

サクラマス降河幼魚の農業用取水口への迷入

誌名	日本水産學會誌
ISSN	00215392
著者	米山, 洋一 塚本, 勝巳 北田, 修一
巻/号	64巻3号
掲載ページ	p. 398-405
発行年月	1998年5月

サクラマス降河幼魚の農業用取水口への迷入

米山洋一, 塚本勝巳, 北田修一

(1997年3月24日受付)

Rate of Entrainment of the Juvenile Masu Salmon *Oncorhynchus masou* through the Intake of Agricultural Diversion Weirs during Downstream Migration in the Kaji River*¹Yoichi Yoneyama,*² Katsumi Tsukamoto,*³ and Shuichi Kitada*⁴

In order to estimate the loss of the juvenile masu salmon at the intake of agricultural diversion weirs during downstream migration in the Kaji River, Niigata Prefecture, a new method was presented. A total of 70,205 fish with fork length of about 11.5 cm were divided into three groups marked differently by one another by otolith tagging and released at the upstream of the upper weir-I (upper group), the downstream of the lower weir-II (lower group), and the middle area between weir-I and weir-II (middle group) on 13-20 October 1994. We assumed that the difference of the recapture rates of these three groups would be derived from the difference of entrainment of fish at each weir, and estimated the rates of entrainment based on the recapture rates in the sea after their downstream migration in spring.

The recapture rates were 0.0229, 0.0388 and 0.0432% for upper, middle and lower groups, respectively, thus the upper group showed the lower recapture rate because of the larger loss of fish by entrainment at the weirs. The rate of entrainment with 95% confidence intervals were estimated as 41.0% (30.2-51.9) at the weir-I, 10.2% (-1.32-21.5) at the weir-II, and 47.0% (30.5-63.5) for a sum of loss at both weirs.

キーワード: 迷入, 農業用取水口, サクラマス幼魚, 降河回遊, 標識放流実験, 個体群動態モデル

我が国には発電, 灌漑, あるいは砂防目的で数多くの河川横断工作物が設置されている。これらは通し回遊魚^{1,2)}の回遊経路を分断するため, その生活史と資源に対する影響が懸念されている。この影響を軽減する目的で, 多くの河川横断工作物に, 古くから魚道が設置されている。近年の設計理論^{3,4)}の発展により, 適切な設計, 施工が行われれば, 河川を下流から上流へ移動する魚類は, ほぼ問題なく魚道を使って遡上することが可能と言われている。一方, 上流から下流へ降河する場合には, 河川横断工作物に併設された取水施設の取水口のサイズや取水量が, 魚道のそれらをはるかに上回るため, 降河魚の“迷入”が生じる可能性が高い。ここで“迷入”とは, 河川魚類が取水口や放水口など本来の生息域でない場所に入り込むことである。^{4,5)} これらの施設に魚類が迷

入した場合, その後再び本来の回遊経路に戻ることは困難で, 結果的に生活史を全うすることが不可能となり, 資源の減耗につながる。

降河魚の迷入対策³⁻⁶⁾としては, フィルタースクリーン, ルーバースクリーン, 気泡列, 電気スクリーンなど様々な方法が考案されている。しかし, 我が国の迷入対策は単に魚を取水口より追い払うことによって, 進入を抑止または妨害する構造に留まるものが多い。こうした施設の場合, 降河回遊中の魚は一旦は追い払われても, 降河行動を繰り返すうちにやがて疲労し, 結果的には取水口に迷入してしまう可能性が高い。取水口とは別に安全な回遊経路(バイパス)を確保し, そこへ誘導する対策が有効と考えられるが, こうした施設は我が国にはほとんどなく, 降河魚の迷入対策は十分に確立されている

*1 本研究の一部はサクラマス資源増殖振興事業と放流稚魚等迷入防止対策委託事業の一環として実施された。

*2 新潟県内水面水産試験場 (Niigata Prefectural Inland Water Fisheries Experiment Station, Oogawara, Nagaoka, Niigata 940-1137, Japan).

*3 東京大学海洋研究所 (Ocean Research Institute, University of Tokyo, Minamidai, Nakano, Tokyo 164-8639, Japan).

*4 東京水産大学 (Tokyo University of Fisheries, Konan, Minato, Tokyo 108-8477, Japan).

とは言い難い。⁵⁻⁷⁾

迷入による河川魚類の減耗が重大であることは以前より経験的に指摘されてきたが、日本での調査研究例⁸⁻¹⁶⁾は少なく、まして迷入量について定量的な解析は皆無である。これは、(1)施設管理者から取水施設の調査許可を得ることが難しいこと、また(2)用水路の規模、流量が大きいことから迷入量の直接的な定量的調査が難しいことに起因する。迷入問題解決の第一歩として、まず迷入の実態を明らかにすることが肝要である。

そこで、本論文では、新潟県加治川に設置された2つの農業用取水堰を対象とし、降河サクラマス幼魚の迷入率の推定を試みることを目的とした。

材料および方法

調査河川 調査河川である加治川は、新潟県北部を東から西に流れ日本海に注ぐ流程約 65 km の 2 級河川である (Fig. 1)。河口から 20.5 km と 9.5 km 上流の地点には、それぞれ第一および第二頭首工と呼ばれる農業用取水堰が設けられている (Fig. 1)。これら 2 つの堰の高さはそれぞれ 2 m と 4.7 m で、ともに魚道が設置されている。また、河口から 29 km の地点には落差 6.2 m の発電用取水堰があるが、この発電用取水堰には魚道が設置されておらず、これより上流へ魚の遡上は不可能である (Fig. 1)。

