魚の遊泳運動における π 効果現象—I.

水平反転運動

肥 後 伸 夫

(1967 年 12 月 11 日受理)

 π -Effect in the Swimming Motions of Fish—I.

Horizontal U-turn Motion

Nobio HIGO*

In this study, the correlation between the width of the horizontal U-turn motion and the body width of the fish was investigated.

The experiments were carried out in the waterway set up at the bottom of the circulation-type large tank. The fish used were gold fish, *Carassius auratus*. These fish were made to be swimming against the flowing current in the waterway specially prepared with the two pieces of plastic plates (Fig. 1).

As the experimental condition, the current velocity was assorted into the 3 grades, the interval of the waterway was arranged into the 8 grades (Fig. 2). The electric stimulus was given the fish just before passing between the both electrodes for U-turn motion of the fish. The experiments under the same condition were repeated three times on each fish.

The results obtained are as follows;

(1) The body width may be regarded as the fittest factor of the U-turn motion (Fig. 2). The widths of the waterway in which the U-turn motion of fish can take place aptly were observed to be π -times of the body widths.

(2) Through the results of Fig. 6, the relationship between the swimming width (L) and the radius of the curvature of the dorsal line (R) may be expressed, generally, as following formula;

$$\frac{L}{R} = \frac{B}{0.81B - 0.22}$$

here, B is the body width.

底曳網に入網した魚群が一定の型の遊泳運動をすることは宮崎¹⁾, LIVINGSTONE^{2,3)} らによつて明らかにされているが、これらの遊泳運動の一型として反転運動をあげることが出来るようである。一方、囊網中の魚群を構成している個体の遊泳運動は、少くとも 1 個体当り最小遊泳可能容積中において始めて可能であるので、直進、定位等の遊泳運動より広い遊泳幅を必要とする反転運動では、必然的に最小遊泳可能容積の遊泳幅、すなわち遊泳可能の最小幅を決定出来ることとなる。反転運動は魚体の屈曲の状態によつて更に種々の型に分けられるが、反転が水平におこなわれる場合では、反転可能の最小幅は魚体の体長、体幅等の形態的条件にある程度比例した形で変化するか、または反転運動が円運動であるところから π の関数かまたはそれに近い形で表わされる可能性のあることが考えられる。

本論では、このような観点にたつて反転運動に関する水槽実験をおこない、水平反転運動における反転可能の最小幅を測定し、反転可能の最小幅と魚体の形態的条件との関係および π の効果の存否について確認す

* 鹿児島大学水産学部 (Faculty of Fisheries, Kagoshima University, Kagoshima)

べく検討したので報告する。

実験装置と方法

実験魚は7ヶ月間養魚池で飼育したヒブナ *Carassius auratus*, 417尾, 体長 4.5~7.3 cm, 体高 1.3~2.0 cm, 最大体幅 0.8~1.5 cm, 体重 4~14 g を用いた。実験装置は Fig. 1 に示す白色プラスチック板で作製した長さ 140 cm, 高さ 20 cm の2枚の側板, 距離目盛を記入した1枚の底板および真鍮棒に網地を取り付けた2枚の仕切網からなり, これを大型回流水槽の槽底に固定し, 水深 15 cm に定め実験水路とした。側板には長方形 (35×15 cm) の穴をあけ, 外側にガラス板, 内側に白色ナイロン網地を取り付け, 両者の間隙に上方よりプラスチック板を貫通して電極をそう入した。電極には径 1.5 mm の銅線を用い, これを上方に導き, 12 volt 蓄電池, 電鍵と連絡した。この場合電極間の電流の強さは水路幅 2.5 cm で 30 mA

Fig. 1. Experimental equipments for the determination of U-turn motion.

- A: Side view of the waterway
- B: Top view of the waterway
- C: Sketch of the experimental equipments
- D: White plastic plate
- E: Copper wire
- F: Bare wire (Electrodes)
- G: Glass plate
- H: Nylon net
- I: Iron plate
- J: Observation hole
- K: Key
- L: Battery (12 volt)
- M: Graduation plate
- N: End net

Fig. 2. Relationships between the body width and the possibility of U-turn motion within the waterway.

- : π -times value of body width
- O: U-turn is possible (three times)
- : U-turn is possible (one or twice in three times)
- X: U-turn is impossible (three times)

Table 1. Showing chi-square test for the line of π -times body width.

