

アユの産卵に必要な水理環境に関する研究

SUITABLE HYDRAULIC CONDITION FOR SPAWNING OF AYU

鬼束幸樹¹・東野誠²・高見徹²・永矢貴之³・大塚法晴⁴・秋山壽一郎⁵・松本和也⁶

Kouki ONITSUKA, Makoto HIGASHINO, Tohru, TAKAMI, Takayuki NAGAYA, Noriharu OTSUKA, Juichiro AKIYAMA and Kazuya MATSUMOTO

¹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)

²正会員 博(工) 大分工業高等専門学校助教授 (〒870-0152 大分市大字牧1666番地)

³正会員 修(工) 建設技術研究所 (〒810-0041 福岡市中央区大名2-4-12)

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丁目2889)

⁵正会員 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

A lot of environmental assessments have been conducted before construction of the hydraulic structures last 10 years. However, the accuracy of the environmental assessment is not so high, because the quantitative investigation on the suitable hydraulic condition for target species has not been conducted in detail. It is pointed out that the most important parameters for spawning of Ayu are flow depth, velocity, SS and water temperature on the basis of the data of the Gokase River. In this study, the suitable range of the flow depth and velocity for spawning of Ayu were investigated. It was found that the velocity is important parameter for spawning of Ayu than the flow depth. Further, it is suggested that the suitable range of the mean velocity near the bottom for spawning of Ayu is 17 to 25% of the burst speed of Ayu.

Key Words : Ayu, spawning, environmental assessment, suitable range, burst speed

1. はじめに

近年, 河川改修計画を策定するにあたり, 環境アセスメントの必要性が叫ばれている。IFIM/PHABSIMやHEPなどに代表される生息環境評価法は, 近年多くの改良が加えられている。田代ら^{1,2)}は生息環境評価を行う上で, 魚の生活史を考慮する必要性を指摘すると共に, 各生息場間の移動のし易さを示すアクセス性を考慮した環境評価手法を提案した。知花・玉井³⁾は瀬と淵の構造をモデル化してウグイの生息域の環境を調べた。砂田・川村⁴⁾は水際領域の存在が仔魚にとって重要であることを指摘し, 水際を考慮できる評価手法を提案した。また, PHABSIMは選好曲線の積でWUAを評価するのにに対し, 植村ら⁵⁾はパラメータの和で評価することを提案した。

生息環境評価手法を利用する上で, 問題となるのが対象とした種の生息環境に与えるパラメータの選定である。永矢・松尾⁶⁾は流速および水深をパラメータとして採用し, アユおよびオイカワの生息環境評価を行った。砂田ら⁷⁾は流速および水深以外に, 底質および水温をパラメータとして用い, 富士川のオイカワの実採捕数を説明

した。北村ら⁸⁾および田代・辻本⁹⁾は河床攪乱頻度をパラメータとして提案した。喜多村ら¹⁰⁾は河川工作物の流域面積, 流域の森林面積に対する比などをパラメータとして用い, アユの漁獲量と河川環境との相関を求めた。

以上のように, 水生生物の生態環境評価を行う上で, 生息環境評価手法はかなり改良が加えられ実用段階に達しているものの, 使用されるパラメータは研究者によって異なっている。これは, 対象とする生態環境に如何なるパラメータが影響を及ぼしているかが不明であることが主たる原因と考えられる。鬼束ら¹¹⁾はアユの産卵について着目し, 主成分回帰分析を用いて五ヶ瀬川水系のアユの産卵に必要なパラメータを選定した。その結果, 水深, 流速, SS, 水温の順にアユの産卵に影響を及ぼしていることを指摘した。しかし, これらのパラメータの選好値に関しては, 統一的な値は得られていない。

本研究は, 既往の研究結果に基づき, アユの産卵に適した水深および流速について検討した。その結果, 底面近傍の流速分布および河床材料の粒度分布を明らかにする必要が生じたため, 現地計測を行い既往の研究結果と比較しながらアユの産卵に適した水深および流速について考察した。

