

極低落差軸流水車と魚通過に関する実験的研究*

(発電運転時と無負荷時の比較)

清水 幸丸^{*1}, 加藤 努^{*2}, 全 誠^{*3}
前田 太佳夫^{*1}, 新 間 脩 子^{*4}

Experimental Studies on Lower Head Axial Water Turbine with Passing Fish

(Comparison of Load Operation with Nonload Running)

Yukimaru SHIMIZU, Tsutomu KATO, Cheng QUAN,
Takao MAEDA and Hisako SHIMMA

A water turbine through which fish can pass is studied in optimum-load operation. In order to examine the effects of the pressure and flow velocity on fish passing through the runner, four casings are used: one straight, two diffusers and one draft tube. A single stage axial runner is used. From the results of the measurement of the velocity and pressure distributions inside the turbine casing, the negative pressure and the flow velocity in which fish can swim are investigated. The kinds of fish tested are amago salmon and rainbow trout. Photographs of fish passing through the rotating runner are taken and analyzed.

Key Words: Fluid Machinery, Water Turbing, Axial Flow Runner, Fish Passing through Runner, Rotation Speed of Runner, Number and Configuration of Runner Blade, Pressure Distribution, Velocity Distribution

1. 緒 言

本研究は河川に設置されている水力発電用水車と河川魚の関係を人工的な水槽実験によって推察することを目的としている。従来、水力発電用水車には落差と流量に対応して軸流水車、斜流水車、フランシス水車、ペルトン水車等、種々の種類が利用されている。これらの水車の中で魚が通過可能と推察されるのは軸流水車と斜流水車である。本研究では軸流水車を取り上げる。軸流水車ではランナ下流にドラフトチューブが設置され、性能改善がはかられている。このため、ランナブレードの負圧面が著しく負圧になり、キャビテーション状態になる。このような状態では魚の生存は不可能と推定される。では、どのような条件であれば魚に損傷を与えずに軸流ランナを通過させることができるか、興味ある問題である。

これまでの研究^{(1)~(3)}ではおもに軸流水車が無負荷

運転状態で各回転速度で回転している状態でのランナ内の魚通過の問題を検討したが、本報告では、発電時の魚通過を実験的に研究し、これまでの結果と比較した。魚通過実験では比較的大きなコンクリート製水槽に極低落差軸流水車を設置し、魚長約10 cmから20 cm程度のアマゴ、およびニジマスを使用した。魚は養殖魚を使っているため、天然の魚とは多少性状が異なると思えるが現段階ではこれ以上の対応方法はない。その結果、魚が通過できる条件が相当解明され、少なくとも魚が死なずに通過できる条件の一端が解明された。また、従来発電に用いられている軸流水車の場合、どのような運転状態であれば魚の通過が可能であるかが不十分ながら理解できるようになってきた。

2. おもな記号

Q : 流量 m^3/s

H : ダム上流と下流の落差 m

T : トルク $\text{N} \cdot \text{m}$

η : 水車効率

ω : 回転角速度 rad/s

g : 重力の加速度 m/s^2

ρ : 水の密度 kg/m^3

* 原稿受付 1996年1月8日。

^{*1} 正員、三重大学工学部 (〒514 津市上浜町1515)。

^{*2} 准員、ブラザー工業(株) (〒467 名古屋市瑞穂区苗代町15-1)。

^{*3} 学生員、三重大学大学院。

^{*4} 水産庁養殖研究所玉城庁舎 (〒519 三重県度会郡玉城町昼田224-1)。

3. 実験装置および方法

発電用軸流水車と魚通過に関係するおもな要素には、次のようなものが考えられる。ランナ回転数、ランナの入口、出口およびランナ内流速分布、ランナ内圧力分布、ドラフトチューブの圧力分布、ランナブレード枚数、ブレード形状等および発電状況がある。

これらの要素を一つの実験装置ですべて検討することは困難なので、実験項目に合せて順次装置を変更しながら実験を行った。以下ではおのおのの項目に合せて用いられた実験装置の説明を行う。

図1には本研究で使用された軸流ランナ、ダム、ケーシング

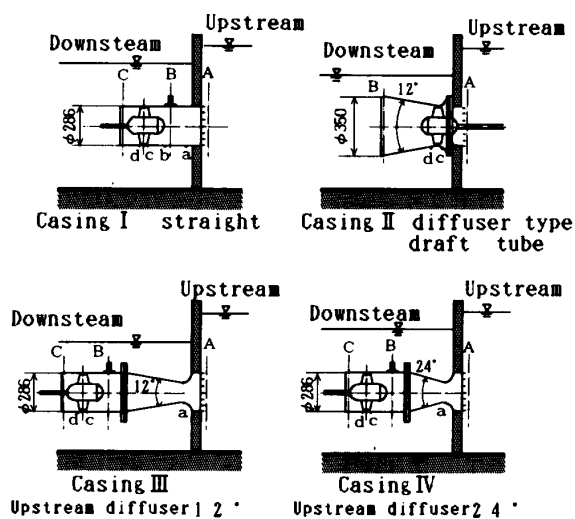


Fig. 1 Four kinds of casing configurations, the measurement points of pressure (A, B, C) and velocity (a, b, c, d) distributions

