

## 生物共存機械-魚通過可能水車の開発研究\* (水車ランナを通過する魚の速度と通過様式の関係)

清水 幸丸\*<sup>1</sup>, 全 誠\*<sup>2</sup>  
加藤 努\*<sup>3</sup>, 新間 脩子\*<sup>4</sup>

### Studies on Water Turbine Runner which Fish Pass Through (Relationship between Swimming Velocity and Style of Fish)

Yukimaru SHIMIZU, Cheng QUAN,  
Tsutomu KATO and Hisako SHIMMA

This paper describes the relationships among rotation speed of runner, setting angle of blade, chord length, number of blade, and the necessary swimming velocity of fish which pass through the runner theoretically. With fish experiment, the swimming velocity of fish is examined by many video films. Comparing with the data of theoretical prediction and experiment, in non-load operation, both are consistent. But in load operation, the fish velocity of experiment is less than that of theoretical prediction. The main reason is that most of fishes which passed through the runner are touched by blade. Fishes spend the time to swim away from the blade after touching the blade.

We also investigated the hit position of fish body. In the condition of rotation speed below 200 rpm, except the head and the upper half of the body, the damage and mortality of fish will not happen. But the actual swimming velocity becomes slower. The higher is the rotation speed and the less is the blades number, the faster is the fish swimming velocity. The fish goes through the runner with the best speed which they decide and they choose the easiest course in the passage and regulate the swimming velocity themselves. The results supply the data for the study of biology co-exist water turbine.

**Key Words:** Fluid Machinery, Water Turbine, Axial Runner, Fish Swimming Velocity, Safety Condition for Fish Passing through Turbine Runner

#### 1. 緒 言

これまで、魚通過可能水車の開発研究について、おもに水車の回転数、ランナの形状(スクリー形、二段軸流形、単段軸流形ランナ)、羽根の取付角、ケーシング内部の圧力分布、軸流流速分布、魚の雌雄分離などの条件について検討した<sup>(1)-(4)</sup>。

実際、魚が回転している水車ランナを通過する際、重要になるのは魚自身の遊泳速度を含めた遊泳状態の解明である。本研究ではまず水車ランナ回転数、ケーシング内部の流速、羽根枚数、魚自身の体長などの条件を考慮して、理論的に魚が羽根に接触せず通過する遊泳速度を求めた。続いて、発電状態で魚通過の様子を水中ビデオカメラで撮影した写真を1枚ずつ詳細に調べ、魚が水車ランナを通過する際の遊泳速度および遊泳状態を明らかにした。その結果、理論値と実験値の傾向が一致すること、さらに魚が羽根と接触する位

置を5タイプに分けて調べることにより、魚が水車ランナを安全に通過することのできる条件等、いくつかの興味ある事実を明らかにした。以下詳述する。

#### 2. 実験装置および方法

**2.1 実験装置** 実験装置図を図1に示す。水産庁養殖研究所にある魚飼育用の縦5.2 m、横1.8 m、深さ1.5 mのコンクリート製水槽に、コンクリートブロックで仕切ダム⑤をつくり、そこへ円筒形ケーシング⑦を設置した。ケーシングの出口には、縦1.5 m、横1.0 mのステンレス製の金網ケージ⑨を設け、その中に約150尾のアマゴを放流し、実験を行った。水槽内の水はポンプ①によって下流側からダムの上流側へ注水される。注水された水は整流格子④で整流された後、ケーシングに流入する。このように、水槽内に人工的に流れをつくり出す。下流側金網ケージ中の魚はランナ⑥を通過し上流へ泳いでいく。魚がランナを通過する状態を水中ビデオカメラ⑧で確認し魚の挙動を観察する。

水車回転軸はベベルギア⑩により同じ回転速度でトルク計を介して負荷の発電機⑫に接続されている。発電機はインバータで回転数制御されており、可変速発電運転が可能である<sup>(5)</sup>。ダムの上流と下流側の水位

