

瀬と淵におけるアユの生息適正の相違および その要因の解明

COMPARISON OF SUITABILITY FOR LIVING OF AYU BETWEEN POOL AND RAPID

永矢貴之¹・白石芳樹¹・鬼束幸樹²・東野誠³・高見徹³・大塚法晴⁴・

秋山壽一郎⁵・尾関弘明⁶・畑中弘憲⁷・中川由美子⁷

Takayuki NAGAYA, Yoshiki SHIRAIISHI, Kouki ONITSUKA, Makoto HIGASHINO, Tohru
TAKAMI, Noriharu OTSUKA, Juichiro AKIYAMA, Hiroaki OZEKI, Hironori HATANAKA and
Yumiko NAKAGAWA

¹正会員 修(工) (株)建設技術研究所 九州支社河川部 (〒810-0041 福岡市中央区大名2-4-12)

²正会員 博(工) 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

³正会員 博(工) 大分工業高等専門学校助教授 都市システム工学科 (〒870-0152 大分市大字牧1666)

⁴正会員 国土交通省九州地方整備局延岡河川国道事務所所長 (〒882-0803 延岡市大貫町1-2889)

⁵フェロー会員 Ph. D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科

⁶学生員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程

⁷学生員 九州工業大学 工学部建設社会工学科

It is necessary for inhabitation of aquatic lives to preserve the structure consisting of both pool and rapid. Because some fish prefer the pool and the other some fish prefer the rapid. In particular, the ayu prefers rapid. However, the reason why the ayu prefers rapid has not been investigated. In this study, the field survey, i.e., velocity measurements, flow depth and bed level measurements, recording the behavior of the swimming ayu and also gathering attached algae on the rocks, was conducted both in the pool and rapid under the condition that the ayu cannot feed attached algae in some area (non-ayu area) and also can feed in the other area (normal area). It was found that the growth of attached algae in the rapid is higher than that in the pool. The growth of attached algae in non-ayu area is higher than that in the normal area, due to the ayu feed attached algae on the rocks in the normal area. A logistic model was used for the evaluation of the growth of attached algae. As a result, the difference in the growth of attached algae between in the pool and rapid and also between in non-ayu and normal area can be investigated quantitatively.

Key Words : ayu, habitat, suitable condition, pool and rapid, attached algae

1. はじめに

河川生態系は、植物プランクトン、動物プランクトン、水中昆虫、陸生昆虫、付着藻類、付着動物、水草、デトライタス、魚などで構成される¹⁾。河川改修を行う上でこれら全ての生き物に配慮することが理想であるが、現実的には魚類の保護に力点が置かれる。特に経済価値の高いアユは内水面で生計を立てる漁業関係者から保全が強く求められている。

瀬と淵が明瞭な川や水質の良好な川には多くのアユが生息している。一方、蛇行の少ない川や瀬と淵が不明瞭な平坦化した川の優占種はオイカワであることが多い。

これは、アユは多様性のある河川にしか生息できないのに対し、オイカワはかなり広範囲の環境においても生息できることが原因である²⁾³⁾。沼田¹⁾は前者を「アユ型河川」、後者を「オイカワ型河川」と名付け、河川改修を行う際にはアユ型河川をモデルにするべきと述べている。

アユは秋頃に下流域の瀬で産卵を行う。2週間ほどで卵が孵化し、すぐに川の流れに乗って海洋にたどり着く。約6ヶ月間沿岸域で生息し、春頃に河川水温と海水温がほぼ同じになると遡上を開始する。アユは河川に定着すると、淵よりも瀬に好んでなわばりを作って生息することは知られているが、その理由は不明である⁴⁾⁵⁾。したがって、瀬と淵におけるアユの生息適正の相違点を解明すれば、アユ型河川的设计に大きく貢献する。中村⁶⁾は

魚が川に生息する条件として、①産卵場の確保、②回遊路の確保、③避難場所の確保、④天敵からの保護、⑤流量の確保、⑥水質の確保、⑦餌の確保を挙げている。隣接した瀬と淵を想定すると、①、②、⑤、⑥はほぼ同一と考えられる。③および④については、水深が深く、巨石も多く存在する淵の方がむしろ適していると考えられる。そのため⑦がなわばりを作る大きな要因の一つと考えられる。成長したアユは飢餓が迫らない限り付着藻類しか食べないため、付着藻類の成長特性が瀬と淵で異なるかどうかを解明する必要がある。