ーシングおよびドラフトチューブ、の位置関係を示す。図1-Iは円筒形ケーシング内でランナを回転させ、ドラフトチューブとしても円筒形パイプを用いた場合、図1-IIは円筒形ケーシングの代わりに広がり角が 12° のディフューザ状のドラフトチューブを用いた場合で、入口のベルマウスの最小半径位置に軸流ランナを設置した場合を示す。入口の最小半径位置断面と出口の面積比は約1:1.5である。もう少し大きく取りたかったが、実験装置の都合上、これが限界であった。図1-IIIおよび図1-IVでは装置の都合上図1-IIのドラフトチューブ付き水車の最小圧力があまり小さくできなかったため、魚に対する負圧の影響を検討するためにランナから上流側へ移動したダム入口直後に絞り部を設けた。この絞り部では比較的大きな負圧を実現できたのでランナ通過プラス負圧部通過という形式で魚と負圧の関係を調べた。なお、図1中のアルファベット大文字A~Cは速度分布測定位置、アルファベット小文字a~dはケーシングの壁面圧力測定位置を示す。さらに、実験装置位置の都合上、図1のケーシングI, III, IVでは、水車回転軸は下流側から配置され、発電機も下流側に設置されている(図2)。図1-IIの場合は水車回転軸は上流側へ配置され、発電機も上流側へ設置されている。図2には、実験装置の全体図を示す。実験には、水産庁養殖研究所のコンクリート製水槽を用いた。水槽は縦横(1.8 m * 5.2 m)、深さ(1.5 m)で水温 12° 前後で一定の地下水が絶えず流入している条件下にある。この水槽の中にコンクリート製ダムを設置した。このダムに⑥のような状態で各種ケー

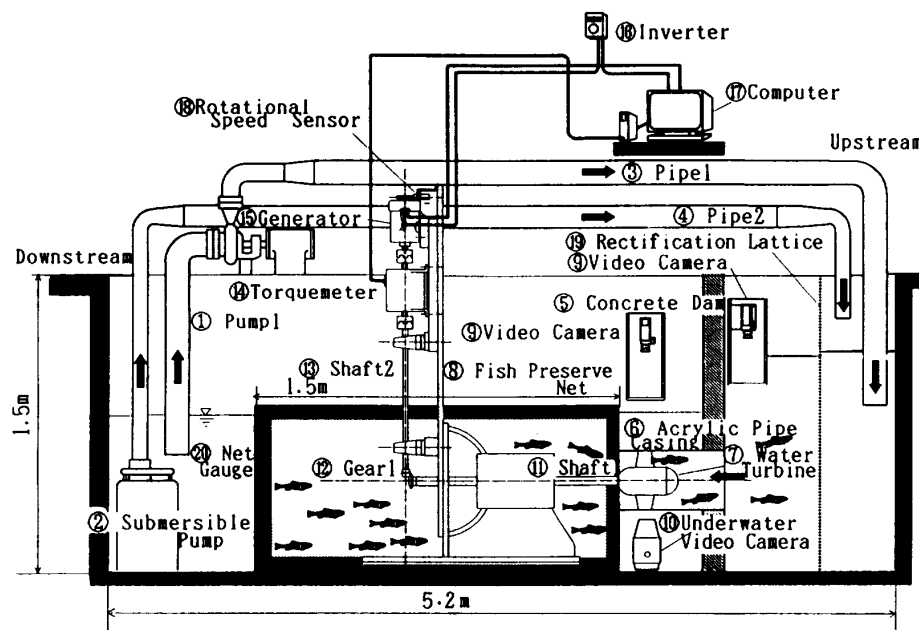


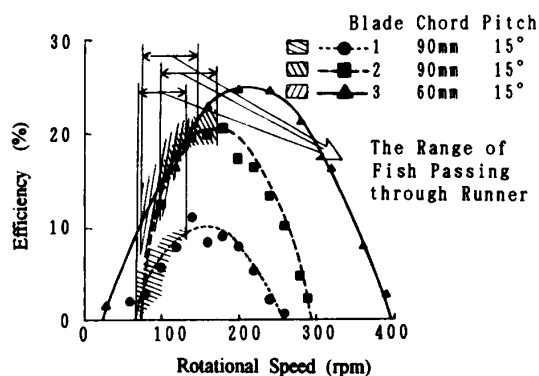
Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