2. 現地計測

(1) 対象フィールドおよび計測場所の選定

対象フィールドは五ヶ瀬川水系の大瀬川である。アユの産卵場は主として百間の瀬、三須の瀬および安賀多の瀬である。アユの産卵シーズンには瀬を分割した区画が漁協の組合員に与えられ、産卵にきたアユを「瀬かけ」と呼ばれる漁法で釣り上げる。図-1に計測の対象とした安賀多の瀬を示す。上下流方向に2組、横断方向に7列並んでいるのは各区画の境界線に石が積まれて陸化していることを表している。1区画の大きさは幅方向に10.5mで流下方向に15mである。漁協に対するヒアリング調査によって、これらの16区画の中で最も産卵魚数の多かった区画および最も産卵魚数の少なかった区画が判明した。さらに、産卵は区画内で均等に行われておらず、図-2の丸印のところが最も多いこともヒアリング調査によって判明した。ここは区画の最上流部に設置された巨石から発生する衝撃波が重なる点である。そこで、最も産卵魚数の多かった区画において、衝撃波がぶつかる2点をそれぞれGR1、GR2とし、最も産卵魚数の少なかった区画における同様な点をBR1、BR2とした。さらに、BRおよびGRの上流側における淵の部分それぞれPL1、PL2とした。

(2) 計測装置および方法

河床高・水位計測、流速計測および河床材料の粒径調査を2003年12月16日に行った。この時期は産卵シーズンがほぼ終了する時期に相当する。この日の天気は晴れで、ほぼ無風状態であった。スタッフおよびレベルを用いてGR、BR、PL1およびPL2における河床高および水位を流下方向に2m間隔で6点程度計測した。3次元電磁流速計を鉛直方向に約20~25点トラバースして流速3成分を計測した。測定時間は1点あたり51.2sで測定間隔は0.1sとした。GR1、GR2、BR1、BR2、PL1、PL2の各点において、河床材料を採取した。採取方法としては、まず80cm四方の板を採取ポイントの上流側に設置して流れをせき止め、スコップで河床材料をすくい上げ、細砂が流されないように注意しながらバケツに入れた。なお、アユの卵は6~10cmの深さに生み付けられるので¹²⁾、約10cm深さまでの河床材料を採取した。

3. 既往の研究および現地計測結果に基づく考察

前報¹¹⁾で、大瀬川においては水深、流速、SS、水温の順番でアユの産卵に影響を与えることを指摘した。この結果は大瀬川固有のものであり、全国の河川で必ずしも適用できる保証はないが、水深や流速が重要なパラメータであることは既往の研究でも指摘されているため、これらの適正範囲を示すことは重要である。表-1に既往の研究で示されたアユの産卵に適した水深、流速等を記す^{9), 13) 32)}。

