

千代川の淵の構造と魚類の生息

藤田 正治・道上 正規

土木工学科

(1995年9月1日受理)

Formation of Pools and Habitat of Fishes in Sendai River

by

Masaharu FUJITA and Masanori MICHIE

Department of Civil Engineering

(Received September 1, 1995)

Of elements composing river environment, pools and shoals play an important role in habitats of fishes. We investigated the geometrical and hydraulical features of a few pools of Sendai River and observed the situation of habitat of fishes. The results indicated that the pool naturally formed in the channel bend of the upstream region gave the inhabitable place to fishes due to the non-uniform structures of flow and river bed topography. The formation process of pool was also investigated theoretically and observationally with a focus on step-pool formation in mountain rivers. The comparison between theoretical and observational results showed that the structure was formed by the flood occurring once five years and the interval of the pool can be calculated by the presented method.

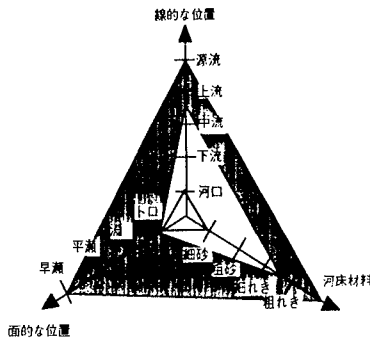
Key words : Step-pool formation, Habitat, River environment

1. 緒言

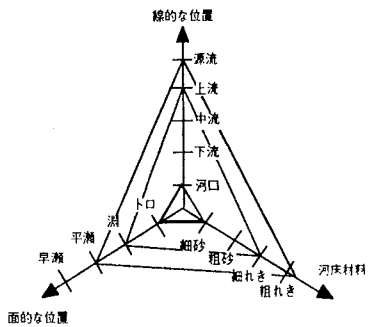
河川環境整備の要望が高まる中、多自然型河川工法が取り入れられるようになり、河川周辺の様相は数年前のものとはかなり変わってきた。しかし、環境整備により造られたものが生態系の保全・育成や親水性の改善に十分寄与したとは言えず、むしろ多くの問題点を抱えたままであるというのが現状であろう。したがって、河川環境を構成している諸要素について、水理学的側面や生物学的側面などからさらに詳細に検討し、その成果を環境整備に取り入れなければならない。

河川環境を構成している諸要素の内、淵の存在は視覚的な景観において不可欠であるばかりか、魚類の生息にとっても重要である。そこで、魚類の生息環境について実例を挙げて少し考えてみよう。いま、魚類の生息環境としての河川を議論する場合、河川を線として見るだけでなく、面として扱わなければならない。なぜなら、流

速、水深、水質、水温、河床材料、河床形状など魚類の生息に影響を与えられる土砂水理学的要因はマクロにみると上流から下流に線的に変化しているが、ミクロにみると面的にも著しく変化しているからである。そこで、千代川に生息する代表的な魚としてヤマメ、オイカワを取り上げ、生息環境[1]、[2]を線的な位置(源流→上流→中流→下流→河口)、面的な位置(トロ→淵→平瀬→早瀬)、河床材料(細砂→粗砂→細礫→粗礫)の三つの要素から整理し、成魚の生息場所と産卵場所別に図示するとFig.1(a)、(b)のようになる。この図に示すように、生息環境は魚種によって線的な位置だけでなく面的な位置も異なっていることがわかる。また、一般的に産卵は生息領域の中の特定の場所を選んで行われているようである。したがって、多くの魚類が生息できる環境をもつ河川とは、流速や河床材料が線的にも面的にも変化するような河川である。淵・瀬の構造が魚類の生息に重要であるといわれているのは、淵や瀬の周辺で面

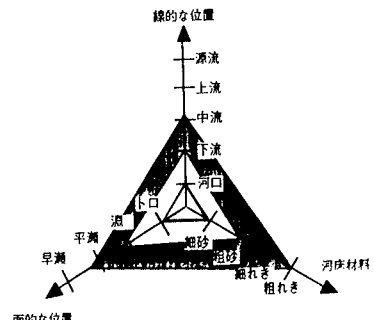


ヤマメ成魚期

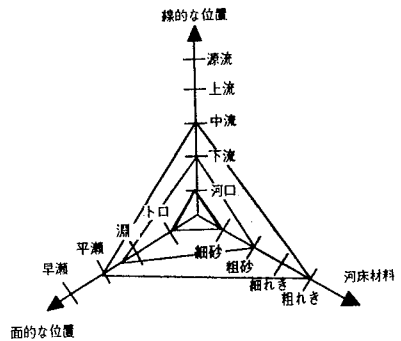


ヤマメ産卵域

Fig.1(a) Habitat of "Yamame"



オイカワ成魚期



オイカワ産卵域

Fig.1(b) Habitat of "Oikawa"

的に流速、水深、河床材料が変化し、色々な種類の魚類が生息できる可能性をもっていると考えられるからである。

本研究では、河川環境を構成している重要な要素として“淵”を取り上げ、魚類の生息に対する淵の役割を調査するとともに、今後の河川整備において淵の規模および形状をいかに決定すればよいかということを確認することが目的である。河川の代表的な淵は弯曲部や溪流部に形成されるが、移動床上に形成されるものと基岩形状そのものが淵になっている固定床上のものがある。本研究では、とくに前者の淵を対象とする。また、淵の形成にはFig. 2のように河道特性、水文特性および土砂生産特性が影響しているが、しばしば人的なインパクトがそこに加えられる。人的なインパクトとは護岸、ダム、堰など河道特性に与えるインパクト、林道、山林の開発など土砂生産特性に与えるインパクトなどのことである。このような研究を遂行するうえでは、つねにどのような人的なインパクトが加えられているかを認識しておくことが重要であるが、本研究ではそのようなインパクトがなるべく小さい自然河道を主に対象とする。まず、第2章では、土砂水理学的に見た淵の分類と千代川におけるその分布について検討する。第3章では、千代川の淵の構造を調査するとともにそこに生息する魚類について調査する。第4章では様々な淵のうち、山地河川でよく見られる階段状河床型の淵の間隔、形状、材料特性について現地調査に基づいて明らかにする。

