

シラウオ稚魚の石狩川本流から三日月湖への移動機構解明のための ボックスモデル・シミュレーション

山口幹人^{†1}・藤岡 崇²

Box-model Simulation for the Migration of Juvenile Shirauo (*Salangichthys microdon*) from the Main Stream to the Oxbow Lake in the Ishikari River

Motohito YAMAGUCHI^{†1} and Takashi FUJIOKA²

Numerical simulation was conducted to confirm two types of immigration mechanisms of juvenile Shirauo *Salangichthys microdon* to the oxbow lake through the Shibi Canal in the Ishikari River system. These mechanisms were consisted of three swimming behaviors of fish based on our survey in July 1995, 1996 and 1997. These behaviors, (1) coming near the bank during ebb tide, (2) moving away from the bank during flood tide and (3) staying around the mouth of the canal in the main stream of Ishikari River during ebb tide, were taken into the numerical simulation. Other passive movements of fish were dependent on water circulation. Through the calculation, some characteristics shown in the field survey were reproduced appropriately. It was suggested that staying around the mouth of the canal in the main stream of Ishikari River during ebb tide was more efficient to move to the oxbow lake.

Key words: *Salangichthys microdon*, simulation of the migration, movement mechanism, the Ishikari River

はじめに

石狩川下流域から河口周辺沿岸域に分布するシラウオは、河口域でふ化した後(山口, 1994)、本流下層の塩水楔内部を上流に移動し(山口ほか, 1998)、さらには、7月以降、三日月湖に移動する(山口・渡辺, 1994)。この遡上回遊は、三日月湖内で採集されたシラウオの耳石の Sr: Ca 分析からも確認されている*。三日月湖の入口にあたる志美運河における移動機構を明らかにするため、1995年7月

6~7日、1996年7月15~16日および1997年7月14~15日に調査を実施し、その結果から2つのシステムを提案している(山口・藤岡, 投稿中)。一つは、シラウオ稚魚が順流時に運河の本流の入口付近に滞留して逆流時に運河に侵入するというものであり、もう一つは、順流時に速い流れを避けて岸に近寄り逆流時に流れの中心に分布することで、流速差を利用して三日月湖へ移動するというものである。しかし、前者では、順流時における運河の本流側入口付近における滞留が確認されておらず、また後者については、順流時でも運河中央に偏在する傾向がみられる時間帯があるなどの問題点も残されている。

そこで、二つのシステムの可能性を確かめ、移動機構についてより詳しく考察する目的で、ボックスモデルを用いたシミュレーションを行った。なお、3ヶ年の資源量や潮汐の状況などが異なることから、三日月湖への総移動数の経年比較などは行わず、実際の調査結果である短期的なネット採集数変動の再現に主眼をおいてシミュレーションを実施した。

2003年3月3日受付、2003年9月29日受理

北海道立中央水産試験場

Hokkaido Central Fisheries Experimental Station, 238 Hamanaka-cho, Yoichi-cho, Yoichi-gun, Hokkaido 046-8555, Japan

¹ 現所属 北海道立網走水産試験場

Hokkaido Abashiri Fisheries Experimental Station, 1-1-1 Masu-ura, Abashiri, Hokkaido 099-3119, Japan

² 現所属 北海道立栽培漁業総合センター

Hokkaido Institute of Mariculture, 539-112 Honbetsu, Shikabe-cho, Kayabe-gun, Hokkaido 041-1404, Japan

[†] yamaguchim@fishexp.pref.hokkaido.jp

* Yamaguchi M., S. Katayama and M. Omori (in preparation) Migration pattern of Shirauo, *Salangichthys microdon*, Bleeker in the Ishikari River system and adjacent nearshore sea area, Japan, as estimated by otolith microchemistry analysis.

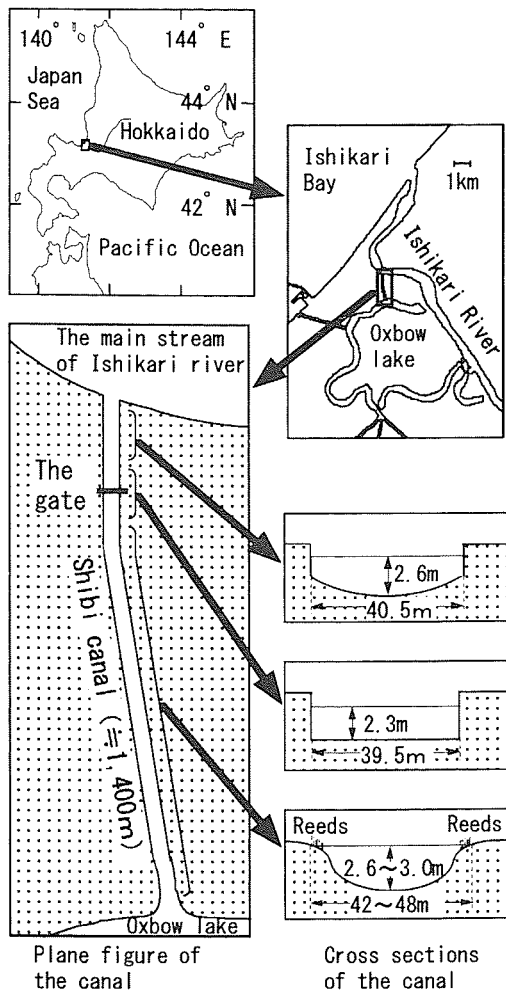


Figure 1. Location and structure of Shibi Canal.

