茨城県久慈川における流下アユ仔魚の鉛直分布

荒山 和則,* 須能 紀之,^a 山崎 幸夫^b

(2010 年 1 月 5 日受付, 2010 年 4 月 29 日受理)

茨城県内水面水産試験場

Vertical distribution of ayu *Plecoglossus altivelis altivelis* larvae during seaward migration in Kuji River, Ibaraki Prefecture, JapanKAZUNORI ARAYAMA,* NORIYUKI SUNOH^a AND YUKIO YAMAZAKI^b

Ibaraki Prefectural Freshwater Fisheries Research Institute, Namegata, Ibaraki 311–3512, Japan

Seasonal and nocturnal changes in the vertical distribution of ayu, *Plecoglossus altivelis altivelis* larvae during seaward migration in the lower Kuji River were examined in 2006 and 2007. Sampling was performed at a site, approximately 3 m deep, using 0.3-mm mesh ring nets (45 cm in diameter). Ayu larvae were caught mainly from late October to early November in 2006 and from late October to early December in 2007. In both years, nocturnal vertical larvae distributions were different in late October and from early November onward; the larvae were evenly distributed throughout the water column in late October, but mainly in the middle and bottom layers from early November onward. Body and quantity of yolk sizes of larvae were not different between layers. No marked differences were observed in water velocity within the water column. Seasonal changes in water temperature showed a gradual decrease from 24°C to 6°C from September to December, while in late October and early November, it was 15°C–16°C in both years. These results show that ayu larvae do not always drift at the same depth and that their distribution in the water column changes seasonally as the water temperature decreases.

キーワード：アユ, 鉛直分布, 久慈川, 水温, 流下仔魚

日本の代表的な両側回遊魚であるアユ, *Plecoglossus altivelis altivelis* は, 河川での漁業や遊漁の対象として, あるいは地域の観光資源として大いに利用されている。ところが近年は, 全国各地で遡上稚魚数の減少が問題になっている。^{1,2)} そのため, アユの主な利用者である漁業者や遊漁関係者からは, 遡上稚魚数の増加策と遡上数や資源量の予測技術の開発が望まれている。これらの技術は, その年の漁模様の予測するのみならず, 種苗の放流量でアユの生息密度を適当な水準に調整し漁場を効率的に利用するために必要とされている。

このような課題の解決は, アユの生態を理解し問題点を把握することが糸口となる。また, 予測技術の開発では, アユの生態に即した手法で得た長期にわたる資源量データが不可欠である。

アユの生態研究は, ふ化後の仔魚が成育場である海や

汽水域に至るまでの河川流下期^{3–13)}や到達してから遡上するまでの海洋生活期,^{3,14–24)} 河川への遡上から産卵までの河川生活期,^{3,4,25–31)} といった生活史の各段階で行われ, 知見の蓄積がすすんでいる。

なかでもアユ資源の最も初期段階といえるふ化仔魚, すなわち流下仔魚の生態については, 一般的に次のような理解が得られている。1) 仔魚は夕方から深夜にかけてふ化し,^{10,32)} 主に夜間に川の流れにのって流下する,^{3–8,10–13)} 2) 仔魚の流下は流量の多い流心部に集中する,^{6,12)} 3) 流下仔魚数の経時変化は, 調査地点から産卵場までの距離や河川流速などが関係して生じる,^{9–11)} 4) 仔魚が流下に時間を要すると, 飢餓や被食の機会の増加を招き, 生残率の低下がもたらされる。^{4,8,9)}

流下仔魚数の推定を目的とした調査方法には, 調査地の地形や水深, 流速等に応じて河川横断面を分割したう

* Tel : 81-299-55-0324. Fax : 81-299-55-1787. Email : k.arayama@pref.ibaraki.lg.jp

^a 現所属：茨城県霞ヶ浦環境科学センター (Ibaraki Kasumigaura Environmental Science Center, Tsuchiura, Ibaraki 300-0023, Japan)

^b 現所属：茨城県水産試験場 (Ibaraki Prefectural Fisheries Research Institute, Hitachinaka, Ibaraki 311-1203, Japan)

えて仔魚を採集し、用いたネットの網口面積と分割区域の面積の比から仔魚数を推定する面積法と、単位流量あたりの仔魚数を求め、それを河川流量に乗じて仔魚数を推定する流量法が知られている。³³⁾

しかし、大規模河川や河川敷の状況によっては水深の深い場所で調査を行わなければならないことがある。その場合、調査を適切かつ簡便に実施する上で重要な「どの水深帯で仔魚を採集することが適当か」を示す知見、すなわち流下仔魚の鉛直分布に関する研究は、千田・東⁵⁾や和田³⁴⁾、兵藤ら⁷⁾に限られている。しかもそれらのうち、兵藤ら⁷⁾の調査は日中に行われたものであって仔魚の主な流下時間帯である夜間^{3-8,10-13)}の情報は得られていない。また、夜間に調査を行った千田・東⁵⁾と和田³⁴⁾においては一致した結果が得られておらず、前者は表層を、後者は底層を仔魚が流下するとしている。両者の結果が異なった要因には調査河川の違いをはじめ様々なことが考えられるが、いずれにしても仔魚の鉛直分布が一様でないならば、調査方法等によっては推定された仔魚数と真値との間に大きな差が生じることが懸念される。したがって流下仔魚数を精度高く推定するには、仔魚の鉛直分布を正確に把握し、それに応じた調査を行うことが必要と考えられる。