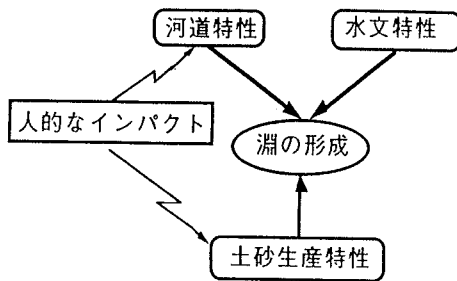


Fig. 2 Factors on the formation of pools in rivers

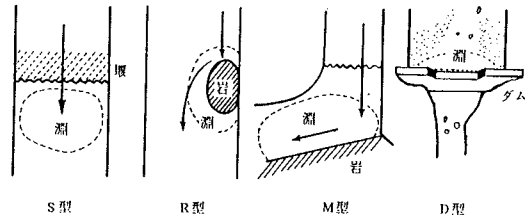


Fig. 3 Classification of pools

2. 淵の分類と千代川における分布

2-1 分類

河川生態学では淵をFig. 3のようにS型、R型、M型、D型に分類している。[3] S型は河床の固さが異なると軟らかい方の部分がえぐられて蛇行点でもないのに生じる淵のことで、たとえば、堰や落差工直下の深掘れや滝壺がこれに当たる。R型は巨大な岩や橋脚部の周辺に生じる深掘れである。M型は河川の蛇行点にできる淵、D型は堰堤などの上流にできる淵である。このような分類法で現地の淵をほぼ区別することはできるが、理論的に淵の形成過程や形状を議論するために、淵を土砂水理学の局所洗掘という観点から分類し直してみよう。Fig. 4および5に土砂水理学的に見た淵の分類とその形成過程を示す。各々の淵の形成過程を簡単に説明すると次のようである。

(1) 階段状河床型

階段状河床形態は連続したステップとプールからなり、山地河川の代表的な河床形態であり、このプールの部分を階段状河床型の淵と定義する。芦田、江頭ら[4]によると、この河床形態は移動床において形成される反砂堆が発達したものであると考えられる。

(2) 落差型

位置エネルギーの大きい水脈が落下することによって形成される淵である。たとえば、山地河川で狭さく部や弯曲部に土石流が堆積すると巨石群の落差ができ、その直下流に大きな淵ができる。また、堰や砂防ダムのような人工的な落差構造物の下流にも淵が形成される。従来の分類のS型がこれにあたる。

(3) わん曲型

わん曲部には遠心力の影響で二次流が発生する。この

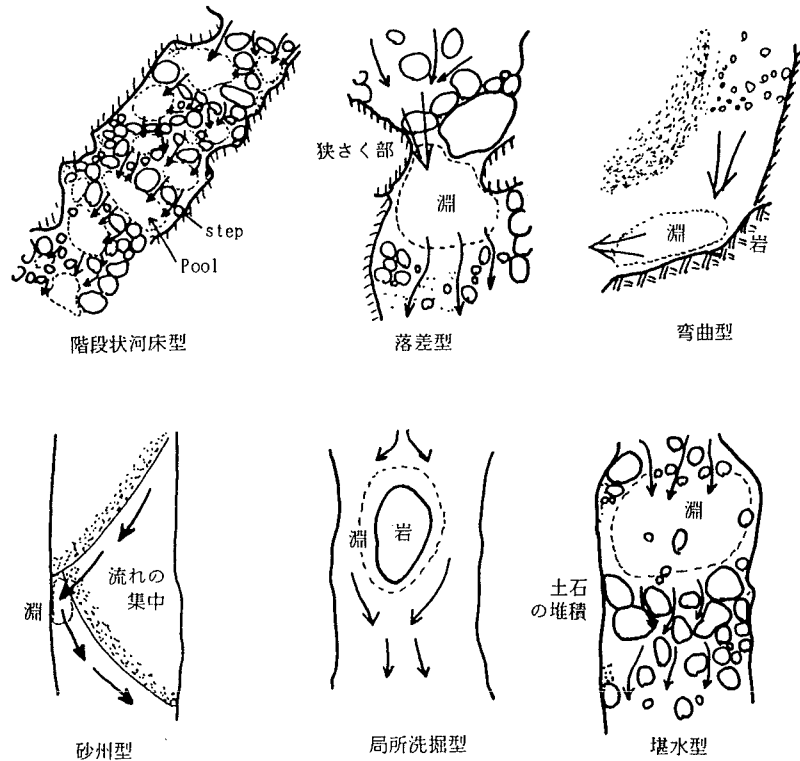


Fig. 4 Classification of pools (from a river morphological aspect)

働きにより外岸側は局所洗掘され、通常深い淵が生じる。M型がこれに相当する。

(4) 砂州型

交互砂州上の流れは蛇行し、側岸付近に流水の集中部が生じる。そのようないわゆる水衝部には淵が形成される。

(5) 局所洗掘型

大岩、橋脚、水制等の周辺は局所洗掘されて淵が生じる。R型に対応する。

(6) 堰水型

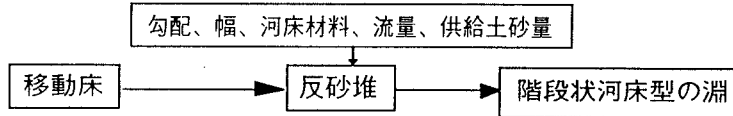
下流側が土石の堆積等によって堰止められてできた淵である。D型がこれにあたる。

以上の淵は移動床上にできる淵であるが、淵が深くなると部分的に基岩が露出している場合もある。また、この他に、基岩が露出して固定床になった個所で基岩の凹部に淵が生じている場合もしばしば見られるが、本研究ではこのような淵は取り扱わない。