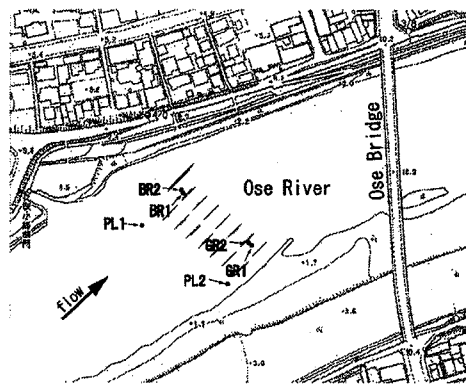


図-1 安賀多の瀬の概要

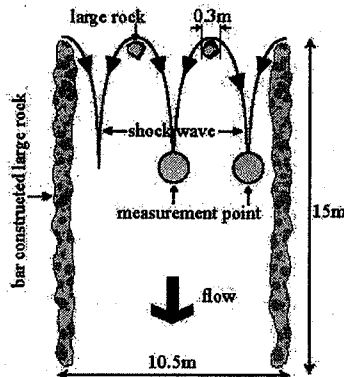


図-2 瀬における最も産卵が行われるポイント

(1) アユの産卵に適した水深

アユの産卵に適した水深を調査する研究は古くは1908年の浪江¹³⁾の研究までさかのぼる。彼はアユの産卵場所が「河中の瀬」であることを述べたにすぎなかったが、その後、具体的な数値を示す研究が行われた。図-3に既往の研究で示されたアユの産卵に適した水深 h を0.05m刻みのヒストグラムで示すと共に、その累積数を示した。既往の研究における値のほとんどは単一値ではなく範囲で示されているため、その範囲内の水深をすべて1度数とした。なお、表-1中には琵琶湖に注ぐ川で得られたデータもあるが、琵琶湖に生息するアユは垂種であり一般に体長が小さいため、今回の解析からは除外した。既往の研究結果に基づく、アユの産卵に適した水深 h の最小値は0.03mで最大値は2.0mとなっている。アユの体高 B_H は一般的に3~5cmなので、アユの体高の1倍程度から50倍程度と極めて広範囲にデータがばらついている。鈴木²²⁾はアユが背びれを空气中に露出するほど浅い水深でも産卵することを指摘している。同様な行動が大瀬川でも観察されることを漁協に対するヒアリング調査から判明した³³⁾。また、石田¹⁹⁾は実験池において水深およびアユの体長を系統的に変化させて、産み落とされた卵数を計測した。石田の結果を図-4に示すが、卵数と水深との間に明確な相関は認められない。また、漁協のヒアリング調査によって、水深よりも流速の方がアユの産卵に大きな寄与があると感じていることも判明した³³⁾。以上のことから、アユの産卵に対しては、水深よりも流速の方が重要と考えられる。

表-1 既往の研究に基づくパラメータの選好値

発表者	流速 (m/s)	水深 (m)	粒径 (mm)	対象河川	備考
波江(1908)	瀬				
青木(1924)		0.45-1.2	200以下		
阿部(1933)		1.8			
川那部ら(1957)					
鈴木(1958)	0.264	0.11 1.0		員弁川(1954.10.22) 宮川(1954.11.11)	
石田(1961)	0.73(上層),0.48(下層) 0.75(上層),0.65(下層) 0.46(上層),0.42(下層)	0.33 0.28 0.25	浮き石	姉川(1957.9.17-9.25)	河床耕耘後の計測 琵琶湖
石田(1961)	1.0	0.05-0.1		大分川(1958)	河床耕耘後の計測
石田(1972)			10以下		
大野(1975)	0.5-0.7				
石田(1976)	0.5-2.5(上層),0.4-1.2(下層) 0.2-0.5(下層) 0.5-0.8(上層) 0.5-0.8(上層) 0.6-1.1(上層),0.4-0.7(下層) 0.7-1.2(上層),0.5-0.85(下層) 0.5-2.5(*1),0.4-0.8(*2) 0.1(*1) 0.5-1.0(*1),0.2-0.5(*2) 1.2(*1) 0.8-1.3(*1)	0.3-0.6 0.1-0.3 0.1-0.3 0.1-0.3 0.3-0.6 0.2-0.5 0.3-0.6 0.5 0.1-0.3 0.65 0.3-0.6		中津川(1954.9下旬～10初旬) 小鮎川(1954.11初旬～12末) 小鮎川(1954.11初旬～12初旬) 小鮎川(1955.11初旬～12初旬) 相模川(1955.10中旬～11末) 相模川(1955.10中旬～11末) 中津川(1957.10.12) 相模川(1954.11.1) 小鮎川(1954.11.1) 相模川(1956.11.5) 相模川(1956.11.5)	河床耕耘後の計測 *1:水面下5-10cm *2:底面から5-10cm
Ishida & Ichijo (1990)	0.6, 0.5-0.65	0.2-0.25	10以下	安曇川・姉川	琵琶湖
Hara(1990)	0.5	0.1-0.2	5-25	安曇川・姉川	琵琶湖
Akazaki(1990)			礫床	一般的 五ヶ瀬川	
中川・小池(1999)	0.6	0.3			
五ヶ瀬川(2001)	0.5-1.6	0.15-0.7	5以下	五ヶ瀬川	
永矢・松尾(2002)	0.35	0.3	礫床		
新潟内水試	0.5-0.8 0.3-0.6	0.05-0.15	10以上	海川(1990-1992)	
多摩川県水試		0.5-1.5	20-80	荒川(1988)	
神奈川県淡水増 試	0.1-0.7		5-20	酒匂川(1983-1984)	
淡水区水研		0.05<	0.5<	西湖(1952)	
滋賀水試	0.3-0.7 0.4-0.6	0.1-0.3 0.1-0.2	10	芹川(1972-1973) 琵琶湖周辺の河川	琵琶湖
和田吉弘(1964)	0.35-1.5			長良川(1964)	
岐阜県	1.1 1.27-1.48 0.738-1.33 0.886-1.21	0.3-0.5 0.49-0.6 0.05-0.5 0.1-0.4	100< 50	長良川(1978-1991)	
	0.58-1.66 0.56-1.48	0.12-0.58 0.1-0.4	100<	揖斐川(1981-1991)	
静岡県水試	1.0-2.0 0.1-1.0	0.4-0.8 0.05-0.4		天竜川(1965, 1972-1986)	
	0.4-0.9 0.4-0.5 0.2-0.6	0.2-0.4 0.1-0.3 0.05-0.1 0.05-0.4		都田川(1965)	
和歌山内水漁協 センター	0.3-1.65 0.4-1.3	0.12-0.38 0.08-0.46	22-75 20<	日高川(1986) 日高川(1987)	
三重水試	0.264	0.11		員弁川(1954)	
鳥取水試		0.2-0.4 0.03-0.15		千代川(1967)	
	0.25-1.0	0.2-0.6		天竜川(1968)	
	1.3-1.6 0.25 0.6 2-2.5	0.1-0.4 0.3 0.1-0.2 0.5		日野川(1969)	
		0.2-0.3		太田川(1966)	
		0.3 0.12		沼田川(1966)	
広島県南部淡水 魚指導所					