第一および第二頭首工の取水は主に水田の灌漑を目的としている。取水盛期は 4 月下旬から 8 月上旬の期間

であり、それ以外の期間にも防火用水等を目的として通年取水が行われている。取水された用水は最終的に日本海に注ぐが、水田や水田排水路の揚水機場あるいは市街地を経由するため、これらの水域は迷入したサクラマス幼魚の生息には不適と考えられる。

材料 供試魚は、信濃川水系魚野川で採集したサクラマス成魚を初代の親魚とし、新潟県内水面水産試験場小出支場で継代飼育して得た 3 代目の親魚から、1993 年 11 月 23 日に採卵・受精によって得られた個体で、1994 年 10 月の放流まで新潟県内水面水産試験場小出支場で飼育した。この 11 月 23 日の採卵群を無作為に分けて 3 つの放流群を得た (Table 1)。放流魚と同一系群のスマルト化率を調査した結果では、¹⁷⁾ 約 8 割がスマルトまたはスマルト変態途中であったことから、当供試魚においても降河率は高いと考えられた。

放流魚には、鰭切除の外部標識とアリザリンコンプレクソン (以下 ALC という) による耳石標識¹⁸⁻²⁰⁾を施し、両者の組み合わせにより各放流群を識別した。耳石標識処理は、発眼卵を 200 mg/l の ALC 水溶液に 24 時間浸漬する方法をとった。一重標識は発眼直後に 1 回のみ、二重標識は発眼直後とふ化直前に計 2 回処理した。鰭切除標識は、1994 年 10 月 6 日~17 日の期間に、麻酔下 (オイゲノール使用) で右胸鰭切除又は右胸鰭と脂鰭の複合切除の 2 種類のうち、いずれか 1 つを施した (Table 1)。

放流と再捕 標識魚は、放流日に飼育池より取り上

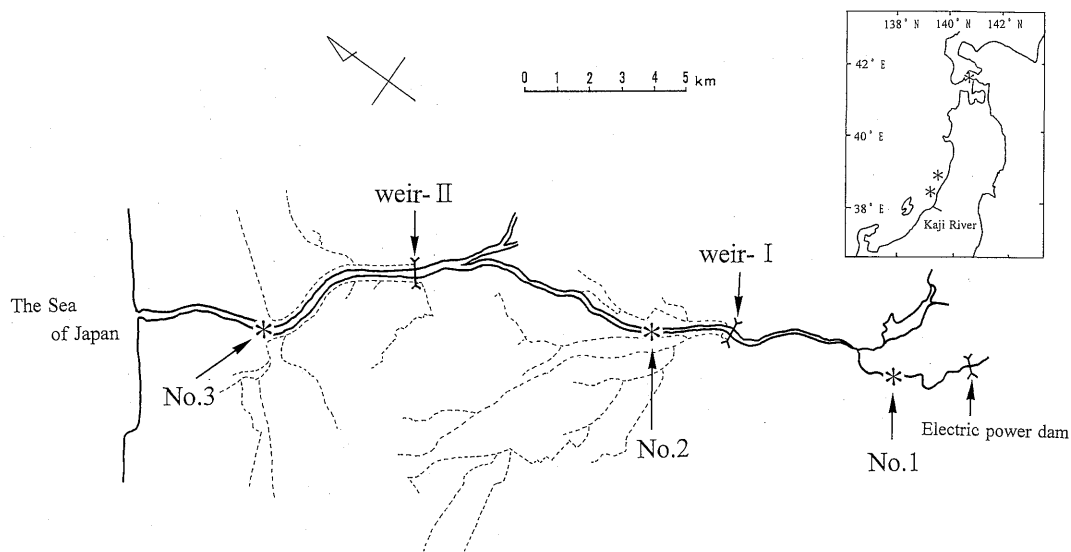


Fig. 1. Study area in the Kaji River, Niigata Prefecture, Japan.

The asterisks from No. 1 to No. 3 show the points of release of juvenile masu salmon. Broken lines show the diversions for agricultural irrigation from weir-I and weir-II. The asterisks in a small square in the right upper side of the figure show the sampling sites of released masu salmon in the sea during April-June 1995.

Table 1. Masu salmon released in the Kaji River in 1994

Point of release	Marking*		Date of release	No. fish released	Fork length (cm)	Body weight (g)
	Fin	Otolith				
Upstream	RP+AD	ES	Oct. 13, 14	21,834	11.4±1.12	19.2±6.10
Middle	RP	ES	Oct. 14, 18	20,598	11.3±1.06	19.3±5.83
Downstream	RP+AD	ES+EL	Oct. 18, 20	27,773	11.6±1.02	20.3±5.35

Marking, date of release, number of fish released and body size are for each three fish group. Fifty fish randomly sampled from each group were used for the measurement of body size.

* RP: Right pectoral fin clipping, AD: Adipose fin clipping, ES: Otolith marking with Alizarine complexone after eye pigmentation, EL: Otolith marking with Alizarin complexone just before hatching.

げ, 約2時間かけて加治川までトラックで輸送し, 1994年10月13日~20日に第一頭首工上流(以下流域という)と, 第二頭首工下流(同下流域)および両頭首工の中間(同中流域)の計3カ所に, それぞれ21,834尾, 27,773尾, 20,598尾を放流した(Table 1, Fig. 1)。以下では, 各放流群をそれぞれ, 上流放流群, 下流放流群, 中流放流群とよぶ。放流時の平均尾叉長, 平均体重は各放流群間で大差なく, それぞれ11.3~11.6 cmと19.2~20.3 gであった。

再捕魚は, 1995年4月から6月にかけて, 降河後の北上回遊経路上に当たる日本海沿岸および北海道津軽海峡沿岸に設置された定置網によって漁獲されるものの中から採集した。本実験の放流魚は全て右胸鰭切除の外部標識が施してあるので, これを目安に新潟県村上市沿岸で58尾, 山形県沿岸で23尾, 北海道上磯町沿岸で4尾

