事例研究 CASE STUDY

流量変化に伴う河床型構成およびアユの生息密度の変化とそれらの河川維持流量評価への活用

高橋 勇夫^{1)*}・谷口 順彦²⁾

1) たかはし河川生物調査事務所 〒781-5603 高知県香南市夜須町西山627

2) 福山大学生命工学部海洋生物科学科 〒729-0292 広島県福山市東村町字三蔵985

Isao TAKAHASHI^{1)*}, Nobuhiko TANIGUCHI²⁾: Assessment of river-bed composition and population density of ayu *Plecoglossus altivelis* to estimate minimum flow charge. *Ecol. Civil Eng.* 15(2), 197-206, 2012.

1) Takahashi Research Office of Freshwater biology, 627 Nishiyama Yasu-cho, Konan, Kochi 781-5603, Japan

2) Department of Marine Bioscience, Faculty of Life Science and Biotechnology, Fukuyama University, 985 Sannzou Higashimurayama-cho Fukuyama, Hiroshima 729-0292, Japan

目 的

河川維持流量とは動植物の保護、漁業、景観、流水の清潔の保持、人と河川との豊かな触れ合いの確保等を総合的に考慮し、維持すべきであるとして定められた流量と定義されている（国土交通省河川局 2007）。1988年に発電ガイドライン（発電水利権の期間更新時における河川維持流量の確保について）が設けられて以降、発電所下流の減水区間の環境改善のために維持流量が確保されるようになった。しかし、ガイドラインで目安とされている集水面積 100 km² あたり 0.1~0.3 m³/s という流量は、生物の生息条件を満足するものとは必ずしもなっていない。ガイドラインを越える維持流量が放流されるケースも増えている（国土交通省 2003）。

また、河川維持流量を決定する際の動植物（魚類）に対する評価指標は瀬における水深と流速とされ、対象種の生息に必要な水深と流速から維持流量を算定するよう指針が設けられている（ダム水源地環境整備センター 1994）。しかし、この方法に関しては、川全体を面的に評価できていない点や生物の生息生育地を評価していない点が問題点として指摘されている（島谷 2000）。確かに水深と流速は魚類の生息にとって重要な要素ではある

が、種によって要求範囲は大きく異なるし、1 種の中でも生活史の中で大きく変化し、どれをもって適正な値とするかは難しい。また、水産的価値が高いことから維持流量を検討する際の代表種として取り上げられることが多いアユにしても、その生息状態と水深あるいは流速との間に明確な関係がなく、生息環境を評価するうえでの指標としては必ずしも適切でないことが指摘されている（鬼束ほか 2005；高橋 2009）。

河川におけるアユの生息状態を詳細に調査した川那部ほか（1957）は、生息密度は河床型によって異なり、早瀬、平瀬と淵、トロの順に低下し、体サイズは平瀬やトロで相対的に小さい傾向があることを明らかにした。このことは、河床型によってアユの収容力が異なることを意味している。また、取水により河川水が減少することによる魚類への影響としては、生息可能な面積の縮小だけにとどまらず、早瀬の縮小や早瀬から平瀬への変化、トロの拡大といった生息場所の質的な低下が生じ（小野寺 1957）、その結果、アユやウグイの生息量の減少を招くことが指摘されている（水野 1993a）。逆に言えば、維持流量を流すことで河床型に変化が生じ、環境収容力を増すことになるが、水深と流速を指標とした従来の手法では、そのような変化は十分には評価できていない。最近になって、PHABSIM（Physical Habitat Simulation System）を用いた事例が増えつつあるものの（朝位

2011 年 12 月 22 日受付, 2012 年 9 月 6 日受理

*e-mail: tkhsayu@mxi.netwave.or.jp

2004; 鬼束ほか 2005; 宮本ほか 2010), まだ技術的な課題も多いことが指摘されている (中村 2000; 鬼束ほか 2005; 山本 2006)。

本研究では, 四万十川中流部に建設されている佐賀取水堰下流の減水区間において, 河川流量 (放流量) の増減により, 水面面積と河床型の構成がどのように変化するのかを現地調査するとともに, 生息場の量 (水面面積) と質 (河床型) の変化によって起きるアユの生息数の変化を試算した。さらに, 河床型の構成の変化とそれに対応したアユの生息密度の推定値に基づき適正な維持流量の検討を行った。

方 法

対象地

本研究は高知県西部を流れる四万十川中流部の佐賀取水堰 (河口から約 110 km 上流) の直下から梶原川合流点までの約 16 km の区間を対象とした (図 1)。この区間の河川形態は Aa-Bb 移行型で, 水際はほとんど人工化されていなかった。河床はおおむね礫で覆われていた