本研究では高精度な流下仔魚数の推定技術の開発に寄与するため、仔魚が主に採集される夜間^{3-8,10-13)}の鉛直分布を経月および経時的に明らかにした。そして流下仔魚の調査手法について意見を述べるとともに、仔魚の流下行動についても考察を加えた。

材料と方法

調査は、流路延長約 124 km の茨城県久慈川で行った (Fig. 1)。調査地点は、アユの主な産卵場よりも下流にあること、仔魚の流下を妨げる潮の干満の影響³⁵⁾を受けないこと、河川の増水の影響を受けにくいことといった条件を満たす場所として、河口から約 8 km 上流で川幅が約 50 m、最大水深約 3 m の、橋が架かっている地点に設定した ($36^{\circ}30'15''\text{N}$, $140^{\circ}32'40''\text{E}$, Fig. 1)。この地点は、下流に向かって左岸側に流心があり、河床が深くなっていた。

調査期間は、2006 年と 2007 年のそれぞれ 9 月下旬から 12 月下旬にかけてとし、各月の前半と後半に調査した。採集時間は、2006 年 10 月上旬を除いて 18 時から翌朝 8 時までとし、採集は 2 時間に 1 回、5 分間実施した。日中の調査は、本研究の先行研究¹³⁾によって、流下仔魚が主に夜間に採集されることが明らかであることから行わなかった。

採集は、仔魚が主に流下する流心部(荒山ら、未発表)において、2006 年は表層と底層で、2007 年は表層と中層および底層で行った (Fig. 1)。表層とは水面から約

Fig. 1 Map showing the sampling site in the Kuji River and a cross-section diagram of the site. Ayu larvae collection conducted at the surface and in the bottom river layers in the 2006 survey, and at the surface and in the middle and bottom river layers in the 2007 survey.

50 cm、中層とは約 1.2~2.0 m (各調査日の水深の中心にネットを設置したため)、底層とは水底上約 30~80 cm の範囲であった。各調査日の水深は、2.8~3.6 m の間で変動した。

採集道具には、口径 45 cm、側長 1.8 m、目合 0.3 mm の円錐形のネットを用いた。表層での採集にはリングに浮きを取り付けたネットを、中層と底層の採集にはリングに浮きとロープ付きの錘を取り付けたネットを用いた。中層と底層へのネットの設置は、錘とリングをつなぐロープの長さを調節して行った。2007 年の調査ではリングにダイビングコンピューター (タバタ製 TUSA, IQ-700) を取り付け、ネットの設置水深を確認した。それぞれのネットは、橋から垂下して各層に設置した。ネットの開口部には濾水計 (離合社製 No. 5571) を取り付け、濾水量から 1 m^3 あたりの仔魚密度を算出した。ただし、流速が遅く、濾水計が回転しなかった場合は、濾水率を 1 として計算した。

調査では毎回、表層の水温と流速を採集前後に観測し

た。観測には YSI ナノテック社製ハンディ DO メーターモデル 55 とケネック社製電磁流速計 LP1100 を用いた。また、2006 年は 9 月下旬と 10 月下旬および 11 月上旬、2007 年は全ての調査で各層の水温と流速を観測した。これらの観測にはアレック電子社製 2 次元電磁流向流速計 AEM-213D と COMPACT-EM を用いた。

採集物は、5 % ホルマリン水溶液で固定し研究室に持ち帰った。研究室ではアユ仔魚の選別と計数を行った後、一つの標本につき最大 50 個体を無作為に抽出して、マイクロメーターを取り付けた実体顕微鏡下で脊索長（以下体長）の計測と卵黄の残存状態の観察を行った。卵黄の残存状態は、塚本⁹⁾に従って 5 段階の卵黄指数に区分した。なお、卵黄指数 4 は大量の卵黄が残存した状態で、指数 0 は卵黄が全く残存していない状態である。

得られたデータに関する統計解析は次のように行った。まず、同一採集日の各層における仔魚の流下割合の一意性を適合度の検定で評価した。次に、隣り合う調査日間での各層における仔魚の流下割合の差について、検定の多重性を考慮して Bonferroni の方法で全体の有意水準を 5 % ($P=0.05$) に調整したうえで、Fisher の正確確率検定で比較した。調整後の検定各回の有意水準は 1 % ($P=0.01$) であった。

仔魚の体長と卵黄指数については、産卵時期や親魚の大きさで卵の大きさが異なり、結果としてふ化仔魚の体長が異なることや、³⁶⁾ ふ化後日数によって卵黄の残存量が変わること^{4,9)}などを考慮して、異なる採集時間や調査日間における差には注目せず、同一採集時間における層間の差にのみ注目して比較した。比較は各層の全てで仔魚が 10 個体以上採集されたときに行った。体長の比較は、2006 年は Welch の t 検定で、2007 年は一元配置分散分析 (ANOVA) で行った。卵黄指数の比較は、2006 年は Mann-Whitney の U 検定で、2007 年は Kruskal-Wallis 検定で行った。これら検定における有意水準は 5 % ($P=0.05$) とした。統計解析には、R ver. 2.9 (R Development Core Team, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <http://www.R-project.org>.) を使用した。