の右胸鰭欠損魚を採集した。

再捕魚から耳石を取り出した後, 蛍光顕微鏡により標識の有無を確認し, 耳石標識があるものについては一重標識か二重標識かを判別した。この耳石標識と外部標識から放流群を特定し, 海域再捕魚の放流群別の再捕率を算出した。

迷入モデル 以下のように記号を定め, 降河サクラマス幼魚の第一および第二頭首工での迷入モデルを作成した(Fig. 2)。ここで*i*および*j*は河川の流域区分を表し, 上流(*i, j=1*), 中流(*i, j=2*), 下流(*i, j=3*)を表す。

N_i : *i*域における放流尾数

S_i : *i*域放流群の降河率

ϕ_i : *i*域での単位時間当たりの河川内生残率

t_{ij} : *i*域放流群の降河群が*j*域に滞留する時間

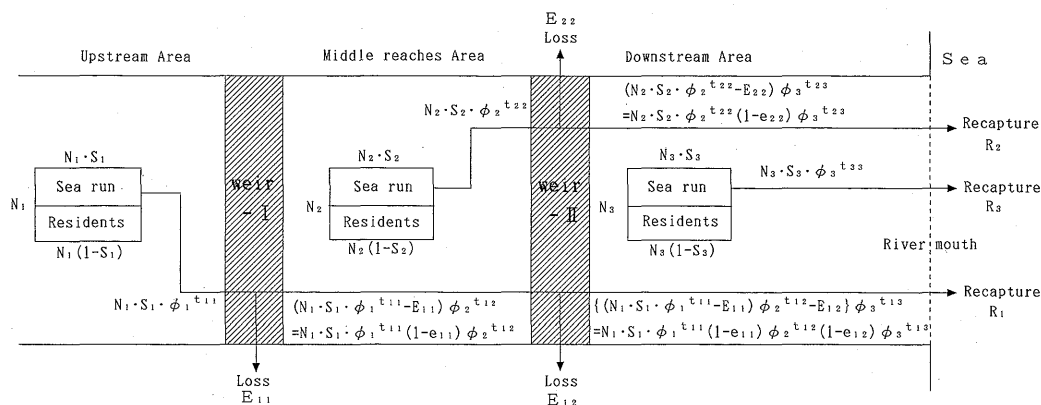


Fig. 2. An entrainment model for the loss of juvenile masu salmon at the water intake of diversion weirs during their downstream migration in the Kaji River, Niigata Prefecture, Japan.

Notations in the model are as follows: N_i , Number of fish released in the *i*th area; S_i , Rate of smolts which start downstream migration in the fish group released in the *i*th area; ϕ_i , Daily survival rate of fish in the *i*th area; t_{ij} , Time for which fish group released in the *i*th area stay in the *j*th area; r_i , Recapture rate of the fish group released in the *i*th area; R_i , Number of fish recaptured from the fish group released in the *i*th area; E_{ij} , Number of fish entrained at the *j*th weir from the fish group released in the *i*th area; e_{ij} , Rate of entrainment at the *j*th weir from the fish group released in the *i*th area.

r_i : i 域放流群の再捕率

R_i : i 域放流群の再捕尾数

上流放流群の動態は次のようになる。放流尾数 N_1 のうち $N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}}$ 尾が翌年春に第一頭首工を降下し、そこで最初の迷入が起きる。そこでの迷入する尾数を E_{11} とすると、迷入率 e_{11} は

$$e_{11} = \frac{E_{11}}{N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}}} \quad (1)$$

で定義される。第一頭首工で迷入せずに降河する上流放流群は $N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}} - E_{11}$ であり、うち $(N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}} - E_{11}) \phi_2^{t_{12}}$ が第二頭首工を降下する。そこでの迷入尾数を E_{12} とすると、迷入率 e_{12} は

$$e_{12} = \frac{E_{12}}{(N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}} - E_{11}) \phi_2^{t_{12}}} \quad (2)$$

で定義される。第二頭首工で迷入せずに降河する上流放流群は $(N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}} - E_{11}) \phi_2^{t_{12}} - E_{12} = N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}} (1 - e_{11}) \phi_2^{t_{12}} (1 - e_{12})$ で表され、海域に到達する群は $\{(N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}} - E_{11}) \phi_2^{t_{12}} - E_{12}\} \phi_3^{t_{13}} = N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}} (1 - e_{11}) \phi_2^{t_{12}} (1 - e_{12}) \phi_3^{t_{13}}$ となる。

上流放流群の降河群が第一および第二頭首工で迷入により減耗する尾数は以下のように算定される。いずれの頭首工でも迷入減耗がなかったと仮定すると、 $N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}} \cdot \phi_2^{t_{12}} \cdot \phi_3^{t_{13}}$ が海域に到達することとなる。これにより、第一および第二頭首工で迷入により減耗する尾数を E_{13} とすると

$$E_{13} = N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}} \cdot \phi_2^{t_{12}} \cdot \phi_3^{t_{13}} - N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}} (1 - e_{11}) \phi_2^{t_{12}} (1 - e_{12}) \phi_3^{t_{13}}$$

と計算され、合計の迷入率 e_{13} は

$$e_{13} = \frac{E_{13}}{N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}} \cdot \phi_2^{t_{12}} \cdot \phi_3^{t_{13}}} = \frac{N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}} \cdot \phi_2^{t_{12}} \cdot \phi_3^{t_{13}} - N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}} (1 - e_{11}) \phi_2^{t_{12}} (1 - e_{12}) \phi_3^{t_{13}}}{N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}} \cdot \phi_2^{t_{12}} \cdot \phi_3^{t_{13}}} = 1 - (1 - e_{11})(1 - e_{12}) \quad (3)$$