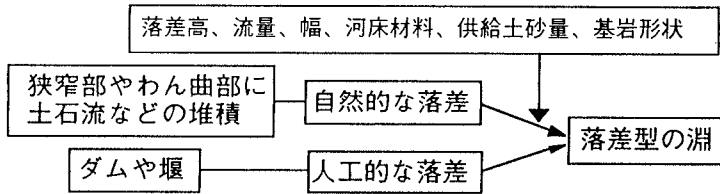
2-2 分布

前項で示した様々な淵が河川の縦断方向にどのように分布しているのかを千代川本川において調査した。Fig. 6はその結果を示したものである。わん曲型の淵は河道の平面形状に起因しているのて上下流全体に分布しているのに対し、砂州型の淵は河口から30km上流までの範囲に発生しており、とくに20km上流までに集中している。また、階段状河床型の淵は河口から30kmより上流に見られる。河川上流域では階段状河床形態上に砂州構造が共存する場合があるので、詳細に検討すると階段状河床型の淵の領域に砂州型の淵を見つけることも可能であろうが、その淵の外見は階段状河床型の淵と変わらないと思われるので、ここでは階段状河床型の淵の領域には砂州型の淵はないものとした。また、Fig. 6によると砂州型の淵が顕著に見られる下流域では階段状河床型の淵は見られない。このような結果から河川の上流を階段状河床型の淵が見られる領域、中流が砂州型の淵がみられる領

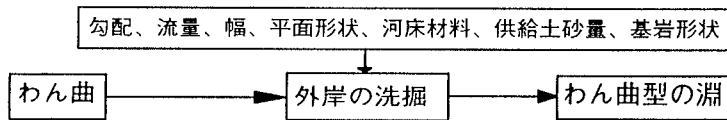
① 階段状河床型



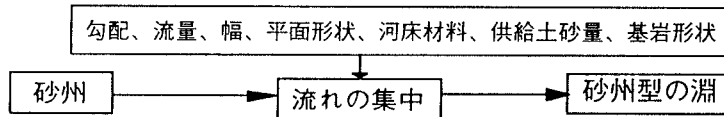
② 落差型



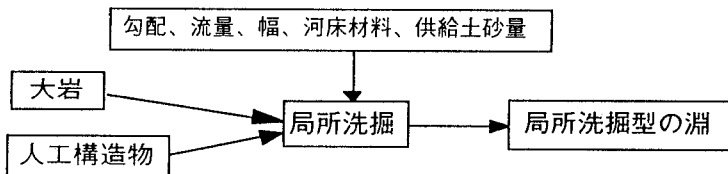
③ わん曲型



④ 砂州型



⑤ 局所洗掘型



⑥ 湛水型



Fig. 5 Process of the formation of pools

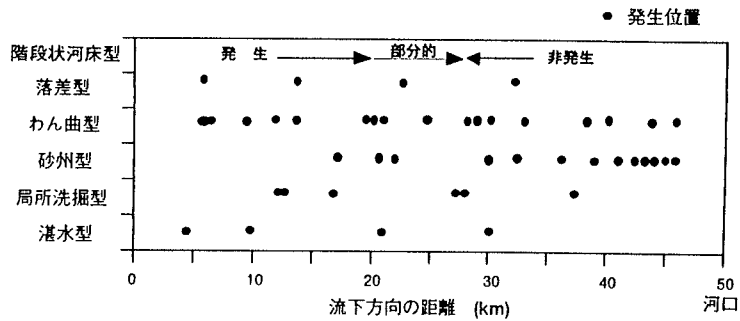


Fig. 6 Distribution of pools in Sendai River

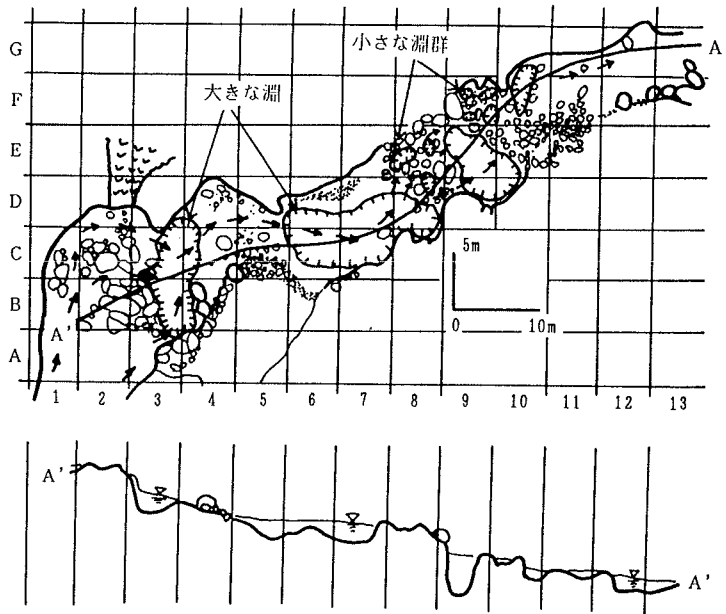


Fig. 7 Plane view of a mountain river and bed profile along line A'-A'

域と定義することが可能である。落差型の淵は主に取水堰の直下流に形成されている。調査区間にいわゆる源流域が含まれていないので、自然の落差による淵は見られなかった。湛水型の淵は取水堰の上流に形成されている。このように千代川においては色々な型の淵がまだ多く存在しており、生息する魚種も多い。また、河口から約30km付近を境に階段状河床型の淵と砂州型の淵の発生領域が区別されるので、このような河道特性の違いを環境整備に活かさなければならない。