宮崎水試		0.2-0.25		五ヶ瀬川(1983-1984)	
全国内水面漁業協同組合連合会(1993)	1.01	0.3		海川(1990) (新潟)	河床耕耘後の計測
	0.519	0.08		海川(1990) (新潟)	河床耕耘後の計測
	0.312	0.06		海川(1990) (新潟)	河床耕耘後の計測
	0.588	0.12		海川(1990) (新潟)	河床耕耘後の計測
		0.7	浮き石	木曾川 (岐阜)	河床耕耘後の計測
		0.3	浮き石	揖斐川 (岐阜)	河床耕耘後の計測
		0.3-0.5	浮き石	天竜川 (静岡)	河床耕耘後の計測
		0.1-0.5	浮き石	知内川 (滋賀)	河床耕耘後の計測
		0.4	浮き石	由良川 (茨城)	河床耕耘後の計測
		0.2-0.4	浮き石	日高川 (和歌山)	河床耕耘後の計測
		0.4	浮き石	千代川 (鳥取)	河床耕耘後の計測
		0.3-0.4	浮き石	大野川 (大分)	河床耕耘後の計測
		0.03-0.1		酒匂川 (神奈川)	
		0.05-0.45		揖斐川 (岐阜)	
		0.15-0.45		長良川 (岐阜)	
		0.08-0.46		日高川 (和歌山)	
		0.482-0.515		大野川 (大分)	
		0.05-1.4		荒川 (埼玉)	
		0.2-2.0		太田川 (広島)	
		0.3-1.0		沼川 (広島)	

(2) アユの産卵に適した流速

図-5に既往の研究で示されたアユの産卵に適した断面平均流速 U_m を0.05m/s刻みのヒストグラムで示すと共に、その累積数を示した。ただし、上層および下層のデータで構成されているものは両者の平均値を用いた。用いたデータおよび作成方法は図-3と同様である。既往の研究では、アユの産卵に適した断面平均流速 U_m の最小値は0.1m/sで、最大値は2.5m/sである。ところで、体長 B_L が15cm程度のアユの突進速度 U_{BS} は、次式で示される³⁴⁾。

