

## 魚通過可能水車ランナの開発研究\*

### (第1報, スクリュー形軸流ランナの通過条件)

清水幸丸<sup>\*1</sup>, 森本幸作<sup>\*2</sup>

## Can Fishes Pass Safely Through the Rotating Runner of Water Turbine ?

### (1st Report, In Case of Screw Type Runner)

Yukimaru SIMIZU and Kousaku MORIMOTO

Can fishes pass safely through the rotating runner of water turbine? We have interest in this problem. If possible, many ultra low head water turbines will be set in the river and we will enjoy our life with many kinds of river fishes. In this paper, several conditions of safety pass in the rotating runner were investigated and several pictures were taken to demonstrate the fact that fishes can pass through the rotating runner from downstream to upstream.

**Key Words:** Fluid Machinery, Water Turbine, Screw Type Runner, Safety Condition of Fish Pass, Velocity and Pressure Distributions

## 1. 緒 言

魚と水力発電用水車の関係はわが国においてはあまり関心がなく、これまでほとんど研究されていない。河川にダムを建設し、既存の水車発電装置を設置すると河川は寸断され、河川魚の生息条件が著しく破壊されることはすでに知られている。ダムが低い場合にはしばしば魚道が作られるが、通常建設費がかかるので設置しない。また、魚道を通過する流量は発電に利用できない。したがって、もし魚が運転中の水車内を自由に通過することができれば、河川にすむ魚族の生態系を破壊することなく、河川のいたるところに低落差の水車を設置することができる。現在の高性能反動形水車ランナはキャピテーション寸前の高負圧下で運転され、ランナ内流速も速い。負圧は魚の内蔵破裂を引き起こし、高速では魚がさかのぼれない。では、どのような条件があれば、魚は生命の危険なく水車ランナを通過が可能であろうか、これらの条件を解明するため、低回転形軸流ランナ(スクリュータイプ)を用いて、次のような研究を行った。供試魚には体長7~8 cm のは

やおよびうぐいを用いた。

(1) 水車ランナを通過する魚の挙動をビデオカメラおよび写真撮影により観察した。(a)上流から下流へ移動する場合 (b)下流から上流へさかのぼる場合

(2) 水車ランナを通過する魚にランナが与える損傷、その他生物学的打撃を検討した。

(3) 水車ケーシングの圧力分布を測定し、水車内圧力分布と魚生存の関係を検討した。

(4) 水車ランナ入口および出口直後の速度分布を測定し、魚が水車ランナを下流から上流へさかのぼりうる流速の条件を明らかにした。

なお、水車性能についてはランナ形状を変えた場合を含めて次報で述べる。

## 2. 実験装置および方法

**2.1 実験装置** 実験装置の概要を図1に示す。下部タンク①の水はポンプ②によって塩化ビニール管③を通して上部タンク④へと注ぎ込まれる。その後、上部タンクで水位を保ち、アクリル管ケーシング⑤を通して下部タンク①へと流下する。その過程で、疑似的な川の流れを作り出す。塩化ビニール管③の出口には水の勢いを消すために、網⑥が取付けてある。ケーシング⑤の中には水車ランナ⑦が設置されており、ラン

\* 原稿受付 平成元年10月27日。

<sup>\*1</sup> 正員、三重大学工学部 (〒514 津市上浜町)。

<sup>\*2</sup> 学生員、三重大学大学院。

ナ内通路は外部から観察が可能である。水車の軸には負荷として、ブレーキ⑧が取付けてあり、それによって水車の回転数を変えることができる。ケーシング⑤から下部タンク①への出口には、流量の調節用の板⑨および、網⑩が取付けられるようになっている。流量の調節は板⑨の中心に開けられた孔の大きさを変えて行われた。孔直径 150 mm を TYPE-1、孔直径 100 mm を TYPE-2 と呼ぶ。ケーシングには、圧力測定孔 a~h および流速測定孔 A~C があり、圧力は水柱マノメータ、流速は小形プロペラ式流速計で測定された。流速計の取付け部分を図 2 に示す。①はケーシングにたてられたパイプであり、②は測定孔の影響を防ぐためのものである。流速計の高さは③の固定ねじによって調整し、また部品②③は流速計支持軸④とともに回転する。また水柱マノメータの取付け方法を図 3 に示す。

