

アユの産卵に適した水深および流速の選好曲線 に関する検討

PREFERENCE CURVES OF FLOW DEPTH AND VELOCITY FOR SPAWNING
OF AYU, *PLECOGLOSSUS ALTIVELIS*

鬼束幸樹¹・永矢貴之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・白石芳樹²

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

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

³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)

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

It is well known that ayu, *Plecoglossus altivelis*, spawns at the rapid in the lower reaches of rivers. However, suitable conditions, such as the flow depth and velocity, for spawning of ayu are not known, so that the high accurate environmental assessment has not been conducted. In this study, preference curves of the flow depth and velocity for spawning of ayu were investigated on the basis of the field survey and previous data. It was found that the flow depth does not affect on the suitability of spawning for ayu so much, due to ayu swims near the bed before and after spawning. In contrast, the velocity strongly affects on the suitability of spawning for ayu. The preference curve of the velocity for spawning of ayu can be obtained. The surface condition of the bed material also affects on the suitability of spawning for ayu. Further, suitability index of spawning for ayu is predicted with the aid of PHABSIM on the basis of 2-D numerical simulation. It was conformed that the accuracy of the prediction is high.

Key Words : Ayu, spawning, environmental assessment, suitability index, PHABSIM

1. はじめに

1981年の河川審議会の答申により「河川環境」という概念が取り上げられて以来、河川環境を保全する気運が高まっている。1990年には「多自然型川づくり」の通達が出され、1991年には「魚がのぼりやすい川づくり推進モデル事業」が着手され、近年はこれを発展させた「魚がすみやすい川づくり」に方針がシフトしつつある。また、河川法が改正された1997年には、「環境影響評価法」が制定され、さらに、2003年には「自然再生推進法」が施行された。したがって、今後の河川計画の策定に当たっては、信頼に足る河川環境アセスメントを遂行することが必要不可欠となる。特に、魚類の生息環境の悪化は、内水面で生計を立てる漁師にとっては深刻な問題であり、負荷を最小限にとどめる必要がある。

HQI, HEP, PHABSIMなど様々な環境評価法が提案されているが、河川魚類の生息環境評価に頻繁に用いられるのはPHABSIMである。1976年にPHABSIMを包括するIFIMが米国の国立生物研究所で開発され、1995年に中村ら¹⁾²⁾が日本に紹介して以来、国内の多くの河川魚類評価に使用されている³⁾⁴⁾。PHABSIMは水深、流速、底質、カバーといった各パラメータに対する選好曲線から選好値を算出し、利用可能面積を求めるものである。しかしながら、これまで行われた生息環境評価の事例には、必ずしも十分な精度を有していないものがある。これは、各魚類の各パラメータに対する選好曲線が不明なために、選好曲線を経験的に与えていたり、常に1.0としていることが一因である。最も経済価値の高い河川魚類の一種であるアユについても例外でなく、アユの生息あるいは産卵に適した各パラメータの選好曲線は明確でない。

アユは、下流域の瀬に産卵し、孵化後直ちに海洋に流下し、半年弱の海洋生活の後の春頃に川を遡上し、中流域で成長して秋頃に成熟する¹²⁾¹⁹⁾。そのため、各パラメータの選好曲線は、仔魚の流下、遡上、生息および産卵の各フェイズで異なることが予想されるが、本論文では産卵環境について着目し、アユの産卵に影響を与える各パラメータの選好曲線を解明し、アユの産卵環境評価法を提案する。さらに、五ヶ瀬川派川の大瀬川を対象として産卵適正值を予測し、フィールドデータと比較することで産卵環境評価法の妥当性を検討した。

2. アユの産卵適正值の予測手法

PHABSIMに基づく適正值 CSI は各パラメータの選好値 SI の積として求められる²⁾。パラメータの選択手法は対象とする魚種および事象に応じて取捨選択する必要があるが、選択手法は長年確立されていなかった。前報²⁰⁾²¹⁾では、アユの産卵に影響を与えていると推測される多くのパラメータと産卵密度との関係を主成分回帰分析によって求めた結果、少なくとも大瀬川においては水深、流速、SS、水温などがアユの産卵に支配的な影響を与えていることが解明された。しかし、従来から指摘されていた底質についてはデータ不足のために解析には取り込まれていなかった。SSおよび水温といった水質パラメータは選好値としてではなく、しきい値として働く。したがって、アユの産卵適正值 CSI は、次式で求められる。

$$CSI = SI(h) \times SI(v) \times SI(s) \quad (1)$$

ここに、 $SI(h)$ 、 $SI(v)$ 、 $SI(s)$ は、それぞれ、水深 h 、流速 v および底質 s に対する選好値である。これらの3つのパラメータの選好曲線を解明することで、アユの産卵環境の予測精度が飛躍的に向上する。