本研究は、アユの生息に不可欠な瀬と淵におけるアユの行動特性と水理環境・餌場環境との関係を現地調査に基づき検討したものである。

2. 現地計測

計測対象としたのは五ヶ瀬川水系の北川15K700m地点である。この地点を選んだ理由は、比較的、瀬と淵が明確で、良好にアユが生息している代表的なポイントであると北川漁協から推薦されたからである。計測期間は2005年8月9日～12日である。図-1に2002、2003、2004および2005年の7月13日～8月12日の同地区の流量を示す。2005年8月7日の8時頃に10mm/h程度の降雨があり、水位が上昇しているが、例年と比較すると流量が少なく、このとき、河床材料の移動や付着藻類のはく離はほとんどなかった。

図-2に示すような瀬および淵のそれぞれ6カ所において、河床材料をピックアップし、8月9日に付着藻類を完全にはぎ取り、再び元の位置に戻した。この時、表-1に示すように、瀬におけるRC1～3および淵におけるPC1～3には5cmメッシュの縦0.4m、横0.6mの黄色の金網4枚で周囲を囲み、アユが近づけないようにした。瀬におけるRN1～3および淵におけるPN1～3の周囲には網がなく、自由にアユが付着藻類をはむことが可能である。ここで計測を行った瀬の水深は0.4m程度、淵の水深は1.0m程度であった。これら12カ所の河床材料に繁茂する付着藻類を8月10、11および12日にそれぞれ採取し、全蒸発残留物TR(total residue)を測定した。ここで付着藻類の採取に用いた河床材料は粒径約0.1m程度のものを用いた。表-1中のPC、PN、RC、RNはPC1～3、PN1～3、RC1～3、RN1～3をそれぞれ平均したデータを示す。

計測点12カ所全体を網羅するように水深を計測した。また、全計測点の12カ所において、3次元電磁流速計を用いて鉛直方向に15点程度の流速計測を行った。計測間隔は0.05sで計測時間は51.2sとした。また、金網設置による影響を検討するために、RC-1およびPC-1に設置されている金網を除去した状態(RC1(NC)、PC1(NC))でも

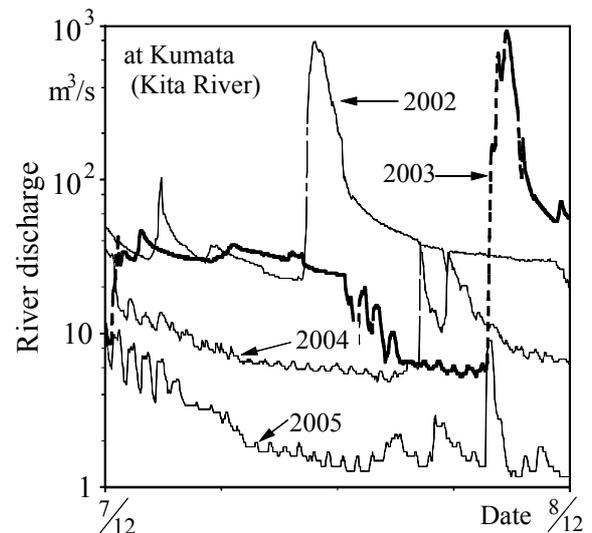


図-1 調査対象地点の流量

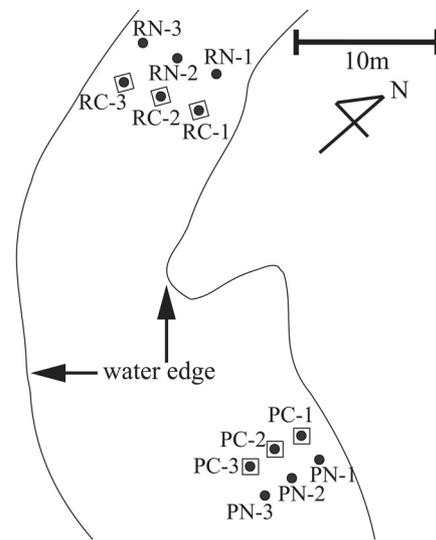


図-2 調査対象地点の位置関係

同様な流速計測を行った。さらに、水中ビデオを用いて午前8時から午後5時にかけて瀬と淵におけるアユの挙動を撮影した。撮影後、アユの密度、遊泳位置、単位時間当たりのはみ数などを解析した。以上の計測が終了した後、全ての計測場所における河床材料を採取した。

