントされにくくなることが読みとれる。このことは、ある地域の水生昆虫群集の種構成が、瀬・淵の河川単位内にほぼ収まっていることを示唆している。

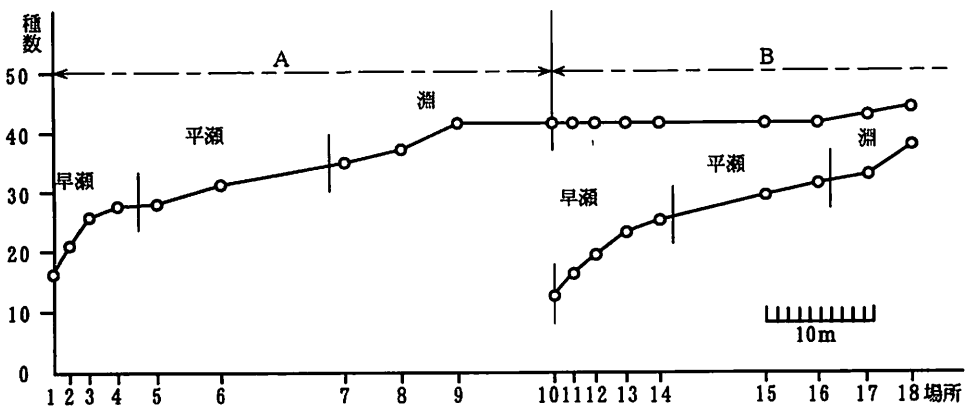


図-6 早瀬・平瀬・淵の河床型に対応した種数-面積曲線

(可児, 1944: 溪流昆虫の生態, 可児藤吉全集(1970), 全一卷, 思索社, pp35より作成)

遊泳力のある魚類に比べ水生昆虫類は、各種の選好性によって異なる限られた範囲内で幼虫期の水中生活を送っていると言えよう。よって水生昆虫に関しては、瀬・淵構造よりもさらに小スケールで分析することが重要となる。そのような観点から可児は、瀬・淵内の早瀬・平瀬・淵の河床型それぞれが、重合した礫からなる「浮き石」、細砂や砂礫に没した「はまり石」、沈殿した泥ないし砂、とい

った底質に対応していることを指摘している。このように、各種昆虫の選好性を反映する底質、その底質によって形成される河床型、その河床型の集合体である瀬-淵構造、さらに瀬-淵の連続構造からなる河川形態へと、異なる空間スケールに対してそれぞれを結び付ける研究を行ったことは注目に値する。

近年では、水生昆虫の棲み場所構造に関連して、さらに詳細な微環境要素を取り扱う研究がなされている（例えば、竹門、1991；谷田、1996）。このような微生物息場所を対象とした調査から、水生昆虫にとって重要となるのは瀬-淵内に点在する特定の場所であることが示されている。多くの水生昆虫が様々な微環境要素を巧みに利用することで、種の多様性が維持されている。

以上が生態学的に明らかにされた瀬-淵構造の機能である。水生昆虫類にとってはさらに細かな微環境が必要となるが、魚類にとっても産卵や稚魚の成育にはそれらが重要な要素となってくる。ある生物種やある成育段階に不可欠となる微環境の多くは、瀬-淵の河川単位内に点在しており、その形成過程において瀬-淵構造に規定されているものと推測される。

こうした環境要素の形成過程は、水と土砂礫の相互運動によって説明される。例えば早瀬のように粗い粒径からなる河床は、出水によって細かな砂礫が選択的に運搬されるような侵食過程を経て形成される。このようなアーミング現象に代表される侵食過程での分級作用を淘汰と呼ぶこととする。また淵尻の瀬頭に位置する河床内間隙水域は、早瀬から淵を経由して運搬されてきた砂礫がふるい分けられて堆積する。このような堆積過程での分級作用を級化と呼ぶこととする。こうした小空間スケールでの分級作用は、伊勢屋ら（1986,1989）によって実験水路内で確認されており、河床形態との密接な関係が指摘されている。流域単位に比べ非常に小規模な瀬-淵の河川単位においても、出水時の侵食・運搬・堆積作用に対してさらに淘汰や級化という分級作用が加わることで、多様な環境要素が形成維持されていると考えられる。

Ⅲ 瀬-淵構造にかかわる水と土砂礫の運動

Ⅱ章においては、河川生態学の分野で使用される可児の河川形態Aa, Bb, Bcについて説明を行った。この頭文字のA, Bは瀬と淵の分布様式によって区分されるが、それは水理学的には河床波と呼ばれる河床面の起伏によって区別することができる。一般に河床波は、中規模河床形態と小規模河床形態に大別され、前者には多列砂州・単列砂州・固定砂州が、後者には砂連・砂堆・反砂堆などが含まれる。こうした河床波に関する研究は、河川工学、砂防工学、地理学、地形学などの各学問分野で行われてきている。

ここでは、特に瀬-淵構造と関連のある河床波について土砂水理学的研究を総括することとする。なお河床波を可児の河川形態区分と対比させると、B型には砂州が、A型には反砂堆が対応する。

1. 瀬-淵構造と砂州

河川工学の分野では、淵は深掘れ部であり、洪水時に破堤を引き起こす原因となるため古くから注目されてきた。特に洪水時の深掘れ部や水衝部の推移が研究課題となり、流体力学を基礎にした河川水理学の分野がこの課題に取り組んできた。これらの研究は、主として比較的緩勾配な沖積地河川を対象に行われており、この点において急流河川を対象とする砂防工学と異なる展開を示している。

実験水路を用いた砂州の発生実験では、木下（1954,1957）が先駆的な業績を残している。彼は直

線的な実験水路において交互砂礫堆（交互砂州）を発生させ、その形状特性や発生に必要な水理条件に関する研究を行っている。また、蛇行流路の発生原因を河岸の側刻に求めてきたこれまでの諸説に対して、砂礫堆の形成が流水を蛇行させる要因であるとして、その後の蛇行成因論に大きな影響を及ぼした（高山，1974）。