が, 瀬では岩盤の露出が目立ち, 砂底は少なかった。佐賀取水堰は堤高 8 m の発電用取水を目的とするゲート式堰堤で, 取水した水を別水系である伊与木川に導水し発電するため, 堰堤下流の四万十川は減水区となっている。出水時にはゲートが開けられ土砂が流下するため, 貯水池への堆砂はほとんど見られない。

約 16 km の対象区間内に水面面積の測定のための弘瀬, 打井川, 轟崎の 3 調査区間を設けた (図 1)。調査区間の選定にあたっては, 少なくとも 1 ヶ所は瀬があることを条件とし, 16 km の対象区間内に 3 つの調査区間が概ね等間隔となるように設定した。各調査区間の延長距離は, 弘瀬調査区が 349 m, 打井川調査区が 378 m, 轟崎調査区が 422 m であった。

河床型の区分と水面面積の測量

本調査では河床型を早瀬, 平瀬, 淵, トロ A 級, トロ B 級の 5 つに区分した。河床型の判別基準は図 2 に示したとおりで, まず, 水面にはっきりと波立ちがある部分は瀬とし, その中で白波が立っていれば早瀬, 白波はほとんど立っていなければ平瀬とした。水面に波立ちがない部分については川底に明瞭な最深部があれば淵とし

図 1 調査対象区間内の 3 調査区間。図中の□は水面面積を測量した調査区。

図2 河床型の判別基準と判別方法

た。トロは瀬と淵との中間的な特徴を持ち、川底が平坦（明瞭な最深部はない）で流速は緩い。その中で水面にしわ状の波がある部分をトロ A 級とし、流速がきわめて緩く水面が鏡状の部分をつトロ B 級とした。なお、今回の調査では、小流量時に水深は 1 m 以下と瀬のように浅いにもかかわらず、流速がほとんどない部分（たまり状）が多く見られた。このような河床型はトロ B 級に含めた。河床型を区分する際には底質の特徴（粒径等）も考慮すべきであるが（水野 1991, 1993b）、本調査は減水区で行ったため、流速は緩いにもかかわらず河床材料の粒径は大きいことが観察される等、流速と底質の対応関係は必ずしも正常な状態になかった。そのため、底質の特徴は河床型の判別基準には含めなかった。

水面面積の測定は表1に示したように 1998 年 10 月から 1999 年 4 月の流量の異なる時期に 5 回実施した。佐賀取水堰（流入地点）での低水流量（1985～1984 年）は $5.79 \text{ m}^3/\text{s}$ （比流量； $1.53 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ km}^2$ ）、平水流量は

$11.85 \text{ m}^3/\text{s}$ （ $3.14 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ km}^2$ ）であり、今回の調査で最大流量であった 1999 年 4 月 14 日における堰堤からの放流量 $9.13 \text{ m}^3/\text{s}$ は平水流量に近い値であった。

調査区間内において河床型別に縦断距離と横断水面幅（10～20 m ピッチ）の測定には、レーザー距離計（Bushnell 社製、アメリカ）およびメジャーを用いた。河床型別の水面面積は横断幅の平均値に延長距離を乗じて算出した。

調査時の比流量の推定

各調査区における流量は佐賀取水堰からの放流量に残流域からの流量を加えることで推定した。残流域からの流入量の推定にあたっては、まず、調査当日の佐賀取水堰への流入量を佐賀取水堰の流域面積（ 377.7 km^2 ）で除して単位面積あたりの流出量を求め、次にそれに各調査区域の残流域面積を乗じて算出した。佐賀取水堰の流入量と放流量のデータは、堰堤を管理する四国電力株式会社から提供を受けた。

アユの河床型別生息密度の計測

河床型別のアユの生息密度を把握するために、1998 年 8 月 6 日および 1999 年 7 月 15 日・8 月 30 日に四万十川中流部の梶原川合流点から十和村柳瀬の間（図 1）において潜水し、アユの生息数を河床型別に計数した。調査区間の河床形態は Aa-Bb 移行型と Bb 型が混在していた。なお、水面面積の調査区間（佐賀取水堰から梶原川合流点）は発電取水による減水のため、平常時は早瀬やトロ A 級などの河床型はほとんど存在しないので、生息密度の調査はアユが正常な形で生息している区間を選定して測定を実施した。このため、生息密度の調査区間は水面面積の調査区間とは同一ではない。