3. フィールドデータの取得

(1) 既往のフィールドデータ

アユの産卵に適した水深、流速および底質に関するデータは多く存在するが、最もまとめられているものは全国内水面漁業協同組合連合会が作成した「アユの産卵場づくりの手引き」²²⁾である。アユの産卵が確認された水深および流速のデータが示されているが、底質については詳細な記述はあまりない。

(2) 現地計測によるフィールドデータの取得

宮崎県北川町を貫流する北川および宮崎県延岡市を貫流する五ヶ瀬川派川の大瀬川を計測対象に選んだ。北川は自然産卵床を有しているが、大瀬川では産卵シーズン前の9月上旬頃に重機を用いて人工的に瀬を整地し、さ

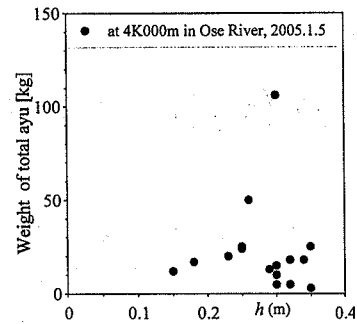


図-1 水深と漁獲高の関係

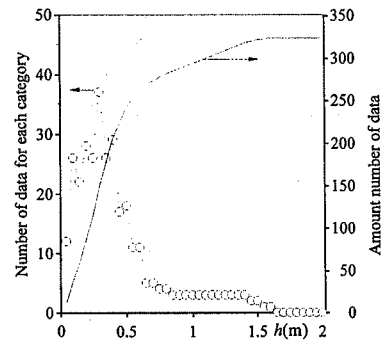


図-2 既往の研究によるアユの産卵が確認された水深

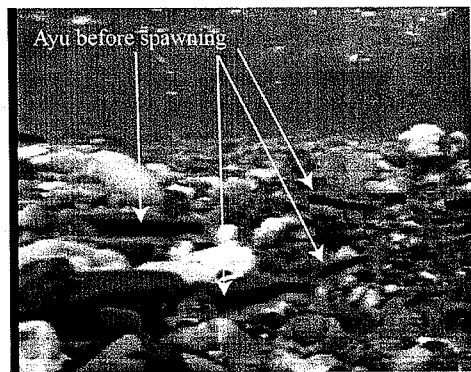


図-3 産卵前後のアユの遊泳位置

らに産卵シーズン中も漁師の経験に基づき手作業によって最適な産卵床となるように河床耕耘がなされている。したがって、前者の計測で自然な産卵環境を抽出でき、後者では理想的な産卵環境を抽出できると考えられる。

2004年12月9日に北川の河口から12K400m付近の8地点において、2004年12月10日に10K300m付近の8地点において計測を行った。2003年12月16日に大瀬川の4K000m付近の4地点において、2005年1月5日に16地点において計測を行った。全ての計測日の天候は晴れでほぼ無風状態であった。計測項目は水深計測および流速計測である。3次元電磁流速計を鉛直方向に約12~25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0.05sとした。

2005年1月5日に計測対象とした大瀬川の16地点については、2004年度のアユの年間漁獲高データを延岡五ヶ瀬川漁協から提供頂いた。漁師は産卵に来たアユを針に引っかけて釣り上げるため、漁獲量と産卵適正值は比例

すると考えられる。また、2003年度および2004年度の北川におけるアユの産卵床の河床材料に付着している微細流砂量、付着藻類量および浮き石か沈み石かどうかのデータを北川漁協から提供頂いた。

詳細は後述するが、大瀬川4K000m付近の現況のアユの産卵状態を予測するために、平面2次元計算を行った。これに先立ち、アユの産卵床を網羅する領域において、流下方向に10m間隔で15測線、横断方向に5m間隔で33測線における河床高および水深を2003年9月3日に計測した。