\* 原稿受付 1997年11月13日。

\*<sup>1</sup> 正員、三重大学工学部(☎514-8507 津市上浜町1515)。

\*<sup>2</sup> 正員、三重大学大学院。

\*<sup>3</sup> 准員、ブラザー工業(株)(☎467-0000 名古屋市瑞穂区苗代町15-1)。

\*<sup>4</sup> 水産庁養殖研究所玉城庁舎(☎519-0423 三重県度会郡玉城町昼田224-1)。

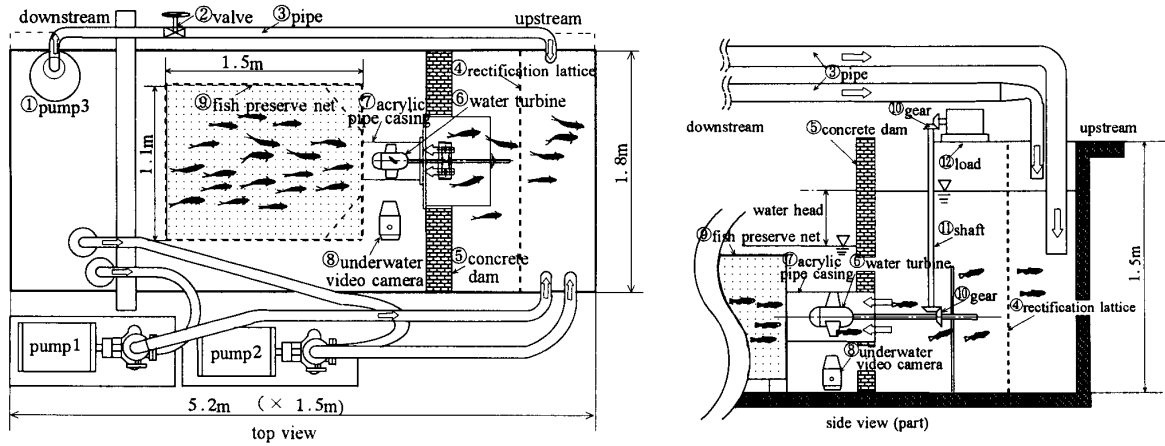


Fig. 1 Experimental apparatus

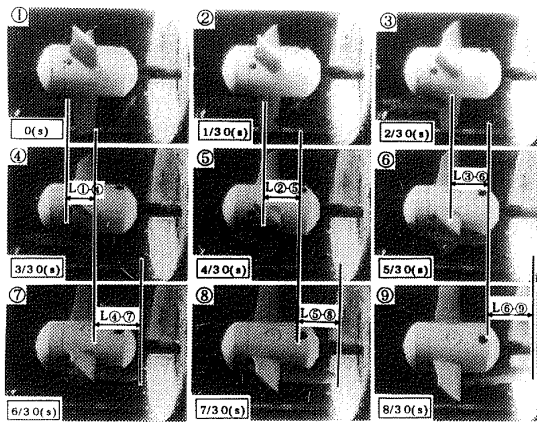


Fig. 2 Time interval frame to frame on the video tape images

差, ケーシング内の流速は, ポンプのバルブ②開度の調節により変化させた. 速度分布の測定には直径 10 mm のプロペラ式流速計を用い, 壁面圧力の測定には水柱マノメータおよび半導体式圧力変換器(定格 98 kPa)を用いた. 実験用の魚は 7~22 cm のアマゴである. 回転数は回転計で測定した. なお, 水車ケーシング圧力分布および水車ケーシング内流速分布については, 本報告では省略するが, 文献(5)に詳述しているので参照願いたい.

**2.2 魚の遊泳速度の測定方法** 理論速度との比較のため, 魚の実際の遊泳速度を知る必要がある. その測定および求め方は以下に行った.

各条件の実験で, 魚が水車部分を通過する様子をビデオカメラで撮影し, その映像をビデオプリンタを用い, 図2のような9こまの写真にする. この写真はビデオを1こま送りにして作られ, 9こまの連続写真になっている. 1こま間の時間は 1/30 s である. 図2におけるこま①~④, ②~⑤, ③~⑥, ④~⑦, ⑤~⑧, ⑥~⑨, の6箇所においてそれぞれの4こま分の移動距離  $L_{1-4}$ ,  $L_{2-5}$ ,  $L_{3-6}$ ,  $L_{4-7}$ ,  $L_{5-8}$ ,  $L_{6-9}$  を

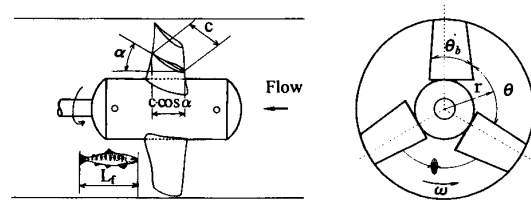


Fig. 3 The detail of tes runner, three blades

求め, これを実際の距離に換算し, 経過時間で割り魚の遊泳速度を求めた. そして, ケーシング断面から水車部分の断面積を引いた, 平均水流流速を加えて実際の魚そ上の遊泳速度とした. 6箇所を平均した値に水流流速を加えたものを魚の平均遊泳速度とし, 6箇所のうち, 最も速い速度に流速を加えたものを魚の最大そ上遊泳速度とした. 実際には, ランナ内の魚の空間的な位置変化が生じるが, この位置変化の測定は困難なので, 無視し, ビデオ画像に表れる平面内での移動距離から魚の遊泳速度を算出した.

