

短 報

スタミナトンネルを用いて測定したサケ稚魚の瞬発遊泳速度

大熊一正^{*1}・佐々木正吾^{*2}・和田有正^{*3}・戸嶋忠良^{*4}

^{*1}〒062-0922 札幌市豊平区中の島2-2 水産庁さけ・ます資源管理センター

^{*2}〒089-0563 中川郡幕別町字千住47 水産庁さけ・ます資源管理センター札幌内事業所

^{*3}〒066-0068 千歳市蘭越無番地 水産庁さけ・ます資源管理センター千歳支所

^{*4}〒099-4404 斜里郡清里町字江南807 水産庁さけ・ます資源管理センター斜里事業所

RESEARCH NOTE

Burst Swimming Speed of Chum Salmon Fry measured with a Simple Water Tunnel Apparatus

Kazumasa Ohkuma^{*1}, Shogo Sasaki^{*2}, Arimasa Wada^{*3},
and Tadayoshi Tojima^{*4}

^{*1} Research Division, National Salmon Resources Center, Fisheries Agency of Japan,
2-2 Nakanoshima, Sapporo 062-0922, Japan

^{*2} Satsunai Field Station, National Salmon Resources Center, Fisheries Agency of Japan,
Senju 47, Makubetsu, Hokkaido 089-0563, Japan

^{*3} Chitose Branch, National Salmon Resources Center, Fisheries Agency of Japan,
Rankoshi, Chitose, Hokkaido 066-0068, Japan

^{*4} Shari Field Station, National Salmon Resources Center, Fisheries Agency of Japan,
Konan 807, Kiyosato, Hokkaido 099-4404, Japan

Abstract.— Burst swimming speed (U_b) of chum salmon (*Oncorhynchus keta*) fry were measured with a simple water tunnel apparatus at 8°C. Examined fish were reared in a pond (length, 30 m; width, 5.4 m; depth, 0.4-0.45 m) of the Chitose Hatchery from March 5 to April 20, 1994. U_b of fry was measured individually in a 20 mm diameter acrylic test tube with a 30 cm long swimming space. Burst swimming speed increased with fish length (FL) and the relationship could be expressed as U_b (cm/s) = $2.36FL$ (mm) - 26.23 ($n=142$, $r=0.720$, $p<0.001$) for the absolute value and as U_b (FL/s) = $0.15FL$ (mm) + 11.12 ($n=142$, $r=0.266$, $p<0.01$) for the specific value. These positive relations, especially the increase in the specific value suggests rapid development and improvement of swimming ability during the fry stage.

Key words: chum salmon fry, swimming, burst speed, water tunnel

緒 言

古くから魚類の遊泳については多くの研究がなされ、これらについてはBeamish (1978) や Videler (1993) 等に詳しくまとめられており、サケ・マスについて行

なった研究も少なくない。しかしこれらの多くは淡水生活の比較的長いベニザケ (*Oncorhynchus nerka*)、ギンザケ (*O. kisutch*)、ニジマス (*O. mykiss*) 等の幼魚や未成魚を対象にしており、持続遊泳速度 (sustained speed) や prolonged swimming speed, 臨界遊泳速度 (critical swimming speed, Brett 1964) をあつかった論文が多い。幼稚魚の瞬発遊泳速度 (あるいは突進速度, burst speed) についてはBainbridge (1960) によるニジマス幼魚 (体長10.3-28.0 cm) を用いたものや、

Blaxter and Dickson (1959) のブラウントラウト (*Salmo trutta*, 体長10-40 cm) による報告以外には少なく、サケ稚魚の瞬発遊泳速度についてはまだ十分に明らかとなっていない。瞬発遊泳速度は攻撃行動、捕食者などからの逃避、危険回避、急流の遡上などの緊急時に現れるので (塚本 1991), 放流後の生残に直接関与することが考えられる。そこで著者らはサケ稚魚の瞬発遊泳速度を測定し、それが体成長によってどのように変化するかを明らかにすることを試み、若干の知見を得たので報告する。