4. アユの産卵に適した水理環境

(1) アユの産卵に適した水深の選好曲線

図-1に大瀬川で得られたアユの産卵床における水深 h とその地点でのアユの漁獲高との関係を示す。水深が15～35cm程度の範囲で産卵が行われていることがわかる。しかし、漁協にヒアリングすると、河床耕耘の際に水深よりも流速に注意していることが判明した。図-2に既往の計測¹²⁾²⁴⁾で得られたアユの産卵床の水深 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。アユの産卵床の水深 h の最小値は0.03mとなっている。鈴木¹⁷⁾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がヒアリング調査から判明した。一方、アユの産卵床の水深の最大値は2.0mとなっている。アユの体高は一般的に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て、図-3に産卵期のアユの遊泳の様子を示す。アユは底面付近を泳いでいることが認められ、水深を意識して遊泳していないことが推測される。以上のことから、アユの産卵に適した水深の選好曲線を次式とした。

$$\begin{aligned} SI(h) &= 33.3h \quad (0 \leq h(\text{m}) < 0.03) \\ SI(h) &= 1 \quad (0.03 \leq h(\text{m})) \end{aligned} \tag{2}$$

(2) アユの産卵に適した流速の選好曲線

図-4に大瀬川で得られたアユの産卵床における水深平均流速 U_m とその地点でのアユの漁獲高との関係を示す。0.4～0.8m/s程度の範囲であることから、この程度の流速範囲が最適な流速と考えられる。現地計測結果および全国の河川で得られたデータ¹²⁾²⁴⁾を基に、図-5に流速に対

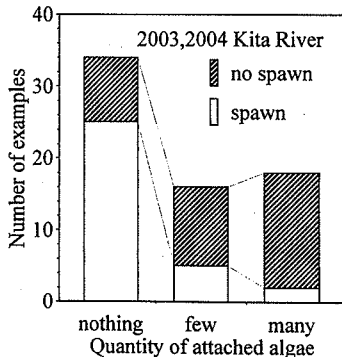


図-6 付着藻類の有無とアユ卵の有無

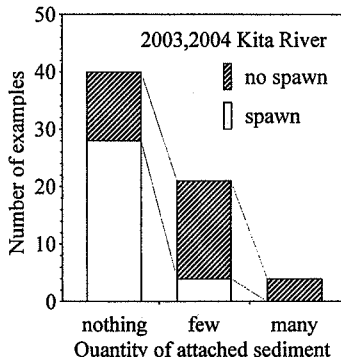


図-7 表面の付着流砂の有無とアユ卵の有無

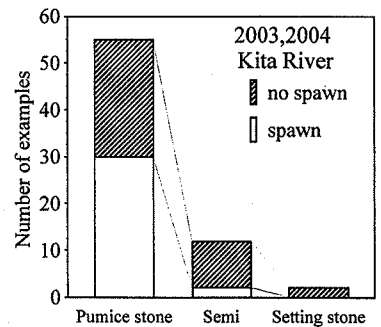


図-8 浮き石、沈み石によるアユ卵の有無

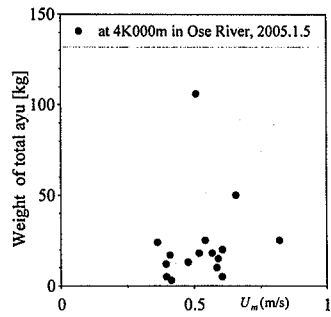


図-4 流速と漁獲高の関係

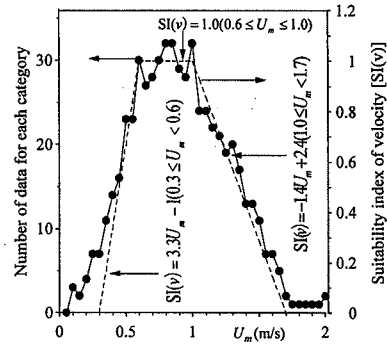


図-5 アユの産卵に適した流速の選好曲線SI(v)