で算定される。

同様に、中流放流群の動態は次のようになる。 $N_2 \cdot S_2 \cdot \phi_2^{t_{22}}$ 尾が翌年春に第二頭首工を降下し、そこで迷入する尾数を E_{22} とすると、迷入率 e_{22} は

$$e_{22} = \frac{E_{22}}{N_2 \cdot S_2 \cdot \phi_2^{t_{22}}} \quad (4)$$

となる。第二頭首工で迷入せずに降河する中流放流群は $(N_2 \cdot S_2 \cdot \phi_2^{t_{22}}) - E_{22} = N_2 \cdot S_2 \cdot \phi_2^{t_{22}} (1 - e_{22})$ で表され、海域に到達する群は $\{(N_2 \cdot S_2 \cdot \phi_2^{t_{22}}) - E_{22}\} \phi_3^{t_{23}} = \{N_2 \cdot S_2 \cdot \phi_2^{t_{22}} (1 - e_{22})\} \phi_3^{t_{23}}$ で表される。

下流放流群はいずれの頭首工でも迷入減耗はなく、翌年春に $N_3 \cdot S_3 \cdot \phi_3^{t_{33}}$ が海域に到達する。

迷入率の推定 迷入率の推定に必要な実際の迷入尾数 $E_{11}, E_{12}, E_{13}, E_{22}$ の調査は困難であるため、次の仮定を置いて迷入率を推定した。

- 1) 各放流群の降河率 S_1, S_2, S_3 は等しい
- 2) 上流, 中流, 下流の各放流群は, 1995 年春期, ほぼ一斉に降河し同時期に海へ入る。よって各放流群の河川内滞留時間は等しく $t_{11} + t_{12} + t_{13} = t_{22} + t_{23} = t_{33}$ が成り立つ。なお, t_{12}, t_{13}, t_{23} は降河回遊時の各流域の通過時間なので, 越冬期の t_{11}, t_{22}, t_{33} に比べ比較的短い
- 3) 第一および第二頭首工を隔てた上流, 中流, 下流域の河川環境に大きな差はなく, 単位時間当たりの生残率 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 は等しい
- 4) 放流群間の再捕率の差は, 放流地点より下流の堰における迷入によってのみ生じ, 上流放流群と中流放流群の降河群の第二頭首工での迷入率 e_{12}, e_{22} は等しい
- 5) 海域における各放流群の回遊経路, 再捕までの経過時間, 生残率および漁獲率は各放流群間で差がない

仮定 2), 3), 4), 5) より, 第二頭首工を降下し海域に到達する上流放流群と中流放流群, 並びに下流放流群の再捕率は等しくなるはずであり, 次の 2 つの式が成り立つことが期待される。

$$\frac{R_1}{(N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}} - E_{11}) \phi_2^{t_{12}} (1 - e_{12}) \phi_3^{t_{13}}} = \frac{R_2}{N_2 \cdot S_2 \cdot \phi_2^{t_{22}} (1 - e_{22}) \phi_3^{t_{23}}} \quad (5)$$

$$\frac{R_1}{\{(N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}} - E_{11}) \phi_2^{t_{12}} - E_{12}\} \phi_3^{t_{13}}} = \frac{R_3}{N_3 \cdot S_3 \cdot \phi_3^{t_{33}}} \quad (6)$$

(5) 式並びに (6) 式をそれぞれ変形すると, 上流放流群の降河群の第一頭首工並びに第二頭首工での迷入尾数が

$$\hat{E}_{11} = \frac{R_2 \cdot N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}} \cdot \phi_2^{t_{12}} \cdot \phi_3^{t_{13}} - R_1 \cdot N_2 \cdot S_2 \cdot \phi_2^{t_{22}} \cdot \phi_3^{t_{23}}}{R_2 \cdot \phi_2^{t_{12}} \cdot \phi_3^{t_{13}}} \quad (7)$$

$$\hat{E}_{12} = \frac{R_3 \cdot \phi_2^{t_{12}} \cdot \phi_3^{t_{13}} (N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}} - E_{11}) - R_1 \cdot N_3 \cdot S_3 \cdot \phi_3^{t_{33}}}{R_3 \cdot \phi_3^{t_{13}}} \quad (8)$$

で推定できる。(7) 式を (1) 式に, (8), (7) 式を (2) 式に代入して, 迷入率

$$\hat{e}_{11} = \frac{N_1 \cdot S_1 \cdot R_2 \cdot \phi_1^{t_{11}} \cdot \phi_2^{t_{12}} \cdot \phi_3^{t_{13}} - N_2 \cdot S_2 \cdot R_1 \cdot \phi_2^{t_{22}} \cdot \phi_3^{t_{23}}}{N_1 \cdot S_1 \cdot R_2 \cdot \phi_1^{t_{11}} \cdot \phi_2^{t_{12}} \cdot \phi_3^{t_{13}}}$$

$$\hat{e}_{12} = \frac{R_3 (N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}} - E_{11}) \phi_2^{t_{12}} \cdot \phi_3^{t_{13}} - R_1 \cdot N_3 \cdot S_3 \cdot \phi_3^{t_{33}}}{(N_1 \cdot S_1 \cdot \phi_1^{t_{11}} - E_{11}) \phi_2^{t_{12}} \cdot R_3 \cdot \phi_3^{t_{13}}}$$

$$= \frac{R_3 \cdot S_2 \cdot N_2 \cdot \phi_2^{t_{22}} \cdot \phi_3^{t_{23}} - R_2 \cdot S_3 \cdot N_3 \cdot \phi_3^{t_{33}}}{R_3 \cdot S_2 \cdot N_2 \cdot \phi_2^{t_{22}} \cdot \phi_3^{t_{23}}}$$