今日では、河道の平面形状と密接な関係にある砂州の配置形態は、川幅水深比 B/H に規定されることが明らかにされている（鮭川ら，1992）。なお、ここで使用されている川幅 B 及び水深 H は、平均年最大流量に応じた川幅・水深の平均値である。この平均年最大流量は、回帰年が2～3年程度であり、計画洪水流量（150年確率洪水）の3～4分の1程度、年一回生じる洪水流量の3倍程度である（山本，1994）。つまり、沖積河川では、回帰年にして2～3年の出水によって砂州が形成されると考えられている。こうした砂州と川幅水深比の関係は、多くの水路実験や実際河川の空中写真判読、または現地調査によって明らかにされてきた。

図-7は、典型的な砂州の形状を示したものである。図中左の交互砂州は、他の多列砂州との対応から単列砂州とも呼ばれ、川幅水深比が10～20程度以上になると形成される。そして川幅水深比が70～100程度以上になると図中央の複列砂州が、扇状地河川のように数百に達するようになると図中右のうろこ状砂州が形成される。

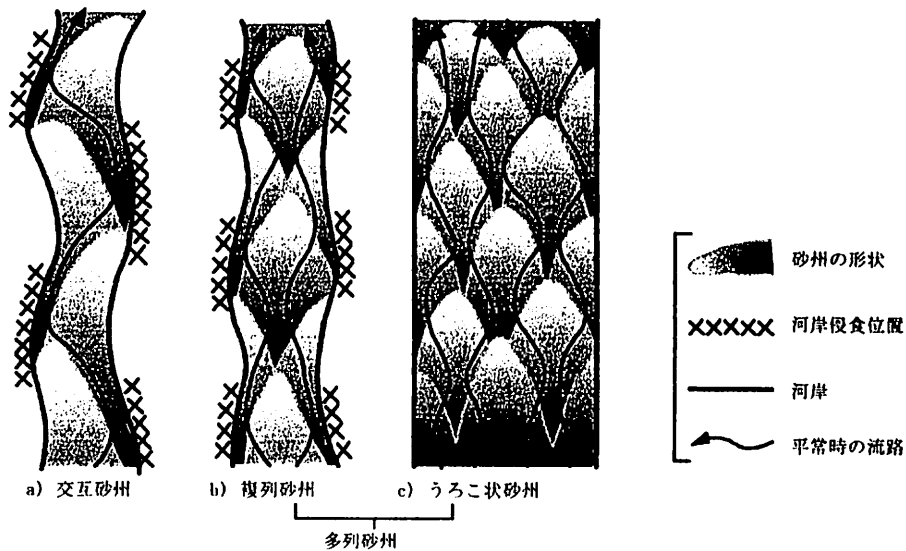
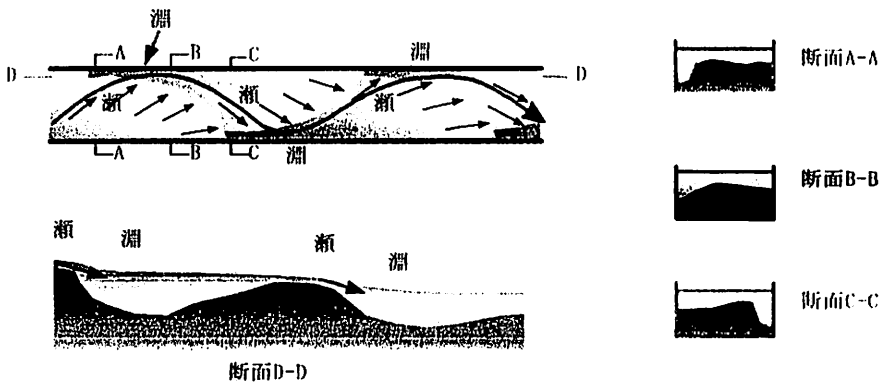


図-7 砂州の種類

（鮭川ら，1992：河川工学，鹿島出版会，pp105より作成）

ただし実際の河川では、洪水時の水深に応じた砂州に変形する前に水深が小さくなったり、小規模な出水でも砂州の移動が起こったりするため、同一河道内に異なる規模の砂州が発生することもある（鮭川ら，1992）。また河床形状は、水理条件の時間的变化、地形・地質・植生及び砂礫の特性の場所的な分布、河道に加えられた人工的条件など数多くの外的条件の影響を受けて非常に複雑かつ不規則である（水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会，1973）。よって実験水路とは異なって、実際河川では種類やスケールの異なる砂州が混在していると考えられる。

一方、河川地形学（地理学）の分野では、交互砂礫堆に関してより詳細な分類がなされている。これに含まれる部類として先の交互砂州（移動砂礫堆）の他に、水路の湾曲によって水流が偏流する結果生じる強制砂礫堆、蛇行の湾曲が大きいために移動砂礫堆が停止した状態の停止砂礫堆があげられている（池田，1991）。学問分野によって用語の使い方に違いが見られるものの、主として河川工学でいう交互砂州・固定砂州、河川地形学でいう交互砂礫堆が可児のB型に対応している。その中から交互砂州と瀬－淵構造の配置関係を図－8に示す。



図－8 交互砂州と瀬－淵の配置関係
 （銚川ら，1992：河川工学，鹿島出版会，pp105より作成）

2. 瀬－淵構造と反砂堆

砂防工事の主な目的は、山地における土砂生産を防止、あるいは軽減することと、生産された土砂が流水によって下流に運搬され堆積することによって発生する土砂害を未然に防ぐことにある（村野，1971）。そのため、上述したように河川工学では沖積河川を対象とするのに対して、砂防工学では上流域の急流河川を対象とし、土砂水理学的な研究が行われている。

