

アユの産卵に必要なパラメータの選定と 産卵密度の予測

EVALUATION OF WIGHT OF PARAMETER FOR EGG-LAYING OF AYU AND PREDICTION OF EGG DENSITY PER UNIT AREA

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 工学部建設社会工学科

Hydraulic structures such as a dam, weir and water gate affect on the flow depth, velocity, bed shape, water quality and so on, so that the hydraulic structures may affect on the water environment for plants and aquatic lives in an around rivers. Therefore, before construction of such hydraulic structures, it is necessary to conduct the environmental assessment. However, the accuracy of the environmental assessment is not so high at present, because it is not clear that what is the most suitable parameter which affects on the water environment. In this study, the most suitable parameter for spawning of Ayu were selected from the several values such as water temperature, velocity, flow depth, incline, BOD, COD, pH, SS and so on, on the basis of a principal component regression analysis. It was found that the most suitable parameters are temperature, velocity, flow depth and SS.

Key Words : Ayu, spawning, environmental assessment, parameter

1. はじめに

「環境アセスメント」という言葉を耳にして久しい。これは、土木構造物を建設あるいは改修工事等を行った場合に、人的インパクトが環境に及ぼす影響を定量的に予測しようというものであるが、これには2つの予測が必要となる。1つは物理環境の予測で、もう1つは生態環境の予測である。河川に堰を設置した場合を想定すると、堰の上下流で水深や流速が変化しそれに伴い河床形状が変化し、さらに、この影響によって流速や水深が変化するという物理環境の変化が予測される。続いて、物理環境の変化は生物や植物の分布およびそれらの個体数を変化させ、さらに、食物連鎖を通じて他の種類の生物や植物にも影響を与えるといった生態環境の変化が予測される。物理環境の変化については、流砂モデルや植生モデルの研究と近年の計算機能力の急激な発達によっ

て、ある程度の予測が可能になりつつある。ところが、生態環境の予測については困難を極めており、信頼に足る環境アセスメントの実現を阻んでいる。この要因として、物理環境の変化が生態環境に及ぼす影響の定量的評価方法が十分には確立されていないことが挙げられる。

しかしながら、河川で漁業を営む人々にとって、河川改修による漁獲高の変化は死活問題につながるため、物理環境の変化が生態環境に及ぼす影響の解明が切望されている。こうした背景から、土木学会河川懇談会は「アユの産卵床と物理環境に関する研究」を平成15年度から3年間推進することにした。これは、アユの産卵に必要な物理環境を定量的に把握し、アユの保全に助力を与えようというものである。対象魚をアユにした理由は、河川における漁獲量のトップをアユが頻繁に征していることやアユを対象としている釣り愛好家が多く、アユは最も保護しなければならない魚の一種と認識されているからである。また、アユは日本以外では韓国、中国、台湾

に生息するのみで、ヨーロッパやアメリカ大陸には生息していないため、アユに関する研究は我が国が率先して推進しなければならない¹⁾。

魚類の生息環境評価法として、近年、IFIM / PHABSIMが注目されている。砂田ら²⁾は流速、水深、底質および水温をパラメータ（PHABSIMでは適性指標と呼ぶ）とし、富士川本川におけるオイカワの実採捕数を説明した。田代・辻本³⁾は出水などによって河床の攪乱が生じた後にアユやオイカワの食物である藻類が増殖することに着目し、水深、流速に加えて河床攪乱頻度をパラメータとして採用し、アユおよびオイカワの生息評価予測を行った。知花・玉井⁴⁾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。一方で、ゲンジボタルの生息条件を数量化Ⅱ類によって求めた植村ら⁵⁾の研究では、BOD、COD、pH、DO、SS、水温、流速、水深、川幅、水路形状、樹木の繁茂状態、空間パターン、護岸の材質、照度および川底の流況をパラメータとして用い、魚類の生息環境を調査した野上ら⁶⁾の研究では、流速、水深、浮石の状態、河床材料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多変量解析で求めた喜多村ら⁷⁾の研究では、漁獲量、水温、SS、BOD、DO、流量、アユ生息範囲、河川工作物の流域面積、湛水面積、河床勾配、流域の森林面積に対する比をパラメータとして用いている。以上のように、水生生物の生息環境評価を行う上で、IFIM/PHABSIM、多変量解析などという評価手法はほぼ確立さ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、パラメータに何を選ぶかという選択基準が確立されていないことが原因である。従って、評価手法の選択よりも生息環境に影響を与えるパラメータの選定の方がむしろ重要であると同時に困難であると判断せざるを得ない。