を得る。仮定 1), 2), 3) を使うことにより, 第一頭首工

並びに第二頭首工の迷入率は

$$\hat{e}_{11} = \frac{N_1 \cdot R_2 - N_2 \cdot R_1}{N_1 \cdot R_2} = 1 - \frac{N_2 \cdot R_1}{N_1 \cdot R_2} = 1 - \frac{r_1}{r_2} \quad (9)$$

$$\hat{e}_{12} = \frac{N_2 \cdot R_3 - N_3 \cdot R_2}{N_2 \cdot R_3} = 1 - \frac{N_3 \cdot R_2}{N_2 \cdot R_3} = 1 - \frac{r_2}{r_3} \quad (10)$$

となって実際に推定可能となる。ここで $r_1 = R_1/N_1$, $r_2 = R_2/N_2$, $r_3 = R_3/N_3$ で, 上流, 中流, 下流放流群の再捕率である。

また, 上流放流群の降河群が第一および第二頭首工の両方で受ける合計迷入率は, (3)式に(9)(10)式を代入して

$$\begin{aligned} \hat{e}_{13} &= 1 - \frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{r_2}{r_3} = 1 - \frac{r_1}{r_3} = 1 - \frac{N_3 \cdot R_1}{N_1 \cdot R_3} \\ &= \frac{N_1 \cdot R_3 - N_3 \cdot R_1}{N_1 \cdot R_3} \end{aligned} \quad (11)$$

で推定できる。

同様に仮定2), 3), 5)より第二頭首工を降下し海域に到達する中流放流群と下流放流群の再捕率は等しくなるはずであり, 次式が成り立つことが期待される。

$$\frac{R_2}{(N_2 \cdot S_2 \cdot \phi_2^{t22} - E_{22}) \phi_3^{t23}} = \frac{R_3}{N_3 \cdot S_3 \cdot \phi_3^{t33}}$$

これを变形すると, 中流放流群の降河群の第二頭首工での迷入尾数

$$\hat{E}_{22} = \frac{R_3 \cdot N_2 \cdot S_2 \cdot \phi_2^{t22} \cdot \phi_3^{t23} - R_2 \cdot N_3 \cdot S_3 \cdot \phi_3^{t33}}{R_3 \cdot \phi_3^{t23}}$$

が推定できる。これを(4)式に代入して, 第二頭首工の迷入率は

$$\hat{e}_{22} = \frac{N_2 \cdot S_2 \cdot R_3 \cdot \phi_2^{t22} \cdot \phi_3^{t23} - N_3 \cdot S_3 \cdot R_2 \cdot \phi_3^{t33}}{N_2 \cdot S_2 \cdot \phi_2^{t22} \cdot \phi_3^{t23} \cdot R_3}$$

となる。仮定1), 2), 3)より, 第二頭首工の迷入率は

$$\hat{e}_{22} = \frac{N_2 \cdot R_3 - N_3 \cdot R_2}{N_2 \cdot R_3} = 1 - \frac{N_3 \cdot R_2}{N_2 \cdot R_3} = 1 - \frac{r_2}{r_3}$$

により推定可能となる。これは(10)式と同じであり, 仮定4)が確認される。

\hat{e}_{11} , \hat{e}_{12} , \hat{e}_{13} の近似的な分散は, R_1 , R_2 , R_3 を確率変数とみてデルタ法により

$$\hat{V}(\hat{e}_{11}) = \frac{N_2^2 \cdot R_1^2}{N_1^2 \cdot R_2^4} \hat{V}(R_2) + \frac{N_2^2}{N_1^2 \cdot R_2^2} \hat{V}(R_1)$$

$$- 2 \frac{N_2^2 \cdot R_1}{N_1^2 \cdot R_2^3} \widehat{COV}(R_1, R_2)$$

$$\hat{V}(\hat{e}_{12}) = \frac{N_3^2 \cdot R_2^2}{N_2^2 \cdot R_3^4} \hat{V}(R_3) + \frac{N_3^2}{N_2^2 \cdot R_3^2} \hat{V}(R_2)$$

$$- 2 \frac{N_3^2 \cdot R_2}{N_2^2 \cdot R_3^3} \widehat{COV}(R_2, R_3)$$

$$\hat{V}(\hat{e}_{13}) = \frac{N_3^2 \cdot R_1^2}{N_1^2 \cdot R_3^4} \hat{V}(R_3) + \frac{N_3^2}{N_1^2 \cdot R_3^2} \hat{V}(R_1)$$

$$- 2 \frac{N_3^2 \cdot R_1}{N_1^2 \cdot R_3^3} \widehat{COV}(R_1, R_3)$$

で推定される。ここで, $\hat{V}(R_1) = N_1 \cdot \hat{P}_1(1 - \hat{P}_1)$, $\hat{V}(R_2) = N_2 \cdot \hat{P}_2(1 - \hat{P}_2)$, $\hat{V}(R_3) = N_3 \cdot \hat{P}_3(1 - \hat{P}_3)$ である。 P_1, P_2, P_3 は海域での再捕率で, $\hat{P}_1 = R_1/N_1$, $\hat{P}_2 = R_2/N_2$, $\hat{P}_3 = R_3/N_3$ で推定する。 $COV(R_1, R_2)$, $COV(R_2, R_3)$, $COV(R_1, R_3)$ については推定が困難であるが, 仮定5)より, とりあえずここでは R_1, R_2, R_3 の相関係数を1と仮定して

$$\widehat{COV}(R_1, R_2) = \sqrt{N_1 \cdot N_2 \cdot \hat{P}_1 \cdot \hat{P}_2 \cdot (1 - \hat{P}_1)(1 - \hat{P}_2)}$$

$$\widehat{COV}(R_2, R_3) = \sqrt{N_2 \cdot N_3 \cdot \hat{P}_2 \cdot \hat{P}_3 \cdot (1 - \hat{P}_2)(1 - \hat{P}_3)}$$