この分野で特に取り上げられてきたのは、流路の安定性にかかわる流砂量の問題である。中でも、流水による砂礫の移動限界、すなわち限界掃流力の問題は古くから主要課題とされてきた。この限界掃流力に関する研究は、流水の掃流力と砂礫の大きさとの関係を求めるために、当初は一様粒径の砂礫を用いた基礎的実験が行われ、その後、実際河川の河床材料が広範囲の粒径から構成されていることを考慮して、混合砂礫を用いた水路実験が進められるようになった。水路実験において混合砂礫が取り扱われるようになると、混合砂礫床が粗砂化する、いわゆるアーミング現象が取り上げられるようになった。近年では、実際河川の河床形態に着目して、階段状河床形すなわちステップ・プールの問題が流砂量との関連で議論されている。この階段状を呈する河床形態が、可児の河川形態区分のA型に相当し、水理学的には反砂堆と呼ばれる河床波によって形成されることが知られている（Takahashi, 1990）。

階段状河床形に関する研究は、芦田ら（1984, 1985, 1986, 1987など）によって先駆的に行われている。一連の研究において、まず階段状河床形の発生機構と形状特性に関する実験的検討がなされたのを皮切りに、実際河川における階段状河床形の構造の把握とそれによって得られた形状特性値から、河床波形成時の出水規模の推定が試みられている。続いて、階段状河床波の形成・破壊過程及びプー

ル部における砂礫の貯留過程の考察を通して、流砂の量的・質的な変化に関する理論的・実験的研究が行われている。その他にも、階段状河床波上の流れと抵抗則に関する研究など多くの報告がなされているが、以下では可児の河床形態区分のA型に関連する階段状河床形の構造と形成過程について、上記の文献を引用しながら説明を試みる。

一般に山地河川には、一連のステップとプールからなる階段状の河床形態が見られる。これは、巨礫が流路横断方向に連なってステップを構成し、その上・下流側にプールが存在するという繰り返しの構造からなっている。これが、階段状河床形あるいはステップ・プール構造と呼ばれる河床形態である（図-9）。この階段状河床波は、上述したように、小規模河床波の一種である反砂堆と一致した波長を持っている。また、その波高は水路床表面のアーマ・コートの平均粒径程度であることが、実験水路と実際河川の双方において確認されている（芦田ら、1984,1985）。

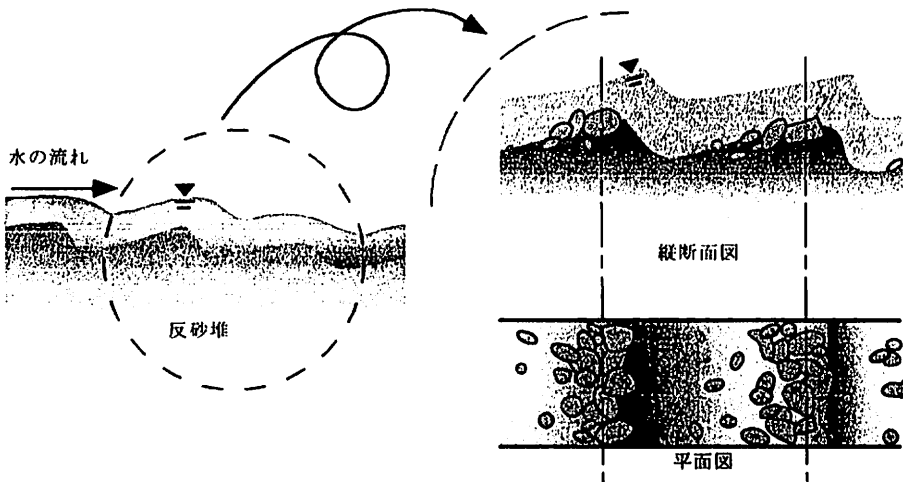


図-9 階段状河床波の構造

ステップ構造の形成過程に関しては、水路実験での観察から、分級砂礫による反砂堆の形成とその固定化、ならびに河床波の峰付近への巨礫の集中といったプロセスが推察されている。まず形成初期において、河床面の混合砂礫の中からある範囲の粒径が分級流送され、それを材料に河床には反砂堆が形成される。次に、この反砂堆の凹凸によって流水の掃流力が不均一になり、また局所的な勾配の影響が現れて、反砂堆の下流側の峰部から谷部にかけては最大径程度の砂礫も間欠的な移動を示すようになる。こうして谷部を越えた砂礫は次の峰部に掃流されるが、ある大きさを越える礫は、峰部の直上流にある逆勾配の河床によってこの峰を乗り越えることができずに停止してしまう。同時に、河床表面の分級が進み、流砂運動が減衰して反砂堆は固定される。また間欠的に移動する比較的大きい砂礫は、先に停止した砂礫に接触して停止したり、局所的な勾配の影響を受けて停止する。このようにしてステップ構造が形成されるものと考えられている（芦田ら、1984）。

以上が階段状河床形の構造及び形成過程に関する従来の知見である。ただし、この説明は、主として水路実験から導かれた結論である。実際の河川では、規模の異なる出水の履歴を反映した形状特性の異なる河床波が確認されている（芦田ら、1985）。また、これら小規模河床形態と中規模河床形態は、ある水理量の範囲では共存可能とされている（山本、1994）。従って、実際河川の河床面は、局所的な勾配の変化や流路の分岐による水量の減少あるいは流量の断続的变化に伴って、種々の河床波が混在した複雑な形状を呈しているものと考えられる。よって、これまでの実験的研究を一般化するには、さらに多くの実際河川における調査が必要となってくる。