魚は、上部タンク④に取付けた細い塩化ビニール管⑪から、水とともにケーシングへと注ぎ込まれ、実験

終了後は、ケーシング出口に取付けられた網⑩によって回収される。また、今回使用した水車ランナを図 4 に示す。

## 2.2 魚通過の撮影方法

**2.2.1 上流から下流への通過実験** 魚(はや・うぐい)を、塩化ビニール管⑪から水とともに注ぎ込み、水車内部での振舞いを観察し、写真およびビデオ撮影を行う。魚は数匹まとめて流し込む。流し込んだ魚は下流出口で網⑩によって回収する。引き続き下流から上流への通過実験を行うときは魚を下流で十分休ませる。

**2.2.2 下流から上流への通過実験** 魚を下流において十分休ませた後、上流側へと登らせて、撮影を行う。魚には、走流性があり、上流側へ頭を向けて、その位置を一定に保とうとする性質があるため、なんらかの刺激を与えなければ魚は上流へと登ろうとしない。そのため、タンクをたたいたり、棒などで追い立てたりする必要がある。撮影用光源としては、300 W の

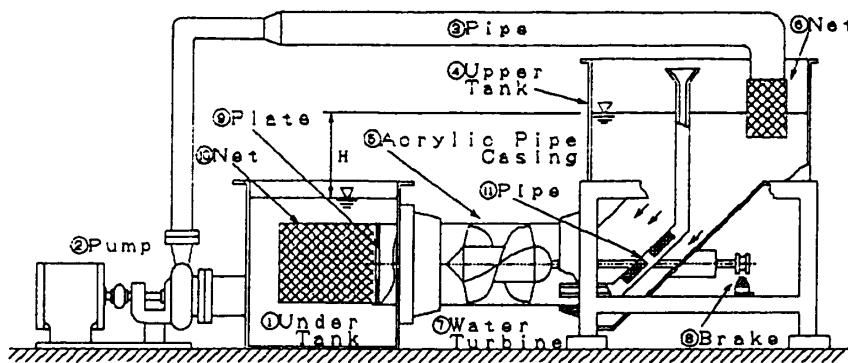


図 1 実験装置概要

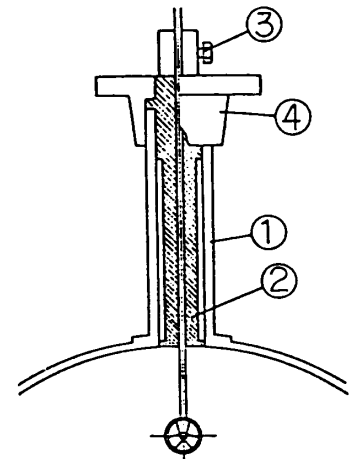


図 2 流速計取付部詳細

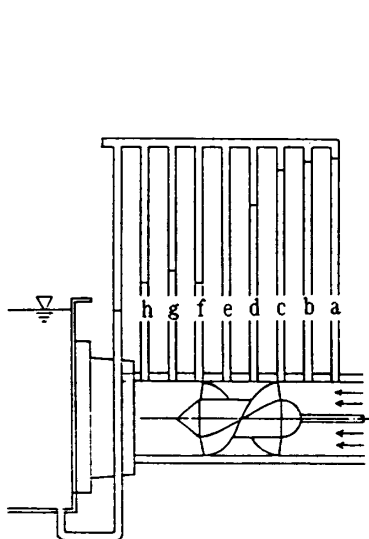


図 3 水柱マノメータ取付部詳細

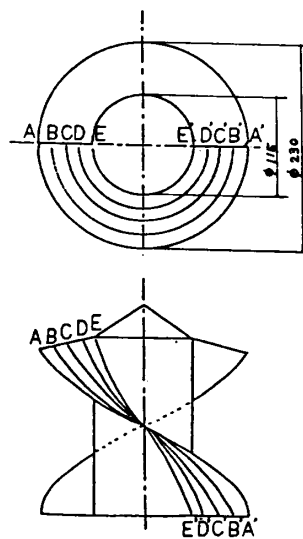


図 4 実験に使用した水車ランナ

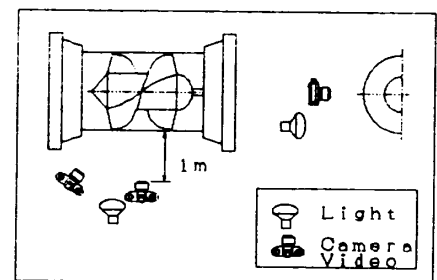


図 5 カメラ、ビデオおよび照明の設置場所

電球を使用した。これは魚の走光性を利用するためのもので、照明の使用によって魚を上流側へと誘導する効果がある。実験では、周囲を常に暗幕で覆い、撮影のとき照明を行う方法を用いた。カメラ、ビデオおよび照明の設置場所は図5に示す。水車の回転数はブレーキ⑧によって変化させた。流量はケーシング出口に取付けた流量調節用の板⑨によって調整した。上部タンクと下部タンクの水頭差  $H$  は、一定(1 m)に保たれているが、必要に応じて変化させることができる。