$\widehat{COV}(R_1, R_3) = \sqrt{N_1 \cdot N_3 \cdot \hat{P}_1 \cdot \hat{P}_3 \cdot (1 - \hat{P}_1)(1 - \hat{P}_3)}$ により推定する。

結 果

放流群別の再捕尾数および再捕率は, それぞれ上流再捕群が5尾で0.0229%, 中間放流群が8尾で0.0388%, 下流放流群が12尾で0.0432%であった(Table 2)。これらの値を用いて(9)(10)(11)式によって, 各頭首工の迷入率を推定すると, サクラマス降河幼魚の第一頭首工の迷入率は41.0%, 第二頭首工の迷入率は10.2%, 第一および第二頭首工の両方を降下する場合の合計迷入率は47.0%となった。また, 迷入率の95%信頼区間は, 第一頭首工が30.2%~51.9%, 第二頭首工が-1.3%~21.5%, 第一および第二頭首工の両方を降下する場合の合計迷入率では30.5%~63.5%と推定された。

考 察

本論文では河川取水口における降河魚の迷入モデルを提示し, 迷入率を推定する方法を提案した。これにより, 今までほとんど定量的な扱いがなされていなかった迷入率の推定が可能となり, 河川構造物の取水口における, 魚類の迷入実態の一端を明らかにすることができた。しかし, 今回の標識放流実験結果では, 海域での標識幼魚の再捕尾数は合計25尾と少なく, 各放流群の再捕率に有意差が認められないため (χ^2 値=1.501, $p=0.48$), 推定した迷入率の信頼度には問題がある。モデルから信頼度の高い迷入率を推定するためには, 各放流群の再捕率に差が認められ, 下流放流群, 中流放流群, 上流放流群の順に有意に高くなる必要がある。そのためには, 標識放流魚の再捕尾数を増大させることが肝要である。降河行動を開始する直前に標識放流を行い, 河口域での再捕および海域での組織的調査体制を整えること等により, 再捕尾数を増やすことは可能であろう。

Table 2. Number of masu salmon recaptured in different sea areas, Niigata, Yamagata and Hokkaido (see Fig. 1)

Fish group	Number of fish recaptured				Recapture rate %
	NIIGATA	YAMAGATA	HOKKAIDO	Total	
Upstream	4	1	0	5	0.0229
Middle	7	1	0	8	0.0388
Downstream	8	2	2	12	0.0432
Total	19	4	2	25	0.0356

これまで、加治川ではサクラマス幼稚魚の迷入実態の把握を目的とし、第一頭首工より取水している用水路内において採捕調査を行ってきた。しかし、用水路は多数に枝分かれするうえに、その規模、取水流量が大きく、さらには施設管理者側の調査に対する理解を得づらいことなどの理由から、迷入量を正確に把握することは困難であった。しかし、少なくともある時点における断片的な採捕調査事例¹¹⁻¹⁴⁾によると、用水路の中にはサクラマス幼稚魚の生息密度が著しく高いことが示されており、これらの知見はモデルで推定された高い迷入率を支持している。本論文の迷入モデルでは5つの仮定を設けたが、以下でこれらの仮定を吟味する。

仮定1) 標識放流魚は同一系群であり、これを無作為に3群に分けたことから、それぞれのスモルト化率並びに降河率は等しいと考えられる。

仮定2) 上述のように各放流群は同一採卵日の同一系群であり、外界の刺激に対して同様に反応すると考えられる。したがって、スモルト化の時期、降河回遊のための、外界からの“引き金”に対する反応に差はないと考えて良い。また、本実験の試験区間の流れはわずか29 kmと短く、もしサクラマス幼魚が河川水と一緒に全く受動的に降河するとしたら、ほぼ一日間程度で河口に到達してしまう。すなわち、10月中旬の放流からその後の約6ヶ月間の越冬期間に比べ、春の雪解け増水期の降河回遊の所要時間は短く無視できる。²¹⁻²⁵⁾したがって、各放流群の放流場所の違いによる河川滞留時間に、ほとんど差はないと考えて良い。

仮定3) 加治川の河川環境は、実際には頭首工を隔てて上流、中流、下流域で異なる。過去の加治川における一連の放流実験によれば、^{11,20,26-30)} サクラマス幼稚魚にとっての餌料条件や越冬場所としての生息環境は、上流域が最も良く、次いで中流域、下流域の順となっている。もしこれがサクラマス幼魚の生残率に影響するとしたら、下流域ほど生残率が低くなり、今回得られた各取水口の迷入率を少なく見積もった可能性がある。しかし、加治川は歴史的にみてもサクラマス資源の豊かな河川として有名であり、サクラマスにとっては全流域にわたって、概ね良好な河川環境を有していると言えよう。

また、今回の放流魚の尾叉長が約11 cmとかなり大型であったことを考えると、上流、中流、下流域の場所の違いによって、迷入や遊漁による漁獲死亡を除く自然死亡に大きな差は生じないものと考えられる。さらに、本実験は夏の遊漁期を避け、10月中旬に放流し実験を開始したことから、遊漁による漁獲死亡もほとんど考慮しなくてよい。したがって、各放流群の生残率が等しいとする仮定は妥当なものと考えられる。