IV 淵の分布特性

1. 淵の分布調査の目的

近年各地で、環境及び景観への調和に配慮した様々な河川事業が行われつつある。中には河川環境の保全を指向して、早瀬を真似た全面魚道や淵を含めた蛇行常水路を造成する工事も多く見られるようになった。河川を自然環境の一部として捉え、環境保全事業を展開していくことは今後も必要とされる。しかし、河川生態系に大規模な改変を加えるような工事は、十分な学問的知見に基づく検討を経て慎重に実施されなければならない。

II章で述べたように、瀬-淵構造は、多様な生物の生息を保障する重要な環境構成要素であり、この瀬-淵構造を積極的に保全していくことは、今後の河川事業において重要な課題となる。単に瀬や淵の形状を真似たこれまでの造成事業に留まらず、それらを生物の生息にとって意義のある環境構成要素として機能させるには、できるだけ自然な状態で瀬-淵構造を形成・維持させることが望ましい。そのためには、瀬-淵構造の形成に関わる水理的条件を把握する必要がある。

III章で、瀬-淵構造及びステップ・プール構造に関連する河床波の水理的特性について述べているが、これまでの河床波に関する研究は、実験的研究が主であったため、それらの実際河川における形状・分布特性を明らかにしていく必要がある。また、生物の生息に直結するより微少な環境構成要素は、瀬-淵の河川構成単位内に分布しており、それらに対象を絞って調査することも重要である。

本研究では、こうした観点に沿って、淵の規模とその分布特性に焦点を当てている。河川生態学の分野では、形態や成因から淵のタイプを五つに分類している（川那部ら、1957；水野ら、1972）。この中で主に調査対象となる淵は、流路の屈曲部に形成されるM型の淵である。この淵は、他の4タイプに比べ一般に水面面積や水深が大きく、景観面からも漁業目的からも最も重要視されている（川那部ら、1990）。また、砂州との配置関係から、形成過程を規定する水理量はその形状特性に反映され易いものと推察される。

このM型の淵の規模や形状が河川縦断方向に対して変化していくことは自明であるが、そこにどのような法則性があるかは知られていない。そこで、河道内に点在する淵を対象に、河口から上流に向かって淵の長さを計測した。得られた淵の長さを河川縦断方向に並べ、淵の存在場所によって河床勾配や流量と如何なる対応関係にあるかを検討していくことにする。

2. 淵の分布調査の方法

調査範囲や対象となる淵の選定方法・計測方法について述べる。計測対象となるM型の淵は、主として可児の河川形態区分のBb型に多く見られる。本調査対象河川である能生川の河川形態は、河口

から流路延長の中間点までがほぼBb型，そこから上流がAa-Bb推移型，さらに源頭部付近に近づく
とほぼAa型に限られてくる。そこで調査範囲は，河口を出発点として上流域でM型の淵が見られる
限界地点までとした。

調査対象となる淵は，上述の調査範囲の中から無作為に抽出することを原則とした。しかし，実際の
調査においては，単位距離あたりの淵の数が少ない下流域でほぼ全ての淵を計測し，相対的に淵の
数が多い上流域では接近しやすい場所の淵を選んで計測する場合もあった。

一般に個々の淵の長さは，流量変動に伴って多少変化しているものと考えられる。そこで計測に際
しては，流出状況の等しい条件下で，短期的に集中して実施する必要がある。また，淵の長さを一義
的に決定可能とするため，本研究においては淵の長さを以下のように定義した。すなわち，早瀬を
経て淵に流入する落ち込み地点から，淵を経てその後流速が速くなり始める流速変換点までである。そ
の際，起点となる淵頭の位置は滞筋付近の流速・水深・水面勾配の変換点とし，終点となる淵尻の位
置は滞筋の流速が速くなりだす位置とする。しかし淵尻には平瀬が続き，流路が末広がりとなって滞
筋を確認できないことも多い。このような場合には，水路横断方向に流速の変換点を等間隔で三ヶ所
定め，各所で得られる三つの長さを平均してその場所の淵の長さとした。

淵の生物生息環境としての機能をふまえて，主に淵を生息場所とする魚類を想定すると，彼らの利
用範囲はこの様に定義した淵とほぼ一致している。この定義によると，河床型で区別されている平瀬
の一部も淵に含まれるが，通常のみならず増水時の避難場所（玉井ら，1993）としての淵の役割を考
えると，やや大きめに淵を定義することに問題はないものと判断した。

3. 調査対象河川の概要

新潟県西頸城郡能生町を流れる能生川は(図-10)，
容雅山(1,498.5 m)・火打山(2,462 m)の裾野を水
源とし日本海に注ぐ全長約25km，流域面積104km²強
の二級河川である。その主立った特徴として，流路
延長と源頭部の標高から日本有数の急流河川の一つ
と言えよう。

能生川は大規模河川とは異なり，山地急流河川が
谷底平野を流下して扇状地を持たぬまま直接海へ達
するような河川形状を呈している。そのため流下過
程において分級作用が発揮されず，勾配や河床材料
の粒径がほぼ一定となる河道区間（セグメント）が
明瞭でない。流路延長に対する河床勾配の変化は，
極めてなめらかな変動を示している（図-11）。た
だし，河口より23kmの地点からは山腹をほうよう
に河道が延びており，その一点が河床勾配の遷移点となっている。

能生川の右岸側と左岸側の流域面積は，それぞれ43.47km²，60.25km²であり，やや左岸側が大きい(図-
12)。左右両流域ともに，中・下流域で特に大きな支流が入り込むことはなく，流路延長に対する流
域面積の関係は連続的な変化を示す（図-13）。