### 3. 実験結果および考察

**3・1 流速分布** 図6には回転数を変えた場合の水車ランナ(羽根車)入口直前(図6のA)、出口の直後(図6のB)、ボス下流5 cm(図6のC)の軸速度、周速度および合成速度の分布を示す。入口直前A点および直後B点では、管壁から流速計先端がボスに接触するまで、またボス下流のC点では管壁まで測定した。ランナ回転速度の調節には二つの方法を用いた。

第1は、出口下流は開放の状態、上部水槽へポンプで注入する流量を調節しながら水位を一定に保つ。その際、ランナの回転数調節には負荷用のブレーキを用いる。この方法は実際の水力発電用水車の運転状態に近いが、ランナケーシング内がほとんど負圧になる。

第2は、出口下流に流量調節板を設ける方法である。流量は円板中心に開けられた孔の面積によって調節される。当然であるが、これに負荷用ブレーキが併用される。この方法は、ランナケーシング内の圧力を負圧から正圧まで調節することが可能であり、本研究の目的にかなった有意義な方法である。これらの測定を行った際の、上部水槽と下部水槽の水位差(落差)は、約1 mである。

図6の速度分布を検討する。図6の左側、200 rpmの場合、この回転数は本装置の落差1 mでは無負荷運転の場合のみ得られる。負荷をかけていくに従って、180, 150, 100, 60 rpmと回転数は低下してくる。図6では紙面の都合上、180, 150, 130 rpmの速度分布は省略した。200 rpmの▲印の場合、ランナ入口直前の速度分布は、ボス近くで最も大きく、管壁に近づくに従って低下する。この速度分布形状はランナ出口でも得られる。C点のボス下流5 cmの速度分布は、ボスの後流領域において低速になり、その両側に最大速度域が生じる。

回転数が100, 60 rpmと低下した場合、流量調整板がなければ、200 rpmの場合と同様の速度分布が得られるが、流量調節板TYPE-1(●印)、TYPE-2(■印)を取付けた場合には速度分布は相当異なる。ボス部ではA点、B点ともにボス上で軸速度分布、周速度分