表 1 水面面積測定時における佐賀取水堰直下での流量。放流量は堰堤のゲート放流量と魚道通水量とを合計した値。

調査日	佐賀取水堰直下での流量	
	放流量 (m^3/s)	比流量 ($\text{m}^3/\text{s}/100 \text{ km}^2$)
1998 年 12 月 20 日	0	0
1998 年 11 月 4 日	1.00	0.26
1999 年 4 月 30 日	2.03	0.53
1998 年 10 月 29 日	3.37	0.89
1999 年 4 月 14 日	9.13	2.42

注）流量は調査日の日平均

観察地点は1回の調査につき4～6地点設けたが、地点によっては5つの河床型がそろっていないこともあり、河床型ごとの観察数は1回の調査につき3～6河床となった。アユの生息密度は岸寄りと中心部で異なることが多いため（水野 1993a）、いずれの河床型でも横断観察を原則とした。観察のための横断ラインは一つの河床型についてはほぼ等間隔で5～10本設け、縦断的な偏りが生じないように配慮した。アユの生息密度は観察数を観察面積（観察幅×移動距離）で除することで算出した。

結 果

河床型別水面面積の変化

3つの調査区における河床型別水面面積の変化を表2および図3に示した。水面面積は流量の増加に伴い拡大し、同時に河床型の構成も大きく変化した。例えば佐賀取水堰直下の弘瀬調査区では、比流量 $0.01 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ km}^2$ （佐賀取水堰からの放流量は $0 \text{ m}^3/\text{s}$ ）では総水面面積は $4,352 \text{ m}^2$ で、その95%に当たる $4,153 \text{ m}^2$ がトロ B 級で占められ、平瀬がわずかに見られる程度であった。 $0.28 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ km}^2$ （放流量は $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ）では、水面面積は $7,611 \text{ m}^2$ まで拡大した。トロ B 級の面積はやや縮小し、その一方で平瀬の面積は約 200 m^2 から約 4200 m^2 まで拡大した。平瀬の面積の拡大は、流量の増加に伴い水面幅

が広がったことだけでなく、トロ B 級であった区間のうちの水深が浅かった部分が平瀬に変化したことで起きていた。トロ A 級も 200 m^2 とわずかながら出現した。 $0.56 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ km}^2$ （放流量は $2.03 \text{ m}^3/\text{s}$ ）では総水面面積は $8,312 \text{ m}^2$ となり、初めて早瀬が出現した。早瀬はそれまで平瀬だった部分が流量の増加によって流速が速くなることで形成されていた。トロ A 級は 980 m^2 まで拡大した。さらに $0.91 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ km}^2$ （放流量は $0.89 \text{ m}^3/\text{s}$ ）では平瀬とトロ B 級が無くなり、早瀬とトロ A 級の大幅な拡大が見られた。この変化は、それまで平瀬であった部分が早瀬に変化し、トロ B 級のうち水深が深かった部分がトロ A 級に変化したことで起きていた。 $2.44 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ km}^2$ （放流量は $9.13 \text{ m}^3/\text{s}$ ）では水面面積はさらに拡大したものの、河床型の構成に大きな変化はなかった。

他の区間でも流量の増加に伴って、トロ B 級の縮小と早瀬およびトロ A 級の拡大が見られたが、平瀬の面積の増減傾向は、地点によって異なった（図3）。また、轟崎調査区に見られた淵は流量が変化しても水面面積に大きな変化は起きなかった（表2）。

各調査区とも流量の増加に伴い水面面積は拡大したものの、河床型の構成は流量がある段階まで増加すると、大きな変化が見られなくなった（図3）。構成に大きな変化が見られなくなった流量は、弘瀬調査区では 0.91

表2 調査区間の3地点における河床型別水面面積および測量時の佐賀取水堰からの放流量。調査実施期間は1998年10月から1999年4月。

地点	佐賀取水堰放流量 (m^3/s)	地点比流量 ($\text{m}^3/\text{s}/100 \text{ km}^2$)	河床型別水面面積 (m^2)					
			早瀬	平瀬	淵	トロ A 級	トロ B 級	合計
弘瀬 L=349 m	0.00	0.01	0	199	0	0	4,153	4,352
	1.00	0.28	0	4,198	0	200	3,213	7,611
	2.03	0.56	990	4,118	0	980	2,224	8,312
	3.37	0.91	8,073	0	0	4,124	0	12,197
	9.13	2.44	8,774	0	0	6,662	0	15,436
打井川 L=378 m	0.00	0.04	0	1,308	0	0	5,863	7,171
	1.00	0.38	1,649	1,050	0	0	5,996	8,695
	2.03	0.69	886	1,463	0	4,255	2,866	9,470
	3.37	1.05	2,280	1,999	0	2,880	4,065	11,224
	9.13	2.57	6,242	2,525	0	4,179	1,727	14,673
轟崎 L=422 m	0.00	0.14	570	2,052	7,004	0	675	10,301
	1.00	0.68	3,453	2,088	8,141	0	0	13,682
	2.03	1.11	4,209	1,162	8,689	1,466	0	15,526
	3.37	1.46	5,371	2,182	8,619	0	0	16,172
	9.13	2.99	6,363	0	9,702	2,016	0	18,081

図3 流量別・河床型別水面面積の比較

表3 四万十川中流域で測定したアユの河床型別生息密度.