材料と方法

志美運河の構造

志美運河は、石狩川の河口から約5.5km上流地点と三日月湖を繋ぎ、その全長は約1,400m、幅は約40mである (Fig. 1)。運河の石狩川本流から約300m地点に通常は開放されている水門があり、その前後100mほどは、水深2.2~2.3mの長方形断面となっている。その他の部分は中央が2.6~3.0mと深く、岸に近づく程浅くなる断面構造で、水門部より三日月湖側の河岸には葦が茂っていた。

ボックスモデル

シラウオ稚魚は本流に向かって流れる順流時に浮上し、三日月湖方向に流れる逆流時に深い水深に分布する傾向がみられるが (山口・藤岡, 投稿中)、運河内における水深別の流速差が小さいことが判明しており (山口ほか, 1998)、そのため、シミュレーションにシラウオの深浅移動を組み入れる必要はないと判断した。また、モデルを単純にするために単層モデルとした。志美運河の平面を1,400m×40

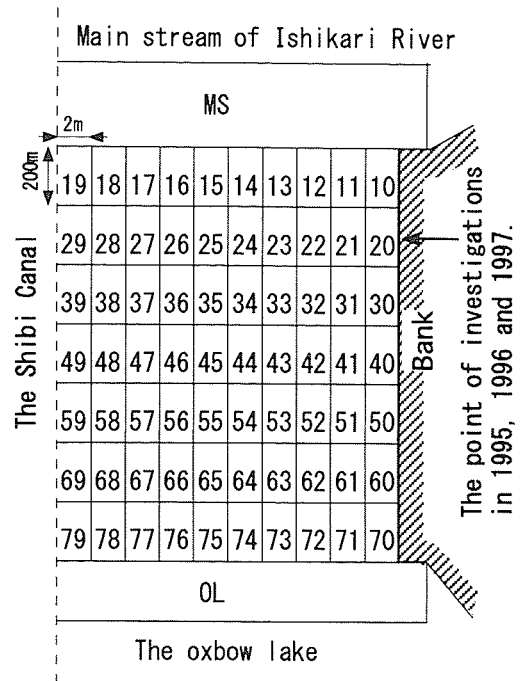


Figure 2. Grid of box-model in the right half of the Shibi Canal. MS and OL are names of boxes bordering on main stream of Ishikari River and the oxbow lake, respectively.

mの長方形と仮定し、同時に運河の構造がほぼ左右対称であることから、右岸側の半分のみをモデル化した (Fig. 2)。運河内を縦200m、幅2mの70のボックス Box_{mn} ($m=1, 2, \dots, 7, n=0, 1, \dots, 9$) に分け、水門部にあたる Box_{2n} はすべて水深2mとした。水門部以外では、岸に接したボックスの水深を0.5mとし、離岸するに従って0.25mずつ深く設定した。各ボックスの横断面積 S_c 、縦断面積 S_l 、容積 C を Table 1 に示した。

志美運河内の流速は、大潮時に約 $70 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ に達する (山口・藤岡, 投稿中)。これは外からの補充や流れに逆らう稚魚の行動がなければ、運河内の各ボックスの個体数 N_{mn} が、30分程度でほぼ0になることを示している。しかし、実際の調査では、積算流速値が採集位置である水門部から運河入口までの長さを越えても採集が続いた。そのため、稚魚が滞留する Box_{MS} と Box_{OL} を、それぞれ本流側と三日月湖側の入口に接続させた。具体的には1997年7月14日21時40分に順流から逆流に変化した後、15日3時30分まで岸から10mの下層ネットで平均以上の採集が続いた (山口・藤岡, 投稿中)。この間の積算流速値は約3,500m、水門部ボックスから本流までの距離200mを除けば3,300mとなり、これに水門部の断面積の半分である 40 m^2 をかけた $132,000 \text{ m}^3$ を Box_{MS} の容積とした。一方1997年7月14日の11時に逆流から順流に変化し、14時には同ネットの採集数は平均を下回った。この間の積算流速値は約

Table 1. Data used for box models.

Box No. or name	V_r	Size			Sc	Sl	C
		Length (m)	Width (m)	Depth (m)			
10,30,40,---70	0.25	200	2.0	0.50	1.0	100	200
11,31,41,---71	0.44	200	2.0	0.75	1.5	150	300
12,32,42,---72	0.64	200	2.0	1.00	2.0	200	400
13,33,43,---73	0.83	200	2.0	1.25	2.5	250	500
14,34,44,---74	1.02	200	2.0	1.50	3.0	300	600
15,35,45,---75	1.22	200	2.0	1.75	3.5	350	700
16,36,46,---76	1.41	200	2.0	2.00	4.0	400	800
17,37,47,---77	1.60	200	2.0	2.25	4.5	450	900
18,38,48,---78	1.80	200	2.0	2.50	5.0	500	1,000
19,39,49,---79	1.99	200	2.0	2.75	5.5	550	1,100
20	0.91	200	2.0	2.00	4.0	400	800
21	0.96	200	2.0	2.00	4.0	400	800
22	1.00	200	2.0	2.00	4.0	400	800
23	1.04	200	2.0	2.00	4.0	400	800
24	1.09	200	2.0	2.00	4.0	400	800
25	1.13	200	2.0	2.00	4.0	400	800
26	1.17	200	2.0	2.00	4.0	400	800
27	1.22	200	2.0	2.00	4.0	400	800
28	1.26	200	2.0	2.00	4.0	400	800
29	1.30	200	2.0	2.00	4.0	400	800
MS	-	-	-	-	-	-	132,000
OL	-	-	-	-	-	-	10,000

 V_r : Velocity ratio to V_C Sc : Cross sectional area Sl : Longitudinal area C : Capacity