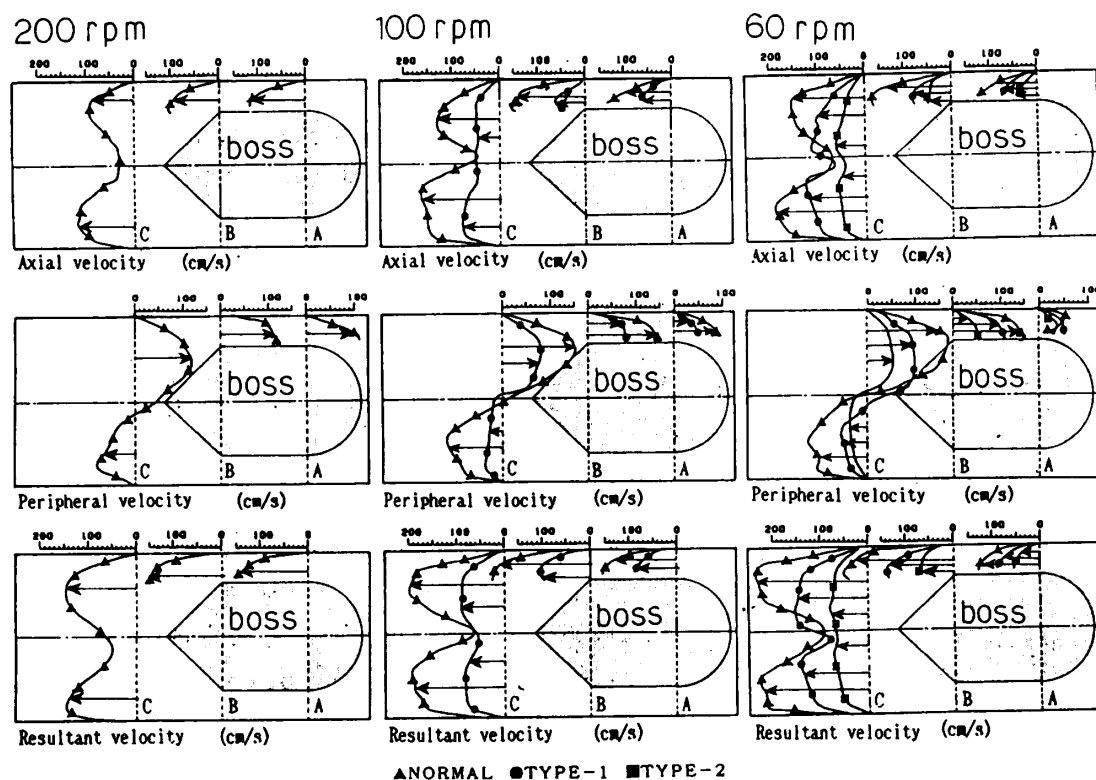


図6 流速分布

布ともに最大値が得られ、管壁では遅くなる。C点の出口下流では、軸速度分布は相当平たんになる。

**3・2 圧力分布** 図7には圧力分布の測定結果を示す。縦軸は下部タンク水面を基準とした水頭差である。

(1) 流量調節用の板を取付けない場合、200 rpm (無負荷の状態)の場合入口cと出口fの水頭差は90 mmである。ランナ内部の圧力はすべて負になり、最低圧力はd-e間の-60 mmである。180 rpmになると入口と出口の水頭差は120 mmとなる。圧力がd-e間において最低となることには変わりなく、最低水頭は-52 mmと200 rpmの場合に比べ多少高くなる。同様に、150, 130, 100 rpm, ではd-e間の最低水頭はそれぞれ-50, -37, -30 mmになる。60 rpmになると入口と出口の水頭差は173 mm, d-e間の最低水頭は10 mmと初めて正の値をとる。後述するが、圧力が極端に低下する場合、魚に重大な影響を及ぼす。

(2) 流量調節用の板(TYPE-1: 孔直径15 cm)を取付けた場合、130 rpm(無負荷)の場合、入口と出口の水頭差は40 mm, 最低圧力水頭は正圧の290 mmである。100, 60 rpmとブレーキによって負荷をかけていくに従って入口と出口の水頭差は、64, 89 mmと

増加していく。最低圧力水頭は100 rpmにおいて正圧265 mmまで一度低くなり、60 rpmでは再び正圧280 mmまで増加する。

(3) 流量調節用の板(TYPE-2: 孔直径10 cm)を取付けた場合、無負荷での回転数は60 rpmのみであり、そのときの入口と出口の水頭差は20 mmであり、また最低水頭は正圧658 mmである。水頭差が20 mmと小さいため取り出しうる仕事は非常に小さい。

### 3・3 上流から下流への通過実験の結果および考察

**3・3・1 魚への影響** 今回の実験で魚が死亡したのは、回転数200, 180 rpmの場合であった。このときのランナ内流速は図6の結果から明らかなように、魚の遊泳最大速度(後述)を超えており、魚は抵抗しないで流速に近い速度で流される。流れに抗して泳ぐことができない場合、魚は流速の遅い部分へと移動する傾向がある。一方、ケーシング内の水は旋回しており、中心部の圧力が低く管壁に近い部分は高くなる。圧力差のみを考えると、魚は中心側へ押されるはずであるが、魚自身が回転流とともに回転するので、遠心力によって魚は管壁側へ移動する。管壁側では、羽根の周速度が速いので、ランナボス部付近を通過する場合よりも羽根との衝突の衝撃も大きくなる。その例として図8に各回転数における魚の通過の様子を示す。回転数200 rpmの場合は、羽根とケーシング内壁との間に挟まれている。