### 3. 理論計算および実験結果の考察

**3.1 理論遊泳速度の計算** 今までの研究によって魚がランナを通過することが可能であることを明らかにした. しかし魚がそれぞれの条件に対してどの程度の遊泳速度で通過したのかまだ十分明確になっていない. そこで, 本研究では魚がランナをどの程度の遊泳速度で通過しているのかまず理論的に求めることにする. 理論計算には二つの仮説を設定している.

- (1) 魚は休まずにランナを通過していく.
- (2) 魚は羽根に沿って二次元的に移動する. すなわち, 半径方向の移動を無視する.

水車ケーシングとランナ羽根の関係は, 図3のようになる. 水車の羽根の枚数を  $m$  とする(図3では  $m=3$ ). ケーシング中央から半径  $r$  [cm] の位置にいる魚に与えられる有効通過角度  $\theta$  [rad] は, 次式で与

えられる。

$$\theta = (2\pi - m\theta_b) / m \quad \dots\dots\dots (1\cdot a)$$

ここで、 $\theta_b$  は羽根によって閉ざされる角度 [rad] で、  
図3より次の近似式が成り立つ。

$$r\theta_b = c \cdot \sin \alpha \quad \dots\dots\dots (1\cdot b)$$

$$\theta_b = (c \cdot \sin \alpha) / r \quad \dots\dots\dots (1\cdot c)$$

となる。ここで  $\alpha$  は翼弦長と軸方向成分の成す角度  
である。 $c$  [cm] は翼弦長である。

水車が  $\theta$  [rad] 回転するのに要する時間  $t$  [s]  
と角速度  $\omega$  [rad/s] は次のような関係となり、

$$\omega t = \theta \quad \dots\dots\dots (1\cdot d)$$

$\omega$  を水車の回転数  $N$  [rpm] で表すと次式となる。

$$\omega = 2\pi \cdot N / 60 \quad \dots\dots\dots (1\cdot e)$$

式(1・a), (1・d), (1・e)より  $t$  [s] は

$$t = \frac{60}{2\pi N} \left( \frac{2\pi - m\theta_b}{m} \right) \quad \dots\dots\dots (1\cdot f)$$

となる。

魚がこの  $t$  [s] 間で羽根を通過すれば、羽根に衝突  
せず通過できる。図3に示すように、魚が  $V_{f'}$   
[cm/s] の速度で水車軸に平行に直進するとする。 $t$   
[s] 間で魚が泳ぐことのできる距離  $x$  [cm] は

$$x = V_{f'} \cdot t \quad \dots\dots\dots (1\cdot g)$$

となる。この  $x$  [cm] が  $c \cdot \cos \alpha$  [cm] と魚の体長  
 $L_f$  [cm] の和より大きいと、魚は羽根に衝突せずに  
通過できる。

$$V_{f'} \cdot t > c \cdot \cos \alpha + L_f \quad \dots\dots\dots (1\cdot h)$$

よって、魚が羽根に衝突せずに泳ぐのに必要な速度  
 $V_{f'}$  [cm/s] は次式に示す。

$$V_{f'} > (c \cdot \cos \alpha + L_f) / t \quad \dots\dots\dots (1\cdot i)$$

式(1・i)に式(1・f)を代入すると、 $V_{f'}$  [cm/s] は

$$V_{f'} > \frac{\pi N (c \cdot \cos \alpha + L_f)}{30(2\pi/m - \theta_b)} \quad \dots\dots\dots (1\cdot j)$$

となる。

しかし、魚は流れに逆らって泳いでいる。このため、  
実際にはこの  $V_{f'}$  [cm/s] に流速を加えた値で泳い  
でいる。水車ランナ内の主方向の水流の平均流速を  
 $V_a$  [cm/s] とすると、魚は流れに対して、

$$V_f = V_{f'} + V_a \quad \dots\dots\dots (1\cdot k)$$

で泳いでいることになる。流速分布によりケーシング  
内の流量を求め、ケーシングの断面積からボス部分を  
引いた断面積で割ることによりランナ内の平均流速  
 $V_a$  を求める。

**3・2 理論速度と実験値の比較および考察** 本研  
究で用いた実験用軸流水車では、羽根の取付角が15°  
のとき ( $\alpha = 75^\circ$ )、水車の効率が最もよく、魚の通過も  
良好であった<sup>(5)</sup>。そこで本研究では、この羽根の取付

