

魚道型実験水路におけるサクラマス幼魚のそ上行動

真山 紘*

Ascending Behavior of Juvenile Masu Salmon (*Oncorhynchus masou*) in Experimental Fishway

Hiroshi MAYAMA*

Ecological observation of ascending behavior of juvenile masu salmon under various hydraulic and light conditions was carried out using a small-scale experimental fishway (pool-and-overfall type) which had 4 or 5 pools rising every 5 cm between them. Hatchery-reared fish raised from eggs taken from wild stock were used in a series of tests. All experiments were performed under outdoor photoconditions. Active ascent was shown in the daytime, especially under high fish densities, but the stimulus of strong flow caused fish to swim up during the night. In tests on the effect of pool depth below the weir, a 10 cm pool depth, approximately equal to body length of fish, resulted in the most successful passage over weir. The general tendency was not evident in the relation between waterflow supplied into the channel and ascending rate. However, under inadequate flow conditions of higher or lower discharge, ascent form of the fish changed from "swimming-type" to "jumping-type" and jump failure coincided with the change. Although notch on weir was effective to swim up without troubles at the lower flow level, alternate placement of the notch prevented successive ascent and caused a decline in willingness of ascent. When a condition of total darkness was created during daylight hours, the fish became inactive compared to the usual level during daylight. Rate of ascent in the partly shaded channel was also lower than that in wholly lighted channel. From the experiments on response to shadow, fish were observed to hesitate more before their swimming out from the shaded portion than into it. The observation using this technique was considered to be a simple and effective method for studying ascent behavior as one aspect of swimming ability of juvenile salmonids.

ま え が き

サクラマス (*Oncorhynchus masou*) 資源培養のための増殖手段の一つとして、近年、降海期まで幼魚を池中で人工飼育する河川生活省略型のスマルト放流技術が開発されてきている。しかし、この魚種の生態特性からみて、今後とも河川を使つての天然再生産の比重は高いものと考えられ、効率的資源培養のためには、

北海道さけ・ますふ化場研究業績第307号

* 水産庁北海道さけ・ますふ化場 (Hokkaido Salmon Hatchery, Fisheries Agency of Japan, 2-2 Nakanoshima, Toyohira-ku, Sapporo 062 JAPAN)

河川内での生活実態の把握が不可欠である。

サケ科魚類の稚幼魚の河川内での分散移動のうち、降下行動に関する研究は数多いが、上流へのそ上行動に関しては極めて少ない。上流に向けてそ上移動するサクラマス幼魚が少なからずいることは良く知られており（小坂・石田 1969, 石田他 1971, 田中他 1971, 久保 1976, 本多他 1981）、また、物理的に押し流された場合に本来の生息場に戻るためにも強いそ上能力を要求されることから、河川生活期の幼魚にとってそ上移動は遊泳能力の一つの側面として重要な行動の一つである。

しかしながら、上流への移動の実態、特にそ上障害となる小規模な滝や落ち込みでの跳躍行動や、早瀬におけるそ上行動などについての観察例は少ない。魚道内をそ上しながら通過する天然ヤマメの観察（佐藤 1983）や、既存の魚道に採集した天然ヤマメを放流しての実験（大渡 1983）からは小型のサクラマス幼魚も高いそ上能力を持つことが伺える。

サケ科魚類の跳躍・そ上能力を実験的に確かめた報告は、産卵そ上親魚用魚道の設計の基礎データ収集を目的としたものが多く、特に米国のコロンビア川で行われた一連の大規模な実験（Long 1959, Elling et al. 1959, Ellig 1960, Collins et al. 1962, Collins et al. 1963, Gauley and Thompson 1963, 他）が代表的なものである。これに対し、河川生活期のサケ科稚魚の跳躍・そ上行動の実験観察は、大西洋サケとブラウントラウト幼魚を用いた人工水路での跳躍実験と自然界での観察との対比（Stuart 1962）や、傾斜面の流下水でのサケとギンザケ稚魚のそ上行動（Mackinnon and Hoar 1953）等極めて数少ない。

河川生活期サクラマス幼魚の生息の場の保全と造成のために必要なデータ収集を目的として、人工水路でのサクラマス幼魚のそ上行動を実験的に確かめたのでその結果を報告する。

この試験を行うにあたり、水産庁北海道さけ・ますふ化場千歳支場の職員各位に多大の尽力を頂いた。ここに記して感謝の意を表わしたい。

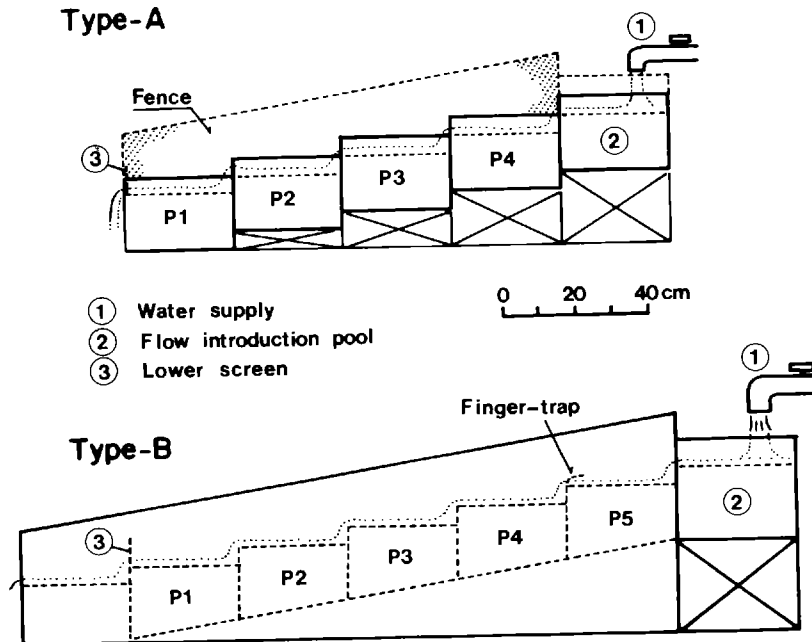


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental equipments.

A and B types of fishways were used on Exp.1 to 3, and Exp.4 and 5, respectively

図1 実験装置の概略図。Aタイプは実験1-3に、Bタイプは実験4と5に使用

材 料 と 方 法

これらの実験は、1979年から1985年の間の秋に行われた。

実験水路の設計に当たっては、サケ・マス類に用いられている階段式魚道にまねた構造として、北海道においてサクラマス親魚のために作られている魚道の標準的なサイズを参考にしながら、供試魚であるサクラマス幼魚の体長（平均尾叉長で9～10cm）と回帰親魚（60cm前後）の比率から6分の1に縮小したモデルとした。実験水路は、2種類使用したが、これらのプールの長さとは幅はそれぞれ30cmと20cmで同一である（図1）。また、上下プール間の水位差（落差）は5cmとした。これは、泳ぎながら連続したそ上が可能とされている、米国のサケ属魚類用魚道の基準値の1 foot (U.S. Army Engineer Division 1973) に準じた縮小値とした。

実験1～3は、各独立した合板製の水槽を水位差5cmとなるように設置した水路（図1のAタイプ）で行った。プール水深は15cmである。

実験4と5は、5つの遊泳プールを持つ水路（Bタイプ）を用いた。これも合板製で、各プールの側壁と底板をそれぞれ一体化したことにより、プール間の隔壁板を替えることの出来る構造となり、水路の遮光も容易となった。底板を一体化したため、プールの水深は上段側で15cm、下段側で20cmと異なった。