Velocity (cm/sec)	10		20		30	
Range of body width (cm)	0.7~1.1	1.2~1.5	0.7~1.1	1.2~1.5	0.7~1.1	1.2~1.5
χ^2	23.74	18.14	13.63	7.15	14.56	16.17

を示した。

実験条件は2枚の側板によつてつくられる水路幅を 2.5, 2.8, 3.1, 3.5, 3.8, 4.2, 4.7, 6.2 cm の8段階、水車駆動によつてつくられる流速を 10, 20, 30 cm/sec の3段階とし、各組合せについて実験をおこなつた。まず魚を小出し用タンクより水路の下流側仕切網の前方に移す。魚はしばらく定位しているが、やがて遡泳し始め、両電極間に接近する。これを上方より注視し、魚の吻端が両電極間を結ぶ線に達する直前に電鍵で電路を閉じ衝撃電流を与える。魚は感電すると体を左右いずれかに屈曲させて反転運動をおこなう。この際水路幅に余裕のある場合は反転し、流れに沿うて下流側に達し、網面に魚体を押し付けられるが、やがて実験開始時の旧位に復する。水路幅に余裕のない場合は一応反転姿勢をとつた後旧姿勢にかえり、そのまま両電極間を通り抜けて直進し、水路前部仕切網に達する。この場合はタモで魚をすくい、実験開始時の位置に移す。この要領で1尾について3回実験をおこなつたが、魚が側板に接近して遡泳する場合および反転する姿勢がひねりまたは跳び上りである場合のデータは用いなかつた。

実験結果

縦軸に水路幅、横軸に最大体幅をとり、各流速毎に実験値を検討してみると、Fig. 2 に示すように、いずれの流速の場合においても、水路幅の狭い場合は3回共反転不可能で直進し、水路幅の広い場合ではほとんど反転可能の場合が多く、これらの現象は体幅の約3倍の点を境として2分されるようである。ここで各図に示すように、体幅の π 倍の線を設けてみると、該線は全体的に反転可能と不可能の境界線を示すものであることが認められる。更に体幅 1.15 cm の線および体幅の π 倍の線を以て各図をそれぞれ4分し、各体幅群毎に体幅の π 倍の線を境とする2群について群間の差異の有無を χ^2 検定により検討した。 χ^2 の値はTable 1 に示した通りで、すべて5%水準で有意差を示した。したがつて各流速における実験値はいずれも体幅の π 倍の線を境として有意であり、該線は反転可能と不可能の境界を表わす線として信頼性の高いことを示している。

反転姿勢の測定

一般に魚が制限された水路内において反転可能である場合は、Fig. 3 に示すように頭部 H 点と尾部 T 点の間隔 (L_0) がその水路幅に等しいか、または水路幅より短い場合であり、この L_0 は魚体の構造上主として体幹部の背線 $\widehat{OP}$ の曲率半径 (R_0) によつて定まると考えて差支えない。しかしこの曲率半径は体型、鱗の形状・配列、脊椎骨等の形態的条件を総合的に集約した形の屈曲性で表わされるので、すべての魚種について一律に論じ難い。本論ではヒブナの例から L_0 と R_0 に相当する長さを反転可能な最小幅で反転させた場合と、人為的に魚体を極端に屈曲させた場合とについて測定し検討することとした。まず反転可能な最小幅 (L) で反転させた場合の曲率半径 (R) は、Fig. 4 に示すような目盛付きのプラスチック板上に活魚を置き、移動板および分銅 W_2 を用いて、吻端と尾柄後端を一線に揃え、かつその間隔を体幅の π 倍の長さに等しくなるように魚体を屈曲させて測定した。魚体を人為的に屈曲させた場合の L_0 , R_0 に相当する長さ l , r は、魚体の屈曲が極限に達し、分銅 W_1 を押して魚体が頭部の方向にずれ始めた時にこれを測定した。なお、 R , r は魚体の上方より写真撮影して測定した。分銅の重量は W_1 : 20~60 g, W_2 : 200 g で、 W_1 は魚体の体重にはほぼ等しい最大静止摩擦力をもち、魚体を屈曲させる際、頭部のずれを出来るだけ防止するために使用し、体重の約4倍の重量とし、5 g を単位とした。 W_1 の最大静止摩擦力の測定結果は Fig. 5

Fig. 3. Showing the figure of the U-turn motion on the interval by π -times the body width.

R_0 : Radius of curvature of the dorsal line

Fig. 4. Showing the measurement method of a radius of curvature of the dorsal line (R, r) and the length of the body extension (L, l).

W_1 : Sinker weighing four times the fish weight

W_2 : Sinker weighing 200 g

S : Shifting plate (plastic plate)

G : Graduation plate (plastic plate)

Fig. 5. Showing the maximum static frictional force of W_1 .