本研究では、アユの産卵に必要なパラメータを既往の研究に基づいてピックアップし、統計手法を駆使して各パラメータの重みを算出し、重要なパラメータの選定を行う。さらに、主成分回帰分析を用いてアユの産卵密度を予測するモデル式の提案を行う。

2. アユの産卵に関する既往の研究

既往の研究で用いられたアユの産卵に必要なパラメータを表-1に示す。アユの産卵に必要な状態として、石田・一条⁸⁾は瀬であること、粒径が10mm以下であることおよび砂礫が浮き石状態、すなわち、足で踏むとザクザクしている必要があることを述べている。Hara⁹⁾は琵琶湖に注ぐ安曇川および姉川の河口に建設された人工産卵床を調査し、流速(50cm/s)、水深(10-20cm)、粒径(5-

表-1 既往の研究に基づく環境因子の選考値

	流速 (m/s)	水深 (m)	粒径 (mm)	水温 (℃)
石田・一条		0.2-0.25	10以下	
Hara	0.5	0.1-0.2	5-25	18前後
石田	0.2-1.2	0.1-0.6	5以下	
Akazaki				10-16
五ヶ瀬川	0.5-1.6	0.15-0.7	5以下	15以下

25mm)および水温(18℃前後)がパラメータであると述べている。石田¹⁰⁾は5つの河川を調べ、河口から標高50mまでの平均河床勾配と産卵床の河口からの距離とが相関が高いことを示し、流速(20-120cm/s)、水深(10-60cm)、粒径(10mm以下で特に5mm以下)および浮き石状態かどうかパラメータであると指摘した。Akazaki¹²⁾はアユの産卵適水温(10-16℃)であると述べている。五ヶ瀬川^{11),12)}のアユの産卵床を観察した結果によると、流速(50-160cm/s)、水深(15-70cm)、粒径(10mm以下で特に5mm以下)、水温(15℃以下)および石表面がつるつるした状態であることが必要とされている。杉下ら¹³⁾による人工河川でのふ化実験では、水温および溶存酸素量をパラメータとして用いている。一方で、SS、CODによる影響も指摘されている¹⁴⁾。また、日本水産資源保護協会が刊行している「水産用水基準」では、アユに適した水質環境としてDO(7mg/L以上)およびBOD(2mg/L以下)の値に特に注意が必要と記載されている。

以上のように、アユの産卵に影響を与えるパラメータが何であるかは研究者によって意見が分かれており、統一的な見解は得られていない。そこで本研究では既往の研究で使用されたパラメータを極力多く解析の対象にして、アユの産卵に影響を与えるパラメータの抽出を行う。既往の研究におけるパラメータを総括すると、流速、水深、河床勾配、粒径、浮き石の状態（水理的パラメータ）、水温、pH、DO、BOD、SS、COD、大腸菌群数（水質的パラメータ）がパラメータとして考えられる。

3. 対象データ

前章に示したパラメータを取得することは容易ではないが、幸いにも五ヶ瀬川の水利特性、水質特性およびアユの産卵に関するデータを入手することができた。それは、流速、水深、河床勾配、水温、pH、DO、BOD、COD、SSおよび産卵密度であり、既往の研究の大半を網羅しているといえる¹⁵⁾⁻¹⁹⁾。ここに、産卵密度とは各瀬で発見された産卵数を産卵が確認された範囲の面積で除したものである。流速、水深、水温は瀬において電磁流速計、スタッフおよび水温計を用いて計測したもので、河床勾配は200mピッチの河川縦断面図から算出したも