結 果

水温と流速 表層の最高水温は、両年ともに、9 月下旬から 12 月下旬に向かうにつれて低下した (Fig. 2)。最高水温の範囲は、2006 年は 6.8~24.3°C、2007 年は 6.4~24.7°C であった。水温は、夕方 18 時から翌朝に向かって徐々に低下し、各調査日の最高水温と最低水温の差は、2006 年では 1.5°C (12 月下旬)~3.5°C (9 月下旬)、2007 年では 0.7°C (11 月下旬)~3.0°C (9 月下旬) であった (Fig. 2)。また、いずれの観測時も、水温は

Fig. 2 Changes in water temperature recorded at the surface of the sampling site from late September to late December in 2006 and 2007.

Fig. 3 Changes in water velocity recorded at the surface of the sampling site from late September to late December in 2006 and 2007.

表層から底層までほぼ一様であり、その差は最大でも 0.2°C であった。

表層の流速は、水温のように経月で変化する傾向にはなく、河川流量が多いときには早く、少ないときには遅かった。観測された流速範囲は 14.4~69.5 cm s⁻¹ で、各調査日の最大流速と最小流速の差は 2.6~17.0 cm s⁻¹ (平均±標準偏差: 6.8±4.0 cm s⁻¹) であった (Fig. 3)。

流速の鉛直分布は、調査期間を通じて観測できた 2007 年でみると、表層から底層までほぼ一様の場合と、底層の流速が表層や中層よりもやや遅い場合と早い場合、そして中層がもっとも早く表層と底層が同程度の場合の 4 つの様式が認められた (Fig. 4)。これらの傾向は、一部でのみ観測した 2006 年も同様であった。しかし両年とも各観測時の層間を比較しても、最大流速と最小流速の差が 0.2~10.0 cm s⁻¹ (最大流速に対する最低流速の割合: 69.6~99.2%)、平均で 3.7 cm s⁻¹ (87.8%) であることや、流速の遅速関係が規則的ではないことから (Fig. 4)、全体的に流速は水深によって大きく異ならないと思われた。

Fig. 4 Changes with time in vertical distribution of water velocity recorded at the sampling site from late September to late December in 2007.

仔魚の鉛直分布 アユ仔魚の流下が確認されたのは、2006年は10月上旬から、2007年は9月下旬からであった (Fig. 5)。ただし2007年9月下旬の採集個体数は1個体のみであった。仔魚が多く流下したのは、2006年は10月下旬と11月上旬、2007年は10月下旬から12月上旬にかけてで、2007年の方が2006年よりも長期間、高密度で仔魚が流下した。

両年の各調査日について、各層における仔魚の流下割合を比較した。2006年では、10月下旬と12月下旬に関しては有意な差が認められず (適合度の検定, 10月下旬, $\chi^2 = 1.69$, $P = 0.14$; 12月下旬, $\chi^2 = 0.01$, $P =$

Fig. 5 Changes in mean density of ayu larvae collected from all water column layers of the sampling site from late September to late December in 2006 and 2007.

Fig. 6 Changes in the percentage of density of ayu larvae collected from each water column layer of the sampling site in 2006 and 2007.

0.92), 仔魚の流下は表層と底層で同程度であると評価された (Fig. 6)。これに対して10月上旬と11月上旬から12月上旬にかけてでは、表層よりも底層を流下する割合が高いと評価された (適合度の検定, $\chi^2 = 6.45 \sim 39.94$, $p < 0.05$)。また、隣り合う調査日間に注目する

Fig. 7 Changes with time in the density of ayu larvae collected from each water column layer of the sampling site in 2006. Arrows indicate sunrise.

と、各層における仔魚の流下割合は、10月下旬と11月上旬との間で、表層の占める割合が43.5%から18.4%まで低下する現象がみられた (Fig. 6, Fisherの正確確率検定, $p < 0.001$)。11月下旬以降は表層の占める割合が旬を追うごとに高まったが、統計的に有意な差は認められなかった (Fisherの正確確率検定, $P = 0.09 \sim 0.23$)。

2007年の各層における仔魚の流下割合は2006年と似た傾向にあった (Fig. 6)。すなわち、10月下旬と12月下旬では表層と中層および底層の各層において仔魚は一樣に流下したと評価されたが (適合度の検定, 10月下旬, $\chi^2 = 1.67$, $P = 0.44$; 12月下旬, $\chi^2 = 5.11$, $P = 0.08$)、その他の調査日には偏りがあると評価された (適合度の検定, $\chi^2 = 10.31 \sim 25.94$, $p < 0.01$)。また、隣り合う調査日間で各層における仔魚の流下割合の変化をみると、表層を流下した仔魚の割合が10月下旬と11月上旬の間で31.8%から10.1%まで低下した (Fisherの正確確率検定, $p < 0.001$)。11月下旬以降は、旬を追うごとに表層の占める割合が高まったが、統

Fig. 8 Changes with time in the density of ayu larvae collected from each water column layer of the sampling site in 2007. Arrows indicate sunrise.