してアユの産卵が確認された地点の事例数のヒストグラムを示す。流速の増加に従い産卵確認数が増加し、およそ0.6m/s付近から1.0m/s付近までに最大を取り、その後減少する傾向が観察される。そこで、流速が0.6m/sから1.0m/sの 때가最も産卵に適した状態と判断し、流速の選好曲線を次式のように提案する。

$$\begin{aligned} SI(v) &= 0 \quad (0 \leq U_m(\text{m/s}) < 0.3) \\ SI(v) &= 3.3U_m - 1 \quad (0.3 \leq U_m(\text{m/s}) < 0.6) \\ SI(v) &= 1 \quad (0.6 \leq U_m(\text{m/s}) < 1.0) \\ SI(v) &= -1.4U_m + 2.4 \quad (1.0 \leq U_m(\text{m/s}) < 1.7) \\ SI(v) &= 0 \quad (1.7 \leq U_m(\text{m/s})) \end{aligned} \tag{3}$$

(3) アユの産卵に適した底質の選好曲線

アユの産卵床に最適な底質の状態を漁協に対してヒアリング調査を行った結果、付着藻類の有無、付着微細流砂の有無および浮き石状態か沈み石状態かが重要な要素であることが判明した。また、これらのデータを北川漁協から入手した。

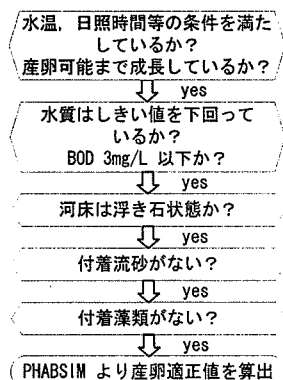


図-9 アユの産卵に必要な条件

図-6に河床材料における付着藻類の有無とアユ卵の有無の関係を示す。付着藻類が少ない方がアユの産卵に適していることがわかる。図-7に河床材料表面の付着微細流砂の有無によるアユ卵の有無を示す。付着微細流砂が少ない方が産卵に適している。図-8に浮き石か沈み石かどうかの状態とアユ卵の有無を示す。浮き石状態では産卵が確認されたものとされていないものがあるが、沈み石状態では全く産卵が確認されていない。以上から、付着藻類、付着微細流砂および石の設置状態がアユの産卵に影響を与えることが確認された。これら3つの状態は水深や流速に依存すると考えられる。事実、著者らが計測したアユの産卵床においてはこれら3つの条件が成立していた。今後、上記の3つの条件が成立する水理条件

を解明し、底質についての選好曲線 $SI(s)$ を示したい。

(4) アユの産卵に必要な条件

これまでアユの産卵に必要な水理条件について検討したが、アユが産卵期までに河川で生息し、成熟する必要があることはいうまでもない。一般に、アユが成熟するための気象の季節的要因が必要で、アユが生息するには水質が良好である必要がある。既往の研究も参照すると、アユの産卵が可能かどうかを判定するには、①気象条件、②水質条件および③水理条件の全てを満たす必要がある。今回は、水理条件の中の底質に関する選好曲線を示すことが出来なかったため、これを別の条件ととらえると、アユの産卵が可能かどうかを判断するフローチャートは図-9のようになる。最下段のPHABSIMは式(1)~(3)を用いることで評価可能である。

5. 平面2次元計算に基づくアユの産卵環境予測

(1) 数値計算モデルおよび境界条件

任意の水域がアユの産卵に適しているかどうかを判定するには、河道の水理量を計算し、さらに式(1)~(3)を用いたPHABSIMによって示すことができる。

計算メッシュは図-10に示すように、流下方向10m、横断方向5mとした。図中中央の点線は2003年9月3日に測量から得た河床高データを示し、実線は定期観測で

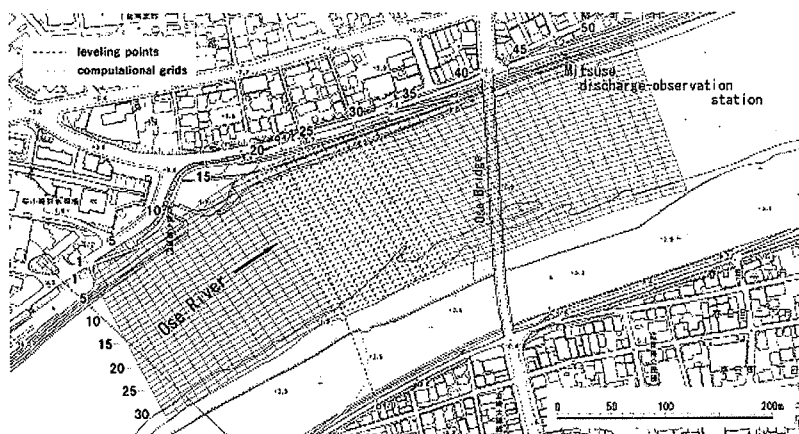


図-10 計算メッシュ (点線は実測で得られたもの、実線は補間でえられたもの)