文中では、プールの番号を図1に示すように下流側から順に、P1、P2、P3の順に記した。

すべての実験は、供試魚の飼育場である、水産庁北海道さけ・ますふ化場千歳支場の構内で行った。実験用水は、飼育用水と同じ湧水を水中ポンプで揚水し、配水槽に一旦受けて流れを均一化してから実験水槽へ落とした。水温は、湧水のためほとんど変化なく、常時8.1～8.2℃を示した。

供試魚は、前年秋に採卵されて屋外で飼育中のサクラマス当歳魚である。実験開始30分前に、飼育池から掬い上げ、計数して止水中におき、実験開始5分前に実験水路のプールに移し、そ上防止用に取付けた網を取り除くことにより実験を開始した。なお、試供魚は、実験毎に全数入れ替え、再使用を避けた。実験観察はいずれの年も9月と10月に行われたため、供試魚の大きさはほぼ同一であったが、必要に応じて実験終了時に、そ上・残留魚別に体長を測定した。

実験はすべて同じ形状の水路を2列に並べて行われたが、実験に先立ち2基の水路を同一水理条件として、両者間にそ上率の大きな差のないことを予備試験として確かめた上で本実験を始め、さらに実験毎に対照区を左右入れ替えて、器差による偏りを排除するように努めた。

文中、そ上率は、実験開始時の収容尾数に対する終了時のそ上数（各実験により計数法が異なる）の比率（%）で示した。

実験場が屋外のため、気象条件の変化がそ上行動に影響を与えることが考えられたため、実験中の天候、照度変化などについても記録した。

各実験毎に異なる方法については、結果の項にそれぞれ記した。

結 果

実験1 そ上行動の日周期性

(1) 日中のそ上量変化

外周環境条件の変化や日周期性によるそ上量の変動を明らかにすると共に、実験魚としての適性を検討するための予備実験も兼ねて日中の時間別そ上量変化を調べた。

1回の観察時間は1時間とし、最下段のプール(P1)に収容した50尾のうち、5分毎に1段でも上のプールにそ上していたものを計数して取り上げた。午前6時5分に実験を開始し、午後5時55分までの間の11時間帯について、並置した2基の水路で同時に実施した。注水量は、それぞれ毎分40ℓとした。

実験を行った9月17日の日の出は5時30分で、日中は快晴がつづき、夕刻の4時には山影に日が入り、終

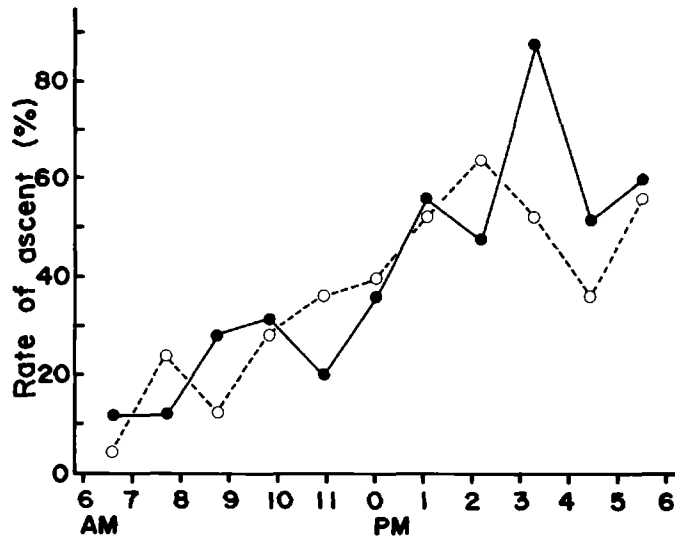


Fig. 2. Fluctuation of percentage of fish ascending upper pools during 1 hour in the daytime at a pair of experimental fishways: in Exp. 1-(1)

図2 日中のそ上率変化, 2基の実験水路の値を個別に示す

了時の午後5時55分には照度が375Luxまで低下した。

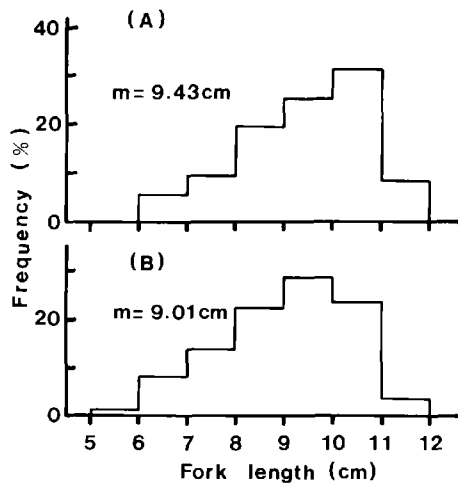


Fig. 3. Fork length distributions of the fish ascending upper pools (A) and the resident (B) at Exp.1-(1)

図3 実験1-(1)におけるそ上魚(A)と残留魚(B)の体長頻度分布

時間帯毎のそ上率は、図2にみられるように、早朝に低く、徐々に増加し、午後2時から3時前後に最大を示した。夕方の照度低下時の変化には一定の傾向が示されなかった。実験に用いた2基の水路で、ほぼ同様のそ上変動傾向が示されたことから、両水路の中に収容されている魚が同じ環境変化の刺激を受けて反応したことが伺われ、そ上活動の観察にこのような実験装置及び供試魚を用いることの有効性が確かめられた。

そ上魚と実験終了時にプール1に残っていた残留魚の魚体サイズを尾叉長で比較したところ、平均値ではそ上魚が若干大きかったものの、その範囲は両者ではほぼ似通っており、偏りなく小型個体でも活発にそ上することが伺われた(図3)。

(2) 昼夜のそ上量変化

1-(1)で、時間帯によりそ上活動の相違がみられたことから、次に、24時間の日周変化を観察した。また、

実験用水に餌生物が混入し、これがそ上行動を促す一つの要因となることも考えられたことから、そ上実験と並行して、用水中の流入動物量についても調べた。

2組の実験水路の下から2段目のプール(P2)に供試魚を25尾と50尾ずつ、それぞれ密度を変えて収容し、90分間毎のそ上数を求めた。実験開始後15分毎の計数時に、2段そ上して最上段のプール(P4)に達したも

魚道型実験水路におけるサクラマス幼魚のそ上行動

のをそ上数とし、実験終了時に P 1 にいたものを降下魚とした。観察は、午前10時15分から翌日の午後 0 時 15 分までの間の15時間帯について行った。注水量は両区共毎分40ℓとした。

流入動物は、用水の一部を目合 GG54 のネットで濾過して採集し、時間帯毎の単位水量あたりの個体数を求めた。実験時の気象条件は、10月18日の開始時から同日の夜半までは曇りで、午前 0 時過ぎに雨が降り始め、夜明けから終了時にかけては強い降雨が続いた。

各時間帯毎のそ上、降下率を図 4 に示す。25尾収容区の日周変化は明確でなく、午後 5 時15分から翌朝 5 時 15 分までの 7 回の時間帯を夜間とし、これ以外の 8 回を日中として比較すると、そ上率は日中34.0%、夜間 30.9%、降下率はそれぞれ46.0%、47.4%と差がなかった。一方、収容密度の高い50尾収容区ではそ上率は日中56.3%、夜間30.6%、降下率はそれぞれ28.3%、46.6%と、明らかに日中のそ上率が夜間に比べて高いという結果が得られた。しかし、悪天候により明確な照度変化がなかったためか、前の実験結果から予想されたような大きなそ上量変動はみられなかった。

実験用水を濾過して採集された流入動物は、主に小型の端脚類 (*Anisogammarus sp.*) で、この他にユスリカとオナシカワゲラの幼虫、ミミズが出現した。採集濾過水量から各実験水路内を流下した餌対象動物の個体数を推定すると、各時間帯毎に 0 ~ 25 個体 (平均13.4個体) で、この値は実験魚のそ上行動数に比べてはるかに小さく、しかも流下動物量とそ上数の間に関連性はみられなかった。このことから、この実験では餌料としての流入動物がそ上行動に与える影響は無視されると判断した。