シングを設置した。ケーシング出口には十分大きなステンレス製金網の囲いを設け、その中に数百匹のアマゴ、ニジマス、などをおおの、単独種(複数の魚種を混ぜてはいない、一種のみである)で放流し、実験を行った。水槽内の水は2台のポンプを用いてダム上流側の整流格子の上流側へ循環される。ポンプアップされた水は整流格子で整流された後水車ケーシングに流入する。魚は金網ケージで囲っておかないとポンプに吸い込まれて死亡する危険性が大きい。図2は発電機が下流側に設置された場合を示す。水車回転軸はベベルギアによって同じ速度で、トルク計を介して発電機に接続されている。発電機はインバータで制御されており、可変速度発電が可能である。ダムの上流側と下流側の水位差はポンプ流量を調節することによって変化した。流量の測定はダムからケーシングへ流入する際の速度分布をあらかじめ測定して速度分布を確定し、個々の実験時には代表速度を測定し、その値から求めた。速度分布の測定には直径10mmの小さなプロペラ式流速計が用いられた。ケーシングの壁面圧力分布は水柱マノメータまたは圧力変換器(98 kPa)で測定された。ケーシングには透明なアクリル性パイプおよびFRP製ディフューザドラフトチューブまたはディフューザが用いられた。魚がランナを通過する状態を確認し、かつ、魚の挙動を観察するため、眼鏡箱に設置されたビデオカメラおよび水中ビデオカメラが用いられる。FRPディフューザを用いた場合透明でないため内部観察は不可能である。この場合はダムからケーシングへの入口部とディフューザ出口にビデオカメラを設置し魚の挙動を同時観察した。透明なアクリルケーシングの場合はランナ内の挙動撮影は簡単にでき、ケーシング上部および水中の側面から2箇所でき、

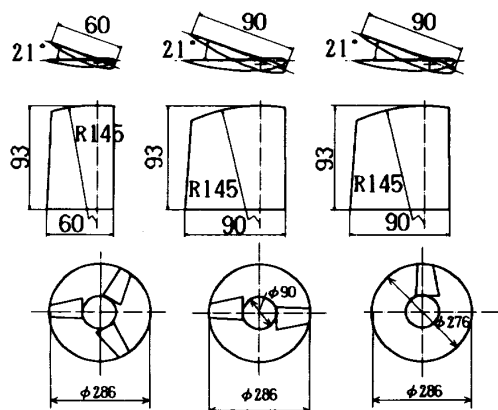
デモ撮影を行った(図2)。

図3には実験に用いたランナおよびブレードを示す。ランナのブレード枚数は3, 2, 1枚, ブレードの翼断面形状はNACA 4412, 翼端から翼根までは 21° で連続的にねじられている。このねじり角度分布はランナ内平均流速0.6 m/s, 150 rpmで最適迎え角分布になるように与えられたものである。さらに、ハブにブレードが設置される場合、手動で 15° 間隔でピッチ角が変化できるように作られている。実験ではブレード先端ピッチ角(回転面と翼端翼弦とのなす角度)を種々変化した。本報告では、その中で最も効率のよかったピッチ角 15° の場合についておもに実験結果を述べる。供試ブレードは翼端翼弦長が60 mmと90 mmの2種類を用いた。その理由は、60 mmのブレード3枚用いた場合と90 mmのブレード2枚用いた場合、翼の総面積が同一になり、翼枚数の影響を比較検討しやすいためである。

水車効率 η の定義: 水車効率は測定されたトルク T [N·m], 回転 ω [rad/s], 流量 Q [m³/s]およびダム上流と下流のヘッド差 H [m]から次のように定義さ