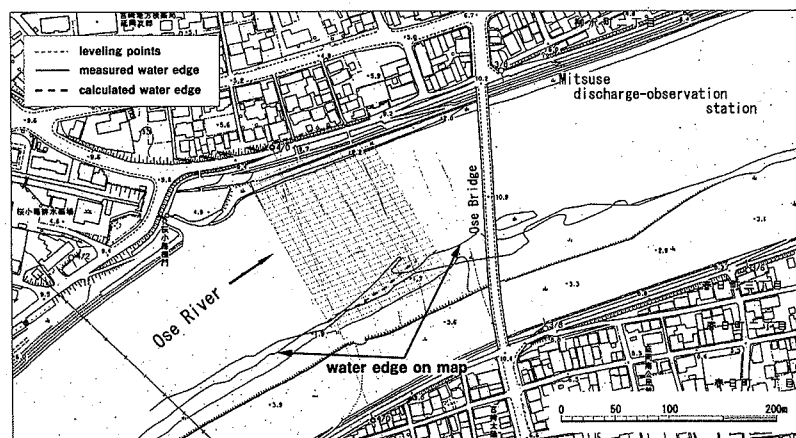


図-11 実測および計算で算出された水際線

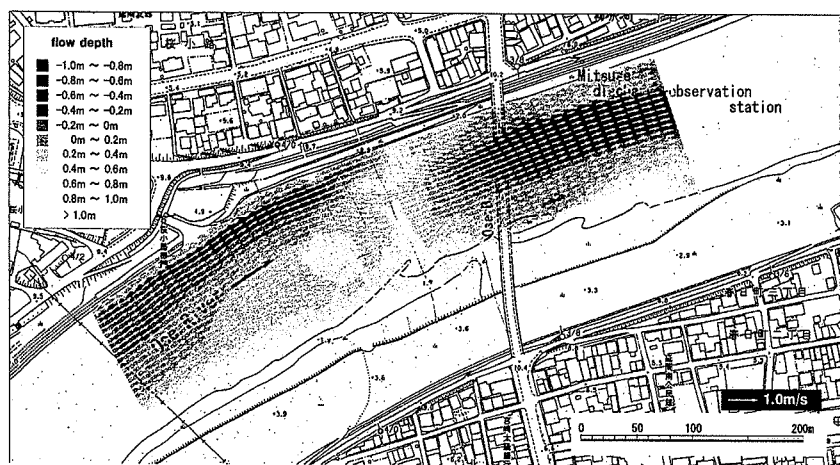


図-12 流速ベクトルと水深のコンターライン

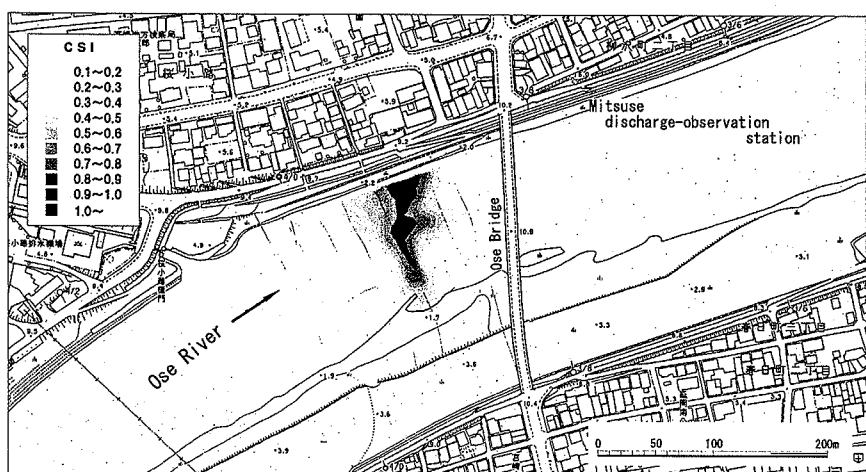


図-13 アユの産卵適正值 CSI の算出結果

得られている200m ピッチの横断形状を補間して得たデータを示す。

直交座標系の平面2次元モデルは次式で示される²⁵⁾。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial U_m M}{\partial x} + \frac{\partial W_m M}{\partial z} + gh \frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{\tau_{0x}}{\rho} - h \frac{\partial U_m' U_m'}{\partial x} - h \frac{\partial U_m' W_m'}{\partial z} \quad (5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial U_m N}{\partial x} + \frac{\partial W_m N}{\partial z} + gh \frac{\partial H}{\partial z} = -\frac{\tau_{0z}}{\rho} - h \frac{\partial U_m' W_m'}{\partial x} - h \frac{\partial W_m' W_m'}{\partial z} \quad (6)$$