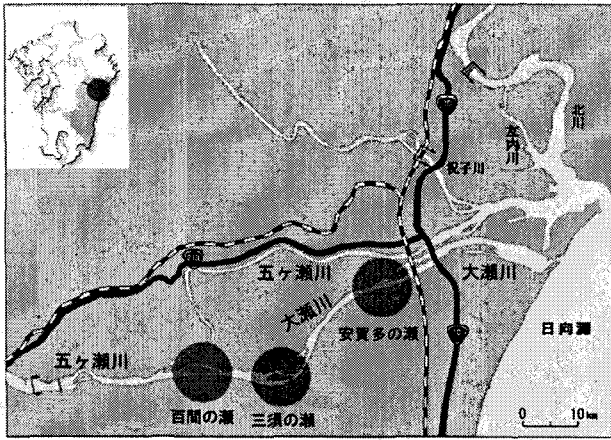


図-1 五ヶ瀬川下流域の概略図

のである。水温以外の水質は月ごとに水質観測所で得られたものである。また、DOについては、溶存酸素飽和度に変換して使用する方法もあるが、水産用水基準ではDO値そのものをアユの生息基準に使用しているため、ここでは飽和度に変換せずに使用する。一方、粒径および浮き石状態かどうかのデータは得られなかったが流速、水深、河床勾配によってこれらは決定されと考えられるため、粒径および浮き石状態かどうかというパラメータを陰的に含んでいると考えられる。ところで、流速、水深、河床勾配といった水理のパラメータはある特定の日時の特定の場所において得られたもので、pH、DO、BOD、SS、CODといった水質のパラメータは月ごとに得られたものである。従って、水理データの長さスケールは100m以下で時間スケールは日単位であり、水質データの長さスケールは数Kmで時間スケールは月単位である。アユの卵は2週間程度で孵化することから、アユの卵が確認された1週間程度前からの水質を求めなければならない。一方、アユの産卵は瀬で行われていることが明白なため、瀬と淵の構造を捉えることができる100m以下の長さスケールで解析を行わなければならない。そのため、水理のパラメータが得られた瀬の上下流の水質観測所で得られた水質データを時間および場所に関して内挿して水理データのスケールに合わせた。その結果得られた各パラメータの平均値を表-2に示す。

五ヶ瀬川は五ヶ瀬町向坂山に水源をもつ一級河川で、幹川流路延長が106km、流域面積が1,820Km²、流域内人口が13.4万人である。五ヶ瀬川下流域の概略図を図-1に示す。五ヶ瀬川は延岡付近で五ヶ瀬川と大瀬川に分流する。産卵場は派川である大瀬川における「百間の瀬」、 「三須の瀬」および「安賀多の瀬」の3ヶ所である。

4. 解析手法とその結果

(1) 単相関解析

アユの産卵に必要なパラメータの抽出および影響度合いを求めるには、産卵密度を目的変数、水理および水

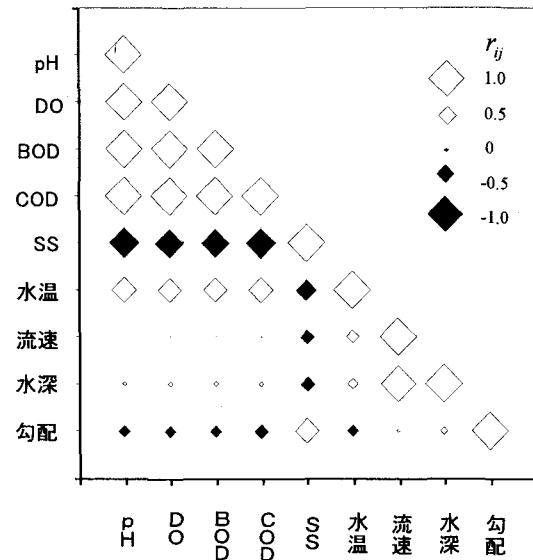


図-2 各パラメータ間の相関係数

表-2 パラメータ名と各平均値

パラメータ名	平均値
流速	0.66 [m/s]
水深	0.24 [m]
河床勾配	0.0017 [-]
水温	13.30 [°C]
pH	7.52 [-]
DO	10.35 [mg/L]
BOD	0.55 [mg/L]
COD	0.68 [mg/L]
SS	0.97 [mg/L]
産卵密度	6.68 [個/cm ²]

質のパラメータを説明変数として重回帰分析するのが最も簡単な方法である。ただし、各パラメータ間の相関係数が高い場合、すなわち多重共線性が高い場合はこの手法が不適であることが数学的に証明されている。各説明変数間の相関係数 r_{ij} は次式で示される。

$$r_{ij} = s_{ij} / \sqrt{s_i^2 \times s_j^2} \quad (1)$$

ここに、 s_{ij} は説明変数変動の共分散、 s_i^2 および s_j^2 は説明変数変動の分散である。図-2に各パラメータの相関係数 r_{ij} を示す。図中の白い菱形が正の相関で黒塗りの菱形が負の相関を示している。同図より、水質パラメータ間の相関が高いことがわかる。たとえば、SSとCODの相関が高い負となっているが、これは木下ら²⁰⁾が行ったヒル谷での排砂実験結果と一致する。また、pH、DOおよびCOD間の相関が高い正になることも、神奈川県水産総合研究所の測定結果と一致する²¹⁾。以上のように、今回得られたデータは多重共線性の疑いが高いため、重回帰分析を使用する上では各パラメータの相関を考慮してパラメータを減らすなどの処理が必要であるが、これ