3. 計測結果および考察

(1) 金網で河床材料を囲んだ影響の検討

RC1～3およびPC1～3の河床材料の周囲には金網が設置されているが、5cmメッシュであるため物理的には体高5cm以下の魚は出入り可能である。アユのアスペクト比(体長/体高)は5程度なので、体長25cm以下の個体がそれに相当する。しかし、水中カメラで連続1時間程度撮影してもアユはおろかウグイも金網に近づかなかった。

図-3にRC-1、RC1(NC)、PC-1、PC1(NC)の流速分布を

表-1 それぞれの調査点における計測条件と計測項目

| case name | averaged case name | rapid or pool | cage | measurements items |
|------------------|--------------------|---------------|---------|-----------------------------|
| RC-1, RC-2, RC-3 | RC | rapid | cage | velocity and attached algae |
| RN-1, RN-2, RN-3 | RN | | no cage | |
| RC-1(NC) | - | | | |
| PC-1, PC-2, PC-3 | PC | pool | cage | velocity and attached algae |
| PN-1, PN-2, PN-3 | PN | | no cage | |
| PC-1(NC) | - | | | |

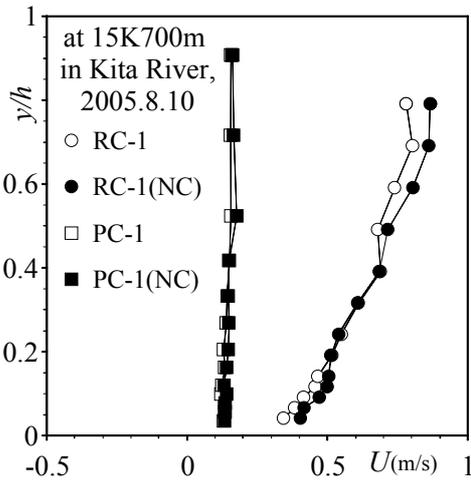


図-3 金網設置による流速場への影響

示す。ここに、 h は水深、 y は鉛直座標、 U は時間平均された流下方向流速、 U_* は摩擦速度で算出方法は後述する。図-3より金網の有無による平均流速への影響は微小と判断される。

図-4(a)および図-4(b)に瀬および淵における流下方向乱れ強度 u' の分布を示すと共に、禰津⁷⁾の普遍式も曲線で併示している。

$$\frac{u'}{U_*} = D_u \exp\left(-\lambda_u \cdot \frac{y}{h}\right) \quad (D_u = 2.26, \lambda_u = 0.88) \quad (1)$$

ここに、 D_u および λ_u は実験定数である。RC-1とRC-1(NC)およびPC-1とPC-1(NC)の乱れ強度はほぼ同様な値をとっており、金網設置による乱れ強度への影響もほとんどないと判断される。従って、金網がある場合とない場合の付着藻類量の差はアユの摂食圧の大きさに依存すると判断される。

全ての計測点において、乱れ強度分布は水面近傍を除き、底面から水面に向かって単調減少しており、定量的にも禰津⁷⁾の普遍式とほぼ一致する。これは、流れがほぼ等流であったことおよび計測が適切であったことを意味する。