河床型	生息密度 (尾/㎡)						3 回平均
	1998/8/6		1999/7/15		1999/8/30		
	平均	範囲	平均	範囲	平均	範囲	
早瀬	0.27	0.11-0.50	0.61	0.38-0.98	0.59	0.39-0.74	0.46±0.24
平瀬	0.12	0.05-0.22	0.22	0.05-0.48	0.34	0.19-0.47	0.21±0.16
淵	0.15	0-0.25	0.18	0.12-0.26	0.47	0.42-0.53	0.27±0.17
ト口 A 級	0.21	0.10-0.40	0.52	0.33-0.62	0.57	0.36-0.80	0.45±0.23
ト口 B 級	0.04	0-0.05	0.05	0.01-0.14	0.14	0.02-0.26	0.07±0.09

m³/s/100 km², 打井川調査区では 0.69 m³/s/100 km², 轟崎調査区では 0.68 m³/s/100 km² であった.

アユの河床型別生息密度

四万十川中流域において 1998 年と 1999 年に実測した河床型別のアユの生息密度を表 3 に示した. アユの生息密度は早瀬, トロ A 級で高く, 次いで淵または平瀬と続き, トロ B 級は 3 回の調査とも最も低かった. 早瀬とトロ B 級では平均値に 7 倍近い差がみられた.

高知県の河川では, 早瀬では 2 ~ 4 尾/m² のアユが生息することがしばしば観察されるが (高橋・東 2006), 今回の調査では早瀬でも 0.27 ~ 0.59 尾/m² と密度が低く, 淵やトロ B 級ではアユが全く観察されないこともあった.

流量の変化に伴うアユの生息数の推定

異なる流量時における河床型別の水面面積 (表 2) にアユの河床型別生息密度 (表 3 に示した 3 回の平均値) を乗じて, 流量の変化に伴うアユの生息数を推定した (表 4). さらに, 図 4 には流量変化に伴う各調査区の生

息数の変化を示した. アユの生息数は流量の増加とともに急激に増大した. スピアマンの順位相関分析の結果, 生息数と流量の相関は有意であった ($P < 0.05$). 各調査区に共通してみられた流量の増加に伴う生息数の増大は, 水面面積の拡大だけでなく, 河床型の構成がアユの生息数の少ないトロ B 級や平瀬主体の構成から生息数の多い早瀬やトロ A 級主体の構成へと大きく変化することによって起きていた (図 3, 表 4).

平均生息密度 (推定生息数/水面面積) と流量の関係を図 5 に示した. スピアマンの順位相関分析の結果, 両者の相関は有意であった ($P < 0.05$). 生息密度は流量の増加とともに急激に増大したが, いずれの調査区においても一定の流量を超えるとあまり増えなくなった. 生息密度の増大が鈍化する流量は, 弘瀬調査区では 0.91 m³/s/100 km², 打井川調査区では 0.69 m³/s/100 km², 轟崎調査区では 0.68 m³/s/100 km² であった.

表 4 流量の変化に伴うアユの河床型別生息数および平均密度の推定値.

地点	地点比流量 ($\text{m}^3/\text{s}/100 \text{ km}^2$)	河床型別推定生息数 (尾) ^{*1}					平均生息密度 ^{*2} (尾/ m^2)
		早瀬	平瀬	淵	トロA級	トロB級	
弘瀬 L=349 m	0.01		42			291	0.08
	0.28		882		90	225	0.16
	0.56	455	865		441	156	0.23
	0.91	3,714			1,856		0.46
	2.44	4,036			2,998		0.46
打井川 L=378 m	0.04		275			410	0.10
	0.38	759	221			420	0.16
	0.69	408	307		1,915	201	0.30
	1.05	1,049	420		1,296	285	0.27
	2.57	2,871	530		1,881	121	0.37
轟崎 L=422 m	0.14	262	431	1,891		47	0.26
	0.68	1,588	438	2,198			0.31
	1.11	1,936	244	2,346	660		0.33
	1.46	2,471	458	2,327			0.33
	2.99	2,927	0	2,620	907		0.36

*1 河床型別の水面面積 (表 2) に河床型別のアユの生息密度の平均値 (表 3) を乗じた

*2 アユの推定生息数合計値を水面面積 (表 2) で除した

図 4 流量とアユの生息数 (推定値) の関係. アユの生息数は流量別・河床型別水面面積に河床型別の生息密度を乗じた.