材料および方法

測定に供したサケ稚魚は、北海道さけ・ますふ化場千歳事業場 (現さけ・ます資源管理センター千歳事業所) で1993年11月8日と11日に採卵・受精の後、1994年3月5日より幅5.4 m, 長さ30 m, 水深40-45 cmの飼育池で飼育されていた約154万尾の中から任意に抽出した。測定は飼育開始 (3月5日) から放流 (4月20日) までの47日間に計4回 (3月14日, 30日, 4月7日および13日) 行った。この間の飼育状況はTable 1に示した通りで、飼育開始時の稚魚の平均体重は0.31 gであったが、放流日には1.08 gに増加した。途中、密度の高まりによる飼育環境の悪化が懸念されたため、4月1日には約1/2の稚魚を別の池に移し、良好な飼育環境の維持に努めた結果、飼育開始から放流までの間の生残率は99.5%であった。飼育には湧水を用いたため、水温変化は少なく、遊泳速度を測定した日の供試魚取上げ時の水温は、3月14日が8.1℃, 3月20日が8.2℃, 4月7日が7.9℃, 4月13日が8.4℃であった (Table 1)。また、飼育期間を通して排水の溶存酸素量は8 mg/l以上に保たれた。供試魚はタモ網を用いてすくい上げた後すぐにバケツでふ化室へ運び、流水式のコンテナ (容積15 l) に収容した。馴致および

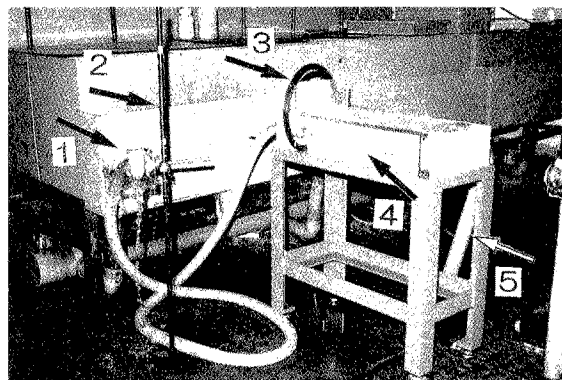


Fig. 1. A photograph of the apparatus for measuring burst swimming speed of chum salmon fry. 1, outlet; 2, stand; 3, water supply; 4, swimming chamber; 5, overflow pipe.

試験用水はいずれも飼育に用いているのと同じ湧水で、その水温は8.1-8.2℃であった。取上げ後実験開始まで約1時間供試魚をコンテナ内で安静状態においた。

遊泳速度の測定に用いた装置は、小林・大熊 (1983) によるスタミナトンネルの排水口部分を本体とは別の支持台に取り付けることにより落差を大きく取れるように改良したもので (Fig. 1), 内径20 mm, 長さ約30cmの透明なアクリル製の遊泳管の一方にホースを接続し、出口との間に落差を生じさせることで管内に流れを発生させ、供試魚を強制的に遊泳させた。測定はこの落差を計測する方法で行なった。あらかじめ落差と流量を測定し、落差(H)と流速(V)の関係式 $V(\text{cm/s}) = 2.750 \cdot H(\text{mm})^{0.599}$ ($r^2 = 0.979$) を得た。流速は上式より求めた。測定可能な最大流速は概略120 cm/sであり、それ以上の流速を得ようとする、測定用水槽の上面の越流を維持できなくなって水面の低下を起こしたり、水面に渦が発生して空気を吸い込んだり、各種の抵抗の増加により損失水頭が極端に増加すること等が生じた。

Table 1. Rearing condition of test fish held at a pond of Chitose Hatchery.