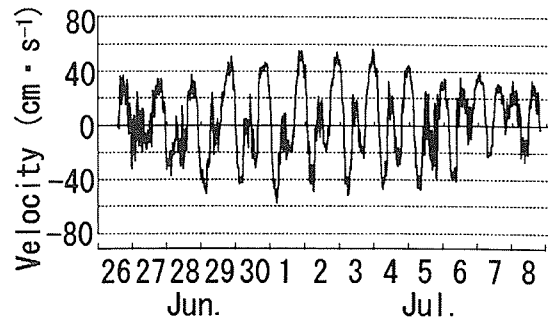
1,100 m、水門部ボックスから三日月湖までの距離 1,000 m を除けば 100 m となり、同様に 40 m² をかければ Box_{OL} の容積は 4,000 m³ となる。後述のように本研究では 2 分ごとに再計算を行っており、その最大流量は 3,058 m³ に達する。従って後述のパラメータ δ を 1.3 以上とすると、 Box_{OL} の個体数がマイナスとなる可能性が生じる。このため、余裕をみて Box_{OL} の容積を 10,000 m³ とした。

流速

シミュレーションに与える流速には、運河内水門部の岸から約 5 m 地点に設置した流向流速計（アーンデラー社製 RCM-7）によって、1996 年 6 月 26 日 13 時 40 分から 7 月 8 日 19 時 40 分に観測された（山口ほか、1998）20 分毎の順流速 $V_{0i} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($i=1, 2 \dots 883$) を使用した (Fig. 3)。流速計の観測値は、記録時の流向とそれ以前 20 分間の平均流速である。よって 2 分ごとの計算を行うにあたり、6 月 26 日 19 時 22 分から 19 時 40 分までの 10 回の計算の流速 V_{Ci} ($i=1, 2 \dots 10$) には 19 時 40 分の観測値 V_{01} を用い、以下同様に 10 計算ごとに流速を更新した ((1) 式)。なお (1) 式中の $\text{INT}(x)$ は x を越えない最大の整数である。

$$V_{Ci} = V_{0_{\text{INT}((i-1)/10)+1}} \quad (i=1, 2 \dots 8830) \quad (1)$$

長方形断面の水門部では、岸に接した Box_{20} と最も離岸した Box_{29} における流速比を富永・江崎 (1985) より 0.70:1.00 とし、水門部以外では岸から 1, 2, 5, 15 m の流速実測値（山口・藤岡、投稿中）から、岸に接した Box_{m0} と最も離岸した Box_{m9} ($m=1, 3, 4 \dots 7$) の流速比を 0.125:1.00

Figure 3. Observed current velocity (V_0) at Shibi Canal.

とした。それらの中間のボックスの流速は、比例配分によって求めた。また、水門部とそれ以外の部分の流速と断面の積算値、すなわち単位時間当たりの流量は等しくなるように調節した。流速計の設置位置にあたる Box_{22} の流速 V_{22i} と V_{Ci} との比率を 1.00 とし、それを基準に各ボックス流速 V_{mni} の V_{Ci} への比率 $V_{r_{mni}}$ を求めた (Table 1)。よって各ボックスにおける流速は (2) 式に示した通りとなる。

$$V_{mni} = V_{Ci} \cdot V_{r_{mni}} \quad (2)$$

ボックス間のシラウオの移動

シミュレーションは、単位時間毎に各ボックス内のシラウオ数を計算する差分法で行った。計算に用いた運河内の最高流速は、実測値 V_0 では $0.57 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、計算上では V_{m9} ($m=1, 3, 4 \dots 7$) の $1.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ となる。よって計算間隔が 175 秒以上となれば、流れに運ばれたシラウオが下流側に接したボックスを越えてさらに下流側のボックスまで移動することになるため、計算単位時間 Δt を 2 分とし、8,830 回繰り返し計算した ($t=1, 2 \dots 8830$)。なお全ボックス内のシラウオ個体数の初期値は 0 とした ((3) 式)。

$$\begin{aligned} N_{mni} &= 0, \\ N_{MS_0} &= 0, \\ N_{OL_0} &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

河口付近でふ化したシラウオは本流の塩水楔の中を上流方向に移動し、志美運河の入口に達すると考えられる（山口ほか、1998）。よって逆流時に限って、一定数 R のシラウオが志美運河の本流側入口にあたる Box_{MS} に達するとした ((4) 式)。

$$R = 10,000/\text{min} \quad (V_{Ci} < 0) \quad (4)$$

シラウオ稚魚の遊泳速度は志美運河内の流速に対して十分に遅い（山口ほか、1998；山口・高谷 2000）と考えられるため、運河に沿った方向の動きにはシラウオの遊泳速度を加えず、流れのみによって移動するものとした。具体的には、順流時 ($V_{Ci} \geq 0$) に Box_{m0} から本流側の $Box_{m-1,n}$ あるいは Box_{MS} へ、逆流時 ($V_{Ci} < 0$) には三日月湖側の $Box_{m+1,n}$

あるいは Box_{OL} へ, Nl_{mn} 個体が移動するとした (5) 式).

$$\left. \begin{aligned} \rho_{mn} &= N_{mn} / C_{mn} \\ Nl_{mn} &= \rho_{mn} \cdot Sc_{mn} \cdot |V_{mn}| \cdot \Delta t \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし ρ_{mn} は密度 (個体 $\cdot m^{-3}$) である. なお, 順流時の Box_{OL} から Box_{7n} への移動数 Nl_{OL}^n , および逆流時の Box_{MS} から Box_{1n} への移動数 Nl_{MS}^n については, 移動先のボックスの流速値と断面積を用いて計算した (6) 式).

$$\left. \begin{aligned} Nl_{OL}^n &= \rho_{OL} \cdot Sc_{7n} \cdot |V_{7n}| \cdot \Delta t \\ Nl_{MS}^n &= \rho_{MS} \cdot Sc_{1n} \cdot |V_{1n}| \cdot \Delta t \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