3. 千代川における淵の形態と魚類の生息

3-1 渓流域

典型的な渓流域の淵群の特性を明らかにするために、千代川の支流の曳田川上流の柚小屋付近で、平板測量、水準測量によって地形測量を行うとともに、水深分布、河床材料分布を調査した。Fig. 7は河道の平面形状および平面図中の測線A'-A'に沿った縦断面形状を示したものである。上流部のわん曲地点(2, B)、(2, C)、(3, B)

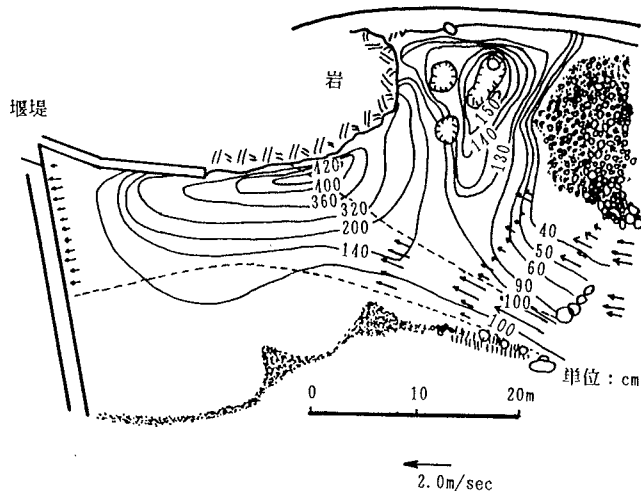


Fig. 8 (a) Equi-depth lines and velocity vectors at water surface in a pool

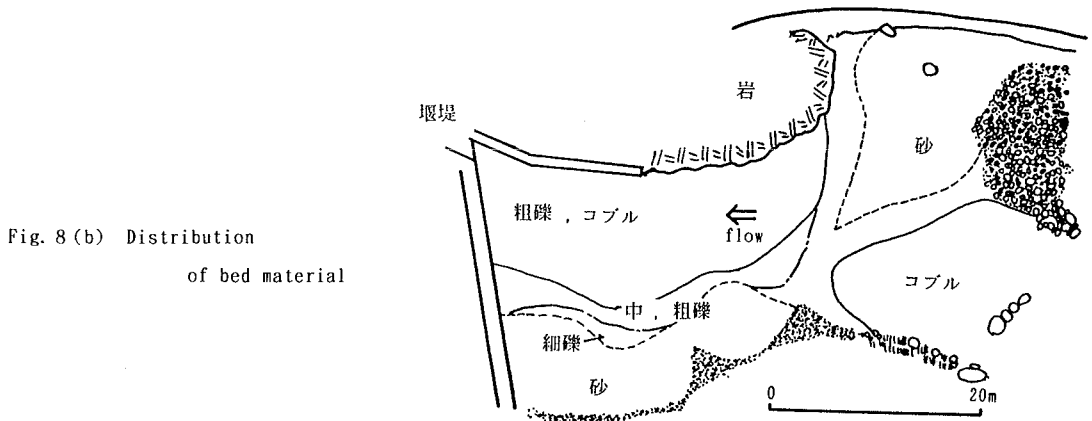


Fig. 8 (b) Distribution of bed material

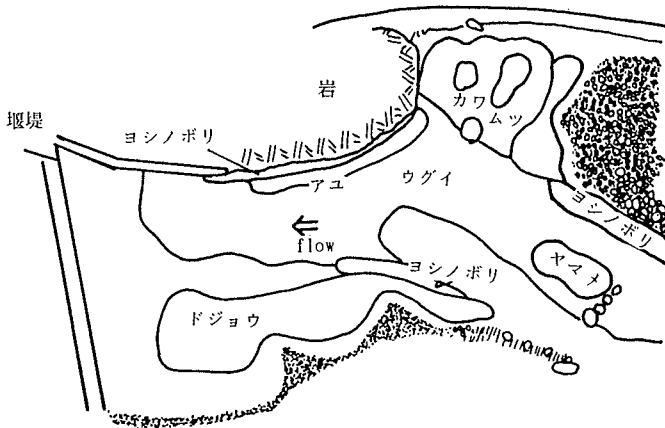


Fig. 8 (c) Habitat of fishes

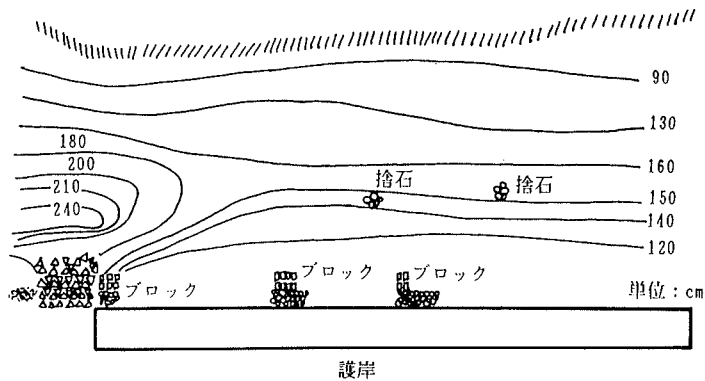


Fig. 9 (a) Equi-depth lines in a pool

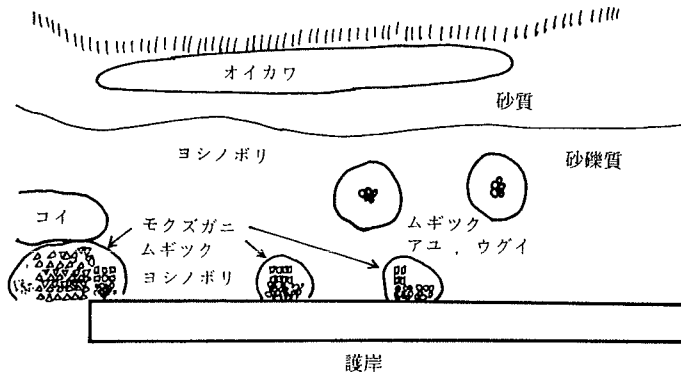


Fig. 9 (b) Distribution of bed material and habitat of fishes

には、粒径1 mから2 m程度の岩が堆積し、約2、3 mの落差を形成している。これは土石流のような巨石を含んだ流れがわん曲部に堆積して落差を作り、その下流に水深2 m程度の深くて大きい落差型の淵ができたものと推察される。淵内のほとんどの河床材料は約2～3 cmの礫で構成されている。その下流の(5, C)や(9, E)の狭さく部にも数十cmの礫が堆積し、落差型の淵を構成している。ついで、(8, E)や(9, F)は瀬になっているが細かくみると規則正しい階段状河床型の淵が形成されている。しかし、この淵は落差型の淵と比べるとあまり大きくない。このように自然溪流では、わん曲部や狭さく部に粒径の大きな石や岩が堆積し、その下流に落差の大きな淵を形成する。また、淵と淵の間の勾配の急な部分には階段状河床型の淵が形成される。なお、この周辺では潜水調査によりヤマメの生息が確認されており、図示したような大きな淵と小さな淵の共存するこの地域は溪流魚の良好な生

息域である。

3 - 2 上流域

千代川上流域の代表的な淵として、智頭町篠坂のわん曲部の淵を対象にして議論する。Fig. 8(a)に等水深線と表面流速ベクトル、Fig. 8(b)に河床材料分布を示す。右岸側は岩盤で、下流には取水堰がある。これらの図から岩盤部は水衝部になっており、水深4 m以上の深い淵が形成されていることがわかる。この個所の河床材料は粗礫やコブルで構成されており、ここから河岸にかけてのいわゆるかけ上がり部では、河岸に向かって細粒化している。岩盤に向かう流れの個所は、コブルで形成されており、その右岸は砂で構成された淀みになっている。Fig. 8(c)はこの淵に生息する魚の分布を示したものである。流速や河床材料の大小に応じて、アユ、ヤマメ、ヨシノボリ、ウグイ、カワムツ、ドジョウなどが住み分けられている。このように、混合砂で構成されたわん曲部に