に示した通りで、 W_1 の重量を体重の4倍とした場合にその摩擦力は体重にほぼ等しいか、または若干超過する値となつた。

考 察

縦軸に体幅の π 倍の線 L および前項の測定より求めた R, l, r , 横軸に体幅 B をとり、両者の関係を検討すると、Fig. 6に示すようにいずれも回帰直線式で表わされ、また $L > l, R > r$ となり、曲率半径が大となる程反転幅は大となる傾向が認められた。Fig. 6は魚体自体の屈曲性によつて定まる最小の曲率半径と、人為的な外力による限界に近い最小の曲率半径の場合を比較対照させたものであり、同図より体幅0.9~1.5 cmの範囲における R と r の関係を求めると、 $R/r = 2.7 \sim 3.2$ となり、 R は r の約3倍の長さを持つ。この関係は反転可能の最小幅で反転する場合、大型魚の曲率半径が小型魚のそれよりかなり大となるので、理論的には大型魚程反転し難くなることを示している。次いで反転可能な最小幅とその曲率半径との関係式をFig. 6より求めると

$$\frac{L}{R} = \frac{\pi B}{2.54 B - 0.68} = \frac{B}{0.81 B - 0.22}$$

が与えられる。上式より体幅0.9~1.5 cmの範囲における L/R の値を求めると1.77~1.50となる。すなわち反転可能の最小幅とその曲率半径との比が大型魚になる程小となる傾向があるので、その曲率半径は小型魚よりかなり大となることが考えられる。この傾向は上述の R と r の関係でもいえるが、実際の実験では、Fig. 2に示す通り大型魚でも体幅の π 倍の水路幅内で反転しており、上式の解析と異なる。実際には大型魚程、屈曲性がより大となるか、また反転速度がより速いために回転能率が小型魚より著しく大となり、その結果曲率半径が体幅に比例して大となるにも拘らず反転が可能なのであろうとも考えられるが、これらの諸点については今後検討してゆきたい。

遊泳中の魚を反転せしめるには種々の方法が考えられる。本実験では黒木⁴⁾の ζ -pointに近い吻端附近に衝撃電流を与える方法を採用したのであるが、このような方法を採用する場合、視覚および聴覚刺激によつて生ずる運動が問題となるが、視覚刺激は電気衝撃による運動が衝動的であるため瞬間的に消

Fig. 6. Relationship between the body width (B) and each character on the experiments at waterway as was shown in Fig. 1 and as in Fig. 4.

The related equations are as follows:

$$L \text{ and } B, (—): L = \pi B$$

$$R \text{ and } B, (\times-\times): R = 2.54 B - 0.68$$

$$l \text{ and } B, (-\cdot-\cdot): l = 2.34 B - 0.45$$

$$r \text{ and } B, (\cdot-\cdot): r = 0.65 B$$

観点にたてば、ヒブナと体型の類似したいわゆる紡錘型の魚種は勿論、体型の異なる魚種についても、遊泳可能の最小幅に関して π の効果が適用されるであろうし、遊泳可能容積の要素である長さ、高さについても、生物学的要素（三次元屈曲性）または生態学的要素（三次元遊泳幅、長さ、高さ）の相乗的な（したがって三次元空間では π^3 ）効果が表わされるものと考えられるので、これらについても今後研究を進めたい。

要 約

回流水槽の槽底に水路を設け、水路長、水深を一定にし、水路幅を種々変えて、ヒブナの反転遊泳実験をおこなった結果、ヒブナの体幅と水路幅との関係について次のような結果を得た。

1. 水路幅を制限した水路内での反転が可能か否かは、体幅によつて定まる傾向が著しく、水路幅が体幅の π 倍以上の場合は反転可能であり、 π 倍以下の場合はほとんど反転不可能である。
2. 魚が反転可能な最小幅で反転する場合の水路幅 (L) と体幹部背線の曲率半径 (R) との関係は下式で与えられる。

$$\frac{L}{R} = \frac{B}{0.81 B - 0.22} \quad B: \text{最大体幅}$$

終りに本研究をおこなうに当り御示唆を賜わった北海道大学黒木敏郎教授、ならびに実験に御協力をいただいた本学田畑静夫事務官に対しお礼申し上げる。

文 献

- 1) 宮崎千尋: 三重大水紀要, **2**, 98~200 (1957).
- 2) R. LIVINGSTONE: *Ann. Rep. of Wood Hole Biol. Lab., Circular* **99**, 42~43 (1960).
- 3) R. LIVINGSTONE: *J. du Conseil*, **27**, 43~48 (1962).
- 4) 黒木敏郎: 本誌, **16**, 51~56 (1951).
- 5) 黒木敏郎: 同誌, **18**, 21~24 (1953).
- 6) 黒木敏郎: 鹿大水紀要, **7**, 87~101 (1959).

減に近い形になると考えられ、また聴覚刺激を与える回流水槽の水車の騒音は、その回転が定常的であるため無視出来るとした。

結 び

実験の結果、ヒブナの場合は遊泳可能の最小幅とみなされる反転可能の最小幅として体幅の π 倍の値を得たが、黒木^{5,6)}のカワニナの運動速度および魚群移動のループ遊泳にみられる π 効果の現象が、個体群の運動を確率的に扱ったものであるのに対し、ここで論じたヒブナの遊泳運動にみられる π 効果現象は、魚の個体運動自体が生物学的要素もしくは生態学的要素を基礎として現われることを示したものである。遊泳生態現象が時空間的に連続的なものであり、かつ魚体が可撓性のものである以上は、遊泳可能空間は当然円周率 π の関数として表わされると考えられる。このような π 効果現象を認める