計的に有意な差は認められなかった (Fisherの正確確率検定, $P = 0.21 \sim 1.00$)。

次に、各層における流下仔魚密度の経時変化を2006年と2007年両年の10月上旬から12月下旬の各調査日に注目してみたところ、両年とも10月下旬と11月上旬との間で流下様式が変化したことがわかった (Figs. 7, 8)。すなわち、10月下旬には仔魚密度が全ての層で同じように増減したのに対し、11月上旬では、中層や底層に比べて表層の変化は小さく、密度も低く推移した。11月上旬にみられた表層での仔魚密度の低下は、2006年では11月下旬と12月上旬にも、2007年では11月下旬以降にも認められた。また、両年とも10月下旬の4時から6時にかけて、中層や底層より表層の仔魚密度が著しく減少した。

仔魚の体長と卵黄指数 仔魚の体長範囲は、2006年は4.0~7.0 mm (平均±標準偏差: 5.8 ± 0.4 mm) で (Fig. 9), 2007年は4.6~7.2 mm (5.9 ± 0.3 mm) であった (Fig. 10)。

同一採集時間における層間での仔魚の体長差は、

Fig. 9 Changes with time in notochord length distributions of ayu larvae collected from surface (S) and bottom (B) layers of the sampling site from early October to late December in 2006. Vertical and horizontal bars show maximum and minimum length of larvae and mean length, respectively and boxes show 25% and 75% quartiles. Significance level: **, $p < 0.01$; *, $p < 0.05$; -, no significant difference. Blank means not included in the statistical analysis. n. s.: not surveyed.

2006 年では統計解析を実施した全 25 回のうち 12 回で有意な差が認められた (Welch の t 検定, $p < 0.05$): 10 月下旬, 20 時, 22 時, 8 時; 11 月上旬, 20 時~2 時, 6 時; 11 月下旬, 0 時, 4 時; 12 月上旬, 0 時; 12 月下旬, 2 時 (Fig. 9)。このうち 10 月下旬の 8 時と 11 月上旬の 6 時および 12 月下旬の 2 時は底層を, それ以外では表層を大きな仔魚が流下した。しかし, その体長範囲は, 統計的に有意な差が認められたときであっても

概ね重複した。

2007 年では, 統計解析を実施した全 34 回のうち 10 回で有意な差が認められた (ANOVA, $p < 0.05$): 10 月上旬, 6 時; 10 月下旬, 2 時, 4 時; 11 月上旬, 4 時; 11 月下旬, 18 時, 20 時, 8 時; 12 月上旬, 6 時, 8 時; 12 月下旬, 8 時 (Fig. 10)。このうち 10 月上旬の 6 時と 11 月下旬の 18 時と 20 時では, 底層, 中層, 表層の順に平均体長が大きくなったが, その他では中層の

Fig. 10 Changes with time in notochord length distributions of ayu larvae collected from surface (S), middle (M) and bottom (B) layers of the sampling site from early October to late December in 2007. Symbols indicate the same as in Fig. 9.

平均体長が最も大きい、もしくは最も小さい時の両方が認められた。また、その体長範囲は2006年同様重複する傾向にあった。

卵黄指数は兩年ともに1と2の占める割合が高く、0と4の占める割合は低かった (Figs. 11, 12)。

2006年の各標本における卵黄指数1から4の割合は、指数0が0~57.1%，指数1が0~72.2%，指数2が0~63.6%，指数3が0~46.1%，指数4が0~23.5%で変異した (Fig. 11)。同一採集時間における層間での卵黄指数の差は、統計解析を行った全25回のうち4

回で有意な差が認められた (Mann-Whitney の U 検定, $p < 0.05$) : 10月下旬, 22時; 11月上旬, 22時; 12月上旬, 0時, 6時 (Fig. 11)。しかし、これらにおいて、卵黄指数の大きい仔魚が特定層を流下するといった規則性は認められなかった。

2007年の各標本における卵黄指数1から4の割合は、指数0が0~23.0%，指数1が0~92.0%，指数2が0~72.2%，指数3が0~32.0%，指数4が0~26.5%で変異した (Fig. 12)。同一採集時間における層間での卵黄指数の差は、統計解析を実施した全34回のうち

Fig. 11 Changes with time in percentages in yolk index of ayu larvae collected from surface (S) and bottom (B) layers of the sampling site from early October to late December in 2006. Significance level: **, $p < 0.01$; *, $p < 0.05$; -, no significant difference. Blank means not included in the statistical analysis. n. s.: not surveyed.