Date	Number of fish (thousand)	Total weight of fish (kg)	Mean body weight (g)	Rearing density (kg/m ³)	Water intake (m ³ /min)	Loading rate* (kg · min/l)	Water temperature (°C)	Daily ration (kg/day)	(%/day)
March 5	1,544	479	0.31	6.9	1.51	0.32	8.0	20	4.2
March 10	1,537	563	0.37	8.1	1.51	0.37	8.1	20	3.6
March 14	1,537				1.51		8.1	20	
March 20	1,536	675	0.44	9.8	1.93	0.35	8.3	20	3.0
March 30	1,535	1,002	0.65	14.5	1.93	0.52	8.1	25	2.5
April 1	857	560	0.65	8.1	1.93	0.29	8.3	13	2.3
April 7	857	642	0.75	9.3	1.93	0.33	7.9	17	2.6
April 13	856	813	0.95	11.8	1.93	0.42	8.4	24	3.0

*McLean et al. (1993)

供試魚はコンテナからすくい出して1尾ずつ測定管の中に静かに収容し、流速1 cm/s以下の微小な流れの中で約5分間馴致のあと測定に供した。測定は馴致後数秒間の間に一定のスピードで排水口を下げて落差を与え、稚魚が下流端の網に接触し遊泳不能となった時の落差から流速を求め瞬発遊泳速度 (U_b) とした。流速負荷 (落差) の与え方および遊泳不能の基準をできるだけ一定とするため、 U_b の測定に関しては著者らのうちの1名が最後まで担当した。流れを与えた時に正の走流性を示さなかった個体や、十分泳ぐことなく流されたと思われる個体は非遊泳魚として区別した。 U_b を測定したすべての供試魚について、測定後MS222で麻酔し、尾叉長 (FL, 以下同じ) と体重 (BW) を測定した。 U_b については絶対値 (cm/s) と供試魚の尾叉長に対する相対値 (FL/s) で表した。

測定管内で管壁に接触しないで稚魚が自由に遊泳できる許容サイズについて、小林・大熊 (1983) では内径22 mm管でFL80 mmとしたが、Hunter and Zweifel (1971) によると遊泳時の尾鰭の振幅は遊泳速度に関係なく体長のほぼ0.21倍であるとしている。この値をもとに尾鰭の高さを体高とほぼ同じと考えて遊泳時に鰭の接触しない最大FLを推定すると、20 mm管では70 mm程度となった。しかし、FLが約55 mmを越えると測定限界の120 cm/sでも遊泳できる個体も見られたことから、FL- U_b の関係式を求める際にはFLが50 mmを超える個体は除外した。

測定結果の分析にあたり、飼育池内の異なる場所 (注水部と排水部) から取り上げた群について、体サイズおよび遊泳速度をt検定を用いて比較したところ、有意差は見られなかったため区別は行なわなかった。これらの結果を基にサケ稚魚の成長に伴う瞬発遊泳速度の変化を示した。

結 果

サケ稚魚の瞬発遊泳速度の変化 正常に泳いだと考えられる群のうち、一部に差の認められた給餌開始前群を除いたFL50 mm以下の稚魚142尾について、FLと U_b の関係を調べた (Fig. 2a, b)。絶対値であらわした U_b はFL35-50 mmの範囲でほぼ直線的に増加し、

$$U_b \text{ (cm/s)} = 2.36FL \text{ (mm)} - 26.23 \quad (n=142, r=0.720, p<0.001)$$

が得られた (Fig. 2a)。また、尾叉長で除した相対値では、ほぼ15-20 FL/sであり大きな変化はなかった。しかし、絶対値と同様相関性を調べたところ、

$$U_b \text{ (FL/s)} = 0.15FL \text{ (mm)} + 11.12 \quad (n=142, r=0.266, p<0.01)$$