自然にできた淵においては、平面的に流速、水深、河床材料が著しく変化し、そのため多くの魚種が淵全体で生息することができる。

3-3 下流域

千代川下流の淵として鳥取市叶の淵を調査した。Fig. 9(a)に等水深線、Fig. 9(b)に魚類の生息分布と河床材料分布を示す。この個所には、砂州による流れの集中のために右岸側が洗掘され、淵が形成されている。また、この局所洗掘を防ぐため、根固めブロックが入れられている。最深部で水深240cm程度であり、全体的には小規模な淵を形成している。また、Fig. 9(b)に示すように浅瀬が砂質土、深みが砂礫で構成されているが、それほど幅広い粒度分布にはなっていない。このようなあまり変化のない河道では多くの魚類の生息は望めないが、ここには河道内の2個所に捨て石群が入れられており、この付近に多くの魚種が生息している。また、根固めブロックの周辺にも同様に色々な魚類の生息が確認された。このように、下流域にできる淵の周辺では流速や河床材料が上流部ほど顕著に変化しないが、捨て石や根固めブロックを投入することにより流れに変化が生まれ、多くの魚類が生息できる環境を作り上げることができる。

4. 階段状河床型の淵の形成と形状

4-1 概要

自然河川には様々な形態の淵が形成されるが、階段状河床型の淵は山地河川の環境を構成する重要な要素の一つである。ここでは、千代川支流の八東川とその支川の糸白見川、加地川において、階段状河床型の淵の有無、間隔、形状および河床材料の粒度分布などについて調査するとともに、淵の発生条件や淵の間隔について河道形状や既往洪水流量を考慮して理論的に検討するものである。

4-2 調査区間と調査結果

(1) 調査区間

Fig. 10に示す千代川の支流の八東川、その支流の糸白見川および加地川において、階段状河床型の淵の間隔、深さおよび河床材料の粒度分布などについて調査した。調査区間は八東川で6区間、糸白見川で9区間(うち支川2区間)、加地川で9区間(うち支川3区間)設定さ

れた。これらの測定区間は、八東川では河口から15km付近から50km付近までをカバーしており、糸白見川、加地川では八東川との合流点から約5km上流までが含まれている。一つの区間長は80mから160mであり、その区間の河床形態を簡単な測量によってスケッチし、淵の位置、淵の種類を明確にした。糸白見川においては、1区間だけ平板測量、水準測量等によって淵・瀬の構造を詳細に測定した。各区間の平均河床勾配、平均河幅および河床材料の平均粒径はTable 1のような範囲にある。

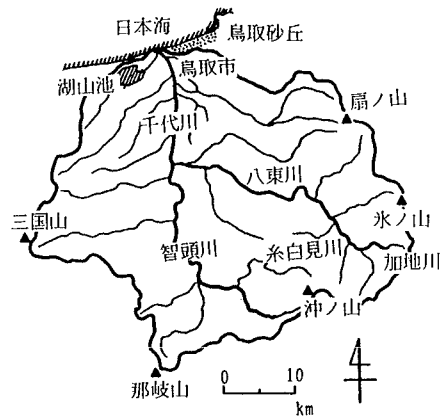


Fig. 10 Investigated field

Table 1 Channel slope, channel width and mean diameter of bed material

項目 河川名	勾配	川幅 (m)	河床平均粒径 (cm)
八東川	1/320~1/30	25~78	7.1~32.5
糸白見川	1/14~1/5	3~9	24.6
加地川	1/34~1/7	3~11	測定せず