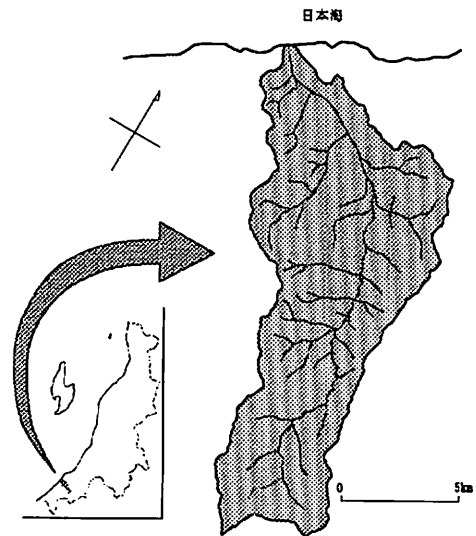


図-10 能生川の位置および流域図

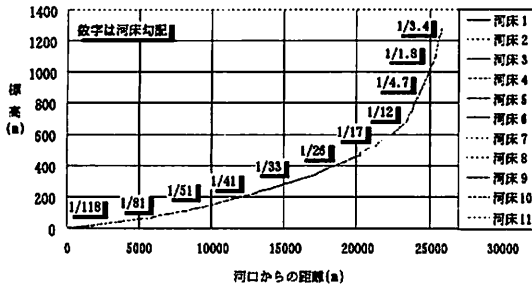


図-11 能生川縦断面図

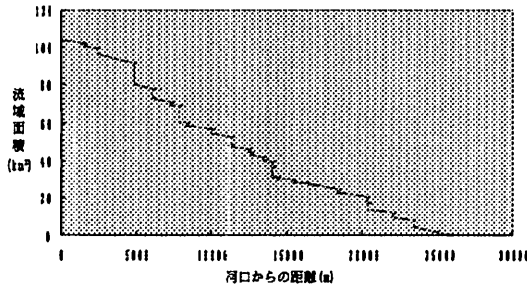


図-13 縦断面方向の流域面積の変化

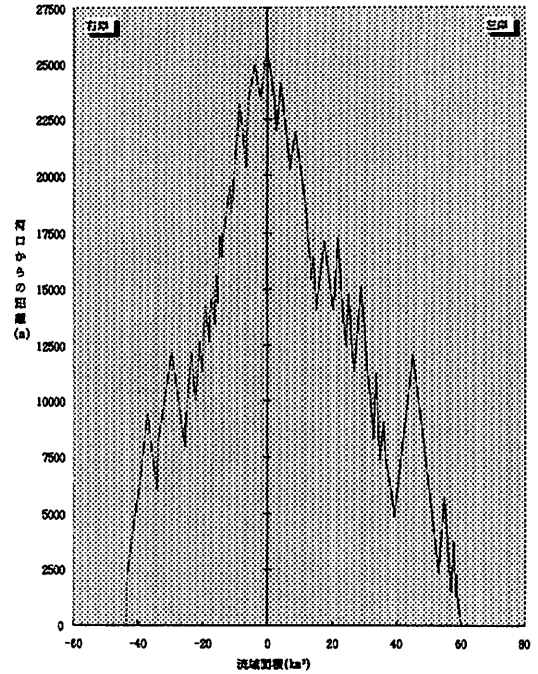


図-12 縦断面方向の流域面積の変化

4. 淵の分布調査の結果

本研究においては、合計40個の淵について調査した。先述したように、流路延長の中間点を境として下流方向では、ほぼ全ての淵を計測した。しかし上流方向では、河道に至る道がないため接近できる場所を選んで、周辺に点在する淵だけを計測する場合もあった。

源頭部に近い上流域では、砂州を伴うM型の淵がほとんど見られなくなり、代わって岩盤床やステップ・プール構造によって形成されたS型の淵が顕著に見られるようになった。このS型の淵は、底質の固さの違いによって相対的に軟部が侵食を受けて形成される。この源頭部付近では、成因の異なるM型とS型の2つの淵の長さに、大きな差が見られなかった。また、これより数キロメートル下流のAa-Bb推移型の河道区間では、流路が谷壁にぶつかるたびにM型の淵が形成されていた。さらに下流の人工河道区間では、規模の異なる淵が数多く点在したり、数百メートルに渡って早瀬または平瀬が連続する区間も見られた。

図-14より、全体的な傾向として淵の長さは上流側に向かって小さくなっていることがわかる。これは、淵の長さを規定する水理量が河川縦断面方向に対して変化することによるものと推察される。しかし河口からの距離が同じ地点でも、淵の長さに2倍以上の開きが生じていることもあり、その長さは概して多様である。近隣する場所で確認される淵の長さの違いは、出水の履歴や人工工作物の影響または形成される河床波の種類などに起因するものと考えられる。

こうした淵の長さの大小関係に付随して、それぞれの淵頭及び淵尻付近の形態上の特徴を指摘することができる。まず比較的大きな淵の特徴として、その淵頭に接続する上流側の早瀬は、ほぼ完全に河道を横断して斜めに流入している。その淵尻には、小さめで均等な砂礫が多量に堆積している。また小規模な淵の特徴として、上流側の早瀬は直線的に接続することが多く、その淵尻付近には砂礫の

堆積が少ない。ここでは逆に、重なり合った巨礫が淵の伸長を妨げるように分布している。

こうした淵尻付近の巨礫は、流路横断方向へ帯のように連なっていることから、出水時に形成された砂礫堆の前縁部である可能性が高い。これらが淵尻付近に位置していることで、周辺部の侵食が阻止され、淵の維持に寄与しているものと考えられる。このことは、砂礫堆の規模と淵の長さに密接な関係があることを示唆している。仮に砂礫堆前縁部が淵の長さの規定要因であるとすれば、河道を横断する大規模な砂礫堆をもとに形成された淵は大きく、小規模な砂礫堆をもとに形成された淵は小さくなることが予想される。