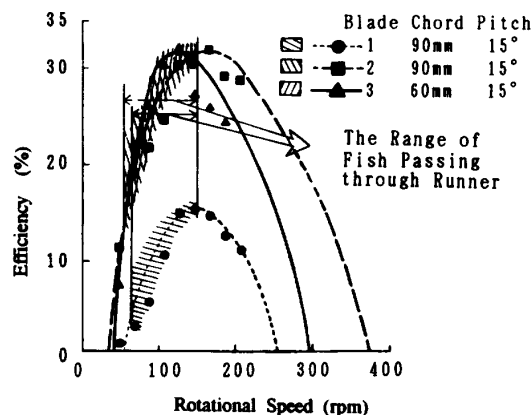


(a) Total efficiencies of test water turbines in case of casing I



(a) Three (b) Two blades (c) One blade

Fig. 3 Three kinds of blade configurations of test axial runner



(b) Total efficiencies of test water turbines in case of casing II

Fig. 4

れる。

$$\eta = T\omega / \rho g Q H \quad \dots\dots\dots (1)$$

4. 実験結果と考察

4・1 供試水車の効率 図4には供試水車の効率を示す。図4(a)は図1-Iの水車、図4(b)は図1-IIの水車である。おのおののケーシング状態でブレード枚数を1枚から3枚に変えた効率が比較してある。ブレード翼端のピッチ角度は15°である。水車効率は図4(a)ケーシングIの場合、3枚ブレードで最高効率 $\eta=25\%$ および図4(b)ケーシングIIの場合2枚、3枚ブレードともに最高効率 $\eta=32\%$ 程度になる。これらの値は実際水力発電で使われている水力効率90%前後に比べて著しく悪いが、手製のブレードでしかも翼端すきまが大きく、入口速度分布も必ずしも良好でないのではやむをえない値である。したがって魚通過の水車の各種条件として、そのまま実際の水車に適応できないが、その差を十分に考慮すれば実際の水車へ、その結果を適用する重要な手掛かりを与えられ、ケーシングIIIおよびIVの実験の目的は魚に対して比較的大きな負圧と回転するランナという二つのハードルを与えて、その通過の様子を観察することであるから、性能試験結果は省略する。

図4(a),(b)中に描かれた斜線領域は水車の性能試験範囲で、魚が通過し得た回転数の範囲を示す。本実験結果から、最高効率点付近では150rpm程度が魚

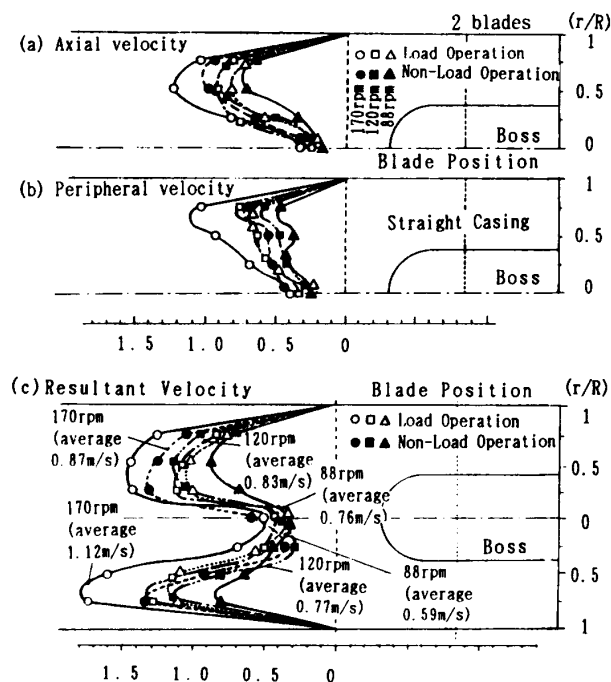


Fig. 5 (a) Axial, (b) Peripheral and (c) Resultant velocity distribution, Runner: Two blades [see Fig. 3(b)]

通過の限界と推定される。詳しくは後節で論ずる。最高効率点付近での魚のランナ通過と前報で検討した無負荷運転状態での通過状態とは相当異なってくる。

4・2 ランナケーシング内の速度分布および壁面圧力分布 図5にはケーシングI(ストレートの場合)のランナ出口の速度分布を示す。供試ランナは図3(b)の2枚ブレードを使用。(a)は左右折り返して平均した軸速度分布、(b)は同様の周速度分布、(c)は合成速度分布を示す。図5には最高効率点付近の発電(負荷)運転が白抜き印○, □, △, 無負荷(走り放し)が黒い印●, ■, ▲によって示されている。回転数は88, 120, 170 rpm 変化させた。最高効率運転時の速度分布の違いを170 rpm の場合(白, 黒, 丸印)を例に説明する。同じ170 rpm の回転数であっても、○印の最高効率運転時では●印の無負荷運転時に比べて平均軸速度で約1.3倍大きくなる。この現象は、負荷をかけて仕事をしている場合、ランナの上流側と下流側の圧力差が大きくなるために生じる。他の回転数において