6回で有意な差が認められた (Kruskal-Wallis 検定, $p < 0.05$): 10 月下旬, 6 時; 11 月上旬, 4 時, 6 時; 12 月上旬, 4 時; 12 月下旬, 22 時と 6 時 (Fig. 12)。しかし, その差の傾向は一定ではなく, 2006 年同様卵黄指数の大きい仔魚が特定層を流下するといった規則性は認められなかった。

考 察

流下仔魚の鉛直分布の時期的変化とその要因 本調査

地点においてアユ仔魚は, 表層から底層までを常に一様に流下するのではなく, 10 月下旬と 11 月上旬を境として, すなわち時期によって流下する水深帯が異なった (Figs. 7, 8)。

流下仔魚の鉛直分布に影響をおよぼすと考えられる要因には, 仔魚の大きさや卵黄残存量の違い, 流速, 照度, 産卵場から調査地までの距離, 捕食者の存在などがあげられる。^{3,4,6,8,9,13,37-42)} また和田³⁴⁾は, 流下仔魚が河川の下層から多く採集されることに関して水槽実験を行

Fig. 12 Changes with time in percentages in yolk index of ayu larvae collected from surface (S), middle (M) and bottom (B) layers of the sampling site from early October to late December in 2007. Symbols indicate the same as in Fig. 11.

い、仔魚は河床の起伏や流路の蛇行、流路中の工作物等によってうける衝撃で衰弱するために上層よりも下層の分布密度が高まるという仮説を述べている。

しかし、本研究結果はこれらの要因で説明することは難しいと考えられた。なぜなら、下記に述べる理由からそれぞれ否定されたからである。

まず仔魚の大きさについては、統計的に同一採集時間の層間で差が認められたこともあったが (Figs. 9, 10)、体長範囲がほぼ重複したことや、平均体長の差が 1 mm

にも満たなかったこと、さらに 2006 年に認められた「表層に大きな仔魚が流下する現象」が 2007 年では不明瞭であったことから、仔魚の発育にともなう流下水深の変化は生じていないと考えられた。卵黄残存量については、層間で差がほとんど無く (Figs. 11, 12)、差が認められたときでも規則性がみられなかったことに加え、2006 年、2007 年とも仔魚の分布が大きく異なる 10 月下旬と 11 月上旬の間で卵黄残存量が大きく変化していないことから否定できると考えられた。

流速については、仔魚の鉛直分布が変化した10月下旬と11月上旬とで比べると、2006年は前者から遅くなったのに対して2007年は速くなっていた (Fig. 3)。流速が仔魚の鉛直分布に影響し、流速が遅い時には仔魚は中層や底層を主に流下し、速い時には表層から底層まで一様に流下するのであれば、2007年11月上旬よりも流速が遅かった2007年10月下旬には11月上旬と同様に中層や底層を主に流下するはずであるが、結果はそうではなかった。このように、流速の遅速に対応して仔魚の鉛直分布が変化したとは考えられなかった。また、流速が層間であまり変わらず (Fig. 4)、仔魚と流速の鉛直分布が対応していないことから流速の影響はなかったと考えられた。

照度は、光量子計で観測したものの夜間のデータが得られなかったことから具体的には検討できないが、月令や天候に応じて仔魚の鉛直分布が変化しなかったことから (荒山, 未発表), その影響は大きくないと思われた。なお、用いた光量子計の性能は、測定範囲0~2000 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{s}$, 分解能1 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{s}$ であった。

産卵場までの距離については、仔魚のふ化後日数の目安となる卵黄指数^{4,9)}をみる限り、卵黄指数4や3といったふ化後まもない仔魚が規則的に経月で増減していないこと (Figs. 11, 12) から大きく変化したとは考えにくい。すなわち、産卵場からの仔魚の流下距離が鉛直分布に影響したとは考えられない。

被食の回避については、カワムツ, *Nipponocypris temminckii* やウキゴリ, *Gymnogobius urotaenia* などが仔魚の捕食者として知られるが,^{39,43)} これら魚類は表層にのみ分布するわけではないことから、11月上旬以降、捕食者を回避するために仔魚が表層を流下しなくなったとは説明できない。むしろウキゴリなど底生魚の存在は、底層を流下する仔魚の方で被食の危険性が高くなると推測される。事実、ウキゴリ属のスミウキゴリ, *G. petschiliensis* が夜間に流下仔魚を捕食していることは確認されている。⁴³⁾

最後に、仔魚が流下中に河床の起伏や流路中の工作物などから受ける各種の衝撃の影響³⁴⁾については、衝撃が流れの強さや河川流量に関係すると仮定すれば、流速が大きく異なる2006年と2007年の10月下旬 (Fig. 3: 19.0~24.7 cm s^{-1}) で仔魚が同じ鉛直分布 (Figs. 7, 8) を示したことの説明は難しい。あるいは衝撃が流下する仔魚に影響するとしても、久慈川において観測された約70 cm s^{-1} ほどの流速では無視できると考えられる。

以上のように仔魚の発育状況や河川の物理、生物環境が今回の10月下旬と11月上旬に生じたアユ仔魚の分布様式の変化に影響しない可能性を述べてきたが、変温動物であるアユにとってその行動は水温にも大きく左右される。事実、仔魚の鉛直分布が変化した11月上旬に