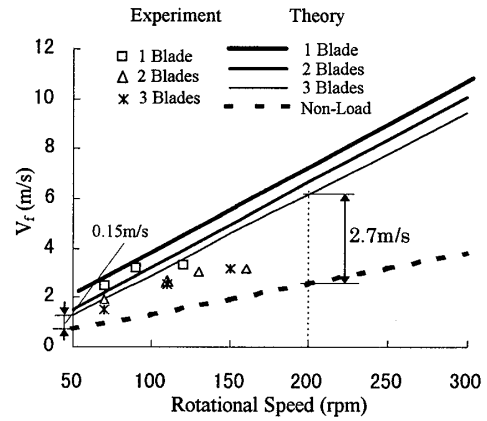


Fig. 4 Relationship between runner rotation and velocity of fish swimming (comparison between theory and experiment)

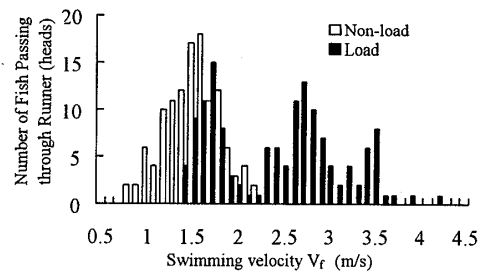


Fig. 5 Swimming velocity vs number of passed fish

角15°の条件について考察する。また、1枚羽根およ  
び2枚羽根のとき翼弦長90 mm、3枚羽根のとき翼弦  
長60 mmと設定した。 $r$ はケーシング内径145 mm  
(魚が最も通過している距離と考えられる場所)とし、  
魚の体長  $L_f$  の平均値16.3 cmとした。図4に回転数  
と魚の速度  $V_f$  の関係を示す。式(1・j)から理論速度  
と回転数の関係は一次直線になる。線類は理論計算値  
で、□△\*印は実際の遊泳速度である。まず理論計算  
値について考察する。グラフ縦軸は魚がランナ部を接  
触せず通過するのに必要な理論速度  $V_f$  [m/s] を示  
す。線類はそれぞれの回転数における臨界条件であ  
る。魚が羽根に接触せず通過するには臨界条件より速  
く泳がなくてはならない。無負荷状態では回転数が高  
くなるにつれて魚の必要な遊泳速度は発電時の同じ条  
件に比べ差が開いていく。例えば、羽根枚数3枚で回  
転数50 rpmのとき発電状態のほうが0.15 m/sほど  
速い。200 rpmでは2.7 m/sほどの差になる。実験値  
(すべての実験データを平均した値である)は図4の□  
△\*印で示す。1枚羽根のとき魚の遊泳速度がいちば  
ん速い。羽根枚数が多くなるにつれて魚通過遊泳速度  
が減っている。羽根枚数が一定のとき、ランナの回転  
数が高くなるにつれて魚通過遊泳速度が速くなる。実  
験値は無負荷状態と発電状態間に位置しているが、傾

向は理論計算値のそれに一致する。

図5には無負荷運転状態と発電状態におけるランナ内の魚の遊泳速度分布を示す。縦軸には通過数(匹数)、横軸には魚の遊泳速度(m/s)を示している。無負荷運転状態時では魚の遊泳速度は1.6 m/sを中心にきれいな山形に分布していることがわかる。この遊泳速度はランナの  $\theta/\omega = t$  (魚から見た羽根間の通過可能時間)に関係している。なぜなら、遊泳速度は回転している羽根が通過してから、次の羽根が到達するまでの時間に対応しているからである。つまり次の羽根が到達するとき、魚が羽根に接触すると通過できる確率が落ちてしまう。

発電運転状態時では無負荷運転状態時とは異なり、全体として無負荷運転状態時より速い遊泳速度で通過している。これは前報<sup>(5)</sup>の速度分布より明らかのように、発電運転状態時には無負荷運転状態時よりも、ランナ内流速が大きくなるために、魚の遊泳速度は一段と速くなっているからである。通過数のピークが3箇所に分かれて現れる理由は羽根枚数の違いによるものと推定される。この結果について検討する。まず、発電状態時に羽根枚数ごとの遊泳速度分布を調べる。図6は水車の羽根枚数が1, 2枚および3枚の場合の魚通過匹数を同一図に重ねて表示してある。横軸は魚の遊泳速度を表す。

3枚羽根の場合、遊泳速度分布はおもに遊泳速度1.7 m/sをピークに分布している。羽根は魚通過の邪魔となるため枚数が多いと魚が遅い速度でしか通過できない。これは一つめのピークと一致している<sup>(6)</sup>。2枚羽根の場合、遊泳速度分布はおもに遊泳速度1.5~1.8 m/sと2.4~2.9 m/sに通過例が多く、低速度から高速度まで広い範囲に分布している。