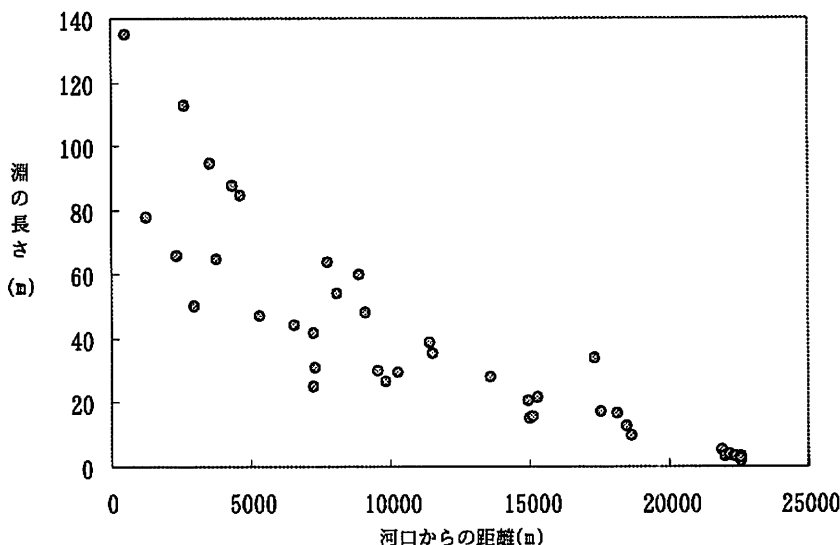


図-14 淵の長さの変化

そこで、計測した40個の淵の中から、河道を横断する交互砂礫堆（交互砂州）をもとに形成された淵のみを選定し、河川縦断方向にその長さを見ていくことにする。砂州の形態は川幅水深比に規定されるため、砂州をより処として形成された淵の長さにも川幅水深比に関係する法則性が見出せるものと推察される。交互砂礫堆をより処として形成された淵の選定条件には、視覚的判断のし易さと水文学的根拠の点から次の三項目を用いた。

1. 淵の上流側に連なる瀬が河道を斜めに完全に横断していること。
2. 出水時に流水が集中する淵であること。
3. 人工工作物の影響が無視できる淵であること。

まず1と2の条件は、河道内の典型的な交互砂礫堆をもとに形成されている淵を選定するための条件である。この砂州は、河道の湾曲角 θ が 20° 以上になると移動しなくなる（三輪, 1974; 木下ら, 1979）ことから、水理学の分野では移動砂州と停止砂州とに分類されている。しかし現地でそれを判定することは、極めて困難であるため、ここでは移動・停止の概念を無視して現時点での淵の長さを対象とした。

3の人工工作物の影響とは、橋脚・頭首工・根固などの構造物による淵尻及び淵頭への影響である。

人工工作物に規制されている淵は、排除した。なお、図-14の17,000 m付近に見られる大きな淵は、早瀬から淵への流入地点で流路が分岐しているため除外した。以上の判定の結果、この三つの条件を満たす淵は合計20個となり、これらをプロットしたのが次の図-15である。

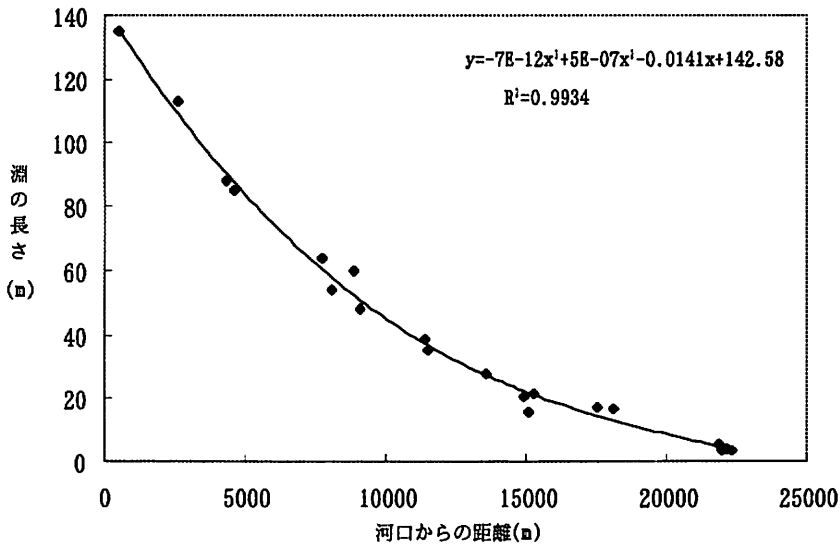


図-15 条件付きの淵の長さの変化

図-15から、交互砂州をもとに形成された淵の長さには明瞭な法則性が見られる。これらの淵は、いずれも交互砂州及び固定砂州をもとに形成されている。単列砂州や多列砂州の形態が川幅水深比によって規定されることは、III章で触れた。さらにこの川幅水深比は、河床材料の代表粒径・河床勾配・支配流量の三量によって評価できるとされている（山本，1994）。よって砂州をもとに形成された淵の形状も、この三量によって評価できるものと推察される。

能生川の流域特性を見てみると、この三量の中で代表粒径は、本川に対して多量の土砂を供給する支川がないため、河川縦断方向で急変しないと推察される。また河床勾配については、調査対象河川の概要で示した縦断図から、河川縦断方向に対して滑らかに変化することがわかる。流量は、河川縦断方向に対する集水面積の変化から、流下の過程にほぼ一定の割合で増加するものと予想される。このように、河川縦断方向に対する三量の変化が滑らかな推移を示すため、淵の長さに図のような傾向が現れるものと考えられる。