結果の評価

トロの区分の妥当性

水野 (1991, 1993b) は河床型を早瀬, 平瀬, 淵, トロ (比較的水深が浅くて流れの緩い部分) の 4 つに区分している. しかし, 水野 (1991, 1993b) の河床型の区分では, 区分しづらい河床型が存在する. それは, 水深は瀬と淵との中間程度で, 流速は瀬よりもかなり遅く淵よりも速いという特徴を持っており, 漁業者や釣り人はそ

れを「トロ場」と呼んで, アユの好漁場と認識してきた (高崎 1984). このようなトロは瀬と瀬の間に単独で存在することが多く, 淵の後半部にあるとされる水野 (1991, 1993b) の分類したトロとは成因が異なると考えられた. 本調査ではこのようなトロをトロ A 級とした (図 2). 一方, B 級と分類したトロは, 流速がきわめて緩い淀み状の部分であった.

この 2 つのタイプのトロにおけるアユの生息密度を比較すると, A 級で著しく高く, 平均値では 6 倍以上の差

がみられた（表 3）。水野（1991, 1993b）がトロと分類した河床型は、アユの生息量が少ないと解説されていることから、本調査で区分した河床型の中ではトロ B 級がそれに近いと考えられる。トロ A 級と B 級に水面の外観では大きな差はないものの（図 2）、アユの生息場としての質が異なることが明らかとなり、トロを 2 つに区分したことは妥当と言える。ただし、現地調査の際に、トロ A 級と B 級の区分は必ずしも容易ではなかった。両者の主な違いは水面のしわ状の波の有無で（図 2）、これは流速の違いを反映している。しかし、物理的に明瞭な境界はないため、観察者の見方によって境界部が多少ずれることは起こりうる。そのため、一連の調査の中で調査者が複数になる場合は判断基準をあらかじめ十分に統一しておく必要がある。

河床型の構成の変化

流量の変化は単に水面面積を増減させるだけでなく、河床型の構成、言い換えれば水生生物の生息場の質をも大きく変化させた。特に顕著であったのは早瀬とトロ B 級の変化で（図 3）、早瀬は流量の増加とともに急激に面積を拡大した。他方トロ B 級は、弘瀬および打井川調査区では小流量時には卓越していたが、流量の増加とともに縮小（平瀬やトロ A 級へと変化）した。本調査区域はももとの河川形態が河床勾配の急な Aa-Bb 移行型であった。トロ B 級はそのような河川形態の場所で取水のために流量が減少し、流速が低下したことで形成されていたため、流量が増加することで流速が速くなり、河床型の顕著な変化が見られたと推察される。

河床型別生息密度の妥当性

川那部ほか（1957）は京都府の宇川における河床型別のアユの生息密度について、早瀬が最も多く、次いで平瀬・淵で、トロは平瀬・淵よりもやや少ないとしている。川那部ほか（1957）が分類したトロは底質が砂地であることから、かなり流速が遅い部分と判断され、本調査のトロ B 級に近いと判断される。したがって、今回得られた河床型間の相対的な生息密度は、トロ A 級を除けば、宇川のそれと概ね一致している。

水深があるうえに流速も平瀬について速いという特徴を持つトロ A 級の生息密度は、早瀬に次いで高かった（表 3）。アユを 25~100 cm の異なる水深で飼育すると、水深 100 cm での成長が最も良くなる（丸山・石田 1978）。このことは大きな水深はアユに対してカバーとしての役割を果たすことを示唆している。また、トロ A 級の比較的速い流速は付着藻類の生産に寄与すること（石田 1994）を考え合わせると、トロ A 級が早瀬と同等の生

息密度であったことが理解できる。一方、トロ B 級においてアユの生息密度が極端に低いのは、アユが利用しうる下限流速とされる 20 cm/s 程度の流速（村上ほか 1989；山本・本田 2005）よりも遅い部分が存在すること、流速が遅いために餌となる付着藻類の生産が悪いこと（石田 1994）、摂餌の阻害要因となる砂泥が河床に沈積しやすいことなどが理由として考えられる。