(2) 付着藻類の増殖速度のモデル化

a) 付着藻類量の時間変化

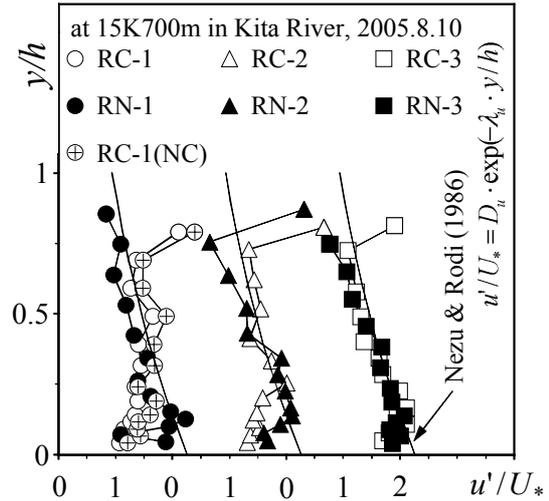


図-4(a) 瀬における流下方向乱れ強度分布

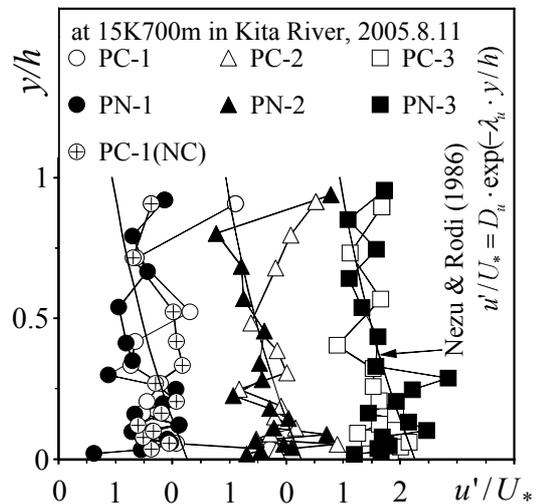


図-4(b) 淵における流下方向乱れ強度分布

高見ら⁸⁾は五ヶ瀬川におけるクロロフィルaとTRの量の計測を行い、4月から10月の期間ではクロロフィルaがTRの約0.1%の一定値であることを明らかにした。そのため、計測によって得られたTR量を付着藻類量に変換することが可能である。図-5に付着藻類量の時間変化を示す。淵よりも瀬の方が付着藻類量の増殖率が高いことがわかる。また、金網がないものよりもある方が付着藻類増殖率が高い。付着藻類量の時間変化率は、単位面積当たりの総生産量、移入量、代謝量およびはく離量のバランスで成立していることを戸田ら⁹⁾は述べているが、モデルに含まれる未知量がやや多いため、ここでは、モデル定数の少ないロジスティックモデルを採用する。

$$\frac{dM}{dt} = \alpha M \left(1 - \frac{M}{M_{\max}}\right) \quad (2)$$

ここに、 M は付着藻類量、 M_{\max} は付着藻類の最大現存量、 t は時間、 α は比増殖速度である。上式は、移入

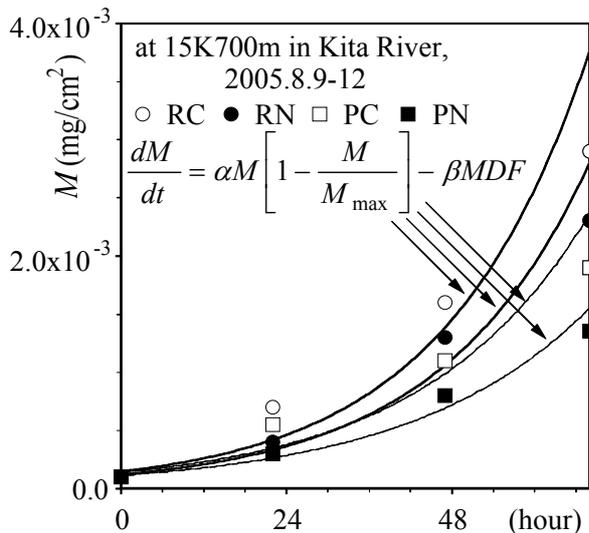


図-5 付着藻類量の時間変化

量およびはく離量が小さいという仮定に基づいている^{10, 11)}。さて、アユが付着藻類をはまさない場合、すなわち金網がある場合は式(2)が成立するが、金網がない場合はアユによる摂食量を考慮しなければならない。そのためには、アユの摂食行動を把握する必要がある。