さらにこの三量について考察し、淵の長さを示す数式を誘導する。代表粒径の縦断方向に対する変化は、主に分級作用の結果として捉えられることができる。よって代表粒径は、流量及び河床勾配に規定されると見なされる。流量は、ラショナル式に見られるように集水面積と置き換えることができる。従って、淵の長さは集水面積と河床勾配で評価され、次式によって表せる。

$$L = f(A, I_b) \dots\dots\dots ①$$

ここに、 L は淵の長さ、 A は集水面積、 I_b は河床勾配である。

ここで、淵の長さが集水面積及び河床勾配のべき関数であるとして次式を仮定する。

$$L = k A^\alpha I_b^\beta \dots\dots\dots ②$$

ここに、 k は比例定数、 α 及び β は集水面積 A と河床勾配 I_b の指数（定数）である。②式に実測値を代入し、各定数を算出すると、 $k=0.11$ 、 $\alpha=1$ 、 $\beta=-0.5$ という結果が得られた。従って、②式は次式のようになる。

$$L = 0.11 \frac{A}{\sqrt{I_b}} \dots\dots\dots ③$$

図-15の淵の長さの実測値と③式の計算値を比較したものが、次の図-16である。

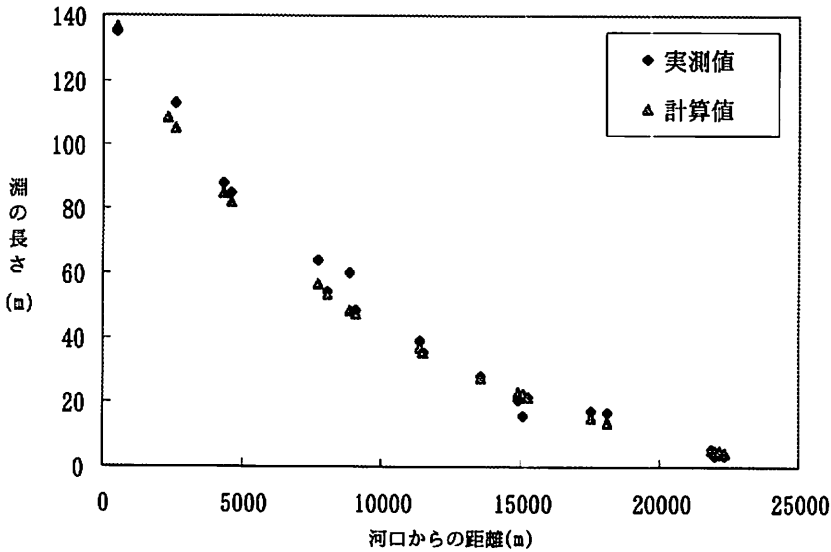


図-16 淵の長さの実測値と計算値

能生川における③式の適用範囲は、集水面積が104~11km²、河床勾配が1/125~1/13の範囲である。③式によると、淵の長さは集水面積に比例し河床勾配の1/2乗に反比例することになる。仮に比流量が河川縦断方向に対して一定であるとすれば、淵の長さは流量に比例することになる。一方、河床勾配については、限界掃流力の面から淵の長さに対する影響を考察する。

まず、礫の移動限界状態を考えると、河床面に働くせん断力 τ_0 、及び礫に働く限界掃流力 τ_c は、次式によって与えられる。

$$\begin{cases} \tau_0 = \rho g R I_b \approx \rho g h I_b & \dots\dots\dots ④ \\ \tau_c = C (\sigma - \rho) d & \dots\dots\dots ⑤ \end{cases}$$

ここに、 ρ は水の密度、 σ は礫の密度、 g は重力加速度、 R は径深、 I_b はエネルギー勾配、 h は水深、 d は礫の直径、 C は比例定数である。ここで限界掃流力状態を仮定し、④、⑤式を等値関係とすれば、河床勾配は次式で表現される。

$$I_b = \frac{CS d}{g h} \dots\dots\dots ⑥$$

ここに、 S は礫の水中比重で $(\sigma - \rho) / \rho$ であり、その他に C 、 g を含む第一項目は、定数として扱える。従って、河床勾配は、水深を粒径で除した相対水深と反比例の関係にあることがわかる。

③式に⑥式を代入すると、新たに定数をC'として、③式は

$$L = C'A\sqrt{\frac{h}{d}} \dots\dots\dots ⑦$$

と書き換えられる。⑦式より、淵の長さは相対水深の1/2乗に比例することになる。すなわち、河床材料が大きく水深の浅い上流域においては、相対水深が小さく、従って淵の長さが短くなる。

以上をまとめると、淵の長さは集水面積と河床勾配によって評価され、集水面積とは比例関係に、河床勾配とはその1/2乗に反比例する関係にある。さらに、水深を粒径で除した相対水深とはその1/2乗に比例する関係にある。淵の長さに関する上述の関係は、能生川においては河口から源頭部付近まで適用可能な法則性である。

V お わ り に

近年全国各地で実施されている環境及び景観に配慮した河川事業について、学問的裏付けが不十分であることを指摘した。河川環境と調和した今後の河川事業の推進に際しては、河川生態学の知見が不可欠となる。そこで本研究では、まず最初に、水生生物の生息環境として生態学的に重要視されている瀬-淵構造に焦点を当て、その構造と機能について、さらに瀬-淵構造の形成に關与する河床波の水利的特性について、従来の研究を総括した。

瀬-淵構造に関する構造・機能・動態を把握した上で、淵の分布特性を明確にすることを目的として現地調査を実施した。その結果、本調査対象河川である能生川において、河川縦断方向に対する淵の長さの変化に法則性が見られた。調査結果に基づき、淵の長さの支配要因を検討して淵の長さを表す数式を得た。淵の長さは集水面積と河床勾配によって評価され、集水面積とは比例関係に、河床勾配とはその1/2乗に反比例する関係にある。また、水深を粒径で除した相対水深とは、その1/2乗に比例する関係にある。淵の長さに関するこのような法則性は、能生川の河口から源頭部付近までを対象とした調査結果に基づくものである。ただし、どの程度一般性があるかが不明であるため、他の河川をも対象として調査を行い、この法則性の適用度を見るのが今後の課題となる。