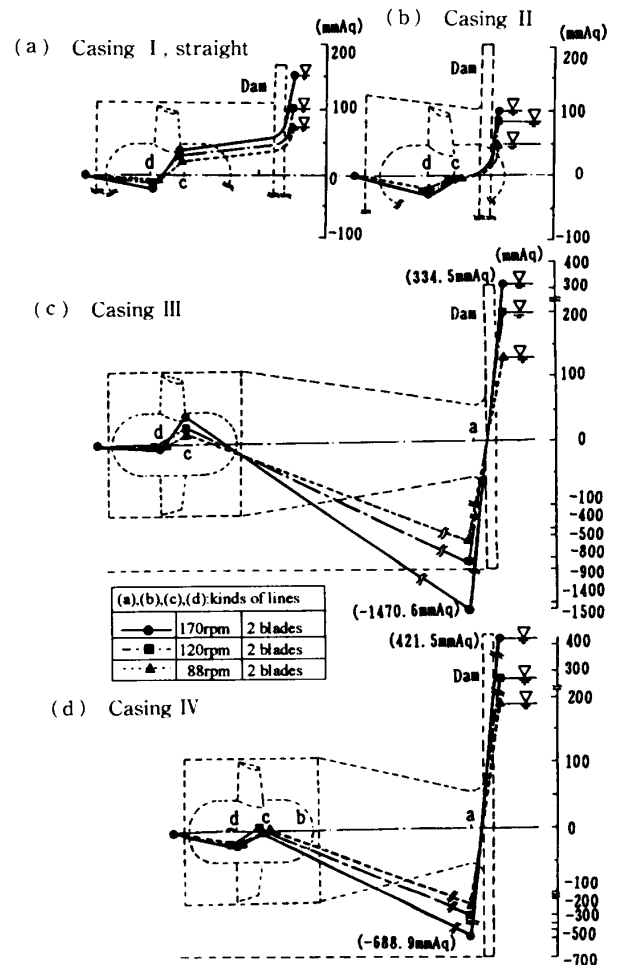


Fig. 6 Pressure distributions on the casing walls. In case of optimum load operation

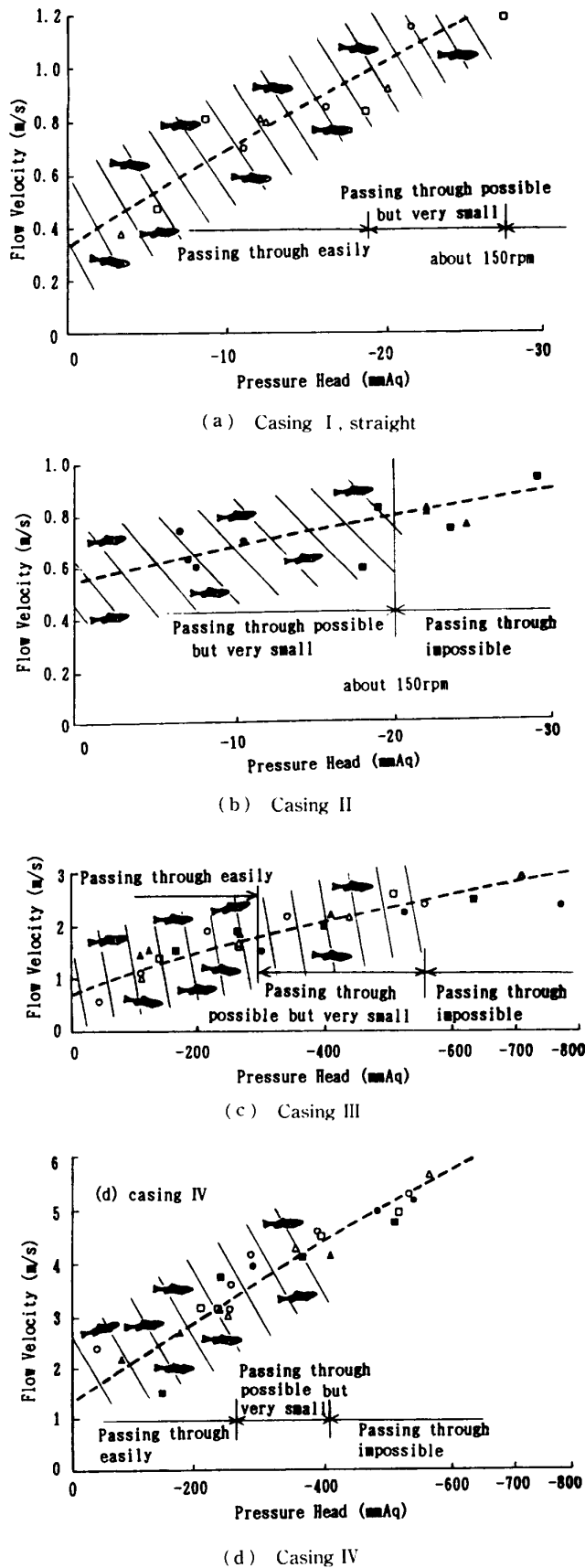


Fig. 7 Relationships among fish passing through, average axial velocity in the rotating runner and minimum negative pressure in the runner and casing. Experimental conditions is explained in Table 1