なお、四万十川において、河床型別の生息密度を潜水調査した 1998 年および 1999 年はアユの遡上量が少なく、先のとおり生息密度もかなり低かった。漁業・養殖業生産統計年報（農林水産省統計部）によると、1998 年および 1999 年の四万十川におけるアユ漁獲量は、それぞれ 258 t, 273 t で、652~1,093 t（平均で 892 t）の漁獲量があった 1980 年代の 1/3 程度に過ぎない。したがって、1998 年と 1999 年の調査で得られた生息密度は、四万十川の基礎生産力に見合ったものではなく、それを大きく下回っていると考えられるが、河床型間の相対値として使うには特に問題はないと判断した。

維持流量の検討

石田（1989）は、人為的な河川流量の減少は、河相（河床型の構成と理解される）の変化→餌料生物相の変化→棲み場の減少→魚類相の質の変化という過程において、直接的にも間接的にも魚類の生息条件に悪影響を与えていると指摘したうえで、魚類資源の保全と漁業の振興のために望ましい流量とは、河相に大幅な変化が起きない流量、すなわち「河床型の構成に大きな変動が起きない範囲内の流量」であるとした。今回の調査での最大流量（1999 年 4 月 14 日）は平水流量に近いことから、その時の河床型の構成を本来（取水がない状態）の構成とみなすことができる。各調査区において最大流量時の河床型の構成に近似する流量は、弘瀬調査区では 0.91 m³/s/100 km²、打井川調査区では 0.69 m³/s/100 km²、轟崎調査区では 0.68 m³/s/100 km² であり（図 3）、維持流量としては 0.7~0.9 m³/s/100 km² が妥当ということになる。なお、図 3 を見ると、発電ガイドラインで目安とされている 0.1~0.3 m³/s/100 km² では、河床型の構成は本来の構成と大きく異なっていた。

アユの平均生息密度は、流量の増加とともに増大した後、比流量 0.7~0.9 m³/s/100 km² を超えるとあまり増えなくなった（図 5）。流量がほとんどない状態から河床型の構成が平水時のそれに近くなるまでの間は、アユの生息数が少ない河床型の構成から生息数が多い構成へと質的な変化（トロ B 級→平瀬やトロ A、平瀬→早瀬）が起きるために、平均生息密度は大きく増大する。これ

図 5 流量とアユの生息密度（推定値）の関係．アユの生息密度は調査区間別の推定生息数（表 3）を水面面積で除した．

に対して、河床型の構成が本来のものに近くなった後は、水面面積の拡大が生息数を増やす主要因となるため、生息密度は増えにくくなる．これらのことから、アユの生息環境を改善するにあたって、発電と生息場の保全のバランスという観点からは、平均生息密度の増大が鈍化し始める流量（比流量 $0.7 \sim 0.9 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ km}^2$ ）を維持流量とすることで妥協点を見出すことができる．

流速と水深を評価指標とすることの問題点

発電所取水口の下流河川において魚類のための維持流量を検討する際の評価指標は水深と流速とされ、対象魚種が生息するために必要な水深と流速を設定するよう求められている（ダム水源地環境整備センター 1994）．また、近年では PHABSIM を用いて生息環境を評価した事例も増えつつある（朝位 2004；鬼束ほか 2005；宮本ほか 2010）．これらの評価手法の問題点として、以下のことを指摘できる．

これらの評価方法では、魚類の生息に水深と流速が深く関連すると考えられることから（ダム水源地環境整備センター 1994）、水深と流速が生息環境を評価するうえでの重要な要素とされている．しかし、対象魚種として選定されることが多いアユについては、その生息状態と水深や流速との間に密接な関係があるという考え方に疑問が呈されている（鬼束ほか 2005；高橋 2009）．また、筆者らのこれまでの潜水観察や採捕調査によると、アユが分布している水深や流速は多様で、水深は $0.2 \sim 3 \text{ m}$ の範囲であればアユは普通に観察されるし、流速が緩い淵尻から表面流速が 2 m/s 近い早瀬（荒瀬）まで広い範囲に生息している．そして、河川の現場においても様々

な水深と流速を有する場所がアユの友釣りのポイントとして広く認知されている（高崎 1984）．その一方で、アユの生息に好適とされる $0.5 \sim 0.6 \text{ m/s}$ 程度の流速（本田・山本 2009）の区域がアユの良好漁場になることもあれば、不良漁場となることもある（井塚ほか 2011）．さらには水深や流速は良好漁場と不良漁場を分ける要因とはなっていないことも指摘されている（阿部 2011）．このような野外での調査から得られた事実は、水深と流速を必要水理条件として維持流量を検討するこれまでの手法では、アユの生息環境を十分には評価できないことを示唆している．