河川工事及び河川管理のあり方を検討する上で、河川が本来有している特性を明らかにし、それを積極的に生かすことが肝要である。瀬-淵構造の分布状況は、河川の有している特性を反映する本質的な環境要素と考えられる。従って、今後環境及び景観との調和を指向した河川事業を目標とする際には、瀬-淵構造を保全することが中心的な課題となる。こうした課題の実現に向けて、本研究で明らかにされた淵の分布特性に関する法則性は、適切な施設の配置計画の策定に際し、重要な示唆を与えるものと考えられる。

文 献

- 水野信彦(1995)：魚にやさしい川のかたち、信山社。
井良沢道也・佐藤義晴・菊池昭紀・長谷川達也(1995)：自然環境に配慮した常水路の検討事例（一自然営力を活用した生態系にやさしい川づくりー）、新砂防、Vol.48, No.2, pp.31~34。
竹門康弘(1992)：動物生態学から見た多自然型河川のあり方、水環境学会誌、Vol.15, No.5, pp.19~24。
崎尾 均・鈴木和次郎(1997)：水辺の森林植生（溪畔林・河畔林）の現状・構造・機能および砂防工事による影響、砂防学会誌、Vol.49, No.6, pp.40~48。
丸井英明(1993)：環境及び景観に配慮した砂防技術のあり方について、新潟大学積雪地域災害研究センター研究年報、第15号、pp.1~28。

- 丸井英明(1997)：景観と砂防（－海外の事例を交えて－），砂防学会50周年記念シンポジウム講演集，pp.63～83.
- 可児藤吉(1944)：溪流棲昆虫の生態，可児藤吉全集（1970），全一卷，pp.3～91，思泉社.
- 竹門康弘・谷田一三・玉置昭夫・向井 宏・川端善一郎(1995)：棲み場所の生態学，平凡社.
- 玉井信行・水野信彦・中村俊六(1993)：河川生態環境工学，東京大学出版会.
- 井上幹生・中野 繁(1994)：小河川の物理的環境構造と魚類の微生物場所，日本生態学会誌，Vol.44，No.2，pp.151～160.
- 丸山 隆(1981)：ヤマメとイワナの比較生態学的研究，日本生態学会誌，Vol.31，No.3，pp.269～284.
- 竹門康弘(1991)：動物の目から見た河川のあり方，関西自然保護機構会報，No.13，pp.5～18.
- 谷田一三(1996)：生息場所・種・生態関係の多様性から「多自然の川作り」を考える，水処理技術37，pp.443～451.
- 伊勢屋ふじこ・池田 宏(1986)：混合砂礫を用いた大型実験水路（－混合効果による勾配の急変と堆積構造の違い－），筑波大学水理学実験センター報告，No.10，pp.125～134.
- 伊勢屋ふじこ・池田 宏(1989)：実験水路における堆積段丘と侵食段丘（－供給岩屑量の減少に伴う段丘形成－），地形，第10巻，第4号，pp.323～342.
- 木下良作(1954)：砂レキ堆と掃流うねりに関する研究(2)，栃木県砂防委託調査報告書，(木下，1971より引用).
- 木下良作(1957)：河床における砂レキ堆の形成について（－蛇行の実体の一観察－），土木学会論文集，第42号，pp.1～21，(木下，1971より引用).
- 木下良作(1971)：河川の蛇行現象と河道計画，科学技術庁資源調査所.
- 高山茂美(1974)：河川地形，共立出版.
- 鮭川 登・大矢雅彦・石崎勝義・荒井 治・山本晃一・吉本俊裕(1992)：河川工学，鹿島出版会.
- 山本晃一(1994)：沖積河川学（－堆積環境の視点から－），山海堂.
- 水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究委員会(1973)：移動床流れにおける河床形態と粗度，土木学会論文報告集，第210号，pp.65～91.
- 池田 宏(1991)：河川蛇行の成因に関する研究の歩みと今後の課題，筑波大学水理学実験センター報告，No.15，pp.11～19.
- 野村義郎(1971)：砂防工学.
- Goichiro TAKAHASHI (1990)：A Study on the Riffle-Pool Concept，地形，第11巻，第4号，pp.319～336.
- 芦田和男・江頭進治・安東尚美(1984)：階段状河床形の発生機構と形状特性，京都大学防災研究所年報，第27号，B-2，pp.341～353.
- 芦田和男・江頭進治・沢田豊昭・西本直史(1985)：山地河道における階段状河床形の構造，京都大学防災研究所年報，第28号，B-2，pp.325～335.
- 芦田和男・江頭進治・西本直史(1986)：階段状河床波上における流砂機構，京都大学防災研究所年報，第29号，B-2，pp.377～390.
- 芦田和男・江頭進治・西野隆之(1986)：階段状河床波上の流れと抵抗則，京都大学防災研究所年報，第29号，B-2，pp.391～403.
- 芦田和男・江頭進治・西野隆之・亀崎直隆(1987)：階段状河床波の形成・破壊過程における流砂機構，京都大学防災研究所年報，第30号，B-2，pp.493～506.
- 川那部浩哉・水野信彦・宮地伝三郎・森主 一・大串竜一・西村 登(1957)：遡上アユの生態2（－特に生息密度と生活様式について－），生理生態，7(2)，pp.145～167（水野・御勢，1972より引用）.
- 水野信彦・御勢久右衛門(1972)：河川の生態学，築地書館.
- 川那部浩哉・水野信彦(1990)：川と湖の魚②，保育社.
- 三輪 式(1974)：実際河川における砂レキ堆の移動と安定の限界角度，昭和49年農業土木学会講演会（木下・三輪，1979より引用）.
- 木下良作・三輪 式(1979)：砂レキ堆のが安定化する流路形状，新砂防，94，pp.12～17.