は、2ヶ年ともに水温が15℃以下を記録するという共通点を認めることができる (Fig. 2)。

水温が仔魚におよぼす影響には、卵黄の消費速度⁴⁴⁾のほか、行動の活発さの変化が予想される。伊藤ら³⁷⁾は、夕方の水温が16.2℃であった水深60 cmの飼育池において、ふ化後6日までのアユ仔魚の分布層は水面から40 cmまでに集中すると述べている。一方、著者の予備的な水槽実験では水温の低下とともに仔魚の遊泳行動は緩慢になり水面まで浮上しない傾向を示すことが認められている。⁴⁵⁾ アユ仔魚の流下行動の始点が水底である以上,²⁵⁻²⁷⁾ その遊泳力が約3 cm s^{-1} にも満たない⁴⁶⁾としても、仔魚は、水温が高ければ水底から底層へ、そして中層へと浮上、分散して流下するはずであり、分布状況は仔魚の活発さに従うと考えられる。したがって、水温の低下が、アユ仔魚の鉛直分布に大きな影響を与えたことは容易に推測できる。

久慈川における流下アユ仔魚の鉛直分布の時期的変化についてまとめる。水温が高い10月下旬には、仔魚が表層まで分散することによって全層で分布密度が一様となるが、水温が低下する11月上旬以降には、仔魚が表層まで分散しにくくなるために表層では低密度となり、中層と底層を主に流下するようになると考えられる。

本研究で示された流下アユ仔魚の鉛直分布の時期的変化は、今回初めて報告される現象であるが、全国各地の河川で一般的に起こりうると著者らは考えている。しかし仔魚の流下時期は、産卵やふ化状況が河川水温の影響を受けるため,^{47,48)} 地域や気象条件によって変動する。したがって、本研究で明らかにした水温と流下仔魚の鉛直分布の関係は今後データを多面的に蓄積し、地域的な特徴や天候による差違を把握していくことが重要であろう。

早朝における流下仔魚の鉛直移動 アユ仔魚の流下は、日中ではなく主に夜間に認められる。^{3-8,10-13)} また、日中の仔魚は底層に多いと報告され、⁷⁾ アユの亜種であるリュウキュウアユでも同様の事例が確認されている。⁴²⁾ このような背景のもと高橋³⁾は、アユ仔魚が日中にあまり流下しない理由を「日の出による照度の高まりに応答した負の走光性の発現と日周的な体比重の増加によって、日中は淵などの流れが緩やかな場所に沈降することで流下を防いでいる」と考察している。

本研究では、調査を行った2ヶ年ともに10月下旬の早朝 (4時から6時) に表層の仔魚密度が急激に低下し、中層や底層よりも低くなる現象が認められた (Figs. 7, 8)。このことは、日の出にともなって仔魚が表層から中層や底層へ移動した可能性を強く示唆するものであり、高橋³⁾の仮説を裏づける結果と考えられる。

しかしながらその一方、2007年の11月上旬から12月下旬にかけては、日の出以降も表層の仔魚密度が急減

せず (Fig. 8), 仔魚の表層からの移動を否定する現象が認められた。本研究では前述のとおり, 流下仔魚の鉛直分布の時期的変化, とくに表層への出現は, 水温の影響を受けた仔魚の活発さに左右されると考えている。これによれば, 鉛直分布の時期的変化が生じた 11 月上旬以降に表層の仔魚密度が急減しなかったことは, 表層にいた仔魚が低水温のために日の出をむかえても速やかに底層へ移動できなかったためと説明することができ, 高橋³⁾の仮説を否定するには至らない。

残念ながら本研究の調査地点は 1 か所であり, 流下してくる仔魚の日周的鉛直移動の追跡は出来なかった。今後, 仔魚の日周的鉛直移動を含めた流下行動に関する事象の解明に向けて, 多地点における調査が望まれる。

鉛直分布を踏まえた流下仔魚調査の必要性 高い精度で推定された流下仔魚数は, アユ資源の保全や増加対策, あるいは資源量や遡上数の予測技術を開発するための基礎データとして活用が期待される。好例をあげれば, 流下仔魚数と遡上稚魚数を長期にわたってモニタリングしている和歌山県では, 流下仔魚数の多かった 1978~1980 年には遡上稚魚数も多かったという関係を認めたと⁴⁹⁾ 現在問題となっている遡上稚魚数の減少要因を追及する研究が進められている。⁵⁰⁾

本研究で明らかとなった時期的に変化する仔魚の鉛直分布を踏まえると, 水深のある地点で流下仔魚数の推定を目的とした調査を行う際には, 単一層からのみ仔魚を採集するのではなく, 流下期間を通じて表層から底層の多面的な調査の実施が望ましいといえる。このような調査は, 各時期における正確な仔魚の鉛直分布の把握を可能とし, 対象河川におけるアユ資源の発生量を過少あるいは過大に推定する危険の回避につながる。実際, 本研究結果から仔魚数を算出した場合, 表層で得たデータのみに基づけば 11 月上旬以降の推定値は過少評価となり, 底層で得たデータのみでは過大となる。