b) アユの摂食行動特性

観察の結果、アユは日中は一日中絶え間なく摂食していることが認められた。これは、石田¹²⁾の結果と一致する。図-6に瀬および淵における摂食中のアユの遊泳位置を示す。ここに、 B_H はアユの体高で、 N は観察された総魚数、 n は各領域における魚数である。同図より、アユは瀬・淵に関わらず、底面から体高 B_H の約10倍以下の領域を摂食中のアユは遊泳していることが理解される。撮影された映像からは、小粒径の河床材料の周辺では石の上を遊泳し、大粒径の河床材料付近では石の周囲を遊泳していることが確認された。これは、アユが水深を意識して遊泳していないことを示唆し、瀬を好む理由が水深の低さではないことを意味している。

単位面積の単位時間当たりのアユの摂食量は、河床に投影された単位面積当たりのアユの密度 D (尾/m²)および単位時間当たりのアユのはみ数 F (回/s)に比例する。ビデオ解析によって得られた瀬と淵における D および F を表-2に示す。

c) 付着藻類の増殖速度モデル

アユの摂食を考慮した付着藻類量の時間変化を次式のように提案する。

$$\frac{dM}{dt} = \alpha M \left(1 - \frac{M}{M_{\max}} \right) - \beta MDF \quad (3)$$

ここに、 β は係数である。金網がある場合、右辺第2項が消去されるので、式(3)は式(2)に帰着する。そこで、金網のあるRCおよびPCの付着藻類量を式(2)にベスト

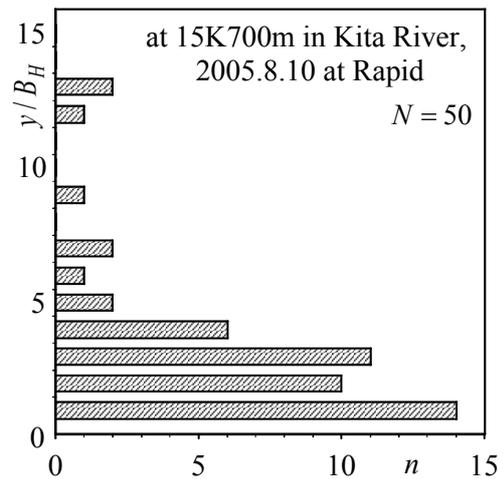


図-6(a) 瀬におけるアユの遊泳位置

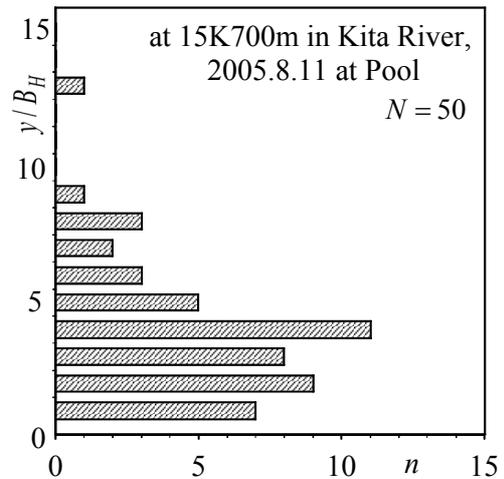


図-6(b) 淵におけるアユの遊泳位置

表-2 付着藻類増殖モデルに必要な諸量

| case name | D number/m ² | F number/s | α | β |
|-----------|------------------------------|-----------------|----------|---------|
| RC | 0 | 0 | 0.048 | 0 |
| RN | 5 | 0.714 | | 0.0026 |
| PC | 0 | 0 | 0.042 | 0 |
| PN | 25 | 0.909 | | 0.0005 |

フィッティングすれば比増殖速度 α が算出される。この時、最大現存量 M_{\max} は観測初日に採取した付着藻類量とした。観測前は出水もなく、また、晴天も続いていたので付着藻類の増殖速度とアユの摂食速度がバランスした最大現存量に達していたものと推測される。さて、得られた α を式(3)に代入し、金網のないRNおよびPNの付着藻類量を用いると係数 β を算出することができる。表-2に係数 α および β を記すと共に、図-5中に式(3)の計算値を実線で示した。式(3)によって付着藻類の増殖速度が再現できることが認められる。したがって、係数 α および β を予測できれば、アユの摂食圧および付着藻類量の変化が予測可能となる。