も同様の現象がみられる。図5(b)の周速度分布をみるといずれの回転数においても、値は多少異なるが大きな旋回成分を伴っていることがわかる。この旋回成分の発生は水車効率を悪化させる一つの要因である。図5より今回行った魚通過実験の水車ランナ下流の流れはいずれの場合も旋回を伴った複雑な流れ状態であることがよくわかる。図6には最高効率運転時の各種ケーシングの壁面圧力分布を示す。図6にはケーシングの形状およびランナとボス、ダム入口の関係が破線で記入してある。壁面圧力分布は水柱差(mm)で示す。壁圧は上流側より低下しランナブレード直前点cから直後点dにかけて急激に降下する。ブレード後縁(点d近傍)で最小圧力になり、それ以降は下流出口に向かって徐々に回復する。圧力値の大きさは回転数および負荷運転あるいは無負荷運転で異なるが、全体的な傾向はほぼ同じである。ランナ上流と下流の圧力差は負荷運転時では大きく無負荷運転時には小さくなる。この圧力差は前述の速度分布と直接関係がある。圧力差が大きければ流速は大きくなる。すなわち、負荷運転時では圧力差が大きいのでランナ内流速も大きくなる。

本実験で用いたケーシングI(ストレートケーシング)およびケーシングII(ディフューザタイプドラフトチューブ)水車では、いずれの場合もランナブレード後縁位置の圧力があまり大きな負圧にならず、通常、発電に用いられる水車に比べ、負圧の度は不十分である。そこでケーシングIIIおよびIVのように、ランナと切り離して、しぼり部を設け、比較的大きな負圧を発生させ、魚との関係を検討した。図6(c),(d)の -1470 mmAq および -689 mmAq の値は、このような値を示している。しかし、この最低 -1470 mmAq の値は本実験範囲ではかなりの負圧に思えるが、現実の水力発電用水車の負圧はキャビテーションの生じる $-10.33 \text{ mmAq}(-10330 \text{ mmAq})$ に近いので、 -1470 mmAq はわずかな負圧と考えてさしつかえない。

図7には図1に示す四つのケーシングについて、最高効率運転時の魚通過と平均流速および最低圧力の関係を示す。図7(a)から図7(d)までの実験条件を表1に示す。実験にはニジマスおよびアマゴ(魚長約10

Table 1 Experimental conditions

	Blade	Chord	Pitch	Fish
○	1	90mm	15°	Small salmon
●	1	90mm	15°	Rainbow trout
□	2	90mm	15°	Small salmon
■	2	90mm	15°	Rainbow trout
△	3	60mm	15°	Small salmon
▲	3	60mm	15°	Rainbow trout

cm から 20 cm 程度の)を用いた。ここで述べる平均流速および最低圧力は少し複雑で、ケーシングの種類によって内容が異なる。図 7 (a)ケーシング I と図 7 (b)ケーシング II の場合は、ランナ内平均軸速度と最低圧力の関係、図 7 (c)ケーシング III と図 7 (d)ケーシング IV の場合は、しぼり部の最低圧力としぼり部の平均軸速度の関係が、それぞれ最高効率運転時について、○, ●, □, ■, △, ▲印で示してある。この結果の中に、魚印で、魚が通過したときとほぼ類似の条件の位置を示した。ここで、魚の通過判定の基準は通過成功率 5% を目安とした。したがって魚印の場所は、魚が通過したことを示すと考えてよい。

(a) のケーシング I : 魚はランナ内平均軸速度 1.1 m/s, -25 mmAq まで通過。

(b) のケーシング II : 魚はランナ内平均軸速度 0.9 m/s, -20 mmAq まで通過。

(c) のケーシング III : 魚はしぼり部の平均軸速度 3 m/s, -500 mmAq まで通過。

(d) のケーシング IV : 魚はしぼり部の平均軸速度約 5 m/s, -400 mmAq まで通過。

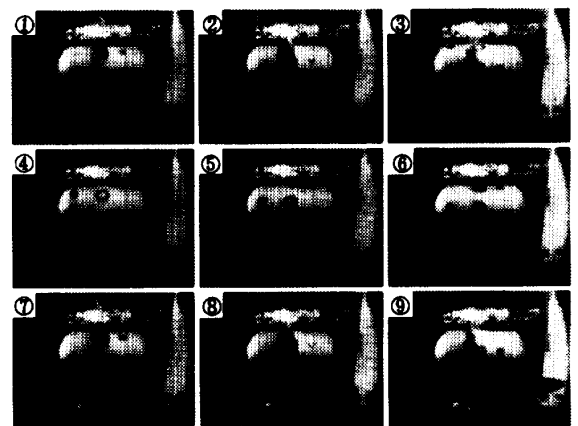
この結果から次のことが指摘できる。ニジマスおよびアマゴは、150 rpm 程度で回転しているランナ内では約 1 m/s, -20 ~ -25 mmAq 程度が通過の限界となる。供試ニジマスおよびアマゴの魚長が 10 ~ 20 cm 前後とすると魚長の 5 ~ 10 倍程度の速度で遊泳可能である。一方、ほぼ同じ魚長のニジマスおよびアマゴであっても、ランナ通過後、回転部分のないしぼり部のみの通路に対しては、比較的大きな負圧の部分があり、平均軸速度が 4 m/s 前後であっても通過していく。体長の 20 ~ 40 倍の遊泳能力を発揮することが発見された。この結果より早く回転するランナは魚に対して大きな障害となることがよく理解できる。