そ上行動の日周期性に関する 2 つの実験結果から、時間帯の違いや供試魚の分布密度がそ上行動に影響を与えることが伺われた。このため、以後の各種条件下での比較試験を行うに当たっては、一定の条件を持つ対照区を設ける必要性が指摘された。

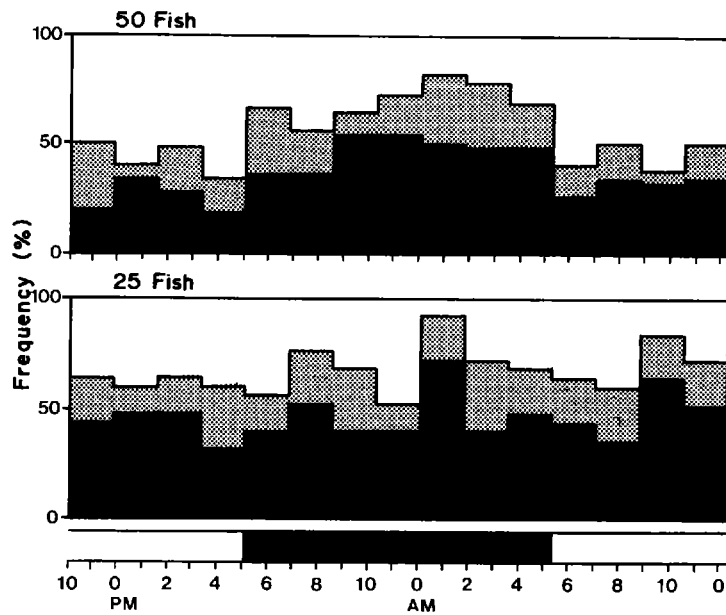


Fig. 4. Diurnal fluctuations on upward (□) and downward (■) movements of fish, placed in the pool-P2 during 90 minutes under the different fish densities.

図 4 そ上数と降下数の日周変化。密度を変えて 2 基の水路の P2 に収容し、90 分間に P4 に達したそ上魚、実験終了時に P1 にいた降下魚、P2 と P3 にいた魚の比率 (%) で図に示す。□ : そ上魚 ■ : 降下魚 ▨ : その他

実験2 プール水深とそ上行動

プール水深がそ上行動に与える影響を明らかにするため、プール水深を変えながらそ上率の差を比較観察した。

表1 水深を変えたプールからのそ上率。各実験区とこれに対応する対照区（水深15cmで一定）の値を示す

Table 1. Rate of ascent from a test pool with different depth to the upper pool

Water flow (ℓ /min.)	Depth of test pool (cm)	Rate of ascent (%)					
		Experimental			Control (15cm depth)		
		Test-1	Test-2	Mean	Test-1	Test-2	Mean
40	0	0	—	0	60	—	60
	2.5	28	20	24	44	58	51
	5	28	28	28	42	40	41
	10	32	50	41	26	54	40
80	0	6	2	4	52	50	51
	2.5	12	16	14	40	46	43
	5	32	50	41	50	52	51
	10	38	56	47	40	44	42

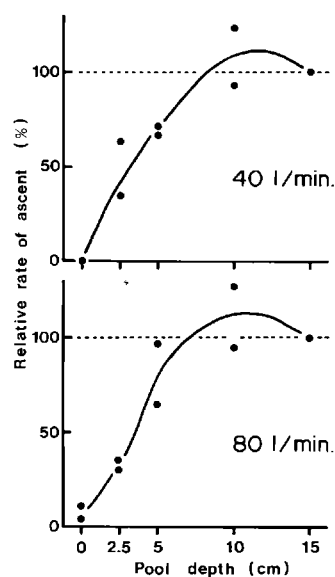


Fig. 5. Relation between pool depth and relative rate of ascent under the different water flow. Relative rate of ascent is percentage of number of fish ascending from the test pool with different depths to number of ascent fish in control group: in Exp.2

図5 プール水深とそ上度合の関係、そ上度合は対照区（水深15cmで一定）のそ上尾数に対する水深を変えた実験区のそ上尾数の比率(%)

実験区と対照区の2本の水路のそれぞれの最下段のプール(P1)に供試魚を50尾収容し、水深を変えた2段目のプール(P2)を通過してP3, P4に達した魚を15分毎に計数し取り上げた。P2の水深は水を流さない状態で、0, 2.5, 5, 10cmの4段階として対照区(15cmで一定)と比較した。それぞれの水深について、流量を毎分40 ℓ と80 ℓ の2段階設定し、それぞれの水量で2回ずつ、計4回の実験を行った。実験時間は1時間とした。

各実験区毎のそ上率を表1に示す。そ上率は0%(水深0cm, 流量40 ℓ /分)から60%(15cm, 40 ℓ /分)の範囲で変化し、水深が増すにつれてそ上率も高くなる傾向がみられた。対照区(水深15cm)のそ上数を100%として各水深の実験区毎のそ上度合を求め図示したのが図5である。0cmから10cmまでは水深の増加と共にそ上度合も高まるが、10cmから15cmに至る間でわずかながら低下傾向を示した。水深が浅い時にそ上率の低い要因としては、水深が不足するため十分な跳躍が出来にくいということの他に、プール内の平均流速が早まり、そ上のための体制を整えにくく、流下されやすいということも観察結果から指摘出来る。流量が多い時(80 ℓ /分)に水深0cmにおいても数尾がそ上したが、これは、水の落下域の裏側に魚が入り込み落水の裏側からの跳躍によりそ上したものである。

実験3 注水量の相違とそ上行動

プール内に落下・流入する水量の違いが、そ上能力に与える影響を確かめるため、注水量を変えながらそ上率及びそ上形態の違いを比較した。

実験区と対照区の2本の水路のそれぞれの下から2段目のプール(P2)に供試魚を取容し、最上段のプール(P4)に達した魚を10分毎に計数の上取り上げた。また、1時間の実験終了時にP3までのぼっていたものもそ上数に含めた。注水量は、毎分20, 25, 30, 40, 50, 65, 80ℓの7段階とし、対照区を40ℓとして、実験区毎に比較した。比較観察は各注水量毎に、25尾の供試魚で2回、50尾で1回、計3回ずつ行った。

注水量別のそ上率を表2に示す。そ上率は24% (50, 80ℓ/分) から76% (20ℓ/分) の範囲で変化した。しかし、対照区の値の変化が大きく、外圍環境などによりそ上率が影響を受けていることが明らかであったことから、対照区の値をもとに標準化してみると、図6に示されるように、同じ注水量でも実験時による変動幅が大きく、注水量の相違によるそ上率の差は明確でない。同様に、流下度合について、実験終了時に最下段(P1)にいた魚の尾数を、対照区と比較してみると、図6に示されるように、これも変動幅が大きいものの、注水量が少ない時に流されにくい傾向がみられた。