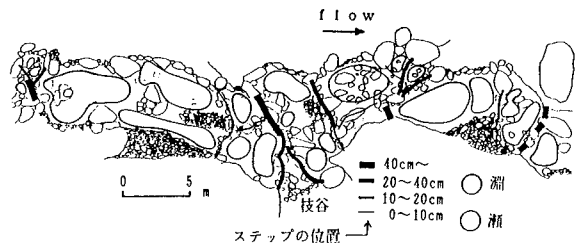


Fig. 11 Plane view of Step-pool formation

表中の河床平均粒径は八東川では各調査地点で実測した結果で、糸白見川では平板測量等を行った地点での実測値である。

(2) 河道平面形状

Fig. 11は糸白見川および加地川における典型的な階段状河床型の淵・瀬の連続構造の例として、糸白見川で測定した河道平面図を示したものである。図中には、淵と瀬の位置とともにステップ（淵の上流側の段差）の位置を水流の落差別に示している。わん曲部や狭窄部には土石流の堆積によると思われる大きな落差があり、その間に小さな階段状河床型の淵が点在している。全ての淵の平均間隔は3.2m、10cm以上の落差のものが5.0m、20cm以上の落差のものが5.6mであり、様々なスケールの淵が共存していることがわかる。

(3) 淵の間隔

Fig. 12は階段状河床型の淵の間隔（階段状河床形の波長に相当）の河川上流方向への変化を調べた結果を示したもので、階段状河床形が発生していなかったり、部分的に発生している地点はその位置のみが示されている。河口から約22km付近から上流に階段状河床形態が見られはじめ、約30kmより上流に明確な階段状河床型の淵が存在していた。この図からわかるように上流ほど淵の間隔は狭くなり、とくに八東川から両支川に入ると間隔が急激に減少している。これは支川に入ると勾配が急激に大きくなるためである。

(4) 河床の粒度分布

Fig. 13はFig. 11に示す区間の河床全体およびステップ（段差の部分）の粒度分布を求めた結果を示したものである。渓流部の粒度分布を求めることは難しいが、ここでは、河道をステップの部分、大きな礫で覆われた部分、砂や礫で構成された部分に分け、資料採集不可能な前2者ではメジャーによる現地計測と写真撮影により粒度分布を求め、後者では淵と瀬で採取された資料のふるい分け試験により粒度分布を求めた。その後、各領域の面積比を考慮して全体の粒度分布を算定した。

ステップは河床材料の中の80%粒径よりも大きな礫で構成されている。また、ステップの平均粒径は河床材料の平均粒径の約4倍、10%粒径は約2倍程度であり、ステップの最小粒径は河床材料の平均粒径とほぼ一致している。

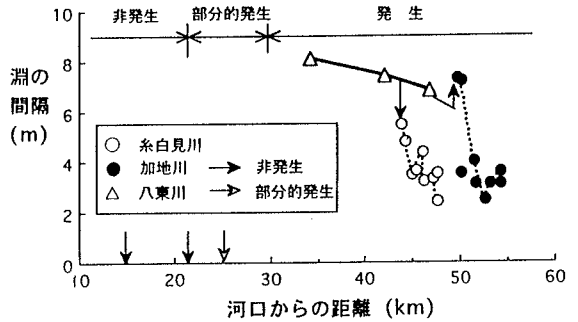


Fig. 12 Interval of pools in Sendai River

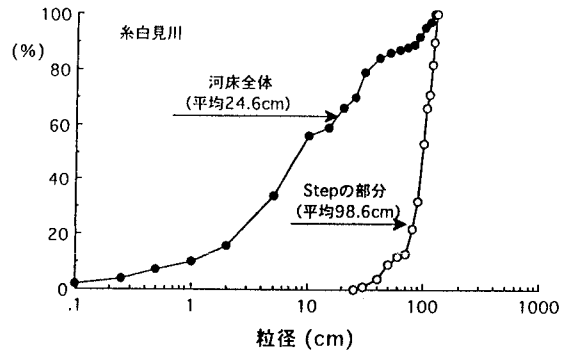


Fig. 13 Grain size distribution of bed material

4-3 階段状河床型の淵の発生条件

芦田らの研究[4]によると、階段状河床形の発生条件は、

- ① 河床材料が混合砂であること
- ② 流れが射流であること
- ③ 初期河床の平均粒径 d_m あるいはそれよりも大きい粒径 βd_m の礫が移動して、分級現象が活発であること
- ④ 最大粒径程度 γd_m の礫は移動しない

ことである。

②、③、④の条件式は、各々次式のようなものである。

$$\frac{h}{d_m} \leq \left(6 + 5.75 \log \frac{h}{\alpha d_m}\right)^2 s \tau_{*m} \dots\dots(1)$$

$$\tau_{*m} = \frac{u_*^2}{sgd_m} \geq \beta \tau_{*cm} \dots\dots(2)$$

$$\tau_{*m} = \frac{u_*^2}{sgd_m} \leq \gamma \tau_{*cm} \dots\dots(3)$$

ここに、 h : 水深、 d_m : 平均粒径、 τ_{*m} : 平均粒径に対する無次元掃流力、 τ_{*cm} : 移動限界に対する τ_{*m} 、 α : 相当粗度高と d_m の比、 s : 砂礫の水中比重、 u_* : 摩擦速度、 g : 重力加速度である。