1枚羽根の場合、遊泳速度分布はおもに遊泳速度2.6~3.5 m/sに集中しているが、遊泳速度2.6~2.7 m/sと3.5 m/sに二つのピークがある。これは図5の二つめと三つめのピークと一致する。そして、羽根枚数が少ないため、3枚羽根や2枚羽根のときと比較して全体的に魚が速い速度で通過している。これは理

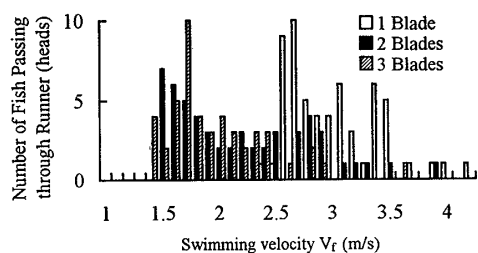


Fig. 6 Swimming velocity vs number of passed fish

論分析と一致する。

羽根の枚数によって魚の遊泳速度は異なってくることから、三つのピークは羽根の枚数が関係しているといえる。

さらに、別の角度から検討する。図7では、水車の回転数と魚通過数の関係を回転数の違いから検討する。今、魚通過数を魚遊泳速度が図5の3箇所のピーク別1.1~2.0(図7中白棒)、2.1~3.0(斜線棒)、3.1~4.0 m/s(黒棒)の3種類に分類して、横軸を回転数に取り表示する。

白色棒(通過速度が1.1~2.0 m/s)の場合、すべて70 rpmで通過している。斜線棒(通過速度が2.1~3.0 m/s)では、おもに110 rpmまでで通過している。黒棒(通過速度が3.1~4.0 m/s)では、おもに120 rpm以上で通過している。

このように、魚通過速度が遅い場合、回転数は低く、速い場合では回転数も高いといえる。羽根の枚数別に見ても同じ傾向が見られる。つまり魚は回転数に対応して遊泳速度を変化している。これらのことより、羽根枚数および回転数と、通過速度の間には密接な関係があることがわかる。

図8には、縦軸に魚通過数、横軸に通過した魚の体長を水車羽根の翼弦長  $C$  で割った無次元体長を示す。羽根の平均翼弦長は83 mmである。

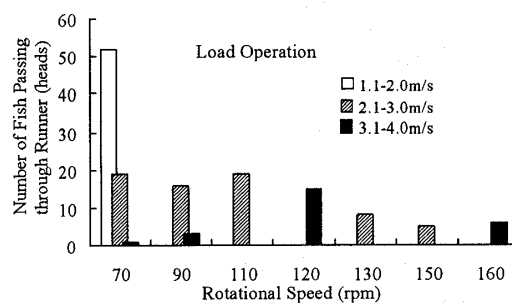


Fig. 7 Relationship between rotational speed and number of passed fish

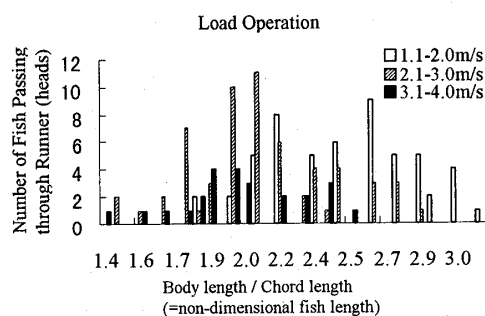


Fig. 8 Non-dimensional fish length vs number of passed fish

白色棒(遊泳速度 1.1~2.0 m/s)の場合、全体的に大きい魚長で通過が見られる。つまり、魚長の大きなものは遅い遊泳速度で通過していることになる。

斜線棒(遊泳速度 2.1~3.0 m/s)では広い範囲で分布しているが、白色棒(遊泳速度 1.1~2.0 m/s)に比べて低い値での通過数が多い。つまり、遊泳速度 1.1~2.0 m/s の場合より小形の魚の通過が多いことになる。黒棒グラフ(遊泳速度 3.1~4.0 m/s)では高い値での通過例がない。すなわち、これらの結果より、次のような結果が推定される。体長/翼弦長というパラメータで見ると遊泳速度 1.1~2.0 m/s では魚長の大きいものが通過しており、遊泳速度が速くなるにつれて、小さな魚の通過が増えている。これは水車羽根通過という特定の条件下では、大きな魚は羽根に接触する確率が高くなり、接触の影響で魚の遊泳速度が遅くなることが一つの原因と考えられる。

このことより魚の通過には魚の体長、回転数、流速が大きく影響していることがわかる。

**3.3 水車羽根と魚の衝突の際の遊泳速度** 図9は魚の平均遊泳速度と理論速度との比(平均速度/理論速度)を横軸に取り、縦軸には魚の通過数を示す。図9より無負荷状態では魚の平均速度は理論速度の0.9~1.1倍で泳ぐ魚の数が最も多く、理論速度にかなり近い速度で泳いでいることがわかる。理論速度以上で泳ぐものも数多くいる。これに対し、発電状態にお