$$U_{BS} = 12.4 B_L \tag{1}$$

アユの体長は、産卵シーズンの初期に大きく、産卵シーズンの経過に伴い減少することが知られているが¹⁷⁾、平均的な値として $B_L=20\text{cm}$ を用いると、2.5m/sの値はほぼ突進速度に匹敵し、産卵に適した速度とは考えにくい。一方で、石田¹²⁾は産卵期のアユを実験池に放流し、アユの行動を観察した。その結果、アユを実験池に放流した後の数日間は上・中層を泳ぐが、その後、日の経過と共に遊泳層が深くなることを述べている。また、産卵中のアユは底面に腹部を河床に押しつけているし、産卵前後も深い水深の場合は底面付近を泳ぐものが多い。したがって、アユの産卵に適した流速を議論する上で、断面平均流速ではなく、底面近傍の局所平均流速を用いるべきと考えられる。しかし、そのようなデータはほとんど存在しないので、2.に述べた要領で現地計測を行った。

図-6に河床に直角上向き座標 y をアユの体高 B_H で、平均流速 U をアユの突進速度 U_{BS} で無次元化したものを示す。こうした無次元化を行った理由は次の通りである。産卵中および産卵前後にアユが体感する流速の領域はアユの体高 B_H 程度なので、座標 y はアユの体高 B_H で無次元化した。また、体長の大きなアユは高流速領域に産卵し、体長の小さなアユは低流速領域に産卵することを漁協に対するヒアリング調査で明らかとなったため、

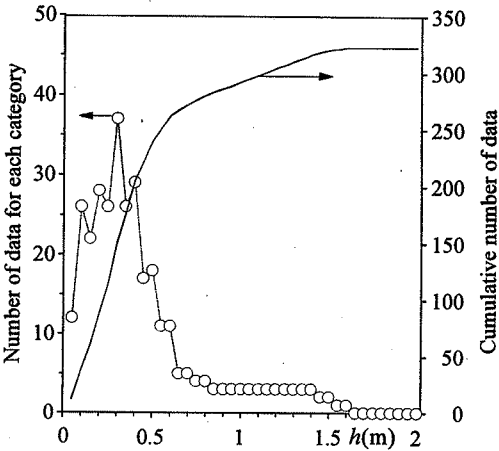


図-3 既往の研究におけるアユの産卵に適した水深

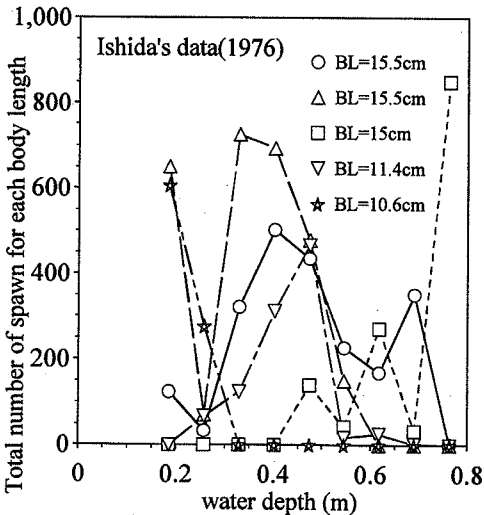


図-4 水深とアユの体長変化に伴う産卵数

アユの体長が考慮された突進速度 U_{BS} で流速を無次元化した。なお、アユの体長 B_L に関しては、現地計測を行った日に漁協から提供いただいた約50尾のアユの体長