河川によっては仔魚の鉛直分布が本研究結果と合致するとは限らない。しかし, 流下仔魚調査を水深の深い地点で実施しなければならない際には, 仔魚の時期的, 時間的な鉛直分布の変化を意識して採集, 解析することを推奨したい。

謝 辞

茨城県内水面水産試験場臨時職員 (当時) の成島仁子さんと田宮由美さんには研究室での作業にご尽力いただき, 同試験場職員の方々には調査に関して様々な便宜を図っていただいた。久慈川漁業協同組合の方々には調査に対するご理解とご協力をいただいた。井口恵一朗博士, 高橋勇夫博士からは草稿に対し有益なご助言を賜った。また, 本研究の一部は文部科学省の特別電源所在県科学技術振興事業補助金により行った。記して感謝の意

を表する。

文 献

- 1) 高橋勇夫, 東 健作. 「ここまでわかったアユの本」 築地書館, 東京. 2006.
- 2) 高橋勇夫. 「天然アユが育つ川」 築地書館, 東京. 2009.
- 3) 高橋勇夫. 四万十川河口域におけるアユの初期生活史に関する研究. 高知大学海洋生物教育研究センター研究報告 2005; **23**: 113-173.
- 4) 高橋勇夫, 新見克也. 矢作川におけるアユの生活史—I, 産卵から流下までの生態. 矢作川研究 1998; **2**: 225-245.
- 5) 千田哲資, 東 幹夫. 河口堰沖合海域における稚アユの生態 II. 木曾三川河口資源調査報告 1967; **4**: 39-54.
- 6) 和田吉弘, 稲葉左馬吉. 長良川におけるアユの産卵から仔アユの降下まで IX, 降下経路の解析. 木曾三川河口資源調査報告 1967; **4**: 13-27.
- 7) 兵藤則行, 関 泰夫, 小山茂生, 片岡哲夫, 星野正邦. 海産稚仔アユに関する研究—I 仔アユの降下状況について. 新潟県内水面水産試験場調査研究報告 1984; **11**: 41-50.
- 8) 兵藤則行, 関 泰夫. 海産稚仔アユに関する研究—II 流下仔アユの生残におよぼす絶食の影響(1). 新潟県内水面水産試験場調査研究報告 1985; **12**: 15-22.
- 9) 塚本勝巳. 長良川・木曾川・利根川を流下する仔アユの日齢. 日水誌 1991; **57**: 2013-2022.
- 10) 田子泰彦. 庄川におけるアユ仔魚の降下生態. 水産増殖 1999a; **47**: 201-207.
- 11) 田子泰彦. 庄川におけるアユ仔魚の河口域への到達時間の推定. 水産増殖 1999b; **47**: 215-220.
- 12) 養宮 敦. 相模川におけるアユ降下仔魚量の推定. 神水研研報 2004; **9**: 37-44.
- 13) 小沼洋司. 沿岸海況がアユの遡上に与える影響について. 茨城県内水試研報 1984; **21**: 49-61.
- 14) Senta T, Kinoshita I. Larval and juvenile fishes occurring in surf zones of western Japan. *Trans. Amer. Fish. Soc.* 1985; **114**: 609-618.
- 15) 塚本勝巳, 望月賢二, 大竹二雄, 山崎幸夫. 河口水域におけるアユ仔魚の分布・回遊・成長. 水産土木 1989; **25**, 47-57.
- 16) 田子泰彦. 富山湾の河口域およびその隣接海域表層におけるアユ仔魚の出現・分布. 日水誌 2002; **68**: 61-71.
- 17) 田子泰彦. 富山湾の砂浜域砕波帯周辺におけるアユ仔魚の出現, 体長分布と生息場所の変化. 日水誌 2002; **68**: 144-150.
- 18) 東 健作. アユの海洋生活期における分布生態. 高知大学海洋生物教育研究センター研究報告 2005; **23**: 59-112.
- 19) Ebrahim A, Kinoshita I, Sashida M, Hashimoto T, Nunobe J. Do the ayu (*Plecoglossus altivelis altivelis*) bone in the river with an inlet or large estuary in its mouth perform a horming? *La mer* 2006; **44**: 59-69.
- 20) 吉本 洋, 藤井久之, 中西 一. 日高川河口域におけるアユ仔魚の出現. 水産増殖 2006; **54**: 543-551.
- 21) 八木佑太, 美藤千穂, 舟越 徹, 木下 泉, 高橋勇夫. 土佐湾沿岸域におけるアユ仔魚の分布および食性. 日水誌 2006; **72**, 1057-1067.
- 22) 荒山和則, 河野 博, 茂木正人. 館山湾の砂浜海岸におけるアユ仔魚の季節的および日周的出現様式. 水産増殖 2007; **55**: 245-252.
- 23) 山本敏哉, 三戸勇吾, 山田佳裕, 野崎健太郎, 吉鶴靖則, 中田良正, 新見克也. 矢作川河口周辺海域 (三河湾西部) におけるアユ仔魚の分布と底質の関係. 日水誌