4.3 魚がランナを通過する成功率と各種運転条件の関係 4.2 節で述べた流速分布および圧力分布のもとで、回転するランナ内を魚がどういう思いで通過するのかということは残念ながら推察のしようもない。とにかく結果としていえることはドラフトチューブ出口近傍の金網で囲まれた流れの中で、魚は次のような遊泳状況にある。(1) 魚は走流性をもつため流れに向かって静止状態で泳ぐ。(2) 流れのよどんだ場所ではほぼ静止している状態で泳いでいる、実験では休憩を含め、間欠的に板でケージ内の魚を追い立てた。追い立て時に方向性はないが、かなりの魚は上流に向かって泳ぎ、ランナ通過を試みる。この状態をビデオカメラ 2 台で観測し、実験終了後ビデオテープをチェックすることによって魚通過を確認する。ケーシング

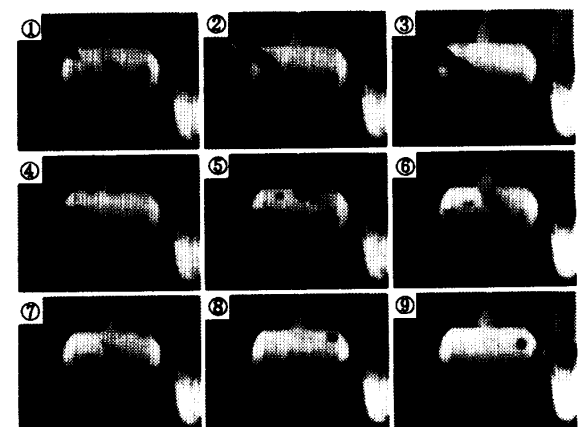
が不透明な場合はケーシング入口と出口にビデオカメラを設置し、魚通過の確認を行った。図 8 にはケーシング I (アクリル透明) の場合に魚が回転中のランナを遡上する様子を示す。図 8 (a) は最高効率運転時、羽根枚数 3, 回転数 120 rpm, 図 8 (b) は無負荷運転時、羽根枚数 3, 回転数 120 rpm の結果である。図 9 および図 10 には上述の観測方法で得られた結果を整理し、示した。ここで魚通過の成功率とは次のように定義される。

成功率 = (一定時間内にランナを通過した魚の匹数) / (一定時間内にランナ下流でブレードに向かって進入を試みた匹数)

本実験では、1 回の実験時間を 20 min に設定し、そのときに下流に 200 匹の魚を放流し、そのうちの何匹がランナ上流に移動したかによって求めた。1 匹 1 匹の魚通過の確認はビデオ撮影によって確かめた。



(a) Optimum Load Operation (3 blades, 120rpm, 1/30 sec interval of frame to frame)



(b) Non-Load Operation (3 blades, 120rpm, 1/30 sec interval of frame to frame)

Fig. 8 Photographs when fish swims in the rotating runner

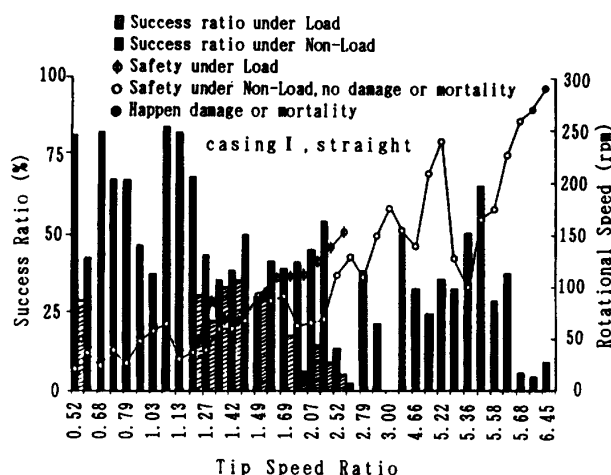


Fig. 9 Relationships among success ratio, rotation speed and tip speed ratio in case of casing I (straight) (Comparison load and non-load operations)

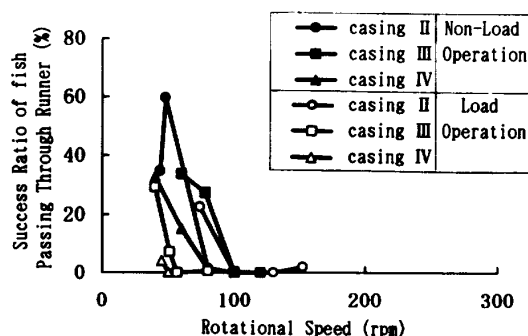


Fig. 10 Success ratios under optimum load operations Comparison casing II, III, IV