には個人差が生じることもあり注意が必要となる。

(2) 主成分回帰分析

多重共線性の疑いが高い場合、主成分回帰分析が有効な手段である。主成分回帰分析は主成分分析を行った後に、重回帰分析を行い、パラメータの影響度を求めるものであり、相関係数の高いパラメータを減じることなく処理できる便利な方法である。

各パラメータ、すなわち、流速、水深、河床勾配、水温、pH、DO、BOD、COD、SSの主成分分析を行い、表-3に各主成分の固有値、寄与率および累積寄与率を示し、図-3(a)～(c)に第1主成分と第2主成分、第1主成分と第3主成分および第2主成分と第3主成分の因子負荷量の関係をそれぞれ示した。図-3より第1主成分の因子負荷量は、pH、DO、BOD、CODが高く、流速、水深は低いことから、第1主成分は水質に関する因子と考えられる。第2主成分の因子負荷量は、流速、水深が高く、pH、DO、BOD、COD、SSが低いことから、水理に関する因子と考えられる。第3主成分に関しては、詳細は不明である。産卵密度と各主成分の相関係数を表-4に示し、図-3中にプロットした。産卵密度と第3主成分は相関係数が高いものの、固有値が1.0以下であり、その寄与率は10.9%と小さいことから、第3主成分は産卵密度にあまり影響を与えないと類推される。また、表-3より、第2主成分までの累積寄与率が0.833なので、第1主成分および第2主成分を用いることで産卵密度を83%程度説明できる。

産卵密度を目的変数、第1および第2主成分の主成分得点を説明変数として重回帰分析を行った。図-4に第1および第2主成分の主成分得点を示し、表-5に各主成分の偏回帰係数、標準偏回帰係数、偏相関係数を示した。標準回帰係数(RPC)は標準偏回帰係数と各主成分の固有ベクトルとの積和として求められる。表-6に各パラメータの標準回帰係数およびその絶対値の大きさの順位を示す。すなわち、アユの産卵密度は以下の式で表される。

$$y^* = 0.28x_1^* + 0.28x_2^* - 0.16x_3^* + 0.15x_4^* + 0.085x_5^* + 0.085x_6^* + 0.084x_7^* + 0.082x_8^* + 0.0228x_9^* \quad (2)$$

ここに、 y^* は標準化されたアユの予測産卵密度、 x_m^* ($m=1,2,3,4,5,6,7,8,9$)はそれぞれ標準化された水深、流速、SS、水温、DO、BOD、COD、pH、河床勾配である。すべてのパラメータの標準回帰係数はゼロではない値を有している。これは、すべてのパラメータがアユの産卵密度に影響を与えていることを意味する。