が得られ、体長の増加に伴い、相対遊泳速度も増加することが示された (Fig. 2b)。さらに、曲線式の当てはめも行い、2次式による回帰と相関を調べたところ、

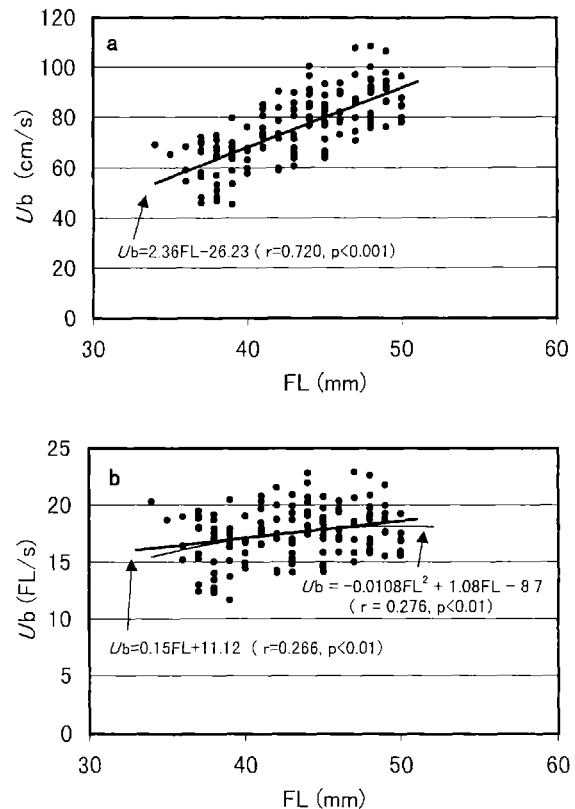


Fig. 2. Changes of the burst swimming speed (U_b) expressed as cm/s (a) and FL/s (b) of chum salmon fry with their growth ($n=142$).

$$U_b \text{ (FL/s)} = -0.0108FL^2 + 1.08FL - 8.7 \quad (n=142, r=0.276, p<0.01)$$

というFLが50 mmのとき U_b が最大値18.3を示す上に凸な式が得られたが、相関係数は直線式とほぼ同程度であった。

考 察

遊泳速度は、疲労することなく200分以上泳ぎ続けることのできる持続遊泳速度、ほんの数秒から20秒程度のごく短時間しか持続できない瞬発遊泳速度、およびその中間域で20秒から200分程度の間持続可能な遊泳速度で、最後は筋肉の疲労のために遊泳できなくなる prolonged speed の3種類に分類される (Beamish 1978)。このうち瞬発遊泳速度は短時間で測定できる上、稚魚を用いる測定装置であれば、小型で扱いやすく、適当な水量さえ供給されれば電気その他の動力源も不要であることから、放流種苗を生産している現場で測定しやすい。

今回得られた U_b 値は小林・大熊 (1983) に比べ高い値となっているが、これは小林・大熊 (1983) では測定に要する遊泳時間を1分程度と比較的長くとして