- 2008; **74**: 841-848.
- 24) 涌井 海, 八木佑太, 山中拓也, 木下 泉. 土佐湾でのアユの母川回帰性と初期生態の河川間比較. 海洋と生物 2009; **31**: 522-529.
- 25) 石田力三. アユの産卵生態—I, 産卵群の構造と産卵行動. 日水誌 1959; **25**: 259-268.
- 26) 白石芳一, 鈴木規夫. アユの産卵生態に関する研究. 淡水区水産研究所研究報告 1962; **12**: 83-107.
- 27) 石田力三. アユの産卵生態—IV, 産卵水域と産卵場の地形. 日水誌 1964; **30**: 478-485.
- 28) 川那部浩哉. アユの社会構造と生産Ⅱ —15 年間の変化をみて—, 日本生態学会誌 1970; **20**: 144-151.
- 29) 井口恵一郎, 伊藤文成, 山口元吉, 松原尚人. 千曲川におけるアユの産卵降河移動. 中央水研研報 1998; **11**: 75-84.
- 30) 田子泰彦. 富山湾の湾奥部で成育したアユ稚魚の河川への回遊遡上. 日水誌 2002c; **68**: 554-563.
- 31) 荒山和則. 茨城県久慈川におけるアユの遡上様式. 茨城県内水試研報 2006; **40**: 45-54.
- 32) 木村関男. アユ卵の自然及び実験室内での孵化と光線との関係について. 水産増殖 1954; **1**: 36-39.
- 33) 塚本勝巳. 流下仔魚調査法. 「河川生態環境工学」(玉井信行, 水野信彦, 中村俊六編) 東京大学出版会, 東京. 1993; 266-267.
- 34) 和田吉弘. 長良川の千本松原付近における降下仔アユの垂直分布について. 岐阜大学教育学部研究報告 (自然科学) 1981; **6**, 705-712.
- 35) 和田吉弘, 稲葉佐馬吉. 長良川におけるアユの産卵から仔アユの降下までⅩ, 汽水域の仔アユについて. 木曾三川河口資源調査報告 1968; **5**: 1-9.
- 36) Iguchi K, Yamaguchi M. Adaptive significance of inter- and intrapopulational egg size variation in Ayu *Plecoglossus altivelis* (Osmeridae). *Copeia* 1994: 184-190.
- 37) 伊藤 隆, 岩井寿夫, 古市達也, 鈴木惇悦. アユ種苗の人工生産に関する研究—ⅩⅢ, 飼育池におけるアユ仔魚の分布・行動・摂餌活動および消化管内食物量の日周変化. 木曾三川河口資源調査報告書 1965; **2**: 971-1022.
- 38) 水谷英志, 西田 睦, 田沢 茂, 伏木省三. コアユ産卵場におけるヨシノボリ・ウツセミカジカのアユ卵 (アユ仔魚) 食害について. 滋賀水試研報 1974; **25**: 69-78.
- 39) 水谷英志. 各種魚類による流下アユ仔魚の食害 (Ⅱ), 実験人工河川河口域と姉川のアユ産卵場附近に棲息する魚類の胃内容物について. 滋賀水試研報 1976; **28**: 21-28.
- 40) 小山長雄. 「アユの生態」中公新書, 東京. 1978.
- 41) 北島 力, 山根康幸, 松井誠一, 吉松隆夫. アユ仔魚の発育に伴う比重の変化. 日水誌 1998; **64**: 822-829.
- 42) 岸野 底, 四宮明彦. 奄美大島役勝川におけるリュウキュウアユの孵化後の流下行動. 魚類学雑誌 2006; **53**: 143-149.
- 43) 岡田裕史. アユ流下仔魚の魚類による捕食について. 平成 19 年度アユ資源研究部会研究発表報告書, 全国湖沼河川養殖研究会アユ資源研究部会, 富山. 2008; 26-27.
- 44) 森 直也, 関 泰夫, 星野正邦, 佐藤雍彦, 鈴木惇悦, 塚本勝巳. 信濃川水系を流下する仔アユの日令とさいのう体積. 新潟県内水面水産試験場調査研究報告 1989; **15**: 1-7.
- 45) 荒山和則, 須能紀之, 山崎幸夫. 流下仔魚の鉛直分布. 平成 19 年度アユ資源研究部会研究発表報告書, 全国湖沼河川養殖研究会アユ資源研究部会, 富山. 2008; 22-23.
- 46) Tsukamoto K, Kajihara T, Nishiwaki M. Swimming ability of fish. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1975; **41**: 167-174.
- 47) 落合 明, 田中 克. アユ. 「新版 魚類学 (下)」恒星社厚生閣, 東京. 1986; 465-476.
- 48) Kashiwagi M, Iwai T, Yamamoto H, Sokabe Y. Effects of temperature and salinity on egg hatch of the ayu *Plecoglossus altivelis*. *Bull. Fac. Fish., Mie Univ.* 1986; **13**: 17-24.
- 49) 吉本 洋, 藤井久之, 中西 一. 紀伊半島西岸域における稚アユの成長. 日水誌 2007; **73**: 1057-1064.
- 50) 原田慈雄, 高橋芳明, 藤井久之. 和歌山県日高川における近年のアユ資源変動メカニズム. 海洋と生物 2009; **31**: 508-514.