落下水に向かっての跳躍回数に対するそ上に成功した回数の比率(そ上成功率)を実験時の一定時間内に目視計数し、注水量別に求めてみたところ、図7に示されるように、20ℓ/分では29.9%と成功率が低いものの、注水量の増加と共に高くなり、65ℓ/分で80%と最高値を示した。しかし、80ℓ/分では若干低下した。次に、そ上時の跳躍の形態を観察したところ、落下水の中を泳ぎのぼる方式(Swimming type)と、一旦空中に飛び出してから上のプールに飛び込む方式(Jumping type)に大別されたことから、そ上に成功した時のそ上形態を観察し、これら2方式に分けて計数してみた(図8)。注水量の少ない時は、跳ねてのぼる比率が高く、20, 25ℓ/分では約半数がこのそ上形態を示した。注水量がふえるにつれ、泳ぎのぼる度合が高まり、60ℓ/分では95.1%とほとんどがこの方式となったが、80ℓ/分では再び跳ねてのぼる度合が増した。これらの傾向はそ上成功率の変化と良く一致した。注水量の少ない時は、泳ぎのぼろうとしても水量不足のため推進力を得ることが出来ずに失敗を繰り返し、やがて跳ねて上のプールに飛び込む傾向が多い。また、これら一度跳ねてそ上した魚は、次々と連続して上の段へも跳ねてのぼることが観察された。これに対して、注水量が多い場合は、十分な水量が上のプールから流れ落ちているため、背中を出しながらも水中を泳いでそ上し、しかも一度で成功する度合が高かった。

表2 異なる注水量の水路でのそ上率。各実験区とこれに対応する対照区(水量40ℓ/min.)の値を示す。供試魚はTest-1, 2が25尾, Test-3が50尾

Table 2. Rate of ascent under various conditions of water flow supplied into experimental channel. 25 fish were used in Test-1 and 2, and 50 fish in Test-3

Water flow (ℓ/min.)	Rate of ascent (%)					
	Experimental			Control (40 ℓ/min.)		
	Test-1	Test-2	Test-3	Test-1	Test-2	Test-3
20	52	76	58	36	40	58
25	44	56	46	40	24	28
30	52	44	40	64	52	44
40	28	56	52	40	64	58
50	24	40	50	20	16	62
65	40	40	28	36	16	42
80	28	24	44	24	28	36

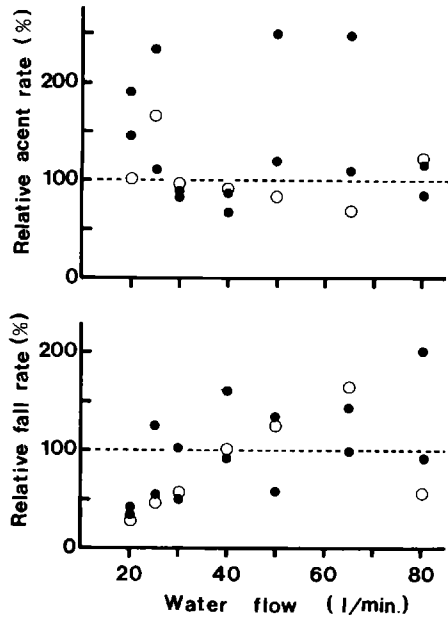


Fig. 6. Relation between water flow and relative rate of ascent (A) and falling (B). Relative rate is percentage of the number of fish moving upstream or downstream under the various flow conditions to number of moving fish in a control group: in Exp.3

図6 注水量とそ上度合及び降下度合の関係。そ上・降下度合は、対照区(15 l/min.で一定)に対する、水量を変えた実験区でのそれぞれの尾数の比率(%). 黒丸は25尾, 白丸は50尾取容時の値

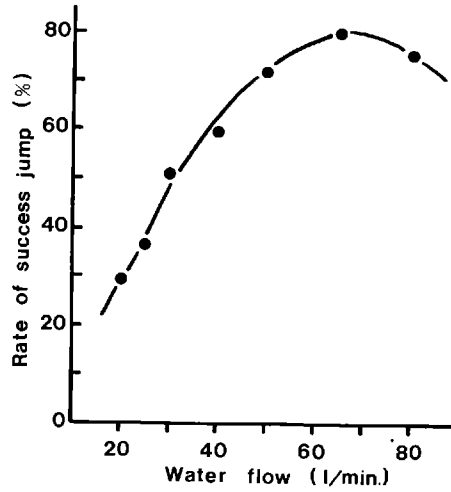


Fig. 7. Relation between water flow and rate of success jumps ascending upper pool to total jumps: in Exp.3
 図7 注水量とそ上成功率の関係。そ上成功率は、全跳躍数に占めるそ上成功数の割合(%)

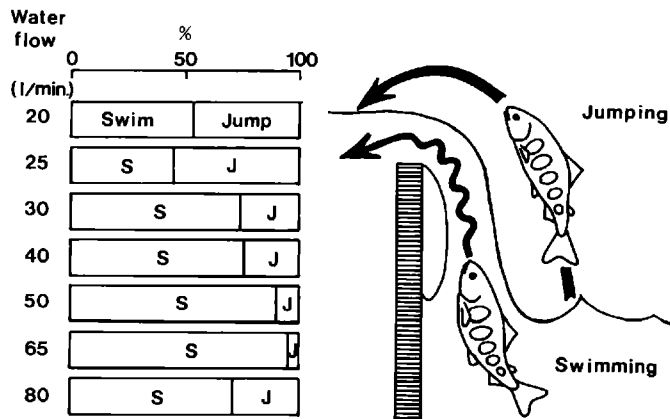


Fig. 8. Percentage composition of two types of ascent form under various water flow conditions: in Exp.3

図8 注水量とそ上形態の構成比との関係。そ上形態は、図に示す「跳ね上る方式」と「泳ぎ上る方式」の2式に大別した

実験4 隔壁の形状及び配列とそ上行動

サクラマス幼魚が生活の場とする河川には単純な流れは少なく、種々の障害物により流路が変更され渦流が到る所に発生する。また、魚道には、水量の減少時にも一定の越流水深が保てるように隔壁に各種形状の切り欠け (notch) を備えていることが多い。これらプール隔壁の切り欠けの存在及びその配列の仕方がそ上行動に与える影響を実験的に確かめ、流路の変化とそ上行動について検討した。

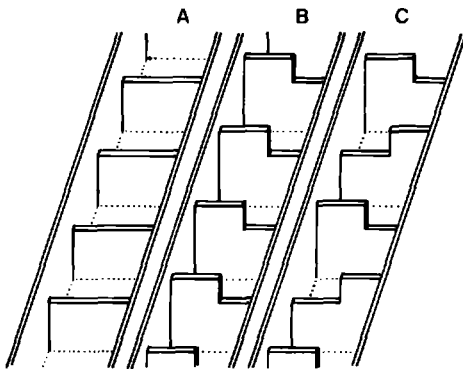


Fig. 9. Full weir(A) and notched weir(B, C) used in Exp.4, and their placements showing in-line(B) and alternate(C) arrangements

図9 実験4で使用したプール隔壁の形状と配列。A：切り欠けのない隔壁，B：矩形の切り欠けを持つ隔壁を片側に並べて配列，C：矩形の切り欠けを左右交互に配列

(1) 切り欠けの有無

並置した2基の実験水路のうち、一方の水路には切り欠けがない水平な隔壁 (高さ20cm) を、そして他方には高さ25cm・幅20cmの板の右半分 (下流から見て) の上端から5cmの直角形の切り欠け (rectangular notch) を持つ隔壁をすべてのプール間 (4箇所) に取り付け (図9のB)、それぞれのそ上状態を比較した。

最下段のプール(P1)に50尾の供試魚を収容し、最上段(P5)に達した魚を15分毎に計数し取り上げ、90分間の実験終了時までの合計をそ上数とした。注水量は毎分40, 60ℓとして、それぞれ4回ずつ比較した。

8回の実験観察では、1回だけ切り欠けのない方がそ上率が高く、他にもう一度同率のものがあったが、他の6回は切り欠けを持つ隔壁でのそ上度合が高いという結果が得られた (表3)。そ上率の低い時に2~3倍の値が示されたが、そ上率の高い時にはその差は少なかった。