魚と羽根との衝突の確率には、魚が通過するときのランナの周速比(周速度/平均軸速度)が重要な要素に

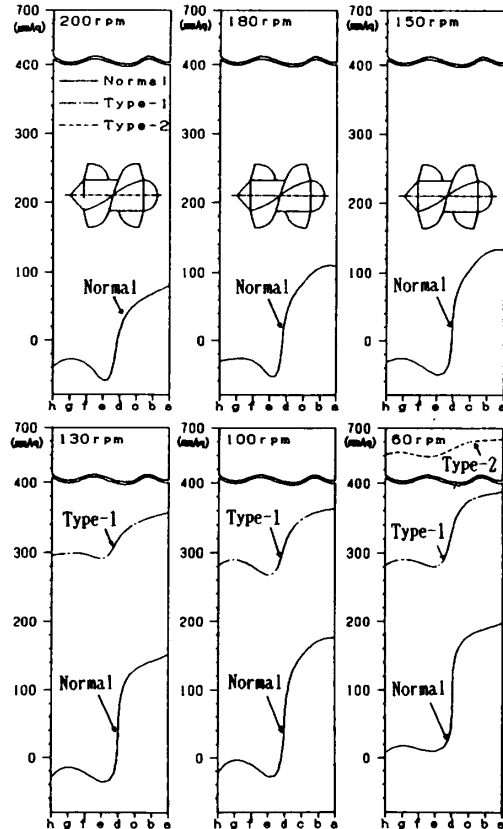


図7 圧力分布

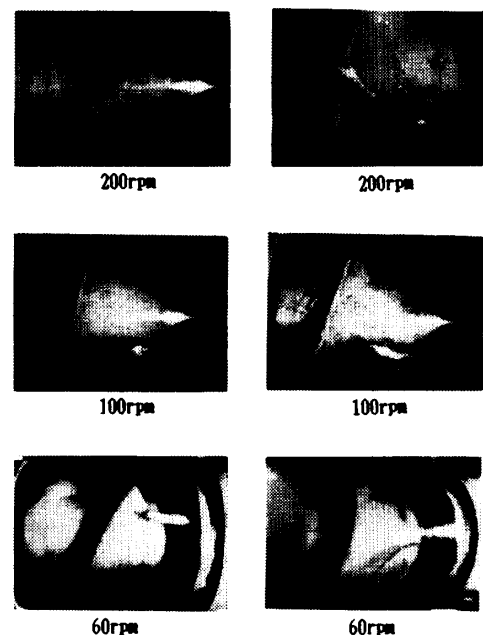


図8 魚通過の様子

なる。表1には各回転数において、魚長とほぼ等しい長さ7 cmの物体が軸方向に平均流速でランナ内を通過する間に羽根の回転する角度および周速比を示す。負荷をかけて回転数を落としていくと、落とすに従ってランナ内流速は増加していく。すなわち、周速比は低下する。この場合は、魚は流速に近い速度で流されていき、魚と羽根先端との衝突の確率は低くなる。しかし、200 rpmで無負荷の場合は周速比は大きく、魚がランナ内を通過する間に、魚が羽根とともに回転する角度が最も大きくなり、その回転中に魚と羽根先端との衝突の可能性が最も高くなる。

次に水車内の負圧の魚に与える影響であるが、200, 180 rpmにおける水車内の最低圧力は、それぞれ-60, -52 mmである。この場合のみ、内蔵障害、眼球突出などが見られた。魚の耐える負圧の限界がこのあたりにあり、魚の死亡の主な原因は最低圧力にあって、他に羽根との衝突による外傷の影響も加わり死亡率が極端に増加したと考えられる。

図9～11には、流量調節板を取付けない状態で、200, 180, 150, 130, 100, 60 rpmの各回転時に、体長

7～8 cmのはややうぐいを30匹通過させ回収した後の死傷割合(縦軸)を示した。死傷は、容易に手ですぐえるほど弱った魚および羽根との衝突によって外傷または死亡したものを回収し、目視で確認した。表2は、各回転数における平均流速、最低圧力、負傷率を示した。