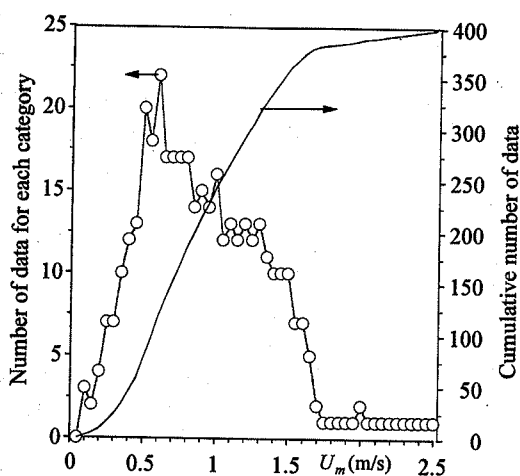


図-5 既往の研究におけるアユの産卵に適した断面平均流速

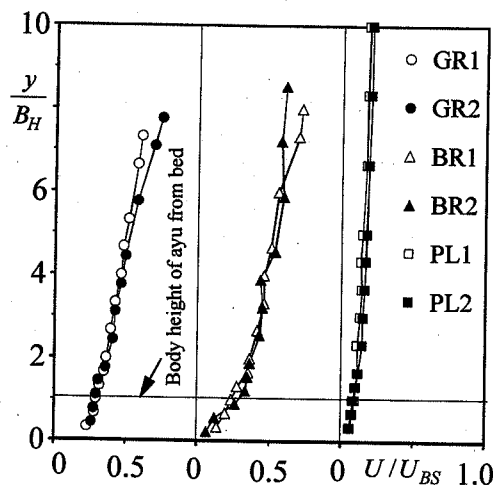


図-6 アユの特性を考慮した流速分布表示

表-2 現地流速測定で得られた結果

	h (m)	Fr	U_{mean} (m/s)	U_{max} (m/s)	U_{ayu} (m/s)	U_{ayu}/U_{BS}
GR1	0.25	0.45	0.70	1.11	0.47	0.253
GR2	0.25	0.52	0.82	1.39	0.45	0.242
BR1	0.28	0.44	0.73	1.34	0.34	0.183
BR2	0.28	0.43	0.78	1.12	0.31	0.167
PL1	0.71	0.12	0.30	0.39	0.13	0.070
PL2	0.69	0.13	0.34	0.41	0.12	0.065

の平均値(15cm)を用い、アユの体高 B_H に関しては、図鑑³⁵⁾に掲載されたアユの写真から求めた次式で算出した。

$$B_H/B_L = 0.2 \quad (2)$$

表-2に各ポイントで得られた水深 h 、フルード数 $Fr \equiv U_m/\sqrt{gh}$ 、断面平均流速 U_m 、最大流速 U_{max} 、底面からアユの体高までの局所平均流速 U_{ayu} および無次元局所流速 U_{ayu}/U_{BS} を示す。ここに、 g は重力加速度である。産卵魚数の最も多かったGRの U_{ayu}/U_{BS} が約0.25に対し、産卵魚数の最も少なかったBRの U_{ayu}/U_{BS}

は約0.17程度となっている。この速度差によって産卵魚数が変化したかどうかを断定するにはさらに検討が必要であるが、少なくとも U_{ayu}/U_{BS} が0.17~0.25の範囲ではアユの産卵が可能と判断される。

4. 既往の研究との比較

既往の研究で示されたアユの産卵に適した断面平均流速 U_m を局所平均流速 U_{ayu} に変換し、前章の結論と比較検討する。これには、流速分布の形状が既知でなければならない。粗面等流の内層($y/h \leq 0.2$)における流速分布としては次式の対数則が広く用いられている。

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y + \Delta y}{k_s} + A_r \quad (3)$$

ここに、 U_* は摩擦速度、 κ (≈ 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、 Δy ($=1/4 k_s$) は原点補正量である³⁶⁾⁻³⁹⁾。対数則は本来、内層($y/h \leq 0.2$)しか適用できないが、工学的には外層($y/h > 0.2$)にも適用させることが多い。底面から任意の高さ y_1 までの局所平均流速 U_{y1} は次式となる。

$$U_{y1} = \left\{ \frac{1}{\kappa} \left(\ln \frac{y_1 + \Delta y}{k_s} - 1 \right) + A_r \right\} U_* \quad (4)$$

$y_1 = h$ とすると断面平均流速 U_m が得られる。

$$U_m = \left\{ \frac{1}{\kappa} \left(\ln \frac{h + \Delta y}{k_s} - 1 \right) + A_r \right\} U_* \quad (5)$$