表3 隔壁の切り欠けの有無によるそ上率の対比。切り欠けのない隔壁 (図9のA) と片側に切り欠けを配列した隔壁 (同図のB) での比較

Table 3. Comparison of ascending rate between channels with full weir and in-line setting of notched weir under different flow conditions

Test No.	Water Flow (ℓ/min.)	Rate of ascent (%)		A/B
		Notched weir (A)	Full weir (B)	
1	40	14	4	3.50
2		32	10	3.20
3		50	50	1.00
4		46	50	0.96
5	60	26	12	2.17
6		58	52	1.12
7		50	46	1.09
8		64	42	1.52

表4 隔壁の切り欠けの有無と注水量の違いによるそ上成功率及びそ上形態の変化

Table 4. Comparison of success jump rate and the ascent form between channels placing weir with notch and full weir

Water flow (ℓ/min)	Shape of weir	Rate of success jump(%)	Percentage of swimming-type ascent	
			in success jump	in failure jump
40	Notched	63.2	86.7	85.7
	Full	30.5	57.9	85.5
60	Notched	55.6	74.3	76.8
	Full	42.6	79.8	89.3

そ上行動の内訳を、そ上成功率とそ上形態で見ると、表4に示されるように、流量40ℓ/分では切り欠けのない場合にそ上成功率が30.5%と低く、しかも跳ねてのぼる割合が高いのに対し、切り欠けがあると、成功率が約2倍でしかもほとんどが泳ぎのぼる方式となり、そ上効率の良いことが伺われた。水量が60ℓ/分に増加すると、両者の差は少なくなり、泳ぎのぼる割合はむしろ切り欠けのない方が高くなるが、成功率はやはり切り欠けのある方が高い。このことは、隔壁の越流部の水深が供試魚の体高とほぼ等しい2cm前後となる条件さえ作られれば、そ上効率には余り差が生じないことを示す。

(2) 切り欠けの配列

並置した2基の実験水路のうち、一方の水路には実験4-(1)で用いた切り欠けのある隔壁をすべて片側(右側)だけに切り欠けが並ぶように配置し、そして他方は切り欠けが左右交互になるように隔壁を取付け(図9のC)、そ上状態を比較観察した。

最下段のプール(P1)に50尾の供試魚を収容し、最上段(P5)に達した魚を15分毎に計数し取り上げ、90分間の実験終了時までの合計をそ上数とした。注水量は毎分40, 60ℓとして、それぞれ6回ずつ比較した。

切り欠けを片側のみに直列配置した水路のそ上率が12回の実験のすべてで高く、交互配置水路のそ上割合はこれらの42.1%から87.5%にとどまった(表5)。注水量の違いによる両者のそ上割合の差は明確でなかった。そ上魚の様子を観察したところ、片側配置した水路では1段目をのぼった後に休むことなく、次の段に向う連続そ上例が良く見られたのに対し、交互に配置した水路では、連続そ上はほとんどなく、のぼると次の隔壁に直進し、水の落下しない所でジャンプしたり水面から頭を出すことが多く、また流れと共に下段に落下する割合も高かった。最下段のプール(P1)から2つ目のプールにのぼった後に、さらに上の段へ連続してそ上した割合を観察結果で示すと(図10)、交互配置の場合は約95%が一段だけで中断してしまい、残りのわずかが2段目まで、3段目までの連続そ上は全く見られなかった。一方、片側配置では1段だけのも

表5 隔壁の配列の違いによるそ上率の対比。片側に直列に並べた場合(図9-B)と左右交互の配列(同図-C)での比較

Table 5. Comparison of ascending rate between channels of alternate and in-line placements of weir with notch

Test No.	Water flow (ℓ/min)	Rate of ascent (%)		A/B
		Alternating (A)	In-line (B)	
1	40	28	34	0.82
2		28	32	0.88
3		24	42	0.57
4		30	40	0.75
5		38	64	0.59
6		34	62	0.55
7	60	22	36	0.61
8		26	34	0.76
9		16	38	0.42
10		44	66	0.67
11		38	54	0.70
12		48	68	0.71

のは65%前後で、最上段までの4段連続そ上するものも10%近くあり、明らかに両者でそ上形態が異なった。交互配置で見られた連続そ上しにくい条件が、結果としてこの水路のそ上率を低下させたものと考えられる。

実験5 陰影とそ上行動

魚の行動が明暗条件下で異なることは、そ上の日周期性からも知られた。ここでは、日中の暗条件下でのそ上行動を、水路全体あるいはその一部を遮光して比較観察した。

(1) 水路全体を遮光した場合

並置した2基の水路の一方の側壁の上に合板製の遮光板を載せ、光は注水部と配水部からわずかに漏れるだけの暗条件とした。もう一方は通常と同じく上方から自然光が入る明条件として比較した。

供試魚50尾をP1に収容し、P5に達したものを15分毎に計数して取り上げ、90分間の実験終了時までの合計をそ上数とした。注水量は40ℓ/分で、実験4で使用した隔壁を切り欠けが片側に並ぶように直列配置し、6回の比較実験を行った。

6回の実験すべてで明条件の水路のそ上率が高く、遮光した暗条件の水路では明条件の16.0%から52.2%、平均36.6%にとどまった(表6)。

表6 明暗各条件下でのそ上率の比較
Table 6. Comparison of ascending rate under darkness and light photo-conditions in daytime

Test No.	Rate of ascent (%)		A/B
	Darkness (A)	Light(Control) (B)	
1	24	54	0.44
2	20	48	0.42
3	24	46	0.52
4	26	82	0.32
5	8	50	0.16
6	18	54	0.33
Mean			0.37

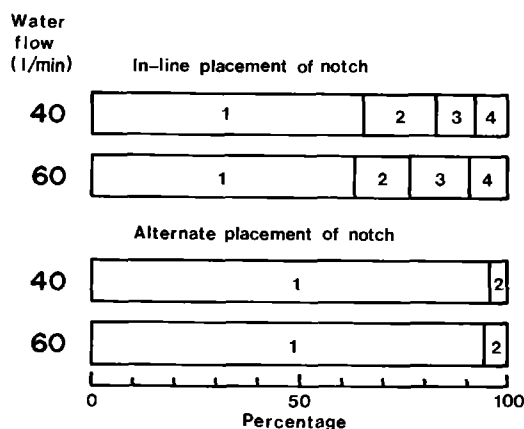


Fig. 10. Percentage composition of number of successive ascending steps from the pool-P1 in fish-way with different placement of notch on weir. Numeral in graph shows the number of steps in Exp 4-(2)

図10 隔壁の切り欠けの配列の違いによる連続そ上段数の変化。図中の数字は最下段のプール(P1)からの連続そ上段数を示す

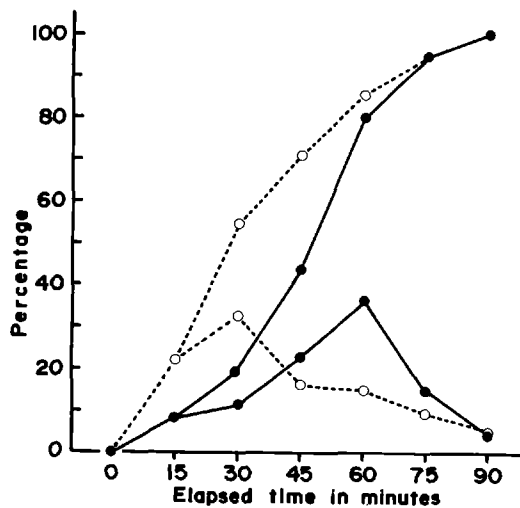


Fig. 11. Rate of fish ascending every 15 minutes to total number of ascent fish in darkness (solid circle) and light (open circle) conditions, and the cumulative percentage: in Exp.5-(1)