実際の調査において, 多くの時間帯で岸から遠いほど多くのシラウオが採集される傾向がみられたが, 順流時にはその差が小さくなることがあった. そこで順流時にシラウオが岸に向かう動きを, 逆流時に岸から離れる動きを組み込んだ. 具体的には順流時に Box_{mn} から岸側の Box_{m-1} に Ncn_{mn} 個体 (7) 式) が, 逆流時には Box_{mn} から岸とは反対側の Box_{m+1} に Ncb_{mn} 個体 (8) 式) が移動するとした.

$$Ncn_{mn} = \rho_{mn} \cdot Sl_{mn} \cdot \alpha \quad (7)$$

$$Ncb_{mn} = \rho_{mn} \cdot Sl_{mn} \cdot \beta \quad (8)$$

ただし α は岸に向かう速度のパラメータ ($m \cdot 2 \text{ min}^{-1}$), β は岸から離れる速度のパラメータ ($m \cdot 2 \text{ min}^{-1}$) である. 最後に順流時には Box_{MS} から本流へ2分毎に Ne_{MS} 個体のシラウオが移動し (9) 式), 逆流時に Box_{OL} から三日月湖に Ne_{OL} 個体が移動する ((10) 式) とした. 移動数は密度と流量の積にパラメータ γ と δ をかけたものとした.

$$Ne_{MS} = \rho_{MS} \cdot \sum_{n=0}^9 (V_{1n} \cdot Sc_{1n}) \cdot \gamma \quad (V_{C_i} \geq 0) \quad (9)$$

$$Ne_{OL} = \rho_{OL} \cdot \sum_{n=0}^9 (V_{7n} \cdot Sc_{7n}) \cdot \delta \quad (V_{C_i} < 0) \quad (10)$$

ここで γ は本流への移動パラメータ, δ は三日月湖への移動パラメータである. 以上から, 各ボックス内のシラウオ個体数の2分当たりの変化を, 順流時と逆流時に分けてまとめると, (11) 式および (12) 式になる.

$V_{C_i} \geq 0$ のとき

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_{MS} &= \sum_{n=1}^9 Nl_{1n} - Ne_{MS}, \quad \Delta N_{OL} = - \sum_{n=1}^9 Nl_{OL}^n, \\ \Delta N_{mn} &= \begin{cases} Nl_{m+1n} - Nl_{mn} + Ncn_{m,n+1} - Ncn_{mn} & (m=1,2,\dots,6; n=1,2,\dots,8) \\ Nl_{m+1n} - Nl_{mn} + Ncn_{m,n+1} & (m=1,2,\dots,6; n=0) \\ Nl_{m+1n} - Nl_{mn} - Ncn_{mn} & (m=1,2,\dots,6; n=9) \\ Nl_{OL}^m - Nl_{mn} + Ncn_{m,n+1} - Ncn_{mn} & (m=7; n=1,2,\dots,8) \\ Nl_{OL}^m - Nl_{mn} + Ncn_{m,n+1} & (m=7; n=0) \\ Nl_{OL}^m - Nl_{mn} - Ncn_{mn} & (m=7; n=9) \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$V_{C_i} < 0$ のとき

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_{MS} &= 2R - \sum_{n=1}^9 Nl_{MS}^n, \quad \Delta N_{OL} = \sum_{n=1}^9 Nl_{7n} - Ne_{OL}, \\ \Delta N_{mn} &= \begin{cases} Nl_{m-1n} - Nl_{mn} + Ncb_{m,n-1} - Ncb_{mn} & (m=2,3,\dots,7; n=1,2,\dots,8) \\ Nl_{m-1n} - Nl_{mn} + Ncb_{m,n-1} & (m=2,3,\dots,7; n=9) \\ Nl_{m-1n} - Nl_{mn} - Ncb_{mn} & (m=2,3,\dots,7; n=0) \\ Nl_{MS}^m - Nl_{mn} + Ncb_{m,n-1} - Ncb_{mn} & (m=1; n=1,2,\dots,8) \\ Nl_{MS}^m - Nl_{mn} + Ncb_{m,n-1} & (m=1; n=9) \\ Nl_{MS}^m - Nl_{mn} - Ncb_{mn} & (m=1; n=0) \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

よって各ボックス内の t 回目の計算終了時のシラウオ分布数は (13) 式で示したとおりとなる.

$$\left. \begin{aligned} N_{mn_t} &= N_{mn_{t-1}} + \Delta N_{mn_t} \\ N_{MS_t} &= N_{MS_{t-1}} + \Delta N_{MS_t} \\ N_{OL_t} &= N_{OL_{t-1}} + \Delta N_{OL_t} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

パラメータの調整

まず $\gamma = \delta = 1$, すなわちシラウオが運河の両側入口付近に滞留しようとする, あるいは離散しようとする動きがないとして, 岸に向かう速度と岸から離れる速度のパラメータ α と β を変化させて, 繰り返し計算を行った. そして i) 順流時の Nl_{20} 積算値/逆流時の Nl_{20} 積算値が, 河岸直近でネット方向を固定して採集を行った1995年と1996年の調査結果である7,035個体/2,706個体=2.60と, 1,101個体/137個体=8.04の間にある, ii) $\rho_{20} \cdot |V_{20}|$ 積算値/ $\rho_{25} \cdot |V_{25}|$ 積算値が, 河岸直近と岸から10mの距離に方向を固定せずにネットを設置して採集を行った1997年の調査結果である79個体/608個体=0.13と79個体/872個体=0.09の間にある, という2つの条件を同時に満たす α と β の値を求めた. なお α, β は計算1回=2分当たりの移動距