さらに付け加えると、選好流速等を把握するための実験には、多くの場合人工飼育されたアユが用いられているが、天然アユと人工アユでは筋肉の赤筋の割合が異なっていて、そのことで遊泳能力に差が出るのが指摘されている（谷口・池田 2009）．したがって、人工アユを使った実験から得られた選好流速・水深のデータが天然アユのそれを代表していない可能性もあり、今後の課題として残されている．

本研究で提案した方法の評価

今回実施した検討方法では、流量の増加に伴い水面面積（生息場）が拡大するだけでなく、アユの生息に不適当な（密度が低い）河床型から好適な河床型へと質的にも変化することもあわせて評価できた．これまで行われてきた瀬の水深と流速を用いた評価手法は、瀬という一つの断面のみを切り取っているため川全体を見ることはできず、河川空間を面的に評価できる手法の必要性が指摘されていた（島谷 2000）．それに対して今回提案した

方法は、水面面積の拡大と河床型の構成の変化という面的な評価ができるという点で意義は大きい。さらにアユの生息数や生息密度を計算することで、生息場の質の改善をも評価することができた。

一方、問題点としては、アユの生息数を算定する際の基本単位である河床型別生息密度の設定方法があげられる。河床型別生息密度は河床材料や地形に影響を受けるため、河川によって異なることが予想される。今回のように現地調査に基づくことが望ましいが、透明度の低下で潜水観察に適した川が少なくなっている。河床型間の相対的な密度だけでも標準化しておく必要がある。

また、流量が増えると早瀬においては流速が速すぎて生息できなくなる部分が生じることが起こりうるが、今回の方法ではそれを評価することはできていない。ただし、今回対象とした流量の範囲ではアユが生息できない可能性が高いと判断されるような流速部分は観察されなかった。

本研究で提案した手法を用いた展望

本研究の特徴として、流量の増加に伴う河川の変化をアユの生息数および平均生息密度に反映し、維持流量の評価に用いたことをあげることができる。維持流量を検討するには専門家だけではなく、地域の代表者らが参加して会議が行われることが多いが、評価指標としたアユの生息数・生息密度は専門的知識がなくともイメージしやすく、理解が深まることが期待される。また、流量を増やすことで期待されるアユの生産額も計算すれば、経済的な評価も容易になる。ちなみに、佐賀取水堰から他水系へ分水される水の全量を四万十川に戻すことを想定したケースにおいて、今回と同様の手法を用いて潜在的なアユの生産額を見積もると、売電価格に匹敵すると試算された（谷口・池田 2009）。このような試算は分水によってもたらされる便益とリスクを総合的に査定するうえでの重要な情報となり得ると考えられる。

謝 辞

本研究で使用した調査データの多くは、1998～1999年度に建設省から委託された「渡川水系生態系調査業務」を実施する際に取られたものである。今回再検討するにあたって、国土交通省中村河川国道事務所から当時の調査データをご提供いただいた。また、河川生態調査の岸野底博士には、有益なご助言をいただいた。さらに、校閲者からは多岐にわたって貴重なご指摘をいただいた。厚くお礼申し上げる。

摘 要

四万十川の佐賀取水堰下流の減水区間において、河床型を早瀬、平瀬、淵、トロ A 級、トロ B 級の 5 つに区分し、5 段階の流量別に河床型別水面面積を測量した。さらに、水面面積と河床型の構成の変化と、それによって起きるアユの生息数、生息密度の変化から妥当な維持流量を検討した。

流量の増加に伴い、アユの生息密度が低い河床型であるトロ B 級は縮小し、生息密度がより高い平瀬、早瀬やトロ A 級が拡大した。しかし、 $0.7 \sim 0.9 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ km}^2$ を超えると河床型の構成に大きな変化が見られなくなった。アユの平均生息密度も比流量 $0.7 \sim 0.9 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ km}^2$ を超えるとあまり増えなくなった。流量がほとんどない状態から河床型の構成が本来のもの（平水流量程度）に近くなるまでの間は、水面面積の拡大だけでなく、アユに不適な河床型の構成から好適な構成へと質的な変化（例えばトロ B 級→平瀬やトロ A、平瀬→早瀬）があわせて起きるために、平均密度が大きく増大する。これに対して、河床型の構成が本来のものに近くなった後は、水面面積の拡大が生息数を増やす主要因となるため、平均生息密度はほぼ一定の値を取るようになる。アユの生息環境を改善するにあたって、効率あるいは発電と生息場の保全のバランスという観点からは、平均密度の増大が鈍化し始める流量を維持流量とすることで妥協点を見出すことができた。