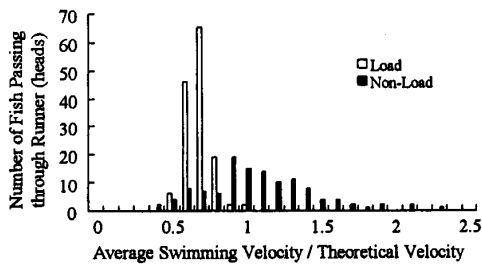


Fig. 9 Non-dimensional average swimming velocity vs number of passed fish

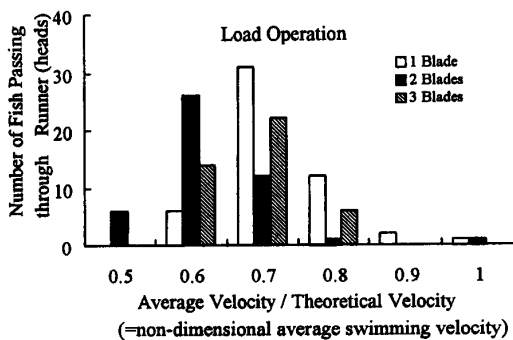


Fig. 10 Non-dimensional average swimming velocity and number of passed fish (comparison with number of blades)

いては魚の平均速度は理論速度よりやや遅い。また、理論速度以上の速さで泳ぐものもほとんどいない。

図10は発電状態の羽根枚数別の結果を表す。枚数の違いによらず、理論速度の0.6~0.7倍の速度に集中している。

**3.4 魚と羽根の衝突位置の考察** 次にランナ通過中の魚は、魚体のどの位置で羽根と接触するのか、接触位置と遊泳速度の間に何か関係があるのか、接触した魚は生命的に影響があるかを考察する。

ビデオカメラで撮影した写真を1枚1枚観察した結果、発電時ほとんどの魚が羽根に接触しながら通過し

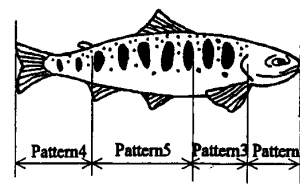
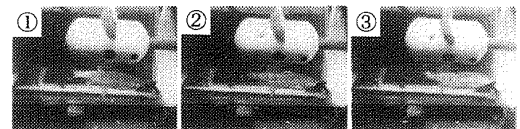
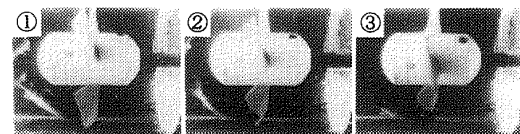


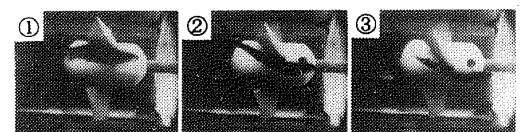
Fig. 11 Kinds of crush positions of fish to runner blade



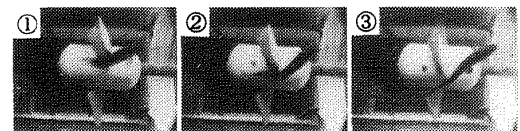
(a) Representative example of pattern 1: non crush



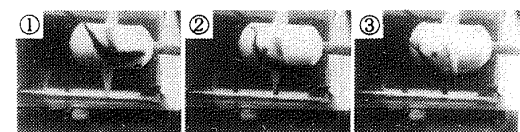
(b) Representative example of pattern 2: the head position



(c) Representative example of pattern 3: position of the upper half of the body



(d) Representative example of pattern 4: position of the lower half of the body



(e) Representative example of pattern 5: position of the middle half of the body

Fig. 12 Representative five kinds of crush patterns of fish passing through runner

ていくことが明らかになった。魚がランナを通過するとき、羽根に接触せず通過する場合をパターン1とする。魚が羽根に接触しながら通過する場合は、接触位置を図11のようにパターン2からパターン5に分け、遊泳速度によってどのような違いがあるかを考察する。それぞれ通過パターンの代表例は図12に示す。

パターン2は魚の頭先端が羽根に接触し、その後通過する場合、3は魚の体の上半身、4は魚の体の下半身、5は魚の体の真ん中が羽根に接触し、その後通過する場合である。

これらの結果に基づいて、どの位置の衝突であれば、通過にさしつかえがないかを考察する。

図13において、最大遊泳速度における衝突場所をパターン別に示す。縦軸に通過数、横軸に理論値との比較値を取った。パターン4で通過数がいちばん多く、約理論速度の0.7倍の速度に集中している。