階段状河床型の淵の発生領域は、式(1)~(3)を使えば h/d_m と τ_{*m} をパラメータとして描かれる。Fig. 14はそれを示したもので、Upper flow regime と Lower flow regimeの境界線、最大粒径の移動限界線および活発な分級作用を表す線で囲まれた領域が淵の発生領域である。ただし、ステップの構成材料の平均粒径が移動しない条件になるものとし、Fig. 13の観測結果を参考にして γ は4とた。また、 α および β は各々3および1とした。参考のために、ステップの構成材料の10%粒径の礫の移動限界も示している。Fig. 14には、1、5、20年確率の洪水に対する各調査地点の h/d_m と τ_{*m} の計算結果を淵の発生・非発生別に示している。計算は等流状態を仮定し、糸白見川および加地川の平均粒径は全て24.6cm、八東川の平均粒径はTable 1に示すそれぞれの地点の値を用いた。この図から5年確率と20年確率の流量のとき理論上の発生領域に淵が発生していることがわかる。1年確率の洪水では掃流力が小さいために活発な土砂移動が起きず、階段状河床は発生しない。20年確率の洪水に対する結果では、ステップの構成材料の10%粒径が移動する条件になる地点が多くある。したがって、このような洪水ではFig. 13のような材料からなるステップは不安定になるものと考えられ、一度形成された淵が破壊されることも考えられるが、この点についてはステップの強度について検討して行く必要がある。以上より、千代川では5年確率の流量より大きい流量の洪水のとき階段状河床型の淵が形成されるものと推察される。

4-4 淵の間隔と形状

芦田らの研究[4]によると、階段状河床波の波長は反砂堆の波長と等しいものとして、次のようなケネディーの式で求められる。

$$F_r = \frac{2 + k_* \tanh k_*}{k_*^2 + 3k_* \tanh k_*} \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $k_* = 2\pi(h/\lambda)$ であり、 F_r : フルード数、 λ : 波長である。したがって、階段状河床型の淵の間隔も上式の λ で求められる。Fig. 15はケネディーの理論曲線およ

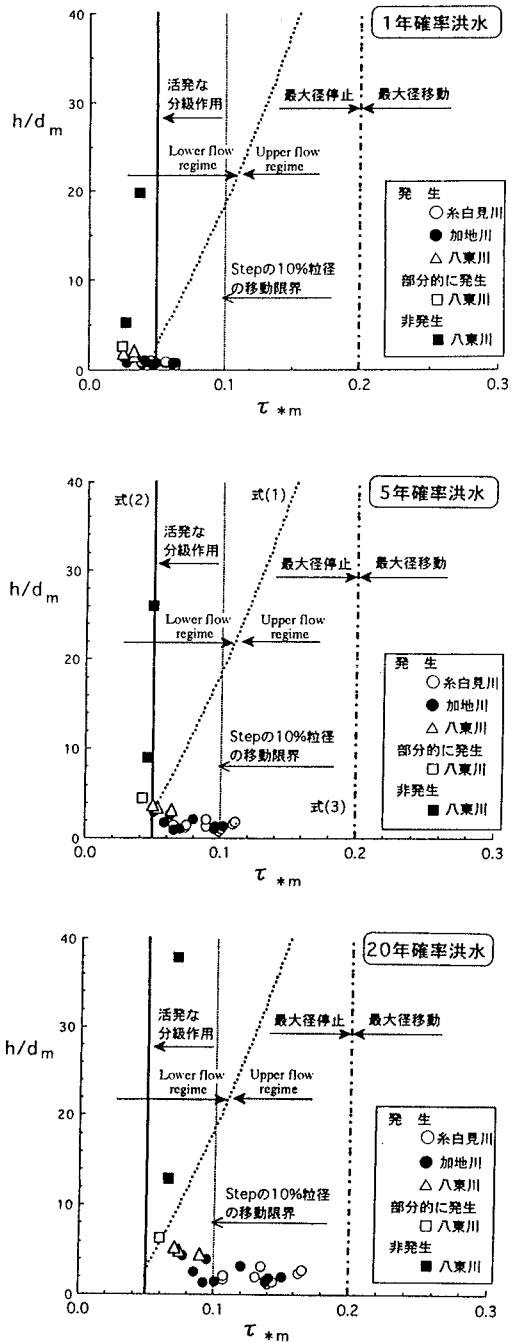


Fig. 14 Condition of occurrence of step pool

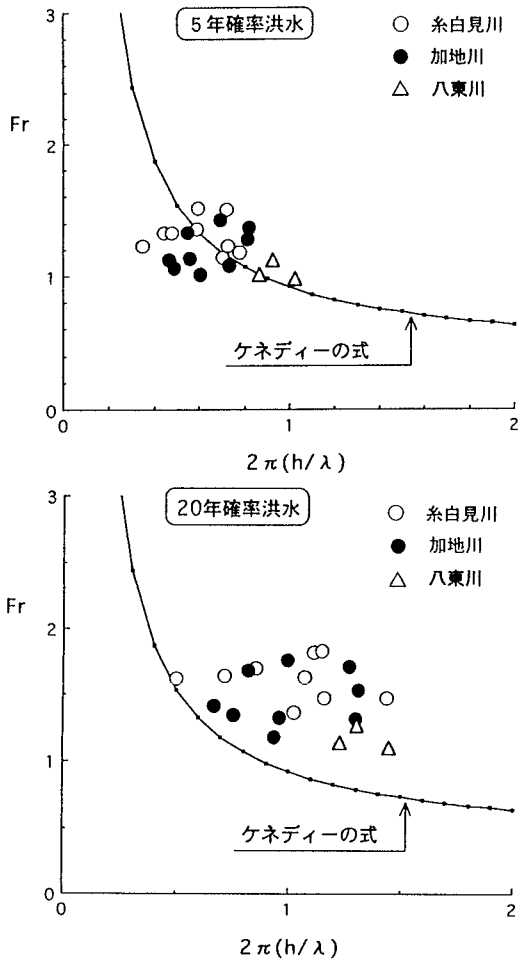


Fig. 15 Comparison between theoretical interval of pool and observed one

び各調査地点における淵の間隔の実測値と5年確率および20年確率洪水に対する水量から求めた k と F を示したものである。これより、5年確率洪水に対して両者はほぼ一致している。現在存在している階段状河床型の淵は過去の洪水履歴のもとに形成されたものであるが、Fig. 14やFig. 15から判断すると淵の発生や間隔に関する支配流量は5年確率の洪水に対するものであると言える。また、この結果から、河川の淵の形成に係わる支配流量がわかれば、式(4)より淵の間隔が推定でき、今後人工的な淵を造成するときの目安を得ることができる。また、