式(4)および(5)を連立すると摩擦速度 U_* が消去されるので、断面平均流速 U_m 、水深 h 、原点補正量 Δy ($=1/4 k_s$)、相当粗度 k_s 、カルマン定数 κ (≈ 0.412)、積分定数 A_r (≈ 5.29) を代入することで³⁶⁾⁻³⁹⁾、局所平均流速 U_{ayu} が算出される。これらの諸量の内、相当粗度 k_s は不明である。そこで、現地調査によってGR1およびGR2で得られた粒度分布から次式で示されるEinstein⁴⁰⁾の式を用いて相当粗度 k_s を求め、その値を代入する。

$$k_s = d_{65} \quad (6)$$

ここに、 d_{65} は65%通過粒径である。以上の仮定より、既往の研究で示された水深 h および断面平均流速 U_m から局所平均流速 U_{ayu} を得ることができた。図-7に既往の研究において水深 h および断面平均流速 U_m が一対で示された中川・小池³⁰⁾、永矢・松尾⁹⁾、三重水試および全国内水面漁業協同組合連合会のデータ³²⁾およびGR、BRにおける断面平均流速 U_m と局所平均流速 U_{ayu} の関係を示す。断面平均流速 U_m の範囲は0.26~1.01m/sであったものが、局所平均流速 U_{ayu} に変換すると0.15~0.47m/sとなった。この変換にはいくつかの仮定を用いているため厳密な値を示しているとは限らないが、既往の研究におけるアユの産卵に適した断面平均流速の範囲よりかなり小さな範囲になった。

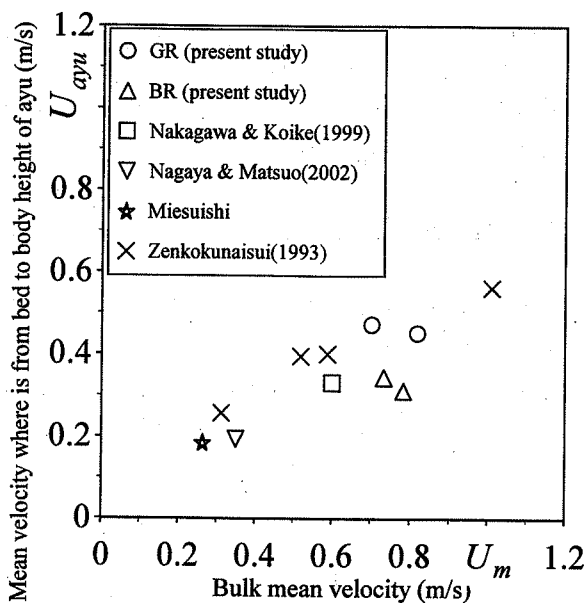


図-7 既往の研究および本研究における U_m と U_{ayu}

5. おわりに

本研究では、アユの産卵に適した水深および流速について検討した。既往の研究および漁協に対するヒアリングを行った結果、水深よりも流速の方がアユの産卵への寄与が大きいことが示唆された。続いて、流速に関しては、アユの産卵中および産卵前後の行動特性を考慮すると、断面平均流速よりも底面近傍の局所平均流速の方が適切なパラメータであることが示された。さらに、産卵可能な流速が体長に依存することから、流速の絶対値よりもアユの突進速度で無次元化した流速を用いることが適していると考えられ、現地計測を行った結果、底面からアユの体高までの局所平均流速がアユの突進速度の17～25%の範囲では少なくともアユの産卵が可能であることが示された。また、いくつかの仮定を用いて既往の研究で示された断面平均流速を局所平均流速に変換した結果、本研究結果と類似した範囲にあることが示された。

今後、アユの産卵に適した局所平均流速および河床材料の粒度分布を詳細に計測し、より厳密な値を求めていきたい。こうした適正值が解明されると、アユの保全を考慮した川づくりに貢献することができる。

謝辞：現地計測に際して理解・協力いただいた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謝意を表す。建設環境研究所の清水孝および豊國法文の両氏には貴重な資料を提供いただいた。国土交通省延岡河川国道事務所の鶴崎秀樹課長、田上幸喜調査係長、西江和典技官、嘉瀬川ダム工事事務所調査設計課の甲斐英明調査係長、福岡国道事務所工務課の宮城純技官の諸氏にはアユに関するデータを提供いただいた。大分工業高等専