図9は、回転数の影響を示す。縦軸は負傷割合、横軸は回転数である。回転数が増加すると、負傷割合も増加している。これは回転数が増加すると、羽根の周速度が速くなり、羽根との衝突の確率、衝撃ともに増すためであろう。

図10はランナ内流速の影響を示す。縦軸は負傷割合、横軸は平均流速である。負傷割合は、流速が増すほど低くなる。これは、流速が魚の遊泳最大速度を超えると、魚は流速に近い速度で流されるために、流速が増すほど羽根との衝突の確率が少なくなるためであろう。

図11は水車圧力分布の影響を示す。縦軸は負傷割合、横軸はケーシング壁面の最低圧力である。最低圧力が低下するに従って負傷割合も増加している。これ

表1 物体通過間の羽根の回転角度および周速比

	Rotation speed (rpm)	Rotation angle (°)	Peripheral velocity ratio
N	200	68.9	3.09
O	180	66.3	2.88
R	150	53.4	2.30
M	130	39.3	1.65
A	100	25.6	1.07
L	60	13.1	0.54
TYPE 1	130	71.8	3.31
	100	50.6	2.17
	60	19.7	0.85
TYPE 2	60	41.6	1.76

表2 回転数、平均流速、最低圧力と負傷割合との関係

	Rotation speed (rpm)	Mean velocity (cm/s)	Minimum pressure (mm)	Mortality (Rate of damage) (%)
N	200	81.3	-60	83.3 (100)
O	180	78.4	-52	46.7 (80)
R	150	81.9	-50	0 (53)
M	130	99.0	-37	0 (30)
A	100	117.5	-30	0 (13)
L	60	137.4	+10	0 (7)
TYPE 1	130	49.2	+290	0
	100	57.7	+265	0
	60	87.8	+280	0
TYPE 2	60	42.6	+658	0

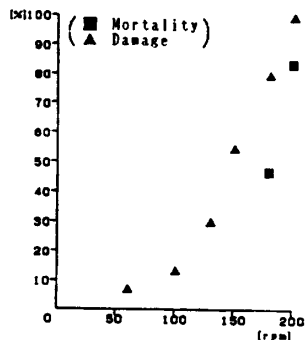


図9 回転数に対する負傷割合

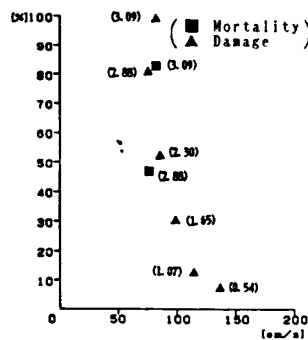


図10 流速に対する負傷割合 (( )内は周速比)

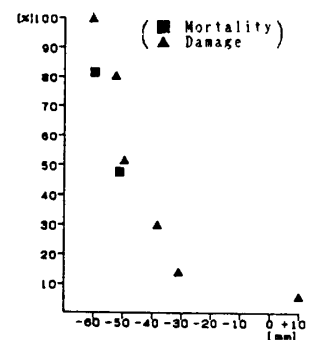


図11 最低圧力に対する負傷割合

は、圧力が魚の耐えうる最低圧力以下になったとき、魚に与える影響が非常に大きいためであると考えられる。

3・4 下流から上流への通過実験結果および考察  
魚の遊泳速度は、一般には巡航速度と最大速度に分けられるが、この実験において問題となるのは最大速度である。最大速度と魚の体長との関係を求めた式には、さまざまなものがあるが、ここでは、Bainbrige<sup>(1)</sup>らに

よって求められた

$$S_b = aX^c \dots\dots\dots(1)$$

を用いる。ここで統計的に、 $a=14.8$ ,  $c=0.88$  であり、 $S_b$  は cm/s で与えられる。今回の実験に用いた魚の体長  $X$  は 7~8 cm であるから、その最大速度は式(1)より 82~92 cm/s である。魚を上流へと通過させるためには、流速が最大速度以下であることが必要である。今回の実験結果のうちこの条件に当てはまるもの