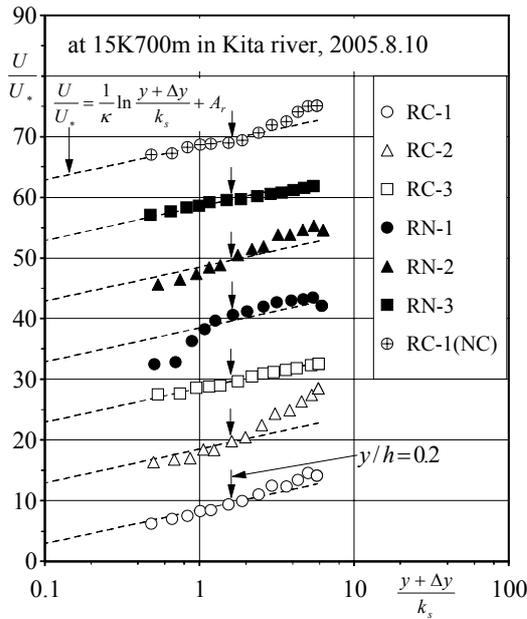


図-7(a) 瀬における流速分布

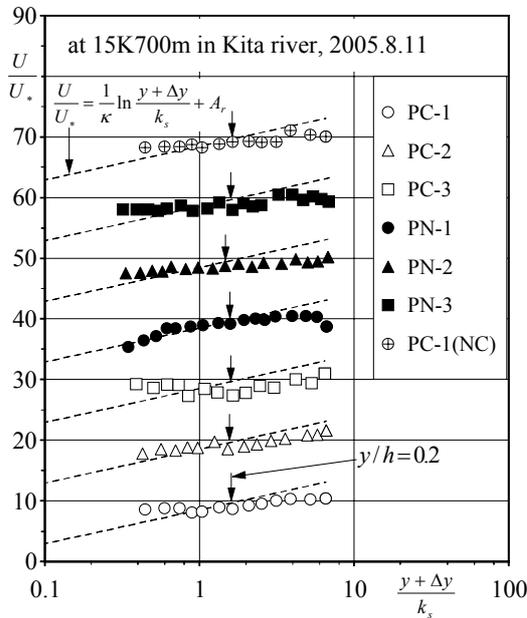


図-7(b) 淵における流速分布

(3) 増殖速度モデルの検討

a) 比増殖速度 α および係数 β に関する検討

比増殖速度 α は淵より瀬の方が高いといわれている¹³⁾。本計測結果も同様な結果となった。この原因として、溶存酸素量、栄養塩濃度、照度、流速の相違などが考えられている¹³⁾。溶存酸素については、瀬と淵で異なるとの池田ら¹³⁾の結果も報告されているが、当該水域においては有位な差はないことが明らかにされている¹⁴⁾。また、透明度の高い当該地域では河床に到達する照度の差もほとんどないと考えられる。したがって、瀬と淵における比増殖速度の差を生じさせた大きな要因として流速の相違が考えられる。ただし、河床の石に接触する流速を評価する必要があるため、通常用いられる水深平均された