今回実施した検討方法では、水面面積の拡大と河床型の構成の変化という 2 点から、魚類の生息場としての河川を面的に評価できたという点で意義は大きい。さらにアユの生息数や生息密度を計算することで、生息場の質の改善をも評価することができた。また、流量の増加に伴う河川の変化をアユの生息数および平均密度に反映し、維持流量の評価に用いたことは、専門家だけでなく一般の理解が深まる情報となることが期待される。

引用文献

- 阿部信一郎（2011）アユ漁場環境評価手法の開発。「良好なアユ漁場を維持するための河川環境調査の指針」, pp. 34-43. 水産庁, 上田.
- 朝位孝二（2004）維持流量を季節的に変化させる河川の PHBSIM を用いた生息場評価. 山口大学工学部研究報告 **55** (3): 19-28.
- ダム水源環境整備センター（1994）発電維持流量調査の手引き（案）. ダム水源環境整備センター.
- 本田晴郎・山本亮介（2009）河川生活期のアユの物理環境選好性. 電力中央研究所報告 V08013.

- 石田典子 (1994) 河床の石の異なった面における付着藻類群集, 名古屋女子大学紀要 **40**: 93-98.
- 石田力三 (1989) 提言 (望ましい姿) と課題, 「魚を育む豊かな流れ」, pp. 231-232. 全国内水面漁業協同組合連合会, 東京.
- 井塚隆・高村正造・相澤康 (2011) 早川・中津川・千歳川におけるアユ漁業実態および漁場環境調査, 「良好なアユ漁場を維持するための河川環境調査の指針」, pp. 105-114. 水産庁, 上田.
- 川那部浩哉・水野信彦・西村登 (1957) アユは河床型をいかに利用するか—アユの密度と体長分布—, 日本水産学会誌 **23(7)**: 430-434.
- 国土交通省 (2003) 河川環境のための水利調整—取水による水無川の改善—, 平成 13-14 年度プログラム評価書, 国土交通省.
- 国土交通省河川局 (2007) 正常流量検討の手引き (案), 国土交通省河川局.
- 丸山為蔵・石田力三 (1978) 池の水深がアユの成長ならびに体型におよぼす影響, 淡水区水産研究所研報 **28(2)**: 211-219.
- 水野信彦 (1991) 漁場の形成要因, 「魚にやさしい川のすがた」, pp. 33-44. 全国内水面漁業協同組合連合会, 東京.
- 水野信彦 (1993a) 魚類の生態学的研究, 「河川の生態学 (補訂版)」 (沼田真監), pp. 103-225. 築地書館, 東京.
- 水野信彦 (1993b) 生息場所の確保, 「河川生態環境工学」 (玉井信行・水野信彦・中村俊六編), pp. 171-185. 東京大学出版会, 東京.
- 宮本一仁・佐々木勝教・山本亮介 (2010) 河川維持流量の変化に伴うアユ生息環境変動予測解析, 電力土木 **350**: 9-15.
- 村上恭祥・林譲二・加藤友久 (1989) 広島県 (アユ漁業にとって望ましい河川流量調査), 「魚を育む豊かな流れ」, pp. 158-209. 全国内水面漁業協同組合連合会, 東京.
- 中村俊六 (2000) 魚類生息場評価, 「河川生態環境評価法」 (玉井信行・奥田重俊・中村俊六編), pp. 168-183. 東京大学出版会, 東京.
- 鬼束幸樹・永矢貴之・東野誠・高見徹・大塚法晴・秋山壽一郎・尾関弘明・白石芳樹 (2005) アユの産卵および生息に適した水理環境に関する検討, 水工学論文集 **49**: 1471-1476.
- 小野寺好之 (1957) 河川型の変化に応ずる漁獲努力量 (アユ) の変化について, 日本水産学会誌 **23(7 & 8)**: 410-419.
- 島谷幸宏 (2000) 河川における正常流量設定手法に関する近年の動向と課題—動植物の保全を中心に—, 河川技術に関する論文集 **6**: 173-178.
- 高橋勇夫 (2009) 天然アユが育つ川, 築地書館, 東京.
- 高橋勇夫・東健作 (2006) ここまでわかったアユの本, 築地書館, 東京.
- 高崎武雄 (1984) ポイントの見分け方, 「アユ—生態と釣法」, pp. 73-75. 世界文化社, 東京.
- 谷口順彦・池田実 (2009) アユ学, 築地書館, 東京.
- 山本亮介 (2006) 流量変動に伴う付着藻類の剥離とアユ生息環境の変動予測, 電力中央研究所報告 V05018.
- 山本亮介・本田晴郎 (2005) 河川流況変動に起因するアユ産卵環境の変動予測手法の提案, 電力中央研究所報告 V04009.