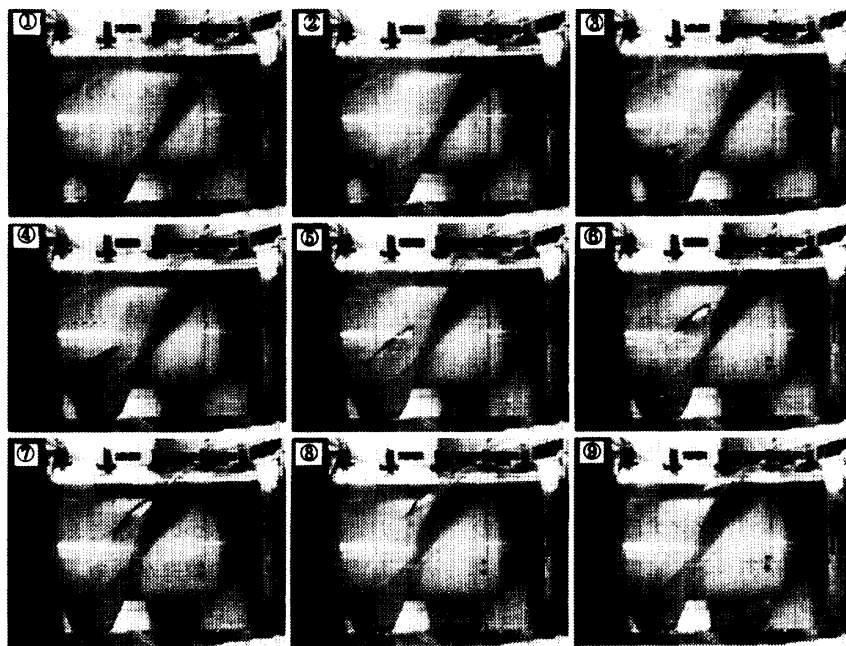


図 12 魚通過の様子

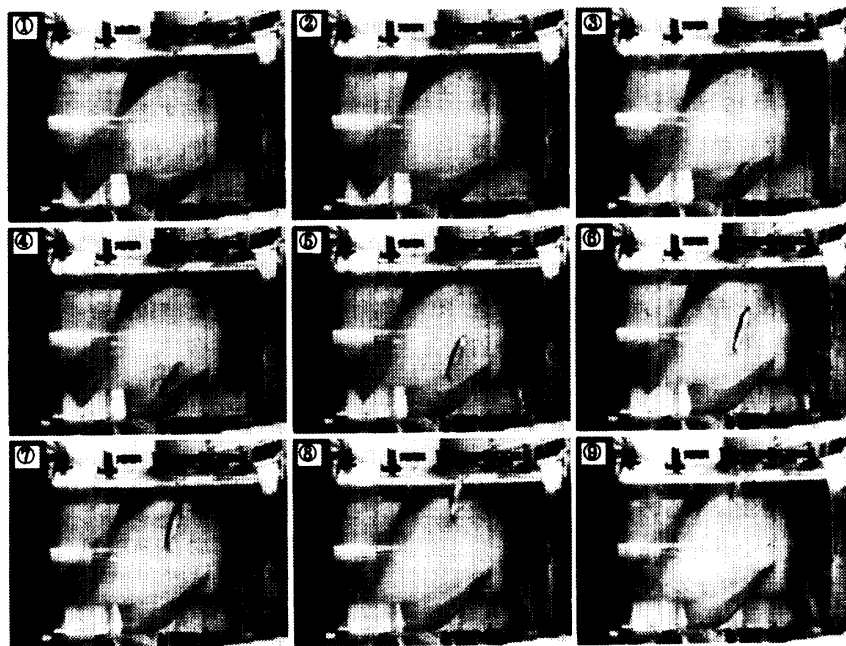


図 13 魚通過の様子

は、TYPE-1の流量調節板を取付け、回転数 100 rpm とした場合と、TYPE-2の流量調節板を取付け、回転数を 60 rpm とした場合のみであることがわかる。事実、実験の結果、魚が上流へとそ上できたのは、この条件のみであった。