この成功率は絶対的なものでなくランナ通過の一つの目安値である点に注意しておこう。その理由^{(4)~(6)}は(1)魚が養殖魚であること、(2)あまり、長時間実験すると魚が疲労すると考えられること、(3)同じ魚を何箇月も使うので学習効果が生じること、(4)さらに、数箇月の間に魚が数 cm から 20 cm を越える大きさに成長すること、などである。天然の河川と本実験では条件が異なってくると推察される。不十分ではあるが、天然魚を用いた実験結果に基づくと養殖魚に比べ天然魚は動きがより活発なので、より通過する方向にずれるのではと推察している。著者らは、本研究結果は魚と水車ランナの関係の一端は示していると考えている。

図 9 にはケーシング I の場合について、ランナ通過成功率と周速比およびランナ回転速度の関係を示す。成功率と周速比の関係は、棒グラフ黒、斜線で、回転数と周速比の関係は、○、◇印で示す。●印は、魚に損傷あるいは死亡が起った場合を示す。周速比は次のように定義される。

$$\text{周速比} = (\text{翼端周速度}) / (\text{ランナ内平均軸速度}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

周速比が小さい 0.5~0.6 および 2.0 前後で最高効率運転時の魚通過成功率斜線棒は、無負荷運転(走り放し状態)黒棒の通過成功率の約 1/2 前後になる。周速比が 1.3 から 1.5 程度では、両者はほぼ同程度であるが、負荷運転時のほうが少し小さくなる。最高効率運転時には周速比が 2.5~2.7 を超えると魚はランナを通過できなくなる。そのときの回転数は約 150 rpm 前後である。しかし、ごくまれに、この周速比を超えても魚通過が見られる。無負荷運転時には、周速比が 5.0~6.0 回転数では 250 rpm 前後まで魚のランナ通過は見られるが、周速比が 6.0 を超え 7.0 前後になると魚がランナに打たれて損傷したり、死亡が生じる。回転数でいえば 250~350 rpm で生じる。無負荷運転では 300 rpm 以上になると魚にはランナ通過の機会がほとんどなくなる。

図 10 にはケーシング II, III, IV の場合の通過成功率とランナ回転数の関係を示す。発電負荷運転時に通過成功率が低下する理由は 3・2 節の速度分布および圧力分布から明らかのように、ランナ前後の圧力差が大きくなり、ランナ内流速が大きくなり、魚が泳ぎづらくなる結果である。

5. 結 論

極低落差軸流水車と魚通過の関係を実験的に研究し、おもに次のような結論を得た。

(1) 最大効率で発電運転時の魚の通過成功率は、魚が通過可能な周速比の範囲において、周速比が 1.27 から 1.7 の範囲では、無負荷運転の約 50% から 80% 程度になり、周速比が高く 1.7 以上 2.5 以内では、5% から 50% の間になる。また、本研究の条件では発電時は約 150 rpm、無負荷運転時は約 250 rpm が魚通過の限界になる。そのときのランナ内平均流速は 1 m/s (平均魚体長の 5~10 倍の遊泳速度) で、負圧 -25 mmAq 程度であった。このように大きな差の生じる理由は発電時にはランナ入口と出口の圧力差が大きくなり、ランナ内流速が増加するためである。

(2) 回転するランナがない場合には平均流速 4 m/s 前後(平均魚体長の 20~40 倍の遊泳速度)で、しかも負圧 -400 mmAq でも生命に別状なく魚の通過は可能である。これより、回転するランナは魚に相当に障害になると考えられる。

文 献

- (1) 清水幸丸・森本幸作、魚通過可能水車ランナの開発研究

- (第1報), 機論, 56-530, B(1990), 2984-2990.
- (2) 清水幸丸・家田和磨・森本幸作, 生物共存形機械—魚通過可能水車の開発研究(第2報), 機論, 59-558, B(1993), 492-498.
- (3) Shimizu, Y., ほか4名, Studies on Water Turbine Runner Which Fish Can Pass Through (Comparison Between Screw and New Type), *ASME Proc. Ind. Environ. Appl. Fluids Mech.*, FED-145, (1992), 145-150.
- (4) Shimizu, Y., ほか5名, Studies on Water Turbine Runner Which Fish Can Pass Through: In case of Single Stage Axial Runner, *ASME Proc. Ind. Environ. Appl. Fluids Mech.*, FED-186, (1994), 47-52.
- (5) 井上実, 魚の行動と魚法, (1984), 20-28, 恒星社厚生閣.
- (6) Bainbridge, R. (Harris, J. E.), ed. *Problem of Fish Locomotion. Vertebrate Locomotion*, 5(1961), 13-32, Symposia Zoo. Soc. London.
-