離であるので、ボックスの幅を基準に $2\text{ m} \cdot 2\text{ min}^{-1}$ を最大値とした。さらに計算の中で α が 0.2 を越えると条件 ii) を満たす可能性はなく、 β が 1.0 を越えると条件 i) と ii) が両立しなかったため、ここでは $0 < \alpha < 0.2$ 、 $0 < \beta < 1.0$ の結果を示した。なお、シミュレーションに使用した流向流速観測期間の月齢は 10~22 日であり、3 ヶ年の調査時の月齢 (1995 年: 8~9 日, 1996 年: 29~0 日, 1997 年: 9~10 日) に該当しなかったため、同月齢期の調査結果にシミュレーション結果を合致させるのではなく、8830 回の計算の積算値の比が、調査結果の範囲に収まるように α と β の範囲を推定した。

次に繰り返し計算の中で条件 i) と ii) を満たし、かつ稚魚の動きが最も小さい $\alpha=0.08$ 、 $\beta=0.10$ の条件の下で、 Box_{MS} および Box_{OL} からの離脱の強さを示すパラメータ γ と δ を変化させて、本流および三日月湖への総移動数 $\sum_{t=1}^{8830} Ne_{MS}$ と $\sum_{t=1}^{8830} Ne_{OL}$ 、および両者の比率を求めた。なお δ については 0.2 以下および 1.8 以上において条件 ii) が成立しなかった。また γ についてもモデル内から本流への離脱が皆無 ($\gamma=0$) とは考えられないため下限を 0.2、同時に遊泳などによる離脱が流れによる離脱より大きいとは考えられなかったので上限を 2.0 とし、 $0.2 < \gamma < 2.0$ 、 $0.2 < \delta < 2.0$ の結果を示した。

最後に $\alpha=0.08$ 、 $\beta=0.10$ 、 γ と δ は条件 i), ii) に適合する範囲で、三日月湖への総移動数が最大となる $\gamma=0.2$ 、 $\delta=1.0$ でシミュレーション計算し、1995~1997 年の調査結果の特徴が再現されているかを確認した。1995、1996 年に水門部の河岸直近で開口方向を三日月湖および本流に固定して設置したネットの採集数として、それぞれ順流時および逆流時の N_{20} を Box_{20} の断面積 4 m^2 で除した値を 1 時間ごとに積算した。また採集数を積算流速値で除して密度を計算した。さらに 1997 年に水門部で、河岸直近と岸から 2、5、10 m に開口方向を固定せずに設置した 4 ネットの採集数として、それぞれ $\rho_{20} \cdot |V_{20}|$ 、 $(\rho_{20} \cdot |V_{20}| + \rho_{21} \cdot |V_{21}|) / 2$ 、 $\rho_{22} \cdot |V_{22}|$ 、 $(\rho_{24} \cdot |V_{24}| + \rho_{25} \cdot |V_{25}|) / 2$ を 1 時間毎に積算した。

結果

α と β の推定

$\gamma=\delta=1$ の条件下で、 $0 < \alpha < 0.2$ 、 $0 < \beta < 1.0$ の範囲で計算した順流時の N_{20} 積算値 / 逆流時の N_{20} 積算値および $\rho_{20} \cdot |V_{20}|$ 積算値 / $\rho_{25} \cdot |V_{25}|$ 積算値を Fig. 4 に、三日月湖への総移動数 $\sum_{t=1}^{8830} Ne_{OL}$ を Fig. 5 に示した。順流時の N_{20} 積算値 / 逆流時の N_{20} 積算値は、 $\beta > 0.1$ では、 α 、 β ともに増加するほど高くなった (Fig. 4 の実線)。そして値が 2.60~8.04 (条件 i) の適合範囲: Fig. 4 の薄い網掛け) となるのは β が 0.0 の時には α が 0.04 以上の広い範囲であったが、 β が増加

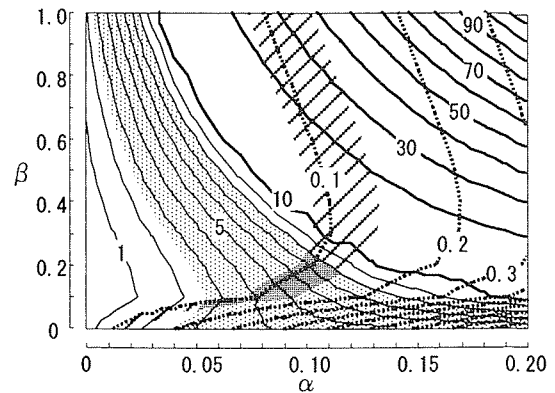


Figure 4. Ratio of integrated number of fish moved from Box_{20} (N_{20}) to Box_{10} during ebb tide and to Box_{30} during flow tide (solid lines). Ratio of integrated density · absolute value of velocity ($\rho \cdot |V|$) at Box_{20} and Box_{25} (broken lines). In dotted and shaded areas, both values correspond to results of the survey (2.60~8.04 and 0.09~0.13, respectively). α and β are swimming speeds ($\text{m} \cdot 2\text{ min}^{-1}$) of fish to the bank and from the bank, respectively.