まず、TYPE-1で、回転数 100 rpm の場合について述べる。このときの流速は、最大流速をわずかに下回った程度である。ランナの前後にいる魚は、流れに対し頭を向けて自分の位置を保っている。そこで、水車の前にいる魚のうち遊泳力の劣っているものは、途中で力尽き後退してくる。しかし羽根と接触した場合も、羽根の周速度が遅いため魚に与える影響は、ほとんどない。また水車の後ろにいる魚に、タンクの外壁をたたいたりして刺激を与えると、驚いてランナ内にはいる。このとき魚は、流速の遅い羽根の付け根付近へと移動する。そして上流側へそ上するためには、羽根の回転角度が問題となる。魚が流れに逆らって泳ぎランナ内を通過する間の羽根の回転角度は、非常に大きい。そのため魚は、羽根に沿ってらせん状に泳がなければならず、羽根の回転角度が増すほど、水車を通過するために泳がなければならない距離が増える。したがって、遊泳力の優れた魚は、通過することが可能であるが、遊泳力の劣る魚は、ランナ内にはいるものの途中で後退をよぎなくされる。

次に、TYPE-2の場合について述べる。このときの流速は、魚の最大流速をはるかに下回る。また、魚への影響が大きいと思われる圧力も正圧であり、魚は刺激を与えられることにより、自由にランナ内を行き来する。流量調節板 TYPE-2 を取付けた場合の、そ上時に観察された代表的な2例を図12および図13に示す。図12はそ上途中、羽根に接触せず、スムーズにランナを通過する場合であり、図13はランナ羽根にぶつかる場合である。まず、図12を詳しくみる。図12中の番号①～⑨のように、魚は羽根に平行に水車ランナに進入し、羽根に平行に泳ぎ、平行に出ていく。しかし、図13では、図13中①においては、羽根に平行に泳いでいた魚が、②において羽根と接触し、③～⑥では、急に方向をかえて羽根から遠ざかり、真上に泳ぎ始める。このため、⑦～⑨のように、ランナ内の軸方向流速に抗するだけの速度を保てなくなり、次第に下流へと押し流される。

最後に魚の行動に影響を及ぼすものとして、光源の存在があげられる。魚をそ上させるためには、実験方法の説明で述べたように、タンクをたたいたりしてなんらかの刺激を与えてやる必要があるが、実験を進め

るにつれ、晴れた日よりも曇った日のほうが魚はそ上しやすいことがわかってきた。これは天候が行動に影響を与えるだけでなく、実験装置内の明るさの差が魚の行動に影響を与えるものと推定される。魚には光に集まる、「走光性」と呼ばれる性質があるが、前述の現象はこの性質によるものと考えられる。「走光性」が現れるためには、明るさのコントラストが大きいことが要求されるが、晴れた日は下部タンク全体が明るくなり、ケーシングの部分を照らしても、コントラストは大きくならない。これに対し曇りの日はこの差が大きくなるために、魚は明るい部分に近づこうとしてランナ内部へと侵入してくるものと推定される。また一度そ上した魚が戻ってくる場合もある。午前と午後でそ上回数に差がでてくるのもこれと同じ理由によるものと考えられる。この性質をうまく利用して、魚のそ上をコントロールすることが可能であると思われる。

#### 4. 結 論

(1) はや、うぐいは、低速で回転する水車スクリューランナ内を下流から上流へさかのぼることができる。

(2) はや、うぐいが下流から上流へ回転するスクリューランナをさかのぼることができる条件は、スクリューランナ内の流速がはや、うぐいの最大遊泳速度を超えないことである。

(3) 上流から下流へ通過する場合、流路内の流速がはや、うぐいの遊泳最大速度を超えたとき、はや、うぐいは流速に近い速度で流される。

(4) はや、うぐいがスクリューランナに衝突したり、スクリューランナとケーシングに挟まれたりする確率は周速比が大きい場合に大きくなり、さらに負圧が増すにつれて増加する。

(5) はや、うぐいは負圧に極端に弱い。

なお、研究に当たって、奈良女子大名越誠教授の助言と、卒研究生 高田秀樹、春田尚人両君の協力を得た。また、ビデオ撮影ではナック(NAC)社 高平親課長の協力を得た。ここに感謝の意を表す。

#### 文 献

- (1) 清水、マイクロ水力発電ハンドブック、(1989)、107、ハワ一社。
- (2) 井上、魚の行動と漁法、(1984)、20、恒星社厚生閣。
- (3) 矢島・ほか、フィッシュポンプの利用に関する研究-I、日本水産学会誌、(1963)、10。
- (4) Eicher, G. J., Fish Mortality In Turbines, *Hydro Rev.*, February, (1988)。