いたことによると考えられる。Videler (1993) は Bainbridge (1960) のデータをもとに U_b (m/s) $= 0.4 + 7.4L$ (m) という式を導き出している。これに今回用いたサケ稚魚の体長を当てはめると FL30 mm で $U_b = 62$ cm/s (21FL/s), FL50 mm で $U_b = 77$ cm/s (15.4FL/s) と近い値が得られた。また, Blaxter and Dickson (1959) の測定結果を見ると体長約 10 cm のブラウントラウトの瞬発遊泳速度 (2-5 秒間) は約 180 cm/s (約 18FL/s) と示されていることから今回の結果は妥当なものと判断される。Videler (1993) の式でもそうだが, 一般には体長の増加に伴い, 相対遊泳速度は減少する (塚本 1991)。しかし, 本報告における FL が 35-50 mm までの範囲のサケ稚魚ではわずかなではあるが有意に正の相関を示し, 体成長とともに相対遊泳速度も増加することが示された。遊泳は基本的に推進のための鰭 (特に尾鰭), そしてその鰭に力を与える筋肉 (体側筋), およびこれらを支える骨格によって機能化がはかられている。この時期のサケ稚魚の発育について, 帰山 (1986) は FL43 mm ころから硬骨の形成が始まり, 尾部が補強され, さらに尾鰭の湾入は FL30 mm ころから始まり FL50 mm までに完了するとしている。また, 中野ら (1985) は摂餌開始とともにサケ稚魚の蛋白質量は著しく増加するが, 増加速度は FL50 mm 付近で変化すると述べ, さらに FL35-50 mm で筋肉の収縮機能が強化され, FL50 mm 付近から背肉量が増加し, FL50 mm を超えると筋肉の肥大化, グリコーゲン, 中性脂質などの蓄積が増えて体力的にも強化されるとしている (中野 1991)。残念ながら本報告ではこの相対遊泳速度の増加傾向がどのくらいのサイズまで続くのかは明らかにできなかったが, 種々のサイズのサケ幼稚魚の流速と持続遊泳時間を示した曲線 (遊泳特性曲線) をみると浮上直後の FL が 36-38 mm では低い値を示したが, FL が 44 mm 以上に成長するとほぼ一定の高い値を示した*。これらのことから考えると, 体長あたりの相対値で表したサケの瞬発遊泳速度は, 遊泳生活を行なう稚魚から成魚までの期間全体を通してみるとほぼ一貫した減少傾向を示すと考えられるが, 浮上直後から幼魚期までの間には一時的に増加するほどの遊泳能力の向上がなされる可能性を示唆している。

謝 辞

本研究を行なうにあたり, 千歳支所職員の方々に多

大な協力を賜った。また, 本報告を取りまとめるにあたり北海道東海大学帰山雅秀教授には御校閲の労と数々の有益な御助言を賜った。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- Bainbridge, R. 1960. Speed and stamina in three fish. *J. Exp. Biol.*, **37**: 129-153.
- Beamish, F. W. H. 1978. Swimming Capacity. *In* Fish physiology, Vol. 7 (edited by W. S. Hoar and D. J. Randall). Academic Press, London. pp. 101-187.
- Blaxter, J. H. S., and W. Dickson. 1959. Observations on swimming speeds of fish. *J. Cons., Int. Explor. Mer*, **24**: 472-479.
- Brett, J. R. 1964. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon. *J. Fish. Res. Board Can.*, **21**: 1183-1226.
- Hunter, J. R., and J. R. Zweifel. 1971. Swimming speed, tail beat frequency, tail beat amplitude and size in jack mackerel, *Trachurus symmetricus*, and other fishes. *Fish. Bull.*, **69**: 253-266.
- 帰山雅秀. 1986. サケ *Oncorhynchus keta* (Walbaum) の初期生活に関する生態学的研究. さけ・ますふ研報, **40**: 31-92.
- 小林哲夫・大熊一正. 1983. サケマス稚魚の体力測定装置について. さけ・ますふ研報, **37**: 41-44.
- McLean, W. E., J. O. T. Jensen, and D. F. Alderdice. 1993. Oxygen consumption rates and water flow requirements of Pacific salmon (*Oncorhynchus* spp.) in the fish culture environment. *Aquaculture*, **109**: 281-313.
- 中野 広. 1991. 生体成分の生化学的分析. 魚類の初期発育 (田中 克編), 恒星社厚生閣, 東京. pp. 60-70.
- 中野 広・安藤義秀・白旗総一郎. 1985. 成長にともなうサケ稚魚の酸性フォスファターゼ活性, 総蛋白質, RNA および DNA 量の変化. 北水研報, **50**: 71-77.
- 塚本勝巳. 1991. 遊泳生理. 魚類生理学 (板沢靖男・羽生 功編), 恒星社厚生閣, 東京. pp. 539-584.
- Videler, J. L. 1993. Fish swimming. Chapman & Hall, London. 260 p.

*第5回サケマス増殖談話会 (1998年6月, 札幌市) において口頭発表 (大熊一正)