門学校の河野晶文、河野由季、佐藤由紀、九州工業大学大学院生の伊瀬知栄人、常松智博、木内大介および当時九州工業大学学部生の武田雅俊（愛媛県庁）の諸氏には現地計測に協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 田代喬ら，河川技術論文集，第8巻，pp.277-282，2002.
- 2) 田代喬ら，水工学論文集，第47巻，pp.1105-1120，2003.
- 3) 知花，玉井，水工学論文集，第46巻，pp.1145-1150，2002.
- 4) 砂田，川村，水工学論文集，第48巻，pp.1561-1566，2004.
- 5) 植村三香ら，水工学論文集，第47巻，pp.1117-1122，2003.
- 6) 永矢，松尾，河川技術論文集，第8巻，pp.73-78，2002.
- 7) 砂田憲吾ら，水工学論文集，第47巻，pp.1123-1128，2003.
- 8) 北村忠紀ら，河川技術論文集，第7巻，pp.297-302，2001.
- 9) 田代，辻本，水工学論文集，第46巻，pp.1151-1156，2002.
- 10) 喜多村雄一ら，河川技術論文集，第8巻，pp.295-300，2002.
- 11) 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，水工学論文集，第48巻，pp.1549-1554，2004.
- 12) 石田力三：アユの産卵生態-I，*Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, Vol.25, No.4, pp.259-268, 1959.
- 13) 浪江元吉，動雑，第20巻，No.237，pp.263-264，1908.
- 14) 青木赴雄，水研誌，第19巻，No.11，pp.398-401，1925.
- 15) 阿部圭：鮎，大日本水産会，pp.265，1933.
- 16) 石田力三，水産増殖，Vol.9，No.2，pp.67-78，1961.
- 17) 石田力三，淡水研報，第17巻，1号，pp.8-19，1967.
- 18) 石田力三，さかな，第29号，東海区水産研究所，pp.13-20，1972.
- 19) 石田力三，アニマ，No.43，pp.12-20，1976.
- 20) Ishida, M. and Ichijo, E., *Proc. of the Int. Symposium on Fishways, '90 in Gifu, Japan*, pp.81-84, 1990.
- 21) 大野喜弘，滋賀県水産試験場研究報告，Vol.27，pp.18-22，1975.
- 22) 鈴木喜三郎，水産増殖，Vol.5，No.3，pp.21-26，1958.
- 23) 水野信彦，淡水魚，第6号，pp.1-7，1980.
- 24) 川那部浩哉ら，生理生態，第7巻，No.2，pp.145-167，1957.
- 25) 川那部浩哉，桜井淳史：アユの博物誌，平凡社，1982.
- 26) Akazaki, M., *Proc. Int. Symp. on Fishways, '90 in Gifu, Japan*, pp.45-52, 1990.
- 27) Hara, N., *Proc. Int. Symp. on Fishways, '90 in Gifu, Japan*, pp.75-80, 1990.
- 28) Sugishita, T., Ono, K. and Mitura, H., *Proc. Int. Symp. on Fishways, '95 in Gifu, Japan*, pp.24-26, 1995.
- 29) 国土交通省延岡工事事務所：五ヶ瀬川のアユ，2001.
- 30) 中川，小池，リバーフロント研究所報告，第10号，pp.22-36，1999.
- 31) 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一，1994.
- 32) 全国内水面漁業協同組合連合会：魚を育む豊かな流れ—河川生物資源保全流量調査報告書一，1989.
- 33) 延岡五ヶ瀬川漁業協同組合：談話，2003.
- 34) ダム水資源地環境整備センター：最新魚道の設計，信山社サイテック，1998.
- 35) 川那部浩哉ら：日本の淡水魚，山と溪谷社，2001.
- 36) Nezu, I. and Nakagawa, H.: *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR-Monograph, Balkema, Netherlands, 1993.
- 37) Lane, E. W., *Proc. A.S.C.E.*, Vol.270, 1935.
- 38) 中川博次ら，第32回水理講演会論文集，pp.535-540，1988.
- 39) Nezu, I. and Rodi, W., *J. of Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.112, pp.335-355, 1986.
- 40) 川村三郎，小沢功一，土木学会誌，pp.53-58，1970.
- 41) 瀬津，中山，土木学会論文集 No.593/II-43，pp.69-78，1998.

(2004. 4. 7受付)