するに従って α の値は範囲を狭めつつ低くなった。一方、 $\rho_{20} \cdot |V_{20}|$ 積算値 / $\rho_{25} \cdot |V_{25}|$ 積算値は、 α が増加するほど高くなった (Fig. 4 の破線)。また β が 0 の時に最も高く 0.30~0.40 付近で最も低くなっていた。そして値が 0.09~0.13 (条件 ii) の適合範囲: Fig. 4 の斜線) を示す α と β の範囲は、 β が 0~0.30 では、 β が高くなるほど α も高くなったが、 β が 0.40 以上では、 β が増加するほど α は減少した。条件 i), ii) の双方を満たす α と β の組み合わせは、 $\beta=0.10$ のときに $\alpha=0.08\sim 0.09$ 、 $\beta=0.20$ のときに $\alpha=0.10\sim 0.11$ であった (Fig. 4 の濃い網掛け)。2 つの条件の範囲から更に細かい刻みで計算すれば、 β が 0.10 未満においても条件を満たす α と β の組み合わせは存在すると思われる。しかし、ここでは計算値が得られており、同時に遊泳力が弱いシラウオ稚魚に最も負担とならない遊泳速度パラメータ $\alpha=0.08$ 、 $\beta=0.10$ を妥当な推定値とした。

三日月湖への総移動数 $\sum_{t=1}^{8830} Ne_{OL}$ (Fig. 5) は、 $\beta=0$ の場合を除いて、基本的に α と β が増加するほど大きくなった。ちなみに $\alpha=0$ 、 $\beta=0$ のとき 31.21×10^6 個体であったものが、妥当な推定値とした $\alpha=0.08$ 、 $\beta=0.10$ ならば約 3.0% 増加して 32.16×10^6 個体となり、条件 i), ii) を満たす範囲では $\alpha=0.102$ 、 $\beta=0.247$ のときに約 4.8% 増加して最大の 32.72×10^6 個体となった。

γ と δ の推定

$\alpha=0.08$ 、 $\beta=0.10$ の条件下で、 $0.2 < \gamma < 2.0$ 、 $0.2 < \delta < 2.0$ まで変化させて計算した本流への総移動数 $\sum_{t=1}^{8830} Ne_{MS}$ を Fig. 6 に、

三日月湖への総移動数 $\sum_{t=1}^{8830} Ne_{OL}$ を Fig. 7 に、両者の比率を

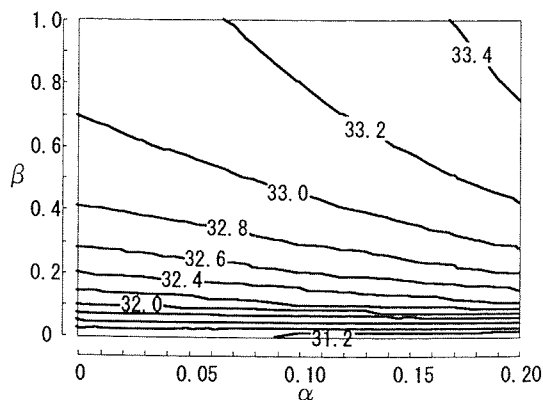


Figure 5. Integrated number of fish moved from Box_{OL} to the oxbow lake ($\times 10^6$) when $\gamma = \delta = 1$. α and β are swimming speeds ($m \cdot 2 \text{ min}^{-1}$) of fish to the bank and from the bank, respectively. γ and δ indicate moving strength of fish from Box_{MS} to the main stream and from Box_{OL} to the oxbow lake, respectively.

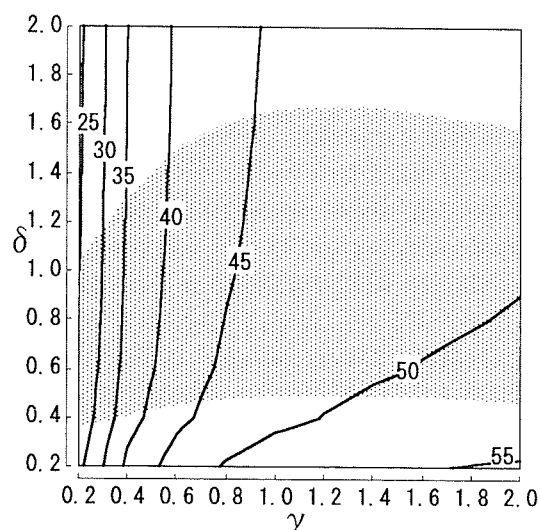


Figure 6. Integrated number of fish moved from Box_{MS} to the main stream ($\times 10^6$) when $\alpha = 0.08$ and $\beta = 0.10$. Dotted area satisfies condition i) and ii). α and β are swimming speeds ($m \cdot 2 \text{ min}^{-1}$) of fish to the bank and from the bank, respectively. γ and δ indicate moving strength of fish from Box_{MS} to the main stream and from Box_{OL} to the oxbow lake, respectively.

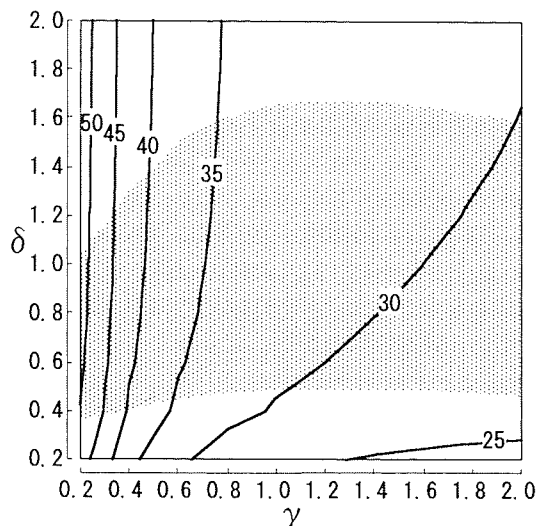


Figure 7. Integrated number of fish moved from Box_{OL} to the oxbow lake ($\times 10^6$) when $\alpha = 0.08$ and $\beta = 0.10$. Dotted area satisfies condition i) and ii). α and β are swimming speeds ($m \cdot 2 \text{ min}^{-1}$) of fish to the bank and from the bank, respectively. γ and δ indicate moving strength of fish from Box_{MS} to the main stream and from Box_{OL} to the oxbow lake, respectively.