ここに、 t は時間軸、 x および z は直交する水平座標、 $M \equiv hU_m$ 、 $N \equiv hW_m$ はそれぞれ x 、 z 軸方向の流量フラックス、 U_m 、 W_m はそれぞれ x 、 z 軸方向の水深平均流速、 U_m' 、 W_m' はそれぞれ x 、 z 軸方向の時間平均流速からの変動成分である。 τ_{0x} 、 τ_{0z} はそれぞれ x 、 z 軸方向の底面せん断応力、 H は基準面からの水位、 g は重力加速度である。式(4)~(6)を一般座標系に変換したものを用いた。

計算条件としては、マンニングの粗度係数を0.033とし、平常時の流量 $24.9\text{m}^3/\text{s}$ および計算領域の下流に位置する水位観測所で計測された水位を与え、流れが定常状態になるまで計算した。

(2) 計算結果および考察

図-11 中に計算で得られた水際線を実線で、2003 年9月3日の実測で得られた水際線を点線で示した。計算値は実測値を概ね表現しており、水深の計算精度が高いことが示された。したがって、流速の計算精度も高いと推測される。

図-12 に水深をコンターラインで、流速をベクトルで表示する。計算領域の上流端と大瀬橋との間で湾曲しているが、外岸側の深掘れ部分で流速が増加しており、妥当な結果と判断される。

式(1)~(3)を用いてアユの産卵適正值 CSI を図-13 に、2004年度の漁獲高を図-14に示す。計算で得られたアユの産卵に適した領域が、実際の領域よりも100m程度下流に位置している。図-15に示すように、河床高の測量を行った後に、重機で瀬を上流側に100m程度移動させているので、これを考慮すると今回示したアユの産卵適

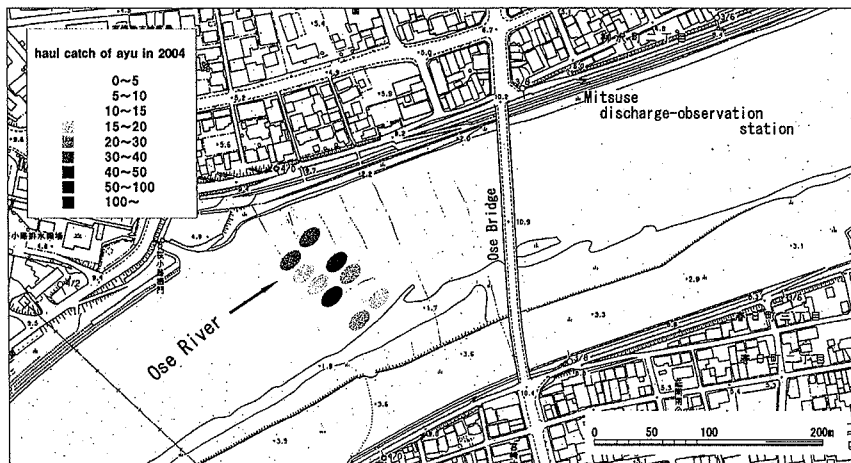


図-14 2004年度大瀬川におけるアユの漁獲高(Kg/year)