図11 明暗各条件下での15分毎のそ上数とその累積数の比較。それぞれのそ上数累計に対する比率(%)で示す。黒丸：暗条件、白丸：明条件

時間開始後の経過時間とそ上量の変化を、それぞれ6回の実験のそ上数を合計しての時間帯毎のそ上数の割合から求めると、明条件では、開始後すぐから活発にそ上し、30分後にピークがあるのに対し、暗条件では初めはそ上が不活発で、ピークは60分後であった(図11)。

(2) 水路の一部に影を作った場合

2基の水路の一方の下半分(FP, P 1, P 2), 中間(P 2, P 3, P 4), あるいは上半分(P 3, P 4, P 5)のそれぞれの側壁上に合板製の日覆いを置き、遮光しない他方の水路(対照区)とのそ上度合を比較した。

異なる3種の陰影条件下での実験を、それぞれ5回ずつ計15回行った。その他の実験条件は5-1と同様である。

水路上に影の部分がある時のそ上率が明条件の対照区より高い値を示したのは15回中2例にすぎず、いずれの条件下でもそ上行動が抑制される傾向を持つことが知られた(表7)。しかし、全体を遮光した時と比較すると、どの場合もそ上率は高く、これら3種のうちでは上方に陰影部分のある実験区で比較的高い値が示された。経過時間に伴うそ上量の変化は、下方の影の時にそ上が遅れ、上方の時にあまり差がなく、中央の時はそれらの中間の傾向を示した(図12)。

考 察

一連の実験観察は、それぞれ異なる目的を持って行われたため、これらの実験の間には必ずしも一貫性がなく、サクラマス幼魚のそ上行動の側面を断片的に確かめた結果となった。ここに各実験項目毎にその結果を考察して見る。

日周期性：サケ科魚類のそ上行動の日周期性は、産卵そ上期については数多い報告があり(Banks 1969), 日中に活発になるという例が多いものの、逆に夜間に多くなるという観察結果もあり、他の刺激要因の介入、魚種や時期、場所による違いの影響も考慮しないと判断が難しい。今回の実験で、夜間に比べ日中にそ上活動が活発化する傾向のあることが確かめられ、特に魚の収容密度の高い時に顕著であった。サケ科魚類はその跳躍に先立ち方向と障害物の高さをあらかじめ視覚で確かめるため、低照度下では跳躍行動が停止するという観察結果(Stuart 1962)があるが、夜間にもかなりの数がそ上したことは、この結果と矛盾する。このことは、落差が少なく(5 cm), 流量さえ十分であれば、空中に一旦出て跳ね上ることなく、落下水の中を泳いで上ることが可能で、暗条件下でも視覚が関与しないそ上が支障なく行われることを示したものと思

表7 水路の一部に影のある時のそ上率の比較

Table 7. Comparisons of ascending rate under the different photoconditions shading a part of channel

Test No.	Rate of Ascent (%)								
	Lower part*			Middle part*			Upper part*		
	Shaded	Light (Cont.)	A/B	Shaded	Light (Cont.)	A/B	Shaded	Light (Cont.)	A/B
1	42	66	0.64	40	58	0.69	38	72	0.53
2	48	40	1.20	44	58	0.76	46	60	0.77
3	30	58	0.52	30	42	0.71	58	66	0.88
4	28	70	0.40	40	62	0.65	64	62	1.03
5	46	72	0.64	22	52	0.42	48	70	0.69
Mean			0.68			0.65			0.78

* Shaded parts showing in Fig. 12

魚道型実験水路におけるサクラマス幼魚のそ上行動

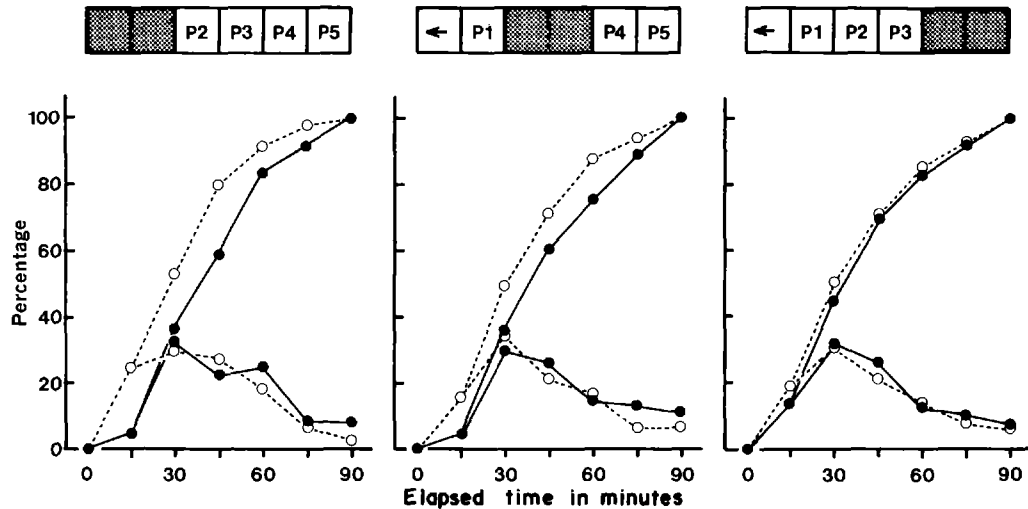


Fig. 12. Comparison on rate of fish ascending every 15 minutes to total number of fish in partly shading (solid circle) and light (open circle) conditions, and the cumulative percentage: in Exp.5-(2)

図12 実験水路の一部に陰影のある時の15分毎のそ上数とその累積数の比較。各区の上部に実験水路への日覆い板の配置部分を示す。黒丸：暗条件、白丸：明条件

われる。河川生活期のサクラマス幼魚は、夜は摂食活動をほぼ停止し（真山・大熊 1983）、流れの弱い岸などに移動する。河川内の生態が良く似ているギンザケ稚魚でも同様の行動が観察されている（Hoar 1958）。このため、本実験のように夜にもかかわらず強い流れの中に置かれることは通常はありえない。したがって、この日周期変化は、強い流れの刺激が常に加わる条件下で生じた結果といえる。

また予備試験の結果としては、そ上活動中の魚でなくても、走流性が刺激されれば、このような実験水路内でもそ上活動が活発化し、観察が比較的容易に出来ることが知られた。また、同一日の中でも時間帯によりそ上率が大きな差が生じたことから、外圍環境を変えてのそ上活動の変化を確かめる実験を行う場合、少なくとも2つ以上の同じ設計の水路を備え、つねに同一条件を持つ対照区を設けて比較し、標準化して実験区のそ上率を検討することの必要性が指摘された。

プール水深：水深を5段階に変えたプールを供試魚が通過してそ上出来た度合は、2種類の注水量のいずれの場合でも、水深の増加と共に高まり、水深10cmで最大となり、15cmでは再び低下するという傾向を示した。このような傾向は、ヒメマス親魚（白石 1972）、サケ親魚（真山 未発表*）でも同様にみられる。

水深が浅過ぎる場合はそ上しにくいだけでなく、流下されやすいこともそ上率の低下の要素となり、また深過ぎる時はプール内の平均流速の低下やそ上魚の定位する底部の水利状態の変化によって、走流性を引き起こす刺激が減少して、そ上欲の減退を招いたものと思われる。

プール水深を0 cmとした時にも、注水量の多い条件下でそ上に成功した魚が観察されたことは、いかなる悪条件下でも、そ上の可能性を求める能力を、これら人工飼育魚でさえ備えていることを示したものと言え