式(2)によってアユの産卵密度が予測可能になった。ただし、主成分回帰分析といった数学的手段で得られたものであり、式の物理的解釈を行う必要がある。標準回

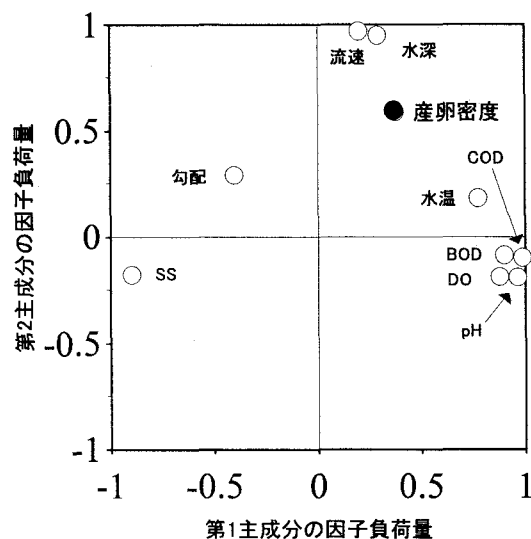


図-3(a) 第1主成分と第2主成分の因子負荷量

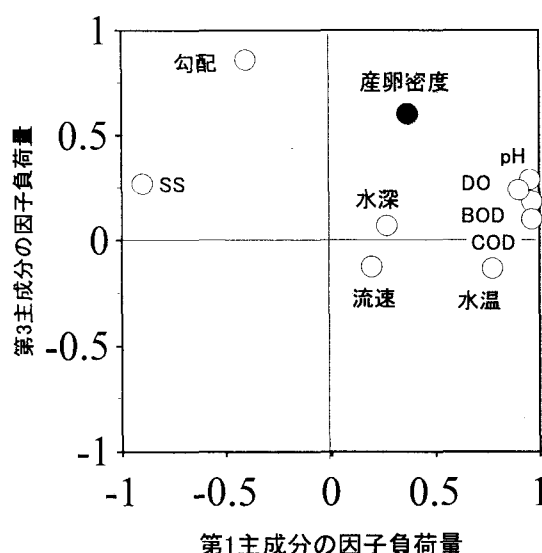


図-3(b) 第1主成分と第3主成分の因子負荷量

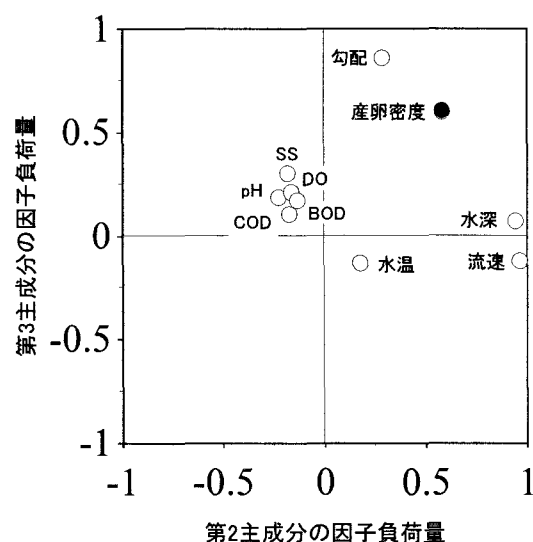


図-3(c) 第2主成分と第3主成分の因子負荷量

表-3 各主成分の固有値，寄与率および累積寄与率

	主成分1	主成分2	主成分3
固有値	5.41	2.09	0.979
寄与率	0.601	0.232	0.109
累積寄与率	0.601	0.833	0.942

表-4 産卵密度と各主成分との相関係数

	主成分1	主成分2	主成分3
相関係数	0.377	0.586	0.598

表-5 主成分回帰分析結果

	偏回帰係数	標準偏回帰係数	偏相関係数
主成分1	0.759	0.306	0.368
主成分2	1.50	0.375	0.425

表-6 各パラメータの標準回帰係数(RPC)と順位

パラメータ	RPC	順位
水深	0.282	1
流速	0.277	2
SS	-0.164	3
水温	0.147	4
DO	0.0847	5
BOD	0.0847	5
COD	0.0841	7
pH	0.0821	8
河床勾配	0.0228	9

帰係数の符号および絶対値に着目すると，流速が速く，水深が深いところほど産卵密度が高いことがわかる．これら2つのパラメータは他のパラメータに比べると高い寄与を示しており，アユの産卵には瀬という流れ場が必要不可欠なことが改めて認識される．水温の寄与も大きなこともわかる．一般にアユが降下を始めるきっかけは水温の低下といわれており，既往の研究結果を裏付けている．一方，SSの標準回帰係数は負の値をとっている．すなわち，SSが高いほど産卵密度が低くなることを意味し，アユの住む河川では水を汚してはならないことを警告している．また，河川工事を行うとSSが高くなるので，アユの産卵時期と河川工事の時期が重なる場合は特に注意が必要である．pH，DO，BOD，CODについてはそれほど大きな標準回帰係数にならなかった．これは，一見これらのパラメータがアユの産卵にほとんど影響を与えないかのように感じられるが，今回用いたデータは五ヶ瀬川のものだけであり，そもそも他の河川に比べて水質が良好なために生じた結果と考えられる．今後，全国の河川のデータを用いて解析すれば，異なる結果になることも予想される．