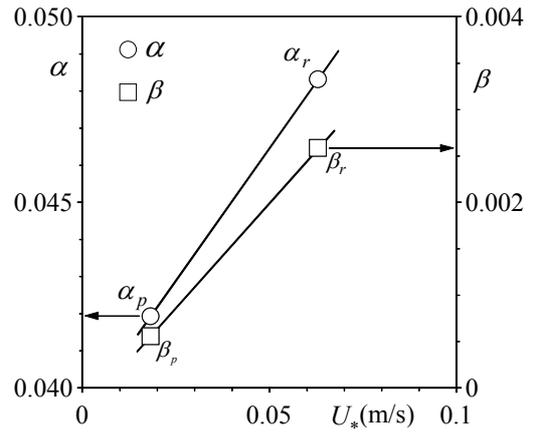


図-8 比増殖速度 α 、係数 β と摩擦速度 U_* との関係

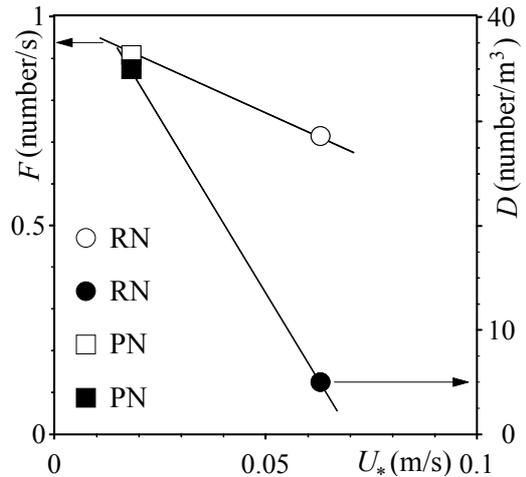


図-9 アユの密度 D およびアユのはみ数 F と U_* との関係

流速は不適切である。そこで、底面近傍の流速と関連の高い摩擦速度 U_* を用いて、瀬と淵の比増殖速度の相違を評価する。

摩擦速度 U_* はエネルギー勾配、レイノルズ応力分布および対数則から算出可能である⁷⁾。エネルギー勾配およびレイノルズ応力分布から求める場合、精度の高い計測が必要とされるため、ここでは対数則から算出する。

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y + \Delta y}{k_s} + A_r \quad (y/h \leq 0.2) \quad (4)$$

ここに、 $\kappa (=0.412)$ はカルマン定数、 $A_r (=8.5)$ は積分定数、 k_s は相当粗度、 $\Delta y (=0.25 k_s)$ は原点補正量である¹⁵⁾。Einstein¹⁶⁾の方法より、65%通過粒径 d_{65} から相当粗度 k_s が求められる。

$$k_s = d_{65} \quad (5)$$

図-7に計測点12カ所における流速分布の実測値をプロットで、対数則(4)を点線で示す。外層($y/h > 0.2$)ではwakeが観察されるが¹⁷⁾、内層($y/h \leq 0.2$)では対数則に良好に従っており、対数則を用いた摩擦速度 U_* の評価が妥当であることを示唆している。

図-8に比増殖速度 α 、係数 β と摩擦速度 U_* との関係を示す。2点しかデータがないため断定的なことは言え

ないが、比増殖速度 α は摩擦速度の増加関数のようである。一方、係数 β も摩擦速度の増加関数となっているが、物理的意味は不明である。

b) 比増殖速度 α および係数 β に関する検討

式(3)に含まれるアユの密度 D およびアユのはみ数 F は瀬と淵で異なっている。ビデオを観察すると、流速の速い瀬では定位するためかなりの遊泳力を要している印象を受けた。一方、淵ではそのような遊泳力は必要ない。そのため、淵では体勢を整える時間が不必要なために F が大きな値をとっていると考えられる。図-6に示されたように、アユの遊泳位置は水深方向に一様に分布しているのではなく、底面近傍に集中している^{18, 19)}。そのため、底面近傍の流速とアユの行動特性との間に相関があると考えられる。そこで、摩擦速度 U_* とアユの密度 D および単位時間当たりのアユのはみ数 F との関係を求める。図-9にアユの密度 D およびアユのはみ数 F と摩擦速度 U_* との関係を示す。摩擦速度の増加に伴い D および F の両者ともが減少している。アユのはみ数 F については、上記に考察したとおりである。アユの密度 D が減少したについては、瀬ではアユがなわばりを有しており、他のアユを近づけさせないことおよび高速流にも耐えるような体力の優れた優秀なアユしかはむことができないなどの理由が考えられる。ただし、瀬と淵の2カ所のみでの結果なので、今後多くの流速場で同様な計測を行い、摩擦速度 U_* と D 、 F の関係および摩擦速度 U_* と比増殖速度 α 、係数 β を求め、そのメカニズムを解明したい。