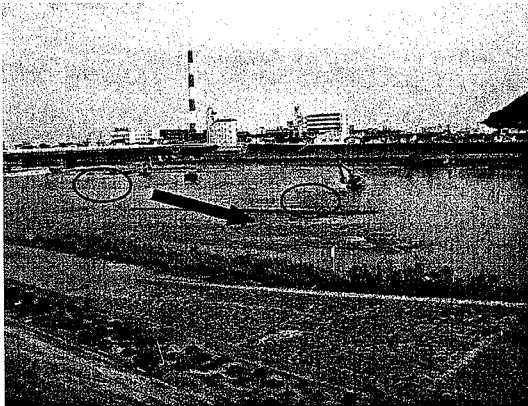


図-15 重機による瀬の移動 (大瀬川4K000m付近左岸から)

正值の予測結果は良好な結果であると考えられる。

6. おわりに

本研究では、アユの産卵に適した水理環境について検討した。水深と流速の選好曲線を式(2)~(3)のように得ることができた。また、河床材料に付着藻類が少なく、付着流砂量が少なく、浮き石状態であることが産卵床として必要であることが確認された。これらのことを踏まえてアユの産卵が可能かどうかを判断するフローチャートを図-9のように提案した。平面2次元計算とPHABSIMを併用することでアユの産卵に適した水域を推定することができた。

謝辞：現地計測に協力および資料提供を頂いた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資料を提供いただいた。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、建設技術研究所の小寺隆一郎および羽野友亮の諸氏には現地計測に協力頂いた。当時、大分高専あるいは九工大学生であった河野晶文、河野由季、伊瀬知栄人、常松智博、木内

大介、松本和也、川良典彰、鈴木鉄兵、首藤健次、俣賀円の諸氏には現地計測に協力いただいた。

参考文献

- 1) 中村俊六ら，河道の水理と河川シンポジウム，JSCE，pp.127-134，1995.
- 2) 中村俊六，テリー・ワドウル訳：IFIM入門，(財)リバーフロント整備センター，1999.
- 3) 北村忠紀ら，河川技術論文集，第7巻，pp.297-302，2001.
- 4) 田代喬ら，河川技術論文集，第8巻，pp.277-282，2002.
- 5) 田代喬ら，水工学論文集，第46巻，pp.1151-1156，2002.
- 6) 知花武佳ら，水工学論文集，第46巻，pp.1145-1150，2002.
- 7) 喜多村雄一ら，河川技術論文集，第8巻，pp.295-300，2002.
- 8) 植村三香ら，水工学論文集，第47巻，pp.1117-1122，2003.
- 9) 砂田憲吾ら，水工学論文集，第47巻，pp.1123-1128，2003.
- 10) 田代喬ら，水工学論文集，第47巻，pp.1105-1120，2003.
- 11) 砂田憲吾ら，水工学論文集，第48巻，pp.1561-1566，2004.
- 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) 石田力三，水産増殖，Vol.9，No.2，pp.67-78，1961.
- 14) 石田力三，淡水研報，第17巻，1号，pp.8-19，1967.
- 15) 石田力三，さかな，第29号，東海区水産研究所，pp.13-20，1972.
- 16) 石田力三，アニマ，No.43，pp.12-20，1976.
- 17) 鈴木喜三郎：産卵期のアユの生態及び産卵床について，水産増殖，Vol.5，No.3，pp.21-26，1958.
- 18) 川那部浩哉ら，生理生態，第7巻，No.2，pp.145-167，1957.
- 19) 川那部浩哉，桜井淳史：アユの博物誌，平凡社，1982.
- 20) 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.
- 21) Nagaya, T., Onitsuka, K., Higashino, M., Takami, T., Otsuka, N., Akiyama, J. and Matsumoto, K., *Env. Hydr. and Sustainable Water Manag.*, Vol.2, AA. Balkema Publishers, UK, pp.947-954, 2004.
- 22) 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.
- 23) 鬼束幸樹，永矢貴之，東野誠，高見徹，大塚法晴，秋山壽一郎，尾関明，白石芳樹，水工学論文集，第49巻，pp.1471-1476，2005.
- 24) 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，河川技術論文集，No.10，pp.447-452，2004.
- 25) 永矢貴之，松尾景治：平面流況解析を用いた動植物の生息・生育環境の評価，河川技術論文集，第8巻，pp.73-78，2002.

(2005. 4. 7 受付)