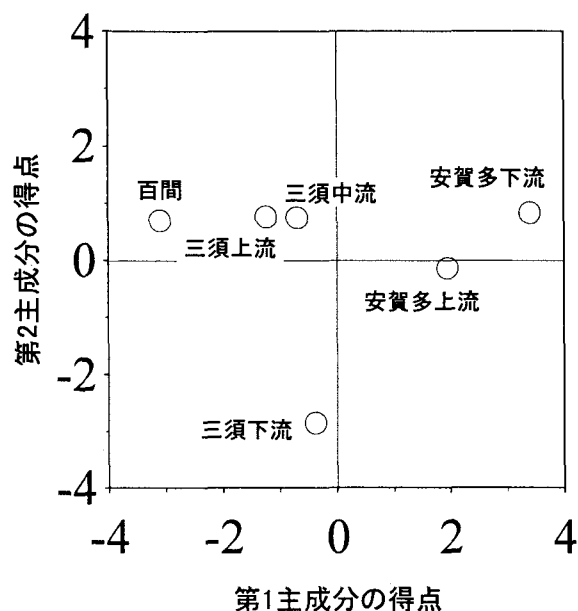


図-4 各主成分得点

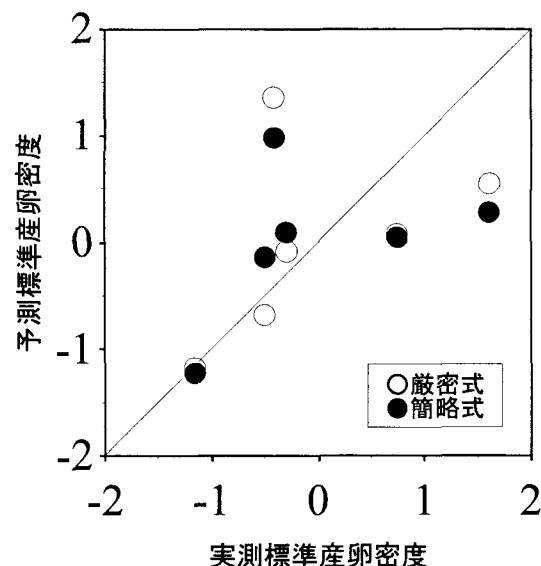


図-5 各産卵床における実測データと予測データ

(3) 産卵密度の予測

式(2)を用いることによってアユの産卵密度を予測することが可能となったが，右辺に含まれるすべてのパラメータを任意の河川で取得することは極めて困難である．また，工学的には厳密な予測値を求めることよりも，少ないパラメータで解が得られる方が好ましい．表-6の標準回帰係数の絶対値の順位は，水深，流速，SS，水温，DO，BOD，COD，pHとなっている．どのレベルのパラメータまで採用するかは目的に応じて決めればよいが，ここでは，標準回帰係数の絶対値が0.1以下のものを無視する．すると，水深，流速，SSおよび水温の4つがパラメータとなる．

$$y^* = 0.28x_1^* + 0.28x_2^* - 0.16x_3^* + 0.15x_4^* \quad (3)$$

9個のパラメータを考慮した厳密式(2)および簡略式(3)を用いた予測産卵密度を図-5にそれぞれ白丸および黒丸で示す。簡易式(3)を用いた予測値は式(2)を用いた予測値と大差はない。従って、簡易式(3)でも十分に産卵数を予測できると判断される。

5. おわりに

河川における物理環境の変化が生態環境に及ぼす影響を予測する様々な手法が開発されているが、生態環境に及ぼすパラメータの選択基準が明確でないために、環境アセスメントが困難となっている。アユの産卵に必要な物理環境を把握する上でも何がパラメータなのか不明であり、今までは経験的に選択されてきた。極力多くのパラメータを用いて重回帰分析を行うのが最も単純な方法であるが、実測データは多重共線性が高いのが普通であり、今回取得した五ヶ瀬川のデータも例外ではなかった。そのため、主成分回帰分析を用いて、流速、水深、河床勾配、水温、pH、DO、BOD、COD、SSが産卵密度に及ぼす影響を定量評価した。その結果、水深、流速、SS、水温、DO、BOD、COD、pHの順番でアユの産卵密度に影響を与えていることが明らかとなった。さらに、工学的な利便性を考慮し、影響の強いパラメータだけを選択し、式(3)を提案した。この式によって水深、流速、SS、水温のデータから産卵密度を予測することが可能になった。これらのパラメータは一般的に知られるアユの産卵に必要な環境因子と一致し、経験から得られた知見が正しいことが数学的に証明された。ただし、式(3)を導出する上で使用したデータは五ヶ瀬川だけのものであり、式(3)が五ヶ瀬川以外の河川で使用できる保証はない。しかし、今回示した主成分回帰分析を用いたパラメータの抽出方法は汎用性があり、全国の河川のデータを用いれば全国の河川に適用可能なアユの産卵密度の予測式が構築できる。逆に、対象河川のデータのみを用いればその河川に特化した予測式が構築できる。今後、アユの稚魚の放流数や漁獲量といった人的インパクトや洪水および濁水といった自然外力のインパクトの影響を考慮した予測式の構築を目指すと共に、アユの産卵が不可能となる各パラメータのボーダーラインなどを解明していきたい。