仮定4) 放流実験を、サクラマス幼魚の活発な河川内移動のない越冬期と、これに続く降河期に行ったこと、放流地点が上流の堰の直下でないことを考えると、堰の魚道を遡上して上流の実験区に入る個体もわずかながら存在するが、²⁹⁾ 十分無視できる量である。各放流群の河川内滞留時間が等しいとした仮定2)および各流域の単位時間当たりの生残率が等しいとした仮定3)を勘案すると、仮定4)は妥当な仮定である。にもかかわらず、各放流群の再捕率には有意差は認められなかった。しかし、再捕率は下流放流群、中流放流群、上流放流群の順に大きく、迷入モデルの構造を支持している。標識放流実験で、各放流群の再捕率の差が統計的に有意とならなかったために迷入が起こっていないわけではない。再捕率の差が統計的に有意とならなかったのは、標本数が少ないことに起因すると考えられた。

仮定5) 一斉に降河したサクラマス幼魚の降海後の回遊経路は、各放流群で違いがなく、定置網へ入る可能性も等しいと考えられるので、海域における生残率、漁獲率を等しいとおいた仮定5)も概ね妥当と考えられる。この仮定から、迷入率の分散の推定では、各放流群の海域での再捕尾数 R_1, R_2, R_3 の間の相関係数を1とした。この相関を推定するためには調査を繰り返す必要があるが、現実的には困難である。相関係数は普通1より小さく、相関係数が1の時に迷入率の分散は最小となるので、ここで推定した信頼区間は過小評価になっている。それでもなお、結果においてその範囲が広がったことは、これも標本数が小さいことに起因し、標本数を大きくすることにより信頼区間の範囲は狭くなり、精度の高い迷入率を推定することが可能と考えられる。推定した迷入率の精度は低い、これを改善するためには、

迷入尾数の直接調査が必要となろう。

本モデルは放流から6ヶ月後の降河回遊時の移動に注目して構築した。しかし、実際には放流直後の降河行動により、頭首工を降下する可能性も考えられる。この場合、取水口への迷入は降河回遊時と同率で生じるものと考えてよい。また、一旦放流直後に降河したとしても、これらの降河群はただちに海に入るのではなく、放流地点にそのまま留まった個体群と同様に、春の融雪増水期に一斉に海に降りると考えられる。したがって、本モデルは、降河がいずれの時期に起こったとしても、第一頭首工、第二頭首工を通過する全てのサクラマス幼魚に適用できる。

今回の実験は約半年間の実験期間をとっており、またモデルは降河魚の迷入のみ扱った。しかし、実際にはサクラマス稚魚の河川滞留期間は1年半であり、この間、卵期を除けば約1年半にわたって迷入の可能性にさらされる。さらに、1年半後に降河しない河川残留魚については、より長い期間河川内移動に伴う迷入が予想される。したがって、サクラマス稚魚の実際の迷入率は、今回見積もった値よりさらに大きくなると予測される。

サクラマスはサケ属魚類の中でも河川依存性が強く、河川集団間の遺伝的独立性も強い。³¹⁻³³⁾ Tsukamoto²⁰⁾は、同じ加治川で行った放流実験の結果から、春期に稚魚の段階で放流することが、他の秋期の放流、受精後1年半後の春期のスマルト放流等と比べ、生物学的、経済的に最も効率が良くしている。さらに、加治川においては天然親魚の保護、産卵環境の整備を行うことがサクラマス資源増大に最も有効であると提言している。²⁰⁾以上のことから、サクラマス資源を増殖していくためには、産卵場や越冬場所などサクラマスの生息環境を整備して、各河川毎に在来の系統の天然再生産力を最大限に引き出す努力をすることが肝要である。また、禁漁期の設定、漁獲尾数の制限など適切な漁業管理も積極的に見直さなければならない。さらに、サクラマスなどの通し回遊魚^{1,2)}の資源を健全に維持するためには、河口から上流まで、河川の全域を自由に往来できる路を確保することが不可欠である。そのためには、河川の維持流量の確保や魚道整備を図るとともに、ダム等の取水口への迷入を極力防止することが望まれる。本研究により試算された迷入率は、過小評価であっても過大な値ではないと考えられる。バイパスの設置等効果的な迷入防止対策を講じることにより、資源に重大な影響を及ぼす迷入を大幅に軽減することができ、大きな増殖効果を期待できるものとする。

謝 辞

本研究に用いた種苗の飼育、標識処理及び放流作業は、新潟県内水面水産試験場小出支場の小池利通氏が担当した。また、新潟県栽培漁業センター村上支場の藤田利明氏、山形県水産試験場の阿部幸氏、水産庁さけますふ化場の真山紘博士には、海域で採捕されたサクラマス幼魚を提供して頂いた。さらに、加治川漁業協同組合の島津正英氏には、本実験を通じ終始ご協力と暖かい励ましを頂いた。これらの方々へ厚くお礼申し上げる。