* 平均尾叉長約60cmのサケ親魚を用いたそ上実験で、プール水深75cmの時のそ上率が最大で、それ以浅、以深ではそれぞれ低下した。特に深い時には跳躍回数も減少した。

る。

その上率の高かった水深を魚体長との比で示すと、この実験では約1:1であった。前記したヒメマス親魚では、水深20cmで最も上率が高く(白石 1972)、これには供試魚の体長の記述がないが、この水深とほぼ同じ位の体長と推定されることから、両魚種とも、魚体長とほぼ等しい深さがあれば上効率の高いことが知られた。実際に使われているサケ・マス用魚道の設計水深は、米国では150cm(U.S. Army Engineer Division 1973)で、その上魚の中で最も大型のマスの平均体長を約90cmとすれば、1:1.7という値である。しかし、跳躍による上成功率の高い、滝の高さとプール水深の理想的な比率は1:1.25であるという見解(Stuart 1962)からは、プール間落差を含めた検討が必要なることも示唆される。

注水量：流量の変化がサケ・マス親魚の河川上を促すことは、広く知られている(Prichard 1936, Davidson et al. 1943, 真山・高橋 1977)。しかし、日中の生活の場を河川の複雑な流れの中に置くサクラマス幼魚が、流量の変化にどのように対応して生活しているかは良く知られていない。プールへの注水量を7段階に変えての実験で、水量の少ない時には降下率が低く抑えられるため、上率が高くなる傾向が示されたものの、全体としては流量変化による明確な差は認められなかった。上率だけでみる限りは、水量の変化は上それにそれほど影響を与えなかったと言える。しかし、少ない水量のときは、跳ねて上る方式(jumping type)の占める比率が比較的高く、しかも上成功率が低いが、水量の増加と共に泳ぎ上る方式(swimming type)の割合が高くなり、上成功率も高くなること、そしてさらに水量を増した時には再びそれぞれが低下することが知られた。

特別に設計された照明付の“endless fishway”で、ベニザケ親魚が5日間全く休まずに6,000feetを越える高さまでのぼり続け、しかも生化学的な検討によっても疲労が認められなかったこと(Collins et al. 1962, Collins et al. 1963)からは、適当な水理条件を持つ魚道を泳ぎ上ることは上魚にとって大きな負担とならないことが伺われる。このため、跳躍に伴うエネルギーの消費や魚体の損傷割合が少なく、しかもプール内の滞留時間の短い効率の良い上をもたらしするためには、注水量調節により自然な形で泳ぎ上る形態での上割合が高い水理条件を作ることが重要であることが知られた。

隔壁の形状と配列：ある限界点までの注水量の増加は、上効率を高めることが知られた。一般の魚道には水量の少ない時に上効果を増すことを期待して切り欠け(notch)が備えられていることが多い。隔壁の半分だけに水が通るように切り欠けを付けて上行動の変化を見たところ、水量の少ない時には上効果の高いことが知られた。しかし、水量が多い時にあまり差がなくなった。従って、水量の少ない時には、切り欠けを持つことにより上欲を増進させ、しかも上し易い条件を作る効果があると思われる。その一つの要因としては越流部の幅を半分にするにより越流部の水深が約2 cmに増して、魚の体高とほぼ等しくなり、上りやすくなったことが考えられる。

また、この様な隔壁の切り欠けの配列を片側に揃えた方が、切り欠けを交互に並ぶ様にしたものより上率が高く、しかも連続した上が多く見られた。この結果や上時の魚の行動から見て、交互の配列によって生じるプール内の渦流が上を断絶したり、下段への落下の増加をもたらしたようである。あゆの魚道には通常切り欠けが左右交互に付けられ、水流のエネルギーの消散を図っているが(小山 1967)、サケ・マス親魚のように大型で遊泳力の強い魚種では、むしろ渦流による上行動への混乱の方が害が大きいことが示唆されている(Clay 1961, Sakowicz and Zarnecki 1954)。

これらの結果から、サクラマス幼魚の効率的な上は、泳力が最大に発揮できる越流水深の確保と、方向感覚を混乱させない様な流れによってもたらされることが確かめられた。

陰影：日中に水路全体を遮光し、ほぼ暗黒状態にした時の上率が、明条件のものに比較して著しく低かったことは、明らかに照度の低下が影響を与えたもので、走流性の刺激だけでは上活動が促進されないことを示している。このことは日周期活動の実験結果とは幾分矛盾する。しかし、この実験では日中に突然暗条件に移行するという、自然光下のゆるやかな照度変化とは異なる環境の急変を行ったことから、これの影

響を考慮する必要がある。このような急激な光の消失がそ上活動を鈍らせたことは、実験経過時間とそ上率の変化で、そ上のピークが30分も遅れたことから明らかである。しかしこの条件下でも1時間を経過した後にはそ上率が減少したことは、他の実験でも一様にみられた現象と同じで、この程度の時間を経ると走流性への刺激が失われていくことを意味するのかもしれない。

水路の一部を遮光した実験でも、やはりそ上率は明条件区に比較すると低く示された。しかし、影のある場所により少しずつ異なるそ上行動がみられた。そ上率及び時間の経過に伴うそ上活動の変化から、3つの異なる陰影個所を持つ水路の魚の行動を比較すると、暗い所に収容された魚は、明るい部分に出るのをためらうが収容されたプールの高い魚の分布密度と流れの刺激により徐々にそ上を始める。そ上路の途中に影がある場合、ここまでそ上してもこの部分でそ上が中断され、そのまま留まるものが多く、ここから上流へのそ上率は他に比べ低い。上流部のゴール地点に影がある時は、暗い所に入るのをためらうものが若干いるためそ上率は対照区に比べると若干低いものの、他の2つの実験区との比較では高く、そ上活動時間は明条件区とほとんど差がない。これらのことから、影の存在はこの部分に入るのをためらわすが、ここから明るい部分に出る時の躊躇に比較すればその割合は低いことが示唆された。

このような照度変化は、水路全体を遮光した実験区のようにほとんど完全な暗黒条件とは異なり、それぞれの覆板の下が薄暗くなる程度で、自然条件下でも良くみられる照度変化である。河川生活期のサケ科魚類は、魚種により、発育段階により明暗それぞれの条件を好む(Hoar et al. 1957, Gibson and Keelenside 1966)ものの、一般にサケ・マス幼魚は明暗のどちらかだけを選択する傾向は示さないといわれる(Hoar et al. 1957)。サクラマスによく似た河川生活をおくるギンザケは、光と影がたびたび変わるような照度変化に馴れやすく、しかも広範囲の照度で活動する(Hoar 1958)ことから、サクラマス幼魚でも、影の存在は活動性を低下させるものの、暗黒条件下でなければ広範囲な照度変化に順応できるものと考えられる。

産卵期のサケ・マス親魚のそ上について、暗黒条件の魚道に入るまでは時間がかかるが通り抜けるのに要した時間はむしろ短い(Long 1959)という実験結果や、パイプの中を通過させる実験で魚種によって異なるが、パイプ内の照明は通過速度を多少早めるものの、暗黒条件下でもなんら支障なく通過する(Slatick 1970)ことなどが確かめられている。これら流水条件下での観察結果からも、理想的な水理条件さえ保たれば、暗黒条件下でも走流性の刺激によりそ上活動が引き起こされること、そして照度の急変による一時的な活動の低下は避け難いことが示されており、今回の結果とも一致する。