図14には接触パターンの割合を示す。通過した140匹魚の中にはパターン1(接触しない)で通過した魚の数は34匹で、24%を占める。パターン2の場合、魚が進入した直後に羽根と衝突しているため、衝突後、引き返すものも多く、通過数は少ない。発電状態の1札羽根ではこのパターンの衝突は見られなかった。羽根枚数2, 3枚時衝突が多い。羽根が頭にあたり死亡した例も2例見られた。

次にパターン3の場合も通過数が多いことか

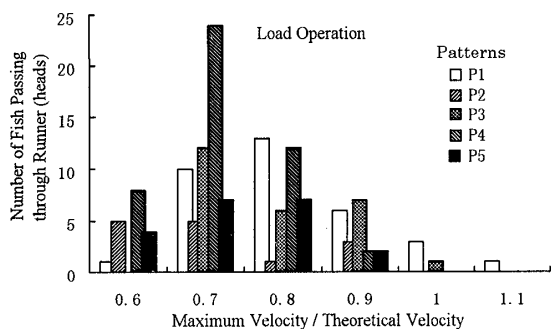


Fig. 13 Non-dimensional maximum swimming velocity vs number of fish passing through runner (heads), compared with crushing patterns 1~5

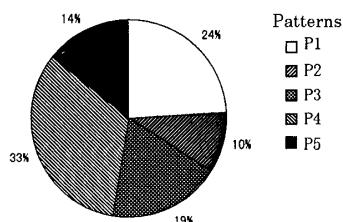


Fig. 14 The proportionality of five crush patterns of fish to runner blades

ら、進入のタイミングが悪いといえる。このパターンでは羽根に衝突してそのまま羽根に沿って泳ぎ、通過する例が多く約19%を占める。この位置では、負傷も多く、羽根と衝突して死亡した魚が5例見られた。次にパターン4の場合は、全体の33%を占める。この場合、尾ひれ付近で羽根が衝突しているため、遊泳姿勢は乱れるものの通過する。発電状態では理論速度に対して0.7倍の速度で通過しているものが多い。ビデオテープを見た結果、負傷も少なく死亡した魚がいなかった。羽根に接触されても致命的なダメージがないという結果が明らかになった<sup>7)</sup>。

次にパターン5の場合、魚体のほぼ中央で衝突しているが、通過数はパターン2よりも多い。これはすでに体の半分が通過しているためと思われる。また、いずれの羽根枚数でもこのパターンでは死亡した魚は見られず、負傷が見られた。

図15には魚の遊泳速度別のランナ通過のパターンと通過数の関係を示す。

図15(a)の白色棒(遊泳速度1.1~2.0 m/s)の条件で、魚通過の様子を確認すると、この速度で通過する魚は魚長が大きいということが判明した。また接触なしの例は少なくほとんどの場合は羽根に接触してい

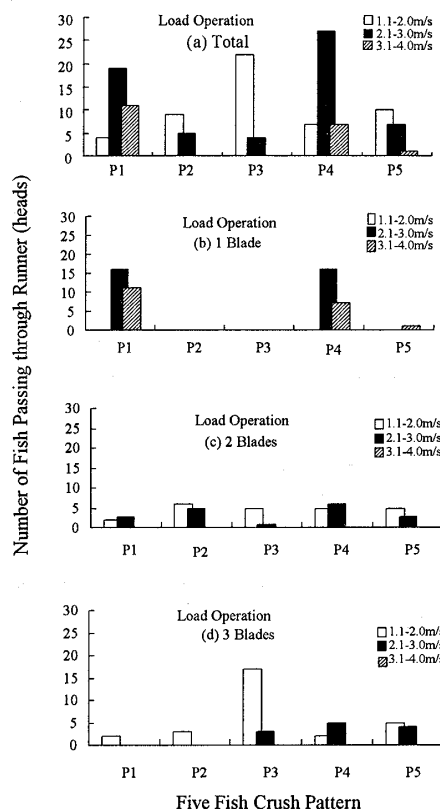


Fig. 15 Relationships among swimming velocity, five crush pattern, blades and passed fish heads