文 献

- 1) 後藤 晃, 塚本勝巳, 前川光司編: 川と海を回遊する淡水魚, 第1版, 東海大学出版会, 東京, 1996, pp. 1-274.
- 2) 塚本勝巳: 回遊魚の生態, 「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, pp. 95-111.
- 3) 廣瀬利雄, 中村中六編著: 魚道の設計, 第1版, 山海堂, 東京, 1993, pp. 1-376.
- 4) 中村俊六: 魚道のはなし, 第1版, 山海堂, 東京, 1995, pp. 1-225.
- 5) 中村俊六: 迷入防止技術の現状と課題, 「魚の迷入の実態とその対策へのアプローチ」, 全国内水面漁業協同組合連合会, 東京, 1996, pp. 159-185.
- 6) 中村俊六: 回遊路の確保, 「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, pp. 186-198.
- 7) 真山 紘: サケ・マスの生態特性と河川, 「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, pp. 111-121.
- 8) 小林哲夫, 尾崎志志, 伊藤嘉義郎: さけ稚魚の生態調(4) 灌漑溝に流入するさけ稚魚について. 孵化場試験報告, 11, 1-5 (1956).
- 9) 北見支場事業係: 常呂川における稚魚の降下と迷入について, 魚と卵, 149号, 北海道さけ・ますふ化場, 1980, pp. 1-6.
- 10) 田子泰彦: 発電用水路に迷入した魚類. 富山水試研報, 6, 25-35 (1995).
- 11) 関 泰夫, 小池利通, 塚本勝巳, 大矢真知子, 星野正邦: 加治川へ耳石標識をして放流したサクラマス幼魚の分布, 生長及び食性について. 新潟内水試研報, 16, 19-44 (1990).
- 12) 兵藤則行, 関 泰夫, 塚本勝巳, 大矢真知子, 大久保久直: 加治川におけるサクラマス稚魚の農業用水への迷入. 新潟内水試研報, 18, 21-30 (1992).
- 13) 兵藤則行, 小池利通, 大矢真知子, 塚本勝巳: 農業用水取水堰堤がサクラマス稚魚の移動分散・生残に及ぼす影響. 新潟内水試研報, 20, 23-28 (1994).
- 14) 米山洋一, 大久保久直: 調査事例新潟県, 「魚の迷入の実態とその対策へのアプローチ」, 全国内水面漁業協同組合連合会, 東京, 1996, pp. 9-50.
- 15) 森山貴光, 小松章博, 佐伯 昭: 調査事例高知県, 「魚の迷入の実態とその対策へのアプローチ」, 全国内水面漁業協同組合連合会, 東京, 1996, pp. 51-94.
- 16) 堀田英一: 調査事例熊本県, 「魚の迷入の実態とその対策へのアプローチ」, 全国内水面漁業協同組合連合会, 東京, 1996, pp. 95-115.
- 17) 新潟県: 稚魚の育成と標識放流. 平成6年度サクラマス資源増殖振興事業調査報告書, 1-39 (1995).
- 18) K. Tsukamoto: Mass-marking of ayu eggs and larvae by

- tetracyclin-tagging of otoliths. *Nippon Suisan Gakkaishi.*, **51**, 903-911 (1985).
- 19) 関 泰夫, 塚本勝巳, 岩橋正雄: サケ・マスの発眼卵・仔魚の耳石標識. 新潟内水試研報, **14**, 13-19 (1988).
- 20) K. Tsukamoto: Use of otolith-tagging in a stock enhancement program for masu salmon (*Oncorhynchus masou*) in the Kaji River, Japan, in "Recent Developments in Fish Otolith Research" (ed. by D. H. Secor, J. M. Dean and S. E. Campana), The Belle W. Baruch Library in Marine Science Number 19, University of South Carolina Press, South Carolina, 1995, pp. 403-422.
- 21) 関 泰夫, 金子文与: サクラマスの増殖に関する研究-I 魚野川を流下する銀毛化幼魚について. 新潟内水試研報, **7**, 17-25 (1979).
- 22) 関 泰夫, 金子文与, 富永祐次: サクラマスの増殖に関する研究-III 池産銀毛ヤマメの魚野川における降下について. 新潟内水試研報, **9**, 10-15 (1981).
- 23) 真山 紘: サクラマス *Oncorhynchus masou* (Brevoort) の淡水域の生活および資源培養に関する研究. 北海道さけ・ますふ化場研報, **46**, 1-156 (1992).
- 24) 木曾克裕: 本州北部太平洋岸の河川を母川とするサクラマスの生活史の研究. 中央水研研報, **7**, 1-188 (1995).
- 25) 久保達夫: 北海道のサクラマスの生活史に関する研究. 北海道さけ・ますふ化場研報, **34**, 1-95 (1980).
- 26) 関 泰夫, 小池利通, 塚本勝巳, 大矢真知子, 星野正邦: 新潟県加治川におけるサクラマス稚魚の生息尾数の推定. 新潟内水試研報, **17**, 7-10 (1991).
- 27) 兵藤則行, 関 泰夫, 塚本勝巳, 大矢真知子, 大久保久直: 加治川における抽水植物群落の生態的評価. 新潟内水試研報, **18**, 1-20 (1992).
- 28) 小池利通, 塚本勝巳, 関 泰夫, 大矢真知子, 星野正邦: 加治川における耳石標識サクラマスの回帰について. 新潟内水試研報, **18**, 38-44 (1992).
- 29) 兵藤則行, 小池利通, 大矢真知子, 塚本勝巳: 系群, 放流時期および放流場所がサクラマス種苗の河川内の移動分散と再捕率に及ぼす影響. 新潟内水試研報, **20**, 1-14 (1994).
- 30) 兵藤則行, 小池利通, 大矢真知子, 塚本勝巳: 新潟県加治川におけるサクラマス幼稚魚の移動, 資源量および生残. 新潟内水試研報, **20**, 15-21 (1994).
- 31) T. Okazaki: Genetic variation and population structure in masu salmon *Oncorhynchus masou* of Japan. *Nippon Suisan Gakkaishi.*, **52**, 1365-1376 (1986).
- 32) 真山 紘: サクラマス (*Oncorhynchus masou*) の交換移殖試験 1. 北海道オホーツク海沿岸の斜里川と日本海沿岸の尻別川のサクラマスの生物特性の比較. 北海道さけ・ますふ化場研報, **43**, 75-97 (1989).
- 33) 真山 紘, 野村哲一, 大熊一正: サクラマス (*Oncorhynchus masou*) の交換移殖試験 2. 地場産魚と移殖魚の降海移動と親魚回帰の比較. 北海道さけ・ますふ化場研報, **43**, 99-113 (1989).