これら一連の実験に用いたサクラマスは、その淡水生活期に攻撃行動を伴ったなわばりを持つことが知られている(久保 1976, Maeda and Hidaka 1979)。ギンザケの攻撃行動については、河川内幼魚の移動を促す重要な要素である(Chapman 1962)ため、光や流れに対する反応を確かめる実験時に、異なる場所の選択をもたらすこともあることが指摘されている(Hoar et al. 1957)。本実験では、小さなプール(容積9.0~10.5ℓ)に高密度に供試魚を収容(50尾の時には、魚の容積がおよそ0.5ℓ)しており、このような行動は生じにくかったものと思われる。そ上魚と残留魚の魚体サイズは、表1のようにそ上魚が有意に大きい場合もあるが、差の認められないことが多く、これら一連の実験結果に影響を与えるような、供試魚間の順位性をめぐる関係の存在は認められなかった。

魚体の大きさとそ上能力については、大型個体ほど上流へ向かう傾向の強いことが放流魚で確かめられている(本多 1981)。しかし、今回の実験条件下では明確な差が生じなかった。その要因として、プール間落差が5 cmで小型魚でも容易にそ上出来たこと、そしてそ上距離(段数)が短いことなど、能力差が生じにくかったこともその一つと考えられた。従って、魚体の大きさととの関係については、今回は論議を控えた。

川の流れの中にいる魚の観察は、浅くて流れの早い瀬に生活している場合に特に難しく、やむを得ず水槽や人工水路を用いることが多い。今回の実験に用いた隔壁の付いた小型の魚道型水路は、色々条件を変えての比較試験が簡単に出来るため、そ上活動の観察から、遊泳行動の一面を明らかにすることが出来た。このような実験方法は他のサケ科魚類の幼魚にも応用出来、さらに、大型魚を対象とした魚道に必要な条件を明

らかにするためにも、このような小型魚を用いた小型水路での模型実験が有効で簡便な方法と思われる。

また、これらの実験は、野外の池で飼育されているサクラマス幼魚を供試し、その飼育水を流して、自然光のもとで行われた。したがって、気象条件によってそ上行動が影響を受けたと考えられることも数多く見受けられたが、自然界での魚の行動に近づけるためには、このような条件下での実験方法も意義があると思われる。

引用文献

- Banks, J.W. (1969): A review of the literature on the upstream migration of adult salmonids. *J. Fish. Biol.*, **1**, 85-136.
- Chapman, D.W. (1962): Aggressive behavior in juvenile coho salmon as a cause of emigration. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, **19**(6), 1047-1080.
- Clay, C.H. (1961): Design of fishways and other fish facilities. 1301, Dept. Fish. Canada.
- Collins, G.B., J.R. Gauley, and C.H. Elling (1962): Ability of salmonids to ascend high fishways. *Trans. Amer. Fish. Soc.*, **91**, 1-7.
- Collins, G.B., C.H. Elling, J.R. Gauley, and C.S. Thompson (1963): Effect of fishway slope on performance and biochemistry of salmonids. U.S. Dep. Int., Fish. Wildl. Serv., *Fish. Bull.*, **63**(1), 221-253.
- Davidson, F.A., E. Vaughan, S.J. Hutchinson, and A.L. Prichard (1943): Factors influencing the upstream migration of the pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*). *Ecology*, **24**(2), 149-168.
- Elling, C.H. and H.L. Raymond (1959): Fishway capacity experiment. 1956, U.S. Fish. Wildl. Serv., Spec. Sci. Rept.: Fish. No. 299, 1-26.
- Elling, C.H. (1960): Further experiments in fishway capacity. U.S. Fish. Wildl. Serv., Spec. Sci. Rept.: Fish. No. 340, 1-16.
- Gibson, J. and M.H.A. Keenleyside (1966): Responses to light of young Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *J. Fish. Res. Bd. Canada*, **23**(7), 1007-1024.
- Gauley, J.R. and C.S. Thompson (1963): Further studies on fishway slope and its effect on rate of passage of salmonids. U.S. Dep. Int., Fish. Wildl. Serv., *Fish. Bull.*, **63**(1), 45-62.
- Hoar, W.S., M.H.A. Keenleyside, and R.G. Goodall (1957): Reactions of juvenile Pacific salmon to light. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, **14**(6), 815-830.
- Hoar, W.S. (1958): The evolution of migratory behaviour among juvenile salmon of the genus *Oncorhynchus*. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, **15**(3), 391-428.
- 本多信行・片岡哲夫・星野正邦・網田健次郎 (1981): 在来マス類の放流効果に関する研究—V 河川勾配が急な水域でのヤマメの分散と定着についての観察. 新潟内水試調査研報, (9), 1-9.
- 石田昭夫・小坂 淳・前川光司 (1971): 小川におけるサクラマス幼魚 *Oncorhynchus masou* の生態に関する知見—補遺. さけ・ますふ研報, (25), 29-34.
- 小坂 淳・石田昭夫 (1969): 小川におけるサクラマス *Oncorhynchus masou* 幼魚の生態に関する一知見. 北大水産彙報, **20**(2), 65-74.
- 小山長雄 (1967): 魚道をめぐる諸問題II. 解説篇, 木曾三川河口資源調査団 (KST).
- 久保達郎 (1976): サクラマス幼魚の河川生活期における移動習性, 生理生態, **17**(1/2), 411-417.
- Long, C.W. (1959): Passage of salmonids through a darkened fishway. U.S. Fish. Wildl. Serv., Spec. Sci. Rept.: Fish. No. 300, 1-9.
- Mackinnon, D. and W.S. Hoar (1953): Response of coho and chum salmon fry to current. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, **10**(8), 523-538.

魚道型実験水路におけるサクラマス幼魚のそ上行動

- Maeda, N. and T.Hidaka (1979): Ethological function of the parr marks in a Japanese trout, *Oncorhynchus masou f. ishikawai*. *Zool. Mag.* 88, 34-42.
- 真山 紘・大熊一正 (1983): 河川滞留期サクラマス幼魚の摂餌生態, マリールランチング計画 (サクラマス) プロGRESSレポート, (3), 92-102. 北海道さけ・ますふ化場.
- 真山 紘・高橋敏正 (1977): サケ・マス親魚の生態調査-I 千歳川におけるサケ親魚のそ上活動の日周変動, さけ・ますふ研報, (31), 21-28.
- 大渡 齊 (1983): 県内の魚道とその効果調査, 埼玉水試研報, (42), 117-145.
- Pritchard, A.L.(1936): Factors influencing the upstream spawning migration of the pink salmon, *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum), *J.Biol.Bd.Can.* 2(4), 383-389.
- Sakowicz, S. and S. Zarnecki (1954, translation 1962): Pool passes biological aspects in their construction. *Roczniki Nauk Rolniczych*, 69 (Ser. D): 5-171. (published for the National Science Foundation and the Department of the Interior, Washington D.C.).
- 佐藤善雄 (1983): 階段式魚道の魚類の遡上に関する調査, 秋田内水試事業報告書, (10), 121-128.
- 白石芳一 (1972): サケ・マス類の魚梯そ上能力について (第1報). 関谷分水事業に関する水産現況調査報告書.
- Slatick, E. (1970), Passage of adult salmon and trout through pipes, U.S.Fish.Wildl.Serv., Spec.Sci.Rept.: Fish. No. 592, 1-18.
- Stuart, T.A. (1962): The leaping behaviour of salmon and trout at falls and obstructions, Dept. Agri. Fish. Scotland, *Freshwater and salmon Fisheries Research* (28), 1-46.
- 田中哲彦・石田昭夫・松川 洋・石川嘉郎・薫田道雄 (1971): 人工ふ化サクラマス稚魚の河川放流に関する研究-1報 目名川とその支流における分散と定着についての観察. さけ・ますふ研報, (25), 1-17.
- U.S.Army Engineer Division (1973): Fishway structures at dams and natural obstructions: 14 + V + IX, in *Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria*, Fisheries Engineering Research Program.