謝辞：本研究は土木学会河川懇談会研究課題である「アユの産卵床と物理環境に関する研究」の一環として行ったものである。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、工藤平寿郎理事および組合員の皆様には謝意を表す。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していた。

だいた。国土交通省九州地方整備局延岡河川国道事務所の鶴崎秀樹課長、甲斐英明計画係長、田上幸喜調査係長、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。九州工業大学大学院生の伊瀬知栄人、常松智博および九州工業大学学部生の木内大介、武田雅俊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) 小山長雄：アユの生態，中公新書，1978.
- 2) 砂田憲吾，熊木明子，川村和也：河川の流況特性による魚類の生息適性のマクロな評価に関する検討，水工学論文集，第47巻，pp.1123-1128，2003.
- 3) 田代喬，辻本哲郎：河床攪乱頻度を指標とした生息場評価による瀬・淵構造の変質に関する考察，水工学論文集，第46巻，pp.1151-1156，2002.
- 4) 知花武佳，玉井信行：生息域の季節変動に着目した魚類生息域適性基準に関する研究，水工学論文集，第46巻，pp.1145-1150，2002.
- 5) 植村三香，石川貴子，首藤要介，福井吉孝：ゲンジボタルの生息条件について，水工学論文集，第47巻，pp.1117-1122，2003.
- 6) 野上毅，中津川誠，小林美樹：豊平川と札内川における魚類生息環境の比較，河川技術論文集，第8巻，pp.283-288，2002.
- 7) 喜多村雄一，松本正喜，勝山一朗：アユ漁獲量を用いた河川生態系の予測と評価，河川技術論文集，第8巻，pp.295-300，2002.
- 8) 石田力三，一条エリ子：アユ産卵用人工河川，*Proc. of the Int. Symposium on Fishways, '90 in Gifu, Japan*, pp.81-84，1990.
- 9) Hara, N.: Artificial spawning channel for Ayu fish at Lake Biwa, *Proc. of the Int. Symp. on Fishways, '90 in Gifu, Japan*, pp.75-80，1990.
- 10) 石田力三：瀬付き，アユの産卵行動をさぐる，*アニマ*，No.43，pp.12-20，1976.
- 11) 国土交通省延岡工事事務所：五ヶ瀬川のアユ，2001.
- 12) Akazaki, M.: Fishway in Miyazaki prefecture, *Proc. of the Int. Symposium on Fishways, '90 in Gifu, Japan*, pp.45-52，1990.
- 13) 杉下徹，小野一広，光榮英生：Evaluation of the hatching efficiency of Ayu in the incubation channels, *Proc. of the Int. Symposium on Fishways, '95 in Gifu, Japan*, pp.24-26，1995.
- 14) 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.
- 15) 建設環境研究所：五ヶ瀬川水系鮎産卵場調査検討業務報告書，2001.
- 16) 西日本技術開発株式会社：五ヶ瀬川水系鮎実態調査業務報告書，2000～2001.
- 17) 国土交通省延岡工事事務所：保護水面管理事業委託実績報告書，1999～2002.
- 18) 伊藤正博，平野克己，岩槻幸雄：アユ資源管理指針策定事業調査報告書，1995.
- 19) 国土交通省延岡工事事務所，国土開発コンサルタント：五ヶ瀬川と大瀬川における生物生態調査，1990～1991.
- 20) 木下篤彦，藤田正治，水山高久，澤田豊明：排砂に伴う濁水によるイワナへの影響評価法，水工学論文集，第47巻，pp.1129-1134，2003.
- 21) 神奈川県水産総合研究所内水面試験場HP：<http://www.agri.pref.kanagawa.jp/suisoken/naisui/kenkyu/h10/99ayuso.htm>

(2003. 9. 30受付)