る。特に頭や上半身で接触した後に通過している魚が多いため、遊泳速度が遅くなっている。黒色棒(遊泳速度 2.1~3.0 m/s)のとき、接触なしでの通過例が増えたが、まだ羽根と接触するものが多い。しかし、体の真ん中から下半身、特に尾ひれの部分接触する魚が多くなっている。これは魚の体が羽根を半分以上通過してから接触しているため、ある程度の遊泳速度を保ったまま通過しているからである。斜線棒(遊泳速度 3.1~4.0 m/s)はほとんど1枚羽根時のデータである。この場合、羽根に接触して通過する魚より接触せずに通過している魚の数が多くなっている。また、羽根に接触した例でも、魚体の真ん中より下半身で接触している魚が多い。したがって、遊泳速度が速い場合、羽根と接触をしていない魚が多く、もし接触しても、体の真ん中よりも下半身で接触している魚がほとんどである。

羽根枚数別に見ると、図 15(b)の1枚羽根の場合ではいずれの遊泳速度でも羽根と接触しない魚が多い。遊泳速度 2.1~3.0 m/s の場合、下半身で羽根と接触している魚が多い。しかし2, 3枚羽根の場合に比べて、接触なしの数が断然多く、上半身で接触する魚もいない。

図 15(c)の2枚羽根の場合では、通過パターンがどちらも分散しており、接触なしの例は少ない。そして、遅い遊泳速度 1.1~2.0 m/s の場合のほうが比較的上半身で接触するものも多く、遊泳速度 2.1~3.0 m/s のときでは下半身での接触が多い。これも前と同じ傾向である。

図 15(d)の3枚羽根の場合では遊泳速度 1.1~2.0 m/s のとき上半身で接触している魚が他の条件のものよりかなり多いのに対し、遊泳速度 2.1~3.0 m/s では下半身での接触が多くなっている。これでもやはり、先と同じ傾向となった。

2, 3枚羽根では1枚羽根より上半身で接触するものが多くなる。つまり羽根枚数が多くなると魚が羽根と接触する危険性が高くなる。

図 16 は3枚羽根、発電状態の魚通過の様子を示す連続写真である。写真は左上①より始まり右方向に時間が送られ、右下が最後⑨である。こま送りは1/30 s である。魚はケーシングの手前やや上方より進入してきて、ランナ部を通過する手前④こままで頭が羽根と接触し、体が傾いた。つづいて⑤こまと⑥こまで上半身接触をしながら泳いでいく。⑦こまのとき、羽根の入口前縁から押さえられて、体が90度ほど傾いたまま泳ぎつづけ、⑧こまのとき下半身に接触している。⑨こまめでは、まだ尾が羽根に接触している。姿

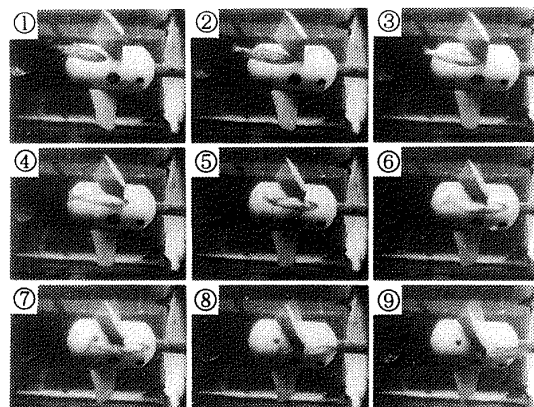


Fig.16 An example of behaviour of fish passing through runner

勢は乱れたが加速してうまく通過した。2枚羽根の場合も同じ傾向が見られ、ほとんどの場合、いろいろな遊泳速度において、いろいろなパターンで羽根と接触しながら通過していく。

#### 4. 結 論

本研究から以下に示す結論を得た。

- (1) 実際の魚の遊泳速度分布は理論計算値の傾向と一致する。
- (2) 発電状態で魚が理論速度よりやや遅い速度で通過し、無負荷状態では魚が理論速度より速い速度で通過する。水車の回転数が高くなればなるほど魚遊泳速度が速くなる。羽根枚数が多くなると、魚遊泳速度が遅くなる。水車羽根を通過するとき魚の遊泳速度は0.7~4.2 m/s である。平均して1 s 間に魚体長10~20 倍の遊泳速度でそ上する。魚は自動的に流速、通過空間に応じて遊泳速度を調節すること等を明らかにした。
- (3) 発電状態では、魚長が大きい場合には、羽根と接触しながら通過する。また、接触しながら通過した魚の遊泳速度は遅くなり、頭と上半身を除く部分に羽根が接触しても生命に別状なく通過することができるということが明らかになった。

#### 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) 清水幸丸・加藤努・全誠・前田太佳夫・新間脩子, 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), *機論*, 62-601, B(1996), 126-133.
- (6) 井上実, 魚の行動と魚法, (1984), 20-28, 恒星社厚生閣.
- (7) Bainbridge, R. (Harris, J. E., ed.) *Problem of Fish Locomotion. Vertebrate Locomotion*, 5(1961), 13-32, Symposia Zoo. Soc. London.
-