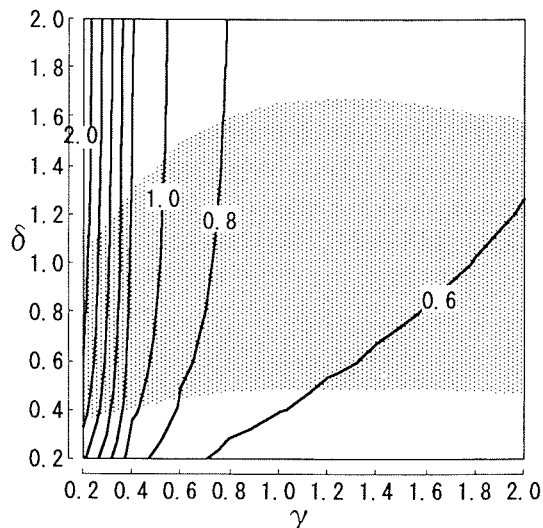


Figure 8. Ratio of integrated number of fish moved from Box_{OL} to the oxbow lake and Box_{MS} to the main stream when $\alpha = 0.08$ and $\beta = 0.10$. Dotted area satisfies condition i) and ii). α and β are swimming speeds ($m \cdot 2 \text{ min}^{-1}$) of fish to the bank and from the bank, respectively. γ and δ indicate moving strength of fish from Box_{MS} to the main stream and from Box_{OL} to the oxbow lake, respectively.

Fig. 8 に示した, 設定上当然であるが, パラメータ γ が増加あるいは δ が減少すると本流への総移動数が増加し (Fig. 6), 逆に γ が減少あるいは δ が増加すると三日月湖への総移動数が増加した (Fig. 7). そしてその影響は γ の方が δ よりも大きかった. なお, 条件 i), ii) に適合したのは, 基本的に δ が 0.4~1.6 の範囲であり, 特に γ が 0.2 のときには δ の範囲は 0.4~1.0 と狭かった (Fig. 6, 7, 8 の網掛け部分). その中で三日月湖への総移動数と本流へのその比率が

1.0 を上回ったのは γ が 0.4 以下の場合に限られた (Fig. 8). そこで, 条件 i), ii) に適合し, 三日月湖への移動数が最大となる $\gamma = 0.20, \delta = 1.00$ を妥当な推定値とした.

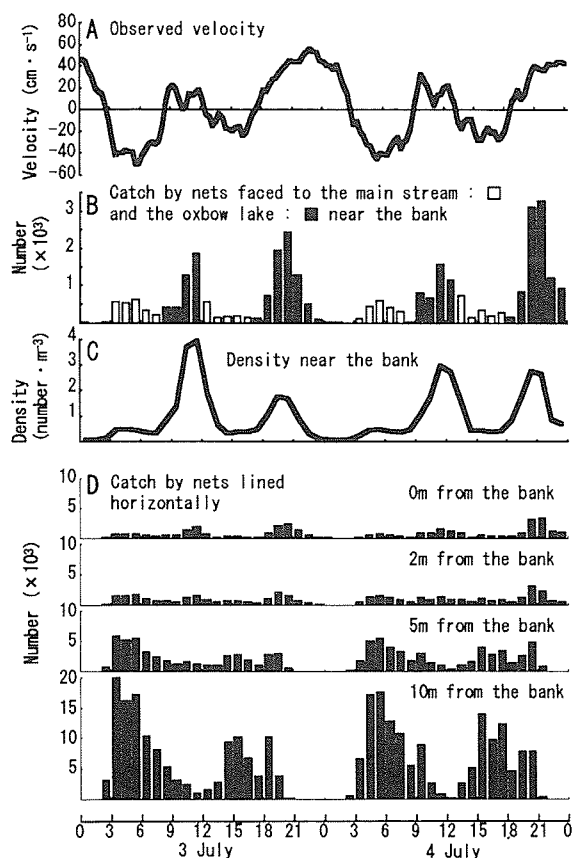


Figure 9. Results of simulation during 3-4 July in 1996. A: Observed current velocity. B: Number of fish caught near the bank by nets faced to both directions. C: Density near the bank. D: Number of fish caught by nets lined horizontally.

調査結果の再現

$\alpha=0.08$, $\beta=0.10$, $\gamma=0.20$, $\delta=1.00$ の条件でシミュレーションを行い、結果のうち7月3~4日を抜粋して、Fig. 9に示した。計算から得られた河岸直近での三日月湖および本流方向に開口したネットによる採集数は、2日間の合計でそれぞれ24,667個体と7,260個体となり、三日月湖方向に開口したネットにおける採集が多いという1995、1996年の調査結果と合致した (Fig. 9B)。また計算密度において、順流時に高く、逆流時に低いという結果が再現された (Fig. 9C)。同じく計算から得られた河岸直近と岸から2, 5, 10mに方向を固定せずに設置したネットによる採集数は、2日間合計でそれぞれ31,999個体、38,328個体、90,772個体、280,420個体となり、1997年の岸から遠いほど採集数が多いという調査結果が再現された (Fig. 9D)。同時に7月3日12時のように、その傾向が順流時に短時間ながら解消される点も再現され、さらに順流から逆流に変化した直後である7月3日4時に、岸から10mでの採集個体数が急増した点も調査結果に合致した。