4. おわりに

本研究は、瀬と淵におけるアユの生息適正の相違を解明するために、現地計測を行ったものである。得られた知見を以下に示す。

- (1) アユは日中のほとんどの時間を餌食に費やすが、瀬・淵に関わらず、摂食中のアユは底面から体高の約10倍以下の領域を遊泳している。
- (2) 淵よりも瀬の方が付着藻類の成長速度が速いことが確認された。また、摩擦速度の増加に伴い、比増殖速度が増加することが示唆された。ただし、この原因については未解明なため、今後検討が必要である。
- (3) 瀬・淵ごとに異なるアユの単位面積当たりの密度およびアユの単位時間当たりのはみ数を考慮した付着藻類の増殖速度モデルを提案した。本モデルによって付着藻類の増殖の記述が可能となったが、モデル定数を現地計測結果に基づき同定しているのが現状である。今後、様々なフィールドにおいて本研究と同様な計測を行うことによって、モデル定数の定式化が可能となる。

謝辞：本研究は土木学会水工学委員会河川懇談会の共同研究の一環として行われたものである。北川漁協の長瀬一己組合長およびその他の組合員の皆様ならびに延岡五ヶ瀬川漁協の須田政道組合長、工藤平寿郎理事、甲斐勝組合員、土田栄組合員およびその他の組合員の皆様には調査に協力いただいた。延岡河川国道事務所の高尾秀敏副所長、鶴崎秀樹課長、高橋史哉係長、西江和典技官の諸氏には貴重なコメントを頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 沼田真, 水野信彦, 御勢久右衛門: 河川の生態学, 築地書館, 2000.
- 2) 森誠一: 魚から見た水環境, 信山社サイティック, 2000.
- 3) 川那部浩哉, 桜井淳史: アユの博物誌, 平凡社, 1982.
- 4) 玉井信行, 水野信彦, 中村俊六: 河川生態環境工学—魚類生態と河川計画, 東京大学出版会, 1993.
- 5) 全国内水面漁業協同組合連合会: アユの産卵場づくりの手引き—魚類再生産技術開発調査報告書—, 1994.
- 6) 中村俊六: 魚道のはなし, 山海堂, pp.42-49, 1995.
- 7) Nezu, I. and Nakagawa, H.: *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, 1993.
- 8) 高見徹, 東野誠, 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 永矢貴之, 大塚法晴: 河床材料への付着藻類量とアユの生活環境について, 平成16年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, VII-100, 2005.
- 9) 戸田祐嗣, 西村明, 池田俊介: 付着藻類の一次生産および種間に関する数値解析, 水工学論文集, 第49巻, pp.1447-1452, 2005.
- 10) 戸田祐嗣, 辻本哲郎, 藤森憲臣: 取水量の大きな砂河川における河床付着藻類の繁茂について, 河川技術論文集, 第11巻, pp.541-546, 2005.
- 11) 有田正光, 中井正則, 道奥康治, 池田裕一, 中村由行, 村上和男: 水圏の環境, 東京電機大学出版局, 1998.
- 12) 石田力三: アユその生態と釣り, p.66-68, 1988.
- 13) 池田俊介, 戸田祐嗣, 佐野貴之: 現地観測に基づく瀬と淵の水理と生物一次生産に関する研究, 土木学会論文集, No.593/II-43, pp.93-103, 1998.
- 14) 大塚法晴, 鬼束幸樹, 東野誠, 高見徹, 永矢貴之: 河川懇談会共同研究中間報告書, アユの産卵床と物理環境に関する研究—五ヶ瀬川, 特に大瀬川をフィールドとして—, p.1-313, 2005.
- 15) Lane, E.W., *Proc. A.S.C.E*, Vol.270, 1935.
- 16) 中川博次, 辻本哲郎, 清水義彦, 村上正吾, 第32回水理講演会論文集, pp.535-540, 1988.
- 17) Nezu, I. and Rodi, W.: Open-channel flow measurements with a laser Doppler anemometer, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.112, pp.335-355, 1986.
- 18) 知花武佳, 辻本哲郎, 玉井信行: 物理環境の階層構造を考慮した魚類生息場評価法の開発, 水工学論文集, 第48巻, pp.1567-1572, 2004.
- 19) 鬼束幸樹, 東野誠, 高見徹, 永矢貴之, 大塚法晴, 秋山壽一郎, 松本和也: アユの産卵に必要な水理環境に関する研究, 河川技術論文集, No.10, pp.447-452, 2004.

(2005. 9. 30受付)