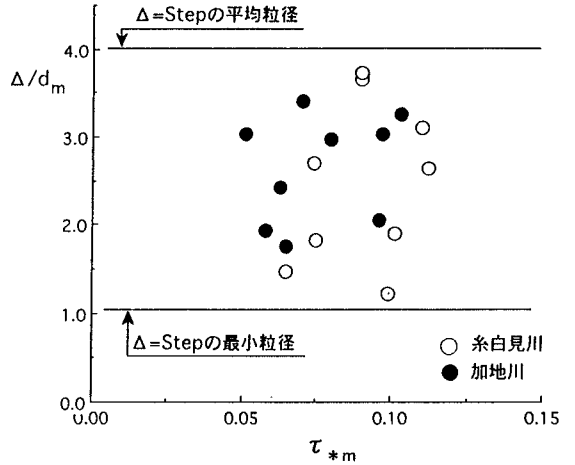


Fig. 16 Depth of pool

Fig. 11に示す20cm以上の落差の淵は、式(4)から逆算すると19年確率の洪水に対応して形成されるものと考えられ、実際の河川には色々な洪水に応じたスケールの異なる淵が共存している。

Fig. 16は各区間の淵の深さ(ステップの部分の段差)の平均値 Δ と5年確率の洪水に対する無次元掃流力との関係を示したものである。淵の深さを河床材料の平均粒径で無次元化すると1から4の間の値になり、ステップの構成材料の最小粒径から平均粒径までの深さの淵が洪水の規模に応じて形成されるものと考えられる。

Fig. 17は淵の落差と水深の関係を示したもので、落水水脈が高いほど大きな淵が形成されている。参考に落差型の場合の結果も示しているが、ほぼ同様の傾向が見られる。Fig. 18は階段状河床型と落差型の淵の段差を形成している最大粒径の頻度分布を確率密度で表示したものである。落差型の段差の方が大きな粒径の岩で構成されており、それだけ落差も大きくなっている。したがって、Fig. 17の結果からもわかるように落差型では階段状河床型より深い淵ができています。

淵の長さとの比の値は、階段状河床型および落差型で0.05から0.25の間でばらついているが、平均すると約0.1付近に集中している。したがって、落差型でも階段状河床型でも淵の形はほぼ相似形になるとみさせる。

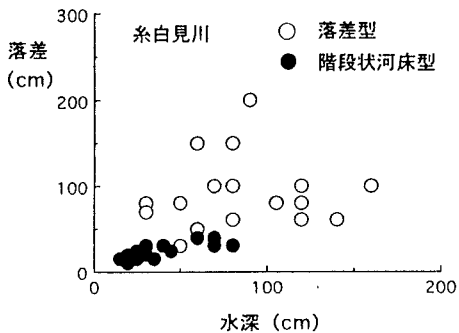


Fig. 17 Relation between the height of step and the depth of pool

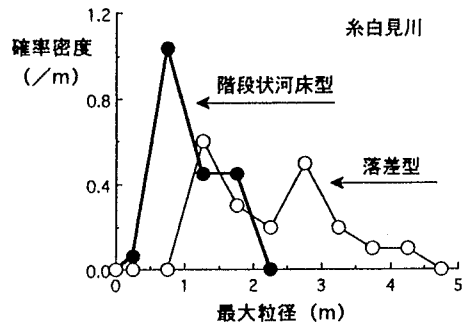


Fig. 18 Maximum diameter of rocks of steps

5. 結 語

本研究は千代川の淵の構造と魚類の生息状況について調査した結果に基づき、淵の形態、淵の形成過程、魚類の生息に良好な淵の条件等について検討した。以下に本研究の結果を列挙する。

(1) 河道に形成される淵は、土砂水理学的に見ると階段状河床型、落差型、わん曲型、砂州型、局所洗掘型、湛水型に分類される。

(2) 河川上流部のわん曲型の淵の個所は、流速や水深のみならず河床材料も平面的に顕著に変化するため、多種多様な魚類が生息できる環境が備わっている。

(3) 河川下流部にできる砂州型の淵では、わん曲型の淵に比べて流速、水深、河床材料などの変化が少ないが、護岸にブロックを置いたり、流れの中心に捨て石を沈めておくと多様な魚類の生息地になり得る。

(4) 千代川では河口から30km付近を境にして河道特性が異なる。すなわち、上流側は階段状河床型の淵、下流側は砂州型の淵の領域である。

(5) 階段状河床型の淵は過去の流量履歴によって形成と破壊を繰り返し現在の姿になったと思われるが、発生条件や淵の間隔の点から考えると、約5年確率の洪水に対する階段状河床形態とよく対応している。

(6) 階段状河床型の淵の深さはステップの構成材料の最小粒径から平均粒径の間で、長さとの比は約0.1である。

なお、本研究を遂行するにあたり、西田威君、青木聡君、平井淳一君（当時工学部4年生）の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 川那部浩哉・水野信彦、川と湖の魚①、保育社、p. 153、1989.
- [2] 川那部浩哉・水野信彦、川と湖の魚②、保育社、pp. 44-45、pp. 60-61、1990.
- [3] まちと水辺に豊かな自然をII、(財)リバーフロント整備センター、山海堂、pp. 17-19、1992.
- [4] 芦田・江頭・安東、第28回水理講演会論文集、pp. 743-749、1984.