考察

岸に向かう移動と離れる移動

α は順流時の岸に向かう速度、 β は逆流時の岸から離れる速度である。それらがともに0としたケースでは条件 i) と ii)を満たす、すなわち調査結果の特徴を再現することは出来なかった。これは、シラウオ稚魚が順流時に岸近くに分布し、逆流時に離岸するという移動を行っていることを示している。また、妥当とした $\alpha=0.08$, $\beta=0.10$ は秒速に換算するとそれぞれ $0.067 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ と $0.083 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、適合した最大値である $\alpha=0.102$, $\beta=0.247$ で $0.085 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ と $0.206 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ となる。これは体長20mm程度 (山口・藤岡, 投稿中)の稚魚にも十分に可能な遊泳速度と考えられる。そして、流向に伴うシラウオ稚魚の岸からの距離の変化が、岸からの距離別の流速差によって、三日月湖への移動に多少なりともプラスに働くことが示された。

運河入口における滞留

γ と δ は本流側入口の Box_{MS} および三日月湖側入口の Box_{OL} からモデル外に移動する強さのパラメータであり、それぞれ Ne_{MS} と Ne_{OL} を規定する。モデル内への移動は定数である R のみ、外部への移動は Ne_{MS} と Ne_{OL} の二つだけであるため、モデル内の個体数と密度は γ と δ によって調節される。従って γ と δ のどちらか一方を小さくすると、モデル内の密度は高くなり、もう一方が規定する外部への移動が増加する。そしてその影響は γ の方が δ よりはるかに大きい。つまり、三日月湖への移動を増加させるためには、 γ を小さくする必要がある。しかし、 Box_{MS} が本流上層の厚さ2~3m程度の淡水層にあると仮定すれば、その面積は $88,000 \sim 132,000 \text{ m}^2$ と広大なものとなる。運河入口付近の地形からみて、その大部分は流速 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度 (吉田, 1985)の本流に位置することになり、シラウオ稚魚の滞留は困難で、 γ は大きな値になると考えられる。一方、本流下層の塩水楔内の流速は極めて遅く (吉田, 1985)、同時に分布調査からシラウオ稚魚が6月下旬から7月下旬にかけて表層より塩水楔内に多く分布していることが判明している (山口ほか, 1998)。以上から、シラウオ稚魚は順流時に本流の運河入口付近の塩水楔内に滞留し、逆流時に運河に侵入しているものと考えられる。また、今回は三日月湖側からモデル内への加入を考慮しなかった。これは三日月湖に入った稚魚が運河入口から分散し、運河内に戻らない機構をモデルに組み込んだことになる。このことも稚魚が三日月湖に移動する上で重要な機構の一つと言えるかも知れない。

運河中央への偏在

1997年にみられた岸から離れるほど採集数が多くなる理由として、先述の逆流時における岸から離れる移動がある。加えてシミュレーション過程の追跡によって、別の理由も推察された。まず岸方向あるいは岸から離れる方向への移動がない条件下における逆流時の Box_{in} をみると、それぞ

れの増加数は $N_{MS}^{in} = \rho_{MS} \cdot Sc_{1n} \cdot |V_{1n}|$, 減少数は $N_{1n} = \rho_{1n} \cdot Sc_{1n} \cdot |V_{1n}|$ である。よって計算が繰り返される中で、各ボックスの密度 ρ_{1n} はすべて ρ_{MS} に近づいていく。採集数は密度と流速の絶対値の積に比例するので、密度の差がなくなっていけば、採集数の差は基本的に流速差によると理解できる。また Box_{1n} から水門部の Box_{2n} へ移行する際には、岸近くでは流速および断面積が増加し、運河中央ではどちらも減少する。採集数は流速に比例し断面積に反比例するが、岸からの距離別の流速増加率を断面積増加率で除した値は 0.79~0.92 と大差がないため、水門部における岸から遠いほど採集数が多い傾向が、基本的に運河入口の流速差に起因していると理解される。実際には、断面積と流速の関係から運河中央付近の流れの一部が水門部分で岸方向に広がっていると考えられるが、基本的には上述の理由によって岸から遠いほど採集数が多い結果が得られたと考える。

今回、フィールド調査から想定した二つのシステムを組み込んだシミュレーションによって、調査結果の特徴をほぼ再現することができた。これらはモデルの妥当性を支持する結果と考える。そして、組み込んだ二つのシステムが、どちらもシラウオ稚魚の三日月湖への移動に貢献しており、その貢献度合いでは、順流時に運河の本流入口付近に待機し、逆流時に運河内に侵入することが最も大きいこと

が示された。

謝 辞

本稿をまとめるにあたって適切なアドバイスを頂きました東北大学大学院農学研究科の大森迪夫教授に心より感謝申し上げます。またシミュレーションモデルの基礎をお教え下さった北海道大学大学院水産科学研究科の磯田豊助教授、モデル構築に関して懇切なアドバイスを下さった水産工学研究所の桑原久実博士に深謝申し上げます。

引用文献

- 富永章宏・江崎一博 (1985) 長方形断面開水路流の三次元乱流構造に関する実験的研究。土木学会論文集, 357, 81-88.
- 山口幹人 (1994) 石狩川水系のシラウオ産卵場を発見。北水試だより, 27, 40-42.
- 山口幹人・渡辺安廣 (1994) シラウオ資源調査。平成5年度北海道立中央水試事業報, 252-263.
- 山口幹人・藤岡崇・渡辺安廣 (1998) シラウオ資源調査。平成8年度北海道立中央水試事業報, 315-324.
- 山口幹人・高谷義幸 (2000) シラウオの遊泳速度(短報)。北水試研報, 57, 31-32.
- 山口幹人・藤岡 崇 (投稿中) 石狩川本流と三日月湖間を繋ぐ水路内におけるシラウオ稚魚の移動。
- 吉田静男 (1985) 石狩川の河口流出流。日本海洋学会 沿岸海洋研究部会編: 日本全国沿岸海洋誌, 東海大学出版会, 72-74.